

становке производства и к широкому внедрению их в практику.

Для физической теории полупроводники имеют исключительное значение. Здесь открывается возможность изучить электрические и оптические свойства твердого тела, квантовые состояния электронов, их связь с атомами вещества. И, действительно, современная оптика и электроника твердого тела строятся на изучении полупроводников. Растущий технический опыт обогащает теорию, а теория в свою очередь открывает новые пути улучшения и применения полупроводников. Примерами этого могут служить фотоэлементы и выпрямители, технический опыт изготовления которых открыл явление запирающего слоя и различие знака выпрямления. А квантовая теория, объяснив связь знака с механизмом выпрямления, указала путь рационального усовершенствования фотоэлемента и выпрямителя.

В области полупроводников наглядно проявляется взаимная обусловленность теории и практики. Полупроводники представляют поэтому благодарное поле для изучения технической физики, для изобретательства и для автоматизации производственных процессов. Перед советской физикой, перед лабораториями, которые заняты исследованием полупроводников, стоит задача быть инициаторами прогресса в этой области.

ПОЛУПРОВОДНИКИ В ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ *

До недавнего времени физика изучала, а техника применяла либо полностью проводящие металлы, либо совсем не проводящие электрический ток изоляторы. В свете современных представлений об электрических свойствах твердого тела металлы и изоляторы представляются как крайние случаи. В металлах от каждого атома уже отделен электрон, а все вместе они переносят электрический ток, выравнивают температуру внутри металла. При силь-

* Статья опубликована в журнале: Советская наука, 1940, № 11, с. 90—104 и представляет собой стенограмму доклада, прочитанного А. Ф. Иоффе на общем собрании Академии наук СССР 29 октября 1940 г. в день его 60-летия (см. также: Вестник АН СССР, 1940, № 10, с. 12—27).

ном нагреве или при освещении ультрафиолетовым светом электроны вырываются из металла наружу. Все эти свойства металла широко использованы современной техникой. Медные, алюминиевые и железные провода, теплопередача через металлические стенки котлов, радиолампы с накалимым катодом, фотоэлементы звукового кино давно уже вошли в обиход техники.

Давно уже применяются в технике и изоляторы, в которых почти отсутствуют свободные электроны, способные переносить электрический ток. Для изоляторов удельное сопротивление электрическому току выражается десяти- и пятнадцатизначными числами, а для металлов оно выражается лишь сотысячными долями ома. Между этими двумя крайностями мы находим в природе громадное многообразие промежуточных полупроводящих материалов (графит, селен, ряд окислов, сернистых соединений и т. п.).

До недавнего времени из полупроводников применялись только электролиты, которые встречаются в аккумуляторах и электрохимических производствах, теперь же полупроводники находятся в центре внимания электрофизиков. Исследования этих материалов расширяют наши познания об электричестве, а результаты их интенсивно внедряются во все области электротехники. Появились твердые выпрямители переменного тока, твердые фотоэлементы, оксидная изоляция, стабилизаторы напряжения, предохранители высоковольтных сетей от перенапряжений. Автоматика и телеуправление производственными процессами широко пользуются полупроводниками. Исследованию полупроводников и их применению посвящена значительная часть работ Ленинградского физико-технического института Академии наук СССР.

Чтобы полностью оценить значение возникших в этой области проблем, следует напомнить эволюцию наших представлений об электричестве. В XVIII в. наши сведения об электричестве черпались из явлений, возникающих при электризации тел трением. Электричество и магнетизм представлялись «электрической и магнитной жидкостями». А так как электричество проявлялось либо во взаимном отталкивании, либо во взаимном притяжении, то пришлось допустить существование двух противоположных «электрических жидкостей» и точно так же двух противоположных «магнитных жидкостей». Наряду с этим существовала и гипотеза одной «электрической жидко-

сти», а противоположные ее действия объяснялись в одном случае избытком этой жидкости против какой-то нормы, в другом случае, наоборот, недостатком ее в теле.

Главными материалами, на которых проводились исследования явления электризации тел трением, были мех кошки, амальгамированная кожа и бузиновые шарики. Технические применения электричества ограничивались электромашинами и гальваническими элементами.

Следующий этап электрофизики связан с открытиями Эрстеда и Ампера, установивших тесную связь между электрическим током и магнетизмом. Вслед за этим Фарадей открыл электромагнитную индукцию. Между идеями Ампера и Фарадея существовала близкая связь: оба изучали взаимодействие электрических токов и магнитных явлений, но их представления были крайне различны, если не сказать диаметрально противоположны. В то время как Ампер создавал представление о непосредственном действии токов друг на друга, Фарадей рассматривал преимущественно промежуточную среду и то силовое поле, существовавшее в этой промежуточной среде, через которое только и проявлялись действия токов.

Максвелл, синтезировав теорию Ампера и Фарадея, сделал дальнейший шаг в сторону обобщения, включив в свою электромагнитную теорию и световые явления. В то время как электрические теории XVIII в. все внимание обращали на источник электрических явлений, на электрический заряд, возникающий на проводнике в результате трения двух тел, теория Фарадея—Максвелла рассматривала только те изменения, которые вызывают в окружающей среде заряды и токи. В самом начале нашего столетия эти противоположные точки зрения были синтезированы в электронной теории Лоренца, установившей, что и здесь речь идет о разных сторонах одного и того же реального явления.

