Основные типы полупроводниковых приборов. Структура и режимы работы диодов. Стабилитроны. Дифференциальное сопротивление стабилитронов. Аппроксимация статической вольт-амперной характеристики диодов. Динамические характеристики диодов. Переключение диодов. Выпрямители. Ограничители напряжения и амплитудные детекторы.

Основные типы полупроводниковых приборов

Полупроводниковые приборы – основа современной электроники. В данном курсе лекций подробно рассматриваются следующие типы полупроводниковых приборов: диоды (выпрямительные, Шотки, стабилитроны), биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим p-n переходом, МОП-транзисторы, а также их применение. Вкратце рассматриваются полупроводниковые приборы силовой электроники – тиристоры и БТИЗ. Изучение предмета начинается с диодов.

Структура и режимы работы диодов

Диод – простейший полупроводниковый прибор, представляет собой p-n переход или переход металл-полупроводник для диодов Шотки. Металлический (как правило, алюминиевый) катод нанесен на обратную сторону кремниевой пластины, образуя с областью n+ невыпрямляющий контакт. На верхней стороне пластины в n- области сформирована область p+, на которую нанесен металлический контакт анода. В случае диода Шотки выпрямляющий контакт анода нанесен непосредственно на область n- типа.

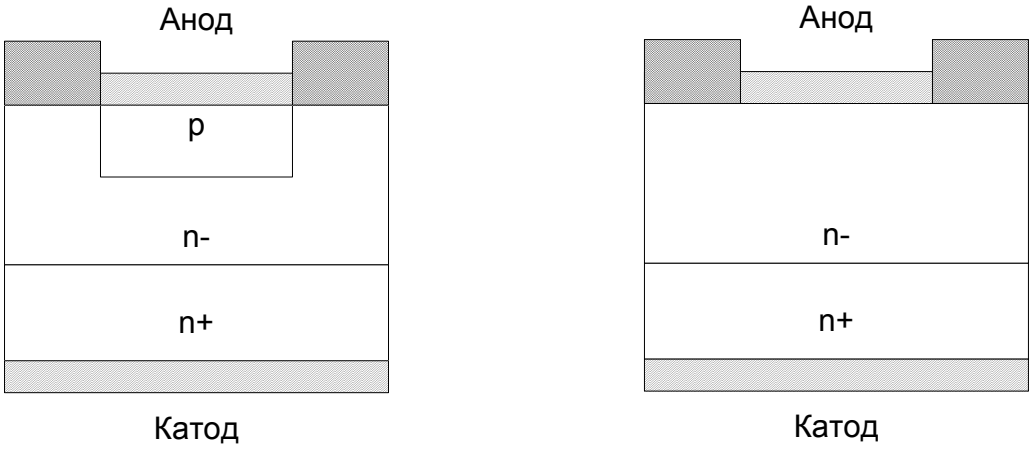

Рисунок 2.1 – Структура диода с p-n переходом (слева) и диода Шотки (справа)

Выпрямление тока происходит на границе p и n- области или на границе металла анода и n- области. Не вдаваясь глубоко в физику полупроводников, рассмотрим поведение диода в области проводимости, области запирания и в области пробоя. Поведение диода рассматривается в квазистатическом режиме.

При приложении к аноду положительного напряжения ток через диод растет в экспоненциальной зависимости, что математически описывается формулой

$$I_D = I_s \left(\exp\left(\frac{U_D}{nU_T}\right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

где I_s – ток насыщения, А,

$n \approx 1 \ldots 2$– коэффициент эмиссии,

температурный потенциал $U_T = \frac{kT}{q} \approx 26$ мВ при комнатной температуре (300 К).

В области проводимости при $U_D \gg nU_T$

$$I_D \approx I_s \exp\left(\frac{U_D}{nU_T}\right) \quad (2.2).$$

Из последней формулы получаем

$$U_D = nU_T \ln\left(\frac{I_D}{I_s}\right) = 2{,}3\, nU_T \log\left(\frac{I_D}{I_s}\right) \quad (2.3).$$

В полулогарифмическом масштабе ВАХ диода представляет собой прямую линию.

Важное практическое значение последней формулы: при изменении тока в 10 раз напряжение на p-n переходе изменяется на 60…120 мВ.

Ток насыщения реальных диодов имеет порядок единиц-десятков наноампер. В области запирания обратный ток диода в теории равен току насыщения; на практике может превышать это значение на несколько порядков из-за утечек.

Если рассматривать поведение диода при изменении температуры, то следует отметить температурную зависимость тока насыщения и зависимость температурного потенциала. Совокупность данных зависимостей при температуре 300 К дает *температурный коэффициент прямого напряжения -1,7 мВ/К. Таким образом, при изменении температуры на 60 К прямое падение напряжения диода изменяется примерно на 100 мВ.*

Область пробоя имеет место при достижении обратным напряжением значения *напряжения пробоя* и характеризуется резким (лавинообразным) возрастанием обратного тока; поэтому пробой называется *лавинным (avalanche breakdown).*

Поведение p-n перехода при пробое описывается приближенной формулой

$$I_{DBR} \approx -I_{BR} \exp\left(-\frac{U_D + U_{BR}}{n_{BR} U_T}\right) \quad (2.4)$$

где I_{BR} – начальный ток пробоя, А,

U_{BR} – напряжение пробоя, В,

n_{BR} – коэффициент эмиссии пробоя.

