

СОВРЕМЕННАЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ТЕХНИКА

О. В. ЛОСЕВ △ У ИСТОКОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ

О. В. ЛОСЕВ

У ИСТОКОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ТЕХНИКИ





О. В. ЛОСЕВ

(1903—1942)

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
отделение общей физики и астрономии

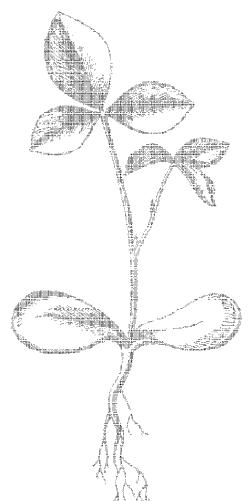
О. В. ЛОСЕВ

У ИСТОКОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ
ТЕХНИКИ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Ленинград 1972



У истоков полупроводниковой техники. Избранные труды.
Лосев О. В. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л., 1971,
1—203.

В сборник включено 20 работ пионера физики твердого тела О. В. Лосева, опубликованных на русском языке. Научная деятельность автора (1921—1941 гг.) распадается на два периода. Первый период (особенно 1922—1924 гг.) характеризуется преимущественными успехами в экспериментальном исследовании выпрямительных и генераторных свойств минеральных кристаллических радиотехнических детекторов, обладающих полупроводниковыми свойствами. Второй период (1927—1941 гг.) характеризуется изучением электролюминесценции в тех же детекторах и обстоятельным научным доказательством того, что детектирование, люминесценция и фотопроводимость суть явления взаимосвязанные. В 1926 г. Лосевым был обнаружен новый случай самовозбуждения автоколебаний радиотехнических схем и подробно изучены общие вопросы самовозбуждения радиотехнических генераторов, в том числе релаксационных. Некоторые вопросы, исследованные О. В. Лосевым, в последующие годы были изучены всесторонне, другие, сформулированные или затронутые им, сохранили первоначальную актуальность и научную новизну. Сборник снабжен библиографическим очерком.

Библ. — 219 назв., илл. — 137, табл. — 14.

Ответственный редактор
Г. А. Островский

ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛОСЕВ

БИОБИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Г. А. Остроумов

Значение работ Олега Владимировича Лосева состоит в том, что еще в 20-х годах нашего столетия он одним из первых обнаружил и исследовал область, лежащую на границе между радиотехникой и физикой и называемую ныне полупроводниковой электроникой. Добытые им результаты получили объяснение лишь много лет спустя. В частности, О. В. Лосев экспериментально доказал существование некоторого «активного» слоя в детектирующем контакте, обладающем вентильными свойствами, которые теперь объясняются наличием $n-p$ -перехода. Еще в 1923 г. он обнаружил в этом слое явление электролюминесценции, которое теперь широко применяется в полупроводниковых лазерах и изучается во многих лабораториях мира. В то же время О. В. Лосев тщательно исследовал на примере цинкитного детектора кристаллические диоды с отрицательным сопротивлением, которые только теперь заново изобретены и подвергаются изучению под названием лавинных диодов. Даже в области технологии полупроводниковых приборов он внес свой вклад: изобрел способ переплавки цинкита в вольтовой дуге. Каждое его научно-техническое начинание ныне выливается в самостоятельное научное направление.

Удивительная естественнонаучная интуиция и самоотверженная работоспособность сочетались в Олеге Вла-

димировиче с необыкновенной скромностью и влюбленностью в науку. Эти качества позволили ему выполнить и опубликовать целый ряд работ, заслуживающих и ныне самого пристального изучения.

Олег Владимирович Лосев родился 10 мая 1903 г. в Твери (ныне Калинин) в семье служащего вагоноремонтного завода. Будучи еще учеником 5 класса реального училища, он присутствовал в 1917 г. на публичной лекции начальника Тверской военной радиоприемной станции Владимира Михайловича Лепчинского о беспроволочном телеграфе [1]. Содержание лекции увлекло любознательного юношу, он познакомился с автором лекции, с личным составом радиостанции, стал частым гостем в той «внештатной» радиовакуумной лаборатории, которая была создана на станции Михаилом Александровичем Бонч-Бруевичем, и приступил к радиолюбительскому экспериментированию у себя дома. Постепенное пополнение его кустарной лаборатории и усердные занятия в ней, а также чтение книг по физике, далеко выходящих за рамки школьных программ, уже с детства воспитали в нем богатые экспериментальные навыки и выдающуюся физическую интуицию. Занятия О. В. Лосева нашли одобрение и поддержку его школьного учителя Вадима Леонидовича Лёвшина (впоследствии выдающегося физика, сотрудника ФИАН в Москве). Обратил на него внимание и часто бывавший на Тверской станции профессор Владимир Константинович Лебединский, отметивший его незаурядные способности. Опытный педагог и знаток человеческого сердца, он сразу почувствовал энтузиазм и своеобразную одаренность юноши.

Коллектив «внештатной» лаборатории в середине августа 1918 г. переехал в Нижний Новгород в качестве инициативной группы для организации, по прямому указанию В. И. Ленина, первого в Советской стране целевого научно-исследовательского и производственного института — Нижегородской радиолаборатории Наркомата почт и телеграфа.

Не прерывая экспериментов, Лосев оканчивает школу и осенью 1920 г. отправляется в Москву для поступления в Московский институт связи. В сентябре того же года в Москве состоялся Первый Всероссийский радиотехнический съезд, куда постарался проникнуть любозна-

тельный юноша. Там он вновь встретился со своими тверскими друзьями и вдохновителями, в частности с М. А. Бонч-Бруевичем, ставшим техническим руководителем Нижегородской радиолаборатории (НРЛ), и с профессором В. К. Лебединским — председателем Совета НРЛ и редактором журнала «Телеграфия и телефония без проводов» (ТиТбп). Они предложили О. В. Лосеву переехать в Нижний Новгород и поступить на работу в НРЛ.