На теории Фарадея—Максвелла построена вся современная электротехника сильных токов: нашли генераторы, электромоторы, трансформаторы, а также и распространение радиоволн. Электронная теория положила начало изучению явлений разряда в газах, испускания электронов под действием света или высоких температур. Исследования в этой области явлений имели значение прежде всего для развития техники слабых токов,

Новая эпоха — эпоха квантовых представлений — началась с опубликования в 1913 г. знаменитой работы Нильса Бора о строении атома. Обобщив многочисленные указания, накопившиеся в самых разнообразных областях физики, он установил, что в атоме электрический заряд может обладать только рядом вполне определенных значений энергии и находится только во вполне определенных состояниях. Электроны переходят из одного возможного состояния в другое, дискретное, резко отличное, но тоже возможное, минуя все промежуточные состояния, которые для них недоступны, «запрещены» законами квантовой физики.

Это странное на первый взгляд утверждение покоится на огромном и многообразном опытном материале. Пожалуй, наиболее наглядно квантовые свойства электронной оболочки атома сказываются в спектрах, испускаемых газами. Эти спектры состоят из тысяч отдельных линий. Ко времени появления работы Бора существовало около 60 тысяч измерений спектров различных газов. Все они были эмпирически связаны арифметическими закономерностями, смысла которых никто не мог понять. Теория Бора объяснила физический смысл спектров и другие физические явления, механизм которых был от нас скрыт. Не только оптика, но и магнитные явления, механические свойства тел, химические связи, периодическая система элементов, точный смысл которой до работ Бора далеко еще не был ясен, — все это на протяжении нескольких лет получило объяснение.

В настоящее время физика перешла от изучения внешних закономерностей к раскрытию внутреннего механизма явлений. На эту новую, квантовую физику и опирается наше понимание электрических явлений и наше представление о полупроводниках. Изучение полупроводников, в свою очередь обогащая эти представления, превращает квантовую схему в реальную теорию электрофизики.

Существо новых, квантовых представлений можно показать на некоторых примерах. На рис. 1 (слева) нанесен ряд черточек. Эти черточки изображают энергию, которой может обладать электрон в атоме. Энергия отсчитывается в вертикальном направлении от нижнего края чертежа. Только указанные значения энергии возможны для электрона в изолированном атоме. Спрашивается: что же будет происходить в том случае, если мы имеем не

изолированный атом, а тело, совокупность атомов? Этот вопрос имеет весьма существенное значение.

По мере сближения отдельных атомов, образующих в конце концов твердое тело, между ними начинает проявляться взаимодействие. Современная квантовая теория утверждает, что если мы имеем какое-то число N одинаковых взаимодействующих атомов, то тот уровень энергии, который был раньше у всех их одинаковым, начинает расщепляться на такое же число N близких друг к другу, но все-таки различных уровней.

Число атомов в любом достаточно заметном объеме твердого тела чрезвычайно велико (в кубическом сантиметре оно выражается двадцатидвухзначным числом). Следовательно, и каждый уровень энергии расщепля-

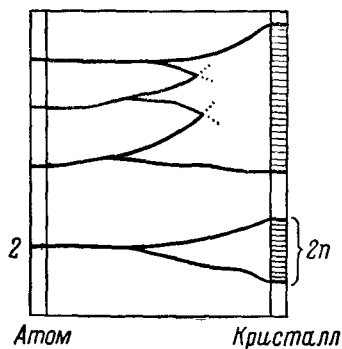


Рис. 1.

ется на такое же громадное число отдельных, близких друг к другу уровней. Поэтому эти уровни можно считать как бы некоторой сплошной полосой и позабыть об их дискретности. На рис. 1 (справа) схематически изображено, что должно произойти с уровнями энергии электронов в атомах, когда последние конденсируются в твердое тело. Вместо системы отдельных уровней, свойственных атомам, в твердом теле имеются целые полосы уровней. Нижняя полоса уровней произошла от одной единственной энергии в атоме. Верхняя происходит от трех отдельных уровней атомов. Между ними имеется «запрещенный» интервал, в котором электроны не могут находиться. Выше и ниже его густо расположена система возможных уровней.

Как ведут себя заряды в таком твердом теле? Каковы электрические свойства этого тела? Квантовая механика вносит здесь целый ряд новых, непривычных для нас представлений, каждое из которых, однако, точно подтверждено опытом, и притом весьма обширным. Пожалуй, важнейшее из этих представлений заключается в следующем: в твердом теле, как и в отдельном атоме, каждый

Из уровней может быть заполнен только одним электроном. Это так называемый принцип Паули, который впервые позволил объяснить многие стороны периодической системы элементов.

Для электрона принцип Паули вытекает из определенной формулировки квантовой теории. С такой же строгостью он должен быть применен и к твердому телу. Здесь много уровней, но на каждом из них может находиться только один электрон. Если этот уровень занят, то другой электрон там находиться не может. Когда речь идет об отдельном атоме, с таким утверждением можно свыкнуться, хотя и нелегко понять его. Но когда речь идет о большом теле, то его приходится рассматривать как одну систему. В этом случае еще труднее себе представить, как из-за того, что где-то данный уровень занят электроном, другой электрон не может его занять. Система уровней свойственна всему телу в целом, и мы не можем уже рассматривать отдельный электрон сам по себе. Поведение его зависит не только от него самого, но и от совокупности всех остальных электронов. Мы должны рассматривать весь коллектив электронов как одно целое.

Этот принцип впервые привел к пониманию того, почему одни тела — металлы — прекрасно проводят электричество, другие — изоляторы — совсем не проводят, а третьи проводят лишь частично, почему и называются полупроводниками. Чем объясняется столь резкое различие в электрических свойствах этих трех типов тел? Оказывается, причина лежит в различном распределении уровней энергии, доступных для электрона. В одних веществах (рис. 2, а) мы получаем систему уровней, непрерывно примыкающих один к другому, без промежутка. Таков, например, металл, являющийся проводником электрического тока. В каждом атоме имеются электроны, и число их в теле чрезвычайно велико (в 1 см^3 тела их содержится до 10^{23}).

