**Общие сведения о полупроводниках**

Полупроводниками называют обширную группу материалов, которые по своему удельному электрическому сопротивлению занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Обычно к полупроводникам относят материалы с удельным сопротивлением р = (10- 3... 10 9) Ом ּ см, к проводникам (металлам) — материалы с р < 10 -4Омּ см, а к диэлектрикам (изоляторам) - материалы с р >1010 Омּсм. Такая классификация весьма условна, потому что между полупроводниками и диэлектриками нет принципиальных различий.

Так как особенности электропроводности полупроводников тесно связаны с принципом действия полупроводниковых приборов, их параметрами и характеристиками, рассмотрим некоторые основные понятия, связанные с физической сущностью электропроводности.

Согласно принципам квантовой механики электроны в атоме характеризуются вполне определенными значениями энергии, соответствующими разрешенным энергетическим уровням. В изолированном атоме существует конечное число таких энергетических уровней, причем электроны низших уровней сильно связаны с атомом; по мере увеличения уровня энергии связи ослабевает. В отсутствие внешних воздействий атом находится в состоянии, при котором электронами заняты все низшие энергетические уровни, а верхние — свободны. Под влиянием внешних воздействий (тепла, света, электрического или магнитного поля и т. д.) электроны, приобретая дополнительную энергию, могут переходить на более высокие энергетические уровни или вовсе становятся свободными. В группах близкорасположенных однотипных атомов, например в твердом теле, положение принципиально не меняется, но взаимодействие атомов друг с другом приводит к тому, что разрешенные уровни энергии электронов соседних атомов смещаются, образуя целую группу близкорасположенных подуровней, которые образуют так называемые зоны разрешенных уровней энергии, отделенных друг от друга запрещенными зонами энергии ∆EД . Величина ∆EД определяет энергию (в электронвольтах), которую нужно сообщить электрону, чтобы он перешел из более низкой зоны разрешенных уровней энергии в зону разрешенных значений более высокого уровня.

На электропроводность твердого тела наибольшее влияние оказывает расположение двух соседних зон разрешенных уровней энергии, которые называют зоной проводимости I и валентной зоной III. Запрещенная зона II между зоной проводимости и валентной зоной может существовать, а может и отсутствовать, причем ширина этой зоны в разных веществах различна. Металлы отличаются отсутствием запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости, поэтому они характеризуются высокой электропроводностью. В полупроводниках и диэлектриках такая запрещенная зона есть, и отличаются они друг от друга лишь шириной этой зоны. В полупроводниках ширина запрещенной зоны ∆EД между валентной зоной и зоной проводимости мала (меньше 3 эВ). При этом уже при комнатной температуре, когда атому сообщается малое количество энергии, часть валентных электронов переходит в зону проводимости, а электропроводность полупроводников оказывается не равной нулю. В диэлектриках ширина запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости настолько велика, что практически все валентные электроны остаются на своих орбитах, а это означает, что электропроводность диэлектриков равна нулю.

Для изготовления современных полупроводниковых приборов и особенно интегральных микросхем используют преимущественно кремний, который является монокристаллом — твердым телом с регулярной кристаллической решеткой, содержащей множество одинаковых примыкающих друг к другу тетраэдров (рисунок. 2.1, а).



Рисунок 2.1 - Структуры полупроводников

Особенность этой решетки состоит в том, что каждый атом в ней расположен на одинаковом расстоянии от четырех соседних. Условно это можно представить и на плоской модели (рисунок 2.1, б). Связь атомов в кристаллической решетке кремния обусловлена специфическими обменными силами, возникающими в результате попарного объединения валентных электронов соседних атомов. Такую связь называют валентной. При этом каждый атом остается электрически нейтральным.

Структура реального кристалла никогда не бывает идеальной, в любом полупроводнике наблюдаются дефекты, которые подразделяют на дефекты точечного типа (нарушение регулярности в некоторых точках кристалла) и дислокации (смещения плоскостей решетки). Наиболее распространенный точечный дефект решетки состоит в замещении одного из атомов кремния атомом примеси. Эти примеси могут быть паразитными — включениями тех веществ, от которых не удалось избавиться при первоначальной очистке кремния, или полезными — специально введенными в кристалл для получения нужных свойств (рисунок. 2.1 в,г).

Для создания высококачественных полупроводниковых приборов исходный материал должен иметь как можно более правильную кристаллическую структуру и весьма высокую чистоту. Поэтому первой операцией при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем является очистка, после которой допускается не более одного атома примеси на 1010атомов германия и 1013атомов кремния.

