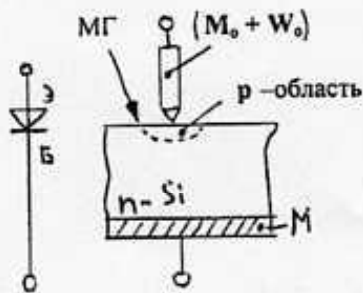


## Полупроводниковые диоды

Диодом называется электропреобразовательный прибор содержащий один или несколько электрических переходов и два вывода для подключения к внешней цепи.

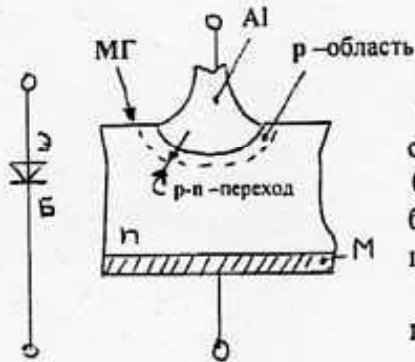
### Классификация диодов:

По виду электрического перехода	По физическим процессам в переходе	По рабочему назначению	По диапазону рабочих частот	По материалу перехода	По технологии изготовления перехода
точечные и плоскостные p-n диоды  p-i-n диоды  М-ПП – диоды Шоттки	туннельный; лавинный; излучательный	выпрямительные; импульсные; стабилитроны; шумовые; генераторные; переключающие; варикапы и т.д.	НЧ; ВЧ; СВЧ; оптические	Ge; Si; GaAs	сплавные; диффузионные; эпитаксиальные; планарные; ионно-лучевые



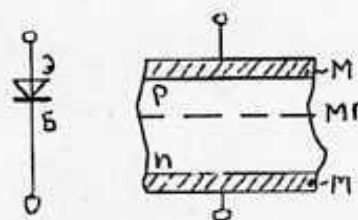
**Точечный диод.** Технология изготовления: p-область образуется при пропускании большого прямого тока  $I_{пр}$ . При этом алюминий (Al) являющийся акцептором, растворяется в кремнии (Si). Отличительные свойства этого типа диодов: 1. Мала барьерная емкость перехода  $C_{бар}$  (т.к. мала площадь перехода  $S_{пер}$ ); 2. Мал прямой ток  $I_{пр}$ .

$M_o$  – молибден;  $W_o$  – вольфрам; М – металл; МГ – металлургическая граница.



**Плоскостной сплавной диод.** Технология изготовления: p-область образуется сплавлением алюминия в кремний при температуре  $700^{\circ}C$ . Отличительные свойства этого типа диодов: 1. Прямой ток  $I_{пр}$  – большой и достигает десятков и более Ампер. 2. Барьерная емкость перехода  $C_{бар}$  – велика.

Большие величины  $I_{пр}$  и  $C_{бар}$  связаны с большой площадью перехода  $S_{пер}$ .



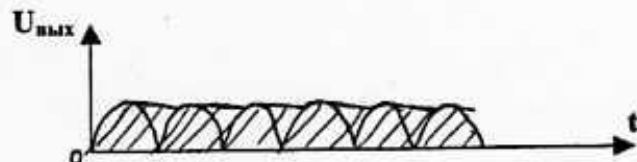
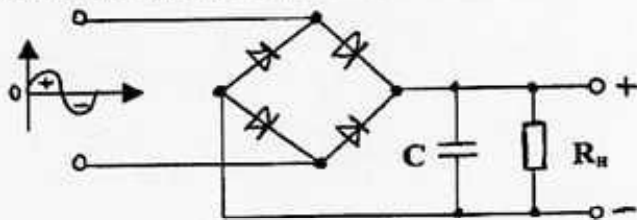
**Диффузионный диод.** Технология изготовления: p-область образуется при диффузии акцептора (алюминий) в n-область (Si) и проводимость этой части n-области становится p-типа. В результате между этими областями образуется p-n переход.