Данная формула не учитывает тепловой зависимости входящих в нее параметров и не учитывает омическое последовательное сопротивление диода.

Если не принято специальных конструктивных мер, то обычно лавинный пробой p-n перехода необратим и заканчивается тепловым разрушением последнего. В другом случае, диод конструируется так, чтобы пробой не приводил к его разрушению и был обратимым. Такой тип диодов называется *стабилитрон*.

Стабилитроны

Стабилитрон – полупроводниковый диод с точно заданным напряжением пробоя, рассчитанный на непрерывную работу в области пробоя и предназначен для стабилизации или ограничения напряжения. У современных стабилитронов напряжение стабилизации U_Z составляет от 2,7 до 300 В при токе стабилизации от единиц микроампер до 0,1 А.

В теории ВАХ стабилитрона в области пробоя задается формулой (2.4); в практике также следует учитывать последовательное омическое сопротивление R_B:

$$U_D = -U_{BR} - n_{BR}U_T \ln\left(-\frac{I_D}{I_{BR}}\right) - R_B I_D \qquad (2.5).$$

Физически при напряжении стабилизации менее 5 В преобладает туннельный эффект с отрицательным ТКН, при напряжении свыше 5 В преобладает лавинный эффект с положительным ТКН. Для примера, для серии BZX84 для напряжения 2,7 В ТКН составляет до -1,3 $К^{-1}$; для напряжения 5,1 В средний ТКН около 0; для напряжения 75 В ТКН составляет до 1,2 $К^{-1}$.

Дифференциальное сопротивление стабилитронов

Важной характеристикой стабилитрона является *дифференциальное сопротивление в области пробоя*. Дифференциальное сопротивление определяется как отношение малого приращения напряжения к малому приращению тока

$$r_Z = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \qquad (2.6).$$

Для серии BZX84 для напряжения 2,7 В дифференциальное сопротивление достигает 100 Ом; для напряжения 6,2 В не превышает 10 Ом; для напряжения 75 В достигает 255 Ом.

Согласно теории, коэффициент эмиссии пробоя достигает 10…20 при минимальных напряжениях, 4…8 при напряжении в полсотни вольт, и имеет минимум

1…2 при напряжении около 8 В. *Таким образом, для стабилизации напряжения с точки зрения минимизации ТКН и дифференциального сопротивления лучше всего пригодны приборы с напряжением от 5 до 8 В.*

Аппроксимация статической вольт-амперной характеристики диодов

На практике статическая ВАХ диода может быть аппроксимирована кусочно-линейным графиком:

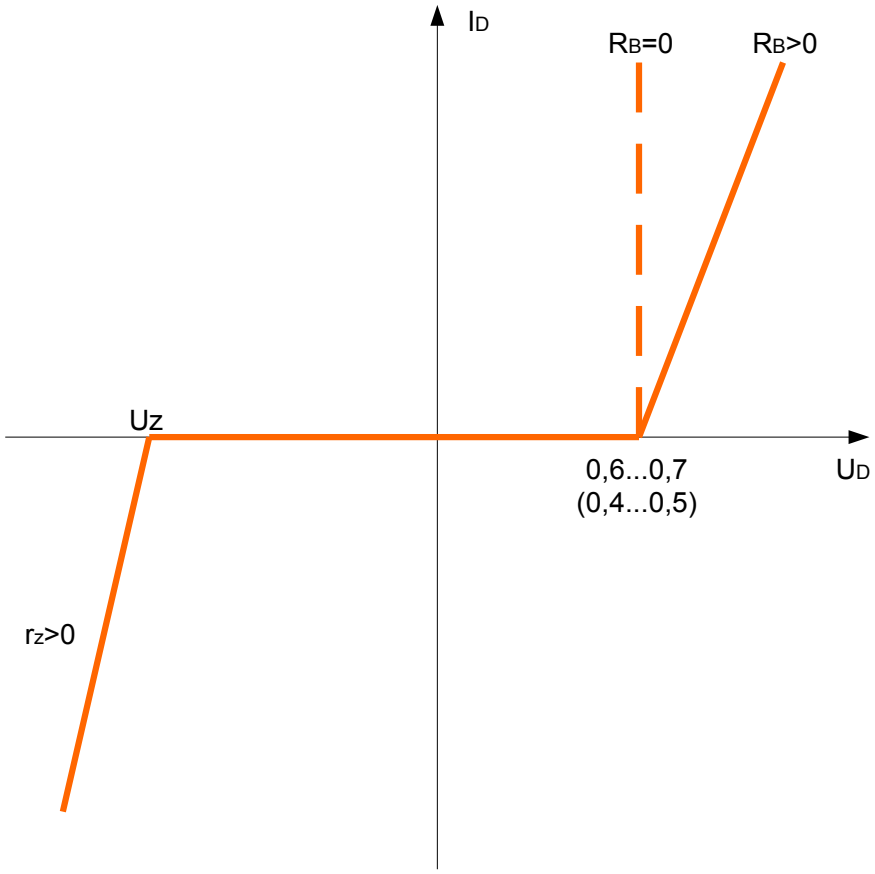

Рисунок 2.2 – Кусочно-линейная аппроксимация ВАХ диода

На практике типовое прямое напряжение на диоде в диапазоне рабочих токов составляет 0,6…0,7 В; для диода Шотки напряжение ниже порядка 0,4…0,5 В. Для диодов с рабочими токами порядка единиц ампер сопротивление базы можно не учитывать, для более сильноточных учет его необходим.

Динамические характеристики диодов

Описание поведения диода при изменении протекающего тока и прикладываемого напряжения требует определения его динамических характеристик.

Исходя из физики полупроводниковых приборов, p-n переход обладает *барьерной и диффузионной емкостью*.

Барьерная емкость физически обусловлена накоплением заряда по обе стороны обедненной зоны обратносмещенного p-n перехода. Эту емкость можно представить в виде плоского конденсатора известной площади, расстояние между обкладками которого нелинейно увеличивается с ростом обратного напряжения. Барьерная емкость

$$C_S = C_{S0}\left(1 - \frac{U_D}{U_{diff}}\right)^{-m_s} \quad (2.7)$$

где C_{S0} – начальная емкость при нулевом напряжении на p-n переходе, Ф,

U_{diff} – диффузионное напряжение, 0,4…0,7 В,

m_s – емкостной коэффициент, от 0,33 до 0,5.

Барьерная емкость максимальна при малых положительных напряжениях в окрестности диффузионного, и интенсивно спадает при увеличении запирающего напряжения.

Диффузионная емкость физически обусловлена накоплением заряда в p-n переходе диода при протекании прямого тока. Диффузионный заряд равен

$$Q_D = \tau_T I_{DD} \quad (2.8)$$

где τ_T – постоянная времени p-n перехода, с,

I_{DD} – диффузионный ток, А.

За пределами области микротоков

$$C_D \approx \frac{\tau_T I_D}{nU_T} \quad (2.9)$$

то есть диффузионная емкость примерно пропорциональна току диода. Для кремниевых диодов постоянная времени 1…100 нс, у диодов Шотки 10…100 пс, поэтому *диффузионный заряд последних пренебрежимо мал*.

Особый класс диодов представляют *варикапы* – диоды, барьерная емкость которых нормирована и сильно зависит от приложенного обратного напряжения. Основное применение варикапов – в качестве электрически перестраиваемых емкостей в различных времязадающих и частотозадающих цепях.

Переключение диодов

При подаче отпирающего импульса напряжения наблюдается короткий импульс тока, обусловленный перезарядом барьерной емкости. В течение длительности импульса напряжение плавно возрастает до установившегося значения.

При подаче запирающего импульса напряжения начинается процесс рассасывания диффузионного заряда. В течение времени рассасывания диод остается открытым, при этом через него течет обратный ток. По окончании рассасывания заряда начинается перезаряд барьерной емкости, что проявляется как плавный быстрый спад обратного тока.

Время рассасывания составляет от десятков микросекунд для низкочастотных диодов до единиц наносекунд для свербыстрых приборов.

Выпрямители

Основное применение диодов состоит в выпрямлении переменного напряжения.

Однополупериодные выпрямители для выпрямления синусоидального напряжения в настоящее время практически не применяются, а находят свое место при выпрямлении пульсирующего напряжения, например, в импульсных источниках питания.

Наиболее широкое применение при работе в сетях промышленной частоты находят одно- и трехфазные диодные мосты.

Ограничители напряжения и амплитудные детекторы

Цепь ограничителя напряжения содержит последовательно включенный балластный резистор и один либо пару параллельно включенных диодов или последовательно включенных стабилитронов. Ограничители на диодах применяют в тех случаях, когда нужно высокое быстродействие, например, для защиты входов чувствительных усилителей. Ограничители на стабилитронах применяют, если амплитуда сигнала велика и нет возможности использовать диодный ограничитель.

В особый класс следует выделить импульсные ограничители напряжения, или TVS-диоды (transient voltage suppressors), предназначенные для абсорбции электромагнитных импульсов значительной мощности. У этих приборов нормируется напряжение ограничения, мощность одиночного импульса и средняя мощность прибора.

Амплитудные детекторы предназначены для фиксации пикового напряжения и представляют собой в простейшем случае последовательно включенный диод и RC-цепь с постоянной времени, много большей длительности входного импульса. Входной импульс (достаточной энергии) открывает диод и заряжает емкость, которая, в свою очередь, остается заряженной в течение длительного времени.