

О.В. ЛОСЕВ – ПИОНЕР ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

(из истории изобретения светодиодов, "усилительных диодов" и транзисторов)

Е.В. Остроумова

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской Академии Наук



Остроумова Елена Владимировна – старший научный сотрудник ФТИ им А.Ф. Иоффе, канд. физ.-мат. наук. Область научных интересов: ИК-спектроскопия поверхности полупроводников, квантовые явления на поверхности в сверхсильных электрических полях в структурах полупроводник-диэлектрик.

В 1920-30 годах техника и наука претерпевали невероятно быстрое развитие. Уже была построена теория относительности, создавалась квантовая теория твердых тел, развивалось и совершенствовалось радиовещание и зарождалась электроника. Трудно назвать другую область современной науки и техники, которая оказывала бы сейчас столь же сильное воздействие на развитие экономики и науки, как полупроводниковая электроника. В 1960-е годы полупроводниковые электронные приборы произвели подлинную революцию в технике связи и в вычислительной технике и положили начало бурному развитию полупроводниковой микроэлектроники. Можно без преувеличения утверждать, что современная вычислительная техника в той же мере увеличила интеллектуальное могущество человека, как в XIX веке овладение энергией пара увеличило физическую силу человека. Отныне экономическая и военная мощь государства в существенной мере определяется степенью владения полупроводниковой технологией.

Первыми полупроводниковыми электронными приборами стали кристаллические детекторы электромагнитных колебаний (Пиккард, 1906), которые пришли на смену когереру, использованному А.С. Поповым в первом в мире радиоприемнике в 1894 г. В качестве кристаллического детектора Пиккард использовал кусочки кремния, находящегося в контакте с металлической проволокой. Примерно в то же время выясняется, что свойством детектировать (выпрямлять) высокочастотные колебания обладает и контакт металлической проволоки со многими другими плохо проводящими

кристаллами (галенитом, пиритом, халькопиритом, цинкитом и др.). В том же, 1906 году, американец Ли де Форест изобретает вакуумный триод, который мог усиливать электромагнитные колебания и генерировать их в амплитудно-модулированной форме, что в сочетании с кристаллическим детектором позволило приступить к радиовещанию. Кристаллические детекторы в эпоху зарождения радиовещания способствовали его массовости. Детекторный приемник обеспечивал прием, используя лишь энергию высокочастотных колебаний из антенны, и был чрезвычайно прост в изготовлении. Кристаллический детектор является примером изобретения, сделанного "вовремя".

Хотя кристаллический детектор и был по существу первым полупроводниковым прибором, но думается, что время зарождения полупроводниковой электроники следует отсчитывать от момента создания полупроводниковых приборов, могущих не только обнаруживать, но и усиливать и генерировать электромагнитные колебания. Человеком, сделавшим этот чрезвычайно важный шаг, был замечательный изобретатель и ученый Олег Владимирович Лосев. Его удивительные открытия (усиление и генерация электромагнитных колебаний полупроводниковыми устройствами –



Олег Владимирович Лосев (1903-1942)

1921 г., электролюминесценция в полупроводниках – 1923 г.) намного опередили свое время и были практически забыты ко времени начала бурного развития полупроводниковой электроники, последовавшего за изобретением транзистора.

Литература о Лосеве немногочисленна. В 1972 г. был издан сборник научных трудов О.В. Лосева с наиболее полным описанием его биографии [3], а в 1976 г. в журнале IEEE Transaction Electron Devices появляется статья известного американского физика, профессора Стэнфордского университета Игона Лобнера (Egon Loebner), в то время атташе США по науке в Москве, в которой изложена история развития светодиодов [4]. Позднее, в 1983 и 1986 гг. А.А. Рогачевым (в 1986 г. совместно с А.Г. Остроумовым) [5,6], был сделан анализ трудов О.В. Лосева с точки зрения современной физики полупроводников. Далее, как и в начале, цитируются эти работы [5,6].

