

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Г**осударственный образовательный стандарт дисциплины ОПД.Ф.02.02 «Электроника» направления подготовки студентов 654400 по специальностям: 200900 — «Сети связи и системы коммутации»; 201000 — «Многоканальные телекоммуникационные системы»; 220100 — «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»; 201200 — «Средства связи с подвижными объектами», — включает в себя частично или полностью различные разделы электроники. В основном, Госстандартом дисциплины «Электроника» охвачены следующие разделы электроники: полупроводниковая электроника и микроэлектроника, физические основы которых приведены в Госстандарте дисциплины «Физические основы электроники».

В учебное пособие «Физические основы электроники» не вошли разделы электроники: вакуумная и плазменная электроника; квантовая и оптическая электроника, так как они не включены в Госстандарт указанных дисциплин.

Учебное пособие написано по материалам лекций дисциплин «Электроника» и «Физические основы электроники», прочитанных авторами в разные годы в Московском техническом университете связи и информатики и Ростовской-на-Дону государственной академии сельскохозяйственного машиностроения. Авторы методически объединили материалы лекций указанных дисциплин, что органически вошло в содержание настоящего

учебного пособия. При этом основной акцент был сделан на физических основах построения и функционирования элементной базы приборов и устройств электроники и упрощении их математического анализа. Вместе с тем, авторы обязаны замечательным учебникам и учебным пособиям Щуки А. А., Степаненко И. П., Бойко В. И. и др., Герасимова В. Г. и др., Ефимова Е. И. и др., а также других замечательных отечественных ученых и преподавателей, методические находки которых были использованы в учебном процессе и процитированы в учебном пособии. Задачи и упражнения авторами адаптированы из популярных задачников Гольденберга Л. М., Левитского С. М., Линча П., Терехова В. А., Успенского А. В. и других крупных методистов.

Учебное пособие включает в себя разделы, пронумерованные арабскими цифрами. В конце каждого раздела предлагаются задачи, которые снабжены решениями. Эти классические, ранее апробированные задачи, могут использоваться для проведения индивидуальных занятий, а также для самостоятельной работы студентов. Знакомясь с решением задач, студент может самообразовываться, самостоятельно разбираться в отдельных вопросах курса лекций. Также в конце каждого раздела учебного пособия приведены контрольные вопросы и рекомендуемая литература. Контрольные вопросы должны быть применены студентами для закрепления лекционного материала и могут также использоваться преподавателями при составлении экзаменационных билетов, а рекомендуемая литература — для углубленного изучения рассматриваемых и возникающих проблем и вопросов.

Работа по написанию учебного пособия была распределена между авторами следующим образом: введение, разделы 1 и 2 написаны кандидатом технических наук, доцентом Ю. А. Смирновым; предисловие, раздел 3 — доктором технических наук, профессором С. В. Соколовым; раздел 4 — кандидатом технических наук, доцентом Е. В. Титовым. Компьютерный набор учебного пособия провел Ю. А. Смирнов, а общее редактирование — С. В. Соколов.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные критические замечания, сделанные ими при просмотре электронного варианта учебного пособия.

Все замечания и пожелания по содержанию учебного пособия просим Вас направлять по электронному адресу (e-mail): [smirnoff.iura@yandex.ru](mailto:smirnoff.iura@yandex.ru).

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

**П**о количеству выпускаемых промышленностью единиц, по точности технологии и чистоте производства, по количеству областей применения нет прибора, который хоть в какой-то мере мог приблизиться к транзистору. На основе транзисторов созданы интегральные схемы — совершенный продукт технологического прогресса XX столетия. Как же и когда возник транзистор и интегральная схема — чудо-приборы?

В основе работы транзисторов лежат физические явления и эффекты в полупроводниках, или, как их называли более 100 лет назад, в «плохих» проводниках.

В 1833 г. Майкл Фарадей столкнулся с первой загадкой полупроводников. При исследовании сернистого серебра он обнаружил, что с повышением температуры электропроводность образца возрастает. А всем уже было известно, что металлические проводники линейно увеличивали свое сопротивление с ростом температуры. И только сопротивление образцов из семейства «плохих» проводников, в данном случае сернистого серебра, наоборот уменьшалось по экспоненциальному закону. Физики не могли тогда дать ответ на эту загадку «плохих» проводников.

В 1851 г. Александр Эдмон Беккерель обнаружил, что при освещении «плохого» проводника светом появляется электродвижущая сила. Возникновение фотоЭДС, или фотогальванический эффект, стало второй загадкой в ряду неразгаданных.

