

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

**И**спользование полупроводников в электронике прошло длительный путь — от первого детектора на кристалле сернистого свинца до современных микропроцессоров. Такой результат достигнут благодаря успехам технологий, которая опирается на физическую электронику. В наши дни развитие микро- и наноэлектроники непрерывно стимулируется успехами в области физики полупроводников и в области технологий производства новых полупроводниковых структур.

Физической электроникой называют науку, которая занимается изучением и использованием потоков движущихся электронов, порождающих электрический ток, и так принято называть науку, изучающую электронные свойства некоторых твердых тел, кроме того, методы получения материалов с такими характеристиками, которые позволяют создавать устройства для передачи и накопления электронов. При этом рассматриваются не любые материалы, а лишь полупроводники, характеристики которых интересны с точки зрения технических приложений.

Дисциплина «Физические основы микро- и наноэлектроники» относится к группе естественно-научных дисциплин и ее целью является изучение физики электрических явлений в твердых телах. Особое внимание уделяется основам зонной теории твердых тел, физическим механизмам и математическому описанию основных (электрических, тепловых, оптических и магнитных) свойств равновесных, неравновесных полупроводников, особенностям контактов различных веществ, поверхностным состояниям твердых тел; рассматриваются различные физические эффекты, а также их применение в различных приборах и элементах. Пособие охватывает только часть материала, изучаемого в рамках дисциплины «Физические основы микро- и наноэлектроники».

---

# 1. ФИЗИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И ЕГО КОМПОНЕНТЫ

---

## 1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

---

Для однозначности толкования понятия «физический эффект» (ФЭ) принято следующее определение: физический эффект — это закономерность проявления результатов взаимодействия объектов материального мира, осуществляемого посредством физических полей. При этом закономерность проявления характеризуется последовательностью и повторяемостью при идентичности взаимодействия.

Все физические поля и их модификации будем рассматривать как воздействие в отрыве от тех материальных объектов, от которых они исходят.

Воздействие всегда направлено на некоторый материальный объект (в дальнейшем — объект), которым может быть отдельный элемент или совокупность взаимосвязанных элементов, образующих определенную структуру. Так, к объектам могут быть отнесены: системы из макротел (в т. ч. детали приборов, механизмов и др.), макротела (твердое тело, жидкость, кристалл и т. д.), молекула, атом, части атомов и молекул, частицы и т. д.

Результаты воздействия — это эффекты, проявляющиеся на объектах (или в окружающем их пространстве), на которые направлены определенные воздействия. Результатами воздействия являются те же физические поля, которые относятся к воздействиям. Этим обуславливается взаимосвязь между ФЭ, которая используется в объектах техники. К результатам воздействия относятся также измерения параметров объектов (размеров, формы, диэлектрической проницаемости и т. д.). При постоянстве условий взаимодействия и свойств объекта проявляются одни и те же результаты воздействия.

Схематическое изображение ФЭ (рис. 1) позволяет наглядно представлять физические процессы, происходящие при взаимодействии материальных объектов, в т. ч. в объектах техники.

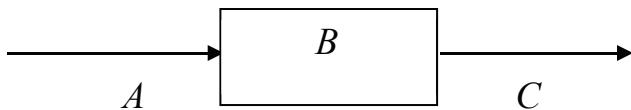


Рис. 1. Структурная схема физического эффекта;

*A – воздействие; B – физический объект, на который оказывается воздействие;  
C – результат воздействия (эффект)*

Анализ информации об известных ФЭ позволил выявить следующие закономерности их проявления.

