

2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

2.1 Общие сведения о диодах

Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего электрического перехода.

В полупроводниковых диодах выпрямляющим электрическим переходом может быть электронно-дырочный (p - n) переход, либо контакт «металл-полупроводник», обладающий вентильным свойством, либо гетеропереход.

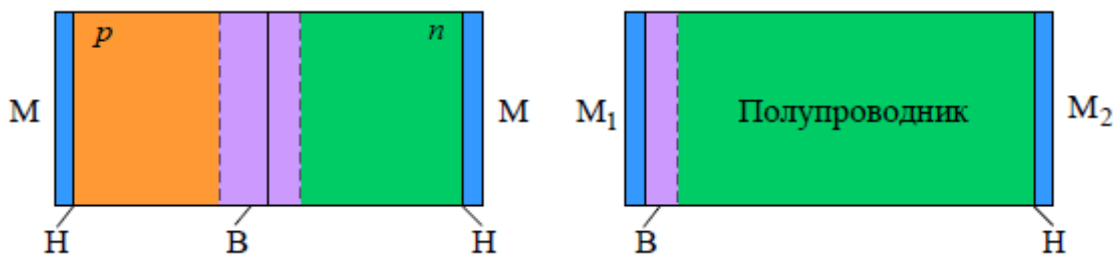


Рисунок 2.1 – Структуры полупроводниковых диодов:

а – с выпрямляющим p - n -переходом;

б – с выпрямляющим переходом на контакте «металл-полупроводник»;

Н – невыпрямляющий (омический) переход;

В – выпрямляющий электрический переход;

М – металл.

В зависимости от типа перехода полупроводниковые диоды имеют следующие структуры (рисунок 2.1):

а) с p - n -переходом или гетеропереходом, в такой структуре кроме выпрямляющего перехода, должно быть два омических перехода, через которые соединяются выводы диода;

б) с выпрямляющим переходом в виде контакта «металл-полупроводник», имеющей всего один омический переход.

В большинстве случаев полупроводниковые диоды с p - n -переходами делают несимметричными, т. е. концентрация примесей в одной из областей значительно больше, чем в другой. Поэтому количество неосновных носителей, инжектируемых из сильно легированной (низкоомной) области, называемой *эмиттером диода*, в слабо легированную (высокоомную) область, называемую *базой диода*, значительно больше, чем в противоположном направлении.

Классификация диодов производится по различным признакам:

- по типу полупроводникового материала – кремниевые, германиевые,
- из арсенида галлия;
- по назначению – выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы и др.;
- по технологии изготовления электронно-дырочного перехода – сплавные, диффузионные и др.;
- по типу электронно-дырочного перехода – точечные и плоскостные.

Основными классификационными признаками являются тип электрического перехода и назначение диода.

В зависимости от геометрических размеров p - n -перехода диоды подразделяют на плоскостные и точечные.

Плоскостными называют такие диоды, у которых размеры, определяющие площадь p - n -перехода, значительно больше его ширины. У таких диодов площадь p - n -перехода может составлять от долей квадратного миллиметра до десятков квадратных сантиметров.

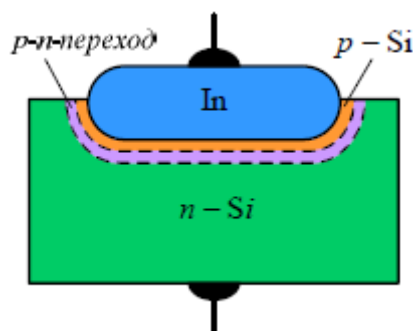


Рисунок 2.2 – Структура плоскостного диода, изготовленного методом сплавления

Плоскостные диоды (рисунок 2.2) изготавливают методом сплавления или методом диффузии.

Плоскостные диоды имеют сравнительно большую величину барьерной ёмкости (до десятков пикофарад), что ограничивает их предельную частоту до 10 кГц .

Промышленностью выпускаются плоскостные диоды в широком диапазоне токов (до тысяч ампер) и напряжений (до тысяч вольт), что позволяет их использовать как в установках малой мощности, так и в установках средней и большой мощности.

Точечные диоды имеют очень малую площадь p - n -перехода, причем линейные размеры ее меньше толщины p - n -перехода.

Точечные p - n -переходы (рисунок 2.3) образуются в месте контакта моно-кристалла полупроводника и острия металлической проволоочки – пружинки.

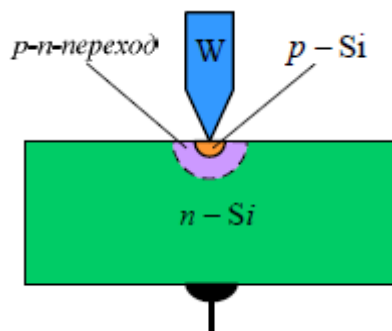


Рисунок 2.3 – Структура точечного диода

Для обеспечения более надежного контакта его подвергают формовке, для чего уже через собранный диод пропускают короткие импульсы тока.

В результате формовки из-за сильного местного нагрева материал острия пружинки расплавляется и диффундирует в кристалл полупроводника, образуя слой иного типа электропроводности, чем полупроводник. Между этим слоем и кристаллом возникает p - n -переход полусферической формы.

Благодаря малой площади p - n -перехода барьерная ёмкость точечных диодов очень незначительна, что позволяет использовать их на высоких и сверхвысоких частотах.

По аналогии с электровакуумными диодами, ту сторону диода, к которой при прямом включении подключается отрицательный полюс источника питания, называют *катодом*, а противоположную – *анодом*.

2.2 Выпрямительные диоды

Выпрямительный диод – это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный.

Выпрямительные диоды, помимо применения в источниках питания для выпрямления переменного тока в постоянный, также используются в цепях управления и коммутации, в ограничительных и развязывающих цепях, в схемах умножения напряжения и преобразователях постоянного напряжения, где не предъявляются высокие требования к частотным и временным параметрам сигналов.

Конструктивно выпрямительные диоды оформляются в металлических, пластмассовых или керамических корпусах в виде дискретных элементов (рисунок 2.4, а) либо в виде диодных сборок, к примеру, диодных мостов (рисунок 2.4, б) выполненных в едином корпусе.

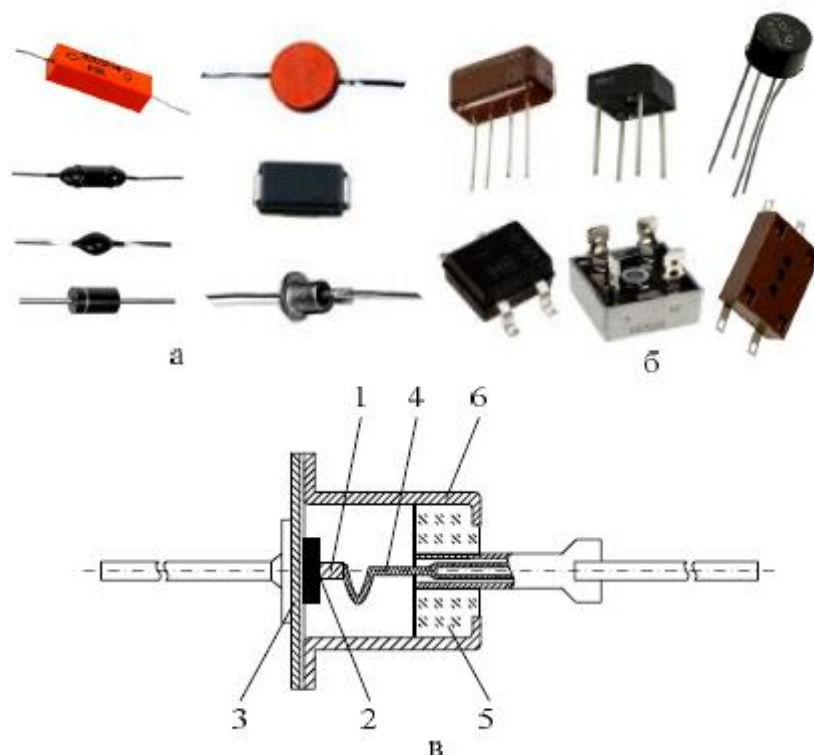


Рисунок 2.4 – Выпрямительные диоды: дискретное исполнение (а), диодные мосты (б) и конструкция одного из маломощных диодов (в)

