

Электроника.

Лекция 1

Тема: Электрофизические свойства полупроводников.

Диоды. Выпрямители напряжений.

Проводимость материалов, полупроводники, р-п- переход, диоды (ВАХ, назначение, барьерная и диффузионная емкости, потенциальный барьер). Пробой электронный, тепловой. Выпрямительные диоды. Схемы выпрямителей напряжений.

Электрофизические свойства полупроводников

Все вещества образованы атомами, состоящими из положительно заряженных ядер и вращающихся вокруг них отрицательно заряженных электронов. Ядро включает электрически нейтральные частицы — нейтроны и положительно заряженные протоны. Количество протонов определяет заряд ядра. Отрицательный заряд электрона по величине равен положительному заряду протона. В нормальном состоянии число электронов, образующих электронную оболочку атома, равно числу протонов в ядре и атом электрически нейтрален. Электроны вращаются вокруг ядра по орбитам, сгруппированным в слои. Каждому слою соответствует строго определенная энергия электрона W (так называемый разрешенный энергетический уровень). Количество электронов в слоях строго определено: в первом, ближайшем к ядру слое может находиться не более двух электронов, во втором — не более восьми и т.п. Электроны целиком заполненных слоев устойчивы к внешним воздействиям. Не «уместившиеся» во внутренних слоях электроны образуют незаполненный внешний слой, который легко отдает и воспринимает электроны. Эти электроны определяют валентность элемента при химических реакциях. Чем дальше от ядра расположена орбита электрона, тем большей энергией он обладает. Под воздействием энергии теплоты, света, радиации или каких-либо других внешних факторов электрон из валентной зоны может перейти на новую, более удаленную от ядра орбиту. Такой электрон называется возбужденным, а при дальнейшем увеличении энергии, называемой работой выхода, электрон покидает поверхность вещества.

В кристалле происходит взаимодействие между соседними атомами, заключающееся в том, что на электроны «своего» атома воздействуют ядра соседних атомов. В результате разрешенные энергетические уровни электронов смещаются и расщепляются на несколько — по числу соседних атомов в кристаллической решетке. Эти уровни создают энергетические зоны. Совокупность энергетических уровней, соответствующих внешнему слою электронов, образует *валентную зону*. Разрешенные уровни энергии, которые остаются незанятыми, составляют *зону проводимости*, так как ее уровни могут занимать возбужденные электроны, обеспечивающие электропроводность вещества. Между валентной зоной и зоной проводимости может располагаться *запрещенная зона*.

Зонная структура лежит в основе разделения веществ на проводники, полупроводники и диэлектрики. На рис. 1.1 показано расположение энергетических зон для этих групп веществ. У проводников (металлов) валентная зона 1 и зона проводимости 2 перекрывают друг друга (рис. 1.1, а) и валентные электроны легко переходят в зону проводимости. У диэлектриков (рис. 1.1, б) ширина запрещенной зоны велика (более 6 эВ (электрон-вольт)) и для перехода валентных электронов в зону проводимости надо сообщить значительную

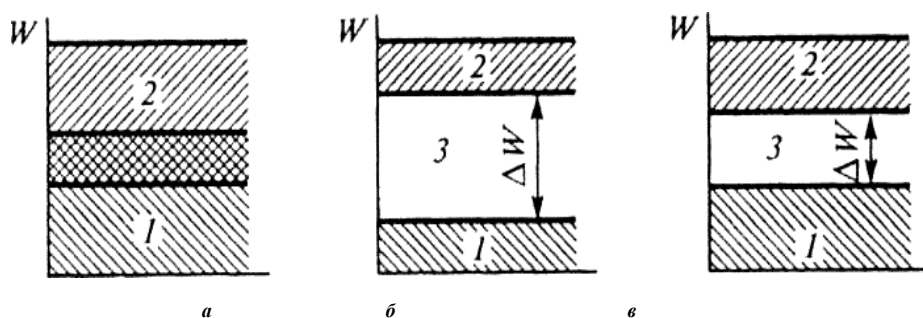


Рис. 1.1. Энергетические зоны проводника (а), диэлектрика (б) и полупроводника (в): 1 — валентная зона; 2 — зона проводимости; 3 — запрещенная зона

энергию (такой процесс происходит при пробое изоляции). У полупроводников (рис. 1.1, в) запрещенная зона относительно мала и колеблется от 0,1 до 3,0 эВ.

В кристаллической решетке четырехвалентного полупроводника (например, кремния) каждый атом связан с четырьмя соседними атомами с помощью двух валентных электронов — по одному от каждого атома. Такая связь называется ковалентной. При ее образовании электрон принадлежит уже не одному, а обоим связанным между собой атомам, т.е. является для них общим. В результате вокруг каждого ядра образуется восьмиэлектронная оболочка, устойчивая к внешним воздействиям. Так как все валентные электроны оказываются прочно связанными между собой, свободных электронов, способных обеспечить электропроводность, нет. Такую структуру имеют химически чистые полупроводники при температуре абсолютного нуля (рис. 1.2, а).