Олег Владимирович Лосев родился в 10 мая 1903 г. в Твери в семье конторского служащего. До 1920 г. Лосев учился в реальном училище в Твери. Много времени юный Лосев проводил на Тверской радиостанции Русской Армии. В то время, а шла Первая Мировая война, на Тверской радиостанции работала небольшая группа патриотически настроенных офицеров, которые под руководством В.М. Лещинского и его ближайшего помощника М.А. Бонч-Бруевича пытались не только изготавливать, но и усовершенствовать приемную аппаратуру. Так, в составе Тверской радиостанции создавалась внештатная Радиолaborатория, коллектив которой в августе 1918г. стал основой замечательного учреждения – Нижегородской Радиолaborатории (НРЛ). Работы этой лаборатория стали впоследствии гордостью нашей радиотехники.

Вернемся, однако, к биографии О.В. Лосева. Его школьным учителем был В.Л. Лёвшин, впоследствии – сотрудник лаборатории С.И. Вавилова, известный своими работами по люминесценции кристаллов. В том же году Лосев уезжает в Москву и поступает в Московский институт связи. Но учиться в институте ему было не суждено. В сентябре 1920 г. в Москве проходил первый Российский радиотехнический съезд, после которого Лосев принимает решение оставить институт и уехать в Нижний Новгород, чтобы работать в Нижегородской Радиолaborатории, куда к тому времени перебрались многие сотрудники Тверской радиостанции. В окружении блестящих специалистов (проф. В.К. Лебединский, В.М. Лещинский, М.А. Бонч-Бруевич) Лосев мог продолжать свое образование, совмещая с интересовавшей его работой. И уже в 1921 г., когда О.В. Лосеву едва исполнилось 18 лет, послана в печать его первая научная статья "О магнитных усилителях". В том же, 1921 г., исследуя вольтамперные характеристики кристаллических цинкитных (ZnO) детекторов, Лосев наблюдает участки отрицательного сопротивления и на "научно-технической беседе лаборатории" сообщает об открытии генерации и усиления электромагнитных колебаний на контакте металла с кристаллом окиси цинка при пропускании через него электрического тока. О.В. Лосеву удалось установить, что детектор из цинкита дает устойчивые колебания при приложении к нему напряжения менее 10 вольт. Электрические характеристики контакта

оказались столь стабильными, что, изменяя напряжение на контакте и устанавливая его в области значений, чуть меньше напряжения начала генерации, Лосеву удалось получить значительное усиление электрических колебаний, не сопровождающееся сколько-нибудь значительными шумами [1].

Далее, в первой статье о детекторе-генераторе Лосев пишет: "Точка кристалла, на которой получались колебания, совершенно другая, чем та, на которой происходило наилучшее детектирование без приложенного извне напряжения". О.В. Лосев установил, что усиление или генерацию при помощи двухполюсника (детектора, лампы и др.) возможно получить только в том случае, если он при определенных условиях обладает "падающей" вольтамперной характеристикой — отрицательным сопротивлением (рис.1) (т.е. падение напряжения на этом участке приводит к возрастанию тока). Режим усиления или генерации детектора определяется выбором тока и напряжения на участке отрицательного сопротивления. При последовательном включении детектора с отрицательным сопротивлением и нагрузки он служит усилителем напряжения, при параллельном — усилителем тока. Впоследствии этот детектор получил название "кристадин". Лосев приводит схемы приемников, в которых изобретенный им кристадин применялся для усиления как высокочастотных, так и звуковых колебаний. О.В. Лосеву удалось получить 15-кратное усиление сигнала в головных телефонах (наушниках) по сравнению с обычным детекторным приемником. Радиолюбители, высоко оценившие изобретение Лосева, писали в НРЛ, что при помощи цинкитного детектора в Томске, например, можно слышать Москву, Нижний, а также и заграничные станции Лион, Ганновер и ряд других.