На рисунке 2.4, в приведена конструкция выпрямительного маломощного диода, изготовленного методом сплавления. В качестве полупроводникового материала использован германий. Изготовление германиевых выпрямительных диодов начинается с впаивания индия 1 в исходную полупроводниковую пластину (кристалл) германия 2 *n*-типа. Кристалл 2 припаивается к стальному кристаллодержателю 3. Основой конструкции является коваровый корпус 6, приваренный к кристаллодержателю. Корпус изолирован от внешнего вывода стеклянным проходным изолятором 5. Внутренний вывод 4 имеет специальный изгиб для уменьшения механических напряжений при изменении температуры. Внешняя поверхность стеклянного изолятора покрывается светонепроницаемым лаком для предотвращения попадания света внутрь прибора, для устранения генерации пар «электрон-дырка» и увеличения обратного тока *p-n*-перехода.

Конструкция ряда маломощных кремниевых диодов практически не отличается от конструкции маломощных германиевых диодов. Кристаллы мощных выпрямительных диодов монтируются в массивном корпусе, который имеет стержень с резьбой для крепления диода на охладителе (радиаторе) (рисунок 2.5), для отвода выделяющегося при работе прибора тепла.



Рисунок 2.5 – Мощные выпрямительные диоды:

- а) дискретное исполнение;
- б) диодный мост;
- в) диодный силовой модуль;
- г) конструкция одного из маломощных диодов.

Для получения p - n -переходов кремниевых выпрямительных диодов вплавляют алюминий в кристалл кремния n -типа или же сплава золота с сурьмой в кремний p -типа. Для получения переходов также используют диффузионные методы.

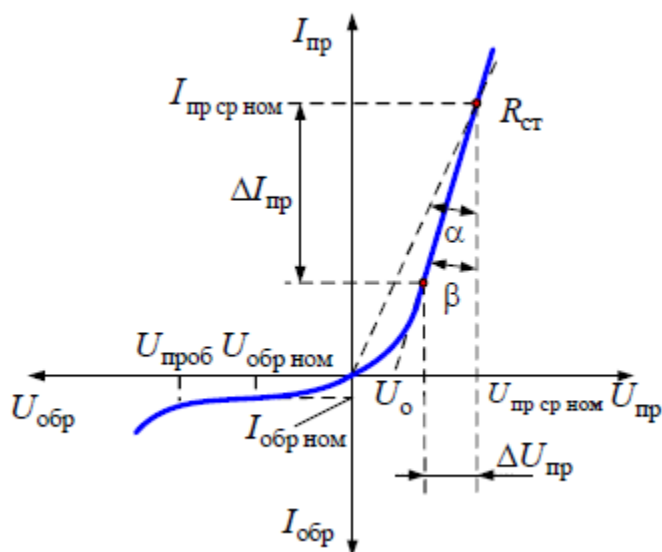


Рисунок 2.6 – Вольт-амперная характеристика выпрямительного диода

Выпрямительные диоды должны иметь как можно меньшую величину обратного тока, что определяется концентрацией неосновных носителей заряда или, в конечном счете, степенью очистки исходного полупроводникового материала. Типовая вольт-амперная характеристика выпрямительного диода описывается уравнением (1.16) и имеет вид, изображенный на рисунке 2.6.

По вольт-амперной характеристике выпрямительного диода можно определить следующие основные параметры, влияющие на его работу:

1. *Номинальный средний прямой ток* $I_{пр. ср. ном}$ – среднее значение тока, проходящего через открытый диод и обеспечивающего допустимый его нагрев при номинальных условиях охлаждения.
2. *Номинальное среднее прямое напряжение* $U_{пр. ср. ном}$ – среднее значение прямого напряжения на диоде при протекании номинального среднего прямого тока. Этот параметр является очень важным для обеспечения параллельной работы нескольких диодов в одной электрической цепи.
3. *Напряжение отсечки* U_0 , определяемое точкой пересечения линейного участка прямой ветви вольт-амперной характеристики с осью напряжений.
4. *Пробивное напряжение* $U_{проб}$ – обратное напряжение на диоде, соответствующее началу участка пробоя на вольт-амперной характеристике, когда она претерпевает излом в сторону резкого увеличения обратного тока.
5. *Номинальное обратное напряжение* $U_{обр. ном}$ – рабочее обратное напряжение на диоде; его значение для отечественных приборов составляет $0,5 \cdot U_{проб}$. Этот параметр используется для обеспечения последовательного включения нескольких диодов в одну электрическую цепь.
6. *Номинальное значение обратного тока* $I_{обр. ном}$ – величина обратного тока диода при приложении к нему номинального обратного напряжения.
7. *Статическое сопротивление диода:*

$$R_{ст} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.1)$$

где $I_{пр}$ – величина прямого тока диода;

$U_{пр}$ – падение напряжения на диоде при протекании тока $I_{пр}$.

Статическое сопротивление диода представляет собой его сопротивление постоянному току.

Кроме рассмотренной системы статических параметров в работе диодов важную роль играет система динамических параметров:

1. *Динамическое (дифференциальное) сопротивление* $R_{дин}$:

$$R_{дин} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}} = \operatorname{tg} \beta, \quad (2.2)$$

где $\Delta I_{пр}$ – приращение прямого тока диода;

$\Delta U_{пр}$ – приращение падения напряжения на диоде при изменении его тока $\Delta I_{пр}$.

Динамическое сопротивление играет важную роль и в рассмотрении процессов при обратном включении диода, например, в стабилитронах. Там динамическое сопротивление определяется через приращение обратного тока и обратного напряжения.

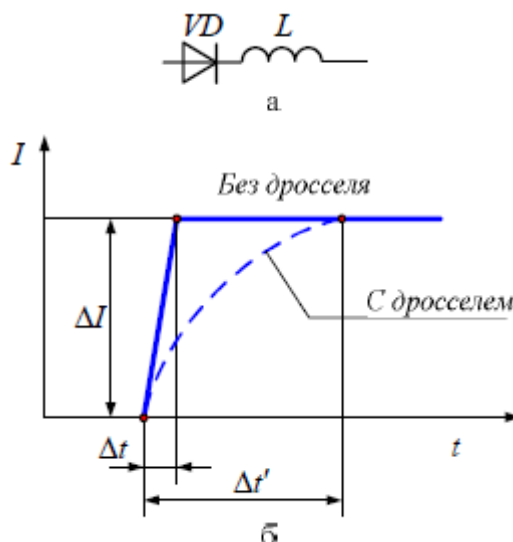


Рисунок 2.7 – Способ уменьшения скорости нарастания прямого тока

2. *Скорость нарастания прямого тока* $\frac{di}{dt}$. Этот параметр является очень важным при включении силовых диодов в цепи, где возможно очень быстрое нарастание прямого тока (например, в цепях, имеющих ёмкостный характер). Если ток через диод не превышает допустимого значения, но имеет очень крутой фронт нарастания, то в полупроводниковом кристалле возможно возникновение явления, называемого *шнурованием тока*, когда ток в первый момент времени из-за неоднородностей в *p-n*-переходе сосредоточится в узкой области *p-n*-перехода, имеющей наименьшее сопротивление, образуя так называемый «токовый шнур». Плотность тока в «шнуре» может оказаться недопустимо большой, что приведет к проплавлению полупроводниковой структуры и выходу прибора из строя. Поэтому для силовых диодов этот параметр часто нормируется в паспортных данных с указанием его предельного значения. Для защиты силовых диодов от выхода из строя из-за большой скорости нарастания тока можно последовательно с диодом включить небольшой дроссель *L* (рисунок 2.7, а). Наличие дросселя *L* в цепи приводит к затягиванию фронта нарастания тока с величины Δt до безопасной величины $\Delta t'$ (рисунок 2.7, б).

