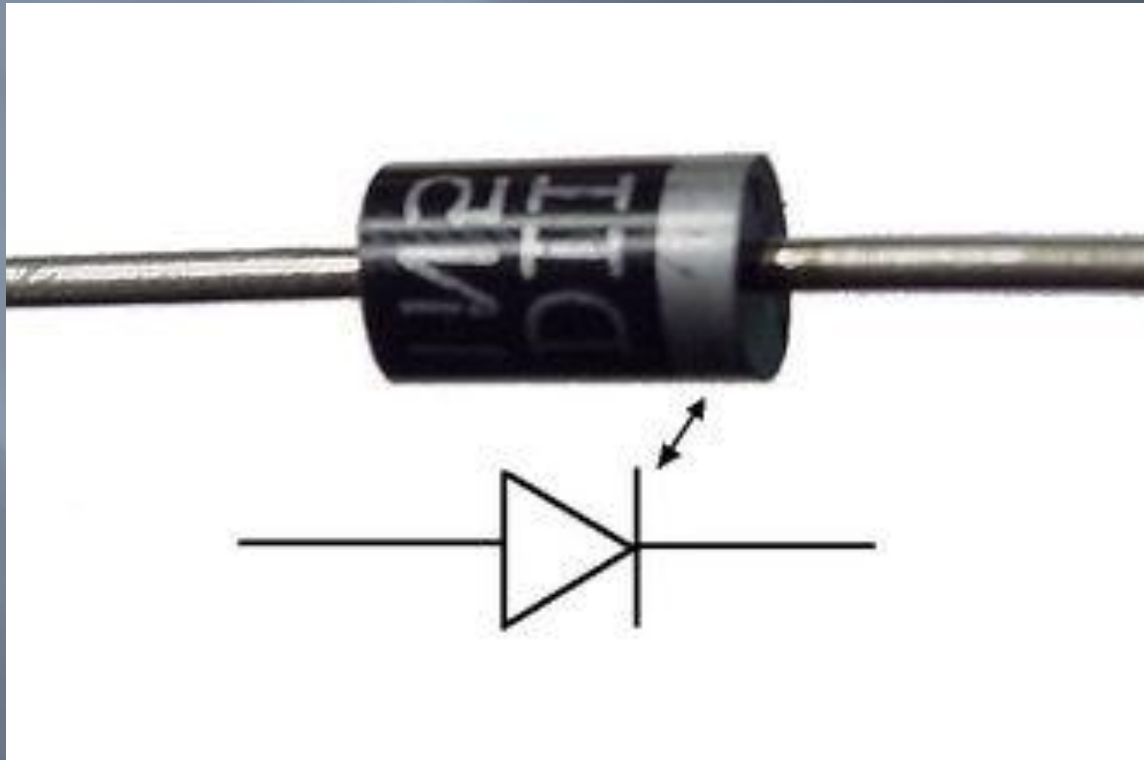


ТЕМА 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ



3.1. Общие сведения

- ▣ Полупроводниковый диод – это полупроводниковый прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство электрического перехода:
- ▣ В качестве электрических переходов используется р – n переход, переход Шоттки или гетеропереход.

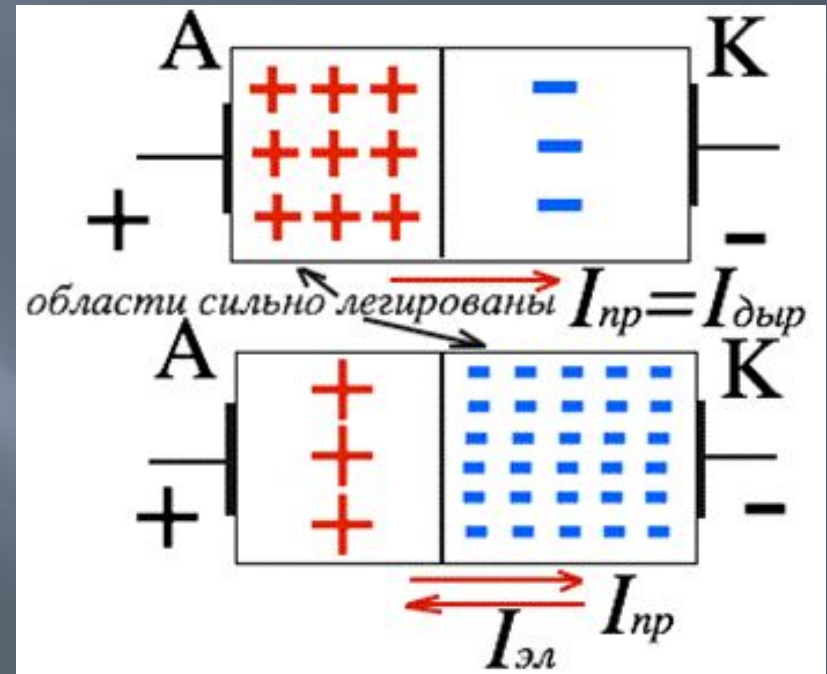
3.1. Общие сведения

Свойства:

- ▣ Односторонняя проводимость (применение: выпрямительный диод)
- ▣ Нелинейность ВАХ (смесительный диод)
- ▣ Способность к лавинному размножению зарядов (стабилитрон)
- ▣ Зависимость ёмкости диода от напряжения (варикап)
- ▣ Стрелка показывает направление тока открытого диода.

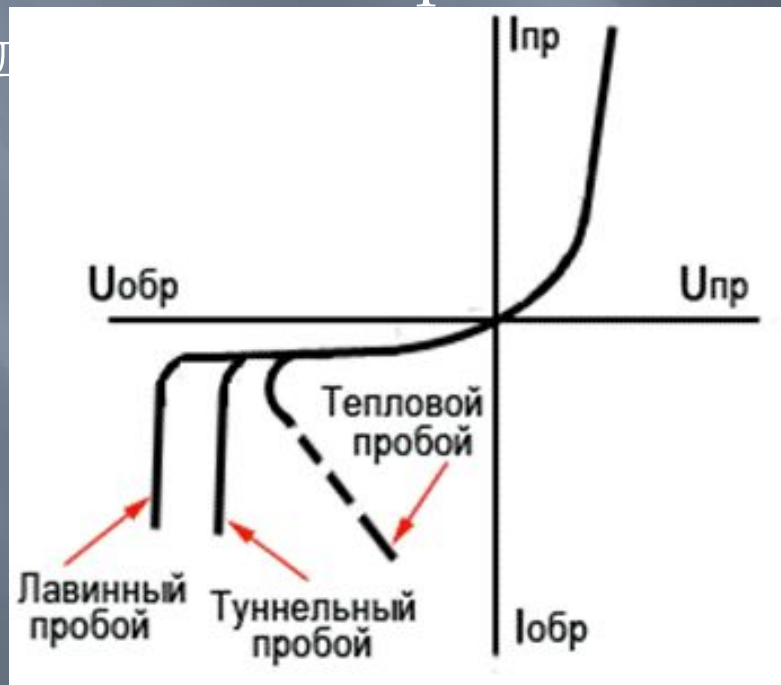
3.1. Общие сведения

- Структура диода на p – n переходе:
- При подаче $U_{пр}$ будет инжекция.
- Инжекция – это переход основных носителей через пониженный потенциальный барьер в область, где они будут основными.
- Сильно легированная область (сопротивление её меньше) называется эмиттером.
- База – область с высоким сопротивлением.



3.2. Пробой диода

- ▣ Пробой – это резкое увеличение обратного тока, т.е. дифференциальной проводимости.
- ▣ В зависимости от физических явлений, приводящих к пробоев, различают:



3.2. Пробой диода

- а) Лавинный пробой – это пробой, вызванный лавинным размножением носителей заряда под действием сильного электрического поля.
- Лавинное размножение происходит от того, что носители заряда, проходя через электрический переход при обратном напряжении приобретают в сильном электрическом поле на длине свободного пробега дополнительную энергию, достаточную для образования электронно-дырочных пар посредством ударной ионизации атомов полупроводника.
- б) Туннельный пробой – это пробой, вызванный квантово-механическим туннелированием носителей заряда сквозь запрещённой зоны полупроводника.
- в) Тепловой пробой – это пробой, развитие которого обусловлено выделением в электрическом переходе теплоты.

