

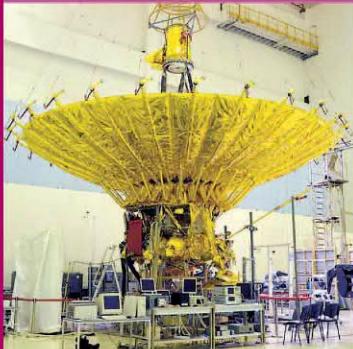


Московский
педагогический
государственный
университет



В. А. Ильин
В. В. Кудрявцев

ИСТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ



Москва 2017



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский педагогический государственный университет»



В. А. Ильин, В. В. Кудрявцев

ИСТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ
Модульный курс для магистров

Учебное пособие

МПГУ
Москва • 2017

УДК 53 (075.8)

ББК 22.3гя73

И46

Рецензенты:

Григорий Наумович Гольцман, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета (МПГУ), руководитель Учебно-научного радиофизического центра факультета физики и информационных технологий МПГУ

Петр Иванович Самойленко, член-корреспондент Российской академии образования (РАО), доктор педагогических наук, профессор кафедры физики Московского государственного университета технологий и управления им. К. Г. Разумовского

Ильин, Вадим Алексеевич.

И46 История радиофизики. Модульный курс для магистров : Учебное пособие / В. А. Ильин, В. В. Кудрявцев. – Москва : МПГУ, 2017. – 320 с. : ил.

ISBN 978-5-4263-0482-6

Модульный курс знакомит студентов с основополагающими вехами развития радиофизики как науки. В нем рассказано как об истории становления и современных достижениях радиотехники, радиоспектроскопии, твердотельной и квантовой электроники, лазерной спектроскопии, физики и техники терагерцового излучения, радиоастрономии, так и о научной деятельности ряда выдающихся ученых-радиофизиков. Исследование истории радиофизики проводится в контексте самой престижной научной награды – Нобелевской премии. Кроме того, представлен достаточно обширный материал, посвященный истории развития отечественной радиофизики.

Модульный курс предназначен для обучения магистров по направлениям подготовки 511500 Радиофизика и 011200 Физика. Его можно использовать также и для обучения по направлению 050100 Педагогическое образование (квалификация «магистр») при подготовке будущих учителей к осуществлению исторического подхода к преподаванию физики в школе. Издание может быть также рекомендовано всем интересующимся вопросами истории и методологии науки.

УДК 53 (075.8)

ББК 22.3гя73

ISBN 978-5-4263-0482-6

© МПГУ, 2017

© Ильин В. А.,
Кудрявцев В. В., текст, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Модуль № 1. История радиофизики – важнейшее направление истории науки	7
1.1. Предмет, методы и аспекты радиофизики	7
1.2. Периодизация исторических этапов развития радиофизики	12
1.3. Нобелевские премии в области радиофизики	14
Модуль № 2. Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники	25
2.1. Беспроволочная телеграфия	25
2.2. Радиотехника незатухающих колебаний	37
2.3. Вакуумная (ламповая) электроника	42
Модуль № 3. Исторический обзор развития радиоспектроскопии	53
3.1. Резонансные методы исследований	53
3.2. Микроволновая спектроскопия	71
Модуль № 4. Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники	83
4.1. Изобретение мазера и лазера	84
4.2. Изобретение транзистора	91
4.3. Создание интегральной схемы и рождение микроэлектроники	96
4.4. Гетероструктурные полупроводники и приборы на их основе	102
4.5. Гетеросистемы пониженной размерности	113
4.6. Современные направления квантовой электроники	117
Модуль № 5. Исторический обзор развития лазерной спектроскопии	146
5.1. Лазерное охлаждение атомов	149
5.2. Прецизионная лазерная спектроскопия	157
Модуль 6. Исторический обзор развития физики и техники терагерцового излучения	166
6.1. Источники терагерцового излучения	166
6.2. Приемники терагерцового излучения	170
6.3. Области применения устройств, использующих терагерцовое излучение	174

Модуль № 7. Исторический обзор развития радиоастрономии	180
7.1. Открытие космического радиоизлучения. Создание первого радиотелескопа	181
7.2. Разработка метода апертурного синтеза. РСДБ	186
7.3. Современные радиотелескопы и РСДБ	194
7.4. Открытие реликтового излучения и его анизотропии	199
7.5. Обнаружение квазаров, пульсаров и двойных пульсаров	213
7.6. Радиоастрономия и проблема SETI	224
Модуль № 8. Исторический обзор развития отечественной радиофизики	233
8.1. Первые отечественные радиофизические центры	233
8.2. Научные школы в области теории нелинейных колебаний	244
8.3. Научные школы в области радиолокации	258
8.4. Научные школы в области радиоастрономии	268
8.5. Эволюция радиофизической школы МПГУ	283
Заключение	294
Приложения	296
1. Методические рекомендации к изучению модульного курса	296
2. Список рекомендуемой литературы	301
3. Задания для самостоятельной работы	315

Введение

Традиционно под радиофизикой понимают раздел физики, в котором изучают физические основы радиотехники и электротехники, в том числе физические процессы, связанные с электромагнитными колебаниями в радиодиапазоне. Однако в настоящее время радиофизика пронизывает практически все сферы человеческой деятельности. Ее методы широко используются в астрономии (изучение космических объектов путем анализа приходящего от них радиоизлучения), в планетологии (радиолокация планет и их спутников), в спектроскопии атомов и атомных ядер (использование резонансных методов исследования, методов лазерной спектроскопии и др.), в физике низких температур (лазерное охлаждение микрочастиц и бозе-Эйнштейновская конденсация атомов), в химии и медицине (ЯМР-спектроскопия, ЯМР-томография), в дистанционном мониторинге Земли и Мирового океана и т. д.

В силу стремительной дифференциации радиофизической науки и активной экспансии ее методов в другие области науки и техники сегодня принята более общая трактовка этой дисциплины. Академик РАН А. В. Гапонов-Грехов характеризует предмет современной радиофизики следующим образом. «Это – наука о колебаниях и волнах разной физической природы. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов. Радиофизика исследует колебания и волны разной физической природы: электромагнитные, звуковые, сейсмические, гравитационные и т. д.».

В связи с этим в книге будет представлен обзор важнейших достижений не только в области магистральных направлений радиофизических исследований (радиотехники, радиоспектроскопии, твердотельной и квантовой электроники, радиоастрономии), но также в физике и технике терагерцового излучения, в лазерной спектроскопии. Такой подход позволяет более глубоко проанализировать связи между различными физическими явлениями и процессами, выявить в них радиофизическую составляющую, продемонстрировать широкий спектр применений этой науки, исследовать эволюцию основополагающих радиофизических идей, устройств, методов.

Кроме того, при изложении материалов курса широко используется историко-физический подход, способствующий лучшему пониманию процессов возникновения и развития радиофизических идей и методов, не прибегая при этом к сложному математическому аппарату.

Для освоения содержания курса предусмотрены задания для самостоятельной работы, выполнение которых позволит студентам закреплять и обобщать полученные знания, подготавливать творческие работы (рефераты или компьютерные презентации) к семинарским занятиям по истории физики или к зачетам. Подобная деятельность способствует формированию у студентов ряда общекультурных и профессиональных компетенций.

Модульный курс может быть использован при чтении курса «История и методология физики», спецкурсов «Современная физика и астрофизика», «Нобелевские премии по физике» и др. Кроме того, он может читаться параллельно с изучением стандартного (теоретического) курса радиофизики и тем самым его удачно дополнять. Благодаря этому у студентов появляется возможность расширить свои знания в области истории этой науки, раскрыть межпредметные связи и методологические аспекты радиофизики.

Представленный в модульном курсе материал можно также изучать (в зависимости от учебных целей) в школе (в классах с углубленным изучением физики), применять в проектной деятельности, при подготовке тематических конференций.

Модуль № 1. История радиофизики – важнейшее направление истории науки

1.1. Предмет, методы и аспекты радиофизики

Стремительный взлет физической науки и инженерной мысли в конце XX – начале XXI в., их усиливающаяся интеграция свидетельствуют об успешной эволюции постнеклассической физики и ее магистральных направлений исследований. Одним из ярких тому примеров является развитие радиофизики – научной дисциплины, открытия и достижения которой (например, создание транзистора и интегральных схем, изобретение лазеров и др.) способствовали формированию и развитию постиндустриального (информационного) общества, расширению возможностей научного познания природы.

Радиофизика – раздел физики, предполагающий изучение и использование электромагнитных колебаний в интервале частот 10^4 – 10^{11} Гц (радиодиапазон): их возбуждение, распространение, прием и преобразование частот, а также возникающие при этом взаимодействия электрических и магнитных полей с зарядами в вакууме и в веществе.

Со временем радиофизические методы проникли и в другие диапазоны: от очень низких частот до γ -излучения, а также в область исследований волновых процессов неэлектромагнитной природы (например, в акустику). При этом наблюдается активное взаимопроникновение радиофизических представлений в другие области знания, и наоборот.

Радиофизика как наука сформировалась в 1930–1940-е гг. благодаря бурному развитию радиотехники, радиосвязи, радио- и телевещания и др. На первом этапе развитие радиофизики опиралось на классическую электродинамику, общую теорию колебаний и волн, электронику. Кратко охарактеризуем эти научные направления.

- *Классическая электродинамика*, в основе которой лежит электромагнитная теория Максвелла, обеспечила понимание процессов излучения, распространения и приема радиоволн. До сих пор уравнения Максвелла остаются краеугольным камнем теории радиотехнических устройств и систем.

- *Теория колебаний* создала математический аппарат, позволяющий исследовать процессы в колебательных системах и управлять ими. Важную роль сыграли исследования нелинейных колебаний (и особенно автоколебаний), лежащие в основе работы генераторов электромагнитных колебаний радиодиапазона. Благодаря исследованиям нелинейных колебаний, проведенных школой Мандельштама, наша страна стала общепризнанным центром исследований в этой области, а советская радиотехника, использующая достижения радиофизики, добилась огромных успехов. Дальнейшее развитие радиофизики показало, что эти исследования имеют фундаментальный характер, так как современную радиофизику невозможно представить без нелинейных устройств.
- *Электроника* – наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется для преобразования электромагнитной энергии, в основном для передачи, обработки и хранения информации. Электроника зародилась в начале XX в. после создания основ электродинамики, исследования свойств термоэлектронной эмиссии, фотоэлектронной эмиссии, рентгеновских лучей, открытия электрона, создания классической электронной теории. В настоящее время электроника включает в себя три области научных исследований: вакуумную электронику, твердотельную электронику и квантовую электронику. Каждая область подразделяется, в свою очередь, на ряд разделов и направлений.

Итак, радиофизика, по меткому выражению В. И. Гапонова, «держится на трех китах: теории колебаний, электродинамике и электронике».

Особое место в обсуждении предмета и методов радиофизики занимает *радиотехника*, которая представляет собой один из наиболее ярких примеров технической дисциплины, сохранившей тесный контакт с физикой. Это объясняется прежде всего тем, что по своей сущности радиотехника имеет дело непосредственно с электродинамикой (вопросы излучения и распространения электромагнитных волн), с электроникой, электронной оптикой (электронные лампы, электронно-лучевые приборы) и с молекулярной физикой (газонаполненные

приборы, вопросы ионизации верхних слоев атмосферы). Однако в ряде важных случаев радиотехнике, так же как и другим отраслям техники, приходится покидать давно привычную почву линейных колебаний и заниматься нелинейными задачами. Эти и подобные им обстоятельства привели к выделению из физики научной дисциплины, называемой радиофизикой, которая выступает своеобразным соединительным звеном между физикой и радиотехникой.

Таким образом развитие радиотехники предопределило зарождение и развитие радиофизики. Однако весь тот комплекс вопросов, который дал основание выделять радиофизику как самостоятельную науку, был разработан значительно позже.

По мере развития радиофизики ее методы (например, радиотехнические методы, радиолокационный метод, резонансные методы исследования вещества, радиоинтерференционный метод, томографический метод др.) стали проникать в другие области физики. Возник процесс обратного взаимодействия. Новые задачи, а также освоение диапазонов высоких частот привлекли в радиофизику идеи и методы из других областей физики, в частности из оптики, что привело к появлению нового раздела радиофизики – квазиоптики (квазиоптические линии передачи, открытые резонаторы и др.). В свою очередь, радиофизические методы, развитые, например, для сантиметрового диапазона длин волн, проникнув в оптику, заметно расширили возможности последней, вызвав к жизни такие разделы, как волоконная оптика, голография, интегральная оптика и др., так что и оптический диапазон частот стал областью приложения методов радиофизики. Иногда это поясняют термином «радиооптика».

В результате взаимных «обогащений» с другими областями физики, с одной стороны, и обособления отдельных разделов – с другой, внутри радиофизики образовалось, кроме квазиоптики, несколько других важных «дочерних» направлений исследований: статистическая радиофизика, квантовая радиофизика (квантовая электроника), радиоспектроскопия, радиоастрономия, микроэлектроника и др. Из приведенного перечня весьма затруднительно определить собственно предмет радиофизики. Поэтому целесообразно выделить направления, позволяющие уточнить предмет радиофизики на каждом этапе ее развития. Предполагается, что радиофизика охватывает в основном два таких направления (по мнению С. М. Рытова).

1. Изучение физических явлений, существенных для радиофизики, т. е. для всех основных этапов радиосвязи, – генерация электромагнитных сигналов, излучение и распространение электромагнитных волн, прием радиосигналов. Это направление можно назвать *физикой для радио*.
2. Применение радиофизических методов в различных областях физики, астрономии, химии и др. Это направление может быть охарактеризовано как *радио для физики*.

Таким образом, развитие радиофизики сопровождается открытием новых явлений, находящих практическое применение и составляющих основу ее новых разделов. При этом некоторые разделы радиофизики выделяются в самостоятельные области физики (радиоастрономия, радиоспектроскопия и др.), где методы радиофизики служат лишь средством изучения явлений, лежащих за пределами радиофизики.

В настоящее время принято следующее определение предмета этой науки (формулировка академика РАН, основателя и первого директора Института прикладной физики А. В. Гапонова-Грекова). «Радиофизика – наука о колебаниях и волнах разной физической природы. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов. Радиофизика исследует колебания и волны разной физической природы: электромагнитные, звуковые, сейсмические, гравитационные и т. д. Она включает в себя возбуждение колебаний и волн в неравновесных средах и системах, их излучение и распространение, взаимодействие со средой, регистрацию и обработку колебательных и волновых сигналов».

Будучи одним из краеугольных камней современной науки, радиофизика обладает научным, техническим и гуманитарным аспектами. Рассмотрим их подробнее.

Научный аспект радиофизики. Радиофизика – важнейший источник знаний об окружающем мире. Благодаря появлению таких радиофизических направлений исследований, как радиоспектроскопия, статистическая радиофизика, квантовая радиофизика (квантовая электроника), микроэлектроника, радиоастрономия и др., был осуществлен стремительный прорыв во многих областях современной науки.

Приведем лишь один пример. В последние десятилетия резонансные методы (область радиоспектроскопии) получили широкое распространение при исследовании вещества в разных агрегатных состояниях. Их можно отнести к наиболее чувствительным и точным методам исследования, которые активно используются в физике, химии, биологии и медицине. Каждое вещество имеет характерный только для него набор частот собственных колебаний (от 102 до 1022 Гц). Этот набор частот – своеобразная «визитная карточка» вещества, изучая которую можно распознать химический состав, структуру, симметрию и другие его характеристики.

Технический аспект радиофизики. Расширяя и многократно умножая возможности человека, радиофизика обеспечивает его уверенное продвижение по пути технического прогресса. Радиофизические методы широко используются в астрономии (изучение космического пространства и планет с помощью методов радиоастрономии), в спектроскопии атомов и атомных ядер (использование резонансных методов исследования, методов лазерной спектроскопии и др.), в метеорологии (изучения метеоритов, контроль за облачными и грозовыми фронтами и осадками), в геологии (поиск минеральных месторождений, определение состава земных пород и их структуры радиолокационными методами), в медицине (биорезонансная терапия, ЯМР-томография), в современных средствах связи и т. д.

Гуманитарный аспект радиофизики. Изучение процесса развития радиофизики и определение главных его закономерностей позволяют проследить эволюцию основополагающих радиофизических идей и выделить перспективные области развития радиофизики. Отметим, что приобщение к истории радиофизики означает не уход от актуальных проблем современности, а более глубокую ориентацию в них благодаря пониманию истоков и перспектив научно-технического прогресса.

Таким образом, в радиофизике в наибольшей степени представлены научный, технический и гуманитарный аспекты. Это предопределило ту исключительно важную роль, какую она играет в современном мире.

1.2. Периодизация исторических этапов развития радиофизики

Изучение радиофизики сквозь призму истории позволяет выявить значимость этой науки для развития научно-технического прогресса в XXI в., а также проследить эволюцию основополагающих радиофизических идей и теорий. Прежде всего, определим предмет истории радиофизики и установим ее хронологические рамки.

Предметом истории радиофизики является история зарождения, становления и развития радиофизики как научной дисциплины, которая вносит весомый вклад в формирование общечеловеческой культуры и современной фундаментальной науки.

Несомненно, предмет истории радиофизики – широкое понятие. Можно выделить, как минимум, три важнейших аспекта, его составляющих. Во-первых, это *физический аспект*. Для изучения истории радиофизики необходимо иметь естественнонаучное или техническое образование и обладать определенным запасом знаний по радиофизике. Во-вторых, это *исторический аспект*, предполагающий использование методов и принципов истории физики при изучении истории развития магистральных направлений радиофизики, научных биографий творцов радиофизики и т. д. Наконец, необходимо учитывать *социокультурный аспект* истории радиофизики, т. е. рассмотреть вклад радиофизики в развитие цивилизации, в частности Нобелевские премии за радиофизические открытия, многогранные связи радиофизики с другими областями знания, социальные последствия применения радиофизических идей (например, мобильной и спутниковой связи в телекоммуникационных системах) и др.

Целью истории радиофизики, как и любой исторической науки, является накопление и систематизация научных фактов в контексте определенных социокультурных явлений. К этой цели необходимо добавить исследование закономерностей, следуя которым развивается радиофизическая наука, что позволит спрогнозировать пути ее дальнейшей эволюции.

Одной из важных проблем в истории науки является ее периодизация, которая позволяет понять эволюцию основополагающих научных идей и методов, тенденции развития, движущие факторы, поворотные моменты, практические применения и социальные последствия. В развитии радиофизики можно выделить несколько этапов.

- 1) **Этап предыстории радиофизики (середина XIX в. – 1930-е гг. XX в.).** Здесь речь идет о творцах теории электромагнитного поля (М. Фарадей, Дж. К. Максвелл, Г. Герц, О. Хевисайд, П. Н. Лебедев, Дж. Г. Пойнティング и др.), пионерских исследованиях в области электросвязи гениальных дилетантов и ученых (М. Лумис, Д. Хьюз, А. Долбэр, А. Риги, Э. Томсон и др.), основополагающих работах по беспроволочной телеграфии (А. С. Попов, Г. Маркони, К. Ф. Браун и др.).
- 2) **Этап зарождения и становления радиофизики как науки (30–40-е гг. XX столетия).** На этом этапе развитие радиофизики опиралось на электродинамику, общую теорию колебаний и волн, электронику. Зарождение и становление радиофизики как науки предопределилось развитием радиотехники, в истории которой, в свою очередь, можно выделить несколько этапов. Первый из них – искровая радиотехника – начинается непосредственно с изобретения радиоприемника и создания систем радиосвязи. Начальным пунктом второго этапа следует считать создание в 1907 г. американским радиотехником Л. де Форестом электронной лампы – триода. Вторая мировая война стимулировала развитие микроволновой радиотехники и полупроводниковой электроники – третий этап в истории радиотехники.
- 3) **Этап дифференциации радиофизической науки (с 1950-х гг. до настоящего времени).** На этом этапе радиофизика, проникая во многие разделы физики, вносит туда (кроме экспериментальной методики) радиофизические представления. В результате взаимного обмена с другими областями физики, с одной стороны, и обособления отдельных разделов – с другой, внутри радиофизики образовалось несколько важных «дочерних» направлений исследований: статистическая радиофизика, квантовая электроника, радиоспектроскопия, радиоастрономия, микроЭлектроника и др.

Развитие радиофизики сопровождается открытием новых явлений, находящих практическое применение и составляющих основу ее новых разделов. При этом некоторые разделы радиофизики выделяются в самостоятельные области физики (радиоастрономия, радиоспектроскопия и др.), где методы радиофизики служат лишь средством изучения явлений, лежащих за пределами радиофизики.

1.3. Нобелевские премии в области радиофизики

Обсудим радиофизические исследования, удостоенные Нобелевской премии по физике. Для этого воспользуемся табл. 1, в которой представлены имена лауреатов, формулировки Нобелевского комитета и год присуждения премии.

ТАБЛИЦА 1

Лауреаты	Формулировка Нобелевского комитета	Год присуждения
Г. Маркони и К. Ф. Браун	«За выдающийся вклад в создание беспроволочной телеграфии»	1909
И. А. Раби	«За резонансный метод измерений магнитных свойств атомных ядер»	1944
Э. В. Эпстон	«За исследования физики верхних слоев атмосферы, в особенности за открытие так называемого слоя Эпстона»	1947
Ф. Блох и Э. М. Персепл	«За развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия»	1952
У. Ю. Лэмб	«За открытия, связанные с тонкой структурой спектра водорода»	1955
П. Куш	«За точное определение магнитного момента электрона»	1955
У. Б. Шокли, Дж. Бардин и У. Х. Браттейн	«За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта»	1956
Н. Г. Басов, А. М. Прохоров и Ч. Х. Таунс	«За фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе»	1964
А. Кацлер	«За открытие и разработку оптических методов исследования резонансов Герца в атомах»	1966
Д. Габор	«За изобретение и развитие голографического принципа»	1971
Б. Д. Джозефсон	«За теоретическое предсказание свойств тока, проходящего через туннельный барьер, в частности явлений, общеизвестных ныне под названием эффектов Джозефсона»	1973
Л. Эсаки и А. Джайевер	«За экспериментальные открытия туннельных явлений в полупроводниках и сверхпроводниках»	1973
М. Райл и Э. Хьюиши	«За пионерские исследования в области радиоастрофизики»	1974

Лауреаты	Формулировка Нобелевского комитета	Год присуждения
А. А. Пензиас и Р. В. Вильсон	«За открытие микроволнового реликтового излучения»	1978
Н. Рамзей	«За изобретение метода раздельных колебательных полей и его использование в водородном мазере и других атомных часах»	1989
Х. Демелт и В. Пауль	«За разработку метода удержания одиночных ионов»	1989
Р. Халсес и Дж. Тейлор-мл.	«За открытие нового типа пульсаров, давшее новые возможности в изучении гравитации»	1993
С. Чу, К. Коэн-Таннуджи и У. Филлипс	«За создание методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом»	1997
Ж. И. Алфёров и Г. Крёмер	«За разработки в полупроводниковой технике»	2000
Дж. Килби	«За исследования в области интегральных схем»	2000
Р. Глаубер	«За вклад в квантовую теорию оптической когерентности»	2005
Дж. Холл и Т. Хэнш	«За вклад в развитие лазерного высокоточного спектроскопирования и техники прецизионного расчета светового сдвига в оптических стандартах частоты»	2005
Дж. Смут и Дж. Мазер	«За открытие планковской формы спектра космического фонового излучения и анизотропии космического фонового излучения»	2006
А. Ферг и П. Грюнберг	«За открытие гигантского магнето-сопротивления»	2007
Ч. Као, У. Бойл и Дж. Смит	«За новаторские достижения в области передачи света по оптоволоконным каналам и разработку оптических полупроводниковых сенсоров – ПЗС-матриц»	2009
А. Гейм и К. Новосёлов	«За новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена»	2010

Первая Нобелевская премия в области радиофизики (**радиотехники**) была присуждена Г. Маркони и К. Ф. Брауну в 1909 г. «за выдающийся вклад в создание беспроволочной телеграфии». Одним

из изобретателей радио является русский физик А. С. Попов. В результате исследований Попову удалось сконструировать радиопередатчик и радиоприемник, демонстрация которых проводилась 7 мая 1895 г. Хотя Г. Маркони нельзя считать единственным изобретателем радио, бесспорны его огромные заслуги в последующем увеличении дальности передачи сигналов, развитии промышленного производства радиоаппаратуры, ее последующем совершенствовании.

К заслугам немецкого ученого К. Ф. Брауна относится изобретенный им в 1897 г. осциллоскоп (осциллограф). Браун занимался также разработкой устройств беспроволочной телеграфии. Его изобретения позволили избавиться от потерь энергии на создание «искры» (что существенно повысило КПД передатчика), а также эффективно использовать явление резонанса.

Исторически следующая Нобелевская премия, связанная с радиофизикой, была присуждена в 1944 г. американскому физику И. А. Раби «за резонансный метод измерений магнитных свойств атомных ядер». Раби обнаружил, что, прикладывая слабый радиочастотный сигнал к молекулярному пучку в магнитном поле, можно заставить атомы изменять ориентацию спинов. Управляя частотой радиосигнала, Раби получил возможность провести прецизионные измерения спина ядра и напряженности собственного магнитного поля ядра. Эти измерения имели огромное значение для ядерной физики.

Исследования Раби и его учеников заложили фундамент нового направления в радиофизике – **радиоспектроскопии**.

- Ф. Блох и Э. М. Перселл (Нобелевская премия 1952 г.)

Американскими учеными Ф. Блохом и Э. Перселлом независимо друг от друга был открыт ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – резонансное поглощение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем магнитном поле, что обусловлено переориентацией магнитных моментов ядер. С помощью ЯМР ученые установили, что на магнитные свойства ядер в молекуле оказывают влияние магнитные поля окружающих электронов; это позволяет получать важную информацию о структуре молекулы.

- У. Лэмб и П. Куш (Нобелевская премия 1955 г.)

Американский ученый У. Лэмб занимался вопросами поглощения и испускания микроволнового излучения атомами. Он приготовил пучок атомов водорода в метастабильном состоянии, и затем подверг его

микроволновому облучению во внешнем магнитном поле. При этом некоторые из атомов поглощали излучение и переходили в коротковременное состояние. Это означало, что два соответствующих энергетических уровня не тождественны, а разделены разностью энергий, получившей название лэмбовского сдвига. С помощью резонансного метода П. Куш и американский физик Г. Фоли исследовали магнитный момент электрона. Им удалось измерить отношение полных внутреннего и орбитального магнитных моментов атомов в различных энергетических состояниях. Тем самым удалось определить с высокой точностью магнитный момент электрона.

- А. Кацлер (Нобелевская премия 1966 г.)

Французские физики А. Кацлер и Ж. Броссель разработали несколько методов, в которых свет использовался для преодоления некоторых ограничений метода Раби. В одном из них (методе оптической накачки) особым образом поляризованный свет направляется на группу атомов. Если основное состояние имеет два магнитных подуровня, то атомы на одном подуровне поглощают свет и переходят в возбужденное состояние, тогда как атомы на другом подуровне этого не делают. Испуская излучение и возвращаясь в основное состояние, атомы занимают и поглощающие, и непоглощающие уровни. В этом случае говорят, что свет «накачал» атомы в непоглощающее основное состояние. В дальнейшем метод оптической накачки лег в основу создания лазера.

- Н. Рамзей (Нобелевская премия 1989 г.)

Работы американского физика Н. Рамзея связаны, главным образом, с использованием метода молекулярных пучков для прецизионных измерений электрических и магнитных свойств нуклонов, ядер, атомов и молекул. Рамзей открыл электрический квадрупольный момент дейтранона. Кроме того, он разработал высокоточные методы радиоспектроскопии молекулярных пучков, в частности, метод разнесенных резонаторов и метод накопительной колбы, а также построил водородный мазер.

- Х. Демелт и В. Пауль (Нобелевская премия 1989 г.)

В 1973 г. в контейнере со «стенками» из электрического и магнитного полей ученым удалось локализовать один захваченный электрон. В 1980 г. в аналогичном устройстве было осуществлено удержание одиночного атома. Эта техника позволила физикам определять

свойства электронов и атомов с беспрецедентной точностью. Инициаторы проведения этих исследований – Х. Демелт и В. Пауль – были удостоены Нобелевской премии по физике 1989 г.

- У. Филлипс, С. Чу и К. Коэн-Таннуджи (Нобелевская премия 1997 г.)

В 1985 г. американский ученый У. Филлипс начал серию экспериментов по лазерному охлаждению атомов натрия. С помощью разработанного им метода удалось охладить пучок атомов натрия до температуры < 100 мК, при этом средняя скорость охлажденных атомов была близка к нулю. В компании Bell Labs американский ученый С. Чу и его коллеги, используя множество пересекающихся лазерных лучей, осуществили дальнейшее охлаждение образца атомов до температуры < 1 мК. Рекордные значения температур были получены группой под руководством французского ученого К. Коэн-Таннуджи в период 1988–1995 гг. Исследователям удалось охладить атомы гелия до температуры 0,18 мК, атомы натрия до температуры 0,1 мК, т. е. эксперименты вышли в область нанотемператур. Полученные результаты значительно продвинули знания о взаимодействии излучения с веществом и позволили глубже понять квантово-механическое поведение газов при сверхнизких температурах.

- Р. Глаубер, Дж. Холл и Т. Хенш (Нобелевская премия 2005 г.)

Р. Глаубер, используя схему когерентных состояний (их называют глауберовскими), смог построить строгую квантовую теорию когерентности электромагнитного излучения. Введенные им понятия послужили теоретической базой исследования излучения лазеров и стали общепринятыми в современной квантовой оптике. Исследования Дж. Холла и Т. Хенша позволили измерить оптические частоты с точностью до 15 знаков. Благодаря этому, теперь возможно создание лазеров для высокоточного спектроскопирования и определение спектра излучения молекул и атомов с беспрецедентной точностью, что может быть использовано, в частности, для развития систем спутникового позиционирования и навигации GPS.

Необходимо упомянуть о Нобелевской премии 1947 г., которой был удостоен английский физик Э. В. Эплтон за исследования в области радиотехники. Эплтону и его сотрудникам удалось с помощью метода радиолокации с частотной модуляцией получить первое экспериментальное подтверждение существования ионосферы, определить ее

высоту. Этот метод стимулировал развитие радиотехники и способствовал изобретению радиолокатора. Впоследствии Эплтон открыл второй непроводящий слой. Большее сопротивление этого слоя, ныне известного как слой Эплтона, позволяет ему отражать коротковолновые радиосигналы. Этим открытием Эплтон установил возможность прямого радиовещания на весь мир.

Еще одним Нобелевским «направлением» в радиофизике являются **информационные технологии (квантовая электроника)**, датой рождения которых принято считать 23 декабря 1947 г. В этот день состоялась официальная презентация транзистора. За несколько дней до этого знаменательного события американские ученые У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн из компании Bell Labs впервые создали действующий биполярный транзистор. В 1956 г. они были награждены Нобелевской премией по физике «за исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта».

Следующую Нобелевскую премию в области информационных технологий можно отнести к сверхпроводниковой электронике, которая зародилась в 1960-е гг., после открытия эффектов Джозефсона.

Теоретические изыскания Джозефсона, а также экспериментальное мастерство Л. Эсаки и А. Джайевера позволили всесторонне и глубоко исследовать туннельные явления в полупроводниках и сверхпроводниках. Их ставшие фундаментальными исследования были отмечены Нобелевской премией 1973 г.

Еще одна Нобелевская премия в области информационных технологий относится к квантовой электронике. Благодаря исследованиям советских ученых Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, а также научным работам их американских коллег: Ч. Таунса, Дж. Гордона и Х. Цейгера были созданы первые квантовые генераторы. В 1964 г. «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе» А. М. Прохоров, Н. Г. Басов и Ч. Таунс были удостоены Нобелевской премии.

Среди многочисленных применений лазерного излучение особое место занимает голография – метод получения объемного изображения предметов с помощью наложения (интерференции) световых волн. Метод был предложен в 1948 г. венгерским ученым Д. Габором.

Обычные источники света не обладают достаточной степенью когерентности для использования в голографии. Поэтому решающее значение для ее развития имело изобретение лазера, обладающего высокой степенью когерентности и способного излучать строго одну длину волны. Габор, изучая проблему записи изображения, выдвинул замечательную идею. Если пучок когерентного света разделить на два, осветить одним (предметным) регистрируемый объект, а второй (опорный) направить на фотографическую пластинку, то лучи, отраженные от объекта, будут с ним интерферировать. В этом случае интерференционная картина, образующаяся на пластинке, будет устойчива во времени, т. е. образуется изображение стоячей волны.

Полученная интерференционная картина является кодированным изображением, описывающим объект таким, каким он виден из всех точек фотопластиинки. В этом изображении сохранена информация как об амплитуде, так и о фазе отраженных от объекта волн и, следовательно, заложена информация о трехмерном (объемном) объекте. Фотографическая запись картины интерференции предметной волны и опорной волны обладает свойством восстанавливать изображение объекта. Если на такую запись снова направить опорную волну, т. е. облучить светом той же длины волны, появится (восстановится) объемное изображение объекта, которое зрительно трудно отличить от реального – голограмма (термин предложен Габором). Д. Габор был удостоен Нобелевской премии по физике 1971 г. «за изобретение и развитие голографического принципа».

В начале 1950-х гг. появилась идея об изготовлении транзисторов, резисторов и конденсаторов в виде единого полупроводникового блока – интегральной схемы. Возможность создания интегральной схемы независимо друг от друга продемонстрировали два молодых инженера – Дж. Килби и Р. Нойс. 12 сентября 1958 г. Килби продемонстрировал руководству компании «Тексас Инструментс» рабочую интегральную схему, сформированную в кусочке германия, наклеенного на стеклянную пластину.

Наряду с исследованиями Дж. Килби основополагающий вклад в развитие информационных технологий внесли работы Ж. И. Алфёрова и Г. Крёмера. Эти ученые занимались всесторонним изучением гетероструктур.

Немецкий физик Г. Крёмер предложил основный принцип конструирования приборов на основе гетеропереходов, который позволил использовать эффективные методы управления движением носителей заряда и световыми потоками.

Трудности в изготовлении гетероструктур удалось преодолеть в 1957 г., когда Алфёровым с коллегами была предложена структура GaAs – GaAlAs. Благодаря обнаружению в ней эффектов сверхинжекции, оптического накопления и др. удалось создать низкопороговый импульсный лазер, работающий при комнатной температуре, и высокоэффективные светодиоды, а вскоре и ряд других приборов (солнечные элементы, биполярные гетеротранзисторы и др.). Эти приборы нашли широкое практическое применение: от космических станций до бытовой и аудиоаппаратуры.

В начале 1990-х гг. одним из основных направлений работ, проводимых под руководством Алфёрова, стало получение и исследование свойствnanoструктур пониженной размерности: квантовых проволок и квантовых точек. В 1993–1994 гг. впервые в мире были созданы гетеролазеры на основе структур с квантовыми точками – «искусственными атомами». Таким образом, исследования Алфёрова заложили основы принципиально новой электроники на основе гетероструктур, известной сегодня как «зонная инженерия».

Нобелевская премия по физике за 2000 г. была поделена на две части с вручением половины Ж. И. Алфёрову и Г. Крёмеру за исследование полупроводниковых гетероструктур, которые нашли применение в высокочастотной и оптической электронике. Вторая половина премии досталась Дж. Килби за вклад в изобретение интегральной схемы.

Прошло всего 7 лет, как снова Нобелевской премии были удостоены ученые, исследования которых относятся к области информационных технологий. Речь идет о работах, посвященных спиновой электронике (спинтранонике). Интерес исследователей к спиновой электронике возник в 1988 г., в связи с открытием эффекта гигантского магнетосопротивления (ГМС). Открытие было сделано независимо двумя научными группами во главе с А. Фертом и П. Грюнбергом.

В 2009 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Ч. Као, У. Бойлу и Дж. Смиту за исследования в области информационных технологий. Као стоял у истоков оптоволоконной технологии

передачи данных, а Бойл и Смит изобрели полупроводниковое устройство, позволяющее напрямую, минуя фотопленку, получать цифровые фотографии.

В 2010 г. Нобелевской премии по физике удостоены А. Гейм и К. Новосёлов за передовые опыты с двумерным материалом – графеном. Высокая подвижность зарядов вместе с атомарной толщиной делают графен идеальным материалом для создания миниатюрных и быстрых полевых транзисторов – «кирпичиков» современной микроэлектронной промышленности.

На конец, еще одним Нобелевским «направлением» в радиофизике можно считать **радиоастрономию**. Английский ученый М. Райл вместе с коллегами работал над повышением разрешающей способности радиотелескопов. Расположив две антенны на расстоянии многих длин волн друг от друга, Райл подключил их к одному приемнику. Используя этот простой радиоинтерферометр, ему удалось определить местоположение нескольких так называемых радиозвезд. В дальнейшем Райл создал несколько радиотелескопов с большей апертурой, благодаря которым он сделал ряд фундаментальных открытий в радиоастрономии.

В 1974 г. М. Райл и другой английский астроном Э. Хьюиш были удостоены Нобелевской премии по физике «за пионерские исследования в области радиоастрофизики». Под руководством Э. Хьюиша аспирантка Кембриджского университета Дж. Белл проводила поиск радиоисточников с быстро и заметно меняющейся амплитудой сигнала. Проводя круглосуточные исследования, Белл обнаружила быстропрерывистый источник – «помеху» на длине волны 3,5 м (85,7 МГц), которая наблюдалась даже ночью, когда мерцающих источников не должно было быть. По импульльному характеру излучения эти источники были названы пульсарами. Открытие пульсаров в 1967 г. стало крупнейшей вехой в развитии радиоастрономии наряду с открытыми за несколько лет до этого квазарами и реликтовым излучением.

Следующим крупным достижением радиоастрономии принято считать обнаружение двойных пульсаров. Нобелевская премия по физике 1993 г. была присуждена американским астрофизикам Дж. Тэйлору-мл. и Р. Халсе за открытие и исследование первого двойного радиопульсара PSR 1913 + 16. Открытие было сделано на радиотелескопе Аресибо летом 1974 г. Халсе, который в то время был аспирантом

у Тэйлора. Оказалось, что источник представляет собой быстровращающуюся сверхплотную нейтронную звезду с сильным магнитным полем, которая входит в состав двойной системы и движется по очень вытянутой орбите с периодом 6,75 ч.

Уникальным достижением радиоастрономии является открытие реликтового излучения. В 1965 г. американские ученые А. Пензиас и Р. Вильсон обнаружили постоянное слабое излучение, исходящее из каждой точки небесной сферы. Существование подобного излучения, заполняющего Вселенную, было предсказано Г. А. Гамовым и его сотрудниками, построившими первую модель Большого взрыва еще в 1948 г. Когда был получен спектр этого излучения (оно представляло собой излучение абсолютно черного тела с температурой около 3 К) и доказана высокая степень его изотропии, данная модель стала общепринятой.

В 1978 г. А. Пензиас и Р. Вильсон были удостоены Нобелевской премии по физике «за открытие микроволнового реликтового излучения». В дальнейшем проводились многочисленные исследования реликтового излучения, которые привели в конечном счете к открытию его анизотропии.

Благодаря исследованиям американского ученого Дж. Мазера, который координировал работы по программе “COBE” и руководил экспериментом “FIRAS”, удалось выявить соответствие микроволнового фона излучению абсолютно черного тела. Другой американский ученый Дж. Смут был ответственен за разработку другого ключевого устройства “COBE” – “DMR”. Это устройство использовалось для обнаружения небольших флуктуаций реликтового излучения по разным направлениям.

В 2006 г. Дж. Мазеру и Дж. Смуту была присуждена Нобелевская премия по физике за «открытие планковской формы спектра космического фонового излучения и анизотропии космического фонового излучения».

Проведенный анализ не может считаться абсолютно точным, так как многие современные открытия совершаются на стыке различных наук. Тем не менее можно выделить несколько ведущих направлений радиофизических исследований. К их числу относятся: радиотехника, радиоспектроскопия, информационные технологии, радиоастрономия (показаны на схеме). В дальнейшем эти направления радиофизики

мы будем называть *магистральными*. Из схемы видно, что пальма первенства среди наиболее премированных направлений радиофизических исследований принадлежит радиоспектроскопии (8 Нобелевских премий, 18 лауреатов).



Отметим, что история радиофизики не только охватывает по своей тематике указанные 4 направления радиофизики, но и учитывает междисциплинарные связи радиофизики и других областей знания, например, радиофизика и медицина, радиофизика и оборона страны и др.

Модуль № 2. Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники

2.1. Беспроволочная телеграфия

Открытие Генрихом Герцем (1857–1894) электромагнитных волн, изучение их свойств и создание оригинальных приборов – вибратора и резонатора (первого генератора высокочастотного электромагнитного поля и его индикатора) – составляют важный этап предыстории радиофизики. Однако эти достижения еще нельзя отнести к изобретению радио.



Г. Герц

Из-за невысокой чувствительности приемника Герца и неудобного способа наблюдения принимаемых сигналов осуществление приема было возможно только на расстоянии 8–10 м от передатчика.

Большой шаг вперед в этом деле сделал итальянский физик Аугусто Риги (1850–1920). Он сконструировал вибратор, состоящий из близко расположенных металлических шаров, помещенных в масляную ванну (рис. 1).

Длина волны определялась размерами шаров и диэлектрической проницаемостью масла. С помощью созданного устройства Риги удалось возбудить волны длиной несколько сантиметров (чаще всего он работал с волнами длиной 10,6 см).

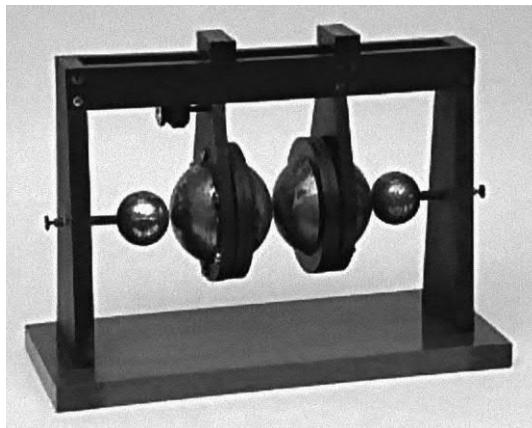
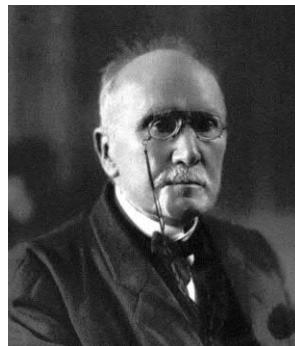


Рис. 1. Сферический осциллятор сантиметровых волн Риги

Важнейшее после Герца научное достижение, которое в какой-то степени можно рассматривать как прототип первого радиоприемника, – экспериментальные работы Эдуарда Бранли (1844–1940) по изучению влияния электромагнитного поля на проводимость металлических порошков.

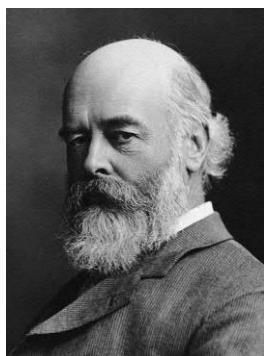


Э. Бранли

Изобретение когерера – прибора, сопротивление которого резко изменяется под действием электромагнитного излучения, – принадлежит Бранли. В 1890 г. он обнаружил, что вблизи происходящих электрических разрядов резко уменьшается сопротивление нанесенного на стеклянную или эбонитовую пластины отполированного слоя тонко измельченной меди. Контакт порошка с внешней цепью осуществлял-

ся с помощью медных пластинок, прижимаемых струбцинками. Бранли назвал свой прибор радиокондуктором. Однако в приборе Бранли необходимо было каждый раз встряхивать опилки перед каждым приемом излучения.

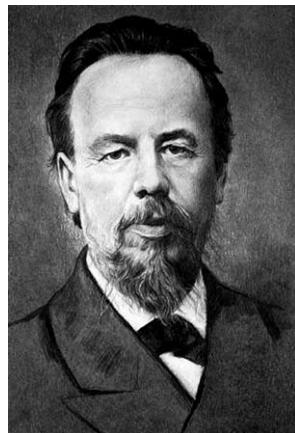
Более совершенный когерер, сконструированный английским физиком Оливером Джозефом Лоджем (1851–1940), представлял собой стеклянную трубку, набитую металлическими опилками («трубку Бранли»), которые для восстановления чувствительности к электромагнитным волнам следовало периодически встряхивать. Для этой цели использовался механизм, похожий на электрический звонок. О своем изобретении Лодж сообщил в докладе на заседании Британской ассоциации содействия развитию науки в Оксфордском университете в 1894 г. Когерер Лоджа под действием электромагнитных волн «открывался», замыкая цепь постоянного тока, на расстоянии около 40 м.



О. Лодж

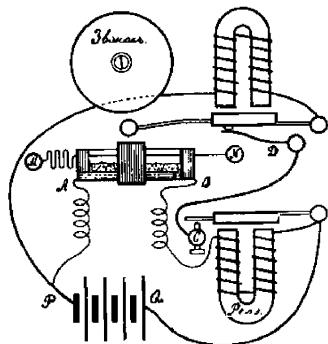
Прибор Лоджа мог быть использован для беспроволочной телеграфии, но его создание еще нельзя назвать изобретением радио: когерер не обеспечивал достаточной надежности, а встряхивание опилок не было автоматическим после каждого сигнала.

Обе эти задачи решил русский ученый Александр Степанович Попов (1859–1906). В результате многочисленных экспериментов он усовершенствовал когерер, снабдил его устройством автоматического встряхивания, а также, что не менее важно, добавил контур релейного усиления сигнала и проволочную антенну. Все это в совокупности и сделало прибор пригодным для беспроволочной телеграфии.

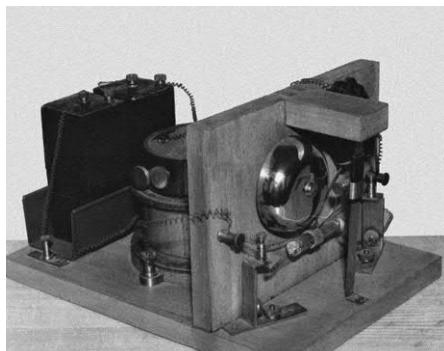


А. С. Попов

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества Попов выступил с докладом «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» и демонстрацией созданного им первого в мире радиоприемника. Свое сообщение Попов закончил следующими словами: «В заключение могу выразить надежду, что мой прибор при дальнейшем усовершенствовании его может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающих достаточной энергией». Этот день вошел в историю мировой науки и техники как день рождения радио.



а



б

Рис. 2. а – схема; б – внешний вид радиоприемника Попова

Через 10 месяцев 24 марта 1896 г. Попов на заседании русского физико-химического общества передал первую в мире радиограмму на расстояние в 250 м. Летом следующего года дальность беспроволочной связи была увеличена до 5 км.

В 1896 г. Попов применил аналогичное приемное устройство с записывающей аппаратурой для регистрации грозовых разрядов. В процессе изготовления и испытания приемника он обнаружил его чувствительность к атмосферным разрядам, что сказывалось на надежности радиосвязи. Заинтересовавшись этим явлением, Попов провел серию экспериментов, результаты которых послужили основанием для создания другого приемника. Для обеспечения круглосуточной надежной регистрации атмосферных электрических разрядов без участия оператора детектор приемника подключался к громоотводу и заземлению. Параллельно к звонку подключался самопишущий прибор (пишущая катушка братьев Ришар) с недельным заводом. Прибор записывал на движущуюся бумажную ленту сигналы, вызванные электромагнитным излучением гроз. Профессор Д. А. Лачинов назвал этот прибор «грозоотметчиком» («разрядоотметчиком»). В историю он вошел как прибор, открывший возможность использования природных электромагнитных волн в интересах человека. Грозоотметчик нашел применение в метеорологии (использовался для предсказания погоды), но особенно он был востребован на Военно-морском флоте.

Попову принадлежит еще одно открытие, значение которого трудно переоценить. Во время опытов по радиосвязи на военных кораблях Балтийского флота летом 1897 г. было установлено, что электромагнитные волны отражаются от кораблей. Попов сделал вывод о возможности практического использования этого явления и задолго до возникновения радиолокации и радионавигации сформулировал важнейшие идеи для создания и развития этих направлений техники.

В ноябре 1897 г. французский предприниматель и инженер, владелец мастерской физических приборов в Париже Э. Дюкрете, используя описание и схему устройства Попова, изготовил когерерный приемник и передатчик, основанный на вибраторе Герца. Дюкрете продемонстрировал работу этих устройств во время докладов на заседаниях Французского физического общества. В конце 1898 г. фирма Дюкрете приступила к мелкосерийному производству радиостанций системы Попова, выполняя заказы военно-морских ведомств России

и Франции. Для России фирма изготовила в общей сложности около 50 корабельных радиостанций.

Особенно успешное развитие беспроволочной телеграфии началось в 1899 г., когда сотрудникам Попова П. Н. Рыбкину и Д. С. Троицкому удалось при проведении работ между двумя кронштадтскими фортами случайно обнаружить, что когерер при уровне сигнала, не достаточном для его возбуждения, преобразует амплитудно-модулированный высокочастотный сигнал в низкочастотный, так что его сигналы становятся возможным принимать на слух.

Прием радиосигналов на слух открыл новые возможности в создании радиолиний. Регистрация сигналов за счет этого эффекта (детектирования) повышала чувствительность приемного устройства, а следовательно, дальность радиосвязи. В 1900 г. Попов осуществил связь в Балтийском море на расстоянии свыше 45 км между островами Гогланд и Кутсаало, недалеко от города Котка. Эта первая в мире практическая линия беспроволочной связи обслуживала спасательную экспедицию по снятию с мели броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», севшего на камни у южного берега Гогланда. Первая радиограмма, переданная Поповым на остров Гогланд 6 февраля 1900 г., содержала приказ ледоколу «Ермак» выйти на помощь рыбакам, унесенным на льдине в море. Ледокол выполнил приказ, и 27 рыбаков были спасены. Успешное применение этой линии послужило стимулом к «введению беспроволочного телеграфа на боевых судах как основного средства связи», – так гласил соответствующий приказ по Морскому министерству. Работы по внедрению радиосвязи в русском Военно-морском флоте производились при участии самого изобретателя радио и его ассистента Рыбкина.

С появлением «телефонного приемника» на основе открытия Рыбкина и Троицкого существенно возросла дальность действия линий радиосвязи. В конце 1899 г. фактически закончилась эра «когерерного» приема радиосигналов. В дальнейшем многочисленные модификации когерера использовались уже в качестве детектирующих устройств; были созданы различные типы контактных, а позднее и электровакуумных детекторов.

Таким образом, Попов научно обобщил и развил сделанные до него отдельные разрозненные открытия в науке и технике, нашел способы передачи сообщений на расстояние с помощью электромагнитных

волн и практически применил свое открытие. Попов не только изобрел первый в мире радиоприемник и осуществил первую в мире радиопередачу, но и сформулировал основополагающие принципы радиосвязи. Он предложил идею усиления слабых сигналов с помощью реле, изобрел приемную антенну и заземление. Попов осуществил первую в мире линию радиосвязи на море, создал первые походные армейские и гражданские радиостанции и успешно провел работы, доказавшие возможность применения радио в сухопутных войсках и в воздухоплавании. Созданием кронштадтских мастерских по изготовлению приборов для телеграфирования без проводов, позднее превратившихся в широко известное НПО им. Коминтерна (ныне АО МАРТ, СПб.), Попов положил начало отечественной радиопромышленности и промышленности средств связи.

Наряду с Поповым весьма схожее приемное устройство в сочетании с искровым излучателем Герца, модифицированным итальянским профессором Риги, применил итальянский изобретатель Гульельмо Маркони (1874–1937) в системе передачи на расстояние сигналов Морзе с помощью электромагнитных волн.



Г. Маркони

Одним из главных отличий устройств, разработанных ученым, было применение антенн в виде высоко поднятого вертикального провода и заземления. Особенno важным было включение длинной антенны в передатчик. Тем самым был осуществлен переход к значительно более длинным волнам, чем в опытах Герца и Лоджа.

В сентябре 1896 г., усовершенствовав свою систему, Маркони передал сигнал на расстояние почти в 2 мили. Британское патентное ведомство решило выдать Маркони патент № 12039 от 2 июля 1897 г. с приоритетом от 2 июня 1896 г. на «...усовершенствования в передаче электрических импульсов и сигналов на расстояние и в аппаратуре для этого». В мае 1897 г. Маркони передал сигналы через Бристольский залив на расстояние 9 миль. В июле того же года Маркони и небольшая группа вкладчиков основали «Компанию беспроволочного телеграфа и сигналов», в задачу которой входила установка аппаратов на плавучих и наземных маяках вдоль побережья Англии. В ходе работ Маркони обнаружил, что дальность передачи пропорциональна числу и длине используемых антенн. Для того чтобы передать сигнал на расстояние 28 миль через пролив Ла-Манш, Маркони использовал группу антенн, каждая из которых была высотой 150 футов. С увеличением длины волн в большей мере проявляется способность волн огибать препятствия – дифракция. Благодаря этому Маркони в первых же опытах 1895 г. добился приема волн от передатчика, когда пункты передачи и приема располагались по разные стороны холма, т. е. в условиях отсутствия геометрической видимости.

В 1900 г., опираясь на открытие немецкого физика К. Ф. Брауна (о его исследованиях рассказано ниже), Маркони включил в свой передатчик конденсатор и катушку настройки, что позволило увеличить энергию сигнала. Конденсатор усиливал эффект колебаний, создаваемых искровым разрядником, а катушки позволили добиться совпадения периода колебаний в антенне с периодом усиленных колебаний. Эти две цепи можно было настраивать так, чтобы колебания в них происходили согласованно и тем самым не было бы гашения колебаний вследствие интерференции. Это сводило к минимуму затухание сигнала. Патент № 7777, выданный в апреле 1900 г., по существу, закреплял за Маркони монополию на использование настроенных друг на друга передатчиков и приемников. Основанная им компания была переименована в «Компанию беспроволочной телеграфии Маркони».

К концу 1900 г. Маркони увеличил дальность передачи сигналов до 150 миль. В январе 1901 г. он установил беспроволочный контакт между некоторыми пунктами на побережье Англии, отстоящими друг от друга на расстоянии 186 миль. 12 декабря 1901 г. Г. Маркони осу-

ществил одностороннюю «радиосвязь» через Атлантический океан – между Полдху (Корнуэлл в Англии) и мысом Код (в Ньюфаундленде). В 1902 г. Маркони передал первый беспроволочный сигнал через Атлантику с запада на восток. В 1907 г. он открыл первую трансатлантическую службу беспроволочной связи, а в 1912 г. – получил патент на усовершенствованную регулируемую во времени искровую систему для генерирования передаваемых волн.

В 1920-е гг. Маркони активно работал над новым видом радиосвязи – *направленной передачей*. Он проводил опыты с направленной радиопередачей на коротких волнах на своей яхте. Она покинула Фальмутскую гавань в Англии и, дойдя до Африки, приступила к приему сигналов от опытной радиостанции в Нольдю (Англия). Находящаяся между приемником и передатчиком Испания с ее горами, простирающимися на расстоянии 300 миль, нисколько не мешала отчетливому приему сигналов в Севилье (780 миль от Нольдю).

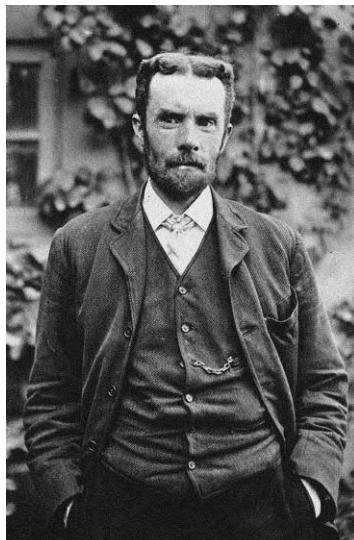
Результаты дальнейших опытов Маркони показали, что с передатчиком мощностью всего в 1 киловатт надежная коммерческая радиосвязь возможна на расстоянии по меньшей мере 2300 морских миль.

Успехи Маркони привлекли к радиосвязи внимание ряда научных учреждений и администраций связи в странах Европы и в США. По существу во всем мире начали проводиться интенсивные эксперименты и разработки. Все успешные усовершенствования немедленно внедрялись в практику. Линии искрового радиотелеграфа пересекли океаны и связали континенты.

Для уверенного приема на больших расстояниях потребовалось объединить чувствительность технических средств с таким совершенным биологическим средством, как слух человека. Повсеместный прием на слух радиосигналов по коду Морзе ознаменовал начало в технике беспроволочной телеграфии эры искровых передатчиков и «телефонных» приемников.

Качество слухового приема зависит от числа импульсов, действующих на телефон: предпочтительно, чтобы частота звука была в пределах 500–1000 Гц. Первые искровые передатчики не отвечали этому условию: искровые разряды индукционной катушки передатчика воспроизводились не как тон, а как треск. Увеличение числа искр было достигнуто введением взамен электромагнитного прерывателя Румкорфа многоконтактных врачающихся прерывателей.

Для преобразования радиочастотных импульсов, принимаемых от искрового передатчика, в последовательность импульсов постоянного тока, вызывающую звук в телефоне, потребовалось применить устройство, обладающее способностью выпрямлять переменный ток. Предпочтительным оказался детектор, состоящий из полупроводникового кристалла с точечным контактом. Пригодность для этой цели ряда кристаллов была еще в конце XIX в. выявлена в ходе исследований Брауна.



О. Хевисайд

Наряду с повышением технического уровня радиоустройств уже в первые годы XX в. началось глубокое научное изучение колебательных и волновых процессов в системах радиосвязи. Теоретические исследования процессов распространения радиоволн вдоль земной поверхности, выполненные немецкими учеными И. Ценнеком и А. Зоммерфельдом, не дали исчерпывающих объяснений механизма дальнего распространения радиоволн. Высказанная в 1902 г., после установления трансатлантической радиосвязи, независимо американским инженером Артуром Кеннели (1861–1939) и английским физиком Оливером Хевисайдом (1850–1925) гипотеза о существовании в верхней атмосфере ионизированных областей (позднее названных

ионосферой), способствовавших огибанию радиоволнами земной поверхности, вызвала к жизни многочисленные теоретические работы по этой проблеме.

В первых приемных устройствах совсем не использовалось явление резонанса, о возможностях которого для селекции каналов связи так проницательно упоминал английский физик У. Крукс в своей статье в 1892 г., еще до опытов Лоджа, Попова и Маркони. Искрывающую ясность в понимание колебательных процессов в искровых передающих устройствах внесли работы немецкого физика Карла Фердинанда Брауна (1850–1918), а его исследования детектирующих свойств контактов ряда кристаллов, предложенные им кристаллические детекторы позволили использовать все возможности искровой радиотелеграфии.



К. Ф. Браун

Использовав идею вакуумной трубы Крукса, Браун изобрел катодно-лучевой прибор (кинескоп) для индикации формы электромагнитной волны. Трубка Брауна монтировалась горизонтально на опоре вместе с отклоняющей луч катушкой. Анодное напряжение около 50 кВ обеспечивалось индукционной машиной. Исследуемый ток подводился к катушке электромагнита, расположенной снаружи узкой части стеклянной колбы между диафрагмой и экраном.

Катодный пучок, реагируя на изменения магнитного поля, высвечивал на флуоресцирующем экране линию между двумя точками, соответствующими минимальной и максимальной величинам исследуемого сигнала. Светящаяся линия отбрасывалась на внешний экран

с помощью зеркала, которое позволяло наблюдать изменение сигнала во времени. Скорость сканирования зеркала, превращающего пульсирующую вертикальную линию в двумерную визуально наблюдаемую картину формы тока, подбиралась при настройке. Впоследствии трубка Брауна (первый ее вариант относится к 1897 г.) стала прообразом современных электронных осциллографов, широко используемых при исследовании высокочастотных электромагнитных сигналов.

Браун был занят также разработкой устройств беспроволочной телеграфии, которую в Германии называли радиотелеграфией. Его успешную работу связывают с переходом к так называемым сложным схемам, в которых искровой разрядник в передатчике и когерер (детектор) в приемнике были вынесены из цепи антенны в разработанные Брауном отдельные колебательные контуры значительной емкости с малым затуханием. Это позволило избавиться от затрат энергии на создание «искры» (что существенно повысило КПД передатчика), эффективно использовать явление резонанса, т. е. работать в узкой полосе частот и без взаимных помех.

В 1901 г. Браун опубликовал свои статьи по беспроволочной телеграфии в виде буклета, озаглавленного «Беспроволочная телеграфия по воде и по воздуху». В следующем году он продемонстрировал первую функциональную передачу и прием направленной беспроволочной связи, где использовались направленные передатчики и приемники. Браун взял патент на свое изобретение в 1899 г. и основал «Телеграфную компанию профессора Брауна», через которую и внедрял свои последующие изобретения.

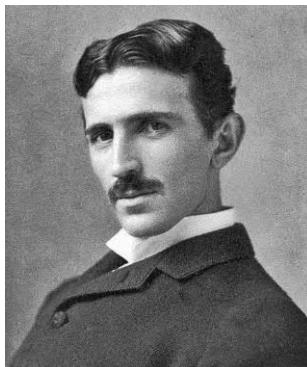
В 1909 г. К. Ф. Браун и Г. Маркони были удостоены Нобелевской премии по физике в знак признания их вклада в создание беспроволочной телеграфии. К этому времени А. С. Попова уже не было в живых.

Увеличение мощностей передающих радиостанций до многих десятков и даже сотен киловатт потребовало оригинальных инженерных решений для обеспечения более эффективной работы искровых разрядников и управления их работой. Становилась все более ясной необходимость искать новые технические решения проблем генерации и приема радиоволн. Искровой метод возбуждения серий затухающих колебаний и используемые методы манипуляции излучения исчерпали свои возможности. К тому же значительная полоса частот

каждого канала связи искровой радиотелеграфии с увеличением числа радиостанций и ростом их мощностей привела к возникновению взаимных помех.

2.2. Радиотехника незатухающих колебаний

Итак, к концу первого десятилетия XX в. стало ясно, что следует искать способы получения и использования не последовательностей быстро затухающих посылок радиоволн, а генерации и излучения незатухающих колебаний. Еще в 1893 г. сербский изобретатель Никола Тесла (1856–1943) продемонстрировал открытый им способ получения электрических колебаний преобразованием постоянного тока в переменный с использованием дугового разряда. Ученый получил несколько патентов, связанных с радиосвязью, и некоторое время даже имел отчисления от компании «Маркони».



Н. Тесла

В 1900 г. Тесла начал строительство огромной деревянной башни в городке Шорхэм, штат Лонг-Айленд. Он хотел обеспечить не только радиосвязь, башня должна была передавать на расстояние «дармовую» электрическую энергию, обеспечив ею чуть ли не всю Землю.

Кроме того, она должна была позволить управлять погодой и т. д. Строительство было завершено в 1903 г., но башня так и не заработала. Тесла хотел исправить ошибки, но разочарованные инвесторы прекратили поддержку проекта. Позже Тесла сделал еще несколько важных изобретений – в частности, именно он сформулировал

основные принципы построения радара. В 1888 г. Тесла открыл явление вращающегося магнитного поля, на основе которого построил электрогенераторы высокой и сверхвысокой частот. В 1891 г. он сконструировал резонансный трансформатор (трансформатор Тесла), позволяющий получать высокочастотные колебания напряжения с амплитудой до 106 В.

Значительный период в истории радиосвязи связан с применением передатчиков, основанных на использовании свойств вольтовой дуги, — дуговых передатчиков.

Упрощенный пример схемы дугового передатчика с рядом последовательно соединенных дуг приведен на рис. 3. На нем не показаны входящие в конструкцию передатчика мощные агрегаты для создания в камере дуг газовой среды и сильного магнитного поля, для отвода тепла и др. На рис. 3 буквой М обозначен микрофон, с помощью которого осуществлялась радиотелефонная связь: изменение сопротивления микрофона при действии на него звуков речи приводило к изменению энергии колебаний в антенне. В результате амплитуда получаемых волн изменяется соответственно речевому сигналу, т. е. происходит амплитудная модуляция радиосигналов.

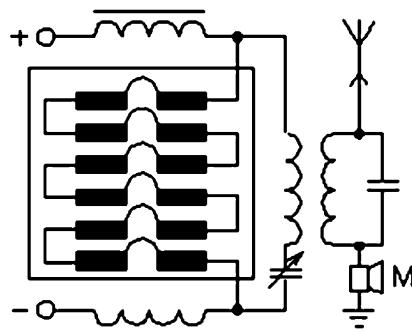


Рис. 3. Схема дугового передатчика

Выбором материалов для электродов (например, медь и уголь), последовательным включением нескольких дуг, применением водородного или водяного охлаждения, воздействием на дугу магнитного поля и другими мерами удалось получать колебания большой мощности с частотами до сотен килогерц. В отличие от искрового генератора по-

лучаемые колебания тока были незатухающими, по форме близкими к синусоидальным.

В 1900 г. уличные фонари в Лондоне (как и повсюду в Европе) были уже электрическими, но источниками света в них были не привычные нам лампы накаливания. Хотя знаменитое изобретение Эдисона было уже сделано (явление термоэлектронной эмиссии), его лампы пока еще не обеспечивали достаточно количества света и, кроме того, были дороги и недолговечны. Это было время электродуговых угольных ламп (непрерывной электрической искры), но у них имелся существенный недостаток – раздражающий свистящий звук, издаваемый при горении.

Ирландский инженер Уильям Дуддэль (1872–1917) в поисках пути устранения данного звука нашел способ управлять его тоном (частотой). Он обнаружил, что угольная дуговая лампа могла генерировать звуки в диапазоне слышимых частот. С помощью клавиатуры, соединенной с дуговыми лампами, устройство позволяло воспроизводить звуки. Так была создана «поющая дуга». Фактически это был первый электромузыкальный инструмент. В 1900 г. Дуддэль предложил использовать известные свойства электрической дуги и генерировать в присоединенной к ней колебательной цепи незатухающие колебания. Правда, в первом варианте дуговой генератор Дудделя возбуждал колебания звуковых частот, но, базируясь на том же принципе, в дальнейшем удалось получать колебания и более высоких частот. Накопленные в ходе исследований физических процессов в искровых разрядниках данные способствовали глубокому изучению и пониманию свойств электрической дуги и выявлению условий ее оптимального использования для генерации мощных и устойчивых колебаний радиочастот.

Вероятнее всего изобретение так и осталось бы занятной игрушкой, если бы в 1903 г. датский инженер-электрик Вальдемар Поулсен (1869–1942) не развел идею «поющей дуги» Дудделя в своем генераторе – дуге Поулсена (рис. 4).

Поулсен обнаружил, что если «поющую дугу» поместить в атмосферу водорода, то частота колебаний увеличивается почти до 500 000 Гц. Еще одной особенностью дуги Поулсена было поперечное магнитное поле, прикладываемое в месте ее горения. Это позволяло использовать более высокие напряжения и, таким образом, повысить мощность излучения.

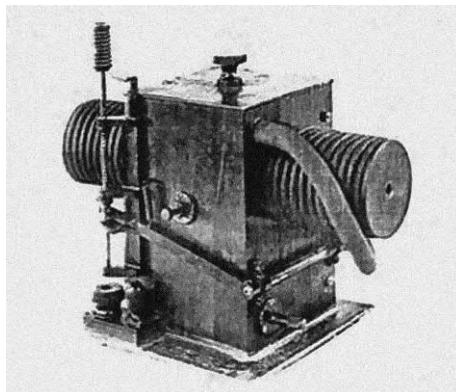
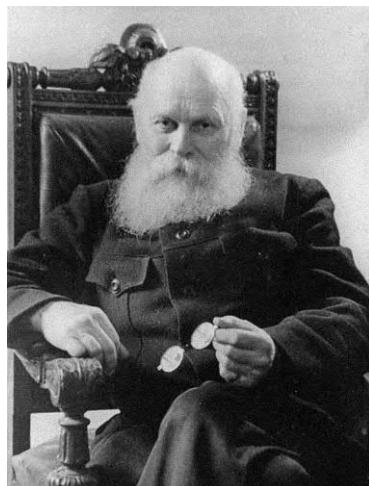


Рис. 4. Дуговой конвертер Поулсена («дуга Поулсена»)

В 1903 г. Поулсен запатентовал «улучшенный дуговой генератор колебаний, использующий углеводородную атмосферу и магнитное поле», и первым предложил последовательное соединение дуговых ламп. Разработанные Поулсеном дуговые генераторы получили широкое распространение на радиостанциях многих стран. Мощность генераторов Поулсена составляла от единиц до многих сотен киловатт. За его вклад в развитие радиотехники репортеры окрестили Поулсена «датским Эдисоном». В течение первых десятилетий XX в. его дуговая система передачи была основой большинства устройств радиосвязи.

Мощные дуговые генераторы радиостанций представляли собой громоздкие сооружения, включающие большой и мощный электромагнит, систему электропитания и водяного охлаждения. Было создано множество модификаций подобных генераторов, работавших на частотах до нескольких сотен килогерц. Относительно высокий КПД дуговых генераторов по сравнению с искровыми делал их применение весьма привлекательным на мощных радиостанциях дальних радиолиний. Подобные машины строились многими фирмами и применялись до 1920-х гг. на крупных радиостанциях мира. Весомый вклад в создание мощных высокочастотных машинных генераторов в России внес Валентин Петрович Вологдин (1881–1953), сконструировавший генераторы мощностью от 2 кВ · А (1912 г.) до 150 кВ · А (1925 г.), использовавшиеся на отечественных радиостанциях со статическими умножителями частоты.

Дуговые передатчики и генераторы в целом ряде усовершенствованных конструктивных вариантов применялись как для телеграфной, так и для телефонной радиосвязи вплоть до 1930 г. Одновременно с дуговыми генераторами на передающих станциях дальних линий радиосвязи применялись мощные машинные генераторы. В отличие от машинного генератора в виде многоконтактного прерывателя, предложенного в 1885 г. Эдисоном, эти генераторы были бесконтактными, индукционными. Роторы этих мощных машин были многозубцовыми и имели прочную конструкцию, рассчитанную на вращение с большой скоростью: до 20 000 оборотов в минуту. Частота генерируемого тока достигала десятков килогерц. Для получения более высоких частот к машинному генератору добавлялись цепи умножения частоты в виде трансформаторов с нелинейными магнитными характеристиками сердечников.

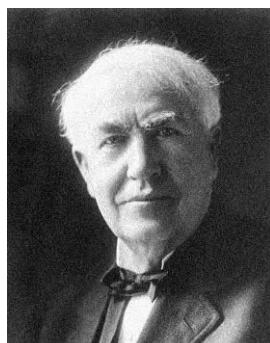


В. П. Вологдин

По сравнению с дуговыми передатчиками электромашиныные генераторы высокой частоты имели ряд преимуществ: более высокий КПД, стабильность частоты, устойчивость и надежность в работе. Но ни дуговые, ни электромашиныные устройства не могли удовлетворить все более высоким требованиям, которые предъявляла развивающаяся радиотехника к генераторам радиочастот. Это привело к постепенному переходу к использованию устройств на *радиолампах*.

2.3. Вакуумная (ламповая) электроника

Рассказ о зарождении электронных ламп всегда и вполне обоснованно начинают с *эффекта Эдисона*. 21 октября 1879 г. Томас Эдисон (1847–1931) продемонстрировал лампочку накаливания с угольной нитью. Лампочка горела в течение 40 ч, питаясь от высоковольтной динамо-машины. Успех Эдисону принес удачный выбор материала нити накала: коксованная хлопковая нить, которая обладала большим сопротивлением, чем платиновая проволока, используемая прежде. Сочершенствуя свою лампу, Эдисон пытался устранить такой ее дефект, как внутреннее почернение колбы, вызывающее потерю до 50% светового потока. Он предположил, что внутри лампы происходит электрический разряд и что осадок на ее внутренней поверхности – следствие рассеяния заряженных частиц угольной пыли, отрывающихся от раскаленной нити. По идее Эдисона при введении внутрь колбы дополнительного положительно заряженного электрода такие заряженные частицы будут им притягиваться.



Т. Эдисон

Эксперименты он начал в 1880 г., поместив над нитью накала проволоку, пропущенную сквозь стекло колбы и присоединенную к положительному полюсу источника постоянного тока. В 1882 г. он заменил добавочный проволочный электрод пластиной из различных проводящих материалов.

В 1883 г. Эдисон впервые в мире обнаружил прохождение тока через вакуум к добавочному электроду, т. е. открыл *явление термоэлектронной эмиссии*, названное в ту пору эффектом Эдисона. Этот эффект получил исчерпывающее объяснение после открытия

Дж. Дж. Томсоном электронов (1897 г.) как результат электронной эмиссии накаленными металлами.

В 1904 г. английский ученый Джон Амбрози Флеминг (1849–1945), изучая эффект Эдисона, предложил первую *радиолампу-диод* (радиодетектор или вакуумный диод). В ней накаленная нить представляла собой источник электронов (катод), а на второй электрод (анод) подавался небольшой положительный потенциал (рис. 5). Это устройство, запатентованное в 1904 г., стало первым электронным детектором радиоволн, преобразующим радиосигналы переменного тока в постоянный ток.



Рис. 5. Диод Флеминга

Диод Флеминга успешно заменил в радиоприемных устройствах кристаллические и другие детекторы, обеспечивая устойчивую работу при хорошей чувствительности. Правда, для работы диода требовались дополнительные источники электропитания. Кроме того, диод Флеминга выпрямлял радиочастотные сигналы, но не был в состоянии их усилить.

В 1907 г. американский инженер Ли де Форест (1873–1961) предложил (и запатентовал) трехэлектродную электронную лампу – *аудион* (или *триод*), которая позволила усиливать электрические сигналы, подводимые к третьему электроду – управляющей сетке (рис. 6).

Эти разработки благодаря широкому фронту исследований электрических процессов в вакууме и разреженных газах открыли широкие возможности для различных применений электронных и ионных приборов в радиотехнике. Однако первые приборы Фореста имели очень низкое усиление, необходимы были дополнительные исследования, чтобы превратить аудион в действительно полезный усилитель.

Этим новым устройством стала *рекогенеративная схема* американского ученого-радиотехника Эдвина Говарда Армстронга (1890–1954), которую он создал на базе аудиона в 1912 г. В 1913 г. он получил патент на схему рекогенеративного приемника.

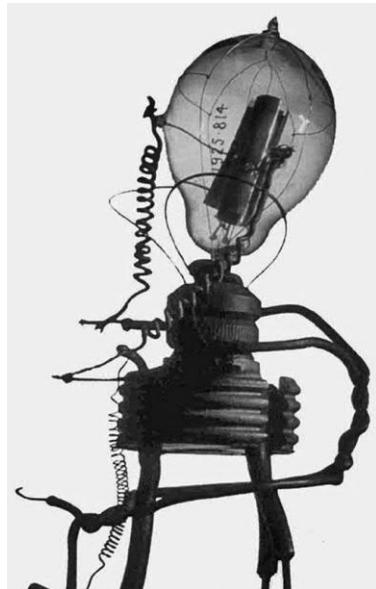


Рис. 6. Аудион де Фореста

В 1918 г. Армстронг почти одновременно с немецким физиком Вальтером Шоттки (1886–1976) предложил *супергетеродинный приемник*. Принцип супергетеродинного приема заключается в том, что принятые колебания преобразуются в промежуточную частоту, на которой и происходит усиление сигнала. С 1930-х гг. супергетеродинная схема стала доминирующей при конструировании радиовещательных приемников, телевизоров и радаров.