- 1) При одном воздействии на объект может проявляться несколько результатов воздействия. Их число зависит от структуры физического объекта. Чем менее сложен по своей структуре объект, тем меньшее число результатов воздействия на нем проявляется. Изменяя число и состав структурных элементов, при заданном воздействии можно получить необходимые результаты воздействия.
- 2) На один объект может быть оказано несколько воздействий. Их можно подразделить на основные и дополнительные. Основным воздействием на объект является такое, результат от которого представляет другое, отличное от воздействия, физическое поле. Дополнительное воздействие — такое, которое приводит лишь к количественному изменению результата, получаемого от основного воздействия. Дополнительными воздействиями могут являться постоянно действующие воздействия, например гравитационное и тепловое поля, а также воздействия, оказываемые объектами окружающей среды. Так, на ФЭ возникновения магнитного поля при протекании электрического тока, где воздействием является электрическое поле, может быть дополнительно оказано воздействие, например, магнитным полем, что вызовет изменение электрического сопротивления проводника (магниторезистивный эффект). Дополнительные воздействия не могут вызвать данного результата без основного воздействия.
- 3) На одном объекте могут проявляться несколько ФЭ. Если какое-либо воздействие приводит к новому результату воздействия,

то налицо проявление на одном объекте двух разных ФЭ. Эта особенность является основой для многофункционального использования элементов объектов техники. Любые два ФЭ или более, проявляющиеся на одном объекте, оказывает влияние друг на друга. Это влияние объясняется участием структурных элементов объекта в проявлении обоих ФЭ.

- 4) Значение результата воздействия можно регулировать; оно обусловливается следующими факторами: количественным изменением воздействия, введением дополнительных воздействий, введением еще одного основного воздействия, изменением структуры объекта, изменением параметров объекта. Это свойство лежит в основе технической реализации таких функций объектов техники, как усиление, ослабление, преобразование, модуляция, выравнивание, проводимость, непроводимость и др.
- 5) При постоянстве условий воздействия и свойств объекта проявляются одни и те же результаты воздействия, одни и те же значения их параметров. Эта закономерность обусловлена стабильностью структуры объекта, на который оказывается воздействие, и стабильностью свойств элементов структуры.

## 1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

---

Физический эффект — это реальное явление, происходящее в физической системе и характеризующееся причинно-следственной связью между двумя или несколькими величинами. Уточним структуру физического эффекта.

В электронике чаще всего рассматриваются следующие воздействия: электрическое, механическое, магнитное, тепловое, оптическое, радиационное и акустическое.

Физические объекты электроники многообразны и могут быть классифицированы по ряду признаков, например:

- 1) по агрегатному состоянию — газ, жидкость, твердое тело;
- 2) по составу вещества — простые (германий, кремний, селен и др.) и составные (антимонид индия, арсенид галлия, карбид кремния и др.);

- 3) по структуре — однородные, неоднородные и контакты. Среди контактов можно выделить следующие — проводник-проводник, полупроводник-полупроводник (гомопереходы и гетеропереходы), металл-полупроводник, металл-диэлектрик-полупроводник;
- 4) по величине электропроводности — проводник, полупроводник, диэлектрик, сверхпроводник;
- 5) по величине магнитной проницаемости — ферромагнетики, парамагнетики, диамагнетики, ферримагнетики;
- 6) по виду вольтамперной характеристики — объекты с линейной, параболической, экспоненциальной,  $N$ -образной,  $S$ -образной характеристикой и т. д.

Результаты воздействия или эффекты, встречающиеся в электронике, также многообразны. Перечислим некоторые из них: изменения агрегатного состояния, электропроводности, силы и плотности тока, напряжения, магнитной индукции, магнитной проницаемости, температуры, давления; перемещение  $\Delta x$ , излучение, возникновение акустических волн, появление потока частиц, возникновение радиочастотных колебаний и т. д.

---

## 2. Однородный полупроводник

---

### 2.1. Собственный полупроводник

---

#### *Классификация веществ*

**В**се вещества по электрофизическим свойствам могут быть разделены на три больших класса: проводники, полупроводники и диэлектрики. Наиболее просто, казалось бы, классифицировать вещества по удельной электрической проводимости  $\sigma$  (или по удельному электрическому сопротивлению  $\rho$ ). В создании электрического тока могут принимать участие только подвижные носители электрических зарядов. Поэтому электропроводность вещества тем больше, чем больше в единице объема этого вещества находится подвижных носителей электрических зарядов. В металлах практически все валентные электроны свободны, что и обуславливает их высокую электропроводность.