3.3. Параметры диода

- 1. Дифференциальное сопротивление:

$$r_{\text{диф}} = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{m.A}$$

- 2. Диффузионная ёмкость (при прямом напряжении):

$$C_{\text{диф}} = \left| \frac{dQ_{\text{инж}}}{dU} \right|$$

- Связывают с инжектированными зарядами. Не все заряды одинаково участвуют в образовании ёмкости.

3.3. Параметры диода

- 3. Барьерная ёмкость:

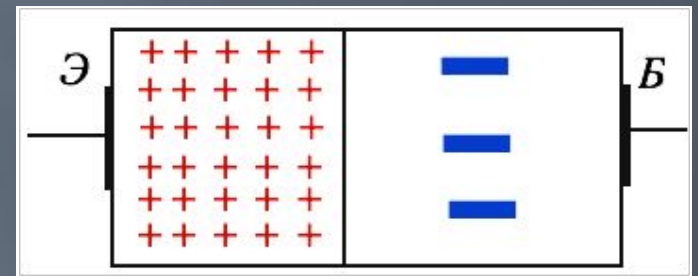
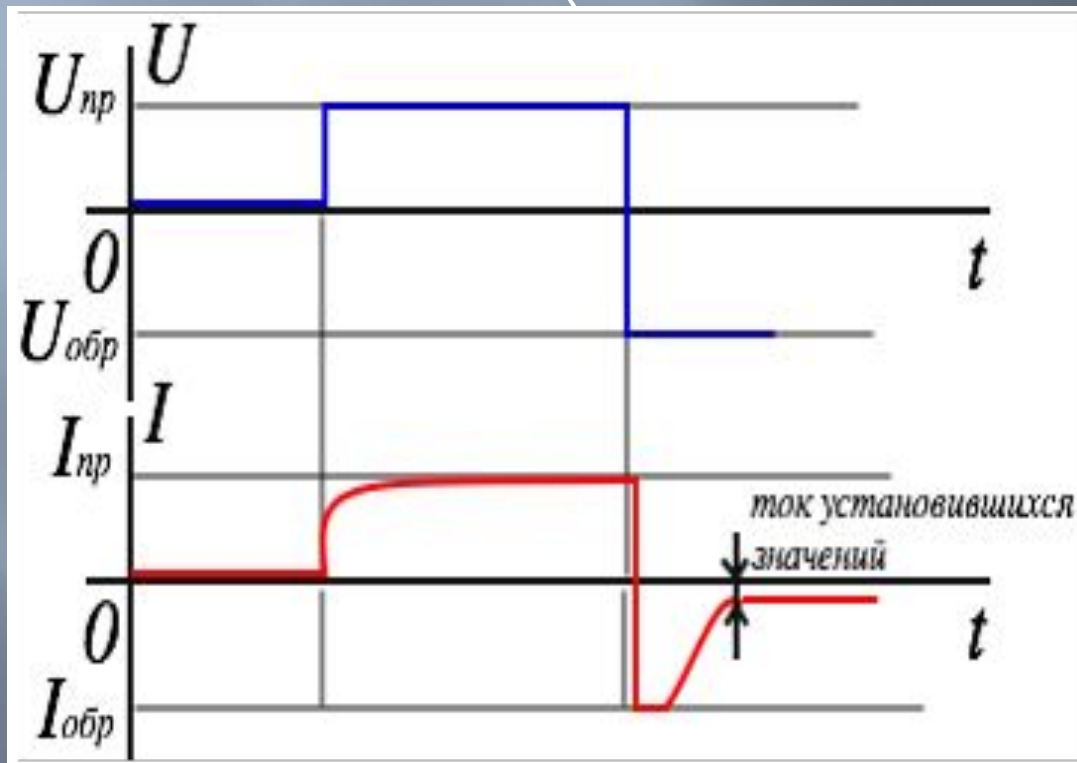
$$C_{\text{бар}} = \frac{dQ_{\text{объёмн}}}{dU}$$

3.4. Переходные процессы в диодах на p – n переходах

- ▣ Переходные процессы связаны с 2-ми явлениями:
- ▣ При большом уровне инжекции это явление накопления и рассасывания неосновных носителей заряда
- ▣ При малом уровне инжекции – перезаряд емкостей диода.

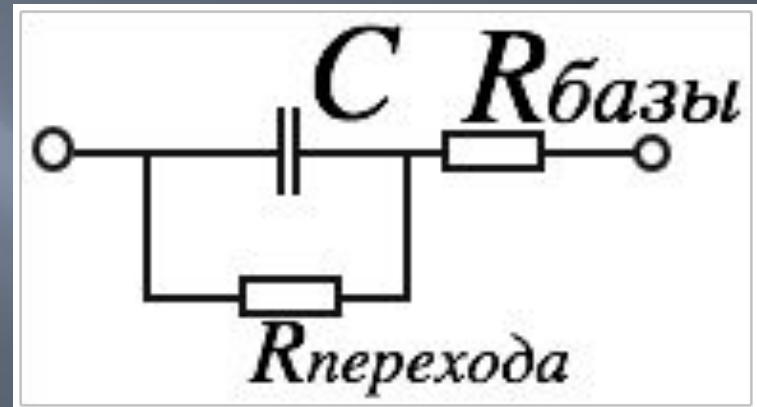
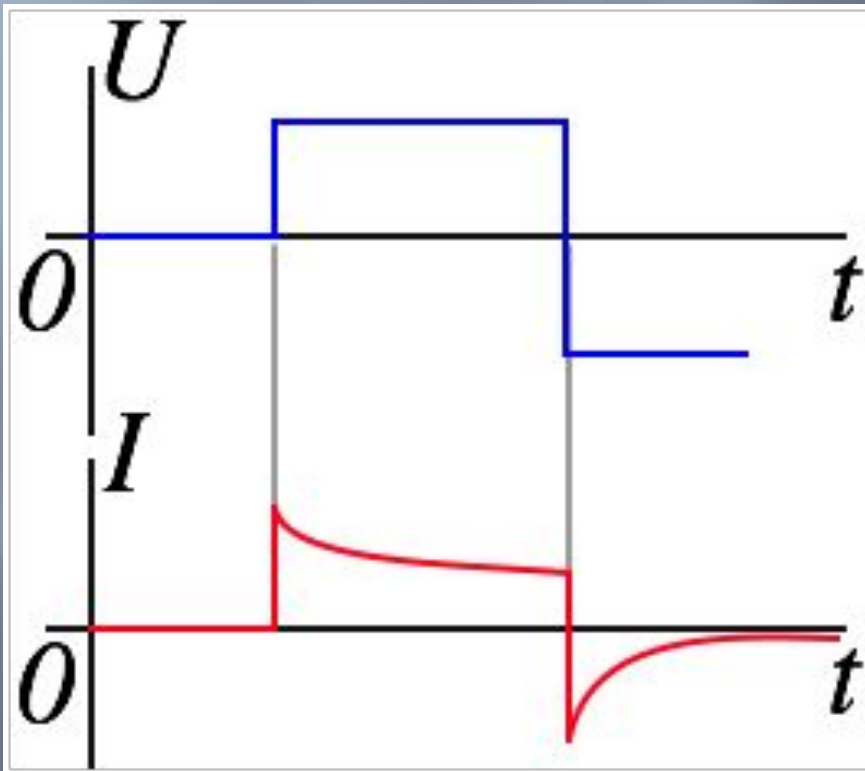
3.4. Переходные процессы в диодах на р - n переходах