Электроны занимают ряд «дозволенных» уровней. Более низким уровням соответствует меньшая энергия. Стремление всякой системы перейти в состояние с меньшей энергией вполне естественно (так же, как камень падает вниз, а не вверх). Поэтому электроны прежде всего занимают уровни, соответствующие меньшим энергиям. Наконец, последовательно, вплоть до какой-то границы, все уровни оказываются занятыми. В металле

к этим уровням непосредственно примыкает еще целая система уровней, свободных от электронов. Под действием электрического поля электроны должны двигаться в определенную сторону, создавая целый поток, который мы воспринимаем как электрический ток. При прохождении тока энергия электрона увеличивается. А так как изменяются и энергия и направление движения электрона, последний должен перейти на новый, более высокий уровень. Поскольку этот уровень свободен, ничто не мешает такому переходу.

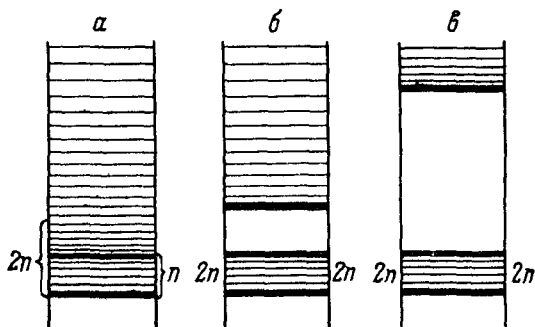


Рис. 2.

а — металл; б — полупроводник; в — изолятор.

Совершенно другое дело, если имеется запрещенная зона уровней (рис. 2, в) и если все нижние зоны уже заполнены электронами. Допустим, что в нижних зонах имеется N уровней и N электронов, т. е. все уровни будут заняты. Имеются, правда, еще свободные уровни в верхних зонах, но их энергия уже значительно больше, по крайней мере на величину запрещенного промежутка. Электроны, находящиеся в таком теле в таком же числе, как в металле, совершенно бессильны изменить как-нибудь свое состояние, ибо все доступные для них уровни заняты. Единственное, что может произойти с электронами — обмен местами, но это никак не скажется на общем состоянии, потому что мы все равно отдельных электронов не различаем, а имеем дело, так сказать, с их коллективом.

Можно различать два случая: когда запрещенная зона сравнительно узка и когда она очень велика. Различие между ними заключается в следующем. Электроны, как было указано, занимают прежде всего наиболее низкие

по энергии уровни, заполняя всю нижнюю зону. Но если бы они откуда-нибудь получили достаточную энергию для того, чтобы перескочить на более высокие уровни, то условия их движения изменились бы.

В обычных условиях всякое тело обладает той или иной тепловой энергией, тем более высокой, чем выше температура. Если появится заметное число электронов, получивших энергию, достаточную для перехода в верхнюю зону свободных уровней, то в этой зоне, где уровней гораздо больше, чем электронов, они могут свободно переходить с одного уровня на другой, проводя электрический ток. Таков механизм полупроводника (рис. 2, б). При низких температурах такой полупроводник почти не проводит ток. С повышением же температуры его проводимость быстро растет. Если запрещенный промежуток настолько широк, что при доступных нам температурах электроны не получают энергию, необходимую для перехода в верхнюю зону, тело остается изолятором.

Таково наше представление о проводнике, полупроводнике и изоляторе. Различие между ними чисто количественное, но оно приводит к качественным изменениям. На рис. 2, а представлена модель проводника (металла), на рис. 2, в — изолятора, а на рис. 2, б — полупроводника, проводимость в котором тем лучше, чем выше температура, т. е. чем сильнее тепловое движение.

Наше современное представление об электроне в твердом теле во многих отношениях отличается от того, что мы думали о нем раньше. Раньше мы представляли себе электроны маленькими заряженными шариками, хаотически движущимися в проводнике, подобно молекулам, как это трактовала кинетическая теория газов. Этой аналогией электронная теория металлов и пользовалась для объяснения электрических свойств проводников. Сейчас мы уже не можем говорить об отдельных электронах главным образом потому, что законы их движения определяются волновой механикой. Мы должны рассматривать движение не отдельных электронов, а их совокупности, как распространение волн. Совершенно бессмысленно спрашивать, в какой точке находится волна. Волна не может быть локализована в точке, она размыта.

В соответствии с прежней электронной теорией представляли себе, что электроны, сталкиваясь с атомами тела, отталкиваются от них, как маленький шарик от большого, летяг по другому направлению и т. д. Теперь

будет правильнее сказать, что движение электронов больше напоминает распространение волн в среде, чем движение отдельных шариков. Волны, соответствующие электронам, рассеиваются так же, как свет рассеивается вокруг встречаемых им мелких объектов. Волновая механика обнаружила, что электрон — частица значительно более сложная, чем можно было предполагать вначале. Оказалось, что он не только имеет электрический заряд, но, представляя собой некоторый магнитик, обладает еще известным количеством вращательного движения. Законы

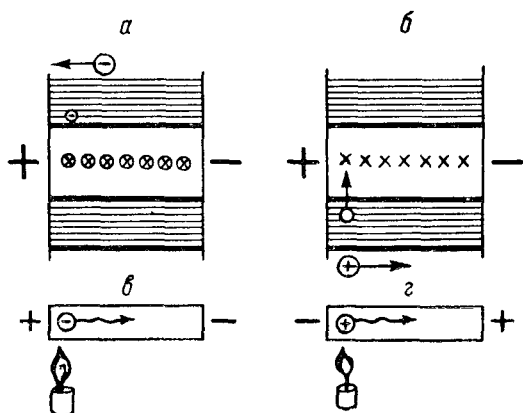


Рис. 3.

его движения, естественно, не могут быть описаны простым перенесением опыта движения макроскопических шариков на эту систему.