Нельзя не упомянуть о выдающихся достижениях в области радиотехники канадско-американского инженера Реджинальда Фессендене (1866–1932). Он работал химиком у Эдисона, главным инженером-электриком в компании “Westinghouse”. В 1900 г. Фессенден предложил принцип «наложения вибрирующих волн звуковой частоты на постоянную радиочастоту, чтобы модулировать амплитуду радиоволны в форму звуковой волны». Этот принцип был назван *амплитудной модуляцией*.

дуляцией. В том же году ученый провел первые эксперименты по передаче голоса по радио.



Э. Г. Армстронг

В 1902 г. Фессенден предложил и запатентовал принцип гетеродина (предшественник супергетеродина). «...Принятая радиочастота смешивается с другой частотой, вырабатываемой специальным генератором (гетеродином), отличной от несущей. В результате сложения получается постоянная промежуточная частота, которую проще усиливать и демодулировать». В силу того что промежуточная частота выше максимальной приемной частоты, это позволяет уменьшить шумы и помехи от других радиосигналов. Эта система стала стандартом к 1918 г. и основой для всего современного радиоприема. В дальнейшем она послужила основой для разработки Армстронгом супергетеродина.

Впервые экспериментальную передачу публичного выступления по радио Фессенден осуществил в 1900 г. Затем, после изобретения им генератора высокой частоты, он решил испробовать новую технику в своей мастерской в Брант Рок (маленькая деревушка на берегу Атлантики, штат Массачусетс) накануне Рождества 1906 г., послав в эфир вместо азбуки Морзе человеческий голос и музыку. За три дня до эксперимента он направил радиотелеграфные сообщения на ближайшие корабли с просьбой принять его послание в определенное время. Передача велась на частоте около 80 кГц с использованием 1 кВт генератора переменного тока, разработанного Фессенденом совместно с американским инженером шведского происхождения Эрнестом Александерсоном (1878–1975). Операторы в наушниках услышали

в условленный час голос человека, соло на скрипке в исполнении изобретателя, чтение отрывков из Библии и поздравления с Рождеством. Дальность передачи составила более 100 миль (185 км). В 1910 г. подобным же образом Ли де Форест передал в эфир из нью-йоркского театра «Метрополитен» пение великого оперного певца Энрико Карузо.

Регенерация за счет обратной связи стала важной вехой в использовании электронных ламп в радиотехнике. Видные ученые и инженеры разных стран (США, Великобритании, Германии и др.) Л. де Форест, Э. Армстронг, К. Раунд, Дж. Флеминг, З. Штраус, А. Мейсснер, Г. Арко в первые годы второго десятилетия XX в. предложили ряд схем с регенерацией. Однако высокая чувствительность и устойчивая работа таких схем реализовывалась лишь при приеме телеграфных сигналов, передаваемых незатухающими колебаниями. В этом случае приемное устройство работало в режиме генерации автоколебаний. Прием же телефонных передач с высокой чувствительностью требовал точного поддержания уровня регенерации вблизи критического, при котором возникают собственные автоколебания. Поэтому в конце 1920-х – начале 1930-х гг. регенеративные радиоприемные устройства уступили место супергетеродинным с преобразованием частоты и стабильным усилением промежуточной частоты.

Наряду с созданием новых диодов и триодов, а позже и многоэлектродных электровакуумных приборов велись теоретические разработки возможностей применения радиоламп в первую очередь в радиоприемных устройствах. Ученые занимались усовершенствованием вакуумной техники, изучением процессов электронной эмиссии, поведения электронных потоков и возможностей управления ими. С полным правом можно считать, что именно на начальном этапе развития электроники были заложены основы радиоэлектроники. Ученые из разных стран – И. Ленгмюр, В. Шоттки, О. Ричардсон, Р. Либен и др. – внесли основополагающий вклад в развитие радиотехники той поры. Остановимся кратко на результатах их научной деятельности.

Австрийский ученый Роберт фон Либен (1878–1913) изобрел усиительную электронную лампу. Он получил патент на новое изобретение от 4 марта 1906 г. В патенте лампа Либена была названа «катодно-лучевым реле». Отсюда и пошло последующее название электронных ламп – «катодное реле», которое долгое время использовалось в радиотехнике.

В патенте Либена впервые был сформулирован принцип усиления электрического сигнала в вакуумной электронной лампе. Эта первая усиительная электронная вакуумная лампа имела, кроме катода прямого накала, анода, управляющего электрода, еще и катушку индуктивности, что не позволяло называть ее трехэлектродной лампой, которая потом стала доминирующей в радиотехнике. Конструкцию лампы этого типа («триод Либена») немецкий ученый предложил позже, после того как стало известно о работах американского ученого Л. де Фореста (см. выше).

Усилильная лампа Либена получила название «трубки Либена», но иногда ее называли и «лампой Либена». При ее практическом внедрении встретились некоторые трудности но, невзирая на это, лампа была опробована в качестве усилителя звукового сигнала в телефонии и, что важно, доказала свою работоспособность.

В ходе разработки ламповых радиоприемных устройств было предложено множество вариантов использования возможностей радиоламп. В 1913 г. австрийский изобретатель Александр Мейсснер (1883–1958) запатентовал идею положительной обратной связи для самовозбуждающегося *лампового генератора* – нового метода генерации незатухающих электрических колебаний радиочастот с помощью радиоламп (рис. 7).

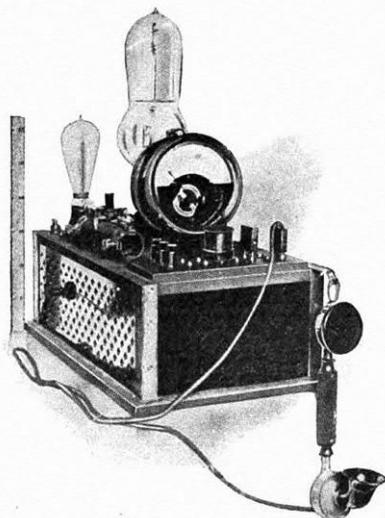
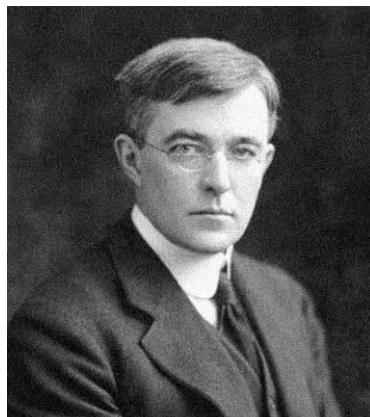


Рис. 7. Ламповый генератор Мейсснера

Дальнейшее развитие этого направления зависело от успехов электровакуумной техники, так как для получения колебаний достаточной мощности потребовались специфические электронные лампы – генераторные. Для них характерны высокая эмиссия катода, значительные мощности на аноде и обеспечение отвода от анода большого количества выделяющейся теплоты.

В первое десятилетие XX в. в радиотехнике исследовались вопросы технологии изготовления оптимальных конструкций электровакуумных приборов и их применения. Здесь решающую роль сыграли работы американского ученого Ирвинга Ленгмюра (1881–1957). В 1916 г. он изобрел ртутный высоковакуумный насос, который был в 100 раз более мощным, чем любой из ранее существовавших для этих целей насосов.

Приблизительно в то же время, занимаясь исследованием способности испускания электронов узкой пластинкой вольфрама, покрытой оксидом тория, Ленгмюр обнаружил новый эффект. Он состоял в том, что вольфрамовая нить «ведет себя лучше всего», если она покрыта слоем оксида тория толщиной всего в одну молекулу. Применительно к радиолампам такое покрытие уменьшает температуру катода и способствует его нормальной работе. Это открытие заставило Ленгмюра обратиться к изучению поверхностных явлений – молекулярной активности, которая наблюдается в тонких покрытиях или на поверхностях. В 1932 г. он был удостоен Нобелевской премии «за открытия и исследования в области химии поверхностных явлений».



И. Ленгмюр

Начало 1920-х гг. ознаменовалось двумя важными событиями. Первое из них – *широкое использование радиотелефонии как средства массовой информации*. Технические возможности создания радиоприемных устройств, доступных широкому кругу населения, в сочетании с передачей вещательных программ по проводам, сделали радиотелефонию массовым средством распространения оперативной информации и культуры.

Второе – выяснение возможностей применения коротких радиоволн (длиной $100\text{--}10$ м) для дальней радиосвязи. Широкое использование на первых этапах радиосвязи средних и длинных радиоволн (в сотни и тысячи метров) объяснялось как чисто техническими обстоятельствами, так и тогдашними представлениями о механизме распространения радиоволн на большие расстояния далеко за пределы прямой видимости. Кроме того, ряд экспериментов по установлению радиосвязи на коротких волнах на расстояния в сотни километров показал неустойчивость работы таких радиолиний и более заметное убывание интенсивности радиосигналов с расстоянием. Это привело к тому, что радиоволны короче 200 м считались неэффективными и применялись лишь в экспериментах радиолюбителей.

Но уже в начале 1920-х гг. появились сообщения об установлении радиосвязи на волнах длиной 100 м и менее на расстояниях в несколько тысяч километров при мощностях передатчиков, измеряемых ваттами или десятками ватт. Естественно, что подобные эксперименты стали возможными только с распространением ламповых радиоустройств, что как раз и соответствует началу 1920-х гг. Развернулись широкие исследования условий распространения коротких радиоволн. Теоретические соображения А. Кеннели и О. Хейвисайда о существовании ионосферы были подтверждены в 1925 г. экспериментами Э. Эплтона и М. Барнета по интерференции земных радиоволн и волн, отраженных от ионосферы, и прямыми измерениями высот и других характеристик слоев ионосферы, выполненных импульсным методом Г. Брейтом и М. Тьюром. Расскажем подробнее о научных исследованиях Э. Эплтона.

В 1924 г. английский физик Эдуард Эплтон (1892–1965) вместе со своим аспирантом М. Барнетом начал изучать распространение радиоволн в атмосфере. Эплтон задался вопросом, могут ли радиоволны, отражающиеся от слоя Хейвисайда – Кеннели, интерферировать с радиоволнами, распространяющимися непосредственно у земли.

С помощью компании «Бритиш бродкастинг» Эплтон и Барнет осуществили отражение радиоволн различных частот от слоя Хевисайда – Кеннели 11 декабря 1924 г.



Э. Эплтон

С помощью их метода, известного ныне как радиолокация с частотной модуляцией, удалось получить первое экспериментальное подтверждение существования ионосфера, определить ее высоту, равную 60 милям над землей. Этот метод оказал существенное влияние на развитие радиотехники и проложил путь к изобретению радиолокатора.

Два года спустя после измерения высоты ионосферы Эплтон открыл второй непроводящий слой, расположенный на высоте 150 миль над поверхностью земли. Большое сопротивление этого слоя, известного в настоящее время как *слой Эплтона* (или *F-слой*), позволяет ему отражать коротковолновые радиосигналы. Этим открытием Эплтон установил возможность прямого радиовещания на весь мир.

В 1947 г. Эплтон был награжден Нобелевской премией по физике «за исследования физики верхних слоев атмосферы, в особенности за открытие так называемого слоя Эплтона».

Подведем итоги. От затухающих колебаний в первых передатчиках, от искровых, дуговых и машинных генераторов, работавших в диапазонах длинных и средних волн, радиотехника прошла замечательный путь последовательного освоения коротких, ультракоротких (метровых), дециметровых, сантиметровых, миллиметровых, микрометровых

вых диапазонов волн и, наконец, нанометрового диапазона, с возвращением к проводным линиям, но теперь уже не с металлическими, а стекловолоконными проводниками. Наземные сети связи были дополнены спутниковыми и радиорелейными каналами, а кабели с медными проводниками все больше вытесняются волоконно-оптическими. Таким образом, современные сети электросвязи – это результат совместного развития проводной связи и радиотехники.

Если проследить историю радиотехники, то можно с уверенностью констатировать, что темпы ее развития постоянно растут, а сам этот процесс порождает появление новых отраслей науки и техники, изменяет социальные отношения в обществе и т. п. Радиотехнические методы широко применяют в промышленности, народном хозяйстве, при создании приборов для научных исследований. Приведем лишь несколько примеров. Высокочастотный нагрев используется для плавки особо чистых металлов в условиях вакуума и в атмосфере инертных газов, а также для закалки поверхностей стальных деталей, для сушки древесины, керамики и зерна, для приготовления и консервирования пищи, в медицинских целях и т. д.

Ускорители заряженных частиц, по существу, являются мощными генераторами радиочастотных колебаний с блоками модуляции, линиями передачи и специальными резонаторами, в которых происходит процесс ускорения частиц. Большая часть установок для исследования элементарных частиц и космических лучей представляет собой сложные радиотехнические схемы и блоки, позволяющие идентифицировать частицы по наблюдаемым результатам их взаимодействия с веществом.

К настоящему времени сконструированы также многочисленные радиотехнические устройства, в основе работы которых лежат достижения современной физики (в частности, нанотехнологий). Остановимся лишь на одном из них. В 2007 г. группе исследователей (А. Зеттл, К. Дженсен и др.) из Национальной лаборатории Лоуренса в Беркли удалось создать микроскопический радиоприемник, состоящий из одной углеродной нанотрубки, которая является одновременно антенной, настраиваемым полосовым фильтром, усилителем и демодулятором.

Основу радиоприемника составляют четыре элемента: антenna, принимающая электромагнитный сигнал, тюнер, выделяющий

из спектра нужную частоту, усилитель и демодулятор, отделяющий информационный канал от несущей частоты. Выделенный компонент информации передается на внешний громкоговоритель. Оказалось, что углеродная нанотрубка обладает таким сочетанием химических, геометрических и электрических свойств, что, будучи помещенной между двумя электродами, может одна выполнять функции всех четырех вышеуказанных элементов.

Как же удалось реализовать такой радиоприемник? Нанотрубку длиной около 500 нм и диаметром около 10 нм предстояло закрепить на электроде или вырастить прямо на нем методом химического осаждения из паров, когда слои атомов углерода осаждаются из ионизированного газа. На некотором расстоянии от кончика трубы, оформленного в виде полусферы, нужно было установить другой электрод – противоэлектрод – и создать между ними небольшую разность потенциалов, чтобы вызвать поток электронов между свободным концом нанотрубки и противоэлектродом.

Принцип действия нанорадиоприемника состоит в следующем. Падающая электромагнитная волна заставляет нанотрубку вибрировать. Ее колеблющийся кончик усиливает сигнал, а ее автоэмиссионные свойства обеспечивают выделение информационной составляющей из этого сигнала. Противоэлектрод детектирует изменения тока и передает электрический сигнал звуковой частоты на громкоговоритель, который преобразует его в звуковой сигнал. По мнению создателей нанорадиоприемника, он позволит миниатюризировать целый ряд приборов, таких, как слуховой аппарат, сотовый телефон, до такой степени, что они будут целиком помещаться в наружном слуховом проходе. Кроме того, откроется возможность создать средства связи нового поколения, различные имплантаты, систему радиоуправляемой доставки лекарственных препаратов к больным органам человека и др.

Модуль № 3. Исторический обзор развития радиоспектроскопии

3.1. Резонансные методы исследований

Рассказ о резонансных методах исследования уместно начать с *метода молекулярных и атомных пучков*. Именно в экспериментах с молекулярными и атомными пучками возникла радиоспектроскопия как магистральное направление радиофизики. Молекулярные и атомные пучки – направленные потоки молекул или атомов, движущихся в вакууме практически без столкновений друг с другом и с молекулами остаточных газов.

Немецкие физиками Отто Штерн (1888–1969) и Вальтер Герлах (1889–1979) использовали молекулярные и атомные пучки для измерения скорости молекул и эффективных сечений их соударений друг с другом, а также для исследования явлений, обусловленных электронными спинами и магнитными моментами атомных ядер. Опыты Штерна – Герлаха подтвердили существование у атомов спина и факт пространственного квантования направления их магнитных моментов.



И. А. Раби

В 1937 г. американский ученый Исидор Айзек Раби (1898–1988) использовал молекулярные и атомные пучки в разработанном им резонансном методе. Вначале этот метод применялся для измерения

магнитных моментов ядер, а в дальнейшем стал основным методом радиоспектроскопии, позволившим измерить с большой точностью фундаментальные характеристики молекул, атомов и атомных ядер.

Работая в Колумбийском университете, Раби начал экспериментальные исследования атомных и молекулярных пучков. Теоретически вычисляя поведение атомов в более слабых магнитных полях, Раби предсказал, что молекулярный пучок расщепится на две или более частей (эффект Зеемана). Число подпучков зависит от взаимодействия ядерных и электронных спинов друг с другом и с приложенным магнитным полем. Раби удалось подтвердить свое предсказание экспериментально, когда он разработал метод измерения ядерного спина путем подсчета расщеплений молекулярного пучка.

Вскоре после того, как Раби начал карьеру в Колумбийском университете, он решил проделать эксперимент с молекулярными пучками. Отметим, что это было время Великой депрессии, когда в США резко снизилось финансирование научных исследований. К 1931 г. Раби удалось открыть собственную лабораторию для исследований молекулярных пучков. Впоследствии он создал научную школу, в которую вошли талантливые молодые физики. Четверо молодых людей, вышедших из лаборатории Раби, стали нобелевскими лауреатами. Это – Уиллис Лэмб, Поликарп Куш, Чарльз Таунс, Норман Рамзей. Лаборатория Раби проработала до осени 1940 г.

В начале 1930-х гг. темой экспериментальной работы Раби, по его же словам, было «проигрывание различных вариантов с использованием оригинальной установки Штерна». Для различных элементов были определены спины и магнитные моменты. Впоследствии эксперименты для одних и тех же элементов проводились с постоянно увеличивающейся точностью. С теоретической точки зрения, наиболее важные результаты того периода касались магнитных моментов нейтрона и дейтрона. Они впервые были измерены Штерном и его сотрудниками, однако для дейтрона эти измерения были весьма приблизительными. Группа Раби повторила два этих измерения с гораздо большей точностью.

В 1936 г. у Раби возникла самая блестящая за всю его карьеру идея. Он предложил поместить между однородными магнитными полями установки Штерна дополнительное магнитное поле, совершающее периодические колебания во времени, частота которого может варьи-

роваться с высокой точностью. Новая установка Раби позволила значительно повысить точность измерений магнитных моментов (на порядок величины при первом же применении).

В 1937 г. Раби обнаружил, что, прикладывая слабый радиочастотный сигнал к молекулярному пучку в магнитном поле, можно заставить атомы изменять ориентацию спинов. Управляя частотой радиосигнала, можно выполнять прецизионные измерения спина ядра и напряженности собственного магнитного поля ядра. Первые же измерения Раби оказались примерно в 10 раз точнее, чем измерения, выполненные существовавшими ранее методами, а последующее усовершенствование позволило довести преимущество в точности до 1000-кратного.

В экспериментах с пучками использовались атомы с отличным от нуля электронным магнитным моментом, из которых формировался атомный пучок, пропускавшийся через один или два отклоняющих магнитных поля такого же типа, как в опыте Штерна – Герлаха. Путем подбора магнитных полей и исследования картины отклонения или перефокусировки пучка атомов удалось получить сведения о связи ядерных и электронных моментов. Таким способом были измерены спины ядер, а также характеристики взаимодействия ядерных магнитных моментов и электрических квадрупольных моментов. Для регистрации факта поглощения Раби исследовал влияние на отклонение молекул в молекулярных пучках поглощения атомами и молекулами электромагнитного излучения радиочастотного и микроволнового диапазонов. Рассмотрим схему его экспериментальной установки (рис. 8).

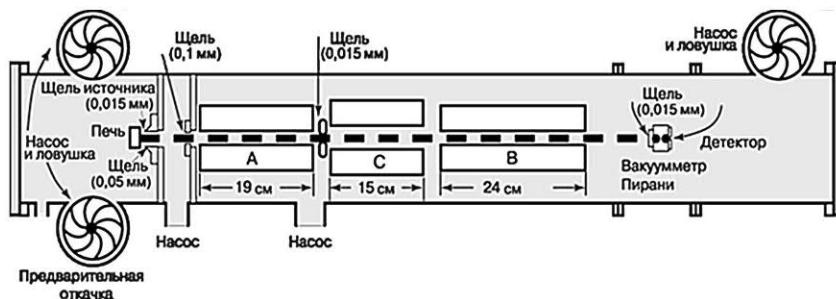


Рис. 8. Схема экспериментальной установки Раби для исследования магнитных моментов ядер

Молекулы из термического источника попадают в вакуумную камеру, в которой магниты *A* и *B* создают неоднородные магнитные поля с противоположными направлениями неоднородностей. В магните *A* молекулы отклоняются так, как это происходит в опыте Штерна – Герлаха, а затем перефокусируются магнитом *B* на детектор при условии, что входящие в состав молекулы магнитные моменты одинаково ориентированы в магнитах *A* и *B*. Но если один из моментов переориентируется в средней области *C*, то перефокусировка не происходит, и интенсивность пучка уменьшается. Поэтому в области *C* создают однородное магнитное и осциллирующее радиочастотное поле и измеряют поглощение радиочастотного излучения, регистрируя уменьшение интенсивности пучка.

Типичные результаты эксперимента, проведенного с молекулами тяжелого водорода (дейтрана), представлены на рис. 9. На нем показана зависимость интенсивности пучка от напряженности однородного магнитного поля в области *C*.

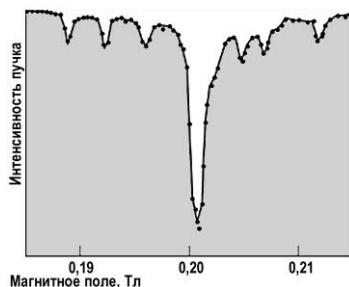


Рис. 9. Резонансная кривая, полученная для молекул тяжелого водорода (дейтрана)

Самый глубокий центральный минимум интенсивности пучка соответствует частоте v и напряженности поля H , которые связаны соотношением $hv = \frac{\mu H}{I}$ (μ – магнитный момент ядра), так что эти данные позволяют определить отношение магнитного момента к спину. Менее глубокие дополнительные минимумы обусловлены электрическим квадрупольным моментом. По их расположению можно определить электрический квадрупольный момент дейтрана.

Таким образом, Раби и его коллеги использовали свой метод для точных измерений атомных энергетических уровней в основном

состоянии (т. е. в состоянии с наименьшей энергией). Основное состояние может иметь несколько магнитных подсостояний, которые слегка разделяются магнитным полем. Следовательно, воздействуя на атомы с помощью магнитного поля заранее подобранный частоты, можно индуцировать переход с одного подуровня на другой. Под заранее выбранной частотой электромагнитного поля понимается такая частота, при которой энергия фотонов равна разности энергий между подуровнями. Эти частоты лежат в радиодиапазоне.

Располагая особым образом магниты и щели, колумбийская группа сумела получить узкие пучки атомов, находящихся всего лишь в нескольких магнитных подсостояниях, причем детекторов могли достигать только атомы в определенных состояниях. Если поле настроено на «правильную частоту», то изменение числа атомов, достигающих детектора, свидетельствует о том, что переход с одного уровня на другой совершился. Зная энергию фотонов, вызывающих переходы, группа Раби сумела вычислить энергетические уровни, соответствующие подсостояниям. Такое соответствие между радиочастотой поля, вызывающего переход, и разностью энергий между подуровнями называется *резонансом Герца* (в честь Г. Герца).

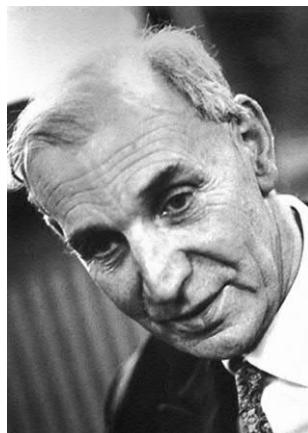
Обладая в своем арсенале новыми методами, группа Раби еще раз вернулась к измерениям магнитного момента, повторив их с большей точностью (до шести значащих цифр). В ходе этой работы они сделали открытие, имеющее основополагающую важность для теории ядерных сил, действующих между нейтронами и протонами внутри ядра. Они обнаружили, что форма дейtronов не является идеальной сферой, как это предполагали до того времени в отношении всех ядер. У него была эллипсоидная форма, т. е. дейtron обладал электрическим квадрупольным моментом, что впервые указало на существование тензорных сил между элементарными частицами.

Измерения Раби и его группы имели чрезвычайно важное значение для ядерной физики. Методом Раби были измерены спины ядер, магнитные и электрические квадрупольные моменты стабильных и радиоактивных ядер. Была также измерена с высокой точностью тонкая структура атомных спектров, в результате чего в экспериментах с атомарным водородом был открыт лэмбовский сдвиг, послуживший стимулом к революционным теоретическим открытиям в квантовой электродинамике (об исследованиях У. Лэмба будет рассказано ниже).

После начала Второй мировой войны исследовательская группа Раби в Колумбийском университете распалась. В 1940 г. Раби взял отпуск, чтобы занять пост заместителя директора радиолокационной лаборатории Массачусетского технологического института. Там он отвечал за разработку микроволновых источников для их использования в радарных системах. В поисках надежных помощников Раби пригласил многих известных физиков, в том числе Джюлиуса Швингера, Эдуарда Перселла, Роберта Дикке и Джорджа Уленбека. Полагая, что радар способен быстрее обеспечить преимущества союзников в военной технике, чем атомная бомба, и потому отказавшись от участия в Манхэттенском проекте, Раби навещал лаборатории проекта в Лос-Аламосе (штат Нью-Мексико) в качестве неофициального консультанта Дж. Оппенгеймера.

В 1944 г. И. Раби был удостоен Нобелевской премии по физике «за резонансный метод измерений магнитных свойств атомных ядер».

Таким образом, исследования Раби и его учеников заложили фундамент нового направления в радиофизике – радиоспектроскопии. Однако созданный Раби метод магнитного резонанса в атомном пучке имел свои ограничения: среднее время жизни возбужденного состояния до того, как оно испустит энергию и возвратится в основное состояние, очень мало (порядка одной десятимиллионной секунды), и только небольшое число атомов претерпевает индуцированный резонансом переход.



А. Каstлер

Французский физик Альфред Каstлер (1902–1984) вместе со своим студентом Ж. Бросслем разработал несколько методов, в которых свет используется для преодоления некоторых ограничений метода Раби. Метод Каstлера получил название метода двойного резонанса. В нем пучок света соответствующей частоты возбуждает атомы до определенного энергетического уровня. Но при этом не все подуровни оказываются занятыми.

Следовательно, при обратных переходах атомов в основное состояние свет испускается неодинаково в различных направлениях, кроме того, в каждом направлении он частично поляризован. Если электромагнитное поле, приложенное к возбужденным атомам, имеет частоту (энергию фотонов), необходимую, чтобы индуцировать переходы между занятыми и незанятыми подуровнями, то испускаемый свет изменяет как пространственное распределение, так и поляризацию. Это изменение свидетельствует о том, что радиочастота настроена на разность энергий между подуровнями (находится в резонансе с разностью энергий). Метод Каstлера является средством точной фиксации положений подуровней возбужденных атомных состояний.

В 1950 г. Каstлер сообщил о методе, получившем название оптической накачки и позволившем ему сдвигать электроны в атомах с одного магнитного подуровня основного состояния на другой. В дальнейшем этот метод лег в основу создания квантового генератора света – лазера (см. ниже). А. Каstлер был удостоен Нобелевской премии по физике 1966 г. «за открытие и разработку оптических методов исследования резонансов Герца в атомах».

Магнитный резонанс представляет собой взаимодействие между веществом и полем электромагнитного излучения. В процессе этого взаимодействия изменяются свойства как вещества, так и поля. В соответствии с этим методы детектирования магнитного резонанса можно подразделить на два класса: детектирование изменений, происходящих в веществе, и детектирование изменений, происходящих с полем. К первому классу относятся калориметрический метод Гортера, метод атомных пучков Раби и методы оптического детектирования. Ко второму классу методов детектирования принадлежат электронные методы, развитые Е. К. Завойским, Э. М. Перслем и Ф. Блохом. Остановимся подробнее на второй группе методов, начав с рассказа об истории открытия электронного параметрического резонанса (ЭПР), его научном и практическом применении.

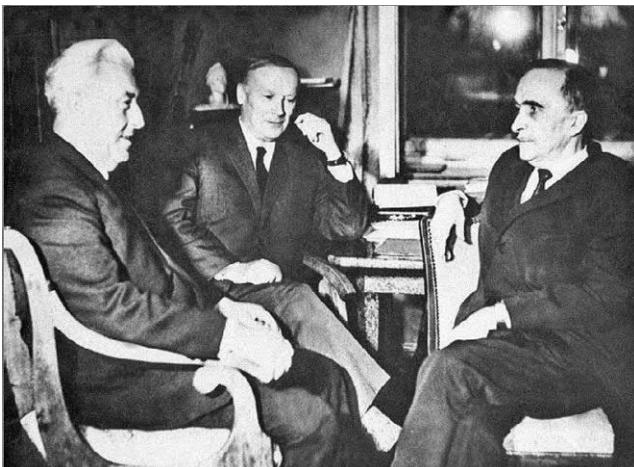
Советский физик-экспериментатор Евгений Константинович Завойский (1907–1976) в работе «Метод измерения потенциалов возбуждения атомов и молекул» (1936 г.) обосновал возможность возбуждения молекул электронами, ускоренными высокочастотными электрическими полями. При этом было обнаружено явление поглощения электрической составляющей электромагнитного поля генератора УКВ (при определенном режиме генератора) веществом. При этом наблюдалось изменение величины анодного и сеточного тока лампового генератора. Это явление было положено в основу метода сеточного тока (см. ниже).

Важный поворот в научной деятельности Завойского происходит в 1940 г. В 1939 г. среди физиков буквально произвело сенсацию сообщение об опытах Раби, применившего впервые для определения магнитных моментов ядер резонансный метод и измерившего с высокой точностью моменты протона и дейтранона (см. выше). Однако метод Раби требует использования молекулярных пучков в вакууме и может быть применен к небольшому числу ядер. К. Гортер изучал поведение твердых парамагнитных веществ в радиочастотном поле и не смог обнаружить резонансного поглощения энергии атомов. Более того, по оценкам физиков-теоретиков В. Гайтлера и Э. Теллера, время ядерной релаксации для твердых парамагнитных диэлектриков очень велико – порядка миллиона лет. Из этих исследований следовало, что наблюдать резонансное поглощение невозможно.

В связи с этим у Завойского возникла идея применить свой высокочувствительный метод измерения поглощения радиоволн для резонансного определения магнитных моментов атомных ядер в конденсированных средах, в твердых и жидких телах. Завойский привлек к этой работе своих сотрудников Бориса Михайловича Козырева (1905–1979) и Семена Александровича Альтшулера (1911–1983).

До Завойского для детектирования небольших изменений интенсивности электромагнитного поля при его резонансном поглощении в образце применялся калориметрический метод Гортера. Однако он обладал рядом недостатков: низкая чувствительность, невозможность ставить эксперимент при комнатной температуре, неприменимость при частотах выше 10^8 Гц. Требовалась совершенно новая методика эксперимента, и она была создана в начала 1940-х гг. казанскими учеными. Весной 1940 г. начались измерения. Во многом успех даль-

нейших исследований Завойского связан с изобретенным им в 1934 г. методом сеточного тока.



С. А. Альтшулер, Е. К. Завойский и Б. М. Козырев

Основная его идея заключается в том, что небольшое изменение нагрузки на генератор, вызванное поглощением некоторой доли электромагнитной энергии в веществе, чувствительным образом сказывается на величине анодного или сеточного тока генератора, причем эта зависимость имеет линейный характер. Простота и удобство работы с этим методом очевидны. Кроме того, он не имеет ни температурных, ни частотных ограничений, не говоря уже о гораздо более высокой чувствительности.

Процесс измерения поглощения заключался в медленном изменении напряженности магнитного поля H при постоянной частоте генератора ω и регистрации сеточного (или анодного) тока генератора, величина которого заметно изменялась при определенном (всегда одном и том же) значении H . Этим способом Завойскому впервые удалось наблюдать явление резонансного поглощения электромагнитной энергии в парамагнитном веществе. Однако в таком простейшем варианте новый метод обладал некоторым недостатком: из-за узости резонанса найти резонансное значение магнитного поля, изменяя его напряженность (например, двигая ручку реостата), было затруднительно. Поэтому несколько позднее Завойский дополнительно усовершенствовал

свой метод, введя низкочастотную (на звуковой частоте) модуляцию постоянного магнитного поля, благодаря которой установка теперь как бы «сама» находила резонансное значение H . Кроме того, это усовершенствование привело к дополнительному значительному увеличению чувствительности метода.

В 1940 г. Завойский вместе с Козыревым и Альтшуллером предприняли попытку обнаружить резонансное магнитное поглощение электромагнитного поля на протонах в жидкости. И хотя результат исследований был отрицательным, данная работа сыграла важную роль в развитии радиоспектроскопии. Это, во-первых, был очень смелый шаг, поскольку к тому времени были известны аргументы крупных авторитетов, которые, казалось, не оставляли надежды на успех эксперимента. Во-вторых, Завойский применил принципиально новую методику эксперимента, которая составляет основу радиоспектроскопии до сих пор: вместо калориметрических измерений он использовал свой метод сеточного тока, чувствительность которого на несколько порядков выше; впервые была применена модуляция магнитного поля переменным полем звуковой частоты. Первым результатом данного сотрудничества стало наблюдение Завойским, Альтшуллером и Козыревым сигналов ядерного (протонного) магнитного резонанса в мае – июне 1941 г. Однако проведению тщательных экспериментов по исследованию этого явления помешала война, полученные результаты не были опубликованы. Завойский с сотрудниками был вынужден демонтировать установку, лишив тем самым Казанский университет приоритета в открытии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) – одного из крупнейших открытий XX в. ЯМР был открыт в 1946 г. американскими физиками Ф. Блохом и Э. Перселлом (независимо друг от друга), за что они были отмечены Нобелевской премией по физике 1952 г. К истории открытия ЯМР мы еще вернемся.

В 1943–1944 гг., когда Завойский снова мог заниматься экспериментальными исследованиями, он вместо продолжения изучения ЯМР приступил к исследованиям электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Как следует из документов, 21 января 1944 г. Завойский впервые наблюдал на осциллографе сигнал ЭПР: сохранились целлулоидные пленки, на которых Завойский впервые зафиксировал сигналы ЭПР с экрана осциллографа. Разработанная Завойским установка (рис. 10) состояла из сварочного трансформатора, катушки-соленоида, амперметра, автодинного генератора, профилометра Аббота, осциллографа.

В катушке соленоида создавалось переменное магнитное поле низкой частоты (50 Гц). Эта катушка питалась от вторичной обмотки сварочного трансформатора. Величина магнитного поля, создаваемого соленоидом, измерялась по величине переменного тока, для чего последовательно с соленоидом включался амперметр Гартмана – Брауна. Коэффициент пропорциональности между магнитным полем и силой тока определялся экспериментально. В магнитное поле соленоида помещалась радиочастотная катушка генератора высокой частоты (10 МГц). В катушку помещался исследуемый парамагнетик, запаянный в герметичную целлулоидную ампулу. Магнитные моменты ионов парамагнетика, помещенного в низкочастотное магнитное поле H соленоида, прецессируют (вращаются) вокруг направления магнитного поля с частотой v , пропорциональной величине поля. Если одновременно с этим парамагнетик поместить в переменное магнитное поле радиочастотного генератора, ориентированного перпендикулярно полю соленоида, то парамагнетик может поглощать высокочастотную энергию, поступающую в катушку от генератора, только в том случае, если частота генератора совпадает с частотой прецессии измеряемых магнитных моментов. Это явление и называется *электронным парамагнитным резонансом* (ЭПР).

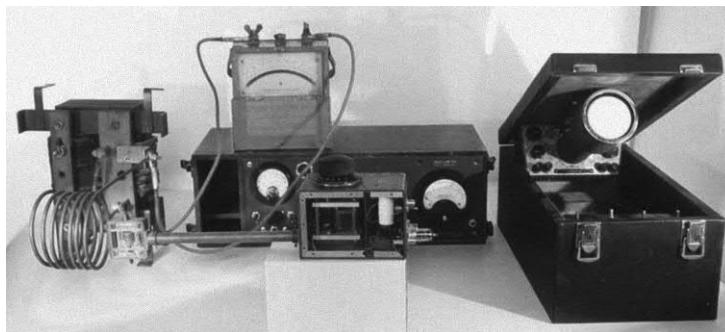


Рис. 10. Реконструированная установка Завойского для наблюдения ЭПР

Зафиксировать сигнал ЭПР можно по изменению амплитуды колебаний генератора в момент, когда переменное поле соленоида проходит через резонансное значение, или же по изменению тока сетки лампы генератора. Для этого использовался усилитель низкой частоты, входящий в состав профилометра Аббота (профилометр – прибор

для измерения неровностей поверхности с отсчитыванием результатов измерения на шкале в виде значений одного из параметров, используемых для оценки этих неровностей). Сигнал с выхода усилителя регистрировался либо с помощью теплового миллиамперметра, либо на экране осциллографа.

В 1944 г. с помощью этой экспериментальной установки в Казанском государственном университете Завойский при исследовании поглощения электромагнитной энергии парамагнитными солями металлов заметил, что безводные хлорид хрома и карбонат марганца, двухводные хлорид меди и ряд других неразведенных парамагнитных солей, помещенные в постоянное магнитное поле 40 Гаусс (4 мТл), начинают поглощать микроволновое излучение с частотой около 133 МГц. Прямым доказательством резонансной природы наблюдавшихся пиков было закономерное смещение их по полю с изменением частоты.

Первое публичное выступление Завойского, посвященное ЭПР, состоялось 30 января 1945 г. на защите его докторской диссертации в Физическом институте им. П. Н. Лебедева в Москве. Исключительно широкое распространение метода ЭПР обусловлено тем, что спектры парамагнитных центров в твердых и жидких телах существенно отличаются от спектров свободных атомов и молекул. Информативность метода ЭПР в реальном теле обязана тому, что парамагнитный атом или ион связан в нем электрическими или магнитными силами со своим окружением. По мнению авторитетнейших российских ученых академиков И. Е. Тамма и В. Л. Гинзбурга, открытие ЭПР было одним из крупнейших физических открытий мирового значения, сделанных в нашей стране. Известно, что с 1958 по 1963 г. Е. К. Завойский 8 раз номинировался на Нобелевскую премию по физике, а в 1958 и 1960 гг. – на Нобелевскую премию по химии. По мнению И. Е. Тамма, «большой ошибкой Нобелевского комитета было то, что комитет обошел своим вниманием эти выдающиеся исследования».

В 1945–1947 гг. Завойский продолжил исследования открытого явления, наметив основные пути развития магнитной радиоспектроскопии. От измерений в области метровых волн он перешел к дециметровому диапазону. Ему принадлежит первое исследование ЭПР в монокристаллах парамагнитных солей. Кроме того, впервые были проведены наблюдения и исследования ЭПР при низких температурах (водородных и гелиевых) благодаря возможности, предоставленной академиком

П. Л. Капицей во время краткого, но продуктивного визита Е. К. Завойского в Институт физических проблем. Наряду с поглощением он впервые наблюдал резонансную парамагнитную дисперсию, применив, независимо от Ф. Блоха, известный ныне *метод скрещенных катушек*.

В 1947 г. Завойский по приглашению И. В. Курчатова переехал в Москву и начал работать в лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН), ныне называемой Российский научный центр «Курчатовский институт». С августа 1947 г. он участвовал в работах по созданию атомной бомбы в КБ-11 (Арзамас-16). Позже Завойским и его сотрудниками были созданы приборы, позволяющие производить измерения с рекордным временем и пространственным разрешением.

В конце 1950-х гг. в нашей стране развернулись исследования в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). Огромный опыт работы, приобретенный в казанский период научной деятельности, помог Завойскому обнаружить аномальное поглощение плазмой энергии переменных электромагнитных полей большой амплитуды. Новый механизм создания высокотемпературной плазмы для УТС получил название *«турбулентный нагрев»*.

Открытие ЭПР было одним из важнейших событий в физике XX столетия. Уже вскоре после опубликования первых работ Е. К. Завойского началось интенсивное развитие исследований в этой области. У нас в стране, в Англии, Франции, США и других странах мира на основе использования метода ЭПР возникли и выросли многие научные центры. Вслед за ЭПР были открыты ядерный магнитный резонанс, ферромагнитный резонанс, антиферромагнитный резонанс, ядерный квадрупольный резонанс, магнитный акустический резонанс, многие виды двойных резонансов. Возникла и выросла в крупную самостоятельную область науки *магнитная радиоспектроскопия*. В промышленно развитых государствах образовалась целая индустрия, выпускающая радиоспектроскопическое оборудование.

После отъезда в 1947 г. Завойского из Казани созданное им научное направление продолжало развиваться. Сообщество ученых Казани, использующее различные методы магнитного резонанса, образовало *казанскую школу магнитной радиоспектроскопии*, которая воспитала десятки докторов и сотни кандидатов наук. В первое время работы велись в Казанском университете и в Физико-техническом институте Казанского филиала АН СССР.

Электронный парамагнитный резонанс, открытый в 1944 г. Завойским и его сотрудниками, является первым наблюдением эффекта избирательного поглощения веществом электромагнитного излучения. В 1946 г. Ф. Блохом и Э. Перселлом независимо друг от друга был открыт другой аналогичный эффект – *ядерный магнитный резонанс* (ЯМР). Свое название магнитный резонанс получил в связи с тем, что поглощение электромагнитного излучения в этом процессе сопровождается переориентацией магнитных моментов электронов (в случае ЭПР) или ядер (в случае ЯМР), при котором дискретно изменяется энергетическое состояние рассматриваемой системы (электронной или ядерной).

В 1946 г. Феликс Блох (1905–1983) совместно с У. Хансеном и М. Паккардом предложил метод, который отличался высокой точностью и совершенно не повреждал образца. Хотя Блох известен многими достижениями в области физики твердого тела, именно за разработку этой методики ЯМР он был удостоен Нобелевской премии. Рассмотрим физическую сущность явления ЯМР.



Ф. Блох

Явление ЯМР состоит в резонансном поглощении электромагнитной энергии, обусловленном магнетизмом ядер. Из правил частот Бора следует, что частота v электромагнитного поля, вызывающего переходы между соседними уровнями, определяется формулой:

$$\hbar v = \frac{\mu H_0}{I}$$
, где H_0 – однородное магнитное поле; I – спиновое квантовое число.

Частота $\nu = \frac{\mu H_0}{Ih}$. В силу того, что векторы момента количества движения и магнитного момента параллельны, то часто удобно характеризовать магнитные свойства ядер величиной γ , определяемой соотношением $\mu = \gamma \frac{Ih}{2\pi}$, где γ – гиromагнитное отношение. С учетом этого частота оказывается пропорциональной приложенному полю: $\nu = \gamma \frac{H_0}{2\pi}$.

Если в качестве примера взять значение $\gamma = 5,58$ для протона, то резонансная частота оказывается равной 42,577 МГц. Такая частота сигнала может быть получена обычными радиотехническими методами. Зная частоту радиосигналов, соответствующую резонансу (ориентация спинов ядер меняется на противоположную) для данного ядра, находящегося в магнитном поле заданной напряженности, можно определить магнитный момент этого ядра с высокой точностью.

Принципиальная схема экспериментальной установки для наблюдения ЯМР представлена на рис. 11. В однородное магнитное поле между полюсами электромагнита помещается пробирка (ампула), содержащая исследуемое вещество. Если с помощью небольшой катушки, витки которой охватывают пробирку, возбудить электромагнитное поле в радиочастотном (РЧ) диапазоне, то можно добиться ЯМР на определенной частоте.

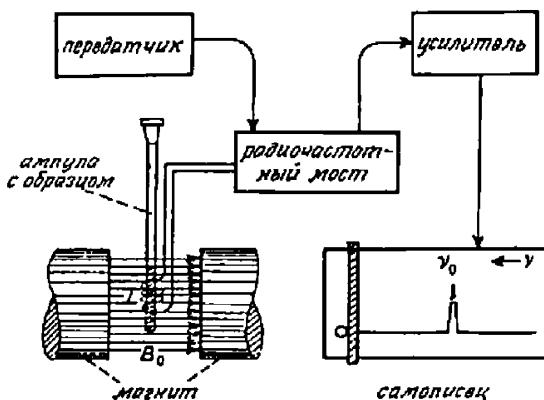


Рис. 11. Схема экспериментальной установки для наблюдения ЯМР

Катушка соединена с генератором радиочастотного поля и приемником. Сигнал регистрируется самописцем и после калибровки выдается в виде спектрограммы. Спектр ЯМР представляет собой график в координатах «интенсивность сигнала поглощения – частота радиочастотного поля» (рис. 12).

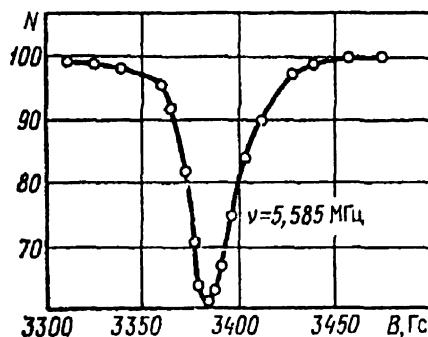


Рис. 12. Экспериментальная кривая ЯМР, полученная для ядер ^7Li . Частота радиочастотного поля, на которой наблюдался резонансный минимум, равна 5,585 МГц

В стационарных спектрометрах используется метод «непрерывной развертки», при котором исследователи добиваются наступления ЯМР при изменении (развертке) одного из параметров v или H_0 (при фиксировании другого). На практике применяют также импульсные методы получения спектра ЯМР. В этом случае в импульсных спектрометрах образец при постоянном внешнем магнитном поле H_0 подвергают воздействию короткими высокочастотными импульсами. После Фурье-преобразования сигнала можно наблюдать обычный спектр ЯМР. Спектры ЯМР высокого разрешения обычно состоят из узких, хорошо разрешенных линий, соответствующих магнитным ядрам в различном химическом окружении.

В период открытия ЯМР Ф. Блохом другой американский физик Эдуард Миллс Перселл (1912–1997) исследовал ту же проблему. Одновременно и независимо от Блоха он разработал методику измерения ядерных магнитных моментов, которая была почти идентичной методу Блоха. Глубокие знания в области радио- и микроволновой техники позволили Перселлу вместе с сотрудниками Г. Торри и Р. Паундом открыть ЯМР.



Э. М. Персэлл

В отличие от Блоха, наблюдавшего резонансное поглощение на протонах в воде, Персэлл добился успеха в обнаружении ЯМР на протонах в парафине. С помощью ЯМР Персэлл установил, что на магнитные свойства ядер в молекуле оказывают влияние магнитные поля окружающих электронов, что позволяет получить важную информацию о структуре молекулы. Он разработал метод ядерного резонанса для измерения магнитных моментов ядер и частиц, исследовал поведение ядер при низких температурах, измерил атомные константы. Совместно с Р. Паундом и Н. Бломбергеном Персэлл разрабатывал первые ЯМР-приборы. В 1948 г. Бломберген, Паунд и Персэлл опубликовали статью о релаксационном эффекте в ЯМР и ввели понятие *спиновой температуры*, превышающей температуру решетки, что послужило основой микроскопической теории релаксации в жидкостях.

Важным результатом Персэлла стало открытие с помощью метода ЯМР *радиоизлучения межзвездного нейтрального водорода*. В 1945 г. голландским астрономом Хендриком ван де Хюлстом (1918–2000) была указана принципиальная возможность наблюдения радиоизлучения межзвездного нейтрального водорода на волне 21 см. Это излучение обусловлено сверхтонким расщеплением основного уровня энергии атома водорода на два близких подуровня. Причиной расщепления является взаимодействие спинов ядра протона и электрона. Энергия атома при параллельном расположении спинов электрона и ядра несколько больше, чем при антипараллельном. При спонтанном

изменении ориентации спина электрона на противоположную происходит испускание кванта излучения с $\lambda = 21,1$ см. В 1948 г. советский астрофизик Иосиф Самуилович Шкловский (1916–1985) рассчитал ожидаемую интенсивность радиолинии и показал, что она достаточна для того, чтобы линию можно было обнаружить методами радиоастрономии. В каждом отдельном атоме переход, рождающий квант радиоизлучения, происходит в среднем один раз за 11 млн лет, но благодаря высокой распространенности атомарного водорода в межзвездной среде радиолиния оказывается достаточно интенсивной.

В 1951 г. Перселл совместно с Г. Юинем установили радиоантенну на крыше Лаймановской лаборатории в Гарварде. С помощью метода ЯМР радиоизлучение атомов водорода было обнаружено. Почти одновременно с американскими учеными радиоизлучение атомов водорода наблюдали голландские астрономы К. Мюллер, Я. Оорт, а также их австралийские коллеги. Радиоизлучение атомов водорода на длине волны 21 см является эффективным средством исследования Вселенной. Более половины массы галактического межзвездного вещества составляет нейтральный водород в основном состоянии. Его можно исследовать только по излучению в линии 21 см. Поэтому исследования радиоизлучения водорода дают очень ценные, часто уникальные, сведения о распределении нейтрального водорода в космическом пространстве.

В 1952 г. Ф. Блох и Э. Перселл были награждены Нобелевской премией по физике «за развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия».

Перейдем к обсуждению методов ЯМР-спектроскопии. ЯМР-спектроскопия позволяет определять точное расположение атомов в молекуле, т. е. молекулярную структуру различных соединений. Частота ЯМР зависит от типа ядра, для которого наблюдается ядерный магнитный резонанс, и напряженности магнитного поля. Из-за того, что окружающие ядро электроны частично экранируют магнитное поле, а степень экранировки зависит от вида соседствующих ядер и межъядерных расстояний, то наблюдается химический сдвиг. Различные группы, например HO, HC, HN и т. д., имеют разный химический сдвиг, и ЯМР для них наблюдается на разных частотах. Для большего числа структурных элементов значения химических сдвигов сведены в таблицы. Поскольку ширина спектральных линий

ядерно-магнитного резонанса чрезвычайно мала, а частота резонансного поглощения может быть измерена очень точно, ЯМР-метод дает высокую точность при определении химических сдвигов.

ЯМР используется также для изучения механизма и кинетики химических реакций. На ЯМР основаны приборы для прецизионного измерения и стабилизации магнитного поля – квантовые магнитометры.

Современное состояние теории и экспериментального обеспечения ЯМР позволяет считать его одним из самых мощных методов получения информации о строении и поведении многоэлектронных систем.

Недавно в ходе совместных работ научных групп IBM Almaden Research Center, Гарвардского университета и Массачусетского технологического института обнаружено, что методами ЯМР можно манипулировать квантовой информацией. Таким образом, с помощью ЯМР впервые был реализован элементарный квантовый алгоритм с использованием двух кубитов, в качестве которых в одном случае выступали спины ядер атомов водорода, а в другом – водорода и углерода. Подобные исследования направлены на создание квантового ЯМР-компьютера – компьютера XXI в. Наконец, явление ЯМР лежит в основе одного из инновационных направлений в области получения и обработки информации – ЯМР-томографии.

3.2. Микроволновая спектроскопия

Микроволновая спектроскопия – область радиоспектроскопии, в которой исследуются спектры веществ в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн (микроволны или сверхвысокие частоты). Остановимся на исследованиях тонкой структуры водорода методами радиоспектроскопии (работы У. Лэмба и П. Куша), создании мазера и лазера, методах исследований лазерной спектроскопии, разработке и применении СВЧ-устройств.

Американский физик Уиллис Юджин Лэмб (1913–2008) с 1942 по 1952 г. работал по совместительству в радиационной лаборатории Колумбийского университета. Его исследования были связаны главным образом с радарной и микроволновой техникой. Работая вместе с группой Раби, занимавшейся молекулярными пучками (см. выше), Лэмб заинтересовался метастабильными состояниями атомов.



У. Ю. Лэмб

Обычно возбужденное, или высокоэнергетическое, состояние атома быстро распадается, и атом, испуская излучение, переходит в состояние с более низкой энергией. Наиболее сильно возбужденные состояния распадаются с испусканием одного фотона примерно за 10^{-8} с. Метастабильные состояния существуют гораздо дольше.

Первоначально Лэмб был физиком-теоретиком, но его наиболее известные работы связаны с серией необычайно тонких экспериментов, большинство из которых было выполнено в сотрудничестве с Р. Резерфордом в Колумбийском университете. По мере расширения сферы своих исследований внимание Лэмба привлекли процессы поглощения и испускания микроволнового излучения атомами. Зная о предпринятых в 1930-х гг. безуспешных попытках обнаружить поглощение микроволнового излучения в газе, состоящем из возбужденных атомов водорода, Лэмб сначала посчитал неудачу следствием неправильного выбора микроволновой техники. Но впоследствии он пришел к выводу, что обнаружить поглощение мешал метод, который экспериментаторы избрали для возбуждения атомов.

Как известно, в атоме водорода один электрон движется вокруг ядра по одной из серии стационарных орбит. Находясь на своей орбите, электрон обладает вполне определенной энергией. Для того чтобы он перешел на более высокую орбиту, атом должен поглотить фотон, энергия которого в точности соответствует разности энергий между орбитами. То же самое происходит и при переходе электрона на более низкую орбиту – атом должен испустить фотон, обладающий соответствующей энергией. Такие переходы порождают спектр атомарного водорода, состоящий из отдельных четких линий. Многие из этих линий в спектре водорода обладают «тонкой структурой». Если рассматривать их с большим увеличением, можно установить, что они состоят из двух или большего числа близко расположенных линий. Орбитальные энергетические уровни также расщепляются на близко расположенные подуровни. Переходы между соседними уровнями тонкой структуры требуют поглощения или испускания излучения в микроволновом диапазоне длин волн.

Лэмб решил воспользоваться усовершенствованной микроволновой техникой для того, чтобы уточнить спектроскопические измерения между энергетическими уровнями атома водорода $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$. Рассмотрим схему эксперимента Лэмба – Резерфорда (рис. 13). В вакуумном сосуде находилась вольфрамовая печь 1, создающая пучок атомов водорода в основном состоянии. Пучок, нагретый печью до температуры около 2000 К \approx 0,2 эВ, направлялся на электрод 4, способный эмитировать электроны, если его бомбардируют частицы, энергия которых превышает работу выхода. В эксперименте использовался образец с работой выхода несколько электрон-вольт, поэтому кинетическая энергия атомов была недостаточной для выбивания из него электронов. Пушка 2 испускала электроны, достаточно энергичные для возбуждения атома водорода на высокие уровни. В дальнейшем, после каскада спонтанных переходов, атомы большей частью оказывались в основном состоянии. Однако на метастабильном уровне атомы накапливаются. Энергия возбуждения второго уровня (10,2 эВ) вполне достаточна для преодоления работы выхода из вещества электрода. На электрод 4 попадает пучок возбужденных атомов и выбивает из него электроны, генерируя в цепи электрический ток.

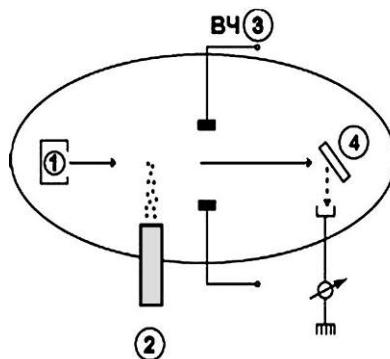


Рис. 13. Схема опыта Лэмба – Резерфорда

Затем исследователи подвергли пучок микроволновому облучению во внешнем магнитном поле. Некоторые из атомов поглощали излучение и переходили в короткоживущее состояние. Это означало, что два соответствующих энергетических уровня не тождественны, а разделены небольшой разностью энергий, получившей название лэмбовского сдвига. Величину энергетической щели между близкими уровнями позволяет измерить источник высокочастотного излучения 3.

Итак, лэмбовский сдвиг – смещение уровня энергии $2s_{1/2}$ относительно уровня $2p_{1/2}$ в атоме водорода и водородоподобных атомах. Согласно релятивистской теории Дирака, эти уровни должны совпадать, поэтому после обнаружения лэмбовского сдвига возникла проблема согласования данных эксперимента с теорией Дирака. Она была решена при внесении в теорию Дирака радиационных поправок, учитывающих взаимодействие электрона с флуктуациями вакуума. Теперь в квантовой электродинамике считается, что именно такое взаимодействие приводит в атоме водорода к несовпадению (относительному сдвигу) энергетических уровней $2p_{1/2}$ и $2s_{1/2}$.

Открытие Лэмба заложило основы *квантовой электродинамики* – ключевого направления современной физики элементарных частиц. Когда была создана теория перенормировок, лэмбовский сдвиг оказался первым физическим эффектом, который подтвердил ее правильность (и соответственно, правильность квантовой электродинамики, в основе которой лежит эта теория). Вычисленное теоретическое значение лэмбовского сдвига оказалось равным 1,001159652415 магнетонам Бора, что поразительно точно совпало с результатом эксперимента.

Перейдем к рассмотрению экспериментальной работы американского физика Поликарпа Куша (1911–1993). В первые годы своей работы в Колумбийском университете Куш в сотрудничестве с Раби применял метод резонанса в исследовании атомных и молекулярных свойств молекулярных пучков. Магнитный момент электрона принадлежит к числу свойств, часто фигурирующих в теоретических расчетах атомной физики.



П. Куш

Электрон обладает собственным магнитным моментом, и если он связан с атомом, то обладает орбитальным магнитным моментом, так как обращается вокруг ядра. Используя магнитный резонанс, Куш и американский физик Г. Фоли исследовали магнитный момент электрона. Им удалось измерить отношение полного внутреннего и полного орбитального магнитных моментов пучков атомов в различных энергетических состояниях. Эти полные моменты зависят от собственного и орбитального моментов отдельных электронов и однозначно определяются энергетическим состоянием атома. Любое отклонение величины экспериментально измеренного отношения от его теоретически предсказанного значения должно свидетельствовать о том, что собственный и орбитальный магнитные моменты электрона не равны. Поскольку создать чистые атомные состояния трудно, Куш и Фоли выполнили эксперимент с несколькими различными комбинациями состояний и с несколькими атомами в одном и том же энергетическом

состоянии. Результат всех измерений неизменно оказывался одним и тем же: собственный магнитный момент электрона чуть больше чем на 0,1% превышает его орбитальный магнитный момент.

Открытия Лэмба и Куша побудили Дж. Швингера, С. Томонагу и Р. Фейнмана пересмотреть взгляды Дирака и сформулировать новую теорию, получившую название квантовой электродинамики, которая с высокой точностью предсказала лэмбовский сдвиг и экспериментальное значение магнитного момента электрона, полученное Кушем и Фоли.

В 1955 г. У. Лэмб был удостоен Нобелевской премии по физике «за открытия, связанные с тонкой структурой спектра водорода». Премию Лэмб разделил с П. Кушем, получившим награду «за точное определение магнитного момента электрона».

Стремительный прогресс в микроволновой спектроскопии в значительной мере связан с изобретением электровакуумных приборов – *магнетрона и клистрона*.

Термин «магнетрон» был предложен А. Халлом, который в 1921 г. опубликовал результаты теоретических и экспериментальных исследований работы прибора в статическом режиме и предложил ряд конструкций магнетрона. Однако магнетрон Халла не был предназначен для получения высокочастотных электромагнитных волн. Генерирование электромагнитных колебаний в дециметровом диапазоне посредством магнетрона открыл и запатентовал в 1924 г. чехословацкий физик А. Жачек и немецкий ученый Э. Хабан. Независимо друг от друга они обнаружили возможность генерации магнетроном дециметровых волн (порядка 100 МГц – 1 ГГц).

В 1920-е гг. исследованиями в области генерирования СВЧ-колебаний с применением магнитных полей занимались также А. А. Слуцкин и Д. С. Штейнберг (1926–1929 гг., СССР), К. Окабе и Х. Яги (1928–1929 гг., Япония). К 1936–1937 гг. мощность генераторов на основе магнетрона была увеличена в несколько раз (до сотен ватт на длине волны 9 см) путем создания *многорезонаторного магнетрона* (с использованием массивного медного анода с несколькими резонаторами и охлаждением). Авторы этого изобретения: М. А. Бонч-Бруевич, Н. Ф. Алексеев и Д. Е. Маляров.

Резонансный магнетрон (рис. 14) состоит из анодного блока, который представляет собой, как правило, металлический толстостен-

ный цилиндр с прорезанными в стенках полостями, выполняющими роль объемных резонаторов. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему. К анодному блоку прикрепляется цилиндрический катод, внутри которого находится подогреватель. Магнитное поле, параллельное оси прибора, создается внешними магнитами или электромагнитом. Для вывода СВЧ-энергии используется проволочная петля, закрепленная в одном из резонаторов, или отверстие из резонатора наружу цилиндра.



Rис. 14. а – магнетрон в продольном разрезе; б – схема конструкции магнетрона

Электроны, испускаемые катодом, под действием магнитного поля движутся по круговым траекториям. В строго определенное время они пересекают на периферии открытые пазы резонаторов. При этом электроны отдают свою кинетическую энергию, возбуждая колебания в резонаторах. Затем электроны возвращаются на катод, и процесс повторяется. Благодаря такому устройству время пролета и межэлектродные емкости не препятствуют генерации СВЧ-энергии. Магнетроны могут быть сделаны большого размера, и тогда они дают мощные импульсы СВЧ-энергии.

Однако у магнетрона имеются недостатки. Например, резонаторы для очень высоких частот становятся столь малыми, что их трудно изготавливать, а сам такой магнетрон из-за своих малых размеров не может быть достаточно мощным. Кроме того, для магнетрона нужен тяжелый магнит, причем требуемая масса магнита возрастает с увеличением мощности прибора. В связи с этим, например, для самолетных бортовых установок мощные магнетроны не подходят.

Расскажем о некоторых технических применениях магнетрона.

Радарные устройства. В них волновод подсоединен к антенне, которая может представлять собой как щелевой излучатель, так и конический рупорный облучатель в паре с параболическим отражателем (так называемая тарелка). Магнетрон управляется короткими высоконапряженными импульсами подаваемого напряжения, в результате чего излучается короткий импульс микроволновой энергии. Небольшая порция этой энергии отражается обратно к антенне и волноводу, где она направляется к чувствительному приемнику. После дальнейшей обработки сигнала, он появляется на электронно-лучевой трубке в виде радарной карты.

Микроволновые печи. В них волновод заканчивается отверстием, прозрачным для радиочастот (непосредственно в камере для приготовления пищи). Важно, чтобы во время работы печи в ней находились продукты. Тогда микроволны поглощаются вместо того, чтобы отражаться обратно в волновод, где интенсивность стоячих волн может вызвать искрение. Продолжительное искрение способно вывести магнетрон из строя.

Для клистрона, основанного на несколько ином принципе, не требуется внешнее магнитное поле. В нем электроны движутся по прямой – от катода к отражательной пластине, а затем обратно. При этом они пересекают открытый зазор объемного резонатора в форме тороида. Управляющая сетка и сетки резонатора группируют электроны в отдельные «сгустки», так что электроны пересекают зазор резонатора только в определенные моменты времени. Промежутки между сгустками согласованы с резонансной частотой резонатора таким образом, что кинетическая энергия электронов передается резонатору, вследствие чего в нем устанавливаются мощные электромагнитные колебания.

Клистроны подразделяются на два класса: пролетные и отражательные.

В *пролетном клистроне* электроны последовательно пролетают сквозь зазоры объемных резонаторов. В простейшем случае резонаторов два: входной и выходной. Дальнейшим развитием пролетных клистронов являются каскадные многорезонаторные клистроны, которые имеют один или несколько промежуточных резонаторов, расположенных между входным и выходным резонаторами. В *отражательном клистроне* (рис. 15) используется один резонатор, дважды пронизыва-

емый электронным потоком. Возвращение электронов осуществляется с помощью отражателя, находящегося под отрицательным постоянным потенциалом по отношению к катоду. Для работы кластрона как генератора СВЧ-колебаний необходимо, чтобы сгустки электронного потока, сформированные при первом прохождении сквозь резонатор, проходили через резонатор при обратном движении в те моменты, когда в нем имеется тормозящее высокочастотное электрическое поле.

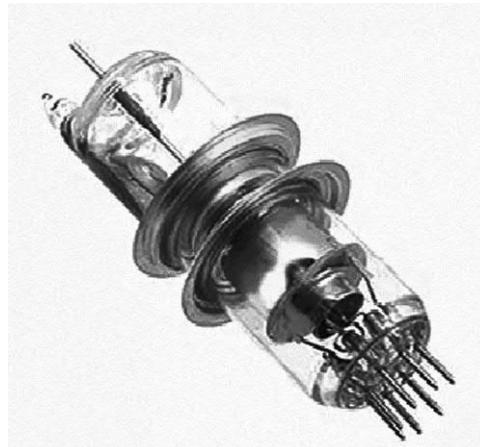


Рис. 15. Отражательный кластрон

Первые конструкции пролетных кластронов были предложены и осуществлены в 1938 г. американскими учеными, братьями Р. Варианом и С. Варианом. Отражательный кластрон был разработан в 1940 г. советскими учеными Н. Д. Девятковым, Е. Н. Данильцевым, И. В. Пискуновым и независимо от них В. Ф. Коваленко.

Отражательные кластроны применяют в различной аппаратуре в качестве маломощных генераторов. Вследствие низкого КПД их не используют для получения больших мощностей и применяют в качестве гетеродинов СВЧ-приемников, в измерительной аппаратуре и в маломощных передатчиках. Разрабатываются варианты конструкции кластрона, рассчитанного на большие выходные мощности в миллиметровом диапазоне. Кластроны могут также служить усилителями СВЧ-сигналов. Для этого нужно входной сигнал подавать на сетки объемного резонатора, и тогда плотность электронных сгустков будет изменяться в соответствии с этим сигналом.

Рассмотрим еще два электровакуумных прибора, работающих в СВЧ-диапазоне. *Лампа бегущей волны* (ЛБВ) – электровакуумный прибор, в котором для усиления СВЧ-колебаний используется длительное взаимодействие бегущей электромагнитной волны и электронного потока, движущихся в одном направлении. Электровакуумный прибор, работа которого основана на взаимодействии электронного потока и бегущей волны, впервые предложил и запатентовал американский инженер А. Гаев в 1936 г. Первую ЛБВ создал американский ученый Р. Компфнер в 1943 г., а первые теоретические работы по ЛБВ опубликовал Дж. Пирс в 1947 г.

Механизм взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной можно объяснить следующим образом. Электроны, синхронно двигаясь вместе с волной, под воздействием ускоряющих (положительная полуволна) и тормозящих (отрицательная полуволна) участков ее электрического поля группируются в «сгустки». Последние располагаются в тех местах поля, где ускоряющая электронами полуволна переходит в тормозящую. В случае равенства скоростей волны и электронов обмена энергией между ними нет, усиление отсутствует. Если скорость электронов немного превышает скорость волны, «сгустки» электронов, обгоняя волну, входят в тормозящие участки поля и под их действием тормозятся. Кинетическая энергия, потерянная электронами при торможении, переходит в энергию бегущей волны.

Основное назначение ЛБВ – усиление СВЧ-колебаний (1–300 ГГц) в приемных и передающих устройствах. ЛБВ используют также для преобразования и умножения частоты. Особенно ценным свойством ЛБВ является их широкополосность. В этом отношении ЛБВ значительно превосходят усилительные кристаллоны, которые могут обеспечивать весьма высокое усиление, но имеют значительно более узкую полосу частот.

Лампа обратной волны (ЛОВ) – электровакуумный прибор, в котором для генерации СВЧ-колебаний используется взаимодействие электронного потока с электромагнитной волной, бегущей по замедляющей системе в направлении, обратном направлению движения электронов.

Явление генерирования СВЧ-колебаний в результате взаимодействия электронного потока и обратной волны обнаружил и описал американский физик С. Мильман в 1950 г. Название ЛОВ предложили

американские ученые Р. Компфнер и Н. Уильямс в 1953 г., впервые исследовавшие работу ламп этого типа.

В ЛОВ созданный электронной пушкой прямолинейный поток электронов проходит сквозь замедляющую систему, образованную рядом встречных пластин, и возбуждает в ней электромагнитную волну, бегущую в направлении, обратном направлению движения электронов. Под влиянием электрического поля бегущей волны в электронном потоке образуются «сгустки» электронов. Каждый «сгусток» поочередно проходит зазоры между пластинами замедляющей системы, в каждом из которых встречает очередную пучность напряжения бегущей волны и тормозится ее электрическим полем (условие генерирования колебаний). Это условие выполняется, когда время пролета «сгустка» из одного зазора в соседний немного меньше половины периода колебаний. Повышение (понижение) напряжения между катодом электронной пушки и замедляющей системой уменьшает (увеличивает) это время пролета и, следовательно, уменьшает (удлиняет) период генерируемых колебаний. Для фокусировки электронного потока в ЛОВ применяют постоянное магнитное поле, направленное по оси потока, или электростатическую систему фокусировки.

Современные ЛОВ покрывают диапазон частот от единиц ГГц до единиц ТГц ($1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$). Поэтому ЛОВ применяют в широкодиапазонных генераторах для радиотехнических измерений и радиоспектроскопии, в основном для генерации *терагерцового излучения* (см. модуль № 6), в гетеродинах быстро перестраиваемых приемников, в задающих генераторах передатчиков с быстрой перестройкой частоты и т. д.

К другим СВЧ-устройствам можно отнести плоские вакуумные триоды, генератор на диоде Ганна. Подробно об их конструкции и принципе действия можно прочитать в соответствующей литературе.

В заключение отметим, что СВЧ-излучение сыграло важную роль в исследованиях электронных свойств твердых тел. Когда твердое тело оказывается в магнитном поле, свободные электроны в нем начинают вращаться вокруг магнитных силовых линий в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля. Частота вращения, называемая циклотронной, прямо пропорциональна напряженности магнитного поля и обратно пропорциональна эффективной массе электрона. Она определяет ускорение электрона под действием какой-либо силы

в кристалле. Она отличается от массы свободного электрона, которой определяется ускорение электрона под действием какой-либо силы в вакууме. Различие обусловлено наличием сил притяжения и отталкивания, с которыми действуют на электрон в кристалле окружающие атомы и другие электроны. Если на твердое тело, находящееся в магнитном поле, падает СВЧ-излучение, то это излучение сильно поглощается, когда его частота равна циклотронной частоте электрона. Данное явление называется циклотронным резонансом. Оно позволяет измерить эффективную массу электрона. Подобные измерения позволили получить ценную информацию об электронных свойствах полупроводников, металлов и металлоидов.

В настоящее время методы микроволновой спектроскопии применяют для получения из вращательных спектров сведений о строении и динамике молекул, их химическом и изотопном составе, а при действии электрических или магнитных полей – дипольных моментов, поляризуемостей и магнитных восприимчивостей молекул. Из исследований сверхтонкой структуры молекулярных спектров получают сведения о квадрупольных и магнитных моментах ядер и о внутренних полях в молекуле. Исследования уширения и сдвига молекулярных и атомных линий при соударениях в газе дают информацию о взаимодействиях частиц. Прецизионное измерение частот переходов в простейших квантовых системах позволяет оценить точность фундаментальных теорий. Микроволновые спектральные линии некоторых молекул и атомов наблюдают в космическом пространстве. С их помощью получают сведения о составе межзвездного вещества, химических процессах и физических условиях в различных областях космического пространства.

Модуль № 4. Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники

В этом модуле будут рассмотрены вопросы, связанные с историей развития и современными достижениями в области квантовой и твердотельной электроники. Но прежде всего определим предмет исследования этих направлений радиофизики.

Твердотельная электроника – раздел электроники, изучающий принципы действия и функциональные возможности электронных приборов, в которых движение электронов или иных носителей заряда, обуславливающих электрический ток, происходит в объеме твердого тела. Твердотельная электроника рассматривает основы конструирования электронных устройств, построенных на твердотельных приборах. К таким приборам относятся, в частности, полупроводниковые диоды и интегральные схемы.

Радиофизические методы и устройства находят широкое применение в *квантовой электронике* (или *квантовой радиофизике*). Предметом ее изучения являются методы усиления и генерации электромагнитного излучения, основанные на использовании явления вынужденного излучения в неравновесных квантовых системах, а также свойства получаемых таким образом усилителей и генераторов и методы их применения в электронных приборах.

В первой половине XX в. в оптике преимущественно развивались квантовые представления, а в радиофизике – волновые. Общность радиофизики и оптики, обусловленная общей квантовой природой электромагнитных волновых процессов, не проявлялась до тех пор, пока не возникла радиоспектроскопия. Особенность радиоспектрскопических исследований состоит в использовании источников монохроматического излучения и в том, что в радиодиапазоне спонтанное излучение гораздо слабее, а возбужденные уровни заселены за счет теплового возбуждения уже при комнатных температурах ($T = 300$ К). Это обстоятельство сказывается на резонансном поглощении радиоволн. Как раз при проведении радиоспектрскопических исследований и возникла мысль о том, что путем создания инверсии заселеностей уровней в среде можно добиться усиления радиоволн. Если же какая-либо система усиливает радиоизлучение, то при соответствующей обратной связи она будет генерировать это

излучение. В квантовой электронике первым прибором, в котором была реализована данная идея, стал мазер.

4.1. Изобретение мазера и лазера

В 1916 г. Альберт Эйнштейн (1879–1955) доказал, что переход электрона в возбужденном атоме с верхнего энергетического уровня на нижний уровень может происходить под действием внешнего электромагнитного поля (пролетающего фотона), частота которого равна разности энергий этих уровней. Возникающее при этом излучение называют *вынужденным* или *индуцированным*.

При взаимодействии возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же частоты, распространяющийся в том же направлении (рис. 16). На волновом языке это означает, что атом излучает электромагнитную волну, частота, фаза, поляризация и направление распространения которой точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. Именно индуцированное излучение является физической основой работы лазеров.

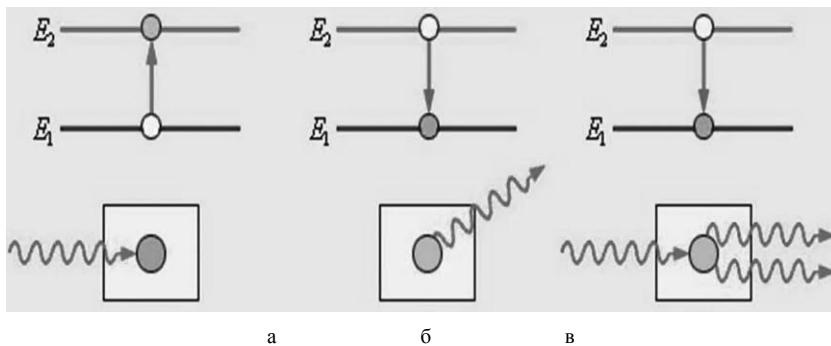


Рис. 16. Схема возможных переходов между двумя энергетическими состояниями атома с поглощением или испусканием кванта: а – поглощение; б – спонтанное испускание; в – индуцированное (вынужденное) испускание кванта

В 1938 г. сотрудник Московского энергетического института Валентин Александрович Фабрикант (1907–1991) высказал идею о принципиальной возможности создания среды, не ослабляющей, а усили-

вающей (вследствие вынужденного излучения) проходящее через нее излучение, – *среды с инверсной заселенностью*. Он также указал на конкретные экспериментальные методы ее достижения.