В 1923 г. НРЛ посещают немецкие радиотехники А. Арко и А.Мейснер. В журнале ТИТбп ("Телеграфия и Телефония без проводов", 22, (1923)) есть сообщение о том, что детекторный генератор произвел на них впечатление такой новизны, соединенной с простотой, что они искали объяснения возможности появления такого прибора только в молодости талантливого изобретателя. А в журнале "Radio News" за 1924 г. появилась редакторская статья под названием "Сенсационное изобретение", автор которой пророчески назвал кристадин "изобретением, делающим эпоху". В том же 1924 г. в журнале "Radio-Review" публикуется статья, в которой "прибор признается сенсационным, и там же впервые ему дается название "кристадин".

У современников не вызывало сомнений, что О.В. Лосев изобрел принципиально новый и полезный при-

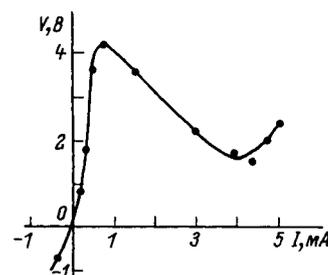


Рис.1. Типичная вольтамперная характеристика цинкитного детектора в генерирующей точке [1].

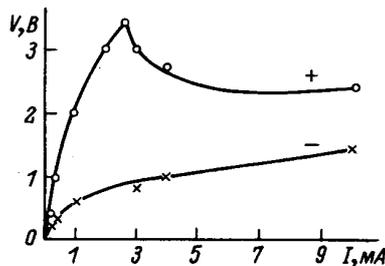


Рис.2. Вольтамперная характеристика с отрицательным сопротивлением в обратной ветви [2].

бор. Однако ясно и то, что без дальнейшего совершенствования применение его было ограничено. Кристадин явно проигрывал соревнование с радиолампами, которые в то время быстро совершенствовались. Кристадин был двухэлектродным устройством, что практически исключало создание на его основе многокаскадных усилителей и приемников, содержащих более чем два кристадина. Кристадин обладал многими преимуществами по сравнению с вакуумными радиолампами, но в отличие от радиоламп он все еще оставался "вещью в себе". Ко времени изобретения кристадина практически отсутствовали какие-либо теоретические представления, объясняющие природу выпрямляющего действия промежутка металлическое острие-контакт. Для объяснения протекающих в нем процессов потребовалось создание физических теорий, о которых в 1922 г. никто не мог иметь ни малейшего представления. Фактически, в том, каковы причины возникновения отрицательного сопротивления в полупроводниковых диодах, удалось разобраться лишь через тридцать лет. Выяснение природы процессов в чудесном кристалле, который он держал в руках, стало целью жизни Лосева. Современники вспоминали, что работа в лаборатории была его единственным увлечением, ей он отдавал себя всего без остатка. Его не тяготили ни условия, в которых он жил, а жил он в лаборатории у входа на чердак, ни должность рассыльного, на которую он был зачислен в штат лаборатории. Талант экспериментатора, который позволил ему выделить цинкитный детектор из всех известных тогда кристаллических детекторов, а исследовал он не одну дюжину контактов (цинкит, галенит, PbS, пирит FeS, халькопирит $CuFeS_2$, карборунд SiC, молибденовый блеск MoS, оловянный камень SnO_2 , с цинковыми, медными, алюминиевыми, угольными и др. проволочками), позволил ему сделать следующее, еще более замечательное открытие — свечение карборундового детектора [2]. Но об этом чуть позже.

