

способить их так, чтобы этот свет дифференцировал четыре-пять определенных цветов. Чувствительность их начинается в инфракрасной части. Для теплового излучения, не сопровождающегося видимым светом, порядка 500° , эти фотоэлементы могут регистрировать нагревание только тем инфракрасным светом, который при этом излучается. Можно также пользоваться для температурных измерений, для фиксации, регулировки и усиления термоэлектродвижущей силой или изменением сопротивления, изменение которого составляет 5—10 % на каждый градус.

Для электротехнических целей весьма полезное свойство полупроводников — резко менять сопротивление в магнитном поле. У нас сейчас разработан простой и удобный прибор, который позволяет очень хорошо измерять, например, магнитное поле Земли.

При полетах на аэроплане можно иметь просто компас, стрелка которого указывает направление магнитного поля. Наконец, можно пользоваться выпрямлением, которое также очень резко зависит от температуры и прекращается при 150° .

ПОЛУПРОВОДНИКИ В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ И ТЕХНИКЕ*

Еще совсем недавно электротехника применяла, а физика изучала лишь предельные по своим электрическим свойствам материалы: хорошо проводящие металлы или непроводящие ток изоляторы.

* Статья опубликована в журнале: Природа, 1939, № 4, с. 13—19 (см. также: Электричество, 1939, № 6, с. 5).

Она написана до открытия транзисторов и до создания последовательной теории выпрямляющего действия контакта полупроводник—металл и явлений в $p-n$ переходах. В становлении этой теории существенную роль сыграли работы Д. И. Блохинцева, Б. И. Давыдова и С. И. Пекара. Упомянутые в статье исследования А. Ф. Иоффе и Я. И. Френкеля по туннельной теории выпрямления оказались, как выяснилось в конце 50-х годов, возможным приложить к описанию туннельных диодов Л. Есаки.

Предложенный в статье А. Ф. Иоффе термин «позитронная проводимость» в литературе не прижился, и вместо этого говорят о «дырочной проводимости».

В начале XX в. удалось установить, что в металле ток переносится электронами, а ничтожный ток, наблюдаемый в изоляторах, имеет электролитический характер. Однако после первых успехов электронной теории металлов и ионной теории диэлектриков исследование натолкнулось на ряд трудностей, которые удалось разрешить только с помощью новой квантовой механики на протяжении последнего десятилетия.

Главнейшей трудностью в теории металлов были их тепловые свойства. С одной стороны, электроны свободно перемещаются в металле, перенося электрический ток, выравнивая температуру, создавая термоэлектродвижущие силы. Это значит, что в тепловом движении электроны участвуют как самостоятельные частицы, движущиеся среди атомов металла. Нагревая металл, нужно сообщить энергию не только его атомам, но и свободным электронам. Число их, судя по оптическим свойствам металлов, равно числу атомов. Электроны должны получить столько же тепловой энергии, сколько получил бы газ, состоящий из такого же числа молекул.

На нагревание одного грамм-атома твердого тела на 1°C требуется около 6 кал; на нагревание грамм-атома газа — 3 кал. Естественно было бы ожидать, что на нагревание грамм-атома металла на 1°C потребуется 9 кал в отличие от непроводящих тел, теплоемкость грамм-атома которых составляет 6 кал. В действительности, однако, теплоемкость металлов существенно не отличается от теплоемкости диэлектриков.

Выход из этих противоречий, как и из ряда других трудностей, был найден благодаря квантовой механике. Как в отдельном атоме электроны могут занимать только строго определенные квантовые состояния (чем и объясняется, например, появление в спектре газов резких спектральных линий), так и в целом кристалле существуют строго ограниченные квантовые состояния, в которых могут находиться электроны. Как в атоме, так и в кристалле не может быть двух электронов в одном и

Предвидение А. Ф. Иоффе роста КПД фотоэлементов на полупроводниках полностью оправдалось — кремниевые солнечные батареи обеспечивают питание бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли и космических кораблей. Прав оказался А. Ф. Иоффе и в оценке будущего полупроводниковых термоэлементов. Успехи в их техническом использовании получены благодаря работам А. Ф. Иоффе и его школы.

том же квантовом состоянии. Естественно, что прежде всего электронами заполняются состояния с наименьшей энергией. Подсчет показывает, что при обычных температурах, когда средняя энергия теплового движения атомов составляет около 0.03 эВ (1 эВ — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя в электрическом поле разность потенциалов в 1 В), электроны занимают все квантовые состояния с энергиями от нуля до 5—10 В. Поэтому энергия теплового движения 0.03 эВ мало влияет на среднюю энергию электронов, хотя последние и находятся в тепловом равновесии с атомами металла.