Олег Владимирович в Нижнем успешно прошел срок обычной для вновь принимаемых на работу проверки в должности «служителя» и вошел в коллектив вдохновенных энтузиастов радиотехники.

После внимательного наблюдения за тем, как относился О. В. Лосев к поручаемым ему заданиям, В. К. Лебединский принял его в свою лабораторию на должность младшего лаборанта и приложил все старания, чтобы помочь ему в кратчайшее время приобрести основные необходимые знания для самостоятельной работы в области радиотехники.

В. К. Лебединский очень внимательно следил за ростом Олега Владимировича и, несомненно, оказал сильное влияние на направление и темпы этого роста. Его методика обучения была очень своеобразной. В ней не было как будто никакого руководства, т. е. назначения заданий и проверки исполнения. Давались только редкие единичные советы, вкрапленные среди множества задаваемых всколызь вопросов. Владимир Константинович спрашивал, Олег Владимирович отвечал. И трудно было удержаться от восхищения глубокой искренностью и тактом, с каким крупнейший ученый вел научный разговор с юношой.

Лебединский по складу ума был просветитель, трибун, оратор, пропагандист- популяризатор, в то время как в Лосеве явно проглядывали черточки естествоиспытателя-индивидуалиста. Он не всегда мог охватить те мотивы и те идеи, которыми руководился его учитель, стремившийся к реорганизации радиотехники на основе новых успехов науки. Понимать его он начал значительно позже.

В лаборатории Олег Владимирович встретился с некоторыми молодыми сотрудниками, такими же, как он, энтузиастами беспроводной связи. Вместе с ними он

занялся изучением физической природы ее и технологией изготовления самодельной радиоаппаратуры. В те времена даже простейшие радиодетали, такие, как катушки индуктивности, переменные и постоянные емкости и активные омические сопротивления, так называемые мегомы, исследователям приходилось изготавливать в основном самостоятельно. Мегомы зачастую заменяла просто жирная черта, проведенная графитовым карандашом между двумя клеммами на поверхности бумаги.

Из таких деталей сотрудники НРЛ собирали схемы приемников, генераторов и других приборов на угловых панелях. Сначала приемные радиолампы марки ПР-1, потом другие, более совершенные, изготавлялись в НРЛ. О. В. Лосев имел возможность наблюдать и за их производством и постепенным усовершенствованием.

В библиотеке была собрана богатая по тому времени литература и на русском, и на основных европейских языках; разобраться в последней молодежи помогала библиотекарь Ольга Александровна Зайцева, сама увлеченная возможностями новых средств связи.

С элементарными физическими процессами в радиосвязи О. В. Лосев был знаком еще со временем своих экспериментов в Твери. Он мог уже выполнять задания инженеров по сборке отдельных узлов приборов и по производству радиоизмерений; в часы, свободные от выполнения обязательных работ, он мог теперь гораздо глубже, чем прежде, продумывать конкретные вопросы, выдвигаемые лабораторной практикой. В частности, его крайне интересовал механизм действия кристаллических детекторов, которому он не находил удовлетворительного объяснения. Старая искровая радиотехника оставила богатый материал по чисто эмпирическому изучению множества различных детекторов, в котором было трудно разобраться. Теории же явлений детектирования тогда совсем не существовало.

Олег Владимирович постепенно убедился, что все виды детекторов представляют собой так называемые нелинейные сопротивления, в которых ток не подчиняется закону Ома, и на графике зависимость его от напряжения — так называемая вольтамперная характеристика — выражается не прямой линией, а более сложной фигурой. Он обратил внимание, что подобные нелинейные зависимости наблюдаются в процессе намагничивания

железа, разные образцы которого характеризуются различными кривыми намагничивания. Наблюдалась формальная аналогия, которую Лосев пытался проследить [³].

Уже в июне 1921 г. он передает редактору ТиТбп профессору В. К. Лебединскому научную заметку о магнитных усилителях [1], которая оказалась первой публикацией на эту тему на русском языке. В ней отлично прослежена формальная параллель между нелинейными свойствами ферромагнетиков и диэлектриков и показано, что посредством низкочастотного источника электроэнергии (в том числе постоянного тока) нельзя усилить высокочастотный сигнал. Как известно [²], современные магнитные усилители усиливают низкочастотный сигнал за счет энергии высокочастотных источников.

Одобрение этой работы, полученное от Владимира Константиновича, побудило Олега Владимировича к еще более внимательному экспериментальному изучению детекторов различного типа. Вскоре ему удалось открыть новое явление в детекторе из кристалла цинкита в контакте с металлическим острием — способность генерировать колебания в контуре Томсона. В феврале 1922 г. он передает в ТиТбп свою историческую рукопись о генераторных свойствах некоторых кристаллических детекторов [2], открывшую серию из 16 работ, опубликованных им на эту тему на протяжении 5 лет.

Первое публичное сообщение о своей работе Лосев сделал 9 марта 1922 г. на 36-й лабораторной беседе НРЛ (так назывался семинар, организованный для повышения квалификации сотрудников). Заметка в хронике журнала об успешности его опытов [⁴] появилась раньше статьи [2]. В заметке было отмечено, что еще в мае 1910 г. в Лондоне перед Физическим обществом демонстрировались подобные генераторные свойства, наблюдавшиеся, однако, при совсем иных условиях, лишь при напряжении около 500 в и токе 1 а в контуре с малым волновым сопротивлением [⁵]; они не имели никакого практического значения.