В коротком обзоре нет возможности более конкретно и детально описать наши представления о движении электронов и электронных волн в твердом теле. Отметим лишь, что эти представления привели нас к пониманию природы тех сил, которыми связаны частицы металла. Мы получили не только объяснение свойств чисто электрического характера, но и теорию химических, механических и тепловых явлений в металлах. Взаимодействие между атомами в металле совершенно не похоже на взаимодействие их в молекуле. Совокупность электронов, весь коллектив их связывается совокупностью атомов, и химические соединения среди металлических сплавов определяются не отношением химических валентностей, как в газах или изоляторах, а условиями минимальной

энергии коллектива электронов. Поэтому и оказывается, например, что металлы могут образовывать определенные, резко выраженные соединения тогда, когда отношение числа электронов к числу атомов равно $21:13$ или $57:21$ — числа, которые в обычной химической теории валентности никакого смысла не имеют, но совершенно точно подтверждаются изучением сплавов. Добавим, что упругие постоянные, прочность металла и другие его свойства также определяются в основном поведением электронного коллектива, а не отдельных электронов, связанных с отдельными атомами.

Новые представления об электричестве в твердом теле, охарактеризованные нами в самых общих чертах, существенно отличны не только от представлений об электрической жидкости, но и от электронных теорий начала нашего века, которые рассматривали электрон как заряд, лишенный структуры. Как же проявляются эти свойства электричества в действительных явлениях?

Полупроводник, в соответствии с вышесказанным, представляет такую систему, в которой доступные для электрона уровни энергии разделяются на две группы (рис. 3). Одна группа этих уровней сплошь заполнена электронами, и поэтому здесь никаких изменений произойти не может. Кроме того, на определенном расстоянии имеется еще другая система свободных уровней. Если небольшая часть электронов какими-нибудь внешними силами, например тепловым движением или светом, будет выброшена из нижней зоны в верхнюю, то произойдет некоторое изменение общего состояния. Движение электронов, находящихся в верхней зоне, следует примерно тем же законам, по которым происходит движение свободных электрических зарядов. Под действием электрического поля такой электрон движется от отрицательного полюса к положительному (рис. 3, а).

А что будет с электронами, оставшимися в нижней зоне? Если из нее ушло какое-то число электронов, тогда уже эта зона заполнена не сплошь; в ней остается некоторое количество свободных мест, «пустых» уровней. Теперь для оставшихся там электронов полного запрета изменять свое движение нет, появляется какая-то возможность их перемещения. Представляя себе, что где-то в пространстве электрон ушел и его место осталось свободным, мы говорим: вместо ушедшего электрона образовалась «дырка», «пустой уровень». Эта «дырка» может

быть заполнена одним из ближайших соседних электронов, находившихся справа, слева, сверху или снизу.* «Дырка» будет заполнена, но тогда освободится то место, которое только что занимал электрон, т. е. появится новая «дырка», скажем, слева. Это место снова будет заполнено электроном, находящимся слева, и т. д.

Если мы проследим за перемещением свободного места, то заметим, что оно движется навстречу входящим в данную зону электронам. Следовательно, если электрон движется в данном поле справа налево, то свободное место, заполняемое электронами, перемещается им навстречу, т. е. слева направо (рис. 3, б). Свободное место будет двигаться в данном электрическом поле так, как двигался бы положительный заряд. На самом деле мы не думаем, что двигаются положительные заряды; двигаются электроны, и двигаются всегда в одну и ту же сторону (рис. 3). Но в нижней зоне движение соответствует перемещению положительного заряда (мы часто говорим «положительной дырки»). В верхней же зоне процесс вполне соответствует движению свободного отрицательно заряженного электрона. Это различие является основным, и на нем именно построено разрешение многих практических задач в области полупроводников.

Разделение «дырок» и электронов звучит несколько схоластически; но вот на рис. 3, в изображен простейший прием, позволяющий реально обнаружить это различие. Положим, у нас имеется полупроводник. Нагреем один конец его. Тогда электроны начнут двигаться быстрее, и в верхнюю, свободную зону их перейдет больше. Стремясь распределиться более равномерно, часть электронов уйдет к холодному концу полупроводника. На горячем конце его останется избыточный положительный заряд, а холодный конец, куда перейдут электроны, зарядится отрицательно. Нагретое место зарядилось положительно — значит, отрицательные электроны свободно перемещаются. Если же ток переносится «дырками» (рис. 3, г), то при нагревании появится большое число пустых мест. Они тоже начнут уходить, т. е. замещаться электронами. Нагретый конец окажется поэтому заряженным отрица-

* Если существует электрическое поле, которое гонит все электроны в направлении от отрицательного полюса к положительному, то естественно, что «дырка» чаще всего будет заполнена тем электроном, который приходит к ней под действием поля слева.

тельно, к нему придет гораздо больше отрицательных электронов, чем их было вначале, а холодный конец зарядится положительно. Итак, если движется отрицательный электрон, нагретый конец полупроводника заряжается положительно, а охлажденный — отрицательно. Если же движется «дырка», то нагретый конец заряжается отрицательно, а охлажденный — положительно. Вот элементарный опыт, сразу позволивший сказать, с каким из двух возможных механизмов тока мы имеем дело.

В этой связи небезынтересно вспомнить представления об электрических жидкостях. Как было сказано выше, на заре развития учения об электричестве существовали две гипотезы: одна утверждала наличие двух противоположных жидкостей, другая сводила все к недостатку или избытку одной жидкости. Любопытно, что та же самая идея, по в измененной форме имеет место и в современной квантовой теории. В сущности говоря, то, что называют «дырками», есть не что иное, как недостаток электронов по сравнению с числом уровней.

Кроме основных уровней, в состав кристалла могут входить еще и другие, добавочные уровни электронов. Этим обстоятельством мы также очень широко пользуемся.

