**ТЕМА 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ**

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

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.

Рисунок 3.1 – Устройство точечных диодов

В точечном диоде используется пластинка германия или кремния с электропроводностью n- типа (рис.3.1), 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 р-n- переход полусферической формы.

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

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

В плоскостных диодах р-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 изготовляются методами сплавления (вплавления) или диффузии (рис. 3.2).

Рисунок 3.2 – Устройство плоскостных диодов, изготовленных сплавным (а) и диффузионным методом (б)

В пластинку германия n- типа вплавляют при температуре около 500°С каплю индия (рис. 3.2, а) которая, сплавляясь с германием, образует слой германия р- типа. Область с электропроводностью р- 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 р- типа, то в него вплавляют сурьму и тогда получается эмиттерная область n- типа.

Диффузионный метод изготовления р-n- перехода основан на том, что атомы примеси диффундируют в основной полупроводник (рис. 3.2, б). Для создания р- слоя используют диффузию акцепторного элемента (бора или алюминия для кремния, индия для германия) через поверхность исходного материала.

**3.1 Выпрямительные диоды**

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

Выпрямительные диоды выполняются на основе р-n- 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-n- 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 обусловливаются вентильные свойства диода.

Основными параметрами выпрямительных полупроводниковых диодов являются:

* прямой ток диода Iпр, который нормируется при определенном прямом напряжении (обычно Uпр = 1…2В);
* максимально допустимый прямой ток Iпр мах диода;
* максимально допустимое обратное напряжение диода Uобр мах, при котором диод еще может нормально работать длительное время;
* постоянный обратной ток Iобр, протекающий через диод при обратном напряжении, равном Uобр мах;
* средний выпрямленный ток Iвп.ср, который может длительно проходить через диод при допустимой температуре его нагрева;
* максимально допустимая мощность Pмах, рассеиваемая диодом, при которой обеспечивается заданная надежность диода.

По максимально допустимому значению среднего выпрямленного тока диоды делятся на маломощные (Iвп.ср ≤ 0,3А), средней мощности (0,3А < Iвп.ср ≤ 10А) и большой мощности (Iвп.ср > 10А).

Для сохранения работоспособности германиевого диода его температура не должна превышать +85°С. Кремниевые диоды могут работать при температуре до +150°С.

Рисунок 3.3 – 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 ΔUпр = 0,3…0,6В, у кремниевых диодов − ΔUпр = 0,8…1,2В. Большие падения напряжения при прохождении прямого тока через кремниевые диоды по сравнению с прямым падение напряжения на германиевых диодах связаны с большей высотой потенциального барьера р-n- 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-n- переход.

При повышении температуры р-n- 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, дальнейшей рост тока и, наконец, тепловой пробой (разрушение) р-n- перехода. Большинство диодов может надежно работать при обратных напряжениях, не превышающих (0,7…0,8)Uпроб.

Допустимое обратное напряжение германиевых диодов достигает − 100…400В, а кремниевых диодов − 1000…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 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 прямой ток будет больше предельного.

Рисунок 3.4 – Параллельное соединение выпрямительных диодов

Для выравнивания токов используют диоды с малым различием прямых ветвей ВАХ (производят их подбор) или последовательно с диодами включают уравнительные резисторы с сопротивлением в единицы Ом. Иногда включают дополнительные резисторы (рис. 3.4, в) с сопротивлением, в несколько раз большим, чем прямое сопротивление диодов, для того чтобы ток в каждом диоде определялся главным образом сопротивлением Rд, т.е. Rд >> rпр вд. Величина Rд 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 Iобр. 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.

Рисунок 3.5 – Последовательное соединение выпрямительных диодов

Для того, чтобы обратное напряжение распределялось равномерно между диодами независимо от их обратных сопротивлений, применяют шунтирование диодов резисторами. Сопротивления Rш резисторов должны быть одинаковы и значительно меньше наименьшего из обратных сопротивлений диодов Rш << rобр вд, чтобы ток, протекающий через резистор Rш, был на порядок больше обратного тока диодов.