В работе [2], очень богатой по содержанию, О. В. Лосев дает подробное описание своих опытов с цинкитным [⁶, ⁷] детектором, в которых им были экспериментально установлены следующие закономерности. Цинкитный детектор, питаемый через балластное сопротивление 1000—1500 ом от батареи 8—12 в и включенный по-

следовательно в колебательный контур, может возбуждать в нем собственные незатухающие колебания. Частота этих колебаний равна или несколько меньше собственной частоты контура в зависимости от выбора рабочей точки на вольтамперной характеристике детектора. Места соприкосновения контактной проволочки с различными точками поверхности кристалла обнаруживают различные свойства: одни хорошо детектируют, другие хорошо генерируют, третьи не проявляют активности. Для усиления колебаний (что сопровождается, между прочим, и некоторым понижением их частоты) следует по возможности уменьшать волновое сопротивление контура.

Было исследовано 13 пар кристалл—контактная проволочка при токах в обоих направлениях, и генераторные свойства их оценены по 8-балльной шкале. В статье [2] приведен перечень четырех возможных схем соединений детектора с последовательным колебательным контуром и батареей питания с балластным сопротивлением. Установлена возможность радиотехнического применения цинкитного детектора как гетеродина к простому детекторному радиоприемнику и как регенеративного (автодинного) детекторного приемника (ультраудиона). Разработана схема исследования электрических свойств генерирующего детектора, наглядно изображаемых вольтамперными характеристиками, и установлено, что самоизвозбуждение колебаний осуществляется только на «падающей» части этих характеристик. Усиление сигналов ограничено максимальной амплитудой переменного тока, которая в свою очередь ограничена ходом кривизны вольтамперной характеристики детектора (ее формой).

Статья поражает отчетливостью изложения и убедительностью графических методов анализа исследуемых физических явлений.

Через 2 месяца Олег Владимирович публикует сообщение (см. [8]) о простом способе отыскания генерирующих точек на поверхности кристалла цинкита с помощью контура звуковой частоты и телефона: удачная точка сразу дает в телефоне слышимый тон как сигнал о возникшем самовозбуждении контура.

Эти работы получили очень высокую оценку со стороны руководителей НРЛ — М. А. Бонч-Бруевича и В. К. Лебединского, они открывали возможность воспользоваться

этими физическими явлениями для разработки высокочувствительной радиоприемной аппаратуры, не требующей для питания таких мощных гальванических или аккумуляторных батарей, как ламповые приемники того времени. В то время уже начала работать центральная радиотелефонная станция в Москве, но ее передачи можно было принимать на простые детекторные радиоприемники лишь вблизи столицы, а на расстоянии порядка 600—800 км требовались все же ламповые усилители. Возможность снабдить радиослушателей дешевыми приборами с цинкитным усилителем, предложенным Лосевым, была очень заманчива.

О. В. Лосев получил предложение сделать доклад в Москве на заседании Научного совета Наркомата почт и телеграфа с демонстрацией аппаратуры. Совет признал ценность достигнутых результатов. Он поручил Олегу Владимировичу продолжать работы, а руководству НРЛ — изготавливать образцы, пригодные для промышленного производства. Было обращено внимание на недостаточную устойчивость генерирующей точки на поверхности кристалла. Это побудило Лосева продолжить изучение физических свойств контакта для выяснения природы явления генерации.

В статье [4] (январь 1923 г.) он приводит свои соображения и опыты, подтверждающие его идею о большой роли «электронных разрядов, происходящих вследствие высокого градиента потенциала в точке контакта». Ввиду того что к тому времени был уже хорошо изучен и применен в радиотехнике дуговой разряд, характеризуемый падающим участком характеристики, то его, с осторожными оговорками, О. В. Лосев избирает в качестве модели для объяснения наблюдаемых явлений. Многочисленные опыты с нагревом контактной проволочки отдельным нагревателем привели его к выводу, что нагрев очень сильно понижает сопротивление точки контакта R , но мало влияет на удельное сопротивление толщи кристалла r . В статье приведены многочисленные примеры вольтамперных характеристик цинкитного генерирующего детектора, отличающихся изумительной точностью антисимметрии (одинаковостью кривых в первом и третьем квадрантах). Продолжая осторожные сопоставления действия детекторов с дугой, Олег Владимирович пишет [4]: «Условия вылета электронов на таких

малых расстояниях, какие имеют место при работе детектора, очевидно, совсем иные (чем в дуге), раз так сильно влияет на понижение пробивного напряжения уже незначительное изменение (повышение) температуры — значит, самый разряд происходит тоже при температуре нагрева электродов порядка сотни градусов Кельвина (а не 3000, как у обыкновенной... дуги), хотя и имеет свойства... дуги, а именно подчиняется закону $U = a + \frac{b}{j}$.

В ответ на многочисленные гипотезы, высказывавшиеся ранее в литературе, О. В. Лосев выполняет специальные исследования роли термоэлектродвижущих сил с образцами детекторов и устанавливает, что в рамках исследуемых явлений термоэдс ничтожна по величине и обратна по знаку. Он отмечает, что у карборундового детектора в месте контакта замечается слабое зеленоватое свечение при токе через контакт всего 0.4 ма, и делает отсюда вывод, что «разряды, которыми действуют генерирующие точки, не являются вольтовыми дугами в буквальном смысле, т. е. не имеют накаленных электродов». Магнитное поле (до 10^4 гс) не оказывает заметного влияния на изучаемое явление.

В мае 1923 г. О. В. Лосев изготовил первый технический образец приемника-гетеродина с кристаллическим детектором [9], а в июле того же года аппарат был с успехом испытан радиотелеграфистами-профессионалами [10].

В работе [5] (июнь 1923 г.) Олег Владимирович подробно описывает аппаратуру (генератор, волномер и методы его градуировки, схему установки) для генерирования токов высокой частоты при помощи контактного детектора. Он зарегистрировал частоту 12.3 Мгц. Для цинкитного детектора это не предел, хотя по мере повышения частоты мощность колебаний убывает. Статья заканчивается техническими рекомендациями, в том числе излагается технология переплавки «плохих» кристаллов в «хорошие» (т. е. имеющие малое удельное сопротивление толщи кристалла r).

