

§ 113 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

В чем главное отличие полупроводников от проводников? Какие особенности строения полупроводников открыли им доступ во все радиоустройства, телевизоры и ЭВМ?

Отличие проводников от полупроводников особенно проявляется при анализе зависимости их электропроводности от температуры. Исследования показывают, что у ряда элементов (кремний, германий, селен и др.) и соединений (PbS, CdS, GaAs и др.) удельное сопротивление с увеличением температуры не растет, как у металлов

(см. рис. 16.3), а, наоборот, чрезвычайно резко уменьшается (рис. 16.4). Такие вещества и называют **полупроводниками**.

Из графика, изображенного на рисунке, видно, что при температурах, близких к абсолютному нулю, удельное сопротивление полупроводников очень велико. Это означает, что при низких температурах полупроводник ведет себя как диэлектрик. По мере повышения температуры его удельное сопротивление быстро уменьшается.

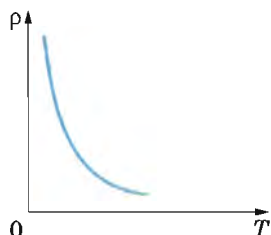


Рис. 16.4

Строение полупроводников. Для того чтобы включить транзисторный приемник, знать ничего не надо. Но чтобы его создать, надо было знать очень много и обладать незаурядным талантом. Понять же в общих чертах, как работает транзистор, не так уж и трудно. Сначала необходимо познакомиться с механизмом проводимости в полупроводниках. А для этого придется вникнуть в *природу связей*, удерживающих атомы полупроводникового кристалла друг возле друга.

Для примера рассмотрим кристалл кремния.

Кремний — четырехвалентный элемент. Это означает, что во внешней оболочке его атома имеется четыре электрона, сравнительно слабо связанных с ядром. Число ближайших соседей каждого атома кремния также равно четырем. Схема структуры кристалла кремния изображена на рисунке 16.5.

Взаимодействие пары соседних атомов осуществляется с помощью парноэлектронной связи, называемой **ковалентной связью**. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, которые отделяются от атома, которому они принадлежат (коллективируются кристаллом) и при своем движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами. Их отрицательный заряд удерживает положительные ионы кремния друг возле друга.

Не надо думать, что коллективированная пара электронов принадлежит лишь двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, и любой валентный электрон может двигаться по одной из них. Дойдя до со-

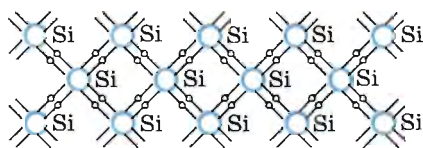


Рис. 16.5

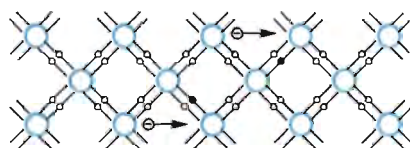


Рис. 16.6

седнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Валентные электроны принадлежат всему кристаллу.

Парноэлектронные связи в кристалле кремния достаточно прочны и при низких температурах не разрываются. Поэтому кремний при низкой температуре не проводит электрический ток. Участвующие в связи атомы валентные электроны являются как бы «цементирующим раствором», удерживающим кристаллическую решетку, и внешнее электрическое поле не оказывает заметного влияния на их движение. Аналогичное строение имеет кристалл германия.

Электронная проводимость. При нагревании кремния кинетическая энергия частиц повышается, и наступает разрыв отдельных связей. Некоторые электроны покидают свои «проторенные пути» и становятся свободными, подобно электронам в металле. В электрическом поле они перемещаются между узлами решетки, создавая электрический ток (рис. 16.6).

Проводимость полупроводников, обусловленную наличием у них свободных электронов, называют **электронной проводимостью**. При повышении температуры число разорванных связей, а значит, и свободных электронов увеличивается. При нагревании от 300 до 700 К число свободных носителей заряда увеличивается от 10^{17} до 10^{24} $1/\text{м}^3$. Это приводит к уменьшению сопротивления.