Что же все-таки представляет собой кристадин с позиций современной физики? В настоящее время известно несколько полупроводниковых диодов, вольтамперные характеристики которых имеют область статического или динамического отрицательного сопротивления. Это — диод Ганна, ЛПД диоды, диоды с толстой базой и поверхностно-барьерные диоды с туннельно-тонким слоем окисла. Исходя из вида вольтамперных характеристик, которые опубликованы Лосевым (например, рис.2 [2]), можно сделать вывод, что участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением наблюдается в обратной ветви. Окись цинка, как известно, имеет проводимость только p-типа, поэтому в поверхностно-барьерном диоде вбли-

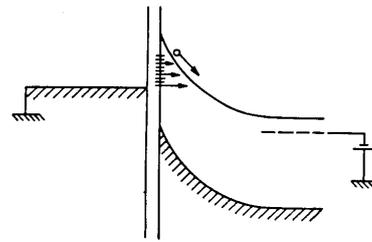


Рис.3. Энергетическая схема МДП-структуры с туннельно-прозрачным слоем диэлектрика и с поверхностными уровнями на границе раздела [7]

зи контакта с металлом зоны загибаются вверх. Это согласуется с тем, что для наблюдения обратной ветви ВАХ к металлическому электроду должен быть приложен "минус", т.е. так, как и в опытах Лосева. Далее, напряжение "отсечки" диода значительно меньше ширины запрещенной зоны окиси цинка ($E_g=3.2$ эВ), что также типично для диодов Шоттки.

Пожалуй, единственный известный до сих пор механизм возникновения отрицательного сопротивления в обратной ветви МДП-диода был предложен в 1968 г. в работе [7], выполненной на кремнии. Для этого механизма существенным является наличие туннельно-тонкого слоя диэлектрика (окисла), разделяющего металл и полупроводник (для кристалла ZnO это будет естественный поверхностный слой, отличный по составу от ZnO). Рис.3 поясняет сущность этого механизма. В сильном электрическом поле электроны, захваченные на поверхностные состояния на границе окисел-полупроводник, освобождаются за счет туннельных переходов в зону проводимости полупроводника, оставляя избыточный положительный заряд на поверхности. Поле этого положительного заряда создает небольшое падение потенциала в промежуточном слое окисла между полупроводником и металлом, что приводит к понижению потенциального барьера для электронов, выходящих из металла в полупроводник.

В качестве одной из возможных причин возникновения падающей вольтамперной характеристики цинкитного детектора О.В. Лосев рассматривал возможность появления микроскопических электрических разрядов на границе металлического острия и кристалла. Лосев искал и действительно нашел характерное свечение, возникавшее при пропускании тока через детектор. Но для этого ему пришлось просмотреть разные кристаллы, и только в детекторах из карборунда (SiC) наблюдалось интенсивное зеленоватое свечение, однако в нем не удалось получить генерацию электрических колебаний. Цинкитный детектор либо не светился совсем, либо показывал очень слабое свечение. И здесь начинается самая блестящая страница его открытий. Исследуя свечение кристаллических детекторов, изготовленных из карбида кремния, О.В. Лосев установил, что свечение является холодным, не связано с нагреванием кристалла или металлического электрода, как тогда считалось; свечение происходит внутри кристалла, а не на его поверхности и характер свечения сильно зависит от полярности приложенного напряжения [8]. Лосев различает два типа излучения: свечение I и свечение II. Приведенное им описание позволяет отождествить свечение I с тем, что теперь называется предпробойным свечением, а

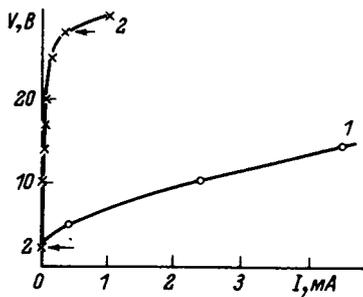


Рис.4 Вольт-амперная характеристика светящегося контакта карборунд-металл. 1-прямая ветвь, 2-обратная. Стрелками показаны значения тока, при котором свечение становится заметным глазом [8].

свечение II — с инжекционной люминесценцией полупроводника. Лосев обнаружил, что свечение II возникает лишь в кристаллах, имеющих на поверхности зеленого карборунда слой серого цвета, причем свечение локализуется вблизи границы этих слоев. Впоследствии, проводя измерения с помощью микротермозонда, он определил, что серый карборунд имеет проводимость дырочного типа, а зеленый — электронного. Таким образом, созданное им устройство было первым полупроводниковым светодиодом. На рис.4 приведена ВАХ, полученная Лосевым для светящегося контакта карборунд-металл.

