

## Лекция 7

# Специальные диоды

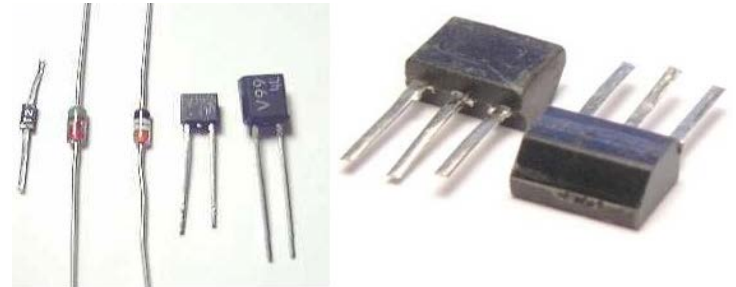
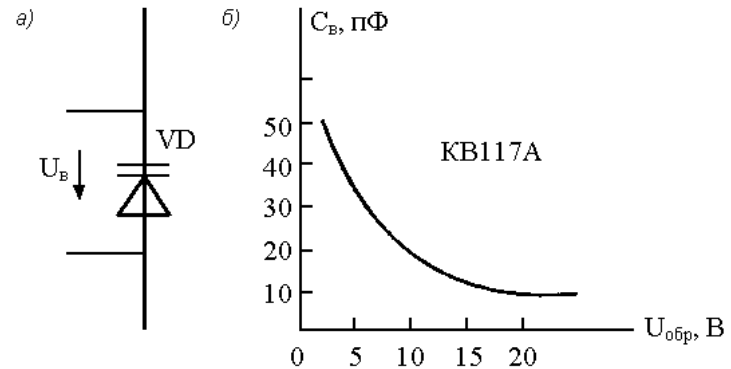
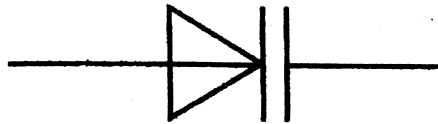
1. Варикапы.
2. Сверхвысокочастотные диоды.
3. Диоды Ганна.
4. Лавинно-пролетные диоды (ЛПД).
5. Туннельные диоды. Обращенные диоды.
6. Переход Шоттки. Диоды Шоттки.

# Варикапы

**Варикап** - полупроводниковый диод, в которых используется зависимость барьерной емкости  $p$ - $n$ -перехода от обратного напряжения. Применяются в качестве конденсатора с электрически управляемой емкостью.

Варикапы:

- подстроечные,
- умножительные,
- варакторы.

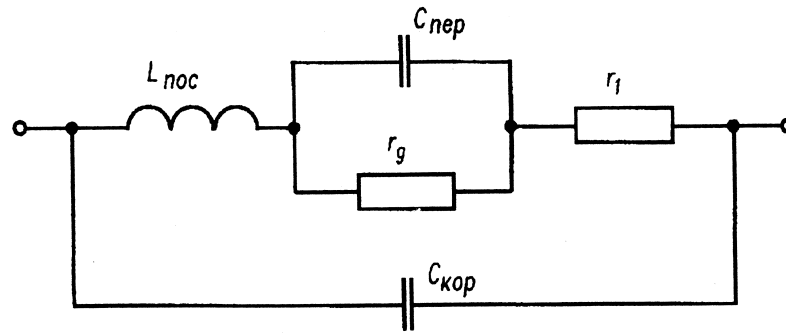


Основные параметры:

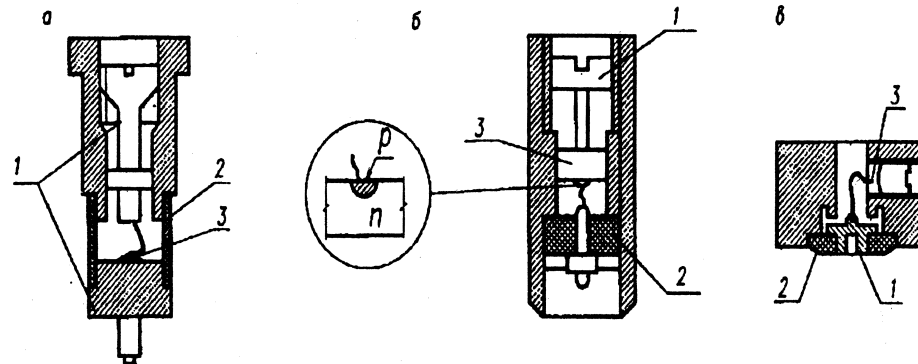
- номинальная емкость  $C_B$ , измеренная при заданном обратном напряжении  $U_{обр}$ ;
- коэффициент перекрытия емкости  $K_C$ ; определяемый отношением емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения;
- добротность  $Q$ , определяемая как отношение реактивного сопротивления варикапа к сопротивлению потерь.

