

Электрический ток в полупроводниках. Собственная и дырочная проводимость полупроводников

Электронно-дырочная проводимость

По значению удельного электрического сопротивления полупроводники занимают промежуточное положение между хорошими проводниками и диэлектриками. К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений. Почти все неорганические вещества окружающего нас мира – полупроводники. Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры.

Качественное отличие полупроводников от металлов проявляется прежде всего в зависимости удельного сопротивления от температуры. С понижением температуры сопротивление металлов падает (см. рис. 4). У полупроводников, напротив, с понижением температуры сопротивление возрастает и вблизи абсолютного нуля они практически становятся изоляторами (рис. 1).

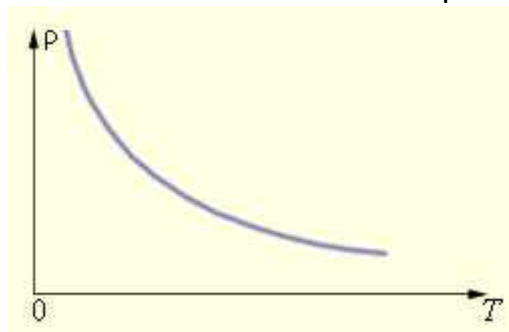


Рисунок 1. Зависимость удельного сопротивления ρ чистого полупроводника от абсолютной температуры T

Такой ход зависимости $\rho(T)$ показывает, что у полупроводников концентрация носителей свободного заряда не остается постоянной, а увеличивается с ростом температуры. Механизм электрического тока в полупроводниках нельзя объяснить в рамках модели газа свободных электронов. Рассмотрим качественно этот механизм на примере германия (Ge). В кристалле кремния (Si) механизм аналогичен.

Атомы германия на внешней оболочке имеют четыре слабо связанных электрона. Их называют валентными электронами. В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь между атомами в кристалле германия является ковалентной, т. е. осуществляется парами валентных электронов. Каждый валентный электрон принадлежит двум атомам (рис. 2). Валентные электроны в кристалле германия связаны с атомами гораздо сильнее, чем в металлах; поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках на много порядков меньше, чем у металлов. Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей. Такой кристалл электрического тока не проводит.

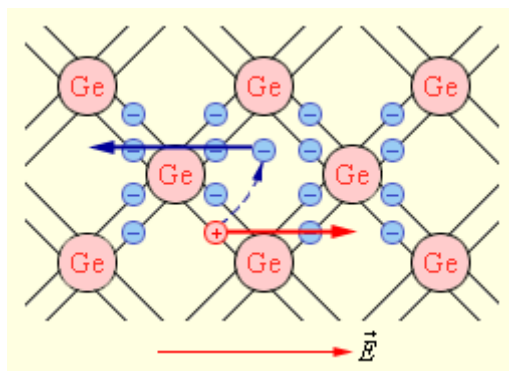


Рисунок 2. Парно-электронные связи в кристалле германия и образование электронно-дырочной пары

При повышении температуры некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Тогда в кристалле возникнут свободные электроны (электроны проводимости). Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые не заняты электронами. Эти вакансии получили название дырок. Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле. При заданной температуре полупроводника в единицу времени образуется определенное количество электронно-дырочных пар. В то же время идет обратный процесс – при встрече свободного электрона с дыркой, восстанавливается электронная связь между атомами германия. Этот процесс называется **рекомбинацией**. Электронно-дырочные пары могут рождаться также при освещении полупроводника за счет энергии электромагнитного излучения. В отсутствие электрического поля электроны проводимости и дырки участвуют в хаотическом тепловом движении.

Если полупроводник поместить в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы. Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного I_n и дырочного I_p токов:

$$I = I_n + I_p$$

Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна концентрации дырок: $n_p = p_p$. Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (т. е. без примесей) полупроводников. Он называется собственной электрической проводимостью полупроводников.

При наличии примесей электрическая проводимость полупроводников сильно изменяется. Например, добавка в кристалл кремния примесей фосфора в количестве 0,001 атомного процента уменьшает удельное сопротивление более чем на пять порядков. Такое сильное влияние примесей может быть объяснено на основе изложенных выше представлений о строении полупроводников.

Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.

Проводимость полупроводников при наличии примесей называется примесной проводимостью. Различают два типа примесной проводимости – **электронную и дырочную**.

