

## Лекция 2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

### 2.1. Общие сведения о полупроводниках

К полупроводникам относятся вещества, занимающие по величине удельной электрической проводимости промежуточное положение между проводниками (металлами) и диэлектриками. Значения удельной электрической проводимости этих трех классов веществ приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Удельная электрическая проводимость веществ

Вещество	Удельная электрическая проводимость, Сим/см
Проводники	$10^6 - 10^5$
Полупроводники	$10^4 - 10^{-10}$
Диэлектрики	$<10^{-10}$

Основным, признаком, выделяющим полупроводники как особый класс веществ, является **сильное влияние температуры и концентрации примесей на их электрическую проводимость**. Зависимость электрической проводимости полупроводника от температуры носит экспоненциальный характер и уже при сравнительно небольшом ее увеличении проводимость полупроводника резко возрастает (до 5 – 6% на градус). Проводимость металлов с ростом температуры не увеличивается, а падает, причем очень незначительно: изменение составляет десятые доли процента на градус. Введение примеси в полупроводник уже при дозах порядка  $10^{-7} - 10^{-9}\%$  существенно увеличивает его электропроводность.

У большинства полупроводников сильное изменение электрической проводимости возникает под воздействием света, ионизирующих излучений и других энергетических воздействий.

Полупроводники представляют собой наиболее многочисленную группу веществ. К ним относятся химические элементы: бор, углерод, кремний, фосфор, сера, германий, мышьяк, селен, серое олово, теллур, йод, большинство природных химических соединений – минералов и многие органические вещества.

В электронике находит применение лишь ограниченное количество полупроводниковых веществ. На первом месте среди них стоят германий и кремний, используемые в качестве основы при изготовлении полупроводниковых приборов. Ряд веществ, таких, как бор, фосфор, мышьяк, используются в качестве примесей.

## 2.2. Структура полупроводников

Применяемые в технике полупроводники имеют совершенную кристаллическую структуру. Их атомы размещены в пространстве в строго периодической последовательности, на постоянных расстояниях друг от друга, образуя кристаллическую решетку. Решетка наиболее распространенных в электронике полупроводников: германия и кремния, имеет структуру алмазного типа (рис. 2.1). В этой решетке каждый атом вещества окружен четырьмя такими же атомами, находящимися в вершинах правильного тетраэдра.

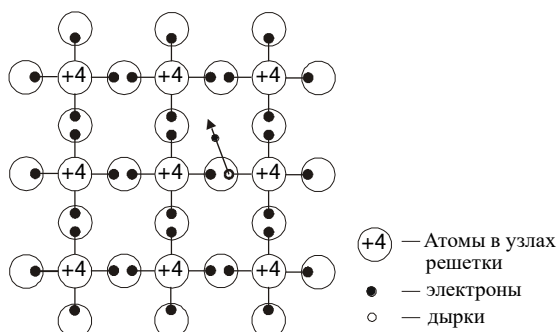


Рис. 2.1. Ковалентные связи в решетке германия или кремния

Каждый атом, находящийся в кристаллической решетке, электрически нейтрален. Силы, удерживающие атомы в узлах решетки возникают за счет обмена взаимодействующих атомов валентными электронами. Подобная связь атомов носит название **ковалентной** (гомополярной) **связи** и для ее создания необходима пара электронов. Пример такой связи можно наблюдать в молекуле водорода, где имеются два валентных электрона и силы притяжения к ним протонов уравниваются силами взаимного отталкивания этих протонов.

При увеличении расстояния между атомами, входящими в молекулу, возникают силы притяжения, а при уменьшении — силы отталкивания. При этом для разрушения молекулы необходима затрата энергии.

В германии и кремнии, являющихся четырехвалентными элементами, на наружной оболочке имеется по четыре валентных электрона, поэтому каждый атом образует четыре ковалентные связи с четырьмя ближайшими, окружающими его атомами (рис. 2.1).