**Эпитаксиально-планарный или поверхностный диод.** Технология изготовления: эпитаксия – наращивание монокристалла полупроводника на подложке. Вначале выращивают кремний p-типа, затем путём диффузии доноров получают слой с проводимостью n-типа (область базы), далее путём диффузии вводят акцепторы и получают в приповерхностном слое локальную область p-типа – эмиттерную область. Планарная технология – это технология при осуществлении которой все выводы от создаваемых внутри кристалла полупроводника структур выполняются на одну сторону – это основная технология изготовления современных интегральных схем.





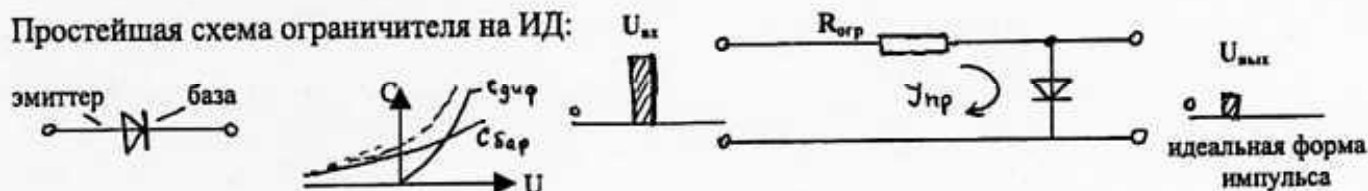
Двухполупериодный, так называемый мостовой выпрямитель:



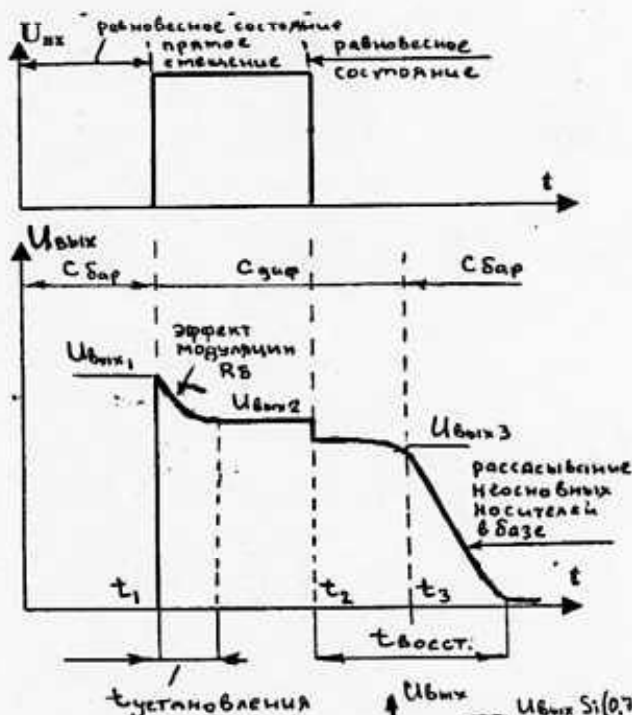
## Импульсные диоды (ИД)

Параметры импульсных диодов			
статические	динамические	электрические	Специальные импульсные параметры
параметры такие же, как у выпрямительных диодов			$U_{пр.имп.макс}$ – максимальное импульсное прямое напряжение $t_{уст}$ – время установления прямого сопротивления перехода (влияет на форму переднего фронта импульсной характеристики) $t_{вос}$ – время восстановления обратного сопротивления перехода (влияет на форму заднего фронта импульсной характеристики)

Простейшая схема ограничителя на ИД:



## Импульсная характеристика схемы на ИД



### Передний фронт импульсной характеристики (ИХ).

(при больших прямых токах, т.е. когда произведение  $I_{пр} R_б$  соизмеримо с  $U_{пр}$ )

в момент  $t_1$ : а)  $C_{бар} \gg C_{диф}$ ,  $C_{бар}$  быстро заряжается прямым током  $I_{пр}$  и устанавливается выходное напряжение  $U_{вых} = U_{перехода} + I_{пр} R_{б0}$ . б) высокая степень инжекции повышает концентрацию носителей в базе и уменьшает сопротивление базы (эффект: модуляции  $R_б$ ),  $R_б < R_{б0}$  и тогда  $U_{вых2} = U_{пер} + I_{пр} R_б$  (соответствует  $U_{пр}$  на ВАХ).