# Сверхвысокочастотные диоды

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



Эквивалентная схема диода



Конструкции СВЧ-диодов:

*а* — патронного; *б* — коаксиального; *в* — волноводного

# 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  $I_{\text{ВЫХ}}$ .

Параметры:

- чувствительность по току - отношение выпрямленного тока к мощности подводимого сигнала;

$$\beta = I_{\text{ВЫХ}} / P_c$$

- шумовое отношение диода  $n_{\text{ш}}$ ;
- дифференциальное сопротивление  $r_d$ ;
- коэффициент качества детектора:

$$M = \frac{\beta r_d}{\sqrt{n_{\text{ш}} r_d + R_{\text{ш}}}}$$

$R_{\text{ш}}$  — шумовое сопротивление.

# Параметрические 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.

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.

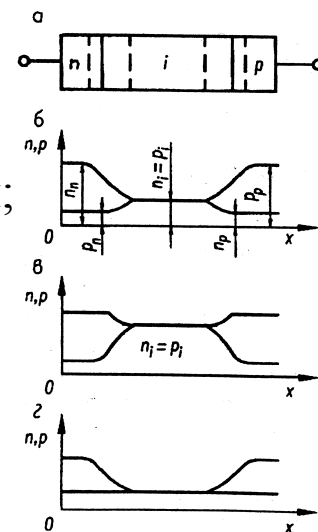
# Регулирующие диоды

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

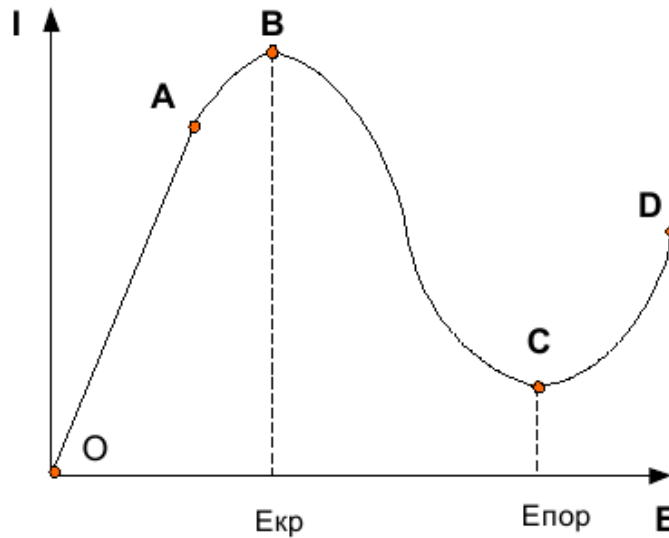
В ограничительных диодах используется зависимость полного сопротивления диода от мощности подводимого сигнала СВЧ.

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: при прямом смещении возникает резонанс параллельного контура, характеризующийся большим сопротивлением; при обратном смещении наступает резонанс последовательного контура и сопротивление диода резко падает.
- $p-i-n$ -структура;
- распределение носителей зарядов в состоянии равновесия;
- включение диода в прямом направлении;
- включение диода в обратном направлении.



# Диоды Ганна



OA - линейный участок, на котором соблюдается закон Ома.

