

Лекция 7. Специальные диоды

Варикапами называют полупроводниковые диоды, в которых используется зависимость барьерной емкости p - n -перехода от обратного напряжения. Они применяются в качестве конденсатора с электрически управляемой емкостью. Вторым элементом обозначения варикапов является буква «В». Варикапы делятся на подстроечные, умножительные, или *варакторы*. Условное графическое изображение варикапа показано на рис. 3.18. Подстроечные варикапы используются, например, для изменения резонансной частоты колебательных систем.

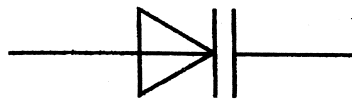


Рис. 3.18. Графическое изображение варикапа

На рис. 3.19 изображен колебательный контур, перестраиваемый с помощью варикапа. В этой схеме конденсатор C предотвращает замыкание напряжения смещения через индуктивность L . Его емкость обычно значительно превышает емкость варикапа — диода $VD1$. Поэтому резонансная частота контура определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_B}}, \quad (3.7)$$

где C_B — емкость варикапа.

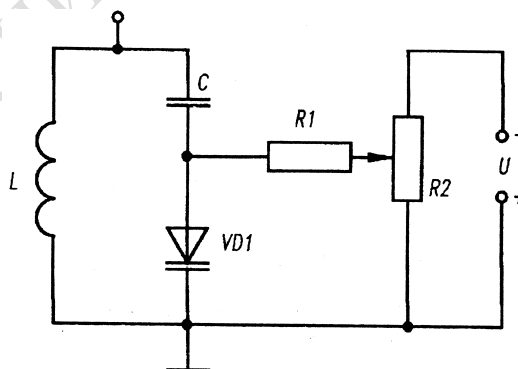


Рис. 3.19. Схема включения варикапа

Регулировкой напряжения смещения, подаваемого на диод с потенциометра $R2$ через резистор $R1$, можно изменять емкость диода и, следовательно, резонансную частоту колебательного контура. Резистор $R1$ предотвращает возможность шунтирования колебательного контура при перемещении движка потенциометра. Сопротивление резистора $R1$ выбирают большим резонансного сопротивления контура.

Варакторы применяются для умножения частоты сигнала. При этом используется нелинейность вольт — фарадной характеристики.

Основными специальными параметрами варикапов являются: номинальная емкость C_v , измеренная при заданном обратном напряжении $U_{обр}$; коэффициент перекрытия емкости K_c ; определяемый отношением емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения; добротность Q , определяемая как отношение реактивного сопротивления варикапа к сопротивлению потерь. Например, варикап KB109A обладает следующими параметрами: $C_v = 8 \dots 16$ пФ при $U_{обр} = 3$ В, $K_c = 4 \dots 6$, $Q = 300$ при $U_{обр} = 3$ В и $f = 50$ МГц.

Сверхвысокочастотные диоды

Сверхвысокочастотными называют полупроводниковые диоды, используемые для преобразования, детектирования, усиления, умножения, генерирования управления уровнем мощности сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

В диапазоне СВЧ в качестве линий передачи энергии и колебательных систем применяются устройства с распределенными параметрами (волноводы, фидерные линии, резонаторы и др.). Конструкция СВЧ-диодов позволяет включать их в волноводно-фидерные тракты и обеспечивает получение малых емкостей и индуктивностей вводов при незначительных потерях энергии. Эквивалентная схема диода с учетом последовательной индуктивности $L_{пос}$ и емкости корпуса $C_{кор}$ представлена на рис. 3.20. На рис. 3.21 показаны конструкции СВЧ-диодов. В корпус диода, образованного короткими толстыми вводами 1, имеющими малую индуктивность, и изолятором 2, изготовленным из высокочастотной керамики с малыми потерями, помещается кристалл полупроводника 3 с p - n -переходом.

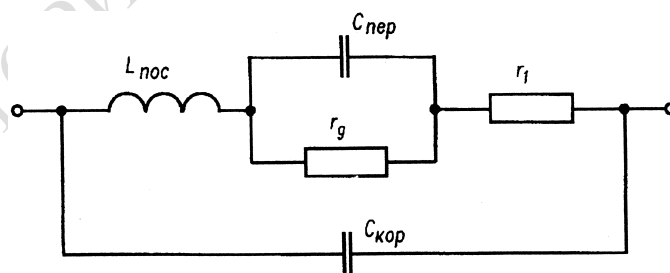


Рис. 3.20. Эквивалентная схема диода с учетом индуктивностей вводов и емкости корпуса