Задний фронт ИХ. а) в момент  $t_2$  прекращается инжекция носителей,  $U_{вх}$  падает до нуля и на выходе происходит скачок напряжения:

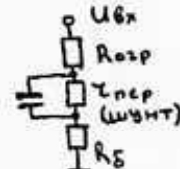
$$U_{вых2} - U_{вых3} = U_{вх} R_б / (R_{огр} + R_б),$$

т.к.  $C_{бар} < C_{диф}$

б) неосновные носители в базе:

- 1) возвращаются в эмиттер,  $I_{обр} \gg I_0$
- 2) рекомбинируют в базе.

в) после момента  $t_3$   $C_{диф} < C_{бар}$ ,  $C_{бар}$  перезарядается и восстанавливается сопротивление перехода  $R_{пер}$  (становится большим т.к. в переходе мало носителей)



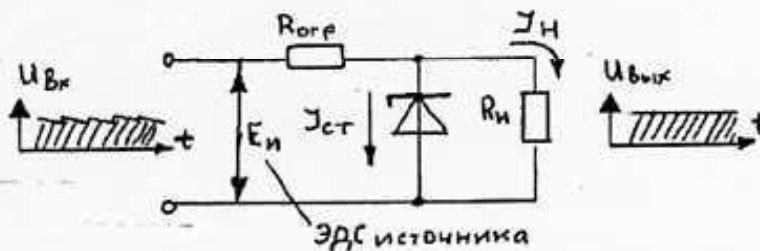
Лучшими ИД являются диоды с малыми барьерными ( $C_{бар}$ ) и дифференциальными ( $C_{диф}$ ) ёмкостями (т.к. мала площадь перехода -  $S$ ) или диоды с барьером Шотки (М-пп) т.к. у них нет накопления неосновных носителей и нет  $C_{диф}$

## Стабилитроны и стабилиторы.

Стабилитрон – диод, имеющий на обратной ветви ВАХ участок высокой крутизны. Обозначение на схемах одноанодного стабилитрона:



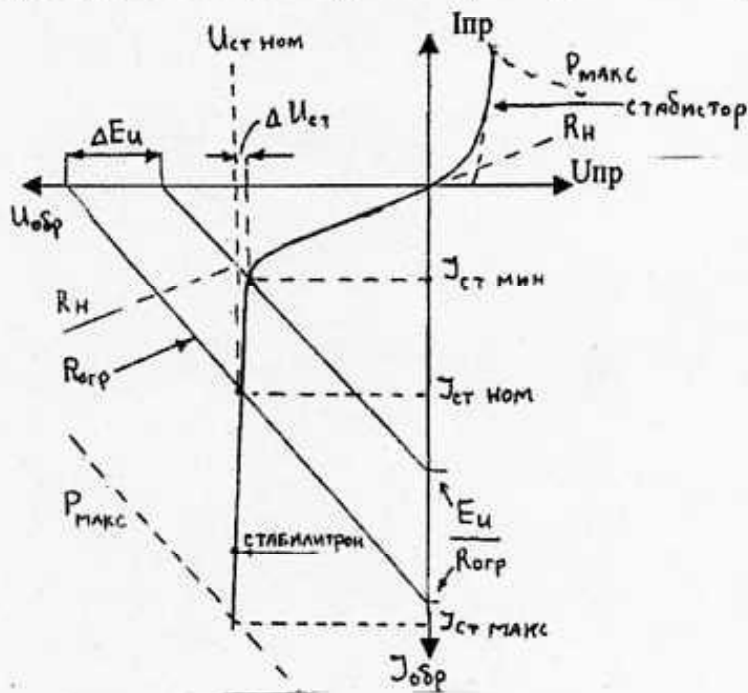
Схема включения стабилитрона:



Классификация стабилитронов: стабилитроны общего назначения; прецизионные или высокоточные; импульсные; двуханодные, обозначение на схемах: стабилиторы ( $U_{ст} = 0,7 \text{ В}$  при  $300^\circ\text{К}$ )



Стабилитором называют ПП диод, с помощью которого осуществляют стабилизацию напряжения при прямом смещении (т.е. на прямом участке ВАХ).