При  $T = 300$  К у проводников удельная электрическая проводимость имеет значения  $10^4$ – $10^6$  См/см (напомним, что 1 См/см есть проводимость 1 см<sup>3</sup> вещества), у диэлектриков она меньше —  $10^{-10}$  См/см, а у полупроводников ее значения находятся в пределах  $10^{-10}$ – $10^4$  См/см. Как видно, для полупроводников характерен очень широкий диапазон удельной проводимости. Поэтому значения удельной проводимости не могут служить в качестве однозначного критерия для классификации веществ.

Характерной особенностью полупроводников является ярко выраженная температурная зависимость удельной электрической проводимости. С повышением температуры, она, как правило, увеличивается на 5–6 % на градус, в то время как у металлов удельная электрическая

проводимость с повышением температуры падает на десятые доли процента на градус. Кроме того, удельная электрическая проводимость полупроводника также резко возрастает при введении в него незначительного количества примеси, а металлических сплавов — уменьшается.

Итак, полупроводник — это вещество, электропроводность которого занимает промежуточное положение между проводниками и диэлектриками; основным свойством этого вещества является сильная зависимость удельной проводимости от воздействия внешних факторов (температура, концентрация примесей, световое и ионизирующее излучение и др.). Большинство известных веществ относится именно к полупроводникам. К полупроводникам относятся элементы четвертой группы периодической таблицы Менделеева, а также химические соединения элементов третьей и пятой групп типа  $A^{III} B^V$  (GaAs, InSb) и второй и шестой групп типа  $A^{II} B^{VI}$  (CdS, BbS, CdFe). Ведущее место среди полупроводниковых материалов, используемых в полупроводниковой электронике, занимают кремний, германий и арсенид галлия GaAs.

Собственный полупроводник или полупроводник *i*-типа (от англ. *intrinsic* — собственный) — это идеально чистый полупроводник, т. е. влиянием примеси на его свойства можно пренебречь.

### *Модель ковалентной связи*

Полупроводники, как правило, — твердые тела с регулярной кристаллической структурой — монокристаллы. Их кристаллическая решетка состоит из множества повторяющихся и примыкающих друг к другу элементарных ячеек той или иной формы и размера.

Собственные полупроводники имеют кристаллическую структуру, характеризующуюся периодическим расположением атомов в узлах пространственной кристаллической решетки. Взаимное притяжение атомов кристаллической решетки осуществляется за счет ковалентной связи, т. е. общей пары валентных электронов, вращающихся по одной орбите вокруг этих атомов. Согласно принципу Паули, общую орбиту могут иметь только два электрона с различными спинами, поэтому число ковалентных связей атома определяется его валентностью.

Рассмотрим модель ковалентных связей на примере германия или кремния (четвертая группа периодической таблицы Менделеева). Они образуют кубическую решетку типа алмаза, которая состоит из тетра-

эдров; расстояние между смежными атомами около 0,5 нм. В такой решетке каждый атом взаимно связан с четырьмя соседними атомами ковалентными связями (рис. 2), в результате влияния которых происходит обобществление валентных электронов и образование устойчивых электронных оболочек, состоящих из восьми электронов.

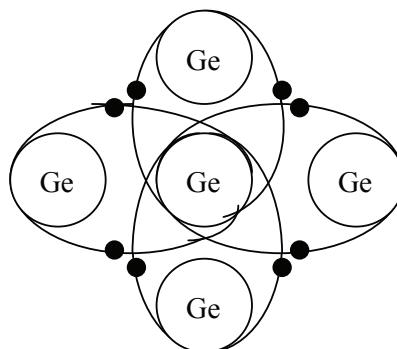


Рис. 2. Ковалентная связь между атомами германия

Как видно на рисунке, вокруг каждой пары атомов движутся по орбитам 2 валентных электрона, показанных жирными точками. В условном плоскостном изображении такой кристаллической решетки (рис. 3) ковалентные связи показаны в виде прямых линий, а электроны — по-прежнему в виде точек (иногда для упрощения электроны вообще не показывают).