Важным для выяснения природы свечения II явилось сделанное Лосевым наблюдение, что это свечение идентично свечению, возникающему при бомбардировке карборунда электронами при разряде в трубке Крукса. Сопоставление спектров фотолюминесценции и катодолуминесценции со спектрами инжекционной люминесценции является и теперь стандартным приемом при исследовании физической природы электролюминесценции. Лосев полагал, что это свечение есть результат тормозного излучения электронов, ускоренных сильным электрическим полем в области пониженной проводимости вблизи контакта. Этот вывод он делает на основе того, что положение границы в спектрах излучения определяется соотношением $h\nu = eV$, где V — напряжение, приложенное к высокоомному слою. Эта точка зрения возникла из аналогии с источниками рентгеновского излучения. Он считает, что излучение, возникшее при пропускании тока, есть явление, обратное фотоэлектрическому эффекту. Лосев предполагает и экспериментально устанавливает, что инерционность излучения отсутствует вплоть до частоты 78.5 кГц.

В настоящее время известно, что излучение полупроводниковых диодов является результатом излучательных переходов между зоной проводимости и валентной зоной, или переходов между одной из зон и примесными центрами в запрещенной зоне. В рамках современных представлений наблюдавшуюся экспериментально зависимость положения голубой границы спектра следует объяснить тем, что кристаллы, которыми пользовался Лосев, содержали большое количество примесных центров (кристаллы карборунда брались Лосевым из отходов абразивного производства), а наблюдаемое им излучение было обусловлено оптическими переходами зона-примесь.

Светодиод, даже в том виде, как он был исполнен О.В. Лосевым в 1926 году, был замечательным

прибором. Наряду с малой инерционностью он обладал и довольно большой яркостью. Современные оценки показали, что при токе через диод 0.1 А, КПД преобразования должен был быть примерно в 10 раз меньше, чем у современных светодиодов из карбида кремния.

Спустя почти 20 лет явление возникновения свечения при протекании тока в кристаллах вновь было "открыто" в Америке, но не в карборунде, а в некоторых кристаллофосфорах известным французским ученым Дестрио (G. Destriau), который назвал это явление "электролюминесценцией". Дестрио, однако, с самого начала отметил приоритет Лосева, и свечение карборунда в Америке получило название "Losev-light".

В процессе исследования природы свечения карборундового детектора О.В. Лосев сделал еще два весьма важных наблюдения. Так, он обнаружил свечение и выпрямление на границе электролита с некоторыми полупроводниками. В другом случае он был чрезвычайно близок к открытию транзистора. Исследуя изменение сопротивления активного слоя карборундового детектора при приложении напряжения в прямом направлении ("при возбуждении свечения II"), он обнаружил, что при пропускании тока между острием и кристаллом изменяется сопротивление между двумя другими остриями, расположенными поблизости от первого острья. Как известно, транзисторное действие состоит в том, что изменение сопротивления, вызванное пропусканием тока через пару контактов, приводит к изменению сопротивления между другой парой контактов. Однако сущность транзисторного действия состоит в усилении сигнала, но в опытах Лосева усиление не было получено. Карбид кремния был наименее подходящим материалом для таких целей. При более удачном выборе материала (галенит, германий, кремний) в той геометрии образца получение транзисторного усиления могло быть возможным. Этот пример показывает, сколь многообещающими были исследования О.В. Лосева.

Работы О.В. Лосева по исследованию полупроводников приборели в то время широкую известность. Его работы печатались в таких журналах, как "Вестник Электротехники", "ЖЭТФ", "Доклады АН СССР", Radio-Review, Philosophical Magazine, Physikalische Zeitschrift и др. Он выступал с докладами на многих всесоюзных конференциях, его работы были премированы Комиссией Наркомпроса.