Принцип действия стабилитрона:

Увеличение напряжения  $\Delta E_u$  вызывает рост  $\Delta I_{ст}$ , но  $I_{нагрузки} = \text{const}$ . (т.е. напряжение на нагрузке  $U_n = I_n R_n - \text{const}$ ) т.е. стабилитрон как бы “поглощает” лишний ток.

Для изготовления стабилитронов применяют в основном Si т.к. у таких диодов мал обратный ток  $I_{обр}$ ; большой диапазон рабочих температур  $\Delta T_{раб}^0$  и высокая крутизна ВАХ.

Работают стабилитроны на двух типах пробоя перехода: туннельном  $U_{ст} < 6,3 \text{ В}$  и лавинном  $U_{ст} > 6,3 \text{ В}$ .

Основными параметрами являются: напряжение стабилизации номинальное  $-U_{ст}$ ; ток стабилизации номинальный  $-I_{ст}$ ;  $I_{ст мин}$ ;  $I_{ст макс}$ ;  $P_{макс}$  – максимальная мощность.

Основной параметр рабочей схемы – коэффициент стабилизации по напряжению:

$K = \Delta E_u / \Delta U_{ст} \gg 1$  – т.е. отношение величины изменения входного напряжения (напряжения источника питания) к величине изменения выходного, стабилизированного напряжения.

## Ограничители напряжения.

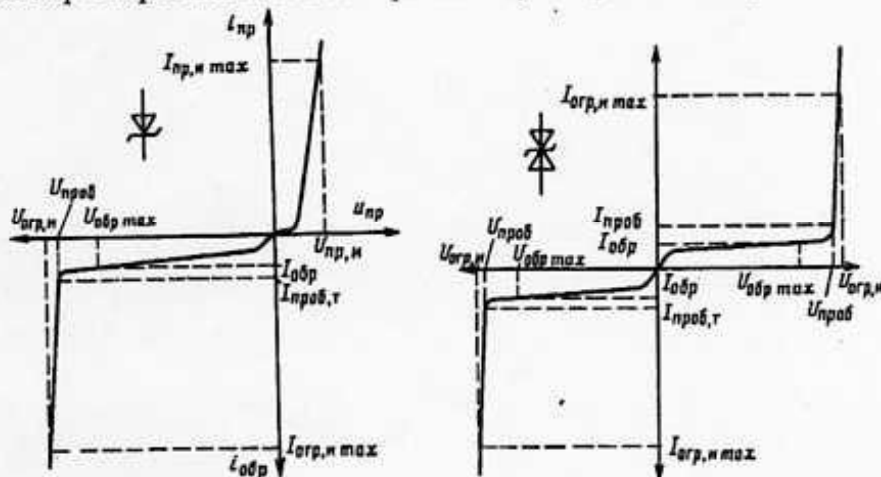
Ограничитель напряжения – полупроводниковый диод, работающий на обратной ветви ВАХ с лавинным пробоем и (или) на прямой ветви ВАХ. Этот диод используется для защиты от перенапряжений электрических схем.

Ограничители напряжения бывают несимметричными (применяются для защиты цепей постоянного тока) и симметричными (для защиты цепей переменного тока).

Основным параметром ограничителей напряжения является время срабатывания, которое может быть от единиц пикосекунд ( $10^{-12} \text{ с}$ ) до единиц наносекунд ( $10^{-9} \text{ с}$ ).