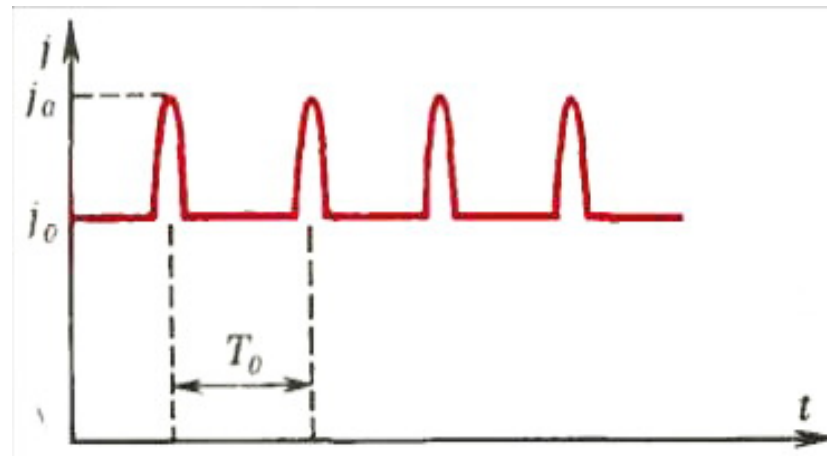
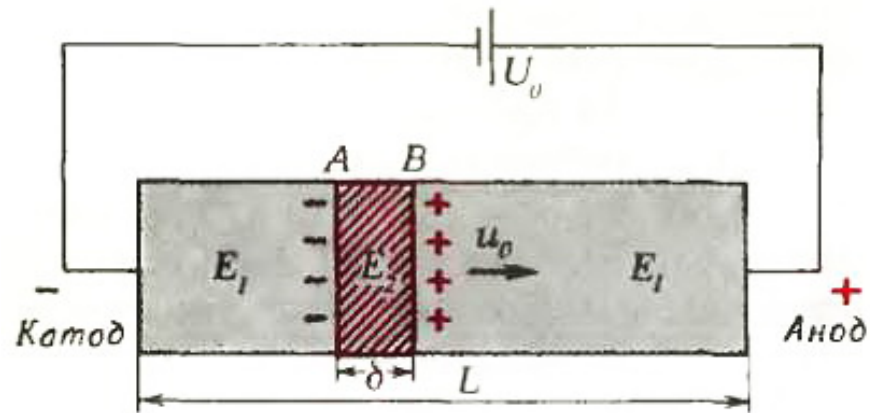
AB - при сравнительно больших напряжённыхностях электрического поля уменьшается подвижность электронов за счёт увеличения амплитуд колебания атомов в узлах кристаллической решётки.

BC - сильное уменьшение подвижности электронов, что приводит к уменьшению тока.

CD - при очень больших напряжённыхностях значительно увеличивается генерация носителей зарядов и, хотя подвижность электронов уменьшается, ток возрастает за счёт увеличения количества зарядов.

**Сущность эффекта Гана** состоит в том, что если в полупроводнике создать напряжённуюность электрического поля, большую  $E_{кр}$ , но меньшую  $E_{пор}$ , т. е. на участке BC характеристики, то в полупроводнике возникнут электрические колебания сверхвысокой частоты (СВЧ).

# Диоды Ганна



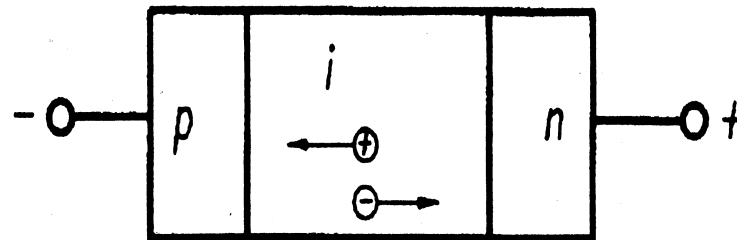
Прикладывая к полупроводнику постоянное напряжение  $U_0$ , мы получаем переменный ток частоты  $f = U_0 L$



# 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 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  $180^\circ$ . Нарастанию напряжения при этом соответствует уменьшение тока, т.е. диод имеет отрицательное сопротивление. Это позволяет использовать такие диоды в качестве генераторов СВЧ-колебаний.