### 2.3. Носители заряда в полупроводнике

В рассмотренной идеальной решетке все электроны связаны со своими атомами, поэтому такая структура не должна проводить электрический ток. Однако в полупроводниках, в отличие от диэлектриков, сравнительно небольшие энергетические воздействия, обусловленные нагревом или облучением, могут привести к разрыву некоторых валентных связей в решетке. При этом валентный электрон, оторвавшийся от своего атома, переходит в новое устойчивое состояние, в котором он обладает способностью перемещаться по кристаллической решетке. Такие сорванные с валентных связей подвижные электроны называются **электронами проводимости**. Они обуславливают электропроводность полупроводника, называемую **электронной электропроводностью**.

Минимальная величина энергии  $DW$ , которую необходимо сообщить валентному электрону для того, чтобы оторвать его от атома и сделать подвижным, зависит от структуры решетки и, следовательно, является параметром полупроводника. Например, у германия  $DW=0,72$ , у кремния  $DW=1,12$  эВ.

Из квантовой механики известно, что энергия электронов, перемещающихся по кристаллу, лежит в некотором диапазоне значений, то есть электроны занимают целую зону энергетических уровней, называемую **зоной проводимости**. Энергетические состояния валентных электронов образуют зону, называемую **валентной**. Между максимальным уровнем валентной зоны и минимальным уровнем зоны проводимости лежит область энергетических состояний, в которых электроны не могут находиться – это **запрещенная зона** (рис. 2.2).

Ширина запрещенной зоны  $\Delta W$  определяет энергию, необходимую для освобождения валентного электрона (**энергия ионизации атома полупроводника**). Таким образом, с энергетической точки зрения отрыв валентного электрона от атома и превращение его в электрон проводимости соответствуют переходу электрона из валентной зоны в зону проводимости. Схема энергетических состояний электронов, изображенная на рис. 2.2, называется энергетической диаграммы полупроводника.



Рис. 2.2. Энергетическая диаграмма собственного полупроводника

При разрыве валентной связи и уходе электрона из атома в решетке образуется незаполненная связь, которой присущ некомпенсированный положительный заряд, равный по величине заряду электрона  $+e$ . На незаполненную связь легко переходят валентные электроны с соседних связей. Таким образом, то место, где отсутствует валентный электрон (**дырка**), хаотически перемещается по решетке. При наличии внешнего поля дырка также будет двигаться в направлении действия поля, что соответствует переносу положительного заряда, т.е. электрическому току.

Такой вид электропроводности полупроводника называют **дырочной электропроводностью**.

Полупроводник, имеющий в узлах решетки только собственные атомы, называют **собственным полупроводником** (полупроводник  $i$  – типа, от английского слова *intrinsic* – присущий).

В электронике часто применяются полупроводники, у которых часть атомов основного вещества в узлах кристаллической решетки замещена атомами примеси, т.е. атомами другого вещества. Такие полупроводники называются **примесными**.

Для германия и кремния чаще всего используют пятивалентные и трехвалентные примеси. Пятивалентные примеси: фосфор, сурьма, мышьяк и др.; трехвалентные: бор, алюминий, индий, галлий.

При наличии пятивалентной примеси, четыре валентных электрона примесного атома совместно с четырьмя электронами соседних атомов образуют ковалентные связи, а пятый валентный электрон оказывается «лишним». Энергия связи его со своим атомом  $DW_n$ , намного меньше, чем энергия  $DW$ , необходимая для освобождения валентного электрона (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Энергия ионизации пятивалентных примесей в германии и кремнии, эВ

Примесь	Германий	Кремний
Фосфор	0,012	0,044
Мышьяк	0,013	0,049
Сурьма	0,0096	0,039

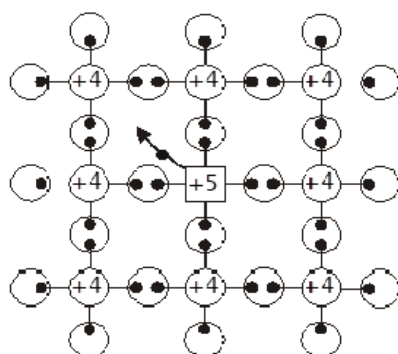
Поскольку энергия ионизации  $DW_n$  невелика пятый электрон даже при комнатной температуре может быть оторван от своего атома за счет энергии теплового движения. При этом образуется свободный электрон, способный перемещаться по кристаллической решетке, и неподвижный положительный заряд – атом примеси, потерявший этот электрон. Примеси такого вида, отдающие электроны, называются **донорными** (рис. 2.3).