Вольтамперные характеристики несимметричного (слева) и симметричного ограничителя:



## Варикапы.

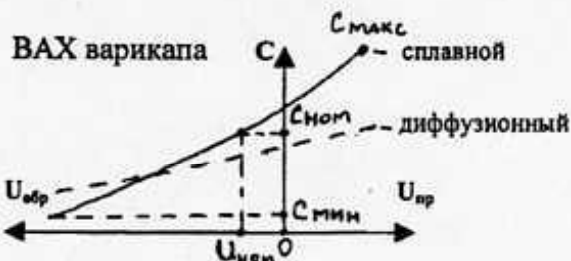
Варикап – полупроводниковый диод с управляемой напряжением ёмкостью перехода.

Обозначение на схемах:



Основные характеристики варикапов

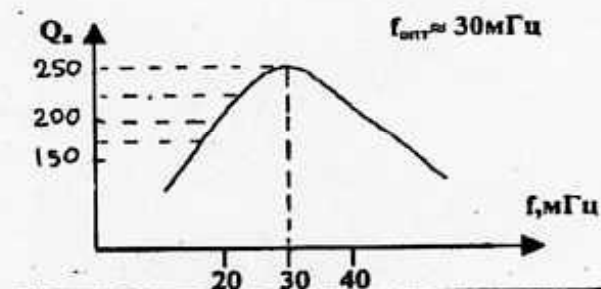
области применения	ПП материалы	структуры	технология	основные параметры
<ul style="list-style-type: none"> <li>- колебательные контура (для автоподстройки частоты)</li> <li>- умножители и делители частоты</li> <li>- параметрические усилители</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si</li> <li>- Ge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- (p - n - n<sup>+</sup>)</li> <li>- (p - i - n)</li> <li>- МДП</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- сплавная (резкая зависимость ёмкости от напряжения)</li> <li>- диффузионная (плавная зависимость C от U)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>C_{ном}</math>; <math>C_{мин}</math>; <math>C_{макс}</math></li> <li>- <math>K_n = C_{макс} / C_{мин}</math> - коэффициент перекрытия по ёмкости</li> <li>- <math>Q_v = X_{реактивное} / X_{полное}</math> - добротность варикапа при <math>U_{ном}</math> на заданной рабочей частоте. Учитывают также и температурные коэффициенты изменения величин C и Q</li> </ul>



Аппроксимация ВАХ:  $C_v = C_{v0} [\phi_k / (\phi_k - U_{обр})]^m$   
 Величина  $m = 0,5$  для сплавного варикапа и  
 $m = 0,3$  для диффузионного.

$C_{v0}$  - при напряжении  $U_v = 0$

$C_{v0}$  - ёмкость варикапа при нулевом напряжении на переходе.



При использовании варикапов в качестве перестраиваемой ёмкости резонансного контура, важно чтобы величина добротности  $Q_v$  была максимальной.

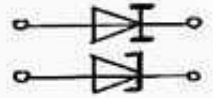
Для увеличения добротности  $Q_v$  необходимо уменьшать сопротивление базы  $r_b$ , а для уменьшения  $r_b$  нужно увеличивать количество примеси  $N_{пр}$  в базе.

График зависимости  $Q_v$  от рабочей частоты  $f$ .

## Туннельный и обращённый диоды.

Обозначение на схемах:

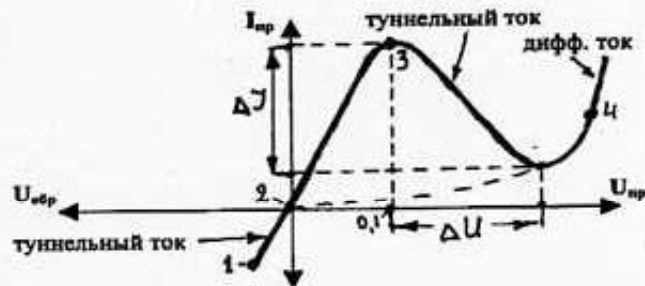
туннельный  
обращённый



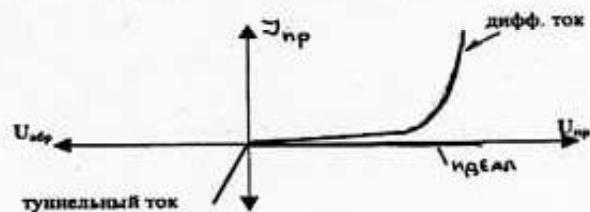
Туннельный диод (ТД) – это диод, у которого имеется участок отрицательного сопротивления на прямой ветви вольтамперной характеристики.

