

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ
ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ
ЗНАНИЙ

АКАДЕМИК
А. Ф. ИОФФЕ

ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Серия III
№№ 14, 15

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва — 1956

ВСЕСОЮЗНОЕ ОБЩЕСТВО
ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

Академик
А. Ф. И О Ф Ф Е

ПОЛУПРОВОДНИКИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»

Москва



1956

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Развитие теории полупроводников и внедрение их в народное хозяйство — это одно из важнейших условий технического прогресса. Решение значительного числа задач, поставленных Директивами XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану, неразрывно связано с применением полупроводников. Выпускаемая издательством «Знание» брошюра Героя Социалистического Труда академика А. Ф. Иоффе посвящена физике полупроводников и их применению. Естественно, что в таком ограниченном объеме автор не мог рассказать подробно обо всех видах использования полупроводников в науке и технике. В дальнейшем издательство выпустит брошюры, посвященные отдельным вопросам применения полупроводников.

Работа академика А. Ф. Иоффе представляет собой дополненный и исправленный автором текст, составивший брошюру, выпущенную издательством Академии наук СССР в начале 1956 года.

Лекция первая

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Введение

Электротехника, а вслед за ней и физика XIX и начала XX столетия применяли и изучали либо металлы для передачи тока, либо диэлектрики для изоляции.

За последние десятилетия техника выдвинула ряд задач, для решения которых потребовались новые средства и новые материалы. Так появились жаропрочные, сверхтвердые и легкие сплавы, пластические массы, органическое стекло, пеностекло, новые строительные материалы. В электрическую промышленность наряду с металлами и изоляторами вошла группа полупроводников.

Напряжение в 1 вольт (ϵ) создает в кубике металла размером в 1 см^3 токи, измеряемые сотнями тысяч ампер. В изоляторах в тех же условиях величина тока будет меньше одной миллиардной доли ампера. Полупроводники заполнили пропасть между этими пределами.

Изучение полупроводниковых материалов показало, что это количественное различие связано с рядом специфических свойств, благодаря которым эти материалы нашли разнообразные применения в технике. Выяснение физической природы этих технических процессов углубило теорию полупроводников и выявило новые факты, позволившие решить ряд важных практических задач.

Даже простое перечисление технических задач, разрешаемых промышленностью с помощью полупроводников, показывает их значение в народном хозяйстве. Полупроводники: 1) превращают переменный ток в постоянный; 2) усиливают высокочастотные колебания и генерируют радиоволны, заменяя вакуумные приборы; 3) регулируют ток и напряжение; 4) защищают от перенапряжений и грозových разрядов линии высоковольтных передач; 5) разрешают разнообразные задачи автоматики и телеуправления; 6) измеряют температуру и освещенность помещений; 7) сигнализируют на десятки километ-

ров о присутствии светящихся или нагретых объектов; 8) превращают теплоту в электрическую энергию без помощи машин; 9) создают с помощью электрического тока тепло или холод; 10) концентрируют электрическую и магнитную энергию; 11) превращают звуковую энергию в электрическую и электрическую в звуковую; 12) превращают ультрафиолетовый свет в видимый и свет одного цветового состава в другой; 13) запасают свет, вновь выделяя его по сигналу; 14) превращают энергию солнечных лучей и радиоактивных излучений в электрическую; 15) служат источником мощных потоков электронов в вакуумных приборах радиотехники; 16) усиливают в миллионы раз самые слабые пучки электронов; 17) выполняют роль катализаторов в химических производствах; 18) служат счетчиками ядерных частиц.

Это перечисление можно было бы продолжить, но и названных применений достаточно, чтобы оценить важную и многообразную роль полупроводников в современной технике.

Изучение полупроводников в то же время обогатило физику новыми представлениями и законами электрических явлений, позволило уяснить связь электрических зарядов с веществом и природу сил, соединяющих атомы и молекулы в твердое тело.

Процесс внедрения полупроводников в народное хозяйство и углубление наших физических представлений на основе опыта, вносимого изучением полупроводников, находятся еще в своей начальной стадии. Сделаны только первые шаги, но они позволяют предвидеть в близком будущем такое развитие, которое может изменить лицо нашей техники. Можно, например, ожидать, что значительная часть паровых, холодильных и динамомашин, а может быть, и отопительные системы, заменятся полупроводниковыми термоэлементами, что радиотехника перейдет от вакуумных электронных приборов к полупроводниковым, а это повлечет уменьшение размеров и стоимости электронных приборов в десятки раз. Широкая автоматизация технических процессов и управление ими из одного центра сделаются легко доступным методом в производстве и резко увеличат производительность труда. Запасенный дневной свет будет использован для ночного освещения. Солнечный свет будет давать электроэнергию для радиоприема и для бытовых нужд. Электроэнергию можно будет извлекать из радиоактивных излучений.

Такое место полупроводников в современной физике и технике и такое большое число еще не использованных возможностей их применения связано со своеобразием их свойств, не встречающихся у других материалов.

Попытаемся выявить эти свойства и понять их происхождение.

Электрические свойства полупроводников

В электрическом отношении материалы различаются по их способности проводить электрический ток. Электрический же ток мы представляем себе как движение электрических зарядов.

В водных растворах или расплавах солей, а также во многих твердых веществах прохождение тока сопровождается переносом частиц самого вещества. Каждый атом или группа атомов несут в этих веществах одинаковые элементарные заряды, величину которых удалось точно измерить. Ток в 1 ампер (a) переносит в 1 секунду ($сек$) $6,25 \cdot 10^{18}$ элементарных зарядов. Количество электричества, переносимое током в 1 a за 1 $сек$ называется кулоном ($к$). Поэтому элементарный заряд равен

$$\frac{1}{6,25 \cdot 10^{18}} = 1,6 \cdot 10^{-19} к.$$

В металлах электрические токи не сопровождаются перемещением атомов самого вещества. Электрический ток в 10 a , переходя из одного металла в другой в течение многих лет, не изменил бы состава обоих металлов, тогда как в водном растворе тот же ток перенес бы за это время многие килограммы вещества. Электрический ток в металлах мы приписываем движению таких же по величине электрических зарядов в $1,6 \cdot 10^{-19} к$, называемых электронами; заряды эти одинаковы во всех металлах. Под действием света или высокой температуры электроны могут выйти через поверхность металла в воздух или в вакуум, где их свойства легче изучать, чем внутри массы металла. Оказалось, что электроны действительно всегда одинаковы, причем каждый из них обладает массой $9,1 \cdot 10^{-28} г$ и отрицательным зарядом $1,6 \cdot 10^{-19} к$.

То обстоятельство, что электроны движутся в массе металла и переходят из одного металла в другой, что электрические силы направляют их движение, что электроны могут покинуть границы металла — все это привело к представлению, что электроны свободно движутся среди атомов металла, как молекулы газа в воздухе. Сталкиваясь с атомами металла, электроны обмениваются с ними энергией. Считалось, что в результате такого обмена средняя энергия электронов становится равной средней энергии теплового движения атомов металла. Поэтому работа электрических сил, затрачиваемая при прохождении электрического тока, через посредство электронов передается металлу и нагревает его. Так объясняется выделение теплоты электрическим током в проводнике.

Если в металле существует разность температур, то, переходя из нагретых участков металла в более холодные, электроны с более высокой энергией отдают ее более холодному участку металла и повышают его температуру. Таким образом

электроны выравнивают температуру внутри металла; этим объясняется высокая теплопроводность металлов.

Таковы были представления о металле еще 30 лет тому назад. Они приводили, однако, к глубоким противоречиям с опытом.

Важнейшее из противоречий относилось к вопросу о теплоемкости металлов. Раз электроны получают и передают энергию атомам металла и с ростом температуры металла увеличивают подобно молекулам газа свою кинетическую энергию, то, нагревая металл, мы должны были бы затрачивать дополнительно значительную часть теплоты на повышение энергии электронов (половину той теплоты, которая идет на повышение теплового движения атомов тела). Опыт, однако, показывает, что это не так, — теплоемкость металла не превышает заметно теплоемкости изолятора, содержащего такое же число атомов. Оказалось, что нельзя устранить это противоречие частичной поправкой к описанной картине. Это стало возможным только в результате коренного изменения основных представлений о строении вещества, о свойствах всех элементарных частиц, в том числе и электронов.

К середине 20-х годов нашего столетия накопился большой опытный материал, убедительно свидетельствующий о недостаточности и односторонности представления о частице как об ограниченном небольшом объеме, заполненном веществом и подчиненном тем же законам механики, как и большие объекты, например камень, снаряд или детали машин. В свойствах микроскопических частиц отчетливо проявилась их волновая природа, незаметная у больших предметов. Вместо поступательного движения по определенной траектории, присущего брошенному камню, поток микроскопических частиц (электронов или атомов) при своем движении сквозь вещество рассеивается, частично отражается, взаимодействует сам с собой, усиливаясь в одних направлениях и ослабляясь в других так, как если бы мы имели дело с волновым движением при распространении света или звука. Электроны скопляются там, где происходит усиление волн, и разрежаются там, где волны взаимно ослабляют друг друга.

Изменилось и представление об атоме: вплоть до 1925 года атом считали системой, воспроизводящей в малых масштабах подобие солнечной системы, с положительно заряженным тяжелым ядром, вокруг которого вращаются по определенным орбитам отрицательные электроны.

В начале нашего столетия физики представляли себе электрон как заряженный отрицательным электричеством шарик, размером около $2 \cdot 10^{-13}$ см, с массой $9,1 \cdot 10^{-28}$ г и зарядом $1,6 \cdot 10^{-19}$ к. Электрон считался простейшим элементом строения вещества, простым сгустком электрического заряда. Инертная масса его уже тогда понималась как результат того, что

движущийся электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. Ускоряя электрон, мы увеличиваем ток и усиливаем магнитное поле, на что приходится затрачивать соответствующую работу совершенно так же, как при ускорении тела, обладающего определенной массой. При таком понимании кинетическая энергия электрона — это энергия магнитного поля, окружающего его во время движения. Казалось, что этим исчерпываются все свойства электрона.

В. И. Ленин еще в 1908 году, исходя из общих положений диалектического материализма, указал в своем труде «Материализм и эмпириокритицизм», что рассматривать электрон как последний элемент мироздания нельзя, что и в нем еще скрыто безграничное многообразие.

Опыт блестяще подтвердил это предвидение В. И. Ленина. Сейчас мы уже знаем, что наряду с зарядом и массой электрон обладает определенными вращательным и магнитным моментами. Мы узнали о существовании мезонов, имеющих такой же заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ к и обладающих массой (а следовательно, и энергией) в 200, 300, 600 и 900 раз большей, чем электроны; мы знаем, что при соответственных условиях возникают и положительные заряды (позитроны), равные по величине и противоположные по знаку заряду электрона, с такой же массой $9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

Опыт показывает, что несмотря на громадное число атомов, заполняющих объем сильно разреженного светящегося газа, все они испускают совершенно одинаковый свет. Частота световых колебаний одного атома настолько близко совпадает с частотами колебаний всех остальных атомов того же газа, что длины волн и частоты спектральных линий, излучаемых газом, могут быть измерены с погрешностью меньшей, чем одна миллионная доля измеряемой величины.

Квантовая теория объясняет этот давно известный, но и весьма замечательный факт тем, что каждый электрон может пребывать в атоме только в строго определенных состояниях движения и переходить из одного из таких состояний (называемых квантовыми состояниями) в другое квантовое же состояние, излучая или поглощая свет строго определенной частоты.

В состоянии повышенной энергии электрон и атом называют возбужденными; возвращаясь в нормальное состояние, электрон выделяет избыток своей энергии, излучая его в виде света или передавая другому электрону.

Между количеством выделяемой энергии E и частотой ν испускаемого света существует прямая связь: $E = h\nu$, где h — одинаковый во всех случаях множитель, равный $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек. Множитель h носит название постоянной Планка.

Наконец обнаружилось еще одно важное свойство не только отдельного атома, но и любой системы атомов: в каждом кван-

товом состоянии может находиться только один электрон. Если в одном из состояний имеется электрон, то во всей системе, как бы велика и сложна она ни была, не может быть еще одного электрона в таком же квантовом состоянии.

Когда мы имеем дело с атомами, содержащими большое число электронов, то они располагаются слоями вокруг ядра. В ближайшем к ядру, так называемом *K*-слое находятся два электрона. В следующем, дальше отстоящем *L*-слое — не более 8 электронов; в *M*-слое — до 18 электронов и т. д. Чем ближе электрон к ядру, тем сильнее он с ним связан, тем больше энергии надо затратить, чтобы вырвать электрон из состава атома. Наружные электроны слабее всего связаны с ядром, они испытывают наибольшие воздействия со стороны электронов других атомов, когда последние подходят к ним достаточно близко. Внешние электроны различных атомов могут тогда объединяться, связывая атомы в одну систему — молекулу. Так появляются химические соединения. Существуют соединения, где часть электронов переходит от одного атома к другому, заполняя в нем соответствующий слой. Например, при встрече атома лития (из 3 электронов которого два находятся в *K*-слое и только один в *L*-слое) с атомом фтора (у которого 9 электронов, из них семь в наружном *L*-слое) внешний электрон лития переходит к атому фтора, где образуется законченный *L*-слой из 8 электронов. При этом атом лития, потерявший один из своих электронов, превращается в положительный ион лития (с 3 положительными зарядами ядра и 2 электронами), а атом фтора — в отрицательный ион фтора (ядро с 9 положительными зарядами и 10 электронами). В ионе лития заполнен *K*-слой, в ионе фтора и *K*- и *L*-слои. Связь между ионами лития и фтора в молекуле фтористого лития осуществляется электрическим притяжением противоположно заряженных ионов.

С другим типом химической связи мы встречаемся в двухатомной молекуле водорода: электроны обоих атомов объединяются и располагаются симметрично по отношению к двум положительным ядрам водорода, связывая их так называемой валентной связью.

Как же связывается в одно целое то громадное количество атомов, которое образует твердое тело (это количество, например, для 1 г вещества выражается 22-значным числом), и в каких состояниях движения находятся здесь электроны?

В твердых и жидких телах, как и в молекулах, встречаются различные типы связи. В металлах, например, все атомы освобождают электроны своих внешних слоев, преобразуясь в положительные ионы. Совокупность отрицательных электронов в своем движении среди остова из положительных ионов связывает их в прочный комплекс твердого или жидкого металла.

В кристаллах, подобных алмазу, каждый атом углерода че-

тырьмя электронами внешнего L -слоя связывается с четырьмя соседними атомами углерода, расположенными на равных от него расстояниях и под одинаковыми углами. По каждому из четырех направлений связь осуществляется, как и в водороде, парой электронов.

В кристалле каменной соли (хлористого натрия) атомы натрия, имеющие в своих M -слоях по одному электрону, передают их атомам хлора, во внешних слоях которых находится по 7 электронов. Таким образом появляются положительные ионы натрия и отрицательные ионы хлора. Электростатическое притяжение противоположно заряженных ионов объединяет их в кубическую решетку, в которой попеременно следуют друг за другом положительный и отрицательный ионы. Это пример ионной связи.

Существуют и другие типы связи. Так, например, большинство кристаллов органических веществ состоит из молекул, объединяющих несколько атомов прочными валентными или ионными связями. Молекулы же связываются между собой в твердое тело более слабыми силами, подобными тем, которые проявляются при столкновении двух молекул газа. Электроны обеих молекул не объединяются в одну общую систему, а только смещаются в пределах каждой молекулы. Такие силы связи получили название сил Ван-дер-Ваальса.

Но каков бы ни был характер сил связи между частицами в твердом теле или в жидкости, всегда остаются справедливыми следующие квантовые закономерности для их электронов.

Когда N одинаковых атомов объединяются в одно тело, то в результате их взаимодействия каждое квантовое состояние электрона расщепляется на N близких, но все же различных состояний (рис. 1). В каждом из этих состояний может находиться только один электрон.

Скорости электронов, из которых каждая в отдельности отвечала бы электрическому току, в своей совокупности компенсируют друг друга по величине и направлению так, что в отсутствие электрического поля никакого электрического тока в теле не наблюдается.

В электрическом же поле электроны, движущиеся вдоль действующей на них электрической силы, ускоряются, а электроны, движущиеся в противоположную сторону, замедляются. В результате движение электронов вдоль сил поля получает преобладание над противоположным, что и проявляется как электрический ток.

Учитывая, что для электронов возможны только квантовые состояния движения, мы должны представлять себе ускорение как переход электрона в новое квантовое состояние с большей скоростью, замедление — как переход электрона в состояние с меньшей скоростью, а электрический ток — как преобладание состояний, соответствующих движению электронов от отрица-

тельного полюса к положительному, над противоположными состояниями.

Рассмотрим сначала твердое или жидкое тело, образованное N атомами или молекулами, обладающими законченным внешним слоем электронов, т. е. образованное частицами, в которых заполнены электронами все возможные квантовые состояния внешнего слоя. Вместо каждого из состояний электронов отдельного атома мы будем теперь иметь N квантовых состояний всего тела; но зато и число электронов в теле будет в N раз больше, чем в атоме. Поэтому следует ожидать, что и теперь все квантовые состояния окажутся занятыми электронами.

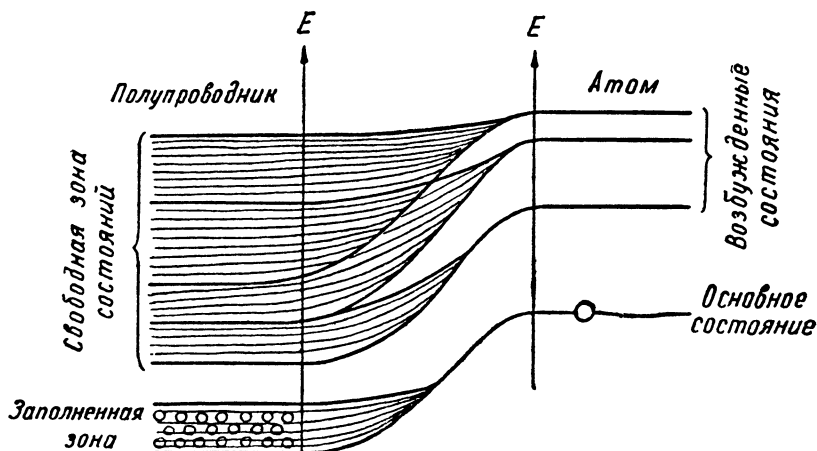


Рис. 1. Энергетические состояния электронов: справа — в изолированном атоме; слева — в полупроводнике.