При введении трех валентной примеси примесный атом отдает три своих валентных электрона для образования ковалентных связей с тремя близлежащими атомами. Связь с четвертым атомом оказывается незаполненной. Однако на нее сравнительно легко могут переходить валентные электроны с соседних связей. В таблице 2.3 приведены значения энергии ионизации  $DW_p$  для некоторых трехвалентных примесей в германии и кремнии.

Таблица 2.3. Энергия ионизации трехвалентной примеси в германии и кремнии, эВ

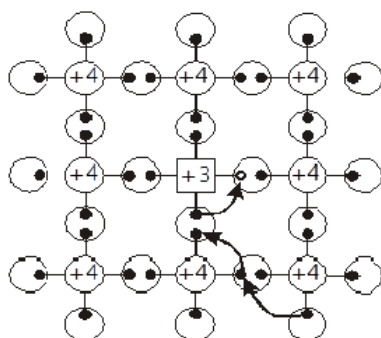
Примесь	Германий	Кремний
Бор	0,0104	0,045
Алюминий	0,0102	0,057
Галлий	0,0108	0,065
Индий	0,0112	0,016

При переходе валентного электрона на незаполненную связь примесный атом с присоединенным лишним электроном образует в решетке неподвижный отрицательный заряд. В решетке образуется дырка, способная перемещаться по решетке и обуславливающая дырочную проводимость полупроводника (рис. 2.4). Примеси такого вида, захватывающие электроны, называются **акцепторными**.



+5 — Атом донорной примеси

Рис. 2.3. Атомы пятивалентной примеси в решетке германия или кремния



+3 — Атом акцептрной примеси

Рис. 2.4. Атомы трехвалентной примеси в решетке германия или кремния

На энергетической диаграмме полупроводника (рис. 2.5) донорные и акцепторные примеси образуют локальные энергетические уровни, лежащие в запрещенной зоне. Уровни доноров находятся около зоны проводимости ( $\Delta W_n$ ), а уровни акцепторов – у валентной зоны ( $\Delta W_p$ ).

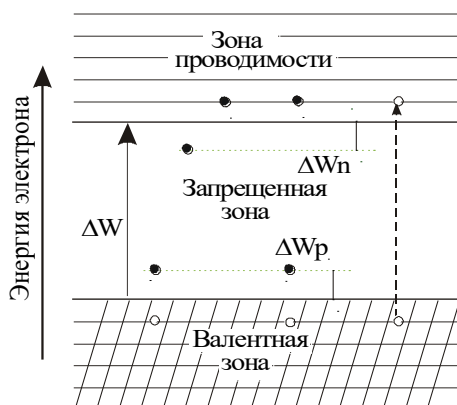


Рис. 2.5. Энергетическая диаграмма примесного полупроводника

## 2.4. Равновесная концентрация зарядов в полупроводнике

### 2.4.1. Собственный полупроводник

При умеренных температурах концентрация электронов в зоне проводимости собственного полупроводника определяется соотношением:

$$n_i = n_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}},$$

где  $n_0 = 5 \cdot 10^{19} \text{ 1/см}^3$  – для германия;

$n_0 = 2 \cdot 10^{20} \text{ 1/см}^3$  – для кремния;

$kT$  – средняя тепловая энергия микрочастицы при температуре  $T^\circ(\text{K})$ .

Число дырок в идеальной кристаллической решетке собственного полупроводника равно числу свободных электронов:  $p_i = n_i$ .