# Туннельные диоды

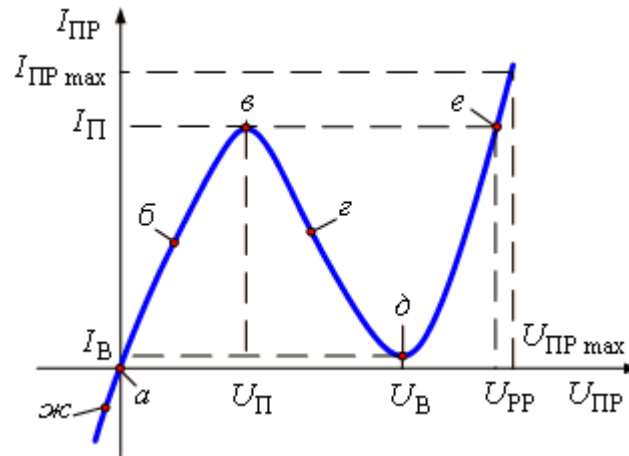
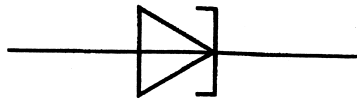
К туннельным относятся диоды, у которых за счет туннельного эффекта на прямой ветви вольт-амперной характеристики существует область с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

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.

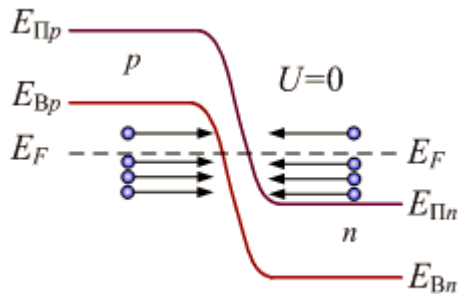
Параметры:

- **Пиковый ток**  $I_n$  – значение прямого тока в точке максимума вольт-амперной характеристики;
- **Ток впадины**  $I_B$  – значение прямого тока в точке минимума вольт-амперной характеристики;
- **Отношение токов**  $I_n/I_B$  – (для туннельных диодов из  $GaAs$  отношение  $I_n/I_B \geq 10$ , для германиевых  $I_n/I_B \approx 3 \dots 6$ );
- **Напряжение пика**  $U_n$  – значение прямого напряжения, соответствующее пиковому току;
- **Напряжение впадины**  $U_B$  – значение прямого напряжения, соответствующее току впадины;
- **Напряжение раствора**  $U_{PP}$  – значение прямого напряжения на второй восходящей ветви, при котором ток равен пиковому току.

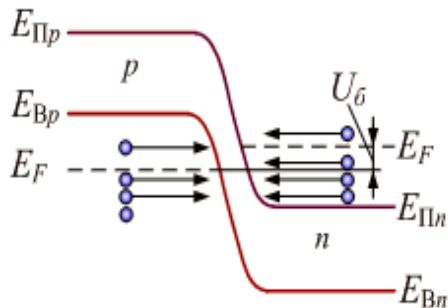
# Туннельные диоды



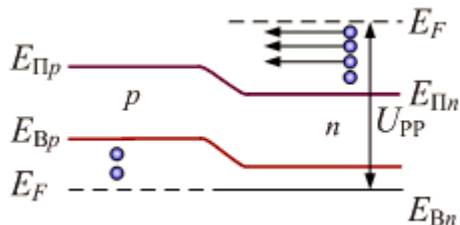
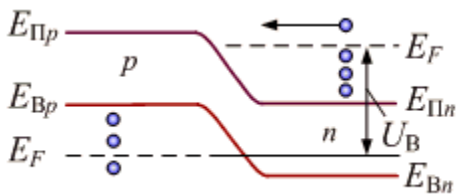
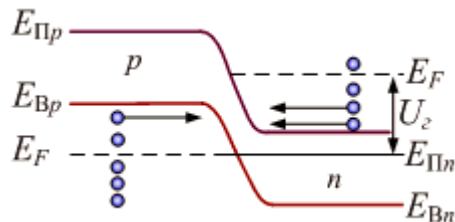
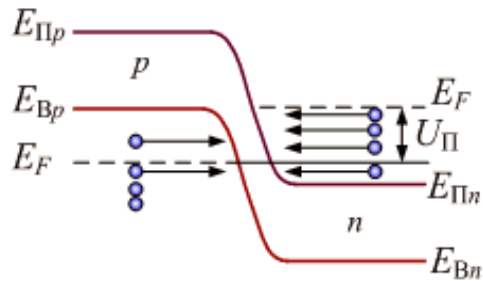
а) нижняя граница дна зоны проводимости области  $n$ -типа оказывается ниже верхней границы потолка валентной зоны области  $p$ -типа, и так как переход очень узкий, то носители заряда могут переходить из одной области в другую без изменения своей энергии, просачиваться сквозь потенциальный барьер, т. е. туннелировать. В состоянии равновесия потоки носителей из одной области в другую одинаковы, поэтому результирующий ток равен нулю.