классификация	технология	основные параметры
- усилительные - генераторные - переключающие	- переход $\tau$ - $N_{pr} \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ - $L_{об} \approx 10 \text{ нм}$	$r_{диф} = (U_2 - U_1) / (I_2 - I_1) = - \Delta U / \Delta I [\text{Ом}]$

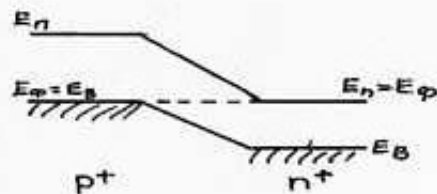
Вольтамперная характеристика туннельного диода:



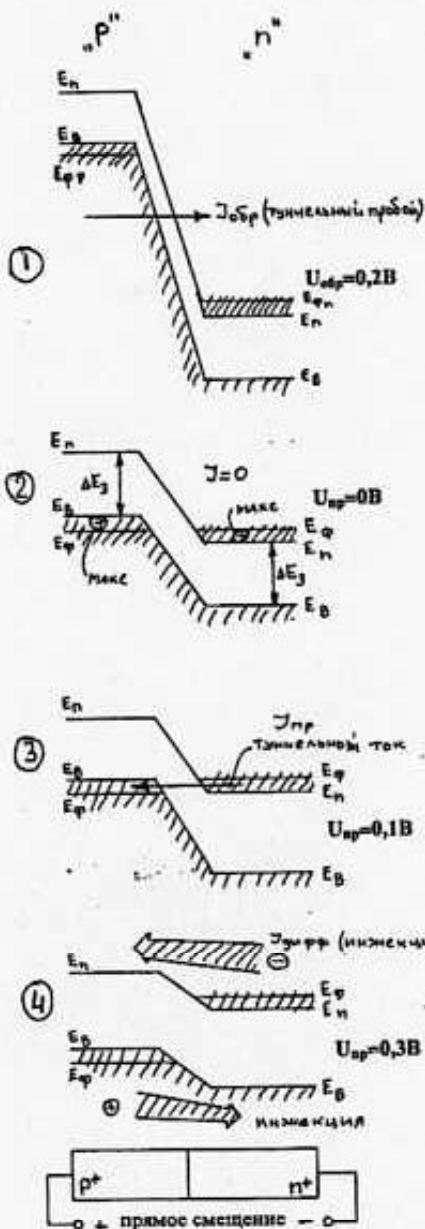
ВАХ обращённого диода ( $N_{pr} = 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ):



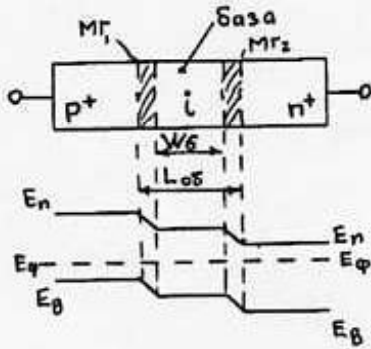
Энергетическая диаграмма обращённого диода:



Энергетическая диаграмма ТД для четырёх разных напряжений смещения на переходе.



Обращённый диод используется в маломощных цепях как переключатель при обратном напряжении менее 0.7 В (для Si).



Структура **р-і-п** диода представляет собой три области с  $p^+$ ,  $i$  и  $n^+$  полупроводниками и содержит два перехода  $p^+-i$  и  $i-n^+$ .

Диоды этого типа используются в качестве переключателей или ограничителей СВЧ сигнала.

Параметры:

- прямое напряжение  $U_{пр}$  — очень мало;
- допустимое обратное напряжение  $U_{обр}$  — очень велико;
- пробивное обратное напряжение достигает киловольт;
- рабочая частота достигает сотен ГГц;
- ёмкость диода — очень мала;
- время включения  $t_{вкл}$  — единицы наносекунд;
- время выключения  $t_{выкл}$  — десятки наносекунд.