В 1874 г. немецкий физик Карл Фердинанд Браун обнаружил, что переменный ток, проходя через контакт свинца и пирита, выпрямляется. Пирит, или колчедан, был самым распространенным минералом, который в то время всесторонне исследовался. Так вот, сопротивление контакта не подчинялось известному и почитаемому всеми физиками закону Ома. Более того, свойства контакта определялись величиной и знаком приложенного напряжения. Это была третья загадка «плохих» проводников.

Эффект выпрямления тока был обнаружен и в других веществах. К ним были отнесены сульфиды и оксиды металлов, кремний, закись меди и др. Этот класс веществ стали называть полупроводниками. Природу выпрямления тока тогда объяснить так и не удалось. Большинство ученых отнесли этот эффект к термическому.

Американский физик Эдвин Герберт Холл в 1879 г. открыл явление возникновения электрического поля в проводнике с током, помещенном в магнитное поле, которое направлено перпендикулярно направлению тока и магнитному полю. В одних полупроводниках возникающее электрическое поле направлено в одну сторону, в других — в противоположную. Выходило так, что существуют отрицательно заряженные частицы — электроны и какие-то, в то время неизвестные, положительно заряженные, которые и определяют направление этого поля. Открытое явление стало четвертой загадкой «плохих» проводников.

Эффекты выпрямления электрического тока и фотопроводимость полупроводников стали использовать для практических целей. Уже в 1876 г. В. Адамсон и Р. Дей создали фотоэлемент на основе селена, а в 1883 г. С. Фритте изготовил первый твердотельный выпрямитель электрического тока. Однако в то время объяснить их работу никто так и не смог.

Большинство ученых считали, что эти «загадки» могут быть объяснены какими-то еще неизвестными термическими эффектами. Теория теплоты тогда могла объяснить многое, но не это.

Все это свидетельствовало об электрической, а не термической природе явлений. Особо подчеркнем, что созданная в 1860–1865 гг. Дж. Максвеллом теория электромагнитного поля не объясняла ни одну из четырех загадок.

Только лишь в 1906 г. Г. Пирс доказал электрическую природу выпрямления тока.

Пока лучшие теоретики искали отгадки, инженеры все шире применяли полупроводники. В начале XX века ученых захватили исследования в области беспроводной связи. Они создавали приемники радиоволн, которые могли детектировать сигналы. В первых конструкциях радиоприемников использовались контакты полупроводникового материала и металла, например, карбид кремния, теллур, окись цинка, селен совместно с металлической пружиной. Кристаллические полупроводниковые детекторы излучения позволяли выпрямлять радиочастотные сигналы, но усиливать их не могли.

Наш соотечественник, выдающийся радиоинженер Олег Владимирович Лосев, изучая в 1922 г. свойства кристаллического детектора, обнаружил на вольт-амперной характеристике кристалла участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением и на основе этого кристалла получил генерирующий детектор. Советский радиоинженер впервые в мире построил полупроводниковый прибор, способный усиливать и генерировать электромагнитные колебания. Основой его служила контактная пара: металлическое острие — полупроводник (кристалл цинкита). Этот прибор вошел в историю полупроводниковой электроники как «кристадин» Лосева. Позднее, в 1927 г., Лосев открыл также явление свечения кристалла карборунда при прохождении тока через точечный контакт. По существу это был первый светодиод. Открытия Лосева вызвали большой, но кратковременный интерес. Четкого объяснения открытых явлений дано не было, и в то же время воспроизводимость опытов оставляла желать лучшего. Промышленное внедрение так и не состоялось. Тем более что те далекие 30–40-е годы прошлого века были порой расцвета электровакуумных ламп.

Идеи электронной лампы попытались воплотить в твердотельный аналог. В 1925 г. профессор физики Юлиус Лилиенфельд получил несколько патентов на конструкцию усилителя с использованием сульфида меди. Спустя десять лет в Англии был выдан патент немецкому изобретателю Оскару Хейлю на полевой триод. В нем предлагалось использовать управляющий электрод для регулирования тока через слой полупроводника.

В 1926 г. советский физик Яков Ильич Френкель ввел понятие о дырках в кристаллах, о дефектах кристаллической решетки, представляющих собой дырку в междоузлии, — так называемые *дефекты по Френкелю*. В дальнейшем теорию дырок развил английский физик Поль Адриен Морис Дирак и немецкий физик Вернер Карл Гейзенберг в середине тридцатых годов.