В предельно чистом полупроводнике с идеальной кристаллической решеткой, собственном или i - полупроводнике (от английского слова intrinsic — истинный) при температуре абсолютного нуля в валентной связи участвуют все четыре валентных электрона каждого атома. Это означает, что все электроны находятся в валентной зоне, свободных электронов нет, а проводимость полупроводника равна нулю, т. е. он обладает свойствами идеального изолятора. С повышением температуры валентные связи между отдельными атомами полупроводника нарушаются, что приводит к одновременному образованию свободного электрона и незаполненной связи — дырки вблизи того атома, от которого оторвался электрон. Незаполненная связь может быть замещена одним из валентных электронов соседнего атома, на его месте образуется новая дырка, которая замещается новым электроном и т. д., т. е. дырка, имеющая положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона, тоже может перемещаться по кристаллу.

Таким образом, в собственном полупроводнике имеются два типа носителей зарядов — электроны и дырки, причем они всегда образуются и исчезают парами. Число электронов ni равно числу дырок pi . Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями теплового происхождения, называют собственной электропроводностью. Она сильно зависит от температуры и энергии активации.

Электрон, покинувший атом и нарушивший валентную связь, может находиться в свободном состоянии только определенное время. При столкновении с другими атомами кристалла он теряет энергию и, попав в зону дырки, может заполнить освободившуюся валентную связь в другом атоме. Этот процесс называют рекомбинацией, а среднее время существования свободного электрона и дырки — временем жизни носителей заряда. Движение электронов и дырок происходит в полупроводнике за счет двух процессов: диффузии и дрейфа. Причиной возникновения диффузионного тока является разность концентраций носителей. Дрейфовый ток связан с действием электрического поля.

Характер электропроводности собственного полупроводника существенно изменяется при добавлении в него атомов примесного вещества. В полупроводниковых приборах и интегральных схемах применяют только примесные полупроводники, в которых в качестве примесей используют элементы V (сурьма, мышьяк, фосфор) и III (индий, бор, алюминий) групп таблицы Менделеева.

При введении в кристалл кремния атома примеси V группы (например, сурьмы) только четыре ее валентных электрона вступают в прочную связь с четырьмя соседними атомами собственного полупроводника (рисунок 2.1, в). Пятый валентный электрон сурьмы оказывается слабо связанным с ядром, и он легко переходит в зону проводимости. При этом примесный атом превращается в неподвижный положительный ион. Свободные электроны, оторвавшиеся от примесных атомов, добавляются к собственным свободным электронам. В этом случае проводимость полупроводника начинает определяться главным образом электронами. Такие полупроводники называют полупроводниками n - типа (от английского слова negative — отрицательный). Примеси, обусловливающие электронную электропроводность, называют донорными.

Πри введении в крисалл кремния атома примеси III группы (например, бора) одна из четырех связей между атомом собственного полупроводника и атомом примеси оказывается незаполненной, что эквивалентно образованию дырки (рисунок 2.1, г) и неподвижного отрицательного иона. Электропроводность таких примесных полупроводников обеспечивается за счет перемещения дырок, а сами полупроводники называют полупроводниками р - типа (от английского слова positive — положительный). Примеси, обусловливающие дырочную электропроводность, называют акцепторными..

Присутствие Nд атомов донорной примеси приводит к появлению nn подвижных электронов, причем nn≈ Nд. Присутствие Na атомов акцепторной примеси приводит к появлению pp подвижных дырок, причем pp ≈Na. Чтобы примесная электропроводность преобладала над собственной, концентрация атомов донорной Nд и акцепторной Na примесей должна превышать концентрацию собственных носителей заряда ni = pi . В примесных полупроводниках количество примесей строго дозируется и в 102...105 раз превышает концентрацию собственных носителей. Носители заряда, концентрация которых в данном полупроводнике преобладает, называют основными, а те, которые составляют меньшинство,— неосновными. Так, в полупроводнике n - типа основными носителями заряда являются электроны, а в полупроводнике p - типа — дырки. Между концентрациями свободных электронов и дырок в полупроводниках как n , так и р-типов существует соотношение np pp = nn pn .

В большинстве полупроводниковых приборов применяют неоднородные по своим электрофизическим свойствам монокристаллы, в которых можно выделить области с донорными и акцепторными примесями и электронно-дырочные или р-n переходы между двумя областями полупроводников, одна из которых имеет электропроводность n -типа, а другая— р-типа. На часть поверхности монокристалла каждой области наносится слой металла — электрод прибора, к которому привариваются или припаиваются выводы из тонкой проволоки. Большинство полупроводниковых кристаллов помещается в специальный герметический корпус (металлический, стеклянный или пластмассовый), изолирующий его от окружающей среды. В корпусе имеются специальные внешние выводы, с помощью которых электроды полупроводникового прибора могут быть соединены с соответствующими точками схемы.