Действительность сложнее изложенной здесь схемы. Полупроводники — это почти весь окружающий нас неорганический мир. Поэтому мы рассматриваем не какой-то специально подобранный класс веществ, а неорганическую природу в целом и ее электрические свойства. Химический состав этих веществ в твердом виде несколько отличается от привычных представлений о газовых молекулах.

Рассмотрим, например, твердую соль — хлористый натрий. Здесь число атомов хлора и атомов натрия равно друг другу так же, как в отдельной молекуле хлористого натрия, заключающей по одному атому хлора и натрия. Но это только приблизительно так. На самом деле благодаря существованию теплового движения все время то в одном, то в другом месте атомы срываются со своих мест; часть их может выйти наружу и перейти в окружающую среду. В результате число атомов натрия не будет равно числу атомов хлора. В окислах кислород обменивается с окружающей средой, создавая в одних случаях избыток, в других — недостаток кислорода по сравнению с химической формулой.

Полупроводники — и это является важнейшим их свойством — отличаются тем, что состав их никогда не отвечает строго химической стехиометрической формуле. Между тем отступления от нее являются решающими. Достаточно увеличить количество кислорода в закиси меди на 1 %, чтобы электропроводность ее возросла в миллион раз и чтобы все ее свойства резко изменились. Таким образом, сравнительно небольшими химическими воздействиями мы можем вносить самые фундаментальные изменения в свойства полупроводников. В частности, мы можем из материала, который обладает электронной проводимостью, сделать материал, обладающий «дырочной» проводимостью.

Если мы так изменим материал, что появятся атомы, легко отдающие свои электроны, то получится электронный проводник. Если в то же вещество внести атомы, которые захватывают электроны, мы получим «дырочный» проводник. Такова теперь уже достаточно развитая картина многообразия полупроводников — оксидов, сульфидов, карбидов и т. д. Надо сказать, что это представление является еще только качественной картиной явления, и наша задача заключается в том, чтобы использовать ее для создания количественной теории, которая позволила бы точно предсказывать и указывать пути изменения тех или других свойств полупроводников.

Мы уже находимся на такой ступени знаний, которая позволяет утверждать, что эта задача в значительной степени нами разрешена. Изучая данный материал систематически и разносторонне, мы можем заранее количественно вычислить величину его термодвижущей силы, т. е. ту разность потенциалов, которая возникает, если создать определенную разность температур. Кроме того, в ряде случаев мы знаем, как превратить данное вещество в материал, обладающий заданными желательными для нас свойствами. Значит, мы научились, до некоторой степени, владеть свойствами полупроводников.

Полупроводники технически особенно интересны потому, что на границе их с металлом, в пограничном слое, наблюдаются явления, несвойственные ни металлам, ни изоляторам, явления, которые, собственно, и были основой их первых технических применений. На границе между металлом и полупроводником можно создать, например, такие условия, при которых ток проходил бы только в одном направлении и почти совсем не проходил бы

в другом. На этом принципе построены так называемые выпрямители переменного тока.

В самом начале моей научной деятельности, примерно 35 лет тому назад, передо мной как загадка возник вопрос: почему могут существовать изоляторы, сквозь которые электрический ток не проходит? Если изолятор заключен между металлическими электродами, в которых электронов сколько угодно, почему эти электроны не проходят через изолятор насквозь? Возможных ответов могло быть два: либо потому, что электроны не могут перейти из металла в диэлектрик, либо потому, что они не могут двигаться внутри диэлектрика. Какое из этих соображений действительно?

Для того чтобы решить этот вопрос, автор настоящей статьи пытался внести заряды во внутрь диэлектрика. Воздействуя ультрафиолетовым светом, рентгеновскими, радиевыми лучами и т. д. на различные изолирующие кристаллы (кварц, серу, каменную соль, сильвин и др.), удавалось создавать заряды, которые, оказывается, совершенно свободно перемещаются в этих кристаллах. Это дало основание предположить, что если некоторое количество зарядов попадает в зону, где уровни свободны, то ничто не мешает им перемещаться из одного места в другое и проводить ток.

Казалось, что главную трудность для электронов представляет переход из металла в изолятор. Сам по себе этот факт несколько не удивителен: из металла электрон не переходит в воздух, не переходит и в пустоту, но хорошо известно, что ультрафиолетовый свет может переводить электроны из металла в пустоту. Почему же он не может перенести их и в диэлектрик? Переводя электрон в пустоту, мы отрываем его от всех связей в металле, здесь же, вырывая электрон из металла, мы вносим его в новую втягивающую среду. Следовательно, для переноса электрона в диэлектрик энергии должно требоваться значительно меньше, чем при вырывании его в пустоту. Для выяснения этого нами были проведены исследования, но они давали результат, противоположный ожидаемому. Оказывалось, что электрон легче вырвать в пустоту, нежели ввести в изолятор, т. е. для переноса электрона в пустоту ему надо сообщать энергию меньшую, чем при введении в диэлектрик.

Для того чтобы электрон перешел из металла в изолятор, мало сообщить ему энергию, достаточную для отрыва

от металла. Нужно, чтобы он попал в свободную зону, поскольку только тогда мы заметим электрический ток. Электроны в металле обладают энергией, равной энергии середины запрещенной зоны. Значит, половина ширины этой зоны имеет ту энергию, которую нужно сообщить электрону, чтобы перевести его в диэлектрик. Но и это оказалось неверным.

Более ясные представления о переходе электронов из металла в полупроводники можно получить из рассмотрения явлений на границе между двумя полупроводниками или полупроводником и металлом — явлений, лежащих в основе технических выпрямителей.