**3.2 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-n- переходе при электрическом (лавинном или туннельном) пробое. Это связано с тем, что небольшое увеличение напряжения на р-n- переходе в режиме электрического пробоя вызывает более интенсивную генерацию носителей заряда и значительное увеличение обратного тока.

Низковольтные стабилитроны изготовляют 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 Uст (Uст = 1…1000В);
* минимальный Iст міn и максимальный Iст мах токи стабилизации (Iст міn ≈ 1,0…10мА, Iст мах ≈ 0,05…2,0А);
* максимально допустимая рассеиваемая мощность Рмах;
* дифференциальное сопротивление на участке стабилизации rд = ΔUст/ΔIст , (rд ≈ 0,5…200Ом);
* температурный коэффициент напряжения на участке стабилизации:

TKU стабилитрона показывает на сколько процентов изменится стабилизирующее напряжение при изменении температуры полупроводника на 1°С

(TKU = −0,5…+0,2 %/°С).

Рисунок 3.6 – 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 прямой ветви ВАХ кремниевых диодов. Диод, в котором для стабилизации напряжения используется прямая 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:

Uст = Uст1 + Uст2 +…

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 Uст, что вызовет перегрев стабилитрона.

**3.3 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 изготовляется 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 р-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 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 Iп – прямой ток в точке максимума ВАХ;
* ток впадины Iв − прямой ток в точке минимума ВАХ;
* отношение токов туннельного диода Iп/Iв;
* напряжение пика Uп – прямое напряжение, соответствующее пиковому току;
* напряжение впадины Uв − прямое напряжение, соответствующее току впадины;
* напряжение раствора Uрр.

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

Рисунок 3.7 – 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 р-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 р-n- переход, т.е. прямой ток является диффузионным. При обратном напряжении через переход протекает значительный туннельный ток, создаваемый перемещение электронов сквозь потенциальный барьер из р- области в n-область. Рабочим участком ВАХ 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.

Рисунок 3.8 – Вольт-амперная характеристика обращенного диода

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

**3.4 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.

Полупроводниковым материалом для изготовления варикапов является кремний.

Основные параметры варикапов:

* номинальная емкость Св – емкость при заданном обратном напряжении (Св = 10…500 пФ);
* коэффициент перекрытия по емкости ; (Кс = 5…20) – отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратных напряжений.

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

Рисунок 3.9 – Вольт-фарадная характеристика варикапа

**3.5 Расчет электрических цепей с полупроводниковыми диодами.**

В практических схемах в цепь диода включается какая-либо нагрузка, например резистор (рис. 3.10, а). Прямой ток проходит тогда, когда анод имеет положительный потенциал относительно катода.

Режим диода с нагрузкой называют рабочим режимом. Если бы диод обладал линейным сопротивлением, то расчет тока в подобной схеме не представлял бы затруднений, так как общее сопротивление цепи равно сумме сопротивления диода постоянному току Rо и сопротивления нагрузочного резистора Rн. Но диод обладает нелинейным сопротивлением, и значение Rо у него изменяется при изменении тока. Поэтому расчет тока делают графически. Задача состоит в следующем: известны значения Е, Rн и характеристика диода, требуется определить ток в цепи I и напряжение на диоде Uд.

Рисунок 3.10

Характеристику диода следует рассматривать как график некоторого уравнения, связывающего величины I и U. А для сопротивления Rн подобным уравнением является закон Ома:

 (3.1)

Итак, имеются два уравнения с двумя неизвестными I и U, причем одно из уравнений дано графически. Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков.

Уравнение для сопротивления Rн – это уравнение первой степени относительно I и U. Его графиком является прямая линия называемая линией нагрузки. Она строится по двум точкам на осях координат. При I = 0 из уравнения (3.1) получаем: Е − U = 0 или U = Е, что соответствует точке А на рис. 3.10, б. А если U = 0, то I = E/Rн. откладываем этот ток на оси ординат (точка Б). через точки А и Б проводим прямую, которая является линией нагрузки. Координаты точки D дают решение поставленной задачи.