Крайняя дешевизна новых приемно-усилительных устройств и их простота привлекли внимание радиолюбителей не только в СССР, но и за рубежом. Это отметил В. К. Лебединский в заметке в журнале ТиТбп (июль 1924, № 25; см. [12]).

В разных радиолюбительских журналах в СССР и за рубежом появились описания кристаллических генераторов и приемников О. В. Лосева. Один французский журнал при этом подчеркнул, что за рубеж от него не поступило заявки на патент и, как он выразился, Лосев «подарил свое открытие миру». В другом журнале ему присвоили даже звание «профессора», не допуская и мысли, что столь значительную работу выполнил начинающий радиист-энтузиаст, не закончивший даже высшую школу.

В те времена совсем не было радиотехнической аппаратуры в современном понимании — осциллографов, ламповых электрометров, фотоумножителей и прочих приборов, имеющихся ныне в каждой высокочастотной лаборатории. Однако недостаток аппаратуры компенсировался до известной степени остroумными комбинациями измерительных методов и схем, позволявших устанавливать требуемые количественные закономерности, и искусством экспериментатора. Новая радиотехника только создавалась и самим О. В. Лосевым, и другими сотрудниками НРЛ. Каждый новый аппарат продумывался, проектировался и изготавлялся при небольшой помощи мастерских самим автором, а потом исследовался, градуировался и эксплуатировался им же.

Олег Владимирович обладал талантом собирать из простейших предметов и разных отходов — дощечек, обрезков проволоки, жестянок и пр.— приборы для наблюдения интересовавших его явлений. Это умение он совершенствовал с детских лет. Следуя совету великого экспериментатора П. Н. Лебедева, он никогда не красил и не отделял свои отлично работающие установки. Это придавало им внешне непрятный вид, и начальство избегало показывать приборы О. В. Лосева высокопоставленным гостям.

В работе его всегда была собранность и целеустремленность. Он выполнял ее ровно, систематически, размежено, спокойно, с одинаковым все время напряжением, и все своими руками. Человек он был внешне невозмутимый.

Одновременно с Олегом Владимировичем подросла и повысила свою квалификацию вся та группа юных радиотехников, в состав которой он вошел в первые дни работы в НРЛ. Их товарищеская спайка и дружба только укрепились. Несмотря на то что все они решали

те или иные важные и новые очередные вопросы радиосвязи, они долго сохраняли настроения ранней юности и даже мальчишеские привычки.

С течением времени эта молодая дружная компания значительно пополнилась. В нее вошли И. М. Рущук, Б. Ф. Архангельский, А. А. Одинцов, В. М. Петров, Б. Л. Максимовых, А. Г. Рязанкин, Н. Н. Пальмов, С. И. Моругина и, наконец, самый младший из них, М. В. Лебединский, сын их общего учителя и опекуна В. К. Лебединского. Это пополнение быстро втягивалось в быт и в напряженную трудовую жизнь молодой смены радиостанции НРЛ, внося оживление и юношеский задор. О. В. Лосев пользовался среди них неизменным уважением и дружеским расположением. Его исключительная отзывчивость к интересам товарищей, личная скромность и врожденное благородство покоряли сердца. И в труде, и в развлечениях он был верным другом, принимавшим близко к сердцу интересы сверстников.

Любовь О. В. Лосева к науке была совершенно поразительна. Вполне допуская, что существуют люди, не столь преданные науке, как он (они могут быть преданы другим важным идеям), Олег Владимирович не навязывал никому своего увлечения, но свою влюбленность в эксперимент не скрывал, правда, и не афишировал — по своей скромности. Возможность немедленно осуществить новый научный эксперимент заставляла его бросать без сожаления все остальное и устремляться в лабораторию.

Интересы радиолюбителей неизменно были близки О. В. Лосеву, и он старался им помогать. В заметке [6] от 15 ноября 1923 г., напечатанной в ТиГБп, он констатирует успехи радиолюбителей, применивших цинкитные детекторы. Они использовали прием радиотелефона в режиме затягивания (увлечения) и осуществили радиотелефонную передачу на расстояние около 4 км. В том же номере ТиГБп отмечена положительная роль О. В. Лосева в деле пропаганды радиолюбительства.

Профessor B. K. Лебединский придавал большое значение внедрению приемников О. В. Лосева с генерирующим кристаллом в практику радиолюбителей, и не только потому, что они значительно расширяли область слышимости радиотелефонных станций, заменяя сложные ламповые радиоприемники, но еще и потому, что изго-

тovление их требовало значительного повышения технической квалификации любителей, знакомило с новыми физическими явлениями и с методами их изучения. Многие радиолюбители, начав с изготовления простейшего детекторного радиоприемника С. И. Шапошникова, переходили к попыткам изготовления «кристадинов» и к практике гетеродинного и регенеративного приема без затраты своих скромных средств на ламповую радиоаппаратуру. По настоянию профессора В. К. Лебединского и на основании своих экспериментов О. В. Лосев подготовил к печати брошюру «Кристадин» [13^a, 13^b, 13^c], изданную под редакцией В. К. Лебединского в 1924 г. тиражом 2000 экз. Успех ее среди радиолюбителей побудил НРЛ в том же году выпустить 2-е издание с увеличенным тиражом (3000 экз.), а в следующем году общество «Связь» и «Общество друзей радио» выпустили 3-е издание тиражом уже 15 000 экз.

По инициативе В. К. Лебединского статьи О. В. Лосева о «кристадине» были переведены О. А. Зайцевой на английский и немецкий языки и направлены, соответственно, в журналы «Wireless World and Radio Review» и «Zeitschrift für Fernmeldetechnik» [21, 22].