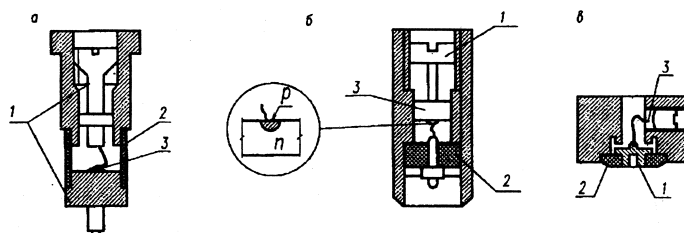


Рис. 3.21. Конструкции СВЧ-диодов: *а* — патронного; *б* — коаксиального; *в* — волноводного

В большинстве диодов используется точечный *p-n*-переход (исключение составляют некоторые переключаемые диоды). Для увеличения рабочей частоты уменьшают время жизни неравновесных носителей зарядов в базе путем повышения концентрации примесей в полупроводнике. Таким образом, для изготовления *p-n*-перехода берется кристалл полупроводника с малым удельным сопротивлением. На поверхности такого полупроводника существуют участки с другим типом проводимости. Прижатием конца контактной пружины к одному из этих участков получают *p-n*-переход малой площади и, следовательно, незначительной емкости. Из-за высокой концентрации примесей ширина запирающего слоя оказывается небольшой и пробой перехода наступает при напряжении 3...5 В. Во втором элементе обозначения диодов СВЧ используется буква «А».

Малая электрическая прочность таких диодов требует особой осторожности при обращении с ними. Диоды должны храниться в закрытых металлических патронах. Необходимо исключить возможность разряда через диод, извлекаемый из патрона, статического электричества, накопленного на теле оператора, в блоках аппаратуры и т.д. Поэтому, прежде чем вынуть диод из патрона, оператор должен снять статический заряд прикосновением руки к прибору, в который устанавливается диод.

Детекторные диоды

Детекторные диоды предназначены для детектирования сигналов СВЧ. Под *детектированием* понимают процесс выделения из модулированного напряжения высокой частоты напряжения сигнала более низкой частоты, по закону которого была осуществлена амплитудная модуляция высокочастотного сигнала.

На детекторный диод поступает модулированный высокочастотный сигнал мощностью P_c . Через детекторный диод проходит ток $I_{\text{вых}}$.

К параметрам детекторных диодов относятся: чувствительность по току $\beta = I_{\text{вых}} / P_c$, т.е. отношение выпрямленного тока к мощности подводимого сигнала; шумовое отношение диода $n_{\text{ш}}$; дифференциальное сопротивление r_d ; коэффициент качества детектора $M = \frac{\beta r_d}{\sqrt{n_{\text{ш}} r_d + R_{\text{ш}}}}$, где $R_{\text{ш}}$ — шумовое сопротивление.

Некоторые детекторные диоды имеют характеристику, близкую к квадратичной, что позволяет использовать их для измерителей мощности колебаний СВЧ.

Параметрические и умножительные диоды

Параметрическими называют диоды, предназначенные для работы в параметрических усилителях. В основу работы параметрических диодов положено периодическое изменение емкости колебательной системы.

Таким образом, эти диоды являются разновидностью варикапов. Их основные параметры: емкость перехода $C_{\text{пер}}$; емкость корпуса $C_{\text{кор}}$; последовательная индуктивность $L_{\text{пос}}$; напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$; обратный ток $I_{\text{обр}}$; постоянная времени $\tau = C_{\text{пер}} r_1$; диапазон рабочих частот и температур. Например, у диода 1А404А, $C_{\text{пер}} = 0,11 \text{ пФ}$, $C_{\text{кор}} = 0,2 \text{ пФ}$, $L_{\text{пос}} = 1,5 \text{ нГн}$, $\tau = 0,85 \text{ пс}$, $U_{\text{проб}} = 10 \text{ В}$.

Умножительные диоды используются в умножителях частоты и выполняют в диапазоне СВЧ роль, аналогичную роли умножительных варикапов. Основными параметрами умножительных диодов являются: емкость диода $C_{\text{д}}$; индуктивность $L_{\text{пос}}$; предельная частота f_{max} . Например, у диода 3А603В $C_{\text{д}} = 0,5 \dots 1,2 \text{ пФ}$, $L_{\text{пос}} = 1,7 \text{ нГн}$, $f_{\text{max}} = 200 \text{ ГГц}$.

Регулирующие диоды

Регулирующими называют полупроводниковые диоды, предназначенные для переключения, ограничения и модуляции сигналов СВЧ.

В ограничительных диодах используется зависимость полного сопротивления диода от мощности подводимого сигнала СВЧ. При больших уровнях мощности полное сопротивление диода обусловлено в основном сопротивлением базы которое выполняет роль ограничителя мощности, проходящей по линии передачи.