Можно подсчитать, что при комнатной температуре, т.е. при  $T = 293^\circ \text{K}$ , число свободных электронов в беспримесном германии, для которого  $\Delta W = 0,72 \text{ эВ}$ ,  $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ 1/см}^3$ .

В кристаллической решетке германия в каждом кубическом сантиметре объема находится  $4,4 \cdot 10^{22}$  атомов. Нетрудно подсчитать, что один свободный электрон приходится на миллиард атомов вещества.

В кремнии при той же температуре количество свободных электронов на три порядка меньше вследствие более высокой энергии ионизации  $n_i = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ 1/см}^3$ .

Величина концентрации электронов и дырок в беспримесном полупроводнике устанавливается как результат динамического равновесия двух непрерывно идущих в полупроводнике процессов: процесса **генерации** подвижных носителей и процесса их **рекомбинации**.

**Скорость генерации носителей**, т. е. количество освобождающихся в единицу времени электронно-дырочных пар, определяется свойствами полупроводника и его температурой.

**Скорость рекомбинации**, т.е. количество исчезающих в единицу времени электронно-дырочных пар, также определяется свойствами полупроводника, кроме того, она пропорциональна концентрации электронов и дырок, т.к. чем больше количество носителей, тем вероятнее их встреча, которая завершается рекомбинацией.

$$\text{Скорость рекомбинации } V_{рек} = r_i n_i p_i = r n_i^2,$$

где  $r$  – множитель, определяемый свойствами полупроводника и называемый коэффициентом рекомбинации.

В стационарном режиме должно существовать динамическое равновесие: скорость генерации  $V_{ген}$  должна равняться скорости рекомбинации  $V_{рек} = V_{ген} = r n_i^2$ .

Это условие определяет **равновесную концентрацию носителей** в собственном полупроводнике.

## 2.4.2. Примесный полупроводник

### **Донорная примесь.**

Пусть концентрация донорной примеси в полупроводнике равна  $N_D$ . Т.к. энергия ионизации донорной примеси  $\Delta W_n$  очень невелика (таблица. 2.2), то уже при комнатной и даже при более низкой температуре практически все атомы примеси оказываются ионизированными и кроме этого, ионизируется некоторая часть атомов основного вещества  $n_i^*$ . Таким образом, в полупроводнике с донорной примесью концентрация электронов в зоне проводимости определяется выражением:  $n_n = N_D + n_i^*$ .

Она больше, чем в беспримесном полупроводнике.

Т.к.  $N_D \gg n_i^*$ , то  $n_n \approx N_D$



Скорость рекомбинации носителей в полупроводнике пропорциональна концентрации электронов и концентрации дырок  $V_{рек} = m_n p_n$ .

Скорость генерации при малых концентрациях примеси остается той же, что и в собственном полупроводнике  $V_{ген} = m_i^2$ .

При динамическом равновесии  $V_{рек} = V_{ген}$ .

Отсюда определяется равновесная концентрация дырок в примесном полупроводнике:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d}.$$

Рассмотрим зависимость концентрации носителей в германии от концентрации донорной примеси. Из рис. 2.6 можно видеть, что концентрация дырок в полупроводнике с донорной примесью значительно ниже, чем в чистом беспримесном полупроводнике. В связи с этим дырки называют **неосновными носителями заряда**. Электроны, составляющие в данном случае подавляющую массу подвижных носителей, называют **основными носителями заряда**. Полупроводник с донорной примесью называют **полупроводником с электронной электропроводностью** (полупроводник *n*-типа, от слова *negative* – отрицательный).