Одновременно Олег Владимирович интенсивно продолжал экспериментальные исследования генерирующих кристаллов и явлений детектирования. В статьях [7, 8] от 6 декабря 1923 г. он возвращается к теме работы [3] — отысканию генерирующих точек на поверхности цинкитного кристалла и устанавливает, что для надежного самовозбуждения высокочастотного контура его активное сопротивление не должно превышать сопротивление поискового низкочастотного контура. Рекомендуется приближенное равенство и волновых сопротивлений обоих контуров. В связи с этим О. В. Лосев рекомендует для настройки детекторных радиоприемников использовать вариометр и переменный конденсатор, объединенные одной осью с рукояткой и стрелкой волноуказателя. Следующая статья [9] посвящена исключительно техническим радиолюбительским вопросам, связанным с применением цинкитного детектора.

В статье [10] от 2 сентября 1924 г. О. В. Лосев описывает опыты, предпринятые в связи с известной феноменологической гипотезой [14, 15], согласно которой нелинейность вольтамперной характеристики детектора с ее

«падающим» участком обусловлена уменьшением удельного сопротивления вещества кристалла при повышении температуры точки контакта вследствие выделения тепла Джоуля. О. В. Лосев нашел, что средние относительные температурные коэффициенты сопротивления в интервале 22—97° для кристаллов железного блеска, карборунда и «лучшего» генерирующего цинкита отрицательны и соответственно равны 0.0065, 0.0027 и 0.007 1/°C. Олег Владимирович приходит к следующему заключению: действие «цинкитного детектора» вовсе не обусловлено видимой, хотя бы и незначительной, вольтовой дугой; вероятнее, что тут (если говорить об электронных разрядах) совершенно своеобразный электронный разряд, не имеющий, как показывает опыт... накаленных электродов». Обращает на себя внимание отличная воспроизводимость всех результатов эксперимента при повторных проверках, т. е. та тщательность, с которой были добыты первичные результаты.

Все эти экспериментальные исследования возникновения электрических колебаний в различных схемах побудили О. В. Лосева внимательнее вдуматься в самый механизм их возникновения. Он сопоставил колебания, генерируемые цинкитным кристаллом, с колебаниями ламповых генераторов в различных режимах, стараясь уловить в них черты различия и сходства. Он изучил все известные в то время способы преобразования частоты — умножения и деления, условия возникновения в некоторых сложных приемно-усилительных схемах паразитных колебаний звуковой частоты, свиста и шума, исследовал так называемые релаксационные колебания в цепях из емкости и сопротивления. Он нашел условия появления за счет энергии основных колебаний в схеме колебаний другой, более низкой частоты с любым отношением частот, а не только целочисленным, как в обычных делителях частоты.

Результатом исследования явилась следующая работа (от 13 августа 1926 г., ранее доложенная 3 февраля 1926 г. на лабораторной беседе НРЛ), посвященная «трансгенерации» [11]. Этот термин О. В. Лосев придумал для того, чтобы возможно точнее охарактеризовать трансформацию автоколебаний высокой частоты в автоколебания низкой частоты (при любом отношении частот) с помощью нелинейного устройства. Всеобщее изумление у товари-

щей по работе вызывало самовозбуждение автоколебаний в низкочастотном контуре, не имеющем даже гальванической связи с самовозбужденным высокочастотным источником: контуры были связаны исключительно через взаимоиндукцию по высокой частоте. В низкочастотном контуре оказалось возможным выделить режимы — почти синусоидальный, почти и совершенно релаксационные. Были получены релаксационные колебания обоих возможных режимов: период колебаний определялся произведением сопротивления на емкость или частным от деления индуктивности на сопротивление.

Явление трансгенерации О. В. Лосев искусно использовал для выяснения деталей фундаментального в радиотехнике вопроса об устойчивости колебаний. Дело в том, что цинкитный самовозбуждающийся двухполюсник, так же как и классический дуговой генератор, современные лавинные диоды [16] и элементы с $p-n-p-n$ -переходами [17], имеющими многозначность по напряжению, может создавать колебания устойчивой амплитуды только в последовательном контуре. В противовес этому катодная лампа (особенно в динатронном оформлении) а также тунNELьные диоды [18], имеющие многозначность по току, могут создавать устойчивые колебания, только если они присоединены параллельно к конденсатору колебательного контура. В пересчетных триггерных схемах роли этих приборов меняются.

Изучая вольтамперную характеристику того двухполюсника с отрицательным сопротивлением, который осуществляется выпрямителем в низкочастотной части трансгенерационной схемы, Олег Владимирович показывает, что трансгенерационный двухполюсник при определенной регулировке (см. стр. 79, рис. 9) может в своей низкочастотной части служить как отрицательным последовательным сопротивлением (в средней части вертикальной ветви характеристики), так и отрицательной утечкой (в средней части горизонтальной ветви). Другой такой феномен доныне в радиотехнике как будто не встречался. В исследованиях этого раздела радиотехники О. В. Лосев опередил своих современников, и ему было выдано авторское свидетельство № 29 875.

В августе 1927 г. появился подробный реферат О. В. Лосева о релаксационных колебаниях по материалам зарубежной литературы [12].

При изучении различных типов кристаллических детекторов он обнаружил еще одно новое явление — появление в точке контакта острия с металлом свечения. Оно наблюдалось лишь у отдельных кристаллов и было весьма слабым. Только некоторые сорта кристаллов карборунда резко выделялись среди прочих значительной яркостью этого свечения — светились и поверхность, и даже толща прозрачного кристалла, прилегавшие к острию. Свечение оказалось «холодным» и «безынерционным».

В работе [13] от 14 июня 1927 г., доложенной 9 марта того же года на лабораторной беседе в НРЛ, О. В. Лосев возвращается к исследованию свечения детекторов (см. также [24]). Они открывают новую блестящую серию из 16 работ по вопросам детектирования, свечения и фотоэффекта.