В 1951 г. В. А. Фабрикант совместно с М. М. Вудынским и Ф. А. Бутаевой сформулировали принцип усиления электромагнитного излучения для среды, в которой создана инверсная заселенность, т. е. ситуация, когда возбужденных атомов больше, чем атомов на основном уровне. В частности, было показано, что прохождение света сквозь среду с инверсной заселенностью приводит к экспоненциальному возрастанию его интенсивности. Это был важнейший шаг к изобретению лазера. Однако эта работа, к сожалению, осталась практически не замеченной.



В. А. Фабрикант

В 1954 г. советскими физиками Александром Михайловичем Прокоровым (1916–2002) и Николаем Геннадьевичем Басовым (1922–2001) были предложены методы формирования молекулярных пучков с последующей селекцией возбужденных и невозбужденных молекул и пропусканием их через объемный резонатор.

Здесь впервые удалось соединить в одно целое представления об индуцированном излучении и инверсной заселенности с представлениями о резонаторах, обратной связи и генерации когерентного электромагнитного излучения. Этого было уже достаточно для создания

квантового генератора, работающего на энергетических переходах в радиодиапазоне в молекулярных пучках.



Н. Г. Басов и А. М. Прохоров



Ч. Таунс

В 1954 г. в Колумбийском университете американский физик Чарльз Таунс (1915–2015) вместе со своими аспирантами Дж. Гордоном и Х. Цайгером построил генератор СВЧ-диапазона ($\lambda = 1,24$ см) и назвал его «мазером» (MASER). Эта аббревиатура расшифровывается как “Microwave amplification by stimulated emission of radiation” – «микроволновое усиление с помощью индуцированного (стимулированного) излучения».

В первом мазере молекулы аммиака проходили через электрические поля специальной конфигурации, которые отталкивали молекулы, находящиеся в основном состоянии, и фокусировали возбужденные молекулы в резонансной полости. Когда в полости накапливалась достаточная концентрация возбужденных молекул, становилась возможной осцилляция. Небольшая порция излучения нужной частоты (с энергией фотона, равной разности между основным и возбужденным состояниями у молекулы аммиака) может вызвать лавинообразный рост индуцированного излучения, возбу-

ждение еще большего числа молекул, находившихся в основном состоянии, и еще большее возрастание этого излучения. В результате был получен микроволновый квантовый усилитель с низким уровнем шума.

После триумфального завершения работ по мазерам возник вопрос о продвижении в сторону видимой части спектра электромагнитных колебаний, т. е. о создании генераторов оптического диапазона (лазеров). Аббревиатура LASER означает “Light amplification by stimulated emission of radiation” – «световое усиление с помощью индуцированного излучения». По словам Прохорова, к основным трудностям на пути создания лазера в то время относились:

- 1) отсутствие конкретных методов достижения инверсной заселенности в оптическом диапазоне;
- 2) отсутствие резонаторов, способных работать в оптическом диапазоне длин волн.

После появления мазера оба эти препятствия были блестящим образом устранены. В 1955 г. Прохоров и Басов предложили создавать инверсную заселенность не путем селекции молекул в молекулярных пучках, а за счет воздействия на них внешним электромагнитным излучением резонансной частоты. Этот метод, получивший впоследствии название метода трех уровней, позволяет достигать инверсной заселенности в любых многоуровневых системах, независимо от величины энергии кванта. Метод трех уровней лежит в основе работы всех лазеров с оптической накачкой.

Столь же успешно было преодолено и второе из препятствий – отсутствие подходящих резонаторов для оптического диапазона. В 1958 г. Прохоров предложил *открытый резонатор* – плоские параллельные пластины-зеркала. В том же году Таунс и американский физик Артур Шавлов (1921–1999) сформулировали требования, которым должен удовлетворять квантовый генератор, работающий в области инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучений.

Американский физик Теодор Мейман (1927–2007) вошел в историю как человек, которому впервые удалось получить лазерный эффект в твердом теле. В то время большинство ученых пытались создать лазер непрерывного действия. Мейман убедился в возможности построения такого лазера, однако его надежность оказалась очень низкой.



Т. Мейман

Поиск нетрадиционных решений натолкнул его на мысль о целесообразности использования сверхъярких стробоскопических ламп, применяемых в фотографии. Проведенные расчеты показали, что эти лампы действительно обеспечивают оптическую накачку, и они были применены в импульсном лазере (рис. 17). 16 мая 1960 г. заработал первый в мире лазер с длиной волны 0,69 мкм.

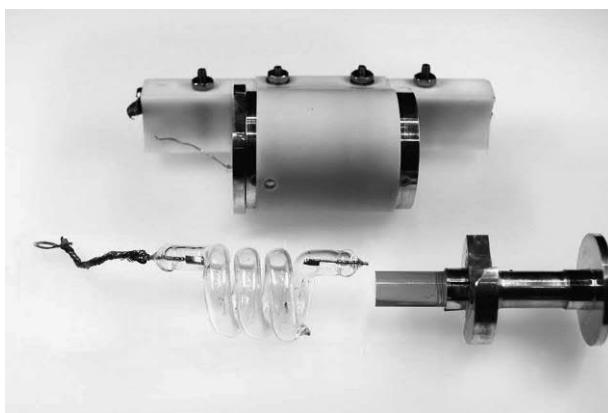


Рис. 17. Лазер Т. Меймана

В 1961 г. компания Bell Labs сообщила о создании первого газового лазера, работающего в непрерывном режиме на смеси гелия и неона. Затем был получен лазерный эффект на парах цезия, и началась

демонстрация возможностей построения лазеров на сотнях различных материалов. В 1961–1964 гг. были разработаны другие твердотельные, а также жидкостные, газовые и полупроводниковые лазеры. В 1970-е гг. начал работать первый лазер на свободных электронах, а в 1980-е гг. – рентгеновский лазер с высокотемпературной плазмой в качестве активной среды.

Несмотря на большое разнообразие типов активных сред и методов получения инверсной заселенности все лазеры имеют три основные блока: активную среду, систему накачки и резонатор (рис. 18).

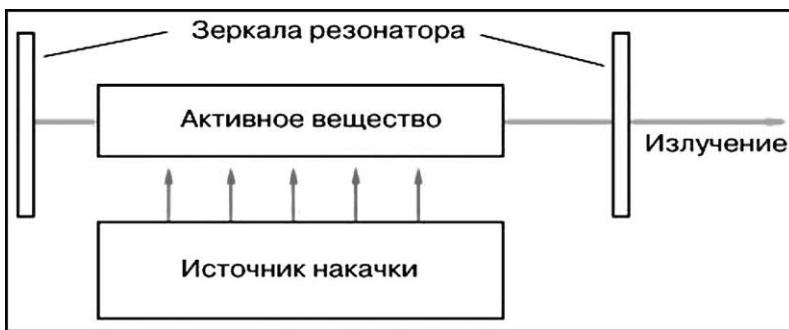


Рис. 18. Принципиальная схема лазера

- Активная среда – вещество, в котором создается инверсная заселенность. Она может быть твердой (кристаллы рубина или алюмоиттриевого граната, стекло с примесью неодима), жидкой (растворы анилиновых красителей или растворы солей неодима в кюветах) или газообразной (смесь гелия с неоном, аргон, углекислый газ, водяной пар низкого давления в стеклянных трубках). Название лазерам дается по типу активной среды.
- Резонатор представляет собой пару зеркал, параллельных друг другу, между которыми помещена активная среда. Одно зеркало («глухое») отражает весь падающий свет. Второе – полупрозрачное – часть излучения возвращает в среду для осуществления вынужденного излучения, а часть выводит наружу в виде лазерного луча. Подбирая расстояние между зеркалами, резонатор можно настроить так, что лазер будет генерировать излучение только одного, строго определенного типа (так называемую моду).

- Накачка создает инверсную заселенность в активных средах, причем для каждой среды выбирается наиболее удобный и эффективный способ накачки. Так, в твердотельных и жидкостных лазерах используют импульсные лампы, газовые среды возбуждают электрическим разрядом, полупроводники – электрическим током. После того как за счет накачки в активной среде, помещенной в резонатор, достигнуто состояние инверсии, его атомы время от времени начинают спонтанно переходить на основной уровень, излучая фотоны. При этом только фотоны, движущиеся вдоль оси резонатора, отражаясь в зеркалах, порождают когерентное излучение.

Таким образом, среда с инверсной заселенностью способна усиливать световую волну. Для того чтобы превратить усилитель в генератор, необходимо осуществить обратную связь. В лазерах это достигается за счет того, что часть излученной активным веществом энергии отражается от зеркал и вновь возвращается в активное вещество. Следует отметить, что система из двух параллельных зеркал обладает резонансными свойствами только на определенных частотах и выполняет в лазере ту же роль, которую в низкочастотных генераторах играет колебательный контур.

Если в процессе работы лазера *добротность резонатора* не изменяется, то лазер работает в режиме свободных колебаний. В этом случае при стационарной накачке он будет функционировать в непрерывном режиме, а при импульсной накачке – в импульсном. Достоинством непрерывного режима является то, что в нем наиболее полно реализуются такие свойства лазеров, как монохроматичность, когерентность, направленность излучения и низкий уровень шумов.

В 1964 г. «за фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию излучателей и усилителей на лазерно-мазерном принципе» Прохоров, Басов и Таунс были удостоены Нобелевской премии по физике.

Необычные свойства лазерного излучения находят широкое научное и практическое применение. Лазеры используются в самых различных областях – от коррекции зрения до управления транспортными средствами, от космических полетов до термоядерного синтеза. В модуле № 5 будет рассказано о некоторых инновационных применениях лазерного излучения – лазерном охлаждении атомов и прецизионной лазерной спектроскопии.

Лазер стал одним из самых значимых изобретений XX в. Оно произвело революцию в оптике: появились не существовавшие до этого мощные источники когерентного излучения с высокой направленностью, яркостью, способные концентрировать громадную энергию в чрезвычайно малых спектральных, временных и пространственных интервалах. Хотя первый лазер был построен совсем недавно, современную жизнь уже невозможно представить без лазеров.

4.2. Изобретение транзистора

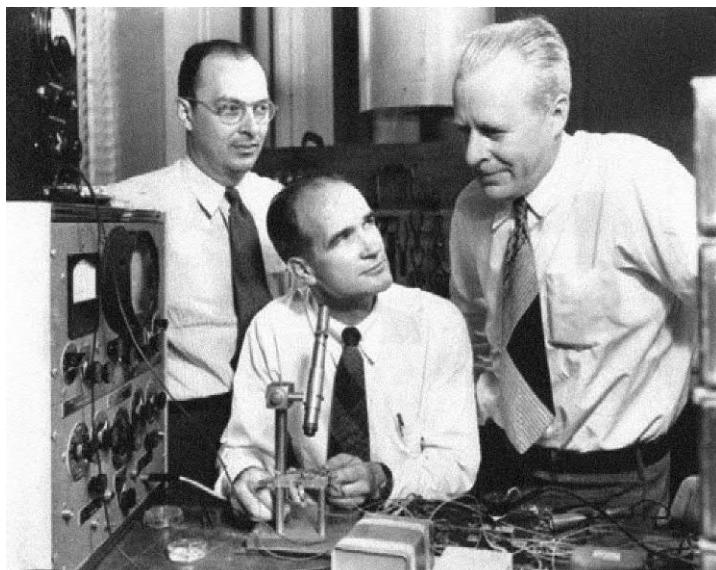
К середине прошлого века проблема замены громоздких, энергоемких и недолговечных электровакуумных ламп была весьма актуальной. Ее решение предполагалось найти при переходе к полупроводниковым материалам. Над этим одновременно работало несколько исследовательских групп. Так, по окончании Второй мировой войны основательным изучением электропроводности полупроводников занялись специалисты фирмы Bell Labs. Именно там под руководством американского ученого Уильяма Шокли (1910–1989) был создан первый транзистор.

Шокли пригласил в свою группу физика-теоретика Джона Бардина (1908–1991) и поставил задачу, которую безуспешно пытался решить до войны, – увеличить проводимость полупроводниковых материалов, используя внешнее электрическое поле.

Сначала исследователи не добились успеха. Правда, Бардин, работавший в тесном сотрудничестве с экспериментатором Уолтером Браттейном (1902–1987), смог объяснить причину неудачи. Он выдвинул гипотезу о том, что внешнее напряжение не создает необходимого поля внутри полупроводника из-за слоя электронов, находящегося на его поверхности. Как только удалось разобраться в поверхностных свойствах полупроводников, Бардин и Браттейн смогли построить первый работающий транзистор.

С транзистором – одним из самых значимых изобретений в истории науки и техники – связана любопытная история. Однажды Браттейн почти вплотную сблизил два игольчатых электрода на поверхности полупроводника (германия) и случайно перепутал полярность прикладываемых к ним напряжений. К своему удивлению, он заметил

на экране осциллографа усиление сигнала. 16 декабря 1947 г. Бардин и Браттейн продемонстрировали полупроводниковый усилитель, названный позже *точечно-контактным транзистором*. Термин «транзистор» предложил другой участник исследовательской группы У. Шокли Джон Пирс (1910–2002).



Дж. Бардин, У. Шокли и У. Браттейн (1948 г.)

Первый транзистор (он относится к классу *биполярных транзисторов*) представлял собой германиевый брускок (рис. 19). Точечными контактами были два тонких «усика» из золотой фольги, названных эмиттером и коллектором и прикрепленных к верхней части блока с помощью изогнутой канцелярской скрепки. Третий контакт, названный базой, был связан с нижней частью блока. Как в этой конструкции были сформированы *p-n*-переходы? В пластинку германия *n*-типа 1 с силой вдавливался пластмассовый треугольник 2, обернутый золотой фольгой 3. На вершине треугольника фольга разрезалась бритвой. В месте соприкосновения фольги с поверхностью пластины образовывались области *p*-типа: эмиттер 4 и коллектор 6. Между ними располагалась база 5.

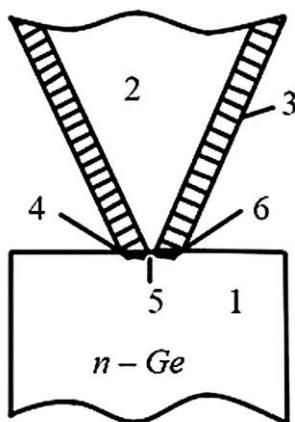


Рис. 19. Конструкция первого транзистора

Для управления током между эмиттером и коллектором использовался небольшой ток, текущий между эмиттером и базой. Правильное объяснение устройства и принципа действия точечного транзистора предложил Бардин. Вкратце напомним, как работает транзистор. Между эмиттером и базой прикладывается постоянное смещающее напряжение в прямом направлении, а между базой и коллектором – постоянное смещающее напряжение в обратном направлении. Протекание тока в цепи эмиттера обусловлено в основном движением дырок и сопровождается их впрыскиванием – *инжекцией* – в область базы.

Проникшие в базу дырки диффундируют по направлению к коллектору, причем при небольшой толщине базы значительная их часть достигает коллектора. Здесь дырки захватываются электрическим полем, действующим внутри перехода (притягиваются к отрицательно заряженному коллектору), вследствие чего изменяется ток коллектора. Любое изменение тока в цепи эмиттера вызывает изменение тока в цепи коллектора. Таким образом, варьируя напряжение между базой и эмиттером, можно изменять значение коллекторного тока от максимального до почти нулевого, т. е. «открывать» и «закрывать» транзистор.

Официальное представление первого транзистора (рис. 20) состоялось 23 декабря 1947 г., и эта дата вошла в историю как день открытия

транзисторного эффекта и зарождения полупроводниковой электроники. На презентации присутствовало руководство Bell Labs, быстро оценившее, какие огромные прибыли способно принести компании новое изобретение. В мрачном расположении духа пребывал лишь руководитель группы Шокли. Он считал себя автором идеи транзистора, однако он не внес определяющего вклада в его создание. Тем не менее буквально за неделю ученый создал более основательную теорию инжекции, чем теория транзистора Бардина – теорию *p-n*-перехода.

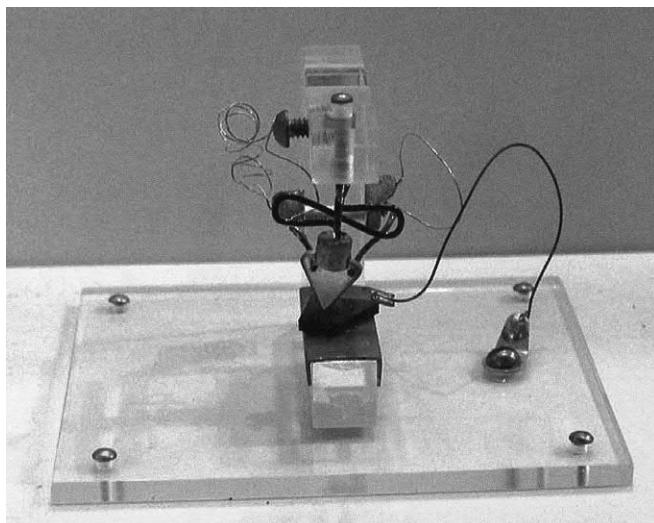


Рис. 20. Внешний вид первого в мире транзистора (копия)

Кроме того, Шокли придумал еще один тип транзистора, предложив заменить точечные контакты выпрямляющими переходами между областями *p*- и *n*-типа в том же полупроводниковом кристалле. Такое устройство, получившее название *плоскостного транзистора*, было изготовлено в 1950 г. Оно состояло из тонкой *p*-области, заключенной между двумя *n*-областями (все они имеют отдельные внешние контакты). Впоследствии плоскостной транзистор потеснил транзистор с точечными контактами, так как производить его оказалось гораздо легче, а функционировал он надежнее. Именно на основе плоскостного транзистора были созданы первые микросхемы, о которых мы еще расскажем.

Усилия Шокли были высоко оценены. В 1956 г. он вместе с Бардином и Браттейном получил Нобелевскую премию по физике «за

исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта». Необходимо отметить, что Бардин является единственным ученым в мире, дважды удостоенным Нобелевской премии по физике. В 1956 г. он получил премию за изобретение транзистора, а в 1972 г. – за создание микроскопической теории сверхпроводимости (теории БКШ).

Усовершенствование методов выращивания, очистки и обработки полупроводниковых кристаллов позволило осуществить давнюю идею Шокли о создании транзистора на основе полевых эффектов. Однако *полевые транзисторы* не находили практического применения, пока германий не был заменен кремнием. Современная же цифровая техника построена, в основном, на полевых *МОП-транзисторах* (транзистор на основе структуры металл-оксид-полупроводник), как более экономичных, по сравнению с биполярными транзисторами. Иногда их называют МДП-транзисторы (транзистор на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник), а международный термин – MOSFET (Metal-oxide-semiconductor field effect transistor – «полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник»).

В МОП-транзисторе используется кремниевая подложка с проводимостью *p*- или *n*-типа. На ней на малом расстоянии друг от друга созданы две области (исток и сток) с проводимостью, противоположной проводимости материала подложки. Между стоком и истоком над поверхностью расположена металлическая пленка – затвор, изолированная от подложки тонким слоем диэлектрика. Участок подложки под затвором между истоком и стоком образует проводящий канал. Работа МОП-транзисторов основана на изменении концентрации свободных носителей заряда в канале под влиянием электрического поля, создаваемого напряжением, которое приложено между затвором и истоком. Для этих приборов характерна взаимозаменяемость стока и истока, т. е. ток в канале может протекать в обоих направлениях в зависимости от полярности напряжения, приложенного к каналу.

МОП-транзисторы выступают в качестве обязательных элементов для построения микросхем памяти, процессоров и т. п. Размеры современных МОП-транзисторов составляют от 90 до 32 нм; на одном современном чипе (обычно его размер $\sim 1\text{--}2 \text{ см}^2$) можно разместить несколько миллиардов подобных транзисторов!

4.3. Создание интегральной схемы и рождение микроэлектроники

Несмотря на впечатляющие успехи в производстве и применении транзисторов, задачи, которые стала решать во второй половине XX в. наука, промышленность, атомная энергетика, военная, ракетная и космическая отрасли, а также бурное развитие электронно-оптической связи, сети Интернет, бытовой электроники потребовали существенного усложнения полупроводниковой аппаратуры. Прежде всего, потребовалась существенная миниатюризация ее элементов. В конечном счете этот процесс привел к созданию в конце 1950-х гг. интегральных схем и появлению микроэлектроники.

Интегральными схемами (ИС) называют устройства, представляющие собой пластины из полупроводника (чаще всего кристалла кремния) с размещенными на них электронными микроприборами. Изобретение и начавшееся в 1960-х гг. серийное производство ИС стало возможно в результате разработки технологии производства сверхминиатюрных транзисторов. Такие микротранзисторы (размером ~ 1 мкм) изготавливают путем нанесения на полупроводниковую пластину мельчайших капелек донорных или акцепторных примесей (процесс легирования). Соединение между ними осуществляют благодаря напылению тонких и очень узких (~ 1 мкм) металлических полосок. В нужных местах ИС тем или иным способом размещают микроскопические конденсаторы, диоды и другие электронные детали. Интегральные схемы, по числу содержащихся в них микроприборов, можно разделить на несколько видов (табл. 2).

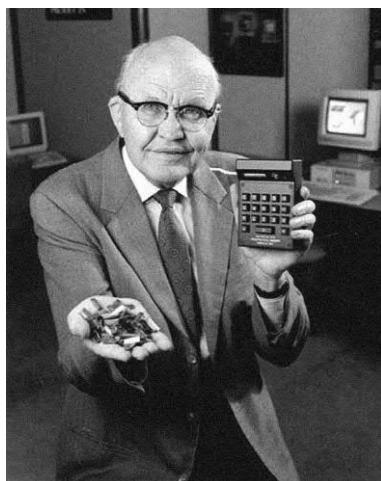
Таблица 2
Виды интегральных схем

Интегральные схемы (микросхемы)	Аббревиатура	Период изобретения	Число микроприборов в ИС
Малые	МИС	Конец 1950-х гг.	Несколько десятков
Средние	СИС	1960-е гг.	~ 103
Большие	БИС	1970-е гг.	$3 \cdot 10^4$
Сверхбольшие	СБИС	Вторая половина 1970-х гг.	$\sim 10^6$

Для повышения быстродействия ИС их иногда изготавливают не на основе кремния, а на основе других полупроводниковых материалов, например, на арсениде галлия GaAs. Большая ширина запрещенной зоны E_g у GaAs (1,5 эВ вместо 1,1 эВ у Si) позволяет приборам функционировать при более высоких температурах и на больших частотах. Однако более высокая стоимость GaAs, его повышенная хрупкость, а главное, отсутствие диэлектрика, подходящего в качестве изоляционного материала, не позволили арсениду галлия применяться в микроэлектронике на равных с кремнием.

Интегральная схема без корпуса и выводов, так называемый *чип* (буквально «кусок кристалла»), имеет очень небольшие объем (0,2–50 мм^3) и массу (0,5–50 мг) и может непосредственно устанавливаться в аппаратуру или использоваться в качестве одного из базовых элементов для автоматического формирования СБИС. Чип, заключенный в корпус с несколькими выводами, используется для решения определенной задачи, под которую проектируется данная интегральная схема. Общая задача создания конкретной аппаратуры решается с помощью комбинации различных функциональных схем.

Обсудим, как появилась на свет интегральная схема. Возможность ее создания продемонстрировали независимо друг от друга два инженера – Джек Килби (1923–2005) и Роберт Нойс (1927–1990).



Дж. Килби



Р. Нойс

Любопытно, что на вышеупомянутой презентации транзистора в компании Bell Labs присутствовал сотрудник небольшой фирмы Centralab Килби. Под впечатлением от демонстрации первого транзистора он занялся производством миниатюрных слуховых аппаратов на транзисторах. В мае 1958 г. он поступил на работу в компанию Texas Instruments (TI, «Тексас Инструментс»), производившую транзисторы, конденсаторы, резисторы и другие элементы радиотехнических схем.

Когда летом 1958 г. большинство сотрудников отправилось в отпуск, Килби остался работать. 24 июля 1958 г. в своем лабораторном журнале он сформулировал так называемую *идею монолита*. В этой записи утверждалось, что элементы схемы, такие как резисторы, конденсаторы и транзисторы, могут быть интегрированы в одну микросхему при условии, что они будут сделаны из одного материала. Вот что говорил Килби по этому поводу в своей нобелевской лекции. «Полупроводники – это единственно, что нам требуется: резисторы и конденсаторы, в особенности, можно сделать из того же материала, что и активные элементы. Я также решил, что уж если все компоненты сделаны из одного материала, то они могут и размещаться удобным образом, соединяясь друг с другом так, чтобы получилась готовая схема».

Первая работающая микросхема Килби (рис. 21) представляла собой генератор с фазовым сдвигом (мультивибратор). 12 сентября 1958 г. было завершено изготовление первых трех генераторов этого типа. Когда было приложено напряжение, в первом из контуров возникла генерация на частоте 1,3 МГц.

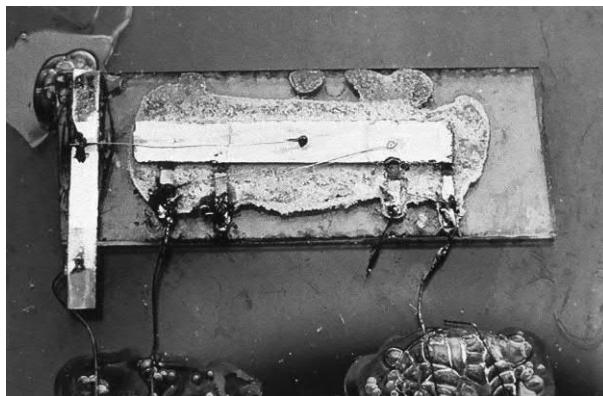


Рис. 21. Интегральная схема Килби

Несмотря на очевидный успех, достижение молодого инженера из Техаса многими было встречено скептически. Специалисты указывали на невозможность ремонтировать микросхемы. Однако ситуация в корне изменилась благодаря двум приоритетным военным программам 1960-х гг. – подготовке полета космического корабля «Аполлон» на Луну и разработке ракеты «Минитмен». Использование ИС в рамках данных программ убедительно показало их работоспособность и экономичность. В 1964 г. несколько предпримчивых компаний начали использовать ИС в коммерческих изделиях. Для того чтобы помочь популяризации ИС, Килби принял участие в работе группы ТI, разрабатывающей первый микрокалькулятор. В 1967 г. компания «Техас Инструментс» представила первый карманный микрокалькулятор.

Как уже упоминалось, еще одним изобретателем интегральной схемы считается Нойс. Первый стимул его научной карьере дал Шокли. В 1955 г. он покинул компанию Bell Labs и основал собственную фирму SSL (Shockley Semiconductor Laboratories – «транзисторная корпорация Шокли») в южном пригороде Сан-Франциско – Пало-Альто. Так был заложен первый камень в основание легендарной «кузницы» высоких технологий – Кремниевой (Силиконовой) долины. Сотрудников Шокли набрал из молодых специалистов, не рассчитав уровня их амбиций. Не прошло и двух лет, как в фирме сложился невыносимый психологический климат (Шокли отличался скверным характером), и восемь лучших сотрудников во главе с Нойсом и Гордоном Муром (р. 1929) ушли из нее. Впоследствии они открыли собственную компанию. Гениальных идей у «восьмерки предателей», как назвал их Шокли, было очень много, чего нельзя сказать о стартовом капитале. Компаньоны еще не существовавшей компании начали поиски денег и после нескольких отказов в ряде банков встретили молодого и амбициозного финансиста А. Рока. С его помощью местная корпорация Fairchild Camera & Instrument согласилась инвестировать в новое дело \$1,5 млн, поставив одно условие: она сможет выкупить компанию «восьмерки» за вдвое большую сумму, если у тех дела пойдут в гору. Так была создана компания Fairchild Semiconductor, название которой с английского буквально переводится как «Полупроводник чудо-ребенка».

Гениальные исследователи из Пало-Альто заявили о себе очень быстро. Нойс, занявший в компании должность директора

по исследованиям и разработкам, главное изобретение в жизни сделал, по его собственным словам, просто от лени. «Интегральная схема – плод моей лени. Мы брали кремниевую пластину, на которой были аккуратно расположены транзисторы, разрезали ее на мелкие кусочки и затем отгружали их потребителям, которые должны были вновь собрать эти кусочки-транзисторы вместе. Я и подумал: нельзя ли выбросить все эти промежуточные шаги и соединить транзисторы друг с другом, пока они все находятся на одной кремниевой пластине. Мы так и поступили».

В основу ИС была положена идея Джина Хёрни (1924–1997) о планарной технологии получения $p-n-p$ ($n-p-n$) слоев. С ее помощью можно проще реализовать электрическое соединение элементов схемы, так как все рабочие слои выходят на одну плоскость. Соответствующий вариант микросхемы (рис. 22) был разработан Нойсом в январе 1959 г.

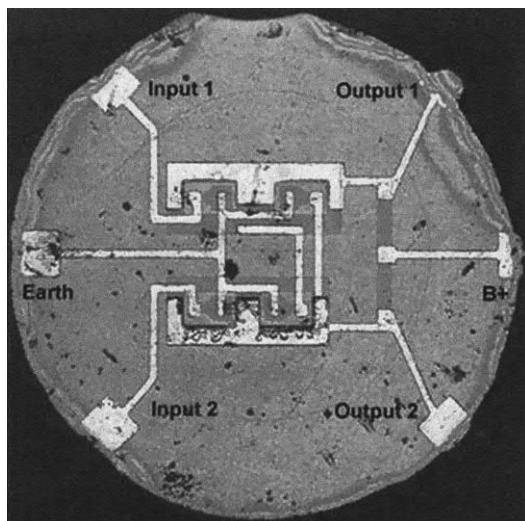


Рис. 22. Интегральная схема Нойса

При этом он обнаружил высокую адсорбирующую способность алюминия как к кремнию, так и к его оксиду. Нойс предложил напылять алюминиевые полоски в качестве соединений ИС из кремния и двуокиси кремния, которые играли роль соответственно полупроводника и изолятора. Исследования Нойса привели к рождению хорошо знакомой нам микросхемы – пластинки с графическим лабирин-

том алюминиевых дорожек, разделенных изолирующим материалом. Его изобретение составило основу интегральной технологии, поэтому считают, что микросхему изобрели два человека – Килби и Нойс.

Нойс не дожил до положенной ему по праву Нобелевской премии ровно десять лет (она была присуждена в 2000 г.). Но до этого он успел основать всемирно знаменитую компанию. Бросив в 1968 г. налаженный бизнес в Fairchild Semiconductor (в том же году эту компанию покинули еще восемь сотрудников, впоследствии создавших очередную «звезду» Силиконовой долины – AMD), Нойс вместе с Муром решили открыть новую компанию, назвав ее первоначально “Moore Noyce”. Однако по-английски это звучало весьма двусмысленно: почти как *more noise* («больше шума»), и компании остановились на более официальном и содержательном названии – Integrated Electronics. Компания неоднократно изменяла имя, и сегодня каждый пользователь персональных компьютеров (ПК) знает ее как – Intel.

В апреле 1965 г., примерно за три с половиной года до создания корпорации Intel, Мур, занимавший в ту пору должность директора отдела разработок компании Fairchild Semiconductors, в статье для журнала Electronics дал прогноз развития микроэлектроники. Вскоре это футурологическое наблюдение получило название *закон Мура*.

Представив в виде графика рост производительности запоминающих микросхем, Мур обнаружил следующую закономерность: новые модели микросхем разрабатывались спустя приблизительно одинаковые периоды – 18–24 месяца – после появления их предшественников, а их емкость каждый раз возрастала примерно вдвое. Если такая тенденция продолжится, заключил Мур, то мощность вычислительных устройств экспоненциально возрастет на протяжении относительно короткого промежутка времени.

Сделанный вывод впоследствии блестяще подтвердился, а обнаруженная им закономерность наблюдается и в наши дни, причем с поразительной точностью. За 30 лет, истекшие с момента появления микропроцессора 4004 в 1971 г. и вплоть до выпуска процессора Pentium® 4, количество транзисторов в микросхеме выросло более чем в 18 000 раз: с 2300 до 42 млн.

Увеличение чистоты полупроводниковых материалов, создание новых видов транзисторов, надежно работающих на высоких частотах и при низком уровне шумов, объединение нескольких электронных

компонентов на одном чипе, разработка полупроводниковых лазеров и новых носителей информации с более высокой плотностью записи – все это только малая часть направлений, которые объединяет современная микроэлектроника.

В настоящее время разрабатываются сверх-сверхбольшие интегральные схемы (ССБИС), которые позволяют получить еще большее быстродействие при меньших размерах ПК. Это стало возможным благодаря освоению технологии фотолитографии на более короткой длине волны ($\lambda = 157$ нм вместо 248 нм) и проведению опытов с использованием экстремального ультрафиолета ($\lambda = 13$ нм).

Таким образом, изобретение ИС, способных объединить на одном чипе миллионы транзисторов, прочно закрепило их преимущество перед электронными лампами. Микроэлектроника стала основой инновационных цифровых технологий: на чипах выпускается колоссальный ассортимент электронных приборов – от часов до глобальных систем спутниковой связи.

В начале 1970-х гг. в ИС научились соединять достаточное количество элементов, чтобы собрать на отдельном чипе первый *микропроцессор*. Это новое устройство привело к появлению ПК. Здесь уместно привести такую аналогию. Подобно тому, как паровой двигатель был главной движущей силой промышленной революции, ПК стал «локомотивом» научно-информационной революции. Затем компьютеры были соединены в информационные сети, позволяющие им взаимодействовать друг с другом. В свою очередь, это привело к синтезу двух важнейших технологий: компьютерной и телекоммуникационной. С повышением требований к скорости обработки данных и передачи информации стало важным не только количество элементов, размещаемых в чипе, но и их быстродействие. Лишь частично новые запросы удалось удовлетворить, уменьшив размеры компонентов и снизив их энергопотребление. В итоге пришлось обратиться к новым материалам – полупроводниковым гетероструктурам.

4.4. Гетероструктурные полупроводники и приборы на их основе

Давно казалась заманчивой идея использовать вместо однородных полупроводниковых кристаллов искусственно синтезированные структуры, сформированные из различных полупроводников. Впер-

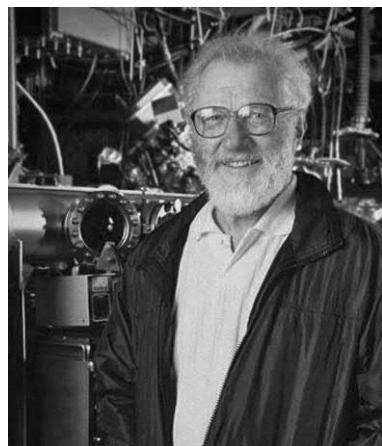
вые ее высказал Шокли, предложивший в биполярных транзисторах использовать в качестве эмиттера полупроводник с большей, чем у базы, величиной ширины запрещенной зоны Eg . Сначала введем необходимые нам термины.

Структуру, состоящую из нескольких тонких слоев полупроводников с различной шириной запрещенной зоны, называют *гетероструктурным полупроводником*. Толщина его слоев варьируется в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров. Как правило, слои изготавливают из арсенида галлия (GaAs) и алюминий-галлий арсенида (AlGaAs). Материалы подбирают таким образом, чтобы их кристаллические структуры соответствовали друг другу, а носители заряда могли практически свободно перемещаться через границы слоев. Именно это свойство гетероструктур широко используется в практических приложениях.

Гетеропереход представляет собой контакт двух различных по химическому составу полупроводников с совпадающими (в идеальном случае) типами, ориентациями и периодами кристаллических решеток. Изучение гетеропереходов началось с пионерских работ американского физика Р. Андерсона, предложившего модель идеального гетероперехода и теорию разрывов зон на гетерогранице (им была предложена модель «идеального» гетероперехода, а также исследованы свойства гетероперехода Ge–GaAs). Кратко остановимся на работах немецкого ученого Герберта Крёмера (р. 1928), опубликовавшего теорию широкозонного эмиттера для транзистора. Для того чтобы лучше понять суть данной теории, рассмотрим однородный кусок полупроводника, например, однородно легированного кремния, к которому приложено постоянное электрическое поле. Его зонная структура показана на рис. 23, а. Две параллельные линии изображают края зоны проводимости и валентной зоны.

Зазор между линиями – это запрещенная зона полупроводника. Угол наклона зон определяется произведением модуля заряда электрона e на напряженность E электрического поля. Если электрон или дырка помещены в такую систему, то на электрон действует сила $-eE$, а на дырку – $+eE$.

В гетероструктуре ширина запрещенной зоны зависит от координаты. При этом углы наклона зон и величины указанных выше сил оказываются неодинаковыми.



Г. Крёмер

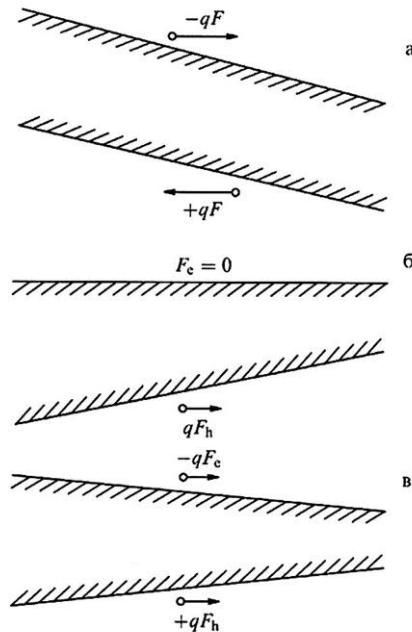


Рис. 23. Зонная структура однородно легированного кремния: а – истинное электрическое поле наклоняет зоны; б – «квазизлектрическое» поле, в котором нет силы, действующей на электроны, но существует сила, действующая на дырки; в – «квазизлектрическое» поле, перемещающее электроны и дырки в одном направлении

Например, может существовать сила, действующая только на один тип носителей (рис. 23, б), или силы, которые действуют в одном и том же направлении на оба типа носителей (рис. 23, в). Силы чисто электрической природы в однородном материале не могут оказывать такое действие на носители заряда, поэтому они были названы «квазиэлектрическими». Отметим, что Крёмер ввел также понятие о «квазимагнитных» полях в плавном гетеропереходе.

К идеи о «квазиэлектрическом» поле Крёмера привел сугубо практический вопрос, возникший еще в 1953–1954 гг. Как отмечал учёный в своей нобелевской лекции, «первые биполярные транзисторы на *p-n*-переходах не годились для применения в телекоммуникациях, так как работали слишком медленно. Я поставил себе задачу объяснить теоретически причину такого частотного ограничения и выяснить, что с ним можно сделать. Одна из возможностей (не единственная) состояла в увеличении скорости потока неосновных носителей из эмиттера в коллектор путем встраивания электрического поля в область базы. Это можно сделать с помощью неоднородного легирования базы, спадающего экспоненциально от эмиттера к коллектору». Так, Крёмер пришел к созданию *дрейфового транзистора*. В нем уже содержалась оригинальная идея устройства, которое впоследствии стало называться *биполярным транзистором на гетеропереходе* (heterostructure bipolar transistor, сокращенно НВТ).

Первый детально разработанный проект гетероструктурного транзистора (гетеротранзистора) Крёмер опубликовал в 1957 г. Он показал, что по ряду параметров гетеротранзистор может значительно превосходить обычный транзистор как при усилении тока, так и в высокочастотных схемах. Гетеротранзистор может работать на частотах порядка 600 ГГц, что приблизительно в 100 раз выше по сравнению с лучшими обычными транзисторами. Кроме того, гетеротранзисторы отличает малый уровень шума. Высокочастотные малошумящие усилители на их основе применяют в спутниковых системах связи и для улучшения соотношения «сигнал/шум» в мобильной телефонии.

Крёмер предположил, что гетеропереходы могут обладать более высокой степенью инжекции, чем гомопереходы. Кроме того, использование гетероструктур позволяет решить проблему управления фундаментальными параметрами (например, шириной запрещенной зоны, эффективными массами носителей заряда, показателем

преломления и др.) в полупроводниковых кристаллах и приборах на их основе. Однако первые попытки реализовать гетеропереходы на практике были безуспешными. Причина была вполне объяснимой: для «идеального» гетероперехода необходимо обеспечить совместимость тепловых и электрических свойств контактирующих материалов, а также их кристаллических и зонных структур. При этом материалы пары должны иметь близкие значения постоянной решетки.

Гетероструктуры удалось создать российскому физику, академику РАН Жоресу Ивановичу Алфёрову (р. 1930). Именно он предложил использовать для их изготовления арсенид галлия (GaAs) и алюминий-галлий арсенид (AlGaAs). Эти материалы обладают необходимым набором физических и химических свойств.

Важным преимуществом гетероструктур является открытый Алфёровым эффект *сверхинжекции*. Сверхинжекция – явление, возникающее при инжекции неосновных носителей заряда в гетеропереходе. Он состоит в том, что концентрация неосновных носителей в материале, в который происходит инжекция, существенно превышает концентрацию носителей в эмиттере.



Ж. И. Алфёров

Группой Алфёрова были предсказаны и открыты также другие эффекты, присущие гетероструктурам. Среди них: эффекты, обеспечивающие локализацию носителей в слое узкозонного полупроводника

(эффект электронного ограничения) и волновую локализацию электромагнитных волн (эффект оптического ограничения). Эти открытия позволили использовать новые методы управления носителями заряда и световыми потоками в устройствах на гетероструктурах (например, в фотодиодах, солнечных элементах, светодиодах).

Алфёрова считают также творцом первых *гетеролазеров* – лазеров на основе гетероструктур. Прежде чем перейти к рассказу об устройстве и принципе действия гетеролазера, рассмотрим общие особенности полупроводниковых лазеров. В них используются квантовые переходы не между дискретными уровнями энергии, а между разрешенными энергетическими зонами. Инверсия заселенности возникает вблизи «дна» зоны проводимости и «потолка» валентной зоны, так что длина волны λ лазерного излучения определяется следующим выражением:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}, \quad (1)$$

где E_g – ширина запрещенной зоны.

В силу того, что значение E_g у разных полупроводников меняется в широких пределах, спектральный диапазон полупроводниковых лазеров простирается от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области, что является одним из их важнейших преимуществ. Еще одно преимущество связано с тем, что длина резонатора полупроводникового лазера обычно составляет 200–300 мкм. По этой причине можно изготовить миниатюрный полупроводниковый лазер. Кроме того, подобное устройство отличается высоким КПД (до 90%), малой инерционностью (10^{-9} с), низковольтным питанием (1–3 В). Наконец, появляется возможность осуществлять плавную перестройку частоты излучения, причем, модулируя ток накачки, можно добиться модуляции излучения по частоте. Это связано с тем, что согласно выражению (1) длина волны лазерного излучения связана с шириной запрещенной зоны, которая, в свою очередь, зависит от температуры, давления, напряженности магнитного поля и др.

Конструктивно полупроводниковый лазер представляет собой элемент из полупроводникового монокристалла, активная часть которого очень мала (10^{-11} – 10^{-10} см³). Оптическим резонатором являются либо торцевые зеркальные грани кристалла, либо внешние отражатели. В качестве механизмов оптической накачки могут использоваться

бомбардировка быстрыми электронами, световое воздействие, электрический пробой. Однако наиболее распространенным вариантом является инжекция избыточных носителей заряда через *p-n*-переход или гетеропереход. Она происходит под действием электрического поля при подаче обратного смещения (внешнего напряжения) на *p-n*-переход. При этом в зону проводимости поступают избыточные электроны, а в валентную зону – дырки. В результате релаксации (столкновения электронов между собой или с фононами) электроны быстро спускаются к нижней границе зоны проводимости, а дырки поднимаются к верхней границе валентной зоны. Излучение возникает после того, как электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне займут свои места на их границах. При этом излучаемый квант получает энергию, в точности равную разности энергий, соответствующих этим границам, т. е. ширине запрещенной зоны.

Первая работа о возможности использования полупроводников для создания лазера была опубликована в 1959 г. Н. Г. Басовым, Б. М. Вулом и Ю. М. Поповым. Применение *p-n*-переходов для этих целей было предложено в 1961 г. Н. Г. Басовым, О. Н. Крохинным, Ю. М. Поповым. В 1962 г. в лабораториях Р. Холла, М. И. Нейтена и Н. Холоньяка (США) были разработаны полупроводниковые лазеры на кристалле GaAs.

Однако эффективность инжекционных полупроводниковых лазеров с *p-n*-переходом осталась невысокой, поскольку для их работы требуется достаточно большой отпирающий ток. В связи с этим получить непрерывное излучение таких лазеров при комнатной температуре не удалось. Тем не менее непрерывный режим работы при комнатной температуре вполне достижим для гетеролазеров.

Использование в лазере гетероструктуры приводит к тому, что на некотором расстоянии от инжектирующего *p-n*-перехода создается потенциальный барьер за счет гетероперехода с более широкозонным полупроводником. Если скорость рекомбинации на границе мала, то носители отражаются от барьера и увеличиваются при том же токе среднюю концентрацию неосновных носителей в области усиления. Тем самым инверсная заселенность в активном слое, возникающая при определенной концентрации инжектированных носителей, достигается при меньшем значении плотности тока. Соответственно, снижение рекомбинационных и оптических потерь уменьшает ток, необходимый для возбуждения генерации.

Обсудим историю создания первого гетеролазера, а также кратко рассмотрим исследования, проведенные группой Алфёрова. Началом его деятельности в новом направлении, которое вскоре стало определяющим в развитии полупроводниковой электроники, стал 1963 г. В этом году Алфёров предложил использовать в лазерах двойную гетероструктуру и начал исследовать возможность ее создания. Как уже отмечалось, это оказалось далеко не тривиальной задачей из-за необходимости получения «идеального» гетероперехода без дефектов на границе раздела. Такой, близкий к «идеальному», гетеропереход Алфёрову и сотрудникам удалось изготавливать на основе метода жидкостной эпитаксии.

В качестве исходных составляющих гетероструктуры были использованы два очень близкие по свойствам вещества: арсенид галлия GaAs и арсенид алюминия AlAs. Их периоды кристаллических решеток и коэффициенты теплового расширения практически совпадают. Именно из них был изготовлен бездефектный смешанный кристалл AlGaAs, использованный для создания первого гетеролазера на гетеропереходах. Но из-за больших пороговых токов он работал только в импульсном режиме и при низких температурах.

В 1963 г. Ж. И. Алфёров, Р. Ф. Казаринов и независимо от них Г. Крёмер придумали конструкцию инжекционного лазера на двойной гетероструктуре (ДГС), подобной структуре биполярного транзистора. При этом предполагалось среднюю область (аналог базы) изготавливать из полупроводника с меньшей величиной E_g , в котором (в отличие от транзистора) состояния и электронов, и дырок лежат ниже по энергии, чем соответствующие состояния в областях слева и справа. Такие лазеры должны были бы обладать существенными преимуществами по сравнению с инжекционными лазерами на p - n -переходах.

Первые гетеролазеры были созданы в 1968 г. Ж. И. Алфёровым, В. М. Андреевым, Д. З. Гарбузовым, В. И. Корольковым, Д. Н. Третьяковым и В. И. Швейкиным. В 1972 г. работа была удостоена Ленинской премии «за исследования гетеропереходов и разработку приборов на их основе».

В гетеролазерах с двойной инжекцией электронов и дырок «квазиэлектрическое» поле собирает их в тонкой области полупроводника с малой величиной E_g . Они удерживаются в этой области даже при больших смещениях в пропускном направлении (что невозможно

в p - n -переходах) и создают инверсную заселенность, приводящую к излучательной рекомбинации.

На рис. 24 представлено схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре.

Ключевым моментом в полупроводниковой электронике следует считать реализацию в 1967 г. структуры GaAs-AlGaAs практически с полным взаимным соответствием параметров решеток используемых материалов. Это одновременно и независимо было сделано группой Алфёрова, а также Х. Руппрахтом и Дж. Вудолом в Исследовательском центре им. Уотсона (США).

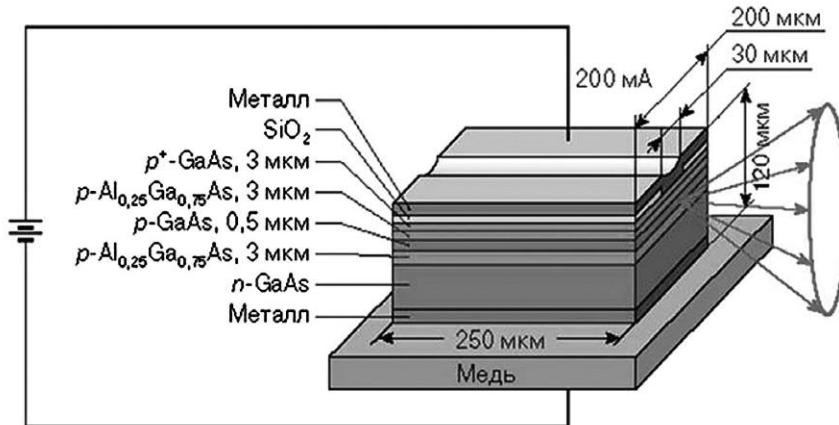


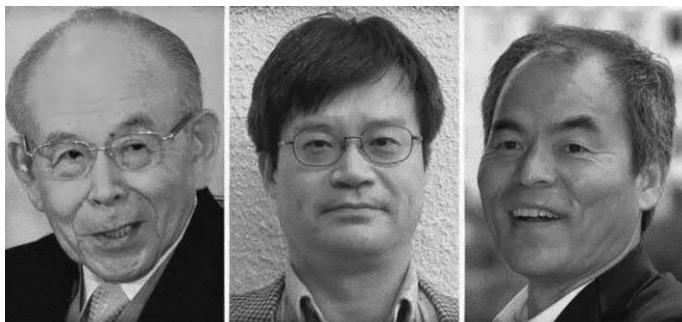
Рис. 24. Структура первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре

Благодаря эффектам сверхинжекции, оптического и электронного ограничения на этой структуре группой Алфёрова были созданы высокоэффективные светодиоды, солнечные элементы, биполярные транзисторы и тиристорные p - n - p - n -переключатели на гетероструктурах и другие устройства.

Вскоре был достигнут режим непрерывной генерации при комнатной температуре в структуре GaAs-AlGaAs. Сообщение об этом было опубликовано в 1970 г. независимо двумя научно-исследовательскими группами – Алфёрова с сотрудниками, а также Х. Кейси и М. Паниша из компании Bell Labs. Основополагающим вкладом в расширение

возможностей гетероструктур стало применение группой Алфёрова четверных твердых растворов полупроводников группы $A^{III}B^V$, например InGaAsP. Это позволило независимо изменять параметры решетки и электронного спектра, и разработать лазеры, излучающие в инфракрасной области спектра и в видимом диапазоне.

Долгое время не удавалось реализовать полупроводниковые лазеры, которые работали бы в коротковолновой (голубой) части спектра. В начале 1990-х гг. японские физики Исamu Акасаки (р. 1929), работавший вместе с Хироши Амано (р. 1960) в университете г. Нагоя, а также Сюдзи Накамура (р. 1954) (исследователь из корпорации Nichia Chemical Industries) смогли изобрести экономичный голубой светоизлучающий диод (светодиод). В 2014 г. им была присуждена Нобелевская премия по физике «за изобретение эффективных голубых светоизлучающих диодов, позволившее создать яркие и экономичные источники белого света».



И. Акасаки, Х. Амано и С. Накамура

Напомним, что *светодиоды* – это полупроводниковые устройства, преобразующие энергию электрического тока в световое излучение. Их действие основано на том, что при пропускании электрического тока через *p-n*-переход в прямом направлении, носители заряда – электроны и дырки – рекомбинируют с излучением фотонов. Спектральный состав излучения светодиода определяется типом используемого полупроводника. Например, светодиоды на основе арсенида галлия генерируют инфракрасное и красное излучения, на основе фосфида галлия – желтое и зеленое, на основе нитрида галлия – голубое, синее и ультрафиолетовое излучения.

Отметим, что первый в мире красный светодиод изобрел американский физик Н. Холоньяк в 1962 г., однако голубые светодиоды появились только спустя три десятилетия. Это произошло благодаря тому, что группы Акасаки и Накамуры разработали технологии получения сплавов нитрида галлия с алюминием (или индием) и применили их для получения гетероструктур. На их основе и были созданы голубые светодиоды. В сочетании со светодиодами, дающими другие цвета спектра, они широко используются для подсветки жидкокристаллических экранов, для производства светодиодных ламп, индикаторов и др.

Таким образом, разработка гетероструктур и исследование их свойств позволили в конце 1960-х – начале 1970-х гг. произвести ряд высокоэффективных полупроводниковых приборов, включая гетеролазеры с низким порогом генерации и непрерывным режимом работы при комнатной температуре. В 1970 г. на основе гетероструктур были сконструированы солнечные батареи, промышленное производство которых позволило оснастить ими космические спутники и орбитальную станцию «Мир».

Гетероструктуры оказали мощное влияние на развитие многих областей науки и наукоемких технологий (физики полупроводников, полупроводниковой электроники, оптоэлектроники и т. д.). Они являются неотъемлемой составляющей высокочастотных транзисторов, полупроводниковых лазеров, светодиодов, фотоэлементов, оптронов. Гетеролазеры обладают низким пороговым током генерации при комнатной температуре, высоким КПД. С их помощью можно реализовать широкий диапазон излучаемых частот за счет использования различных полупроводниковых материалов. Именно поэтому инжекционные гетеролазеры стали просто незаменимыми в волоконно-оптических системах связи. Другая область их применения – лазерные системы памяти, спектроскопия, лазерное прецизионное телевидение, различные следящие и контрольные приборы и т. д.

В 2000 г. Королевская академия наук Швеции присудила Нобелевскую премию по физике исследователям, труды которых заложили основу современных информационных и коммуникационных технологий. Премия была поделена на две части с вручением половины Алфёрову и Крёмеру «за исследование полупроводниковых гетероструктур, которые нашли применение в высокочастотной и оптической электро-

нике». Вторая половина премии досталась Килби «за вклад в изобретение интегральной схемы».

В настоящее время ведутся исследования по созданию лазеров на *гетероструктурах второго рода*, в которых электроны и дырки пространственно разнесены. На их перспективность в своих работах указывал Крёмер еще в 1980-е гг. Благодаря пространственному разделению электронов и дырок можно управлять оптическими свойствами гетероструктур в широких пределах. При этом ступенчатая конфигурация зон позволяет получить оптическое излучение с энергией фотона, много меньшей ширины запрещенной зоны каждого из полупроводников, составляющих гетеропереход.

Реализация инжекционного лазера на основе гетеропереходов II рода в системе GaInAsSb-GaSb открыла широкие перспективы для реализации эффективных лазеров инфракрасного и оптического диапазона. Однако использованию гетероструктур II рода на практике пока препятствует недостаточное понимание их фундаментальных свойств и небольшое число экспериментально исследованных систем.

4.5. Гетеросистемы пониженной размерности

К настоящему времени в физике уже накоплен значительный опыт по созданию и изучению полупроводниковых структур, имеющих размеры несколько нанометров. При этом обычно выделяют три основных типа таких микроструктур: *квантовые ямы*; *квантовые нити (квантовые проволоки)*; *квантовые точки* («искусственные» атомы). Они представляют собой фрагменты проводника или полупроводника, носители заряда которого сосредоточены в пространстве по одному, двум или трем измерениям. Эти структуры, а также переходные состояния между ними принято объединять под одним названием – *гетеросистемы пониженной размерности*. Сюда же принято относить сверхрешетки, а также более сложные гетеросистемы. Оказалось, что, изменяя размерность и регулируя величину квантового ограничения, можно радикальным образом изменять энергетический спектр системы. Это позволяет не только решать фундаментальные задачи квантовой механики и физики полупроводников, но и конструировать инновационные полупроводниковые приборы.

Обсудим основополагающие исследования в области гетеросистем пониженной размерности. В 1979 г. Р. Дингл и его коллеги из компании Bell Labs выдвинули идею *модуляционного легирования*. В модуляционно-легированных структурах область полупроводника, где генерируются носители заряда, и область, где осуществляется их перенос, пространственно разделены. Для этого используются гетероструктуры, образованные полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны.

Рассмотрим гетероструктуру, в которой легирована только одна сторона, с более высоко расположенной зоной проводимости (рис. 25).

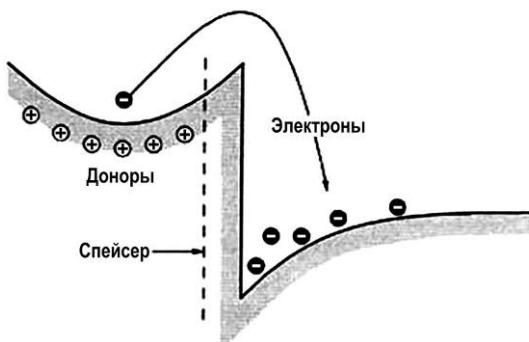


Рис. 25. Схема модуляционного легирования. Искривление зон обусловлено пространственными зарядами, находящимися по обе стороны от границы раздела

Идущая вниз ступенька «квазиэлектрического» потенциала заставляет электроны перетекать в расположенную ниже по энергии зону проводимости с другой стороны от границы раздела двух материалов. Когда электроны находятся в области «квазиэлектрической» потенциальной ступеньки, созданной этой резкой гетерограницей, они все еще чувствуют обычное электрическое поле кулоновского притяжения доноров, находящихся на другой стороне перехода. Оно подтягивает электроны к границе раздела, создавая при этом в треугольной квантовой яме *двумерный электронный газ* (2DEG). Более того, и это самое главное, поскольку электроны пространственно отделились от «своих» доноров, рассеяние на примесях ослабевает, а подвижность электронов растет. Для того чтобы максимально использовать эти преимущества, вблизи от границы оставляют нелегированную область – *спайсер*.

Идея модуляционного легирования оказалась весьма плодотворной, причем как для практических применений, так и для фундаменталь-

ной физики твердого тела. В приборостроении она составляет основу полевых транзисторов нового типа, обычно называемых НЕМТ (High Electron Mobility Transistor – «транзистор с высокой подвижностью электронов»). Благодаря низкому уровню шумов на больших частотах и высокой степени усиления сигнала, они находят широкое применение в спутниковом оборудовании, системах навигации, устройствах для высокоскоростных беспроводных линий связи, оптических системах наземной связи и др. Применение модуляционного легирования позволяет получить двухмерную электронную систему, а также существенно снизить примесное рассеяние электронов и тем самым увеличить их подвижность при низких температурах.

Важнейшим преимуществом искусственных наноструктур стало то, что в них можно относительно легко реализовывать широкий комплекс свойств, нередко весьма необычных. В качестве примера рассмотрим двухмерные и одномерные квантовые системы и их применение в квантовой электронике.

В отличие от обычного электронного газа, который движется в металлах и полупроводниках во всех направлениях, с помощью гетероструктур его можно частично или полностью окружить потенциальным барьером. Это позволяет снизить размерность области перемещения электронного газа с трех измерений до двух («квантовая яма»), до одного («квантовая проволока») и даже до нуля («квантовая точка»).

Двухмерную область существования электронного газа («квантовую яму») можно представить в виде тонкой плоской пластиинки из полупроводника с узкой запрещенной зоной, ограниченной с обеих сторон широкозонным полупроводником. Вырезав из этой «плоскости» узкую полоску и ограничив ее широкозонным полупроводником, можно получить «квантовую проволоку». Если же внедрить порцию узкозонного полупроводника внутрь широкозонного, то будет сформирована «квантовая точка». По определению Алфёрова, «квантовая точка» – это кластер из $10\text{--}10^3$ узкозонных атомов в широкозонной полупроводниковой матрице. Кластер, подобно свободному атому, имеет дискретную структуру уровней. Технологию выращивания мельчайших кластеров внутри другого полупроводника Алфёров и его сотрудники разработали в 1990-е гг. Такие микрокластеры соглашаются с кристаллической решеткой основного полупроводника даже при разных периодах решетки обоих полупроводников.

В результате исследований в 1993–1994 гг. были созданы гетеролазеры на основе структур с квантовыми точками, а в 1995 г. группой Алфёрова был продемонстрирован инжекционный гетеролазер на квантовых точках, работавший в непрерывном режиме при комнатной температуре. Таким образом, исследования ученого заложили основы электроники на основе гетероструктур с очень широким диапазоном применения. Она сегодня известна как «зонная инженерия».

В настоящее время квантовые точки и ямы эффективно используются для создания лазеров небольшой мощности с высоким КПД. Лазеры на квантовых ямах обладают преимуществами по сравнению с обычными полупроводниковыми лазерами. Характеристиками таких приборов можно управлять, изменяя параметры «квантовой ямы». По сравнению с полупроводниковыми лазерами, в лазерах на квантовых ямах легче создать инверсную заселенность из-за локализации носителей заряда в пространстве. Поэтому лазеры на квантовых структурах очень экономны и обладают высоким КПД.

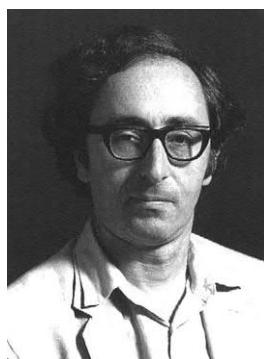
Понятно, что лазеры на квантовых точках должны обладать лучшими характеристиками (высокие коэффициенты усиления, низкие пороговые токи, узкие спектральные линии), чем лазеры на двойных гетероструктурах или квантовых ямах. Для применения в лазерах квантовые точки должны локализовать электроны в зоне проводимости и дырки валентной зоны в одной пространственной области. В 2010 г. японская компания Fujitsu и физики из Университета Токио представили квантовый точечный лазер, позволяющий передавать данные со скоростью 25 Гбит/с на одном луче.

Резюмируя, отметим, что в процессе развития физики и техники полупроводников произошел переход от электровакуумных ламп к транзисторам, а затем к интегральным схемам (чипам) и гетероструктурам, которые можно найти во всех микроэлектронных приборах. Исследования свойств гетеросистем пониженной размерности и их практическая реализация сейчас находятся на переднем крае науки. Однако нельзя забывать, что фундаментальный вклад в становление современных информационных и телекоммуникационных технологий внесли работы трех ученых – нобелевских лауреатов по физике 2000 г. Без их теоретических и экспериментальных работ вся наша жизнь была бы совсем другой.

4.6. Современные направления квантовой электроники

Растущие требования к быстродействию микропроцессоров, увеличению скорости обмена данных, защите информации обуславливают дальнейшую разработку теоретических концепций, методов и технических устройств. Это, в свою очередь, приводит к появлению новых направлений в квантовой электронике. К ним можно отнести сверхпроводниковую электронику, фотонику, спинtronику, квантовую теорию информации.

Сверхпроводниковая электроника. Понимание возможностей, которые сверхпроводимость открывает перед электроникой, должно быть основано на прочном знании физической сущности данного явления, знакомстве с основными положениями теории Бардина – Купера – Шриффера (теории БКШ). Эти вопросы изучаются в общем курсе физики, курсе физики твердого тела и курсе радиофизики. По этой причине мы не будем на них подробно останавливаться. Отметим, что принцип действия различных устройств основан на специфических свойствах сверхпроводников. К важнейшим из них относятся: отсутствие электрического сопротивления при температурах ниже критических, эффект Мейсснера – Оксенфельда, эффекты Джозефсона, неравновесные явления и некоторые другие.



Б. Джозефсон

Зарождение сверхпроводниковой электроники началось в 60-х гг. прошлого века. В 1962 г. аспирант Кембриджского университета Брайан Джозефсон (р. 1940) рассмотрел вопрос о том, что произойдет, если осуществить *слабую связь*, т. е. сблизить два сверхпроводника

на расстояние порядка длины когерентности ξ (несколько десятых долей нанометра). В основу своих рассуждений он положил только что созданную теорию БКШ.

Ключевой идеей Джозефсона стало утверждение, следующее из этой теории, – через потенциальный барьер могут туннелировать не только отдельные электроны, как считалось ранее, но и куперовские пары как единое целое. Это, казалось бы, тривиальное утверждение имеет на самом деле фундаментальный характер. Джозефсон открыл два эффекта, которые носят названия стационарного и нестационарного.

Кратко обсудим их физическую сущность. *Стационарный эффект Джозефсона* можно проиллюстрировать с помощью вольтамперной характеристики (ВАХ) джозефсоновского перехода (ДП) (рис. 26). Из него видно (кривая а), что при нулевом напряжении на контакте через него может идти сверхпроводящий ток, не превышающий некоторого порогового значения; при больших значениях тока появляется напряжение на переходе, возрастающее с увеличением силы тока.

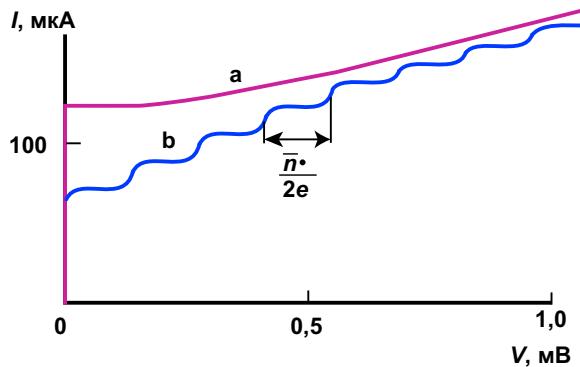


Рис. 26. ВАХ джозефсоновского перехода: а – внешнее высокочастотное электромагнитное поле отсутствует; б – высокочастотное поле включено

Самой важной особенностью ВАХ является наличие критического (порогового) тока I_c . Токи, меньшие I_c , переносятся куперовскими парами. Они не взаимодействуют с решеткой кристалла, в силу чего сопротивление перехода отсутствует. Если для переноса заряда куперовских пар не хватает, он начинает переноситься также неспаренными электронами, которые рассеиваются на дефектах кристалла. При этом

появляется сопротивление и наблюдается падение напряжения. С ростом тока доля электронов в процессе переноса заряда увеличивается, что приводит к увеличению напряжения на переходе. При больших значениях тока ВАХ джозефсоновского перехода не отличается от ВАХ обычного резистора.

Рассмотрим теперь случай, когда ток превышает критическое значение, и на ДП имеет место падение напряжения. Если к контакту приложить постоянную разность потенциалов, то через него потечет переменный сверхпроводящий ток, который будет являться источником электромагнитных волн – собственного джозефсоновского излучения.

В контактах Джозефсона куперовские пары проходят через диэлектрический слой и приобретают при этом энергию $2eU$ (U – разность потенциалов, приложенная к контакту). При протекании сверхпроводящего тока эта энергия не расходуется на преодоление сил сопротивления. В связи с этим энергия, полученная куперовской парой от электрического поля, излучается в виде кванта $h\nu = 2eU$. В этом и заключается нестационарный эффект Джозефсона: приложенное к ДП постоянное напряжение приводит к возникновению собственного электромагнитного излучения с частотой:

$$\nu = \frac{2eU}{h}.$$

Иначе говоря, джозефсоновский контакт двух сверхпроводников не только преобразует постоянное напряжение в переменный ток, но и работает как колебательный контур – излучает электромагнитные волны в диапазоне СВЧ. Изменение частоты излучения при вариациях напряжения на ДП – уникальное явление. До этого открытия радиофизика не знала генераторов излучения, частотой которых можно управлять, изменяя напряжение на нелинейном элементе.

Если ДП поместить во внешнее высокочастотное поле, то при совпадении частот собственного и внешнего излучений возникают резонансные явления. Действительно, на ВАХ в этом случае наблюдаются ступеньки тока (по имени первооткрывателя они называются ступеньками Шапиро), расстояния между которыми в точности равны $\hbar\omega/2e$ (кривая b на рис. 26). Это позволяет с прецизионной точностью измерить соотношение мировых констант \hbar/e , а также создать стандарт единицы электрического напряжения – вольта.

Существование ступенек Шапиро свидетельствует также о том, что на основе ДП могут быть созданы нелинейные радиофизические устройства – детекторы, смесители, параметрические усилители и т. д. Все они были реализованы в микроволновом диапазоне (10–100 ГГц) и нашли применение в радиоастрономии, а также в качестве приемников для мониторинга Земли и водной поверхности. Основными преимуществами этих устройств являются их сверхвысокая чувствительность, быстродействие и низкие шумы. Так как ДП охлаждается до температур ~ 4 К, уровень тепловых шумов снижается до очень малых значений.

Джозефсоновские широкополосные детекторы успешно использовались в радиоастрономических наблюдениях, а также для мониторинга водной поверхности с борта кораблей в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. На более коротких волнах широкое применение нашли смесители на основе туннельных SIS-переходов. Такие устройства успешно используются в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

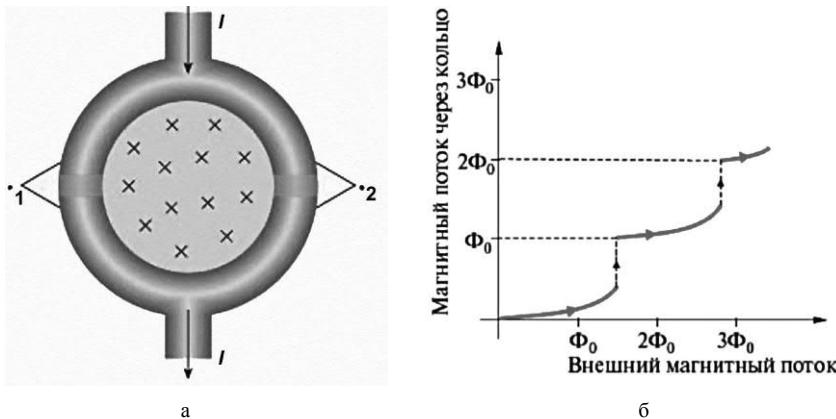


Рис. 27. Двухконтактный СКВИД: а – схема; б – график, иллюстрирующий возрастание магнитного потока через сверхпроводящее кольцо со слабым звеном при увеличении внешнего магнитного поля

Рассмотрим принципы работы сверхпроводящих квантовых интерферометров – СКВИДов. Это название – русский вариант английской аббревиатуры SQUID (Superconducting Quantum Interference Device – «сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство»). Основа СКВИДа – сверхпроводящее кольцо с четырьмя выво-

дами, которые служат для подачи тока и съема напряжения. Эти несложные по конструкции сверхпроводящие приборы открыли новые горизонты в квантовой электронике.

Двухконтактный СКВИД (его называют также СКВИДом постоянного тока) представляет собой два ДП, параллельно включенные в сверхпроводящую цепь (рис. 27, а). В зависимости от интенсивности внешнего электромагнитного поля ток в цепи, в которую включен СКВИД, может изменяться от нуля (когда токи, идущие от двух ДП, взаимно гасят) до максимума (когда они сонаправлены и усиливают друг друга).

Сверхпроводящее кольцо со слабым звеном ведет себя в магнитном поле следующим образом. При увеличении внешнего потока магнитный поток Φ через кольцо тоже немного увеличивается (рис. 27, б) – сверхпроводящий ток кольца не может полностью экранировать внешнее поле. Затем наступает момент, когда этот сверхпроводящий ток превышает критический ток слабого звена, оно переходит в нормальное состояние, один квант потока проникает внутрь кольца (на рисунке это момент скачка), экранирующий ток резко падает, слабое звено вновь переходит в сверхпроводящее состояние, и кольцо снова начинает противодействовать дальнейшему нарастанию внешнего магнитного поля.

При другом возможном режиме на внешние контакты подается постоянный ток, и со СКВИДа можно снимать отличное от нуля напряжение, которое, однако, зависит еще и от магнитного поля, в котором находится СКВИД. Эта зависимость позволяет на основе СКВИДов создавать сверхточные магнитометры – измерители напряженности магнитного поля. Магнитометр на основе двухконтактного СКВИДа измеряет значения индукции магнитных полей $\sim 10^{-10}\text{--}10^{-11}$ Гс и способен фиксировать единичные кванты магнитного потока. Для сравнения: индукция магнитного поля Земли имеет значение $\sim 0,5$ Гс. Наряду с магнитометрией СКВИДы используются в магнитокардиографии и магнитоэнцефалографии.

Несколько слов следует сказать и о разработке джозефсоновских метрологических устройств, в частности стандарта вольта. Существовавший ранее стандарт имел точность лишь около 10^{-6} . В настящее время удалось резко повысить точность воспроизведения напряжения в 1 В с помощью ДП. Стандарт вольта на одном ДП дает

выходное напряжение примерно в 1 мВ. При использовании цепочки из 1500 последовательно включенных туннельных ДП был реализован стандарт вольта с выходным напряжением 1 В. Точность его воспроизведения составила 10^{-10} . Суть эксперимента сводится к следующему. При облучении матрицы, состоящей из нескольких тысяч ДП, микроволновым излучением на частотах от 10 ГГц до 80 ГГц возникает вполне определенное электрическое напряжение, с помощью которого и калибруются вольтметры. Современные экспериментальные образцы приборов с контактами Джозефсона могут обнаруживать напряжения порядка 10^{-15} Вт.

Существуют также *одноконтактные СКВИДы*, в которых ДП включен в замкнутое сверхпроводящее кольцо. Такие устройства носят название высокочастотных СКВИДов. На их основе могут быть созданы сверхвысокочувствительные усилители. Важно подчеркнуть, что для работы обоих типов СКВИДов существенны два явления – стационарный эффект Джозефсона и эффект сохранения и квантования магнитного потока в сверхпроводящем кольце.

Наибольшее применение в электронике сверхпроводники нашли при создании приемников электромагнитного излучения. С помощью сверхпроводниковых приемников можно уловить чрезвычайно слабое электромагнитное излучение. Сначала расскажем о приемниках на основе ДП. Пик научного интереса к ним пришелся на 1970–1980-е гг. В это время удалось создать джозефсоновские детекторные приемники с предельной чувствительностью.

Высшим достижением джозефсоновской электроники может считаться *торцевой джозефсоновский переход* (ТДП), устройство которого показано на рис. 28. Изготовленный по интегральной технологии, он по своим характеристикам является почти идеальным для использования в приемниках. Слабая связь в нем реализуется на торцевом срезе тонкой ниобиевой пленки, покрытой слоем легированного кремния. Ее размер может варьироваться, за счет чего меняются и параметры перехода.

На основе ТДП созданы широкополосные детекторы миллиметрового диапазона волн ($\lambda = 30\text{--}2$ мм), чувствительность которых определяется уже не собственными шумами приемного элемента, а внешним тепловым шумом. Таким образом, чувствительность этих детекторных приемников можно считать предельной. Детекторные радиомет-

ры на основе ТДП успешно использовались для проведения радиоастрономических и геофизических исследований, в том числе на борту научно-исследовательских судов.