Работа переключательных и модуляционных диодов основана на изменении их полного сопротивления в зависимости от величины и полярности напряжения смещения. Их делят на резонансные и диоды *p-i-n*-структуры.

В резонансных диодах используется возможность получения последовательного или параллельного резонанса контура, составленного из реактивностей диода. Параметры схемы подбирают таким образом, чтобы при прямом смещении возникал резонанс параллельного контура, характеризующийся большим сопротивлением. При обратном смещении наступает резонанс последовательного контура и сопротивление диода резко падает. Такие диоды позволяют коммутировать СВЧ-сигнал мощностью до 1 кВт импульсном режиме и до 10 Вт в непрерывном с временем переключения не более 20 нс. Для повышения уровня коммутирующей мощности требуется увеличивать площадь перехода, что приводит к росту его емкости.

Увеличение площади перехода при незначительной емкости достигается в *p-i-n*-диодах. Полупроводниковая структура в этих диодах представляет собой пластинку кремния, на двух противоположных сторонах которой путем введения примесей получены полупроводники с проводимостью *p*- и *n*-типов.

Она рис. 3.22, *а, б* показаны *p-i-n*-структура и распределение в ней носителей зарядов в состоянии равновесия. При включении диода в прямом направлении (рис. 3.22, *в*) наблюдается инжекция электронов (из полупроводника *n*-типа) и дырок (из полупроводника *p*-типа) в *i*-область. Увеличение концентрации носителей зарядов в *i*-области приводит к резкому уменьшению сопротивления структуры в целом. При обратном включении (рис. 3.22, *г*) диода *i*-область обедняется носителями заряда и сопротивление структуры резко возрастает. Мощность коммутируемого *p-i-n*-диодами сигнала может достигать сотен киловатт в импульсе. Однако время переключения у этих диодов больше, чем у резонансных, поскольку в основу их работы положены инерционные процессы инжекции и рассасывания носителей зарядов.

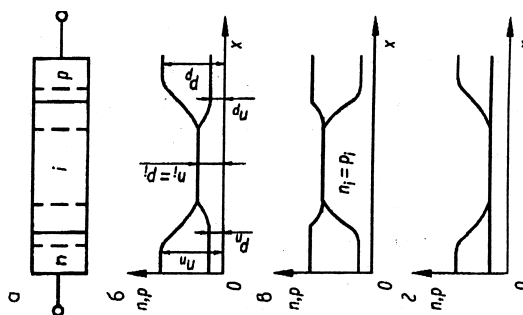


Рис. 3.22. Структура *p-i-n*-перехода и распределение носителей зарядов

Примером переключательных диодов являются: резонансный ГА501А, рассчитанный на коммутацию импульсной мощности 2 Вт, непрерывной — 0,8 Вт на длине волны 3 см, и с *p-i-n*-структурой 2А516А, позволяющий коммутировать сигналы мощностью 1 кВт в дециметровом диапазоне волн.

Генераторные диоды

Диоды Ганна. В 1963 г. Сотрудник фирмы ИВМ Дж. Ганн обнаружил, что при приложении к кристаллу арсенида галлия напряжения, создающего напряженность электрического поля более 10^5 В/см, возникают колебания высокой частоты. Исследования показали, что такое явление, названное *эффектом Ганна*, наблюдается и у кристаллов некоторых других соединений.

Основная причина эффекта Ганна заключается в сложной структуре зоны проводимости арсенида галлия, обеспечивающей возможность существования легких (быстрых) и тяжелых (медленных) электронов. Вольт-амперная характеристика диода Ганна приведена на рис. 3.23. При малых напряженностях электрического поля (малое напряжение) электроны находятся в районе нижних уровней зоны проводимости, где их подвижность μ'_n высока.

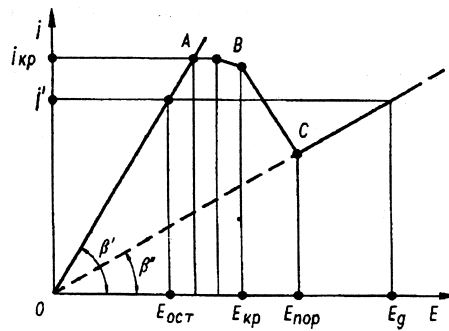


Рис. 3.23. Зависимость плотности тока в диоде Ганна от напряженности электрического поля

