

А. Н. АРСЕНЬЕВА-ГЕЙЛЬ – АВТОР ПЕРВОГО ОБЗОРА В СССР ПО ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

В.М. Аникин

Саратовский национальный исследовательский
государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

E-mail: AnikinVM@sgu.ru

Аннотация: Приводятся биографические сведения об Агнессе Николаевне Арсеньевой-Гейль (1901 – 1991), специалисте по физике полупроводников, авторе (совместно с Матвеем Петровичем Бронштейном (1906 – 1938)) первого научного обзора в СССР (1932) по теории электронных полупроводников. В 1929 г. в Гёттингенском университете А.Н. Арсеньева защитила диссертацию (PhD Thesis). В 1934 – 1935 гг. работала в Кавендишской лаборатории Э. Резерфорда. Вернувшись в Ленинград, трудилась в Физико-техническом институте и Политехническом институте, в том числе в военные годы, а с начала 1950-х гг. – в Ленинградском университете. В 1969 г. защитила докторскую диссертацию по проблемам фотоэмиссионных свойств неметаллов. Автор монографии «Внешний фотоэффект с полупроводников и диэлектриков» (1957).

Ключевые слова: история полупроводниковой электроники, Агнесса Николаевна Арсеньева-Гейль, Матвей Петрович Бронштейн.

Ситуация в исследованиях полупроводников к началу 1930-х гг.

К 1930-м гг. в результате многочисленных экспериментальных исследований были получены данные о некоторых общих свойствах полупроводниковых кристаллических веществ, которые принципиально отличались от электропроводящих свойств металлов и не могли быть объяснены в рамках классической теории Максвелла¹. Тем не менее, на практике коррелирующие свойства односторонней проводимости и фотопроводимости стали активно использоваться при создании твердых выпрямителей, фотоэлементов и иных устройств. В этой связи невозможно пройти мимо имени Олега Владимировича Лосева (1903 – 1942), чьи выдающиеся разработки 1920–1930-х гг. нужно рассматривать как прообразы последующих приборов полупроводниковой электроники, в том числе отмеченных

¹ К этим свойствам относились: увеличение электропроводности с ростом температуры в кристаллах (первый известный опыт: М. Фарадей, 1833 г.; вещество – сульфид серебра Ag_2S); открытие фотопроводимости селена, уменьшения сопротивления селенового образца при его освещении солнечным светом (первый опыт: У. Смит, 1873); открытие эффекта выпрямления (односторонней проводимости, детекторного действия) в *точечном* контакте металл – полупроводник (первый опыт: К. Ф. Браун, 1874; система: металлическое острие – кристалл свинцового блеска, т.е. сульфид свинца PbS , и другие сульфиды металлов; подтверждение – В. фон Сименс и А. Шустер, 1874), при этом сопротивление контакта не подчинялось закону Ома; открытие эффекта Холла (возникновение разности потенциалов в образце в магнитном поле) (Э. Холл, 1879). Полупроводники иногда называли «плохими проводниками».

Нобелевскими премиями (ZnO-усилитель, ZnO-генератор, светодиоды на основе SiC, принципиальная схема транзистора).

Ситуацию разрыва теории и практики, существовавшую в физике полупроводников к началу 1930-х гг., академик А. Ф. Иоффе прокомментировал во вступительном слове на Конференции по твердым выпрямителям и фотоэлементам (Ленинград, сентябрь 1931 г.)²:

«В литературе имеется исследование целого ряда полупроводников, но нет их теории. <...> Эта область в своих направлениях технического использования и выяснения физической картины находится еще в начальной стадии. И поэтому, естественно, она является в данное время одной из центральных проблем как физики, так и техники» [1].

В «Журнале технической физики» (том 1, № 7 за 1931 г.) представлены обзорные и оригинальные доклады, прозвучавшие на этой конференции. Их перечисление дает представление о людях, которые стояли у истоков полупроводниковой электроники в нашей стране.

Обзоры: «Твердые выпрямители» (И. В. Курчатов), «Применение твердых выпрямителей в технике» (К. П. Широков), «Твердые, или вентильные фотоэлементы» (И. В. Курчатов, К. Д. Синельников), «Внутренний фотоэффект в полупроводниках» (Б. В. Курчатов), «Фотоэлектрические свойства селена» (К. Д. Синельников).