3. *Скорость нарастания обратного напряжения* $\frac{du}{dt}$. Если фронт нарастания обратного напряжения на силовом диоде будет очень крутой (это характер-

но для цепей с индуктивным характером), то импульс обратного тока диода с учётом собственной ёмкости p - n -перехода $C_{\delta ap}$ будет равен:

$$i = C_{\delta ap} \cdot \frac{du_c}{dt}, \quad (2.3)$$

где $\frac{du_c}{dt}$ – скорость нарастания обратного напряжения.

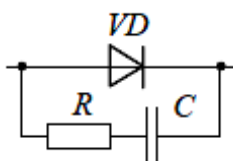


Рисунок 2.8 – Способ уменьшения скорости нарастания обратного напряжения

Даже при сравнительно небольшой величине ёмкости $C_{\delta ap}$ импульс тока может представлять собой опасность для полупроводниковой структуры, если второй сомножитель в выражении (2.3) будет достаточно большим. Для защиты силовых диодов в этом случае их шунтируют защитной RC-цепочкой (рисунок 2.8), причём ёмкость C выбирают больше величины собственной ёмкости p - n -перехода. Тогда импульс обратного тока будет проходить в основном по защитной цепочке, не принося вреда самому диоду.

4. К числу динамических параметров относится и величина собственной ёмкости p - n -перехода силового диода $C_{\delta ap}$.

В настоящее время на практике преимущественно применяется система так называемых предельных параметров, основными из которых являются:

1. *Максимально допустимый средний прямой ток* $I_{пр. ср. max}$. Это максимально допустимое среднее за период значение прямого тока, длительно протекающего через прибор.

Обычно силовые диоды используются совместно с определенным типом охладителя. Это может быть либо массивная металлическая пластина, интенсивно отводящая тепло, выделяющееся в диоде при протекании тока, либо специальная конструкция радиатора, имеющего большую площадь теплоотвода, либо специальный охладитель, имеющий внутри рубашку жидкостного охлаждения, по которой циркулирует вода. Поэтому в справочных материалах приводятся значения предельных токов с учетом влияния охлаждения (скорость и расход охлаждающего воздуха или жидкости).

2. *Максимально допустимый ток перегрузки $I_{пр. \max}$* . Это ток диода, длительное протекание которого вызвало бы превышение максимально допустимой температуры полупроводниковой структуры, но ограниченный по времени так, что превышение этой температуры не происходит.
3. *Максимально допустимый ударный ток $I_{пр. уд. \max}$* . Это максимально допустимая амплитуда одиночного импульса тока синусоидальной формы длительностью 10 мс при заданных условиях работы прибора, что соответствует половине периода тока частотой 50 Гц.
4. *Максимально допустимое импульсное повторяющееся напряжение $U_{обр. и. п. \max}$* . Это максимально допустимое мгновенное значение напряжения, периодически прикладываемого к диоду в обратном направлении. Повторяющееся напряжение характеризуется классом прибора, указывающим его в сотнях вольт и дающимся в паспортных данных.
5. *Неповторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{обр. и. н. \max}$* – максимальное допустимое мгновенное значение любого неповторяющегося напряжения, прикладываемого к диоду в обратном направлении.
6. *Максимально допустимое постоянное обратное напряжение $U_{обр. \max}$* – напряжение, соответствующее началу процесса лавинообразования в приборе (напряжение пробоя).

Большинство указанных параметров обычно приводится в техническом паспорте на прибор, а более подробно информация о параметрах, характеристиках и эксплуатационных свойствах – в технических условиях на прибор.

Особенности вольт-амперных характеристик выпрямительных диодов

На рисунке 2.9 представлена вольт-амперная характеристика кремниевого выпрямительного диода при различной температуре окружающей среды.

Максимально допустимые прямые токи кремниевых плоскостных диодов различных типов составляют 0,1...1600 А. Падение напряжения на диодах при этих токах обычно не превышает 1,5 В. С увеличением температуры прямое падение напряжения уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера *p-n*-перехода и с перераспределением носителей заряда по энергетическим уровням.

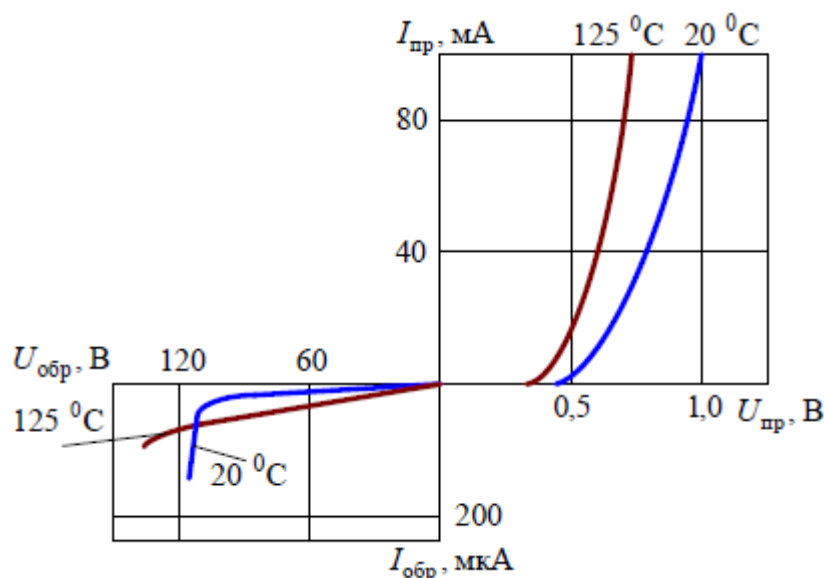


Рисунок 2.9 – Вольт-амперная характеристика одного из кремниевых диодов при различной температуре окружающей среды

Обратная ветвь вольт-амперной характеристики кремниевых диодов не имеет участка насыщения обратного тока, т. к. обратный ток в кремниевых диодах вызван процессом генерации носителей заряда в p - n -переходе. Пробой кремниевых диодов имеет лавинный характер. Поэтому пробивное напряжение с увеличением температуры увеличивается. Для некоторых типов кремниевых диодов при комнатной температуре пробивное напряжение может составлять 500...2000 В.

Диапазон рабочих температур для кремниевых выпрямительных диодов ограничивается значениями $-60...+120^{\circ}\text{C}$. Нижний предел рабочих температур обусловлен различием температурных коэффициентов линейного расширения различных элементов конструкции диода: при низких температурах возникают механические напряжения, которые могут привести к растрескиванию кристалла. С уменьшением температуры также необходимо учитывать увеличение прямого падения напряжения на диоде, происходящее из-за увеличения высоты потенциального барьера на p - n -переходе.

Верхний предел диапазона рабочих температур выпрямительных диодов определяется резким ухудшением выпрямления в связи с ростом обратного тока – сказывается тепловая генерация носителей заряда в результате ионизации атомов полупроводника. Исходя из этого верхний предел диапазона рабочих температур кремниевых выпрямительных диодов, как и большинства других полупроводниковых приборов, связан с шириной запрещенной зоны исходного полупроводникового материала.