- Большие токи (большой уровень



3.4. Переходные процессы в диодах на р – n переходах

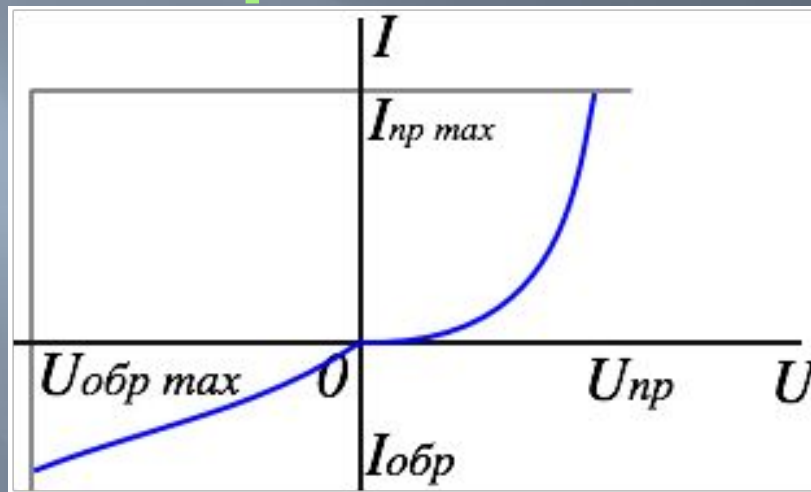
- Малые токи:
- Определяющей является ёмкость диодов.



3.5. Выпрямительный диод

- ▣ Выпрямительный диод – диод, предназначенный для преобразования переменного напряжения в постоянное.
- ▣ В нём используется р – n переход, свойство односторонней проводимости.
- ▣ Для изготовления применяется кремний.

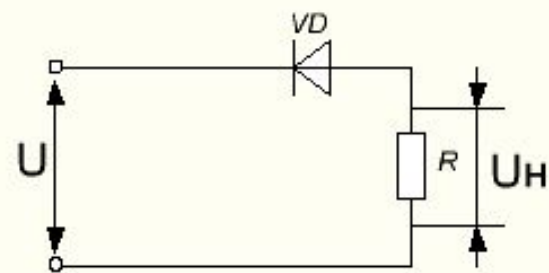
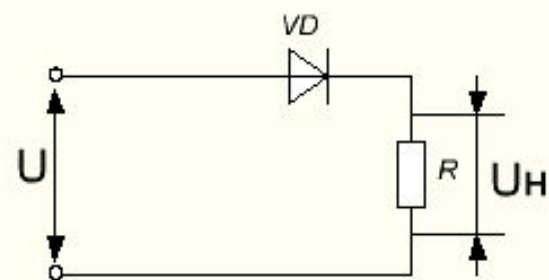
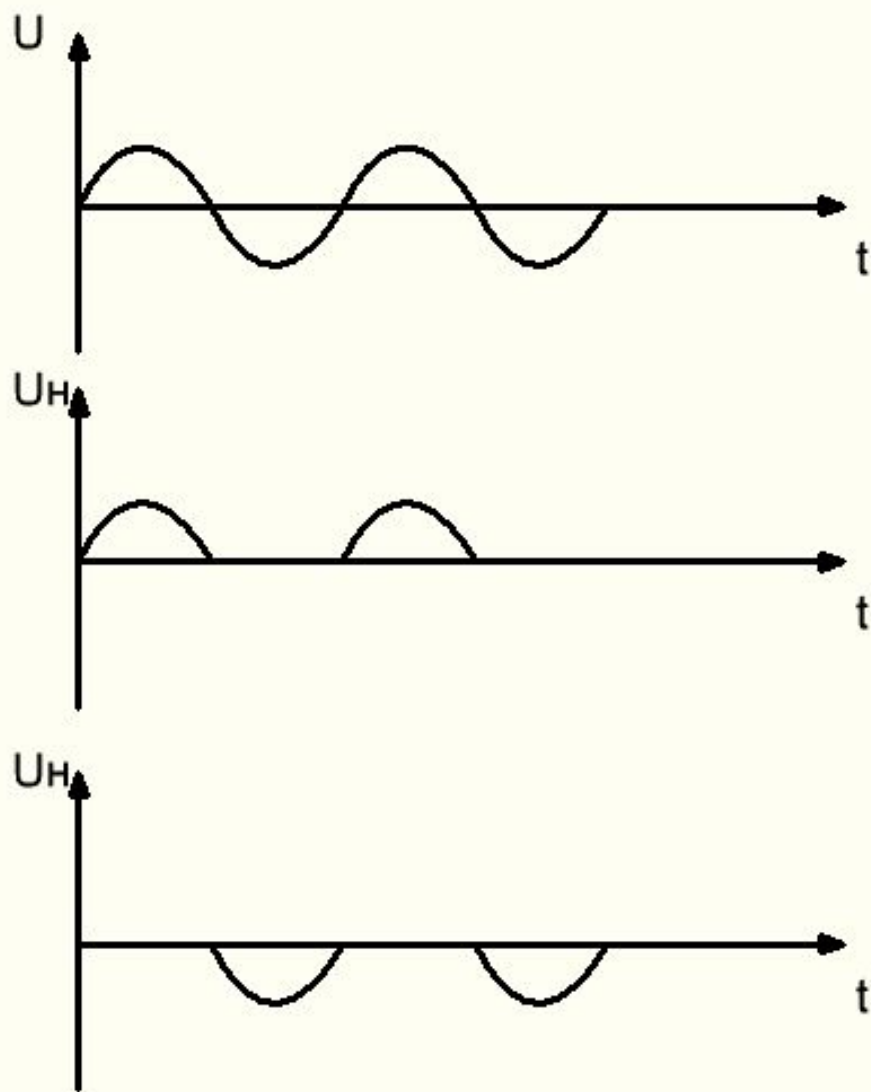
3.5. Выпрямительный диод



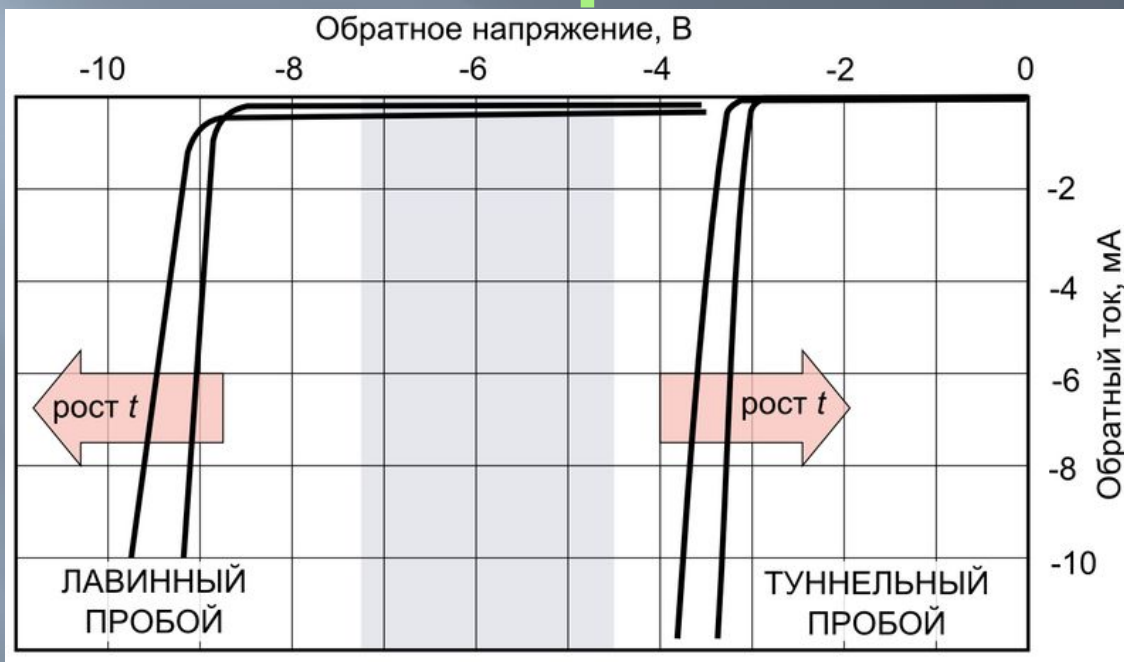
Основные параметры:

- ▣ Прямой ток $I_{пр\ max}$
- ▣ Прямое напряжение $U_{пр} | I_{пр\ max}$
- ▣ Обратное напряжение $U_{обр}$
- ▣ Обратный ток $I_{обр} | U_{обр}$
- ▣ Диапазон температур T_{min}, T_{max}

3.5. Выпрямительный диод



3.6. Стабилитрон и стабистор



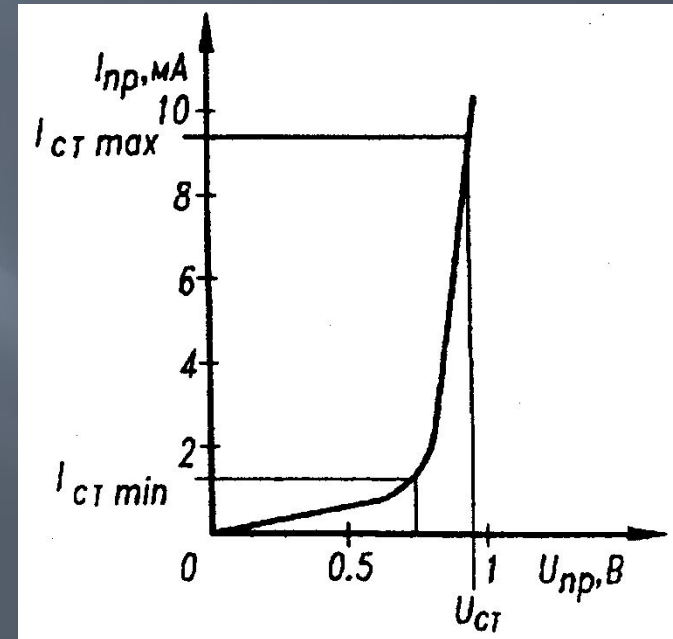
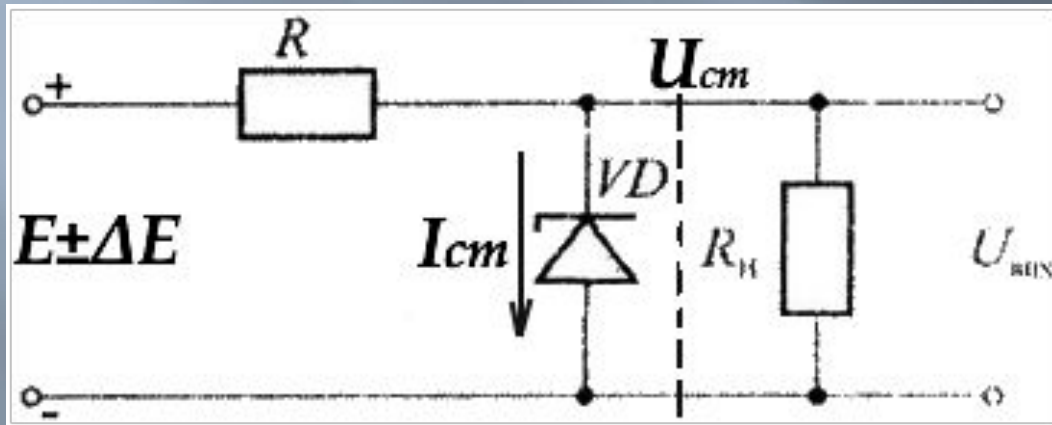
- Стабилитрон – полупроводниковый диод, работающий при обратном напряжении в режиме электрического пробоя (лавинного) и обеспечивает относительное постоянство напряжения при значительных изменениях тока. Применяется в стабилизаторах на напряжении от 2 до 400 В.

3.6. Стабилитрон и стабистор

- Основные параметры:
- Напряжение стабилизации $U_{ст}$
- Ток стабилизации $I_{ст}$
- $I_{ст\ min}$
- $I_{ст\ max}$
- Дифференциальное сопротивление $r_{диф}$
- Температурный коэффициент $\alpha = \frac{1}{u_{ст}} \cdot \frac{\Delta u_{ст}}{\Delta T}$

3.6. Стабилитрон и стабистор

- Стабистор работает при прямом напряжении.



3.6. Стабилитрон и стабистор

Схема включения стабилитрона:

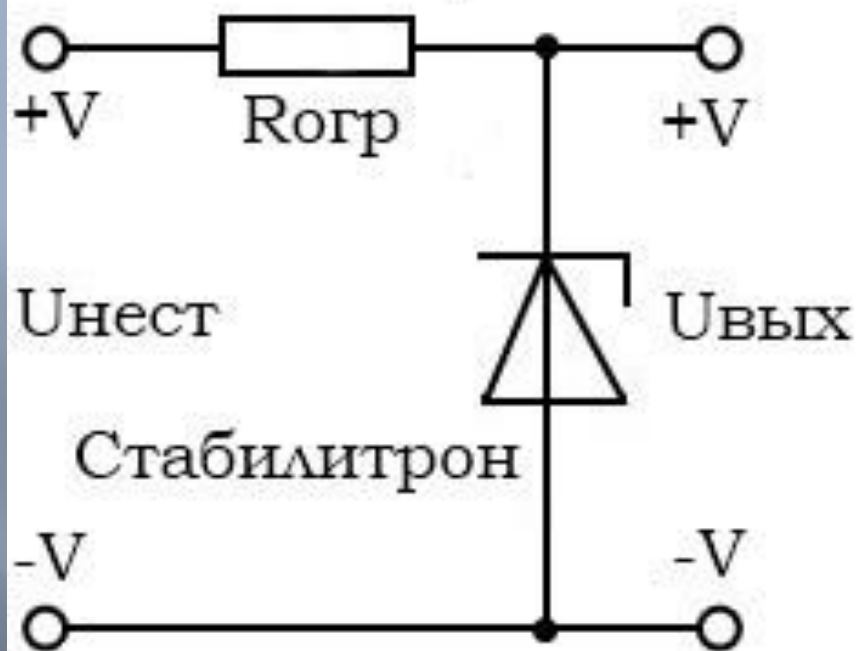
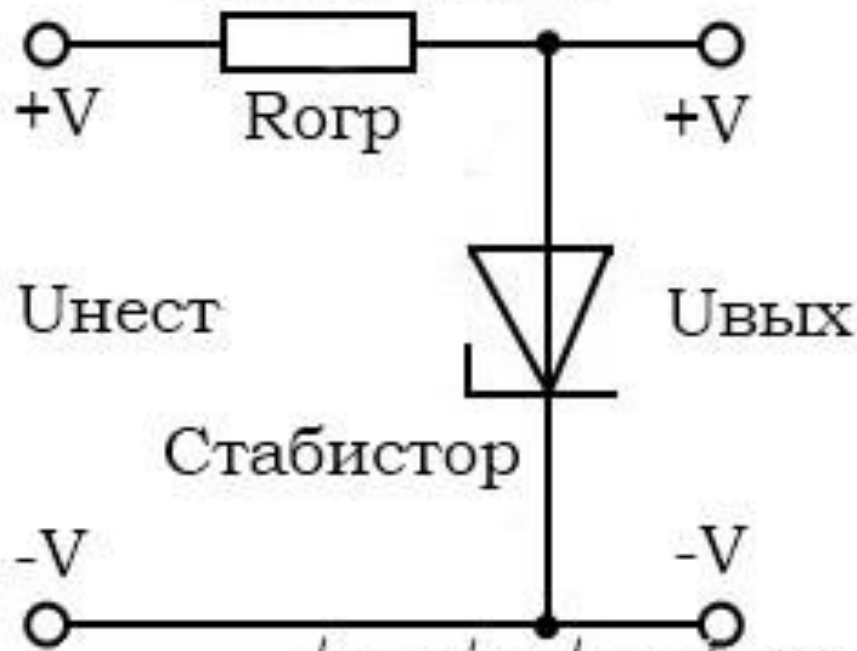