Квантовая теория установила также, чем обусловлена разница между проводниками и изоляторами. В металлах число возможных квантовых состояний значительно больше, чем число электронов. Поэтому, когда в металле создается электрическое поле, электроны имеют возможность изменять направление своего движения, переходя в те квантовые состояния, в которых их скорость направлена в сторону действующей на них электрической силы. Электроны могут также получать от электрического поля работу, переходя в состояния с более высокой энергией и отдавая потом избыточную энергию металлу, — так происходит нагревание металла при прохождении тока.

Диэлектрики отличаются от металлов не меньшим числом электронов — их столько же, если не больше. Они не проводят ток только потому, что число квантовых уровней в них равно числу электронов и свободных уровней нет. В диэлектрике в электрическом поле электрон не может изменить направление своего теплового движения, не может увеличить свою скорость, так как при этом он должен был бы перейти в новое квантовое состояние, которое уже занято другим электроном. Поэтому поле не может изменить тепловое движение электронов и, следовательно, не может создать электронный ток. Такова физическая картина идеального изолятора.

Те состояния, которые мы рассматривали, были нормальные состояния электронов. В отдельном атоме мы знаем и другие, так называемые возбужденные состояния. Поглотив определенную энергию падающего на атом света или встречного электрона, электрон может перейти в атоме на одно из квантовых состояний повышенной энергии. Возвращаясь обратно в нормальное состояние, электрон отдает избыток своей энергии другому атому

или испускает его в виде электромагнитной световой волны (фотона).

Аналогичными свойствами обладают электроны в твердом кристаллическом теле. Кроме системы нормальных уровней, которые в изоляторе заняты электронами, всегда существуют системы возбужденных уровней со значительно большей энергией. Только электроны, которые получают достаточную энергию, могут перейти в эти состояния. Источником этой добавочной энергии может быть тепловая энергия или поглощенный свет (фотон с энергией $h\nu$, где ν — частота световых колебаний, а h — постоянная Планка, равная $6.61 \cdot 10^{-27}$ эрг·с). Чем больше разность энергий возбужденных и нормальных уровней, тем меньшее число электронов при данной температуре получает возможность перейти в новые квантовые состояния. При комнатной температуре средняя энергия теплового движения равна 0.03 эВ. Если наименьшая энергия, необходимая для перехода в новые состояния, составляет, например, 1 эВ, то лишь ничтожная часть электронов может получить такую энергию. При 2 эВ их еще меньше. Можно утверждать, что во всех диэлектриках, в которых разность энергии между нормальными и возбужденными состояниями больше 0.02 эВ, все электроны остаются в нормальных состояниях. Следовательно, все такие диэлектрики не обладают электронной проводимостью. Но поглощение света достаточной частоты (2 эВ соответствуют желтому свету $\lambda \approx 600$ мкм) может все же перевести нормальные электроны на свободные уровни, где они будут участвовать в прохождении электрического тока. Это явление называется внутренним фотоэффектом, а созданный под влиянием света ток — фотоэлектрическим током. Определив наименьшую частоту света фотоэффекта, мы можем узнать энергию, необходимую для перехода из нормальных условий в возбужденные.

Помимо теплового движения и света, электронная проводимость диэлектрика может быть вызвана и химическими примесями. В кристаллической решетке, состоящей из одинаковых ионов или атомов, часто наблюдаются нарушения правильной структуры. Иногда отсутствуют отдельные ионы; иногда ионы решетки оказываются замещенными ионами других элементов или другой валентности; в кристаллах могут размещаться и добавочные атомы, включенные в нормальную решетку.

Во всех этих случаях, кроме нормальных квантовых уровней кристалла, появляются добавочные уровни примесей с энергией, отличной от энергии электронов решетки.

Часто энергия электронов примеси, занимая промежуточное положение между энергией нормальных и возбужденных уровней, оказывается ближе к свободным состояниям, чем энергия нормальных электронов. Если тепловое движение не дает нормальным электронам достаточной энергии для перехода в свободные состояния, то для примесей тепловой энергии может оказаться достаточно, чтобы перевести часть электронов на свободные уровни и вызвать проводимость кристалла.