Оригинальные доклады: «Зависимость фотоэффекта в меднозакисном фотоэлементе от температуры и от выпрямляющей способности его» (В. П. Жузе, Д. Н. Наследов), «Методика исследования вентильных фотоэлементов» (К. Д. Синельников, А. К. Вальтер), «Прохождение электронов через поверхность соприкосновения двух проводников» (Л. В. Розенкевич), «Фотоэлектрический эффект в особом активном слое кристаллов карборунда» (О. В. Лосев).

Авторефераты докладов: «Применение меднозакисного детектора к некоторым измерительным схемам и приборам» (В. Н. Лепешинская), «О температурной компенсации в маловольтных приборах переменного тока с меднозакисным детектором» (В. Н. Рождественский), «Экспериментальное исследование фотоэлектродвижущей силы в меднозакисных фотоэлементах» (В. Н. Лепешинская), «О некоторых невыясненных вопросах из области изучения закиси меди» (Б. А. Остроумов).

В *дискуссиях* на конференции принимали участие А. Ф. Иоффе, Я. И. Френкель, И. В. Курчатов, Б. А. Остроумов, К. Д. Синельников, А. Н. Сысоев. На конференции было намечено распределение работ по

² Впоследствии эту конференцию стали именовать Первой Всесоюзной конференцией по полупроводникам.

изучению твердых фотоэлементов и выпрямителей между научными учреждениями СССР. Руководителем (бригадиром) работ был выбран А. Ф. Иоффе.

После конференции незамедлительно последовали организационные действия. В октябре 1931 г. физико-математический сектор Государственного физико-технического института был преобразован в Ленинградский физико-технический институт. А. Ф. Иоффе разделил его научный и технический состав на 8 групп, игравших роль отделов, при этом в состав первой, Энергетической, группы, которую он возглавил сам, была включена бригада № 6 «Полупроводники» под руководством доктора Гёттингенского университета Агнессы Николаевны Арсеньевой. Примерно через год структура института была переформатирована, и в состав отдела физики твердого тела, вошла Лаборатория электропроводности полупроводников во главе с А. Н. Арсеньевой [2, с. 271–273].

***Обзор А. Н. Арсеньевой и М. П. Бронштейна
«Физические свойства электронных полупроводников» (1932)***

В № 9-10 второго тома «Журнала технической физики» за 1932 г. [3] опубликован обзор сотрудников Физико-технического института Агнессы Николаевны Арсеньевой и Матвея Петровича Бронштейна «Физические свойства электронных полупроводников». Авторы закончили его написание в мае 1932 г. после знакомства с двумя статьями А. Вильсона 1931 г. в журнале *Proceedings of The Royal Society*:

Wilson A.H. The Theory of Electronic Semi-conductors // Proc. R. Soc. A. 1931.V.133. P. 458–491.

Wilson A. H. The Theory of Electronic Semi-conductors. II // Proc. R. Soc. A. 1931. V. 134. P. 277 – 287.

А. Вильсон на основе разработанных в 1928–1929 гг. Ф. Блохом (квантовая механика электронов), Л. Бриллюэном (зоны Бриллюэна) и Р. Пайерлсом (концепция дырочной проводимости) основных положений зонной теории твердых тел создал физическую модель полупроводника, в которой энергетические состояния электронов образуют три зоны – зону проводимости и валентную зону, разделенные запрещенной зоной (история вопроса представлена, например, в [4]). Исходя из этого, Вильсон провел качественное деление кристаллов на диэлектрики («большая» запрещенная зона свыше 4 – 5 эВ, исключающая возможность электропроводности), металлы (свободные электроны проводимости), полупроводники (запрещенная зона от долей электрон-вольта до 3 – 4 эВ, которая может быть «преодолена» электронами в результате их теплового или светового возбуждения, что и обуславливает повышение электропроводности).

Освободившиеся от электронов места в процессе их перехода в зону проводимости образуют вакансии (дырки), которые становятся свободными носителями положительного заряда. Поведение дырок аналогично поведению возбужденных электронов. Они обладают подвижностью, эффективной массой и могут образовывать электрический ток, направление которого противоположно току электронов. Тип проводимости (электронная или дырочная) выявляется на основе эффекта Холла.