Под воздействием внешних факторов (например, при повышении температуры) отдельные электроны атомов кристаллической решетки приобретают энергию, достаточную для освобождения от ковалентных связей, и становятся свободными.

При освобождении электрона от ковалентной связи в кристаллической решетке возникает как бы свободное место, обладающее положительным зарядом. Такое место называется «дыркой», а процесс образования пары «свободный электрон — дырка» — генерацией. В дырку может «перескочить» валентный электрон из ковалентной связи соседнего атома. В результате ковалентная связь в одном атоме восстановится (этот процесс называется рекомбинацией), а в соседнем разрушится, образуя новую дырку. Такое перемещение дырки по кристаллу равносильно перемещению положительного заряда.

При отсутствии внешнего электрического поля дырки перемещаются хаотически. Если же приложить к кристаллу разность потенциалов, то под действием созданного электрического поля движение дырок и электронов становится упорядоченным и в кристалле возникает электрический ток. Таким образом, проводимость полупроводника обусловлена перемещением как отрица-

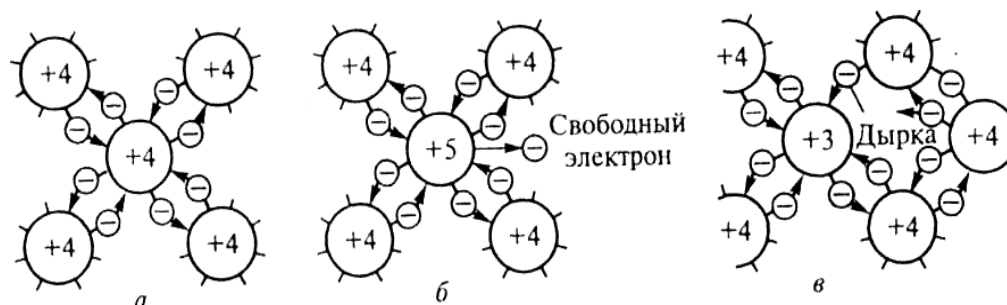


Рис. 1.2. Кристаллическая структура чистого полупроводника (а), полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

тельно заряженных электронов, так и положительно заряженных дырок. Соответственно различают два типа проводимости — электронную, или *проводимость n-типа*, и дырочную, или *проводимость p-типа*.

Для создания полупроводниковых элементов широко применяют *примесные полупроводники*. С четырехвалентным германием и кремнием используют пятивалентные примеси (мышьяк, сурьму, фосфор). Или с четырехвалентным германием и кремнием используют трехвалентные примеси (бор, алюминий, индий, галлий).

В случае пятивалентной примеси (рис. 1.2, б) четыре валентных электрона примесного атома совместно с четырьмя электронами соседних атомов основного вещества образуют ковалентные связи, а пятый валентный электрон оказывается «лишним». В результате даже при комнатной температуре «лишние» электроны легко освобождаются от своих атомов, переходя в зону проводимости. В таких полупроводниках электропроводность обеспечивается главным образом избытком свободных электронов. Их называют полупроводниками **n**-типа, а примеси — *донорными*.

За счет тепловой энергии в полупроводнике «n-типа» могут образоваться и отдельные дырки при генерации пар «свободный электрон — дырка». Поэтому электроны в полупроводнике «n-типа» называют основными, а дырки — неосновными носителями зарядов.

При введении трехвалентной примеси (рис. 1.2, в) в одной из ковалентных связей примесного атома и атома основного полупроводника отсутствует электрон, т.е. образуется дырка. Разрешенные энергетические уровни валентных зон примеси и основного полупроводника находятся рядом. Электрон валентной зоны атома основного полупроводника легко захватывается трехвалентным атомом примеси, в результате чего дырка образуется уже в атоме основного полупроводника и перемещается, таким образом, по кристаллической решетке. Дырки в таких полупроводниках становятся основными носителями зарядов, создавая эффект перемещения положительных зарядов. Трехвалентные примеси называют *акцепторными*, а полупроводники с такой примесью —

полупроводниками р-типа. Неосновными носителями в этом случае выступает небольшое количество свободных электронов, образовавшихся в результате тепловой генерации пар «свободный электрон — дырка».

Р-п-переход и его свойства

Тонкий слой полупроводника между двумя областями, одна из которых представляет полупроводник р-типа, а другая п-типа, называют р-п-переходом. Концентрации основных носителей заряда в **р**- и **п**-областях могут быть равны или существенно различаться. В первом случае **р-п**-переходом называют симметричным, во втором — несимметричным. Чаще используют несимметричные переходы.