Схема включения стабистора:

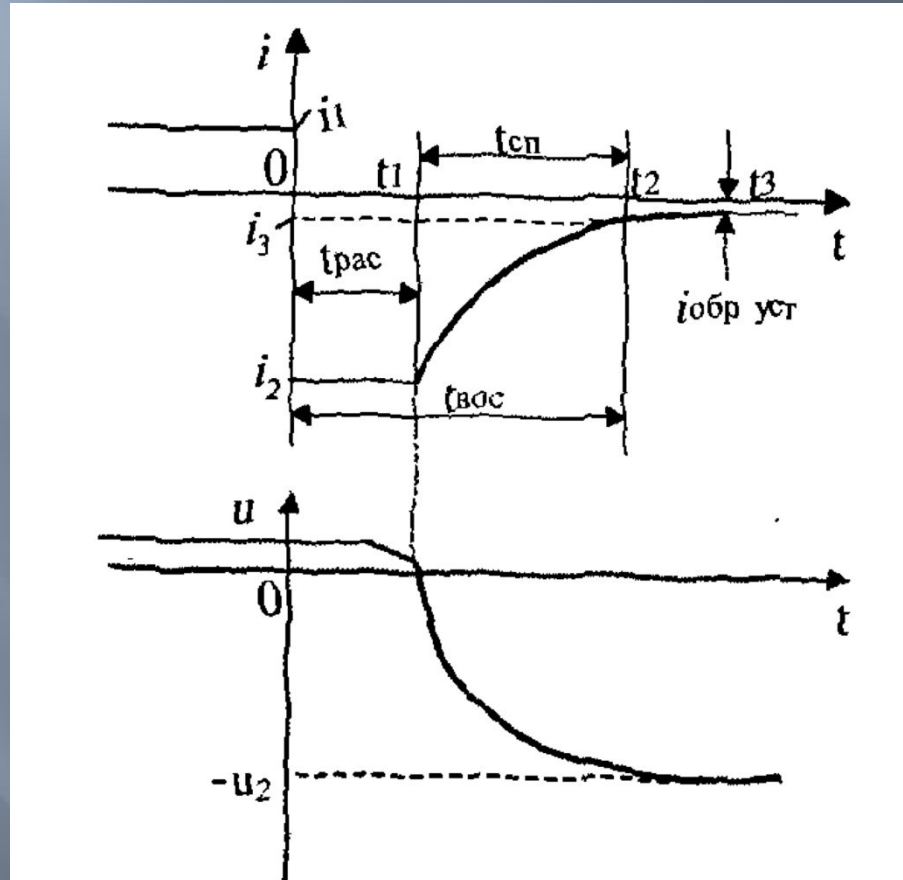


best-char.ru

3.7. Импульсный диод

- Импульсный диод – полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.
- Применяются в качестве коммутационных элементов ЭВМ.

3.7. Импульсный диод



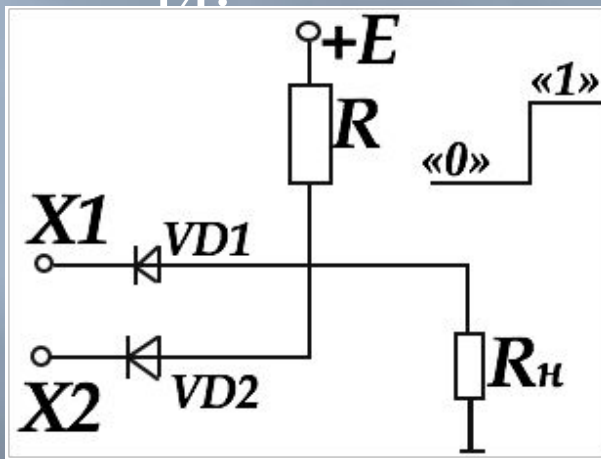
- $t_{вост}$ - время восстановления обратного сопротивления.

3.7. Импульсный диод

- ▣ Переходный процесс при переключении диода с прямого напряжения на обратное определяет его частотные свойства.
- ▣ Переходный процесс – это время, в течение которого импульсного диода восстанавливается до постоянного значения, после быстрого переключения с прямого направления на обратное.

3.7. Импульсный диод

- Пример: реализация логического элемента И.



X1	X2	Y=X1&X2
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- $X1=1, X2=1$: диоды закрыты – ток пойдёт на нагрузку
- $X1=0, X2=1$: диод $VD1$ открыт – ток пойдёт в источник логического нуля

3.8. Диод Шоттки

- ▣ Диод Шоттки – это диод, выпрямляющие свойства которого основаны на использовании перехода Шоттки. В переходе Шоттки присутствуют только основные носители заряда, поэтому нет эффекта накопления неосновных носителей. Диод Шоттки – высокочастотный.
- ▣ *Материал:* Si и GaAs.
- ▣ *Применение:* в импульсных схемах пико- и наносекундного диапазонов.

3.9. СВЧ-диоды:

а) Смесительный диод

- Смесительный диод – это диод, предназначенный для преобразования СВЧ сигнала в сигнал промежуточной частоты .



3.9. СВЧ-диоды:

а) Смесительный диод

- К смесительному диоду подводится напряжение

сигнала и напряжение гетеродина

$$u = E_0 + E_c \cos \omega_c t + E_\Gamma \cos \omega_\Gamma t$$

E_0 – устанавливает точку покоя

$$I = a_0 + a_1(u - E_0) + a_2(u - E_0)^2 + \dots$$

$$0, \omega_c, \omega_\Gamma, \omega_c \pm \omega_\Gamma$$

- Частоты:

$$\omega_{пр} = \omega_c - \omega_\Gamma$$

3.9. СВЧ-диоды:

а) Смесительный диод

- Основные параметры: $\Delta B_{прб} = 10 \lg \frac{P_{СВЧ}}{P_{НЧ}} [\quad]$
- Потери преобразования
- Шумовое отношение $n_{ш}$ – отношение мощности шумов диода к мощности тепловых шумов соответствующего активного сопротивления при той же температуре и одинаковой полосе частот.
- Коэффициент шума $F = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вх} / \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{вых}$
- Коэффициент стоячей волны. Чем лучше согласование камеры, в кот. находится диод, и волнового тракта, тем меньше КСВ и потери принимаемого сигнала. $K_{СВ_{min}} = 1$

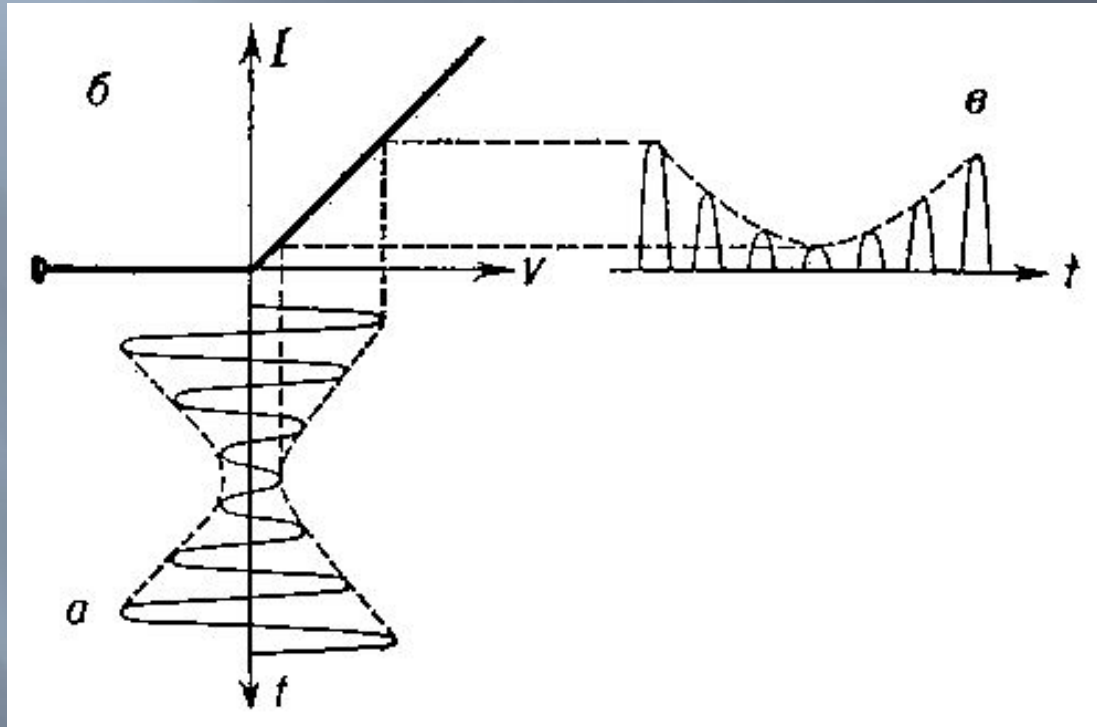
3.9. СВЧ-диоды:

б) Детекторный диод

- Детекторный диод – предназначен для выделения из модулированных по амплитуде СВЧ колебаний сигнала более низкой частоты.



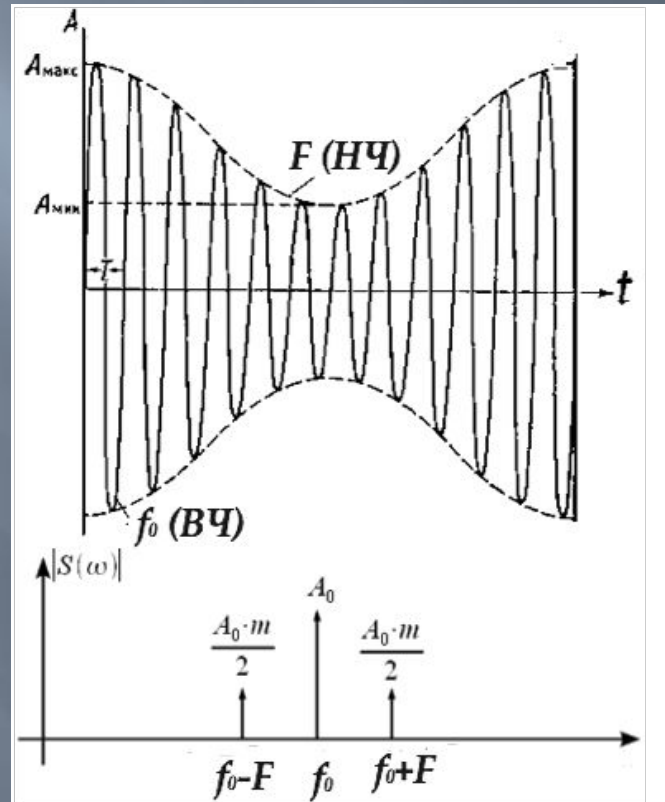
3.9. СВЧ-диоды: б) Детекторный диод



- После прохождения через детекторный диод форма сигнала изменилась, изменился спектр.

3.9. СВЧ-диоды:

б) Детекторный диод



Подключением ФНЧ из спектра сигнала выделяется низкая частота F .

3.9. СВЧ-диоды:

б) Детекторный диод

Параметры:

- Чувствительность (чувствительность к потоку):

$$\beta_I = \frac{\Delta I_{инф}}{\Delta p_{СВЧ}}$$

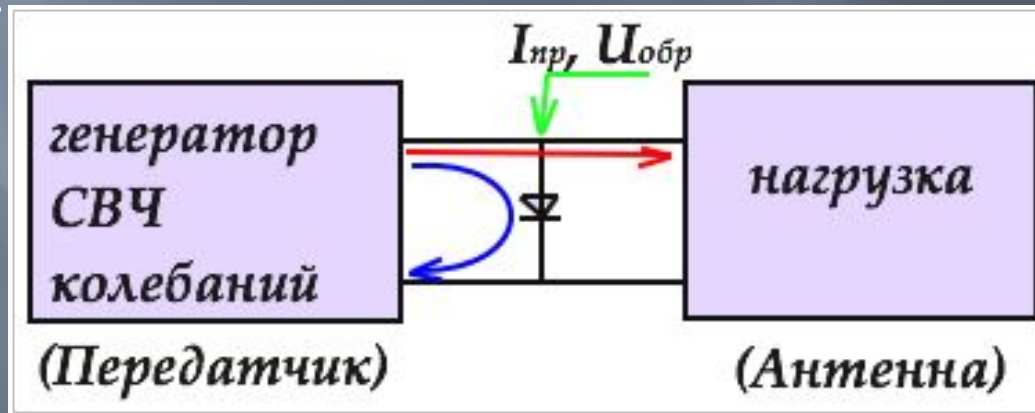
- Коэффициент качества детекторного диода:

$$M = \frac{\beta_I}{\sqrt{n_{ш} r_{диф} + r_{ВХ}}}$$

- Входная проводимость следующего каскада, по умолчанию равно 1 кОм:
 $r_{ВХ}$

3.9. СВЧ-диоды: в) Переключательный диод

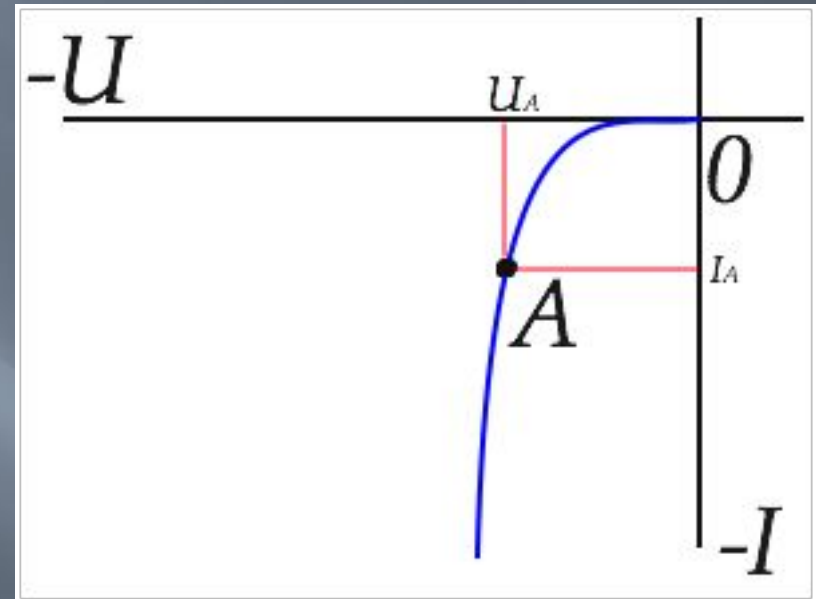
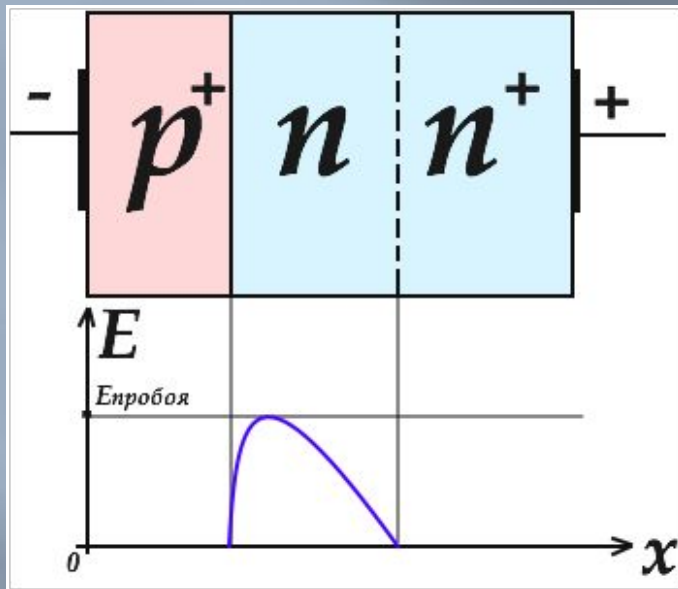
- Переключательный диод – диод, предназначенный для применения в устройствах управления уровнем СВЧ мощности.
- Используются сильные различия между $r_{пр}$ и $r_{обр}$.



3.10. Лавинно-пролётный диод

- ▣ Лавинно-пролётный диод – диод, работающий в режиме лавинного размножения носителей заряда при обратном смещении электрического перехода и предназначенный для генерации СВЧ колебаний.

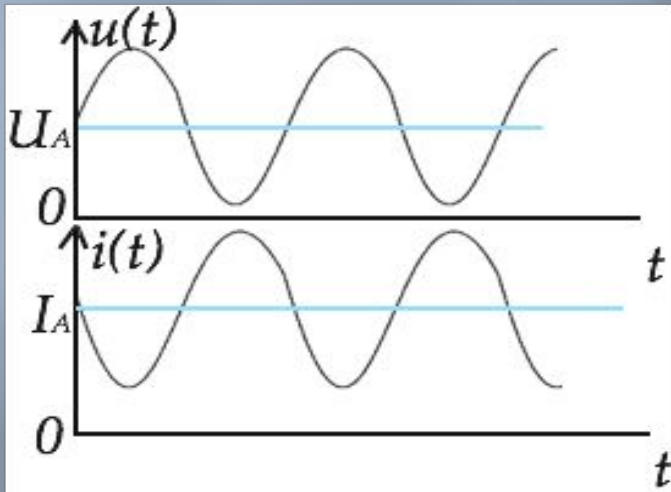
3.10. Лавинно-пролётный диод



Пусть $U_A + \Delta u$

- ▣ Лавинное размножение зарядов
- ▣ Дырки – устремляются в p-область, электроны – в n-область
- ▣ Лавина развивается не мгновенно. Кроме того, из-за конечной скорости движения зарядов к выходу прибора $U_{свч}$ может измениться, таким образом, возникает фазовый сдвиг (ток отстаёт от напряжений).

3.10. Лавинно-пролётный диод

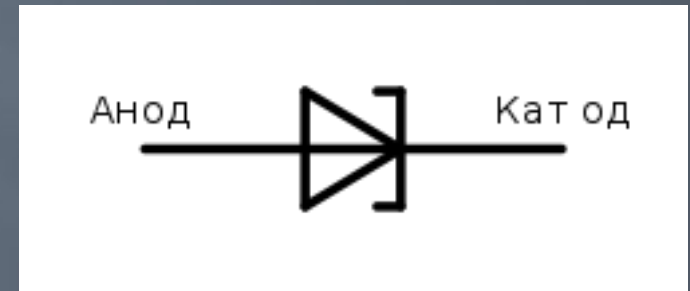
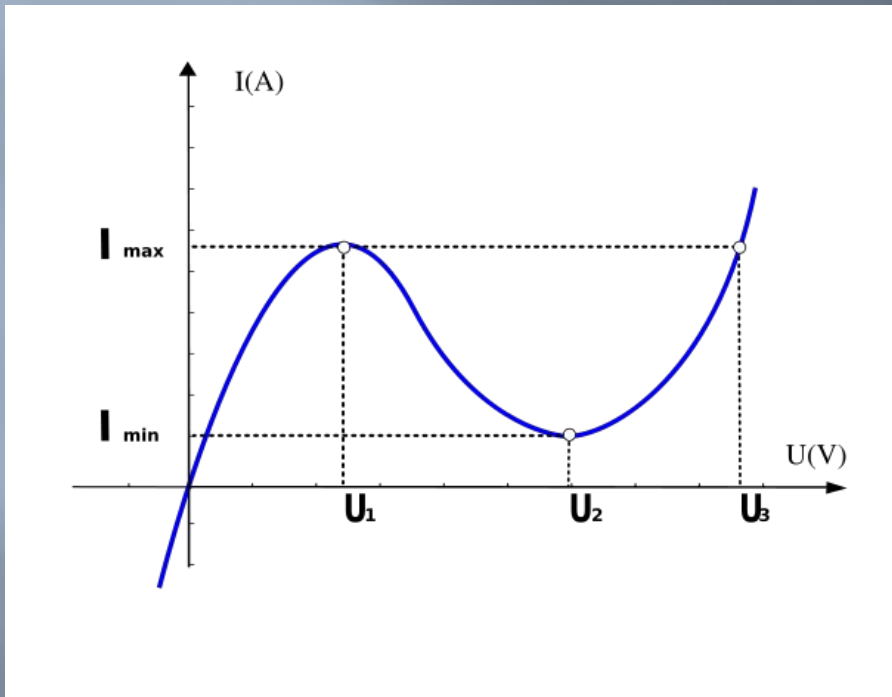


- Пусть фазовый сдвиг равен 180° .
- $r_{\text{диф}}$ отрицательное \Rightarrow способность генерации.
- В течение всего периода существует отрицательное $r_{\text{диф}}$, а это говорит о том, что лавинно-пролётный диод – генератор СВЧ колебаний. Если фазовый сдвиг не 180° , при 90° и 270° исчезают условия для отрицательного $r_{\text{диф}}$ \Rightarrow идёт генерация СВЧ-колебаний в очень узком диапазоне частот.
- $\sim u$ выделяется из сигналов включения в камере, где располагается диод.

3.11. Туннельный диод

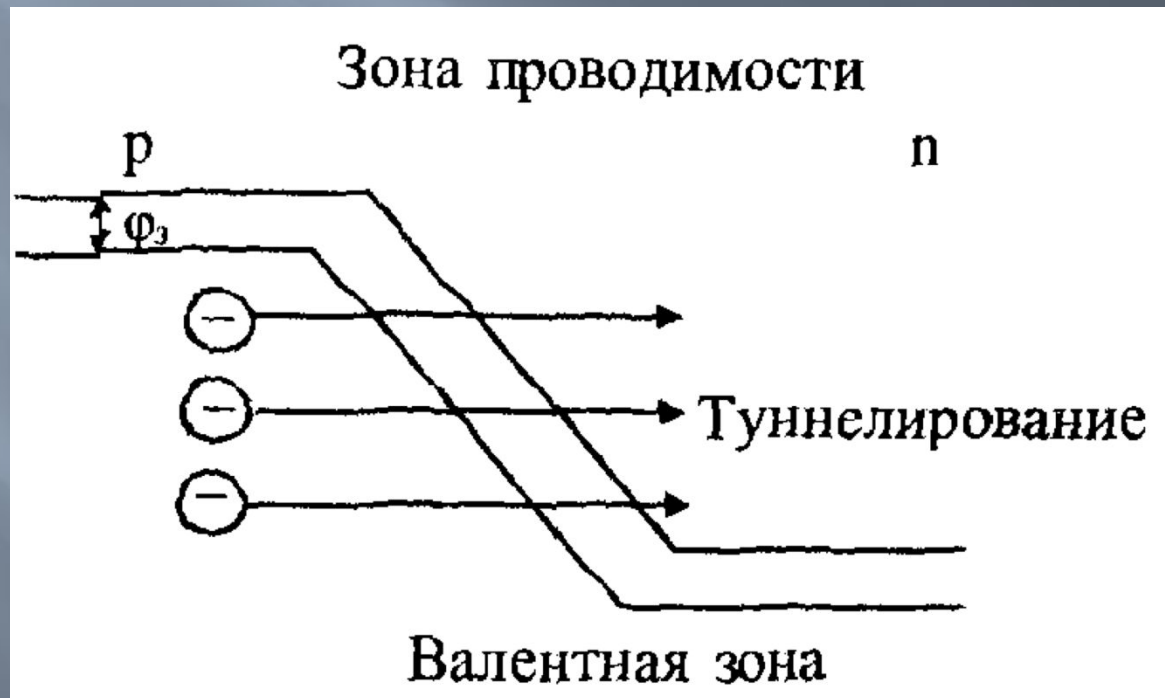
- Туннельный диод – это диод, на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на ВАХ при $U_{пр}$ участка отрицательной диф. проводимости. Вырожденный полупроводник – больше содержание примесей (на 2 порядка), в связи с этим переход значительно меньше, чем в других диодах => возможно туннелирование без изменения энергии.
- Другим следствием большой концентрации примесей является расщепление энергетических уровней с образованием примесных энергетических зон р-области, n-области, эквивалентной зоны р-области.