В 1932 г. советский физик Игорь Евгеньевич Тамм предсказал существование на поверхности кристаллов особых состояний электронов — *уровней Тамма*.

В 1938 г. немецкий физик Роберт Вихард Поль разработал конструкцию кристаллического усилителя, действие которого основано на использовании проволоочной сетки для управления потоком электронов через нагретый кристалл бромида калия. Прибор позволял усиливать сигналы и доказывал возможность создания кристаллических полупроводниковых приборов.

Ненадежные в те времена полупроводниковые приборы не могли конкурировать с электронными вакуумными лампами. Известно, что хорошая теория быстро продвигает технические идеи на уровень внедрения. А в полупроводниковой электронике четыре загадки так и остались неразгаданными с прошлого века:

1. Почему сопротивление полупроводников падает с ростом температуры?

2. Почему сопротивление полупроводников уменьшается при их освещении?

3. Почему сопротивление контакта двух полупроводников зависит от полярности прикладываемого напряжения?

4. Почему в полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, могут существовать отрицательно и положительно заряженные носители заряда?

На все эти и другие «почему» никто не мог дать ответ 100 лет.

## ОДНА РАЗГАДКА НА ВСЕ ЗАГАДКИ

К началу 1930-х гг. проводились интенсивные исследования полупроводниковых структур, предпринимались энергичные поиски природных и синтезированных полупроводников, интерметаллических соединений.

В 1928–1930 гг. американский физик Феликс Блох и французский физик Леон Бриллюэн заложили основы зонной теории твердых тел.

И вот в 1931 г. английский физик Алан Хэррис Вильсон построил квантовую теорию полупроводников, привлекая математический аппарат квантовой механики. В соответствии с этой теорией в твердом теле энергетические состояния электронов образуют так называемые зоны, разделенные промежутками запрещенных значений энергий. Верхняя зона, в которой находятся свободно перемещающиеся заряды, получила название *зоны проводимости*, а нижняя, в которой заряды находятся в связанном состоянии, была названа *валентной зоной*. Промежуточную зону между указанными зонами называли *запрещенной зоной*.

Исходя из представлений о зонной структуре электронного спектра, Вильсон провел деление кристаллов на металлы, полупроводники и диэлектрики. Если ширина запрещенной зоны велика, то в твердом теле с такой энергетической характеристикой электропроводность отсутствовала. Такие вещества называются диэлектриками. Если же ширина запрещенной зоны невелика, то существуют различные возможности возбуждения электронов. Это *полупроводники*. Например, при разогреве твердого тела происходит тепловое возбуждение электронов, повышается их энергия, и они из валентной энергетической зоны переходят в более высокоэнергетическую зону



проводимости. При этом вещество с такой энергетической зонной структурой обладает большей электропроводностью, а значит — меньшим сопротивлением. С ростом температуры число возбужденных электронов увеличивается, стало быть, сопротивление полупроводников падает. Возможен и другой механизм перевода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Речь идет о возбуждении электронов квантами света. Термически или оптически возбужденные электроны становятся свободными электронами проводимости. Таким образом, теория Вильсона объяснила две первые загадки: почему сопротивление полупроводников падает при нагревании и освещении. Впоследствии выяснилось, что процесс электропроводности полупроводников значительно сложнее. Квантово-механическое представление структуры твердого тела подсказывало исследователям, что освободившиеся от электронов места в процессе их перехода в зону проводимости образуют вакансии или *дырки* и 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. Стал понятен эффект Холла, когда в одних полупроводниках преобладают отрицательные носители заряда, а в других — положительные.

Стало ясно, что существуют полупроводники с *электронным* типом проводимости (*n*-типа), для которых эффект Холла имеет отрицательное значение во всей области температур. Вместе с тем, есть полупроводники с положительным значением эффекта Холла, которые имеют *дырочный* тип проводимости (*p*-тип). Первые были названы донорными, а вторые — акцепторными. Зонная теория «заработала». Открытия посыпались как из рога изобилия.

А вот разгадать загадку контактного сопротивления долго не удавалось. Ни теория Вильсона, ни дальнейшее ее развитие не могли объяснить этот феномен полупроводников. А между тем на практике широко использова-

лись полупроводниковые выпрямители электрического тока. Хорошие выпрямители одновременно выполняли функции хороших фотоэлементов. Выяснилось также, что величина термоЭДС в полупроводниках на несколько порядков выше, чем в металлах. Все эти экспериментальные факты нуждались в обобщении и объяснении. Теория Вильсона не могла все объяснить, в частности, механизм выпрямления тока. Оставалась одна загадка — «загадка века».