При температуре абсолютного нуля ( $T = 0^\circ \text{ K}$ ) все валентные электроны находятся в ковалентных связях, следовательно, свободные носители заряда отсутствуют и полупроводник подобен диэлектрику.

При повышении температуры или при облучении полупроводника лучистой энергией, валентный электрон может выйти из ковалентной связи и стать свободным носителем электрического заряда. При этом ковалентная связь становится дефектной, в ней образуется свободное (вакантное) место, которое может занять один из валентных электронов соседней связи, в результате чего вакантное место переместится к другой паре атомов. Перемещение вакантного места внутри кристаллической решетки можно рассматривать как перемещение некоторого фиктивного (виртуального) положительного заряда, величина которого равна заряду электрона. Такой положительный заряд принято называть дыркой (рис. 4).

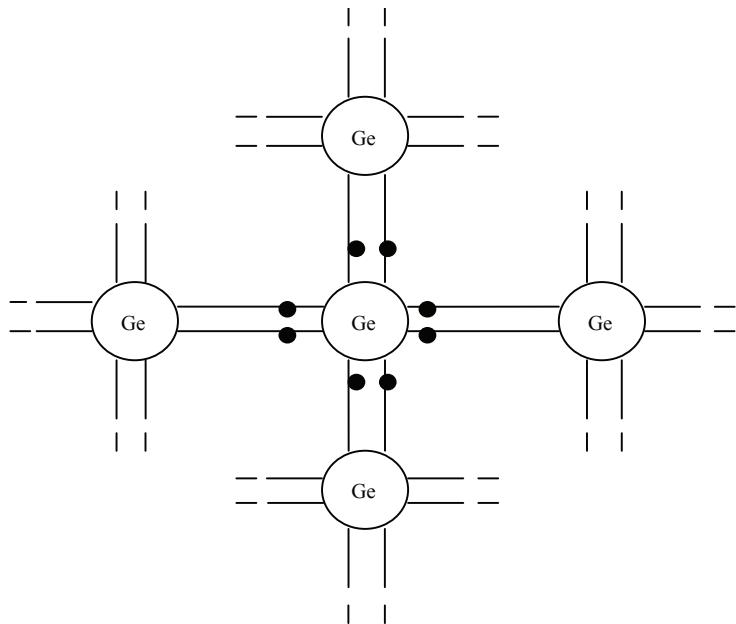


Рис. 3. Плоскостная схема кристаллической решетки германия

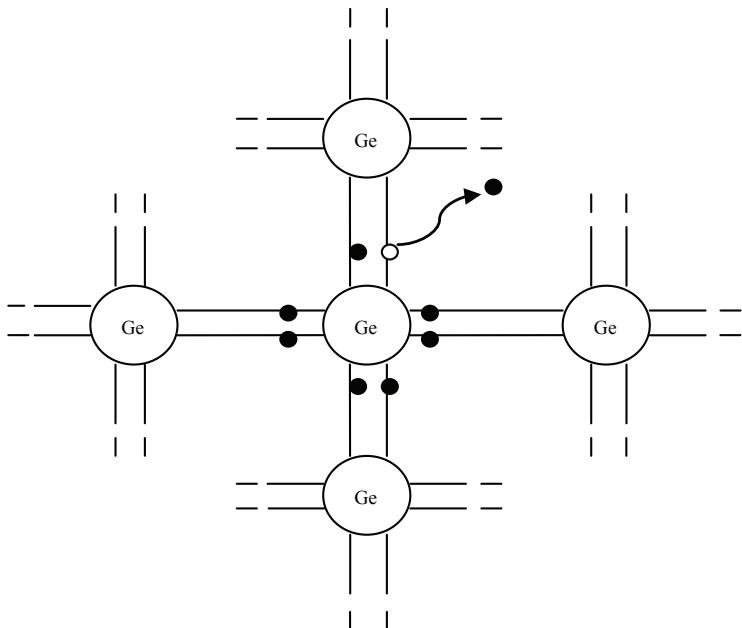


Рис. 4. Возникновение пары электрон — дырка  
в плоскостной модели полупроводника