Дырочная проводимость. При разрыве связи между атомами полупроводника образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют **дыркой**. В дырке имеется избыточный положительный заряд по сравнению с остальными, не разорванными связями (см. рис. 16.6).

Положение дырки в кристалле не является неизменным. Непрерывно происходит следующий процесс. Один из электронов, обеспечивающих связь атомов, перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает здесь парноэлектронную связь, а там, откуда перескочил этот электрон, образуется новая дырка. Таким образом, дырка может перемещаться по всему кристаллу.

Если напряженность электрического поля в образце равна нулю, то перемещение дырок, равноценное перемещению положительных зарядов, происходит беспорядочно и поэтому не создает электрического тока. При наличии электрического поля возникает упорядоченное перемещение дырок,

и, таким образом, к электрическому току свободных электронов добавляется электрический ток, связанный с перемещением дырок. Направление движения дырок противоположно направлению движения электронов (рис. 16.7).

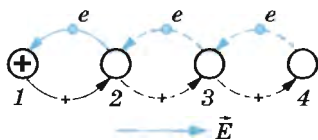


Рис. 16.7

В отсутствие внешнего поля на один свободный электрон (-) приходится одна дырка (+). При наложении поля свободный электрон смещается против напряженности поля. В этом направлении перемещается также один из связанных электронов. Это выглядит как перемещение дырки в направлении поля.

Итак, в полупроводниках имеются носители заряда двух типов: электроны и дырки. Поэтому полупроводники обладают не только электронной, но и **дырочной проводимостью**.

Мы рассмотрели механизм проводимости чистых полупроводников. Проводимость при этих условиях называют **собственной проводимостью** полупроводников.

Проводимость чистых полупроводников (собственная проводимость) осуществляется перемещением свободных электронов (электронная проводимость) и перемещением связанных электронов на вакантные места парноэлектронных связей (дырочная проводимость).



1. Какую связь называют ковалентной!
2. В чем состоит различие зависимости сопротивления полупроводников и металлов от температуры!
3. Какие подвижные носители зарядов имеются в чистом полупроводнике!
4. Что происходит при встрече электрона с дыркой!

§ 114 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРИМЕСЕЙ

Проводимость полупроводников чрезвычайно сильно зависит от примесей. Именно эта зависимость сделала полупроводники тем, чем они стали в современной технике.

Собственная проводимость полупроводников обычно невелика, так как мало число свободных электронов; например, в германии при комнатной температуре $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В то же время число атомов германия в 1 см^3 порядка 10^{23} .

Таким образом, число свободных электронов составляет примерно одну десятиллиардную часть от общего числа атомов.

Существенная особенность полупроводников состоит в том, что в них при наличии примесей наряду с собственной проводимостью возникает дополнительная — **примесная проводимость**. Изменяя концентрацию примеси, можно значительно изменять число носителей заряда того или иного знака. Благодаря этому можно создавать полупро-

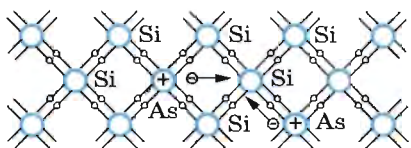


Рис. 16.8

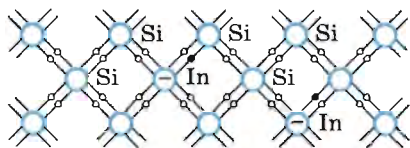


Рис. 16.9

водники с преимущественной концентрацией одного из носителей тока электронов или дырок. Эта особенность полупроводников открывает широкие возможности для их практического применения.