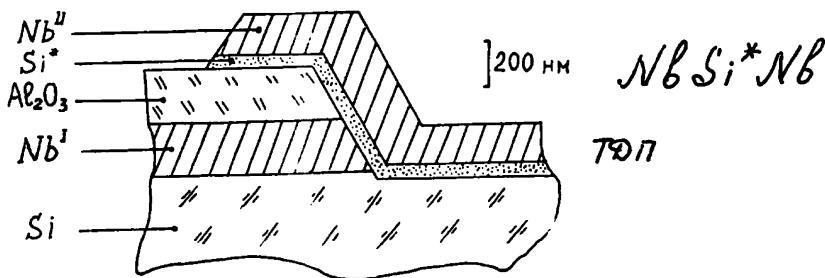


Рис. 28. Торцевой джозефсоновский переход

В сверхпроводниковой электронике в последнее время широко используются устройства, называемые *болометрами*. Назначение болометра состоит в измерении поглощаемой мощности слабого теплового излучения путем фиксации изменения температуры чувствительного элемента. Особенностью сверхпроводящих болометров является то, что зависимость их сопротивления от температуры вблизи сверхпроводящего перехода очень резкая. Если падающее излучение может вызвать хотя бы незначительное изменение температуры образца (например, на 10^{-4} К), то порождаемое им увеличение сопротивления (а значит, и мощность излучения) можно достаточно легко измерить. Такие болометры применяют в инфракрасной области спектра (длины волн $\lambda = 10\text{--}1000$ мкм), где измерения другими методами затруднены.

Сверхпроводящие болометры обладают рядом преимуществ. Они работают при низких температурах, и поэтому их собственные тепловые шумы очень малы. Для болометра со сверхпроводниковым приемником площадью $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ при температуре 4,2 К и времени измерения 1 с мощность шумов составляет всего 10^{-16} Вт. Чувствительность сверхпроводящих болометров к изменению температуры чувствительного элемента высока: можно получить изменение сопротивления в 1000 Ом на каждый градус. Зафиксировать такие изменения не составляет труда, поэтому болометры могут уловить ничтожно малый сигнал теплового излучения.

Сверхпроводящие приемники могут быть использованы также для регистрации α -частиц или других частиц высоких энергий. При попадании частицы в тонкую сверхпроводящую пленку происходит ее локальный разогрев. В результате этого какой-то участок пленки вдоль пути частицы на короткое время переходит в нормальное состояние. В измерительной схеме, присоединенной к приемнику, появляется импульс напряжения. Достоинством таких детекторов является их быстродействие: за 1 с сверхпроводниковый счетчик способен регистрировать около 10 млн частиц.

Наиболее популярными в последнее время стали *электронные болометры*. Дело в том, что традиционные болометры наряду с достоинствами имеют и существенный недостаток – они являются «медленными» приборами. Для получения высокого быстродействия необходимо эффективно и с высокой скоростью отводить теплоту от чувствительного элемента. Это, как правило, невозможно и неизбежно приводит к уменьшению болометрического эффекта, т. е. к потере чувствительности. Качественный скачок в одновременной реализации быстродействия и высокой чувствительности возможен лишь в том случае, когда фиксируется нагревание не решетки сверхпроводниковой пленки, а электронного газа в ней. Электронный газ в сверхпроводнике можно нагреть выше термодинамической температуры решетки кристалла. В этом случае принято говорить об *эффекте разогрева электронов в сверхпроводниках*. Его физические основы были подробно изучены в начале 1980-х гг. группой отечественных ученых под руководством профессоров Е. М. Гершензона и Г. Н. Гольцмана (см. модуль № 8).

Электронные болометры имеют множество преимуществ, главными из которых являются очень высокое быстродействие и уникально широкая полоса приема. На основе проведенных исследований было создано несколько типов быстродействующих приемников излучения с широкой полосой частот. Из них наиболее перспективными считаются сверхпроводниковые НЕВ (Hot Electronic Bolometers) – *сверхпроводниковые болометры на эффекте электронного разогрева*. Наибольшее распространение НЕВ получили в терагерцовом диапазоне частот.

Быстродействие сверхпроводникового болометра делает его перспективным для создания смесителя – основного узла супергетеродинного приемника. Используя в качестве смесителя болометр на горячих электронах можно создать узкополосные избирательные приемники во всей

области электромагнитного спектра: от терагерцовых волн до видимого света. В настоящее время создано множество НЕВ-смесителей терагерцового диапазона. Об их применении будет рассказано в модуле № 6.

В настоящее время в сверхпроводниковой электронике разрабатывается технология цифровых устройств на основе сверхпроводников – *технология устройств быстрой одноквантовой (БОК) логики*, или RSFQ (RapidSingleFluxQuantum) logic. Носителями логической информации в них являются одиночные кванты магнитного потока и соответствующие им одноквантовые импульсы напряжения, которые генерируются джозефсоновскими элементами. В качестве элементарных ячеек памяти в RSFQ-устройствах используются СКВИДы с индуктивным параметром, при котором магнитный поток через интерферометр квантуется: $\Phi = n\Phi_0$. В этом случае состояние $n = 0$ соответствует хранению в такой ячейке логического нуля, а состояние $n = 1$ – логической единицы. Поступление на вход логического устройства кванта магнитного потока в промежутке времени между двумя последовательными импульсами означает, что на этот вход подана логическая единица. Отсутствие кванта соответствует заданию логического нуля. Приход кванта магнитного потока на вход логического устройства сопровождается генерацией на его входном джозефсоновском элементе одноквантового импульса напряжения.

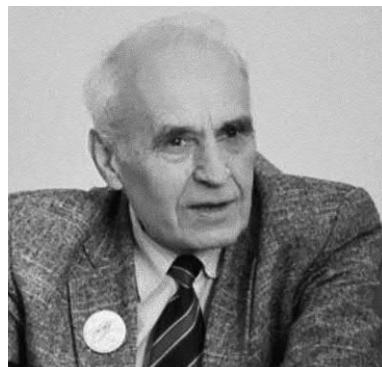
Диссипация энергии в RSFQ-устройствах пренебрежимо мала и примерно равна 10^{-18} Дж/бит (энергия диссипации на одну логическую операцию). Это примерно на пять порядков меньше, чем в полупроводниковых устройствах, где эта величина составляет 10^{-13} Дж/бит.

Перспективными направлениями использования сверхпроводниковых RSFQ-схем являются высокоскоростные вычислительные системы и обработка изображений для широкого спектра задач в науке и технике (в том числе для создания систем сверхчеткого цифрового телевидения).

Фотоника. Значительная информационная емкость когерентного источника света заставила исследователей задуматься над созданием технологий генерации, передачи, приема и обработки сигналов, осуществляемых не электронами, а фотонами. Это научное направление называют фотоникой. Ее формирование и развитие связано прежде всего с изобретением лазера, лазерного диода, появлением волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).

Создание первого оптического волновода позволило передавать огромные объемы информации с высокой скоростью. Важнейшую роль в развитии этого направления лазерной техники сыграл А. М. Прохоров, который возглавлял работы по созданию волоконных световодов с низкими потерями и малой дисперсией.

Полученные результаты и перспективность их практического применения привели в конечном счете к созданию Научного центра волоконной оптики при Институте общей физики (ИОФ) РАН. Его директор – ученик А. М. Прохорова, академик РАН Евгений Михайлович Дианов (р. 1936). В настоящее время он считается ведущим в России специалистом по волоконной оптике.



Е. М. Дианов

В данном контексте нельзя не сказать о работах лауреата Нобелевской премии по физике 2009 г. Чарльза Као (р. 1933), который стоял у истоков оптоволоконной технологии передачи данных. Главным теоретическим выводом его работ стало определение порогового значения коэффициента затухания сигнала.

Для того чтобы информация переносилась внутри оптоволоконных каналов без существенных потерь, коэффициент затухания не должен превышать 20 дБ/км. Однако в 1960-е гг. оптоволокно имело коэффициент затухания 1000 дБ/км и более. Тестируя разные материалы, группа исследователей во главе с Као пришла к выводу, что идеальным кандидатом для оптической связи является кварц. В нем наблюдался минимальный уровень затухания сигнала. Применение оптических волокон для линий связи обусловлено тем, что они обеспечивают вы-

сокую защищенность от несанкционированного доступа, низкое затухание сигнала при передаче информации на большие расстояния и возможность работать с высокими скоростями передачи.



Ч. Као

Эволюция фотонной технологии привела к синтезу фотоники и электроники. Иногда оказывается более удобным без участия электроники усиливать оптические сигналы, включать и выключать их или направлять в одну из нескольких цепей. Это стимулировало исследования нелинейных материалов, в которых интенсивность пропускаемого светового излучения не пропорциональна интенсивности падающего.

В лабораторных условиях нелинейный оптический отклик используется для создания фотонного аналога транзистора – *фотонного транзистора*. Его конструируют из кристаллического нелинейно-оптического материала и пары частично отражающих зеркал. При этом интенсивность света, пропускаемого этим материалом, не пропорциональна мощности падающего светового пучка. В качестве нелинейно-оптического материала используется сверхрешетка, выращенная путем попеременного нанесения слоев двух различных соединений. Свет проходит сквозь левое зеркало в кристалл сверхрешетки и частично отражается правым зеркалом (рис. 29, а). На рис. 29, б представлена кривая, изображающая зависимость пропущенной устройством мощности светового пучка от мощности падающего пучка. Мощность опорного пучка выбирается чуть ниже пороговой, отвечающей резкому возрастанию пропускаемой мощности.

Когда к опорному пучку добавляется слабый управляющий пучок, мощность падающего излучения уже несколько превышает пороговую. Другими словами, малое увеличение интенсивности падающего на материал света может вызвать значительное повышение его интенсивности на выходе. Таким образом, устройство эффективно усиливает свет управляющего сигнала. При определенной организации распространения света в нелинейной среде можно разработать фотонные логические цепи, которые моделируют логические операторы «И», «ИЛИ» и «НЕТ».

В будущем фотонные транзисторы и фотонные логические цепи могли бы стать базовыми элементами компьютера, основанного полностью на фотонной технологии. Дальнейшее развитие технологий фотонных транзисторов обычно связывают с фотонными кристаллами.

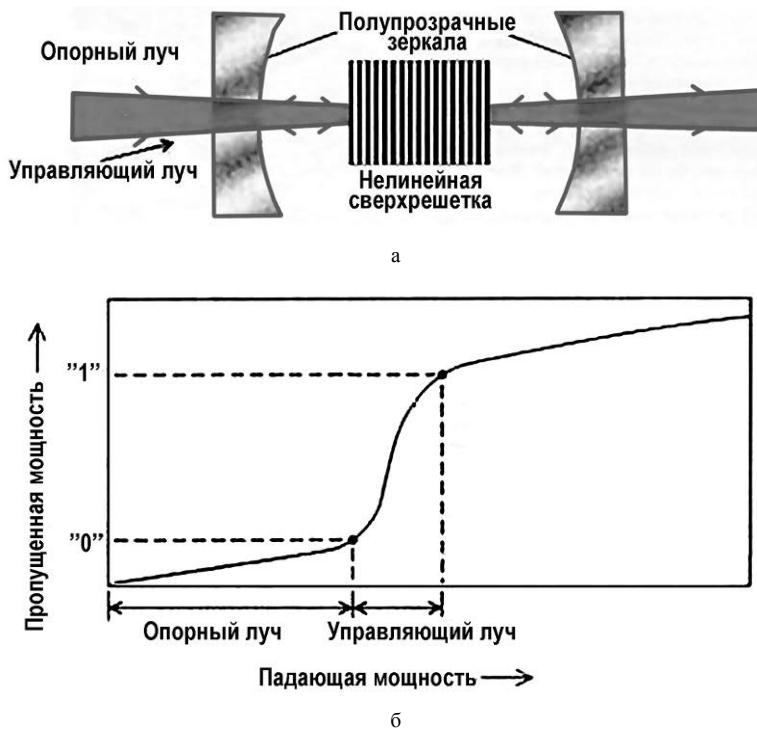


Рис. 29. а – устройство фотонного транзистора; б – график зависимости пропущенной устройством мощности от мощности падающего пучка

Фотонный кристалл – это сверхрешетка, искусственная структура со строго периодическим чередованием областей, отличающихся коэффициентом преломления n (диэлектрической проницаемостью ϵ). Этим термином принято обозначать класс оптических материалов, для которых характерны следующие свойства:

- периодическая модуляция диэлектрической проницаемости с периодом, сравнимым с длиной волны света;
- существование связанный с периодичностью кристалла полной запрещенной зоны в спектре собственных электромагнитных состояний кристалла.

Последнее из указанных свойств отличает фотонный кристалл от дифракционной решетки. Оно означает, что в конкретном спектральном диапазоне свет любой поляризации не может войти в образец или выйти из него ни в каком направлении. В этом и заключается уникальное свойство фотонного кристалла, с которым принято связывать возможные революционные события в технике оптической связи и компьютерных технологиях. В современных разработках это свойство фотонного кристалла пытаются использовать для создания фотонного транзистора.

В настоящее время проводятся интенсивные исследования свойств фотонных кристаллов, разработка теоретических методов их изучения, создание различных устройств на их основе. Специалисты предполагают, что фотонные кристаллы найдут широкие применения в следующих областях.

- Волноводы, основанные на фотонных кристаллах, могут быть очень компактными и обладать малыми оптическими потерями.
- С помощью фотонных кристаллов можно будет создавать среды с отрицательным показателем преломления, что даст возможность фокусировать свет в точку размерами меньше длины волны («суперлинзы»).
- Фотонные кристаллы обладают дисперсионными свойствами, что позволит конструировать «суперпризмы».
- На основе фотонных кристаллов возможно построение нового класса дисплеев, устройств оптической памяти, логических устройств и др.

В завершение рассказа о фотонике обсудим исследования лауреатов Нобелевской премии по физике 2009 г. (наряду с КАО) У. Бойла

и Дж. Смита. Они известны как изобретатели полупроводникового устройства (*ПЗС-матрицы*), позволяющего, минуя фотопленку, получать цифровые фотографии.



У. Бойл и Дж. Смит

Уиллард Бойл (1924–2011) и Джордж Смит (р. 1930), работая в научно-исследовательской фирме Bell Labs, получили задание разработать эффективное полупроводниковое устройство для записи и считывания информации. 17 октября 1969 г. ученые буквально в течение часа набросали на доске прототип требуемого устройства. В приборах с зарядовой связью (ПЗС или CCD – “Charge-Coupled Device”) образование электрона под действием фотона происходит в результате внутреннего фотоэффекта. Это явление состоит в перераспределении электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием излучений. При этом меняется концентрация носителей зарядов в среде и возникает проводимость – увеличение проводимости вещества под действием излучения.

Основным материалом ПЗС-элемента является подложка из кремния *p*-типа, которая оснащается каналами из полупроводника *n*-типа, над которыми из поликристаллического кремния изготавливаются прозрачные для фотонов электроды (рис. 30).

После подачи на такой электрод напряжения в обедненной зоне под каналом n -типа формируется потенциальная яма, в которой накапливаются заряды, возникшие в результате внутреннего фотоэффекта. При этом количество фотонов, попавших на ПЗС-элемент (пиксель), пропорционально заряду, накопленному потенциальной ямой.

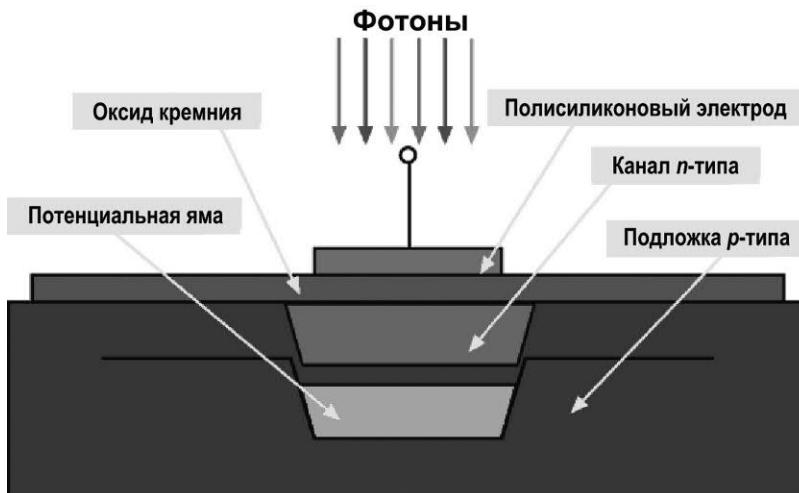


Рис. 30. Устройство ПЗС-элемента

Считывание заряда (фототока) производится последовательным регистром сдвига, подключенным к самой крайней строке матрицы. Данный регистр представляет собой строку из ПЗС-элементов, заряды в которойчитываются поочередно. Для этого используются электроды переноса, расположенные в промежутке между ПЗС-элементами. На эти электроды подаются потенциалы, «вытягивающие» заряд из одной потенциальной ямы и передающие его в другую.

При синхронной подаче потенциала на электроды переноса обеспечивается одновременный перенос всех зарядов строки справа налево (или слева направо) за один рабочий цикл. Заряд, оказавшийся «лишним», поступает на выход ПЗС-матрицы. Последовательный регистр сдвига преобразует заряды, поступающие на его вход в виде параллельных «цепочек», в последовательность электрических импульсов разной величины на выходе. Для того чтобы подать эти параллельные «цепочки» на вход последовательного регистра, используется регистр

сдвига, но на этот раз параллельный. За рабочий цикл происходит синхронное «сползание» фототоков вниз, а оказавшиеся «лишними» заряды нижней строки матрицы поступают на вход последовательного регистра.

ПЗС-матрицы давно применяют в компактных цифровых фото- и видеокамерах. Миниатюрные размеры ПЗС-матриц привели к революции в медицине, поскольку резко расширили как диагностические, так и оперативные возможности врача. Кроме того, ПЗС-матрицы широко используют не только для детектирования оптического излучения, но и в других диапазонах электромагнитных волн, в частности в цифровых рентгеновских установках с малыми дозами излучения. На основе ПЗС функционируют вершинные детекторы для регистрации элементарных частиц. ПЗС-матрицы стоят во всех современных наземных и космических телескопах. Во многом благодаря цифровым технологиям и ПЗС-матрицам широкогоризонтальная и планетарная камера космического телескопа «Хаббл» способна передавать на Землю изображения космических объектов высокого разрешения.

Какое будущее ожидает фотонику? Если сравнить развитие процессов интеграции в фотонике с процессами интеграции дискретных элементов в электронике, то можно предвидеть два этапа. В первую очередь оптические приборы будут интегрированы со связанный с ними электроникой (этот этап происходит в настоящее время). Затем могут быть созданы фотонные цепи, обходящиеся вообще без электронных элементов. Отметим, что в 2015 г. в МГУ был создан сверхбыстрый фотонный переключатель, работающий на кремниевых наноструктурах, который позволит создавать устройства передачи и обработки информации на скоростях в десятки и сотни терабит в секунду.

Спинtronика. Спинtronика – область квантовой электроники, изучающая взаимодействие собственных магнитных моментов электронов (спинов) с электромагнитными полями и разрабатывающая на основе обнаруженных эффектов спинtronные приборы и устройства.

Как известно, спины электронов могут быть ориентированы в направлениях, которые обычно называют «спин-вверх» и «спин-вниз». Если поместить электроны в магнитное поле, то их спины выстраиваются вдоль направления поля. При этом они будут прецессировать вокруг силовых линий. Если выключить поле, прецессия спина прекращается и его ориентация фиксируется. Другими словами, используя эффект

прецессии, можно менять спиновое состояние электрона и тем самым изменять бит информации, переносимый электроном, с логического «0» на «1» и обратно.

Примечательно, что в спинtronных устройствах переворот спина практически не требует затрат энергии, а в промежутках между операциями устройство отключается от источника питания. Если изменить направление спина, то кинетическая энергия электрона не изменится. Это означает, что почти не происходит выделения теплоты. Скорость изменения положения спина очень высока. Эксперименты показали, что переворот спина осуществляется за несколько пикосекунд.

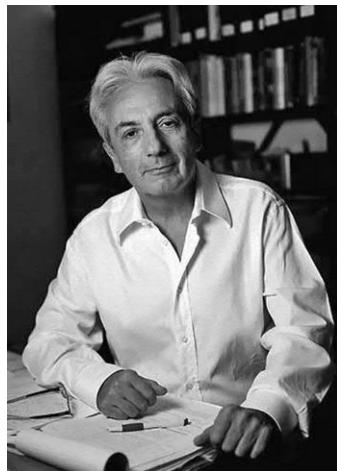
Интерес исследователей к спиновой электронике возник в 1988 г., в связи с открытием *эффекта гигантского магнитосопротивления* (ГМС). Этот квантово-механический эффект наблюдается в тонких металлических пленках, состоящих из чередующихся ферромагнитных и проводящих немагнитных слоев. Эффект ГМС состоит в значительном изменении электрического сопротивления такой структуры при изменении взаимного направления намагниченности соседних магнитных слоев. Направлением намагниченности можно управлять, например, приложением внешнего магнитного поля.

Простейшая физическая система, в которой может проявиться ГМС, состоит из слоя немагнитного материала, зажатого между двумя слоями магнитного металла (ферромагнетика). Эффект возникает из-за зависимости рассеяния электронов от направления их спина по отношению к вектору намагниченности. Приложение внешнего магнитного поля вдоль слоев ориентирует векторы намагниченности во всех слоях в одном направлении. Электроны, спин которых направлен в сторону, противоположную вектору намагниченности, рассеиваются на границах «металл – ферромагнетик» сильнее, чем со спином в направлении намагниченности. Таким образом, сопротивление максимально при антипараллельном расположении намагниченностей слоев и минимально при их параллельном расположении.

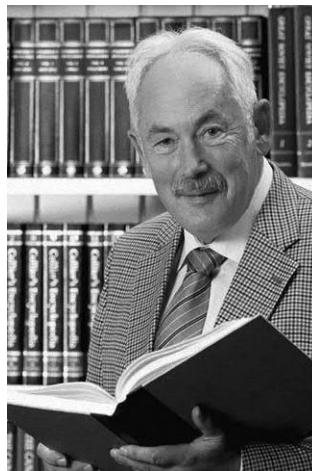
В середине 1980-х гг. французский ученый Альбер Ферт (р. 1938) и его коллеги создали систему из 30 чередующихся слоев железа и хрома. При этом каждый слой имел толщину в несколько атомных слоев. Группа немецкого физика Петера Грюнберга (р. 1939) разработала более простую систему, составленную только из трех слоев железа со слоем хрома (толщиной около 1 нм), зажатого между ними.

Ферт обнаружил, что сопротивление пленок уменьшается на 50%, когда относительная намагниченность ферромагнитных слоев изменяется от антипараллельной до параллельной конфигурации при наложении внешнего магнитного поля в условиях низких температур. У Грюнберга показатели оказались меньше – всего 1,5%, но при комнатной температуре (это значение выросло до 10% при температуре 5 К).

Физическая природа эффекта, который независимо наблюдали обе группы ученых, оказалась одинаковой. Ферт был одним из тех, кто предложил теоретическое объяснение явления ГМС и в своей первой публикации 1988 г. указал, что открытие может иметь большое значение для практики.



А. Ферт



П. Грюнберг

Грюнберг также отметил высокую практическую ценность обнаруженного явления. Прогноз ученых полностью сбылся. На основе ГМС удалось создать высокоточные сенсоры магнитного поля, датчики углового вращения и, самое главное, считающие головки жестких дисков. За открытие ГМС Ферт и Грюнберг были удостоены Нобелевской премии по физике 2007 г.

В качестве устройства, в основе работы которого лежит эффект ГМС, рассмотрим *спиновый клапан*. Он состоит из четырех слоев, схематически показанных на рис. 31.

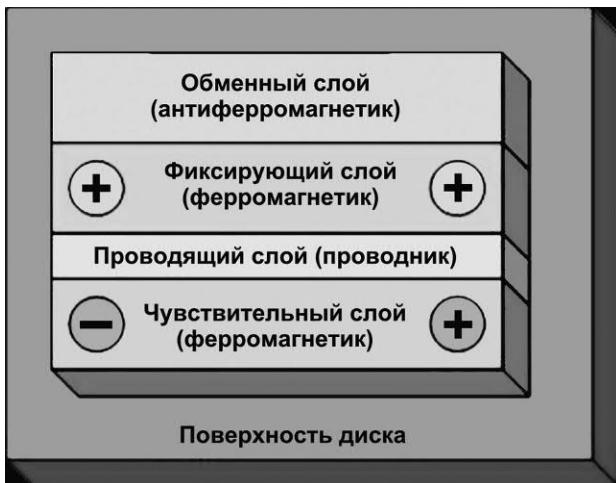


Рис. 31. Устройство спинового клапана

Верхний слой, состоящий из антиферромагнетика, называется обменным и предназначен для того, чтобы зафиксировать магнитное поле второго слоя, который так и называется – фиксирующим. Для обеспечения необходимых магнитных свойств его изготавливают из ферромагнетика (сплавы никеля, железа, кобальта). Магнитное поле фиксирующего слоя всегда направлено в одну сторону. Третий слой – проводящий – обычно выполняется из меди и предназначен для разделения фиксирующего и чувствительного слоев. Последний, чувствительный слой изготавливается из ферромагнетика. В отличие от фиксирующего слоя, направление магнитного поля в нем определяется внешним магнитным полем. В данном случае – это магнитное поле ячейки жесткого диска, которая содержит один бит информации. В зависимости от состояния ячейки изменяется ориентация магнитного поля в чувствительном слое.

Если ориентация магнитного поля в чувствительном и в фиксирующем слоях совпадают, то сопротивление сенсора уменьшается до минимальной величины. Это происходит вследствие того, что те электроны, спины которых совпадают с направлением магнитного поля, не испытывают значительного сопротивления и легко проходят сквозь все слои. Если же ориентация магнитного поля в чувствительном и в фиксирующем слое противоположны друг другу, то вне зависимо-

сти от ориентации спина электроны будут испытывать значительное сопротивление в одном из ферромагнитных слоев.

Такой спиновый клапан помещают в считывающую головку, сканирующую жесткий диск. В жестких дисках информация кодируется с помощью магнитных доменов, когда одному направлению намагниченности в них ставится в соответствие логическая единица «1», а противоположному – логический нуль «0». У жесткого диска фиксирована намагниченность первого ферромагнитного слоя, а намагниченность второго ферромагнитного слоя изменяется при изменении магнитного поля жесткого диска. При параллельной намагниченности двух слоев сопротивление образца низкое, и наоборот. Скачок сопротивления позволяет с высокой точностью различать два состояния намагниченности системы, которым приписывают логический «0» и «1».

В декабре 1997 г. компания IBM запустила в серийное производство первые жесткие диски с ГМС-головкой и плотностью записи 2,69 Гбит/кв. дюйм. С тех пор плотность записи удвоилась, но потенциал технологий не исчерпан. Следующие компьютеры с терабайтными жесткими дисками попросту невозможно представить себе без ГМС. Сейчас существуют считывающие ГМС-головки, работающие в жестких дисках с плотностью записи более 100 Гбайт/кв. дюйм.

Спинtronика уже позволила создать ряд эффективных устройств. Так, компания Motorola начала массовое производство спинtronных модулей памяти MRAM (Magnetoresistance Random Access Memory – «магниторезистивная память с произвольной выборкой»). В отличие от других типов запоминающих устройств, информация в магниторезистивной памяти хранится не в виде электрических зарядов или токов, а в магнитных элементах памяти. Магнитные элементы сформированы из двух ферромагнитных слоев, разделенных тонким слоем диэлектрика. Один из слоев представляет собой постоянный магнит, намагниченный в определенном направлении, а намагниченность другого слоя изменяется под действием внешнего магнитного поля.

Устройство памяти организовано по принципу сетки, состоящей из отдельных «ячеек», содержащих элемент памяти и транзистор. Считывание информации осуществляется измерением сопротивления ячейки. Оно изменяется в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей в слоях. По величине протекающего тока можно определить сопротивление данной ячейки. Обычно одинаковая ориентация

намагнченности в слоях элемента интерпретируется как логический «0», в то время как противоположное направление намагнченности слоев, характеризующееся более высоким сопротивлением, – как логическая «1».

Основным преимуществом модулей памяти MRAM является то, что записанная информация не пропадает при отключении питания, так как электроны способны сохранять положение спина сколь угодно долго. MRAM уже нашла применение в сотовых телефонах, мобильных компьютерах, идентификационных картах. Новую память используют военные для управления боевыми ракетами и для контроля за космическими станциями.

Современную компьютерную, теле- и видеотехнику невозможно представить без спинtronных устройств. Помимо жестких дисков, достижения спинtronики можно найти в персональных видеорекордерах (тюнерах для захвата видеосигнала с аналоговых устройств), аппаратуре телевидения высокой четкости (HDTV), DVD-приводах с интерференцией в ближнем поле (NFR, nearfieldrecording) и т. д.

Квантовая теория информации. Квантовая теория информации – междисциплинарное научное направление, возникшее благодаря развитию идей квантовой механики, теории информации, дискретной математики. В начале 1980-х гг. П. Бенеффу, Р. Фейнману, Д. Дойчу и Ю. И. Манину удалось свести воедино две дисциплины, которые ранее считались взаимоисключающими, – квантовую физику и информатику. Бенефф выдвинул идею универсального квантового компьютера – машины, которая выполняет логические операции, опираясь на квантовые алгоритмы. Фейнман показал, что квантовый компьютер для ряда задач является более мощным, чем классический, Дойч разработал идею квантового параллелизма, а Манин первым выдвинул идею квантовых вычислений.

Простейшей системой, выполняющей функцию, аналогичную битам в классических компьютерах, является система с двумя возможными состояниями. Для обозначения состояния такой квантовой двухуровневой системы предложен специальный термин: *q*-бит (*кубит*) – квантовый бит информации – состояние квантовой системы с двумя возможными базовыми состояниями «0» и «1». В отличие от классических битов, *q*-биты могут существовать одновременно в состоянии «0» и «1» с вероятностью для каждого состояния, задан-

ной числовым коэффициентом. Здесь проявляется базовый принцип квантовой механики – квантовая суперпозиция состояний. Описание q -битного компьютера из двух ячеек требует 4 коэффициентов, nq -битного – 2^n коэффициентов. При этом квантовый компьютер в силу квантовой суперпозиции может находиться одновременно во всех возможных состояниях, а также может воздействовать на все эти состояния.

Физическими системами, реализующими q -биты, могут быть любые объекты, имеющие два квантовых состояния: поляризационные состояния фотонов, электронные состояния изолированных атомов или ионов, спиновые состояния ядер атомов и др. Полномасштабный квантовый компьютер должен содержать большое число кубитов (сотни и даже тысячи), чтобы на нем действительно можно было решать реальные задачи.

Когда Фейнман впервые обратил внимание на возможность построения процессора, работающего на квантово-механических принципах, не было понятно, в решении каких математических проблем такой компьютер может дать преимущество по сравнению с его классическим аналогом. Первый убедительный пример был найден в 1994 г. американским ученым П. Шором при рассмотрении задачи факторизации (разложение натурального числа в произведение простых множителей) большого n -значного числа.

В качестве примера приведем задачу вычисления произведения двух простых чисел, например, 521 и 809. Такая задача не вызывает никаких затруднений. Однако обратная задача – нахождение простых сомножителей числа 421 489 – потребует определенного времени. Известно, что это время растет с ростом длины n факторизуемого числа как $\exp(n^{1/3})$. Достижение Шора состоит в том, что он нашел алгоритм, основанный на особенности квантовых вычислений, уменьшающий рост этого времени до n^2 . Квантовый алгоритм Шора дает многократное ускорение вычислений, причем, чем длиннее факторизуемое число, тем значительнее выигрыш в скорости обработки данных. Эта задача носит нетривиальный характер, поскольку ее решение позволило бы расшифровывать коды, применяемые на практике.

К одной из основных проблем, стоящих на пути реализации квантового компьютера, относится быстрый распад суперпозиционных состояний и превращение их в смесь. Этот процесс называют *декогеренцией*. Она определяет главное требование к физическим элементам

в квантовых компьютерах: время сохранения когерентности состояний должно превышать время вычислений.

Хотя идея о возможности создания квантовых компьютеров была высказана еще 1980-х гг., реальные результаты по ее воплощению были достигнуты только в конце 1990-х гг. Современное состояние теории и экспериментального обеспечения ЯМР позволяет считать его одним из самых мощных методов получения информации о строении и поведении многоэлектронных систем (см. модуль № 3). С помощью спектроскопии ЯМР можно получать широкий набор импульсных радиочастотных последовательностей, которые могут обеспечить выполнение унитарных преобразований над системой кубитов. Именно с помощью ЯМР был впервые реализован элементарный квантовый алгоритм (1998 г.) с использованием двух кубитов, в качестве которых в одном случае выступали спины ядер атомов водорода, а в другом – ядер атомов водорода и углерода.

В течение последующих лет в этом направлении была выполнена серия работ, направленных на увеличение числа ЯМР-кубитов в элементарном квантовом процессоре. Так, группой А. Чуанга из компании IBM был создан 7-кубитовый квантовый компьютер. В России вопросами практической реализации квантового компьютера занимается ряд исследовательских групп, ядро которых составляет научная школа академика РАН К. А. Валиева. В 2003 г. Ю. А. Пашкиным и его сотрудниками (вместе с японскими специалистами) был разработан двухкубитный квантовый процессор на сверхпроводящих элементах. Тем самым была впервые реализована квантовая связь между двумя кубитами.

В 2007 г. канадская компания D-Wave продемонстрировала первый квантовый компьютер в Компьютерном музее в Калифорнии. Компьютер “Orion” компании D-Wave построен на кремниевом чипе и содержит 16 кубитов, соединенных друг с другом (рис. 32). Одна квантовая операция на нем эквивалентна 65 526 операциям на обычном компьютере.

Каждый кубит состоит из кристалла сверхпроводящего ниобия, помещенного в катушку индуктивности. Электрический ток, протекающий по катушке, генерирует магнитное поле, а оно, в свою очередь, изменяет состояния кубита. Важное преимущество компьютера “Orion” состоит в том, что он имеет минимальный расход энергии,

так как ниобий при низких температурах – сверхпроводник и, таким образом, не выделяет теплоты. При этом квантовый чип рассеивает мощность всего в несколько нановатт. Компьютер “Orion” оптимизирован для реализации сложных задач моделирования. Система может использоваться и в других областях, например, при анализе патентных баз данных, для поиска пар одинаковых или перекрывающихся объектов интеллектуальной собственности и др.

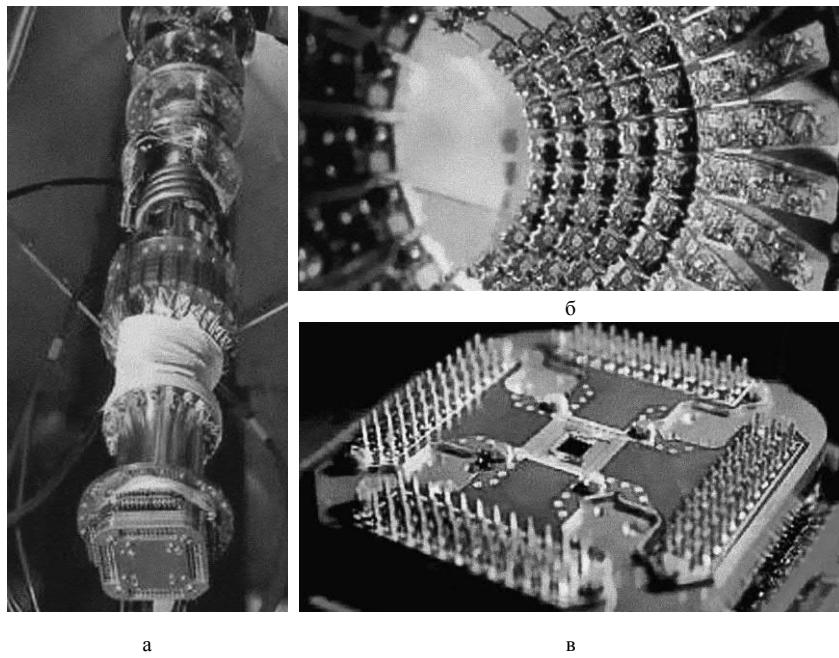


Рис. 32. Элементы квантового компьютера “Orion” компании D-Wave: а – квантовый процессор в сборе; б – электронные модули для связи с квантовым чипом; в – кремниевый квантовый чип с 16 кубитами

В 2011 г. был представлен компьютер “D-Wave One”, созданный на базе 128-кубитного квантового процессора. С помощью этого компьютера была успешно решена задача построения трехмерной модели молекулы белка по известной последовательности аминокислот.

Поговорим теперь о сферах применения квантовой информации. Начнем с *квантовой криптографии*, которую используют для передачи конфиденциальной информации по открытым каналам связи (на-

пример, через Интернет) и для установления достоверности передаваемых сообщений. Свойство квантовых объектов изменять состояние при измерении как нельзя лучше подходит для обеспечения секретности сообщений, передаваемых по открытым сетям.

Первый криптографический протокол обмена данными, основанный на квантовых свойствах фотонов, был придуман Ч. Беннетом и Ж. Брассаром в 1984 г. Они высказали идею о создании защищенного канала с помощью квантовых состояний. После этого ими была предложена схема (BB84), в которой легальные пользователи (Алиса и Боб) обмениваются сообщениями, представленными в виде поляризованных фотонов, по квантовому каналу. Злоумышленник (Ева), пытающийся перехватить передаваемые данные, не может произвести измерение фотонов без искажения текста сообщения. Легальные пользователи по открытому каналу сравнивают сигналы, передаваемые по квантовому каналу, тем самым проверяя их на возможность перехвата. Если ими не будет выявлено никаких ошибок, то переданную информацию можно считать секретной.

Первая работающая квантово-криптографическая схема была построена в 1989 г. в Исследовательском центре компании IBM все теми же Беннетом и Брассаром. Данная схема представляла собой квантовый канал, на одном конце которого находился передающий аппарат Алисы, а на другом – принимающий аппарат Боба. Оба аппарата были размещены на оптической скамье длиной около 1 м, в светонепроницаемом кожухе. Управление происходило с помощью компьютера, в который были загружены программные данные легальных пользователей и злоумышленника. Сохранность тайны передаваемых данных напрямую зависела от интенсивности вспышек света, используемых для передачи.

Слабые вспышки, хотя и делают трудным перехват сообщений, все же приводят к росту числа ошибок у легального пользователя, при измерении поляризации фотонов. Повышение интенсивности вспышек значительно упрощает перехват путем расщепления начального пучка света на два: первого – направленного легальному пользователю, а второго – анализируемого злоумышленником. Легальные пользователи могут исправлять ошибки с помощью специальных кодов, обсуждая по открытому каналу результаты кодирования. Но все-таки при этом часть информации попадает к злоумышленнику. Тем не менее

легальные пользователи Алиса и Боб, изучая количество выявленных и исправленных ошибок, а также интенсивность вспышек света, могут дать оценку количества потеряной информации.

Одно из самых важных достижений в области квантовой криптографии состоит в том, что показана возможность передачи данных по квантовому каналу со скоростью до 1 Мбит/с. Это стало возможно благодаря технологии разделения каналов связи по длинам волн и их единовременного использования в общей среде. В настоящее время квантовая криптография только приближается к практическому уровню использования.

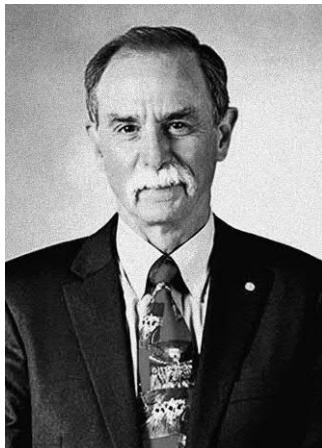
В основу *квантовой телепортации* положена идея о передаче квантового состояния на расстояние с помощью разъединенной в пространстве сцепленной (запутанной) пары и классического (неквантового) канала связи. При этом квантовое состояние разрушается в точке отправления при проведении измерения, после чего оно воссоздается в точке приема. В квантовой телепортации не происходит передачи энергии или вещества на расстояние. Обязательным этапом при квантовой телепортации является передача информации между точками отправления и приема по классическому каналу, которая может осуществляться не быстрее, чем со скоростью света.

Экспериментальная реализация квантовой телепортации поляризованного состояния фотона была осуществлена в 1997 г. независимо группами ученых под руководством А. Цайлингера и Ф. де Мартини. В 2009 г. впервые удалось телепортировать квантовое состояние иона на 1 м. В 2010 г. в эксперименте, поставленном физиками из Национального университета Китая и университета Цинхуа, проводилась передача квантового состояния фотона на 16 км. Наконец, в 2012 г. физики из университета Вены и Академии наук Австрии установили новый рекорд в квантовой телепортации. Им удалось передать квантовые состояния двух квантовых точек на расстояние, равное 143 км!

Завершая рассказ об исследованиях в области квантовой информации, необходимо обсудить фундаментальные работы нобелевских лауреатов по физике 2012 г. С. Ароша и Д. Уайнленда. Независимо друг от друга они предложили оригинальные методы, позволяющие измерять и контролировать очень неустойчивые квантовые состояния, «поймать» которые ранее считалось невозможным.



С. Арош



Д. Уайнленд

Серж Арош (р. 1944) работает с квантовыми состояниями одиночных фотонов, заключенных в резонатор, а Дэвид Уайнленд (р. 1944) – с квантовыми состояниями одиночных ионов, пойманых в ловушку. При этом Арош использует атомы, чтобы наблюдать за состоянием фотона, а Уайнленд – фотоны, чтобы манипулировать состояниями ионов.

Группа Ароша выполнила несколько блестящих исследований, позволивших по-новому взглянуть на основополагающие квантовые явления. Так, например, в 2007–2008 гг. удалось наблюдать ряд удивительных квантовых эффектов.

- Появление и исчезновение отдельного фотона в резонаторе.
- Постепенный «коллапс» семифотонного начального состояния, в котором видно, как на протяжении 0,5 с фотоны один за другим исчезают из резонатора.
- Состояния типа «кота Шредингера», когда в резонаторе находится не какое-то определенное количество фотонов, а суперпозиция трехфотонного и четырехфотонного состояния (тем самым был реализован знаменитый мысленный эксперимент с «однофотонным ящиком», придуманный еще на заре квантовой механики).
- Квантовый эффект Зенона в резонаторе (непрерывное наблюдение за распадающейся системой «замораживает» ее распад) и др.

Манипуляция квантовым состоянием отдельного иона – не менее трудная с технической точки зрения задача. Для того чтобы добиться квантования поступательного движения, отдельный атом или ион требуется не просто поймать, но и охладить до очень низких температур (порядка милликельвинов и ниже). Технология ионных ловушек, в которых заряженные частицыдерживаются в центре переменным электромагнитным полем определенной формы, была разработана полвека назад. Она принесла своим создателям, В. Паулю и Х. Демельту, половину Нобелевской премии по физике 1989 г. В 1973 г. Д. Уайнленд, Ф. Экстром и Х. Демельт сообщили о первых экспериментах с одиночным электроном, удерживаемым в ловушке, а также высказали идею о полной квантовой локализации отдельного иона. Она была реализована лишь в 1995 г., во многом благодаря достижениям группы Уайнленда. Как только поступательное движение иона в ловушке полностью подчинилось исследователям, были реализованы необычные квантово-механические ситуации.

В 1998 г. Уайнленд добился квантового запутывания двух пространственно разнесенных ионов. На данный момент уже реализовано квантовое запутывание 14 ионов, а также многие из логических операций, необходимых для работы квантового вычислителя. Группой Д. Уайнленда предложена принципиальная схема квантового компьютера на цепочке холодных ионов, удерживаемых в ловушке. Специально подготовленные световые импульсы управляют логическими операциями между ионами, а чувствительная фотокамера детектирует свечение отдельных ионов и тем самым считывает результат операций.

Пленение и квантовый контроль отдельных ионов позволяют создать новый сверхстабильный стандарт частоты. Так, группа Уайнленда сообщила о создании оптических часов. В них два иона совместно измеряют время в 100 раз точнее, чем современный цезиевый стандарт. Темп хода новых часов был измерен с относительной точностью 10^{-17} !

Результаты, полученные Арошем и Уайнлендом, по праву считаются прорывными и открывают перспективы для реализации квантовых компьютеров в обозримом будущем. Возможно, они изменят нашу повседневную жизнь уже в этом столетии также кардинально, как это сделали обычные компьютеры в прошлом веке. Завершая рассказ об исследованиях, связанных с реализацией квантовых компьютеров,

отметим, что на этом пути существует еще много неразрешенных проблем, прежде всего экспериментального характера. На их преодоление может уйти не один год. Но если это все-таки случится и квантовый компьютер будет построен, нас, несомненно, ожидают новые открытия в информационных технологиях.

Итак, информационные технологии за последние несколько десятилетий радикально изменили наше общество. Современные системы связи обладают высоким быстродействием, они могут хранить большой объем информации и передавать его за короткий промежуток времени на значительные расстояния. Достижения квантовой электроники поистине огромны и столь же впечатляющи, как в атомной энергетике или ракетно-космической отрасли.

Рассмотренные разработки в области сверхпроводниковой электроники, фотоники, спинtronики, квантовой теории информации открывают захватывающие перспективы для развития компьютерной техники и микроэлектроники. Отметим, что в силу ограниченности объема книги в модуле не были описаны такие инновационные направления квантовой электроники, как одноэлектронника (в частности, графеновая электроника) и биокомпьютеры.

Модуль № 5. Исторический обзор развития лазерной спектроскопии

Первоначально оптика ограничивалась изучением воспринимаемой человеческим глазом видимой области спектра электромагнитных волн с длинами волн $\lambda = 0,4\text{--}0,76$ мкм. Современная оптика изучает также ультрафиолетовую (включая мягкие рентгеновские лучи) и инфракрасную области спектра вплоть до радиоволн миллиметрового диапазона. В модуле № 3 была описана история открытий в области радиоспектроскопии. Отметим, что именно с помощью методов радиоспектроскопии впервые наблюдалось вынужденное (индуцированное) излучение, что привело к созданию квантовых генераторов и усилителей (мазеров и лазеров). В связи с этим лазерную спектроскопию, наряду с микроволновой, следует считать областью приложения радиофизических методов.

В основе лазерной спектроскопии лежит фундаментальный факт: атомы и молекулы поглощают и испускают электромагнитное излучение на частотах, соответствующих разностям энергий между их различными энергетическими уровнями. Изучение спектров излучения и поглощения атомов позволяет идентифицировать химические элементы, устанавливать структуру атомов и молекул, проверять выводы квантовой теории электромагнитного излучения.

Во многих видах спектроскопии спектральные линии (узкие полосы частот) уширяются из-за *эффекта Доплера*. Под этим эффектом подразумевается изменение наблюдаемой частоты при движении источника излучения относительно наблюдателя. При этом частота увеличивается, когда излучатель приближается к наблюдателю, и уменьшается при удалении от него, причем величина повышения или понижения частоты зависит от того, как быстро приближается или удаляется источник. В спектроскопии частоты, испускаемые атомами или молекулами, которые всегда находятся в тепловом движении, зависящем от их температуры, сдвигаются в сторону повышения или понижения в зависимости от направления их движения. Поскольку атомы и молекулы движутся в различных направлениях, их спектральные линии уширяются.

В случае спектров поглощения, когда «наблюдателем» является атом или молекула, на которые падает излучение, спектральные линии

представляют собой пики со спадающими краями. Из-за доплеровского уширения линий два близко расположенных пика могут перекрываться, а небольшой пик может оказаться трудно различимым на фоне более крупного и поэтому оставаться незамеченным.

Применение монохроматического излучения лазеров позволяет стимулировать квантовые переходы между определенными уровнями энергии атомов и молекул. После создания достаточно мощных лазеров видимого диапазона были осуществлены первые лазерные эксперименты в спектроскопии.



А. Л. Шавлов

Значительный вклад в становление лазерной спектроскопии внес американский физик Артур Леонард Шавлов (1921–1999). Работая вместе с Т. Хеншем в Стэнфордском университете, он разработал несколько способов, которые позволяют преодолеть трудности, связанные с доплеровским уширением. В частности, этого удавалось добиться путем выделения спектров поглощения, испущенных атомами, скорость которых не содержит компоненты, параллельной лазерному пучку. Поскольку такие атомы не приближаются к источнику излучения и не удаляются от него, эффект Доплера полностью исключается. В 1972 г. Шавлов и его сотрудники получили первые оптические спектры атомарного водорода, на которых не сказывался эффект Доплера, что позволило с недостижимой ранее точностью измерить постоянную Ридберга.

Спектры молекул, вообще говоря, гораздо сложнее, чем спектры атомов, и Шавлов воспользовался лазерами для упрощения молекулярных спектров с помощью так называемых лазерных меток. Молекулы переводятся в определенное энергетическое состояние с помощью лазерного излучения, настроенного на нужную частоту (энергию фотона), после чего исследователь наблюдает за возвращением их на более низкие энергетические уровни. Поскольку это верхнее состояние выделено из всех возможных соседних состояний, оно называется меченым. Шавлов разработал также метод лазерной спектроскопии, позволяющий определять следы химических элементов в окружающем материале.

В 1981 г. Шавлов вместе с Н. Бломбергеном был удостоен половины Нобелевской премии «за вклад в развитие лазерной спектроскопии». Другая половина премии была присуждена К. Сигбану за близкую по тематике работу в области электронной спектроскопии.

Важным этапом в развитии лазерной спектроскопии стало создание лазеров с перестраиваемой частотой. Излучение такого лазера практически монохроматично и обладает высокой интенсивностью (можно получать спектры при относительно малом числе атомов или молекул). Это существенно для спектроскопии газов в инфракрасной области, где разрешение лучших приборов обычного типа составляет $0,1 \text{ см}^{-1}$, что в 100 раз превышает ширину узких спектральных линий. Временная и пространственная когерентность лазерного излучения, на которой основана нелинейная лазерная спектроскопия, позволяет изучать структуру спектральных линий, скрытую доплеровским уширением.

Короткие и ультракороткие лазерные импульсы дают возможность исследовать быстропротекающие ($\sim 10^{-6}\text{--}10^{-12}$ с) процессы возбуждения, перехода в невозбужденное состояние и передачи возбуждения в веществе. С помощью импульсов направленного лазерного излучения можно исследовать спектры рассеяния и флуоресценции атомов и молекул в атмосфере на значительном расстоянии (~ 100 км) и получать информацию о ее составе, а также осуществлять контроль загрязнения окружающей среды. Фокусируя лазерное излучение, можно исследовать состав малых количеств вещества (имеющих размеры порядка длины волны), что успешно используется в локальном эмиссионном спектральном анализе.

Рассмотрим физические основы, примеры научного и технического использования методов лазерного удержания охлажденных атомов, разработка которых привела к стремительному развитию лазерной спектроскопии.

5.1. Лазерное охлаждение атомов

Лазерное излучение можно использовать для воздействия на поступательное движение атомов с целью их остановки и охлаждения, поскольку оно обладает моментом количества движения (импульсом). Момент количества может быть только передан, но не создан и не уничтожен. При взаимодействии вещества и света момент количества движения передается путем обмена фотонами. Число фотонов, необходимых для охлаждения, огромно. Так, для остановки одного атома натрия, имеющего скорость 1000 м/с, нужно, чтобы с ним столкнулось $\sim 30\,000$ фотонов.

Лазерное охлаждение атомов достигается при настройке лазерного излучения на частоту, меньшую той, на которой происходят резонансное поглощение и испускание света атомами. Атомы, которые движутся навстречу лазерному лучу, будут обладать нужной скоростью и соответствующим доплеровским сдвигом, позволяющим им поглощать и переизлучать фотоны и замедляться. В свою очередь, атомы, которые движутся в том же направлении, что и лазерный луч, «видят» частоту его излучения сильно смещенной, они слабо поглощают свет и их скорости изменяются незначительно. В результате ансамбль атомов в целом замедляется.

Помимо доплеровского уширения, другим следствием теплового движения атомов является времяпролетное уширение. Поскольку атомы постоянно движутся, они не остаются в области наблюдения достаточно долго. Ограниченнное время наблюдения приводит к уширению спектральных линий. Чем выше скорость атомов, тем меньше время наблюдения и тем больше уширение линий.

Очевидно, что лазерное охлаждение атомов – наиболее эффективный способ сведения к минимуму перечисленных выше эффектов, позволяющий проводить эксперименты с высокой точностью. Исследования, выполненные различными группами ученых, позволили охладить ионы до температуры, всего лишь на несколько тысячных

долей градуса отличающейся от абсолютного нуля. Априори ясно, что охлажденные или локализованные атомы представляют исключительный интерес при изучении фундаментальных законов физики. Например, в 1986 г. охлаждение и локализация атомов были использованы для прямого наблюдения такого фундаментального квантового процесса, как переход атома с одного дискретного энергетического уровня на другой (квантовый скачок). В данном случае локализация могла быть достигнута достаточно легко, поскольку атом был ионизирован, т. е. один из его электронов был оторван от него.

Развитые в последнее время методы сделали возможным локализацию даже нейтральных атомов. Основная трудность при их охлаждении заключается в том, что они (в отличие от ионов) испытывают более слабое воздействие со стороны электрических и магнитных полей. Ионы даже при комнатной температуре достаточно легко захватываются в таких полях, однако нейтральные атомы необходимо предварительно охладить до температур ниже 1 К, и только тогда они могут быть захвачены в ловушку.

Здесь нужно отметить пионерские работы ученика Н. Г. Басова Владилена Степановича Летохова (1939–2009) и его научной школы. Работая в Институте спектроскопии АН СССР (ИСАН), он предложил методы управления движением атомов вплоть до их остановки и осуществил первые в мире эксперименты по лазерному охлаждению атомов. Впоследствии эти работы были продолжены в США на более совершенном оборудовании и привели к фундаментальным результатам. Первый успешный эксперимент по замедлению пучка атомов натрия был проведен в 1979 г. В. И. Балыкиным, В. С. Летоховым и В. И. Мишиным. Исследователи получали пучок путем нагревания источника, содержащего металлический натрий, до 450° С. Металл испарялся и атомы вылетали из источника через малое отверстие в виде расходящегося пучка. Из него с помощью другой диафрагмы, расположенной на расстоянии 10 см от источника, выбиралась небольшая узкая часть. В эксперименте лазер светил прямо навстречу натриевому пучку, поэтому каждый атом мог взаимодействовать со светом сколь угодно долго. Когда атом поглощал свет, он совершал «скакок» в возбужденное состояние. В основное состояние атом может вернуться одним из двух способов: при стимулированном или при спонтанном испускании фотона.



В. С. Летохов

Если происходило стимулированное (вызванное лазерным светом) испускание, то испущенные фотоны летели в том же направлении, что и поглощенные, и импульс атома не изменялся. Если же происходило спонтанное испускание, то фотоны разлетались по направлениям случайным образом. В результате повторяющихся поглощений и последующих испусканий фотонов удалось замедлить атомы в направлении лазерного луча. Когда атомы немного замедлялись, всего на несколько метров в секунду, их доплеровский сдвиг изменялся так, что поглощение света ослаблялось. В результате атомы переставали замедляться и продолжали свое движение в лазерном свете. Одним из способов, которым можно скомпенсировать этот нежелательный эффект, является перенос частоты лазера в высокочастотную область, чтобы при замедлении атомы продолжали поглощать излучение. Именно такой подход к решению проблемы был предложен и осуществлен В. С. Летоховым и его коллегами из ИСАН.

Лазерное охлаждение газа атомов в значительной степени отличается от лазерного охлаждения пучка атомов. Дело в том, что атомы пучка движутся примерно в одном и том же направлении, так что одного лазерного луча достаточно, чтобы препятствовать их движению. Напротив, свободные атомы в газе движутся в различных направлениях и, следовательно, необходимо несколько лазерных лучей для их охлаждения.

В фирме Bell Labs американский ученый Стивен Чу (р. 1948) и его коллеги использовали шесть пучков лазерного излучения, разбитых на встречные пары и расположенных в трех перпендикулярных друг

другу направлениях. Частицы из пучка атомов натрия в вакууме были сначала остановлены встречным лазерным пучком и затем введены в область пересечения шести охлаждающих лазерных пучков.



С. Чу

Частоты последних были слегка отстроены в красную сторону по сравнению с частотой света, поглощаемого неподвижными атомами натрия. Все это привело к тому, что в каком бы направлении ни двигались атомы натрия, их встречали фотоны с нужной энергией и переводили обратно в область пространства, где пересекались шесть лазерных пучков. Атомы, находясь там, испытывали замедление при любом направлении их движения. Можно сказать, что они находились в «вязкой» оптической среде – так называемой *оптической патоке* (рис. 33), содержащей около миллиона холодных атомов. Такой способ охлаждения был назван *доплеровским охлаждением*. Группе Чу удалось достичь охлаждения атомов до температуры 240 мК и скорости их движения около 20–30 см/с. Эта величина (*доплеровский предел*) была теоретическим пределом возможностей доплеровского метода охлаждения. Доплеровский предел был обоснован в 1977 г. В. С. Летоховым, В. Г. Миногиным и Б. Д. Павликом.

В эксперименте Чу и его коллег атомы охлаждались, но не удерживались в оптической патоке. Сила тяжести заставляла их выпадать из нее приблизительно за секунду. Для удержания атомов была сконструирована *магнитооптическая ловушка* (1987 г.). В ней используется шесть лазерных пучков, расположенных так же, как в эксперименте, описанном выше, и, кроме того, две магнитные катушки, которые создают плавно

меняющееся магнитное поле, имеющее минимальное значение индукции в области пересечения пучков. Поскольку магнитное поле влияет на энергетические уровни атома (эффект Зеемана), возникает сила, которая превышает силу тяжести и поэтому затягивает атомы в центр ловушки. Такая ловушка удерживала самые холодные атомы и позволяла производить измерения на небольших их ансамблях.

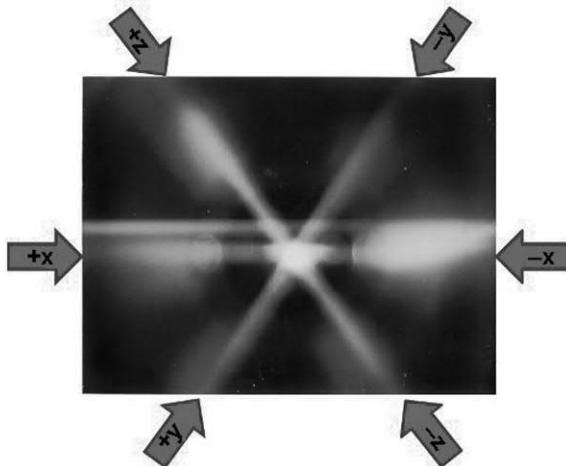


Рис. 33. Оптическая вязкая среда, образованная шестью пересекающимися лазерными лучами

Магнитные поля применялись уже в начале 1980-х гг. американским ученым Уильямом Филлипсом (р. 1948) и его сотрудниками для замедления и полной остановки атомов. Филлипс разработал так называемый зеемановский замедлитель – катушку с меняющимся магнитным полем, вдоль оси которой атомы могли тормозиться встречным лазерным пучком.

При этом частота лазерного луча поддерживалась постоянной, а положение энергетических уровней атомов изменялось так, чтобы они непрерывно поглощали свет.

Этого положения исследователи добивались, пропуская атомы через магнитное поле, величина которого менялась вдоль траекторий их движения. Когда атомы попадают в магнитное поле, их энергетические уровни изменяются по определенному закону, и наблюдается эффект Зеемана.



У. Филлипс

В созданной установке создавалась такая конфигурация магнитного поля, когда его индукция была максимальной в той точке, куда атомы впервые в него попадают, и постепенно уменьшалась с увеличением расстояния от этой точки. Когда атом пролетает через такое неоднородное магнитное поле, его энергетические уровни непрерывно изменяются, и это приводит к компенсации уменьшающегося доплеровского сдвига. В результате атом непрерывно поглощает лазерный свет и замедляется. С помощью зеемановского замедлителя Филлипс в 1985 г. остановил и захватил атомы натрия в магнитную ловушку. Однако силы удержания в такой ловушке относительно малы, поэтому атомы в ней должны быть чрезвычайно холодными, чтобы оставаться внутри. Когда Чу сумел охладить атомы в оптической патоке, Филлипс осуществил похожий эксперимент и начал систематические исследования температуры атомов в ней. В результате ему удалось охладить пучок атомов до температуры менее 100 мК, при этом средняя скорость охлажденных атомов была близка к нулю. Фактически был получен холодный газ почти остановленных атомов. В 1988 г. Филлипс показал, что температура ансамбля атомов натрия может быть понижена до 40 мК, т. е. в шесть раз ниже доплеровского предела.

В 1989 г. французский ученый Клод Коэн-Таннуджи (р. 1933) и его коллеги из Коллеж де Франс дали теоретическое объяснение столь необычному результату. Он показал, что в установке Филлипса лазерные лучи создали серию стоячих волн поляризованного света, электрические поля которых напоминали своего рода гребенку.



К. Коэн-Таннуджи

Когда атом проходит сквозь нее, всплески электрического поля поочередно «сбрасывают» атом во все более и более низкие энергетические состояния и все сильнее и сильнее охлаждают его. Атом как бы все время движется в гору, против поля, и теряет энергию. Этот метод получил название «*сизифово охлаждение*».

В это же время стали известны новые ограничения на дальнейшее охлаждение атомов, связанные с возрастанием скорости отдачи ультрахолодных атомов при испускании фотонов. Скорость отдачи, которую атом получает, излучая один фотон, соответствует температуре, называемой пределом отдачи. Для атома натрия предел отдачи равен 2,4 мК, а для несколько более тяжелого атома цезия он составляет около 0,2 мК. Совместно с Коэном-Таннуджи и его парижскими коллегами Филлипс показал, что атомы цезия могут быть охлаждены в оптической патоке до температуры, примерно в десять раз превышающей предел отдачи, т. е. приблизительно до 2 мК. Сначала казалось, что в оптической патоке в общем случае можно достичь температур примерно в десять раз выше предела отдачи. В более поздних работах и Филлипс, и парижская группа показали, что при соответствующей настройке лазера можно удерживать атомы так, что они группируются регулярным образом в определенных точках пространства, образующих так называемую оптическую решетку. Атомы, группирующиеся в оптической решетке, оказываются удаленными друг от друга на расстояние, равное длине волны света. В оптической решетке атомы, как было показано, могут быть охлаждены до температуры, превышающей предел отдачи в пять

раз. Благодаря совершенствованию методов преодоления этого предела удалось достигнуть невероятно низких температур: 0,18 мК для атомов гелия, 0,1 мК для атомов натрия.

В 1997 г. Нобелевский комитет присудил премию Чу, Филлипсу и Коэн-Таннуджи «за создание методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом». Им удалось достичь температуры на несколько миллионных долей градуса выше абсолютного нуля. На рис. 34 представлена хронология достижения низких температур при лазерном охлаждении атомов различными научно-исследовательскими группами.

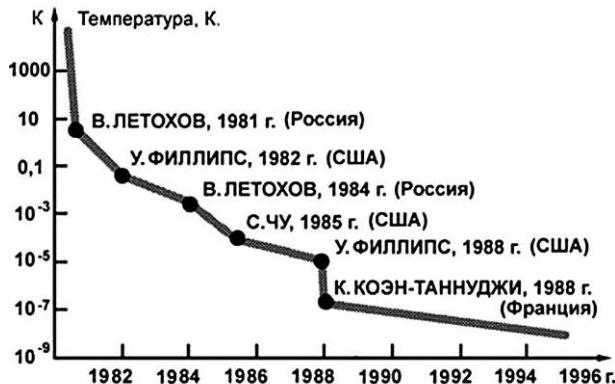


Рис. 34. Хронология достижений низких температур при лазерном охлаждении атомов

Обсудим научно-техническое значение разработанных методов. Исследование лазерно-охлажденных атомов значительно продвинули наши знания о взаимодействии излучения с веществом и позволили глубже понять квантово-механическое поведение газов при сверхнизких температурах. На основе этого удалось зафиксировать тонкое явление – конденсацию Бозе – Эйнштейна в атомарных газах. За его наблюдение и исследование Нобелевский комитет присудил в 2001 г. премию по физике трем американским ученым: Э. Корнеллу, В. Кеттерле и К. Вайману. Э. Корнелл и К. Вайман получили конденсат из примерно 2000 атомов рубидия, охлажденных до $2 \cdot 10^{-8}$ К. Кеттерле независимо от них получил конденсат из атомов натрия, причем ему удалось сконденсировать больше атомов и продвинуться дальше в их исследовании. Эксперимент показал, что поведение атомов в конденсате полностью согласовано. Кроме того, изучение лазерно-охла-

жденных атомов позволяет моделировать в лабораторных условиях экстремальные состояния вещества вплоть до внутризвездных процессов, конструировать нанообъекты с помощью лазерного излучения и ультрахолодных атомов.

До сих пор мы говорили только о фундаментальных исследованиях, связанных с лазерным охлаждением атомов. Однако, как это всегда бывает, фундаментальные работы приводят к выдающимся техническим достижениям. В качестве примера можно привести создание нового атомного эталона частоты, точность которого на два порядка выше цезиевого стандарта. Погрешность его измерений составляет 1 с за 20 млн лет! Кроме того, описанные выше методики указывают пути к созданию атомного интерферометра, который поможет выполнить прецизионные измерения гравитационных сил, атомного лазера – инструмента будущего квантовой микроэлектроники, атомно-волновых элементов квантовых компьютеров.

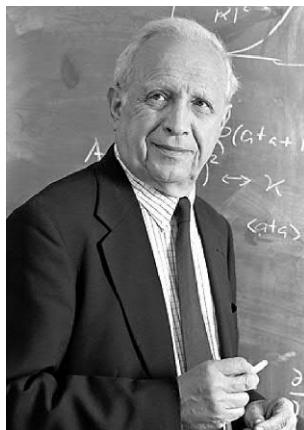
5.2. Прецизионная лазерная спектроскопия

В 2005 г. Нобелевская премия по физике была присуждена ученым, внесшим основополагающий вклад «в квантовую теорию оптической когерентности» (Р. Глауберу) и «в развитие лазерной высокочастотной спектроскопии, включая метод прецизионного устранения частотного сдвига в оптических стандартах частоты (метод фемтосекундной гребенки)» (Дж. Холлу и Т. Хеншу).

В рамках классической электродинамики колебания электромагнитного поля описываются амплитудой, частотой и фазой. Наличие фазы у колебаний классического осциллятора электромагнитного поля позволяет объяснить явление когерентности излучения, демонстрируемое в опытах по дифракции и интерференции света. При рассмотрении колебаний квантового осциллятора необходимо учитывать соотношение неопределенностей Гейзенberга между координатой и импульсом, которое в случае волны приводит к неопределенностям между амплитудой и фазой колебаний, не позволяющей определить точно фазу. Это создает существенные трудности при описании явления когерентности света на языке квантовой механики.

Рой Глаубер (р. 1925) решил проблему, введя понятие «когерентного состояния осциллятора» электромагнитного поля и показав,

что электромагнитное поле в когерентном состоянии максимально близко по свойствам к классическому, причем квантовое соотношение неопределенностей строго соблюдается.



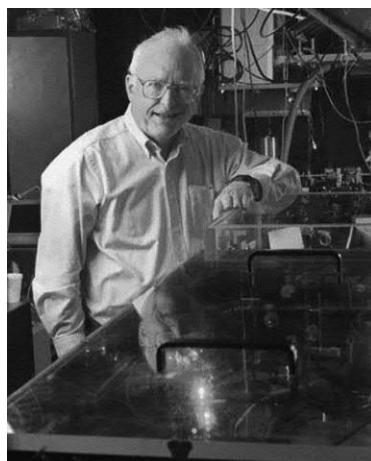
Р. Глаубер

Основополагающая работа Глаубера была опубликована в 1963 г. и была посвящена объяснению так называемого *эффекта Брауна – Твисса* – появлению когерентной связи (а именно, антокорреляции) между сигналами двух детекторов, работающих с одним и тем же слабым пучком света. Это явление было замечено еще в 1956 г., когда астрономы пытались измерить угловой размер Сириуса с помощью интерферометра. Если бы свет имел только волновую природу, то его интенсивность, регистрируемая обоими детекторами, менялась бы во времени одинаково. Однако корпускулярная природа света не позволяет одному и тому же фотону достичь обоих детекторов: либо он попадает в первый детектор, либо во второй. Поэтому, когда фотонов очень мало (пучок света очень слабый), между сигналами детекторов наблюдается антокорреляция – при увеличении сигнала одного из детекторов сигнал другого падает, и наоборот. Глаубер обобщил данные многих исследователей и предположил, что искажения интерференционной картины от таких слабых некогерентных источников излучения по сравнению с классической связаны с фотоэлектронным эффектом внутри детектора, имеющим квантовую природу.

Используя схему когерентных состояний (их называют глауберовскими), Глаубер применил математический аппарат и методы квантовой механики к описанию световых явлений. В результате он смог построить строгую квантовую теорию оптической когерентности и детектирования фотонов. В частности, Глаубер объяснил различия между тепловыми источниками света (например, электрическими лампами накаливания), излучение которых представляет набор различных частот и фаз, и лазерами, излучение которых строго когерентно, т. е. имеет определенные частоту и фазу.

Введенные им понятия послужили теоретической базой лазерной спектроскопии и стали общепринятыми в квантовой оптике. Как это часто случается, имеются другие, более ранние работы, связанные в той или иной степени с данной проблемой. Математический формализм когерентных состояний в значительной мере был известен по работам В. А. Фока.

Теоретические изыскания Глаубера легли в основу экспериментальных работ Дж. Холла и Т. Хэнша. Они занимались усовершенствованием лазерных установок для спектроскопических исследований, пытаясь добиться максимальной когерентности и монохроматичности излучения. В области стабилизации частоты лазеров американский ученый Джон Холл (р. 1934) смог достичь выдающихся результатов, начиная с середины 1960-х гг.



Дж. Холл

В 1968 г. он в ходе спектроскопических измерений зарегистрировал линию метана в среднем ИК-диапазоне с шириной, в 1000 раз меньшей ее доплеровской ширины. В 1973–1976 гг. он улучшил этот результат еще в 100 раз, получив разрешенную магнитную сверхтонкую структуру линии метана и далее ее дублетное расщепление из-за эффекта отдачи при испускании и поглощении фотона (до этого эффект отдачи в квантовых системах наблюдался лишь в эффекте Мессбауэра).

Принцип построения уникального лазерного спектрометра на Не-Ne-лазерах, созданного для экспериментов по прецизионной лазерной спектроскопии метана и его галогенопроизводных, был затем перенесен Холлом на другие типы лазеров, перестраиваемых в широком спектральном диапазоне. Разработанные им многочисленные методики стабилизации широкополосных лазеров позволили на семь–восемь порядков сузить спектр излучения полупроводниковых лазеров и лазеров на красителях. В результате открылась реальная возможность высокоточной стабилизации частоты лазеров по узким, но очень слабым спектральным линиям.

Подобными исследованиями (в частности, двухфотонной спектроскопией атома водорода) в начале 1970-х гг. занимался также немецкий физик Теодор Хенш (р. 1941). Перед ним и его коллегами стояла задача уточнить постоянную Ридберга. Для этого было предложено измерять частоту двухфотонного перехода между уровнями $1s$ и $2s$ в атоме водорода, которая составляет около $2,5 \cdot 10^{15}$ Гц.



Т. Хенш

Стеклянная кювета с водородом, находящимся в атомарном состоянии, облучалась лазерным светом с частотой, вдвое меньшей указанной. Когда переход между уровнями движущихся атомов вызван поглощением сразу двух фотонов с одинаковой частотой, но с противоположно направленными волновыми векторами, влияние линейного эффекта Доплера на ширину линии устраниется. За экспериментами с газом, содержащимся в кювете, последовали опыты на холодном пучке атомов водорода. Отметим, что именно спектроскопические исследования двухфотонного перехода $1s-2s$ в атоме водорода стимулировали возникновение новых методов измерения частот оптического диапазона.

Прямое определение частоты электромагнитной волны с помощью фотодетекторов имеет ограничения, связанные с их структурой и быстродействием, и возможно лишь до значений около 50 ГГц. Измерение частоты видимого света в то время предполагало измерение длины волны излучения интерферометрическими методами (сравнение длины волны с эталоном длины), после чего она пересчитывалась в частоту через значение скорости света в вакууме. В результате различных усовершенствований разрешение водородного спектрометра постоянно увеличивалось, превысив разрешение интерферометрических методов. В результате была создана установка, способная генерировать световую волну со стабильной частотой, однако измерить эту частоту с необходимой точностью было невозможно.

Здесь снова необходимо обратиться к результатам Холла. Его метановый стандарт сыграл важную роль в переходе на новый, единый эталон времени, частоты и длины и фиксации значения скорости света в качестве эталонного. Этот принципиальный для фундаментальной метрологии эксперимент, заключавшийся в одновременном измерении длины волны и частоты $\text{He-Ne}/\text{CH}_4$ -стандарта, был выполнен в 1972 г. Холлу удалось сравнить частоту светового излучения He-Ne -лазера ($8,8 \cdot 10^{13}$ Гц) с частотой, полученной от первичного цезиевого стандарта путем нелинейного преобразования частоты в высшие гармоники. (С 1967 г. в основу определения секунды положена частота сверхтонкого перехода в ^{133}Cs , составляющая 9,192631770 ГГц.) Если раньше им считался именно метр, а скорость света была измеряемой величиной, то с 1983 г. базовой константой стала служить скорость света, а метр, наоборот, находился как расстояние, проходимое светом

в вакууме за $1/299792458$ доли секунды. Кроме того, впервые открылась возможность измерения некоторых оптических частот. Слово «некоторых» здесь очень существенно, поскольку известными стали лишь гармоники частоты Не-Не-лазера, разделенные интервалами около 100 ТГц. Соответственно, доступными для измерения оказались лишь те частоты оптического диапазона, которые лежат в ближайшей окрестности этих гармоник. Для того чтобы перейти к измерению других частот, необходимо было перекинуть мост между радио- и оптическим диапазонами.

Частота лазера, подходящего для возбуждения атома водорода, отличалась от ближайшей (седьмой) гармоники Не-Не-лазера на несколько ТГц, и для преодоления этого интервала Хенш предложил цепочку, основанную на делении частоты (делитель частотных интервалов), которая давала возможность оперировать с разностями частот, а не с самими частотами. Это позволило работать в удобном спектральном диапазоне, например в ближней инфракрасной области, где можно использовать компактные диодные лазеры.

Вдохновленная успехом, группа Хенша продолжила поиски новых методов измерения оптических частот, обратившись к так называемым *оптическим гребенкам*, возникающим при модуляции оптической несущей частоты высокочастотным радиосигналом. Используя рис. 35, поясним метод частотных гребенок. Оптические гребенки частот формируются с помощью фемтосекундного лазера, работающего в режиме синхронизации мод и поддерживающего короткий световой импульс, циркулирующий внутри резонатора. При каждом проходе ослабленная копия импульса покидает резонатор через полупрозрачное зеркало. Хотя одиночные копии имеют широкий и довольно сложный спектр, их бесконечная последовательность дает набор узких линий, причем интервал между двумя соседними спектральными компонентами гребенки («зубьями») равняется частоте повторения импульсов.

Для измерения неизвестной частоты лазерной волны пучок и последовательность импульсов совмещаются с помощью светоделителя, а результирующий интерференционный сигнал регистрируется фотодетектором. Интервал между двумя соседними модами или спектральными компонентами гребенки точно равен частоте повторения f_r . Вследствие дисперсии резонатора вся гребенка сдвигается относительно спектра целых гармоник частоты повторения f_r .