После переезда НРЛ в Ленинград в 1929 г. и преобразования ее в Центральную Радиолaborаторию у О.В. Лосева появляется больше возможностей для исследований. Он часто бывает в ЛФТИ, по приглашению А.Ф. Иоффе проводит там некоторые опыты, в частности, снимает спектры излучения SiC-диодов. Одно время в ЛФТИ у него даже было свое собственное рабочее место, но закрепиться в штате ЛФТИ ему не удалось. Проработав некоторое время в институте № 9 (теперешний "Позитрон"), он уходит ассистентом на кафедру физики в 1-ый Мединститут. С 1935 по 1940 гг. О.В. Лосев не опубликовал ни одной научной работы. Служебное положение его осложнялось отсутствием у него диплома о высшем образовании. Но в то время практиковалось присуждение ученой степени по совокупности работ без защиты диссертации. Друзья уговорили его представить в Ученый совет

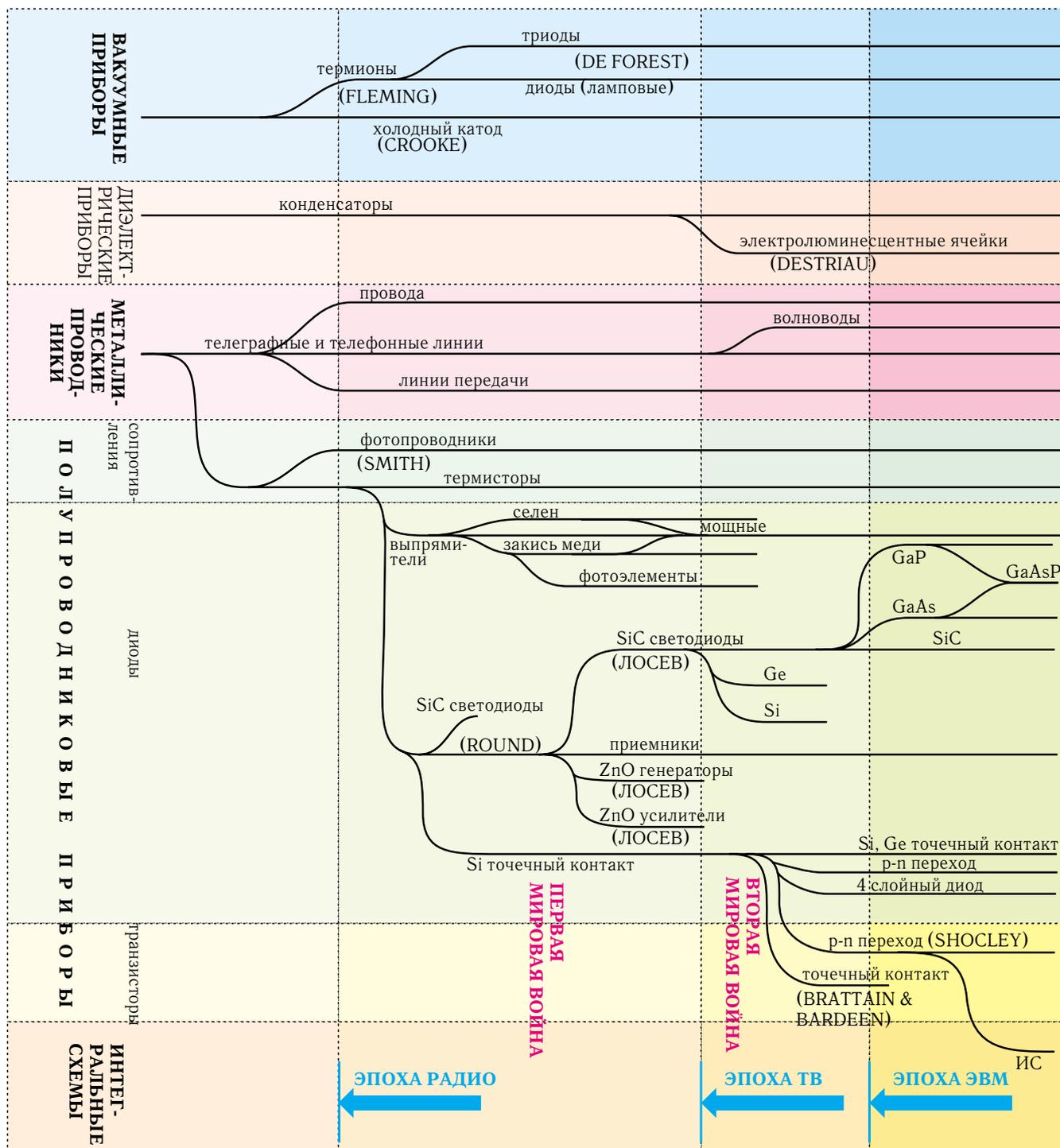


Рис. 5. Схема, дающая представление о моменте появления и этапах эволюции различных электронных приборов. Видно, что О.В. Лосев является родоначальником трех типов полупроводниковых приборов. Бурное развитие одного из них продолжается и в наши дни.

Индустриального Института (ЛПИ им. М.И. Калинина – СПбГТУ) наиболее важные работы. И вот 2 июля 1938 г. на Ученом совете института Лосеву О.В. была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук без защиты диссертации. Это было заслуженным итогом многолетней плодотворной научной работы.

Постепенно условия работы Лосева налаживаются. В 1940-1941 гг. он занимается вентильным фотоэффектом в карборундовых фотоэлементах. Но начавшаяся Великая Отечественная война нарушила научную деятельность Лосева. Он не эвакуировался из Ленинграда, стремясь закончить работу по фотопроводимости в сплавах кремния. Он успевает ее закончить, но работа

так и не увидела свет, она затерялась при пересылке в редакцию ЖЭТФ в Казани. Истощенный О.В. Лосев, оставаясь в блокадном Ленинграде, разделил участь многих ленинградцев – 22 января 1942 г. его не стало.