Пусть концентрация акцепторной примеси в р-области больше, чем концентрация донорной примеси в п-области (рис. 1.3, а). Соответственно и концентрация дырок (светлые кружки) в **р**- области будет больше, чем концентрация электронов (черные кружки) в п-области.

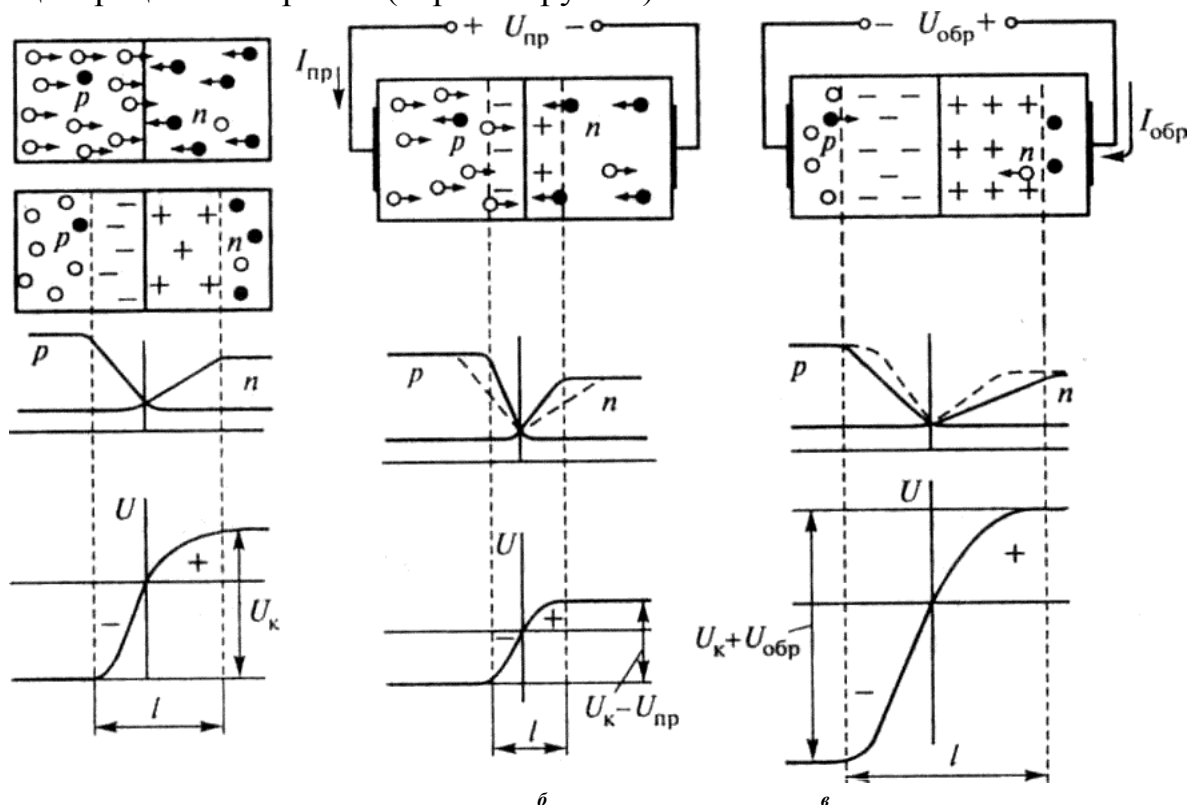


Рис. 1.3. Р-п-структура: а — в равновесном состоянии; б — при прямом внешнем напряжении; в — при обратном внешнем напряжении; l — ширина р-п-перехода

За счет диффузии дырки из **р**-области и электроны из п-области стремятся равномерно распределиться по всему объему. Если бы электроны и дырки были нейтральными, то диффузия в конечном итоге привела бы к полному выравниванию их концентраций по всему объему кристалла. Однако этого не происходит. Дырки, переходя из р-области в п-область, рекомбинируют с частью электронов, принадлежащих атомам донорной примеси. В результате оставшиеся без электронов положительно заряженные ионы донорной примеси образуют приграничный слой с положительным зарядом. В то же время уход этих дырок из р-области приводит к тому, что атомы акцепторной примеси, захватившие

соседний электрон, образуют нескомпенсированный отрицательный заряд ионов в приграничной области. Аналогично происходит диффузионное перемещение электронов из n-области в p-область, приводящее к тому же эффекту. В результате на границе, разделяющей n-область и p-область, образуется узкий, в доли микрона, приграничный слой, одна сторона которого заряжена отрицательно (p-область), а другая — положительно (n-область).

Разность потенциалов, образованную приграничными зарядами, называют **контактной разностью потенциалов U_K** (рис. 1.3, а) или **потенциальным барьером**, преодолеть который носители не в состоянии.