Донорные примеси. Оказывается, что при наличии примесей, например атомов мышьяка, даже при очень малой их концентрации, число свободных электронов возрастает во много раз. Происходит это по следующей причине. Атомы мышьяка имеют пять валентных электронов. Четыре из них участвуют в создании ковалентной связи данного атома с окружающими, например с атомами кремния. Пятый валентный электрон оказывается слабо связанным с атомом. Он легко покидает атом мышьяка и становится свободным (рис. 16.8).

При добавлении одной десятиллионной доли атомов мышьяка концентрация свободных электронов становится равной 10^{16} см⁻³. Это в тысячу раз больше концентрации свободных электронов в чистом полупроводнике.

Примеси, легко отдающие электроны и, следовательно, увеличивающие число свободных электронов, называют **донорными (отдающими) примесями**.

Поскольку полупроводники, имеющие донорные примеси, обладают большим числом электронов (по сравнению с числом дырок), их называют полупроводниками *n*-типа (от английского слова negative — отрицательный).

В полупроводнике *n*-типа электроны являются *основными* носителями заряда, а дырки — *неосновными*.

Акцепторные примеси. Если в качестве примеси использовать индий, атомы которого трехвалентны, то характер проводимости полупроводника меняется. Теперь для образования нормальных парноэлектронных связей с соседями атому индия недостает одного электрона. В результате образуется дырка. Число дырок в кристалле равно числу атомов примеси (рис. 16.9). Такого рода примеси называют **акцепторными (принимающими)**.

При наличии электрического поля дырки перемещаются по полю и возникает дырочная проводимость. Полупроводники с преобладанием дырочной проводимости над электронной называют полупроводниками *p*-типа (от английского слова positive — положительный). Основными носителями заряда в полупроводнике *p*-типа являются дырки, а неосновными — электроны.

Донорные примеси отдают лишние валентные электроны: образуется полупроводник n -типа. Акцепторные примеси создают дырки: образуется полупроводник p -типа.



1. Почему сопротивление полупроводников сильно зависит от наличия примесей?
2. Какие носители заряда являются основными в полупроводнике с акцепторной примесью?
3. Какую примесь надо ввести в полупроводник, чтобы получить полупроводник n -типа?

§ 115

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК ЧЕРЕЗ КОНТАКТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ p - И n -ТИПОВ

Наиболее интересные явления происходят при контакте полупроводников n - и p -типов. Эти явления используются в большинстве полупроводниковых приборов.

На рисунке 16.10 изображена схема полупроводника, правая часть которого содержит донорные примеси и поэтому является полупроводником n -типа, а левая — акцепторные примеси и представляет собой полупроводник p -типа; между ними — зона перехода — зона, обедненная зарядами. В ней происходит рекомбинация электронов и дырок. Электроны изображены голубыми кружочками, дырки — серыми. Контакт двух полупроводников называют p — n - или n — p -переходом.

При образовании контакта электроны частично переходят из полупроводника n -типа в полупроводник p -типа, а дырки — в обратном направлении. В результате полупроводник n -типа заряжается положительно, а p -типа — отрицательно. Диффузия прекращается после того, как электрическое поле, возникающее в зоне перехода, начинает препятствовать дальнейшему перемещению электронов и дырок.

Включим полупроводник с p — n -переходом в электрическую цепь (рис. 16.11). Подключим сначала батарею так, чтобы потенциал полупроводника p -типа был положительным, а n -типа — отрицательным. При этом ток через p — n -переход со-