Следует отметить, что графический расчет рабочего режима диода можно не делать, если Rн >> Rо. В этом случае допустимо пренебречь сопротивлением диода и определять ток приближенно: I ≈ E/Rн.

Рассмотренный метод расчета постоянного напряжения можно применить для амплитудных или мгновенных значений, если источник дает переменное напряжение.

Поскольку полупроводниковые диоды хорошо проводят ток в прямом направлении и плохо в обратном, то большинство полупроводниковых диодов применяется для выпрямления переменного тока.

Простейшая схема для выпрямления переменного тока показана на рис. 3.11. В ней последовательно соединен источник переменного ЭДС – е, диод VD и нагрузочный резистор Rн. Эта схема называется однополупериодной.

Работа простейшего выпрямителя происходит следующим образом. В течение одного полупериода напряжение для диода является прямым и проходит ток, создающий на резисторе Rн падение напряжения UR. В течение следующего полупериода напряжение является обратным, тока практически нет и UR = 0. Таким образом, через диод, нагрузочный резистор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полпериода. Этот ток называют выпрямленным током. Он создает на резисторе Rн выпрямленное напряжение. Графики на рис. 3.11, б иллюстрируют процессы в выпрямителе.

Рисунок 3.11

Амплитуда положительных полуволн на диоде очень мала. Это объясняется тем, что когда проходит прямой ток, то большая часть напряжения источника падает на нагрузочном резисторе Rн, сопротивление которого значительно превышает сопротивление диода. В этом случае

. (3.2)

Для обычных полупроводниковых диодов прямое напряжение не более 1…2В. Например, пусть источник имеет действующее напряжение Е=200В и . Если Uпр max = 2В, то UR max = 278В.

При отрицательной полуволне подводимого напряжения тока практически нет и падение напряжения на резисторе Rн равно нулю. Все напряжение источника приложено к диоду и является для него обратным напряжением. Таким образом, максимальное значение обратного напряжения равно амплитуде ЭДС источника.

Простейшая схема применения стабилитрона приведена на рис. 3.12, а. Нагрузка (потребитель) включена параллельно стабилитрону. Поэтому, в режиме стабилизации, когда напряжение на стабилитроне почти постоянно, такое же напряжение будет и на нагрузке. Обычно Rогр рассчитывают для средней точки Т характеристики стабилитрона.

Рассмотрим случай, когда Е = const, а Rн изменяется в пределах от Rн min до Rн max..

Значение Rогр можно найти по следующей формуле:

 (3.3)

где Iср = 0,5(Iст min+Iст max) – средний ток стабилитрона;

Iн = Uст/Rн – ток нагрузки (при Rн = const);

Iн.ср = 0,5(Iн min+Iн max), (при Rн = var),

причем и .

Рисунок 3.12

Работу схемы в данном режиме можно объяснить так. Поскольку Rогр постоянно и падение напряжения на нем, равное (Е − Uст), также постоянно, то и ток в Rогр, равный (Iст + Iн.ср), должен быть постоянным. Но последнее возможно только в том случае, если ток стабилитрона I и ток нагрузки Iн изменяются в одинаковой степени, но в противоположные стороны. Например, если Iн увеличивается, то ток I на столько же уменьшается, а их сумма остается неизменной.

Принцип действия стабилитрона рассмотрим на примере цепи, состоящей из последовательно соединенного источника переменной ЭДС – е, стабилитрона VD и резистора R (рис. 3.13, а).

В положительный полупериод на стабилитрон подается обратное напряжение, и до величины напряжения пробоя стабилитрона все напряжение прикладывается к стабилитрону, так как ток в цепи равен нулю. После электрического пробоя стабилитрона напряжение на стабилитроне VD остается без изменений и все оставшееся напряжение источника ЭДС будет приложено к резистору R. В отрицательный полупериод стабилитрон включен в проводящем направлении, падение напряжения на нем порядка 1В, а оставшееся напряжение источника ЭДС приложено к резистору R.

Рисунок 3.13