Дырки, подошедшие к границе со стороны p-области, отталкиваются назад положительным зарядом, а электроны, подошедшие из n-области, — отрицательным зарядом. Таким образом, образуется p-n-переход, представляющий собой слой полупроводника с пониженным содержанием носителей — так называемый обедненный слой, который имеет относительно высокое электрическое сопротивление.

Свойства p-n-структуры изменяются, если к ней приложить внешнее напряжение. Если внешнее напряжение противоположно по знаку контактной разности потенциалов (рис. 1.3, б), то дырки p-области, отталкиваясь от приложенного положительного потенциала внешнего источника, приближаются к границе между областями, компенсируют заряд части отрицательных ионов и сужают ширину p-n-перехода со стороны p-области. Аналогично, электроны n-области, отталкиваясь от отрицательного потенциала внешнего источника, компенсируют заряд части положительных ионов и сужают ширину p-n-перехода со стороны n-области. Потенциальный барьер сужается, через него начинают проникать дырки из p-области и электроны из n-области и через p-n-переход начинает течь ток.

С увеличением внешнего напряжения ток возрастает неограниченно, так как создается основными носителями, концентрация которых постоянно восполняется источником внешнего напряжения.

Полярность внешнего напряжения, приводящая к снижению потенциального барьера, называется прямой, открывающей, а созданный ею ток — прямым. При подаче такого напряжения p-n-переход открыт.

Если к p-n-структуре приложить напряжение обратной полярности (рис. 1.3, в), эффект будет противоположным. Под действием электрического поля источника дырки p-области смещаются к отрицательному потенциалу внешнего напряжения, а электроны n-области — к положительному потенциалу. Таким образом, основные носители зарядов отодвигаются внешним полем от границы, увеличивая ширину p-n-перехода, который оказывается почти свободным от носителей заряда. Электрическое сопротивление p-n-перехода при этом возрастает. Такая полярность внешнего напряжения называется обратной, запирающей. При подаче такого напряжения p-n-переход закрыт.

Тем не менее, при обратном напряжении наблюдается протекание небольшого тока **Юбр**. Этот ток, в отличие от прямого определяется носителями не примесной, а собственной проводимости, образующейся в результате генерации пар «свободный электрон — дырка» под воздействием температуры. Эти носители обозначены на рис. 1.3, в единственным электроном в p-области и единственной дыркой в n-области. Значение обратного тока практически не зави-

сит от внешнего напряжения. Это объясняется тем, что в единицу времени количество генерируемых пар «электрон — дырка» при неизменной температуре остается постоянным, и даже при в доли вольт все носители участвуют в создании обратного тока.

При подаче обратного напряжения р-п-переход уподобляется конденсатору, пластинами которого являются р- и п-области, разделенные диэлектриком. Роль диэлектрика выполняет приграничная область, почти свободная от носителей заряда. Эту емкость р-п-перехода называют *барьерной*. Она тем больше, чем меньше ширина р-п-перехода и чем больше его площадь.

Основные технологические процессы изготовления Р-п-переходов

Метод сплавления. Этот технологический процесс заключается в том, что в пластинку полупроводника одного типа проводимости вплавляют примесь, необходимую для образования полупроводника другого типа проводимости. Например, на пластинку германия п-типа помещают таблетку индия и нагревают его до температуры плавления. При этом примесь расплавляется и в ней частично растворяется материал полупроводника, создавая в приграничной зоне слой проводимости р-типа. Сплавные р-п-переходы имеют высокую надежность, работоспособны при больших обратных напряжениях и обладают малым собственным сопротивлением, обеспечивающим малое прямое падение напряжения на них.

Метод диффузии. В этом технологическом процессе р-и п-области получают в полупроводнике путем проникновения акцепторных или донорных примесей, содержащихся в атмосфере паров, куда помещают нагретую до высокой температуры пластинку полупроводника. Так как атомы примеси диффундируют внутрь пластины с поверхности, наибольшая концентрация примеси наблюдается в приповерхностной области и убывает с увеличением расстояния в глубь полупроводника.

Метод эпитаксиального наращивания. Процесс кристаллизации одного вещества на кристалле-подложке другого называется эпитаксиальным наращиванием. При этом кристаллическая решетка подложки предписывает структуру решетки, в которой кристаллизуется наращиваемый слой. Полупроводниковые эпитаксиальные слои (пленки) могут быть получены различными способами: герметическим испарением в вакууме; кристаллизацией в расплавленном веществе, содержащем примесь; осаждением из парообразной формы. Изменяя тип примеси и условия наращивания, можно в широких пределах менять электрические свойства эпитаксиальной пленки.

Ионное легирование. Процесс заключается в бомбардировке ионами примеси нагретой полупроводниковой пластины, находящейся в вакууме. Ионы предварительно разгоняются до определенной скорости и, внедряясь в пластину полупроводника, играют роль донорных или акцепторных примесей.