Зонная теория дала ключ к объяснению ряда электропроводящих свойств полупроводниковых материалов. Интересно, что волновая механика была главным предметом обсуждения на VI съезде Российской ассоциации физиков в августе 1928 г. Заключительное заседание съезда прошло в Саратовском университете 15 августа 1928 г. На нем с «квантовомеханическим» докладом выступил Макс Борн [5 – 7].

В первом разделе своего обзора «Физические свойства электронных полупроводников» А. Н. Арсеньева и М. П. Бронштейн со ссылкой на А. Вильсона кратко воспроизвели положения зонной теории, отметили наличие двух типов проводимости (электронной и дырочной), указали на роль примесей, использовали термин «аномальный эффект Холла» в случае дырочной проводимости, при этом для запрещенной зоны они употребили образный термин «пропасть». Авторы выделили суть явления:

«... Существование изоляторов и полупроводников есть чисто квантовый эффект, основанный на наличии перерывов в совокупности значений энергии и на принципе Паули: теория изоляторов и полупроводников, не опирающаяся на волновую механику, поэтому невозможна» [3, с. 922].

Во втором разделе обзора А. Н. Арсеньева и М. П. Бронштейн провели «описание экспериментального материала», отметив, что «накопившийся материал хотя и обширен, но не позволяет, однако, сделать окончательных выводов относительно закономерностей явлений, происходящих в полупроводниках, так как данные отдельных авторов весьма различны и часто совершенно противоположны друг другу». «Разноречивость результатов» авторы связали с трудностями получения чистого материала «в удобном для измерения виде». В связи с этим в обзоре основное внимание уделено описанию особенностей электропроводимости (для различных температурных диапазонов, давления окружающих газов, наличия примесей) и внутреннего фотоэффекта вещества, «легко получаемого в чистом виде», – закиси меди Cu_2O .

В третьем разделе работы А. Н. Арсеньевой и М. П. Бронштейна развивается количественная теория электронных полупроводников для «простейшего возможного случая механизма электропроводности», определяемого следующими предположениями: «в решетке твердого тела, являющегося в чистом виде изолятором, имеется сравнительное небольшое количе-

ство атомов примеси, которые обладают электронами на уровне энергии, расположенном на ΔE ниже верхнего края пропасти, отделяющей занятые при абсолютном нуле состояния электронов изолятора от незанятых»; «энергия самого нижнего состояния незанятой полосы равняется нулю»; «электронный уровень атомов примеси, с которого при повышении температуры будут переходить наверх электроны, равен ΔE », «никаких других уровней атомов примеси в верхней части пропасти нет».

Если n_0 – число электронов, находящихся на уровне ΔE в единице объема при абсолютном нуле, то при отличной от нуля температуре на этом уровне будет «сидеть» лишь часть этого числа, остальная же часть перейдет в незанятую полосу и станет электронами проводимости. Соответственно решаются две задачи:

1) статистическая задача о нахождении числа электронов проводимости при температуре T в статистическом равновесии между двумя зонами с энергией $-\Delta E$ (n_0 состояний) и с положительной энергией в незанятой полосе изолятора;

2) задача о (пере)распределении электронов (решение задачи 1) по состояниям при помещении полупроводника в заданное электрическое или магнитное поле, а также при создании градиента температуры.

В работе представлены решения этих задач, что в свою очередь позволило авторам вычислять электрический ток в полупроводнике, выделяющееся в единице объема тепло и т. д., т. е. дало возможность определить электропроводность проводника, коэффициент Холла, разнообразные гальваномагнитные, термоэлектрические и термомагнитные коэффициенты. Сравнение ряда данных с результатами экспериментов для закиси меди показало известное совпадение. Часть результатов (по эффектам Пельтье и Томсона) носила прогностический характер.