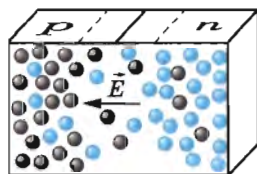


Рис. 16.10

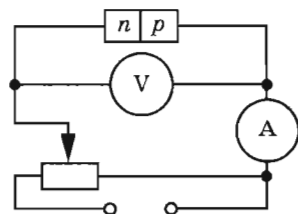


Рис. 16.11

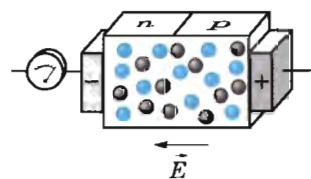


Рис. 16.12

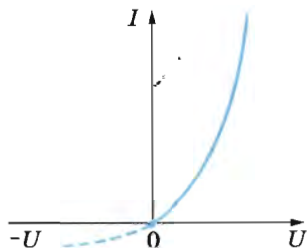


Рис. 16.13

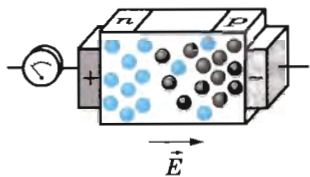


Рис. 16.14

здается основными носителями: из области n в область p — электронами, а из области p в область n — дырками (рис. 16.12).

Вследствие этого проводимость всего образца велика, а сопротивление мало.

Рассмотренный здесь переход называют **прямым**. Зависимость силы тока от разности потенциалов — вольт-амперная характеристика прямого перехода — изображена на рисунке 16.13 сплошной линией.

Изменим теперь полярность подключения батареи. Тогда при той же разности потенциалов сила тока в цепи окажется значительно меньше, чем при прямом переходе. Это обусловлено следующим. Элек-

троны через контакт идут теперь из области p в область n , а дырки — из области n в область p . Но ведь в полупроводнике p -типа мало свободных электронов, а в полупроводнике n -типа мало дырок. Теперь переход через контакт осуществляется неосновными носителями, число которых мало (рис. 16.14). Вследствие этого проводимость образца оказывается незначительной, а сопротивление — большим. Образуется так называемый запирающий слой. Такой переход называют **обратным**. Вольт-амперная характеристика обратного перехода изображена на рисунке 16.13 штриховой линией.

Таким образом, p — n -переход можно использовать для выпрямления электрического тока. Такое устройство называется полупроводниковым диодом.

Полупроводниковые диоды изготавливают из германия, кремния, селена и других веществ.

Рассмотрим, как создают p — n -переход, используя германий, обладающий проводимостью n -типа, с небольшой добавкой донорной примеси. Этот переход не удастся получить путем механического соединения двух полупроводников с различными типами проводимости, так как при этом получается слишком большой зазор между полупроводниками. Толщина же p — n -перехода должна быть не больше межатомных расстояний, поэтому в одну из поверхностей образца вплавляют индий. Для создания полупроводникового диода полупроводник с примесью p -типа, содержащий атомы индия, нагревается до высокой температуры. Пары примеси n -типа (например, мышьяка) осаждают на поверхность кристалла. Вследствие диффузии они внедряются

в кристалл, и на поверхности кристалла с проводимостью *p*-типа образуется область с электронным типом проводимости (рис. 16.15).

Для предотвращения вредных воздействий воздуха и света кристалл германия помещают в герметичный металлический корпус.

Схематическое изображение диода приведено на рисунке 16.16. Полупроводниковые выпрямители обладают высокой надежностью и имеют большой срок службы. Однако они могут работать лишь в ограниченном интервале температур (от -70 до 125 °С).

p—*n*-Переход по отношению к току оказывается несимметричным: в прямом направлении сопротивление перехода значительно меньше, чем в обратном.

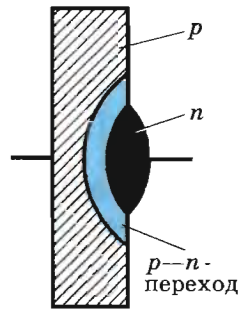


Рис. 16.15

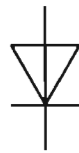


Рис. 16.16

Свойства *p*—*n*-перехода используют для выпрямления переменного тока. На протяжении половины периода изменения тока через переход, когда потенциал полупроводника *p*-типа положителен, ток свободно проходит через *p*—*n*-переход. В следующую половину периода ток практически равен нулю.



1. Что происходит в контакте двух проводников *n*- и *p*-типов?
2. Что такое запирающий слой?
3. Какой переход называют прямым?
4. Для чего служит полупроводниковый диод?