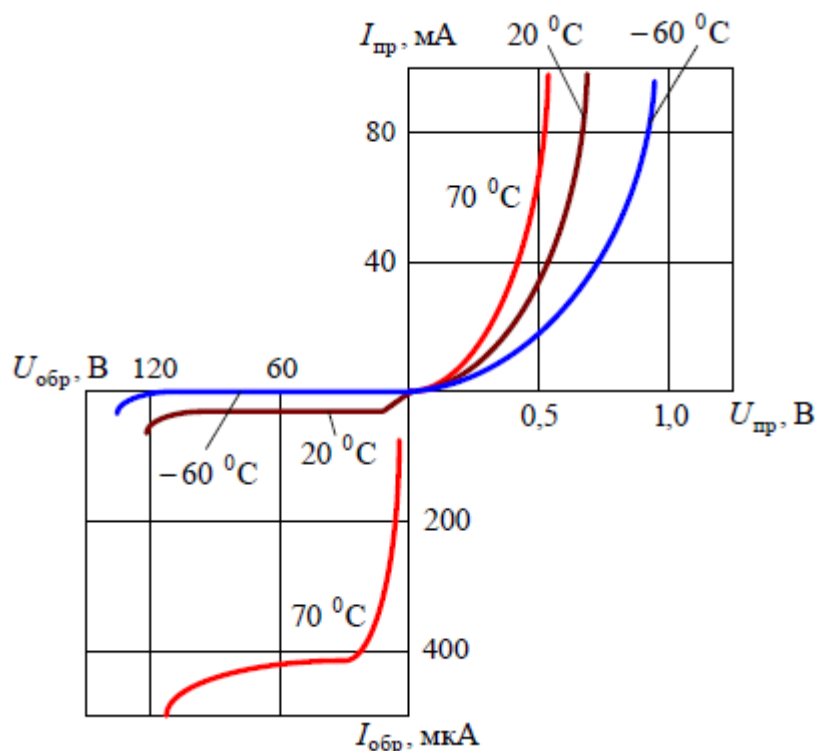


Рисунок 2.10 – Вольт-амперная характеристика одного из германиевых выпрямительных диодов при различной температуре окружающей среды

На рисунке 2.10 представлена вольт-амперная характеристика германиевого выпрямительного диода при различной температуре окружающей среды.

Прямое напряжение на германиевом диоде при максимально допустимом прямом токе практически в два раза меньше, чем на кремниевом диоде. Это связано с меньшей высотой потенциального барьера германиевого перехода, что является достоинством, но, к сожалению, единственным.

Для германиевых диодов характерно существование обратного тока насыщения, что связано с механизмом образования обратного тока – процессом экстракции неосновных носителей заряда.

Плотность обратного тока в германиевых диодах значительно больше, т. к. при прочих равных условиях концентрация неосновных носителей заряда в германии на несколько порядков больше, чем в кремнии. Это приводит к тому, что для германиевых диодов пробой имеет тепловой характер. Поэтому пробивное напряжение с увеличением температуры уменьшается, а значения этого напряжения меньше пробивных напряжений кремниевых диодов.

Верхний предел диапазона рабочих температур германиевых диодов составляет около 75°C .

Существенной особенностью германиевых диодов и их недостатком является то, что они плохо выдерживают даже очень кратковременные импульс-

ные перегрузки при обратном смещении p - n -перехода. Определяется это механизмом пробоя – тепловым пробоем, происходящим при шнуровании тока с выделением большой удельной мощности в месте пробоя.

Перечисленные особенности кремниевых и германиевых выпрямительных диодов связаны с различием ширины запрещенной зоны исходных полупроводников. Из такого сопоставления видно, что выпрямительные диоды с большей шириной запрещенной зоны обладают существенными преимуществами в свойствах и параметрах. Одним из таких представителей является арсенид галлия.

В настоящее время, выпускаемые промышленностью арсенид-галлиевые выпрямительные диоды еще далеки от оптимально возможных. К примеру, диод типа АД112А имеет максимально допустимый прямой ток 300 мА при прямом напряжении 3 В. Большая величина прямого напряжения является недостатком всех выпрямительных диодов, p - n -переходы которых сформированы в материале с широкой запрещенной зоной. Максимально допустимое обратное напряжение для данного диода – 50 В. Это объясняется, вероятнее всего, тем, что в области p - n -перехода имеется большая концентрация дефектов из-за несовершенства технологии.

Достоинствами арсенид-галлиевых выпрямительных диодов являются большой диапазон рабочих температур и лучшие частотные свойства. Верхний предел рабочих температур для диодов АД112А составляет 250°С. Арсенид-галлиевые диоды АД110А могут работать в выпрямителях малой мощности до частоты 1 МГц, что обеспечивается малым временем жизни носителей заряда в этом материале.

Выводы:

1. С повышением температуры обратный ток у германиевых выпрямительных диодов резко возрастает за счет роста теплового тока.
2. У кремниевых диодов тепловой ток очень мал, и поэтому они могут работать при более высоких температурах и с меньшим обратным током, чем германиевые диоды.
3. Кремниевые диоды могут работать при значительно больших обратных напряжениях, чем германиевые диоды. Максимально допустимое постоянное обратное напряжение у кремниевых диодов увеличивается с повышением температуры до максимального значения, в то время как у германиевых диодов резко падает.
4. Вследствие указанных преимуществ в настоящее время выпрямительные диоды в основном изготавливают на основе кремния.

2.3 Импульсные диоды

Импульсный диод – это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Импульсные режимы – это такие режимы, когда диоды переключаются с прямого напряжения на обратное, через короткие промежутки времени порядка долей микросекунды при этом важную роль играют здесь переходные процессы. Основное назначение импульсных диодов – работа в качестве коммутирующих элементов. Условия работы импульсных диодов обычно соответствуют высокому уровню инжекции, т. е. относительно большим прямым токам. Вследствие этого свойства и параметры импульсных диодов определяются переходными процессами.

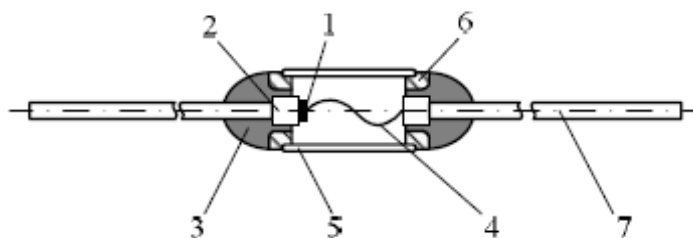


Рисунок 2.11 – Конструкция импульсного диода:

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1 – кристалл полупроводника; | 5 – стеклянный корпус; |
| 2 – кристаллодержатель; | 6 – коваровая трубка; |
| 3 – припой; | 7 – внешние выводы. |
| 4 – контактная пружина; | |

Одной из первых была разработана конструкция точечного импульсного диода (рисунок 2.11). Точечный диод состоит из кристалла германия, припаянного к кристаллодержателю, контактного электрода в виде тонкой проволоки и стеклянного баллона. Особенностью точечных диодов является большое сопротивление базы, что приводит к увеличению прямого напряжения на диоде.

В связи с недостатками точечных диодов они практически полностью вытеснены импульсными диодами, производство которых основано на современных производительных и контролируемых методах формирования *p-n*-переходов (планарной технологии, эпитаксиального наращивания). Основным исходным полупроводниковым материалом при этом служит кремний, а иногда арсенид галлия.

Для ускорения переходных процессов в кремниевых импульсных диодах и для уменьшения значения времени восстановления обратного сопротивления

этих диодов в исходный кремний вводят примесь золота. Эта примесь обеспечивает появление в запрещенной зоне кремния энергетических уровней рекомбинационных ловушек и уменьшение времени жизни неосновных носителей.