В 1948 году после изобретения транзистора начался период бурного развития полупроводниковой электроники. Разновидности полупроводниковых диодов, имеющих падающий участок вольт-амперной характеристики, и сейчас довольно широко применяются в полупроводниках. И в настоящее время эти диоды лучше полупроводниковых транзисторов (как биполярных, так и полевых) для усиления и генерации СВЧ колебаний, а также в сверхбыстрых переключателях. Однако основой полупроводниковой электроники ока-

зался транзистор. Не вызывает сомнений, что если бы транзистор не был изобретен в 1948 г. Бардиным и Браттейном, то его с небольшим опозданием изобрел бы кто-нибудь другой, так как к тому времени все научные предпосылки для такого изобретения уже давно существовали. В этом есть и огромная заслуга талантливого русского изобретателя и исследователя О.В. Лосева. В полной мере значение работ О.В. Лосева, их новизна и революционность стали ясны только в 50-е годы.

А вот что писал о О.В. Лосеве А.Ф. Иоффе в 1950-х годах [9].

"Явление падающей характеристики было открыто еще в 1922 г. О.В. Лосевым на контакте стальной проволоки с кристаллом цинкита и некоторых других материалов. Такой прибор был им назван кристадином. Явление это не исчезало и на высокой частоте, так что кристадин обладал всеми свойствами регенеративного лампового приемника. Кристадиновые приемники получили значительное распространение у радиолюбителей"

"Впрочем, и в вопросе о значении *P-N* границы приоритет принадлежит тому же О.В. Лосеву, который в последние годы своей жизни (1938-1939) изучал видимые на глаз прослойки карборунда с противоположным механизмом проводимости. Пропуская ток сквозь образующиеся здесь запорные слои, Лосев наблюдал видимое свечение и смог установить правильное квантовое соотношение между частотой ν испускаемого света и энергией электрона при прохождении им разности потенциалов V на запорном слое: $h\nu=eV$Таким образом, О.В. Лосев не только подметил выпрямление на границе между *P*- и карборундом, но и открыл и, по-видимому правильно объяснил свечение при прохождении тока через границу. Открытие Лосева было недавно вновь подтверждено в США."