Примеси могут повлиять на электронное равновесие и в другом направлении: часть нормальных электронов кристалла может перейти на уровни энергии, создаваемые примесями, освободив соответственное число нормальных состояний.

Это обстоятельство также сообщает диэлектрику способность проводить электрический ток. Рассмотрим подробнее, как совершается в этом случае движение электронов. Когда электрон, находившийся прежде в нормальном состоянии, переходит в одно из состояний, внесенных примесями, и закрепляется там, то не только появляются свободные состояния с определенной энергией и скоростью, но в то же время в кристалле с уходом отрицательно заряженного электрона в определенном месте остается избыток положительного заряда. Этот заряд может потом привлечь один из соседних электронов, на месте которого окажется тогда избыток положительного заряда. Такие переходы совершаются под влиянием теплового движения в самых разнообразных направлениях. Участок кристалла, где имеется недочет электрона, или, что то же, избыток положительного заряда, перемещается самым хаотическим образом, подобно электрону, участвующему в тепловом движении. Мы получаем впечатление, как будто положительный заряд движется в кристалле, тогда как на самом деле движутся электроны, замещающие свободные места. Когда в диэлектрике создано электрическое поле, то замещение свободного места происходит преимущественно при помощи тех электронов, которые направляются к положительному заряду электрического поля, т. е. в направлении от отрицательного полюса к положительному, а свободное место пере-

мещается при этом на место ушедшего электрона, т. е. от положительного полюса к отрицательному, по направлению, в котором двигался бы положительный заряд, если бы он мог перемещаться. Таким образом, свободное место, оставленное электроном, перешедшим на атомы примеси или в свободные возбужденные состояния, мы можем уподобить свободному положительному заряду.

Движение электронов в диэлектрике может иметь двойной характер.

1. Те электроны, которые перешли под влиянием тепла или света в свободные возбужденные состояния, получают возможность перемещаться внутри диэлектрика, перенося ток и тепло.

2. Оставшиеся после удаления электронов свободные места среди нормальных квантовых состояний замещаются соседними электронами так, как будто движется свободное место со своим положительным зарядом. Часто этот второй механизм тока называют током замещения. Мы будем его называть позитронным током (хотя свободные места имеют лишь частичное сходство с позитронами) в отличие от электронной проводимости первого рода.

Разумеется, в том же диэлектрике одновременно может существовать проводимость первого и второго рода в любых пропорциях.

Как же узнать в каждом данном случае, с каким механизмом проводимости мы имеем дело? Простейший прием — определение знака термоэлектродвижущей силы. Если мы нагреваем конец кристалла, обладающего электронной проводимостью, то здесь создается большее число подвижных электронов, получивших большую кинетическую энергию. Электроны будут уходить из этого конца в большем количестве, чем приходят туда более медленные электроны из холодного конца, где их меньше. Нагретый конец заряжается положительно, холодный — отрицательно, пока электрическое поле в диэлектрике не скомпенсирует этого избыточного ухода электронов, перегоняя обратно электроны из отрицательного (холодного) конца в более теплый. Таким образом, в диэлектрике с электронной проводимостью нагретый конец оказывается длительно заряженным положительно по отношению к холодному.

При позитронной проводимости, наоборот, положительные свободные места уходят из нагретого конца быстрее,

чем они приходят из холодного. Замещающие их электроны заряжают нагретый конец отрицательно.

Другой прием определения механизма проводимости — наблюдение тока в магнитном поле (эффект Холла). Электрический ток отклоняется в магнитном поле в определенную сторону перпендикулярно как к направлению тока, так и к направлению магнитного поля. В эту сторону отклоняются заряды, переносящие ток. Если это электроны, то эта сторона диэлектрика заряжается отрицательно. Если же перемещаются свободные положительные места, то та сторона, в которую отклонился ток, заряжается положительно.

Химические примеси, введенные в диэлектрик, могут вызывать проводимость как первого, так и второго рода в зависимости от того, являются ли они поставщиками электрона на свободные уровни или же вносят в кристалл уровни, на которых могут закрепиться электроны нормальных уровней.

Это различие двух родов тока оказалось весьма важным не только для исследования проводимости, но и для технических применений электронных проводников.

Исходя из сказанного, мы легко можем понять основные свойства этих проводников.

1. Чистые диэлектрики, в которых разность между энергией нормальных и возбужденных состояний превышает 1 эВ, обладают очень малой проводимостью. Но стоит ввести в них некоторое количество примеси, как их проводимость возрастает в тысячи и миллионы раз.