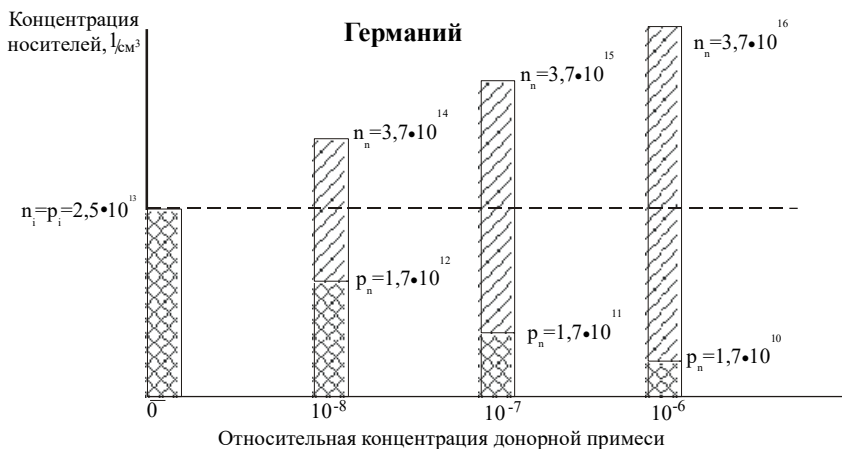


Рис. 2.6. Зависимость концентрации носителей в германии от концентрации доноров

### Акцепторная примесь.

Пусть  $N_a$  – концентрация акцепторов. Концентрация дырок  $p_p = N_a + p_i^*$ ;

где  $p_i^*$  – концентрация дырок, обусловленная ионизацией атомов основного вещества. Обычно  $p_i^* \ll N_a$ , тогда  $p_p \approx N_a$ .

Концентрация электронов при этом определяется соотношением:

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_a}.$$

Электроны в данном случае являются неосновными носителями, так как их концентрация значительно ниже чем концентрация дырок, а дырки являются основными носителями. Полупроводник с акцепторной примесью называется **полупроводником с дырочной электропроводностью** (полупроводник  $p$ -типа, от слова *positive* – положительный).

## 2.5. Неравновесная концентрация зарядов в полупроводнике

Помимо равновесной концентрации носителей заряда в полупроводнике под влиянием различных энергетических воздействий может возникнуть **неравновесная концентрация зарядов**.

После прекращения воздействия, концентрация носителей вследствие рекомбинации и других причин постепенно уменьшается и вновь становится равновесной.

Образование неравновесных носителей может происходить при освещении полупроводника. Кванты света при воздействии на полупроводник вызовут появление в нем дополнительных электронно-дырочных пар (в полупроводниковых диодах и в транзисторах неравновесные носители образуются при прохождении электрического тока).

Процесс рекомбинации электронов и дырок может происходить либо прямым путем - из зоны в зону (рис. 2.7, случай А), либо через вакантные энергетические уровни в запрещенной зоне, называемые **центрами рекомбинации** или **ловушками** (рис. 2.7, случай Б).

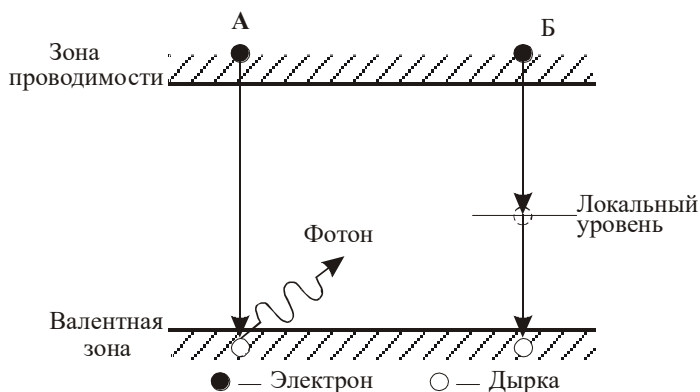


Рис. 2.7. Рекомбинационные процессы в полупроводнике

Случай Б является более вероятным, т.к. в данном случае движется лишь один носитель, а второй неподвижен, и вероятность сближения их на расстояние, при котором возможна рекомбинация значительно выше, чем в случае, когда оба носителя перемещаются по решетке.

Центры рекомбинации создаются примесями, имеющими энергетические уровни вблизи от середины запрещенной зоны полупроводника. Такими примесями являются медь, никель, кобальт. Очень активные центры рекомбинации создает золото.