§ 116 ТРАНЗИСТОРЫ

Транзистор¹ — хитроумный прибор. Понять принципы работы транзистора нелегко, но ведь его сумели изобрести! Надеемся, что вы сможете понять, как он работает, даже по краткому описанию.

Рассмотрим один из видов транзисторов из германия или кремния с введенными в них донорными и акцепторными примесями. Распределение примесей таково, что создается очень тонкая (толщиной порядка нескольких микрон) прослойка полупроводника *n*-типа между двумя слоями полупроводника *p*-типа (рис. 16.17). Эту тонкую прослойку называют **основанием**, или **базой**.

¹ От английских слов transfer — переносить, resistor — сопротивление.

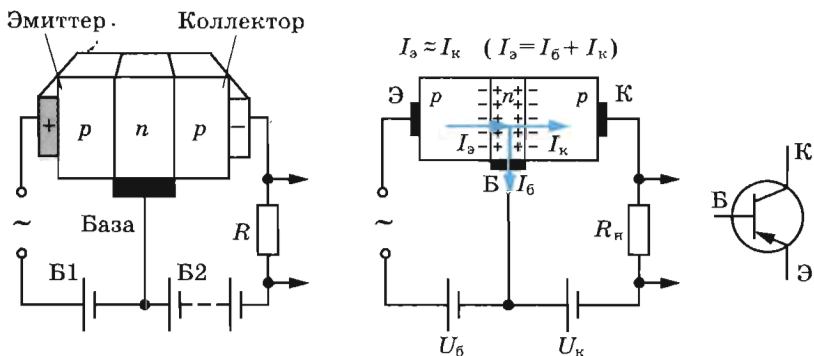


Рис. 16.17

В кристалле образуются два $p-n$ -перехода, прямые направления которых противоположны. Три вывода от областей с различными типами проводимости позволяют включать транзистор в схему, изображенную на рисунке 16.17. В данной схеме левый $p-n$ -переход является *прямым* и отделяет базу от области с проводимостью p -типа, называемую **эмиттером**. Если бы не было правого $p-n$ -перехода, в цепи эмиттер — база существовал бы ток, зависящий от напряжения источников (батареи Б1 и источника переменного напряжения) и сопротивления цепи, включая малое сопротивление прямого перехода эмиттер — база.

Батарея Б2 включена так, что правый $p-n$ -переход в схеме (см. рис. 16.17) является *обратным*. Он отделяет базу от правой области с проводимостью p -типа, называемой **коллектором**. Если бы не было левого $p-n$ -перехода, сила тока в цепи коллектора была бы близка к нулю, так как сопротивление обратного перехода очень велико. При существовании же тока в левом $p-n$ -переходе появляется ток и в цепи коллектора, причем сила тока в коллекторе лишь немного меньше силы тока в эмиттере¹.

Это объясняется следующим. При создании напряжения между эмиттером и базой основные носители полупроводника p -типа (дырки) проникают в базу, где они являются уже *неосновными носителями*. Поскольку толщина базы очень мала и число основных носителей (электронов) в ней невелико, попавшие в нее дырки почти не объединяются (не рекомбинируют) с электронами базы и проникают в коллектор за счет диффузии. Правый $p-n$ -переход закрыт для основных носителей заряда базы — электронов, но не для дырок. В коллекторе дырки увлекаются электри-

¹ Если на эмиттер подано отрицательное напряжение, то левый $p-n$ -переход будет обратным и ток в цепи эмиттера и в цепи коллектора будет практически отсутствовать.

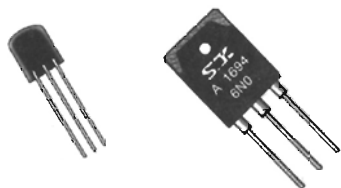
ческим полем и замыкают цепь. Сила тока, ответвляющегося в цепь эмиттера из базы, очень мала, так как площадь сечения базы в горизонтальной (см. рис. 16.17) плоскости много меньше сечения в вертикальной плоскости.