Для этого случая зависимость плотности тока от напряженности электрического поля описывается уравнением $j = qn\mu'_n E$ и представлена участком ОА графика, приведенного на рис. 3.23. Тангенс угла наклона этого участка характеристики β' равен удельной электропроводности $\sigma_1 = qn\mu'_n$. По мере роста напряженности электрического поля все большее количество электронов переходит в область высоких энергетических уровней, или, как говорят, в «верхнюю долину». В этой зоне подвижность электронов μ''_n значительно меньше и рост тока замедляется (участок АВ на рис. 3.23). При некоторой критической напряженности электрического поля $E_{кр}$ переход электронов в «верхнюю долину» становится настолько интенсивным, что плотность тока уменьшается. Это уменьшение наблюдается до пороговой напряженности поля $E_{пор}$, при которой большинство электронов перейдет в «верхнюю долину». Дальнейшее увеличение электрического поля приводит к линейному росту плотности тока в соответствии с законом $j = qn\mu''_n E$. Очевидно, что $\sigma_1 > \sigma_2 = qn\mu''_n$ и $\beta' > \beta''$.

Участку ВС характеристики (см. рис. 3.23) соответствует отрицательная проводимость диода.

Приложим к образцу **GaAs** длиной L напряжение U_0 такое, чтобы оказаться на падающем участке зависимости $j(E)$. Предположим, что сначала электрическое поле в образце однородно и равно U_0/L . Пусть по какой-либо причине в тонком слое АВ образца поле E оказалось чуть больше, чем в остальном объеме образца (рис. 4). Тогда скорость дрейфа электронов $u = jen$ внутри слоя АВ окажется меньше, чем снаружи. Поэтому к границе А будет подлетать больше электронов, чем улетать от нее, а у границы В — наоборот. Вблизи А возникнет избыток отрицательного заряда, а вблизи В — положительного. Следовательно, в слое АВ появится дополнительное электрическое поле, направленное в ту же сторону, что и исходное. Увеличение поля приведет к тому, что дрейфовая скорость электронов внутри слоя еще уменьшится, и поле там еще больше возрастет.

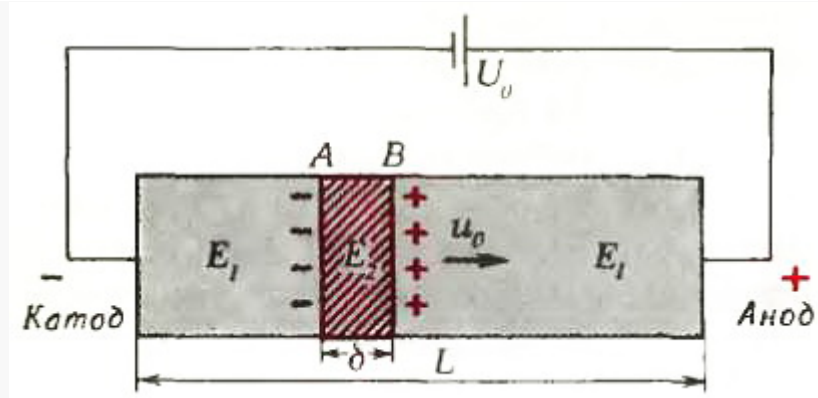


Рис. 4

Таким образом, однородное распределение электрического поля на падающем участке $j(E)$ невозможно: любая сколь угодно слабая неоднородность E , случайно возникшая в образце, не рассасывается, а нарастает. В результате образуется узкая область (размером δ) сильного поля, которая называется электрическим доменом. При этом, так как напряжение U_0 на образце задано, т. е.

$$E_2\delta + E_1(L - \delta) = U_0 = \text{const},$$

рост поля E_2 в домене сопровождается уменьшением поля E_1 вне его. Наступит момент, когда $E_1 < E_a$ и $E_2 > E_b$ (см. рис. 3). Скорость дрейфа электронов вне домена начнет уменьшаться, а внутри — увеличиваться. Рост поля E_2 в домене прекратится, когда эти скорости сравняются, и плотности токов в домене и в образце станут одинаковыми:

$$j(E_1) = j(E_2) = j_0.$$

Из двух последних равенств следует, что установившаяся в образце плотность тока j_0 зависит от толщины домена δ .

Обычно домен возникает вблизи катода (за счет впаивания контактов здесь больше неоднородностей) и, увлекаемый потоком электронов, начинает двигаться к аноду со скоростью $u_0 = j_0 / en$. Пока он движется вдоль образца, его размер не меняется, а значит, не меняется и ток j_0 . Вблизи анода домен начинает исчезать, его толщина уменьшается, и ток в образце возрастает. Одновременно увеличивается поле E_1 вне домена. Как только E_1 достигнет значения E_a , у катода зарождается новый домен, ток начинает уменьшаться, и этот процесс периодически повторяется (рис. 5). Период колебаний тока в образце — $T_0 = Lu_0$.