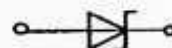
Процессы в **р-і-п** диоде:

- при прямом смещении  $U_{пр}$  происходит двухсторонняя инжекция электронов и дырок в область  $i$ , концентрация носителей в этой области резко возрастает от  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  до примерно  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , что приводит к уменьшению прямого (дифференциального) сопротивления (в основном сопротивления базы) до единиц Ом;
- при обратном смещении  $U_{обр}$  всё обратное напряжение прикладывается к базе, в результате сильное электрическое поле выбрасывает из базы свободные носители (происходит экстракция носителей из  $i$  области), тем самым, увеличивая обратное сопротивление до  $R_{обр} = 10^9 \text{ Ом}$ ;
- барьерная ёмкость  $C_{бар}$  очень мала, она зависит от размеров слоя  $i$  и не зависит от обратного напряжения  $U_{обр}$  т.к. ширина обеднённой области постоянна  $L_{обд} = \text{const}$ ;
- время включения  $t_{вкл}$  определяется временем инжекции дырок и электронов в базу и зависит оно от ширины базы  $W_6$  и величины прямого тока  $I_{пр}$ ;
- время выключения  $t_{выкл}$  определяется: а) скоростью рекомбинации носителей в базе; б) шириной базы  $W_6$ ; в) обратным напряжением  $U_{обр}$  (чем  $U_{обр}$  больше - тем быстрее носители уходят из области базы).

Таким образом, отношение очень малого прямого сопротивления к очень большому обратному сопротивлению, благоприятно для работы **р-і-п** диодов в переключательных режимах.

## Диод Шотки

Обозначение на схемах:



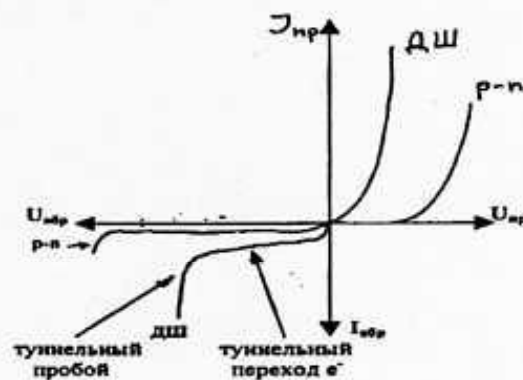
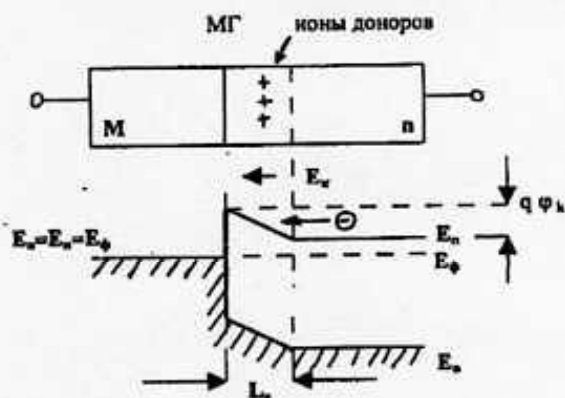
Диод Шотки (ДШ) изготавливается на основе одноимённого типа перехода – перехода Шотки, т.е. перехода **М-ПП** (металл-полупроводник). Используется полупроводник **n**-типа т.к. в нём выше подвижность носителей - электронов  $e^-$ .

Необходимое условие: работа выхода электрона из полупроводника должна быть меньше работы выхода электрона из металла  $A_{пп} < A_m$ .

Области применения: детекторы; переключатели; ограничители СВЧ сигналов.

Особенностью ДШ является инжекция только основных носителей – поэтому  $C_{диффуз} \approx 0$ .