Рассматриваются два сорта свечения карборундового детектора. «Свечение I», наблюденное и описанное раньше [4, 10], отличается большой сосредоточенностью около точки контакта и неизменностью зеленовато-голубого цвета; оно более интенсивно, когда направление тока соответствует большему сопротивлению детектора, — карборунд—острие. «Свечение II» наблюдается и в других точках кристалла карборундового детектора. Оно более расплывчато по очертаниям: «... ярко флуоресцирует значительная поверхность кристалла, выходящая иногда далеко за пределы места касания с контактной проволочкой...». Выпрямительное действие карборундового детектора находится в несомненной связи с его свечением». Несколько разных сортов карборунда, цинкита и железного блеска О. В. Лосев испытал на катодолюминесценцию в газоразрядной трубке, из них сильно светился только карборунд. Он установил, что свечение безынерционно вплоть до частоты 78 500 Гц (опыт был ограничен разрешающей способностью вращающегося зеркала). Яркость свечения достаточна для фотографирования на движущейся фотопластинке пунктирной линии записи переменного тока частотой 500 Гц.

Подробно описывая свечение карборундового детектора, Олег Владимирович подчеркивает органическую связь детекторного действия (в отличие от цинкитного детектора карборунд имеет неантисимметричную характеристику) и свечения. Он пишет: «Вероятнее всего, что кристалл светится от электронной бомбардировки, ана-

логично свечению различных минералов в кружковых трубках».

В статье [13] приведены микрофотографии свечения при разных выдержках. Поперечная площадь свечения (соприкосновения с электродом) оценивается в 700 мкм^2 (диаметр 30 мкм, ср. [15]). Свечение наблюдалось у цинкитного детектора (хотя оно гораздо слабее, чем у карборунда, ввиду непрозрачности цинкита). Приведены шлейфовые осциллограммы тока через генерирующий цинкитный детектор, в том числе типичные релаксационные колебания при той случайной регулировке аппаратуры, при которой осциллограммы снимались [10].

Яркость свечения оказалась пропорциональной протекающему сквозь кристалл току. Спустя почти 20 лет это явление было вновь открыто в Америке, но не в карборунде, а в некоторых кристаллофосфорах известным ученым Дестрио, предложившим для него название «электролюминесценция». Дестрио, однако, с самого начала отметил в своей публикации приоритет О. В. Лосева, и в Америке свечение карборунда получило название «Losev-light» — «свечение Лосева». Электролюминесценция ныне находит широкое применение в сигнализации, телевидении и светотехнике.

Олег Владимирович принимал участие в работе VI съезда физиков и 29 августа 1928 г. на 110-й лабораторной беседе НРЛ доложил о работе съезда в Казани и в Саратове.

В начале 1929 г. О. В. Лосев в составе большой группы сотрудников НРЛ был переведен в Ленинград, в Центральную радиолабораторию треста заводов слаботочной электропромышленности, научным руководителем которой был назначен М. А. Бонч-Бруевич. На новом месте О. В. Лосев продолжал углубленные исследования явлений в полупроводниках. Новое окружение и оживленная культурная жизнь в городе, где было много лабораторий, разрабатывающих открытия в области физики и химии, внесли свежую струю в его научные работы. На результаты его экспериментов обратил внимание академик А. Ф. Иоффе, он дал возможность О. В. Лосеву выполнить ряд исследований в Физико-техническом институте. Исследователь углубился в изучение новых физических теорий, в частности квантовой теории излучения, и сильно расширил свой кругозор.

Следующая статья О. В. Лосева [14] состоит из двух частей. Первая часть была представлена от имени сотрудника НРЛ от 27 декабря 1928 г., вторая — от имени сотрудника Центральной радиолаборатории (ЦРЛ) в Ленинграде. В этой статье он выдвигает гипотезу о происхождении электросвечения карборунда как видимого глазом подобия рентгеновского тормозного излучения. Физиологовому краю этой области спектра по закону Эйнштейна как раз соответствует обнаруженная им разность потенциалов около 3.2 в между положительной и отрицательной ветвями характеристики, начертанными в одном (например, в первом) квадранте плоскости — напряжение—ток. В настоящее время это свечение считается свечением рекомбинации электронов с ионами кристаллической решетки, а разность потенциалов соответствует ширине запретной зоны. Вычислив по своим данным толщину запорного слоя и соответствующий градиент потенциала, автор был ошеломлен большой величиной получаемого градиента — 10^5 в/см.

Впоследствии [19], [25] О. В. Лосев обнаружил, что при свечении II карборунда электропроводность слоев, простирающихся вблизи места контакта, увеличивается по мере усиления тока. С кварцевым спектрографом он проследил [15, 26] сдвиг цвета свечения II в фиолетовую сторону в пределах от температуры жидкого воздуха до красного каления. Спектральный край полосы испускания свечения I близок к началу полосы поглощения карборунда.

Олег Владимирович исследовал и плеохроизм карборунда: «Направление электрического вектора, соответствующего меньшему поглощению в области более коротких волн пропускаемого карборундом света (головой максимум), есть направление меньшей удельной проводимости». При помощи ламповой схемы с обратной связью он мастерски исследовал замеченное ранее обстоятельство: увеличение проводимости вдоль тангенциальных активных слоев карборунда при увеличении нормальной составляющей плотности тока. Свечение кристаллов карборунда под действием тока О. В. Лосев наблюдал в воздухе, в вакууме, в водных растворах электролитов (здесь они ярко светятся и хорошо детектируют).

В связи с ликвидацией лаборатории 23 мая 1931 г. старший лаборант 1-го разряда О. В. Лосев был переве-

ден в вакуумную лабораторию Б. А. Остроумова «для исследования фотоэффекта на карборундовом детекторе». Впоследствии лаборатория вошла в состав Института радиоприемной аппаратуры и акустики (ИРПА). Часть этих исследований О. В. Лосев провел в лаборатории академика А. Ф. Иоффе в ГФТИ. Некоторое время он работал в целевом институте № 9, а затем поступил на работу в качестве ассистента кафедры физики I медицинского института.