Рис. 5

Итак, прикладывая к полупроводнику постоянное напряжение U_0 , мы получаем переменный ток частоты $f = 1/T_0 = u_0/L$. Это совсем уж непохоже на закон Ома. В арсениде галлия (**GaAs**) $u_0 \approx 10^5$ м/с. Используя небольшие образцы длиной от

одного до ста микрон, можно менять частоту переменного тока в диапазоне $f \sim 10^9 - 10^{11}$ Гц. На основе эффекта Ганна работает большинство современных генераторов сверхвысоких частот (СВЧ). Эти приборы используются, например, для определения постами ГАИ скорости движения автомобилей и в телевизионном вещании через искусственные спутники Земли.

Лавинно-пролетные диоды (ЛПД). Лавинно-пролетными называют диоды с отрицательным сопротивлением в диапазоне СВЧ, обусловленным лавинным размножением носителей зарядов в p - n -переходе и ограничением скорости их дрейфа. В основе действия ЛПД лежит пробой p - n -перехода. При пробое p - n -перехода (рис. 3.27) возникшие электронно-дырочные пары движутся в области объемного заряда (область i) в сильном электрическом поле (более 5000 кВ/м). При такой напряженности поля скорость дрейфа электронов не увеличивается с ростом электрического поля. Это насыщение скорости вызывает сдвиг фаз между током и переменным напряжением, прикладываемым к диоду. Выбором режима и ширины области объемного заряда можно добиться сдвига фаз на 180° . Нарастанию напряжения при этом соответствует уменьшение тока, т.е. диод имеет отрицательное сопротивление. Это позволяет использовать такие диоды в качестве генераторов СВЧ-колебаний.

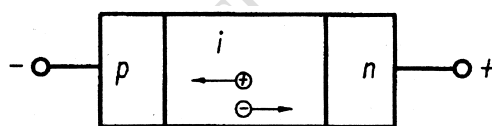


Рис. 3.27. Структура лавинно-пролетного диода с p - i - n -переходом

Кроме рассмотренной структуры, существуют ЛПД с p - n -переходом типа p^+ - n - i - n^+ (n^+ - p - i - p^+). Последние были предложены Ридом в 1964 г., их называют *диодами Рида*.

ЛПД изготавливают из германия, кремния и арсенида галлия. Их рабочие частоты достигают сотен гигагерц при мощности колебаний до десятков ватт в импульсе. Недостатком таких диодов является низкий КПД, что обусловлено узким диапазоном амплитуды переменного напряжения, при котором существует отрицательное сопротивление.

Туннельные диоды

К *туннельным* относятся диоды, у которых за счет туннельного эффекта на прямой ветви вольт-амперной характеристики существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Вторым элементом их обозначения является буква «И».

Туннельный переход электронов через p - n -переход возможен, если толщина перехода мала и энергетическим уровням, заполненным электронами одной области, соответствуют такие же свободные разрешенные энергетические уровни в соседней области. Эти условия выполняются в p - n переходах, образованных полупроводниками с высокой концентрацией примесей (10^{19} — 10^{21} см⁻³). При этих условиях ширина p - n -перехода имеет порядок 10^{-6} см, что обуславливает высокую напряженность электрического поля в переходе и вероятность туннельного прохождения электронов через его потенциальный барьер. В полупроводниках с такой концентрацией примесей атомы примеси взаимодействуют между собой и их уровни расщепляются в зоны, примыкающие в полупроводнике p -типа к валентной зоне, а в полупроводнике n -типа — к зоне проводимости. Такие полупроводники называют *вырожденными*. В них уровни Ферми расположены в зоне проводимости n -области и в валентной зоне p -области.

Вид вольт-амперной характеристики туннельного диода может быть пояснен с помощью энергетических диаграмм (рис. 2.25).

Параметрами туннельных диодов являются:

1. *Пиковый ток* I_n — значение прямого тока в точке максимума вольт-амперной характеристики;
2. *Ток впадины* I_B — значение прямого тока в точке минимума вольт-амперной характеристики;
3. *Отношение токов* I_n/I_B — (для туннельных диодов из GaAs отношение $I_n/I_B \geq 10$, для германиевых $I_n/I_B \approx 3 \dots 6$);
4. *Напряжение пика* U_n — значение прямого напряжения, соответствующее пиковому току;
5. *Напряжение впадины* U_B — 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 рис. 2.14.