Заключительный, четвертый, раздел обзора А. Н. Арсеньевой и М. П. Бронштейна содержит данные о явлениях в пограничном слое между полупроводниками и металлом. Приводится формула, полученная в модели перехода электронов через потенциальный барьер при приложении электрического поля и демонстрирующая наличие выпрямляющего действия. Однако раздел заканчивается фразой: «Теории контакта между проводником и полупроводником до сих пор еще не существует». Как известно, проблема была решена в 1938 г. Б. И. Давыдовым и А. Ф. Иоффе.

Как отмечается в [8, с. 94], обзор А. Н. Арсеньевой и М. П. Бронштейна написан в начальный период развития физики полупроводников, предназначался в первую очередь экспериментаторам и сыграл свою полезную первопроходческую роль.

Страницы биографии А. Н. Арсеньевой-Гейль (1901 – 1991)

Агнесса Николаевна Арсеньева родилась 5 июля 1901 г. в Петербурге. В 1917 г. окончила Петроградское восьмиклассное коммерческое училище в Лесном³, а затем – Политехнический институт.

С момента основания (1924) работала в руководимой А.Ф. Иоффе Ленинградской физико-технической лаборатории [2, с. 259]. Лаборатория, находившаяся под эгидой Научно-исследовательского совета Высшего совета народного хозяйства СССР, была ориентирована исключительно на решение прикладных задач. В ее списочном составе за 1924 – 1930 гг. числилось 800 человек! В 1930 г. эта лаборатория была преобразована в Государственный физико-технический институт, который впоследствии, в феврале 1931 г., был объединен с Государственным физико-техническим радиологическим институтом. За объединенной структурой закрепится название Государственный физико-технический институт. А уже в октябре 1931 г. его физико-математический сектор будет возведен в ранг Ленинградского физико-технического института. Как уже говорилось, в последнем А. Н. Арсеньева руководила лабораториями физики полупроводников.

Росту научного кружора физтеховской молодежи способствовало активное участие в научных семинарах П. С. Эренфеста и Я. И. Френкеля, приведшее к становлению крупных ученых.



Участники семинара П. С. Эренфеста в Физико-техническом институте (слева направо):

П. С. Эренфест, А. Н. Арсеньева, Б. М. Гохберг, Н. В. Томашевский, П. О. Усатая,
Б. Я Пинес, Н. А. Бриллиантов, А. И. Шальников, В. С. Горский (Ленинград, 1924 г.)
(Архив Американского института физики)

³ ЦГИА СПб ф.357 оп.1 д.211. Арсеньева Агнесса Николаевна.



Участники теоретического семинара Я. И. Френкеля в Физико-техническом институте (слева направо): Л. Э. Гуревич, Л. Д. Ландау, Л. В. Розенкевич, А. Н. Арсеньева, Я. И. Френкель, Г. А. Гамов, М. В. Мачинский, Д. Д. Иваненко, Г. А. Мандель (Ленинград, вторая половина 1920-х гг.) (Архив Американского института физики)

Во второй половине 1920-х гг. А. Н. Арсеньева проходила стажировку в Университете Георга-Августа в Геттингене. Здесь у М. Борна в 1929 г. защитила диссертацию (PhD thesis) «Über den Einfluß des Röntgenlichtes auf die Absorptionsspektren der Alkalihalogenidphosphore» («О влиянии рентгеновского излучения на спектры поглощения щелочно-галогенидных люминофоров»). Ее диссертация журналом «The British Journal of Radiology» включена в научно-исторический список работ по радиологии.



А. Ф. Иоффе, А. Н. Арсеньева и П. И. Лукирский (Гёттинген, 1926 г.) (Фрагмент фотографии, Архив Американского института физики)

В августе 1928 г. А. Н. Арсеньева входила в число организаторов VI съезда Российской ассоциации физиков [5 – 7].



М. Борн, П. Дирак, В. Н. Кондратьев, А. Н. Арсеньева и Ю. Б. Харитон на борту парохода «Пруссия», с которым на VI съезд РАФ прибыли зарубежные участники. Август 1928 г.
(Архив Американского института физики)

А. Н. Арсеньева – участница Первой конференции в СССР по теоретической физике в Харькове в 1929 г., на которую приехали Я. И Френкель, И. Е. Тамм, Л. Д. Ландау, Г. А. Гамов, Д. Д. Иваненко, П. И. Лукирский, В. А. Фок, И. В. Обреимов, Ю. А. Крутков, В. К. Фредерикс, В. Р. Бурсиан, Б. И. Давыдов, С. Э. Фриш и др.