Рекомбинация может происходить не только в объеме полупроводника, но и на его поверхности. Скорость рекомбинации может быть различна даже в одном и том же типе полупроводника.

Время жизни неравновесных носителей в германии и кремнии может лежать в широком диапазоне значений (от долей микросекунд до тысяч микросекунд) в зависимости от количества и типа примеси, а также от состояния и чистоты поверхности. Чистота поверхности объясняется тем, что на поверхности полупроводника всегда имеются различные дефекты структуры, а также пленки окислов, которые могут образовывать большое количество ловушек, вызывающих интенсивный процесс рекомбинации электронно-дырочных пар.

Неравновесные носители играют большую роль в процессах, протекающих в полупроводниковых приборах. Важное значение имеет скорость их рекомбинации, которая определяет время установления равновесного состояния в полупроводнике.

## 2.6. Токи в полупроводнике

### 2.6.1. Дрейфовый ток

Когда отсутствует внешнее поле, электроны и дырки в кристалле находятся в состоянии хаотического теплового движения. При наличии поля  $E$  на хаотическое движение накладывается компонента направленного движения, обусловленного действием этого поля (рис. 2.8). В результате электроны и дырки начинают перемещаться вдоль кристалла - возникает электрический ток.

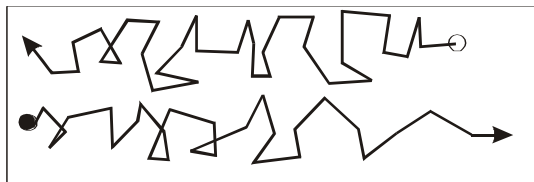


Рис. 2.8. Движение электронов и дырок в полупроводнике

Ток, обусловленный внешним полем называют **дрейфовым током**.

Средняя скорость электронов в полупроводнике определяется по формуле  $\bar{V}_n = -\mu_n E$ ;

где  $E$  – напряженность поля,  $\mu_n$  – подвижность электронов.

Подвижность электронов зависит от свойств кристаллической решетки, от наличия примесей и от температуры. При этом с ростом температуры подвижность электронов уменьшается.

Примеси не оказывают существенного влияния на величину подвижности при невысоких концентрациях (до  $10^{15} - 10^6$   $1/\text{см}^3$ ). При более высоких концентрациях подвижность носителей начинает снижаться из-за рассеяния электронов на ионах примеси.

При малых полях (до  $100$  В/см в германии) подвижность не зависит от напряженности электрического поля. При значительном увеличении напряженности поля и скорости электронов эффективность их взаимодействия с решеткой растет, электроны теряют во время соударений относительно большую энергию и их подвижность начинает падать.

В германии при напряженности поля порядка  $8$  кВ/см подвижность уменьшается пропорционально  $1/E$  и с ростом напряженности поля дрейфовая скорость электронов больше не возрастает, достигнув максимального значения  $u_{\text{max}} = 6 \cdot 10^6$  см/сек (рис. 2.9).

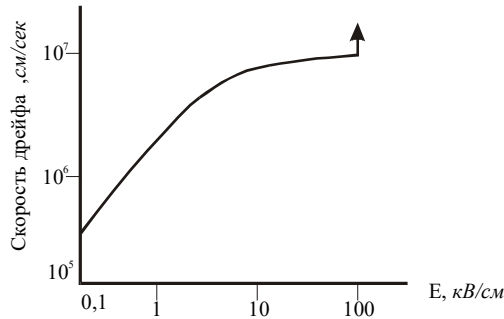


Рис. 2.9. Зависимость дрейфовой скорости электронов в германии от напряженности электрического поля

При  $E > 100 \text{ кВ/см}$  возникает лавинная ионизация атомов решетки, количество носителей и ток резко возрастают, наступает пробой полупроводника.

В кремнии максимальное значение дрейфовой скорости имеет величину порядка  $8,5 \cdot 10^6 \text{ см/сек}$ .