Электронная проводимость возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пятивалентные атомы (например, атомы мышьяка, As).

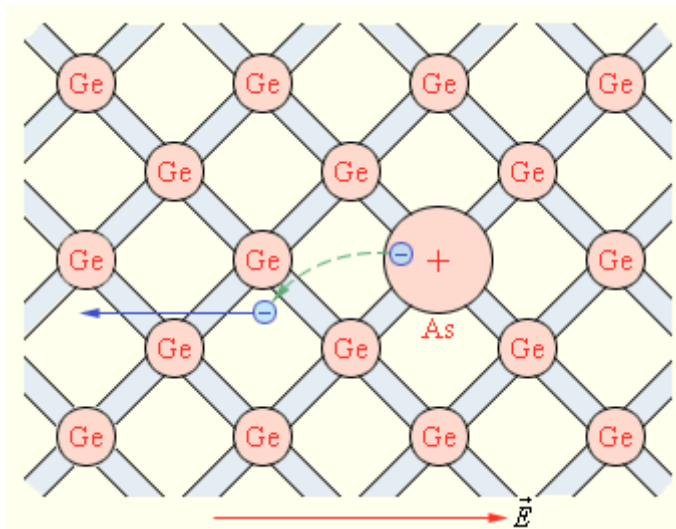


Рисунок 3. Атом мышьяка в решетке германия. Полупроводник n-типа

На рис. 3 показан пятивалентный атом мышьяка, оказавшийся в узле кристаллической решетки германия. Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия. Пятый валентный электрон оказался излишним; он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным. Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, расположенный в узле кристаллической решетки. *Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется донорной примесью. В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов. Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз. Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.*

В кристалле германия с примесью мышьяка есть электроны и дырки, ответственные за собственную проводимость кристалла. Но основным типом носителей свободного заряда являются электроны, оторвавшиеся от атомов мышьяка. В таком кристалле $n \gg p$. Такая проводимость называется электронной, а полупроводник, обладающий электронной проводимостью, называется полупроводником n-типа.

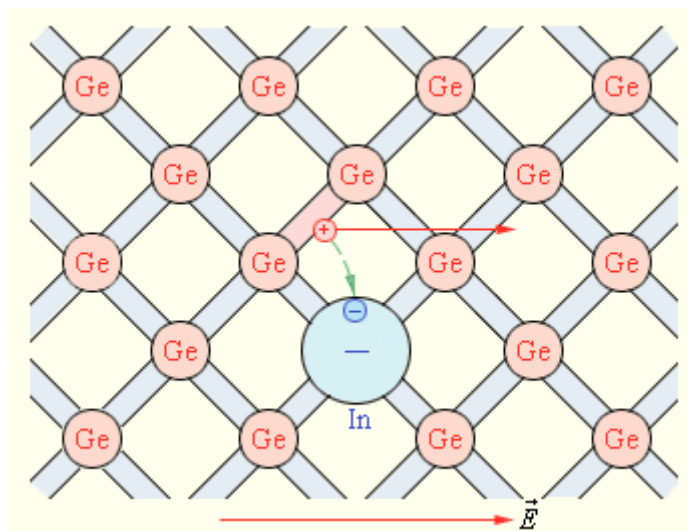


Рисунок 4. Атом индия в решетке германия. Полупроводник р-типа

Дырочная проводимость возникает, когда в кристалл германия введены трехвалентные атомы (например, атомы индия, In). На рис.4 показан атом индия, который с помощью своих валентных электронов создал ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия. На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия. Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется акцепторной примесью. В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки). На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.

*Наличие акцепторной примеси резко снижает удельное сопротивление полупроводника за счет появления большого числа свободных дырок. Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника: $p \gg n$. Проводимость такого типа называется **дырочной проводимостью**. Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется полупроводником р-типа. Основными носителями свободного заряда в полупроводниках р-типа являются дырки.*

Следует подчеркнуть, что дырочная проводимость в действительности обусловлена эстафетным перемещением по вакансиям от одного атома германия к другому электронов, которые осуществляют ковалентную связь.

Для полупроводников n- и р-типов закон Ома выполняется в определенных интервалах сил тока и напряжений при условии постоянства концентраций свободных носителей.