Один из электронов, участвующих в ковалентной связи, получив дополнительную энергию, становится электроном проводимости, т. е. свободным носителем заряда, и может перемещаться в кристаллической решетке, а его прежнее место теперь свободно. Именно оно и является дыркой, изображенной на рисунке светлым кружком.

Генерация — это явление возникновения пар электрон — дырка при получении атомом полупроводника дополнительной энергии (тепловой, электрической, световой и пр.), превышающей энергию связи электрона с атомом.

Одновременно с процессом генерации протекает процесс рекомбинации носителей, при котором электрон восстанавливает ковалентную связь, таким образом, рекомбинация — явление исчезновения электрона проводимости и дырки проводимости при их встрече.

Совокупность электронов в твердом теле можно уподобить электронному газу, который заключен в «сосуд», образованный внешними гранями кристалла. Наличие в этом «сосуде» множества неподвижных атомов — узлов решетки — приводит к тому, что свойства электронов в твердом теле отличаются от их свойств в свободном пространстве — вакууме. Одно из важнейших отличий состоит в том, что масса электрона в кристалле не совпадает с его массой  $m$  в вакууме. Поэтому в теории твердого тела пользуются понятием эффективной массы  $m^*$ , которая зависит от ряда факторов (полная энергия, направление движения и др.). В табл. 1 приведены относительные эффективные массы носителей, приведенные к массе свободного электрона.

Таблица 1

**Эффективные массы носителей при комнатной температуре**

Эффективная масса	Германий	Кремний	Арсенид галлия	Антимонид индия
$m_n^*/m_0$ электронов	0,22	0,33	0,07	0,013
$m_p^*/m_0$ дырок	0,39	0,55	0,50	0,60

Полупроводники обладают электронной и дырочной электропроводностью, которые не наблюдаются в металлах.

При дырочной электропроводности под влиянием приложенной разности потенциалов перемещаются дырки, что эквивалентно пере-

мещению положительных зарядов. Такой процесс показан на рис. 5, на котором изображено для различных моментов времени несколько атомов, расположенных вдоль полупроводника.