Принимая во внимание упомянутые нами квантовые свойства электронов, мы приходим к выводу, что в таком теле нельзя вызвать электрического тока. В самом деле, положим, что мы создали в теле электрическое поле. Несмотря на присутствие громадного числа электронов и на наличие силы, которую каждый из электронов испытывает со стороны электрического поля, состояние их движения не изменится. Для того чтобы произошло изменение, данное состояние должно заместиться другим состоянием, которому отвечает большая или меньшая скорость или иное направление движения. Но раз каждое из возможных квантовых состояний движения уже занято каким-нибудь электроном, никакое изменение состояния электрона не может осуществиться. И до появления электрического поля и после его появления в теле окажется одинаковое число электронов, движущихся как слева направо, так и справа налево, вверх и вниз, вперед и назад. Другими словами, суммарный электрический ток электронов всегда останется равным нулю;

тело ведет себя как изолятор, хотя в нем имеется громадное число электронов.

Иное дело, если тело образуется из атомов или молекул, внешние электронные слои которых не заполнены электронами, например из упомянутых нами атомов лития или натрия. Во внешнем электронном слое каждого из этих атомов движется только по одному электрону, тогда как имеется два квантовых состояния.

Если из N таких атомов образовано твердое тело, то от расщепления квантовых состояний в нем окажется $2N$ квантовых состояний и только N электронов. Войдя в состав твердого тела, электроны займут N состояний с наименьшей энергией. Остальные же N состояний большей энергии останутся свободными. Среди занятых состояний одинаково часто будут встречаться состояния, соответствующие движению слева направо и справа налево, вперед и назад, вверх и вниз. Поэтому и в рассматриваемом случае, как и раньше, без электрического поля не возникает электрический ток. Но в электрическом поле поведение электронов будет резко отличным от их поведения в предыдущем случае. Ничто не мешает электрону, который находился в состоянии, соответствующем движению от отрицательного полюса к положительному, перейти в новое состояние с большей скоростью, если оно свободно от других электронов, а это весьма вероятно, так как в теле осталось еще громадное число всевозможных свободных состояний. Это утверждение относится только к электронам, энергия которых уже близка к энергиям свободных состояний.

Такой электрон изменяет под влиянием электрического поля свое движение аналогично свободному электрону в вакууме.

В действительности движение электрона среди атомов твердого тела, оказывающих на него мощные воздействия, то притягивая, то отталкивая, то ускоряя, то замедляя его, гораздо сложнее, чем в вакууме, и трудно поддается учету. Однако квантовая теория показывает, что в среднем движение электрона на протяжении многих атомных расстояний не отличается от свободного движения такого же заряда, но с несколько измененной массой. Поэтому мы можем считать такие электроны свободными электронами, способными участвовать в переносе электрического тока. Рассматриваемый случай осуществляется в металлах. Электроны же веществ, отвечающих ранее рассмотренному нами типу, следует считать связанными, неспособными создать электрический ток, а такие материалы — изоляторами.

Мы замечаем, что понятия «свободный» и «связанный» электрон получают в квантовой теории необычный смысл. Свободными приходится считать такие электроны, состояния движения которых близко примыкают к квантовым состояниям, не занятым другими электронами. Связанными мы считаем такие электроны, состояния которых примыкают только к уже занятым

другими электронами состояниям. Все электроны, входящие в полностью заполненную группу состояний, оказываются, таким образом, связанными, не проводящими электрического тока.

Квантовая теория, казалось бы, приводит к выводу о возможности только двух типов материалов: металлов со свободными электронами и изоляторов со связанными электронами.

Однако мы не учли еще того факта, что в отдельном атоме, кроме нормальных состояний электрона с наименьшей энергией, возможны и возбужденные состояния большей энергии, и существует даже возможность полного отрыва электрона от своего атома. При переходе к твердому телу не только каждое из нормальных состояний, но и каждое из возбужденных состояний расщепляется на N отдельных состояний. Подобно тому как в отдельном атоме электрон, получив извне необходимую энергию, может перейти в одно из возбужденных состояний, так и в изоляторе электрон может быть переведен из полностью заполненной электронами группы (зоны) нормальных состояний в свободную от других электронов зону возбужденных состояний.

Пока число таких электронов, перешедших в возбужденную зону, будет невелико, они окажутся среди незанятых близких к ним квантовых состояний. Следовательно, как мы видели, эти электроны могут считаться свободными, они способны участвовать в прохождении электрического тока.

Где же источник энергии, позволяющий переводить электроны из группы заполненных состояний в «свободное» возбужденное состояние? Таким всегда присутствующим в теле источником может служить тепловое движение его атомов. Если оно достаточно интенсивно, а работа перехода электрона в свободное состояние невелика, то часть электронов все время будет переводиться тепловым движением в свободное состояние, а тело станет проводником электричества. Именно такие вещества мы и называем полупроводниками.

Чем больше энергия теплового движения атомов по сравнению с энергией, необходимой для освобождения электрона, тем чаще происходит переход электронов в свободное состояние. Но одновременно часть возбужденных электронов будет возвращаться в нормальное состояние, освобождая полученную ранее энергию и возвращая ее тепловому движению атомов тела. Чем больше накопится свободных электронов, тем больше будет случаев возврата в нормальное состояние. В конце концов в теле устанавливается некоторое равновесие, когда столько же электронов переносится тепловым движением в свободную зону, сколько их возвращается оттуда в нормальное состояние.

В большинстве полупроводников, с которыми приходится иметь дело, средняя энергия атомов при тепловом движении гораздо меньше той работы, которую нужно затратить, чтобы перевести электрон в свободную зону. Однако тепловое движение носит хаотический характер — в нем сочетаются разнооб-

разные виды движения и всевозможные скорости. Если средняя энергия атомов и недостаточна для освобождения электрона, то всегда найдутся отдельные атомы с гораздо большими скоростями. Чем дальше данная энергия от средней, тем меньше таких случаев. Так, например, атомов с двойной энергией в 7 раз меньше, чем атомов со средней энергией; атомов с энергией, в 5 раз большей, — в 140 раз меньше, с десятикратной энергией — в 20 000 раз, а с двадцатикратной — в $4 \cdot 10^8$ раз меньше, чем со средней. Тем не менее какая-то часть из 10^{23} электронов, находящихся в 1 см^3 тела, будет освобождена в каждом из перечисленных случаев.

Впрочем, если для перевода электрона в свободное состояние требуется работа, превышающая среднюю тепловую энергию, например, в 100 раз, то число атомов, обладающих достаточной тепловой энергией, окажется уж слишком малым — в данном примере только один атом на каждые 10^{43} . Перевод электрона в свободное состояние делается крайне редким исключением. Как правило, в теле вовсе не будет свободных электронов — оно окажется изолятором. Например, в кристалле каменной соли энергия, необходимая для перевода электрона из связанного в свободное состояние, в 200 раз больше средней энергии теплового движения. Поэтому каменная соль — изолятор.

Условимся, как это принято в современной атомной физике, измерять энергию в электрон-вольтах.

Заряд электрона — строго постоянная величина — $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к}$. Пройдя в электрическом поле разность потенциалов в 1 в, электрон приобретает кинетическую энергию, равную произведению его заряда на разность потенциалов, т. е. $1,6 \cdot 10^{-19}$ джоуля, или $1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$. Эту энергию мы и называем одним электрон-вольт (эв).

Выраженная в этих единицах средняя энергия теплового движения при комнатных температурах составляет около 0,03 эв, а при других температурах — около $10^{-4} \cdot T$, где T — абсолютная температура, или температура t по Цельсию, увеличенная на $273,2^\circ$:

$$T = 273,2 + t.$$

Обозначим энергию, необходимую для перевода электрона в свободную зону, через U электрон-вольт. Она в $U/10^{-4} \cdot T$ раз превышает среднюю энергию теплового движения атомов тела. С ростом отношения $U/10^{-4} \cdot T$ все меньше оказывается свободных электронов в возбужденных состояниях.

Пока энергия U , необходимая для освобождения электрона, не превышает 1 эв, т. е. пока она только до 30 раз больше средней тепловой энергии (0,03 эв при обычных температурах), свободных электронов окажется хотя и мало, но все же достаточно для создания измеримых электрических токов. Когда же U по-

рядка 2 эв или больше, т. е. когда для перевода электрона в свободное состояние нужна работа, в 60 и более раз превышающая среднюю тепловую энергию атома, то при комнатных температурах мы имеем изолятор. Однако и в таком веществе при температурах в несколько сот градусов Цельсия можно обнаружить электропроводность.

Для освобождения электронов каменной соли нужна энергия в 6 эв, поэтому вплоть до температуры плавления (810°C) каменная соль не обладает электронами проводимости.

Таким образом, отличие полупроводника от изолятора носит условный характер: вещество, представляющее собой изолятор при одних температурах, становится полупроводником при других, более высоких. Даже в случае каменной соли, например, если и нет электронного тока, то при обычных температурах ток создается ионами натрия, а вблизи температуры плавления также и ионами хлора.

Ясно, также, что с повышением температуры число свободных электронов в каждом полупроводнике должно возрасти, а при понижении температуры до абсолютного нуля — убывать вплоть до нуля.

Так как свободные электроны в полупроводнике появляются только как результат теплового движения, то при отсутствии теплового движения исчезнут и свободные электроны. Любой полупроводник по этим представлениям становится изолятором вблизи абсолютного нуля.

Это свойство полупроводников отличает их от металлов, в которых способность изменять свое движение под влиянием электрических сил и, следовательно, проводить ток присуща электронам независимо от наличия тепловой энергии атомов тела.

Тепловое движение не только помогает появлению тока в полупроводнике, освобождая его электроны, но и мешает в то же время прохождению тока, создавая препятствия свободному движению электронов.

Квантовая теория приводит к следующим представлениям об электрическом токе в полупроводнике.

В идеально правильно построенном кристалле электроны могли бы двигаться почти так же, как в пустоте. Однако следует учесть, что кристалл не идеален, что случайные искажения, посторонние включения и, наконец, тепловое движение нарушают правильность решетки. То сближаясь, то удаляясь друг от друга, атомы создают кратковременные сгущения и разрежения.

Каждое искажение решетки нарушает правильное чередование зарядов и создает местное электрическое поле, отклоняющее электрон от его первоначального направления. Электрон движется свободно только на неискаженных участках кристалла. Только здесь, на так называемой длине своего свободного пробега, электрон накапливает энергию, ускоряя свое движение.

Теория предполагает, что после встречи с искаженным участком кристалла электрон как бы начинает свой путь сначала. Каждое данное искажение отклоняет электрон в одну определенную сторону, но искажений много, и действуют они в самых разнообразных направлениях, так что суммарное их действие сводится к разбрасыванию электронов по всем направлениям. В результате действие электрического поля, направляющего движение электронов в одну сторону, каждый раз нарушается их рассеянием при столкновениях с искаженными участками кристалла (рис. 2). Направляющее действие поля сказывается только на протяжении свободного пробега от одного столкно-

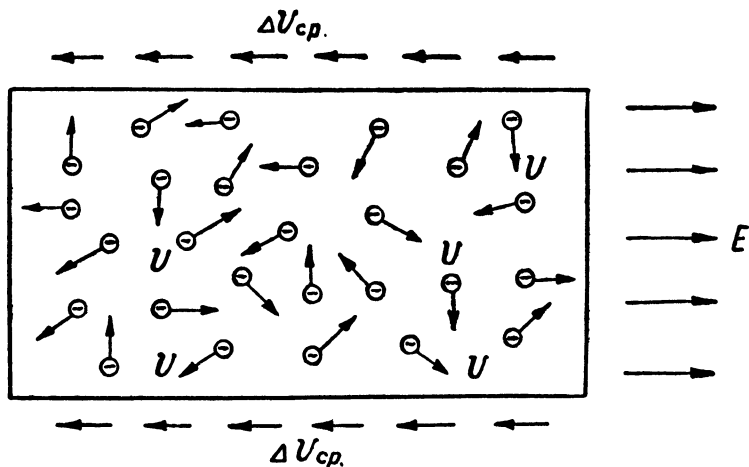


Рис. 2. Схема действия электрического поля на электроны: \vec{v} — тепловые скорости; Δv_{cp} — средняя добавочная скорость, вызванная электрическим полем E .

вения до следующего. Длина эта очень невелика — порядка миллионной доли сантиметра. Поэтому электрическое поле успевает изменить скорость теплового движения электрона только в самой ничтожной степени. Однако только эта небольшая, но одинаково направленная добавочная скорость всех электронов и создает электрический ток.

Даже в сильных электрических полях, например 100 в/см, добавочная энергия на длине свободного пути в 10^{-6} см составит всего 10^{-4} эв, тогда как средняя энергия теплового движения при комнатных температурах в 300 раз больше.

Тепловые скорости электронов, существовавшие и до включения поля, распределены по всевозможным направлениям; электроны переносят столько же зарядов в одном направлении, сколько и в противоположном, так что суммарный перенос ими зарядов вдоль поля равен нулю.

Но тепловые скорости электронов оказывают все же влияние на величину тока, так как они определяют длительность свободного пробега: чем выше температура, тем больше тепловые скорости и тем быстрее пробегают электроны свой свободный путь, тем короче промежуток времени между двумя столкновениями электрона. Этот промежуток времени почти не изменяется от наличия электрического поля, поскольку поле в ничтожной степени изменяет скорость электронов. Длительность свободного пробега зависит от числа неоднородностей в кристаллической решетке и от интенсивности теплового движения.

Средняя добавочная скорость, сообщаемая электронам электрическим полем, равным 1 в/см , называется подвижностью электронов; мы будем обозначать подвижность буквой u . В электрическом поле $E \text{ в/см}$ средняя добавочная скорость $\Delta v_{\text{ср}}$ окажется в E раз больше:

$$\Delta v_{\text{ср}} = uE.$$

Ток в проводнике можно определить следующим образом. Обозначим через n число свободных электронов в 1 см^3 проводника. Все электроны с зарядом e , находящиеся от данного сечения на расстоянии меньшем, чем $\Delta v_{\text{ср}}$, в течение ближайшей секунды пройдут через его сечение; их число будет $n\Delta v_{\text{ср}}S$, где S — площадь поперечного сечения, а переносимый ими заряд, или величина тока, будет равен:

$$I = ne\Delta v_{\text{ср}}S.$$

Плотность тока i , т. е. ток, проходящий через 1 см^2 поперечного сечения, получим, положив $S = 1$, а $\Delta v_{\text{ср}} = uE$:

$$i = neuE.$$

Отношение плотности тока i к создающему его полю E называется удельной электропроводностью σ вещества, а обратная ей величина $\frac{1}{\sigma} = \rho$ — удельным сопротивлением. Мы видим, что

$$\sigma = \frac{i}{E} = neu.$$

Таким образом, удельная электропроводность σ данного материала определяется произведением концентрации n свободных электронов на их заряд e и на подвижность u .

Удельную электропроводность σ можно легко определить при помощи вольтметра, измеряющего разность потенциалов на концах цилиндрического проводника ($V = EL$, где L — его длина), и амперметра, дающего величину тока I :

$$\sigma = \frac{i}{E} = \frac{I/S}{V/L} = \frac{I}{V} \cdot \frac{L}{S}.$$

Однако такие измерения не позволяют узнать в отдельности концентрации n и подвижности u электронов, проводящих ток.

Нельзя также ответить на вопрос, вызван ли ток движением отрицательных зарядов против направления поля от отрицательного полюса к положительному (рис. 3, А) или переносом положительных зарядов к отрицательному полюсу (рис. 3, Б). Казалось бы, ответ ясен: ведь в проводнике имеются только отрицательные электроны, никаких свободных положительных зарядов нет! Тем неожиданное оказались результаты опытов, показавших, что только в некоторых металлах и полупроводниках ток переносится отрицательными зарядами, в других же ток состоит в движении каких-то положительных зарядов.

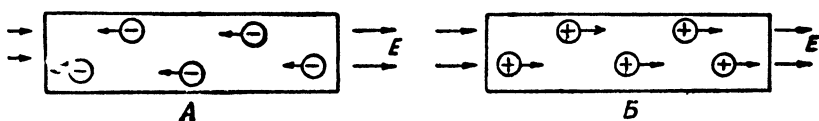


Рис. 3. Перенос тока:
А — электронами; Б — положительными зарядами.

Знак носителей тока можно определить по направлению термоэлектродвижущей силы, возникающей в проводнике, когда один его конец обладает более высокой температурой, чем другой. На горячем конце больше свободных зарядов и тепловая их энергия выше, чем на холодном. Поэтому заряды переходят к холодному концу в большем количестве, чем в обратном направлении, и, перенося свой заряд, заряжают им холодный конец (рис. 4, А и Б).

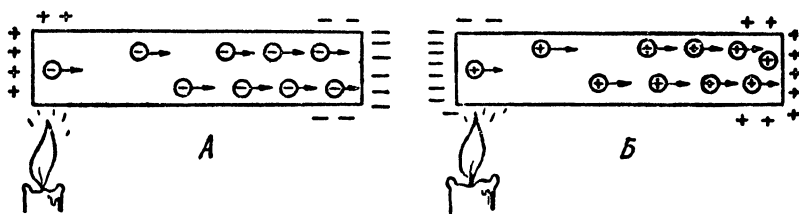


Рис. 4. Перемещение свободных зарядов к холодному концу полупроводника:
А — носители тока электроны; Б — носители тока положительные заряды.

Можно было бы ожидать, что холодный конец окажется заряженным отрицательным электричеством. Опыт же говорит, что и среди металлов и среди полупроводников встречаются как такие, в которых холодный конец получает отрицательный заряд (рис. 4, А), так и вещества, в которых на холодном конце оказывается положительный заряд (рис. 4, Б).