2. Примеси, легко отдающие свои электроны (например, атомы металла), вызывают электронную проводимость; примеси же, легко присоединяющие электроны (кислород, сера, хлор), вызывают позитронную проводимость.

3. С повышением температуры электропроводимость резко возрастает и становится, наоборот, неизмеримо малой вблизи температуры абсолютного нуля.

4. Начиная с некоторой частоты свет при поглощении диэлектриком создает фотопроводимость.

5. Диэлектрики, прозрачные для всех видимых лучей (например, алмаз, каменная соль, кварц), оказываются изоляторами. В самом деле, наибольшая частота видимого фиолетового света соответствует фотонам в 3 эВ.

Если этот свет еще не поглощается, это значит, что разность между нормальными и возбужденными уровнями энергии превышает 3 эВ, а при этих условиях при комнатной температуре только те электроны могли бы перейти на свободные уровни, энергия которых в 100 раз больше средней (0.03 эВ). Таких электронов неизмеримо мало.

6. Введением примесей можно повысить электропроводимость кристаллов.

Но одновременно появляется и окраска, так как свет меньшей частоты может теперь поглощаться, переводя электроны примесей на свободные уровни или, наоборот, переводя нормальные электроны кристалла на уровни энергии, принадлежащие примесям.

7. Материалы, непрозрачные для всех видимых лучей, вплоть до красных (фотонов с энергией 1.5 эВ), наоборот, часто обладают значительной проводимостью, в особенности если в них имеются примеси. Возможно, впрочем, поглощение света и без фотоэффекта.

Таким образом, наряду с металлами и изоляторами, мы изучаем сейчас громадное разнообразие электронных проводников промежуточного типа — полупроводников.

Интерес к ним возрос не только потому, что, воздействуя на них светом, теплом, сильными электрическими полями или вводя примеси, мы можем в самых широких пределах изменять их электрические свойства и изучать поведение электрических зарядов в твердом теле. За последние 10 лет полупроводники получают все более растущие технические применения благодаря двум присущим им свойствам: выпрямлению и появлению электродвижущих сил при освещении. Эти свойства используются в выпрямителях переменного тока и твердых фотоэлементах.

Выпрямитель из закиси меди состоит из медной пластины, на которой окислением при температуре около 1000 °С создается хорошо проводящий слой закиси меди. При этом между медью и закисью появляется слой плохо проводящей закиси толщиной в миллионные или стотысячные доли сантиметра. Различие в проводимости обоих слоев закиси вызвано тем, что в проводящем слое имеется большой избыток кислорода (до 1 %), который снижает его удельное сопротивление до 100 Ом·см², тогда как тонкий прилегающий к меди слой чистой закиси обладает удельным сопротивлением около 10¹⁰ Ом·см².

Сопrotивление такой системы резко меняется в зависимости от направления тока. При одинаковой приложенной к выпрямителю разности потенциалов в 1, 2 или 3 В мы наблюдаем токи в несколько ампер, когда медь служит отрицательным электродом, т. е. когда электроны идут из меди сквозь тонкий слой чистой закиси в насыщенную кислородом и хорошо проводящую закись меди. В обратном направлении при тех же напряжениях в 1—3 В токи составляют лишь несколько миллиампер. Первое направление тока называется пропускным, второе — запорным, а тонкий слой закиси получил название запорного слоя. Отношение пропускного тока к запорному при одинаковых напряжениях носит название коэффициента выпрямления. В хороших технических выпрямителях оно достигает 10 000.

Существовало несколько объяснений работы выпрямителя. Все они исходили из того, что электроны легче проходят сквозь запорный слой, когда они идут из металла, где их много, чем из закиси меди, где их мало. Прохождение электронов мы с Я. И. Френкелем приписывали тому, что тонкий запорный слой становится прозрачным в сильных электрических полях, создаваемых уже напряжением в 1 В. В самом деле, толщина этого слоя всего несколько миллионных сантиметра, следовательно, поле достигает нескольких десятков или сотен тысяч вольт на 1 см. Пропускной ток ван Гель приписывает вырыванию электронов из металла этим сильным полем.

Однако при ближайшем изучении других выпрямителей все эти представления оказались неверными. В лаборатории Ленинградского физико-технического института были созданы искусственные выпрямители, состоящие из полупроводника, нанесенного на него испарением в пустоте тонкого непроводящего слоя и металлического электрода. Позже такие же опыты были развиты в Германии.