В настоящее время большинство конструкций имеет металлокерамический, металлостеклянный или металлический корпус с ленточными выводами.

Рассмотрим процесс переключения такого диода при воздействии на него прямоугольного импульса (рисунок 2.12).

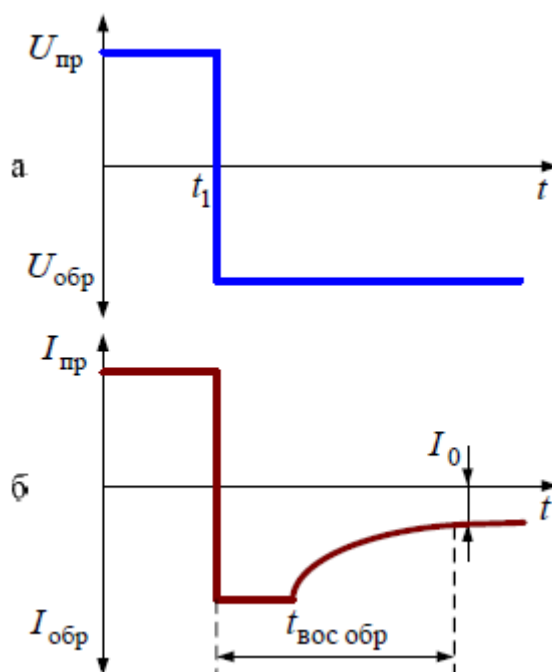


Рисунок 2.12 – Переходные процессы в импульсном диоде:

При прямом напряжении на участке $0 \dots t_1$ происходит инжекция носителей из эмиттерной области в базовую, и их накопление там. При смене полярности напряжения на обратную, в первый момент величина обратного тока будет значительна, а обратное сопротивление диода резко уменьшится, так как накопленные в базе неосновные носители под действием изменившегося направления напряженности электрического поля начнут двигаться в сторону p - n -перехода, образуя импульс обратного тока. По мере перехода их в эмиттерную область, их количество уменьшится и через некоторое время обратный ток достигнет нормального установившегося значения, а сопротивление диода в обратном направлении восстановится до нормальной величины.

Процесс уменьшения накопленного заряда в базе называется рассасыванием, а время, в течение которого обратный ток изменяется от максимального значения до установившегося, называется временем восстановления обратного сопротивления $t_{вос.обр.}$. Время восстановления обратного сопротивления – один из

важнейших параметров импульсных диодов. Чем оно меньше, тем диод лучше. Для улучшения свойств импульсных диодов исходный полупроводник выбирают с малым временем жизни носителей заряда (для более интенсивного процесса рекомбинации в базе), а сам p - n -переход делают с малой площадью, чтобы снизить величину барьерной ёмкости перехода $C_{бар}$.

Выводы:

1. Импульсные диоды работают в режиме электронного ключа.
2. Длительность импульсов может быть очень мала, поэтому диод должен очень быстро переходить из одного состояния в другое.
3. Основным параметром, характеризующим быстродействие импульсных диодов, является время восстановления обратного сопротивления.
4. Для уменьшения $t_{вос.обр.}$ используют специальные меры, ускоряющие процесс рассасывания неосновных носителей заряда в базе.
5. Требованиям, предъявляемым к импульсным диодам, хорошо удовлетворяют диоды на основе барьера Шоттки, которые имеют очень малую инерционность благодаря отсутствию инжекции и накопления неосновных носителей заряда в базе.

2.4 Туннельные диоды

Туннельный диод – это полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперной характеристике при прямом напряжении участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

Для изготовления туннельных диодов используют полупроводниковый материал с очень высокой концентрацией примесей ($10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$), вследствие чего получается малая толщина p - n -перехода (около 10^{-2} мкм), что на два порядка меньше, чем в других полупроводниковых диодах, и сквозь тонкий потенциальный барьер возможно туннелирование свободных носителей заряда.

На рисунке 2.13 представлена вольт-амперная характеристика типичного туннельного диода при прямом смещении.

Параметрами туннельных диодов являются (рисунок 2.14, а):

1. *Пиковый ток* I_n – значение прямого тока в точке максимума вольт-амперной характеристики;
2. *Ток впадины* I_g – значение прямого тока в точке минимума вольт-амперной характеристики;

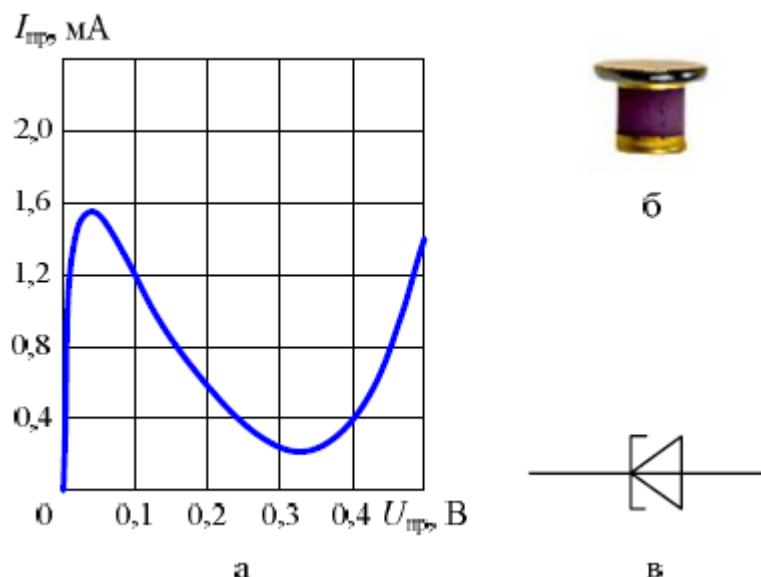


Рисунок 2.13 – Туннельный диод 1И104:

а – вольтамперная характеристика при прямом смещении;

б – конструктивное исполнение;

в – условное графическое изображение туннельных диодов.

3. *Отношение токов $\frac{t_n}{t_g}$* (для туннельных диодов из GaAs отношение $\frac{t_n}{t_g} \geq 10$,

для германиевых $\frac{t_n}{t_g} \approx 3 \dots 6$);

4. *Напряжение пика U_n* – значение прямого напряжения, соответствующее пиковому току;

5. *Напряжение впадины U_g* – значение прямого напряжения, соответствующее току впадины;

6. *Напряжение раствора U_{pp}* – значение прямого напряжения на второй восходящей ветви, при котором ток равен пиковому току.

Работа туннельного диода иллюстрируется диаграммами, изображенными на рисунке 2.14.

В равновесном состоянии системы уровень Ферми постоянен для обеих областей полупроводникового диода, поэтому другие энергетические уровни искривляются настолько сильно, что нижняя граница дна зоны проводимости области *n*-типа оказывается ниже верхней границы потолка валентной зоны области *p*-типа, и так как переход очень узкий, то носители заряда могут переходить из одной области в другую без изменения своей энергии, просачиваться сквозь потенциальный барьер, т. е. туннелировать (рисунок 2.14, б).

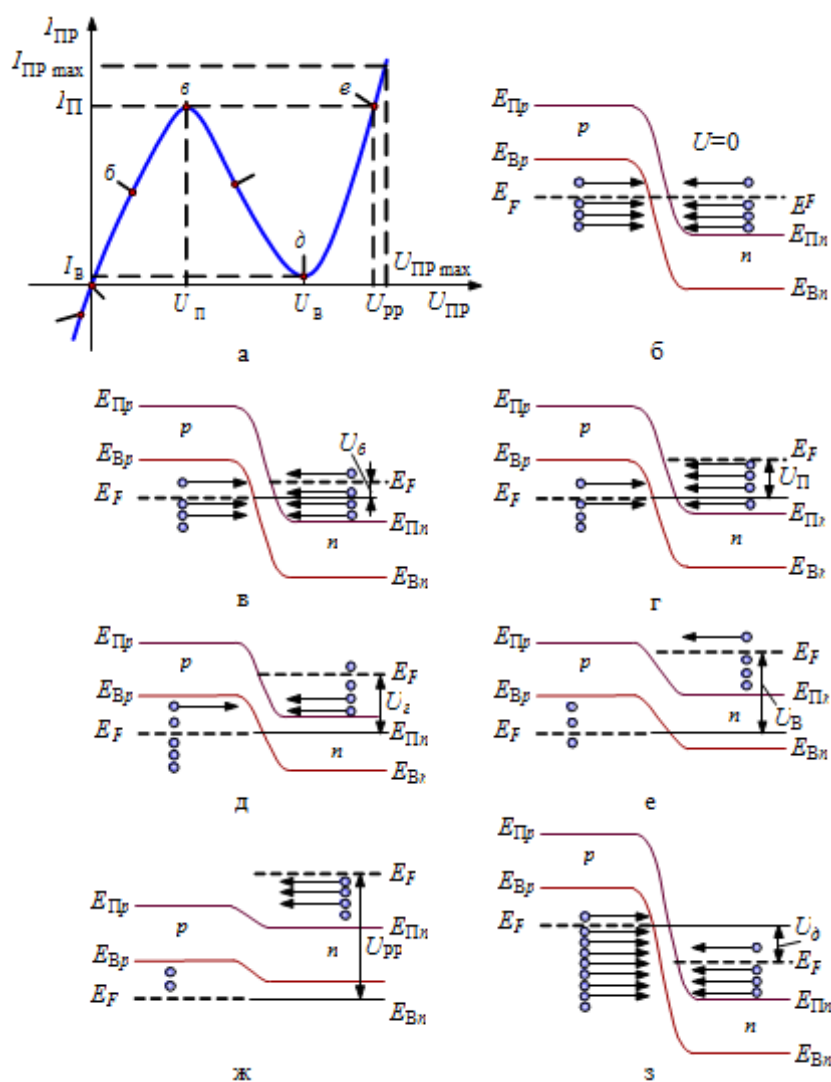


Рисунок 2.14 – Зонные энергетические диаграммы, поясняющие особенности вольт-амперной характеристики туннельного диода

В состоянии равновесия потоки носителей из одной области в другую одинаковы, поэтому результирующий ток равен нулю. Под воздействием внешнего поля энергетическая диаграмма изменится. При подключении прямого напряжения уровень Ферми и положение энергетических зон сместится относительно равновесного состояния в сторону уменьшения потенциального барьера и при этом степень перекрытия между потолком валентной зоны материала p -типа и дном зоны проводимости материала n -типа уменьшится (рисунок 2.14, в). При этом в зоне проводимости материала n -типа уровни, заполненные электронами (ниже уровня Ферми) окажутся против незаполненных уровней в валентной зоне материала p -типа, что приведет к появлению тока, обусловленного большим количеством электронов, переходящих из n -области в p -область. Максимальное значение этого тока будет тогда, когда уровень Ферми материала n -типа и потолок валентной зоны материала p -типа будут совпадать

(рисунок 2.14, г). При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельное перемещение электронов из n -области в p -область начнет убывать (рисунок 2.14, д), так как количество их уменьшается по мере уменьшения степени перекрытия между дном зоны проводимости материала n -типа и потолком валентной зоны материала p -типа. В точке, где эти уровни совпадают, прямой ток p - n -перехода достигнет минимального значения (рисунок 2.14, е), а затем, когда туннельные переходы электронов станут невозможны (рисунок 2.14, ж), носители заряда будут преодолевать потенциальный барьер за счет диффузии и прямой ток начнет возрастать, как у обычных диодов. При подаче на туннельный диод обратного напряжения потенциальный барьер возрастает, и энергетическая диаграмма будет иметь вид, показанный на (рисунок 2.14, з). Так как количество электронов с энергией выше уровня Ферми незначительно, то обратный ток p - n -перехода в этом случае будет возрастать в основном за счет электронов, туннелирующих из p -области в n -область, причем, поскольку концентрация электронов в глубине валентной зоны p -области велика, то даже небольшое увеличение обратного напряжения и связанное с этим незначительное смещение энергетических уровней, приведет к существенному росту обратного тока.

Рассмотренные процессы позволяют сделать вывод, что туннельные диоды одинаково хорошо проводят ток при любой полярности приложенного напряжения, т. е. они не обладают вентильными свойствами. Более того, обратный ток у них во много раз больше обратного тока других диодов. Это свойство используется в другом типе полупроводникового прибора – *обращенном диоде*.

Выводы:

1. Отличительной особенностью туннельных диодов является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Это позволяет использовать туннельный диод в качестве усилительного элемента.
2. Туннельный эффект достигается за счет очень высокой концентрации примесей в p - и n -областях.
3. Так как возникновение туннельного тока не связано с инжекцией носителей заряда, туннельные диоды имеют малую инерционность и вследствие этого могут применяться для усиления и генерации высокочастотных колебаний.

2.5 Обращенный диод

Обращенный диод – это разновидность туннельного диода, у которого концентрация примесей подобрана таким образом, что в уравновешенном со-

стоянии при отсутствии внешнего напряжения потолок валентной зоны материала p -типа совпадает с дном зоны проводимости материала n -типа (рисунок 2.15, а).

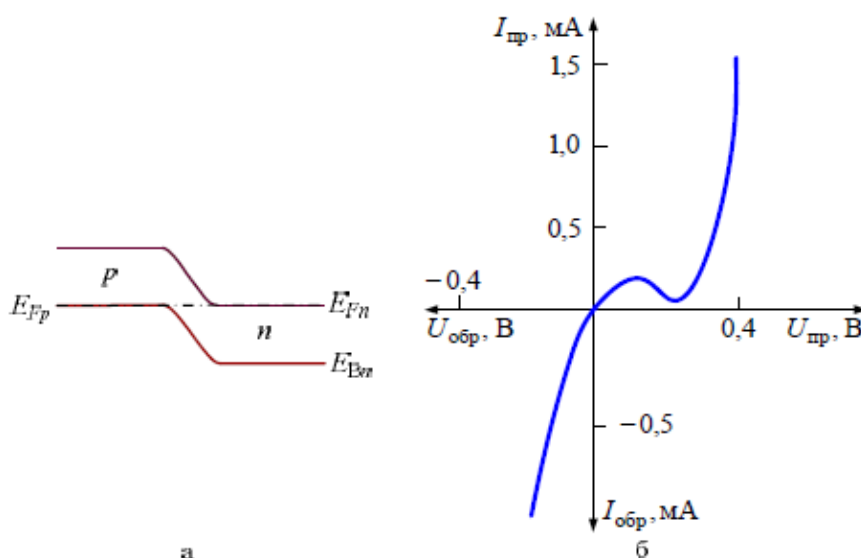


Рисунок 2.15 – Зонная энергетическая диаграмма и вольт-амперная характеристика типичного обращённого диода

В этом случае туннельный эффект будет иметь место только при малых значениях обратного напряжения и вольт-амперная характеристика такого прибора будет аналогична обратной ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода (рисунок 2.15, б). Поэтому обратные токи в обращенных диодах оказываются довольно большими при очень малых обратных напряжениях (десятки милливольт).