В Гёттингене А. Н. Арсеньева познакомилась с немецким физиком Оскаром Гейлем (1908–1994), защитившим диссертацию в 1933 г. В 1934 г. в Ленинграде она вышла за него замуж. В 1934–1935 гг. они вместе работали у Э. Резерфорда в Кавендишской лаборатории. Продуктом их совместного творчества, в частности, стала статья⁴, в которой была представлена концепция электровакуумного микроволнового устройства («трубки Гейля»), в которой происходит модуляция электронов по скоростям и, как следствие, образование электронных «сгустков» и генерация сверхвысоко-частотного электромагнитного излучения. Трубка Гейля рассматривается как своего рода предшественник клистрона.

⁴ *Arsenjewaja-Heil A.; Heil O. Eine neue Methode zur Erzeugung kurzer, ungedämpfter elektromagnetischer Wellen großer Intensität // Zeitschrift für Physik. 1935. Bd. 95. № 11–12. S. 752–762.*
<https://doi.org/10.1007/bf01331341>



Участники Первой конференции СССР по теоретической физике (Харьков, 19 – 25 мая 1929 г.). А. Н. Арсеньева – третья справа во втором ряду сверху (в белой шапочке).
(Фото из журнала «Природа» № 7 за 1990 г.)

В 1932 г. А. Н. Арсеньева участвовала во Второй Всесоюзной конференции по полупроводникам. Среди собравшихся были А.Ф. Иоффе, Я. И. Френкель, И. В. Курчатов, А. Г. Гольдман, А. А. Ансельм, В.П. Жузе, А.П. Александров и др.



Участники Второй Всесоюзной конференции по полупроводникам (слева направо):
?, ?, ?, А. Г. Гольдман, ?, А. Ф. Иоффе, П. В. Шаравский, Я. И. Френкель, И. В. Курча-
тов, А. А. Ансельм, В. П. Жузе, Л. М. Неменов, Д. Н. Наследов, Ю. П. Маслаковец,
А. П. Александров, ?, А. Н. Арсеньева (Киев, 1932 г.)
(Архив Американского института физики)

После возвращения в Ленинград в 1935 г. О. Гейль (ему принадлежит также изобретение раннего полевого транзистора) вскоре уехал в Ве-

ликобританию, а А. Н. Арсеньева-Гейль осталась в Ленинграде, поскольку разрешения на выезд не получила. Своего мужа она больше не увидела...

Годы Великой Отечественной войны Агнесса Николаевна провела в Ленинграде. Участвовала в разработке и испытаниях «прогибографа» для Дороги жизни вместе с П.П. Кобеко и Н.М. Рейновым [9], причем однажды прожила месяц без продуктовой карточки, которую считала потерянной.



Агнесса Арсеньева,
1920-е гг. [9]



А. Н. Арсеньева-Гейль,
1950-е гг. [9]

В начале 1950-х гг. П. И. Лукирский пригласил А. Н. Арсеньеву-Гейль на кафедру электроники твердого тела Ленинградского университета, где она и проработала все последующие годы. «Светлой и дорогой памяти Петра Ивановича Лукирского» Агнесса Николаевна посвятила свою монографию «Внешний фотоэффект с полупроводников и диэлектриков» [10]. В 1969 г. А. Н. Арсеньева-Гейль защитила докторскую диссертацию «Исследование фотоэмиссионных свойств неметаллов».

Знавшие Агнессу Николаевну оставили теплые воспоминания о ней как о страстном и честном экспериментаторе, сохранившем работоспособность до 90 лет, человеке живого ума, образованном и дружелюбном. Вот отрывок из воспоминаний В. С. Ивлева :

«На четвертом курсе Агнесса Николаевна предстала перед нашей группой в качестве лектора. Курс лекций был посвящен экспериментальным исследованиям в области физики полупроводников. <...> Ее лекции были переполнены информацией о проводимых у нас и на Западе различных опытах. Чрезвычайно интересна была манера изложения материала: непосредственность восприятия, восхищение новыми экспериментальными результатами, выраженное чисто по-женски как восклицаниями, так и различными движениями, в первую очередь ног. Они у нее выписывали па, более свойственные восемнадцатилетним девушкам, чем ученым дамам в возрасте за 50. Очень забавно выглядело ее лёгкое вытягивание губ дудоч-

кой и грассирование звуком, когда она хотела подчеркнуть значимость сказанного.