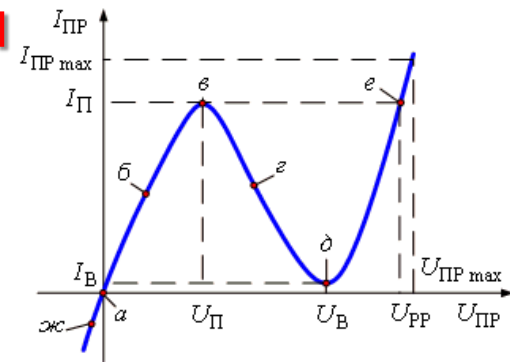
б) положение энергетических зон сместится в сторону уменьшения потенциального барьера. Степень перекрытия между потолком валентной зоны материала  $p$ -типа и дном зоны проводимости материала  $n$ -типа уменьшится. В зоне проводимости материала  $n$ -типа уровни, заполненные электронами (ниже уровня 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.



# Туннельные диоды



Максимальное значение тока

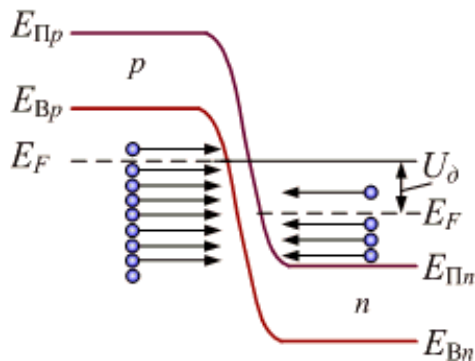


При дальнейшем увеличении прямого напряжения туннельное перемещение электронов из  $n$ -области в  $p$ -область начнет убывать, так как количество их уменьшается по мере уменьшения степени перекрытия между дном зоны проводимости материала  $n$ -типа и потолком валентной зоны материала  $p$ -типа.

В точке, где дно зоны проводимости материала  $n$ -типа и потолок валентной зоны материала  $p$ -типа совпадают, прямой ток  $p$ - $n$ -перехода достигнет минимального значения

Когда туннельные переходы электронов станут, невозможны, носители заряда будут преодолевать потенциальный барьер за счет диффузии и прямой ток начнет возрастать, как у обычных диодов.

# Туннельные диоды



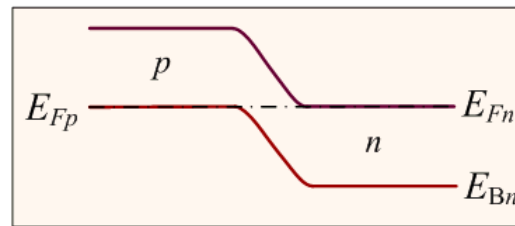
ж) Потенциальный барьер возрастает. Так как количество электронов с энергией выше уровня Ферми незначительно, то обратный ток *p-n*-перехода в этом случае будет возрастать в основном за счет электронов, туннелирующих из *p*-области в *n*-область, причем, поскольку концентрация электронов в глубине валентной зоны *p*-области велика, то даже небольшое увеличение обратного напряжения и связанное с этим незначительное смещение энергетических уровней, приведет к существенному росту обратного тока.

Туннельные диоды одинаково хорошо проводят ток при любой полярности приложенного напряжения, т. е. они не обладают вентиляемыми свойствами. Обратный ток во много раз больше обратного тока других диодов.