на частоту расстройки f_{CE} . Частота f_m спектральной компоненты гребенки, соответствующей mode с номером m , при этом определяется выражением:

$$f_m = mf_r + f_{CE}$$

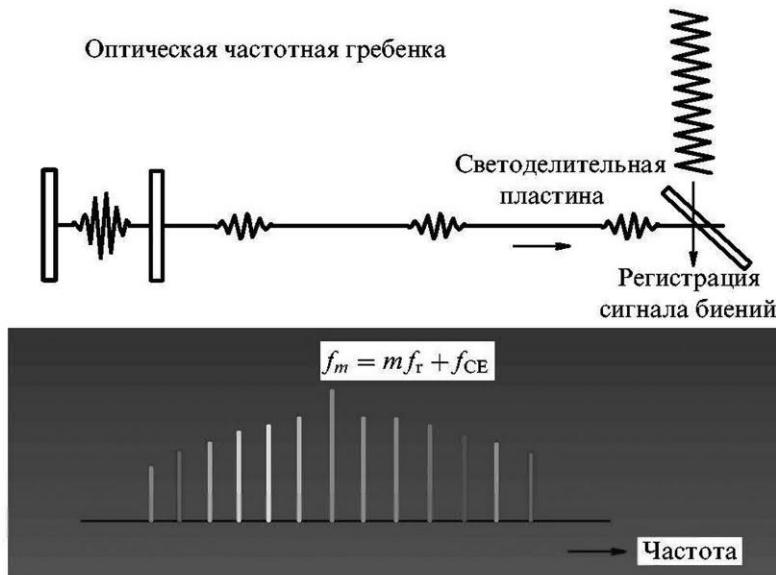


Рис. 35. Схема синтезатора фемтосекундной лазерной частотной гребенки

Подобная частотная гребенка действует как линейка в пространстве частот, и ее можно использовать для измерения больших интервалов между двумя различными оптическими частотами f_r . В случае, когда эти две частоты представляют собой известные кратные или дробные части одной и той же лазерной частоты f , такое измерение позволяет определить саму эту частоту. При известной частоте повторения f_r сигнал биений, формируемый полем известной оптической частоты f и ближайшей спектральной компонентой частотной гребенки, позволяет определить ранее неизвестную частоту расстройки f_{CE} . Зная две радиочастоты f_r и f_{CE} и целое число, соответствующее номеру моды, можно рассчитать частоту любой спектральной компоненты гребенки. Отметим, что идея об использовании частотных гребенок

для спектроскопических измерений была высказана в 1970-х гг. советским ученым В. П. Чеботаевым, однако в те времена технические возможности ее реализации отсутствовали.

Оптические частотные гребенки, формируемые фемтосекундными лазерами с синхронизированными модами, позволяют установить связь между оптическими частотами и радиочастотами, выполнить новые проверки основных физических законов. Так, точное сравнение частот оптических резонансов атома водорода и других атомов с радиочастотой цезиевых атомных часов устанавливает пределы возможных медленных изменений фундаментальных физических постоянных. Техника частотных гребенок открывает путь к развитию физики аттосекундных ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$) импульсов, позволяя управлять электрическим полем сверхкоротких лазерных импульсов.

Работы Холла и Хенша позволили измерить оптические частоты с точностью до 15 цифр. Благодаря этому, теперь возможны создание лазеров для высокоточной спектроскопии и определение спектра излучения молекул и атомов с беспрецедентной точностью, что может быть использовано, в частности, для развития систем спутникового позиционирования и навигации GPS. Еще более высокие точности измерений могут быть достигнуты с помощью оптических атомных часов с «маятником», представляющим собой атомы и ионы, которые колеблются на световой частоте. Такие часы существенно расширяют границы временной и частотной метрологии.

Результаты пионерских работ Холла, одного из самых блестящих экспериментаторов в области квантовой радиофизики, убедили своей перспективностью и увлекли в прецизионную лазерную спектроскопию множество исследователей разных стран. Доведенные до высокого совершенства сверхстабильные твердотельные лазеры Холла используются и в экспериментах по регистрации гравитационных волн. При этом надежность таких систем позволила Холлу с коллегами предложить проект гравитационной антенны космического базирования с длиной плеч интерферометра Майкельсона в 106 км. Нам представляется, что в связи с произошедшим открытием гравитационных волн и необходимостью их детального исследования эта идея найдет свое техническое воплощение.

Имя Хенша ассоциируется с прецизионными водородными измерениями, которые всегда оставались стержневой темой его научной

карьеры. Между тем он известен и как выдающийся экспериментатор, предложивший и воплотивший множество изящных решений и в других областях: им реализовано расщепление бозе-конденсата в оптической решетке, продемонстрирована и исследована многолучевая атомная интерференция, осуществлена передача данных по квантовому каналу между альпийскими вершинами Баварии. Он создал экспериментальную школу высочайшего уровня, из которой вышел не один десяток известных физиков, в том числе нобелевский лауреат 2001 г. В. Кеттерле.

Итак, лазерная спектроскопия – одна из самых динамично развивающихся областей современной радиофизики, которая стимулирует прогресс во множестве смежных дисциплин, таких, как физика твердого тела, физика бозе- и ферми-газов, астрофизика, навигация и передача данных, магнитометрия, метрология и т. д. Летохов, Чеботаев, Холл, Хенш и ряд других ученых были среди тех, кто стоял у истоков зародившегося в середине 1960-х гг. нового направления. Именно в то время в спектроскопических лабораториях мира начали использоваться лазеры и были проведены пионерские эксперименты по субдоплеровской спектроскопии атомов.

Модуль 6. Исторический обзор развития физики и техники терагерцового излучения

Терагерцовое (субмиллиметровое) излучение – неионизирующее электромагнитное излучение, спектр частот которого охватывает коротковолновую часть миллиметрового диапазона, весь субмиллиметровый диапазон и часть дальнего инфракрасного диапазона ($v = 0,3\text{--}10$ ТГц; $\lambda = 1$ мм – 30 мкм). В терагерцовом диапазоне сосредоточено большое количество линий вращательных переходов молекул, соответствующих переходам с большими квантовыми числами, а также линий колебательных и колебательно-вращательных переходов многоатомных молекул, в том числе органических. Это позволяет, используя терагерцовое излучение, селективно воздействовать на молекулы и получать более детальные сведения об их структуре и строении.

6.1. Источники терагерцового излучения

К электровакуумным источникам терагерцового излучения относятся лампы обратной волны (ЛОВ), лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и гиротроны. Низковольтные и компактные ЛОВ обеспечивают мощность излучения порядка 30–1 мВт на волнах с частотами 0,1–1,4 ТГц. Источником излучения в ЛСЭ является пучок электронов в вакууме, проходящий сквозь ондулятор – периодическую систему отклоняющих электрических или магнитных полей. При этом электроны движутся по синусоидальной траектории, теряя энергию, которая преобразуется в поток фотонов. Меняя энергию электронного пучка, а также параметры ондулятора, можно в широких пределах изменять частоту электромагнитного излучения ЛСЭ. В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН создан ЛСЭ с энергией частиц 12 МэВ, который обеспечивает в настоящее время рекордно высокий уровень средней мощности (0,5 кВт) когерентного излучения в диапазоне частот 1,2–1,8 ТГц.

Гиротрон представляет собой мазер на циклотронном резонансе¹, использующий вынужденное излучение потоков высокочи-

¹ Циклотронный резонанс – явление поглощения или отражения электромагнитных волн проводниками, помещенными в постоянное магнитное поле, на частотах равных или кратных циклотронной частоте носителей заряда.

энергичных электронов, вращающихся в магнитном поле. В 1970–1980-х гг. в работах сотрудников Института прикладной физики (ИПФ) РАН была показана принципиальная возможность получения в гиротронах мощного непрерывного и импульсного излучения диапазона субмиллиметровых волн (частоты 0,33–0,65 ТГц). В настоящее время разработкой терагерцовых гиротронов занимаются группы ученых из России, США, Австралии и Японии. Так, например, в ИПФ созданы гиротроны непрерывного действия с частотами в диапазоне 0,14–0,52 ТГц. В импульсном режиме получены мощности 10^2 – 10^4 Вт в сравнительно компактных гиротронах на частотах 1–1,3 ТГц. Для задач спектроскопии и диагностики различных сред в ИПФ разрабатываются непрерывные терагерцовые гиротроны. Совместно с научно-производственным предприятием «ГИКОМ» для Центра исследований дальнего инфракрасного диапазона Университета г. Фукуи (Япония) был разработан гиротрон с частотой 0,3 ТГц и мощностью 2,7 кВт.

Гиротрон используется в качестве источника мощного электромагнитного излучения в основном в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Одним из применений гиротрона является нагрев плазмы в установках термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы. Фактически гиротронами оснащены сегодня две трети всех ведущих термоядерных лабораторий в мире. В частности, в проекте ITER предполагается использование восьми гиротронов мощностью 0,6–1 МВт и с частотой излучения 170 ГГц, созданных предприятием «ГИКОМ» (рис. 36).

Источником терагерцового излучения малой мощности является лазер. До конца XX в. лазеры для дальней ИК-области были громоздкими и малоэффективными, поэтому потребовалась разработка новой схемы генерации. Для того чтобы получить излучение терагерцового диапазона, необходим достаточно малый энергетический зазор между уровнями энергии: $\Delta E = \hbar\omega$, где $\omega \sim 10^{12}$ Гц, $\Delta E = 0,001$ эВ. Однако в природе не существует естественных квантовых систем, в которых энергия перехода составляла бы столь малую величину, поэтому физики пошли на хитрость. Оказалось, что, изменяя толщину слоя материала, можно менять величину энергетической щели – тем самым появляется возможность генерировать излучение в требуемом частотном диапазоне.

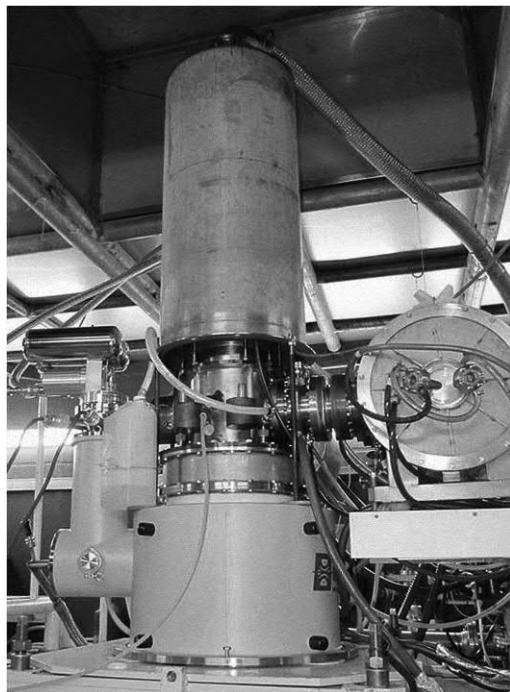


Рис. 36. Гиротрон фирмы «ГИКОМ», разработанный для ITER

Если вырастить последовательность слоев материала с чуть различающейся толщиной, разделенных барьерами (слоями другого материала), то можно получить своеобразную «энергетическую» лестницу: определенные уровни энергии в соседних слоях как бы образуют ее ступеньки. При поглощении энергии электрон переходит на самый верхний уровень, а потом по этой лестнице (при переходе из одного слоя в другой) возвращается в основное состояние, испуская на каждом «шаге» фотон терагерцового диапазона. Такой принцип генерации терагерцового излучения получил название *квантово-каскадного режима*.

На его основе в 1994 г. под руководством Ф. Капассо был реализован терагерцовый лазер. Следующие 8 лет были посвящены решению другой важной проблемы. Активная среда из многослойного кристалла, генерирующая терагерцовое излучение, его же и поглощала, фактически не давая возможности реализовать лазер. Только в 2002 г.

А. Тредикуччи с коллегами решили эту проблему, внедрив в многослойный кристалл множество волноводов, выводящих излучение «наружу». В результате им удалось создать терагерцовый лазер, работающий на частоте 4,4 ТГц, используя в качестве активной среды многослойную структуру из GaAs/AlGaAs (арсенида галлия и арсенида галлия-алюминия). Мощность такого лазера составила 2 мВт.

Недавно был предложен альтернативный вариант построения терагерцового лазера – с использованием нестационарного эффекта Джозефсона в высокотемпературном сверхпроводнике (ВТСП). Известно, что по своей кристаллической структуре ВТСП представляют собой систему из сверхпроводящих слоев оксида меди, разделенных изолирующим слоем. Туннелирование куперовских пар через эти слои под действием приложенного постоянного напряжения сопровождается джозефсоновским излучением в терагерцовом диапазоне. Группе ученых под руководством Л. Озьюзера удалось синхронизировать это излучение. Они создали когерентный источник излучения – лазер с частотой 0,85 ТГц и мощностью 0,5 микроватт, используя в качестве активной среды ВТСП $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ при температуре около 50 К.

Благодаря появлению в 1980-х гг. мощных импульсных лазеров (в частности, фемтосекундных) появилась возможность создания источников терагерцового излучения, основанных на взаимодействии лазерного излучения с веществом. В этом случае терагерцовое излучение генерируется путем нелинейного преобразования высокоинтенсивного лазерного излучения в электрооптических кристаллах (оптико-терагерцового преобразования). Обсудим эффект оптического выпрямления в электрооптических кристаллах. Он состоит в возникновении в среде при прохождении через нее интенсивного оптического импульса нелинейной поляризации, повторяющей форму огибающей оптического импульса. Возникающее при этом квазипостоянное напряжение (или ток) могут быть экспериментально измерены. Как оказалось, импульс нелинейной поляризации (всплеск тока) может быть достаточно эффективным источником терагерцового излучения.

Возможность точной настройки на определенную частоту терагерцового диапазона, возможность частотной перестройки, а также функционирование при комнатной температуре делают лазерные методы генерации весьма эффективными и простыми в реализации.

В экспериментах лазерный пучок фемтосекундного лазера разделяют на два: пучок накачки и зондирующий пучок. Генерация терагерцового излучения происходит, как правило, при воздействии лазерного импульса накачки на некоторый кристалл или специальную структуру. Зондирующий пучок используется для детектирования терагерцового импульса. Отметим, что оптические импульсы (накачки и зондирования) и терагерцовый импульс когерентны. Другими словами, терагерцовый и зондирующий импульсы оказываются привязанными друг к другу по фазе. Используя временную задержку зондирующего импульса по отношению к импульсу накачки (и связанному с ним терагерцовому импульсу), можно подбирать время прихода в детектор зондирующего и терагерцового импульсов и детектировать разные участки импульса. Сканируя интервал временных задержек, можно получать осциллограмму терагерцового импульса.

Еще одним источником терагерцового излучения является фотопроводящая антенна. Она состоит из двух металлических электродов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга на полупроводниковой подложке. К электродам прикладывается напряжение в несколько киловольт. При освещении зазора между электродами ультракоротким лазерным импульсом концентрация носителей заряда в полупроводнике резко возрастает на короткое время (порядка единиц и десятков пикосекунд). Возникшие свободные носители заряда ускоряются приложенным к зазору полем, в результате чего генерируется кратковременный импульс тока, который и является источником терагерцового излучения. Фотопроводящая антенна может быть использована и в качестве приемника излучения. В этом случае к электродам вместо источника напряжения подключается измеритель тока, и регистрируется импульс тока, получаемый при одновременном освещении полупроводника терагерцовым и зондирующим лазерными импульсами.

6.2. Приемники терагерцового излучения

В настоящее время разработаны различные типы терагерцовых приемников: пиродетекторы, болометры, диоды Шоттки, ячейка Голея и др. В качестве примера рассмотрим детектор на основе ячейки Голея (рис. 37), состоящий из замкнутой камеры с двумя мембранами (верхней и нижней).

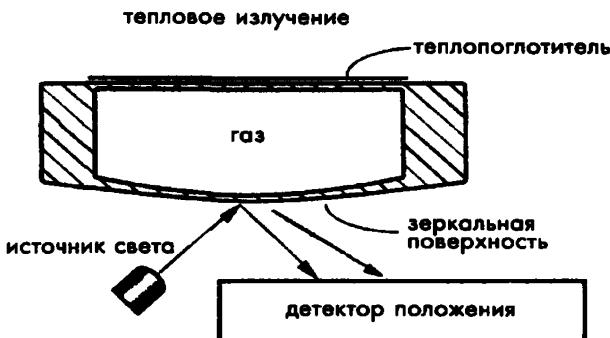


Рис. 37. Схема детектора ИК-излучения на основе ячейки Голея

На верхнюю мембрану наносится слой, поглощающий теплоту, а поверхность нижней мембраны делается зеркальной (например, покрывается слоем алюминия). На зеркальную поверхность направляют источник света. Падающий луч света отражается от поверхности и попадает на детектор положения. При попадании ИК-излучения на верхнюю мембрану происходит нагревание газа, заключенного в камере. Газ расширяется и его давление увеличивается. Увеличение давления внутри камеры приводит к деформации нижней мембранны. Изменение кривизны зеркальной поверхности мембранны оказывает влияние на направление отраженного луча света, который попадает в другую область детектора положения. Величина отклонения зависит от степени деформации мембранны и, следовательно, от интенсивности поглощенного излучения.

Детекторы терагерцового излучения, работающие при комнатных температурах, имеют значительные ограничения из-за низкой чувствительности и/или быстродействия. Для устранения этих недостатков используются детекторы на основе низкотемпературных сверхпроводников (НТСП) и ВТСП. Развитие тонкопленочных сверхпроводниковых технологий привело к появлению и созданию нового типа терагерцовых приемников – НЕВ (см. модуль № 4). Приемным элементом такого болометра является узкая полоска из тонкой (3–4 нм) сверхпроводящей пленки с субмикронными (до 50 нм) пластинарными размерами (рис. 38, а).

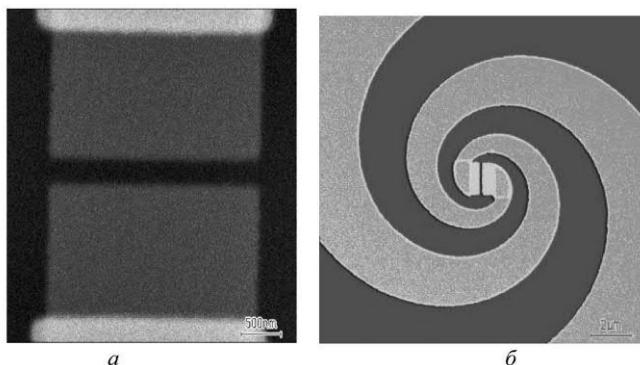


Рис. 38. *а* – НЕВ представляет собой тонкую полоску, сформированную из пленки сверхпроводника; *б* – НЕВ-смеситель, интегрированный с планарной спиральной антенной

Известно, что в твердых телах электронная система может иметь эффективную температуру, отличающуюся от термодинамической температуры решетки. В полупроводниках это явление известно очень давно, в сверхпроводниках его впервые наблюдали Е. М. Гершензон, Г. Н. Гольцман и их сотрудники. Эффект разогрева электронов состоит в том, что с уменьшением толщины сверхпроводящих пленок ($d < 10$ нм для NbN) возрастает роль электрон-электронных столкновений в процессах энергообмена. Малая толщина пленки способствует более быстрому установлению распределения электронов с эффективной температурой большей, чем температура решетки. Если пленки содержат большое количество статических дефектов, электроны рассеиваются не только на границах, но и на этих дефектах, в результате чего роль электрон-электронных столкновений становится определяющей в формировании функции распределения. При воздействии излучения на такие пленки поглощенная энергия распределяется по электронной подсистеме, повышая ее температуру, что проявляется в росте сопротивления пленки. Отметим, что данный эффект не зависит от частоты излучения: экспериментально доказана неселективность разогрева в диапазоне частот 10^{10} – 10^{15} Гц.

Рассмотрим процессы энергетической релаксации «горячих» электронов в системе «пленка – подложка», находящейся при температуре сверхпроводящего перехода. Будем считать, что после поглощения электромагнитного излучения электронами сверхпроводника в электронном газе устанавливается распределение квазичастиц (описываемое

функцией распределения Ферми) с температурой, превышающей температуру решетки сверхпроводника. Такое распределение будет в том случае, если время электрон-электронного взаимодействия (τ_{e-e}) много меньше времени электрон-фононного взаимодействия (τ_{e-ph}).

Если на пленку в резистивном состоянии действует электромагнитное излучение, то его энергия перераспределяется посредством электрон-электронного взаимодействия по электронной подсистеме, вызывая повышение ее температуры. Энергия от «разогретых» электронов, благодаря электрон-фононному взаимодействию, передается фононам с характерным временем τ_{e-ph} , причем неравновесные фононы, не нагревая фононной подсистемы, будут выходить из пленки в подложку. Описанный канал охлаждения электронной подсистемы называется *фононным*. Фононы могут посредством фонон-фононного взаимодействия передавать энергию другим фононам, вызывая повышение температуры пленки, а могут просто уходить из пленки в подложку, служащую термостатом, с достаточно малым характерным временем τ_{esc} . В этом случае электронная подсистема будет иметь более высокую температуру, чем решетка. Это сказывается и на сопротивлении сверхпроводника. Если время электрон-фононного взаимодействия велико по сравнению со временем диффузии электронов из пленки, то релаксация электронной подсистемы будет осуществляться за счет диффузии. В этом случае говорят о *диффузионном* канале охлаждения электронной подсистемы. В настоящее время практическое применение находят только сверхпроводящие болометры, основанные на фононном канале охлаждения.

Особенностью сверхпроводящих болометров является то, что зависимость их сопротивления от температуры вблизи сверхпроводящего перехода очень резкая, вследствие чего достаточно незначительного повышения температуры болометра, чтобы его сопротивление существенно выросло. При протекании тока через болометр это повышение сопротивления приводит к возникновению напряжения на нем, которое можно зарегистрировать.

Уникальные характеристики сверхпроводникового болометра делают его весьма перспективным для создания смесителя – основного узла супергетеродинного приемника. Главной особенностью последнего является наличие специального генератора – гетеродина, частоту которого можно плавно менять. Излучение гетеродина смешивается

с входным сигналом, при этом образуются колебания относительно низкой (промежуточной) частоты, которые несут информацию о входном сигнале. Используя в качестве смесителя болометр на горячих электронах, можно создать узкополосные избирательные приемники в широкой области спектра: от терагерцовых волн до видимого света.

Для повышения эффективности согласования чувствительной области НЕВ-смесителя с излучением он интегрируется в широкополосную планарную спиральную антенну (рис. 38, б). Благодаря быстрому времени релаксации энергии в данных устройствах, резкой зависимости сопротивления от температуры в области сверхпроводящего перехода и малому объему чувствительной области болометра удается добиться как предельно высокой чувствительности, так и рекордного быстродействия (~ 50 пс). Созданные коллективом Учебно-научного радиофизического центра (УНРЦ) МПГУ сверхпроводниковые болометрические приемные системы охватывают диапазон частот: 300 ГГц–70 ТГц.

6.3. Области применения устройств, использующих терагерцовое излучение

Терагерцовое излучение находит широкое применение в спектроскопии газов, твердых диэлектриков и сверхпроводников. Для спектроскопии сверхпроводников терагерцовые волны используются уже давно, но из-за недостаточного разрешения, малой чувствительности и динамического диапазона обычных спектрометров в последние годы этот метод почти не применяется. Его заменила тунNELьная спектроскопия. Однако с ее помощью удается получить информацию лишь о слое сверхпроводника, непосредственно прилегающем к туннельному контакту.

Развитие ЛОВ-спектроскопии кардинально меняет ситуацию. Значительный динамический диапазон ЛОВ-спектрометра позволяет не только измерять спектры достаточно толстых образцов, но и изучать нелинейные эффекты в сверхпроводниках. Разработанные методики позволяют изучать как пропускание и отражение, так и поглощение излучения. Объектами исследования могут быть объемные образцы и пленки с различными параметрами (толщиной, покрытием, подложкой).

Приемные системы терагерцового диапазона удобны также для проведения различного рода астрономических наблюдений и мониторинга атмосферы Земли. Однако эти исследования осложняются тем, что терагерцовое излучение сильно поглощается в земной атмосфере, главным образом, молекулами O_2 , CO_2 и H_2O . Это приводит к необходимости располагать терагерцовые телескопы в высокогорных областях на высоте около 5000 м над уровнем моря (RLT, SMA, ALMA), где прозрачность атмосферы выше, базировать их на самолетах (SOFIA) или же запускать в космос (Herschel Space Observatory). Одним из лучших мест в мире для оптической, инфракрасной и субмиллиметровой (терагерцовой) астрономии является обсерватория в высокогорной местности (Мауна-Кеа) на Гавайских островах на высоте 4205 м.

В настоящее время там функционируют следующие терагерцовые обсерватории (рис. 39): телескоп Джеймса Клерка Максвелла (JCMT, James Clerk Maxwell Telescope), субмиллиметровая обсерватория Калифорнийского технологического института (CSO, Caltech Submillimeter Observatory), многоцелевая субмиллиметровая решетка (SMA, The Submillimeter Array). Все три комплекса могут функционировать как единый интерферометр в диапазоне частот 180–700 ГГц.



Рис. 39. Терагерцовые обсерватории Мауна-Кеа: телескоп Джеймса Клерка Максвелла (в центре), субмиллиметровая обсерватория Калифорнийского технологического института (слева), многоцелевая субмиллиметровая решетка (справа)

В 2013 г. официально завершил свою миссию космический телескоп (обсерватория) «Гершель» (Herschel Space Observatory) (рис. 40). Он был запущен 14 мая 2009 г. с космодрома Куру с помощью ракеты-носителя «Ариан-5» и стал первой космической обсерваторией, полностью изучающей длинноволновую область инфракрасного излучения.

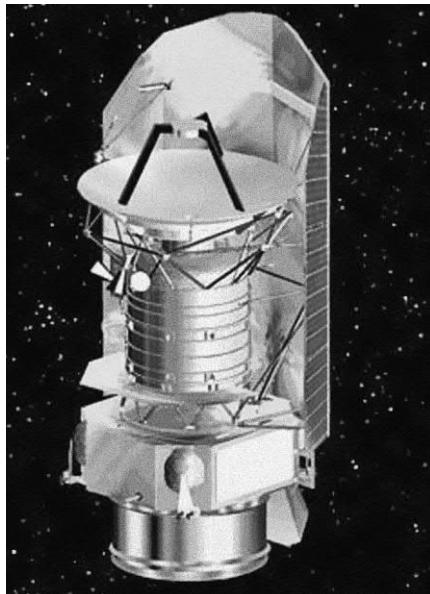


Рис. 40. Космический телескоп «Гершель»

Телескоп с зеркалом диаметром 3,5 м – самый крупный космический телескоп, работающий в инфракрасном спектре, из когда-либо запущенных. Он был предназначен для изучения инфракрасной части излучения от объектов в Солнечной системе, в Млечном Пути, а также от внегалактических объектов, находящихся в миллиардах световых лет от Земли (например, новорожденных галактик).

В 2013 г. состоялось открытие астрономической обсерватории ALMA (The Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array – «Атакамская большая миллиметровая/субмиллиметровая решетка»). Она расположена в пустыне Атакама (Чили) на высоте около 5000 м над уровнем моря. ALMA (рис. 41) является самым мощным в мире телескопом, работающим в миллиметровом и терагерцовом диапазонах. Комплекс состоит из 66 7- и 12-метровых радиотелескопов, объединенных

в единый радиоинтерферометр. Для корреляции совместной работы всех антенн используется суперкомпьютер, способный выполнять 10^{15} операций в секунду. ALMA предназначен для поиска холодных космических объектов, излучающих в миллиметровом диапазоне, пыли, возникшей при взрывах звезд на самых ранних стадиях эволюции Вселенной. Телескоп «погрузит свой взгляд» в плотные газовые облака, наблюдая процессы формирования звезд и планет.



Рис. 41. Астрономическая обсерватория ALMA

Чем вызван интерес астрономов к изучению космического пространства с помощью терагерцовых телескопов? Рождение звезды происходит в результате гравитационного коллапса межзвездных пылевых туманностей. Оказывается, что в процессе коллапса основная часть энергии туманности переходит в электромагнитное излучение терагерцового диапазона. Регистрация этого излучения и анализ полученных данных дают богатую информацию о плотности, температуре и других характеристиках этих туманностей, что необходимо для дальнейшего изучения эволюции звезд и планетных формирований. Таким образом, наблюдения, проведенные в терагерцовой области, позволят лучше разобраться в явлениях, протекающих в гигантских межзвездных молекулярных облаках и областях формирования звезд, а также дать информацию о различных процессах, происходящих в Млечном Пути и других галактиках.

С помощью терагерцовых приемников можно исследовать области Вселенной, в которых протекают процессы звездообразования, и которые окружены облаками газов с температурой и концентрацией выше, чем «холодное» межзвездное вещество. Наибольшую известность в этом смысле приобрели исследования нейтронных звезд. Только в терагерцовом диапазоне можно «заглянуть» через газопылевое облако, окружающее нейтронную звезду в процессе ее образования. Астрономы также интересуются терагерцевым излучением как компонентой космического фона, образовавшегося в результате Большого взрыва.



Рис. 42. Пример применения терагерцевого излучения в системах безопасности. Нож, невидимый в оптической части спектра, становится видимым в терагерцовом диапазоне

Отметим и другие сферы применения терагерцевого излучения. В силу того что терагерцовое излучение обладает высокой проникающей способностью, оно может быть использовано для обнаружения и идентификации предметов, скрытых одеждой (рис. 42). Методы терагерцовой спектроскопии, основанные на применении широкополосных когерентных импульсов, позволяют выявлять характерные особенности различных молекул и тем самым обнаруживать и идентифицировать оружие, пластиковые взрывчатые вещества, ядовитые вещества, наркотические препараты.

В конце 1980-х гг. был предложен метод терагерцовой спектроскопии во временной области (TDS – Terahertz Time-Domain Spectroscopy).

Этот метод основан на генерации и детектировании когерентного терагерцового излучения с помощью импульсов одного и того же лазера. В TDS регистрируется непосредственно осциллограмма прошедшего через образец терагерцового импульса, что позволяет получать как амплитудный, так и фазовый спектр в широком частотном интервале. В отличие от других спектроскопических методов, TDS позволяет с высоким разрешением детектировать электрическое поле терагерцового импульса, длительность которого составляет порядка 1 пс. Отсюда можно получить информацию о сдвиге фазы терагерцового поля при его взаимодействии с исследуемым объектом, а следовательно, изучать сверхбыстрые процессы (например, транспорт носителей заряда).

Благодаря сверхширокой частотной полосе и высокому разрешению по времени, метод TDS предполагают использовать для биомедицинской диагностики, создания новейших систем безопасности, контроля фармакологических продуктов, исследования состава, электронных и колебательных свойств твердых тел, жидкостей и газов, плазмы и др.

В производстве терагерцовое излучение может найти применение для контроля качества выпускаемой продукции, мониторинга оборудования. Например, можно проводить осмотр продукции в пластиковой, бумажной таре, прозрачной в терагерцовом спектре, но непрозрачной в видимом. Совершенствование терагерцовых приемных устройств позволит получать снимки поверхностей, скрытых под слоями штукатурки или краски, что, в свою очередь, сделает, например, возможным «бесконтактное» восстановление первоначального облика произведений живописи. Рассматривается возможность разработки высокоскоростных терагерцовых систем связи и терагерцовой локации для больших высот и космоса.

В настоящее время физика и техника терагерцового излучения является одним из передовых научных направлений. Терагерцовые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, для развития методов ЭПР и ЯМР высокого разрешения. Мощное терагерцовое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управления ее параметрами. Вследствие малой энергии квантов терагерцовое излучение является сравнительно безопасным для живых организмов. Оно может быть применено для выявления патологий и инородных образований методами терагерцовой томографии.

Модуль № 7. Исторический обзор развития радиоастрономии

Бурное развитие радиофизики и радиотехники сделало возможным создание чувствительных приемных устройств и направленных антенн – *радиотелескопов*. Оказалось также, что многие астрономические объекты или важные их свойства могут быть исследованы только на радиоволнах определенной длины. На стыке астрофизики и радиофизики возникла новая научная дисциплина – *радиоастрономия*.

Австралийский ученый Дж. Л. Пози был одним из первых физиков, проводивших радиоастрономические исследования после окончания Второй мировой войны. В предисловии к первой в мировой литературе монографии «Радиоастрономия», написанной Пози вместе с его сотрудником Р. Н. Брейсуэллом, приведено следующее определение радиоастрономии.

«Радиоастрономия – совершенно новая отрасль науки, возникшая на основе открытия радиоволн, доходящих до Земли из мирового пространства. Включая в себя астрономию, радиотехнику и некоторые вопросы теоретической электродинамики, радиоастрономия представляет специальный интерес для астрономов, радиоинженеров и радиофизиков. В то же время для широкого круга научных работников она привлекательна как новая, развивающаяся область науки».

Источниками космического радиоизлучения являются практически все объекты Вселенной, а также вещество и поля, заполняющие межзвездное и межгалактическое пространство. Методы радиоастрономии позволяют с высокой точностью измерять расстояния до планет, периоды их вращения, осуществлять картографирование поверхностей планет, изучать характер радиоизлучения Солнца, исследовать природу солнечной активности, структуру магнитного поля Галактики и т. д.

В данном модуле рассмотрены основные исторические этапы развития радиоастрономии. Подробно рассказывается о радиоастрономических открытиях, удостоенных Нобелевской премии.

7.1. Открытие космического радиоизлучения.

Создание первого радиотелескопа

Впервые космическое радиоизлучение обнаружил в 1932 г. американский физик и радиоинженер Карл Янский (1905–1950). Он исследовал радиопомехи, мешавшие работе трансатлантического беспроводного телефона. Для этих целей была построена большая односторонняя антenna, представляющая специальную металлическую раму, закрепленную на поворотном устройстве – карусели (рис. 43). Размеры конструкции составляли 30,5 м в длину и 3,7 м в высоту. Антенну можно было сориентировать в нужном направлении и изучать приходящее радиоизлучение. Работа велась на волне 14,6 м. Янский выяснил, что треск и щелчки в наушниках, мешавшие связи, были вызваны близкими и дальними грозовыми разрядами. Но кроме этих помех он уловил постоянное негромкое шипение, которое усиливалось и ослабевало с периодом 23 ч 56 мин. Это время равно звездным суткам – периоду обращения Земли вокруг собственной оси. Направленность антенны Янского была довольно низкой, он мог определять положение источника радиоизлучения с точностью лишь около 30° . Тем не менее Янский установил, что «паразитное» радиоизлучение приходит из космоса – от Млечного Пути, причем наибольшая интенсивность его наблюдается в направлении центра нашей Галактики. Результаты своих исследований Янский опубликовал в статье «Электрические помехи внеземного происхождения».

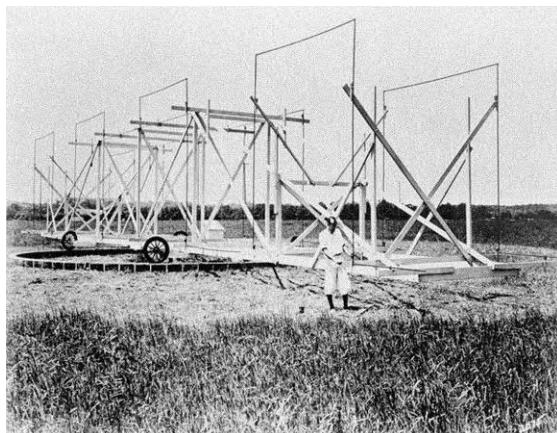


Рис. 43. Антenna Янского

Открытие Янского не сразу было замечено астрономами. Только в 1939 г. другой американский радиоинженер Гроут Ребер (1911–2002), заинтересовавшись природой космического радиоизлучения, посчитал необходимым продолжить эти исследования. Он предложил свои услуги фирме Bell Labs, где работал Янский, а также некоторым астрономическим обсерваториям. Однако он не смог получить место в связи с экономическим кризисом. В 1937 г. Ребер самостоятельно спроектировал и построил во дворе своего дома в Уитоне (пригород Чикаго) первый радиотелескоп с параболической антенной: диаметр 9,5 м, фокусное расстояние 6 м (рис. 44). До начала 1940-х гг. Ребер был единственным в мире ученым, проводившим радиоастрономические наблюдения.

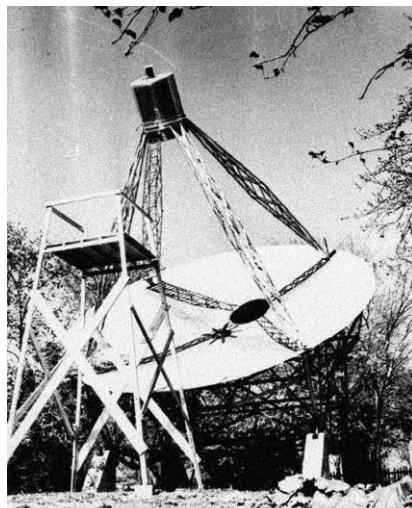


Рис. 44. Радиотелескоп Ребера (1937 г.)

В течение пяти лет Ребер проводил систематические измерения и в 1942 г. издал первую радиокарту всего северного неба. На ней кроме обнаруженного Янским мощного радиоисточника в центре Галактики отмечено еще несколько более слабых источников. Они находятся в созвездиях Лебедя, Кассиопеи, Большого Пса, Кормы и Единорога.

В отличие от Янского, который поместил статью в техническом журнале, Ребер направил свою работу в ведущее астрономическое издание – «Астрофизический журнал» (“Astrophysical journal”). Статья

Ребера привлекла, наконец, внимание астрономов и радиофизиков, но Вторая мировая война приостановила работы по радиоастрономии. Однако в это же время начала быстро развиваться радиолокация. Именно с помощью оборудования радиолокационной станции в Англии Дж. Хей в 1942 г. экспериментально обнаружил радиоизлучение Солнца на длинах волн 4 и 8 м. Во второй половине 1942 г. наблюдения Дж. Саутворта в США подтвердили существование радиоизлучения Солнца и на сантиметровых волнах. Радиолокационная техника, ее крупные антенные системы и высокочувствительные приемники в первые послевоенные годы во многом способствовали развитию радиоастрономии.

Пионерские исследования Янского и Ребера заложили основы нового научного направления – радиоастрономии и ее инструментальной базы. После окончания Второй мировой войны астрономы и инженеры поняли, что для исследования источников космического радиоизлучения нужны радиотелескопы гораздо больших размеров, чем антенны Янского и Ребера.

Конструкции антенн современных радиотелескопов весьма разнообразны, что обусловлено широким диапазоном длин волн, используемых в радиоастрономии (от 0,1 мм до 1000 м). Антенны радиотелескопов миллиметрового, сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов, как правило, представляют собой параболические отражатели, подобные зеркалам обычных астрономических рефлекторов. В фокусе параболоида устанавливается облучатель – устройство, собирающее радиоизлучение, которое направляется на него зеркалом. Облучатель передает принятую энергию на вход приемника. Далее после усиления и детектирования сигнал поступает в память ЭВМ для дальнейшей обработки. Важнейшими параметрами антennы радиотелескопа являются *угловое разрешение* (способность разделить излучение близких друг к другу радиоисточников), *чувствительность* (минимально обнаруживаемый сигнал) и *эффективная площадь* (величина, характеризующая способность приемной антенны собирать падающее на нее электромагнитное излучение). В настоящее время радиотелескопы можно классифицировать по характеру их апертуры – диаметра объектива. Чем больше апертура, тем больше излучений может собрать телескоп. При этом различают *антенны с заполненной и с незаполненной апертурой*.

Антенны с заполненной апертурой аналогичны зеркалам оптических телескопов. Такие антенны просто собирают сигнал от наблюдаемого объекта и фокусируют его на приемнике. Примерами антенн с заполненной апертурой являются параболические (например, 92-метровая антенна в обсерватории Грин-Бэнк) и сферические (например, радиотелескоп в Аресибо) зеркала.

Крупнейшим радиотелескопом с заполненной апертурой является радиотелескоп, построенный в 1963 г. в Аресибо на острове Пуэрто-Рико (рис. 45). Автор его идеи – профессор Корнеллского университета У. Гордон. 305-метровая антенна радиотелескопа неподвижно лежит в огромном естественном котловане в горах, имеющем в центре глубину 137 м. На высоте 150 м над поверхностью зеркала укреплена на стальных тросах 600-тонная платформа, на которую можно подняться по полукилометровому подвесному мосту или по канатной дороге. По рельсам вдоль платформы перемещается управляемая компьютером кабина с облучателями и приемниками – так радиотелескоп наводится на исследуемый источник.



Рис. 45. 305-метровая антенна радиотелескопа Аресибо

Из-за неподвижности антенны наблюдения любого космического объекта не могут продолжаться более 2 ч. Но этот недостаток компенсируется огромной площадью зеркала, обеспечивающей высокую чувствительность.

Радиотелескоп в Аресибо отличается от многих других также тем, что он может служить и передающей антенной. В таком режиме были проведены уникальные эксперименты по радиолокации Солнца, Луны и планет Солнечной системы. Забегая вперед, отметим, что с помощью радиотелескопа в Аресибо удалось в 1968 г. измерить периодичность пульсара в Крабовидной туманности и провести аналогичные измерения для других подобных объектов. Эти исследования позволили подтвердить существование нейтронных звезд. На этом же радиотелескопе в 1974 г. был обнаружен и первый двойной пульсар (см. ниже).

Для получения высокого углового разрешения в радиоастрономии применяют антенны с незаполненной апертурой. В качестве примера можно привести один из крупнейших радиотелескопов в мире – РАТАН-600 (аббревиатура от РАдиоТелескоп Академии Наук) (рис. 46). Авторы его идеи – российские радиоастрономы С. Э. Хайкин и Н. Л. Кайдановский (см. модуль № 8). Научным руководителем РАТАН-600 является академик Ю. Н. Парицкий.



Рис. 46. Радиотелескоп РАТАН-600

Этот радиотелескоп диаметром около 600 м располагается на Северном Кавказе, вблизи станицы Зеленчукская на высоте 970 м над уровнем моря. Телескоп состоит из 895 прямоугольных отражающих элементов размерами 11,4 м x 2 м, расположенных по кругу

с диаметром около 600 м и образующих единую отражающую поверхность. Благодаря такой конструкции достигается высокое угловое разрешение. Круг разделен на 4 сектора по сторонам света. Отражающие элементы каждого сектора фокусируются на приемнике излучения, охлаждаемом жидким азотом и плавающим на противовибрационной платформе в метровом бассейне жидкой ртути.

Радиотелескоп РАТАН-600 предназначен для обнаружения космических источников радиоизлучения, сигналов искусственного происхождения (от внеземных цивилизаций), исследования излучения звезд, объектов Солнечной системы в радиодиапазоне и др.

7.2. Разработка метода апертурного синтеза. РСДБ

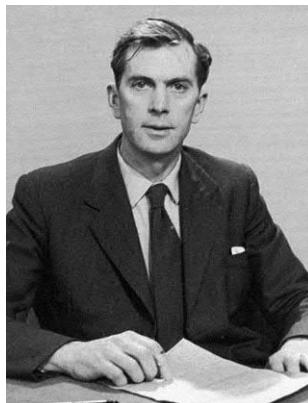
Следующий важный этап развития экспериментальной базы радиоастрономии связан с появлением радиоинтерферометров и созданием метода апертурного синтеза.

К антеннам с незаполненной апертурой относят *радиоинтерферометры* – инструменты, которые состоят, как минимум, из двух разнесенных в пространстве антенн, связанных между собой линией связи. В радиоинтерферометре достигаются угловые разрешения до $\sim 0,001''$. Для сравнения предельное угловое разрешение одиночных антенн радиотелескопов составляет $\sim 17''$ (при диаметре антennы 100 м, работающей на длине волны 7 мм), что недостаточно для разрешения структуры удаленных радиоисточников. В оптическом диапазоне разрешение больших наземных телескопов (диаметром около 6 м) имеет предел $\sim 1''$. Благодаря радиоинтерферометрам удалось определить точные координаты многих радиоисточников во Вселенной.

Метод получения высокого углового разрешения при использовании сравнительно небольших антенн, образующих совокупность радиоинтерферометров, называют *апертурным синтезом*. В более широком смысле апертурный синтез – метод восстановления по отдельным измерениям пространственного распределения полей (для некогерентных полей – пространственной функции корреляции), излучаемых или рассеиваемых каким-либо источником или объектом.

Рассмотрим некоторые виды систем апертурного синтеза. *Последовательный синтез* можно объяснить, используя аналогию с антенной решеткой. Если на синфазную антеннную решетку падает плоская

волна, то сигнал в приемнике определяется суперпозицией токов, наводимых в каждом элементе решетки. При нормальном падении все токи складываются синфазно. Если волна падает под углом к нормали, фаза токов вдоль решетки изменяется линейно, что и обуславливает направленность приема. Путем соответствующего управления фазами токов в отдельных элементах осуществляют сканирование луча антенны. Все эти эффекты можно получить с помощью системы, состоящей в простейшем случае только из двух антенн: неподвижной и подвижной, последовательно занимающей места расположения элементов эквивалентной решетки. Измерив комплексные коэффициенты корреляции токов, наводимых в обеих антенах, и проведя соответствующую обработку, можно в итоге получить то же угловое разрешение, что и при использовании многоэлементной решетки. Этот метод был предложен в 1959 г. британским радиоастрономом Мартином Райлом (1918–1984) и его коллегами из Кембриджского университета.



М. Райл

Работа велась над повышением разрешающей способности радиотелескопов. Расположив две антенны на расстоянии многих длин волн друг от друга, Райл подключил их к одному приемнику. Используя этот простой интерферометр, он установил, что испускание радиоволн солнечными пятнами происходит из очень небольших областей. Используя сдвиг фаз (комбинируя сигналы от каждой из антенн попаременно в фазе и в противофазе), Райл сумел отличить радиоволны,

испускаемые пятном, от радиоволн, выпускаемых остальной частью Солнца. Применяя тот же метод для поиска звезд и галактик, он проник в космическое пространство на расстояние 6 млрд световых лет, что втрое превышает дальность действия 200-дюймового оптического телескопа-рефлектора обсерватории Маунт-Паломар. К 1948 г. Райллу удалось определить местоположение нескольких так называемых радиозвезд (небесных объектов, выпускающих электромагнитное излучение) с точностью, достаточной для того, чтобы их можно было наблюдать с помощью оптических телескопов.

В 1963 г., используя возросшие вычислительные мощности компьютеров, Райл построил телескоп с тремя управляемыми 60-футовыми параболическими антеннами-отражателями, две из которых были закреплены на расстоянии 0,5 мили друг от друга, а третья смонтирована на передвижной платформе длиной 2500 футов. С учетом вращения Земли в течение 24-часового периода наблюдения этот метод позволил Райллу, комбинируя сигналы от трех антенн, достигать разрешения, эквивалентного разрешению радиотелескопа с апертурой в 1 милю. Именно с помощью трехантенного телескопа впервые были открыты детали структуры радиогалактик.

Радиотелескоп с еще большей эквивалентной апертурой (диаметром 3,1 мили) был построен Райлом в 1971 г. Новый телескоп состоял из восьми антенн, каждая диаметром 42 фута (из которых четыре были смонтированы на передвижных платформах), и позволял исследовать высокодисперсную структуру далеких радиоисточников. Разрешение, достигаемое с помощью этого телескопа, было равно дуге в 0,6 дюйма. Проведенные Райлом широкие исследования небесных радиоисточников, большинство из которых слишком далеки и слишком слабы для того, чтобы их можно было обнаружить с помощью оптических телескопов, показали, что некоторые из наиболее интенсивных радиоисточников представляют собой квазары.

В 1974 г. М. Райл и другой английский астроном Э. Хьюиш (см. ниже) были удостоены Нобелевской премии по физике «за пионерские исследования в радиоастрофизике». Премия Райллу была присуждена «за наблюдения и изобретения, в особенности за метод апертурного синтеза».

Современные радиотелескопы, значительно превосходящие по своим размерам построенные Райлом телескопы, в которых используется

точность атомных часов, позволяют принимать сигналы на антенах, отстоящих на тысячи миль друг от друга, и обрабатывать полученные сигналы на отдельном компьютере. Эквивалентная апертура такого телескопа сравнима с диаметром Земли!

Другим видом апертурного синтеза является параллельный синтез. Он осуществляется с помощью радиоинтерферометров со стационарными антennами, позволяющих получать информацию обо всех спектральных составляющих одновременно и исследовать не только стационарные, но и переменные во времени процессы. Обычно в многоэлементных системах диаграмма направленности содержит лепестки, характерные для любой дифракционной решетки, но частично подавляемые за счет диаграмм отдельных элементов, их расположения и методов обработки. С помощью подобных систем можно исследовать лишь источники с угловыми размерами, меньшими углового расстояния между соседними лепестками. Многолепестковость исключается с помощью специальных методов приема и обработки, реализуемых, в частности, в кресте Миллса (или Т- и Г-образных системах), кресте Христиансена и др. Крест Миллса состоит из двух рядов элементарных дипольных антенн, а крест Христиансена – из рядов параболических антенн. Существуют также кресты из параболических цилиндров. Первый крест Миллса, сооруженный в 1952 г. близ Сиднея, имел плечи по 457 м, второй, законченный в 1957 г., – по 1067 м. Позже в Хоскинтауне (шт. Новый Южный Уэльс, Австралия) был построен крест из двух параболических цилиндров длиной по 1554 м. Физическому институту РАН принадлежит крестообразный телескоп из двух параболических цилиндров длиной по 1 км (близ Серпухова). Подобный инструмент используется в университете Болоньи.

Расскажем об одной из самых известных и крупнейших систем апертурного синтеза – VLA (Very Large Array – «Большая антенная решетка»), созданной в США в 1981 г. (рис. 47). Система VLA состоит из 27 подвижных радиотелескопов, размещенных близ Сокорро (шт. Нью-Мексико). Все телескопы в этих центрах наблюдения непосредственно соединены между собой кабелями или волноводами, а достигаемое разрешение составляет около 1''. Таким образом, с помощью интерферометра VLA можно увидеть радиоисточник размером с шарик для гольфа с расстояния 150 км.



Рис. 47. Система апертурного синтеза VLA

Телескопы VLA могут использоваться независимо, либо работать единой группой, объединяясь с тремя подвижными вспомогательными 1,8-метровыми телескопами, образуя уникальный оптический VLA-интерферометр. С помощью радиотелескопа VLA ученые ведут исследования разных небесных тел, в частности, определяют состав галактик и скоплений галактик, пролетающих мимо комет, квазаров и областей ионизированного водорода. Этот телескоп также принимает слабые радиосигналы от межпланетных космических кораблей. В ближайшем будущем планируется усовершенствование системы VLA.

Предельно большими для наземной радиоастрономии стали межконтинентальные интерферометры, отдельные антенны которых расположены в разных странах и даже на разных континентах. Разрешающая способность таких систем достигает $0,001''$. Именно о таких системах далее пойдет речь.

С появлением атомных стандартов частоты стало возможным синхронизировать астрономические наблюдения, выполняемые одновременно несколькими радиотелескопами, разнесенными на тысячи километров. Это позволяет достичь разрешения, не виданного в истории астрономии. Наиболее мощными источниками радиосигналов во Вселенной являются радиогалактики и квазары. Сейчас их мельчайшие

детали наблюдают с помощью сети радиотелескопов, рассредоточенных по всему земному шару. Такой метод исследования в радиоастрономии, обеспечивающий исключительно высокое разрешение, называется *радиоинтерферометрией со сверхдлинной базой* (РСДБ). Идею РСДБ предложили в 1965 г. отечественные ученые: Н. С. Кардашев, Л. И. Матвеенко и Г. Б. Шоломицкий. РСДБ широко применяют для решения актуальных астрометрических и астрофизических задач.

В конце Второй мировой войны несколько молодых ученых, ранее принимавших участие в создании радаров, начали работать в только зарождавшейся тогда радиоастрономии. В то время получение с помощью радиотелескопов разрешения, сравнимого с разрешающей способностью оптических телескопов, казалось несбыточной мечтой. Разрешающая сила большого оптического телескопа при хорошей видимости составляет примерно одну секунду дуги ($1''$).

Нетрудно подсчитать, что для получения такого разрешения на радиотелескопе, работающем, например, на длине волн 1 м, диаметр площадки, с которой собирается излучение, должен был равняться примерно 240 км. Подобный расчет показывает, что телескоп с невероятным по тому времени диаметром около 300 м (размер самого большого отражателя построенного впоследствии радиотелескопа в Арешибо) обладал бы разрешением не лучше $800''$, что примерно в четыре раза хуже разрешающей способности человеческого глаза при наблюдении звезд на ночном небе.

Для получения разрешения значительно лучшего, чем $1''$, телескопы нужно разносить на тысячи километров друг от друга. В этом случае их нельзя просто соединить кабелем. Это было серьезной проблемой, поскольку, прежде чем сложить сигналы от двух телескопов, составляющих интерферометр, их необходимо синхронизировать с точностью до долей микросекунды. С появлением в конце 1960-х гг. точных атомных стандартов частоты необходимость физического соединения двух телескопов отпала, и тогда начали разрабатываться радиоинтерферометры со сверхдлинными базами. В методе РСДБ в двух центрах наблюдения производится независимая запись сигналов (с точностью до микросекунды) на магнитофонную пленку того же типа, что и для записи телевизионных изображений. Затем пленки загружаются в центральный коррелятор, где записи синхронизируются и происходит сложение сигналов.

В методе РСДБ приборы могут располагаться на разных континентах, и фаза интерференционных полос может искажаться не только из-за действия атмосферы и ионосферы, но и вследствие случайных скачков и дрейфа в атомных стандартах частоты, а также из-за невозможности точно определить расстояния между фокусами двух телескопов. Это приводит к дрожанию интерференционных полос и препятствует измерению фазы.

Для решения этой проблемы использовались различные подходы. Два из них применимы только в том случае, если наблюдаемый объект состоит из отдельных точечных источников. Обычно один из них называют методом измерения положения точечного источника по изменениям интерференционных полос, а другой – методом построения радиоизображения по фазовым сдвигам. Их не следует путать с методом апертурного синтеза, который применим к любым источникам излучения сложной структуры.

Точечный источник, по определению, характеризуется нулевым фазовым сдвигом, так что любой наблюдаемый сдвиг полос в его интерференционной картине может быть обусловлен либо влиянием атмосферы, либо приборным эффектом, либо и тем и другим вместе. Поэтому, чтобы исключить такие побочные эффекты, достаточно вычесть фазы излучения соседнего точечного объекта из фаз радиосигнала от объекта наблюдения. Используемый в этом случае точечный источник называется *опорным объектом*. Таким методом были впервые картографированы космические мазеры. Эти объекты по свойствам напоминают определенный тип усилителей, которые нашли широкое применение в радиоастрономии. С момента обнаружения первого космического мазера в 1965 г. найдено несколько сот таких космических объектов.

К сожалению, методы апертурного синтеза, столь плодотворные в случае ярких точечных источников, не применимы для построения радиокарт протяженных объектов, таких, как квазары и радиогалактики. За исключением немногих особых случаев, в этих объектах или поблизости от них нет удобно расположенных точечных источников, которые могли бы служить опорными объектами. Поэтому до 1975 г. считалось маловероятным, что с помощью интерферометров со сверхдлинными базами когда-нибудь удастся получить качественные изображения мощных внегалактических радиоисточников. Однако,

как это часто бывает, ограниченность уже имеющихся средств стимулирует появление нового метода, который давно мог бы использовать-ся в обычной интерферометрии.

Переворот в радиоастрономии произошел в 1953 г., когда Р. Дженнисон обнаружил, что если фазы полос, полученных в замкнутой цепочке из трех или более интерферометров, сложить, то все искажения, обусловленные особенностями распространения волн или инструментальными погрешностями, в точности компенсируются. Получающаяся сумма фаз содержит информацию лишь о структуре исследуемого объекта. Подобный метод развили также в Кембридже Ф. Смит и в Австралии Б. Миллс.

В 1974 г. А. Роджерс из обсерватории Хайстек, не зная о работе Дженнисона, применил тот же метод к интерферометрам со сверхдлинной базой. Роджерс назвал сумму фаз в замкнутой цепочке «фазой замыкания». Под влиянием работы Роджерса П. Уилкинсон и Э. Ридхед, работая в Калифорнийском технологическом институте, разработали метод получения качественных изображений на основе замыкания фазы при использовании РСДБ. Этот метод известен теперь как гибридный метод построения радиокарт. Новый метод революционизировал не только процесс получения изображений, но и принципы построения сетей радиотелескопов. Более того, использование этого метода не ограничено радиоволновым спектром. Его можно применять к любым волнам, которые дают регистрируемые интерференционные полосы.

С момента разработки метода гибридного картографирования радиогалактик прошло еще два десятилетия, прежде чем появились вычислительные методы и вычислительные мощности, с помощью которых стало возможным получить миллисекундные (в угловой мере) изображения по данным интерферометров с записью на ленту, а также реализовать полный потенциал многоэлементных интерферометров типа VLA и MERLIN. В настоящее время РСДБ широко применяют не только для измерения величин, связанных с Землей, но и для решения астрометрических и астрофизических задач.

Дальнейшим шагом в развитии радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой стало создание сетей РСДБ из нескольких радиотелескопов, которые управляются из единого центра и наводятся на один объект; они могут работать в различных диапазонах длин волн.

Измерительную информацию подвергают совместной обработке, позволяющей получать более подробные сведения о наблюдаемом объекте, чем дает одна пара радиотелескопов. Разрешающая способность сети определяется отношением длины волны к максимальному расстоянию между ее элементами. Для предельно коротких длин волн (миллиметрового диапазона) можно достичь разрешения порядка 0,00003 угловой секунды, что в миллион раз превышает разрешение человеческого глаза. Из сетей РСДБ можно создать *глобальную геодезическую сеть* – систему опорных пунктов с известными координатами. Об этом еще в 1998 г. писал директор Астрокосмического центра ФИАН академик Николай Семенович Кардашев (р. 1932): «В 90-е годы в астрономии возникла очень интересная и необычная ситуация – создан принципиально новый радиотелескоп, охватывающий весь земной шар. Все крупнейшие радиотелескопы мира объединены в глобальную систему; они могут по команде наводиться на одну и ту же часть неба. Принимаемые ими сигналы синхронизируются высокостабильными атомными генераторами и обрабатываются. Получающиеся изображения астрономических источников обладают таким же угловым разрешением, как если бы мы имели единый радиотелескоп с размерами порядка размера Земли. Эта глобальная сеть радиоинтерферометров дает поразительные результаты, которые было трудно предвидеть».

7.3. Современные радиотелескопы и РСДБ

Сказанное выше свидетельствует о том, что развитие радиоастрономии тесно связано с созданием все более мощных радиотелескопов и РСДБ, с большей чувствительностью и большим угловым разрешением. Какими же научными инструментами обзавелась современная радиоастрономия? Приведем лишь несколько примеров.

LOFAR (Low Frequency Array – «Низкочастотная решетка») – новейший радиотелескоп, открытый в 2010 г. Он представляет собой гигантский массив, состоящий из 25 000 небольших антенн (от 50 см до 2 м в поперечнике). Диаметр LOFAR составляет примерно 1000 км. Антенны телескопа расположены на территории нескольких стран Европы: Германии, Франции, Великобритании, Швеции. Результирующий сигнал от всех антенн формируется с помощью суперкомпьютера *Stella*. LOFAR предназначен для исследования ранней истории

звезд, изучения магнитного поля Галактики и возможного открытия неизвестных источников космических лучей большой энергии. С помощью этого радиотелескопа осуществляются астрономические наблюдения на низких радиочастотах – 10–240 МГц.

MERLIN (MultiElement Radio Linked Interferometer Network – «Многоэлементная интерферометрическая сеть с радиосвязью») – радиоинтерферометр из 7 радиотелескопов, рассредоточенных по территории Англии с интервалом до 217 км. *MERLIN* работает на частотах от 151 МГц до 24 ГГц. Все радиотелескопы связаны в единую сеть путем передачи сигналов в центр по радиолиниям. Максимальное угловое разрешение *MERLIN* составляет 0,05" на волне 6 см. Под таким углом будет видна монета диаметром 2 см с расстояния ~ 100 км!

В России создан крупнейший в мире наземно-космический РСДБ – «Радиоастрон» (рис. 48), научным руководителем которого является Н. С. Кардашев. Основу проекта составляет наземно-космический интерферометр, состоящий из сети наземных радиотелескопов и космического радиотелескопа, установленного на космическом аппарате «Спектр-Р».



Рис. 48. Космический радиотелескоп «Радиоастрон»

Космический радиотелескоп с приемной параболической антенной диаметром 10 м был запущен 18 июля 2011 г. Космическая радиообсерватория работает как гигантская интерферометрическая сеть с базой

между спутником и системой наземных радиотелескопов. Используя такой интерферометр, можно получить высокое угловое разрешение (примерно в 20 млн раз выше, чем разрешение человеческого глаза) и построить высоко детализированные изображения космических объектов. За первый год работы с помощью «Радиоастрона» были проведены наблюдения 29 активных ядер галактик, 9 пульсаров, 6 источников мазерных линий в районах образования звезд и планетных систем.

Одним из примеров РСДБ является российская сеть «Квазар», спроектированная как система радиоастрономических обсерваторий на территории России и СНГ с передачей данных по спутниковым и оптоволоконным каналам связи в центр управления и обработки. В сеть «Квазар» входят три радиотелескопа с антennыми зеркалами диаметром 32 метра каждый, расположенных в поселке Светлое (под Санкт-Петербургом), станице Зеленчукская (Ставропольский край) и в урочище Бодары (в Бурятии, южнее озера Байкал). Образуемый тремя обсерваториями глобальный радиотелескоп с эффективной площадью зеркала 12 млн км² обладает уникальным пространственным и временным разрешением.

Все пункты сети «Квазар» включены в международную глобальную сеть «IVS». В ней участвуют еще несколько инструментов России и СНГ. Это радиотелескопы ОКБ МЭИ диаметром 64 м под Москвой (Медвежьи озера и Калязин), 70-метровые радиотелескопы центров дальней космической связи вблизи Уссурийска и в Евпатории. В 2007 г. было возобновлено строительство 70-метрового радиотелескопа миллиметровых волн на плато Суффа (Узбекистан). Кроме Квазара существует европейская сеть «EVN», американская – «VLBA», австралийская – «LNA», японский проект – «VERA» и др.

Новейший этап в развитии РСДБ – вынос радиотелескопа в космическое пространство. Космический радиотелескоп, работающий совместно с наземной сетью, образует радиоинтерферометр. Длина его базы определяется высотой орбиты, на которую он запущен. Впервые такой проект под названием *VSOP* (VLBI Space Observation Programme – «программа наблюдений при помощи космической РСДБ») осуществили японские исследователи, запустившие в 1997 г. 8-метровую параболическую антенну на орбиту, максимальное удаление которой от Земли составляет около 20 000 км. Глобальная сеть наземных радиоинтерферометров с добавлением космического радио-

телескопа VSOP используется для изучения процессов, протекающих в окрестностях черных дыр, в центрах активных галактик и т. п.

GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope – «Гигантский радиотелескоп метрового диапазона») – радиотелескоп, работающий в Индии в 80 км от г. Пуна, на высоте в 588 метров над уровнем моря. Он представляет собой радиоинтерферометр, состоящий из 30 антенн, каждая из которых обладает 45-метровым рефлектором.

SKA (Square Kilometre Array – «Квадратная километровая решетка») – самый большой телескоп в истории, который будет иметь собирающую площадь около 1 км², что позволит достичь чувствительности в 50 раз большей, чем у любого другого существующего радиотелескопа. Как и *ALMA*, *SKA* будет радиоинтерферометром, состоящим из 4000 антенн. При этом все антенны соединят с мощным суперкомпьютером, который будет строить изображение на основе собранных данных.

SKA будет построен в Южном полушарии Земли (Южной Африке, Австралии и Новой Зеландии), где обеспечен наилучший обзор нашей Галактики и низкий уровень радиопомех. *SKA* сможет уловить космический «шепот» от звезд и галактик, возникших сразу после Большого взрыва, зафиксировать гравитационные волны, производимые слиянием черных дыр, помочь раскрыть природу темной энергии. Завершение строительства телескопа планируется на 2020 г.

FAST (Five hundred meter Aperture Spherical Telescope – «Радиотелескоп с пятисотметровой апертурой») – гигантский радиотелескоп, строящийся в провинции Гуйчжоу (Китай). Он станет самым большим в мире радиотелескопом с заполненной апертурой (диаметр антенны 500 м!). По конструкции он будет схож с Аресибо и будет располагаться в естественной впадине. Однако, по сравнению со своим пуэрто-риканским «коллегой», он сможет заглянуть в космос в 3 раза дальше и проводить обзор неба в 10 раз быстрее. Астрономы рассчитывают, что высокая чувствительность телескопа станет хорошим дополнением к проекту *SKA*. *FAST* будет заниматься поисками темной материи, слабых сигналов экзопланет размером с Юпитер, новых пульсаров, радиосигналов искусственного происхождения.

В настоящее время ведется активное освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн в астрономических целях. Сверхвысокое разрешение и высокая чувствительность в указанных

диапазонах позволит детально исследовать звезды с планетными системами.

С самого начала реализации проекта Спектр-Р подразумевалось, что этот радиотелескоп будет сопровождаться другими орбитальными радиотелескопами следующего поколения. К ним относятся Спектр-М «Миллиметрон» и Спектр-С «Субмиллиметрон». Как следует из названий этих радиотелескопов, они будут обладать максимальной чувствительностью в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Проекты «Миллиметрон» и «Субмиллиметрон» предусматривают создание международной космической обсерватории – интерферометра «Космос – Земля – Космос» для проведения астрономических исследований в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах с предельно высокой чувствительностью и высочайшим угловым разрешением. Космический телескоп «Миллиметрон» с 12-метровым зеркалом будет эквивалентен наземному радиотелескопу сантиметрового диапазона со сплошной апертурой диаметром 3 км, а в интерферометрическом режиме позволит добиться углового разрешения, в тысячи раз превышающего разрешение интерферометра с предельной наземной базой. Таким образом, более 10 млрд небесных источников излучения станут доступными для исследований. Космическая обсерватория «Миллиметрон» будет содержать следующие системы (рис. 49).

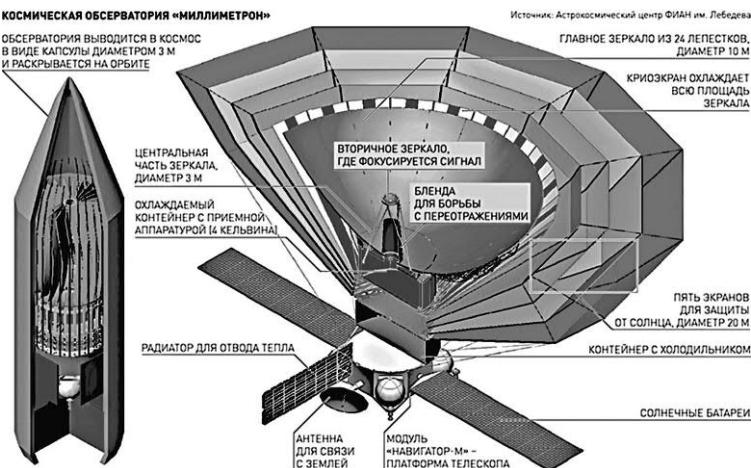


Рис. 49. Устройство космической обсерватории «Миллиметрон»

- 1) Космический аппарат (служебный модуль) типа «Спектр» со всеми системами обеспечения (электропитания, ориентации, управления, связи с Землей).
- 2) Космический криогенный телескоп.
- 3) Активная и пассивная (экраны) системы охлаждения телескопа.
- 4) Болометрические и радиометрические приемники излучения со спектроанализаторами, поляриметрами и дополнительными средствами охлаждения.
- 5) Система генераторов и синтезаторов высокочастотных частот и времени для интерферометрических исследований.
- 6) Система цифровых преобразований, хранения и обработки сигналов научной информации.
- 7) Сверхширокополосная когерентная система связи «Земля – Космос» и «Космос – Космос».
- 8) Бортовая часть комплекса высокочастотных траекторных измерений, включая доплеровскую систему определения скорости, трехосный акселерометр, фазовую и лазерную системы определения дальности.

Запуск спутника «Миллиметрон» запланирован после 2019 г.

7.4. Открытие реликтового излучения и его анизотропии

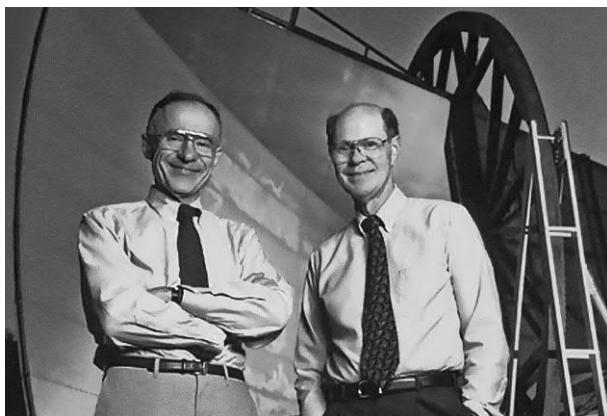
Гипотезу о существовании реликтового излучения (термин предложил И. С. Шкловский) высказал в 1946 г. известный советский и американский ученый Георгий Антонович Гамов (1904–1968). Он разрабатывал теорию нуклеосинтеза в горячей Вселенной, предсказал существование теплового электромагнитного излучения со спектром абсолютно черного тела и оценил его температуру (6 К). Наблюдения подтвердили, что это излучение имеет спектр абсолютно черного тела. Впоследствии была определена и температура реликтового излучения (2,725 К).

Основа теории Гамова – картина расширяющейся Вселенной, построенная его учителем А. А. Фридманом. По Фридману, вначале был взрыв. Он произошел одновременно и повсюду во Вселенной, заполнив пространство очень плотным веществом, из которого через миллиарды лет образовались наблюдаемые тела Вселенной – Солнце, звезды, галактики и планеты, в том числе и Земля.



Г. А. Гамов

Гамов добавил к этой модели представление о том, что первичное вещество мира было не только очень плотным, но и очень горячим. Идея Гамова состояла в том, что в горячем и плотном веществе ранней Вселенной происходили ядерные реакции, и в этом ядерном кotle за несколько минут были синтезированы все химические элементы.



А. Пензиас и Р. Вильсон

В работе 1953 г., выполненной более чем за десятилетие до наблюдательного открытия реликтового излучения, Гамов сделал теоретическое предсказание температуры этого излучения. Он оценил ее в 7 К, что очень хорошо совпало затем с измеренным значением около 3 К. Прошло 15 лет, и американские радиоастрономы Арно Пензиас

(р. 1933) и Роберт Вильсон (р. 1936) открыли космическое фоновое излучение и измерили его температуру: она оказалась равной 3 К.

В 1960 г. в Кроуфорд-Хилле (Холмдел, шт. Нью-Джерси, США) была построена антенна для приема радиосигналов, отраженных от спутника-баллона «Эхо». К 1963 г. для работы со спутником эта антенна была уже не нужна, и Вильсон и Пензиас из компании Bell Labs решили использовать ее для радиоастрономических наблюдений. Антенна представляла собой 20-футовый рупор (рис. 50). Вместе с новейшим приемным устройством этот радиотелескоп был в то время самым чувствительным инструментом в мире для измерения радиоволн, приходящих с широких площадок на небе. В первую очередь предполагалось провести измерения радиоизлучения межзвездной среды нашей Галактики на длине волны 7,35 см. При этом Пензиас и Вильсон не знали о теории горячей Вселенной и не собирались искать реликтовое излучение.

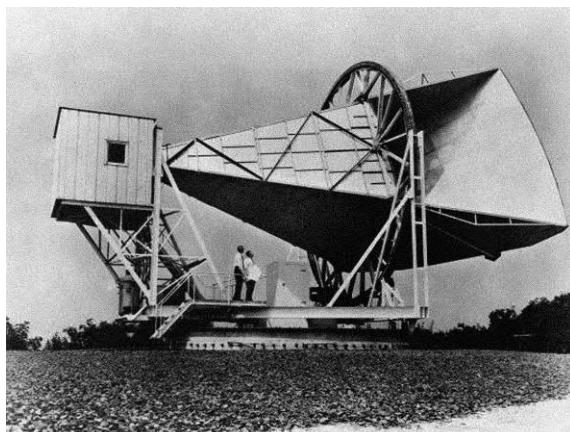


Рис. 50. Антенна, с помощью которой было обнаружено реликтовое излучение

Пензиас и Вильсон обнаружили, что они принимают заметное количество микроволнового шума, не зависящего от направления. Этот «статический фон» не меняется в зависимости от времени суток и не зависит и от времени года. Следовательно, это не могло быть излучением Галактики, ибо в этом случае его интенсивность изменилась бы в зависимости от того, направлена ли антенна вдоль плоскости Млечного Пути или поперек. Отсутствие каких-либо вариаций

наблюдавшего микроволнового шума с направлением серьезно указывало на то, что эти радиоволны, если они действительно существуют, приходят не от Млечного Пути, а от значительно большего объема Вселенной.

Когда все источники помех были тщательно проанализированы и учтены, Пензиас и Вильсон вынуждены были сделать вывод, что излучение приходит из космоса, причем со всех сторон и с одинаковой интенсивностью. Оказалось, что пространство излучает так, как будто бы оно нагрето до температуры 3,5 К (точнее, достигнутая точность позволяла заключить, что «температура космоса» лежит в пределах от 2,5 до 4,5 К).

В последующие годы на различных длинах волн от десятков сантиметров до долей миллиметра были проведены многочисленные измерения. Наблюдения показали, что спектр реликтового излучения соответствует формуле Планка, как это и должно быть для излучения с определенной температурой. Подтвердилось также, что эта температура примерно равна 3 К. При этом максимум реликтового излучения приходится на частоту 160,4 ГГц (микроволновое излучение), что соответствует длине волны 1,9 мм. Оно изотропно с точностью до 0,01% – среднеквадратичное отклонение температуры составляет приблизительно 18 мК.

В 1978 г. Пензиас и Вильсон разделили половину Нобелевской премии по физике «за открытие микроволнового реликтового излучения». Вторую половину премии получил П. Л. Капица «за базовые исследования и открытия в физике низких температур».

Так, было сделано замечательное открытие, доказывающее, что Вселенная в начале расширения была горячей. В дальнейшем наиболее точные измерения реликтового излучения были проведены из космоса. Здесь необходимо назвать эксперимент «Реликт-1», выполненный на советском спутнике «Прогноз-9» (1983–1984 гг.) и эксперимент «DMR» на американском спутнике «СОВЕ» (1989–1993 гг.). Именно последний эксперимент позволил точнее всего определить температуру реликтового излучения: $2,725 \pm 0,002$ К.

Следующий важный шаг в исследовании реликтового излучения – обнаружение его *анизотропии* – разницы температуры реликтового излучения в различных направлениях на небе. Это явление было открыто в 1992 г. В СССР был проведен эксперимент «Реликт-1»

на борту космического аппарата серии «Прогноз» в период с июля 1983 г. по февраль 1984 г. Его основной задачей было получение радиояркостной карты небесной сферы в 8-миллиметровом диапазоне длин волн. Эксперимент «Реликт-1» проводился с помощью спутника «Прогноз-9» (рис. 51), который был сконструирован в Институте космических исследований (ИКИ РАН). Для проведения эксперимента была выбрана высокоапогейная орбита с большой полуосью, равной 400 000 км, и наклонением 65,5°.