Размеры монокристалла в маломощных приборах составляют десятые или сотые доли кубических миллиметров, в мощных — единицы или десятки кубических миллиметров. Размеры корпусов маломощных приборов не превышают нескольких миллиметров, а в мощных приборах достигают нескольких сантиметров. Последние в ряде случаев снабжаются специальными радиаторами для охлаждения. Применяют и бескорпусные полупроводниковые приборы, где вместо корпуса используют специальную защитную пленку. Их размеры меньше, чем у остальных полупроводниковых приборов.

В классификации полупроводниковых приборов используют несколько признаков. В соответствии с характером преобразования энергии различают электропреобразовательные, фотоэлектрические, излучающие, теплоэлектрические и другие приборы.

Наиболее многочисленную группу электропреобразовательных приборов подразделяют на диоды, транзисторы, тиристоры и др.

По полупроводниковому материалу приборы разделяют на германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые и т. д. По области рабочих частот — на низкочастотные, высокочастотные и приборы диапазона СВЧ. По мощности — на маломощные, средней мощности и мощные. По конструктивно-технологическим параметрам полупроводниковые приборы разделяют на сплавные, диффузионные, р-n-р и n-p-n.

Обозначение электропреобразовательных полупроводниковых приборов в соответствии с ОСТ 11336.038—77 состоит из пяти элементов.

**Первый элемент** — буква или цифра — обозначает материал, из которого изготовлен полупроводниковый прибор: германий Г или 1; кремний К или 2; соединения галлия А или 3; соединения индия И или 4.

**Второй элемент** — буква -обозначает подкласс прибора: А — диод СВЧ; В — варикап; Д — диод (общее обозначение); И—туннельный диод; С — стабилитрон; Т — биполярный транзистор; П — полевой транзистор.

**Третий элемент** число или буква — определяет параметр или назначение прибора.

Например, число 1 относится к биполярным транзисторам с мощностью меньше 1 Вт и предельной частотой < 30 МГц, число 2—к биполярным транзисторам с мощностью меньше 1 Вт и предельной частотой > 300 МГц, а число 4 — к биполярным транзисторам с мощностью меньше 1 Вт, но предельной частотой />300 МГц.

**Четвертый элемент** - число от 101 до 999 — обозначает порядковый номер разработки.

**Пятый элемент** - буква от А до Я (кроме 3, О, Ч) — определяет классификацию по параметрам.

[Оглавление](http://lib.kstu.kz:8300/tb/books/Elektronika/teory/modul2/Lection2.htm#top)

**Электронно – дырочный переход**

В основе работы большинства полупроводниковых приборов и активных элементов интегральных микросхем лежит использование свойств р-n переходов. Однако р-n переход не может быть создан путем простого соприкосновения двух полупроводниковых кристаллов с разными типами электропроводности, так как при этом между кристаллами всегда будет существовать некоторый промежуточный слой. Обычно р-n переходы создают с помощью специальных технологических приемов.

По технологии изготовления р-n переходы разделяют на сплавные и диффузионные. При изготовлении сплавного перехода пластинку примесного полупроводника определенного типа, например кремния n -типа, тщательно шлифуют до необходимой толщины, затем на ее поверхности укрепляют небольшую таблетку элемента III группы таблицы Менделеева и помещают в печь, где она нагревается до температуры, лежащей ниже точки плавления полупроводника, но выше точки плавления примеси. В результате этого происходит вплавление в кристалл примеси и формирование р-n перехода. При диффузионном методе изготовления р-n перехода полупроводниковые пластинки с защитным окисным слоем предварительно подвергают фотолитографической обработке, при которой на поверхности пластинки создаются площади заданной конфигурации, свободные от окисного слоя,— «окна». После фотолитографии через эти «окна» проводят диффузию примесей в полупроводниковую пластинку и получают р-n переходы.

Для изготовления полупроводниковых приборов с заданными электрическими характеристиками необходимо очень точно выдержать размеры областей кристалла с разными типами электропроводности. В сплавном переходе конфигурация отдельных областей кристалла сильно зависит от точности поддержания температуры, толщины пластинки, времени вплавления и количества примесей. Ничтожные отклонения любого показателя от номинального значения приводят к большому разбросу электрических параметров полупроводниковых приборов. Диффузионный процесс более медленный и лучше управляемый, поэтому с помощью диффузии удается создать лучшие р-n переходы.