Оказалось, что при толщине запорного слоя около одной миллионной сантиметра коэффициент выпрямления достигает наибольшего значения; при этом запорный слой может состоять из любого непроводящего материала — кварца, шеллака, тонкой слюды. Самым неожиданным образом выяснилось, что знак выпрямления меняется в зависимости от применяемого полупроводника. В закиси меди, селене, сернистой меди пропускной ток течет, когда металл служит катодом. В окиси цинка, окиси алюминия,

наоборот, пропускной ток наблюдается, когда металл служит положительным полюсом. Первые материалы являются полупроводниками с позитронной проводимостью, а вторые — обладают электронной проводимостью.

Таким образом, знак выпрямления зависит не от металла и не от свойств запорного слоя, а от механизма проводимости полупроводника. На границе с металлом всегда имеется достаточное число как электронов, так и свободных положительных мест при любом направлении тока. Наоборот, на границе между полупроводником и запорным слоем условия перехода зарядов резко зависят от направления тока.

Если ток в полупроводнике переносится электронами, то сильный ток может поддерживаться только в том случае, когда полупроводник служит катодом и электроны из него поступают через запорный слой в металл. При обратном направлении тока электроны, уходя от пограничного слоя, создают здесь плохо проводящую прослойку, запирающую ток.

Когда мы имеем полупроводник, в котором перемещаются свободные положительные места (такими, как оказалось, и являются материалы технических выпрямителей — закись меди, селен, сернистая медь), для пропускного тока полупроводник должен быть анодом. Тогда он доставляет к границе запорного слоя положительные заряды, переносящие ток в отрицательно заряженный металл.

Существуют полупроводники, в которых мы можем по произволу создавать электронную или позитронную проводимость, вводя в них те или другие примеси. В этих случаях и знак выпрямления меняется с изменением механизма проводимости. В тесной связи с твердыми выпрямителями стоят и твердые фотоэлементы. Здесь также обязательным условием является присутствие запорного слоя, но, кроме того, необходимо, чтобы материал фотоэлемента обладал внутренним фотоэффектом. По отношению к знаку фотоэлемента, как и в случае выпрямления, сначала существовали неправильные представления. Казалось, что вырванные светом электроны, проникая сквозь запорный слой, заряжают металл отрицательным зарядом. Этот знак и наблюдался в первых технических фотоэлементах из закиси меди и селена, в которых, как мы уже знаем, имеет место ток замещения. Оказалось,

однако, что в новых фотоэлементах из сернистого таллия, созданных в ЛФТИ, знак фототока обратный — металл заряжается положительно. Тот же знак наблюдался в фотоэлементах из сернистого серебра, осуществленных в Киеве в Физическом институте Украинской Академии наук. В обоих случаях мы имеем дело с электронным механизмом проводимости. Впрочем, сернистый таллий можно сделать и проводником с положительными зарядами, насытив его избытком серы; тогда при освещении металл заряжается отрицательно.

Разница между двумя типами фотоэлементов из сернистого таллия не ограничивается знаком фотоэффекта. В то время как при обычном знаке фотоэффекта чувствительность фотоэлемента к свету имеет такие же значения, как и в ранее известных элементах из закиси меди и селена, а именно несколько сот микроампер на один люмен падающего света, серноталлиевые фотоэлементы с положительным знаком фотоэффекта дают до 8000 мкА на люмен и оказываются чувствительными к невидимым инфракрасным лучам.

Каким же образом свет, вырывающий отрицательные электроны, может заряжать металл положительными зарядами? Это легко понять, если вспомнить, что, вырывая электроны из полосы нормальных уровней, свет освобождает там свободные места, создает положительно заряженные подвижные участки, на которые и переходят электроны из металла. Отдавая же свои электроны полупроводнику, металл заряжается положительно.

Если бы не существовало запирающего слоя, фотоэлектрический ток не мог бы создать заметной разности потенциалов между металлом и полупроводником. Включение между ними такого тонкого слоя, который, пропуская электроны, обладает в то же время достаточно большим сопротивлением, обеспечивает разность потенциалов, равную произведению силы фототока на сопротивление запирающего слоя.

Таким образом, твердый фотоэлемент с запирающим слоем создает не только ток, но и электродвижущую силу, достигающую 0,3 В; следовательно, такой фотоэлемент является источником электрической энергии, получаемой за счет энергии поглощенного света.