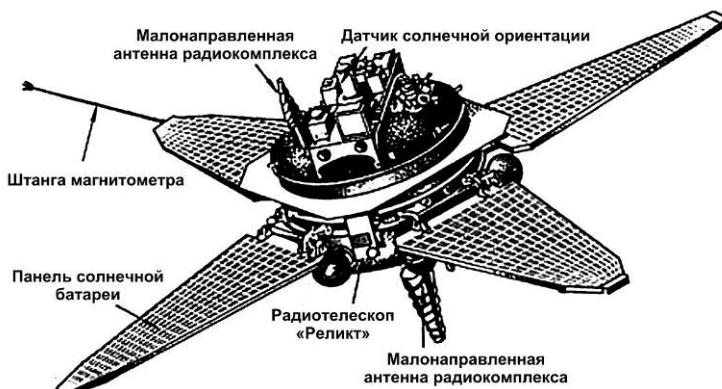


Рис. 51. Спутник «Прогноз-9» с аппаратурой «Реликт-1»

Период обращения составлял около 27 суток. Так удалось свести к минимуму попадание теплового излучения Луны и Земли на вход радиотелескопа, оснащенного двумя антеннами – опорным облучателем и измерительной антенной.

На спутнике был установлен радиометр на длину волны 8 мм. Он имел две рупорные антенны, угол между которыми составлял 90°. Спутник медленно вращался вокруг своей оси, делая один оборот за две минуты. Один рупор был направлен вдоль оси вращения и все время принимал радиосигнал из одной небесной точки. Он назывался *опорным рупором*. Второй рупор за две минуты полностью «просматривал» (в астрономии принят термин «сканировал») большой круг небесной сферы. В таком положении спутник находился примерно неделю, успевая просмотреть каждый элемент большого круга несколько тысяч раз.

Аппаратура спутника «Прогноз-9» работала полгода, картографируя небесную сферу. В результате была получена карта всего неба на длине волны 8 мм. Первая обработка карт неба в микроволновых лучах показала отсутствие анизотропии. Следующий этап работы над полученными данными связан с приходом в группу А. А. Брюханова. После выбора правильной модели радиотракта Брюханов заявил, что на радиокартах обнаружена анизотропия. После первого сообщения еще целый год исследователи занимались моделированием, проверяя различные гипотезы о природе «сигнала». Что это? Случайный шум на карте или реальная анизотропия? Окончательно вопрос был решен к концу 1991 г. Это был реальный сигнал. Правда, из-за недостаточной чувствительности надежность обнаружения анизотропии внушила еще некоторые опасения. Кроме того, радиометр на одну частоту был самым уязвимым местом проекта с точки зрения астрономии.

В январе 1992 г. на научном семинаре в ГАИШ (Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга) А. А. Брюханов выступил от лица всей группы (в эту группу входили: руководитель эксперимента И. А. Струков, Д. П. Скулачев, А. А. Брюханов и М. В. Сажин) с сообщением об обнаружении анизотропии. Одновременно были отправлены статьи в научный журнал на русском языке («Письма в Астрономический журнал») и чуть позже в журнал Королевского Астрономического общества (Monthly Notices of Royal Astronomical Society).

К этому времени созданный НАСА космический аппарат «СОВЕ», аналогичный аппарату «Прогноз-9», но значительно усовершенствованный, находился на околоземной орбите уже почти два года. Он также был предназначен для обнаружения анизотропии реликтового излучения (см. ниже). В 1993–1995 гг. планировалось провести эксперимент, который исследователи назвали «Реликт-2». Для него необходимо было создать малошумящие широкополосные приемные устройства, охлаждаемые приблизительно до 100 К, а также антенны, принимающие излучение только по основному направлению. Этую задачу удалось успешно решить. Несмотря на наличие отработанного спутника, готовность технологического образца аппаратуры и относительно невысокую стоимость испытаний и запуска, проект реализован не был.

Расскажем теперь об исследованиях американского космического аппарата «СОВЕ». Этот спутник был сконструирован и изготовлен в Центре космических полетов им. Годдарда (НАСА). В проекте

“СОВЕ” было достигнуто удачное сочетание научных приборов, конструкции спутника и параметров его орбиты с целью уменьшения систематических ошибок, причем приборы перекрывали широкий спектральный диапазон (от ближнего инфракрасного до сантиметрового) и могли измерять фоновое космическое излучение по всему небу. Спутник был запущен 18 ноября 1989 г.

Этот космический спутник, названный по аббревиатуре термина “Cosmic Background Explorer” («Исследователь космического фона»), был ориентирован на исследование реликтового излучения. В отличие от «Прогноза-9» спутник “СОВЕ” был многочастотным и многоцелевым инструментом. Каждый прибор конструировался так, чтобы свести к минимуму систематические ошибки и обеспечить необходимую для измерения космического фона чувствительность.



Дж. Смут

На спутнике “СОВЕ” были установлены три комплекса аппаратуры (рис. 52). Основной научный комплекс, руководителем работ на котором был Джордж Смут (р. 1945), “DMR” (Differential Microwave Radiometer – «дифференциальный микроволновой радиометр»), состоял из нескольких радиометров на три частоты: 32, 53 и 90 ГГц. Именно он и был предназначен для обнаружения анизотропии реликтового излучения. Антенны каждого из радиометров обладали диаграммой направленности с полушириной 5°. Они были развернуты так, что угол между направлениями приема составлял 60°.



Рис. 52. Спутник “СОВЕ”

Высокая чувствительность радиометров достигалась за счет быстрого переключения двух практически идентичных рупорных антенн, каждая из которых была развернута на 30° относительно оси вращения спутника.

Вторая по значению роль принадлежала комплексу “FIRAS” (Far InfraRed Absolute Spectrophotometer – «длинноволновый инфракрасный абсолютный спектрофотометр»). Основной задачей этого прибора было измерение спектра реликтового излучения в диапазоне от 100 мкм до 1 см в каждом из 1000 участков неба. Отклонения от спектра абсолютно черного тела измерялись с точностью до 1/1000.

Подобно “DMR” “FIRAS” представляет собой дифференциальный прибор. Он сравнивал принимаемую спектральную мощность с внутренним опорным источником, у которого температура контролировалась, а излучательные свойства были прокалиброваны. Своей высокой точностью “FIRAS” был обязан подвижному калибровочному источнику, который мог быть введен во входной пучок рупора. Излучаемый калибратором спектр отличался от спектра абсолютно черного тела не более чем на 0,01%. Значение температуры калибратора выбиралось таким, чтобы поток излучения был как можно ближе к потоку от неба. Тогда любые остающиеся различия в спектрах неба и абсолютно черного тела могли быть измерены с высокой чувствительностью.

Излучение неба попадало в прибор через конус с растробом, который подавлял внеосевое излучение. Результирующий сигнал расщеплялся

на два пучка, которые проходили разные оптические пути, регулируемые при помощи подвижных зеркал. О характере спектра исследователи судили по тому, как два пучка интерферировали друг с другом, когда они вновь объединялись. Поле зрения прибора составляло 7° в направлении оси вращения спутника. Руководил проектом “FIRAS” Джон Мазер (р. 1946).



Дж. Мазер

Наконец, последний научный комплекс “COBE” назывался “DIRBE” (Diffuse InfraRed Background Experiment – «измеритель диффузного инфракрасного фона»). “DIRBE” предназначался для детектирования слабого свечения от первых звезд и галактик во Вселенной. Вклад результатов эксперимента “DIRBE” в космологию оказался менее значительным, чем вклад комплексов “DMR” и “FIRAS”.

Оборудование спутника “COBE” включало также большой криостат (вакуумно-изолированный резервуар с жидким гелием), развертываемый радиационный экран, системы электропитания и управления ориентацией. Экран защищал чувствительные приборы и криостат от солнечного и земного теплового излучения и от радиочастотных помех. “DIRBE” и “FIRAS” были установлены внутри криостата, с помощью которого их температура поддерживалась ниже 2 К. Это сводило к минимуму излучение от самих приборов и позволяло использовать высокочувствительные малошумящие приемники. Криостат содержал достаточное количество сверхтекучего гелия, чтобы поддерживать приборы при низкой температуре все номинальное время полета около одного года, т. е. время, необходимое для достижения требуемой чувствительности и полного обзора неба.

“DMR” был смонтирован вне криостата, но он также был закрыт радиационным экраном. Панели солнечных батарей обеспечивали спутник электропитанием, за исключением только коротких периодов тени. В такие периоды использовались аккумуляторные батареи.

В конце апреля 1992 г. Смут на специально созванной пресс-конференции объявил об открытии анизотропии реликтового излучения. Сообщение было распространено по всему свету средствами массовой информации как научная новость номер один. Оба спутника («Прогноз-9» и «СОВЕ») могли обнаружить только крупномасштабную анизотропию. Характерный угловой масштаб переменности температуры реликтового излучения составлял десятки градусов. На рис. 53 представлена карта неба в радиолучах на частоте 37 ГГц, составленная по результатам эксперимента «Реликт». Многочисленные белые полосы – это так называемые пораженные участки неба.

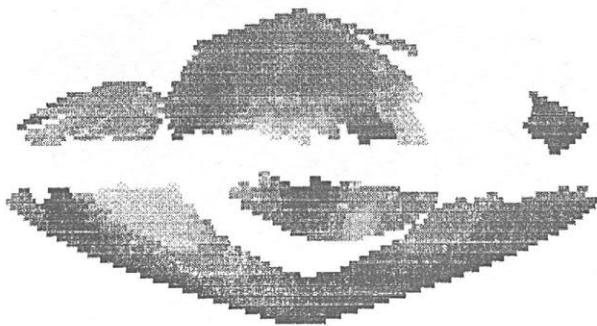


Рис. 53. Карта неба в микроволновом диапазоне (по данным эксперимента «Реликт-1»)

Перейдем к обсуждению результатов исследования спутников “СОВЕ” и «Реликт-1». В ходе проведения эксперимента «Реликт-1» в рупор попадало излучение от Луны, Земли, либо от другого известного и мощного источника. Поэтому часть данных пришлось удалить из анализа. Так возникли белые полосы (рис. 53). Широкая белая полоса, расположенная на середине карты, представляет радиоизлучение галактической плоскости, которое тоже было удалено из анализа. Все эти участки небесной сферы были просто «вырезаны». Различные пиксели (квадратики, размером примерно равные телесному углу диаграммы направленности антенны) покрашены в различные оттенки

серого цвета. Они соответствуют разной температуре реликтового излучения на данном участке неба. Анизотропия реликтового излучения показана здесь разными оттенками серого цвета.

На рис. 54 приведена карта небесной сферы, полученная в ходе проведения эксперимента “СОВЕ”. На этой карте построено распределение анизотропии реликтового излучения, тогда как на карте, полученной в эксперименте «Реликт-1», не проведено разделения излучений различной природы. На ней показана суммарная анизотропия собственно реликтового излучения, синхротронного излучения нашей Галактики, излучения нашей Галактики и излучения галактической пыли. Интенсивность всех трех галактических компонент радиоизлучения зависит от частоты, поэтому многочастотный эксперимент позволил разделить компоненты радиоизлучения различной природы и выделить анизотропию реликтового излучения.

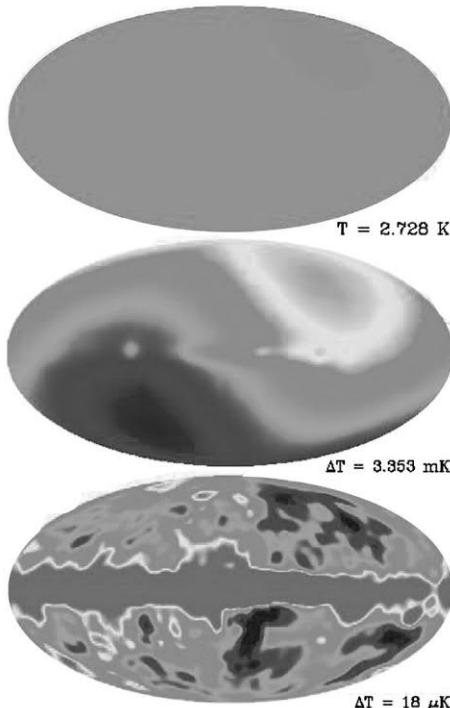


Рис. 54. Карты реликтового излучения, полученные DMR “СОВЕ”. Вверху – монополь; в середине – диполь; внизу – мультиполи

Вскоре другие исследовательские группы стали объявлять об обнаружении анизотропии реликтового излучения в средних угловых масштабах. Эти эксперименты проводились радиоастрономами с наземных радиотелескопов и в ходе проведения баллонных экспериментов.

В 2006 г. Нобелевская премия по физике была присуждена Мазеру и Смуту за «открытие планковской формы спектра космического фонового излучения и анизотропии космического фонового излучения».

Первая и самая важная информация, которую космологи получают из углового спектра анизотропии, – измерение с большой точностью глобальных параметров современной нам Вселенной. В первую очередь, это полная плотность Вселенной, соотношение различных типов материи, ее составляющих, и глобальная геометрия Вселенной. Обо всем этом можно судить по мультипольному спектру анизотропии реликтового излучения. Он же позволяет космологам определять свойства ранней Вселенной и проверять ее теории, включая теорию суперструн. Изучая анизотропию реликтового излучения, можно попытаться спрогнозировать развитие нашей Вселенной.

Угловое разрешение первых наблюдений в экспериментах «Реликт-1» и «СОВЕ» было очень плохое, примерно 7° , поэтому информация о флюктуациях реликтового излучения была неполной. В последующие годы подобные наблюдения проводились с помощью как наземных радиотелескопов (в нашей стране для этой цели используется инструмент РАТАН-600), так и радиотелескопов, которые поднимались на воздушных шарах в верхние слои атмосферы.

Принципиальным шагом в исследовании анизотропии реликтового излучения стал запуск спутника «WMAP». Название спутника – это аббревиатура от Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. Первоначально спутник назывался «MAP». Знаменитый американский ученый Д. Уилкинсон, который был одним из авторов проекта «MAP», умер в сентябре 2002 г. и в память о нем его ученики и соавторы решили назвать спутник его именем. Спутник «WMAP» представлял собой аппарат массой 840 кг. Он был запущен в 2001 г. и выведен в точку Лагранжа L2, которая находится на расстоянии 1,5 млн км от Земли в стороне, противоположной Солнцу. На такую далекую орбиту спутник был запущен для того, чтобы помехи от земной техногенной активности не мешали приему реликтового радиоизлучения. Спутник «WMAP» был предназначен для измерения анизотропии и поляриза-

ции реликтового излучения. Основная задача, которая была поставлена перед экспериментом, – составить карту всего неба с чувствительностью не хуже, чем 20 мК в каждом пикселе, и с систематическими ошибками, не превышающими 5 мК в каждом пикселе.

Аппарат “WMAP” смог построить детальную карту распределения интенсивности реликтового излучения по небесной сфере. На основе этих данных сейчас ведется уточнение космологических моделей и представлений об эволюции галактик. Кроме того, на основе полученных “WMAP” данных удалось с беспрецедентной точностью определить огромное количество важнейших космологических параметров.

- Отношение полной плотности Вселенной к критической – $1,02 \pm 0,02$ (т. е. наша Вселенная плоская или замкнутая с очень малой кривизной).
- Постоянная Хаббла – 72 ± 2 км/с/Мпк.
- Возраст Вселенной – $13,4 \pm 0,3$ млрд лет.
- Красное смещение, соответствующее времени рекомбинации, – 1088 ± 2 (это среднее значение, толщина границы рекомбинации существенно больше указанной ошибки).

Таким образом, на основе данных “СОВЕ”, наземных и баллонных наблюдений и наиболее точных данных спутника “WMAP” были сделаны фундаментальные открытия, заставившие изменить современные представления о строении Вселенной.

В результате наблюдения анизотропии и поляризации реликтового излучения (в частности, в эксперименте “WMAP”) открылась новая эпоха «прецизионной космологии». Теперь космология становится точной наукой, неопределенность измерения основных параметров в космологии приближается к неопределенности измерения в физике. Это позволяет на количественном уровне изучать процессы, происходившие в ранней Вселенной, а также лучше понять физические процессы, играющие основную роль на сверхбольших масштабах в нашей Вселенной.

Для дальнейшего изучения реликтового излучения был подготовлен новый космический проект – телескоп «Планк» (рис. 55), названный в честь М. Планка. «Планк» был запущен 14 мая 2009 г. с космодрома Куру на борту ракеты-носителя «Ариан-5». Вместе с ним был запущен орбитальный инфракрасный телескоп «Гершель».

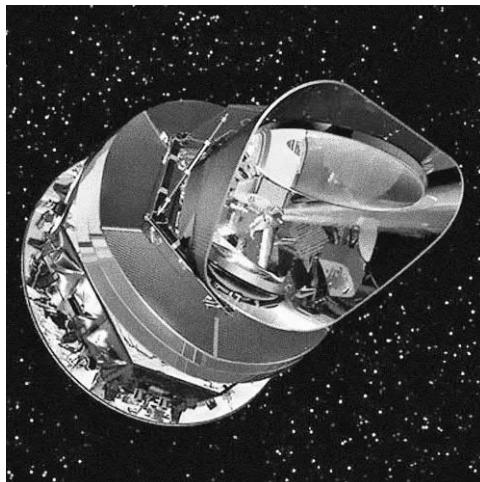


Рис. 55. Телескоп «Планк»

Телескоп «Планк» имел два набора радиоизмерительных приборов. Один набор составлен из 4 радиометров и предназначен для обзора неба на частотах от 30 до 100 ГГц, это так называемый инструмент низких частот. Второй набор состоял из 6 болометров, которые были созданы научно-исследовательской группой, руководимой Г. Н. Гольцманом. Он называется «инструмент высоких частот» и предназначен для построения карты неба на частотах от 100 до 857 ГГц. Болометры в отличие от радиометров являются широкополосными приборами. Чувствительность по измерению температуры каждого прибора составляет несколько мК, угловое разрешение приборов – десяток угловых минут (сравните с угловым разрешением «Прогноза-9» и «СОВЕ» $\sim 6^\circ$). «Планк» способен точно измерить спектр флуктуации реликтового излучения. Это позволяет измерить параметр Хаббла с точностью $\sim \pm 5$ км/с/Мпк, параметр плотности с точностью несколько процентов. Можно точно измерить полное количество барионов во Вселенной и определить, есть ли во Вселенной достаточно интенсивный фон гравитационных волн.

В период с сентября 2009 г. по ноябрь 2010 г. «Планк» успешно закончил основную часть своей исследовательской миссии. По его данным, мир состоит на 4,8% из обычного (барионного) вещества (предыдущая оценка – по данным «WMAP» – 4,6%), на 25,4% из тем-

ной материи (против 22,7%) и на 70% (против 73%) из темной энергии. Кроме того, была уточнена постоянная Хаббла – новое значение $H = 68 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Иначе говоря, с момента Большого взрыва прошло 13,8 млрд лет. Предыдущая оценка – $70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ – соответствовала 13,75 млрд лет. «Планк» подтвердил наличие небольшого отличия спектра первоначальных возмущений материи от однородного, что является важным результатом для инфляционной теории, которая является на сегодняшний день основополагающей теорией, описывающей первые мгновения жизни Вселенной. Часть данных, полученных с помощью телескопа «Планк», пока еще до конца не проанализирована, в частности, это касается данных по поляризации микроволнового фона.

7.5. Обнаружение квазаров, пульсаров и двойных пульсаров

Важнейшим событием в области радиоастрономии считается обнаружение *квазаров* – очень далеких и активных внегалактических объектов. Вначале они казались рядовыми точечными источниками. Затем некоторые из них были отождествлены со слабыми звездами (отсюда название «квазар» – квазизвездный радиоисточник). История квазаров началась с проводимой радиообсерваторией «Джодрелл-Бэнк» программы измерений видимых угловых размеров радиоисточников.

Первый квазар, 3С 48, был обнаружен в конце 1950-х гг. А. Сендижем и Т. Метьюзом во время радиообзора неба. В 1963 г. Луна должна была пройти перед ярким радиоисточником 3С 273. Наблюдения этого покрытия были организованы на Паркском радиотелескопе в Австралии и потребовали весьма сложной подготовки. Башня Паркского телескопа недостаточно высока, так что зеркало нельзя наклонять к горизонту под углом ниже 30° , иначе оно попросту упирается в землю. Но покрытие 3С 273 Луной происходило ниже! В связи с этим с радиотелескопа пришлось снять несколько тонн металлических конструкций, чтобы сделать возможными наблюдения. За несколько часов до покрытия источника Луной по местным широковещательным радиостанциям было передано сообщение с просьбой не включать никаких передатчиков.

Наблюдения прошли успешно, и радиоисточник 3С 273 удалось отождествить со звездой 13-й звездной величины. Для астрономов

это яркая звезда. При внимательном рассмотрении обнаружилось, что из нее исходит светящийся выброс протяженностью 20''. Для того чтобы узнать, что собой представляет звезда, нужно получить ее оптический спектр.



М. Шмидт

У радиоисточника 3С 273 он оказался совершенно иным, чем у обычной звезды. Как выяснилось, спектральные линии были сильно смещены в красную сторону, что соответствует удалению 3С 273 от Земли со скоростью около 50 000 км/с.

Зная скорость удаления галактики, можно определить расстояние до нее (используя закон расширения Вселенной Э. Хаббла). Источник 3С 273 оказался дальше большинства известных галактик, на расстоянии более миллиарда световых лет. Впервые расчеты радиоисточника 3С 273 провел голландский астроном Маартен Шмидт (р. 1929), работавший в то время в Паламарской обсерватории (Калифорния).

К настоящему времени открыты тысячи квазаров. Не все, но многие из них представляют мощнейшие радиоисточники. Большинство квазаров находится на расстояниях 10–15 млрд световых лет от нас, т. е. почти на границе наблюдаемой Вселенной. Что же это за объекты, которые выглядят, как звезды, удалены на гигантские расстояния и излучают энергию в десятки, а иногда и в сотни раз больше, чем целые галактики?

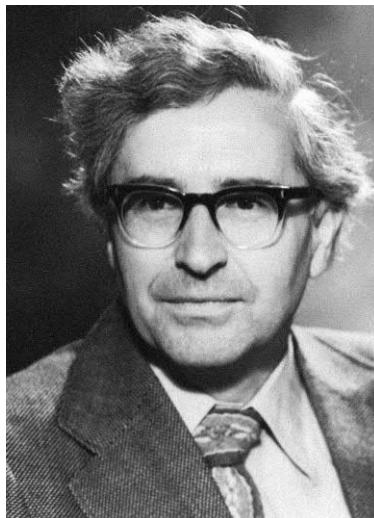
Существует несколько гипотез для объяснения природы квазаров, но наиболее известная сводится к тому, что квазар – это гигантская

черная дыра с массой около 100 млн солнечных масс, расположенная в плотном ядре галактики. Когда на сверхмассивную черную дыру в центре галактики аккрецирует (процесс *аккреции* заключается в падении вещества на звезду, галактику или другое космическое тело из окружающего пространства) слишком много вещества, выделяется огромное количество энергии. Эта энергия разгоняет часть вещества до околосветовых скоростей и выбрасывает его релятивистскими плазменными джетами (*джеты* – выбросы струй вещества) в двух противоположных направлениях, перпендикулярно оси аккреционного диска. Когда эти джеты сталкиваются с межгалактической средой и тормозятся, входящие в них частицы испускают радиоволны.

Расскажем теперь об истории обнаружения *пульсаров*. В середине 1960-х гг. радиоастрономы Великобритании решили провести первый полный обзор северного полушария неба по выявлению мерцающих радиоисточников на длине волны 75 см. Для этого была сооружена специальная антennaная решетка из параллельных рядов медной проволоки. Работу по анализу наблюдений поручили аспирантке Кембриджского университета Джоселин Белл Барнелл (р. 1943). Ее научным руководителем и организатором всей программы был Энтони Хьюиши (р. 1924).



Дж. Б. Барнелл



Э. Хьюиши

В 1954 г. Хьюиш предсказал мерцание радиоисточников с малым угловым диаметром. Радиоволны, испускаемые такими источниками, проходя через космическое пространство, заполненное газом с переменной плотностью (солнечным ветром со слабо выраженным сгустками), должны слегка отклоняться от первоначального направления. В результате этого возникают быстрые, измеряемые секундами вариации принимаемого сигнала. Этот эффект, получивший название *мерцания в межпланетном пространстве* (ММП), аналогичен мерцанию звезд, свет от которых проходит через земную атмосферу, обладающую переменной плотностью.

В 1967 г. было завершено строительство меридианного радиотелескопа для исследования влияния солнечной короны на излучение от далеких точечных источников на основе использования ММП. Дж. Белл Барнелл, участвовавшая в создании телескопа, начала с его помощью поиск радиоисточников с быстро и заметно меняющейся амплитудой сигнала.

Мерцания на околосолнечной плазме наблюдаются только в дневное время суток, когда радиоисточник находится на угловом расстоянии $30\text{--}60^\circ$ от Солнца. Но Белл решила не выключать самописец, регистрирующий радиоизлучение, даже ночью. Она аккуратно просматривала записи, фиксируя мерцающие радиоисточники на длине волны 3,5 м (85,7 МГц). Однажды она нашла быстропеременный источник, который наблюдался ночью, когда мерцающих источников не должно было быть. Вскоре Белл обнаружила, что «помеха» повторяется через 23 ч 56 мин. Вспомним открытие Янского: этот период соответствует одним звездным суткам. Это означает, что источник находится за пределами Солнечной системы.

Хьюиш, Белл и другие члены кембриджской группы сделали запись «помехи» с повышенной скоростью самописца. Они обнаружили, что странный сигнал представляет собой периодические короткие импульсы, точность повторения которых просто феноменальна. До того как была установлена природа пульсаров, Хьюиш высказал чисто умозрительное предположение о том, что такие периодические сигналы могут быть посланиями от внеземных цивилизаций. Какое-то напоминание об этой далекой от истины гипотезе можно найти в журналах наблюдений, в которых рукой Хьюиша первые четыре пульсара обозначены как LGM 1, LGM 2 и т. д. (LGM означает “Little Green

Men" – «маленькие зеленые человечки»). Поэтому несколько месяцев открытие держали в строгом секрете.

Первые специальные записи периодического сигнала были сделаны 28 ноября 1967 г. (рис. 56), а публикация об открытии появилась лишь в феврале 1968 г. За это время Белл нашла в своих записях еще несколько подобных источников. По импульльному характеру излучения они были названы пульсарами. Импульсы следовали один за другим с четко выдерживаемым периодом в 1,34 с. Вскоре обнаружились и другие пульсары (пульсирующие звезды), которые все имели меньший диаметр, чем любая планета, и находились на расстоянии более чем 300 парсеков.

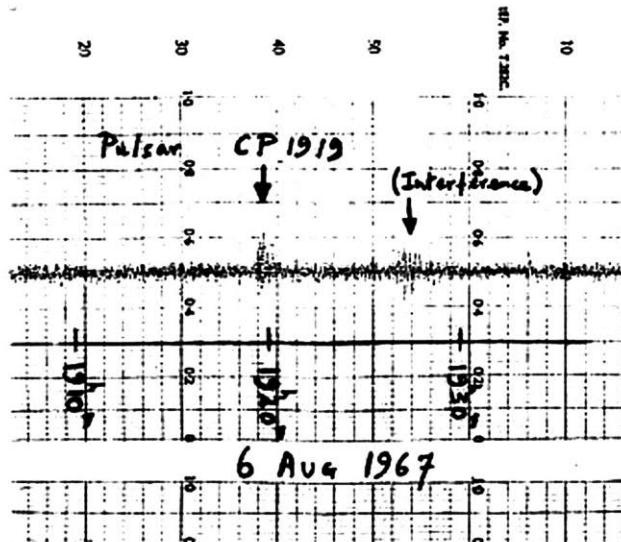


Рис. 56. Первые записи периодического сигнала CP 1919

Открытие пульсаров в 1967 г. стало большой неожиданностью, поскольку такие объекты не предсказывались ранее. Ни обычные звезды, ни даже белые карлики не могут естественным образом пульсировать с такой высокой частотой и вращаться так быстро (центробежная сила разорвет их). Это может быть только очень плотное тело, состоящее из вещества, предсказанного Л. Д. Ландау и Р. Оппенгеймером в 1939 г. В этом веществе ядра атомов вплотную прижаты друг к другу. Сжать

вещество до такой степени может только гигантская сила тяжести, которой обладают лишь очень массивные тела, такие как звезды. При огромной плотности ядерные реакции превращают большинство частиц в нейтроны, поэтому такие тела называют *нейтронными звездами*.

Гипотезу об их существовании впервые выдвинули астрономы В. Бааде и Ф. Цвикки сразу после открытия нейтрона (1932 г.). Однако подтвердить эту гипотезу экспериментально удалось лишь спустя 35 лет после открытия пульсаров. В 1968 г. Хьюиш предположил, что источником радиоволн, испускаемых пульсарами, являются либо высокочастотные колебания возбужденного белого карлика (было известно, что естественная частота белого карлика гораздо ниже), либо колебания нейтронной звезды на ее естественной частоте.

В том же году британский астроном Томас Голд (1920–2004) предложил теорию, впоследствии подтвердившуюся, согласно которой пульсар представляет собой быстровращающуюся вокруг собственной оси нейтронную звезду с сильнейшим магнитным полем (при мерно в 10^{15} раз превосходящим магнитное поле Земли), окруженную облаком электропроводного разреженного газа (плазмы), которое испускает вращающийся луч. Вращающееся магнитное поле захватывает вылетающие с поверхности звезды заряженные частицы и ускоряет их до очень высоких энергий. Эти частицы испускают электромагнитные кванты в направлении своего движения, формируя вращающиеся пучки излучения. Когда пучок оказывается направленным на Землю, мы принимаем импульс излучения.

У нейтронных звезд очень сильное магнитное поле, достигающее на поверхности 10^{12} – 10^{13} Гс (для сравнения: у Земли ~ 1 Гс). Постоянство периода пульсации объясняется стабильностью вращения нейтронных звезд. Некоторые пульсары даже используются для контроля за точностью часов. Каждый из пульсаров обладает своим периодом пульсации. Периоды большинства пульсаров составляют от 0,5 до 1 с.

Первый пульсар ученые назвали CP 1919, что означает «кембриджский пульсар» (Cambridge Pulsar), имеющий прямое восхождение 19 ч 19 мин. Сразу после открытия к поискам пульсаров подключились крупнейшие радиообсерватории мира, давая обнаруженным объектам обозначения по своим каталогам. К 1975 г. было обнаружено уже 150 пульсаров. Для унификации их все стали обозначать буквами PSR с указанием прямого восхождения (до минут) и склонения (до граду-

са). Согласно принятым обозначениям, первому пульсару присвоено имя PSR 1919 + 21. Его период составляет 1,3373 с, а длительность импульса – 0,037 с.

Наиболее детально исследован пульсар PSR 0531 + 21, расположенный в Крабовидной туманности. Эта нейтронная звезда делает 30 оборотов в секунду (период пульсара 0,033 с). Она родилась менее тысячи лет назад. Вспышку сверхновой на этом месте в созвездии Тельца наблюдали на Земле в 1054 г. В настоящее время радиоастрономы всего мира продолжают поиски пульсаров в нашей и соседних галактиках. К 1997 г. благодаря усилиям всех радиоастрономов мира было открыто более 700 пульсаров. На 2008 г. уже известно около 1790 радиопульсаров.

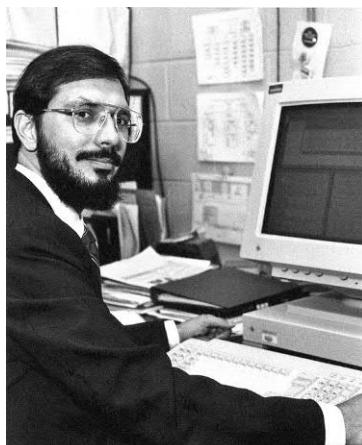
Ученые установили, что нейтронные звезды – пульсары – это заключительная фаза эволюции массивных звезд. Отметим, что пульсары излучают не только в радиодиапазоне, но также в оптическом, рентгеновском, гамма-диапазонах. Сейчас исследования пульсаров проводятся с помощью крупнейших телескопов мира, поскольку для регистрации коротких импульсов необходима высокая чувствительность.

Открытие пульсаров в 1967 г. стало крупнейшей вехой в развитии радиоастрономии наряду с открытыми за несколько лет до этого квазарами и реликтовым излучением. Следующим крупным достижением радиоастрономии принято считать обнаружение двойных пульсаров.

Нобелевский комитет Шведской Королевской академии наук присудил премию 1993 г. по физике американским астрофизикам Джозефу Тэйлору-мл. (р. 1941) и Расселу Халсе (р. 1950) за открытие и исследование первого двойного радиопульсара PSR 1913 + 16. Открытие было совершено на радиотелескопе в Аресибо летом 1974 г. Халсе, который в то время был аспирантом Тэйлора.

2 июля 1974 г. Халсе удалось зарегистрировать слабый пульсирующий сигнал, период которого был удивительно мал – 0,059 с. Положение этого нового пульсара соответствует положению пульсара PSR 1913 + 16, который сейчас известен как двойной пульсар. Первая попытка уточнения периода PSR 1913 + 16 была предпринята 26 августа 1974 г., спустя примерно два месяца после проведения двух раздельных 5–15-минутных сеансов наблюдений каждого пульсара – одного вблизи начала и второго вблизи конца примерно двухчасового

наблюдательного окна, во время которого конкретный объект был ежедневно доступен для наблюдений с телескопа Аресибо. Определенные в каждом из этих наблюдений периоды после вычитания доплеровского сдвига из-за движения Земли оказывались достаточно точными, чтобы затем связать фазы импульсов в обоих наблюдениях, используя времена прихода отдельных импульсов и, таким образом, давая еще более точное определение периода на базе одно- или двухчасового промежутка времени.



Р. Халсе



Дж. Тейлор

Однако вместо того чтобы после доплеровской коррекции получить периоды, одинаковые с точностью до некоторой малой ожидаемой экспериментальной ошибки, Халсе получил различающиеся на 27 микросекунд значения – огромное расхождение.

На рис. 57 приведен график из рабочей тетради Халсе, на котором отложены данные, полученные и обработанные новой системой (для обработки данных Халсе написал новый алгоритм). PSR 1913 + 16 в каждом из этих двух дней наблюдался по возможности долго, и наблюдавший период пульсара отложен в зависимости от времени на протяжении примерно 2 ч каждый день, когда пульсар был виден телескопом. Данные первого дня образуют ломаную верхнюю линию, а второго дня – нижнюю ломаную. Разрывы в линиях были следствием неизбежных пробелов в данных. Обе кривые ведут себя аналогично: сначала период увеличивается, а затем – постепенно уменьшается.

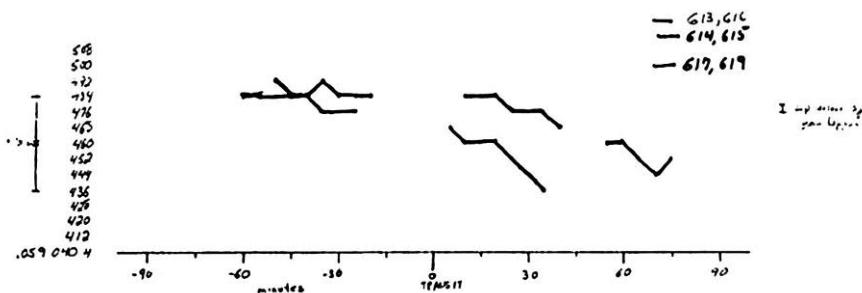


Рис. 57. График из рабочей тетради Халсе

При изучении этого графика Халсе пришло в голову, что эти две кривые совпали бы, если их сместить на 45 мин относительно друг друга. Далее мы приведем выдержку из нобелевской лекции Халсе. «Если пульсар действительно находился в двойной системе, в некоторой точке его период должен прекратить свое постоянное уменьшение в течение ежедневных наблюдений, достигнуть минимума и начать вновь возрастать. Я решил ждать подтверждения этого предсказания, чтобы освободиться от всяких сомнений, что я правильно понимаю то, что я вижу».

К 18 сентября 1974 г. анализ данных от 16 сентября, показывающих минимум периода, был завершен, и Халсе написал письмо Тейлору в Армхерст, чтобы сообщить ему, что пульсар находится на высокоскоростной орбите в двойной системе с 8-часовым периодом. Первым делом, найдя кратчайший промежуток времени, за который серии импульсов точно повторяли друг друга, Халсе и Тейлор определили орбитальный период. Он оказался равным 7,75 ч, так что 45-минутный ежедневный сдвиг, который заметил Халсе, был просто разницей между тремя полными орбитальными периодами и одними земными сутками.

Следующий шаг состоял в слежении за вариациями пульсарного периода на орбите с целью определения скорости пульсара в зависимости от времени. По доплеровскому сдвигу периода пульсара можно судить только о проекции скорости пульсара на луч зрения, а проекция скорости на перпендикулярное направление остается неизвестным. За очень короткое время (только 2 ч из 8) доплеровский сдвиг изменяется от нуля до большого значения и обратно, что соответствует прохождению

пульсара через *periastр* – точку орбиты, в которой расстояние между обоими телами минимально. В оставшиеся 6 ч сдвиг периода медленно изменяется от нуля до меньшего значения с другим знаком и вновь обращается в нуль, что соответствует прохождению пульсаром апоастрра орбиты (*апоастр* – точка наибольшего удаления пульсара от своего компаньона). В наблюдениях 16 сентября зафиксировано как раз прохождение пульсара черезperiастр. Из детального изучения полученной кривой был сделан вывод, что расстояние между двумя телами в апоастре было в четыре раза больше расстояния в periастре, что соответствует эксцентричеситету орбиты около 0,6.

Как следовало из наблюдений уменьшения периода пульсара, действительное значение скорости, с которой пульсар приближался к наблюдателю, было около $300 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$! Скорость удаления была около $75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. Это действительно огромные скорости. Для сравнения орбитальная скорость Земли вокруг Солнца «всего» $30 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

Известие об открытии двойного пульсара произвело настоящую сенсацию, особенно среди специалистов по общей теории относительности (ОТО). И в лабораторных условиях, и среди астрономических объектов астрофизики ищут физические системы, для которых релятивистские эффекты могут оказаться важными. Двойные пульсары действительно стали настоящей астрофизической лабораторией по изучению эффектов ОТО.

Еще до того, как статья Халсе и Тейлора об открытии двойного пульсара вышла из печати, Тейлор с сотрудниками обнаружили первый из важнейших релятивистских эффектов – *смещение periастра орбиты*. Этот эффект ОТО представляет собой поворот эллиптической орбиты в пространстве. Объяснение наблюдаемого смещения перигелия орбиты Меркурия (за сто лет оно составило $43''$) было одним из первых триумфов ОТО. Из первых наблюдений доплеровских сдвигов периода пульсара был сделан вывод о том, что направление на periастр орбиты было перпендикулярно лучу зрения. Однако дальнейшие наблюдения показали, что направление на periастр орбиты медленно поворачивается со скоростью примерно в треть градуса в месяц. За два с половиной месяца наблюдательной программы, законченной в декабре 1974 г., Халсе и Тейлору удалось измерить этот поворот. Смещение periастра орбиты в пульсаре PSR 1913 + 16 составило $4 \pm 1,5$ градуса в год.

Таким образом, за 100 лет, которые понадобились бы для поворота перигелия орбиты Меркурия всего на 0,01 градус, орбита двойного пульсара повернулась бы более чем на 360 градусов, повернувшись более чем один раз! Это было действительно потрясающее экспериментальное подтверждение одного из важнейших эффектов ОТО.

Измерение поворота периастра орбиты пульсара дало возможность определить суммарную массу компонент двойной системы 2,8275 Mc. Кроме того, из-за огромной скорости движения пульсара по орбите были измерены другие релятивистские эффекты – замедление хода времени на движущемся теле (эффект специальной теории относительности) и гравитационное красное смещение в поле тяготения (следствие общерелятивистского принципа эквивалентности). Это дало возможность вычислить массу самого пульсара, оказавшуюся равной 1,4411 массы Солнца. Это наиболее точное измерение массы нейтронной звезды в настоящее время!

Кроме того, к 1991 г. точность наблюдений достигла такой величины, что массы компонентов, определенные раздельно, равнялись 1,4411 и 1,3874 массы Солнца с точностью до 0,05%! Это был настоящий триумф ОТО. Однако более сенсационные результаты были еще впереди.

Наконец, 15-летние высокоточные наблюдения пульсара PSR 1913 + 16 дали возможность проверить одно из наиболее интересных следствий ОТО – существование *гравитационных волн*. Как следует из теории, два тела, обращающихся по орбите, должны излучать гравитационные волны, которые уносят энергию и орбитальный угловой момент, из-за чего орбита должна постоянно сжиматься. Для параметров двойного пульсара PSR 1913 + 16 теория предсказывает уменьшение орбитального периода со скоростью всего 75,8 микросекунды в год. Полученные к 1991 г. Тейлором результаты дали значение $76 \pm 0,3$ мкс в год, что блестяще подтвердило теоретические ожидания! К слову, 11 февраля 2016 г. было объявлено об экспериментальном открытии гравитационных волн коллаборациями LIGO и VIRGO. В настоящее время открыто свыше 40 двойных пульсаров, некоторые из которых могут быть использованы как лаборатории для проверки ОТО.

7.6. Радиоастрономия и проблема SETI

За последние несколько десятилетий радиоастрономия оказалась тесно связанной с проблемой поиска разумной жизни во Вселенной. Принято считать, что современная постановка проблемы поиска внеземных цивилизаций относится к 1959 г., когда в журнале “Nature” появилась статья американских ученых Дж. Коккони и Ф. Моррисона, в которой была показана техническая возможность установления двухсторонней радиосвязи с внеземными цивилизациями.

Для оценки того, сколько в нашей Галактике может существовать цивилизаций, способных вступить с нами в контакт, часто применяется формула Дрейка (предложена в 1960 г. Ф. Дрейком). Согласно этой формуле, количество таких цивилизаций можно оценить следующим образом:

$$N = Rf_p n_e f_l f_i f_c L,$$

где N – количество разумных цивилизаций, готовых вступить в контакт; R – количество звезд, образующихся в год в нашей галактике; f_p – доля звезд, обладающих планетами; n_e – среднее количество планет (и спутников) с подходящими условиями для зарождения цивилизации; f_l – вероятность зарождения жизни на планете с подходящими условиями; f_i – вероятность возникновения разумных форм жизни на планете, на которой есть жизнь; f_c – доля планет, разумные жители которых способны к контакту и ищут его; L – время жизни такой цивилизации (т. е. время, в течение которого цивилизация существует, способна вступить в контакт и желает в него вступить).

Формула Дрейка послужила основанием для выделения значительных финансовых средств на программу поиска внеземных цивилизаций, несмотря на то что при современном уровне развития науки можно относительно точно определить только два коэффициента R и f_p .

Первые попытки вступить в контакт с внеземным разумом предпринял в 1960 г. американский радиоастроном Дрейк и его коллеги по проекту «Озма» в Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк (Западная Вирджиния). Целью эксперимента был поиск следов внеземных цивилизаций в ближайших звездных системах с помощью радиоволн. Они направили радиотелескоп диаметром 26 м на звезды Тау Кита и Эpsilon Эridana (исследования велись на частоте 1,42 ГГц – частоте излучения нейтрального водорода), ожидая,

что у этих близких к нам и очень похожих на Солнце звезд могут быть планеты, подобные Земле, населенные технически развитыми существами. Если бы эти существа имели такую же аппаратуру, как у Дрейка, то с ними можно было бы поддерживать радиосвязь. Однако никаких сообщений из космоса принять не удалось.

За проектом «Озма» последовали другие, гораздо более масштабные эксперименты. Радиоастрономы из США, СССР, Англии, Австралии и других стран направляли чувствительные радиоантенны на сотни близких и далеких звезд, звездных скоплений и даже иных галактик. Сначала подобные исследования получили название SETI (Communication with ExtraTerrestrial Intelligents – «связь с внеземными цивилизациями»). Впоследствии в научный обиход вошел термин – проблема SETI (Search for ExtraTerrestrial Intelligents – «поиск внеземных цивилизаций»).

Обсудим исторические этапы ее исследования в СССР и России. В 1962 г. в СССР появилась книга Шкловского «Вселенная. Жизнь. Разум». Она привлекла значительное внимание к проблеме существования разумной жизни за пределами Земли. Следующий важный шаг связан с работой Кардашева «Передача информации внеземными цивилизациями», первый вариант которой появился в 1963 г.



Н. С. Кардашев

В отличие от проектов, рассчитанных в основном на прием сигналов от цивилизаций, технический уровень которых близок к нашему, Кардашев предложил сосредоточить усилия на поисках сигналов

от цивилизаций, технический уровень которых намного превосходит наш уровень. Как показали расчеты, подобные сверхцивилизации, располагая мощностями порядка 10^{26} Вт и более, могут осуществить непрерывную передачу сигналов в широкой полосе частот, причем эти сигналы могут быть обнаружены с помощью современных радиотелескопов при любых расстояниях в пределах Галактики или даже в соседних галактиках. По своим характеристикам такие широкополосные сигналы подобны шумовому излучению естественных радиоисточников, поэтому методы их обнаружения близки к обычным радиоастрономическим методам.

Кардашев предложил собственную классификацию внеземных цивилизаций по уровню развития. Он считал, что уровень технического развития цивилизаций определяется их общим энергопотреблением. Итак, можно выделить три типа цивилизаций.

1. Цивилизация I типа, которая распоряжается энергией планетарного масштаба. Это, например, наша цивилизация, вырабатывающая 10^{13} Вт при ресурсе энергии, поступающем на планету от Солнца в 10^{17} Вт.
2. Цивилизация II типа использует энергию порядка энергии электромагнитного излучения своей звезды, т. е. около 10^{26} Вт.
3. Цивилизация III типа – сверхцивилизация, использующая энергию, равную энергии Галактики, т. е. около 10^{36} Вт.

Кардашев утверждал, что за долгий срок существования цивилизаций в технологической фазе могло возникнуть много «сверхцивилизаций». Их деятельность не может быть не замечена, так как им легко соорудить всенаправленные маяки-передатчики, мощность излучения которых составляет 10^{20} – 10^{25} Вт.

В 1963 г. в ГАИШ образовалась инициативная группа (Н. С. Кардашев, Л. М. Гиндилис, В. И. Слыши), которая поставила цели – привлечь внимание научной общественности к проблеме SETI и организовать практические работы по поиску сигналов от внеземных цивилизаций. Шкловский, отнесшийся вначале скептически к этой идеи, затем согласился ее поддержать. В конце 1963 г. он и Кардашев обсудили эту проблему с В. А. Амбарцумяном, который предложил провести научное совещание для всестороннего обсуждения и оценки состояния проблемы SETI. Оно состоялось в мае 1964 г. в Бюраканской астрофизической обсерватории. Это было первое Всесоюзное совещание по проблеме «Внеземные цивилизации».

В ходе совещания было предложено два подхода к методике поиска сигналов. Первый из них состоит в поиске сигналов от цивилизаций, подобных нашей или несколько более высокого уровня. Для обеспечения разумной дальности связи передающая цивилизация использует узконаправленное и узкополосное излучение. Для обнаружения подобных сигналов необходимо осуществлять поиск по частоте. Кроме того, поскольку направление поиска заранее не известно, цивилизация-отправитель вынуждена последовательно облучать все подходящие объекты в сфере выбранного радиуса. Таким образом, для исключения пропуска сигнала на приемном конце линии связи необходимо организовать непрерывно действующую систему обнаружения, обеспечивающую поиск в пределах выбранного оптимального диапазона частот. Пример такой системы был предложен В. А. Котельниковым. Идея использования узкополосных сигналов наиболее последовательно отстаивалась В. С. Троицким, и была поддержана многими участниками совещания.

Второй подход, развиваемый Кардашевым, заключается в поиске сигналов от сверхцивилизаций. Поскольку речь идет о непрерывном широкополосном излучении, обнаружение подобных сигналов возможно с помощью обычной радиоастрономической аппаратуры. Здесь возникает задача детального исследования дискретных источников космического радиоизлучения с целью выявления искусственных источников в соответствии с ожидаемыми критериями искусственности. Некоторые из таких критерий (предельно малые угловые размеры, характерное спектральное распределение мощности, переменность во времени, круговая поляризация) были указаны Кардашевым. Этот подход был поддержан И. С. Шкловским, Л. М. Гиндилисом, В. И. Слышом и С. Э. Хайкиным. Совещание в Бюраканской астрофизической обсерватории приняло решение развивать исследования проблемы SETI, используя оба подхода.

Далее мы остановимся на исследованиях известного советского ученого, члена-корреспондента АН СССР Всеволода Сергеевича Троицкого (1913–1996), который внес основополагающий вклад в изучение проблемы SETI. Троицкий был также хорошо известен как выдающийся радиофизик и радиоастроном. Его работы были одними из первых, положивших начало развитию экспериментальной радиоастрономии в нашей стране (об этом будет рассказано в модуле № 8).

В 1964 г., будучи уже известным ученым, Троицкий принял участие в совещании, проходившем в Бюраканской астрофизической обсерватории (см. выше). Там он выступил с докладом, в котором обосновал концепцию поиска узкополосных, монохроматических сигналов внеземных цивилизаций. Этой концепции Троицкий придерживался все последующие годы, обосновывая и развивая ее. Однако этот подход не был для него догматическим. Так он приложил большие усилия к поиску импульсных сигналов внеземных цивилизаций, где условие монохроматичности (в случае коротких импульсов) не выполняется.

Что касается частоты сигнала, Троицкий не связывал ее с «магическими» частотами спектральных линий (например, 21 см). Он считал, что поиск необходимо вести в непрерывном спектре в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн. Сразу после Бюраканского совещания Троицкий приступил к реализации своей программы. Прежде всего, необходимо было создать приемник, способный находить и регистрировать узкополосные сигналы в достаточно широкой полосе частот. Ему удалось увлечь этой идеей молодых сотрудников и аспирантов Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ). Приемник был готов в 1968 г. Он работал на частоте 927 МГц (длина волны 32 см) в полосе 2 МГц. Разрешающая способность приемника определялась узкополосными фильтрами и была равна 13 Гц – значительно выше, чем в проекте «Озма», где она составляла 100 Гц.

Наблюдения проводились в 1968–1969 гг. на 15-метровой антенне радиоастрономической станции НИРФИ в Зименках. Исследовались 11 звезд солнечного типа, расположенных в радиусе 100 св. лет от Солнца, и галактика М31 (Туманность Андромеды). Ни от одного из них сигналы не были обнаружены. По сравнению с проектом «Озма» это был определенный шаг вперед: исследовалось большее число объектов, на порядок выше была разрешающая способность, однако время наблюдения каждого объекта было существенно меньше. Достаточно произвольно был выбран диапазон поиска 32 см – только потому, что в этом диапазоне имелись разработанные и проверенные в работе высокочувствительные СВЧ-элементы. После первых наблюдений работы по этой программе не возобновлялись.

В октябре 1975 г. в Специальной астрофизической обсерватории (САО), в зале, расположенному в башне БТА, проходила Зеленчукская школа-семинар SETI. Доклад Троицкого на этом семинаре назывался «Развитие внеземных цивилизаций и физические закономерности». В нем он сделал попытку обосновать стратегию поиска, основываясь на некоторых общих теоретических представлениях о закономерностях и характере развития внеземных цивилизаций. Троицкий попытался решить важную для SETI задачу, связанную с возможностью создания всенаправленного радиомаяка, который бы вещал на всю Галактику. Дальнейшее развитие его идей содержалось в докладе на Таллинском симпозиуме, проведенном в 1981 г. Энергетические затраты можно существенно уменьшить, используя направленную передачу с помощью достаточно крупных зеркальных антенн. Троицкий выдвинул предложение, что оптимальным диапазоном для связи между цивилизациями является диапазон миллиметровых волн.

Помимо теоретических проблем, он продолжал решать практические вопросы поиска сигналов внеземных цивилизаций. На том же Таллинском симпозиуме он доложил о проекте системы обнаружения «Обзор», которая разрабатывалась под его руководством в НИРФИ. Система должна была состоять из нескольких десятков небольших антенн с диаграммой направленности около 15°. Каждая антenna оборудовалась спектральным приемником с 10 каналами. Эта скромная, но весьма эффективная система представляла собой важный шаг на пути к созданию крупных всенаправленных систем обнаружения. Троицкий прилагал большие усилия к ее реализации, но ему так и не удалось получить необходимые средства.

Обсудим теперь историю отправки радиопосланий в космическое пространство, а затем современные исследования в области SETI. Впервые послание в космос было отправлено 19 ноября 1962 г. из Центра дальней космической связи СССР в Евпатории во время эксперимента по радиолокации Венеры. Оно состояло из трех слов: «Мир, Ленин, СССР». Для передачи этого радиопослания использовалась уникальная восьмизеркальная антenna АДУ-1000 и мощный передатчик первого советского планетного радиолокатора, работавшего на волне 39 см. Адресатом радиопослания была планета Венера. 16 ноября 1974 г. с 300-метрового радиотелескопа в Аресибо

было отправлено радиопослание к шаровому скоплению М13 в созвездии Геркулеса, расположенному на расстоянии около 25 тыс. св. лет от Солнца. Это послание содержало 1679 бит информации. Каждый бит передавался с помощью импульса на одной из двух близких частот в диапазоне 2380 МГц. Если импульсы на одной частоте изображать нулем, а на другой – единицей, то можно получить сообщение, состоящее из 1679 двоичных знаков. Оно было названо “Arecibo Message”.

На рис. 58 приведена расшифровка радиопослания. В первом ряду двоичным кодом изображены числа натурального ряда от 1 до 10. Второй ряд – это метки чисел. Третий ряд содержит числа: 1, 6, 7, 8, 15; это – атомные номера водорода, углерода, азота, кислорода и фосфора – химических элементов, лежащих в основе земной жизни. Затем следует 12 групп, каждая из которых состоит из 5 элементов – это молекулы, важные для жизни и состоящие из указанных выше элементов. Под этими группами изображена двойная спираль ДНК (6-й ряд). Число нуклеотидов в ДНК (около 4 млрд) изображено в центре спирали – 5-й ряд. Ниже показана фигура человека. Наконец, в самом низу изображена схема радиотелескопа в Аресибо и указан его диаметр – примерно 305 м.

В 1977 г. был запущен автоматический космический аппарат «Вояджер-1», первоначально предназначенный для исследования Юпитера и Сатурна. С его помощью были сделаны первые детальные снимки спутников этих планет. На его борту был прикреплен круглый алюминиевый футляр, в котором находилась золотая пластинка. Пластинка имела диаметр 12 дюймов (около 30 см) и была покрыта золотом для предохранения от эрозии под действием космической пыли. Вместе с пластинкой в футляр были упакованы фонографическая капсула и игла для воспроизведения записи. На футляре была выгравирована схема, изображающая установку иглы на поверхности записи, скорость проигрывания и способ преобразования видеосигналов в изображение. На пластинку в закодированном виде нанесено 115 фотографий и звуковая дорожка, которая начинается со слов приветствия на 55 языках мира. Особую главу послания составляют достижения мировой музыкальной культуры. На диске записаны произведения Баха, Моцарта, Бетховена, джазовые композиции Л. Армстронга, Ч. Берри и народная музыка многих стран.

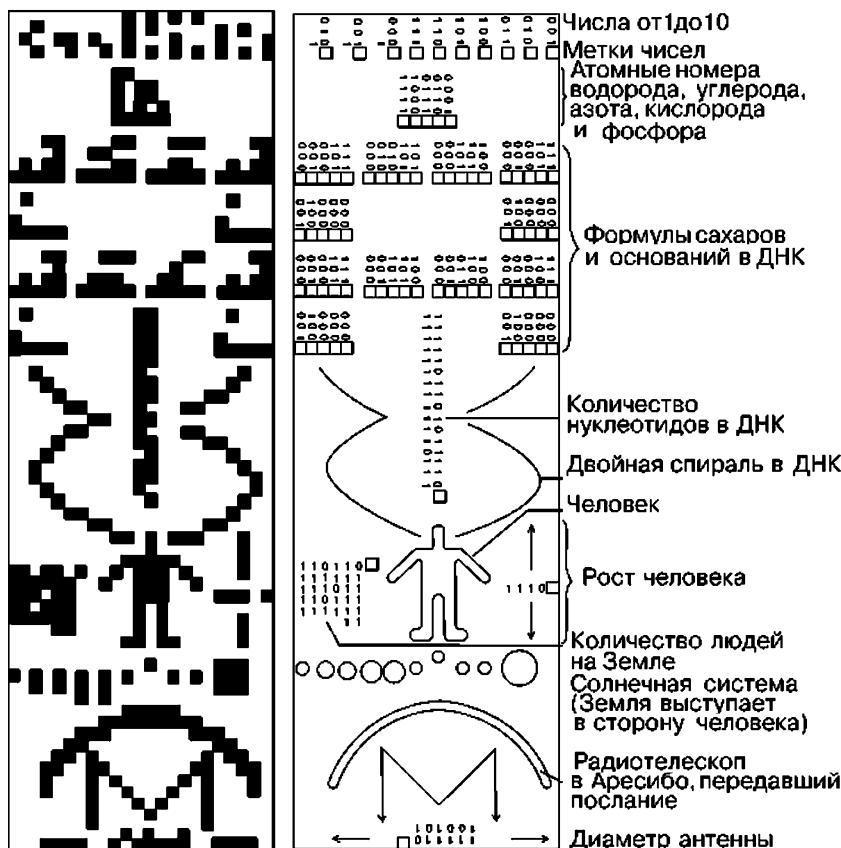


Рис. 58. Расшифровка послания, отправленного с радиотелескопа в Аресибо

Какие исследования по проблеме SETI ведутся сейчас? С 1990 г. крупнейшая программа SETI планировалась администрацией NASA. Программа HRMS (High Resolution Microwave Search – «Микроволновый обзор с высоким спектральным разрешением») предусматривала поиск сигналов с высоким разрешением по частоте, в том числе обзор всего неба в диапазоне частот 1–10 ГГц и целевой поиск в направлении 1000 ближайших звезд в диапазоне 1–3 ГГц с более высокой чувствительностью и с лучшим разрешением по частоте. При этом использовался ряд крупнейших радиотелескопов мира, в том числе телескоп в Аресибо и 64-метровая антенна в Австралии.

В 1993 г. Конгресс США прекратил финансирование программы HRMS. После этого Институту SETI пришлось прибегнуть к средствам частных спонсоров. Работа по обзору ближайших звезд была продолжена в рамках проекта Phoenix («Феникс»). Наблюдения продолжаются в диапазоне 1,2–1,75 ГГц на 300-метровом телескопе в Аресибо и одновременно на 76-метровом радиотелескопе обсерватории Джодрелл-Бэнк. В наблюдениях используется многоканальный приемник (28 млн каналов с полосой частот 1 Гц каждый). Ежегодно наблюдения занимают около трех недель, за это время удается охватить около 200 звезд. В ближайшие годы эта работа будет существенно расширена в рамках проекта ATA (Allen Telescope Array – «Антенная решетка Аллена»). Телескоп представляет собой решетку из 42 антенн-тарелок (планируется, что в будущем их количество достигнет 350) диаметром 6 м каждая. Такая решетка работает как телескоп с антенной диаметром 100 м. Система ATA находится в завершающей стадии постройки и будет расположена в Калифорнии, в обсерватории Хэт Крик.

На радиотелескопе в Аресибо продолжается также проект SERENDIP IV. Работа ведется на волне 21 см в «сопутствующем режиме», т. е. при этом на телескопе параллельно идут наблюдения по другим астрофизическим программам. Объем получаемой информации столь велик, что руководители проекта обратились за помощью к мировому сообществу любителей SETI с предложением обрабатывать получаемые данные на персональных компьютерах (проект SETI@ home). Работа по проекту SERENDIP проводится также на радиотелескопах в Италии и Австралии. В России SETI-наблюдения проводятся на радиотелескопе «РАТАН-600» Л. Н. Филипповой совместно с сотрудниками САО АН. Здесь выполняется обзор ближайших звезд солнечного типа, в том числе имеющих планетные системы, одновременно на нескольких длинах волн (от 13 до 138 см).

Отметим, что поиски внеземных цивилизаций не являются отвлеченной проблемой, оторванной от нужд человечества, она тесно связана с историей нашей земной цивилизации, с развитием ее науки, техники и культуры. В решение этой фундаментальной проблемы неоценимый вклад вносит радиоастрономия – важнейшее направление радиофизики.

Модуль № 8. Исторический обзор развития отечественной радиофизики

Несмотря на то что А. С. Попов выполнил пионерские исследования в области беспроволочной телеграфии (см. модуль № 2), в дореволюционной России радиотехники (и тем более радиофизики) как отдельного научного направления еще не существовало. Это связано с рядом таких факторов, как значительная зависимость отечественного производства радиоаппаратуры от иностранного капитала, отсутствие хорошо оборудованных научно-исследовательских радиолабораторий, специализированных высших учебных заведений, осуществляющих подготовку радиоспециалистов. Как положительное явление можно отметить выход первого оригинального руководства по радиотехнике на русском языке – книги А. А. Петровского «Научные основания беспроволочной телеграфии» (1907 г.).

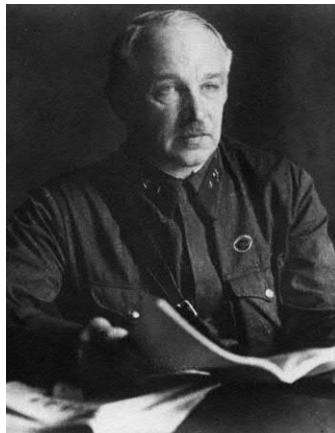
В модуле будут рассмотрены истоки формирования отечественной радиофизики как самостоятельного научного направления. Значительное внимание уделено описанию деятельности первых радиофизических центров, а также основополагающим научно-техническим достижениям, полученным научными школами.

8.1. Первые отечественные радиофизические центры

Радиотелеграфный завод Морского ведомства. В 1900 г. при участии Попова была открыта мастерская (ею руководил его соратник Е. Л. Коринфский) для ремонта и производства приборов беспроволочной связи в одном из корпусов электромеханического завода Кронштадтского военного порта. В период с 1901 по 1904 г. мастерская изготовила и установила на кораблях и береговых объектах около 50 радиостанций. Впоследствии Кронштадтская мастерская переросла в Радиотелеграфное депо (1910 г.), которое было преобразовано в Радиотелеграфный завод Морского ведомства (1915 г.). Это было первое радиотехническое предприятие, выпускавшее радиостанции мощностью 10 и 25 кВт, радиоприемники, радиопеленгаторы, тиккеры (прерыватели) и другую радиоаппаратуру.

В 1913–1918 гг. Михаил Васильевич Шулейкин (1884–1939) (впоследствии академик АН СССР), работая на Радиотелеграфном заводе

Морского ведомства, организовал и возглавил первую в России заводскую лабораторию по изготовлению радиотехнических и измерительных приборов.



М. В. Шулейкин

В 1916 г. Шулейкин на линкоре «Андрей Первозванный» установил радиотелеграфную связь между Петроградом и Гельсингфорсом (Хельсинки) на незатухающих высокочастотных колебаниях (20 кГц). В качестве генератора колебаний использовалась высокочастотная машина Вологдина. Успешная работа группы радиоспециалистов радиозавода Морского ведомства (М. В. Шулейкин, Н. Н. Циклинский, А. А. Петровский, В. П. Вологдин, И. Г. Фрейман, В. И. Волынкин, Л. Д. Исаков, В. А. Габель) позволила к началу Первой мировой войны обеспечить военные корабли русского флота собственными средствами радиосвязи, вытеснив иностранную радиоаппаратуру.

«Русское общество беспроволочных телеграфов и телефонов» (РОБТиТ). В 1908 г. в Санкт-Петербурге известным радиотехником Семеном Моисеевичем Айзенштейном (1884–1962) было организовано «Общество беспроволочных телеграфов и телефонов», которое с 1910 г. стало называться «Русское общество беспроволочных телеграфов и телефонов» (РОБТиТ). В основе технологии производства радиоаппаратуры, выпускавшейся заводом РОБТиТ, лежали научные разработки самого Айзенштейна – одного из пионеров беспроволочной телеграфии. Так, в 1901 г. в Киеве он демонстрировал радиосвязь

на короткие расстояния с помощью самодельного радиопередатчика и когерерного приемника. Кроме того, он построил экспериментальные радиостанции в Киеве и Жмеринке (1906–1907 гг.), что позволило установить радиосвязь между тремя городами – Жмеринка, Севастополь и Одесса. В период Первой мировой войны к научным исследованиям, проводимым в РОБТиТ С. М. Айзенштейном, был привлечен Николай Дмитриевич Папалекси (1880–1947). Он стал консультантом по физическим вопросам и заведующим опытной лабораторией РОБТиТ, в которой велись работы по радиопеленгации, разработке усилительных и генераторных электронных ламп («катодных реле» по терминологии того времени), новых ламповых схем радиоприемников и радиопередатчиков. Однако на заводе РОБТиТ не было своего стеклодувного и вакуумного производства.

Папалекси обратился за помощью к инженеру Н. А. Федорицкому – основателю и владельцу мастерской рентгеновских трубок, которая впоследствии переросла в «Первый русский завод рентгеновских трубок» в Петрограде. Это позволило за сравнительно небольшой срок (август–сентябрь 1914 г.) создать первую в России усилительную трехэлектродную лампу, получившую название «лампа Папалекси» (рис. 59).

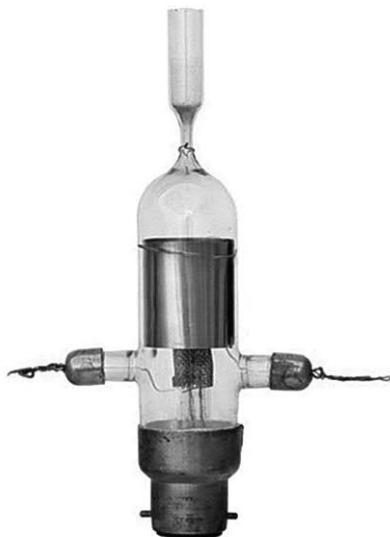


Рис. 59. Одна из ламп конструкции Папалекси

В лаборатории завода РОБТиТ были также разработаны и изготовлены образцы генераторных ламп мощностью 100, 150 и 250 Вт. Вскоре Папалекси создал первую высоковакуумную лампу с вольфрамовым катодом, мощностью 50 Вт. При этом он впервые в мировой практике применил высокочастотный индукционный нагрев для накаливания электродов.

Появление радиоламп позволило заводу РОБТиТ приступить к разработке и выпуску ламповой радиоаппаратуры – радиоприемников, усилителей, гетеродинов. В декабре 1914 г. Айзенштейн провел вместе с Папалекси первые в России опыты по радиотелефонии с помощью ламповых передатчиков мощностью в несколько ватт. В 1915 г. при участии Папалекси была реализована первая в России радиотелефонная линия «Петроград – Царское Село» (расстояние 25 км), а годом позже были проведены исследования возможности радиотелеграфной связи между берегом и погруженной подводной лодкой.

В начале Первой мировой войны РОБТиТ получил правительственный заказ на изготовление искровых радиостанций для установления связи со странами Антанты. В 1914 г. на основе научных разработок Айзенштейна завод РОБТиТ построил мощные передающие искровые радиостанции – Ходынскую в Москве и Царскосельскую (мощностью по 100 кВт каждая), а также приемную радиостанцию в Твери.

После Октябрьской революции Айзенштейн остался в России. В начале 1918 г. он эвакуировал наиболее ценное лабораторное оборудование и инженерно-технический персонал в Москву (на Шаболовку), где еще в 1915 г. был создан филиал РОБТиТ по производству электромоторов. В Москве заводская лаборатория РОБТиТ под руководством В. М. Лебедева проводила работы по совершенствованию средств радиоприема, проектированию и монтажу аппаратуры для 100-киловаттной радиостанции на Шаболовке. Ее антенная башня была сконструирована известным инженером В. Г. Шуховым. Строительство радиостанции, закончившееся в 1921 г., велось под руководством Айзенштейна.

Общество РОБТиТ за сравнительно недолгий период своей деятельности (около 10 лет) сыграло важную роль в становлении отечественной радиотехнической промышленности. Оно стало крупнейшим поставщиком средств радиосвязи в дореволюционной России. К 1917 г. завод построил более половины мощных радиостанций страны, в том числе в Царском Селе, Твери, Москве, Архангельске, Тифлисе и др.

После Октябрьской революции началось интенсивное развитие радиотехники. Важную роль в этом процессе сыграли Российское общество радиоинженеров (РОРИ) и Нижегородская радиолаборатория (НРЛ).

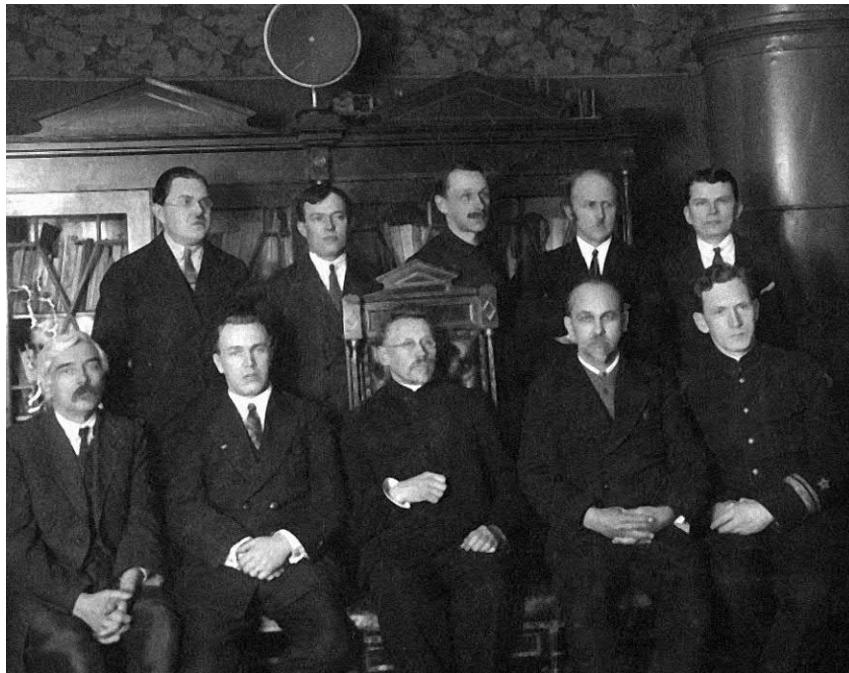
РОРИ. Это первое в нашей стране добровольное научно-инженерное объединение отечественных радиоспециалистов. Оно было создано в 1918 г. в Петрограде по инициативе В. К. Лебединского, А. А. Петровского, В. И. Баженова, М. А. Бонч-Бруевича, М. В. Шулейкина и др. Председателем РОРИ был избран профессор В. К. Лебединский, его заместителем – военный инженер А. В. Водар, а секретарем – инженер Радиотелеграфного завода Морского ведомства Н. Н. Циклинский. Главной задачей РОРИ было содействие развитию радиотехники и радиотехнической промышленности в России. Отделения общества находились в Москве, Петрограде, Нижнем Новгороде, Киеве, Одессе и других городах.

Во главе Московского правления РОРИ стоял Шулейкин, Петроградского отделения РОРИ – Петровский, а работу Нижегородского отделения РОРИ возглавил Лебединский. Московский филиал РОРИ принимал участие в мероприятиях, связанных с использованием достижений радиотехники в народном хозяйстве, в конкурсных и экспертных советах, в разработке учебных планов и программ радиотехнических вузов.

Среди членов РОРИ были выдающиеся ученые и инженеры – М. В. Шулейкин, А. А. Петровский, В. К. Лебединский, М. А. Бонч-Бруевич, И. Г. Фрейман, Д. А. Рожанский, В. П. Вологдин, А. Ф. Шорин, а также сотрудники завода РОБТиТ С. И. Айзенштейн, Р. В. Львович, В. М. Лебедев, фирмы «Сименс и Гальске» – А. А. Савельев, Л. И. Сапельков, радиозавода Морского ведомства – Н. Н. Циклинский, В. И. Волынкин и др. Помимо докладов об оригинальных теоретических и экспериментальных работах членов общества, в РОРИ проводились заседания, на которых рассматривались актуальные вопросы радиотехники.

В 1929 г. РОРИ влилось в состав Общества друзей радио (ОДР) в качестве инженерно-научной и технической секции. В дальнейшем на работоспособности этой секции и на перспективах ее развития отрицательно сказались массовые репрессии 1930-х гг. В 1935 г. ОДР перестало существовать, но наиболее активные члены РОРИ продолжили свою деятельность в других научно-технических

объединениях, одновременно не прекращая попытки создать свое специализированное общество. Однако этим планам помешала Великая Отечественная война. Только в мае 1945 г. на конференции, посвященной 50-летию радио, было учреждено Всесоюзное научное общество радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова (ныне РНТОРЭС им. А. С. Попова).



Члены Российского общества радиоинженеров (РОРИ) – первые отечественные ученые в области радиотехники. Сидят (слева направо): В. К. Лебединский, Н. Н. Циклинский, А. А. Петровский, В. Ф. Миткевич, И. Г. Фрейман (1928 г.)

Нижегородская радиолаборатория (НРЛ). 21 июля 1918 г. Совет народных комиссаров (СНК) издал подписанный В. И. Лениным декрет «О централизации радиотехнического дела Советской республики», положивший начало отечественной радиоэлектронной промышленности. 2 декабря 1918 г. был издан второй декрет «Положение о Радиолаборатории с мастерской Народного комиссариата

почт и телеграфов», направленный на создание научной базы советской радиотехники. Ленин предписал организовать радиолабораторию, собрав в ней радиоспециалистов, работавших на радиостанции в Твери (группа М. А. Бонч-Бруевича), на Царскосельской радиостанции (группа А. Ф. Шорина) и на заводе «Дюфлон, Константинович и К°» (группа В. П. Вологдина). Так появилась НРЛ, называемая колыбелью отечественной радиотехники.

Вкратце расскажем об истории создания НРЛ. Начнем с научной деятельности ее научного руководителя, члена-корреспондента АН СССР Михаила Александровича Бонч-Бруевича (1888–1940). В 1914 г. он поступил на работу помощником В. М. Лещинского – начальника Тверской приемной радиостанции, где уже велись работы по извлечению отечественных радиоламп.



М. А. Бонч-Бруевич

В 1916 г. исследователям удалось собрать первую электронную лампу («Бабушка»). Первая в России серийная лампа, разработанная в 1918 г. в НРЛ под руководством Бонч-Бруевича (на базе лампы «Бабушка»), называлась ПР-1 («пустотное реле, разработка № 1») (рис. 60). Уже в начальный период работы радиолаборатории параллельно с разработкой приемно-усилительных электронных ламп проводились исследования по созданию надежных методов радиотелефонирования.

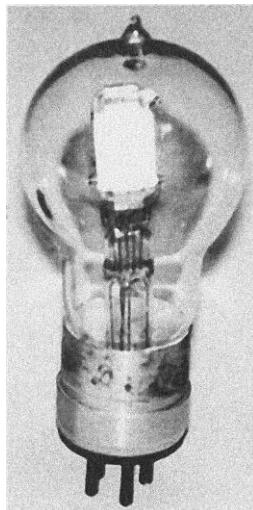


Рис. 60. Первая серийная отечественная приемно-усилительная лампа ПР-1

В 1920 г. Бонч-Бруевич изготовил генераторную лампу с массивным алюминиевым анодом, позволявшим рассеивать большую мощность. Первый удачный опыт радиотелефонной передачи был осуществлен им из НРЛ на расстояние 4 км. 15 января 1920 г. была осуществлена радиотелефонная передача из НРЛ в Москву на расстояние 370 км.