Оксидное маскирование. Этот процесс используют для того, чтобы обеспечить проникновение примеси только в определенные участки пластины,

защитив от них остальную ее поверхность. В полупроводниковых структурах на основе кремния в качестве маски используется диоксид кремния SiO_2 , который является хорошим изолятором и обладает по сравнению с чистым кремнием значительно меньшей скоростью диффузии в него примесей. Для получения пленки оксида кремниевую пластину нагревают до $900\text{—}1200^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода. После охлаждения те участки полупроводника, которые должны подвергаться воздействию примесей, освобождают от пленки оксида травлением.

Фотолитография. Это процесс получения на поверхности плёнки оксида, необходимого рисунка расположения окон. Оксидную пленку покрывают фоторезистом (светочувствительным слоем) и экспонируют (засвечивают) ультрафиолетовыми лучами через маску, на которой выполнен рисунок в виде прозрачных и непрозрачных участков. Участки фоторезиста, подвергнувшиеся освещению, оказываются задубленными (нерастворимыми), а с неосвещенных участков фоторезист удаляют растворителем. Травление пленки диоксида кремния с участков, не защищенных задубленным фоторезистом, производят плавиковой кислотой, в результате в оксидной пленке образуются окна, через которые производится диффузия, эпитаксиальное наращивание или ионное легирование.

Пробой p-n-перехода.

Пробоем называют резкое изменение режима работы перехода, находящегося под обратным напряжением. Характерной особенностью этого изменения является резкое уменьшение дифференциального сопротивления перехода. После начала пробоя незначительное увеличение обратного напряжения сопровождается резким увеличением обратного тока. В процессе пробоя ток может увеличиваться при неизменном и даже уменьшающемся (по модулю) обратном напряжении (в последнем случае дифференциальное сопротивление оказывается отрицательным).

В основе пробоя p-n-перехода лежат три физических явления:

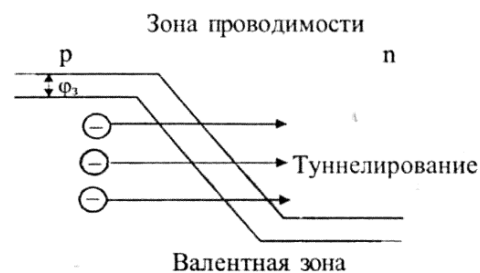
- *туннельного пробоя p-n-перехода (эффект, явление Зенера);*
- *лавинного пробоя p-n-перехода;*
- *теплового пробоя p-n-перехода*

И туннельный, и лавинный пробой принято называть электрическим пробоем.

Рассмотрим все три вида пробоя.

Туннельный пробой. Его называют также зеновским пробоем по фамилии (Zener) ученого, впервые описавшего соответствующее явление в однородном материале. Для объяснения механизма туннельного пробоя схематически изобразим соответствующую зонную диаграмму p-n-перехода (рис. 1.4).

рис. 1.4



Если геометрическое расстояние между валентно зоной и зоной проводимости достаточно мало, то возникает туннельный эффект — явление прохождения электронов сквозь потенциальный барьер. Туннельный пробой имеет место в р-п-переходах с базой, обладающей низким значением удельного сопротивления.

Лавинный пробой. Механизм лавинного пробоя подобен механизму ударной ионизации в газах, схематично явление лавинного пробоя изобразим на рис. 1.5.

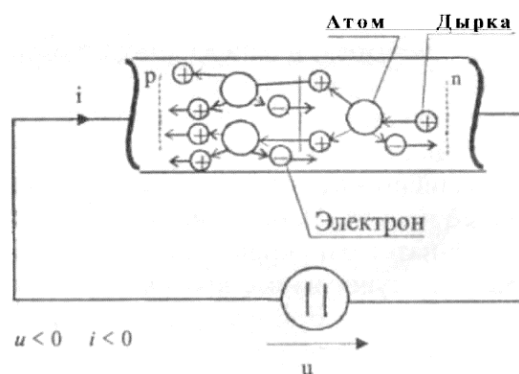


рис. 1.5

Лавинный пробой возникает, если при движении до очередного соударения с атомом дырка (или электрон) приобретает энергию, достаточную для ионизации атома. Расстояние, которое проходит носитель заряда до соударения, называют длиной свободного пробега. Лавинный пробой имеет место в переходах с высокоомной базой (имеющей большое удельное сопротивление).