Шли напряженные исследования. В конце 1930-х гг. три физика — советский Александр Сергеевич Давыдов, английский Невил Френсис Мотт и немецкий Вальтер Шоттки независимо друг от друга предложили теорию контактных явлений. Оказывается, в полупроводниковых материалах вблизи границы дырочного и электронного типов полупроводников имеет место область обеднения носителями заряда. В этом месте возникает эффективный электронно-дырочный барьер для равновесных электронов, который не позволяет электронам и дыркам свободно «гулять» по полупроводнику. Через такую систему ток проходит свободно в одном направлении, а в другом — плохо. Электрическое сопротивление системы зависит от величины и направления приложенного напряжения. Например, при приложении электрического поля в прямом направлении высота барьера снижается, и наоборот. Основные носители заряда (дырки в электронном и электроны в дырочном полупроводнике) играют определяющую роль. Соответствия между теоретическими и экспериментальными данными были только качественными. Свойства твердого тела очень чувствительны к структуре, к присутствию в ней дефектов. К таким чувствительным свойствам относятся электропроводность, фотопроводность, люминесценция, механическая прочность. Наличие и природа рассматриваемых эффектов, их роль в формировании свойств твердого тела были обнаружены в период становления квантовой механики. Одновременно с развитием теории отрабатывались технологические процессы получения полупроводников с заданным типом проводимости. В результате многочисленных экспери-

ментов удалось изготовить образец, вырезанный из цилиндрического слитка, включающий границу перехода между двумя типами проводимости. Так, впервые был создан  $p$ - $n$ -переход, ставший важнейшим элементом современной полупроводниковой электроники.

В 1941 г. советский физик Вадим Евгеньевич Лашкарев впервые обнаружил  $p$ - $n$ -переход в закиси меди. Вскоре он открыл биполярную диффузию неравновесных носителей тока, построил общую теорию фотоЭДС в полупроводниках.

Итак, лишь в 1940-е гг., почти через 100 лет, удалось разгадать все основные загадки «плохих» проводников.

В эти предвоенные и военные годы быстрыми темпами развивалась радиолокация, мощные источники высокочастотной энергии. Нужны были электронные приборы дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн. Тут электронные лампы были вне игры. В этой области эффективными были именно твердотельные детекторы. Так, германиевые и кремниевые детекторы или СВЧ-диоды могли использоваться в частотном диапазоне до 4 ГГц.

В СССР эти работы велись в основном в НИИ-108 и НИИ-160 под научным руководством Сергея Григорьевича Калашникова и Александра Викторовича Красиловы, соответственно.

В послевоенный период были созданы германиевые выпрямители с коэффициентом полезного действия, равным 98%.

Разработки отечественных и зарубежных ученых в те годы шли примерно на одном уровне. Дело в том, что руководители страны считались с мнением ученых и интенсивно развивали научные и прикладные исследования по широкому спектру проблем радиоэлектроники. Организовывались новые НИИ и КБ, заводы и лаборатории при них. Они оснащались современным уникальным оборудованием.

В области полупроводников в те годы стояла нерешенная проблема — протекание тока через контакт «металл — полупроводник». Широко применялись методы зондовых исследований поверхностного потенциала во-

круг точечного контакта. Был выявлен эффект управления током одного из точечных контактов с помощью рядом расположенного другого контакта.

Однако интерпретация была разной. Наши исследователи были очень осторожны, не поверили в эффект усиления сигнала и заставляли сотрудников более тщательно чистить поверхность (Калашников С. Г., Пеннин Н. А.). А вот американские физики увидели новое явление и создали точечный транзистор.

## ЭПОХА ТРАНЗИСТОРИЗАЦИИ

Наступил 1948 г. На одной из страниц газеты «Нью-Йорк Таймс» за 1 июля, посвященной развитию радио и телевидения, было помещено скромное сообщение. В нем говорилось о том, что фирма Bell Telephone Labs разработала новый телефонный прибор. Этот прибор был способен работать в устройствах вместо «незаменимой» в те времена электронной лампы. Новый прибор фирма намеревалась использовать вместо телефонных реле, надежность и быстродействие которых не удовлетворяли запросам того времени.