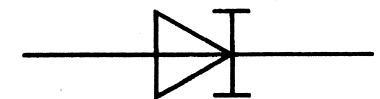
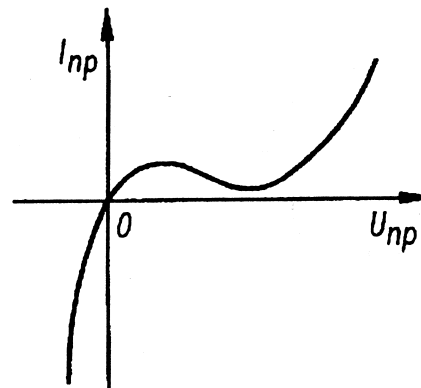
1. Отличительной особенностью туннельных диодов является наличие на прямой ветви вольт-амперной характеристики участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Это позволяет использовать туннельный диод в качестве усилительного элемента.
2. Туннельный эффект достигается за счет очень высокой 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.

# 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.

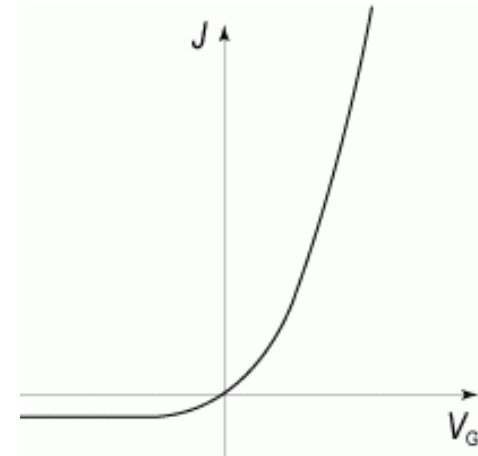
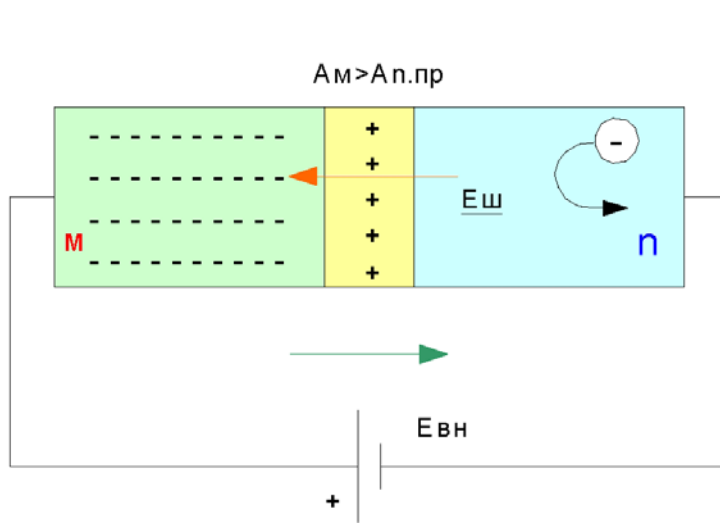


При включении в обратном направлении за счет туннельного эффекта электроны из валентной зоны  $n$ -области переходят на свободные уровни зоны проводимости  $n$ -области, и через  $p$ - $n$ -переход проходит большой обратный ток. Если включить диод в прямом направлении, то перекрытия зон не происходит,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



# Диод Шоттки

Переход Шоттки возникает на границе раздела металла и полупроводника n-типа, причём металл должен иметь работу выхода электрона большую, чем полупроводник.

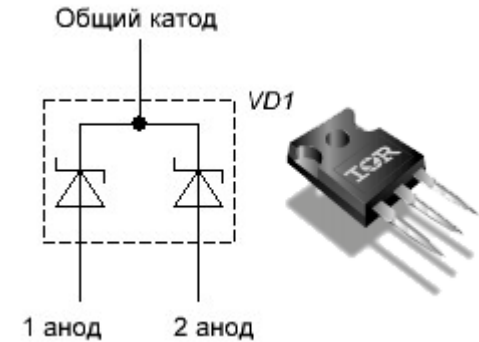


При контакте двух материалов с разной работой выхода электронов электрон проходит из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода, и ни при каких условиях - наоборот.

Достоинства перехода Шоттки:

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

# Диод Шоттки



## Преимущества:

- малое прямое падение напряжения – 0,2 – 0,4 В (для напряжений 50-60 В);
- малая электрическая ёмкость перехода – очень высокое быстродействие.

## Недостатки:

- при кратковременном превышении максимального обратного напряжения диод Шоттки необратимо выходит из строя;
- повышенные обратные токи сильно зависят от температуры перехода.