Подвижность дырок в полупроводнике  $\mu_p = \frac{\bar{V}_p}{E}$  определяется средней направленной скоростью дырок  $\bar{V}_p$  приобретаемой под действием электрического поля  $E$ . Подвижность дырок значительно ниже подвижности электронов. С ростом температуры подвижность дырок падает несколько быстрее, чем подвижность электронов.

Обозначив концентрацию электронов в полупроводнике  $n$ , а концентрацию дырок  $p$ , найдем плотность электронного и дырочного дрейфового тока:

$$j_{n \partial p} = -en\bar{V}_n = en\mu_n E,$$

$$j_{p \partial p} = ep\bar{V}_p = ep\mu_p E$$

где  $e$  – заряд электрона.

Суммарная плотность дрейфового тока имеет вид:

$$j_{\partial p} = e(n\mu_n + p\mu_p)E.$$

Это выражение есть **закон Ома** в дифференциальной форме.

Величина  $\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$  – **удельная проводимость полупроводника**.

Зависимость удельной проводимости от температуры следующая:

- при низких температурах, когда вероятность ионизации собственных атомов полупроводника мала, концентрация электронов и дырок определяется в основном концентрацией примеси и от температуры зависит мало, поэтому удельная проводимость также мало зависит от температуры или слегка падает с ее ростом за счет уменьшения подвижности;
- при достаточно высокой температуре начинается интенсивная ионизация собственных атомов полупроводника, поэтому концентрация подвижных носителей заряда, а, следовательно, и проводимость полупроводника резко возрастают.

### 2.6.2. Диффузионный ток

Причиной, вызывающей электрический ток в полупроводнике, может быть не только электрическое поле. Допустим, что концентрация подвижных носителей заряда в полупроводнике в различных его точках неодинакова. Если при этом тело электрически нейтрально, то различие в концентрациях носителей в соседних областях не приведет к появлению электрического поля. Но в соответствии с общими законами теплового движения в полупроводнике возникнет диффузия микрочастиц из области с большей их концентрацией в область с меньшей концентрацией.

Т.к. диффундирующие микрочастицы несут заряд, то в результате диффузии в полупроводнике появится электрический ток. В отличие от дрейфового тока, вызываемого электрическим полем, электрический ток, обусловленный градиентом концентрации носителей, называют диффузионным током.

В одномерном случае плотность диффузионного тока дырок определяется по формуле:

$$j_{p \text{ диф}} = -eD_p \frac{dp}{dx},$$

где  $\frac{dp}{dx}$  – градиент концентрации дырок;  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок.

Для германия  $D_p = 4,4 \text{ см}^2/\text{сек}$ , для кремния –  $D_p = 6,5 \text{ см}^2/\text{сек}$ .

Знак «–» указывает, что диффузионный дырочный ток направлен в сторону уменьшения концентрации дырок. Плотность диффузионного тока электронов определяется следующим соотношением:

$$j_{n \text{ диф}} = eD_n \frac{dn}{dx},$$

где  $\frac{dn}{dx}$  – градиент концентрации электронов;  $D_n$  – коэффициент диффузии электронов.

Для германия  $D_n = 93 \text{ см}^2/\text{сек}$ ; для кремния  $D_n = 31 \text{ см}^2/\text{сек}$ .

Диффузионный поток электронов движется в сторону уменьшения концентрации, однако в соответствии с принятым в технике условным направлением электрического тока электронный диффузионный ток считается текущим в сторону увеличения концентрации электронов, т. е. навстречу потоку электронов, поэтому перед выражением стоит знак «+».

В общем случае в полупроводнике могут существовать и электрическое поле, и градиент концентрации носителей. Таким образом, ток, протекающий в полупроводнике, имеет дрейфовую и диффузионную составляющие:

$$j_n = en\mu_n E + eD_n \frac{dn}{dx},$$

$$j_p = ep\mu_p E - eD_p \frac{dp}{dx},$$

$$j = j_n + j_p.$$