3.11. Туннельный диод



- I_{max} – $I_{\text{пика}}$ I_{min} – $I_{\text{впадины}}$
- U_1 – $U_{\text{пика}}$ U_2 – $U_{\text{впадины}}$ U_3 – U_{pp} (раствора)
- $U_{pp} > U_{в'}$, $I_{\Pi} = I_{в}$

3.11. Туннельный диод



3.11. Туннельный диод

Параметры:

- ▣ f_R (предельная резистивная частота) – это расчётная ч-та, на которой активная составляющая полного сопротивления, состоящая из р-п перехода и сопротивления потерь, обращается в 0.
- ▣ f_0 (резонансная частота) – это ч-та, на которой общее реактивное сопротивление и индуктивности корпуса обращаются в 0.
- ▣ $f_R < f_0$

3.12. **Обращённый диод**

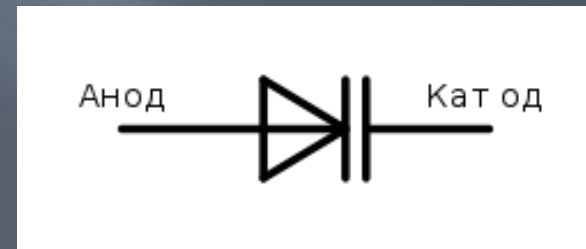
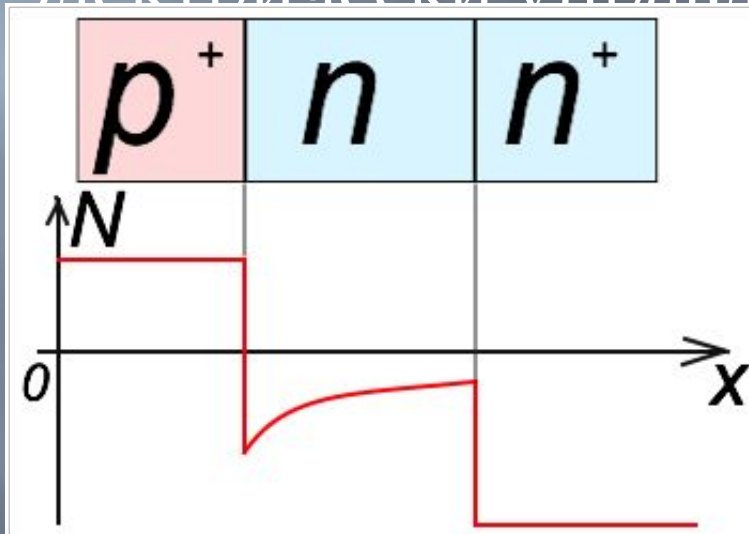
- ▣ Обращённым диодом называется диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении, вследствие туннельного эффекта, значительно больше, чем при прямом.

Применение:

- ▣ Способен работать на очень малых сигналах.
- ▣ Обладает хорошими частотными свойствами, потому что туннельный эффект безынерционный, а инжекция происходит при очень малых токах, поэтому накопление зарядов, влияющих на переходные процессы, отсутствует.
- ▣ Из-за высоких концентраций примесей малочувствителен к воздействию радиации.
- ▣ Материал: германий.

3.13. Варикап

- Варикап – это диод, действие которого основано на использовании зависимости ёмкости диода от напряжения. Предназначен для использования в качестве электрически управляемой ёмкости.



3.13. Варикап

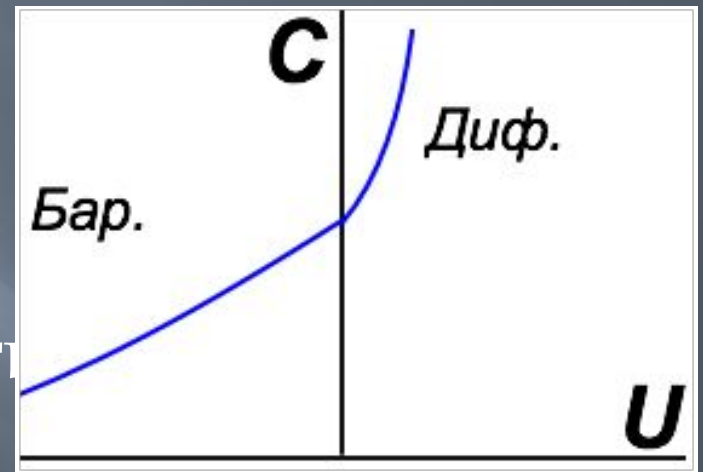
Параметры:

- Ёмкость варикапа:

$$C_{B|U_B}$$

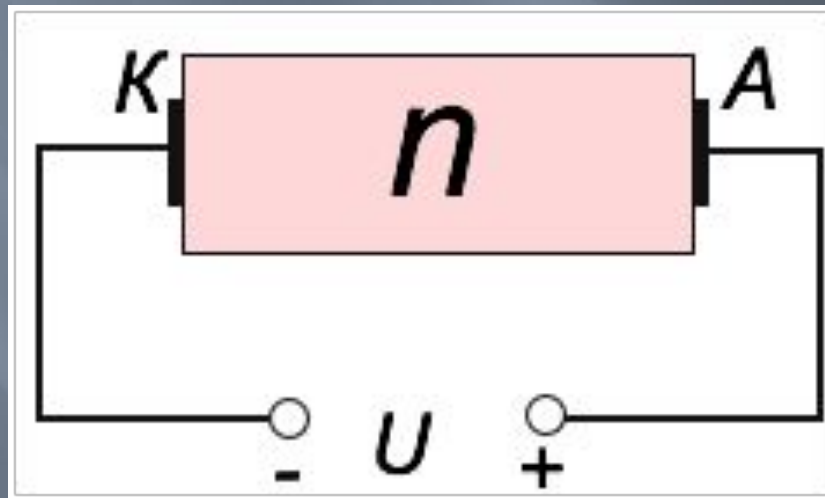
- Коэффициент перекрытия

$$K_{\pi} = \frac{C_{B1|U_{B1}}}{C_{B1|U_{B1}}}$$



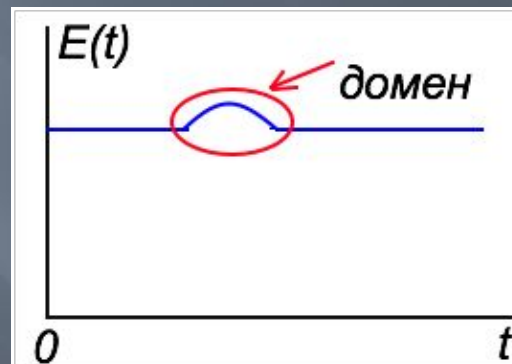
3.14. Генератор Ганна

- Генератор Ганна – функциональная электроника: используется свойство пластины полупроводника генерировать излучение при высоком напряжении.



3.14. Генератор Ганна

- В пластине n-типа при определённом значении U (а, следовательно, и напряжённости E) около катода образуется сгусток электронов – домен (сгусток).
- Домен движется к стоку и рекомбинирует (исчезает) на аноде, образуя импульс тока во внешней цепи.



3.14. Генератор Ганна

Свойства:

- ▣ Преобразование мощности постоянного тока происходит во всём объёме среды, а не в узкой области, например, р-n перехода, поэтому генератор Ганна обладает значительной мощностью.
- ▣ В качестве среды используются GaAs, InAs, CdTe.