Egon Loebner в 1976 г. в статье "Subhistories of the Light Emitting Diodes" [4] писал:

"Light emission from a silicon carbide diode was rediscovered in 1922 in the Soviet Union by Oleg V. Losev. The diode was not an ordinary crystal detector diode, but one sample from a large population of high-frequency oscillating and amplifying zinc oxide and silicon carbide detector diodes.

Working under the personal tutelage of Professor Vladimir K. Lebedinskiy, Losev had made a major discovery which led to ten patents and sixteen papers of which he was sole author. He himself built over 50 radio receivers, incorporating his own tuning, heterodyning, and frequency converting circuits. There can be little doubt that this production line of "crystal-dyne" radio receivers, powered by 12-V batteries, represents a thirty-years start over the transistor radio.

Between 1927 and his death in 1942, he published 16 papers and obtained 4 patents on LED's photodiodes and optical recorders of high frequency signals. His experimental methodology is fundamentally the same as that which we used in our own work at RCA Laboratories in 1958 and 1959 on solution grown single crystals of GaP, in order to separate and identify light emission from forward and reverse biased LED's in III-V compounds.

I do not share the often quoted humor of N.A. Nikitin, L.N. Saltykov, and other who thought it very funny that

foreigners mistook the 22 year old Losev for a professor. To me, irrespective of his age, Losev's papers are indistinguishable from those of a mature, experienced, and skillful experimental device physicist, even though he never received a formal education. In my view, the granting him a "Candidate" degree (Ph.D. equivalent) without a formal thesis by Ioffe's Institute in 1938 was not an act of mercy. It enabled him to return to laboratory work after a five-year "exile" of unproductive physics teaching in a medical school.

In some cases his experimental work was up to 40 years ahead of his time. His research was so exact and his publications so clear that one has little difficulty determining today what he actually did in his laboratory then. His intuitive choice and design of experiments was simply astonishing."

О.В. Лосевым опубликовано 48 научных работ и патентов.

Литература

1. О.В. Лосев, "Детектор-генератор, детектор-усилитель", ТиТбп, **14**, 374, (1922).
2. О.В. Лосев, "Дальнейшее исследование процессов в генерирующем контакте", ТиТбп, **26**, 404, (1924).
3. А.Г. Остроумов, "Олег Владимирович Лосев" в сб. "У истоков полупроводниковой техники" (Л.: Наука, 1972), с.175.
4. Egon E. Loebner, "Subhistories of the Light Emitting Diodes", IEEE Transaction Electron Devices **ED-23**, 7, 675 (1976)
5. А.А. Рогачев, "Первые шаги полупроводниковой электроники", в кн. "Новые научные направления и общество" (М.-Л.: Изд. АН СССР, 1983).
6. А.Г. Остроумов, А.А. Рогачев, "О.В. Лосев - пионер полупроводниковой электроники", в кн. "Физика. Проблемы, история, люди." (Л.: Наука, 1986), с.183.
7. Б.С. Муравский, В.И. Кузнецов, "Холодная эмиссия с поверхностных состояний и отрицательное сопротивление в контакте металл-полупроводник.", в кн.: "Некоторые вопросы общей и теоретической физики и математики", Науч. тр., **98**, (Краснодар, КГПИ, 1968), с.272.
8. О.В. Лосев, "Светящийся карборундовый детектор и детектирование с кристаллами", ТиТбп, **5** (44), с.485.
9. А.Ф. Иоффе, "Физика полупроводников" (М.-Л.: Изд. АН СССР, 1957), с.268.