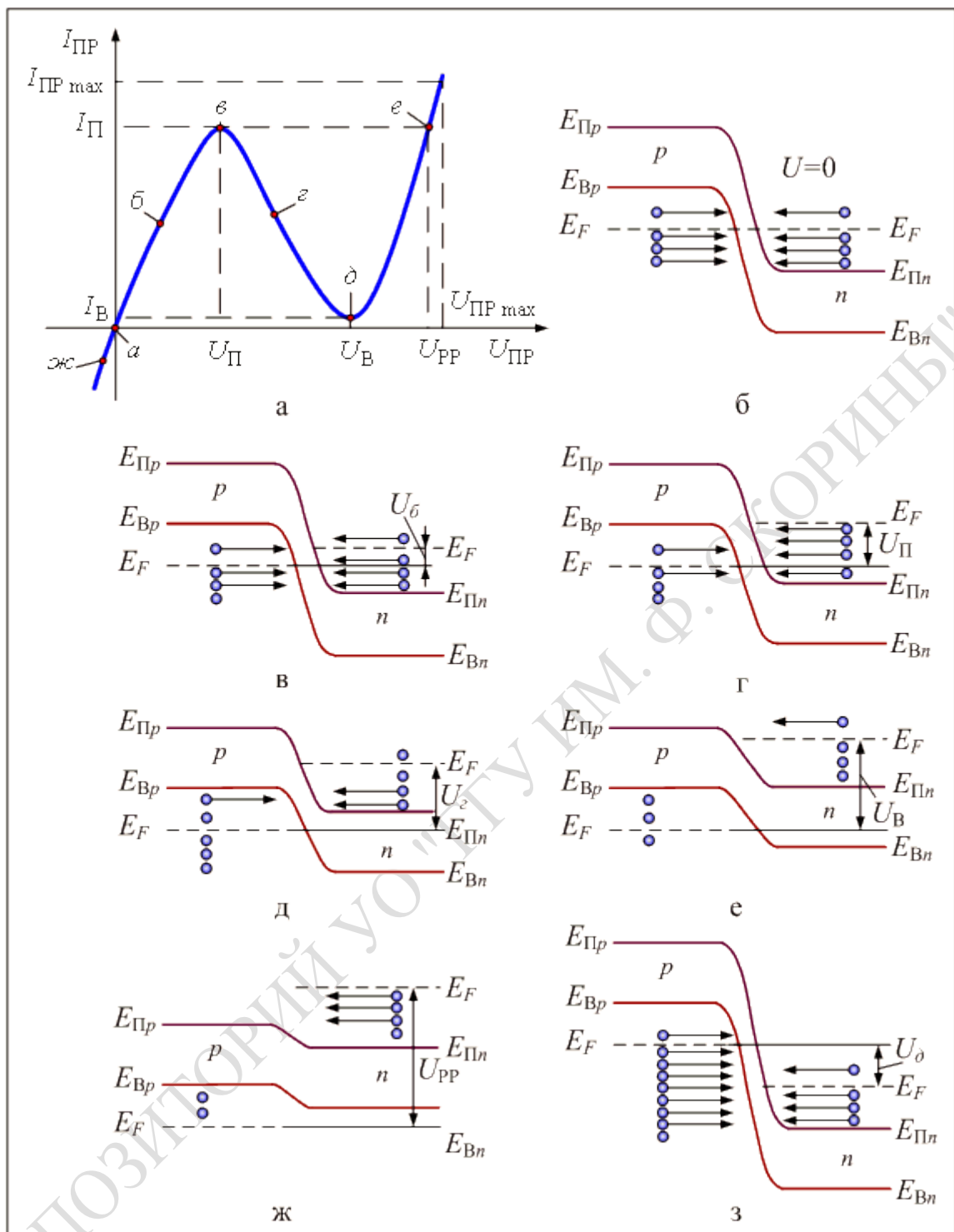


Рис. 2.14. Зонные энергетические диаграммы, поясняющие особенности вольт-амперной характеристики туннельного диода

а) 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 (рис. 2.14, б). В состоянии равновесия потоки носителей из одной области в другую одинаковы, поэтому результирующий ток равен нулю.

б) 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 (рис. 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.

в) Максимальное значение этого тока будет тогда, когда уровень Ферми материала n -типа и потолок валентной зоны материала p -типа будут совпадать (рис. 2.14, г).

г) При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельное перемещение электронов из n -области в p -область начнет убывать (рис. 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.

д) В точке, где эти уровни совпадают, прямой ток p - n -перехода достигнет минимального значения (рис. 2.14, е),

е) когда туннельные переходы электронов станут, невозможны (рис. 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 электрическая диаграмма будет иметь вид, показанный на (рис. 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.

Условное графическое изображение туннельного диода показано на рис. 3.29.