Тепловой пробой. Увеличение тока при тепловом пробое объясняется разогревом полупроводника в области **р-п-перехода** и соответствующим увеличением удельной проводимости. Тепловой пробой характеризуется отрицательным дифференциальным сопротивлением. Если полупроводник — кремний, то при увеличении обратного напряжения тепловой пробой обычно возникает после электрического (во время электрического пробоя полупроводник разогревается, а затем начинается тепловой пробой). После электрического пробоя р-п-переход не изменяет своих свойств. После теплового пробоя, если полупроводник успел нагреться достаточно сильно, свойства перехода необратимо изменяются (соответствующий полупроводниковый прибор выходит из строя).

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами (приставка «ди-» означает два) и одним р-п-переходом.

По функциональному назначению, принципу образования р-п-перехода и использованию тех или иных его свойств диоды делятся на выпрямительные, стабилитроны, импульсные, диоды Шоттки, фотодиоды, светодиоды и т.п. Один из вариантов конструкции и условное обозначение диода приведены на рис. 1.6, а, б.

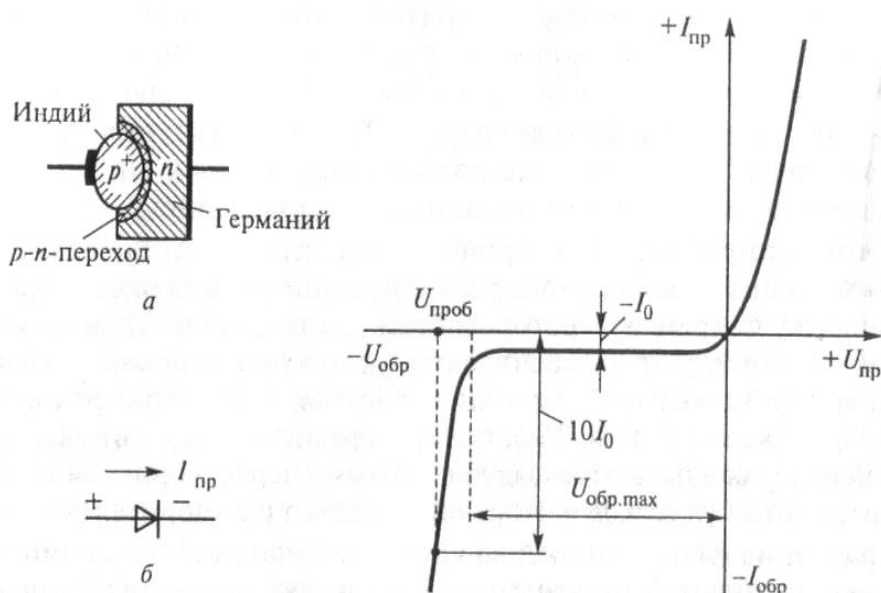


Рис. 1.6. Полупроводниковый диод:

а — вариант конструкции; б — условное обозначение; в — вольт-амперная характеристика

Вывод от р-области называют **анодом**, а от п-области — **катодом**.

Вольтамперная характеристика полупроводникового диода, т.е. зависимость протекающего через диод тока от приложенного к нему напряжения, определяется вольтамперной характеристикой р-п-перехода (рис. 1.6, в). При подаче к диоду прямого напряжения диод открыт и пропускает прямой ток, при этом падение напряжения на нем составляет десятые доли вольт. При подаче обратного напряжения диод закрыт. И если оно не достигает значения $U_{обр\ max}$, то через диод протекает пренебрежительно малый обратный ток I_0 ($U_{обр}$ и $I_{обр}$ рис.1.6,в показаны в разных масштабах). При подаче обратного напряжения, превышающего значение $U_{обр\ max}$, наступает пробой р-п-перехода, при котором обратный ток резко возрастает.

Различают два вида пробоя: электрический (обратимый) и тепловой (необратимый, выводящий полупроводниковый диод из строя). Под воздействием сильного электрического поля электроны освобождаются от ковалентных связей и получают энергию, достаточную для преодоления высокого потенциального барьера. Двигаясь с большой скоростью в р-п-переходе, электроны сталкиваются с нейтральными атомами и ионизируют их, в результате чего появляются новые свободные электроны и дырки. Этот лавинообразный процесс приводит к резкому увеличению обратного тока, т.е. к электрическому пробую р-п-перехода. Если обратный ток ограничивать, то после снятия высокого обратного напряжения р-п-переход восстанавливается. Если же обратный ток не ограничивать, то

электрический пробой перейдет в тепловой, при котором за счет разогрева **p-n**-перехода происходит энергичная генерация пар «свободный электрон — дырка», приводящая к резкому увеличению обратного тока. Увеличение тока приводит к еще большему разогреву p-n-перехода и, значит, к дальнейшей генерации носителей. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к выводу диода из строя (его сгоранию).