Сила тока в коллекторе, почти равная силе тока в эмиттере, изменяется вместе с током через эмиттер. Сопротивление резистора R мало влияет на ток в коллекторе, и это сопротивление можно сделать достаточно большим. Управляя током эмиттера с помощью источника переменного напряжения, включенного в его цепь, мы получим синхронное изменение напряжения на резисторе R .

При большом сопротивлении резистора изменение напряжения на нем может в десятки тысяч раз превышать изменение напряжения сигнала в цепи эмиттера. Это означает усиление напряжения. Поэтому на нагрузке R можно получить электрические сигналы, мощность которых во много раз превосходит мощность, поступающую в цепь эмиттера.

Применение транзисторов. Современная электроника базируется на микросхемах и микропроцессорах, включающих в себя колоссальное число транзисторов. Компьютеры, составленные из микросхем и микропроцессоров, фактически изменили окружающий человека мир. В настоящее время не существует ни одной области человеческой деятельности, где компьютеры не служили бы активными помощниками человека. Например, в космических исследованиях или высокотехнологичных производствах работают микропроцессоры, уровень организации которых соответствует искусственному интеллекту.

Транзисторы (рис. 16.18, 16.19) получили чрезвычайно широкое распространение в современной технике. Они заменяют электронные лампы в электрических цепях научной, промышленной и бытовой аппаратуры. Портативные радиоприемники, использующие такие приборы, в обиходе называются транзисторами. Преимуществом транзисторов (так же как и полупроводниковых диодов) по сравнению с электронными лампами является прежде всего отсутствие накаливаемого катода, потребляющего значи-



$I \approx 0,1 \text{ A}$

$I = 10 \text{ A}$



$I = 50 \text{ A}$



$I \approx 400 \text{ A}$

Рис. 16.18

Рис. 16.19

тельную мощность и требующего времени для его разогрева. Кроме того, эти приборы в десятки и сотни раз меньше по размерам и массе, чем электронные лампы. Работают они при более низких напряжениях.

Свойства p — n -перехода в полупроводниках используются для усиления и генерации электрических колебаний.



1. Почему база транзистора должна быть узкой!
2. Как надо включать в цепь транзистор, у которого база является полупроводником p -типа, а эмиттер и коллектор — полупроводниками n -типа!
3. Почему сила тока в коллекторе почти равна силе тока в эмиттере!

§ 117 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

До открытия уникальных свойств полупроводников в радиотехнике использовались исключительно электронные лампы.

Откачивая газ из сосуда (трубки), можно дойти до такой его концентрации, при которой молекулы газа успевают пролететь от одной стенки сосуда к другой, ни разу не испытав соударений друг с другом. Такое состояние газа в трубке называют **вакуумом**.

Проводимость межэлектродного промежутка в вакууме можно обеспечить только с помощью введения в трубку источника заряженных частиц.

Термоэлектронная эмиссия. Чаще всего действие такого источника заряженных частиц основано на свойстве тел, нагретых до высокой температуры, испускать электроны. Этот процесс называется **термоэлектронной эмиссией**. Его можно рассматривать как испарение электронов с поверхности металла. У многих твердых веществ термоэлектронная эмиссия начинается при температурах, при которых испарение самого вещества еще не происходит. Такие вещества и используются для изготовления катодов.

Односторонняя проводимость. Явление термоэлектронной эмиссии приводит к тому, что нагретый металлический электрод, в отличие от холодного, непрерывно испускает электроны. Электроны образуют вокруг электрода **электронное облако**. Электрод заряжается положительно, и под влиянием электрического поля заряженного облака электроны из облака частично возвращаются на электрод.

В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод в секунду, равно числу электронов, возвратившихся на электрод за это время. Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.