В марте 1920 г. было подписано постановление: «поручить Нижегородской радиолаборатории изготовить в срочном порядке центральную радиотелефонную станцию с радиусом действия 2000 верст». Изготовление мощной генераторной лампы для такой станции в то время казалось практически неразрешимой задачей. Алюминиевый массивный анод для этого был не пригоден, нужен был тугоплавкий анод из тантала или молибдена. Но таких металлов в то время в России не было. Трудно поверить, но в условиях невиданных трудностей, испытываемых страной, Бонч-Бруевичу удалось найти оригинальное техническое решение. Он предложил изготавливать анод из меди и охлаждать его водой. Вместо танталового анода использовалась никелированная трубка из красной меди, вводившаяся внутрь лампы и припаянная к платиновому колпачку, который спаивался со стеклом баллона. Колпачок и анод соединялись со шлангом и охлаждались циркулирующей проточной водой. Анод, охлаждаемый водой, позволял рассеивать

мощность до 950 Вт, что вполне соответствовало требованиям радиотелефонной передачи. Ничего подобного мировая вакуумная техника не знала, долгое время на Западе такую задачу считали неразрешимой.

С первой половины 1920-х гг. в нашей стране получила быстрое развитие новая область радиотехники – радиовещание. В августе 1922 г. в Москве начала работать Центральная радиотелефонная станция им. Коминтерна, названная позднее РВ-1. Радиотелефонный передатчик этой станции обладал мощностью 12 кВт, отдаваемую 12 генераторными лампами, включенными параллельно. Еще 12 таких же ламп использовались в модуляторе этого передатчика. Станция работала на длине волн 3200 м. При этом предусматривался телеграфный режим работы, при котором мощность повышалась до 20 кВт. РВ-1 стала самой мощной передающей станцией того времени. 15 сентября 1922 г. Центральная радиотелефонная станция передала в эфир первый радиоконцерт, принятый во многих городах.

К 1924 г. НРЛ превращается в крупный научно-исследовательский институт в области радиотехники, который получил широкое признание за рубежом. К этому времени Бонч-Бруевич создал макет мощной генераторной лампы мощностью 100 кВт. С 1924 г. стали выпускаться станции «Малый Коминтерн» мощностью 1,2 кВт с питанием от трехфазной сети переменного тока, предназначенные для областных центров. Они работали в диапазоне длин волн от 700 до 1400 м. За два года НРЛ построила 27 таких станций. В 1924 г. была введена в эксплуатацию Сокольническая радиостанция, мощность которой с 640 Вт возросла сначала до 1,2 кВт, а к 1926 г. – до 20 кВт. В 1927 г. сотрудниками НРЛ под руководством М. А. Бонч-Бруевича была закончена работа над радиостанцией «Новый Коминтерн» мощностью 40 кВт, ставшей самой мощной на тот период в Европе.

В НРЛ работали В. М. Лещинский, М. А. Бонч-Бруевич, В. К. Лебединский, В. П. Вологдин, Д. А. Рожанский, А. Ф. Шорин, В. В. Татаринов – выдающиеся специалисты отечественной радиотехники. Они занимались вопросами генерации и использования высокочастотных незатухающих колебаний для передачи голоса, теоретическими исследованиями в области коротких волн. Они разрабатывали приборы для физических экспериментов, конструировали самые мощные на тот момент радиолампы, преподавали в Нижегородском университете, организовывали радиофизические съезды, участвовали

в радиотехнических выставках, издавали технические журналы. В НРЛ работу над периодическими изданиями возглавил В. К. Лебединский. Под его редакцией выходил журнал «Телеграфия и телефония без проводов» («ТиТбп») – для специалистов-инженеров.

В НРЛ были проведены пионерские исследования в области полупроводниковой техники и оптоэлектроники. Молодой ученый О. В. Лосев обнаружил и экспериментально изучил важнейшие явления, связанные с прохождением электрического тока через поверхность неметаллических кристаллов. В 1922 г. он создал *кристадин* – прообраз современных транзисторных приемников и радиоэлектронных полупроводниковых приборов для усиления и генерации электромагнитных колебаний. В 1927 г. Лосев открыл явление свечения кристаллов карборунда при прохождении тока через точечный контакт (свечение Лосева или, в современных терминах, рекомбинационное излучение *p-n*-переходов, лежащее в основе действия светодиодов). Он правильно интерпретировал новое явление, экспериментально доказав существование некоторого «активного слоя» в детектирующем контакте. Отметим, что физика твердого тела (в том числе зонная теория) в то время не была еще разработана. К сожалению, Лосев – изобретатель кристадина и светодиода – трагически погиб в 1942 г. во время блокады Ленинграда.

НРЛ стала первым в России радиотехническим научно-исследовательским центром, в котором были заложены основы радиосвязи, радиотехники, электроники, радиовещания, отечественной радиоэлектронной промышленности. Свою научную деятельность в стенах НРЛ начинали будущие выдающиеся ученые-радиофизики: академик РАН В. А. Котельников, член-корреспонденты АН СССР А. А. Пистолькорс, Д. А. Рожанский, профессор А. М. Кугушев и др. В 1929 г. НРЛ была переведена в Ленинград и объединена с Петроградским электровакуумным заводом. В результате этого слияния появилась ЦРЛ. В дальнейшем на базе НРЛ возникла Центральная военно-индустриальная радиолаборатория (в настоящее время «Нижегородское научно-производственное объединение имени М. В. Фрунзе»).

Центральная радиолаборатория (ЦРЛ). 9 марта 1922 г. был создан Государственный электротехнический трест заводов слабого тока (ГЭТЗСТ), в который вошло 11 заводов Москвы, Петрограда, Нижнего Новгорода. ГЭТЗСТ вел строительство двух радиообъектов: на Ша-

боловке в Москве и в Детском Селе под Петроградом. После объединения разрозненных предприятий электротехнической промышленности России возникла необходимость открыть в составе треста мощную научно-исследовательскую лабораторию. 11 ноября 1923 г.правление ГЭТЗСТ приняло решение организовать радиоотдел (под научным руководством Шорина) с лабораторией, которая затем получила название ЦРЛ. Главной задачей создания ЦРЛ была консолидация ведущих радиоспециалистов, а также привлечение новых ученых и инженеров из разных предприятий и разных городов страны.

Для лаборатории была отведена часть помещений бывшего завода РОБТиТ, где к тому времени уже был развернут Петроградский электровакуумный завод. Кроме того, из Москвы в Петроград была возвращена заводская лаборатория РОБТиТ (руководитель В. М. Лебедев). Из числа ее прежних сотрудников для работы в ЦРЛ были приглашены: Э. Я. Борусевич, В. М. Лебедев, Р. В. Львович, Н. Д. Папалекси, а также ряд выдающихся радиоспециалистов – В. П. Вологдин, Л. И. Мандельштам, Д. А. Рожанский, И. Г. Фрейман, Н. Н. Циклинский, А. Ф. Шорин и др. В 1928 г. в ЦРЛ влился коллектив специалистов из НРЛ. Вместе с ее директором М. А. Бонч-Бруевичем в ЦРЛ перешли работать А. М. Кугушев, И. А. Леонтьев, О. В. Лосев, Д. Е. Маляров, Б. А. и Г. А. Остроумовы, А. А. Пистолькорс, В. В. Татаринов, С. И. Шапошников и др.

ЦРЛ стала многопрофильным учреждением, в котором проводились научно-технические исследования в области радиотехники (в том числе нелинейной), электровакуумной техники, технологии промышленного применения токов высокой частоты, гидро- и электроакустики, телевидения, радионавигации и др. Сотрудники ЦРЛ конструировали и выпускали небольшие партии переносных телефонно-телеграфных радиостанций, специальных радиоприемников и радиопередатчиков. Так, в ЦРЛ были построены радиостанция мощностью 5 кВт для Тебриза (Иран), радиостанции для Ташкента, Харькова и Свердловска.

Укажем на еще одну важную работу, выполненную в ЦРЛ. В 1931 г. саратовский радиофизик В. И. Калинин был приглашен в Ленинград для организации в ЦРЛ одной из первых в СССР лабораторий по исследованию СВЧ-колебаний. В результате интенсивной работы группы под руководством Калинина в течение 1931–1933 гг. в ЦРЛ была создана приемо-передающая аппаратура дециметровых волн. В передатчиках широко использовались разработанные им лампы

с апериодической сеткой, допускающие перестройку частоты в достаточно широких пределах. Эти же лампы с апериодической сеткой были использованы в проводившихся в ЦРЛ 3 января 1934 г. в Ленинграде под руководством Ю. К. Коровина первых в СССР опытах по радиолокационному обнаружению самолетов.

В целях ускорения радиофикации страны в 1930 г. ЦРЛ и Радиозавод им. Коминтерна были объединены в единую организацию – ЦРЛЗ. В дальнейшем в результате множества преобразований сформировался НИИ «Вектор», старейшее радиотехническое предприятие России. В настоящее время это предприятие входит в Концерн радиостроения «Вега».

ЦРЛ сыграла основополагающую роль в развитии отечественной радиотехники и становлении радиопромышленности. Опираясь на ее разработки, ГЭТЗСТ смог развернуть на своих заводах выпуск различной серийной радиоаппаратуры и перейти к массовому выпуску электронных ламп. Отметим, что в ЦРЛ начинали свою научную деятельность ставшие впоследствии широко известными специалисты и ученые: Н. А. Гуревич, В. С. Дехтярев, Ю. Н. Коровин, М. С. Нейман, Н. Н. Пальмов, А. А. Расплетин, А. П. Сиверс, В. И. Сифоров, С. Я. Соколов, А. А. Харкевич, А. Н. Щукин и др.

Отметим, что решающее влияние на развитие отечественной радиотехники и радиопромышленности оказали выдающиеся ученые – И. Г. Фрейман, А. И. Берг, В. К. Аркадьев, М. В. Шулейкин, Б. А. Введенский, А. Л. Минц, А. А. Чернышев, Н. Д. Девятков, А. А. Пистолькорс и созданные ими научные школы.

8.2. Научные школы в области теории нелинейных колебаний

Процесс оформления отечественной радиофизики в самостоятельную научную область связан с деятельностью научных школ в области теории нелинейных колебаний.

Научная школа Л. И. Мандельштама – Н. Д. Папалекси в области теории нелинейных колебаний и применения ее методов в радиофизике. Значительное место в научном творчестве выдающихся ученых Леонида Исааковича Мандельштама (1879–1944) и Николая Дмитриевича Папалекси (1880–1947) занимали исследования в области *теории колебаний*. Начатые еще в Страсбурге (под

руководством Брауна), они первоначально относились к линейным колебательным системам. Однако в связи с практическим использованием нелинейных устройств в радиотехнике начинают интенсивно изучаться явления генерации незатухающих колебаний, которые линейная теория описать не могла. Это привело к возникновению учения о нелинейных колебаниях.



Л. И. Мандельштам



Н. Д. Папалекси

Долгое время идея о том, что возможно построение общей теории нелинейных колебаний, была отнюдь не очевидной. Первым, кто остро осознал необходимость выработки «нелинейного физического мышления», стал Мандельштам. Системное же описание широкого класса нелинейных задач принадлежит научной школе Мандельштама – Папалекси. Большинство научных достижений, полученных ими в области радиофизики, являются результатом совместного творческого содружества.

В 1922 г. Папалекси и Мандельштам были приглашены в Москву в качестве научных консультантов радиолаборатории ТЗСТ. В 1924 г. лаборатория была переведена в Ленинград и преобразована в ЦРЛ. Здесь были выполнены важнейшие работы Мандельштама и Папалекси в области радиотехники. Они предложили новые способы радиотелеграфной и радиотелефонной модуляции, высокочастотных измерений (в частности, измерений глубины модуляции и действующих величин параметров электрических цепей), устройство для кварцевой

стабилизации частоты, высокоселективный приемник с кварцевым фильтром, обобщили понятие обратной связи и др.

В это же время Папалекси совместно с Мандельштамом были начаты исследования колебательных процессов в нелинейных регенеративных системах, заложившие основу всей их научной деятельности в области теории нелинейных колебаний. Ее создание позволило не только объяснить уже известные нелинейные явления, но и более глубоко изучить процессы, происходящие в нелинейных системах, а также предсказать ряд новых эффектов, специфичных для нелинейных колебательных систем (благодаря развитию «нелинейной интуиции», как любил говорить Мандельштам). Так, было показано, что явления, аналогичные резонансу, в нелинейных системах должны наблюдаться не только при совпадении частоты внешнего воздействия с частотой собственных колебаний системы (как это имеет место в линейных колебательных системах), но и тогда, когда частота внешнего воздействия приближается к удвоенной, утроенной и т. д. собственной частоте системы. Это явление было названо *резонансом n-го рода* (второго рода, если внешняя частота вдвое больше, и т. д.). На основе явления резонанса 2-го рода был создан *автопараметрический фильтр* – устройство, предназначенное для ослабления помех при радиоприеме. Оно было успешно применено на радиостанциях в Тифлисе и Баку.

Изучение методов модуляции мощных генераторов с самовозбуждением привело Папалекси к созданию магнитного манипулятора, который был использован на мощной (20 кВт) ламповой радиостанции в Тегеране. Предложенная Папалекси и Мандельштамом осцилляторная схема стабилизации частоты была реализована на радиостанции ВЦСПС, а кварцевые фильтры для высокоселективного приемника были установлены в приемном радиоцентре под Москвой.

В 1933 г. в Париже состоялась I Международная конференция по нелинейным колебаниям. На ней Папалекси выступил с докладом об исследованиях, выполненных совместно с Мандельштамом и их учениками в этой области. Грандиозные результаты, полученные научной школой Мандельштама – Папалекси, способствовали тому, что СССР стал центром мировых исследований по изучению колебательных процессов в нелинейных системах.

В 1926–1934 гг. Папалекси был заведующим сектором нелинейных проблем ЛЭФИ, где изучались колебательные процессы в нелинейных

радиотехнических системах, процессы генерации колебаний путем периодического изменения индуктивности или емкости колебательной цепи, особенности параметрического возбуждения колебаний (*параметрического резонанса*). Мандельштам и Папалекси, анализируя явление параметрического резонанса, открыли новый способ генерации переменного тока, осуществленного в так называемой *параметрической машине*.

В 1934 г. Папалекси начал руководить лабораторией физики колебаний ФИАН, в которой развернулись работы по исследованию распространения радиоволн. Выдающимся достижением Мандельштама, Папалекси и их учеников является разработка *интерференционных методов измерения расстояний*. Они основаны на использовании явления интерференции радиоволн, распространяющихся между пунктами, расположенными один от другого на измеряемом расстоянии. Одним из первых применений разработанных методов было определение скорости распространения радиоволн вдоль земной поверхности. В проведении этих работ активное участие принимали Н. Д. Папалекси, Е. Я. Щеголев, И. М. Борушко, К. Э. Виллер, сотрудники ФИАН В. В. Мигулин, Я. Л. Альперт, П. А. Рязин и др. Значение достигнутых научных результатов исключительно велико. С непревзойденной до того времени точностью (до $3 \cdot 10^{-4}$ над морем и до $6 \cdot 10^{-4}$ над ровной сушей) была измерена скорость распространения радиоволн.

Этот цикл работ внес ясность в теорию распространения радиоволн, позволил определить скорость их распространения в реальных условиях, стал основой для решения проблемы береговой рефракции и ряда других эффектов, связанных с изменением свойств земной поверхности, заложил фундамент для радиогеодезии и фазовой радионавигации. Радиоинтерференционные методы применяют в исследованиях ионосферы и магнитосферы, для реализации систем наблюдения и контроля параметров орбит ИСЗ, создания глобальных радионавигационных систем, решения задач локальной радионавигации и геодезии.

Высокий научный, технический и педагогический потенциалы, богатство и глубина физических идей, личные качества позволили Мандельштаму создать большую и эффективную научную школу в МГУ (1925–1944 гг.). Ее представители работали в основном по трем научно-исследовательским программам: теории нелинейных

колебаний и применению ее методов в радиофизике, оптике и спектроскопии, теоретической физике. Научную школу составили талантливые ученые, аспиранты и студенты: А. А. Андронов, А. А. Витт, Г. С. Горелик, М. А. Дивильковский, Г. Д. Малюжинец, В. В. Мигулин, С. М. Рытов, П. А. Рязин, С. П. Стрелков, К. Ф. Теодорчик, С. Э. Хайкин, И. М. Борушко, К. Э. Виллер, В. П. Гуляев, Э. М. Рубчинский, Е. Я. Щеголев, Г. С. Ландсберг, П. А. Бажулин, М. А. Леонтович, И. Е. Тамм, С. П. Шубин, М. А. Исакович и др.

Подчеркнем, что в конце 1920-х – начале 1930-х гг. исследования в области нелинейных колебаний велись под общим методологическим и практическим руководством Л. И. Мандельштама в НИИФ МГУ и ФИАН в Москве, ЦРЛ, ЛЭФИ и Индустримальном институте в Ленинграде, Горьковском исследовательском физико-техническом институте (ГИФТИ) и были тесно связаны между собой, составляя одно научное направление.

Приведем ряд характерных черт научной школы Мандельштама – Папалекси. Андронов отмечает: «Вокруг Л. И. Мандельштама существовала атмосфера подлинной научной школы. Во-первых, он любил учить – в самом прямом значении этого слова – молодых физиков, любил задавать и растолковывать им разные трудные и каверзные задачи, разные “парадоксы”. Во-вторых, он непрерывно делился с сотрудниками и учениками своими соображениями и планами будущих работ, ставя перед ними вопросы, из которых вырастали научные исследования. При этом Л. И. Мандельштам искренне радовался, если его ученик проявлял работоспособность и особенно творческую инициативу в научной работе».

Большое значение для развития теории колебаний имели лекции и семинары Мандельштама в МГУ. Они собирали многочисленную и разнообразную аудиторию, в которой наряду со студентом можно было встретить профессора, наряду с физиком – математика и инженера. Иногда они содержали новые научные результаты, которые нигде больше не публиковались. Но, может быть, еще большее значение этих лекций было в систематическом привитии навыков колебательного мышления, в общем повышении колебательной культуры.

Нижегородская радиофизическая школа А. А. Андронова. Подход к трактовке колебательных процессов в различных системах, развитый в работах Мандельштама, Папалекси и их учеников, стал

основой для успешного построения теории и методов расчета современных радиофизических устройств. Так, например, Александр Александрович Андronов (1901–1952) создал новое направление в теории колебаний и динамике систем (в частности, теорию автоколебаний), возглавлял всемирно известную школу нелинейных колебаний.

Для обозначения незатухающих колебаний, генерируемых системами, обладающими трением (сопротивлением) подобно часам или ламповому генератору, Андронов ввел новый термин – «автоколебания». Они представляют собой незатухающие колебания в нелинейной динамической системе, амплитуда и частота которых в течение длительного промежутка времени могут оставаться постоянными, не зависят в широких пределах от начальных условий и определяются свойствами самой системы.



А. А. Андронов

При этом диссипация энергии в автоколебательной системе компенсируется за счет поступления в нее энергии из источника постоянного воздействия, благодаря чему автоколебания не затухают. На фазовой плоскости (в случае систем с одной степенью свободы) автоколебания отображаются устойчивыми предельными циклами. На автоколебаниях основан принцип действия множества технических устройств, в том числе часов, генераторов электромагнитных колебаний, поршневых паровых машин и двигателей внутреннего сгорания, некоторых систем автоматического регулирования.

После того как Андроновым было выяснено значение качественной теории дифференциальных уравнений и теории устойчивости Ляпунова для общей теории колебаний, он занялся их применением к конкретным нелинейным задачам радиофизики. Совместно с А. А. Виттом им была создана теория автоколебаний в мультивибраторе Абрагама – Блоха, имеющих резко несинусоидальную форму. Андронов показал также, что для количественного расчета автоколебаний, близких по своей форме к синусоидальным, может быть использован метод разложения в ряд по степеням малого параметра, разработанный А. Пуанкаре для исследования периодических решений задачи трех тел в небесной механике.

С помощью этого метода и теории устойчивости Ляпунова Андронов и Витт разработали теорию некоторых явлений, перед которыми был бессилен математический аппарат теории линейных колебаний. Результаты этих исследований вошли в монографию «Новые исследования нелинейных колебаний», а также в книгу «Теория колебаний», представляющую собой ценный вклад в общемировую научную литературу.

Автоколебания занимали Андронова не только в связи с техникой. Он живо интересовался вопросами астрофизики и предложил своему аспиранту С. А. Жевакину заняться теоретическим изучением механизма колебаний цефеид – пульсирующих переменных звезд. Эта работа была прервана войной и возобновлена в 1946 г. Впоследствии Жевакином была предложена теория самовозбуждения колебаний в цефеидах.

Занимаясь анализом вопросов автоматического регулирования, Андронов пришел к выводу, что теорию автоколебаний следует рассматривать как одну из составляющих общей динамики машин. Им и его сотрудниками были решены в общем виде некоторые задачи автоматического регулирования: о влиянии кулоновского и вязкого трения на работу машины, снабженной регулятором Уатта, о непрямом регулировании при наличии кулоновского трения в индикаторе, о стабилизации курса самолета автопилотом, о спусковом регуляторе и др.

На этом мы закончим наш краткий обзор научных исследований Андронова и перейдем к обсуждению истории становления его научной школы. В 1931 г. он вместе с женой Е. А. Леонович-Андроновой (сестрой М. А. Леоновича) переехал из Москвы в г. Горький (ныне Н. Новгород). В это же время туда приехали М. Т. Грехова и В. И. Га-

понов. В 1937 г. к ним присоединился Г. С. Горелик. Вскоре вокруг Андронова сплотилась группа молодых ученых и преподавателей – Г. С. Горелик, А. Г. Майер, Н. Н. Баутин, И. Л. Берштейн и др. Большую роль в становлении нижегородской радиофизики сыграли такие выдающиеся ученые, как В. Л. Гинзбург, Д. А. Франк-Каменецкий, Е. Л. Фейнберг, С. М. Рытов, М. Л. Левин, Б. З. Каценеленбаум, их последователи и ученики.

В 1945 г. в Горьковском государственном университете (ГГУ) благодаря усилиям Андронова, Греховой, Горелика был создан радиофизический факультет, где были введены специализации по теории колебаний и автоматическому регулированию, распространению радиоволн и радиоастрономии, электродинамике и электронике сверхвысоких частот, по статистической физике и др. Первым его деканом стала Грехова, а Андронов возглавил кафедру теории колебаний и автоматического регулирования. Научной базой для подготовки студентов был ГИФТИ, а впоследствии – Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ, с 1956 г.), Научно-исследовательский институт прикладной математики и кибернетики (НИИ ПМК, с 1964 г.) и НИИ механики (с 1974 г.).

Впоследствии НИРФИ разделился, и новый академический Институт прикладной физики (ИПФ) возглавил А. В. Гапонов-Грехов, а спустя годы отделившийся от ИПФ Институт физики микроструктур РАН – С. В. Гапонов. История нижегородской школы радиофизики тесно связана с двумя поколениями ученых из этой семьи (М. Т. Греховой и В. И. Гапонова).

Научная школа нелинейных колебаний Андронова формировалась на базе ГГУ, профессором которого он оставался до конца жизни, и ГИФТИ. Вокруг Андронова сплотилась группа молодых ученых и преподавателей. В разные годы с ним работали: А. С. Алексеев, А. Г. Майер, Е. А. Леонович-Андронова, М. Я. Широбоков, А. Г. Саймолович, С. В. Беллюстин, Н. П. Власов, Н. Н. Баутин, Н. В. Бутенин, Н. А. Железцов, Ю. И. Неймарк, С. А. Жевакин, И. Л. Бернштейн, А. В. Гапонов-Грехов, Я. Н. Николаев и др.

Андронов придавал особое значение уровню преподавания в ГГУ. Он создал курс теории колебаний, читал лекции по электродинамике и теории относительности. Яркие, глубоко продуманные лекции Андронова неизменно вызывали интерес со стороны студентов. Кроме

того, Андронов создал ряд научных семинаров, которые, несомненно, стали подлинной научной школой для горьковских ученых.

Г. С. Горелик и научная школа в области теории нелинейных колебаний и статистической радиофизики. Габриэль Семенович Горелик (1906–1956) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики ГГУ (1938–1952 гг.) и МФТИ (1953–1957 гг.), заведующий отделом ГИФТИ, талантливый педагог и выдающийся ученый, известный своими исследованиями в области теории колебаний, радиофизики, оптики и акустики, один из организаторов радиофизического факультета ГГУ.



Г. С. Горелик

В 1930 г. Горелик был принят в аспирантуру при НИИФ МГУ, которую окончил под руководством Мандельштама. Горелик развел общую теорию неавтономных линейных параметрических систем и дал обобщение понятий резонанса, селективности и расстройки. Полученные им результаты были настолько ценными и значительными, что в 1934 г., на основании защиты его диссертации, Совет физического факультета МГУ присудил ему степень доктора физико-математических наук.

С 1931 по 1938 г. Горелик работал в МГУ сначала ассистентом, а затем доцентом и профессором. Здесь он выполнил еще несколько научных исследований в области теории нелинейных колебаний. Свою преподавательскую деятельность Горелик тоже начал в МГУ. В течение нескольких лет он читал курсы по оптике и теории колебаний, участвовал в проведении семинаров Мандельштама. С 1935 по 1937 г.

по приглашению Андронова Горелик регулярно приезжал в г. Горький для научных консультаций в ГИФТИ. В начале 1938 г. Горелик стал заведующим кафедрой общей физики физико-математического факультета. В ГГУ он уделил много сил созданию современного университетского курса физики, который систематически обучал бы студентов самостоятельному физическому мышлению и правильному пониманию физических явлений.

Горелик занимался также научно-исследовательской работой в ГИФТИ, где возглавлял сначала отдел теории колебаний, а затем отдел радиофизики. В послевоенные годы им был создан учебник «Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику», впоследствии ставший хрестоматийным. В нем Горелик развил идею об эвристическом потенциале теории колебаний и показал, как различные проблемы акустики, оптики и других отраслей науки переплетаются между собой при рассмотрении их с колебательной точки зрения, при применении общего математического аппарата.

Кроме того, Горелик принял активное участие и в новом этапе развития теории нелинейных колебаний, связанном с достижениями Андронова и Майера в разработке метода точечных преобразований и его применении к задачам теории автоматического регулирования. Совместно с Андроновым и Баутиным он выполнил две работы по автоматическому регулированию, посвященные автоколебаниям системы, содержащей авиационный винт с автоматически изменяемым шагом (1945 г.), и теории непрямого регулирования с учетом сухого трения в чувствительном элементе (1946 г.). Впоследствии в орбиту научных интересов Горелика были вовлечены вопросы флуктуаций, чему в значительной мере способствовали работы И. Л. Берштейна по флуктуациям в автоколебательных системах, начатые в ГИФТИ еще до войны под руководством А. А. Андронова. В результате Г. С. Горелик создал новое направление – исследование свойств вещества и излучения радиофизическими методами.

Педагогический талант Горелика проявился не только в его лекциях, но и в его умении воспитывать научных работников и создавать дружные научные коллективы. Научную школу Горелика в ГГУ составили талантливые молодые исследователи: Г. М. Малюжинец, Н. В. Осипов, К. А. Горонина, В. С. Троицкий, В. А. Зверев, А. Н. Малахов, А. Г. Любина, И. С. Жукова, Е. Ю. Саленикович и др.

В 1953 г. Горелик был избран заведующим кафедрой общей физики МФТИ. В скором времени он взял на себя также обязанности декана радиофизического факультета. Под руководством Горелика в МФТИ вели научно-исследовательскую работу Н. Н. Колачевский, С. М. Козел, Л. А. Пец и П. А. Перепелятник. Кроме чтения общего курса физики, Горелик организовал для старшекурсников и аспирантов МФТИ семинар по статистической радиофизике. С самого основания Института радиотехники и электроники (ИРЭ) Горелик был назначен заведующим организованной им лабораторией статистической радиофизики. Наряду с вопросами, связанными с флюктуациями в автоколебательных системах, он занимался рассеянием волн на хаотически движущихся неоднородностях, автоколебательными системами с запаздывающей обратной связью и другими задачами статистической радиофизики.

Научная школа С. М. Рытова по статистической радиофизике.
Сергей Михайлович Рытов (1908–1996) – выдающийся ученый, член-корреспондент АН СССР, которому принадлежат фундаментальные научные результаты в теории нелинейных колебаний, акустике, теории распространения волн, электродинамике, статистической радиофизике.



С. М. Рытов

В 1930 г. Рытов окончил физико-математический факультет МГУ, а в 1933 г. – аспирантуру под руководством Мандельштама по специальности «теория колебаний». После переезда Академии наук в Москву Рытов перешел в ФИАН. С 1940 г. он был заместителем заведующего лабораторией колебаний ФИАН (в то время ее возглавлял

М. А. Леонович). Ценным вкладом в развитие теории нелинейных колебаний является докторская диссертация Рытова «Модулированные колебания и волны» (1938 г.). После ее издания в Трудах ФИАН СССР она стала настольным руководством для многих ученых в этой области. Необходимо отметить также научные работы Рытова по параметрическим системам, развитию метода возмущений и его приложению к задаче о стабилизации частоты генератора, которые по праву считаются крупнейшими достижениями отечественной теории нелинейных колебаний. Им впервые рассмотрен вопрос о резонансе в параметрических системах, исследовано явление «затягивания» при жестком режиме самовозбуждения колебаний.

С 1935 г. Рытов начал цикл исследований по дифракции света на УКВ. Их результаты были подытожены им в монографии «Дифракция света на ультразвуковых волнах». В этой работе Рытов разработал эффективный метод анализа волн в плавно-неоднородных средах, получивший впоследствии название метода Рытова. В настящее время он является важнейшим средством анализа одной из основных задач радиофизики – распространения волн в случайно-неоднородных средах.

В 1944 г. Рытов был приглашен в ГГУ в качестве заведующего кафедрой теоретической физики радиофизического факультета. В Горьком он читал курсы теории поля, электронной теории и теории относительности. Кроме того, с 1947 г. и практически до конца жизни Рытов работал по совместительству в МФТИ, являясь до 1949 г. профессором кафедры общей физики, а затем – профессором кафедры радиофизики. С 1953 по 1978 г. он возглавлял эту кафедру. В 1958 г. по просьбе А. Л. Минца Рытов перешел в теоретический отдел РТИ, где проводил исследования влияния тропосферы и ионосферы Земли на точность наземных радиолокационных комплексов дальнего действия и оценки их потенциальных возможностей в условиях реальной атмосферы.

Рытовым впервые было дано строгое решение задачи об отражении электромагнитных волн от слоя с отрицательной диэлектрической постоянной и указан корректный электродинамический подход к вопросам распространения волн в трубах и обобщенных линиях передачи с потерями. Кроме того, Рытов – автор наиболее общей феноменологической теории спектрального состава молекулярного

рассеяния света, включая спектр деполяризованного излучения, спектр Мандельштама – Бриллюэна и спектр рассеяния, обусловленного флуктуациями энтропии (1955–1970 гг.). Впоследствии эта теория была подтверждена многочисленными экспериментами и получила общее признание.

Рытов плодотворно занимался также вопросами распространения радиоволн в ионосфере и теорией флуктуационных явлений при распространении и дифракции волн в случайно-неоднородных средах. В области статистической радиофизики его работы открыли новое направление в теории тепловых флуктуационных шумов и полей, позволяющее единым образом рассмотреть тепловые электромагнитные поля для всего диапазона частот. Можно также указать на такие направления научной деятельности Рытова, как разработка и создание малошумящих параметрических усилителей, развитие акустооптических методов обработки радиолокационных сигналов, исследование ионосферы с помощью ракет и искусственных спутников Земли в интересах дальней радиолокации и др.

Благодаря своим блестящим педагогическим способностям и широкой научной эрудиции Рытов был одним из интереснейших лекторов МФТИ. Созданные им лекционные курсы («Курс общей физики», «Теория колебаний», «Статистическая радиофизика») включали в себя как результаты его собственных научных работ, так и последние достижения мировой науки. Лекции по статистической радиофизике, которые Рытов читал в МФТИ, послужили основой для создания единственного в мире учебника по статистической радиофизике – «Введение в статистическую радиофизику» (1966 г.), который сразу же стал научным бестселлером. Особо следует отметить монографию Рытова «Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике», написанную в соавторстве с М. Л. Левиным.

В стенах МФТИ Рытов воспитал множество высококвалифицированных специалистов, докторов и кандидатов наук, которые составляют его научную школу. Кроме того, на протяжении нескольких десятков лет Рытов был бессменным руководителем основанного им радиофизического семинара в ФИАН (впоследствии он проходил в Институте физики атмосферы АН СССР), который оказал огромное влияние на развитие отечественной радиофизики. Популярность и высокий рейтинг этого семинара были обусловлены научным ав-

торитетом самого Рытова и его умением дать квалифицированную оценку работы и четко сформулировать ее сильные и слабые стороны. Ученики и сотрудники Рытова – плеяда выдающихся научных-радиофизиков: А. М. Прохоров (лауреат Нобелевской премии), М. Е. Жаботинский (автор первого отечественного стандарта частоты на атомах цезия, разработчик квантовых парамагнитных усилителей дециметрового диапазона), В. Г. Веселаго (он исследовал свойства материалов с отрицательным показателем преломления), Ф. В. Бункин (один из ведущих исследователей в области лазерной физики и нелинейной акустооптики, создатель научной школы в области радиофизики, оптики, акустики и гидрофизики), Б. М. Болотовский (известен своими трудами в области общей электродинамики и теории относительности, истории науки), М. Д. Галанин, Ю. А. Кравцов, А. Е. Каплан и многие др.

Жизнеспособность любой научной школы определяется, прежде всего, традициями и научными исследованиями ее воспитанников. В этом отношении школа Мандельштама – Папалекси не стала исключением из этого правила. Многие из учеников не только разработали оригинальные научно-исследовательские программы, но и создали собственные научные школы в области радиофизики (Андронов, Горелик, Рытов, Мигулин, Хайкин), работы которых пронизывают гениальные идеи Мандельштама.

Таким образом, научная школа Мандельштама – Папалекси представляет собой уникальный феномен не только в истории отечественной радиофизики, но и в общемировой истории науки. В ее недрах зародился ряд магистральных научно-исследовательских программ (прежде всего, Андронова, Тамма, Леоновича), определивших облик важнейших направлений (теории нелинейных колебаний, радиофизики, оптики, физики плазмы и др.) советской физики.

В настоящее время лидером в области исследований нелинейных и нестационарных явлений является научная школа Д. И. Трубецкова в Саратовском государственном университете. Под его научным руководством изучаются закономерности сложной динамики, включая динамический хаос и образования структур, в различных автоколебательных распределенных и сосредоточенных системах (в том числе радиофизической природы), в моделях экологии, биологии и социальных наук.

8.3. Научные школы в области радиолокации

Радиолокация – область науки и техники, предметом которой является наблюдение радиотехническими методами различных объектов (целей) – их обнаружение, распознавание, измерение их координат и определение других характеристик. Задачи радиолокации решаются с помощью РЛС и сложных радиоэлектронных систем.

Наряду с изобретением радиоприемника А. С. Попову принадлежит еще одно открытие, значение которого трудно переоценить. В 1897 г. он и его ассистент П. Н. Рыбкин при проведении экспериментов на транспорте «Европа» (на нем был установлен радиопередатчик) и крейсере «Африка» (на нем был расположен радиоприемник) обнаружили эффект отражения и интерференции радиоволн от крейсера «Лейтенант Ильин», проходящего между двумя суднами. На основе открытого явления Попов сделал вывод о возможности практического использования этого явления и задолго до возникновения радиолокации и радионавигации сформулировал отправные идеи для создания и развития этих направлений техники.

В течение 1934–1936 гг. в СССР были разработаны и испытаны несколько систем радиолокационного обнаружения самолетов: в ЦРЛ – Ю. К. Коровиным, в ЛЭФИ (Ленинградском электрофизическом институте) – А. А. Чернышевым и Б. К. Шембелем, в ЛФТИ (Ленинградском физико-техническом институте) – Д. А. Рожанским, Ю. Б. Кобзаревым, П. А. Погорелко, Н. Я. Чернецовым, на заводе № 209 им. Коминтерна – П. К. Ощепковым. В 1935 г. ЛЭФИ был объединен с Радиоэкспериментальным институтом (РЭИ, директор А. М. Кугушев) и преобразован в закрытую организацию НИИ-9 (научный руководитель М. А. Бонч-Бруевич).

Одним из главных направлений НИИ-9 стало создание мощных генераторов электромагнитных колебаний СВЧ-диапазона. Бонч-Бруевич, хорошо знавший работу радиостов времен Первой мировой войны, считал, что наиболее перспективной является акустическая индикация принимаемых сигналов, поэтому в НИИ-9 было отдано предпочтение технике непрерывного излучения. Тем не менее образца РЛС с использованием непрерывного излучения, который мог бы быть принят на вооружение, создать не удалось. В 1935 г. Иоффе, по настоянию УПВО, организовал в ЛФТИ специальную лабораторию

рию (под руководством Д. А. Рожанского) для работ по проблеме обнаружения самолетов.

Д. А. Рожанский и его радиолокационная группа. Выдающийся радиофизик, член-корреспондент АН СССР, последователь Попова Дмитрий Аполлинариевич Рожанский (1882–1936) и его научная школа (радиолокационная группа) сыграли ключевую роль в становлении *импульсной радиолокации* в нашей стране. Кроме того, он выполнил важнейшие исследования по распространению коротких и ультракоротких радиоволн с учетом свойств ионосферы, по стабилизации частоты ламповых генераторов, физике газового разряда, СВЧ-электронике, теории антенн.



Д. А. Рожанский

В 1910 г. Рожанский разработал методы осциллографирования быстрых электрических процессов, создав, по существу, современный осциллограф. После защиты диссертации и получения диплома магистра физики он переехал в Харьков.

В 1911 г. он был утвержден в должности приват-доцента Харьковского университета по кафедре физики. Рожанский организовал физический семинар, которым неизменно руководил вплоть до своего отъезда из Харькова в 1921 г. На нем Рожанский делал обзорные доклады и сообщения о собственных научных результатах, активно привлекал к работе семинара студентов и сотрудников кафедры. Фактически семинар стал центром физической мысли Харькова.

По инициативе Рожанского при физико-математическом факультете была организована научно-исследовательская кафедра. После 1921 г., уже работая в Н. Новгороде и Ленинграде, он оставался ее руководителем, периодически приезжая в Харьков. По его предложению на кафедре были начаты исследования по освоению методов генерирования дециметровых и сантиметровых волн. Они проводились А. А. Слуцким и Д. С. Штейнбергом (впоследствии их продолжил С. Я. Брауде) и привели к созданию *магнетронного генератора*, который стал одним из ключевых узлов современной радиолокационной аппаратуры.

В течение 1921–1923 гг. Рожанский работал в НРЛ, где выполнил фундаментальные работы по ряду важнейших проблем радиотехники (в частности, по теории антенн). Им был выдвинут принцип расчета сопротивления излучения путем учета обратного действия поля, создаваемого излучающей системой, на саму систему. Этот метод, названный «методом наведенных ЭДС», был развит в работах И. Г. Кляцкина, В. В. Татаринова и А. А. Пистолькорса. Он получил широкое применение в расчетах сложных антенн.

В 1923 г. Рожанский переехал в Ленинград и начал работать в ЦРЛ, где под его руководством разрабатывались методы генерирования коротких и ультракоротких радиоволн, способы стабилизации частот коротковолновых генераторов. Одновременно Иоффе пригласил Рожанского в организованную им Ленинградскую государственную физико-техническую лабораторию (ЛФТЛ) при ВСНХ, где Рожанский возглавил отдел коротких волн.

В 1925 г. он приехал в Харьков для детального изучения проблемы распространения коротких радиоволн. В это время на физико-математическом факультете Харьковского университета работал радиотехнический кружок. Его организатором и руководителем был тогда еще студент, а затем ученик и ближайший сотрудник Рожанский – Ю. Б. Кобзарев (о его научных исследованиях речь пойдет ниже). Здесь и был установлен коротковолновой приемник Рожанского, с помощью которого осуществлялся прием опытных передач. Это были первые в нашей стране опыты по установлению дальней радиосвязи на коротких волнах. Продолжением сотрудничества Рожанского со своими харьковскими коллегами и учениками стало создание Харьковского физико-технического института – сначала филиала, а затем партнера Ленинградского физтеха.

Магистральным направлением научных исследований Рожанского является также разработка радиолокационных устройств. Под его руководством специальная лаборатория в ЛФТИ выполнила эксперименты по изучению рассеяния самолетами радиоволн метрового диапазона и разработала *импульсный метод радиолокации* применительно к задаче обнаружения самолетов на больших расстояниях.

К концу 1935 г. был реализован макет первой отечественной импульсной РЛС, которая вошла в историю под названием «Редут». Рожанский лично принимал участие в первых экспериментах по импульсной радиолокации. К сожалению, увидеть завершение этой работы он не успел, так как скоропостижно скончался 27 сентября 1936 г. Продолжателем работ Рожанского в области радиолокации стал Кобзарев. В 1938 г. группа сотрудников ЛФТИ (лаборант А. А. Малеев, зав. лабораторией Ю. Б. Кобзарев, научные сотрудники П. А. Погорелко и Н. Я. Чернецов) создали импульсную радиолокационную установку для дальнего обнаружения, которая работала на длине волн 4 м и обнаруживала самолет, летящий на высоте 1500 м, на расстоянии до 50 км. При этом были впервые измерены характеристики рассеяния УКВ самолетами (диаграммы рассеяния самолетов) и определены эффективные площади рассеяния.

Рожанский уделял значительное внимание подготовке научных кадров. Он был организатором харьковской и ленинградской научных школ. В Харьковском университете под его руководством работал будущий академик АН УССР А. А. Слуцкин. Помимо него, учениками Рожанского были такие известные ученые и радиоинженеры, как А. Н. Щукин, Ю. Б. Кобзарев, М. С. Нейман, М. Т. Грехова, В. И. Бунимович, Н. Я. Чернецов, П. Н. Погорелко, Г. В. Брауде, Л. А. Сена и др.

Ю. Б. Кобзарев и научная школа по импульсной радиолокации. Юрий Борисович Кобзарев (1905–1992) – доктор технических наук, академик АН СССР, один из основоположников отечественной радиолокационной техники, руководитель ряда важнейших научных работ, оказавших мощное влияние на развитие теории нелинейных колебаний и радиофизики в целом. После окончания в 1926 г. Харьковского университета (тогда Харьковского института народного образования) Кобзарев работал в отделе коротких радиоволн ЛФТЛ под руководством Рожанского.



Ю. Б. Кобзарев

Первые научные работы Кобзарева были связаны с проблемой стабилизации частот ламповых генераторов. Вскоре им были получены первые результаты по использованию кварцевых резонаторов для стабилизации частот автогенераторов и опубликованы статьи, посвященные расчету параметров кварцевых резонаторов как элементов электронных схем. В дальнейшем на основе этих исследований сформировалось новое научное направление в радиоэлектронике – *акустоэлектроника*.

Следующий цикл работ Кобзарева посвящен развитию «квазилинейного» метода и обоснованию его связи со строгими методами изучения нелинейных систем. С помощью этого метода им были решены многие сложные задачи теории автогенераторов (например, проанализированы различные режимы деления и умножения частоты с помощью автогенераторов). Разработанная Кобзаревым теория нелинейных колебаний, близких к гармоническим, стала классической. Она стала эффективным инструментом для анализа и расчета многих радиотехнических устройств.

С 1935 г. Кобзарев начал вести научную работу в ЛФТИ по проблеме дальнего радиообнаружения самолетов. В то время в лаборатории уже работали Чернецов и Погорелко, вскоре к ним присоединился Кобзарев. Ими была разработана импульсная генераторная лампа ИГ-8 с длиной волны 3,5–5 м мощностью до 50 кВт, ставшая основой передатчика радиолокационной установки. Результаты этих

разработок способствовали тому, что советская система ПВО во время Великой Отечественной войны была оснащена радиолокационной техникой.

17 октября 1937 г. были проведены ключевые эксперименты по обнаружению самолетов, летавших на различных высотах, с помощью импульсной радиолокационной установки. При испытаниях использовался сравнительно маломощный (около 1 кВт) передатчик. Проведенные опыты имели решающее значение для дальнейшей работы. Поскольку все характеристики приемника и передатчика были известны, можно было оценить и отражательную способность самолета, и дальность действия установки при переходе к генераторным лампам большой мощности и высоконаправленной антенны приемника.

В августе 1938 г. на подмосковном полигоне были проведены испытания усовершенствованной РЛС с передатчиком мощностью 50 кВт. В экспериментах самолеты фиксировались на расстояниях до 55 км. Иоффе приложил много усилий для того, чтобы к серийному производству импульсных радиолокационных станций была привлечена промышленность. Постановлением Комитета обороны в 1939 г. к работам был привлечен НИИ-20, которому было поручено совместно с ЛФТИ в 1940 г. изготовить первые опытные образцы радиолокаторов и подготовить их к промышленному выпуску. Работу возглавил один из сотрудников НИИ А. Б. Слепушкин.

В 1938 г. на базе радиолокационной установки «Ревень» (создана в Научно-испытательном исследовательском институте связи Красной армии под руководством инженера Д. С. Стогова) были выпущены первые серийные РЛС «РУС-1». Они были применены в ходе советско-финляндской войны (1939–1940 гг.). По инициативе Иоффе в поселке Токсово под Ленинградом была построена стационарная экспериментальная РЛС. Она начала функционировать в 1940 г. и предназначалась для проведения работ по совершенствованию радиолокационной техники. В частности, на ней были проведены измерения эффективных сечений рассеяния реальных целей, осуществлены исследования по созданию одноантенного варианта РЛС и системы опознавания своих самолетов. Благодаря высоким антennам она позволяла обнаруживать самолеты на больших расстояниях, а также низколетящие цели.

Незадолго до начала Великой Отечественной войны вышло правительствоное постановление о присуждении Государственной премии коллективу лаборатории ЛФТИ в составе Погорелко, Чернечова и Кобзарева. К началу войны было наложено промышленное производство РЛС «РУС-2» в двух вариантах – автомобильном (РЛС «Редут») и перевозимом в упаковках (РЛС «Пегматит»). Именно РЛС «Редут» обеспечивали оборону Москвы и Ленинграда во время наступления фашистских войск (рис. 61). Отметим и другую работу военных лет – создание самолетной установки, обеспечивающей возможность наведения истребителей в ночное время – «Гнейс-2». Кроме того, была сконструирована РЛС «Редут-К», которая была установлена на одном из крейсеров Черноморского флота. При первых налетах фашистской авиации на Севастополь радиолокатор давал весьма точные данные о воздушной обстановке, которые передавались по линиям связи на командный пункт ПВО, что позволило зенитным батареям заблаговременно подготовиться к отражению воздушного налета.

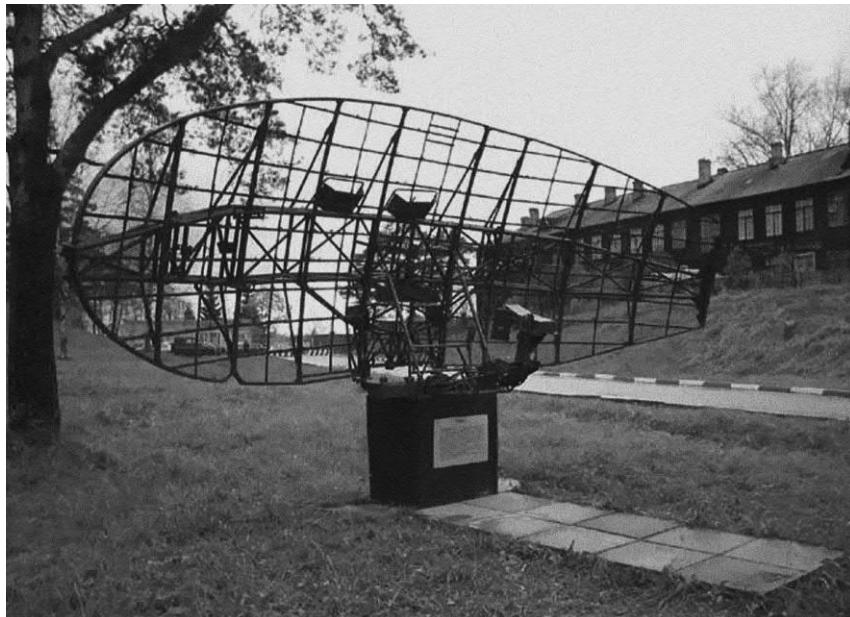


Рис. 61. Антенна радиолокатора «Редут» (памятник в п. Токсово, Ленинградская область)

В марте 1943 г. заместителем наркома электропромышленности был назначен Аксель Иванович Берг (1893–1979). 4 июля 1943 г. перед началом битвы на Курской дуге вышло постановление Государственного Комитета Обороны (ГКО) «О создании Совета по радиолокации при Государственном Комитете Обороны».



А. И. Берг

Председателем Совета был назначен секретарь ЦК ВКП(б) Г. М. Маленков, а его заместителем – Берг. Деятельность Совета расширилась после того, как в начале 1945 г. в нем был создан научно-технический совет (НТС), главной задачей которого было определять научно-техническую политику в развитии радиолокации. Председателем НТС вначале был Кобзарев, а затем А. Н. Щукин.

В истории советской радиолокации это постановление сыграло очень важную роль, так как дальнейшее развитие нового научно-технического направления и отрасли в целом проводилось под непосредственным контролем высшего военно-политического руководства страны, что в тот период имело решающее значение.

Для развития радиолокационных методов и аппаратуры требовались высококвалифицированные специалисты. В связи с этим в 1943 г. Кобзареву было поручено организовать в Московском энергетическом институте (МЭИ) на радиотехническом факультете кафедру радиолокации (в то время она называлась кафедра радиотехнических приборов). В ее работе принимал активное участие Берг, а к чтению лекций были привлечены такие ученые-радиофизики, как Б. А. Введенский

(курс антенно-фидерных устройств и распространения УКВ, впоследствии его преподавал А. Р. Вольперт), Л. Ю. Блюмберг (курс приемных устройств УКВ), М. Д. Гуревич (курс радиопередающих устройств). Сам Кобзарев был автором центрального курса кафедры «Принципы радиолокации». В течение 12 лет при его непосредственном участии на кафедре радиолокации (он был первым ее заведующим) в МЭИ были разработаны основополагающие подходы к подготовке специалистов по радиолокации, созданы учебные курсы и хорошо оборудованные лаборатории. Первыми аспирантами на кафедре радиолокации, которые выполняли работы под руководством Кобзарева, были А. Ф. Богомолов, А. Е. Башаринов и Р. Р. Лисициан.

После преобразования Совета по радиолокации в Комитет по радиолокации (1947 г.) основным местом работы Кобзарева стал НИИ-20 (ныне – Всесоюзный научно-исследовательский институт радиотехники, ВНИИРТ). В нем была создана лаборатория 35, которую возглавил Кобзарев. Ее сотрудниками были Л. Н. Кисляков, Г. Я. Каганская, И. И. Холкина, А. И. Шефлер, А. В. Ландер, И. М. Владимириова, Г. В. Румянцев, В. И. Павлюк и др. В этой лаборатории была начата НИР «Стекло» – первая отечественная работа, посвященная исследованию *когерентно-импульсного метода* как средства защиты РЛС от воздействия помех. В 1943 г. Кобзарев высказал идею о применении вспомогательного источника когерентных колебаний (гетеродина), фазируемого импульсами передатчика, для создания когерентно-импульсной техники. Но приступить к практической ее реализации ему удалось только в 1949 г., когда в НИИ-20 под его руководством началась разработка когерентно-импульсной техники применительно к новым РЛС дальнего обнаружения в 10-сантиметровом диапазоне. Основные трудности были связаны как с новым диапазоном волн, так и с реализацией когерентно-импульсного режима в РЛС дальнего обнаружения, работающих с малой частотой повторения (порядка 300 Гц). Коллектив НИИ-20 успешно справился с поставленными задачами.

Первой отечественной РЛС, в которой была использована когерентная система обработки сигналов, стала П-20 («Перископ»). К 1954 г. в лаборатории Кобзарева были получены научно-технические результаты, на базе которых была разработана первая в СССР когерентная РЛС для обнаружения низколетящих целей с защитой от пассивных помех – РЛС «Тропа» (П-15) (рис. 62).



Рис. 62. РЛС «Тропа» (П-15)

В ней была решена проблема выделения сигналов от цели на фоне мощных отражений от подстилающей поверхности, метеообразований, дипольных отражателей, интенсивность которых могла во много раз превосходить полезный сигнал. РЛС «Тропа» была на вооружении несколько десятилетий и была самой массовой РЛС, которая выпускалась в нашей стране. В настоящее время в военных целях используется ее модификация – РЛС «Дунай» (П-19).

В 1956 г. лаборатория 35 была преобразована в отдел, состоящий из 7 самостоятельных лабораторий. Руководителями лабораторий стали ближайшие сотрудники Кобзарева, которые вскоре защитили диссертации (15 кандидатских, а Л. Н. Кисляков, Г. В. Румянцев и В. А. Ландер – докторские диссертации).

В 1955 г. Кобзарев стал заведующим лабораторией в ИРЭ АН СССР, где под его научным руководством продолжались исследования

по общим проблемам радиолокации. При организации ИРЭ по радиотехническому направлению были объявлены три правительственные темы: «Загорск», «Саратов» и «Пенза». Руководителем «Саратова» был В. А. Котельников, «Пензы» – профессор Г. С. Горелик, а «Загорска» – Ю. Б. Кобзарев. Тема «Загорск» состояла в изыскании новых методов радиолокации с повышенной помехоустойчивостью. Результаты этой работы сыграли значительную роль в повышении эффективности радиолокационных систем и создании современных систем ракетно-космической обороны страны.

Помимо этого, были начаты исследования по обнаружению и измерению электромагнитных волн, излучаемых земной и водной поверхностью в СВЧ-диапазоне. У истоков этого направления стоял ученик Ю. Б. Кобзарева А. Е. Башаринов. По его инициативе в ИРЭ АН СССР широким фронтом были развернуты работы по изучению особенностей теплового излучения различных природных объектов. Одновременно с теоретическими изысканиями формировалась и соответствующая экспериментальная база. В результате появилась новое научное направление в радиофизике – исследование состояния атмосферы, водной и земной поверхностей по их естественному (радиотепловому) излучению в СВЧ-диапазоне (другое ее название – «дистанционное зондирование»).

В заключение отметим, что благодаря деятельности научных школ Рожанского и Кобзарева были созданы теоретические и экспериментальные основания для появления нового научного направления – радиолокации и дальнейшему развитию ее методов. В совокупности это способствовало тому, что радиолокационные методы стали широко применяться в различных областях науки и техники (в военных технологиях, навигации, метеорологии, экологическом мониторинге, космических исследованиях). В связи с этим современную радиолокацию считают комплексной научной дисциплиной, одним из важнейших направлений современной радиофизики.

8.4. Научные школы в области радиоастрономии

Инициатором развития радиоастрономии в нашей стране был Папалекси. Ему пришла в голову идея осуществить наблюдение радиоизлучения Солнца во время его продолжительного полного затмения

20 мая 1947 г., полоса которого проходила через Бразилию. Бразильская экспедиция была организована Астрономическим советом АН СССР под общим руководством Папалекси. Предварительно он попросил Гинзбурга рассмотреть вопрос об условиях отражения радиоволн различной длины от солнечной атмосферы. Расчеты, опубликованные в 1946 г. в «Докладах АН СССР», показали, что, по-видимому, для всего диапазона волн отражение от Солнца невозможно. Радиоволны метрового диапазона будут поглощены в солнечной короне, а более короткие – в хромосфере и не достигнут области отражения. Но отсюда следовало, что источником теплового радиоизлучения Солнца должна быть не фотосфера, а хромосфера и корона (для метровых волн). К аналогичным выводам независимо и практически одновременно пришел ровесник Гинзбурга – И. С. Шкловский.

Для проведения радионаблюдений Солнца был необходим достаточно опытный и квалифицированный специалист. Им оказался Б. М. Чихачев – ученик и сотрудник Папалекси по работе в ЦРЛ, один из пионеров отечественной радиоламповой промышленности. Однако в разгар подготовки к бразильской экспедиции (февраль 1947 г.) Папалекси внезапно ушел из жизни. Преемником Папалекси стал С. Э. Хайкин (см. ниже).

В середине мая 1947 г. теплоход «Грибоедов» прибыл в залив Баии. Наблюдения затмения проводились на длине волны 1,5 м с помощью синфазной антенны, закрепленной неподвижно на палубе теплохода. Результаты наблюдений, опубликованные в октябре 1947 г. и более подробно – в следующем году, стали классическими. Было экспериментально открыто предсказанное теоретиками радиоизлучение солнечной короны.

Открытие явления радиоизлучения солнечной короны стало первым значительным достижением советских ученых в области радиоастрономии. Огромной заслугой Хайкина стало то, что он не только успешно довел до логического завершения запланированный Папалекси бразильский эксперимент, но и внес вместе со своими учениками основополагающий вклад в развитие отечественной наблюдательной радиоастрономии.

С. Э. Хайкин и научная школа в области наблюдательной радиоастрономии. Вслед за непродолжительной работой в качестве инженера в ЛФТЛ и ВЭИ (1928–1930 гг.) Семен Эммануилович

Хайкин (1901–1968) в 1930 г. перешел на физический факультет МГУ, где он работал ассистентом, доцентом и впоследствии заведующим кафедрами колебаний (1935–1938 гг.) и общей физики (1938–1946 гг.). В 1930–1931 гг. он был ученым секретарем, в 1931–1933 гг. – заместителем директора НИИФ МГУ, в 1934–1937 гг. – деканом физического факультета.



С. Э. Хайкин

Хайкин начал свою научную деятельность в МГУ с 1928 г. на кафедре теоретической физики под руководством Мандельштама. В первой половине 1930-х гг. в центре внимания научной школы Мандельштама – Папалекси было создание методов теоретического анализа автоколебаний. Именно поэтому исследования Хайкина того времени были посвящены автоколебаниям. Им были изучены явление «захватывания» при малых величинах внешнего воздействия, релаксационные автоколебания (например, в системах с сухим трением). Витт и Хайкин экспериментально подтвердили основные выводы математической теории захватывания (принудительной синхронизации). Значительная часть научных результатов, полученных Хайкиным в области автоколебаний, впоследствии вошла в фундаментальный труд «Теория колебаний» (1937 г.).

В 1945–1953 гг. Хайкин работал в ФИАН заведующим сектором радиоастрономии в лаборатории физики колебаний. Несмотря на значительный успех (открытие явления радиоизлучения солнечной короны), систематические исследования по радиоастрономии в СССР начались

только в 1952 г. Это связано с тем, что, хотя советские физики-теоретики и астрофизики неоднократно выдвигали перед наблюдательной радиоастрономией оригинальные и важные задачи, измерительная техника для их решения отсутствовала. Хайкин отчетливо понимал, что для развития радиоастрономии нужно, прежде всего, воспитать коллектив единомышленников – радиофизиков, которых увлекла бы астрофизическая тематика. Кроме того, необходимо было разработать инструментальную базу для радиоастрономических наблюдений – радиотелескопы и радиометры для различных диапазонов волн. Для выполнения такой комплексной задачи требовались лаборатории, опытное производство, квалифицированный штат конструкторов-механиков и радиоинженеров.

В 1943 г. Хайкин предложил Президиуму АН СССР программу работ по исследованию условий распространения радиоволн во всей толще земной атмосферы с использованием в качестве внеземных генераторов Солнца, Луны и некоторых дискретных источников радиоизлучения. Эта задача имела большое практическое значение для навигации космических ракет. Программа была принята со сроком окончания в 1950 г. и предусматривала передачу ФИАН и НИРФИ ряда локационных станций.

Помимо А. Е. Саломоновича, Я. И. Лихтера и Н. Л. Кайдановского, С. Э. Хайкин принял в свой штат В. В. Витковича, Б. Г. Горожанкина, Б. М. Чихачева, несколько радиоинженеров и техников. Основной базой исследований стала Крымская экспедиция (КЭ) ФИАН (ее начальником в то время был А. Е. Саломонович), где до этого Папалекси и Щеголев занимались экспериментальной проверкой радиоинтерференционных методов (см. выше). В состав КЭ входили Алупкинский отряд на горе Кошка и Алуштинский отряд, расположенный в поселке Рабочий уголок. В КЭ были направлены Р. Л. Сороченко, Ф. В. Бункин, Б. Г. Осипов, Н. В. Карлов, В. Г. Веселаго, Т. А. Шмаонов, Н. Ф. Рыжков, Т. М. Егорова и др.

Именно на горе Кошка, где сосредоточилась основная часть КЭ, создавались *первые крупные отечественные радиотелескопы*. В большинстве случаев их основой были радиолокаторы времен Великой Отечественной войны, которые были переданы ФИАН для осуществления предложенной Хайкиным программы. Отсутствие готового оборудования и апробированной методики измерений, недостаток

опыта у молодого коллектива, малое время для выполнения работ (менее двух лет) и трудности экспедиционного быта делали эту работу крайне напряженной. Тем не менее она была выполнена в срок.

Первый крымский радиотелескоп ФИАН был запущен в 1949 г. На нем проводились измерения радиоизлучений активных областей Солнца на длине волны 1,5 м (рис. 63).

Параллельно с реконструкцией и монтажом радиотелескопов шла разработка и наладка комплекта радиометров. Все радиотелескопы КЭ, а также НИРФИ были подготовлены к исследованию условий распространения радиоволн в 1949 г. Результатом работ стало изучение рефракции, рассеяния и поглощения радиоволн во всей толще земной атмосферы в диапазоне длин волн от 3 м до 3 см.

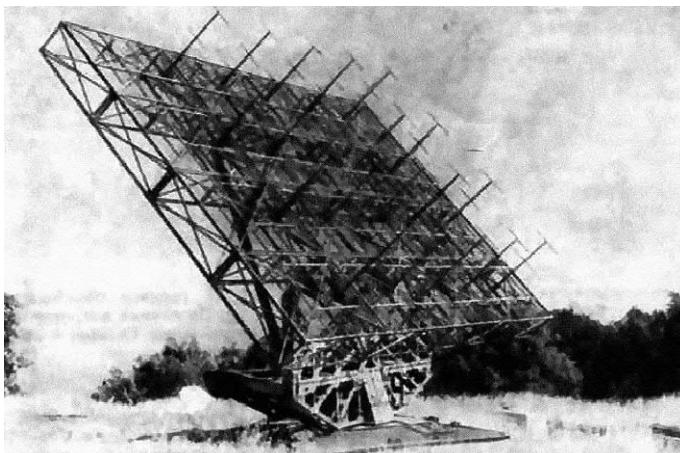


Рис. 63. Первый крымский радиотелескоп ФИАН (1949 г.)

Помимо КЭ под Н. Новгородом работала группа НИРФИ под руководством Горелика и Троицкого. В 1947 г. Троицким был создан первый модуляционный радиометр на длину волны 4 м, а И. Л. Берштейном – радиометр на длину волны 10 см. В 1949 г. около деревни Зименки был организован радиоастрономический полигон, где были, в частности, установлены радиотелескопы на длины волн 1,5 м и 3 см. С их помощью проводились измерения радиоизлучения Солнца, а также наиболее ярких дискретных космических источников.

Новые задачи потребовали улучшения параметров радиотелескопов – увеличения диаметра антенн и чувствительности радиометров.

В связи с этим П. Д. Калачевым была спроектирована и выполнена силами ФИАН конструкция параболической антенны диаметром 4 м с зеркалом высокой точности. Одновременно были разработаны широкополосные радиометры сантиметрового диапазона повышенной чувствительности. Новые радиотелескопы были установлены в Калужской экспедиции ФИАН, на горе Кошка в Крыму и на радиоастрономической станции Зименки.

По инициативе Виткевича возглавляемая им с 1952 г. Крымская станция перебазируется с горы Кошка в Голубой залив. Здесь сооружается серия синфазных и параболических антенн, собираются интерферометры метрового и дециметрового диапазонов, разрабатываются оригинальные спектрографы и другая аппаратура для солнечных и галактических измерений. В частности, были созданы 2 полноповоротных радиотелескопа В-3 в виде усеченных параболоидов, конструкция которых была разработана Калачевым. Один из радиотелескопов В-3 был предназначен для наблюдений линии водорода на длине волны 21 см.

В 1950-х гг. сотрудники КЭ занималась, в основном, исследованием радиоизлучения Солнца под руководством Виткевича. Для этих целей использовался второй телескоп В-3 и радиотелескоп РТ-31, выполненный в виде земляной чаши. В результате работ было сконструировано наклонно расположенное, неподвижное параболическое зеркало диаметром 31 м. Его бетонная поверхность была металлизирована, а вблизи фокуса на ферме укреплена подвижная площадка для радиоприемников. На этом радиотелескопе в 1957 г. впервые в СССР удалось получить *двухмерное радиоизображение Солнца на длине волны 3 см*, а несколько позже А. Д. Кузьминым и В. А. Удальцовым было обнаружено *поляризованное излучение Крабовидной туманности на дециметровых волнах*.

В начале 1950-х гг. Чихачевым было выполнено исследование активных областей на Солнце в метровом диапазоне, а Виткевич провел многочисленные наблюдения радиоизлучения спокойного и слабовозмущенного Солнца. К этому периоду относятся высказанная им идея метода просвечивания солнечной короны радиоизлучением дискретного источника (Крабовидной туманности), а затем и открытие протяженной внешней короны Солнца – «*сверхкороны*». Это повлекло за собой серию исследований, выполнявшихся В. В. Виткевичем и его

сотрудниками – Б. Н. Нановкиным, Н. А. Лотовой, В. И. Шишовой, Р. Д. Дагкесаманским и др. Методом просвечивания с различными интерференционными базами и на разных волнах метрового диапазона были обнаружены и изучены неоднородности внешней короны, ее поляризационные характеристики, особенности корпускулярного излучения Солнца и др.

Таким образом, в 1950-х гг. Крымская радиоастрономическая станция становится крупнейшим центром экспериментальных радиоастрономических исследований в СССР. Впоследствии радиоастрономические исследования из Крыма начали переводиться в Пущино (Московская область).

Вернемся к обсуждению научной деятельности Хайкина. В 1953 г. он создал отдел радиоастрономии в Главной астрономической обсерватории (ГАО) в Пулково. Ядро отдела Хайкина составили Н. Л. Кайдановский, П. Ф. Рыжков, Т. М. Егорова, перешедшие сюда из ФИАН, Ю. Н. Парицкий и Н. С. Соболева (выпускники астрофизической кафедры МГУ), а также Г. Б. Гельфрейх, А. Ф. Дравеких, Н. А. Есепкина, В. Н. Ихсанова и др.

Незадолго до перехода в Пулково Хайкин обратил внимание радиоастрономов ФИАН на перспективность использования сантиметровых и миллиметровых волн для радиоастрономических исследований. Сложность построения очень больших и точных антенн, необходимых для данных диапазонов, должна была быть преодолена путем отказа от традиционной конструкции радиотелескопа со сплошным параболическим рефлектором. По идее Хайкина отражающая поверхность нового радиотелескопа должна быть расчленена на ряд небольших плоских элементов. Их следует устанавливать с помощью механизмов и измерительных устройств таким образом, чтобы образовать поверхность, собирающую в фокус излучение, приходящее от источника. Для наблюдений в разных направлениях профиль отражающей поверхности должен был изменяться, поэтому новый радиотелескоп получил название *антенны переменного профиля* (АПП).

В 1956 г. под руководством Хайкина был сооружен Большой пулковский радиотелескоп (БПР) (рис. 64), ставший первым в мире телескопом с АПП. 120-метровое зеркало БПР состоит из 90 плоских отражательных щитов, каждый размером 3,5 м х 1,5 м, и облучателя.

Щиты расположены полукругом, они могут поворачиваться (изменять наклон) для настройки в зависимости от времени года. Отраженное от щитов излучение собирается в центре полукруга на облучателе, откуда продетектированный сигнал по кабелю попадает в Специальную астрофизическую обсерваторию, где происходит запись и обработка полученной информации. Пространственное разрешение БПР достигает 1 угловой минуты на длине волны 3 см.



Рис. 64. Большой пулковский радиотелескоп (БПР)

К основным научным результатам, полученным с помощью этого радиотелескопа, относятся:

- обнаружение и изучение сильной круговой поляризации излучения активных областей Солнца, линейной поляризации теплового радиоизлучения Луны в сантиметровом диапазоне;
- исследование распределения радиояркости по диску Венеры, структуры мощных радиационных поясов Юпитера, структуры и поляризации сложных внегалактических источников;
- прецизионные измерения координат внегалактических радиоисточников (обнаружено, что более 40% ярких источников в сантиметровом диапазоне имеют квазизвездную природу) и др.

БПР послужил прототипом РАТАН-600 – одного из крупнейших радиотелескопов в мире (см. модуль № 7). С помощью телескопа РАТАН-600 было изучено радиоизлучение большинства планет Солнечной системы, обнаружено предельно слабое излучение радиоструктуры Солнца («радиогрануляция»). В настоящее время с помощью этого радиотелескопа проводятся исследования переменности радиоизлучения микроказаров, структуры излучения межзвездной среды в нашей Галактике, мазерных источников в линиях воды на длине волны 1,35 см, оболочек сверхновых и линии нейтрального водорода на длине волны 21 см и др.

В. С. Троицкий и научная школа по экспериментальной радиоастрономии. Троицкий – член-корреспондент АН СССР, доктор физико-математических наук, профессор, один из крупнейших специалистов в области радиоастрономии и прикладной радиофизики. В 1945 г. он поступил в аспирантуру ГГУ, где его научным руководителем был Горелик.

В 1950 г. Троицкий защитил кандидатскую диссертацию (это была первая в стране диссертация по радиоастрономии). С этого времени начинается его интенсивная научная деятельность, сначала в ГИФТИ и ГГУ (1948–1956 гг.), а затем с 1956 г. в НИРФИ. В 1970–1982 гг. Троицкий был заместителем директора НИФРИ по научной работе, с 1991 г. – главным научным сотрудником.



В. С. Троицкий

Диапазон его научных интересов был чрезвычайно широк: он проводил исследования флуктуаций в автогенераторах и радиоприемных

устройствах, занимался радиоастрономией, общей теорией относительности и квантовой радиофизикой, космологией, проблемой поиска внеземных цивилизаций (см. модуль № 7), применением радиофизических методов в медицине.

Научная деятельность Троицкого связана с началом становления экспериментальной радиоастрономии в СССР. Во второй половине 1940-х гг. он и его коллеги сконструировали первые в стране радиометры и радиотелескопы для приема космического радиоизлучения, начали исследовать радиоизлучение Солнца, Луны, атмосферы, а позже – дискретные источники и распределенное космическое радиоизлучение. Сконструированные Троицким радиометры, позволяющие проводить точные абсолютные измерения малых мощностей, были активно использованы в технических и радиоастрономических измерениях.

Вслед за созданием радиометров начались их практические применения на организованном ГИФТИ в 1949 г. радиоастрономическом полигоне «Зименки». Здесь были поставлены эксперименты по измерению рефракции и поглощения радиоволн в атмосфере, исследовалось радиоизлучение Солнца и Луны, а позднее – дискретных космических источников. Разработки радиометров, антенных систем и методов радиоастрономических измерений, выполненные в процессе исследования Луны, нашли применение в радиофизике и СВЧ-технике.

Троицкий и его ученики добились выдающих результатов в области исследований радиоизлучения Луны. Еще в 1952 г. было установлено, что на длине волны 10 см температура Луны в радиодиапазоне практически не зависит от ее фазы. В 1954 г. Троицкий опубликовал работу по теории радиоизлучения Луны, в которой были сформулированы задачи и оценены возможности ее радиоастрономических исследований. С этой целью в НИРФИ были разработаны антенны в диапазоне длин волн от 0,87 мм до 50 см, а также было организовано несколько экспедиций для наблюдений лунных циклов и затмений. К 1963 г. были обобщены данные систематических наблюдений Луны, которые позволили определить физические свойства ее коры на глубине до 50 м. Все эти работы велись с опережением аналогичных исследований за рубежом.

Троицкий подверг критике выводы американских коллег о наличии на Луне многомерного слоя пыли, делающего невозможным приложение для астронавтов. По его расчетам получалось, что слой пыли

на Луне был совершенно ничтожен, а вскоре это было убедительно доказано его блестящими исследованиями теплового радиоизлучения Луны.

В начале 1960-х гг. в НИРФИ В. С. Троицкий и В. Д. Кротиков, изучая радиоизлучение Луны в широком диапазоне (от миллиметровых до дециметровых) волн, обнаружили *рост температуры Луны с ее глубиной и существование потока тепла из ее недр*. В частности, было показано, что уже на глубине 50 км температура недр Луны составляет 600–700 К.

Из результатов исследований следовало, что верхний покров Луны твердый и пористый со слоистой структурой, образованный спекшимися частицами лунного грунта размером 0,1–0,2 мм. Для повышения точности измерений Троицкий использовал разработанный им *метод «искусственной Луны»*, сравнивая ее радиоизлучение с излучением эталонных «чернотельных» дисков. Это позволило определять температуру Луны в радиодиапазоне с погрешностью 1–2% в широком диапазоне длин волн.

В 1964 г., выступая в качестве эксперта на ответственном совещании у С. П. Королёва, где решалась судьба отправки на Луну первых спускаемых аппаратов, Троицкий убедительно доказал, что посадку необходимо рассчитывать на достаточно твердый грунт. Все без исключения результаты определения группой Троицкого теплофизических характеристик лунного грунта были позже подтверждены информацией, полученной с помощью автоматических межпланетных станций (АМС). Более того, данные о прочности лунного грунта использовались в СССР при проектировании АМС «Луна-9» и «Луна-13» и «Лунохода-1». Аналогичная программа изучения лунного грунта проводилась в 1966–1968 гг. АМС «Сервейер» (США). В феврале 1966 г. спускаемый аппарат АМС «Луна-9» совершил мягкую посадку на поверхность Луны и передал на Землю панорамное изображение лунной поверхности. Конструкторы АМС подарили Троицкому это изображение как подтверждение обоснованной им модели лунного грунта.

Таким образом, им была создана наиболее полная теория теплового радиоизлучения Луны, предложены и разработаны методы определения физических свойств ее верхнего покрова по различным характеристикам радиоизлучения. По результатам прецизионных измерений

спектра радиоизлучения Луны были определены физико-механические и структурные характеристики вещества верхнего покрова Луны вплоть до глубин в несколько метров.

