

второго начала термодинамики в обратимой форме. Томсон обошел эту трудность, заметив, что теплопроводность и джоулево тепло являются побочными эффектами, органически не связанными с явлениями Зеебека, Пельтье и Томсона. Теплопроводность и джоулево тепло не влияют на термоэлектрические явления, и по этой причине от них можно совсем отвлечься. Эти соображения, конечно, мало убедительны и лишены доказательной силы. Онзагер позднее указал условия, когда допустимо раздельное рассмотрение обратимых и необратимых процессов. По-видимому, в металлах и полупроводниках эти условия выполняются, по крайней мере приближенно. В пользу этого говорит то обстоятельство, что выводы термодинамической теории Клаузиуса — Томсона в пределах точности измерений согласуются с опытом.

### ЗАДАЧА

Тэт (1831—1901) ввел предположение, что коэффициент Томсона  $\sigma$  пропорционален абсолютной температуре. Показать, что это предположение приводит к формуле Авенариуса для электродвижущей силы  $\mathcal{E}$ .

Решение. Из уравнений (107.9) и (107.10) получаем

$$\frac{d}{dT} \left( T \frac{d\mathcal{E}}{dT} - \mathcal{E} \right) + \sigma_1 - \sigma_2 = 0.$$

Интегрируя это уравнение с учетом справедливости предположения Тэта, приходим к требуемому результату.

## § 108. Выпрямляющее действие контактов полупроводников

1. Контакт двух металлов, полупроводников или металла с полупроводником обладает *выпрямляющим действием*. Это значит, что сопротивление такого контакта зависит от *направления* проходящего через него тока: в одном направлении (*запорном*) оно велико, в противоположном (*пропускном*) — мало. Особенно резко *выпрямляющее действие* выражено на границе дырочного ( $p$ ) и электронного ( $n$ ) полупроводников, когда работа выхода электрона из электронного полупроводника меньше, чем из дырочного. О таком контакте говорят как об *электронно-дырочном* ( $p-n$ )-контакте или *переходе*. Хорошие  $p-n$ -переходы не удастся получить, прижимая один полупроводник к другому, так как из-за шероховатости поверхностей тел соприкосновение всегда будет происходить лишь в нескольких точках, в воздушных зазорах между телами будут образовываться пленки окислов и т. п. Поэтому для получения хороших  $p-n$ -переходов в пластинку чистого полупроводника вводят две примеси — донорную и акцепторную (см. § 100). Первая сообщает полупроводнику *электронную*, а вторая — *дырочную проводимость*. Например, если пластинка сделана из германия или кремния, то в качестве донора можно взять элемент пятой группы периодической системы (фосфор, мышьяк и пр.), а в ка-

честве акцептора — третьей (бор, индий и пр.). В результате в одной половине пластинки возникает электронная, в другой — дырочная проводимость, а между обеими половинами — тонкий переходный слой. Это и есть  $p-n$ -переход.

2. Рассмотрим теперь физические явления в электронно-дырочных контактах, с которыми связана односторонняя проводимость последних. Допустим сначала, что контакта между полупроводниками нет. Предположим, что оба полупроводника сделаны из одного и того же материала. Однако к одному из них добавлено

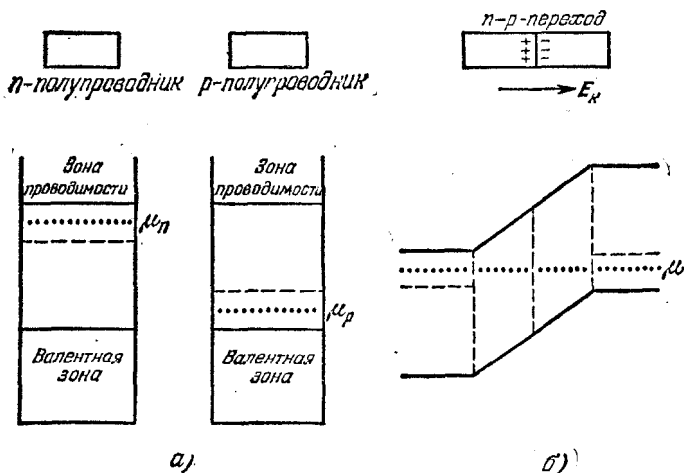


Рис. 269.

небольшое количество донорной, а к другому — акцепторной примесей. В соответствии с этим границы энергетических зон в обоих полупроводниках совпадают (рис. 269, а). Но примесные (промежуточные) уровни в запрещенной зоне расположены в электронном полупроводнике *вблизи зоны проводимости*, а в дырочном — *вблизи валентной зоны*. Благодаря этому средняя энергия электрона проводимости и уровень химического потенциала  $\mu$  в первом полупроводнике будут выше, а работа выхода — меньше, чем во втором полупроводнике.