Выпрямительные диоды

Эти диоды предназначены для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный. К их быстродействию, емкости p-n-перехода и стабильности параметров высоких требований не предъявляют. Их выполняют на сплавных и диффузионных несимметричных p-n-переходах. Выпрямительные диоды характеризуются малым сопротивлением в прямом направлении и позволяют пропускать большие токи (до десятков и сотен ампер) при допустимых обратных напряжениях до 1000 В. Для этого площадь p-n-перехода выполняется относительно большой и, следовательно, емкость p-n-перехода достаточно велика (десятки пикофарад). Поэтому переходные процессы в этих диодах (длительность перехода из открытого состояния в запертое и наоборот при перемене полярности приложенного напряжения) протекают относительно долго.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

- допустимое обратное напряжение $U_{обр}$, которое диод может выдержать в течение длительного времени без нарушения работоспособности;
- средний прямой ток $I_{пр\ ср}$ — наибольшее допустимое значение постоянного тока, протекающего длительно в прямом направлении;
- максимально допустимый импульсный прямой ток $I_{пр}$ при указанной в паспорте наибольшей длительности импульса;
- средний обратный ток $I_{об\ ср}$ — среднее за период значение обратного тока;
- среднее прямое напряжение $U_{пр\ ср}$ — падение напряжения на открытом диоде;
- средняя рассеиваемая мощность $P_{ср\ д}$ — средняя за период мощность, выделяющаяся в диоде при выпрямлении переменного тока;

- дифференциальное сопротивление $r_{диф} = dU_{пр} / dI_{пр}$.

В источниках *вторичного* электропитания с помощью трансформатора осуществляется снижение напряжения до требуемого значения а при помощи выпрямительных диодов (и также электровакуумных диодов) получают постоянное напряжение. Эти устройства называются *выпрямителями*.

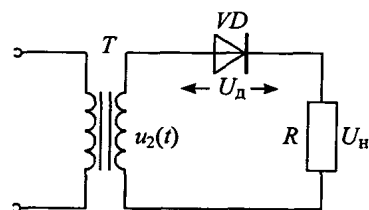


Рис. 1.7.

Однополупериодная
схема выпрямителя

На рис. 1.7. приведена схема однополупериодного полупроводникового выпрямителя, на которой: T — трансформатор, VD — диод, R — нагрузка, $u_2(t)$, $U_{д}$, $U_{н}$ — напряжения на вторичной обмотке трансформатора, на диоде и на нагрузке соответственно.

Сопротивление диода в прямом направлении много меньше сопротивления в обратном направлении, поэтому его можно считать вентилем и реальную характеристику

заменить кусочно-ломаной линией, состоящей всего из двух отрезков. Тогда для тока в цепи, представленной на рис. 1.7, можно записать выражение

$$i = \begin{cases} Su_d, & \text{если } u_d \geq 0; \\ 0, & \text{если } u_d < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где S - тангенс угла наклона прямой ветви идеализированной вольтамперной характеристики (крутизна вольтамперной характеристики).

Если на идеализированную вольтамперную характеристику (1.8) (верхняя область левой части рис. 1.8) наложить переменное напряжение (1) (нижняя область левой части рис. 1.8), то под действием этого напряжения ток будет протекать только в те полупериоды, когда анод вентиля имеет более высокий потенциал относительно катода (правая часть рис. 1.8). При смене знака напряжения ток через диод становится равным нулю. Мгновенное значение тока за период определяется следующим выражением:

$$i = \begin{cases} U_m \sin \omega_1 t / (R_H + R_B), & \text{при } 0 < t < T/2; \\ 0 & \text{при } T/2 < t < T, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_B = r_{Tr} + r_d$ - полное сопротивление выпрямителя, r_{Tr} - активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, r_d - сопротивление вентиля (диода) в прямом направлении. В общем случае при расчете выпрямителя следует учесть и реактивное сопротивление обмоток трансформатора, которое существенно при больших токах нагрузки и числе фаз выпрямленного тока более 3-х. Для маломощных выпрямителей с малыми токами нагрузки реактивным сопротивлением пренебрегают, считая трансформатор источником ЭДС с внутренним сопротивлением, много меньшим сопротивления внешней цепи. При расчетах также часто не учитываются сопротивления вентилях в открытом состоянии, поскольку обычно они много меньше сопротивления нагрузки.

Таким образом, ток через сопротивление нагрузки R_H имеет пульсирующий характер и появляется только в один из полупериодов напряжения на вторичной обмотке трансформатора $u_2(t)$.

Поэтому выпрямитель, собранный по схеме рис. 1.7, называется однополупериодным. Выпрямленное напряжение и ток содержат постоянные составляющие (средние за период) U_0 , I_0 и переменные составляющие (пульсации)

$u_{\text{пульсаций}}, i_{\text{пульсаций}}$.

Недостатки однополупериодного выпрямителя:

- большой коэффициент пульсаций;
- малые средние значения выпрямленного тока и напряжения;
- низкий КПД.