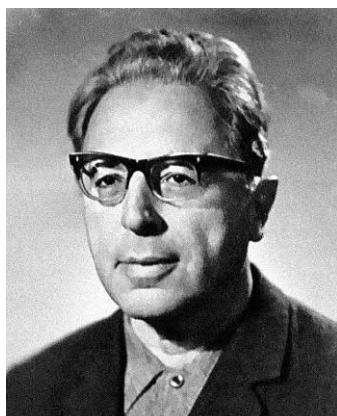
Постепенно лунная тематика подходила к ее логическому завершению, и Троицкий приступил к новым радиоастрономическим исследованиям. Идея создания РСДБ не принадлежит Троицкому (в 1965 г. ее предложили Н. С. Кардашев, Л. И. Матвеенко и Г. Б. Шоломицкий, см. модуль № 7), но он одним из первых практически реализовал такую систему. В период 1965–1981 гг. при его участии была создана аппаратура для РСДБ на частоты 6, 9, 25, 86, 327, 408, 5300 и 22 235 МГц. С 1969 г. были начаты наблюдения космического радиоизлучения на крупных радиотелескопах страны (совместно с другими радиоастрономическими группами).

В результате исследований был впервые измерен угловой размер источника Кассиопея А на декаметровых волнах. На базе «Пущино – Симеиз» проведены наблюдения космических мазеров в линии H_2O с угловым разрешением $\sim 10^{-3}$ минут дуги. Кроме того, были разработаны основы нового научного направления – прецизионной радиоастрометрии, и обозначена сфера ее практических применений: измерение скорости вращения Земли, изучение движения ее полюсов, приливов в земной коре, тектонических и сейсмических проявлений и т. п. Отметим, что в НИРФИ создан радиоинтерферометр независимого приема «Зименки» (РТ-15) – «Старая Пустынь» (РТ-14), оборудованный излучающими системами в диапазонах 327, 610 и 1660 МГц и приемными системами в диапазонах 327 и 610 МГц. Длина базы интерферометра составляет ~ 70 км, пространственное разрешение интерферометра в диапазоне 1660 МГц – $0,5''$. Радиоинтерферометр предназначен для исследований космических сред (межпланетной, межзвездной среды, солнечного ветра) и компактных вспышек солнечного радиоизлучения.

Интенсивную научную работу Троицкий совмещал с активной педагогической деятельностью. Он заведовал кафедрой радиотехники на радиофизическом факультете в ГГУ им. Н. И. Лобачевского с 1953 по 1960 г. и с 1982 по 1985 г. Троицкий читал спецкурсы для студентов 4-го и 5-го курсов, руководил семинаром, проводил занятия в лабораториях кафедры, руководил курсовыми и дипломными работами. Он уделял значительное внимание работе с аспирантами

и воспитанию молодых научных сотрудников. Его научную школу составили: А. Г. Кисляков, В. Б. Цареградский, Н. М. Цейтлин, В. Н. Никонов, В. Д. Кротиков, В. А. Алексеев, В. М. Плечков, А. Ф. Крупнов, В. А. Скворцов, Ю. Г. Матвеев и др.

Научная школа всеволновой астрономии И. С. Шкловского. В 1953 г. выдающийся астрофизик-теоретик XX в., член-корреспондент АН СССР Иосиф Самуилович Шкловский (1916–1985) организовал и возглавил отдел радиоастрономии в ГАИШ, который быстро превратился в отдел всеволновой астрономии. Здесь он создал научную астрофизическую школу, среди воспитанников которой известные ученые, академики, члены-корреспонденты РАН, руководители крупных научных учреждений, отделов, лабораторий.



И. С. Шкловский

В 1938 г. Шкловский окончил физический факультет МГУ. В 1944 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Электронная температура в астрофизике», а в 1948 г. – докторскую диссертацию, посвященную теории солнечной короны. С 1946 г. Шкловский приступил к исследованиям механизма радиоизлучения Солнца. Он показал, что солнечное радиоизлучение содержит две составляющие, имеющие различную природу – тепловое радиоизлучение спокойного Солнца и спорадическое радиоизлучение, связанное с плазменными колебаниями. Его работы, наряду с работами В. Л. Гинзбурга и Д. Мартина, позволили построить изотермическую модель солнечной атмосферы, на основе которой в настоящее время разработана теория радиоизлу-

чения спокойного Солнца. С учетом этой модели был сделан фундаментальный вывод о том, что источником радиоизлучения Солнца являются внешние слои его атмосферы – хромосфера и корона.

Шкловский выполнил ряд работ, заложивших основы радиоспектроскопии Галактики. Прежде всего, он рассчитал радиолинию дейтерия на волне 91,6 см, а также две радиолинии азота на волнах 15 и 30 м с чрезвычайно малой вероятностью перехода. Тогда же Шкловский пришел к другому важному выводу о возможности наблюдения радиолиний межзвездных молекул. Он рассчитал частоту и интенсивность линии гидроксила OH (длина волны 18 см), но в то время наблюдательные средства не позволили ее обнаружить, и она была открыта только в 1963 г. Вскоре в линиях гидроксила был обнаружен эффект космического мазера, а источники мазерного излучения оказались тесно связанными с процессами звездообразования (на что также впервые указал Шкловский в 1966 г.).

В начале 1950-х гг. трудами Гинзбурга и его сотрудников была развита количественная теория синхротронного излучения. Серьезной трудностью ее применения к объяснению нетеплового радиоизлучения Галактики Шкловский считал то обстоятельство, что магнитные поля должны быть связаны с облаками межзвездного газа, который образует плоскую составляющую, тогда как нетепловая составляющая радиоизлучения представляет собой сферическую систему. Однако, после того как С. Б. Пикельнер в 1952 г. показал, что магнитные поля локализованы не только в облаках межзвездного газа, но и в межоблачной среде, – эта трудность была снята. К этому же периоду относится очень важная работа Шкловского, объединяющая единым механизмом излучения радио- и оптический спектр Крабовидной туманности – остатка взрыва сверхновой, и аналогичное исследование по ближайшей радиогалактике Дева А.

Открытие квазаров в 1963 г. стимулировало ряд работ Шкловского, посвященных изучению этих важнейших объектов астрофизики. Уже в 1963 г. он высказал гипотезу о переменности оптического излучения квазаров, подтвержденную позже. В серии работ 1963–1964 гг. Шкловский показал, что химический состав квазаров тождественен солнечному. В 1965 г. он предсказал переменность радиоизлучения активных ядер галактик и квазаров и развил теорию этого эффекта, которая в дальнейшем была полностью подтверждена наблюдениями.

В 1965 г. было открыто фоновое реликтовое радиоизлучение. Важную роль в установлении природы этого излучения сыграла работа Шкловского (1966 г.), в которой он объяснил аномальную населенность энергетических уровней молекулы циана в межзвездной среде воздействием реликтового излучения в миллиметровом диапазоне и предложил метод определения температуры реликтового излучения по интенсивности оптических молекулярных линий межзвездного газа.

В 1953–1954 гг. Шкловский прочел первый в нашей стране курс по радиоастрономии на астрономическом отделении МГУ. Слушателями его, наряду со студентами, были научные сотрудники ряда учреждений Москвы, начинающие заниматься радиоастрономией. Вот как об этом событии отзывался Ю. Н. Парицкий: «Удивительными были курсы И. С. по радиоастрономии 1953–1954 гг. Дело было не только в новизне предмета, но и форме его преподавания. Во-первых, И. С. впервые... представил практически весь наблюдательный материал по радиоастрономии, демонстрируя через эпидиаскоп “живые” наблюдения того времени. Во-вторых... он не только перечислил все попытки объяснить наблюдения, но и дал свое, более глубокое объяснение, на ходу создавая то, что потом начали называть “радиоастрономией” в широком смысле слова».

На астрономическом отделении МГУ начал работу учебный семинар по радиоастрономии под руководством И. С. Шкловского и А. Е. Саломоновича. Этот семинар, в работе которого принимали участие радиофизики и астрономы, стал хорошей школой и для тех, и для других. Среди первых участников семинара были такие известные ныне радиоастрономы, как Ю. Н. Парицкий, Н. С. Кардашев, Н. С. Соболева и др. Таким образом, в ГАИШ была создана эффективная база для серьезного развития радиоастрономических исследований.

Шкловский считал необходимым проводить исследования астрономических объектов во всех диапазонах электромагнитных волн. С этой целью он создал в 1953 г. в ГАИШ отдел радиоастрономии [39]. В 1955 г. в него был зачислен В. Г. Курт, в 1956 г. – В. И. Мороз, позже – В. Ф. Есипов, Г. Б. Шоломицкий, Т. А. Лозинская, В. Н. Курильчик, М. И. Пащенко, В. И. Слыщ, Л. М. Гиндилис и др. Это – первое поколение сотрудников отдела, большинство из которых были непосредственными учениками И. С. Шкловского. В дальнейшем

В. И. Мороз создал группу инфракрасной астрономии, В. Г. Курт занялся внеатмосферной астрономией, Н. С. Кардашев, В. И. Слыши, Г. Б. Шоломицкий, В. Н. Курильчик, М. И. Пащенко посвятили себя радиоастрономии, П. В. Щеглов и Т. А. Лозинская – оптической интерферометрии, В. Ф. Есипов – оптической спектроскопии, Л. М. Гиндилис – проблеме SETI.

Несмотря на большой вклад в развитие радиоастрономии, ГАИШ не имел своего радиотелескопа, и его сотрудники вынуждены были проводить наблюдения на антennaх, принадлежащих другим учреждениям. Проблема была частично разрешена, когда ГАИШ принял участие в сооружении радиотелескопа РАТАН-600, благодаря чему получил право на организацию там собственной наблюдательной базы. В его разработке от ГАИШ принимали участие И. С. Шкловский, Н. С. Кардашев, Л. М. Гиндилис и др.

В 1966 г. Шкловский получил предложение организовать и возглавить отдел астрофизики в ИКИ АН СССР. Это открывало широкие перспективы прежде всего для развития исследований по космической тематике. В то же время Шкловский считал, что космические исследования должны развиваться в единстве с наземными наблюдениями. Тем самым было решено оставить часть отдела в ГАИШ, сохранив с ним тесные связи. Вместе с Шкловским в ИКИ перешли ведущие сотрудники отдела радиоастрономии ГАИШ Кардашев, Мороз, Курт, Слыши.

8.5. Эволюция радиофизической школы МПГУ

В середине XX в. на физическом факультете МПГУ (тогда МГПИ им. В. И. Ленина) работали известные физики – И. Е. Тамм, Е. М. Лифшиц, Г. С. Ландсберг. Под их влиянием развернулись научные исследования в области радиофизики. Кафедра общей и экспериментальной физики (КОЭФ) была образована в МГПИ в 1938 г.

Становление радиофизической научной школы МГПИ связано с именем Н. Н. Малова, его сотрудников и учеников. Николай Николаевич Малов (1903–1990) в 1927 г. окончил физико-математический факультет МГУ. После этого он работал в Государственном рентгеновском институте, а также в Московской магнитной лаборатории, которой руководил В. К. Аркадьев.



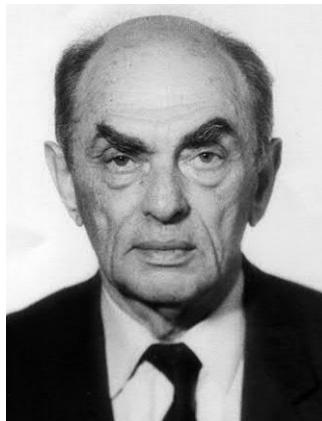
Н. Н. Малов

С 1933 г. научная деятельность Малова была связана с МГПИ, в котором он вырос как преподаватель и как ученый – доцент, профессор, заведующий КОЭФ (с 1942 по 1954 г. и с 1958 по 1969 г.). Научные интересы Малова лежали в области физики колебаний и волн: он был одним из учеников В. К. Аркадьева, который, в свою очередь, входил в научную школу П. Н. Лебедева. Там разрабатывались методы генерации и исследования электромагнитных волн миллиметрового диапазона. В годы войны Маловым вместе с Е. М. Студенковым были получены результаты, которые легли в основу теории распространения СВЧ-колебаний в волноводах.

После создания Проблемной радиофизической лаборатории (ПРФЛ) Малов в течение 10 лет был ее научным руководителем. По воспоминаниям коллег он был широко эрудированным, доброжелательным, в высшей степени интеллигентным человеком и первоклассным специалистом в области физики СВЧ-колебаний. Немудрено, что Малов воспитал целую плеяду учеников, среди которых одним из наиболее талантливых был Е. М. Гершензон.

Евгений Михайлович Гершензон (1930–2001) в 1966 г. защитил докторскую диссертацию, а с 1969 г. заведовал КОЭФ МПГУ. Он – известный ученый в области радиофизики, лауреат Государственной премии СССР 1980 г. и высококвалифицированный препода-

ватель, инициатор создания и один из авторов широко известного комплекта учебников по физике для педагогических вузов – «Курса общей физики».



Е. М. Гершензон

Гершензон вел большую работу и по подготовке научных кадров. Им было подготовлено 43 кандидата и 7 докторов наук. За успехи в организации научно-методической работы и развитии вузовского физического образования в нашей стране он был избран членом-корреспондентом РАО.

Научная школа КОЭФ всегда работала над самыми актуальными проблемами радиофизики в стране и в мире. Довоенный период и первые послевоенные годы связаны с научными исследованиями в области физики СВЧ-колебаний. В 1950-х гг. в вузах СССР формировались коллективы проблемных лабораторий, работающие под эгидой ведущих министерств ВПК. В это время коллектив КОЭФ пополнили молодые талантливые ученые (прежде всего, В. С. Эткин и Е. М. Гершензон). По их инициативе и при участии Н. В. Александрова (впоследствии первого заместителя министра просвещения РСФСР) в 1959 г. на физическом факультете МГПИ открылась Проблемная радиофизическая лаборатория (ПРФЛ). Вскоре она стала крупнейшим научным подразделением в педагогических вузах СССР.

Дальнейшее развитие НШ КОЭФ МПГУ происходило в рамках ПРФЛ. В конце 1950-х – начале 1960-х гг. сотрудниками ПРФЛ был

получен выдающийся научно-технический результат. Под руководством Гершензона и Эткина был создан первый в СССР *малошумящий параметрический усилитель СВЧ на полупроводниковых диодах* (в 1983 г. это достижение было отмечено Государственной премией СССР), предложены основы его расчета, сконструированы и реализованы несколько типов усилителей, ставших базовыми для промышленности. Кроме того, Гершензоном и Эткиным была написана первая в мире монография по полупроводниковым параметрическим усилителям.

В 1960-х и 1970-х гг. фронт исследований научной школы заметно расширился. Значительное внимание уделялось изучению физических процессов в предельно очищенных полупроводниках. Коллектив ПРФЛ проводил исследования слабосвязанных состояний в них с использованием радиофизических методов и представлений. Так, в ПРФЛ были выполнены теоретические и экспериментальные исследования магниторезонансных явлений в монокристаллических материалах – германии (Ge), кремнии (Si), антимониде индия (InSb) и других материалах.

Оригинальность исследовательского подхода, использовавшегося в ПРФЛ, состояла в том, что частоты, на которых выполнялись эксперименты, постепенно росли, достигнув самых высоких значений в радиодиапазоне (длины волн 3–0,5 мм). Это стало возможным благодаря использованию спектроскопии, основанной на применении уникальных ЛОВ. Изучались резонансные эффекты (циклотронный и электронный парамагнитный резонансы), спектры примесных и экситонных состояний в полупроводниках, проводились не имевшие аналогов исследования примесной фотопроводимости полупроводников. Именно в ПРФЛ была использована одна из первых в мире установок для таких исследований при сверхнизких (до 0,3 К) температурах.

Исследования параметрических устройств постепенно переросли в цикл работ по созданию сверхмалошумящих СВЧ-приемников – радиометров, предназначенных для радиоастрономии и дистанционного мониторинга Земли и Мирового океана. Эти работы проводились совместно с ИКИ РАН. Один из отделов этого института был образован сотрудниками ПРФЛ во главе с Валентином Семеновичем Эткиным (1931–1995) – выдающимся ученым в области радиофизики и океанологии. С 1968 г. он заведовал отделом радиофизики ИКИ, а с 1974 г. – отделом прикладной космической физики этого института, совмещая

работу с преподаванием на КОЭФ и руководством радиофизическим сектором ПРФЛ.



В. С. Эткин

В ИКИ Эткин создал новое научное направление – дистанционное зондирование (активное и пассивное) поверхности Земли из космоса радиофизическими методами. Главное задачей стало изучение поверхности океана с целью выявления внутриокеанических процессов по их поверхностным проявлениям. Исследования потребовали создания ряда уникальных комплексов радиометров для самолетных и корабельных исследований подстилающих поверхностей (земли, снежного покрова, морской поверхности и т. д.). В их числе – единственный в своем роде комплекс криогенных приемников гелиевого уровня охлаждения (широкополосных джозефсоновских радиометров) с предельно возможной чувствительностью, предназначенный для использования на борту корабля. Разработанные радиометры успешно использовались в ряде глобальных экспериментов по мониторингу подстилающих поверхностей.

Спектроскопические исследования полупроводников привели Гершензона и его сотрудников к применению этих методов при изучении сверхпроводников и сверхпроводниковых структур. Исследования приобрели прикладную направленность и стали еще более успешными.

Это научное направление возглавил ученик Гершензона Григорий Наумович Гольцман. В настоящее время он является заведующим КОЭФ и научным руководителем учебно-научного радиофизического центра (УНРЦ), пришедшего на смену ПРФЛ.

Важным достижением стало обнаружение, теоретическое обоснование и детальное изучение эффектов, связанных с разогревом электронов в сверхпроводниках, находящихся в резистивном состоянии. Наряду со значительной фундаментальной ценностью, указанный эффект находит многочисленные практические применения. В частности, на его основе созданы не имеющие аналогов приемные устройства, использующие новую технологию когерентного детектирования терагерцового излучения.



Г. Н. Гольцман

В настоящее время к одному из основных направлений исследований научной школы КОЭФ относятся *неравновесные явления и пространственно неоднородные процессы в сверхпроводниковых nano-структурах* – ультратонких пленках толщиной в несколько атомных слоев, узких или коротких сверхпроводящих полосках и мостиках.

Результаты, полученные научной школой и имеющие признанный мировым научным сообществом высокий уровень, стали следствием фундаментальных исследований неравновесных релаксационных явлений в тонких сверхпроводящих пленках, проводившихся в ней в 1980-х гг. На этой основе был разработан смеситель на горячих электронах (1990 г.). Только через три года появилась первая конкурирующая публикация из Йельского университета (США) о сверхпроводниковом смесителе на горячих электронах с диффузионным каналом охлаждения.

Эти фундаментальные исследования стали основой ряда прикладных проектов. Один из них – создание рекордных по характеристикам малошумящих и широкополосных смесителей терагерцового диапазона частот, требующих малой мощности гетеродина, а также однофотонных детекторов инфракрасного диапазона, сочетающих пикосекундное быстродействие, высокую квантовую эффективность и рекордно малое число ложных срабатываний. Это позволяет осуществить практическое применение приборов, созданных на базе сверхпроводниковых наноструктур в ряде областей науки и техники:

- *терагерцовая астрономия* (исследование звездообразования в молекулярных облаках, пылевых туманностях, остатках сверхновых);
- *радиофизика* (дистанционное зондирование верхних слоев атмосферы в субмиллиметровом диапазоне для мониторинга гетерогенных химических реакций и наличия примесей-катализаторов, предположительно отвечающих за состояние озонового слоя и глобальное потепление климата);
- *оптика* (создание новых типов сверхчувствительных приемников, счетчиков фотонов и приемных устройств для квантовой криптографии и других применений в волоконных линиях связи инфракрасного диапазона и новых типов устройств для нанофотоники на основе наноструктурированных оптических волноводов из оптически нелинейных материалов и интеграции их со сверхпроводниковыми счетчиками фотонов);
- *электроника* (разработка приборов для передачи и измерения запутанных фотонных состояний с целью создания квантового компьютера).

Созданные в МПГУ НЕВ-смесители используются Smithsonian Center for Astrophysics (Смитсониевским астрофизическим центром Гарвардского университета, США) в терагерцовой обсерватории, расположенной в пустыне Атакама (Чили). В течение нескольких лет там работал единственный в мире наземный терагерцовый телескоп с супергетеродинным приемником на частотах 1,03, 1,26 и 1,46 ТГц. Кроме того, НЕВ-смесители были установлены на телескопе космического базирования «Гершель» (Herschel Space Observatory). Отметим, что НЕВ-смесители (диапазон частот 1,5–1,9 ТГц) для этого телескопа были изготовлены МПГУ совместно с Чальмерским технологическим университетом (Швеция).



Рис. 65. Гетеродинный спектрометр TELIS

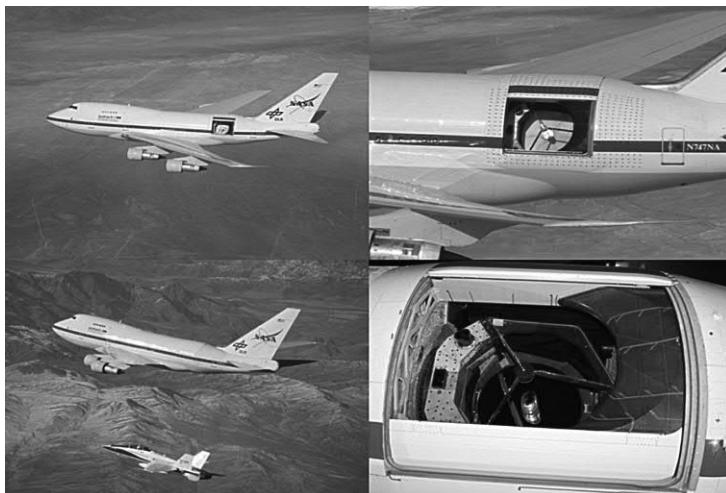


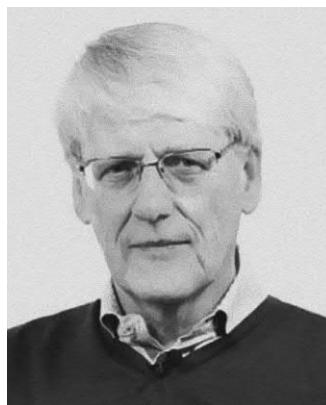
Рис. 66. Стратосферная обсерватория SOFIA

Геофизическое использование НЕВ-смесителей планируется в рамках проекта TELIS (Terahertz Limb Sounder). TELIS – это гетеродинный спектрометр для дистанционного исследования атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне частот 450–650 ГГц (рис. 65).

В этом проекте идет совместная работа МПГУ с *Институтом технологии космического зондирования* (Берлин, Германия). В сотрудничестве с этим же институтом ведутся исследования в рамках проекта SOFIA (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy – Стратосферная обсерватория для ИК астрономии) с терагерцовыми каналом, равным 4,7 ТГц. Эта обсерватория базируется на борту самолета (рис. 66).

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы SSPD (Superconducting Single Photon Detector), работающие на основе эффекта электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках, не имеют принципиальных ограничений со стороны высоких частот и демонстрируют высокую чувствительность. Однофотонные ИК-детекторы удалось успешно использовать для функциональной и технологической диагностики КМОП СБИС последнего поколения путем детектирования излучения горячих электронов в каналах переключающихся полевых транзисторов.

В модуле № 7 было рассказано о проекте «Миллиметрон». Одной из фундаментальных задач, стоящих на пути его реализации, является разработка радиоастрономических наблюдательных приемных систем для телескопа космического базирования. В разработках этих систем активно участвует научная радиофизическая школа КОЭФ.



Т. Клапвик

В 2013 г. в МПГУ была создана лаборатория квантовых детекторов, в которой разрабатываются технологии создания ультратонких сверхпроводниковых пленок для последующего производства на их основе

быстродействующих и высокочувствительных детекторов электромагнитного излучения видимого, ИК и терагерцового диапазонов. Руководителем лаборатории квантовых детекторов (в рамках мегагранта Правительства РФ) является Теунис Клапвик (р. 1948) – специалист в области неравновесной сверхпроводимости, профессор квантовых наносистем Технологического университета г. Делфт (Нидерланды).

Он внес существенный вклад в теорию, которая теперь известна как теория Блондера – Тинкхама – Клапвика, в совершенствование болометров на эффекте электронного разогрева, а также сверхпроводниковых туннельных переходов для гетеродинного детектирования в диапазоне частот 300 ГГц – 5 ТГц. Эти исследования нашли применение в международных научных проектах – космическом телескопе «Гершель» и ALMA.

В последние годы сотрудниками радиофизической школы МПГУ проводятся исследования, направленные на создание действующего прототипа квантово-криптографической системы связи (предельная дальность 320 км) с использованием волноводных сверхпроводящих однофотонных детекторов (WSSPD) на чипе.

Расскажем о специфике подготовки научных кадров в рассматриваемой научной школе. В коллективе развиваются традиции многоступенчатой подготовки научных кадров, заложенные Гершензоном. Профессора и доценты привлекают к научным исследованиям студентов. Лучшие из студентов и магистров направляются в аспирантуру и привлекаются к выполнению научно-исследовательских работ. Аспиранты и магистранты попадают в коллектив, где под руководством опытных научных сотрудников осваивают современные методы исследований сверхпроводниковыхnanoструктур, технологические процессы их производства, овладевают методами обработки экспериментальных данных и теоретического анализа. Параллельно идет разработка фундаментальной или прикладной задачи под руководством профессора. Современная традиция, сложившаяся в научной школе, – организация зарубежных стажировок в научно-исследовательских центрах мирового уровня (Гарвардском, Бостонском университетах, Университете г. Баффало, Институте планетных исследований в Берлине и др.) для молодых ученых и аспирантов.

Важной особенностью научной школы является совместная работа коллектива УНРЦ с малыми инновационными компаниями. При этом

были созданы объекты инновационной инфраструктуры – малые компании «Сверхпроводниковые нанотехнологии» («Сконтел») и «Микроволновые технологии обогащения и сортировки руд» (ООО «Мирос»).

В заключение отметим, что за более чем полувековой период деятельности научной радиофизической школы МПГУ из ее стен вышли многие известные ученые-радиофизики. Среди них доктора физико-математических наук: Ю. А. Гурвич – специалист в области теории резонансных явлений в полупроводниках; Л. Б. Литвак-Горская, А. П. Мельников – специалисты в области физики полупроводников; В. А. Ильин – специалист в области прикладной сверхпроводимости, автор первого корабельного комплекса широкополосных радиометров гелиевого уровня охлаждения; Ю. Л. Хотунцев, А. Н. Мансуров – специалисты в области СВЧ-радиофизики; И. А. Струков – выдающийся астрофизик-экспериментатор, фактический первооткрыватель анизотропии реликтового излучения и др.

Заключение

Авторы модульного курса постарались представить материал таким образом, чтобы Вы смогли пройти тем путем, каким шла радиофизическая наука в лице своих выдающихся творцов. Тем самым у нас появляется возможность реконструировать (хотя бы в общих чертах) историю формирования и развития этой науки. Конечно, отразить во всех деталях эволюцию радиофизики в рамках учебного курса не представляется возможным. Это связано с тем, что радиофизика – дисциплина, охватывающая столь широкий круг научных проблем, что даже специалистам затруднительно охватить все ее разделы и направления. В этом контексте уместно привести мысль М. А. Миллера. «Уже через два-три преемственных поколения (каждое по семь – десять лет) радиофизика стала не просто “физикой для радио и радио для физики” (это образное определение принадлежит Сергею Михайловичу Рытову), а выманила за пределы, отпущеные ей при рождении: она проникла в акустику, в гидро-, гео- и астрофизику, в газо- и плазмодинамику, в твердотелье и уж конечно во все видимые и невидимые диапазоны частот электромагнетизма...» Действительно, трудно найти такое научное направление, в котором не использовались бы представления, методы и идеи радиофизики.

Учитывая это, определить предмет радиофизики и ее истории очень трудно. Понимая это, авторы в модульном курсе предложили лишь один из возможных вариантов построения истории радиофизики. Предлагаемый подход заключается в изучении истории радиофизики в контексте Нобелевских премий. При этом, естественно, не должны оставаться без внимания основополагающие радиофизические исследования, не удостоенные этой научной награды (в частности, значительный историко-научный фрагмент, посвященный истории отечественной радиофизики).

Как уже неоднократно подчеркивалось, в радиофизике можно выделить четыре магистральных направления: радиотехника, радиоспектроскопия, информационные технологии (квантовая электроника), радиоастрономия. История развития этих радиофизических направлений с учетом их современных достижений составляет основу материала, который был использован при изложении истории радиофизики. Однако при рассмотрении эволюции важнейших радиофизических идей

нельзя пройти мимо истории других направлений, история развития которых не рассматривалась в данном пособии. Речь идет, прежде всего, об истории статистической радиофизики.

Кроме того, сложность определения предмета радиофизики и ее истории проявляется в том, что многие физические исследования в настоящее время проводятся на стыке различных наук. И радиофизика в этом отношении представляет собой многогранную научную дисциплину, которая как развивает свои собственные методы, так и «экспортирует» эти методы в другие области знания. Таким образом, к изучению истории радиофизики необходимо применять комплексный подход. При этом важно обратить внимание на следующие аспекты этого подхода:

- историю радиофизики необходимо изучать в совокупности трех аспектов: научного, технического, социокультурного;
- необходимо знакомиться с научными биографиями творцов радиофизики (в том числе лауреатов Нобелевской премии в этой области);
- следует проводить анализ научной, научно-популярной, учебной литературы, периодики и материалов сети Интернет, посвященных истории радиофизики и ее современным достижениям;
- историю радиофизики нужно рассматривать как самостоятельное направление истории и методологии физики и как учебную дисциплину, используя при этом знания из курсов теоретической физики, радиофизики, физики твердого тела.

Работа была выполнена при поддержке мегагранта (договор № 14.B25.31.0007 от 26.06.2013 г.).

Приложения

1. Методические рекомендации к изучению модульного курса

Модульный курс знакомит студентов с основными историческими этапами развития радиофизики как науки и ее современными достижениями. В нем рассматриваются история становления магистральных радиофизических направлений, научная деятельность ряда выдающихся ученых-радиофизиков (в том числе лауреатов Нобелевской премии) и отечественных научных школ по радиофизике.

Цель курса – формирование у студентов представлений об истории развития радиофизики и ее современных достижениях, эволюции основополагающих идей и методов радиофизики.

Задачи курса:

- знакомство студентов с научными биографиями творцов радиофизики, экспериментами, оказавшими влияние на развитие этой науки, практическими применениями радиофизических знаний;
- развитие познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей студентов при работе с различными источниками информации в сети Интернет, с учебной, научно-популярной литературой, подготовке сообщений, докладов, рефератов, компьютерных презентаций и выступлений с ними на семинарах и учебных конференциях;
- осознание студентами места и роли радиофизики в истории науки, а также в развитии человеческой цивилизации в XXI в.

Содержание курса

Содержание модульного курса можно условно разделить на три логических блока: «История магистральных направлений радиофизики», «История развития направлений, смежных с радиофизикой» и «История отечественной радиофизики». Кратко обсудим их содержание.

В табл. 1 представлены обязательные для изучения элементы блока «История магистральных направлений радиофизики». Они условно распределены на пять направлений: «Введение в историю радиофизики», «Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники», «Исторический обзор развития радиоспектроскопии» «Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники», «Исторический обзор развития радиоастрономии».

ТАБЛИЦА 1

Блок «История магистральных направлений радиофизики»

Направления истории радиофизики	Элементы содержания
Введение в историю радиофизики	Предмет, методы и аспекты радиофизики. Теоретические и экспериментальные основания радиофизики. Периодизация этапов развития радиофизики. Нобелевские премии по радиофизике
Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники	Изобретения А. С. Попова, Г. Маркони и К. Ф. Брауна в области беспроволочной телеграфии. Радиотехника незатухающих колебаний (работы Н. Теслы, У. Дудделя, В. Пуулсена, В. П. Вологдина). Развитие вакуумной электроники. Достижения Т. Эдисона, Дж. Флеминга, Л. де Фореста, Э. Армстронга и др. Открытие ионосферы. Достижения современной радиотехники
Исторический обзор развития радиоспектроскопии	Метод молекулярных и атомных пучков. Опыты Штерна. Разработка И. Раби резонансного метода измерений магнитных свойств атомных ядер. Создание А. Каstлером метода двойного резонанса и метода оптической накачки. Открытие ЭПР и ЯМР. Применение ЯМР-спектроскопии. Развитие микроволновой спектроскопии. Открытия У. Лэмба и П. Куша. СВЧ-приборы и их применение в различных областях науки и техники
Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники	Изобретение мазера и лазера. Создание точечного транзистора (группа У. Шокли), интегральной схемы (изобретения Дж. Килби и Р. Нойса). Закон Мура и рождение микролэлектроники. Гетероструктуры и приборы на их основе. Работы Г. Крёмера и Ж. И. Алфёрова. Современные направления квантовой электроники: сверхпроводниковая электроника, фотоника, спинtronика, квантовая теория информации
Исторический обзор развития радиоастрономии	История открытия К. Янским космического радиоизлучения. Создание Г. Ребером первого радиотелескопа. Разработка М. Райллом метода апертурного синтеза. Крупнейшие радиотелескопы и РСДБ в мире. Модель расширяющейся Вселенной. Гипотеза Г. А. Гамова о существовании реликтового излучения. История открытия реликтового излучения (научные исследования А. Пензиаса и Р. Вильсона) и его анизотропии (научные исследования Дж. Мазера и Дж. Смута). Эксперименты «Реликт-1», «СОВЕ», «WMAP». История обнаружения квазаров, пульсаров и двойных пульсаров: модели генерации излучения, примеры объектов. Радиоастрономия и проблема SETI

В табл. 2 представлены обязательные для изучения элементы блока «История развития направлений, смежных с радиофизикой»,

которые условно можно разделить на два направления: «Лазерная спектроскопия» и «Физика и техника терагерцового излучения». Приведем их содержание.

ТАБЛИЦА 2

Блок «История развития направлений, смежных с радиофизикой»

Смежные с радиофизикой направления	Элементы содержания
Лазерная спектроскопия	Физические основы, примеры научного и технического использования лазерной спектроскопии. Методы лазерного охлаждения атомов (работы В. С. Летохова, С. Чу, У. Филлипса, К. Коэн-Таннуджи). Открытие и исследование конденсации Бозе – Эйнштейна в атомарных газах. Прецизионная лазерная спектроскопия и ее применение. Метод частотных гребенок. Результаты, полученные Р. Глаубером, Дж. Холлом и Т. Хеншем
Физика и техника терагерцового излучения	Источники, приемники и области применения терагерцового излучения. Эффект разогрева электронов в тонких сверхпроводящих пленках. НЕВ-смесители и их использование в геофизике, радиофизике, дистанционном зондировании, астрофизике. Терагерцовая астрономия

В табл. 3 приведены обязательные для изучения элементы блока «История отечественной радиофизики».

ТАБЛИЦА 3

Блок «История отечественной радиофизики»

Исторический обзор развития отечественной радиофизики	РОБТиТ, Нижегородская радиолаборатория, Центральная радиолаборатория – первые отечественные радиофизические центры. Радиофизические научные школы в области теории нелинейных колебаний, радиолокации и радиоастрономии: история формирования, основополагающие результаты, ученики, место и роль в истории науки. Выдающиеся отечественные радиотехники и радиофизики: биографии и научные исследования
Эволюция радиофизической школы МПГУ	История образования ПРФЛ МПГУ. Научная деятельность Н. Н. Малова, В. С. Эткина, Е. М. Гершензона и Г. Н. Гольцмана. Основополагающие результаты, полученные радиофизической научной школой МПГУ

Особенность указанных модулей состоит в том, что в зависимости от учебных целей и состава аудитории можно их изучать как отдельно друг от друга, формируя на их основе отдельные спецкурсы, или полностью, излагая материал всего курса. Отметим, что в УНРЦ МПГУ исследуются актуальные проблемы радиофизики. Естественно, что для студентов и аспирантов радиотехнических и радиофизических вузов представляет значительный интерес изучение истории ее развития, научного наследия выдающихся творцов радиофизики, современных радиофизических проблем, деятельности радиофизических научных школ. В этом контексте модульный курс «История радиофизики» может удачно дополнить основной курс радиофизики, предоставляя студентам возможность расширить свои знания в области истории этой науки, раскрыть межпредметные связи и методологические аспекты радиофизики.

Методы, формы и средства изучения

Предлагаемый курс реализуется в виде мультимедийных лекций, выполненных таким образом, что они могут использоваться для чтения лекций в вузе, для проведения уроков в школе, а также при дистанционном обучении. Методика изложения учебных материалов с помощью мультимедийных лекций достаточно хорошо разработана и активно используется в учебном процессе.

В основу модульного курса положены следующие принципы.

- Изложение ведется на качественном уровне, количественные закономерности приводятся только в необходимых случаях. В содержание учебного материала по радиофизике включены сведения из истории развития радиофизики, сведения, раскрывающие многогранные связи этой науки, сведения о вкладе выдающихся ученых в радиофизику и др.
- Чтение курса ведется с учетом психолого-педагогических особенностей визуального и верbalного восприятия учебного материала обучаемыми. При этом мультимедийное изложение рассчитано на активное участие творческого начала учителя и глубокое «погружение» обучаемых в изучаемый материал.

Занятия по изучению истории радиофизики могут быть организованы как процесс самостоятельной познавательной и творческой деятельности студентов. При этом теоретический материал излагается на мультимедийных лекциях. Развитию самостоятельной деятельности

студентов способствуют семинарские занятия, на которых заслушиваются доклады и сообщения, проводятся дискуссии по итогам выступлений. Выступления студентов с творческими работами (рефератами или компьютерными презентациями) проводятся в рамках учебной конференции. Работа над творческим заданием способствует выработке навыков исследовательской и поисковой работы с литературными источниками, развитию умений выделять главное, анализировать, сравнивать, систематизировать, обобщать и конспектировать учебный материал.

К средствам изучения модульного курса по истории радиофизики относятся: учебные и методические материалы, ПК, мультимедийный проектор, интерактивная доска.

Контроль знаний

Для оценки промежуточных достижений студентов могут быть использованы такие способы, как анализ выполнения творческих работ, результатов проведения промежуточных тестовых заданий. Итоговый контроль знаний и умений студентов можно проводить в форме зачета. Применительно к модульному курсу «История радиофизики» зачет можно выставлять, например, по следующим критериям:

- выполнение итогового теста;
- выступления с докладом или сообщением на семинарах;
- выступление с рефератом или компьютерной презентацией на учебно-научной конференции.

Предлагаемые критерии оценки работы не являются обязательными. Преподаватель может устанавливать другие критерии на основе своего опыта и состава группы.

2. Список рекомендуемой литературы

Модуль № 1. История радиофизики – важнейшее направление истории науки

1. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики: Учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений. – М.: Научтехлитиздат, 2011.
2. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. II. Современные достижения. – М.: Научтехлитиздат, 2014.
3. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. История радиофизики в контексте Нобелевской премии // История науки и техники. – 2009. – № 10. – С. 8–25.
4. Ильин В. А., Кудрявцев В. В. История и методология физики: Учебник для магистров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2014. – С. 410–474.
5. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. I. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976.
6. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. – М.: Физматлит, 2007.
7. Миллер М. А. Избранные очерки о зарождении и взрослении радиофизики в горьковско-нижегородских местах. – Н. Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 1997.
8. Гапонов-Грехов А. В. И в XXI веке в авангарде будет физика // Вестник РАН. – 2003. – Т. 73. – № 1. – С. 28–32.
9. Калинин В. И., Герштейн Г. М. Введение в радиофизику. – М.: ГИТТЛ, 1957.
10. Потемкин В. В. Радиофизика: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1988.
11. Основы радиофизики / Г. В. Белокопытов, К. С. Ржевкин и др.; Под ред. А. С. Логинова. – М.: УРСС, 1996.

Модуль № 2. Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники

1. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики: Учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений. – М.: Научтехлитиздат, 2011.

2. *Григорьян А. Т., Вяльцев А. Н.* Генрих Герц. – М.: Наука, 1968.
3. *Болотовский Б. М.* Оливер Хевисайд. – М.: Наука, 1985.
4. *Горохов В. Г.* Становление радиотехнической теории: от теории к практике на примере технических следствий из открытия Г. Герца // ВИЕТ. – 2006. – № 2.
5. *Родионов В. М.* Зарождение радиотехники. – М.: Наука, 1985.
6. *Коваленко Ю. Я., Стрелов А. Б.* У истоков радиосвязи. – СПб.: Автограф, 1997.
7. *Мигулин В. В.* Зарождение радио и первые шаги радиотехники // 100 лет радио: Сб. / Под ред. В. В. Мигулина и А. В. Гороховского. – М.: Радио и связь, 1995.
8. *Чистяков Н. И.* Начало радиотехники: факты и интерпретация // ВИЕТ. – 1990. – № 1. – С. 128–133.
9. *Крыжановский Л. Н.* История изобретения и исследований когерера // УФН. – 1992. – № 4.
10. *Хромов Л. И.* Рождение радиосвязи: от опытов Г. Герца до опытов А. С. Попова // Радиоэлектроника и связь. – 1997. – № 1 (12).
11. *Бренев И. В.* Изобретение радио А. С. Поповым. – М.: Советское радио, 1965.
12. Изобретение радио. А. С. Попов: Сб. документов и материалов / Под ред. А. И. Берга. – М.: Наука, 1966.
13. Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов (Вып. 1) / Сост. С. М. Рытов. – М.: Изд-во АН СССР, 1948.
14. Из истории изобретения и начального периода развития радиосвязи: Сб. докл. и материалов / Сост. Л. И. Золотинкина, Ю. Е. Лавренко, В. М. Пестриков; Под ред. проф. В. Н. Ушакова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2008.
15. *Сонина Д. Д.* Александр Степанович Попов – наш земляк, наша гордость. – Пермь: Книжный мир, 2007.
16. *Рыбак Дж. П., Крыжановский Л. Н.* Гульельмо Маркони: У истоков беспроводной телеграфии // Электросвязь. – 1994. – № 8. – С. 36–39.
17. *Меркулов В.* Какое радио изобретал Г. Маркони // Радио. – 2007. – № 6. – С. 2–6.
18. *Трибельский Д. Л., Урвалов В. А.* Изобретение радио: действительность и домыслы // ВИЕТ. – 1990. – № 1. – С. 122–128.
19. *Климин А. И., Урвалов В. А.* Столетие электрона и электронного осциллографа // Радиоэлектроника и связь. – 1997. – № 1 (12). – С. 32–11.

Модуль № 3. Исторический обзор развития радиоспектроскопии

1. *Пайс А.* Гении науки. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
2. Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия. Т. 1, 2. – М.: Прогресс, 1992.
3. *Таунс Ч., Шавлов А.* Радиоспектроскопия / Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1959.
4. Радиоспектроскопия: Сб. статей. – М.: Наука, 1973.
5. *Завойский Е. К.* Избранные труды. Электронный парамагнитный резонанс и физика плазмы. – М.: Наука, 1990.
6. Чародей эксперимента. Сборник воспоминаний об академике Е. К. Завойском. – М.: Наука, 1994.
7. Евгений Константинович Завойский (1907–1976). – М.: Наука, 1988.
8. Евгений Константинович Завойский (1907–1976): Материалы к биографии. – Казань: УНИПРЕСС, 1998.
9. Парамагнитный резонанс: Казанская школа радиоспектроскопии. 1944–1971: Сб. статей / Под ред. А. В. Митина. – М.: Атомиздат, 1974.
10. *Сабирова Ф. М.* Казанская школа магнитной радиоспектроскопии // История науки и техники. – 2016. – № 1. – С. 69–79.
11. *Альтишuler Н. С., Кессених А. В., Ларионов А. Л.* Очерки истории Казанской школы магнитной радиоспектроскопии // История науки и техники. – 2016. – № 2. – С. 18–46.
12. *Кессених А. В.* Открытие, исследование и применение магнитного резонанса // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 7. – С. 737–763.
13. *Воронов В. К.* Ядерный магнитный резонанс // СОЖ. – 1996. – № 10. – С. 70–75.
14. *Черепанов В. И.* Резонансные методы исследования вещества // СОЖ. – 1997. – № 9. – С. 86–90.
15. *Ризерфорд Р. К., Лэмб У. Е.* Тонкая структура водородного атома // УФН. – 1951. – Т. 45. – Вып. 12. – С. 553–615.
16. *Каш П.* Магнитный момент электрона (Исторический очерк) // УФН. – 1967. – Т. 93. – Вып. 9. – С. 159–175.
17. *Гершензон Е. М., Голант М. Б., Негирев А. А. и др.* Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Радио и связь, 1985.

18. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: В 2 т. – М.: Физматлит, 2003.
19. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. Техника сверхвысоких частот / Под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1970.
20. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 2. Электровакуумные приборы СВЧ / Под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1972.

Модуль № 4. Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники

1. Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия. Т. 1, 2. – М.: Прогресс, 1992.
2. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. I. – М.: Научтехлитиздат, 2011.
3. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. II. Современные достижения. – М.: Научтехлитиздат, 2014.
4. Донина Н. М. Возникновение квантовой электроники. – М.: Наука, 1974.
5. Бертолотти М. История лазера. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2011.
6. Дианов Е. М. А. М. Прохоров и квантовая электроника // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 2. – С. 677–684.
7. Басов Н. Г., Прохоров А. М. Молекулярный генератор и усилитель // УФН. – 1955. – Т. 57. – № 3. – С. 485–501.
8. Щербаков И. А. К истории создания лазера // УФН. – 2011. – Т. 181. – № 1. – С. 71–78.
9. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике. – М.: Наука, 1988.
10. Сэм М. Ф. Лазеры и их применение // СОЖ. – 1996. – № 6. – С. 92–98.
11. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: Учебное пособие. – М.: Техносфера, 2005.
12. Носов Ю. Парадоксы транзистора // Квант. – 2006. – № 1. – С. 5–8.
13. Гуреева О. Транзисторная история // Компоненты и технологии. – 2006. – № 9. – С. 19–22.
14. Шокли В. Физика транзисторов // УФН. – 1958. – Т. LXIV. – № 1. – С. 155–192.
15. Носов Ю. Р. История рождения микроэлектроники // История науки и техники. – 2015. – № 2. – С. 80–113.

16. *Мухин К. Н., Суставов А. Ф., Тихонов В. Н.* Российская физика Нобелевского уровня. – М.: Физматлит, 2006.
17. *Килби Дж. С.* Возможное становится реальным: изобретение интегральных схем // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 9. – С. 1002–1109.
18. *Джексон Т.* Inside Intel. История корпорации, совершившей технологическую революцию XX века. – М.: Альпина Паблишер, 2013.
19. *Воронов В. К., Подоплелов А. В.* Современная физика: Учебное пособие. – М.: КомКнига, 2005.
20. *Крёмер Г.* Квазиэлектрическое поле и разрывы зон. Обучение электронов новым фокусам // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 9. – С. 1087–1101.
21. *Кейси Х., Паниши М.* Лазеры на гетероструктурах. – М.: Мир, 1984.
22. *Басов Н. Г., Крохин О. Н., Попов Ю. М.* Генерация, усиление и индикация инфракрасного и оптического излучений с помощью квантовых систем // УФН. – 1960. – Т. 72. – Вып. 2. – С. 161–209.
23. *Корольков В. И.* От транзистора и гетеролазера к точечным квантовым приборам (Начало пути) // Окно в микромир. – № 1. – 2000. – С. 14–19.
24. *Сугано Т.* Введение в микроэлектронику. – М.: Мир, 1988.
25. *Носов Ю. Р.* Страсти по лазеру (к полувековому юбилею инженерного лазера) // История науки и техники. – 2012. – № 12. – С. 51–90.
26. *Алфёров Ж. И.* История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32. – № 1. – С. 3–18.
27. *Конаев Ю. В.* Лауреаты Нобелевской премии 2000 года // Природа. – № 1. – 2001. – С. 3–7.
28. *Либенсон М. Н.* Фундаментальные исследования в области информационных и коммуникационных технологий // УФН. – 2001. – Т. 7. – № 9. – С. 75–82.
29. *Алфёров Ж. И.* Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологиях // УФН. – 2002. – Т. 172. – № 29. – С. 1068–1086.
30. *Демиховский В. Я.* Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // СОЖ. – 1997. – № 5. – С. 80–86.
31. *Гинзбург В. Л., Андрюшин Е. А.* Сверхпроводимость. – М.: Альфа-М, 2006.

32. Ильин В. А., Кудрявцев В. В. Физические основы сверхпроводимости // Физика в школе. – 2015. – № 2. – С. 5–22.
33. Ильин В. А., Исаев Д. А., Кудрявцев В. В. Прикладная сверхпроводимость. Ч. I // Физика в школе. – 2015. – № 3. – С. 3–16.
34. Лихарев К. К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. – М.: Наука, 1985.
35. Гольцман Г. Н. Эффекты Джозефсона в сверхпроводниках // СОЖ. – 2000. – № 4. – С. 96–102.
36. Корнев В. К. Эффект Джозефсона и его применение в сверхпроводниковой электронике // УФН. – 2001. – Т. 7. – № 8. – С. 83–90.
37. Носов Ю. Р. История оптоэлектроники: общая характеристика // Исследования по истории физики и механики. 2006. – М.: Наука, 2007. – С. 325–339.
38. Као Ч. Песок давно минувших дней шлет в будущее голоса людей // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 12. – С. 1350–1356.
39. Дианов Е. М. На пороге эра-эры // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 8. – С. 659–663.
40. Шевченко В. В. Физические основы современных линий передач сигналов // СОЖ. – 1997. – № 3. – С. 100–106.
41. Роузелл Дж. М. Материалы для фотоники // В мире науки. – 1986. – № 12. – С. 86–98.
42. Кособукин В. А. Фотонные кристаллы // Окно в микромир. – 2002. – № 4. – С. 4–9.
43. Жувикин Г. А. Лабиринты фотонных кристаллов // Компьютерра. – 2001. – № 30.
44. Бойл У. ПЗС – расширение человеческого зрения // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 12. – С. 1348–1349.
45. Смит Дж. История изобретения приборов с зарядовой связью // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 12. – С. 1357–1362.
46. Самардак А. С., Огнев А. В. Спинtronика: физические принципы, устройства, перспективы // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 4. – С. 70–80.
47. Никитин С. А. Гигантское магнитосопротивление // СОЖ. – 2004. – № 2. – С. 92–98.
48. Ферм А. Происхождение, развитие и перспективы спинtronики // УФН. – 2008. – Т. 178. – № 12. – С. 1336–1348.
49. Грюнберг П. А. От спиновых волн к гигантскому магнитосопротивлению и далее // УФН. – 2008. – Т. 178. – № 12. – С. 1349–1358.

50. *Пенроуз Р.* Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. – 4-е изд. – М.: ЛКИ, 2011.
51. *Холево А. С.* Квантовая информатика: прошлое, настоящее, будущее // В мире науки. – 2008. – № 7. – С. 69–75.
52. *Валиев К. А., Кокин А. А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – 2-е изд. – М.: ИКИ, 2004.
53. *Белокуров В. В., Тимофеевская О. Д., Хрусталев О. А.* Квантовая телепортация – обыкновенное чудо. – Ижевск: РХД, 2000.
54. *Ароши С.* Управление фотонами в ящике и изучение границы между квантовым и классическим // УФН. – 2014. – Т. 184. – № 10. – С. 1068–1088.
55. *Монро К., Уайнленд Д.* Ионы для квантовых компьютеров // В мире науки. – 2008. – № 11. – С. 72–79.
56. *Вайнленд Дж. Д.* О суперпозиции, перепутанности и о том, как вырастить кота Шредингера // УФН. – 2014. – Т. 184. – № 10. – С. 1089–1100.

Модуль № 5. Исторический обзор развития лазерной спектроскопии

1. *Кудрявцев В. В., Ильин В. А.* Избранные вопросы истории радиофизики. Т. II. Современные достижения. – М.: Научтехлитиздат, 2014.
2. *Мухин К. Н., Суставов А. Ф., Тихонов В. Н.* Российская физика Нобелевского уровня. – М.: Физматлит, 2006.
3. *Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия.* Т. 1, 2. – М.: Прогресс, 1992.
4. *Летохов В. С., Чеботаев В. П.* Принципы нелинейной лазерной спектроскопии. – М.: Наука, 1975.
5. *Летохов В. С.* Проблемы лазерной спектроскопии // УФН. – 1976. – Т. 118. – Вып. 2. – С. 199–249.
6. *Балыкин В. И., Летохов В. С., Миногин В. Г.* Охлаждение атомов давлением лазерного излучения // УФН. – 1985. – Т. 147. – Вып. 1. – С. 117–177.
7. *Балыкин В. И., Летохов В. С.* Лазерная оптика нейтральных атомных пучков // УФН. – 1990. – Т. 160. – Вып. 1. – С. 141–154.
8. *Физик В. С. Летохов – жизнь в науке / Под ред. Е. А. Рябова, Т. Й. Кару, В. И. Балыкина.* – М.: Физматлит, 2012.

9. *Рамзей Н. Р.* Эксперименты с разнесенными осцилирующими полями и водородными мазерами // УФН. – 1990. – Т. 160. – Вып. 12. – С. 91–108.
10. *Пауль В.* Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц // УФН. – 1990. – Т. 160. – Вып. 12. – С. 109–127.
11. *Демелт Х.* Эксперименты с покоящейся изолированной субатомной частицей // УФН. – 1990. – Т. 160. – Вып. 12. – С. 129–139.
12. *Филлипс У. Д., Меткалф Г. Дж.* Охлаждение и локализация атомов // В мире науки. – 1987. – № 5. – С. 24–31.
13. *Филлипс У. Д.* Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 3. – С. 305–321.
14. *Коэн-Таннуджи К.* Управление атомами с помощью фотонов // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 3. – С. 292–304.
15. *Чу С.* Управление нейтральными частицами // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 3. – С. 274–291.
16. *Глаубер Р.* Сто лет квантам // УФН. – 2006. – Т. 176. – Вып. 12. – С. 1342–1352.
17. *Холл Дж.* Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов – и не только // УФН. – 2006. – Т. 176. – Вып. 12. – С. 1353–1367.
18. *Хэнш Т.* Страсть к точности // УФН. – 2006. – Т. 176. – Вып. 12. – С. 1368–1380.
19. *Губин М. А., Колачевский Н. Н.* Лауреаты Нобелевской премии 2005 года по физике – Р. Глаубер, Дж. Холл, Т. Хэнш // Природа. – 2006. – № 1. – С. 66–70.
20. *Транковский С. Д.* Нобелевские премии 2005 года. Квантовая оптика и сверхточная лазерная спектроскопия // Наука и жизнь. – 2006. – № 1. – С. 45.

Модуль 6. Исторический обзор развития физики и техники терагерцового излучения

1. *Усиков А. Я., Канер Э. А., Трутень И. Д. и др.* Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. – Киев: Наукова думка, 1986.
2. *Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В.* Освоение терагерцового диапазона: источники и приложения // УФН. – 2011. – Т. 181. – № 8. – С. 867–874.

3. Запевалов В. Е. Эволюция гиротронов // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54. – № 8–9. – С. 559–572.
4. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А. и др. Детектирование в терагерцовом диапазоне // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 2. – С. 28–35.
5. Ерь И. И. Полупроводниковые терагерцовые системы когерентного приема на эффекте «горячих электронов» // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14. – № 2. – С. 204–213.
6. Ерь И. И. Терагерцная техника и технология: современное состояние, тенденции развития и перспективы практического применения // Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 3. – С. 51–77.
7. Гольцман Г. Н. Горячие электроны в резистивном состоянии сверхпроводника – новое физическое явление, новая техника в электронике, радиофизике и оптике // СОЖ. – 1996. – № 4. – С. 90–96.
8. Гершензон Е. М., Гершензон М. Е., Гольцман Г. Н., Семенов А. Д., Сергеев А. В. Разогрев квазичастиц в сверхпроводящей пленке, находящейся в резистивном состоянии // Письма в ЖЭТФ. – 1981. – Т. 34. – Вып. 5. – С. 281–285.
9. Гершензон Е. М., Гершензон М. Е., Гольцман Г. Н., Семенов А. Д., Сергеев А. В. Неселективное воздействие электромагнитного излучения на сверхпроводящую пленку в резистивном состоянии // Письма в ЖЭТФ. – 1982. – Т. 36. – Вып. 7. – С. 241–244.
10. Гершензон Е. М., Гершензон М. Е., Гольцман Г. Н., Семенов А. Д., Сергеев А. В. Разогрев электронов в резистивном состоянии сверхпроводника под действием электромагнитного излучения // ЖЭТФ. – 1984. – Т. 86. – Вып. 2. – С. 758–774.
11. Гершензон Е. М. Субмиллиметровая спектроскопия // СОЖ. – 1998. – № 4. – С. 78–85.
12. Гершензон Е. М. Субмиллиметровая спектроскопия полупроводников // СОЖ. – 1998. – № 5. – С. 110–117.
13. Царев М. В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: Учебное пособие. – Н. Новгород: Нижегородский университет, 2011.

Модуль № 7. Исторический обзор развития радиоастрономии

1. Лауреаты Нобелевской премии: Энциклопедия. Т. 1, 2. – М.: Прогресс, 1992.
2. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. I. – М.: Научтехлитиздат, 2011.
3. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. II. Современные достижения. – М.: Научтехлитиздат, 2014.
4. Ильин В. А., Кудрявцев В. В. Радиоастрономия: методы, инструментальная база, фундаментальные открытия // Физика в школе. – 2014. – № 7. – С. 4–16.
5. Каплан С. А. Элементарная радиоастрономия. – М.: Наука, 1966.
6. Ридхед Э. Радиоинтерферометры со сверхдлинными базами в астрономии // В мире науки. – 1983. – № 2. – С. 51–61.
7. Кардашев Н. С. «Радиоастрон» – радиотелескоп многое больше Земли. Научная программа // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 11. – С. 1191–1202.
8. Чернин А. Д. Как Гамов вычислил температуру реликтового излучения, или немного об искусстве теоретической физики // УФН. – 1994. – Т. 164. – № 8. – С. 889–896.
9. Зельдович Я. Б., Сюняев Р. А. Лауреаты Нобелевской премии 1978 года по физике – А. Пензиас и Р. Вильсон // Природа. – 1979. – № 1. – С. 101–103.
10. Вильсон Р. Р. Космическое микроволновое фоновое излучение // УФН. – 1979. – Т. 129. – Вып. 12. – С. 595–613.
11. Насельский П. Д., Новиков Д. И., Новиков И. Д. Реликтовое излучение Вселенной. – М.: Наука, 2003.
12. Струков И. А., Кремнев Р. С., Смирнов А. И. Взгляд в прошлое Вселенной // Наука в СССР. – 1992. – № 4.
13. Сажин М. В., Хованская О. С. Лауреаты Нобелевской премии 2006 года по физике – Дж. Мазер и Дж. Смут // Природа. – 2007. – № 1.
14. Смут Дж. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 12. – С. 1294–1317.
15. Мазер Дж. От Большого взрыва до Нобелевской премии и дальше // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 12. – С. 1278–1293.
16. Сажин М. В. Анизотропия и поляризация реликтового излучения. Последние данные // УФН. – 2004. – Т. 174. – № 2. – С. 198–205.

17. Сажин М. В. Современная космология в популярном изложении. – М.: УРСС, 2002.
18. Хьюи Э., Белл С., Пилкингтон Дж. и др. Наблюдение быстро пульсирующего радиоисточника // УФН. – 1968. – Т. 95. – Вып. 4. – С. 705–711.
19. Халсе Р. А. Открытие двойного пульсара // УФН. – 1994. – Т. 164. – № 7. – С. 743–756.
20. Тейлор (мл.) Дж. Х. Двойные пульсары и релятивистская гравитация // УФН. – 1994. – Т. 164. – № 7. – С. 757–764.
21. Уилл К. Двойной пульсар, гравитационные волны и Нобелевская премия // УФН. – 1994. – Т. 164. – № 7. – С. 765–773.
22. Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум // Под ред. В. Г. Сурдина, Н. С. Кардашева и Л. М. Гиндилиса. – 7-е изд., доп. – М.: Журнал «Экология и жизнь», 2006.
23. Гиндилис Л. М. SETI: поиск внеземного разума. – М.: Физматлит, 2004.
24. Здравствуй, Галактика! – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Группа «Новая струна», 2008.

Модуль № 8. Исторический обзор развития отечественной радиофизики

1. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. I. – М.: Научтехлитиздат, 2011.
2. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Избранные вопросы истории радиофизики. Т. II. Современные достижения. – М.: Научтехлитиздат, 2014.
3. Кудрявцев В. В. Научные школы в области радиотехники и радиоэлектроники // История науки и техники. – 2016. – № 1. – С. 24–45.
4. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Научные школы в области теории нелинейных колебаний // История науки и техники. – 2016. – № 1. – С. 46–68.
5. Кудрявцев В. В., Ильин В. А. Научные школы в области радиолокации и радиоастрономии // История науки и техники. – 2016. – № 2. – С. 47–72.
6. Борисов В. П. Из истории отечественной радиоэлектроники. – М.: ИИЕТ РАН, 2010.
7. Творцы российской радиотехники. Жизнь и вклад в мировую науку / Под ред. М. А. Быховского. – М.: Эко-Трендз, 2005.

8. *Быховский М. А.* Вклад отечественных ученых в развитие радиоэлектроники и в создание современной теории связи (к 110-й годовщине изобретения радио) // Электросвязь. – 2005. – № 5. – С. 2–5.
9. *Миллер М. А.* Избранные очерки о зарождении и взрослении радиофизики в горьковско-нижегородских местах. – Н. Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 1997.
10. Научное сообщество физиков СССР. 1950–1960-е и другие годы: документы, воспоминания, исследования. Вып. 2 / Сост. и ред. В. П. Визгин и А. В. Кессених. – Спб.: РХГА, 2007.
11. Михаил Васильевич Шулейкин: Сб. статей / Под ред. Б. А. Введенского. – М.: Советское радио, 1952.
12. Академик Леонид Исаакович Мандельштам: Сб. статей. – М.: Знание, 1980.
13. *Мигулин В. В.* Л. И. Мандельштам и становление советской физики // Природа. – 1979. – № 5. – С. 44–54.
14. Академик Л. И. Мандельштам. К 100-летию со дня рождения. – М.: Наука, 1979.
15. *Рытов С. М.* Николай Дмитриевич Папалекси // УФН. – 1947. – Т. XXXI. – Вып. 4. – С. 428–446.
16. *Печенкин А. А.* Л. И. Мандельштам. Исследование, преподавание и остальная жизнь. – М.: Логос, 2011.
17. *Фейнберг Е. Л.* Становление радио в России. К 125-летию со дня рождения академика Н. Д. Папалекси // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76. – № 2. – С. 148–155.
18. *Мигулин В. В.* Н. Д. Папалекси (к столетию со дня рождения) // УФН. – 1981. – Т. 134. – Вып. 3. – С. 518–526.
19. *Горелик Г. Е.* Леонид Мандельштам и его школа // Вестник РАН. – 2004. – № 10. – С. 932–940.
20. *Папалекси Н. Д., Андронов А. А., Горелик Г. С.* и др. Некоторые исследования в области нелинейных колебаний, проведенные в СССР, начиная с 1935 г. // УФН. – 1947. – Т. XXXIII. – Вып. 3. – С. 335–352.
21. *Бойко Е. С.* Школа академика А. А. Андронова. – М: Наука, 1983.
22. Памяти Александра Александровича Андронова. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.
23. *Горская Н. В., Митякова Э. Е., Московченко О. И.* и др. Личность в науке. А. А. Андронов. – Н. Новгород: ННГУ, 2001.

24. Мотова М. И., Шалфеев В. Д. К истории научной школы А. А. Андронова // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 5 (3). – С. 15–21.
25. Трубецков Д. И. Наука о сложностях в лицах, датах и судьбах: Как закладывались основы синергетики: Пиршество духа и драма идей. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.
26. Горская Н. В. Личность в науке. Г. С. Горелик. Документы жизни. – Н. Новгород: ННГУ, 2006.
27. Рытов С. М. Памяти Г. С. Горелика // УФН. – 1957. – Т. LXII. – Вып. 4. – С. 485–496.
28. Гуляев Ю. В., Барабаненков Ю. Н., Каплан А. Е. К 100-летию со дня рождения С. М. Рытова // УФН. – 2009. – Т. 179. – № 5. – С. 531–560.
29. Сергей Михайлович Рытов: Жизнь, воспоминания, интервью, записки, стихи, документы / В. М. Березанская, Н. С. Рытова, А. А. Гиппиус и др. – М.: ЛЕНАНД, 2012.
30. Лобанов М. М. Начало советской радиолокации. – М.: Советское радио, 1975.
31. Лобанов М. М. Развитие советской радиолокационной техники. – М.: Воениздат, 1982.
32. Кобзарев Ю. Б., Полякова Н. Л. Д. А. Рожанский и становление радиофизики // Природа. – 1983. – № 3. – С. 72–79.
33. Рожанский И. Д., Рожанская М. М., Филонович С. Р. Дмитрий Аполлинариевич Рожанский. – М.: Наука, 2003.
34. Кобзарев Ю. Б. Первые шаги советской радиолокации // Природа. – 1985. – № 12. – С. 72–82.
35. Кобзарев Ю. Б. Создание отечественной радиолокации: научные труды, мемуары, воспоминания. – М.: Наука, 2007.
36. Развитие радиоастрономии в СССР / Л. М. Гиндилис, Р. Д. Дагкесамский, А. Д. Кузьмин и др. – М.: Наука, 1988.
37. Очерки истории радиоастрономии в СССР: Сб. науч. трудов. – Киев: Наукова Думка, 1985.
38. Саломонович А. Е. Первые шаги советской радиоастрономии // Вестник АН СССР. – 1973. – № 3. – С. 122–136.
39. Кайдановский Н. Л. Профессор Семен Эммануилович Хайкин, 1901–1968. – СПб.: ИПА, 1995.
40. Кайдановский Н. Л. К истории радиотелескопа РАТАН-600. – СПб.: ИПА, 1995.

41. Горская Н. В., Локтева М. Б. Личность в науке. В. С. Троицкий. Документы жизни. – Н. Новгород: ННГУ, 2008.
42. Кисляков А. Г., Кротиков В. Д. Всеволод Сергеевич Троицкий (к 100-летию со дня рождения) // Земля и Вселенная. – 2013. – № 4. – С. 56–63.
43. Аксенов Е. П., Есипов В. Ф., Зельдович Я. Б. и др. Памяти Иосифа Самуиловича Шкловского // УФН. – 1985. – Т. 146. – Вып. 4. – С. 718–720.
44. И. С. Шкловский и современная астрофизика (из цикла «Современные проблемы астрофизики»): Сб. статей. – М.: Знание, 1986.
45. Кудрявцев В. В., Гольцман Г. Н., Ильин В. А. Радиофизика в истории Московского педагогического государственного университета // История науки и техники. – 2009. – № 9. – С. 10–23.
46. Гольцман Г. Н., Чулкова Г. М. Научная радиофизическая школа Московского государственного педагогического университета // История науки и техники. – 2016. – № 1. – С. 80–89.
47. Гольцман Г. Н., Ильин В. А., Кудрявцев В. В. Радиофизическая научная школа и ее основатель Евгений Михайлович Гершензон (к 80-летию со дня рождения) // История науки и техники. – 2009. – № 9. – С. 10–23.
48. Проблемная радиофизическая лаборатория (ПРФЛ). – [Электронный ресурс]. – URL: <http://rplab.ru/index.php?lang=ru>.
49. 40 лет Институту космических исследований Российской академии наук. Обратный отсчет времени. – М.: Изд-во ИКИ РАН, 2006.
50. Гольцман Г. Н. Горячие электроны в резистивном состоянии сверхпроводника – новое физическое явление, новая техника в электронике, радиофизике и оптике // СОЖ. – 1996. – № 4. – С. 90–96.
51. Пентин И. В., Смирнов К. В., Вахтомин Ю. Б. и др. Быстродействующий терагерцовый приемник и инфракрасный счетчик одиночных фотонов на эффекте разогрева электронов в сверхпроводниковых тонкопленочныхnanoструктурах // Труды МФТИ. – 2011. – Т. 3. – № 2. – С. 38–42.
52. Gol'tsman G. N, Okunev O. V, Chulkova G. M. et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – P. 705–707.

3. Задания для самостоятельной работы

Модуль № 1. История радиофизики – важнейшее направление истории науки

1. Что изучает радиофизика?
2. Характерные особенности радиофизики как науки.
3. Связи радиофизики и других наук.
4. Хронология этапов развития радиофизики.
5. Роль радиофизики в развитии человеческой цивилизации.

Модуль № 2. Исторический обзор развития радиотехники и вакуумной электроники

1. Уравнения Максвелла. История открытия, физическая сущность, значение.
2. Г. Герц: биография и научные достижения.
3. О. Хевисайд и развитие электромагнитной теории Максвелла.
4. А. С. Попов – талантливый ученый, исследователь, конструктор, педагог.
5. Э. Дюкрете – французский пионер практической радиосвязи.
6. Кто же изобрел радио? Вопросы приоритета.
7. История создания искровых и дуговых передатчиков.
8. Н. Тесла – гений-одиночка или безумец, опередивший свое время?
9. «Чародей» из Мэнло-парка – Т. Эдисон.
10. Творцы ламповой радиотехники. Биографические очерки.
11. Р. А. Фессенден и широковещательное радио.
12. Э. Эплтон. Открытие и исследования ионосферы.
13. Радиосвязь и ее значение для человечества.
14. Музеи радио.

Модуль № 3. Исторический обзор развития радиоспектроскопии

1. Метод Раби: разработка, физическая сущность, применение.
2. Достижения исследовательской группы Раби в Колумбийском университете.
3. Научная биография А. Кастлера.
4. Электронный парамагнитный резонанс: история открытия, физическая сущность, применение.
5. Е. К. Завойский: биография и научные достижения.

6. Казанская школа магнитной радиоспектроскопии: основополагающие результаты.
7. Ядерный магнитный резонанс: история открытия, физическая сущность, применение.
8. Современные ЯМР-методы. Практическая и теоретическая значимость.
9. СВЧ-устройства: история создания, теоретические и практические аспекты.
10. Применение СВЧ-излучения в науке и технике.

Модуль № 4. Исторический обзор развития твердотельной и квантовой электроники

1. Как радиоспектроскопия помогла создать мазер?
2. Лазеры: история изобретения, физические основы работы, типы, применение.
3. Как был разработан первый транзистор?
4. Разновидности транзисторов и их применение. Современные транзисторы.
5. Дж. Килби и Р. Нойс – изобретатели интегральной схемы.
6. Как создают современные интегральные схемы?
7. Компания “Intel”. Исторические вехи развития и основополагающие достижения.
8. Исследования гетероструктур в историческом преломлении.
9. Ж. И. Алфёров – творец гетеролазеров.
10. Области применения современных гетеролазеров.
11. Использование гетеросистем пониженной размерности в электронике.
12. Исследования двухмерного электронного газа в историческом аспекте.
13. Настоящее и будущее сверхпроводниковых устройств.
14. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). История создания, основополагающие достижения, перспективы.
15. Фотонные кристаллы. История открытия и применение.
16. Что привнесла спинtronика в современные информационные технологии?
17. На пути к созданию квантового компьютера.
18. Реальны ли квантовая телепортация и квантовая криптография?

Модуль № 5. Исторический обзор развития лазерной спектроскопии

1. Вклад А. Шавлова и Н. Бломбергена в развитие лазерной спектроскопии.
2. Физические основы лазерного охлаждения атомов.
3. Эксперименты В. С. Летохова по лазерному охлаждению атомов.
4. С. Чу и лазерное охлаждение газа.
5. У. Филлипс и эксперименты с «зеемановским замедлителем».
6. Достижения научно-исследовательской группы К. Коэн-Таннуджи.
7. Применение лазерно-охлажденных атомов.
8. Открытие и исследование конденсации Бозе – Эйнштейна в атомарных газах.
9. Основные результаты теоретических работ Р. Глаубера.
10. Экспериментальные исследования Дж. Холла и Т. Хенша.
11. Научно-техническое значение работ Дж. Холла и Т. Хенша.

Модуль 6. Исторический обзор развития физики и техники терагерцового излучения

1. Источники терагерцового излучения: конструктивные особенности и принцип действия.
2. Из истории изобретения гиротрона. Где сейчас используют гиротроны?
3. Приемники терагерцового излучения: конструктивные особенности и принцип действия.
4. Эффект разогрева электронов в сверхпроводниках: физическая сущность и применение.
5. Примеры использования ЛОВ-спектроскопии.
6. Терагерцовая астрономия: приборы и объекты изучения.
7. Что исследовал космический телескоп «Гершель»?

Модуль № 7. Исторический обзор развития радиоастрономии

1. Зарождение радиоастрономии. Исследования К. Янского и Г. Ребера.
2. Метод апертурного синтеза и его творцы.
3. Радиоинтерферометрия: создание, ключевые исследования, развитие.

4. Крупнейшие радиотелескопы и РСДБ.
5. Из истории обнаружения квазаров и радиогалактик.
6. Пульсары: история и научное значение открытия, механизм генерации излучения, примеры.
7. Двойные пульсары: история и научное значение открытия, механизм генерации излучения, примеры.
8. Как было открыто реликтовое излучение?
9. Анизотропия реликтового излучения: история обнаружения, физическая сущность, ключевые эксперименты, научное значение.
10. Современное состояние российской радиоастрономии. Проекты «Радиоастрон», «Миллиметрон», «Квазар».
11. Радиоастрономия и проблема поиска внеземных цивилизаций.

Модуль № 8. Исторический обзор развития отечественной радиофизики

1. Основополагающие достижения первых отечественных радиофизических центров.
2. Почему Нижегородскую радиолабораторию называют колыбелью отечественной радиотехники?
3. Научная школа Л. И. Мандельштама – Н. Д. Папалекси в области нелинейных колебаний и радиофизики: формирование, основные научные достижения, ученики, место и роль в истории науки.
4. Научная школа А. А. Андронова в области нелинейных колебаний: формирование, основные научные достижения, ученики, место и роль в истории науки.
5. Научная школа Г. С. Горелика в области нелинейных колебаний: формирование, основные научные достижения, ученики, место и роль в истории науки.
6. Научная школа (радиофизический семинар) С. М. Рытова: формирование, основные научные достижения, ученики, место и роль в истории науки.
7. Вклад научных школ Д. А. Рожанского и Ю. Б. Кобзарева в развитие отечественной радиолокации.
8. Научная школа С. Э. Хайкина в области наблюдательной радиоастрономии: формирование, основные научные достижения, ученики, место и роль в истории науки.

9. Научная школа В. С. Троицкого в области наблюдательной радиоастрономии: формирование, основные научные достижения, ученики, место и роль в истории науки.
10. Вклад И. С. Шкловского и его научной школы в становление всеволновой радиоастрономии.
11. Крупнейшие современные отечественные радиофизические центры: их руководители и основные научные достижения.

Ильин Вадим Алексеевич
Кудрявцев Василий Владимирович

ИСТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ
Модульный курс для магистров

Учебное пособие

Редактор Дубовец В. В.
Оформление обложки Удовенко В. Г.
Компьютерная верстка Дорожкина О. Н., Ковтун М. А.

Управление издательской деятельности
и инновационного проектирования МПГУ
119571, Москва, Вернадского пр-т, д. 88, оф. 446.
Тел.: (499) 730-38-61
E-mail: izdat@mpgu.edu

Подписано в печать 20.03.2017. Формат 60x90/16.
Бум. офсетная. Печать цифровая. Объем 20,0 п. л.
Тираж 500 экз. Заказ № 654.

ISBN 978-5-4263-0482-6



9 785426 304826