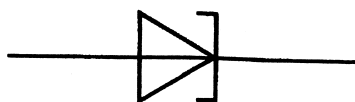


Рис. 3.29. Условное графическое изображение туннельных диодов

Поскольку для изготовления туннельных диодов используются вырожденные полупроводники, по характеру проводимости приближающиеся к металлам, рабочая температура этих диодов достигает 400°C .

Недостатком туннельных диодов является малая мощность из-за низких напряжений (десятые доли вольта) и малых площадей перехода.

Основные параметры туннельных диодов: напряжение и ток пика $U_{\text{п}}$ и $I_{\text{п}}$; напряжение и ток впадины $U_{\text{в}}$ и $I_{\text{в}}$; отношение токов $I_{\text{п}} / I_{\text{в}}$; напряжение раствора $U_{\text{р}}$, равное прямому напряжению, большему $U_{\text{в}}$, при котором ток равен пиковому; емкость диода C ; отрицательная проводимость $g_{\text{пер}} = dI / dU$, определяемая на середине падающего участка вольт-амперной характеристики; сопротивление потерь $r_{\text{п}}$. Параметры зависят от выбора полупроводника (ширины запрещенной зоны) и степени его легирования. Увеличение концентрации доноров приводит к росту $I_{\text{п}}$ и $I_{\text{в}}$. Повышение концентрации акцепторов увеличивает $I_{\text{п}}$, $U_{\text{п}}$, $I_{\text{в}}$ и $U_{\text{в}}$. Напряжения $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{р}}$ возрастают при увеличении ширины запрещенной зоны.

Время туннельного прохождения электронов через p - n -переход составляет 10^{-13} с. На самом деле туннельные диоды работают с меньшим быстродействием из-за емкости диода и потерь. Предельная, или резистивная, частота f_r , на которой активная составляющая полного сопротивления цепи, представленной на рис. 3.30, обращается в нуль, находится по формуле

$$f_r = \frac{|g_{\text{пер}}|}{2\pi C} \sqrt{\frac{1}{|g_{\text{пер}}| r_{\text{п}}} - 1}. \quad (3.8)$$

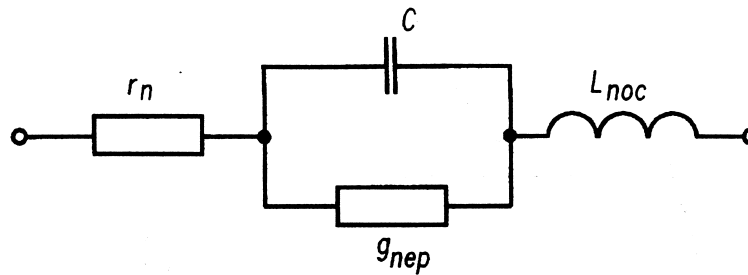


Рис. 3.30. Эквивалентная схема туннельного диода

Максимальное значение этой частоты получается при $r_n = 1 / (2g_{пер})$ и . Следовательно, частотные свойства туннельного диода определяются постоянной времени $r_n C$.

По своему назначению туннельные диоды делятся на усилительные, генераторные, переключаательные. Туннельные диоды позволяют создавать усилители, генераторы смесители в диапазоне волн вплоть до миллиметровых. На туннельных диодах можно строить и различные импульсные устройства: триггеры, мультивибраторы и спусковые схемы с очень малым временем переключения.

Обращенные диоды

Обращенный диод – это разновидность туннельного диода, у которого концентрация примесей подобрана таким образом, что в уравновешенном состоянии при отсутствии внешнего напряжения потолок валентной зоны материала *p*-типа совпадает с дном зоны проводимости материала *n*-типа

При включении такого диода в обратном направлении за счет туннельного эффекта электроны из валентной зоны *n*-области переходят на свободные уровни зоны проводимости *n*-области, и через *p-n*-переход проходит большой обратный ток. Если включить диод в прямом направлении, то перекрытия зон не происходит, туннельный эффект не появляется и прямой ток определяется лишь диффузионным током. Вольт-амперная характеристика обращенного диода представлена на рис. 3.31.

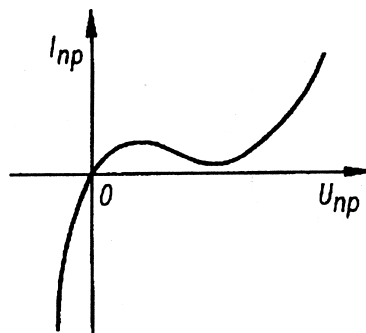


Рис. 3.31. Вольт-амперная характеристика обращенного диода

Поскольку у этих диодов прямой ток меньше обратного, они названы обращенными. Условное графическое изображение обращенного диода показано на рис. 3.32. Третьим элементом обозначения этих диодов является цифра 4.