На протяжении последующего времени он напряженно исследовал свойства светящихся карборундовых детекторов. Толщина активного слоя [19, 20], судя по свечению в нем, оказалась 4, 5, 11 и 20 мкм. По совету А. Ф. Иоффе О. В. Лосев провел постепенное сошлифование, в том числе клиновидное, активного слоя. К обнажаемой поверхности прикладывались электроды — зонды. При этом отчетливо подтвердился замеченный ранее клиновидный характер хода проводимости по мере углубления внутрь активного слоя. Сопротивление, измеряемое между двумя острийными электродами, касающимися склоненной поверхности шлифа, составляет от $5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^8$ ом.

Зондовые компенсационные измерения потенциала на скосе клиновидной сошлифовки показали постепенное падение потенциала и в толще, и в особом активном слое по закону Ома. В активном слое на глубине 11 мкм падение потенциала относительно очень велико и резко несимметрично: выпрямительный механизм локализован именно здесь.

При освещении активного слоя возникала фотоэдс, которая создавала ток, противоположный току высокой проводимости. Вольтамперные характеристики, снятые в темноте и на свету, позволили обнаружить фотоэдс до 0.03 в. После сошлифования до остаточной толщины активного слоя 1—3 мкм фотоэдс увеличивалась до 3.4 в. Это означало, что и она локализована на границе активного слоя с толщиной кристалла. Полное сошлифование активного слоя лишало кристалл фотоэффекта.

На основе дальнейших исследований О. В. Лосев приводит [16, 27] фотографии свечения активного слоя толщиной 15 мкм и результаты анализа огромного количества характеристик. Это позволило ему сформулировать

и обосновать современную физическую модель выпрямления и свечения активных слоев полупроводников.

С целью выбрать полупроводники, пригодные для постройки фотоэлементов вентильного типа, аналогичные селеновым, и фотосопротивлений ученый исследовал более 90 веществ [17]. Он разработал новый метод исследования порошкообразных навесок полупроводника (около 0.05 г), плотно натертых на матовую поверхность диэлектрика и смоченных органическими электролитами. Прерывистое освещение (до 8000 перерывов в 1 сек.) позволило установить, что причина инерционности сигналов от таких фотосопротивлений имеет исключительно емкостную природу. О. В. Лосев обнаружил новый эффект: изменение емкости при освещении смеси прерывистым светом без заметного изменения его проводимости.

В кристаллах даже химически чистого кремния при помощи измерения постоянного тока и при постоянном освещении О. В. Лосев не мог обнаружить фотоэдс [18]. Исследование показало, что в этих условиях фотоэффект проявляется в изменении не электропроводности, а емкости кремниевого фотосопротивления. Опыты с фоническим колесом и ламповым усилителем показали, что обнаруженная емкостная фоточувствительность сначала растет пропорционально частоте перерывов света, достигает максимума при 250 Гц, потом плавно спадает (исследовано до 8 кГц). В спектре она начинается примерно при 450, достигает максимума при 600 и почти линейно спадает к нулю при 1300 мкм.

В 1938 г. Совет Ленинградского политехнического института по представлению академика А. Ф. Иоффе присудил О. В. Лосеву ученую степень кандидата физико-математических наук по совокупности опубликованных работ без защиты диссертации. С осени 1938 г. он становится преподавателем физики I медицинского института в Ленинграде.

На гранях одного и того же карборундового кристалла О. В. Лосев находит [20], [22] активные слои двух типов. Один из них толщиной порядка 10^{-3} см с преобладающей электронной проводимостью (толща кристалла имеет дырочную проводимость); направление фототока соответствует движению электронов из толщи в слой. Второй слой имеет толщину порядка 10^{-5} см. После частичного соплифовывания активного слоя первого типа до ~ 1 мкм при

снятии на свету вольтамперной характеристики можно наблюдать, что фототок монотонно растет с ростом напряжения того же направления от значения фототока короткого замыкания до некоторого тока насыщения, практически достигаемого при напряжении около 5 в. Отношение этого тока I_n к току короткого замыкания I_k следующим образом зависит от частоты ν освещдающего света:

$$\sqrt{\frac{I_n}{I_k} - 1} = \frac{\nu}{\nu_0} - 1.$$

На основании измерений можно определить частоту красной границы фотоэффекта ν_0 . Оказалось, что $\nu_0 = 4.65 \cdot 10^{14}$ Гц, $\lambda_0 = 645$ мкм, $h\nu_0 = 1.91$ эв.

О. В. Лосев исследует [19] величину фототока короткого замыкания в слоях карборунда, отыскиваемых при помощи того свечения, которое в них возникает при пропускании тока обратного направления. Оказалось, что график удельного фототока (отнесенного к одинаковой интенсивности света) имеет вид резонансной кривой с максимумом около 350 мкм, высотой около 180 мка/вт·см² при полуширине около 70 мкм. Таковы параметры фотоэлектрической полосы поглощения зеленого карборунда.

О своих успехах О. В. Лосев доложил на 6-м (юбилейном) совещании по свойствам полупроводников в октябре 1940 г. [20]. При повышении температуры наблюдается «антистоксовская» прибавка энергии фотонов: максимум интенсивности света смещается в фиолетовую сторону. Отмечается высокая яркость свечения и малая его инерционность (прослежено до 8 кГц). Это была последняя публикация О. В. Лосева.

Будучи горячим патриотом, Олег Владимирович регулярно публиковал результаты своих исследований и за рубежом [21—27], но всегда после появления соответствующего сообщения на русском языке. Он в свою очередь внимательно следил за русскими и зарубежными исследованиями в интересующей его области, горячо реагировал на появление в печати новых фактов и идей в его сфере. Его статьи содержат богатую библиографию. О. В. Лосев заботливо оберегал советский приоритет и в области изобретательства, он много трудился над форму-

лировками патентных описаний и формул изобретения. В результате ему было выдано 15 авторских свидетельств.