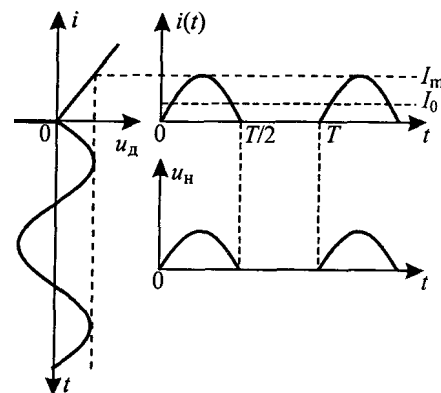


Рис. 1.8. Прохождение переменного тока через вентиляльное устройство

Существуют другие схемы выпрямителей, в которых используются оба полупериода напряжения сети. Такие выпрямители называются двухполупериодными. Наиболее распространен мостовой выпрямитель, схема которого приведена на рис. 1.9.

Переменное напряжение подводится к одной диагонали моста, а сопротивление нагрузки подключается к другой диагонали. В этой схеме вентили пропускают ток попарно VD1, VD4 и VD2, VD3. В один полупериод напряжения, когда потенциал точки А оказывается выше потенциала точки В, пара вентилей VD1 и VD4 будет пропускать ток. В следующий полупериод напряжения ток пропускает другая пара вентилей. Таким образом, в каждый полупериод переменного напряжения через сопротивление нагрузки протекает пульсирующий ток одного направления.

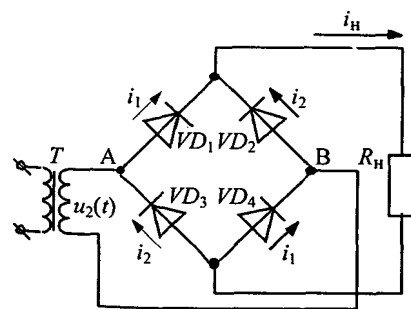


Рис. 1.9 Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

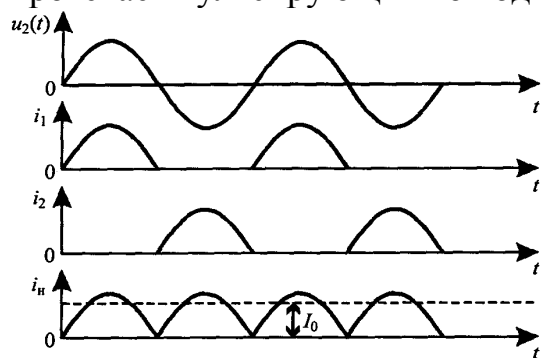


Рис. 1.10 Графики входного напряжения и токов, протекающих через плечи моста и через нагрузку

На рис. 1.10 представлены графики напряжений и токов в этой схеме. На верхнем рисунке изображено исходное напряжение, на двух последующих \square формы токов в первом и втором плечах соответственно. На нижнем графике показана форма тока, протекающего через активную нагрузку.

Качество работы выпрямителей оценивается коэффициентами пульсаций. Для напряжения коэффициент пульсаций

$$P = U_{\text{п}} / U_0, \quad (4)$$

где U_0 - величина постоянного напряжения, $U_{\text{п}}$ - амплитуда пульсаций. Коэффициент пульсаций можно измерить, используя вольтметры постоянного и переменного напряжений. При измерении $U_{\text{п}}$ необходимо учитывать вид измеряемого напряжения: если измеряется эффективное(оно же действующее) значение, то $U_{\text{п}} = U_{\text{эфф}}$.

При одинаковых нагрузках и значениях $U_{\text{м}}$, очевидно двухполупериодная схема выпрямителя имеет меньшие пульсации тока через нагрузку по сравнению с однополупериодной.

Ещё одна схема двухпериодного выпрямителя называется двухпериодный выпрямитель с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора. Состоит из двух диодов и трансформатора имеющего вывод от середины вторичной обмотки трансформатора(рис. 1.11), который служит одним из выводов подключения нагрузки. Т.о. положительная часть периода проходит через верхний (где ток i_{a1}) диод, другой закрыт. Отрицательная полуволна наоборот через нижний диод(где ток i_{a2}) а верхний закрыт.

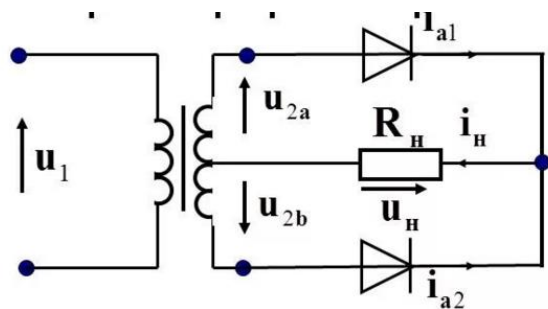


Рис. 1.11 Двухпериодный выпрямитель с выводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора.