

Тема «Полупроводниковые диоды».

Задание: по изученному материалу заполнить таблицу

Название прибора	Основные параметры	Вольт-амперная характеристика	Применение

Справочный материал

Полупроводниковый диод – это электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами, в котором используются свойства р-n- перехода.

1. Классификация и условные графические обозначения диодов.

Полупроводниковые диоды **классифицируются**:

- 1) по назначению: выпрямительные, высокочастотные и сверхвысокочастотные (ВЧ- и СВЧ- диоды), импульсные, полупроводниковые стабилитроны (опорные диоды), туннельные, обращенные, варикапы и др.;
- 2) по конструктивно – технологическим особенностям: плоскостные и точечные;
- 3) по типу исходного материала: германиевые, кремниевые, арсенидо - галлиевые и др.

Классификация и условные графические обозначения диодов представлены на рис. 1:

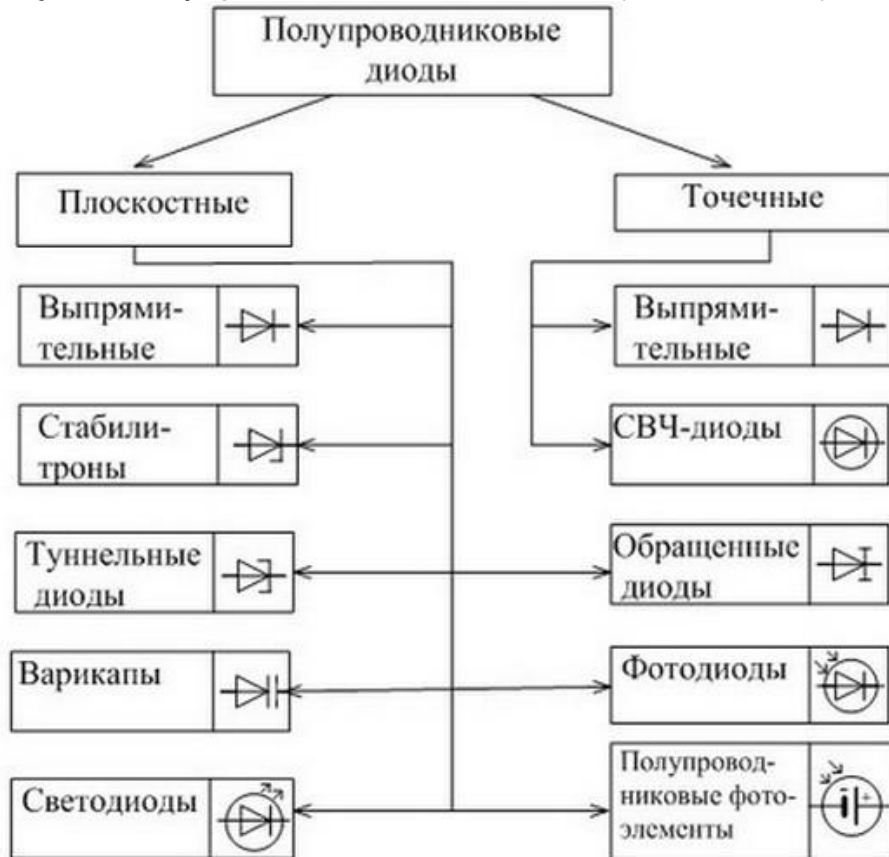


Рис. 1. Классификация и условные графические обозначения диодов.

В точечном диоде используется пластинка германия или кремния с электропроводностью n- типа (рис. 2), толщиной 0,1...0,6мм и площадью 0,5...1,5 мм²; с пластинкой соприкасается заостренная проволочка (игла) с нанесенной на нее примесью. При этом из иглы в основной полупроводник диффундируют примеси, которые создают область с другим типом электропроводности. Таким образом, около иглы образуется миниатюрный p-n- переход полусферической формы.

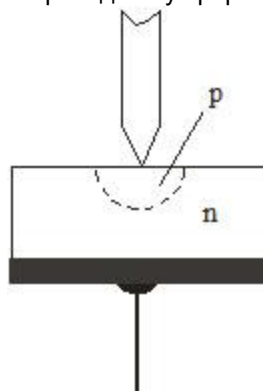


Рис. 2. Устройство точечных диодов

Для изготовления германиевых точечных диодов к пластинке германия приваривают проволочку из вольфрама, покрытого индием. Индий является для германия акцептором. Полученная область германия p- типа является эмиттерной.

Для изготовления кремниевых точечных диодов используется кремний n- типа и проволочка, покрытая алюминием, который служит акцептором для кремния.

В плоскостных диодах p-n- переход образуется двумя полупроводниками с различными типами электропроводности, причем площадь перехода у различных типов диодов лежит в пределах от сотых долей квадратного миллиметра до нескольких десятков квадратных сантиметров (силовые диоды). Плоскостные диоды изготавливаются методами *сплавления* (вплавления) или *диффузии* (рис. 3).

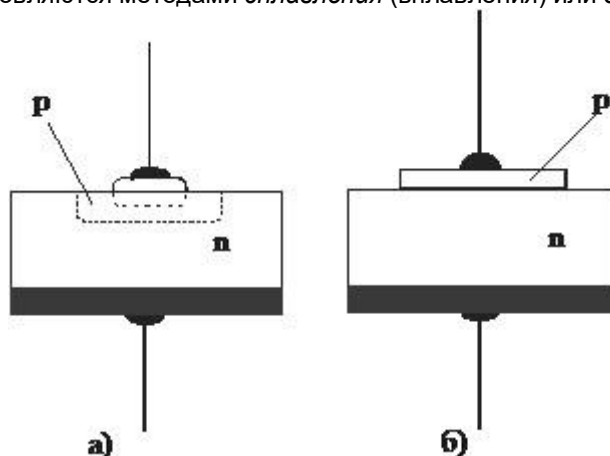


Рис. 3. Устройство плоскостных диодов, изготовленных сплавным (а) и диффузионным методом (б)

В пластинку германия n- типа *вплавляют* при температуре около 500°С каплю индия (рис. 3, а) которая, сплавляясь с германием, образует слой германия p- типа. Область с электропроводностью p- типа имеет более высокую концентрацию примеси, нежели основная пластинка, и поэтому является эмиттером. К основной пластинке германия и к индию припаивают выводные проволочки, обычно из никеля. Если за исходный материал взят германий p- типа, то в него вплавляют сурьму и тогда получается эмиттерная область n- типа.

Диффузионный метод изготовления p-n- перехода основан на том, что атомы примеси диффундируют в основной полупроводник (рис. 3, б). Для создания p- слоя используют диффузию акцепторного элемента (бора или алюминия для кремния, индия для германия) через поверхность исходного материала.

2. Разновидности полупроводниковых диодов.

2.1 Выпрямительные диоды

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

Выпрямительные диоды выполняются на основе р-п- перехода и имеют две области, одна из них является более низкоомной (содержит большую концентрацию примеси), и называется эмиттером. Другая область, база – более высокоомная (содержит меньшую концентрация примеси). В основе работы выпрямительных диодов лежит свойство односторонней проводимости р-п- перехода, которое заключается в том, что последний хорошо проводит ток (имеет малое сопротивление) при прямом включении и практически не проводит ток (имеет очень высокое сопротивление) при обратном включении.

Как известно, прямой ток диода создается основными, а обратный – не основными носителями заряда. Концентрация основных носителей заряда на несколько порядков превышает концентрацию не основных носителей, чем и обуславливаются вентильные свойства диода.

Основными **параметрами** выпрямительных полупроводниковых диодов являются:

- прямой ток диода $I_{пр}$, который нормируется при определенном прямом напряжении (обычно $U_{пр} = 1...2В$);
- максимально допустимый прямой ток $I_{пр\ max}$ диода;
- максимально допустимое обратное напряжение диода $U_{обр\ max}$, при котором диод еще может нормально работать длительное время;
- постоянный обратный ток $I_{обр}$, протекающий через диод при обратном напряжении, равно $U_{обр\ max}$;
- средний выпрямленный ток $I_{вп.ср}$, который может длительно проходить через диод при допустимой температуре его нагрева;
- максимально допустимая мощность P_{max} , рассеиваемая диодом, при которой обеспечивается заданная надежность диода.

По максимально допустимому значению среднего выпрямленного тока диоды делятся на маломощные ($I_{вп.ср} < 0,3А$), средней мощности ($0,3А < I_{вп.ср} < 10А$) и большой мощности ($I_{вп.ср} > 10А$).

Для сохранения работоспособности германиевого диода его температура не должна превышать $+85^{\circ}C$ (рис. 4, а). Кремниевые диоды могут работать при температуре до $+150^{\circ}C$ (рис. 4, б).

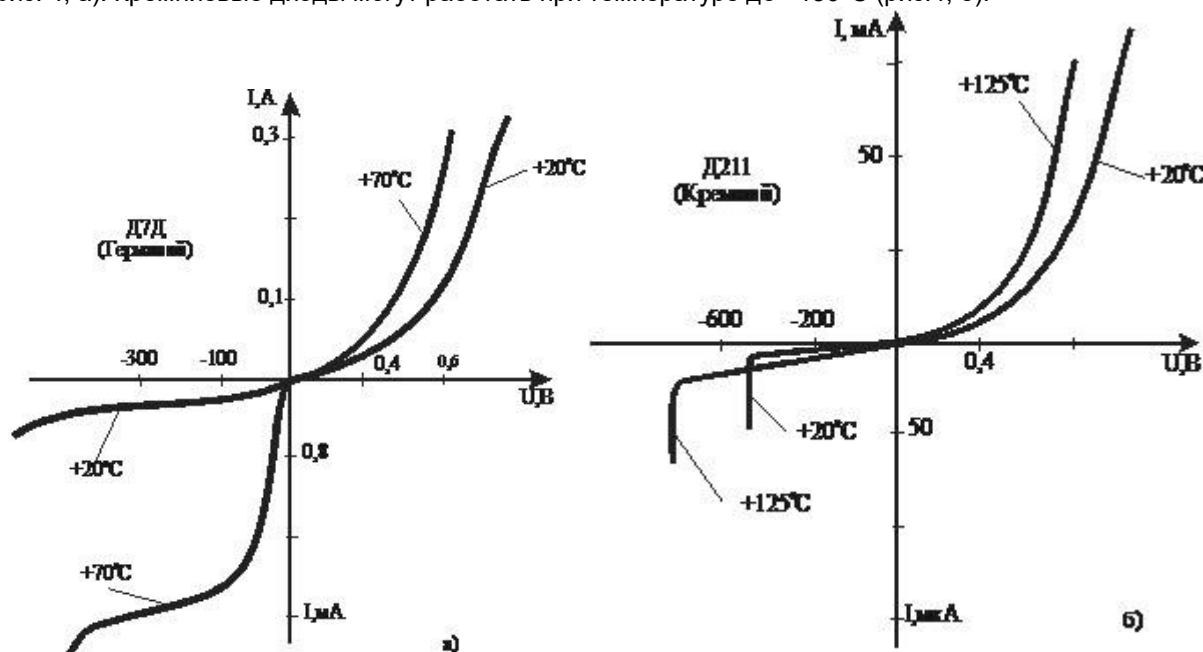


Рис. 4. Изменение вольт - амперной характеристики полупроводникового диода от температуры: а – для германиевого диода; б – для кремниевого диода

Падение напряжения при пропускании прямого тока у германиевых диодов составляет $\Delta U_{пр} = 0,3...0,6В$, у кремниевых диодов – $\Delta U_{пр} = 0,8...1,2В$. Большие падения напряжения при прохождении прямого тока через кремниевые диоды по сравнению с прямым падением напряжения на германиевых диодах связаны с большей высотой потенциального барьера р-п- переходов, сформированных в кремнии.

С увеличением температуры прямое падение напряжения уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера.

При подаче на полупроводниковый диод обратного напряжения в нем возникает незначительный обратный ток, обусловленный движением не основных носителей заряда через р-п- переход.

При повышении температуры р-п- перехода число не основных носителей заряда увеличивается за счет перехода части электронов из валентной зоны в зону проводимости и образования пар носителей заряда электрон-дырка. Поэтому обратный ток диода возрастает.

В случае приложения к диоду обратного напряжения в несколько сотен вольт внешнее электрическое поле в запирающем слое становится настолько сильным, что способно вырвать электроны из

валентной зоны в зону проводимости (эффект Зенера). Обратный ток при этом резко увеличивается, что вызывает нагрев диода, дальнейший рост тока и, наконец, тепловой пробой (разрушение) р-п-перехода. Большинство диодов может надежно работать при обратных напряжениях, не превышающих $(0,7 \dots 0,8)U_{проб}$.

Допустимое обратное напряжение германиевых диодов достигает $100 \dots 400В$, а кремниевых диодов $1000 \dots 1500В$.

Выпрямительные диоды применяются для выпрямления переменного тока (преобразования переменного тока в постоянный); используются в схемах управления и коммутации для ограничения паразитных выбросов напряжений, в качестве элементов электрической развязки цепей и т.д.

В ряде мощных преобразовательных установок требования к среднему значению прямого тока, обратного напряжения превышают номинальное значение параметров существующих диодов. В этих случаях задача решается параллельным или последовательным соединением диодов.

Параллельное соединение диодов (рис. 5, б) применяют в том случае, когда нужно получить прямой ток, больший предельного тока одного диода. Но если диоды одного типа просто соединить параллельно, то вследствие несовпадения прямых ветвей ВАХ они окажутся различно нагруженными и, в некоторых случаях, прямой ток будет больше предельного.

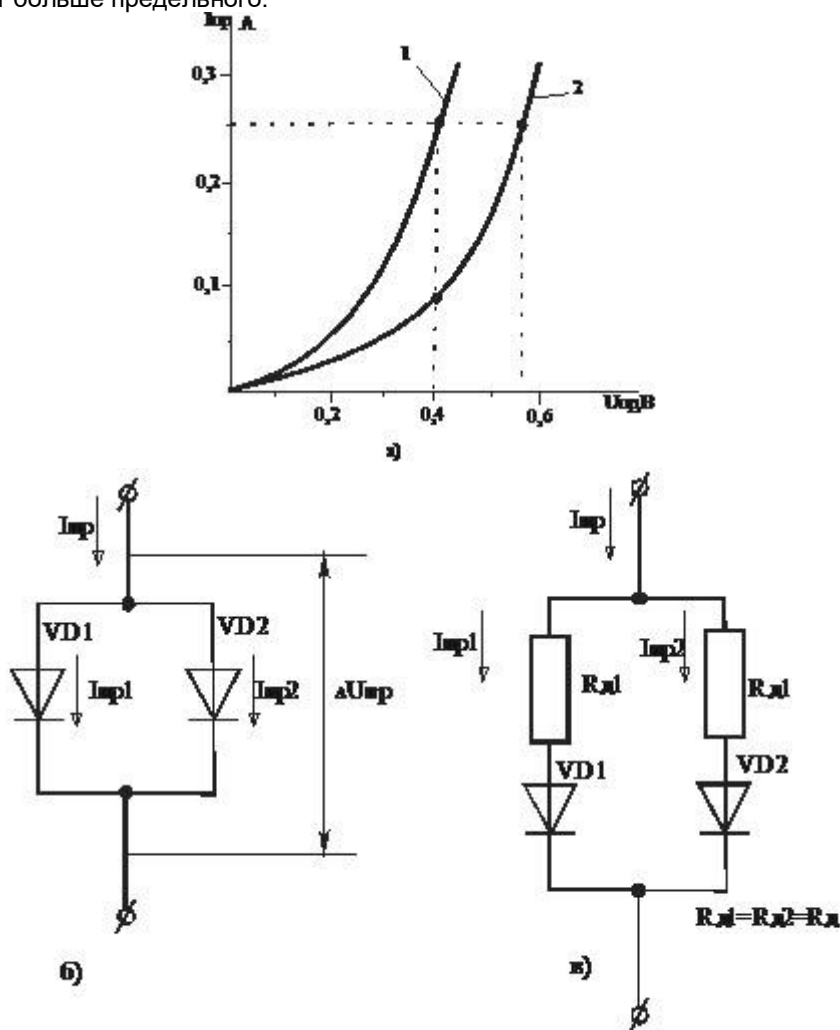


Рис. 5. Параллельное соединение выпрямительных диодов

Для выравнивания токов используют диоды с малым различием прямых ветвей ВАХ (производят их подбор) или последовательно с диодами включают уравнивательные резисторы с сопротивлением в единицы Ом. Иногда включают дополнительные резисторы (рис. 5, в) с сопротивлением, в несколько раз большим, чем прямое сопротивление диодов, для того чтобы ток в каждом диоде определялся главным образом сопротивлением $R_{д}$, т.е. $R_{д} \gg r_{пр}$ вд. Величина $R_{д}$ составляет сотни Ом.

Последовательное соединение диодов применяют для увеличения суммарного допустимого обратного напряжения. При воздействии обратного напряжения через диоды, включенные последовательно, протекает одинаковый обратный ток $I_{обр}$. Однако ввиду различия обратных ветвей ВАХ общее напряжение будет распределяться по диодам неравномерно. К диоду, у которого обратная ветвь ВАХ идет выше, будет приложено большее напряжение. Оно может оказаться выше предельного, что повлечет пробой диодов.

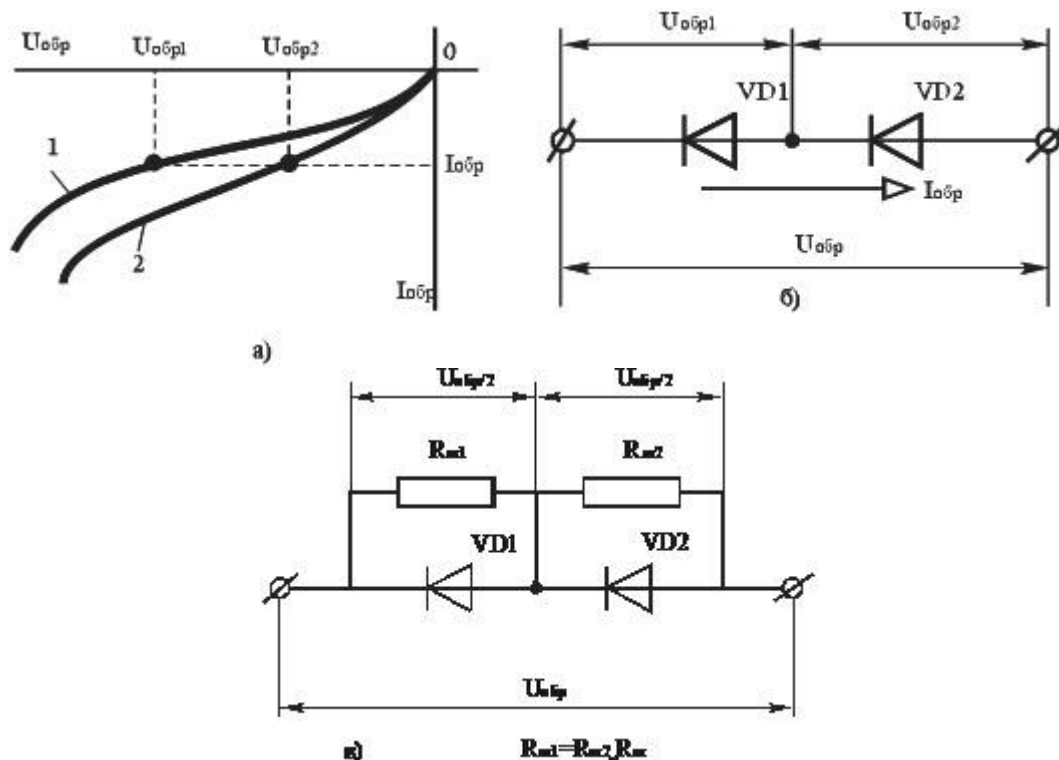


Рис. 6. Последовательное соединение выпрямительных диодов

Для того, чтобы обратное напряжение распределялось равномерно между диодами независимо от их обратных сопротивлений, применяют шунтирование диодов резисторами (рис. 6). Сопротивления $R_{ш}$ резисторов должны быть одинаковы и значительно меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов $R_{ш} \ll g_{обp} \text{ вд}$, чтобы ток, протекающий через резистор $R_{ш}$, был на порядок больше обратного тока диодов.

2.2 Стабилитроны

Полупроводниковый **стабилитрон** – это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области электрического пробоя слабо зависит от тока и который используется для стабилизации напряжения. В полупроводниковых стабилитронах используется свойство незначительного изменения обратного напряжения на р-п- переходе при электрическом (лавинном или туннельном) пробое. Это связано с тем, что небольшое увеличение напряжения на р-п- переходе в режиме электрического пробоя вызывает более интенсивную генерацию носителей заряда и значительное увеличение обратного тока. Низковольтные стабилитроны изготавливают на основе сильнолегированного (низкоомного) материала. В этом случае образуется узкий плоскостный переход, в котором при сравнительно низких обратных напряжениях (менее 6В) возникает туннельный электрический пробой. Высоковольтные стабилитроны изготавливают на основе слаболегированного (высокоомного) материала. Поэтому их принцип действия связан с лавинным электрическим пробоем.

Основные *параметры стабилитронов*:

- напряжение стабилизации $U_{ст}$ ($U_{ст} = 1 \dots 1000\text{В}$);
- минимальный $I_{ст \text{ min}}$ и максимальный $I_{ст \text{ max}}$ токи стабилизации ($I_{ст \text{ min}} \gg 1,0 \dots 10\text{мА}$, $I_{ст \text{ max}} \gg 0,05 \dots 2,0\text{А}$);
- максимально допустимая рассеиваемая мощность P_{max} ;
- дифференциальное сопротивление на участке стабилизации $R_{\partial} = \Delta U_{cm} / \Delta I_{cm}$, (гд $\gg 0,5 \dots 200\text{Ом}$);
- температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации:

$$TKU = \Delta U_{cm} / (\Delta T * U_{cm}) * 100\%$$

TKU стабилитрона показывает на сколько процентов изменится стабилизирующее напряжение при изменении температуры полупроводника на 1°C ($TKU = -0,5 \dots +0,2 \text{ \%}/^\circ\text{C}$).

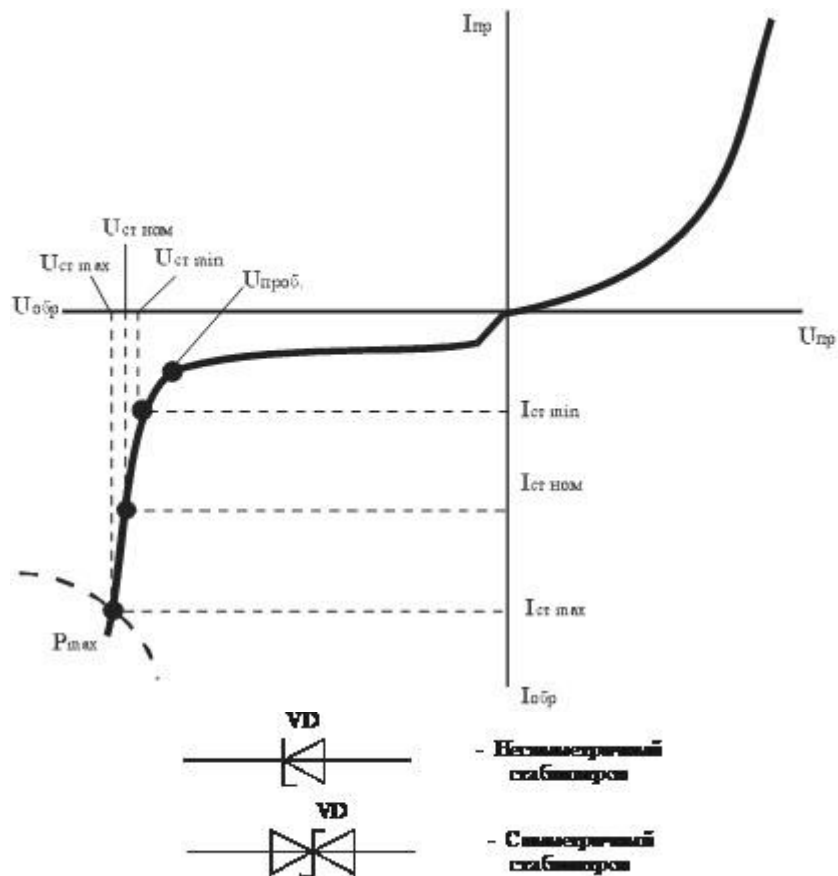


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика стабилитрона и его условное графическое обозначение
 Стабилитроны используют для стабилизации напряжений источников питания, а также для фиксации уровней напряжений в различных схемах.

Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах 0,3...1В можно получить при использовании обратной ветви ВАХ (рис. 7) кремниевых диодов. Диод, в котором для стабилизации напряжения используется обратная ветвь ВАХ, называют стабистором. Существуют также двухсторонние (симметричные) стабилитроны, имеющие симметричную ВАХ относительно начала координат. Стабилитроны допускают последовательное включение, при этом результирующее стабилизирующее напряжение равно сумме напряжений стабилитронов:

$$U_{ст} = U_{ст1} + U_{ст2} + \dots$$

Параллельное соединение стабилитронов недопустимо, т.к. из-за разброса характеристик и параметров из всех параллельно соединенных стабилитронов ток будет возникать только в одном, имеющем наименьшее стабилизирующее напряжение $U_{ст}$, что вызовет перегрев стабилитрона.

2.3 Туннельные и обращенные 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 отрицательного дифференциального сопротивления.

Туннельный диод изготавливается из германия или арсенида галлия с очень большой концентрацией примесей, т.е. с очень малым удельным сопротивлением. Такие полупроводники с малым сопротивлением называют вырожденными. Это позволяет получить очень узкий p-n- переход. В таких переходах возникают условия для относительно свободного туннельного прохождения электронов через потенциальный барьер (туннельный эффект). Туннельный эффект приводит к появлению на прямой ветви ВАХ (рис. 8) диода участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Туннельный эффект состоит в том, что при достаточно малой высоте потенциального барьера возможно проникновение электронов через барьер без изменения их энергии.

Основные параметры туннельных диодов:

- пиковый ток I_p – прямой ток в точке максимума ВАХ;
- ток впадины I_v – прямой ток в точке минимума ВАХ;
- отношение токов туннельного диода I_p/I_v ;
- напряжение пика U_p – прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
- напряжение впадины U_v – прямое напряжение, соответствующее току впадины;
- напряжение раствора $U_{пр}$.

Туннельные диоды используются для генерации и усиления электромагнитных колебаний, а также в быстродействующих переключающих и импульсных схемах.

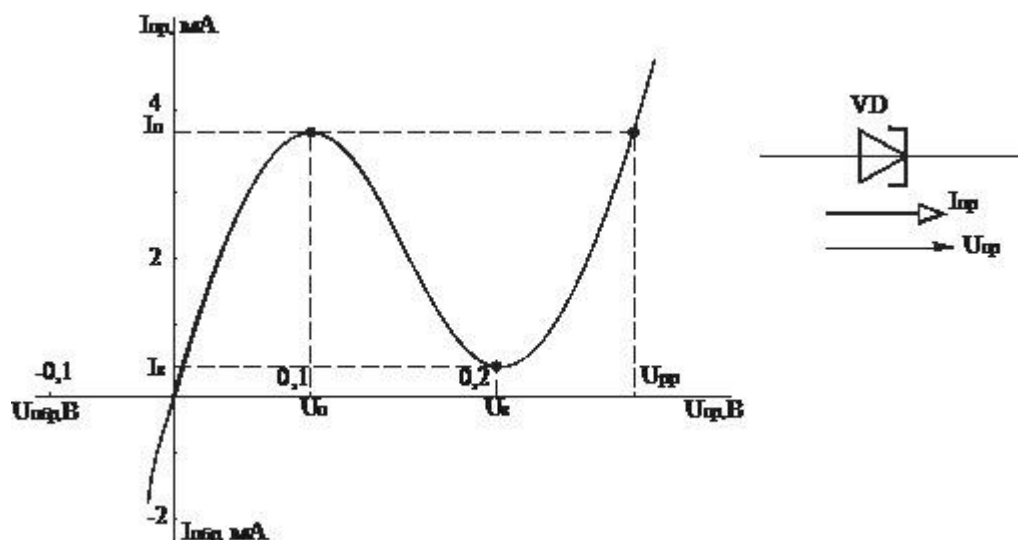


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

Обращенный диод – диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

Принцип действия обращенного диода основан на использовании туннельного эффекта. Но в обращенных диодах концентрацию примесей делают меньше, чем в обычных туннельных. Поэтому контактная разность потенциалов у обращенных диодов меньше, а толщина p-n- перехода больше. Это приводит к тому, что под действием прямого напряжения прямой туннельный ток не создается. Прямой ток в обращенных диодах создается инжекцией не основных носителей зарядов через p-n- переход, т.е. прямой ток является диффузионным. При обратном напряжении через переход протекает значительный туннельный ток, создаваемый перемещением электронов сквозь потенциальный барьер из p- области в n-область. Рабочим участком ВАХ (рис. 9) обращенного диода является обратная ветвь. Таким образом, обращенные диоды обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) – прямому включению.

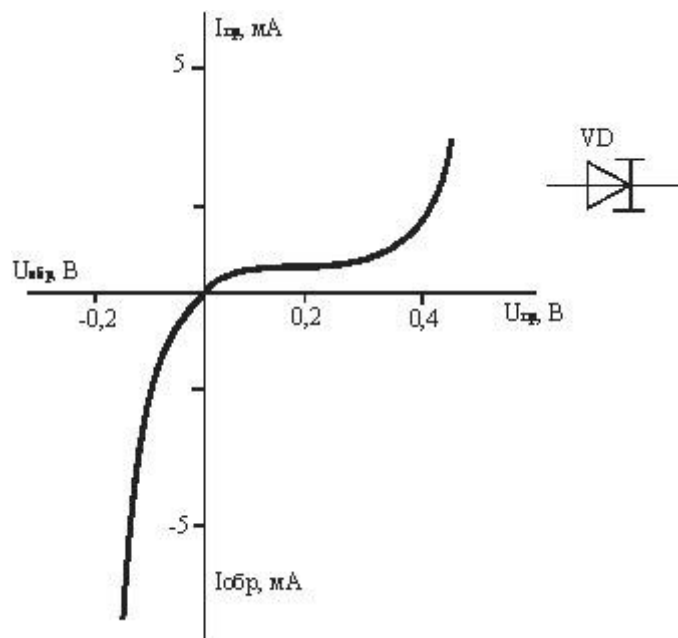


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика обращенного диода

Обращенные диоды применяют в импульсных устройствах, а также в качестве преобразователей сигналов (смесителей и детекторов) в радиотехнических устройствах.

2.4 Варикапы

Варикап – это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость емкости от величины обратного напряжения и который предназначен для применения в качестве элемента с электрически управляемой емкостью.

Вольт-амперная характеристика варикапа приведена на рис. 10.

Полупроводниковым материалом для изготовления варикапов является кремний.

Основные параметры варикапов:

- номинальная емкость C_v – емкость при заданном обратном напряжении ($C_v = 10 \dots 500$ пФ);
- коэффициент перекрытия по емкости $K_c = C_{max}/C_{min}$; ($K_c = 5 \dots 20$) – отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений.

Варикапы широко применяются в различных схемах для автоматической подстройки частоты, в параметрических усилителях.

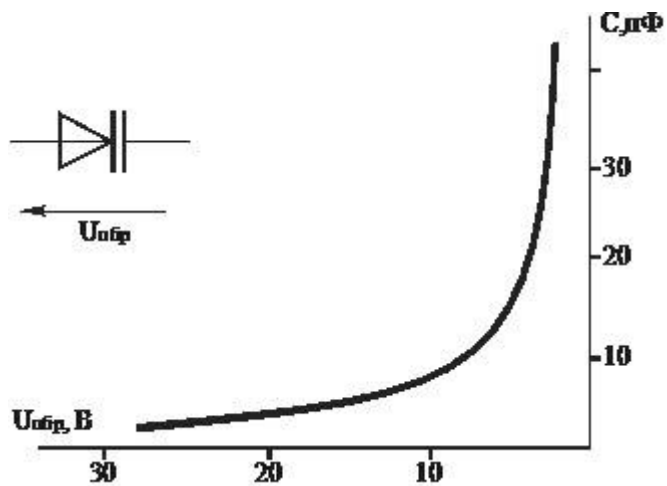


Рис. 10. Вольт-фарадная характеристика варикапа