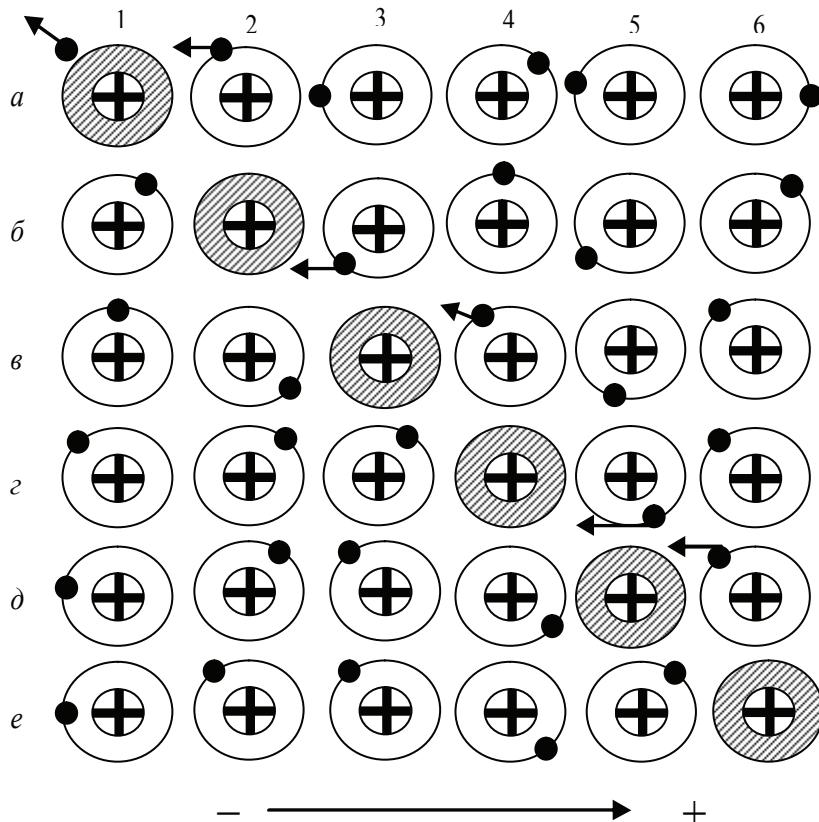


Рис. 5. Принцип дырочной электропроводности

Пусть в начальный момент времени (рис. 5, *a*) в крайнем атоме слева (1) появилась дырка вследствие того, что из атома ушел электрон. Атом с дыркой (заштрихован) имеет положительный заряд и может притянуть к себе электрон из соседнего атома 2. Если в полупроводнике действует электрическое поле (разность потенциалов), то это поле стремится двигать электроны в направлении от отрицательного потенциала к положительному. Поэтому в следующий момент (рис. 5, *б*) из атома 2 один электрон перейдет в атом 1 и заполнит дырку, а новая дырка образуется в атоме 2. Далее один электрон из атома 3 пере-

йдет в атом 2 и заполнит в нем дырку. Тогда дырка возникнет в атоме 3 (рис. 5, в). Такой процесс будет продолжаться, и дырка перейдет из крайнего левого атома в крайний правый. Иначе говоря, первоначально возникший в атоме 1 положительный заряд перейдет в атом 6 (рис. 5, е).

Таким образом, при дырочной электропроводности в действительности тоже перемещаются электроны, но более ограниченно, чем при электронной электропроводности. Электроны переходят из данных атомов только в соседние. Результатом этого является перемещение положительных зарядов — дырок — в направлении, противоположном движению электронов.

Электроны и дырки, которые могут перемещаться и поэтому создавать электропроводность, называют подвижными носителями заряда, или носителями заряда.

Итак, с точки зрения модели ковалентной связи, дырка — это разорванная ковалентная связь, ведущая себя, как подвижный носитель заряда, равный по модулю заряду электрона.

Будем обозначать концентрации (их число в единице объема, например, в 1 см<sup>3</sup>) электронов и дырок проводимости соответственно буквами  $n$  и  $p$  (от слов *negative* — отрицательный и *positive* — положительный). Очевидно, что для собственного полупроводника электрон проводимости и дырка проводимости всегда образуются парами, следовательно,  $n_i = p_i$ . Индекс  $i$  здесь указывает, что эти концентрации относятся к собственному полупроводнику.

В собственном полупроводнике осуществляется электронная и дырочная электропроводность. Следовательно, электрический ток в собственном полупроводнике определяется двумя составляющими: электронным и дырочным токами, текущими в одном направлении.

### Модель энергетических зон

Электроны в твердом теле не могут обладать произвольными энергиями. Энергия каждого электрона может принимать лишь определенные значения, называемые уровнями энергии, или энергетическими уровнями.

Электроны, расположенные ближе к ядру атома, обладают меньшими энергиями, т. е. находятся на более низких энергетических уровнях. Чтобы удалить электрон от ядра, надо преодолеть взаимное притяже-

ние между электроном и ядром. Для этого надо затратить некоторую энергию. Поэтому удаленные от ядра электроны обладают большими энергиями, т. е. они находятся на более высоких энергетических уровнях.