Допустим теперь, что полупроводники приведены в контакт друг с другом (рис. 269, б). Так как работа выхода электрона из электронного полупроводника меньше, чем из дырочного, то электроны в большем количестве будут переходить из первого во второй. Электронный полупроводник начнет заряжаться положительно, а дырочный — отрицательно. В тонком слое между ними появится контактное электрическое поле, направленное от электронного к дырочному полупроводнику. В результате этого энергетические

уровни электронного полупроводника начнут опускаться, а дырочного — подниматься. Контактное электрическое поле будет тормозить переход электронов из электронного в дырочный полупроводник. Процесс перехода электронов прекратится, когда уровни химического потенциала в обоих полупроводниках сделаются одинаковыми. Слева от переходной области энергетические уровни донорных примесей будут на тех же расстояниях от зоны проводимости, что и до контакта, а справа эти расстояния возрастут. Вследствие этого переходная область, в особенности ее правая граница, будет сильно обеднена электронами проводимости. Аналогично, переходная область, и в особенности ее левая граница, будет обеднена и дырками. Можно сказать, что контактное электрическое поле  $E_k$  выталкивает электроны проводимости в глубь электронного, а дырки — в глубь дырочного полупроводника. В результате переходный слой на границе обоих полупроводников оказывается сильно обедненным обоими носителями тока: и электронами, и дырками. Поэтому, несмотря на малую толщину (порядка  $10^{-4}$ — $10^{-8}$  см), электрическое сопротивление переходного слоя оказывается во много раз больше суммарного сопротивления обоих контактирующих полупроводников.

3. Допустим теперь, что наложено внешнее электрическое поле  $E$ , направленное от электронного полупроводника к дырочному, т. е. одинаково с контактным полем  $E_k$ . Ввиду большого сопротивления переходного слоя практически вся разность потенциалов, соответствующая наложенному полю, сосредоточится внутри переходного слоя, так что поле  $E$  внутри слоя может быть очень сильным. Такое поле усиливает контактное поле  $E_k$  и тем самым еще больше уменьшает концентрацию дырок и электронов проводимости в переходном слое. Сопротивление последнего еще больше возрастет. Практически ток через контакт не пойдет. Не то будет, когда внешнее поле  $E$  направлено против контактного поля  $E_k$ . Достаточно уже небольшого поля  $E$ , чтобы оно компенсировало поле  $E_k$ . Тогда электроны проводимости и дырки будут беспрепятственно проникать в переходный слой, и сопротивление последнего практически исчезнет. Ток через контакт будет проходить. Если ток переменный, то в зависимости от его направления и силы сопротивление контакта становится пульсирующим, изменяясь от нуля практически до бесконечности. В соответствии с этим ток через контакт будет проходить только тогда, когда он направлен от дырочного полупроводника к электронному. На этом принципе работают полупроводниковые выпрямители.

К этому надо добавить, что в любом полупроводнике, помимо основных носителей тока, имеется относительно малое количество неосновных (см. конец § 100). В электронных полупроводниках, помимо электронов проводимости, есть и дырки, а в дырочных — электроны. Очевидно, если внешнее поле  $E$  направлено от элек-

тронного к дырочному полупроводнику, то оно делает беспрепятственным проникновение в переходный слой неосновных носителей. В этом случае через контакт не идет ток основных носителей, но идет ток неосновных носителей. Однако, ввиду относительно малой концентрации последних, этот ток также мал.

4. Полупроводниковые выпрямители с успехом заменяют выпрямительные устройства старых систем. Эти выпрямители отличаются высокими к. п. д., малыми габаритами и невысокой стоимостью. Существует много различных систем полупроводниковых выпрямителей. Не останавливаясь на этом вопросе, опишем кратко устройство одного из типов германиевого выпрямителя. Он состоит из пластинки германия с электронной проводимостью, в которую с одной стороны вварен шарик индия, а с другой — шарик олова. Оловянный шарик служит только электродом для включения выпрямителя в цепь. Индий же играет принципиальную роль, сообщая германию дырочную проводимость. При нагревании в процессе сварки индий диффундирует в германий, вследствие чего вблизи индиевого электрода возникает дырочная проводимость, а на некоторой глубине — выпрямляющий  $p-n$ -переход. Такие выпрямители при площади контакта  $\sim 1 \text{ мм}^2$  и напряжении 1 В пропускают токи больше 1 А, причем пропускаемые токи обратного направления обычно не превышают нескольких микроампер. При площади контакта в несколько квадратных сантиметров германиевые и кремниевые выпрямители могут пропускать токи в несколько сотен ампер, хотя они свободно умещаются на ладони руки. Их пробойные напряжения достигают многих сотен и даже нескольких тысяч вольт.

Полупроводниковые выпрямители, как и все полупроводниковые приборы, применяются не только для выпрямления обычных технических токов. В частности, полупроводниковые приборы нашли широкие применения в радиотехнике, для выпрямления и преобразования электрических колебаний высокой частоты, для усиления и генерации электрических колебаний, в счетно-решающих электронных устройствах и т. п. Они в значительной степени вытеснили из радиотехники электронные лампы. Без них было бы невозможно решение множества научно-технических задач. Применение полупроводников — необъятная область, которой посвящены специальные курсы. Однако в задачу настоящей книги не входит изложение практических применений полупроводников.