Агнесса Николаевна была удивительно простой и раскованной женщиной. Складывалось впечатление, что она получила образование в Институте благородных девиц. Великолепное знание основных европейских языков, умение свободно держаться в любом обществе, прекрасное владение танцевальными па. <...>

Ореол вокруг Агнессы Николаевны в 1960-х гг. поддерживался приездами на факультет зарубежных физиков: Нильса Бора, Поля Дирака, Оге Бора. При выступлениях этих ученых на факультете Большая Физическая аудитория была переполнена студентами и известными советскими учеными-физиками. Доклады иностранных ученых обычно переводила Агнесса Николаевна. Для нее истинным наслаждением было окунуться в атмосферу прошлого, снова увидеть друзей молодости, подчеркнуть перед слушателями свою близость к этим титанам. Они, в свою очередь, подчеркивали глубокое уважение к ней. «Ах, этот Нильс, он никогда не умел хорошо танцевать. Только и следи, как бы не оттоптал ноги». Это делало теорию атомного ядра Нильса Бора нам более близкой и понятной» [11, с. 20, 21].

Запоминающимися были и другие высказывания Агнессы Николаевны:

«Вот когда я работала с Резерфордом...» (ностальгическое).

«Вы не смогли бы работать у Резерфорда» (в адрес нерадивых, на ее взгляд, студентов).

Послесловие

В представленном в [2, с. 562] хронологическом списке сотрудников лабораторий академика А. Ф. Иоффе, достигших серьезных результатов в изучении природы, структурных, фотоэлектрических, термоэлектрических, гальваномагнитных, электрических и других свойств полупроводниковых веществ, имя А. Н. Арсеньевой стоит непосредственно за именем А. Ф. Иоффе.

Автор благодарит профессора В. Ф. Названова за уточняющую информацию о деятельности А. Н. Арсеньевой.

Библиографический список

1. *Иоффе А. Ф.* Конференции по твердым выпрямителям и фотоэлементам. Вступительное слово // ЖТФ. 1931. Т. 1, вып. 7. С. 629 – 631.
2. *Соминский М. С.* Абрам Федорович Иоффе. М.; Л. : Наука, 1965. 658 с.
3. *Арсеньева А. Н., Бронштейн М. П.* Физические основы электронных полупроводников // ЖТФ. 1932. Т. II, вып. 9-10. С. 919 – 952.
4. *Дробот П. Н.* История и философия нововведений в области электроники и электронной техники. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, институт инноватики, 2015. 173 с.
5. *Аникин В. М.* «Волжский» съезд как зеркало развития физических наук в 1920-е годы. К 100-летию основания Российской ассоциации физиков // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90, № 1. С. 81–88. <https://doi.org/31857/S0869587320010028>
6. *Усанов Д. А., Аникин В. М.* Шестой съезд русских физиков в Саратове (15 августа 1928 г.) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 153–161. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-153-161>
7. *Аникин В.М., Чурочкин Д. В., Чурочкина С. В.* «Ах, что такое движется там по реке...». К 95-летию VI съезда Российской ассоциации физиков // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2023. Т. 23, вып. 3. С. 265–280. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-265-280>
8. *Горелик Г. Е., Френкель В. Я.* Матвей Петрович Бронштейн. 1906 – 1938. М.: Наука, 1990. 272 с.
9. *Арсеньева-Гейль Агнеса Николаевна.*
URL: <https://www.eduspb.com/node/3822> (дата обращения: 07.04.2024).
10. *Арсеньева-Гейль А. Н.* Внешний фотоэффект с полупроводников и диэлектриков. М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1957. 224 с.
11. *Ивлев Л. С.* Ученица Резерфорда Агнеса Николаевна Арсеньева-Гейль // Слово о женщинах-физиках / под ред. Л. С. Ивлева. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2006. С. 19 – 22.