Вывод о носителях тока двух знаков в полупроводнике настолько удивителен, что хотелось подтвердить его еще другим независимым путем. Такую возможность дает изучение влияния

магнитного поля на движущиеся заряды. Еще в 20-х годах прошлого столетия Ампер обнаружил отклонение гибкого проводника в магнитном поле, когда по проводнику проходит электрический ток. Проводник отклоняется в ту сторону, в которую магнитное поле отклоняет движущиеся внутри проводника заряды. Если это отрицательные электроны, то они движутся против направления тока (направлением поля и тока считается направление от положительного полюса к отрицательному, т. е. направление, в котором движутся положительные заряды) и должны заряжать наружную боковую поверхность проводника отрицательным зарядом (рис. 5, А). Если же это положительные заряды, то они движутся по направлению тока и заряжают наружную боковую поверхность положительно (рис. 5, Б). На опыте здесь наблюдаются отрицательные заряды в одних веществах и положительные в других. Опыт показывает, что знак зарядов, переносимых от горячего конца проводника к холодному,

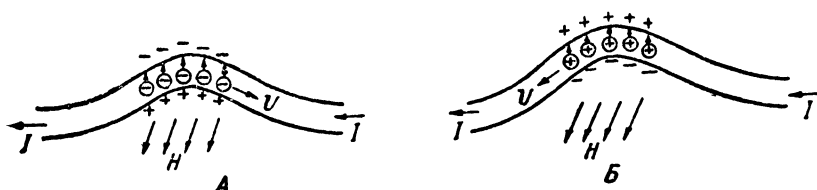


Рис. 5. Отклонение проводника с током I в магнитном поле H , направленном перпендикулярно чертежу, к читателю:

А — носители тока электроны; Б — носители тока положительные заряды; v — направления перемещения зарядов.

всегда совпадает со знаком тех зарядов, которые в том же проводнике отклоняют магнитное поле.

Приходится признать, что в полупроводнике возможно как движение свободных отрицательных электронов, так и перенос каких-то положительных зарядов. Ядерная физика знает, правда, положительно заряженные электроны — позитроны, но для их освобождения нужна энергия свыше 1 миллиона эв. Поэтому не может быть и речи об их участии в создании тока.

Современная квантовая теория объясняет перенос тока положительными зарядами следующим образом.

Мы видели, что в тех случаях, когда все квантовые состояния заняты, электроны не могут участвовать в прохождении тока. Это объясняется тем, что электроны могли бы изменить свое движение, только перейдя в иное и только в свободное квантовое состояние, таковых же не имеется. Но когда некоторая, хотя бы небольшая часть электронов ушла из зоны (например, перешла в возбужденное состояние под влиянием теплового движения атомов или света), среди занятых состояний появляются свободные места — их называют «дырками». В та-

кие освободившиеся состояния могут перейти под влиянием электрического поля другие электроны с близкими значениями энергии. Электрические силы замедляют движение свободных отрицательных электронов и ускоряют движение положительных по направлению поля. Когда среди состояний имеются «дырки», то электроны, движущиеся с большими скоростями вдоль поля, могут перейти в свободные состояния меньших скоростей. Но те состояния, которые занимали электроны, освободятся, превратятся в новые «дырки». Вместо «дырки», соответствующей меньшей скорости вдоль поля, появится «дырка», соответствующая большей скорости. «Дырка», следовательно, изменяет свое положение в электрическом поле так же, как положительный заряд.

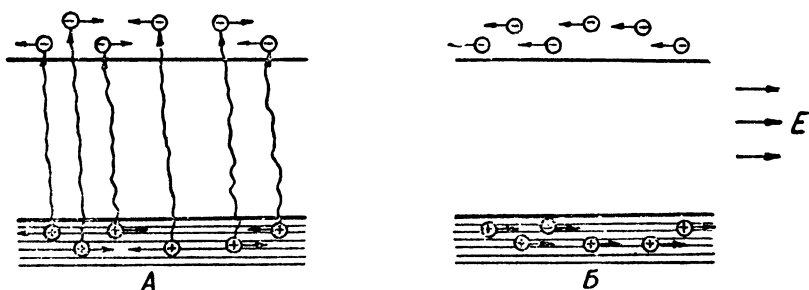


Рис 6 Схема создания в полупроводнике тока носителями обоих знаков: **А** — образование «дырок» благодаря переходу электронов из заполненной зоны в свободную зону; **Б** — образование тока в полупроводнике благодаря электрическому полю.

Согласно квантовой теории, то, что мы считали положительными носителями тока, на самом деле представляет собой лишь не занятые электронами состояния среди остальных заполненных состояний. Такой простой результат получается, впрочем, только тогда, когда «дырок» немного, когда почти все состояния заняты электронами.

Если речь идет о «дырках», освобожденных электронами, перешедшими в возбужденные состояния, то тогда и электроны среди свободных возбужденных состояний и «дырки» среди занятых состояний способны переносить ток. В таком полупроводнике имеется одинаковое число и свободных электронов и свободных «дырок» (рис. 6, А). Приложенное поле вызовет ток, который будет создаваться носителями обоих знаков (рис. 6, Б).

Но может случиться, что «дырки» образовались потому, что часть электронов ушла из заполненной полосы и закрепились на атомах посторонней примеси, превратив их в отрицательные ионы (рис. 7, А). Закрепленные электроны в создании тока не участвуют, и единственными носителями тока окажутся «дыр-

ки». Такой механизм возникновения тока называют «дырочным». Холодный конец, куда переносятся «дырки», где недочет электронов больше, заряжается положительно. В магнитном

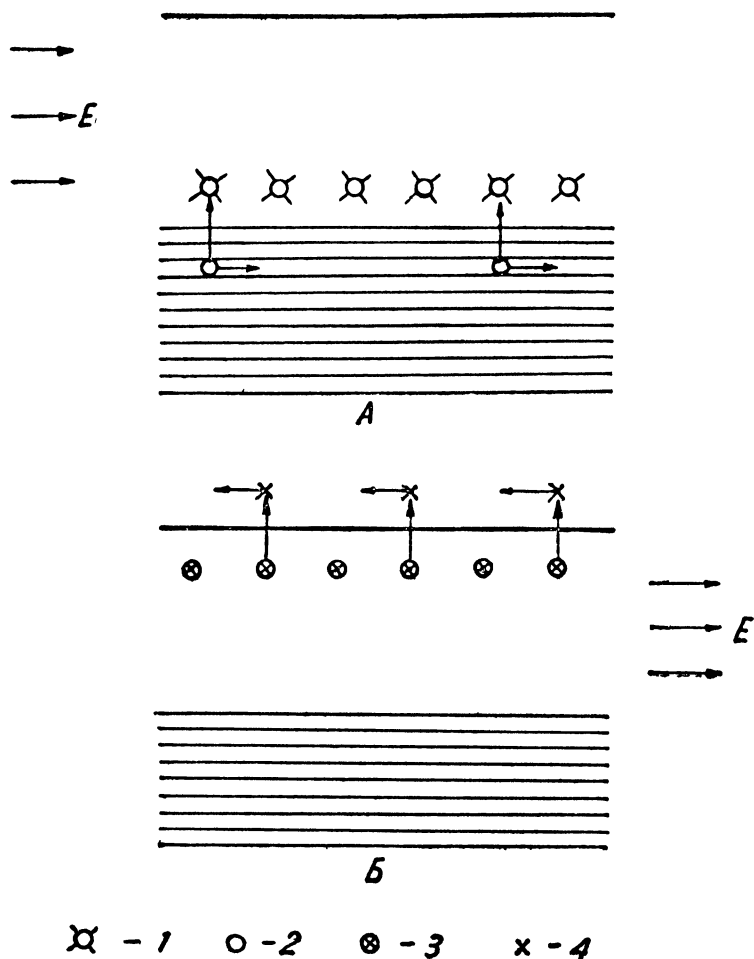


Рис. 7. Схема механизма возникновения «дырочного» тока и электронного в полупроводнике с примесными атомами:

А — образование «дырок» благодаря переходу электронов из заполненной зоны на уровни примеси; **Б** — образование свободных электронов путем перехода их с уровней примеси в свободную зону; 1 — приемники электронов (акцепторы); 2 — свободные состояния; 3 — источники электронов (доноры); 4 — свободные электроны; E — напряженность электрического поля.

поле создающие ток «дырки» отклоняются наружу, заряжая эту сторону полупроводника положительно.

В полупроводниках встречаются и такие примесные атомы,

электроны которых слабо связаны и легче, чем электроны основного вещества, переходят в свободные возбужденные состояния, а сами атомы превращаются в отрицательные неподвижные ионы. Тогда в токе участвуют только отрицательные электроны, и ток мы называем «электронным» (рис. 7, Б).

Полупроводники с дырочным механизмом тока называют полупроводниками *p*-типа (позитивными), а электронные — *n*-типом (негативные).

Иногда достаточно 1% примесных атомов, чтобы повысить концентрацию свободных электронов или «дырок» в миллионы раз. Во столько же раз возрастает при этом и электропроводность полупроводника.

Введение тех или иных примесей в состав полупроводника открывает, таким образом, возможность управлять в широких пределах электропроводностью и изменять знак носителей тока. Кроме того, разнообразие полупроводящих материалов, охватывающих ряд элементов (B, C, Si, Ge, S, Se, Te, P, As), сплавов (Mg_3Sb_2 ; ZnSb; Mg_2Sn ; CdSb; AlSb; InSb; GeSb), окислов (Al_2O_3 ; Cu_2O ; ZnO; TiO_2 ; UO_2 ; WO_3 ; MoO_3), сульфидов (Cu_2S ; Ag_2S ; ZnS; CdS; HgS), селенидов и теллуридов и множество более сложных соединений, позволяет выбрать для каждой конкретной технической задачи наиболее подходящее вещество. В дальнейшем мы увидим, чем руководствуются при выборе материала для данной конкретной цели.

Из года в год применение полупроводников в промышленности растет и по объему производства и по разнообразию его форм. Попытаемся описать важнейшие из них и рассмотрим лежащие в их основе физические процессы.

Лекция вторая

ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И В БЫТУ

Тепловые сопротивления (термисторы)

Свободные заряды создаются в полупроводнике тепловым движением его атомов. Поэтому электропроводность некоторых полупроводников сильно возрастает с ростом температуры. Повышение температуры на $1^\circ C$ увеличивает электропроводность полупроводника на 3—6%; повышение на $10^\circ C$ — примерно на 75%, а повышение температуры на $100^\circ C$ увеличивает электропроводность в 50 раз. Измеряя сопротивление полупроводника, можно судить о его температуре и, следовательно, применять его в качестве термометра.

Такие термометры сопротивления, или болометры, давно применяются в лабораторной практике для измерения самых

низких и самых высоких температур. Но поскольку материалом болометра до сих пор были металлы, изменяющие свое сопротивление на 0,3% на каждый градус, такие измерения были мало точны. Кроме того, болометр приходилось устраивать из длинной тонкой проволоки, для того, чтобы общее сопротивление было достаточно велико по сравнению с сопротивлением подводющих проводников. На рис. 8 показано, как с изменением температуры меняется сопротивление металлического болометра и полупроводникового термосопротивления.

Полупроводники представляют в этом отношении большие преимущества: 1) их удельное сопротивление настолько велико, что весь болометр может иметь длину всего несколько миллиметров или даже несколько десятых миллиметра, а под-

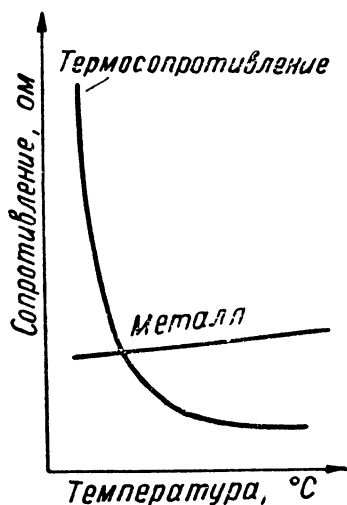


Рис. 8. Зависимость сопротивления металлического болометра и полупроводникового термосопротивления от температуры.

водящие ток металлические провода можно сделать достаточно тонкими; 2) малость размеров резко снижает инерционность, т. е. промежуток времени, необходимый для того, чтобы термометр принял температуру среды; это позволяет измерять температуру небольших предметов и объектов с малой удельной теплопроводностью, таких, например, как лист растения или кожа человека; 3) относительное изменение сопротивления у полупроводника в 10—20 раз больше, чем у металла, что повышает точность измерения.

Все эти преимущества способствовали широкому использованию термометров сопротивления из полупроводников, которые за границей получили название термисторов.

Термисторы позволяют определять температуру любого числа помещений или предметов из одного наблюдательного пункта. На больших теплоходах несколько тысяч термисторов размещаются по всему кораблю и контролируют температуру везде, где это представляет интерес. Термисторы могут не только контролировать, но и поддерживать желаемую температуру в данном помещении, включая нагреватель при ее понижении и выключая его, когда температура достигнет заданного значения.

Такие же термисторы могут выполнять и другие функции, например задачу ограничителя времени. Включая в электрическую цепь полупроводниковое сопротивление, мы получим воз-

растающий со временем ток. Ток разогревает полупроводник и повышает его электропроводность, а следовательно, и величину тока в цепи; полупроводник при этом еще сильнее нагревается, его сопротивление уменьшается, а ток повышается в еще большей степени. Параллельно со все возрастающей температурой увеличиваются и потери тепла в окружающую среду до тех пор, пока они не сравняются с теплотой, выделяемой током; тогда будет достигнута равновесная температура, которую полупроводник и будет сохранять, пока к нему приложена данная разность потенциалов.

Продолжительность времени, необходимого для достижения равновесия и для достижения определенного тока при данной разности потенциалов, определяется размерами образца и условиями охлаждения. Можно подобрать условия так, чтобы это время было от долей секунды до 10 минут.

Тепловые сопротивления применяются, например, для автоматического постепенного включения электрических машин, трансформаторов и электромагнитов с заданной скоростью. Их можно применять как «реле времени», когда нужно включить одно электрическое устройство через заданное время после включения другого.

Тепловые сопротивления используются для регулировки напряжения и величины тока, для ослабления случайных и систематических колебаний разности потенциалов или тока. Для этого в электрическую цепь наряду с рабочей нагрузкой включают полупроводниковое сопротивление таким образом, что при всяком изменении внешнего напряжения распределение потенциала в цепи сохраняет на концах интересующего нас участка ту же разность потенциалов. Она остается тогда практически неизменной, несмотря на значительные колебания напряжения во внешней сети. С помощью полупроводникового сопротивления можно добиться также такого распределения токов, чтобы при любом изменении напряжения в сети ток, идущий через данное устройство, оставался в заданных пределах.

Разумеется, полная регулировка тока или напряжения наступает не сразу, а лишь через такой промежуток времени, когда полупроводник достигнет равновесной температуры. Подбрав размеры полупроводника и условия охлаждения, можно уменьшить этот промежуток времени до малых долей секунды.

Фотосопротивления

Энергию, необходимую для перевода электрона в свободное состояние или для образования «дырки», могут доставить не только тепловое движение, но и другие источники энергии, например поглощенная электроном лучистая энергия света, энергия потока электронов, ядерных частиц и т. п. Всякое же увели-

чение числа свободных электронов или «дырок» проявляется в повышении электропроводности и тока.

Количество энергии, передаваемое светом отдельному электрону, определяется, как оказалось, только частотой световых колебаний и не зависит от яркости светового луча. С увеличением силы света растет число поглощающих свет электронов, но не энергия, получаемая каждым из них. Этот неожиданный факт привел к мысли, что световые волны представляют собой в то же время поток частиц — фотонов, энергия E каждого из которых выражается, как произведение частоты ν световых колебаний за 1 сек на h (постоянную Планка): $E = h\nu$.

Если энергию измерять в эргах, то h получает значение $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг \cdot сек; чтобы выразить E в электрон-вольтах, нужно принять $h = 4,13 \cdot 10^{-15}$. Так, например, число колебаний желтого света составляет около $5 \cdot 10^{14}$ в секунду; следовательно, энергия фотона для желтого света примерно $4 \cdot 10^{-15} \times 5 \cdot 10^{14} = 2$ эв.

Для многих полупроводников такой энергии достаточно, чтобы перевести электроны в свободное состояние и повысить электропроводность. Существуют и такие полупроводники, у которых для перевода электронов в свободное состояние достаточно нескольких десятых долей электрон-вольта, и поэтому повышение проводимости может наблюдаться при гораздо меньшей частоте, в далекой инфракрасной части спектра. Такое излучение дают даже слабо нагретые предметы; присутствие их может быть обнаружено на расстояниях во много километров по небольшому повышению тока в цепи с соответственным полупроводником. Первичное слабое повышение тока затем многократно — иногда в миллион раз — увеличивается с помощью усилителей и дает необходимый сигнал.

Свет может не только переводить в свободное состояние электроны внутри полупроводника, но сообщенная фотоном энергия $h\nu$ может оказаться достаточной, чтобы вырвать электрон из тела в окружающую среду. Такое явление носит название внешнего фотоэффекта, тогда как вызванное светом повышение электропроводности называют внутренним фотоэффектом, или фотопроводимостью, а основанные на этом явлении приборы — фотосопротивлениями.

Наиболее употребительные материалы для фотосопротивлений в видимой области спектра — сернистый кадмий, сернистый таллий, сернистый висмут, а для инфракрасных лучей — сернистый, селенистый и теллуристый свинец. Общий вид некоторых сернисто-висмутовых фотосопротивлений изображен на рис. 9.

Академик П. И. Лукирский открыл особо чувствительный к свету полупроводник для внешнего фотоэффекта — сурьмянистый цезий (Cs_3Sb), а Л. А. Кубецкий изобрел устройство для умножения числа электронов с помощью полупроводников.

Прибор Кубецкого (рис. 10) представляет собой вакуумную трубку, внутри которой расположен ряд пластинок, обладающих тем свойством, что каждый вошедший извне электрон большой энергии вызывает выход из поверхности в несколько

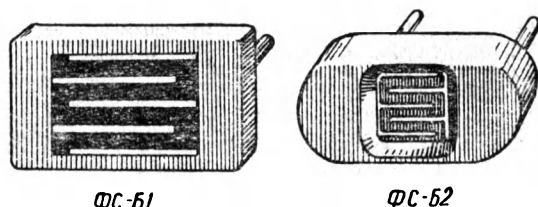


Рис. 9. Внешний вид некоторых сернисто-висмутовых фотосопротивлений.