При прямом напряжении на p - n -переходе прямой ток связан с диффузией носителей через понизившийся потенциальный барьер и вольт-амперная характеристика его аналогична прямой ветви вольт-амперной характеристики обыкновенного диода. Поэтому прямой ток образуется только в результате инжекции носителей заряда через потенциальный барьер p - n -перехода, но при прямых напряжениях в несколько десятых долей вольта. При меньших напряжениях прямые токи в обращенных диодах меньше обратных.

Таким образом, этот диод оказывает малое сопротивление току, проходящему в обратном направлении и сравнительно высокое прямому току. Поэтому используются они тогда, когда необходимо выпрямлять очень слабые электрические сигналы величиной в малые доли вольта.

При этом включается он в обратном направлении, что и предопределило название такого диода.

2.6 Диоды Шоттки

Потенциальный барьер, полученный на основе контакта «металл – полупроводник», часто называют *барьером Шоттки*, а диоды, использующие такой потенциальный барьер, – диодами Шоттки. Как уже было рассмотрено выше, в контакте «металл – полупроводник» не происходит накопления неосновных носителей в базе из-за отсутствия инжекции неосновных носителей, вследствие чего значительно уменьшается время восстановления обратного сопротивления, что в сочетании с малой величиной барьерной ёмкости создает идеальные условия для использования таких диодов в импульсных и высокочастотных устройствах.

Диоды Шоттки изготавливаются обычно на основе кремния Si или арсенида галлия GaAs, реже на основе германия Ge. Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода. В первую очередь важна величина контактной разности потенциалов, образующейся на границе контакта. Чаще всего используются металлы Ag, Au, Pt, Pd, W, которые наносятся на полупроводник и дают величину потенциального барьера 0,2...0,9 эВ.

Диоды Шоттки на электрических принципиальных схемах изображают условным обозначением (рисунок 2.16), которое используется только тогда, когда необходимо сделать акцент на том, что в схеме используется именно диод Шоттки.



Рисунок 2.16 – Условное графическое обозначение диода Шоттки

2.7 Варикапы

Варикап – это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной ёмкости *p-n*-перехода от обратного напряжения.

Таким образом, варикап можно рассматривать как конденсатор, ёмкость которого можно регулировать при помощи электрического сигнала. Максимальное значение ёмкости варикапа имеет при нулевом обратном напряжении. При увеличении обратного напряжения ёмкость варикапа уменьшается. На рисунке 2.17 показана зависимость ёмкости варикапа KB126A-5 от приложенного напряжения.

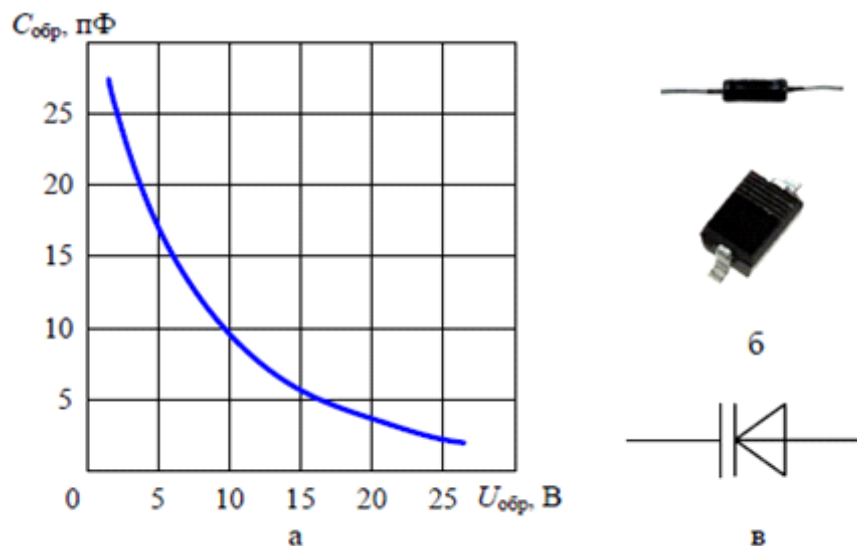


Рисунок 2.17 – Варикапы: вольт-амперная характеристика (а); конструкции (б); условное графическое изображение варикапов (в).

Основные параметры варикапов:

1. *Номинальная ёмкость C_n* – ёмкость между выводами, измеренная при заданном обратном напряжении;
2. *Добротность варикапа Q* – отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте к сопротивлению потерь при заданной ёмкости или обратном напряжении;
3. *Коэффициент перекрытия по ёмкости K_c* – отношение максимальной ёмкости C_{\max} варикапа к его минимальной ёмкости C_{\min} при двух заданных значениях обратного напряжения.
4. *Температурный коэффициент ёмкости α* – относительное изменение ёмкости варикапа, приходящееся на один градус изменения температуры окружающей среды: $\alpha = \frac{\Delta C}{C \cdot \Delta T}$.

2.8 Стабилитроны

Стабилитронами называют полупроводниковые диоды, использующие особенность обратной ветви вольт-амперной характеристики на участке пробоя изменяться в широком диапазоне изменения токов при сравнительно небольшом отклонении напряжения. Это свойство широко используется при создании специальных устройств – стабилизаторов напряжения.

Напряжение пробоя стабилитрона зависит от ширины p - n -перехода, которая определяется удельным сопротивлением материала полупроводника. Поэтому существует определенная зависимость пробивного напряжения (т. е. напряжения стабилизации) от концентрации примесей.

Низковольтные стабилитроны выполняют на основе сильно легированного кремния. Ширина p - n -перехода в этом случае получается очень маленькой, а напряженность электрического поля потенциального барьера – очень большой, что создает условия для возникновения туннельного пробоя. При большой ширине p - n -перехода пробой носит лавинный характер. При напряжении стабилизации U_{cm} от 3 до 6 В в p - n -переходах наблюдается практически туннельный пробой. В диапазоне от 6 до 8 В имеют место процессы как туннельного, так и лавинного пробоя, а в пределах 8...200 В – только лавинного.

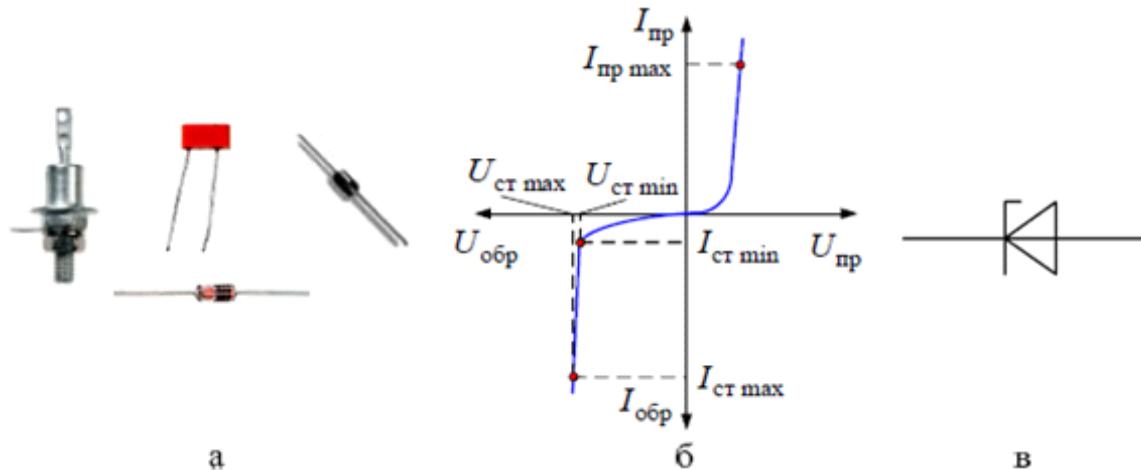


Рисунок 2.18 – Стабилитроны: конструкции (а), вольт-амперная характеристика (б) и условное графическое обозначение (в)

Конструкции стабилитронов очень незначительно, а в некоторых случаях практически не отличаются от конструкций выпрямительных диодов (рисунок 2.18).