Каков же КПД фотоэлемента? В фотоэлементах из закиси меди и селена он составляет для солнечного света несколько сотых и до 0,1 %. В фотоэлементах из серни-

стого таллия кпд приближается к 1 %. При ярком освещении фотогоки здесь достигают 0.1—0.2 А. Но даже кпд в 1 % не дает еще оснований для практического использования солнечной энергии. На 1 м² поверхности солнце дает до 1 кВт мощности; следовательно, фотоэлемент площадью в 1 м² в солнечные дни мог бы создавать ток мощностью в 10 Вт. Этот выход энергии не может оправдать громадной стоимости такого фотоэлемента, соответствующего 1000 обычных элементов.

Но если на данном этапе фотоэлементы не могут быть использованы для превращения солнечной энергии в электрическую, то нельзя отрицать такой возможности в будущем. Дальнейшее развитие фотоэлементов может довести их кпд до нескольких процентов. С другой стороны, стоимость их изготовления и устойчивость по отношению к атмосферным влияниям могут быть настолько улучшены, что фотоэлемент с запорным слоем может оказаться выгодным. Не надо забывать, что количество солнечной энергии чрезвычайно велико: 1 га получает 10 000 кВт мощности, а 5 % от них составляет 500 кВт — энергию, достаточную для большого завода. Несомненно одно, что достижение этой цели потребует еще преодоления громадных трудностей.

Энергетическое использование солнечных лучей — дело будущего. Но и сейчас фотоэлементы широко применяются в технике; звуковое кино осуществляется при помощи фотоэлементов. Возможно, что фотоэлементы с запорным слоем благодаря своей простоте, отсутствию паразитных токов и шумов, отсутствию высоких напряжений получают преимущество перед применяемыми сейчас вакуумными фотоэлементами с вторичным усилением. Далее, фотоэлементы с успехом применяются для всевозможных случаев сигнализации, для автоматического счета, сортировки, контроля производства. Возможно, что они найдут применение также в телевидении и в самых разнообразных измерительных приборах. Первая система передачи изображений А. Корна была основана на внутреннем фотоэффекте селена.

Во многих кристаллах из полупроводников освещение создает фотоэлектродвижущую силу, достигающую нескольких сотых вольта и без запорного слоя, роль которого играет сопротивление самого кристалла.

И. К. Кикоин и М. М. Носков обнаружили, что, помещая такие вещества в сильное магнитное поле, можно

наблюдать эдс, достигающие 20 В, правда, при большом сопротивлении образца и при слабом фототоке. Практического применения эти явления пока не получили.

Мало еще использованы большие термоэлектродвижущие силы, возникающие между двумя полупроводниками с разными температурами. В то время как в металлах 1° разности температур создает эдс порядка сотысячных вольт, в полупроводниках мы получаем до 0.001 В. Знак термоэлектродвижущей силы, как мы уже видели, зависит от механизма проводимости. Соединив два полупроводника с противоположными механизмами тока и нагревая место их соединения, мы получаем сумму эдс.

Термоэлемент является прибором, превращающим тепловую энергию в электрическую. Благодаря неизбежным процессам теплопроводности по тем проводам, которые несут ток, кпд термоэлементов гораздо меньше, чем в тепловых машинах. Термоэлементы из металлов дают не более 1—2 % электроэнергии. Среди полупроводников можно подобрать такие, которые дают до 4 %, и эту величину, по-видимому, можно будет еще увеличить. Даже при кпд в 10 % термоэлементы не могут конкурировать с машинами, но благодаря крайней простоте, отсутствию движущихся частей, компактности для определенных целей термоэлементы могут получить значение не только как измерители температуры и лучистой энергии, но и как источники тока.

Техническое применение полупроводников еще в будущем. Это — один из наиболее молодых и быстро растущих участков технической изобретательности. Наша промышленность уже давно производит выпрямители для целей автоблокировки. Сейчас по разработанному ЛФТИ методу ставится производство сильноточных выпрямителей на сотни и тысячи ампер для электролиза, зарядки аккумуляторов, производства алюминия, магния и для других целей, не требующих высоких напряжений. Ставится производство селеновых выпрямителей, имеющих определенные преимущества при низких температурах и в измерительной аппаратуре. Наконец, в ЛФТИ разработаны новые серно-медные выпрямители с габаритами и стоимостью в десятки раз меньшими, чем у других типов.

Селеновые фотоэлементы производятся в Харькове и Ленинграде в количестве нескольких десятков тысяч в год. Серно-таллиевые фотоэлементы проходят еще стадию испытаний, после чего можно будет приступить к по-

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).