Выпрямитель, как удалось установить, состоит из металлической пластинки, к которой примыкает тонкий изолирующий слой. За ним следует полупроводник и снова металл. Такая система обладает способностью пропускать ток в одном направлении и не пропускать его в противоположном. В существующих выпрямителях из окиси меди или селена электроны свободно идут из металла через изолирующий слой в полупроводник, но не идут из полупроводника в металл. Объяснение этому казалось простым: в металле много электронов, и поэтому они идут оттуда в большом количестве, а в полупроводнике их мало, значит, в противоположном направлении они почти не пойдут. Однако заманчиво простое объяснение оказалось неверным.

Совместно с Я. И. Френкелем мы разработали соответствующую теорию этого явления.*

Так как реальные характеристики промежуточного слоя технического выпрямителя были совершенно неизвестны, то для опытов изготовлялась модель такого выпрямителя: заранее известный тонкий изолирующий слой наносился на полупроводник и покрывался слоем металла.** При этом оказалось, что при толщине изолирующего слоя в несколько десятитысячных миллиметра сильный ток идет то в одном, то в другом направлении, в зависимости от вида полупроводника — электронного или «дырочного». В «дырочном» полупроводнике электроны идут из металла, в электронном, наоборот, — в металл.

* Другую теорию, построенную на том же принципе, разработал голландский физик ван Гель.

** В нашей лаборатории эти опыты были поставлены В. П. Жузе и затем Хартманом в Германии.

Стало быть, дело не в том, что в металле электронов много, а в диэлектрике мало, — все определяется механизмом проводимости. Представим себе систему (рис. 4) из металла, слоя изолятора и полупроводника. Если металл и изолирующий слой всегда одни и те же, а полупроводники разные, результаты не будут совпадать. Причину этого явления надо искать не на границе с металлом, а либо на границе между изолятором и полупроводником, либо на границе между двумя полупроводниками. Мы исследовали оба типа выпрямителей.

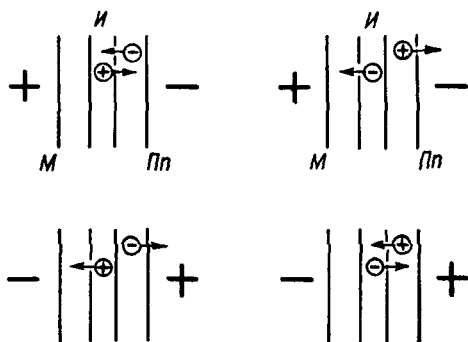


Рис. 4.

В начале нами исследованы явления, происходящие на границе двух различных полупроводников, мы расположили последние в определенный ряд так, чтобы каждый предыдущий (по отношению к последующему) пропускал положительный ток, а последующий (по отношению к своему предшественнику) — отрицательный ток. Для уяснения сути выводов, к которым мы пришли в результате исследований, нужно представить себе, что проводник электронный, т. е. отрицательные электроны движутся к металлу, а навстречу им из изолятора движутся положительные «дырки». Таким образом, два потока — электронов и «дырок» — идут навстречу друг другу. Электроны заполняют «дырки», и ток идет беспрепятственно. Но предположим, что направление тока изменилось: электроны уходят из металла, и на границе образуется слой, в котором свободных зарядов нет. Тогда получится непроводящий слой. Если же в полупроводнике «дырки» подвижные, то картина получается обратная. Эти рассуждения полностью согласуются с опытными данными.

После рассмотрения явлений на границе двух различных полупроводников мы исследовали явления, имеющие место на границе металла с полупроводником. На рис. 5 (слева) показан металл со свободными уровнями, а справа — полупроводник с уровнями, разделенными запрещенной зоной. Между ними изображен уровень свободного электрона. Возьмем для рассмотрения случай электронного полупроводника. Его электроны оказываются на более высоком уровне, чем в металле, и, естественно,

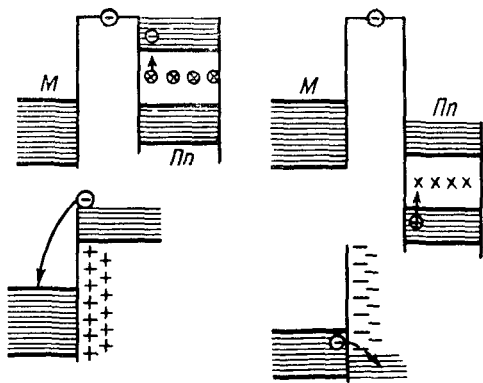


Рис. 5.

при соприкосновении уходят в металл, заряжая его отрицательно. В полупроводнике образуется недостаток отрицательных зарядов, и он зарядится положительно.

Итак, в рассмотренном случае заряды из слоя полупроводника удаляются в металл. Вследствие этого образуется пограничный, лишенный свободных зарядов слой, не проводящий тока, а энергия электронов становится значительно большей. Для того чтобы электронам подняться из металла в свободную зону полупроводника, им нужно затратить большую работу, чем раньше. Если учесть это обстоятельство, то окажется, что для перехода электронов из металла в диэлектрик или полупроводник нужно затратить энергию, величина которой не будет равна, как мы раньше предполагали, половине ширины запрещенной зоны. Оказывается, количественно вполне возможно предсказать, при каких условиях, как и сколько электронов будет переходить из металла в полупроводник. Это даст нам точные сведения о том, почему изолятор не проводит электрического тока и что нужно сделать, чтобы он начал его проводить.

Впервые люди получили представление об электричестве из явления электризации трением. Но до настоящего времени это явление оставалось непоятым. Было совершенно неясно, почему при трении (на самом деле речь идет о простом соприкосновении) одно тело заряжается положительно, другое — отрицательно. Для определения знака заряда имелись эмпирические правила, но о величине заряда мы не имели никакого представления.

Рассмотренная нами пограничная электризация представляет количественную теорию электризации трением. Исходя из расположения энергетических уровней, мы можем предсказать, переходит электрон в металл или из металла. Более того, мы можем определить, какое количество зарядов перейдет при этом в металл или в полупроводник. Наконец, вместо металлов мы можем взять любые два тела и произвести тот же расчет явлений на границе между ними. Таким образом, интересуясь явлениями, которые, казалось бы, не имеют ничего общего с электризацией трением, мы вплотную подошли к проблеме, давно ждущей своего разрешения. Можно надеяться, что на этом пути она будет разрешена.

Итак, теперь мы имеем основы проверенной опытом количественной теории полупроводников и знаем, какими приемами можно менять их электрические свойства. Естественно применить такую теорию к решению технических задач.

Первым техническим использованием полупроводников были выпрямители переменного тока. В 1927 г. американский инженер Грондаль обнаружил, что, окисляя медь при высоких температурах — порядка 1000°C , можно получить пластины, обладающие свойством легко пропускать токи одного направления и создавать весьма большие сопротивления для токов обратного направления. Если к такой пластине приложить разность потенциалов в несколько вольт так, чтобы металлическая медь являлась катодом, а выросшая на ней закись меди анодом, то создается ток, в тысячи раз больший того, который получается в той же цепи, когда медь служит анодом. В первом случае ток будет измеряться амперами, во втором — миллиамперами. Если приготовленную таким образом пластину включить в цепь переменного тока, то мы практически будем наблюдать ток одного направления. Следо-

вательно, пластина Грондаля является выпрямителем переменного тока.*

Созданные Грондалем выпрямители вызвали в США возникновение новой крупной отрасли производства. У нас в СССР до последнего времени производились маломощные выпрямителы из закиси меди, рассчитанные на токи примерно в 3—5 А (применяются для автоблокировки транспорта), в то время как за границей имелись уже аналогичные устройства на десятки тысяч ампер. Совместно с одним из заводов Ленинградский физико-технический институт Академии наук СССР разработал технологию промышленного изготовления выпрямителей на сотни и тысячи ампер и установил технические условия их эксплуатации при низких и высоких температурах. По качеству эти выпрямителы не уступают американским.

В Германии примерно в 1933 г. появились селеновые выпрямителы, свойства которых несколько отличны от свойств медно-закисных выпрямителей. Их производство мы тоже изучили, как говорится, освоили, и теперь можем производить селеновые выпрямителы не хуже германских.

Но не только в этом заключается задача научного института. Он, конечно, должен помочь использовать на практике то новое, что сделалось известным науке, иначе мало стоили бы все его изыскания. Но он должен пойти и дальше. Поэтому на основе теоретических представлений о свойствах и механизме действия полупроводников, о которых идет речь в этой статье, сотрудники Ленинградского физико-технического института Б. В. Курчатов и Ю. А. Дунаев попробовали построить рациональный выпрямитель.

Конструкция разработанного ими выпрямителя представляет собой алюминиевую чашечку, в которую закладывается магний и полупроводник сернистой меди с некоторыми добавками. Затем накладывается крышка, отделенная тонкой слюдяной пластинкой. При прохождении электрического тока выпрямитель сваривается. Вот и вся технология его изготовления. Этот выпрямитель без вся-

* Аналогичное свойство полупроводников уже давно было известно радиолюбителям, применявшим кристаллические детекторы (кристаллики сернистых металлов) с острой иглой в качестве электрода; высокочастотные колебания, создаваемые радиоволнами, выпрямляются таким детектором.

кого охлаждения дает ток до 30 А при 17 В, а при дутье — до 80 А.

Выпрямитель Б. В. Курчатова имеет большие достоинства; плотность рабочего тока, допускаемая им, в 100 раз больше плотности выпрямителя из закиси меди; вместо меди, которая на обычные выпрямители расходуется тоннами, здесь затрачивается совсем немного алюминия. Большое значение имеет также и простота изготовления выпрямителя, не требующего сложной термической обработки, сильно удорожающей производство медно-закисных и селеновых выпрямителей.

В табл. 1 сопоставлены свойства различных выпрямителей.

ТАБЛИЦА 1

Характеристика выпрямителей	Cu ₂ O	Se	Cu ₂ S	
	США, 1929 г.	Германия, 1933 г.	СССР, 1938 г.	США, 1939 г.
<i>I/S</i> , A/cm ² без охлаждения	0.05	0.04	5	—
с охлаждением	0.15	0.14	10	5.5
<i>V</i> , В	8	15	17	5
Кнд, %	75	75	70	55

Таким образом, по некоторым электротехническим показателям наши выпрямители представляют значительный шаг вперед. Правда, их еще нельзя соединять последовательно на более высокие напряжения, но сейчас, опираясь на развивающуюся теорию вопроса, мы продолжаем работу над их улучшением и повышением коэффициента полезного действия. Повышение кнд выпрямителей с 75 до 90—95 % имеет очень важное значение. Если бы мы имели выпрямители с таким высоким кнд, соответствующим современным электротехническим приборам, тогда переход от переменного тока к постоянному был бы окончательно решенной задачей, мы могли бы сочетать легкую превратимость переменных токов с удобствами управления и регулировки, которые обеспечивают пользование постоянным током.

Сравнительно давно известным применением полупроводников являются также фотоэлементы. В 1930 г. Ланге в Германии обратил внимание на то, что медно-закисные выпрямители обладают и фотоэлектрическими свойствами,

создавая при освещении электродвижущую силу и соответственный ток. Затем в 1931 г. Бергману удалось изготовить значительно лучшие фотоэлементы из селена. Селен давно известен как вещество, резко меняющее электрическое сопротивление при освещении. Система передачи изображений по проводам — система Корна — была основана именно на использовании этого свойства селена. В настоящее время наша практика знает почти только одни селеновые фотоэлементы, которые используются для фотোগрафии, в измерительной технике и т. д.

Установив, что свойства твердых фотоэлементов определяются фоточувствительностью полупроводника, работники Ленинградского физико-технического института поставили себе следующую задачу: создать фотоэлементы из материала, обладающего гораздо более сильным внутренним фотоэффектом, чем закись меди или селен, а именно — из сернистого таллия. Было установлено, что и закись меди и селен обладают «дырочным» механизмом проводимости, который мы описали выше. Сернистый же таллий, как оказалось, в зависимости от избытка в нем серы или таллия может быть сделан как «дырочным», так и электронным полупроводником (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

Характеристика выпрямителей	Германия, 1930 г.		СССР, 1937 г.
	Cu ₂ O	Se	Tl ₂ S
$I/L, \text{ А/лм} \cdot 10^{-6}$	100	400	10000
$\lambda, \text{ ммк}$	400—600	300—700	400—1300
Кпд, %	0.01	0.04	1.1

В «дырочном» полупроводнике свет, вырывая электрон, сообщает ему энергию, достаточную для перехода в свободное состояние. Пройдя через запирающий слой и металл, электрон заряжает последний своим отрицательным зарядом. В электронном же полупроводнике электрон, вырванный светом, освобождает одно из нормальных квантовых состояний, которое сейчас же занимает электрон, пришедший через запирающий слой из металла. При этом металл, отдав электрон, заряжается положительно. Это новый, еще никогда не наблюдавшийся вид фотоэффекта запирающего слоя. Научный сотрудник Ленинград-

ского физико-технического института Б. Т. Коломиец создал фотоэлементы, построенные на этом принципе. Они отличаются весьма ценными в практическом отношении особенностями. В то время как «дырочные» фотоэлементы работают лишь в диапазоне видимого света, электронные обладают особенно высокой чувствительностью именно к невидимым, инфракрасным лучам. Получаемый при этом ток в несколько раз превосходит ток от фотоэлементов с «дырочным» механизмом (от 500 до 10 000 мА/лм).

Эти серно-галлиевые фотоэлементы Б. Т. Коломиец применил для звукового кино. К XVIII съезду ВКП(б) на заводе «Ленкиноа» была создана новая аппаратура. Она безупречно работает до сих пор в Доме кино и кинотеатрах Ленинграда. Новая аппаратура отличается простотой: нет необходимости в добавочном фотокакаде усиления и источниках высокого напряжения, но главное ее преимущество — чистота звука. Единственным источником тока в новых фотоэлементах и громкоговорителях служит свет, проходящий сквозь киноленту. Если этого освещения нет, звук полностью отсутствует. В прежних же аппаратах, где имелись высоковольтные батареи, ток проходил самым беспорядочным образом и давал те неприятные потрескивания и шипение, которые так портили звук в кино.

Другая область применения новых фотоэлементов — приборы, обеспечивающие безопасность горных и шахтных работ. Появляющиеся в воздухе небольшие частицы горючих газов сгорают на поверхности платиновой проволоочки, нагретой током, и повышают ее температуру, а фотоэлемент, воспринимая невидимые глазу инфракрасные лучи, отмечает этот нагрев и дает сигнал о приближении опасности. При помощи новых фотоэлементов можно осуществить разнообразную сигнализацию, автоматизацию многих технических процессов, сортировку и контроль изделий и многое другое.

Обращает на себя особое внимание величина их кпд. Твердые фотоэлементы являются прибором для преобразования световой энергии в электрическую. Такой фотоэлемент сам генерирует и электродвижущую силу и ток и, таким образом, создает некоторую электрическую энергию. Величина кпд показывает, какая часть падающего света превращается в электрическую энергию. В селеновых фотоэлементах эта величина составляет 0,04 %, а в новых — около 1 %. Конечно, 1 % — это очень не-

много, но все-таки если вспомнить, что здесь начало решения одной из задач, представляющих собою мечту энергетики, а именно: прямое превращение солнечного света в электрическую энергию, то эта величина все же представляет известный интерес. Достижение 1 % означает шаг вперед в разрешении этой задачи. Лет 10 тому назад, пытаясь представить себе задачи социалистической техники, я указывал на перспективу превращения солнечной энергии в электрическую. Тогда я намечал возможность более значительного увеличения кпд твердых фотоэлементов; теперь в известной мере это осуществляется.

Третий вид использования полупроводников, который в отличие от двух первых находится еще в стадии развития, — это термоэлементы — приборы, превращающие тепловую энергию в электрическую. В силу неизбежных процессов теплопроводности по тем проводам, которые несут ток, кпд термоэлементов гораздо меньше, чем у тепловых машин. Термоэлементы из металлов дают всегда меньше 1 % электроэнергии по отношению к затраченной теплоте.

Лет 10 тому назад мое утверждение о том, что кпд термоэлемента при помощи полупроводников можно повысить с 1—2 до 4 %, встретило резкую критику. Сейчас, создавая в пластинке из сернистого свинца размером в 3 см разность температур порядка несколько сот градусов, мы получаем ток до 50 А при напряжении 0.1 В. Кпд невелик, но и работа еще далеко не завершена. Она, однако, подтверждает, что термоэлектрические явления в полупроводниках могут служить источниками мощных токов. Даже при кпд 10 % термоэлементы не смогут еще конкурировать с машинами, но благодаря крайней простоте, отсутствию движущихся частей и компактности для определенных целей они могут иметь значение не только как измерители температуры и лучистой энергии, но и как источники тока.

За последние годы использование полупроводников в технике растет с необычайной быстротой. Обладая уже некоторым опытом и знаниями в этой области электрофизики, мы можем и должны добиться от применения полупроводников в технике и научных исследованиях результатов, гораздо больших и лучших, чем те, которые описаны в этой статье.