Рисунок. 2.2 - Структура р-n перехода и его вольт-амперная характеристика (г)

При создании электронно-дырочного перехода на границе между полупроводниками с различными типами электропроводности возникают большие градиенты концентрации подвижных носителей зарядов. Это приводит к тому, что через границу между полупроводниками n- и p-типов проходят диффузионные токи (электронный из n -области, дырочный из p - области). В результате ухода основных носителей на границе полупроводников с разными типами электропроводности создается обедненный слой, в котором в n -области будут находиться положительно заряженные ионы донорных атомов, а в р-области— отрицательно заряженные ионы акцепторных атомов. Этот двойной слой протяженностью в десятые доли микрометра и является р-n переходом (рисунок 2.2, а).

Расположенный в p -n переходе двойной слой неподвижных электрических зарядов создает внутреннее электрическое поле. Часть n -области, непосредственно прилегающая к границе полупроводников с разными типами электропроводности, заряжается положительно, а часть p -области — отрицательно. Вследствие этого между р- и n-областями возникает некоторая разность потенциалов — потенциальный барьер, который препятствует движению основных носителей из одной области полупроводникового кристалла в другую и одновременно способствует движению неосновных носителей. Под воздействием электрического поля р-n перехода дырки легко перемещаются из n-области в p -область, а электроны — в обратном направлении, но перемещение дырок из p -области в n -область так же, как перемещение электронов из n-области в p -область, затруднено, т. е. электрическое поле р-n перехода препятствует увеличению диффузионного тока и не препятствует прохождению дрейфового тока через переход. Естественно, что при отсутствии внешнего напряжения в р-n переходе устанавливается равновесие, при котором взаимно компенсируются заряды донорных и акцепторных ионов, дрейфовый и диффузионный токи, проходящие в противоположных направлениях. При этом р-n переход оказывается электрически нейтральным, а ток через него равен нулю.

Если к р- и n-областям полупроводникового кристалла, в котором создан электронно-дырочный переход, подвести внешнее напряжение, то из-за большого сопротивления перехода по сравнению с сопротивлением остальной части кристалла оно окажется приложенным только к р-n переходу. Внешнее напряжение нарушает равновесие в электронно-дырочном переходе, и возникает ток.

При подключении положительного полюса источника внешнего напряжения к p -области высота потенциального барьера уменьшается, а диффузионный ток основных носителей заряда резко возрастает. Такое включение р-n перехода называют прямым (рисунок 2.2, б). При прямом включении происходит преимущественное введение носителей зарядов в те области полупроводникового кристалла, где они являются неосновными, поэтому этот режим работы р-n перехода называют режимом инжекции неосновных носителей. Если изменить полярность внешнего напряжения (подключить к р-области отрицательный полюс источника), высота потенциального барьера в р-n переходе падает. Уже при U≈ - 0,5 В диффузионный ток прекращается и при дальнейшем повышении внешнего напряжения через р-n переход будет проходить только дрейфовый ток неосновных носителей, который называют обратным. Так как число неосновных носителей значительно меньше, чем основных, величина тока через переход в этом случае будет небольшой по сравнению с током при прямом включении и практически постоянной при изменении внешнего напряжения в широких пределах. Указанное включение р-n перехода называют обратным (рисунок 2.2, в).

Таким образом р-n переход обладает несимметричной вольт-амперной характеристикой (рисунок 2.2, г). При прямом включении через него проходит большой прямой ток, а при обратном - незначительный обратный ток, который практически определяется собственной электропроводностью полупроводника, сильно зависящей от температуры среды. Например, в германиевых полупроводниковых приборах обратный ток р-n перехода возрастает примерно вдвое при повышении температуры на каждые 100 С.

При больших отрицательных напряжениях в р-n переходе наблюдается резкий рост обратного тока. Это явление называют пробоем р-n перехода. Пробой перехода возникает при достаточно сильном электрическом поле, когда неосновные носителя зарядов ускоряются настолько, что ионизируют атомы полупроводника. При ионизации создаются электроны и дырки, которые, разгоняясь, снова ионизируют атомы и т. д., в результате чего диффузионный ток через переход резко возрастает, а на вольт-амперной характеристике р-n перехода в области больших отрицательных напряжений наблюдается скачок обратного тока. Следует отметить, что после пробоя переход выходит из строя только тогда, когда происходят необратимые изменения его структуры в случае чрезмерного перегрева, который наблюдается при тепловом пробое. Если же мощность, выделяющаяся на р-n переходе, поддерживается на допустимом уровне, он сохраняет работоспособность и после пробоя. Такой пробой называют электрическим (восстанавливаемым).