Блокада Ленинграда застала О. В. Лосева преподавателем I медицинского института. Он добровольно отказался от эвакуации, о чем потом очень жалел. 17 ноября 1941 г. он писал В. П. Жузе в Саратов: «Я так и остался в Ленинграде с мамой и женой; только старик-отец эвакуировался в г. Ворошиловск. Жалею, что я не эвакуировался со всей семьей . . . Сейчас я по-прежнему в Медицинском институте; пока ничего, но вообще из Ленинграда, разумеется, следовало уехать с самого начала. . . Закончил я в начале октября еще одну статью о полупроводниках — „Метод электролитных фотосопротивлений. Фоточувствительность некоторых сплавов кремния“. Отдал ее в редакцию ЖЭТФ в Ленинграде, но, разумеется, переслать в Казань для редактирования они ее не имеют возможности; она будет лежать, вероятно, до окончания войны. А стремление закончить эту статью¹ было одной из причин, заставивших меня остаться в Ленинграде. Еще раз жалею, что не уехал».

Во время блокады Олег Владимирович нес большую педагогическую нагрузку, охотно работал по общественной линии. Войдя в сферу медицинских идей, он на себе испытывал действие изобретенного им электростимулятора сердечной деятельности. Трамваи тогда не ходили, и О. В. Лосев пешком шагал в город из Лесного за 2 часа до начала занятий, чтобы воздушная тревога не заставила его опоздать на занятия. Он принял участие в разработке аппаратуры противопожарной сигнализации и изготовил портативный прибор для обнаружения в ранах металлических осколков. Наконец, он стал донором и неоднократно сдавал кровь для помощи раненым.

Недоедание и самоотверженная неумеренная перегрузка подорвали силы организма: О. В. Лосев попал в госпиталь института, в котором он работал, и 22 января 1942 г. его не стало.

¹ Следы этой статьи затерялись.

Л и т е р а т у р а

- [¹] В. Лещинский. О сущности беспроволочного телеграфа (изложено применительно к лекции, читанной автором для рабочих Тверской мануфактуры). Тверь, 1918.
- [²] БСЭ, 26, стр. 23.
- [³] О. В. Лосев. Умножители частоты. — Радиотехник, 1921, 14, стр. 478—486.
- [⁴] О. В. Лосев. Детектор-генератор. Заметка. Лабораторная беседа № 36 9 марта 1922 г. с демонстрациями, присутствовало 93 слушателя. — ТиТбп, 1922, март, 13, стр. 348.
- [⁵] А. Н. Васильев. Развитие беспроволочной телефонии. — Радиотехник, Н. Новгород, 1920, сентябрь, 13, стр. 207—220.
- [⁶] Цинкит, цинка окись. БСЭ, 46, стр. 625.
- [⁷] У. Россикх. Редкость цинкита. Реферат из «Radio Barcelona». — ТиТбп, 1925, октябрь, 32, стр. 433.
- [⁸] О. Лосев. Детекторный гетеродин и усилитель. — Техника связи, 1923, 4—5, стр. 56—58 (подробнее см. [2, 3]).
- [⁹] О. В. Лосев изготавляет первый приемник-гетеродин. — ТиТбп, 1923, май, 19, стр. 204.
- [¹⁰] Кристаллический детектор-гетеродин. Заметка. — ТиТбп, 1923, июль, 20, стр. 326.
- [¹¹] Изготовление кристаллов. Заметка. — ТиТбп, 1924, июль, 25, стр. 342—343.
- [¹²] Кристаллический детектор гетеродин за границей. Заметки. — ТиТбп, 1924, июль, 25, стр. 329; 1924, октябрь, 26 стр. 432—433.
- [^{13a}] О. В. Лосев. «Кристадин». — Библиотека радиолюбителя, вып. 4. Нижний Новгород, 1924.
- [^{13b}] О. В. Лосев. «Кристадин». Самодельный радиоприемник с кристаллическим детектором (перевод с англ.). Изд. 2. — Библиотека радиолюбителя, вып. 3. Под ред. Лебединского. Нижний Новгород, 1924.
- [^{13в}] О. В. Лосев. «Кристадин». Самодельный радиоприемник с кристаллическим детектором (перевод с англ.). Циркуляр Бюро стандартов, № 120. Изд. 3-е. Под ред. В. К. Лебединского. М., 1925.
- [¹⁴] W. H. Eccles. — Phil. Mag., 1910, 19, pp. 869—888.
- [¹⁵] Р. Холм. Электрические контакты. М., 1961.
- [¹⁶] A. F. Gibson, J. R. Morgan. Avalanche injection diodes. — Solid-State Electronics, 1960, 1, pp. 54—69.
- [¹⁷] Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением. Сб. переводных статей под ред. С. А. Гаряинова, М.—Л., 1962.
- [¹⁸] Н. Горюнов, А. Экслер. Электрические параметры туннельных диодов и методы их измерения. — Радио, 1964, 12, стр. 38—42.

[¹⁹] О. В. Лосев. О приложении теории квант к явлению свечения карборундового детектора. — Физика и производство, Ленинградский политехнический ин-т, 1929, 2, стр. 43—46.

[²⁰] О. В. Лосев. Отчет по наряду № 1187 за 1931 г. Материалы ЦРЛ. Доклад 24 сентября 1931 г. на конференции по фотоэлементам и твердым выпрямителям в ГФТИ. Результаты опубликованы: ЖТФ, 1931, 1, 7, стр. 718—724.

[²¹] О. В. Лосев. Реферат доклада на Всесоюзной конференции по твердым выпрямителям и фотоэлементам 23 сентября 1931 г. — Вестн. электротехн., 1931, 10, раздел I, стр. 386.

[²²] Новый спектральный эффект при вентильном фотоэлектрическом эффекте в моноокристаллах карборунда и новый метод определения красной границы вентильного фотоэффекта. ДАН СССР, 1940, 29, 5—6, стр. 360—362.