Успех пришел к сотрудникам отделения твердого тела фирмы Bell Telephone Labs. Группа в составе Джона Бардина, Уолтера Браттейна, Джеральда Пирсона, Уильяма Шокли, Ричарда Гобни, Гордона Мура, в которой никто ранее не работал в области физики твердого тела, заинтересовалась работами по созданию кристаллического детектора для радаров типа «кошачий ус». Эти полупроводниковые элементы были изготовлены из германия или кремния. К тому времени уже знали, как сделать так, чтобы они были чистыми, а также было известно, как и чем их легировать для получения материалов *p*- или *n*-типов.

Уильям Шокли предполагал сделать полупроводниковый усилитель по принципу полевого эффекта. В основе его конструкции была тонкая полупроводниковая пленка, проводимость которой должна была меняться при наложении поперечного электрического поля. Расчеты, проведенные Шокли, показывали, что усиление электри-

ческого сигнала может быть получено *при условии формирования индуцированного заряда из подвижных носителей (электронов и дырок)*. Однако экспериментально обнаружить эффект усиления не удалось. К работам подключился Дж. Бардин, выдвинувший гипотезу, согласно которой *индуцированный заряд образуется электронами, захваченными в состояниях у поверхности. Это экранирует внутреннюю область от приложенного поля. Даже несколько атомов на поверхности полупроводника способны защитить или экранировать его от поверхности поля*. Когда же плотность поверхностных состояний не слишком велика, поле контактного потенциала может увеличить или уменьшить слой пространственного заряда. Это также стало ключом к отгадке тайны выпрямляющих ток контактов. *Эффект выпрямления объясняется электростатической разностью потенциалов между внутренней частью полупроводника и его поверхностью*.

Гипотеза поверхностных состояний была весьма плодотворной и позволила сделать несколько предположений, которые можно было экспериментально проверить. По одной из них слой пространственного заряда может существовать у свободной поверхности. В этом случае заряды в слое компенсированы поверхностными состояниями. *В тонком слое, прилегающем к поверхности, может возникнуть инверсный слой с типом проводимости, противоположным тому, который характерен для объема материала*. У. Браттейн экспериментально подтвердил эту гипотезу.

Справедливости ради отметим, что на существование поверхностных состояний на свободной поверхности твердого тела указали советский физик Тамм (1932) и немецкий физик Шоттки (1939). Была выполнена серия экспериментов по подтверждению положений теории поверхностных состояний, *подтверждено существование электрического поля. Носители, генерированные при освещении перехода, рассасывались этим полем в противоположных направлениях в зависимости от знака заряда. Также менялось и значение контактной разности потенциалов*.

А тем временем работы по изучению поверхностных состояний продолжались. С ними были связаны идеи по созданию усилителя на полевом эффекте. Усилиями У. Браттейна и Р. Гибни было выяснено, что *поверхностные состояния можно не учитывать, если в контакте с поверхностью находится электролит, а поле направлено перпендикулярно поверхности*. В то же время Дж. Пирсон показал, что *подвижность носителей в пленках намного ниже, чем в объемном материале*. Эти экспериментальные результаты навели У. Браттейна и Дж. Бардина на мысль о создании *новой структуры усилителя*. Чтобы получить эффект такого слоя в объемном материале, они решили использовать инверсионный слой на поверхности куска кремния с удельной проводимостью противоположного типа. Они использовали контакт типа «кошачий ус» на поверхности и такой же контакт на базе большой площади. Бардин и Браттейн *для преодоления пространственного заряда на поверхности полупроводника использовали электролит*. Окружающая капля электролита была изолирована от «кошачьего уса». Третий электрод был выполнен в виде проволочной петли, которая находилась в контакте с электролитом.

Первые эксперименты были проведены в ноябре 1947 г. Когда на базу подавалось положительное напряжение, большая часть обратного тока носила электронный характер и текла к контакту от инверсного слоя. Ток уменьшался, когда к электролиту прикладывалось отрицательное напряжение. В соответствии с эффектом поля это было прогнозируемо. Эффект был воспроизводимым, но только на низких частотах. Высокие частоты использовать не удалось из-за низкого быстродействия электролита.

Лучшее быстродействие было получено при использовании инверсного слоя *p*-типа на германии *n*-типа. Стало ясно, что наличие электролита в конструкции не позволит достигнуть высоких результатов, и в связи с этим начались новые поиски. Успех пришел в то время, когда было обнаружено, что при подаче постоянного напряжения смещения на электролит происходит анодное трав-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)