Вольт-амперная характеристика стабилитрона представлена на рисунке 2.18, б. Рабочий ток стабилитрона (его обратный ток) не должен превышать максимально допустимое значение $I_{cm\ max}$ во избежание перегрева полупроводниковой структуры и выхода его из строя.

Существенной особенностью стабилитрона является зависимость его напряжения стабилизации от температуры. В сильно легированных полупроводниках вероятность туннельного пробоя с увеличением температуры возрастает. Поэтому напряжение стабилизации у таких стабилитронов при нагревании уменьшается, т. е. они имеют отрицательный *температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН)*:

$$\alpha_{cm} = \frac{1}{U_{cm}} \cdot \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

который показывает – на сколько процентов изменится напряжение стабилизации при изменении температуры прибора на 1°С.

В слабо легированных полупроводниках при увеличении температуры уменьшается длина свободного пробега носителей, что приводит к увеличению порогового значения напряжения, при котором начинается лавинный пробой. Такие стабилитроны имеют положительный ТКН (рисунок 2.19).

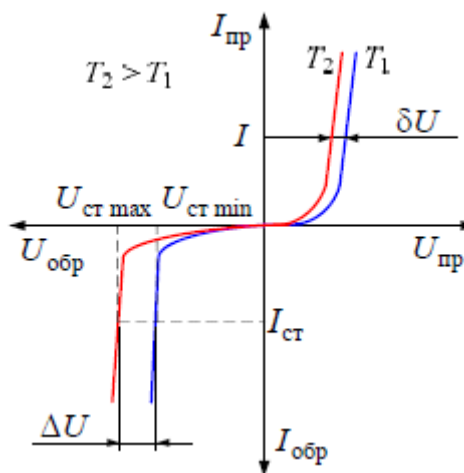


Рисунок 2.19 – Температурная зависимость вольт-амперной характеристики стабилитрона

Для устранения этого недостатка и создания термокомпенсированных стабилитронов последовательно в цепь стабилитрона включают обычные диоды в прямом направлении. Как известно, у обычных диодов в прямом направлении падение напряжения на p - n -переходе при нагревании уменьшается. И если последовательно со стабилитроном (рисунок 2.20) включить n диодов в прямом направлении, где $n = \frac{\Delta U}{\delta U}$, (δU – изменение прямого падения напряжения на диоде при изменении от T_1 до T_2), то можно почти полностью компенсировать температурную погрешность стабилитрона.



Рисунок 2.20 – Термокомпенсация стабилитрона

Основные параметры стабилитронов:

1. *Напряжение стабилизации $U_{ст}$* – напряжение на стабилитроне при протекании через него тока стабилизации;
2. *Ток стабилизации $I_{ст}$* – значение постоянного тока, протекающего через стабилитрон в режиме стабилизации;

3. *Дифференциальное сопротивление стабилитрона* r_{cm} – дифференциальное сопротивление при заданном значении тока стабилизации, т. е. $\frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}}$;

4. *Температурный коэффициент напряжения стабилизации* α_{cm} – отношение относительного изменения напряжения стабилизации стабилитрона к абсолютному изменению температуры окружающей среды при постоянном значении тока стабилизации: $\alpha_{cm} = \frac{1}{U_{cm}} \cdot \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta T} \cdot 100\%$

Предельные параметры стабилитронов:

1. *Минимально допустимый ток стабилизации* $I_{cm \min}$ – наименьший ток через стабилитрон, при котором напряжение стабилизации U_{cm} находится в заданных пределах;

2. *Максимально допустимый ток стабилизации* $I_{cm \max}$ – наибольший ток через стабилитрон, при котором напряжение стабилизации U_{cm} находится в заданных пределах, а температура перехода не выше допустимой;

3. *Максимально допустимая рассеиваемая мощность* P_{\max} – мощность, при которой не возникает теплового пробоя перехода.

Выводы:

1. Полупроводниковый стабилитрон – кремниевый диод, работающий при обратном напряжении в режиме электрического пробоя.

2. Необходимое напряжение стабилизации получают выбором соответствующей концентрации примеси в базе диода.

2.9 Стабисторы

Стабистор – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном его диапазоне и который предназначен для стабилизации напряжения.

Стабилизацию постоянного напряжения можно также получить при использовании диода, включенного в прямом направлении, используя для этой цепи крутой участок прямой ветви вольт-амперной характеристики (рисунок 2.21). При изменении прямого тока в диапазоне от $I_{cm \min}$ до $I_{cm \max}$ падение напряжения будет изменяться в относительно небольшом диапазоне ΔU . Кремниевые диоды, предназначенные для этой цели, называют стабисторами. Для изготовления стабисторов используется кремний с большой концентрацией примесей, что необходимо для получения меньшего сопротивления и меньшей температурной зависимости прямой ветви вольт-амперной характеристики.

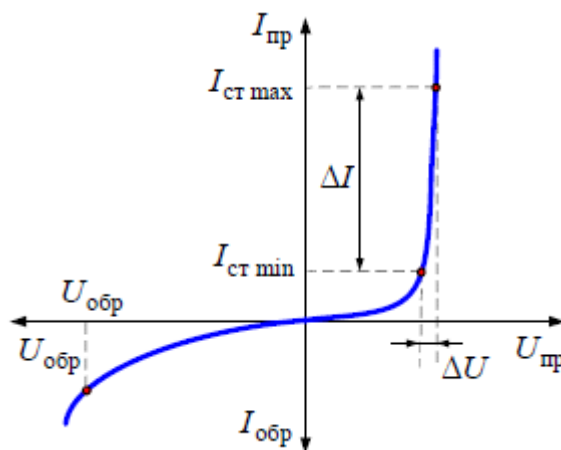


Рисунок 2.21 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона

По сравнению со стабилитронами стабисторы имеют меньшее напряжение стабилизации, определяемое прямым падением напряжения на диоде, и которое составляет примерно $0,7\text{ В}$. Последовательное соединение двух или трёх стабисторов позволяет получить удвоенное или утроенное значение напряжения стабилизации. Некоторые типы стабисторов представляют собой единый прибор с последовательным соединением отдельных элементов.

Основные параметры стабисторов такие же, как у стабилитронов.

2.10 Применение полупроводниковых диодов

При рассмотрении вопросов применения полупроводниковых диодов ограничимся применением стабилитронов и выпрямительных диодов.

Выпрямителями называются устройства, преобразующие электрическую энергию переменного тока в энергию постоянного тока. Структурная схема выпрямителя представлена на рисунке 2.22.

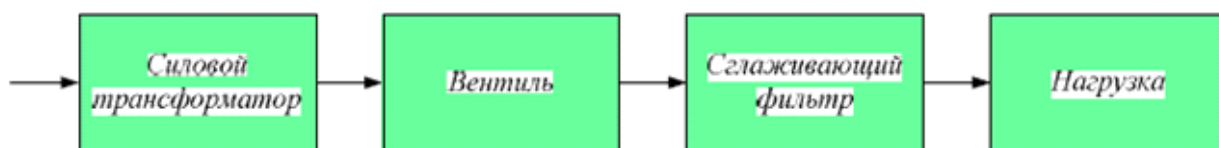


Рисунок 2.22 – Структурная схема выпрямителя

Силовой трансформатор – преобразует переменное питающее напряжение (необходимое напряжение, гальваническая развязка).

Вентиль – обладает односторонней проводимостью и обеспечивает преобразование переменного тока в выпрямленный (ток одного направления).

Сглаживающий фильтр – преобразует выпрямленный ток в ток близкий по форме к постоянному току.