Твердое тело представляет собой множество атомов, сильно взаимодействующих благодаря малым межатомным расстояниям. Поэтому всю совокупность атомов в куске твердого тела следует рассматривать как единое целое, как гигантскую молекулу, которая подобно атому характеризуется некоторым единым для всего тела энергетическим спектром. Особенность этого спектра в том, что он состоит не из дискретных разрешенных уровней, а из дискретных разрешенных зон. Каждая зона происходит от соответствующего атомного уровня, который как бы расщепляется при сближении атомов. Таким образом, для кристалла с межатомным расстоянием  $d_0$  получается определенная зонная диаграмма, в которой разрешенные зоны чередуются с запрещенными зонами. Ширина тех и других обычно не превышает несколько электронвольт и не зависит от числа атомов в твердом теле, т. е. от его размеров.

Строго говоря, разрешенные зоны имеют дискретную структуру и состоят из стольких уровней, сколько атомов имеется в данном теле. Однако количество атомов даже в микроскопических объемах настолько велико, что энергетические расстояния между уровнями зоны в реальных случаях не превышают  $10^{-17}$  эВ, т. е. разрешенные зоны практически можно считать сплошными.

Проводимость в твердом теле возможна лишь тогда, когда возможен переход электрона на ближайший энергетический уровень. Значит, в проводимости могут участвовать электроны только тех зон, в которых есть свободные уровни. Такие свободные уровни иногда имеются в верхней разрешенной зоне. Поэтому верхнюю зону твердого тела, не заполненную (или не полностью заполненную) электронами при нулевой абсолютной температуре, называют зоной проводимости.

Зону, ближайшую к зоне проводимости, называют валентной. При нулевой температуре она полностью заполнена. Следовательно, электроны такой зоны не могут участвовать в проводимости. Но при температуре отличной от нуля, в верхней части валентной зоны образуются свободные уровни, и эта зона также может обусловить проводимость. Таким образом, все существенные процессы в полупроводниковых приборах можно изучить, рассматривая только две смежные

зоны: зону проводимости и валентную. Разрешенные энергетические зоны разделены интервалами энергий, которыми электроны не могут обладать и которые называются запрещенными зонами.

Зонная структура твердого тела при нулевой температуре лежит в основе классификации металлов, полупроводников и диэлектриков. У металлов зона проводимости и валентная зона взаимно перекрываются (рис. 6, *a*), поэтому даже при нулевой температуре в зоне проводимости находится значительное количество электронов и, следовательно, имеет место проводимость. У полупроводников и диэлектриков при нулевой температуре зона проводимости пуста и проводимость отсутствует, в этом их качественное отличие от металлов (рис. 6, *б*). Различия же между полупроводниками и диэлектриками в основном количественные и обусловлены значительно большей шириной запрещенной зоны.

Вещества, у которых ширина запрещенной зоны  $\Delta W_3 \leq 3$  эВ, относятся к полупроводникам,  $\Delta W_3$ , эВ: германий — 0,72; кремний — 1,12; арсенид галлия — 1,41; антимонид индия — 0,18, а при  $\Delta W_3 > 3$  эВ — к диэлектрикам. Но и этот критерий классификации веществ неоднозначен (алмаз с  $\Delta W_3 \approx 7$  эВ используется в полупроводниковой технике).

Поскольку зона проводимости практически сплошная, энергия электронов в этой зоне может меняться непрерывно, как у изолированных электронов в вакууме, поскольку электроны в зоне проводимости называются свободными. Термин «свободный» характеризует возможность перемещения электрона внутри твердого тела.

При нулевой абсолютной температуре, проводимость в собственном полупроводнике отсутствует, потому что зона проводимости пуста, а валентная зона заполнена. При любой температуре отличной от нуля, в кристалле появляются фононы, энергетический спектр которых непрерывен. Фононы с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, переводят некоторые электроны из верхней части валентной зоны в зону проводимости. В результате этого в зоне проводимости появляются свободные электроны, а в валентной зоне — незаполненные уровни (рис. 7). Те и другие образуются одновременно и в равных количествах. Теперь электроны обеих зон могут двигаться в электрическом поле, обеспечивая проводимость кристалла.

Исходя из модели энергетических зон дырка — это незаполненный уровень валентной зоны.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)