раз большего числа вторичных медленных электронов. Начальный, вызванный пучком света L слабый поток электронов ускоряется электрическим полем до энергий в несколько сот электрон-вольт, загибается магнитным полем (не показанным на рис. 10) и направляется на следующую пластинку, откуда вы-

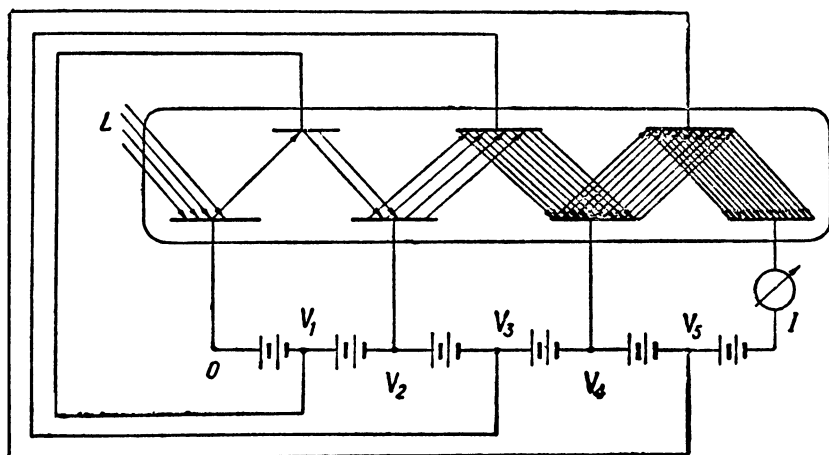


Рис. 10. Схема прибора Кубецкого: $V_1 - V_2$; $V_2 - V_3$; $V_3 - V_4$; $V_4 - V_5$ — разности потенциалов, ускоряющие электроны.

ходит уже увеличенное число медленных электронов; они снова ускоряются и, отклоняясь магнитом, попадают на следующую пластинку, где снова увеличиваются в числе, и т. д. Если каждая пластинка умножает число электронов в 2 раза, то 10 пластинок умножит их в 2^{10} , или в 1 000 раз, а при коэффициенте умножения 5 — в 5^{10} раз, т. е. в 10^7 раз. Так можно измерить самые слабые потоки из нескольких электронов в секунду.

Внешний, а в последнее время и внутренний фотоэффект используются в звуковом кино. Колебания воспринимающей звук мембраны модулируют выходящий из узкой щели луч света, записывая на движущейся фотографической пленке полосу различной ширины или различной степени почернения соответственно звуковым колебаниям. Для воспроизведения звука луч света пропускают сквозь ту же пленку, движущуюся с той же скоростью. Количество света, пропускаемого пленкой, изменяется при этом так же, как оно изменялось при записи под влиянием колеблющейся мембраны. Прошедший свет попадает на фотоспротивление, создающее пропорциональный силе света ток; последний в свою очередь приводит в колебание мембрану громкоговорителя.

Фотоспротивления находят широкое применение для целей сигнализации и автоматики, для управления на расстоянии производственными процессами. Они предупреждают несчастные случаи и аварии при нарушениях хода процесса, автоматически останавливая машину.

Для подобных целей пользуются лучом света, направленным на фотоспротивление; между источником света и его приемником помещается тот или иной указатель, свидетельствующий о нормальном ходе процесса. Как только процесс нарушается, свет попадает на фотоспротивление и создает ток, который выключает двигатель.

Фотоспротивлениями пользуются для сортировки изделий по их окраске или размерам, определяющим количество света, падающего на фотоспротивление, и, следовательно, величину фототока, в зависимости от которой изделие направляется в тот или иной отсек.

Фотоспротивления измеряют силу света и могут автоматически регулировать освещенность, включая дополнительные источники света, как только освещенность падает ниже желательного предела.

Электропроводность полупроводников повышается под влиянием не только света, но и радиоактивных излучений: альфа-бета- и гамма-лучей, а также быстрых ядерных частиц — протонов, дейтронов. Каждая такая частица создает на своем пути сквозь полупроводник большое число свободных электронов. В некоторых материалах, например алмазе, сернистом кадмии, прохождения одной быстрой частицы достаточно, чтобы заметным образом повысить ток. С помощью этих материалов можно осуществить счет числа прошедших частиц, заставляя фототок каждый раз изменять показания счетчика на единицу.

Изучение фотоэлектрических явлений дает ряд сведений о свойствах электронов в полупроводнике, об энергии, необходимой для перехода электронов в свободное состояние, для

освобождения «дырки» и для полного выхода электрона за пределы среды, в которой он находился.

Определение этих важнейших характеристик полупроводника основывается на однозначной связи между частотой света ν и энергией E , сообщаемой таким светом электрону. Мы уже упоминали, что энергия E , выраженная в электрон-вольтах, равна $E = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ эв}$.

Если E_c — энергия, необходимая для перевода электрона в свободное состояние, то только свет такой частоты, при которой $4,13 \cdot 10^{-15} \nu > E_c$, способен освободить электроны и повысить электропроводность. Всякий свет меньшей частоты окажется неэффективным. Определив наименьшую частоту света, способного вызвать фотоэффект, мы определим тем самым величину энергии E_c .

Об энергии электронов в полупроводнике позволяет судить также спектральный анализ частоты рентгеновых лучей, соответствующих переходу электронов в одно из самых глубоких, ближайших к ядру состояний.

Спектры рентгеновых лучей с полной несомненностью подтвердили, что электроны в полупроводнике находятся либо в нормальном состоянии в заполненной зоне, либо в свободном состоянии. Между этими двумя возможными состояниями, как и в отдельном атоме, существует участок недоступных для электрона энергий. Эти уровни энергии составляют запретную зону полупроводника. Ширина запретной зоны энергий составляет в различных полупроводниках от нескольких десятых до $1-2 \text{ эв}$.

Кроме электронов самой кристаллической решетки, часто имеются (в гораздо меньшем числе) электроны, связанные с примесями, энергии которых занимают промежуточное положение в запретной зоне. Эти примесные электроны также могут участвовать в фотоэффекте, переходя в свободное состояние.

Термоэлементы

В 1822 году Зеебек заметил, что замкнутая цепь, составленная из двух различных полупроводников (термоэлемент), отклоняет расположенную вблизи магнитную стрелку всякий раз, когда места контакта проводников имеют различную температуру.

Отклонение стрелки было вызвано появлением электрического тока в цепи. Любопытно, что Зеебек долго и упорно отрицал такое объяснение, считая, что открытое им явление вызвано намагничиванием проводников.

Термоэлемент можно было бы рассматривать как термоэлектрическую машину, которая без всяких движущихся механизмов превращает часть тепловой энергии, нагревающей горячий

спай, в электрическую энергию; при этом остальная часть тепла отдается холодным спаем в окружающую среду. Но одновременно большой поток тепла переходит от горячего спая термоэлемента к холодному путем теплопроводности, а некоторая часть создаваемой термоэлементом электрической энергии превращается в тепло внутри самого же термоэлемента и не может быть использована. Эти бесполезные затраты того запаса тепла, который получает горячий спай, настолько велики, что коэффициент полезного действия, соответствующий превращению сообщаемой горячему спаю тепловой энергии в электрическую, для термоэлементов, изготовленных из металлических проволок, не превышает 0,5%. Такие термоэлементы применяются только для измерения температур и непригодны как технические генераторы электроэнергии.

В полупроводниках соотношение между развиваемой термоэлементом электроэнергией и теплотой, теряемой путем теплопроводности и выделяемой внутри термоэлемента током, гораздо благоприятнее. Полупроводники позволяют реально поставить проблему непосредственного получения электроэнергии из тепловой энергии.

В металлах при всех температурах, начиная с абсолютного нуля, все валентные электроны одинаково свободны, а их кинетическая энергия почти не зависит от температуры. Поэтому разность температур на концах металлического проводника вызывает лишь слабое перемещение зарядов и создает малые термоэлектродвижущие силы — менее 10^{-5} в на каждый градус разности температур.

Другое дело — полупроводник. Свободные заряды создаются в нем тепловым движением. При абсолютном нуле концентрация таких зарядов равна нулю, и полупроводник превращается в изолятор. С повышением температуры концентрация свободных электронов или «дырок» чрезвычайно быстро возрастает, достигая при комнатных температурах 10^{15} — 10^{20} .

Кинетическая энергия свободного электрона в полупроводнике, в отличие от металла, не остается неизменной, а растет пропорционально абсолютной температуре. Поэтому в полупроводнике наличие разности температур вызывает перемещение свободных зарядов.

Если носителями тока являются электроны, то они переносят свой заряд к холодному концу, заряжая его отрицательным электричеством, тогда как горячий конец полупроводника, потерявший часть своих электронов, окажется заряженным положительно, что создаст между горячим и холодным концом разность потенциалов. В полупроводниках же с «дырочным» механизмом тока горячий конец окажется заряженным отрицательно, а холодный — положительно.

Если полупроводник изолирован, то по мере роста разности потенциалов внутри полупроводника нарастает электрическое поле, замедляющее поток электронов от горячего конца к холодному и ускоряющее поток в обратном направлении. Через некоторое время между горячим и холодным концом установится такая разность потенциалов, при которой потоки в обоих направлениях сравняются; это равновесие и определит термоэлектродвижущую силу. Она в десятки раз больше, чем в металлах, достигая или даже превышая 10^{-3} в на один градус разности температур. Если полупроводник, в котором существует разность температур, составляет часть замкнутой электрической цепи, то поток зарядов, не прекращаясь, создает ток в цепи и выделяет электрическую энергию. Особенно выгодно устройство, в котором цепь составлена из «дырочного» и электронного проводников: их токи совпадают по направлению и усиливают друг друга.

Количественное различие между полупроводником и металлом приводит к новым качественным возможностям. Коэффициент полезного действия полупроводниковых термоэлементов доходит до 7%, но может быть и больше. Среди находящихся в обращении тепловых машин только двигатели внутреннего сгорания, требующие высококачественного жидкого топлива — бензина, керосина, нефти, обладают коэффициентом полезного действия порядка 40—50%. Коэффициент полезного действия лучших паровых электростанций едва достигает 30%, а паровых машин малой мощности — 10%; паровозы используют топливо с коэффициентом полезного действия 4—8%. Учитывая крайнюю простоту термоэлектрических генераторов электроэнергии, не требующих ни сложных вращающихся механизмов тепловых машин, ни динамомашин, а также учитывая малые размеры и устойчивую работу термоэлементов, можно ожидать, что полупроводниковые термобатареи займут немаловажное место в энергетике народного хозяйства. Возможно, что термоэлементы откроют также путь к использованию новых источников тепла везде, где имеются значительные разности температур. Вероятно, можно будет с помощью термоэлектрических батарей превращать в электричество энергию солнечных лучей.

Первое практическое применение термоэлементов осуществлено в Советском Союзе в целях радиофикации районов, не имеющих электроэнергии. Источником тепла здесь служат горячие газы, выходящие из стекла керосиновой лампы; они проходят внутри вертикальной трубки, помещенной над стеклом, и подогревают внутренние спаи термоэлементов, расположенных по радиусам трубки.

Наружные спаи охлаждаются комнатным воздухом, для усиления охлаждения эти спаи соединены с металлическими пластинами радиатора. В таком устройстве внутренние спаи нагреты до $300\text{—}350^\circ\text{C}$, тогда как температура наружных спаев не

превышает 60°C . Разности температур в $240\text{--}290^{\circ}\text{C}$, поддерживаемой теплом, доставляемым керосиновой лампой, оказывается достаточно для выработки электроэнергии, необходимой для питания радиоприемника. Термоэлектрическая батарея состоит из двух частей: одна часть дает ток для накала ламп приемника, другая — напряжение порядка 100 в, необходимое для анодной цепи. Опыт показал, что такие термоэлектрические генераторы, разработанные Институ-

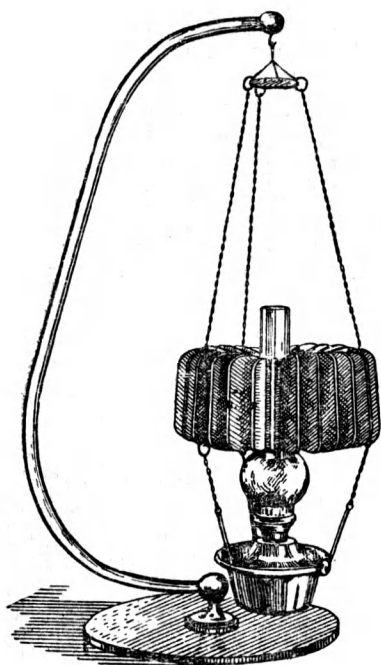


Рис. 11. Термоэлектродгенератор ТГК-3.

том полупроводников Академии наук СССР (А. Ф. Иоффе, Ю. П. Маслаковец, А. Н. Воронин и др.) совместно с Министерством связи СССР (В. С. Даниель-Бек и др.), вполне обеспечивают электропитание радиоприемников; они производятся промышленностью. Такая термобатарея изображена на рис. 11.

Более мощные термоэлектрические генераторы, подогреваемые керогазом, снабжают электроэнергией радиостанции «Урожай», применяемые в машинно-тракторных станциях (рис. 12).

Задача радиофикации отдаленных районов еще более упростится, когда радиоприемники будут построены не на вакуумных лампах с накаливаемым катодом, а на основе полупроводниковых приборов и усилительных элементов, не требующих накала и потому потребляющих

еще меньше электроэнергии. Все устройство будет более компактным, а освободившуюся часть энергии термоэлектрической батареи можно будет использовать для серии связанных с приемником громкоговорителей, особенно если в них будут применены полупроводниковые звукогенераторы, потребляющие весьма мало энергии.

Разумеется, термоэлектрические генераторы не связаны с определенным горючим, например с керосином; столь же легко осуществить их на угле, дровах, торфе и любом другом топливе.

Рассмотрим схему устройства полупроводникового термоэлемента и термоэлектрической батареи, служащих для снабжения электрической энергией.

Термоэлемент (рис. 13) состоит из двух соединенных метал-

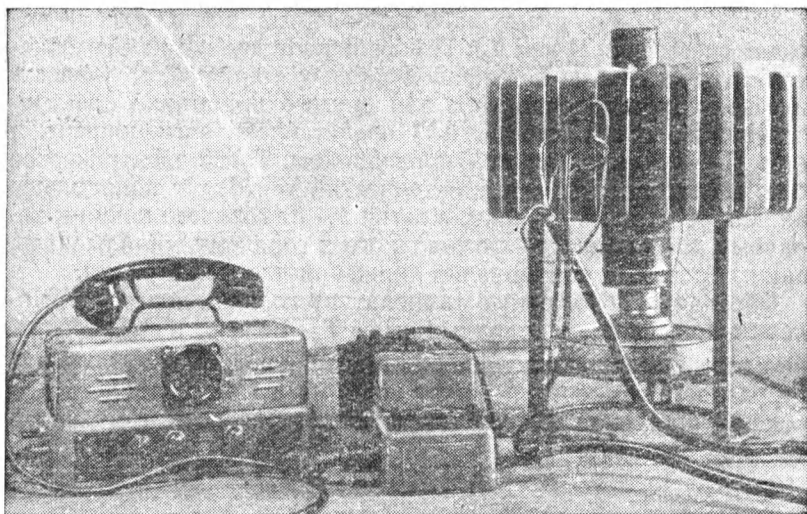


Рис 12. Термоэлектрогенератор с радиостанцией «Урожай».

лическим проводом полупроводниковых ветвей, из которых одна изготовлена из электронного, а другая из «дырочного» полупроводника. Соединяющий их металлический мостик R_0 подогревается источником тепла. Два других конца, охлаждаемые

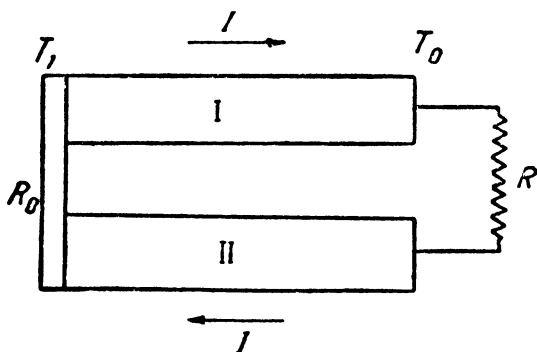


Рис 13. Термоэлектрическая цепь

воздухом или проточной водой, присоединены к внешней цепи, использующей создаваемую термоэлементом электроэнергию. Такой внешней цепью в описанном случае являлся радиоприемник; в других случаях это может быть лампа накаливания или флуоресцентная лампа, если задачей является освещение, элек-

тромотор, если нужна механическая энергия, и т. п. Рис. 13 поясняет сказанное. В нем I и II обозначают две ветви термоэлемента, состоящие из полупроводниковых стержней, R — электрическое сопротивление того или другого приемника электроэнергии. Положим, что ветвь I представлена электронным, а ветвь II — «дырочным» полупроводником. Тогда электрическое поле, а следовательно, и электрический ток будут направлены так, как указывают стрелки: в ветви I — от горячего конца к холодному, а в ветви II — от холодного к горячему, складываясь, таким образом, в направлении движения часовой стрелки.

Обозначим абсолютную температуру горячих концов термоэлемента через T_1 , а холодных через T_0 . Если α_1 и α_{II} обозначают термоэлектродвижущие силы, возникающие в ветвях I и II при разности температур между концами в 1°C , то общая электродвижущая сила E , соответствующая разности температур $(T_1 - T_0)$, составит:

$$E = (\alpha_1 + \alpha_{II}) (T_1 - T_0).$$

Ток I , который появится в замкнутой цепи, состоящей из внутреннего сопротивления R_0 ветвей термоэлемента и внешнего сопротивления R приемника, будет равен:

$$I = \frac{E}{R + R_0}.$$

Полезная мощность W , которую мы получаем в приемнике, может быть выражена как

$$W = VI,$$

где V — разность потенциалов на концах внешнего сопротивления R . Так как в цепи постоянного тока, с которым мы здесь и имеем дело, потенциал падает пропорционально сопротивлению, то

$$\frac{V}{E} = \frac{R}{R + R_0}, \quad V = \frac{ER}{R + R_0},$$

а

$$W = \frac{E^2 R}{(R + R_0)^2}.$$

Подставив вместо E его значение, мы получим общее выражение для полезной мощности W , доставляемой термоэлементом:

$$W = (\alpha_1 + \alpha_{II})^2 (T_1 - T_0)^2 \frac{R}{(R + R_0)^2}.$$

Наибольшего значения W достигает тогда, когда $R = R_0$; наибольшая мощность, которую может создать термоэлемент во внешнем приемнике, равна

$$W = \frac{(\alpha_1 + \alpha_{II})^2 (T_1 - T_0)^2}{4R}.$$

Вся же развиваемая термоэлементом электрическая мощность будет

$$EI = \frac{(\alpha_1 + \alpha_{II})^2 (T_1 - T_0)^2}{2R}.$$

Для того чтобы поддерживать разность температур, необходимо непрерывно сообщать тепловую энергию горячему спаю и отнимать тепло от холодных концов. Значительная часть подводимого тепла уходит путем теплопроводности обеих ветвей к холодным концам. Часть создаваемой термоэлементом электроэнергии бесполезно расходуется на нагревание обеих ветвей. Эти необратимые процессы резко снижают коэффициент полезного действия термоэлемента. Если бы можно было их полностью избежать (а это неосуществимо, так как любой полупроводник обладает теплопроводностью и электрическим сопротивлением), то термоэлемент давал бы наивысший допустимый по законам термодинамики коэффициент полезного действия η всякой обратимой машины:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_0}{T_1}.$$

В примере термобатареи для радиоприема можно принять $T_1 = 350^\circ + 273^\circ = 623^\circ$ и $T_0 = 50^\circ + 273^\circ = 323^\circ$, откуда

$$\eta_{\max} = \frac{623 - 323}{623} = 0,48 = 48\%.$$

В действительности же коэффициент полезного действия термобатареи измеряется немногими процентами. Этот пример показывает, какую громадную роль играют процессы теплопроводности и выделения током джоулевой теплоты.

Если мы заинтересованы в получении возможно большего коэффициента полезного действия η , а не максимальной мощности W , то соотношение между внешним сопротивлением R и внутренним R_0 следует подобрать иначе — R должно быть больше R_0 . В этом случае из всей развиваемой термоэлементом мощности EI используется более половины мощности W . Анализ явлений в термоэлементе показывает, что резкое снижение коэффициента полезного действия η , во много раз по сравнению с термодинамически возможным значение η_{\max} , вызвано в основном необратимым процессом теплопроводности.

Рассмотрим поэтому вопрос о механизме передачи тепла внутри полупроводника. Выравнивание температуры происходит здесь одновременно двумя путями в результате 1) переноса тепла электронами и 2) передачи тепла тепловым движением атомов. Электроны, обладающие на горячем конце более высокой кинетической энергией, переходят к холодному концу, где они отдают избыток энергии атомам, усиливая их тепловое движение и повышая температуру. Находящиеся у холодно-

го конца электроны с меньшей кинетической энергией, переходя к горячему концу, ослабляют тепловое движение и понижают температуру. Так как те же электроны переносят и электрический ток в полупроводнике, то между переносом ими тепла и тока существует близкая связь.

Теплопроводность материала характеризуется некоторым коэффициентом κ , который можно определить следующим образом. Если мы возьмем цилиндрический стержень из данного вещества с поперечным сечением в 1 см^2 , в котором на каждый сантиметр длины температура изменяется на градус, то за секунду в направлении от горячего к холодному концу переносится κ калорий тепла.

Если же площадь поперечного сечения стержня равна $S \text{ см}^2$, его длина — $L \text{ см}$, разность температур на его концах — ΔT° , то за t секунд путем теплопроводности от горячего к холодному концу перейдет Q калорий:

$$Q = \kappa \frac{\Delta T}{L} S t.$$

Коэффициент теплопроводности можно выразить либо в $\text{кал/сек} \cdot \text{град} \cdot \text{см}$, либо в $\text{вт/град} \cdot \text{см}$. Так как 1 кал/сек соответствует $4,19 \text{ вт}$, то выраженная в ваттах величина κ в 4,19 раза больше по численному значению, чем та же величина, выраженная в калориях.

С другой стороны, вызванный теми же электронами, электрический ток в данном веществе определяется его удельной электропроводностью σ . В таком же стержне длиной L и поперечным сечением S при разности потенциалов ΔV между его концами за t секунд пройдет количество электричества q :

$$q = \sigma \frac{\Delta V}{L} S t.$$

Связь между теплопроводностью κ и электропроводностью σ для различных металлов была чисто эмпирически установлена Видеманом и Францем. А именно: опыт показал, что

$$\frac{\kappa}{\sigma} = A_m T,$$

где T — абсолютная температура и A_m — одинаковый для всех металлов множитель.

Квантовая теория полупроводника также приводит к соотношению $\frac{\kappa}{\sigma} = A_n T$, но коэффициент A_n имеет другое значение.

Такое соотношение между κ и σ делает принципиально невозможным осуществление обратимого термоэлемента. Для устранения теплопроводности нужно, чтобы $\kappa=0$; для устранения джоулевой теплоты нужно, чтобы удельное сопротивление

ветвей термоэлемента равнялось нулю, а обратная величина δ — бесконечности. Но требование, чтобы одновременно было $\kappa = 0$, $\sigma = \infty$ несовместимо с законом Видемана — Франца.

Перейдем к рассмотрению второго вида теплопроводности. Кроме переноса тепла электронами, теплопроводность в полупроводниках осуществляется и тепловым движением атомов кристаллической решетки. Механизм этого процесса можно представить себе следующим образом. Хаотическое тепловое движение атомов твердого тела можно рассматривать как совокупность самых разнообразных их колебаний. Сюда входят и колебания отдельных атомов одного по отношению к другому, и колебания их попарно, по три и т. д., вплоть до колебаний всего тела как целого. Чем выше температура, тем интенсивнее колебания.

Каждое из этих многочисленных колебаний распространяется в теле в виде упругих волн, перенося свою энергию.

Коэффициент теплопроводности κ полупроводника складывается, таким образом, из двух частей: из теплопроводности $\kappa_{эл}$, обязанной электронам, и теплопроводности κ_{ϕ} , создаваемой тепловым движением атомов тела. Величина $\kappa_{эл}$ пропорциональна удельной электропроводности σ .

Поэтому с изменением концентрации свободных электронов в полупроводнике коэффициент $\kappa_{эл}$ изменяется пропорционально σ , тогда как κ_{ϕ} остается почти неизменным. Общая теплопроводность κ может быть выражена как

$$\kappa = A_n T \sigma + \kappa_{\phi}.$$

Наши опыты действительно подтвердили такую зависимость κ от σ .

Коэффициенты теплопроводности κ_I и κ_{II} ветвей термоэлемента играют важную роль в определении его коэффициента полезного действия; наряду с этим существенное значение имеют термоэлектродвижущие силы α_I и α_{II} и удельные сопротивления ρ_I и ρ_{II} обеих ветвей. Как показывают вычисления, при данных температурах горячего T_1 и холодного T_0 концов коэффициент полезного действия термоэлемента определяется одной величиной z , зависящей от перечисленных характеристик материалов термоэлемента:

$$z = \frac{(\alpha_I + \alpha_{II})^2}{(\sqrt{\kappa_I \rho_I} + \sqrt{\kappa_{II} \rho_{II}})^2}.$$

Чем больше z , тем выше коэффициент полезного действия; при данном же значении z он всегда один и тот же, каковы бы ни были значения величин α , κ и ρ в отдельности. Расчет показывает также, что коэффициент полезного действия не зависит от размеров и формы ветвей термоэлемента, если они выбраны правильно, а зависит только от T_1 , T_0 и z . Коэффициент

полезного действия термоэлемента может быть выражен следующим образом:

$$\eta = \frac{T_1 - T_0}{T_1} \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2}(T_1 + T_0)z} - 1}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}(T_1 + T_0)z + \frac{T_0}{T_1}}}.$$

Для металлов z имеет значения порядка нескольких единиц, умноженных на 10^{-5} , для полупроводников 10^{-3} и выше, т. е. в несколько десятков раз больше. Соответственно с такими значениями z и коэффициент полезного действия полупроводниковых термоэлементов в десятки раз превосходит таковой металлических термоэлементов.

Из термоэлементов составляются термоэлектрические батареи. Если нужно получить значительные напряжения, приходится соединять последовательно большое число термоэлементов. Так, при термоэлектродвижущей силе $\alpha_I + \alpha_{II} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ в/град}$ и разности температур $T_1 - T_0 = 300^\circ$ электродвижущая сила одного элемента $E = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 300 = 0,12 \text{ в}$. Для того чтобы создать электродвижущую силу в 120 в, нужно включить последовательно 1 000 таких элементов. Если ставится требование получения сильных токов, элементы соединяются параллельно. Чем больше тепла Q поступает через каждый квадратный сантиметр горячего спая, тем меньше размеры термобатареи, выделяющей данное количество электроэнергии.

Эти соображения определяют выбор той или иной конструкции термобатареи. Коэффициент полезного действия термобатареи не зависит ни от способа соединения элементов, ни от ее формы.

Холодильники

Вскоре после открытия Зеебека Пельтье в 1834 году наблюдал явление, которое оказалось тесно связанным с термоэлектричеством (чего, впрочем, сам Пельтье не подозревал). Пельтье хотел доказать, что нагревание проводников слабыми токами не подчиняется общему для всех проводников закону Джоуля—Ленца и обнаруживает индивидуальные особенности в разных металлах. С этой целью он составил цепи из разных металлов. Хотя измерения теплоты, выделяемой в них током, не оправдали ожиданий Пельтье, но зато он подметил на границах двух разных металлов своеобразные тепловые эффекты, которые и описал. Петербургский академик Ленц в 1838 году изящным опытом показал, что на границе различных проводников электрический ток либо выделяет, либо поглощает определенное количество тепла. Поместив на стыке двух металлов каплю воды, Ленц заморозил ее пропусканием тока.

Теперь мы знаем, что количество теплоты Q , выделяемой или поглощаемой на границе двух проводников, пропорционально току I и абсолютной температуре T стыка проводников:

$$Q = AITt.$$

Коэффициент A совпадает с суммой термоэлектродвижущих сил $\alpha_I + \alpha_{II}$ ветвей термоэлемента. Знак величины Q (т. е. будет получаться или теряться теплота в стыке) зависит от знака I , т. е. от направления тока.

В рассмотренном нами ранее примере ток, возникающий в замкнутой цепи термоэлемента, охлаждает горячий спай и, наоборот, подогревает холодный спай, выделяя здесь теплоту. Если, пользуясь внешним источником, пропустить через термоэлемент ток обратного направления, то он будет выделять тепло в горячем спае и отнимать тепло от холодного. Один и тот же спай двух проводников при одном направлении тока нагревается, при другом — охлаждается.

Расчет показывает, что разность температур, которую можно таким образом создать, а также количество тепла, которое ток отнимает от охлаждаемого им спае и сообщает нагреваемому, определяется той же величиной z , что и коэффициент полезного действия термоэлемента.

Те же свойства материала обеих ветвей, определяемые величинами α , κ и ρ , характеризуют производство электроэнергии в термоэлектрическом генераторе и холодопроизводительность в холодильнике.

Поддерживая температуру нагреваемого спае близкой к комнатной и непрерывно отводя от него выделяемую здесь теплоту в окружающую среду, можно значительно охладить другой спай и через его посредство — окружающий воздух. Таким образом, с помощью полупроводников, характеризуемых достаточной величиной z , можно получить в холодильном шкафу необходимые низкие температуры. На этом принципе могут быть осуществлены домашние холодильники (рис. 14).

С другой стороны, явлением Пельтье можно воспользоваться и для подогрева, например для отопления зданий или для приготовления пищи. Подобные задачи давно решаются более простым способом — выделением джоулевой теплоты в реостате или нагревательной плитке. Количество выделяемой в этом случае тепловой энергии равно количеству затраченной электроэнергии.

Термоэлектрический же обогрев помещения существенно отличается от действия нагревательной плитки. Пропуская электрический ток через термоэлектрическую цепь, мы, помимо обычного нагрева всего проводника, охлаждаем один спай и нагреваем другой. От охлаждаемого спае отнимается некото-

рое количество тепловой энергии Q_0 , которое может быть выражено так:

$$Q_0 = \alpha T_c I t,$$

где α — термоэлектродвижущая сила, T_0 — абсолютная температура холодного спая, I — величина тока и t — длительность прохождения тока в секундах.

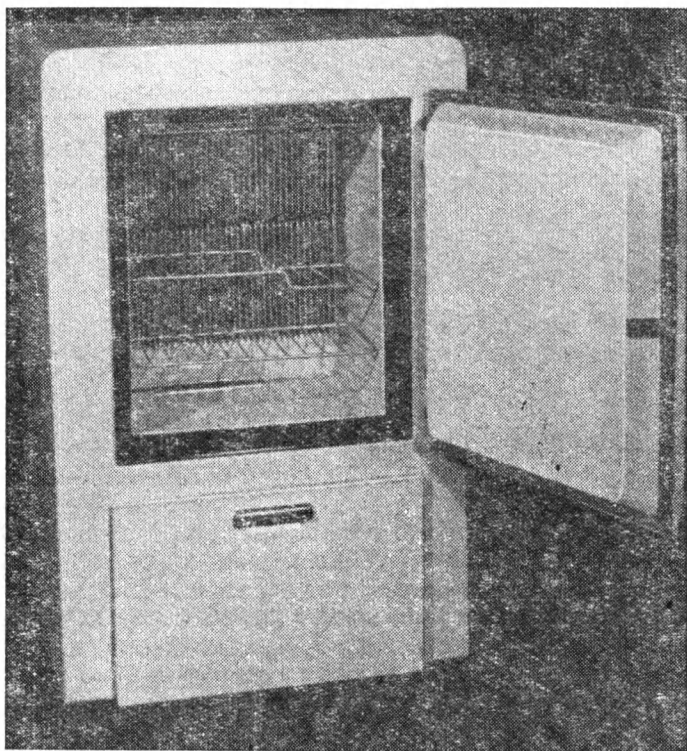


Рис. 14. Термоэлектрический холодильник.

Соответственно, в теплом спаяе, абсолютную температуру которого обозначим через T_1 , выделяется тепловая энергия Q_1 :

$$Q_1 = \alpha T_1 I t,$$

которая больше теплоты Q_0 в отношении

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{T_1}{T_0}.$$

Если мы ограничимся рассмотрением процессов на обоих спаях, то их можно описать следующим образом. Электрический ток отнимает от холодного спая теплоту Q_0 и передает

теплому спая большее количество тепла Q_1 , добавляя недостающую энергию $Q_1 - Q_0$ в виде электрической энергии W .

К теплоте Q_0 , отнимаемой от холодного спая, добавляется энергия W , и сумма их $Q_0 + W = Q_1$ выделяется на теплом спая.

Из приведенных данных о величинах Q_0 и Q_1 видно, что отношение затрачиваемой электроэнергии W к теплоте Q_1 , которая освобождается на теплом спая, равно

$$\frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_1}.$$

Если, например, абсолютная температура теплого спая $T_1 = 300^\circ$, что соответствует $+27^\circ\text{C}$, а температура $T_0 = 270^\circ$, или -3°C , то

$$\frac{W}{Q_1} = \frac{30}{300} = 0,1.$$

Другими словами, для того чтобы в теплое помещение при температуре 27° передать 100 калорий тепла, можно было бы использовать 90 калорий, взятых от холодной среды (например, от внешнего воздуха), и добавить всего 10 калорий за счет электроэнергии.

Поскольку отнятие 90 калорий от внешнего холодного воздуха или водного резервуара легко доступно, возникает заманчивая возможность, затрачивая всего 10 калорий электроэнергии, сообщить более теплому помещению 100 калорий тепла.

К сожалению, действительный процесс в термоэлектрической батарее не ограничивается выделением и поглощением тепла на спаях. Вдоль ветвей самой термобатареи возникает поток тепла от теплого спая к холодному, который противодействует переносу тепла в обратном направлении, сопровождающему прохождение тока. Кроме того, часть электрической энергии превращается в тепло в обеих ветвях термоэлемента.

В результате наличия этих двух процессов использование электроэнергии резко снижается: приходится добавлять не 10% электроэнергии, а около 60%. Но и такой результат представляет значительный интерес: затрата электроэнергии составляет только около половины теплоты, поступающей в помещение, остальная половина доставляется более холодным наружным воздухом или проточной водой при температурах, близких к нулю.

Чем меньше разность $T_1 - T_0$ по сравнению с T_1 , тем выгоднее окажется термоэлектрическая батарея по сравнению с электрической печью сопротивления.

Термоэлектрическая батарея обладает и другим важным преимуществом. Если изменить направление тока на противоположное, то на наружных спаях начнет выделяться теплота Q_0 , а нагревавшие помещение спая будут отнимать теплоту Q_1 , охлаждая помещение. В жаркое время года та же тер-

мобатарея может охлаждать воздух. Регулируя величину и направление тока в батарее, можно поддерживать в помещении одинаковую температуру при любых температурах внешнего воздуха.

Охлаждение, вызываемое термоэлектрической батареей, можно, как мы уже упоминали, использовать для осуществления холодильника. Теплые спаи отдают получаемую ими теплоту Q_1 в окружающий воздух или в водопроводную воду, холодные же спаи, находящиеся внутри шкафа, отнимают теплоту, поддерживая в нем желательную низкую температуру.

В современной технике имеются различные типы холодильных машин. Чем меньше в них необратимых процессов, тем такие машины выгоднее, тем ближе их коэффициент полезного действия к термодинамическому. Существуют сложные холодильные машины с большим коэффициентом полезного действия, чем термоэлектрические, но последние обладают преимуществом простоты и отсутствия движущихся механизмов. Размеры термоэлектрических батарей — как генераторов, так и холодильников — в зависимости от условий охлаждения могут быть изменены в десятки раз.

Полупроводниковые ферромагнетики (ферриты)

Особые магнитные свойства железа, кобальта и никеля, или ферромагнитных металлов, как их называют в соответствии с названием первого из этих элементов — железа (феррум), объясняются тем, что в них большие группы атомов (так называемые домены) обладают одинаковым направлением магнитного момента. В ферромагнитных материалах, помещенных в магнитное поле, в отличие от других металлов, в хаотическом тепловом движении участвуют не отдельные атомы, энергию которых даже сильное магнитное поле изменяет только на величину порядка 10^{-16} эрг, или 10^{-4} эв, а большие комплексы из миллионов атомов, энергия которых в магнитном поле, в зависимости от направления, увеличивается или уменьшается на целые электрон-вольты. В отсутствие магнитного поля моменты атомов или доменов разбрасываются тепловым движением по всевозможным направлениям.

Магнитное поле стремится повернуть магнитные моменты параллельно направлению поля; в то же время тепловое движение продолжает разбрасывать их по всем направлениям. Средняя энергия теплового движения при комнатной температуре составляет около 0,03 эв. Поэтому тепловое движение легко преодолевает направляющую силу магнитного поля, действующего в обычных, не ферромагнитных телах на отдельные атомы. Сохраняется только небольшое преобладание таких атомов, магнитные моменты которых направлены вдоль поля.

Добавочное намагничивание, создаваемое этими атомами, изменяет магнитное поле на миллионные доли.

В ферромагнитных металлах, наоборот, изменение энергии, создаваемое магнитным полем при повороте целого домена, больше энергии теплового движения; поэтому здесь преобладает направляющее влияние магнитного поля, и намагничивание ферромагнетика в сотни и тысячи раз усиливает магнитные действия внешнего поля. С повышением температуры роль теплового движения усиливается и направляющее действие магнитного поля становится все менее эффективным. Как показал П. Кюри, для каждого ферромагнетика существует такая критическая температура (точка Кюри), выше которой домены разрушаются и металл теряет свои ферромагнитные свойства. Для железа точка Кюри равна 780° , для никеля — 360° .

Ферромагнетиками, и в частности железом, широко пользуются в электротехнике для создания мощных магнитных воздействий. Из железа изготовляют сердечники трансформаторов переменного тока, корпуса и роторы электрических машин, электромагниты.

Недостатками ферромагнетиков при использовании их в цепях переменного тока являются энергетические потери, приводящие к их нагреву. Потери вызваны, во-первых, запаздыванием в повороте доменов (гистерезис) и, во-вторых, сильными индукционными токами при непрерывных изменениях магнитного поля, имеющих место в переменном режиме; эти потери тем ощутительнее, чем больше частота переменного тока и чем больше электропроводность материала.

Для ослабления индукционных токов (токов Фуко) железо применяют в виде тонких, изолированных друг от друга слоев или в виде порошка, распределенного в изолирующей массе. Но, тем не менее, токи Фуко ограничивают возможность применения железа при переменных токах большой частоты. При тех частотах, какие применяются в радиотехнике, использование железа становится уже бессмысленным — оно практически не изменяет намагничивания.

Поэтому большое значение должны были получить такие ферромагнетики, которые, обладая высоким удельным сопротивлением, создают в частопеременных полях только слабые индукционные токи и вносят небольшие энергетические потери.

Среди полупроводников за последние годы удалось найти значительную группу материалов, построенных по типу минерала шпинель и представляющих собой соединения окислов трехвалентного металла (например, трехвалентного железа или алюминия) и двухвалентного металла (например, цинка). Такие полупроводники оказались ферромагнетиками с весьма высокими магнитными свойствами и в то же время с большим удельным сопротивлением. Эти вещества получили название

ферритов; уже сейчас создано много разнообразных ферритов, качество которых постоянно улучшается. Ферриты позволяют получать высокие намагничивания при частотах до миллиона герц и больше (герц — это мера частоты, равная одному колебанию в секунду).

Наряду с ферромагнетиками, в которых магнитные моменты всех атомов, входящих в один домен, параллельны друг другу, существуют вещества, и в том числе полупроводники, где в каждом из доменов атомы и их электроны имеют попарно равные и противоположно направленные магнитные моменты. Такие вещества получили название антиферромагнетиков. Для них, так же как и для ферромагнетиков, существует определенная температура — точка Кюри, выше которой указанный порядок внутри домена нарушается и антиферромагнетик теряет свои особые свойства.

Но в то время как в ферромагнетиках переход через точку Кюри означает резкое снижение магнитных свойств, в антиферромагнетиках, в которых ниже точки Кюри магнитные моменты попарно компенсируют друг друга и суммарный магнитный момент всего тела близок к нулю, выше точки Кюри магнитные свойства улучшаются.

Ферриты открыли возможность концентрировать в небольших объемах значительную магнитную энергию не только в постоянном режиме и при небольшой частоте переменного тока, но и на высокой частоте, как, например, в высокочастотных трансформаторах с ферритовыми сердечниками, что сильно сокращает габариты многих радиотехнических приборов.

Растущее разнообразие ферромагнетиков, обладающих различными свойствами, дало в руки экспериментатора и инженера возможность широкого выбора материалов, наилучшим образом отвечающих предъявляемым к ним требованиям. Появление полупроводниковых ферритов означает большой шаг вперед в электротехнике и в особенности в радиотехнике.

Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики

В 30-х годах И. В. Курчатов и П. П. Кобеко всесторонне изучили в сегнетовой соли явление, которое в электрической области аналогично явлению ферромагнетизма в магнитной области. По главному представителю таких веществ они называли это явление сегнетоэлектричеством (его называют также ферроэлектричеством).

Подобно тому как в ферромагнетиках имеются области с одинаково направленными магнитными моментами, так и в сегнетоэлектриках целые области характеризуются одинаковым направлением электрического момента. Поэтому электрическое поле поворачивает всю такую область по направлению поля, преодолевая тепловое движение, стремящееся разбросать

электрические диполи по всевозможным направлениям. Направленные в одну и ту же сторону электрические поля таких областей сегнетоэлектрика, складываясь с внешним электрическим полем, в тысячи и десятки тысяч раз усиливают его. Во столько же раз возрастает и заряд конденсатора, когда воздушный зазор заполнен сегнетоэлектриком; во столько же раз ослабляется электрическое взаимодействие зарядов, находящихся в этом поле. Число, показывающее во сколько раз изменяются перечисленные действия электрического поля при заполнении его данным веществом, называется диэлектрической постоянной этого вещества.

В то время как диэлектрическая постоянная обычных изолирующих материалов измеряется несколькими единицами или немногими десятками, в сегнетоэлектрике она принимает значения порядка нескольких тысяч.

Чем ниже температура и чем сильнее электрическое поле, тем сильнее преобладает направляющее влияние поля над хаотическим тепловым движением. В достаточно сильных полях электрические диполи всех областей сегнетоэлектрика практически направлены по полю. Это создает наибольшую возможную электризацию сегнетоэлектрика. Аналогичное явление магнитного насыщения наблюдается и в ферромагнетиках.

Для сегнетоэлектриков, как и для ферромагнетиков, существует точка Кюри, выше которой объединение в домены нарушается тепловым движением и диэлектрическая постоянная приобретает обычную небольшую величину. Точка Кюри для сегнетовой соли оказалась равной 24°C .

И. В. Курчатов и П. П. Кобеко обнаружили в сегнетовой соли, в отличие от ферромагнетиков, и нижнюю точку Кюри, ниже которой домены закреплены так прочно, что не могут изменить направления своего электрического момента под влиянием внешнего электрического поля, и поэтому диэлектрическая постоянная невелика.

В сегнетовой соли наблюдаются и другие явления, свойственные ферромагнетикам, например гистерезис, т. е. отставание изменения электризации при изменении электрического поля. Когда поле вырастает, электризация оказывается меньше той, которая должна была бы соответствовать данному полю. При уменьшении поля электризация не убывает настолько, как следовало, а сохраняет повышенные значения. В частности, когда поле снижается до нуля, электризация сохраняется, это остаточная электризация, аналогичная остаточному магнетизму ферромагнетика, благодаря которому мы имеем постоянные магниты.

Сегнетовую соль приходится выращивать в виде монокристаллов, которые, однако, весьма гигроскопичны и при 24°C уже теряют свои исключительные свойства. Поэтому большим успе-

хом было открытие Б. М. Вулом аналогичных свойств у титаната бария (TiO_3Ba).

Титанат бария — прочная керамическая масса, легко доступная и легко изготавливаемая прессованием и обжигом в любой форме; его точка Кюри лежит выше 100°C . В связи с дешевой исходных продуктов и высокими диэлектрическими свойствами титаната бария открытие Б. М. Вула получило большое значение для промышленности, изготавливающей конденсаторы, в особенности радиотехнические.

Конденсаторы из титаната бария и сходных с ним материалов концентрируют в небольшом объеме значительные количества электрической энергии, подобно тому как ферриты концентрируют магнитную энергию.

Г. А. Смоленский еще дальше расширил круг известных сегнетоэлектриков и ферритов.

Таким образом, в дополнение к металлическим ферромагнетикам и диэлектрикам из органических изоляторов и слюды, электро- и радиопромышленность получают обширный и быстро растущий ассортимент полупроводников, которые дают возможность лучше решать технические задачи, в том числе и такие, которые были неразрешимы в рамках использования известных ранее материалов. К такой задаче относится, например, изготовление сердечников для радиотрансформаторов или нелинейных конденсаторов. С введением сегнетоэлектриков и ферритов габариты значительного числа устройств, особенно радиотехнических, сократились во много раз.

Сегнетовая соль, помимо высоких диэлектрических показателей, проявляет сильно выраженные пьезоэлектрические свойства. Явление это, свойственное и некоторым другим кристаллам, как, например, кварцу, заключается в электризации их под влиянием упругой деформации. При сжатии или растяжении кристалла на его противоположащих гранях появляются заряды противоположных знаков.

Пьезоэлектрические свойства этих кристаллов объясняются присутствием в их составе электрических диполей, расположенных в определенных кристаллографических направлениях. При сжатии кристалла диполи сближаются и их суммарный электрический момент изменяется, что и приводит к появлению зарядов на поверхности кристалла или прилегающего к ней электрода. При растяжении заряды обкладок меняют знак на противоположный.

Когда к обкладкам пьезоэлектрика прикладывается разность потенциалов, то электрическое поле, сближая или раздвигая диполи, вызывает сжатие или растяжение кристалла, причем сжатие создается такой разностью потенциалов, которая появлялась при растяжении, а растяжение вызывается таким электрическим полем, которое появлялось при сжатии кристалла.

Сжатие или растяжение кристалла сообщает ему упругую энергию; часть этой энергии переходит в пьезоэлектрике в энергию электрического поля. Наоборот, электрическое поле вызывает соответственную упругую деформацию.

Таким образом, в пьезоэлектрике происходит превращение упругой энергии в электрическую и электрической в упругую. Коэффициент полезного действия каждого из этих процессов близок к 100%, поскольку в них почти отсутствуют необратимые явления.

Если к пьезоэлектрику приложить частопеременное электрическое поле и подобрать его частоту так, чтобы она совпадала с частотой собственных колебаний кристалла или одного из его обертонов (например, колебаний половинок, третей или четвертей кристалла), то кристалл придет в интенсивные колебания с этой резонансной частотой. Переменная разность потенциалов вызовет периодическое сжатие и растяжение, которые в свою очередь создадут соответственные заряды и переменную разность потенциалов. Таким образом в кристалле развиваются незатухающие колебания.

Частоты таких колебаний могут быть весьма велики. Действительно, резонанс наступает тогда, когда звуковая волна, отражаясь от обеих внешних поверхностей, превращается в стоячую волну с узлами на концах, т. е. когда толщина кристалла равна половине длины волны. Длина же волны λ выражается как частное от деления скорости звука v (пути, проходимого звуковыми колебаниями за секунду) на частоту ν (т. е. на число волн, выходящих из источника за секунду):

$$\lambda = \frac{v}{\nu}; \nu = \frac{v}{\lambda}.$$

Скорость звука v — величина порядка $3 \cdot 10^5$ см/сек; если $\lambda = 1$ см, то $\nu = 3 \cdot 10^5$ сек⁻¹. Упругие колебания с подобной частотой уже не воспринимаются ухом и представляют собой ультразвук.

Пьезоэлектрики служат, таким образом, источниками ультразвуковых волн. В море с их помощью определяется расстояние до дна, до береговых скал, местоположение айсбергов, подводных лодок, косяков рыб и т. п. Источником энергии для ультразвука являются высокочастотные токи, электрическая энергия которых преобразуется в пьезоэлектрике в упругую энергию, а затем в акустическую энергию ультразвука в окружающей среде.

Те же пьезоэлектрики служат и приемниками ультразвука, который приводит кристалл в упругие колебания; упругие деформации кристалла превращаются в электрические колебания, воспринимаемые приборами.

А. В. Ржанов и Б. М. Вул исследовали пьезоэлектрические свойства керамики из титаната бария, предварительно наэлек-

тризованной электрическим полем. Б. М. Вул разработал на основе титаната бария высококачественные пьезоэлектрики, превосходящие во многих отношениях как кварцевые кристаллы, так и сегнетовую соль.

Применение пьезоэлектриков в акустических дефектоскопах, звукооснимателях, громкоговорителях, радиовещании значительно улучшает качество и силу звучания.

Выпрямители переменного тока и усилители радиоколесаний (транзисторы)

В широкую радиотехническую практику в виде твердых выпрямителей переменного тока полупроводники вошли в конце 20-х годов, сначала на основе закиси меди, затем селена и сернистой меди, а еще позже — кремния и германия.

Первые купроксные выпрямители изготовлялись из медных пластин, на которых при температурах около 1060°C наращивался слой закиси меди (Cu_2O), затем при 600°C этот слой насыщался добавочным кислородом и быстро охлаждался. Верхний слой окиси меди (CuO), который появлялся на такой пластинке, удалялся растворением в кислоте, а на обнажившуюся закись наносилась металлическая медь.

В изготовленной указанным образом пластинке на границе исходной меди с закисью меди появляется тонкий слой, сопротивление которого для тока, направленного от закиси меди к меди, в тысячи раз меньше, чем в обратном направлении. Слой этот называют запорным, направление тока от закиси меди к меди — пропускным, а обратное — запорным.

Попробуем понять: 1) почему запорный слой, несмотря на малую свою толщину (доли микрона), сосредоточивает в себе главную часть сопротивления? — если бы это было не так, то остальная часть слоя закиси с сопротивлением, не зависящим от направления тока, смазала бы эффект запорного слоя, 2) почему сопротивление запорного слоя различно в зависимости от направления и почему эта зависимость именно такая?

Правильный ответ на первый вопрос дали советские физики Б. И. Давыдов и Д. И. Блохинцев, а вслед за ними немецкий физик Шоттки и английский — Мотт.

Закись меди принадлежит к числу полупроводников с «дырочной» проводимостью: часть электронов из заполненной зоны переходит на имеющиеся в закиси избыточные атомы кислорода, освобождая в этой зоне тем большее число «дырок», чем больше избыток кислорода в закиси и чем выше ее температура.

Такие же «дырки» имеются и в меди, прилегающей к закиси, но связь их со средой различна: «дырки» сильнее удерживаются медью, чем закисью. Поэтому они переходят из закиси в медь, заряжая ее положительно и оставляя в закиси слой с

пониженным содержанием «дырок», заряженный отрицательным зарядом. Переход зарядов продолжается до тех пор, пока отталкивание «дырок» положительным зарядом металла не уравнивает стремления «дырок» уменьшить свою энергию переходом в медь. В закиси меди, вблизи ее границы с медью, образуется слой с пониженной концентрацией «дырок», а следовательно, и с пониженной электропроводностью (рис. 15). В этом слое недостаток «дырок» создает отрицательный заряд, равный по величине и обратный по знаку положительному заряду меди.

Из этого объяснения вытекает, что на границе той же окиси меди с металлом, связывающим «дырки» слабее, чем закись, «дырки» должны стремиться из металла в закись и создавать здесь положительно заряженный слой с избыточной концентрацией «дырок» и с повышенной электропроводностью, а на поверхности меди — отрицательный заряд, притягивающий «дырки» закиси к границе. В. Е. Лашкарев назвал такой слой антизапорным.

Если бы мы имели дело не с «дырочным» полупроводником, а с электронным, например с двуокисью титана, то аналогичное рассуждение следовало бы применить к переходу свободных электронов. Мы пришли бы

к выводу, что на границе с таким металлом, который удерживает свободные электроны прочнее, чем полупроводник, образуется обедненный электронами слой с пониженной электропроводностью, тогда как на границе с металлом, слабее притягивающим свои электроны, образуется антизапорный слой с повышенной проводимостью.

Все эти заключения были полностью подтверждены на большом числе различных полупроводников и металлов А. В. Иоффе, причем о силе связи электронов и «дырок» со средой она судила по той работе, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон из состава данного тела.

Если привести в соприкосновение два тела, то электроны до тех пор будут переходить из одного в другое, пока не зарядят их настолько, что прекратится дальнейший переход. При этом между двумя телами установится разность потенциалов, кото-

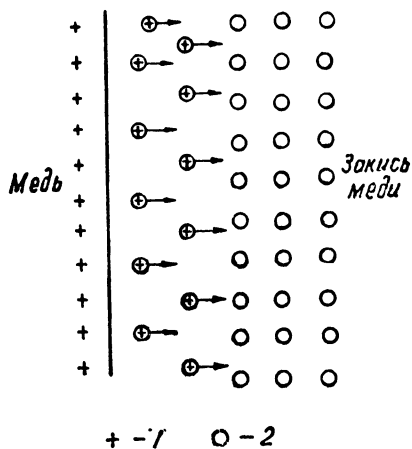


Рис. 15. Граница металлической меди с закисью меди:

1 — положительные заряды; 2 — «дырки».

*Электронный
полупроводник*

*„Дырочный“
полупроводник*

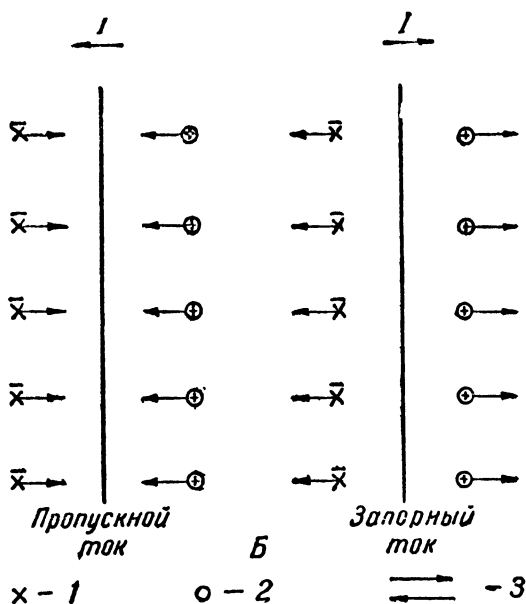
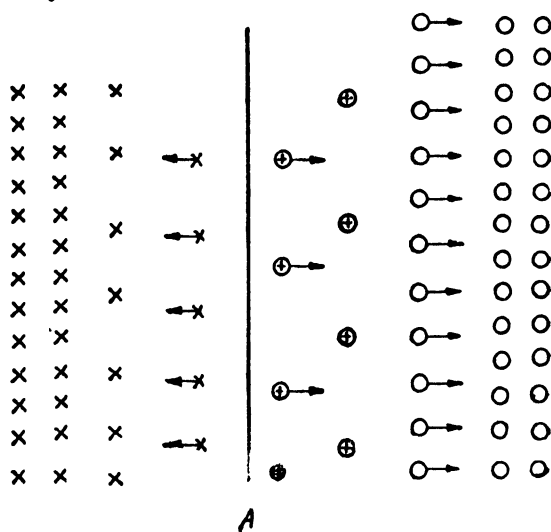


Рис. 16. Схема, поясняющая возникновение пропускного и запорного токов:

А — граница двух полупроводников, «дырочного» и электронного; Б — пропускной и запорный токи; 1 — электроны; 2 — «дырки»; 3 — скорости.

рую называют разностью контактных потенциалов. Измерив разности контактных потенциалов ряда металлов и полупроводников, А. В. Иоффе подтвердила правильность теории Б. И. Давыдова.

Б. И. Давыдов, Шоттки и Мотт показали также, что запорный слой обладает различным сопротивлением в зависимости от направления тока: когда внешнее электрическое поле действует в ту же сторону, что и поле, создаваемое зарядом на поверхности металла, сопротивление еще больше возрастает; когда же внешнее поле противодействует заряду металла, сопротивление слоя убывает, это — пропускное направление тока.

Хотя опыты А. В. Иоффе подтверждали и этот вывод Б. И. Давыдова, однако наблюдавшееся ею соотношение между противоположными токами никогда не достигало значений, наблюдаемых в технических выпрямителях. Превышение пропускного тока над запорным не превосходило нескольких десятков процентов и лишь редко достигало двух- трехкратного значения, тогда как в твердых выпрямителях отношение между токами измерялось тысячами. С другой стороны, А. В. Иоффе получила выпрямление порядка 10 000 и более на границе «дырочного» и электронного полупроводников, например закиси меди (Cu_2O) и двуокиси титана (TiO_2). Естественно было предположить, что и в технических выпрямителях имеется такая граница. При данном направлении тока «дырки» в одном полупроводнике и электроны в другом движутся навстречу друг другу и создают пропускной ток, при противоположном направлении тока они расходятся, увеличивая сопротивление непроводящего запорного слоя (рис. 16).

В купроксных выпрямителях закись меди с обеих сторон граничит с медью, и, казалось бы, при любом направлении тока та или другая граница окажется включенной в запорном направлении, т. е. так, что положительные «дырки» идут из металла в полупроводник. Но у одного из медных электродов имеется слой закиси, образованный окислением меди, т. е. слой закиси с избытком меди и других примесных металлов, легко отдающих свои электроны; с другой стороны медь граничит с закисью, насыщенной при 600°C с избытком кислорода, образующего «дырки». Можно думать, что на первой границе избыток меди в закиси создал слой с электронной проводимостью и что «дырочная» закись граничит, таким образом, не с медью, а с электронной закисью меди. Это и создает здесь сильное выпрямление. Со второй же стороны имеется граница с медью, не дающая заметного выпрямления.

Действительно, В. Е. Лашкареву удалось непосредственно наблюдать на первой границе тонкий слой закиси меди с электронной проводимостью.

Правильную теорию выпрямления на границе двух полупроводников с разным знаком носителей тока развил на этой

основе Б. И. Давыдов и позже подробно разработал А. И. Губанов.

Другим, в настоящее время наиболее распространенным типом твердых выпрямителей являются селеновые выпрямители. Они состоят из нанесенного на железную никелированную пластинку слоя селена, на который в свою очередь наносится слой из сплава кадмия, олова и висмута. После длительного прогрева и пропускания тока образуется выпрямитель.

Селен, как и закись меди, обладает «дырочным» механизмом проводимости. Выпрямление происходит здесь не на границе селена с металлом, а на границе с образующимся в ходе обработки селенистым кадмием, обладающим электронным механизмом тока.

Зависимость тока I , проходящего через выпрямитель, от

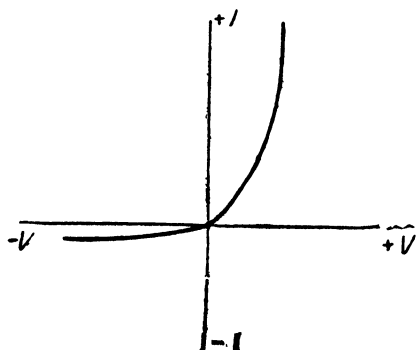


Рис. 17. Зависимость тока, проходящего через выпрямитель, от приложенной разности потенциалов:

$+I$ — пропускной ток; $-I$ — запиорный ток.

приложенной к нему разности потенциалов V изображена на рис. 17. Можно видеть, что пропускной ток быстро растет с увеличением напряжения, тогда как запиорный мал и почти не растет.

За послевоенные годы большое практическое значение получили выпрямители из германия и кремния. Здесь введением соответственных примесей также создается граница «дырочного» и электронного полупроводника или, как принято ее называть, p — n -граница, но с той разницей, что в выпрямителях из германия и кремния

переход от p -слоя к n -слою происходит не на границе двух разных полупроводников, а внутри одного монокристалла.

В некоторых полупроводниках, как, например, в кремнии, германии, сернистом свинце и др., введение одних примесей создает электронную проводимость, присутствие других — «дырочную». Если исходный материал тщательно очищен от посторонних веществ, достаточно бывает ничтожного числа примесных атомов, составляющего тысячные или даже миллионные доли процента, чтобы изменить характер проводимости. На поверхности электронного германия в результате ее обработки или диффузии из электрода удается создать тонкий слой «дырочного» германия и, таким образом, осуществить условия, необходимые для выпрямления.

Радиолюбители еще на начальной стадии развития радиотехники пользовались кристаллическими детекторами радио-

волн, а О. В. Лосеву еще в 20-х годах удалось даже осуществить генератор радиок колебаний. На поверхности полупроводящего кристалла радиолюбителям удавалось находить чувствительные участки. Металлическое острие, прижатое к такому участку, обладало выпрямляющими свойствами: высокочастотные переменные токи, вызываемые радиоволнами, встречая большое (запорное) сопротивление при одном направлении тока, проходили с малым сопротивлением в другом направлении. Получавшиеся при этом токи одного направления легко было обнаружить на слух телефоном.

Чувствительными участками были, вероятно, такие, где граничил «дырочный» слой с электронным, а острие обеспечивало

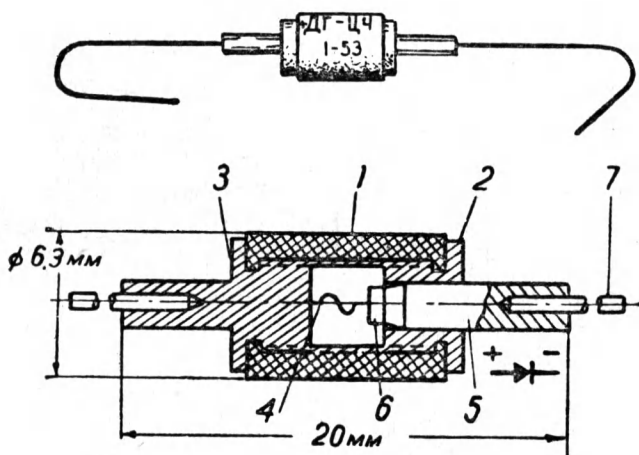


Рис. 18. Внешний вид и разрез германиевого полупроводникового выпрямителя тока высокой частоты (диода):

1 — керамический патрон; 2 и 3 — нижний и верхний штырьки детектора; 4 — контактная пружина; 5 — кристаллодержатель; 6 — германиевая пластинка; 7 — проволочные выводы.

хорошее выпрямление, так как основная часть сопротивления кристалла приходилась на окружающий острие тонкий пограничный слой, в котором и сосредоточено было выпрямление. Дополнительное сопротивление остальной части кристалла, не зависящее от направления, из-за своей малости не играло при этом заметной роли.

Детекторы радиолюбителей давали, однако, неустойчивые показатели, а нахождение чувствительных точек было делом удачи. В отличие от таких детекторов, введенные в ходе второй мировой войны в США германиевые и кремниевые детекторы обладают устойчивостью; переход от электронного слоя к «дырочному» создается сознательно, а металлический электрод прочно приваривается к полупроводнику. Ничтожная емкость

таких точечных детекторов и их малые размеры позволили использовать их в радиолокации для самых коротких сантиметровых волн.

Вскоре удалось применить германиевые (рис. 18) и кремниевые приборы не только для выпрямления, но и для усиления радиоколебаний. Поместив на поверхности германия, снабженного одним общим электродом — основанием (рис. 19), два близко расположенных острия, из которых одно включено в пропускном, а другое — в заперном направлении, можно, оказалось, переводить в заперный слой (почти лишенный свободных зарядов и поэтому непроводящий) носители тока из обогащенного зарядами соседнего участка, включенного в пропускном направлении. Заряды могут переходить от одного острия к другому, если они не будут встречать препятствий на этом пути и если длина их свободного пробега превысит расстояние между остриями, составляющее около 0,1 мм. Оказалось, что это

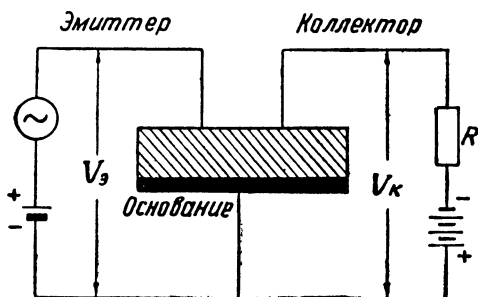


Рис. 19. Схема включения полупроводникового усилителя (триода).

только в таких монокристаллах германия, в которых концентрация случайных примесей не превышает 10^{-6} %. В этом случае заряды могут переходить в обедненный заперный слой. Особенно большой эффект дает внесение «дырок» в электронный слой, и наоборот.

Токи, усиливаемые или выпрямляемые точечными электродами, невелики.

Более мощные усилители и выпрямители изготавливаются не с точечными электродами, а с большими поверхностями, разделяющими электронную и «дырочную» части полупроводника. Для этого изготавливают монокристалл германия, в котором либо тонкая «дырочная» прослойка заключена между двумя слоями электронного полупроводника, либо наоборот — электронный слой заключен между двумя «дырочными». Сквозь тонкую прослойку свободные заряды проникают из лучше проводящего слоя, находящегося по одну сторону, в хуже проводящий слой — по другую сторону прослойки. Создание в монокристалле переходов и прослоек осуществляется, например, введением соответственных примесей в ходе кристаллизации, путем диффузии или электролиза. Такие плоскостные усилители, обладающие значительно большей емкостью, чем точечные, непригодны для сантиметровых волн, но в диапазоне длинных

волн и звуковых частот они имеют ряд преимуществ перед радиолампами.

Полупроводниковые радиоприборы (диоды и триоды) обладают рядом преимуществ по сравнению с радиолампами: большая длительность службы, простота изготовления и связанная с этим массовость производства, высокая устойчивость к сотрясениям, небольшие размеры, измеряемые всего несколькими миллиметрами. В то время как радиолампы требуют предварительного накала вольфрамового волоска, который только тогда и начинает испускать электроны, полупроводниковые приборы вступают в действие непосредственно, как только на них попадают радиоволны; в связи с этим количество потребляемой ими электроэнергии во много раз меньше, чем радиолампами. Полупроводниковые приборы не требуют постоянного наблюдения и квалифицированного ухода.

Если вспомнить, что ферриты и сегнетоэлектрики в несколько раз снижают размеры радиодеталей — конденсаторов и трансформаторов, то легко представить себе, как сокращаются размеры радиотехнических устройств. Многоламповый радиоприемник заменяется небольшим футляром размером в две-три спичечные коробки. Этот футляр вмещает не только систему детекторов и усилителей с необходимыми радиодетальями, но и сухие батареи, обеспечивающие электропитание в течение года, приемную антенну и громкоговоритель. В американской печати сообщалось даже о радиоприемниках в футляре наручных часов. Ничтожные размеры полупроводниковых приемников позволяют размещать их в головке летящего снаряда и по радио управлять его движением.

За послевоенные годы получили большое развитие счетно-решающие устройства, позволяющие за несколько минут или даже секунд получить правильный ответ на задачи такой сложности, которые потребовали бы многомесячной работы большого коллектива вычислителей. Благодаря таким устройствам стали доступными расчеты явлений, определяемых тысячами факторов, как, например, прогноз погоды или автоматический перевод с одного языка на другой.

Электронно-счетное устройство включает многие тысячи вакуумных ламп и занимает помещение целого дома. Замена вакуумных ламп полупроводниковыми радиоприборами создает большие преимущества: дом заменяется шкафом, а для целей транспорта даже небольшим ящиком; уверенность в получении правильного результата возрастает. Средняя длительность службы вакуумных ламп не превышает нескольких тысяч часов, поэтому всегда имеется опасность, что в ходе действия машины хотя бы одна из десятка тысяч ламп выйдет из строя, что сделает негодным результат вычисления. Полупроводниковые приборы гораздо долговечнее вакуумных ламп, и вероятность выхода из строя какого-либо прибора весьма мала.

Для выпрямления обычного переменного тока выпрямители из германия с искусственно созданным $p-n$ -переходами (от «дырочной» к электронной проводимости) дают громадные преимущества. В то время как в купроксных выпрямителях мощность постоянного тока не превышает 70—75% затрачиваемой мощности переменного тока, а в селеновых — коэффициент полезного действия порядка 80%, в германиевых выпрямителях он превышает 95%, а плотности токов во много раз больше плотностей токов, допустимых в селеновых и купроксных выпрямителях.

Полупроводниковые приборы, насчитывающие всего несколько лет своего существования, успели уже широко войти в технику. Они быстро совершенствуются, растет область их применения, а в некоторых случаях они заменили существовавшие раньше приборы. Их введение в радиопромышленность знаменует новый этап прогресса радиотехники, не менее значительный, чем появление электронных вакуумных ламп в конце первого десятилетия нашего века.

Фотоэлементы

Полупроводниковые фотосопротивления обнаруживают и измеряют лучистую энергию по изменению величины тока, создаваемого внешней электродвижущей силой. С конца 20-х годов нашего столетия появились фотоэлементы, которые создают электрический ток без внешних источников энергии, за счет энергии самого света. Это стало возможным благодаря использованию запиорных слоев, образующихся, как мы видели, в полупроводнике на границе с соответственным электродом. Можно нанести на поверхность полупроводника такой тонкий слой металла, например золота, что свет будет проникать сквозь него в полупроводник; передавая свою энергию электронам, свет освобождает их и создает условия для их перехода сквозь запиорный слой в металлический электрод. Когда фотоэлемент освещен между электродом и полупроводником, отделенным от него непроводящим запиорным слоем, поток электронов создает разность потенциалов, которая выделяет в замкнутой цепи электроэнергию. Очевидно, что частота света должна в этом случае превышать минимальную частоту, необходимую для перевода электрона в свободное состояние внутри полупроводника.

Первые фотоэлементы изготовлялись из закиси меди, затем из селена. Селеновые фотоэлементы (рис. 20) и по настоящее время находят применение, так как их спектральная чувствительность близка к чувствительности человеческого глаза, и поэтому они могут характеризовать освещенность, воспринимаемую глазом.

В медно-закисных фотоэлементах, как и в выпрямителях,

запорный слой находится на границе меди с закисью. Если внешний электрод в купроксном фотоэлементе сделан прозрачным, но не создающим запорного слоя, то фотоэлемент будет регистрировать только свет, прошедший сквозь прозрачный электрод и сквозь всю толщину слоя закиси. Таков только красный свет; свет более высокой частоты и меньшей длины волны целиком поглощается. Но купроксные фотоэлементы, в которых под внешним прозрачным электродом искусственно создан запорный слой, чувствительны и к желтой и к зеленой частям спектра.

Электродвижущие силы, возникающие при сильном освещении таких фотоэлементов, приближаются к 1 в, а ток составляет несколько сот микроампер на каждый люмен света (люменом называется такое количество света, которое падает на 1 м^2 на расстоянии в 1 м от источника силой света в 1 свечу).

Советские физики Ю. П. Маслаковец и Б. Т. Коломиец создали гораздо более чувствительный фотоэлемент из сернистого таллия (чувствительность его до 10 000 микроампер на люмен), а сотрудник Института физики Академии наук Украинской ССР Д. С. Гейхман разработала аналогичный фотоэлемент из сернистого серебра, который был затем усовершенствован В. Е. Лашкаревым.

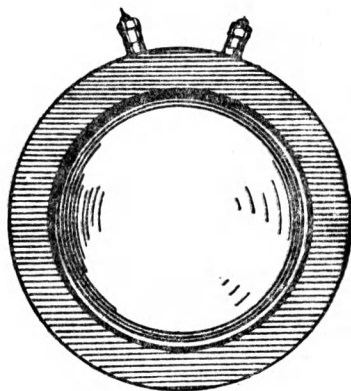


Рис. 20. Селеновый фотоэлемент

Фотоэлементы можно рассматривать как приборы, преобразующие световую энергию в электрическую. Однако коэффициент полезного действия их невелик. Отношение электроэнергии, создаваемой в фотоэлементе из закиси меди или селена, к падающей на него световой энергии не превышает нескольких сотых долей процента. В фотоэлементах из сернистого таллия или сернистого серебра это отношение достигает 1%.

В последнее время появились фотоэлементы с $p-n$ -переходом на основе кремния и германия со значительно более высоким коэффициентом полезного действия, порядка 10%. На границе между p - и n -слоями полупроводника устанавливается разность потенциалов, препятствующая как непрерывному потоку «дырок» из p -слоя в n -слой, так и переходу электронов из n -слоя. Эта разность потенциалов обеспечивает равновесие в полупроводнике.

Под влиянием поглощенного света часть электронов в p -слое и в n -слое переходит в возбужденное свободное состояние, а освобожденные места создают «дырочную» проводимость.

мость. Таким образом, в «дырочном» слое наряду с несколько повышенным содержанием «дырок» появляются свободные электроны, а в электронном слое, кроме небольшого увеличения концентрации свободных электронов, появляются и «дырки».

Электрическое поле на $p-n$ -границе, которое препятствует уходу «дырок» из p -слоя и электронов из n -слоя способствует, наоборот, переходу фотоэлектронов из p -слоя и «дырок» из n -слоя. Эти заряды противоположного знака по отношению к тем, которые существовали до освещения, или, как их часто называют, неосновные носители тока, ускоряемые электрическим полем, свободно проходят сквозь переходный $p-n$ -слой и создают ток. Мощность,

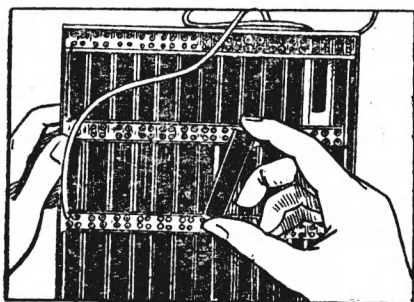


Рис. 21. Внешний вид «солнечной» батареи, составленной из отдельных фотоэлементов.

освобождаемая этим током, определяется произведением существующей между p - и n -слоем разности потенциалов на сумму зарядов, проходящих за секунду через $p-n$ -слой.

Усовершенствование технологии изготовления этих фотоэлементов может сделать их настолько дешевыми, что удастся с выгодой превращать энергию солнечного света в электроэнергию. Внешний вид такой «солнечной» батареи изображен на

рис. 21. Вспомним, что коэффициент использования света растениями, превращающими часть солнечной энергии в энергию топлива, не достигает и 1%. Впрочем, близкий к 10% коэффициент полезного действия могут дать и термоэлементы, технология которых пока проще кремниевых фотоэлементов. Конечно, для термоэлементов необходимо солнечные лучи концентрировать зеркалами. Можно думать, что фотохимическое использование солнечной энергии, которое при удачном решении вопроса может обладать коэффициентом полезного действия, приближающимся к 100%, окажется выгоднее применения фотоэлементов.

Несомненно, однако, что для целей автоматики, сигнализации, телеуправления, а может быть, и звукового кино, полупроводниковые фотоэлементы представляют большие преимущества, не требуя постороннего источника тока.

Источником, повышающим концентрацию электронов и «дырок» вблизи $p-n$ -перехода, может быть не только свет, но и лучи радиоактивных веществ, нанесенных на поверхность полупроводника. Электрическая энергия получается тогда за

счет ядерной энергии. Коэффициент полезного действия таких радиоэлементов с $p-n$ -переходами, как и к. п. д. фотоэлементов, может превышать 10%, а длительность их работы достигает нескольких лет.

История и перспективы учения о полупроводниках

Учение о свойствах полупроводников развивалось в тесной связи с их техническими применениями. По мере появления все новых и новых применений развивалась теория и изучались новые виды материалов.

Фотоэлектрические свойства селена были известны еще в конце XIX столетия. В начале XX столетия была осуществлена система передачи изображений по проводам на основе селеновых фотосопротивлений. Сотни научных исследований были посвящены селену, а с того времени, как появились селеновые фотоэлементы с запорным слоем и возникла промышленность селеновых выпрямителей, число посвященных селену работ превысило тысячу. И все же механизм проводимости и фотопроводимости селена все еще не выяснен.

В 20-х годах разработаны были первые твердые выпрямители переменного тока, а вслед за ними и фотоэлементы из закиси меди. С тех пор закись меди в течение многих лет была основным материалом, на котором изучалось и проверялось учение о полупроводниках. Можно насчитать сотни работ, посвященных исследованию свойств закиси меди. Эти исследования способствовали разработке технологии и улучшению качества выпрямителей, они выяснили механизм выпрямления и ряда других явлений, возникающих на контакте полупроводника с различными электродами. Возникли теории выпрямления Б. И. Давыдова, Д. И. Блохинцева, С. И. Пекара, А. И. Губанова, появились опыты А. В. Иоффе по изучению границы полупроводника с металлом и границы «дырочного» и электронного полупроводников. В период 1941—1945 годов в США в связи с потребностями радиолокации были разработаны выпрямители и усилители высокочастотных токов на основе кремния и германия, где использованы свойства границы «дырочного» p -и электронного n -кремния или германия.

С тех пор главным объектом научного исследования сделался германий. За последние 10 лет опубликованы уже обширные исследования, выяснившие механизм $p-n$ -перехода, открывшие большое число новых фактов и углубившие теорию полупроводников и общую теорию твердого тела. Можно сказать, что именно свойства германия в настоящее время наиболее полно освещены и лучше всего поняты.

От изучения германия интерес исследователей направляется уже к изучению других аналогичных германию полупроводников; исследованы алмаз, графит, кремний, серая модификация олова, кристаллическая решетка которой подобна

решетке германия; изучаются соединения из соседних элементов — алюминия, галлия, индия, фосфора, мышьяка и сурьмы с аналогичной решеткой, в надежде найти заменитель германия и еще далее развить радиотехнические применения полупроводников.

Использование фотоэлектрических свойств полупроводников направило интерес исследователей на материалы с особенно высокими фотоэлектрическими показателями.

В качестве чувствительных фотосопровителений стали применять сернистый таллий, а в последнее время — сернистый кадмий, затем появились и фотоэлементы с запорным слоем из сернистого таллия и сернистого серебра. Еще большее значение должны приобрести приборы, где p — n -переходы в кремнии, германии и других аналогичных материалах используются для получения электроэнергии за счет энергии света или радиоактивных излучений. К возможности изготовления таких приборов привело тщательное изучение этих материалов, применяемых в качестве детекторов и усилителей в радиотехнике.

Потребность в чувствительных приборах для обнаружения инфракрасного излучения привела к ряду исследований сернистых, селенистых и теллуристых соединений свинца, висмута, олова. На базе фотоэлектричества развилось учение об оптических свойствах полупроводников, появились теория экситонов (возбужденных состояний кристалла) Я. И. Френкеля и исследования Е. Ф. Гросса.

Задачи, связанные с использованием люминофоров, создали особую отрасль знания со своей технологией и терминологией и с обширным набором флуоресцирующих и фосфоресцирующих материалов как неорганических (сернистый цинк), так и органических. Развитию учения о люминесценции мы обязаны школе С. И. Вавилова.

Для тепловых сопротивлений используют преимущественно окиси меди, урана, титана и др. В тесной связи с этим выросло учение о подвижности электронов и «дырок», о температурной зависимости электропроводности, об отжиге и закалке полупроводниковых соединений.

Подробно изучена окись алюминия благодаря ее применению в радиотехнике для электролитических конденсаторов.

Применение окисных катодов в вакуумной технике привело к исследованию свойств ряда окислов при температурах, превышающих 1000°C , и к изучению диффузии в твердых телах при высоких температурах.

Связь научного исследования с производством носит ясно выраженный двусторонний характер. Сплошь и рядом новое производство создается на основе научного открытия нового свойства полупроводников. С другой стороны, постановка производства не только стимулирует научное исследование техно-

логического процесса, но и ставит новые задачи, разрешение которых двигает вперед учение о полупроводниках. Вряд ли можно назвать другую область знания, в которой за последние 25 лет так тесно переплетались и взаимно обогащались бы теория и практика, как учение о полупроводниках. В развитии этой области знаний большую роль сыграли советские физики и инженеры.

Перечисленные нами применения полупроводников далеко не исчерпывают их роли в народном хозяйстве. Достаточно вспомнить, например, что большинство катализаторов химических реакций — полупроводники и что изучение механизма и эффективности катализаторов теснейшим образом связано с изучением особенностей полупроводников.

За последние годы полупроводники заняли центральное место в учении о твердом теле. Изучение электрических, тепловых, оптических свойств изоляторов и металлов также развивается на основе опыта изучения полупроводников. Металлы и диэлектрики представляются как предельные случаи полупроводников, и понимание их свойств углубляется, по мере того как растет понимание центрального объекта исследования — полупроводников.

Первоначальная теория полупроводников была целиком заимствована из ранее (с 1928 г.) оформившейся квантовой теории металлов, предложенной в одной ее форме Я. И. Френкелем, в другой, одновременно, Зоммерфельдом. Однако впоследствии металлы и полупроводники переменялись ролями — источником новых идей в физике твердого тела сделалось изучение полупроводников.

На всем протяжении истории развития учения о полупроводниках квантовая теория являлась надежной путеводной нитью, позволявшей разобраться в физической природе изучаемых явлений.

Однако в результате накопления экспериментальных и производственных данных выявились и слабые стороны теории, ее недоработанность, а иногда и противоречие ее с опытом.

Так, теория термоэлектродвижущих сил приводит к выводу об их росте с понижением температуры, тогда как на опыте термоэлектродвижущие силы убывают при понижении температуры. Их величина и температурный ход часто не соответствуют опытным данным.

Аналогия между движением электронов в полупроводнике и движением газовых молекул, исходящая из представления о значительной длине прямолинейного пробега электронов, теряет всякий смысл для таких веществ, где длина пробега оказывается меньше межатомных расстояний, как это имеет место в некоторых полупроводниках с малой подвижностью. Если для полупроводников понятия «дырочного» и электронного механизма тока имеют ясный физический смысл, то «дыроч-

ному» току в металле нельзя приписать какой-нибудь конкретной модели.

Квантовая теория полупроводников строит все свои расчеты, исходя из существования в полупроводнике правильной периодической кристаллической решетки. В то же время А. Р. Регель и его сотрудники показали, что расплавленные полупроводники, в которых не может быть кристаллической решетки, обладают такими же свойствами. А. Р. Регель доказал на ряде примеров, что свойства полупроводников определяются не периодичностью кристалла, а характером химических связей атомов с их ближайшими соседями. Эти факты не нашли еще теоретического толкования.

Под давлением новых фактов и требований производства совершенствуется и развивается теория полупроводников, устраняются ее недочеты.

Еще более быстры темпы развития полупроводниковых производств. 30 лет тому назад их не существовало ни в электропромышленности, ни в радиотехнике. В настоящее время выпрямители переменного тока, полупроводниковые детекторы и усилители высокочастотных токов заняли видное место в промышленности. Автоматика, сигнализация, телеуправление строятся на основе полупроводников. Люминесцентные лампы завоевывают всеобщее признание. Высокочастотные конденсаторы из окиси алюминия и титанатов бария и сердечники трансформаторов из ферритов широким фронтом входят в производство. Начинают применяться полупроводниковые термoelementы.

Необычайно заманчивы перспективы, открываемые этим первым этапом внедрения полупроводников в промышленность. Можно предвидеть, что с помощью полупроводников будут разрешены такие фундаментальные задачи, как прямое превращение тепловой и солнечной энергии в электрическую, а также электрической энергии в механическую и обратно, без помощи машин; получение холода и термодинамически выгодный нагрев электрическим током; концентрация электрической и магнитной высокочастотной энергии; ночное освещение запасенным дневным светом; дешевое освещение светом, наиболее приспособленным для каждой цели, и в частности для выращивания растений, и т. п. Самые совершенные радиоприемники и самая сложная аппаратура для сигнализации, автоматики и телеуправления будут иметь ничтожные габариты и стоить во много раз дешевле.

Электронно-счетные машины с тысячами полупроводниковых диодов и триодов, быстро решающие самые сложные задачи, сделаются легко доступными для любого производственного предприятия и научного учреждения. Правильный прогноз и количественный расчет проникнут во все отрасли знания.

Источником электроэнергии сделаются радиоактивные излучения при ядерных реакциях.

Оценивая перспективы развития учения о полупроводниках, надо иметь в виду, что это одна из самых молодых отраслей науки, по возрасту совпадающая с учением об атомном ядре. По темпам развития и значению ее можно поставить непосредственно вслед за ядерной физикой.

ЛИТЕРАТУРА

- А д и р о в и ч Э. И. Электрическое сопротивление твердых тел. Изд-во «Знание». 1953.
- Б е р г А. И. Современная радиоэлектроника. Госэнергоиздат. 1955.
- В у л Б. М. Физические предпосылки технического использования полупроводников. «Электричество», № 7, 1955
- И о ф ф е А. Ф. Мечта воплощается в жизнь. «Знание — сила», № 2, 1956.
- И о ф ф е А. Ф. Полупроводники в современной физике. Изд-во АН СССР. 1954.
- И о ф ф е А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. Изд-во АН СССР. 1956.
- К о л о м и е ц Б. Т. Фотосопротивления. Изд-во «Знание». 1954.
- К р и с т а л л и ч е с к и е выпрямители и усилители. Изд-во «Советское радио». 1954.
- П о л у п р о в о д н и к и. Теория и применение. Изд-во «Советское радио». 1952.
- П о л у п р о в о д н и к о в ы е материалы. Изд-во иностранной литературы. 1954.
- П у м п е р Н. Я. Кристаллические диоды и триоды. Госэнергоиздат. 1953.
- С о м и н с к и й М. С. Полупроводники и их применение. Госэнергоиздат. 1955.
- Ф е д о т о в А. Я. Кристаллические триоды. Госэнергоиздат. 1955.
- Х е н и ш Г. Полупроводниковые выпрямители. Изд-во иностранной литературы. 1951.
- Ч е ч и к Н. О. Фотоэлементы и их применения. Госэнергоиздат. 1955.
- Ж у з е В. П. Научная литература по полупроводникам. Изд-во АН СССР. 1955.
-

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Лекция первая

Физика полупроводников

Введение	3
Электрические свойства полупроводников	5

Лекция вторая

Применения полупроводников в промышленности и в быту

Тепловые сопротивления (термисторы)	21
Фотосопротивления :	23
Термоэлементы	27
Холодильники	36
Полупроводниковые ферромагнетики (ферриты)	40
Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики	42
Выпрямители переменного тока и усилители радиоколебаний (тран- зисторы)	46
Фотоэлементы	54
История и перспективы учения о полупроводниках	57
Литература	61



★ К ЧИТАТЕЛЯМ ★

Издательство «Знание» Всесоюзного общества
по распространению политических и научных
знаний просит присылать отзывы об этой брошюре
по адресу: Москва, Новая площадь, д. 3/4.



Автор
Абрам Федорович Иоффе.

Редактор **С. Е. Кипнис.**
Техн. редактор **П. Г. Ислентьева.**
Корректор **В. М. Сергеева.**

А 05147 Подп. к печ. 30/IV 1956 г. Тираж 85 000 экз. Изд. № 86.
Бумага 60×92¹/₁₆—2 бум. л.= 4 п. л. Учетно-изд. 3,82 л. Заказ № 956.

Ордена Ленина типография газеты «Правда» имени И. В. Сталина.
Москва, ул. «Правды», 24.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ» ВСЕСОЮЗНОГО ОБЩЕСТВА ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПОЛИТИЧЕСКИХ И НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА НА БРОШЮРЫ-ЛЕКЦИИ на 2-е полугодие 1956 года

Первая, общественно-политическая серия — 40 брошюр-стенограмм лекций по вопросам истории КПСС, истории СССР, всеобщей истории.

Вторая, общественно-политическая серия — 56 брошюр-стенограмм лекций по вопросам диалектического и исторического материализма, истории философии, психологии, политической экономии, государства и права, а также на педагогические и научно-атеистические темы.

Третья, естественно-научная серия — 52 брошюры-стенограммы лекций по вопросам биологии, медицины, геологии, географии, химии, физики, математики и астрономии.

Четвертая, научно-техническая серия — 40 брошюр-стенограмм лекций по вопросам техники, истории технических открытий и изобретений, о передовом производственном опыте; о наиболее выдающихся работах в области научно-технического прогресса в СССР.

Пятая, сельскохозяйственная серия — 36 брошюр-стенограмм лекций по вопросам экономики сельского хозяйства, о достижениях советской сельскохозяйственной науки, об опыте новаторов и передовиков сельского хозяйства.

Шестая серия — литература и искусство. 24 брошюры-лекции по советской и русской классической литературе, литературе народов СССР и зарубежной литературе, по искусству и отдельным вопросам литературоведения, языкознания и эстетики.

Седьмая серия — вопросы международной жизни. 32 брошюры-лекции о внешней политике СССР, стран народной демократии, о внешней политике и внутреннем положении капиталистических государств, о современных международных отношениях, борьбе за мир и безопасность, о рабочем, демократическом и национально-освободительном движении.

ПОДПИСНЫЕ ЦЕНЫ

Серия	На год		На полгода		На квартал	
	колич. лекций	сумма	колич. лекций	сумма	колич. лекций	сумма
Первая	40	24 р.	20	12 р.	10	6 р.
Вторая	56	33 р. 60 к.	28	16 р. 80 к.	14	8 р. 40 к.
Третья	52	31 р. 20 к.	26	15 р. 60 к.	13	7 р. 80 к.
Четвертая	40	24 р.	20	12 р.	10	6 р.
Пятая	36	18 р.	18	9 р.	9	4 р. 50 к.
Шестая	24	12 р.	12	6 р.	6	3 р.
Седьмая	32	19 р. 20 к.	16	9 р. 60 к.	8	4 р. 80 к.

Подписка принимается городскими и районными отделами «Союзпечать», конторами, отделениями и агентствами связи, почтальонами, а также общественными уполномоченными, по подписке на фабриках и заводах, в совхозах и колхозах, в учебных заведениях и учреждениях.

Издательство «ЗНАНИЕ»