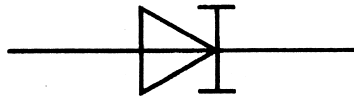


Рис. 3.32. Условное графическое изображение обращенного диода

Малая инерционность, связанная с туннельным прохождением тока, и большая кривизна характеристики обуславливают целесообразность использования обращенных диодов в детекторах и смесителях диапазонов СВЧ, в качестве переключательных и др.

используются они тогда, когда необходимо выпрямлять очень слабые электрические сигналы величиной в малые доли вольта.

Переход Шоттки

При контакте двух материалов с разной работой выхода электронов электрон проходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, и ни при каких условиях - наоборот. Электроны из приграничного слоя полупроводника переходят в металл, а на их месте остаются некомпенсированные положительные заряды ионов донорной примеси. В металле большое количество свободных электронов, и, следовательно, на границе металл-полупроводник возникает электрическое поле и потенциальный барьер. Возникшее поле будет тормозящим для электронов полупроводника и будет отбрасывать их от границы раздела. Граница раздела металла и полупроводника со слоем положительных зарядов ионов донорной примеси называется переходом Шоттки (открыт в 1934 году).

1) Прямое и обратное включение диодов Шоттки.

♦ Если приложить внешнее напряжение плюсом на металл, а минусом на полупроводник, возникает внешнее электрическое поле, направленное навстречу полю перехода Шоттки. Это внешнее поле компенсирует поле перехода Шоттки и будет являться ускоряющим для электронов полупроводника. Электроны будут переходить из полупроводника в металл, образуя сравнительно большой прямой ток. Такое включение называется прямым. f

При подаче минуса на металл, а плюса на полупроводник возникает внешнее электрическое поле, сонаправленное с полем перехода Шоттки. Оба этих поля будут тормозящими для электронов полупроводника, и будут отбрасывать их от границы раздела. Оба этих поля будут ускоряющими для электронов металла, но они через границу раздела не пройдут, так как у металла больше работа выхода электрона. Такое включение перехода Шоттки называется обратным.

Обратный ток через переход Шоттки будет полностью отсутствовать, так как в металле не существует неосновных носителей зарядов.

Достоинства перехода Шоттки:

- отсутствие обратного тока;
- переход Шоттки может работать на СВЧ;
- высокое быстродействие при переключении из прямого состояния в обратное и наоборот.

Диоды Шоттки

Достоинства



- В то время, как обычные [кремниевые](#) диоды имеют прямое падение напряжения около 0,6—0,7 вольт, применение диодов Шоттки позволяет снизить это значение до 0,2—0,4 вольт. Столь малое прямое падение напряжения присуще только диодам Шоттки с максимальным обратным напряжением порядка десятков вольт, выше же падение напряжения становится сравнимым с аналогичным параметром кремниевых диодов, что ограничивает применение диодов Шоттки.
- Барьер Шоттки также имеет меньшую электрическую ёмкость перехода, что позволяет заметно повысить рабочую частоту. Это свойство используется в [интегральных микросхемах](#), где диодами Шоттки [шунтируются](#) переходы [транзисторов](#) логических элементов. В силовой электронике малое [время восстановления](#) позволяет строить [выпрямители](#) на частоты в сотни [кГц](#) и выше. Например, диод MBR4015 (15 В, 40 А), оптимизированный под высокочастотное выпрямление, нормирован для работы при dV/dt до 10 кВ/мкс.
- Благодаря лучшим временным характеристикам и малым ёмкостям перехода выпрямители на диодах Шоттки отличаются от традиционных диодных выпрямителей пониженным уровнем помех, поэтому они предпочтительны в традиционных трансформаторных [блоках питания](#) аналоговой аппаратуры.

Недостатки

- при кратковременном превышении максимального обратного напряжения диод Шоттки необратимо выходит из строя (КЗ — короткое замыкание), в отличие от обычных кремниевых р-п диодов, которые переходят в режим обратимого ^[1] пробоя, и, при условии непревышения рассеиваемой на диоде максимальной мощности после падения напряжения, диод полностью восстанавливает свои свойства.
- диоды Шоттки характеризуются повышенными (относительно обычных кремниевых р-п диодов) обратными токами, возрастающими с ростом температуры кристалла. Для 30CPQ150 обратный ток при максимальном обратном напряжении изменяется от 0,12 мА при +25 °С до 6,0 мА при +125 °С. У низковольтных диодов в корпусах [TO220](#) обратный ток может превышать сотни миллиампер (MBR4015 — до 600 мА при +125 °С). При неудовлетворительных условиях теплоотвода [положительная обратная связь](#) по теплу в диоде Шоттки приводит к его катастрофическому перегреву.