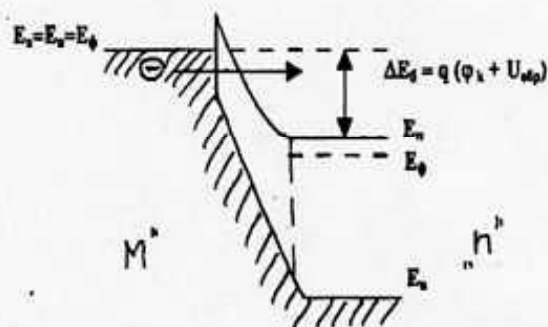
У ДШ мала инерционность в работе (т.к. носители -  $e^-$ ; ёмкость перехода - мала) поэтому ДШ используют на сверхвысоких частотах (СВЧ).



$$\phi_k = (A_m - A_{пп}) / q, \text{ обычно } \phi_k = 0,3 \div 0,9 \text{ В}$$

Сравнительные ВАХ ДШ и p-n диода

При прямом смещении  $U_{пр}$  энергетический барьер  $\Delta E_b$  у ДШ меньше чем у **p-n** перехода и составляет:  $\Delta E_b = q(\phi_k - U_{пр})$ . При этом происходит инжекция только основных носителей - электронов  $e^-$ .



При обратном смещении  $U_{обр}$  - обратный ток в ДШ существенно больше чем у кремниевого **p-n** перехода т.к. рано начинается туннельный переход электронов, а за тем наступает пробой перехода.

$$I_{обр \text{ ДШ}} \gg I_{обр \text{ Si p-n}}$$

Диоды Шотки применяются на частотах ( $f_{гр}$ ) в сотни ГГц. Типичное время переключения – около десятка пикосекунд.



## СВЧ диоды с отрицательным динамическим сопротивлением.

Если на вольтамперной характеристике электронного прибора есть падающий участок (при увеличении напряжения на приборе – ток через прибор уменьшается), т.е. на ВАХ есть участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением  $-r_{\text{дифф}}$ , то возникает возможность компенсации потерь в цепи нагрузки (т.е. в сопротивлении нагрузки  $R_n$ ).

При этом если:  $|-r_{\text{дифф}}| = R_n$  - происходит генерация сигнала;  
 $|-r_{\text{дифф}}| > R_n$  - происходит усиление сигнала.

### Классификация.

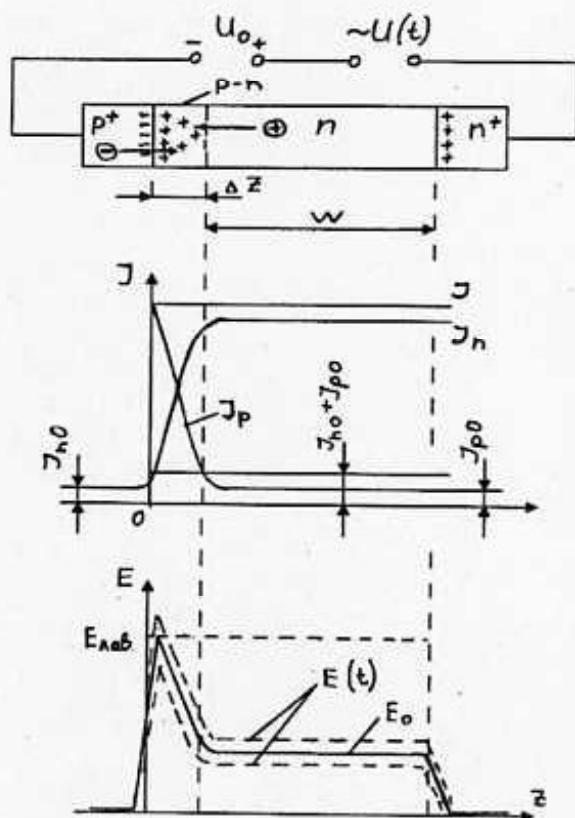
Электронные приборы с отрицательным дифференциальным сопротивлением ( $-r_{\text{дифф}}$ )			
ЭП со статическим ( $-r_{\text{дифф}}$ )		ЭП с динамическим ( $-r_{\text{дифф}}$ )	
ЭП с N - образной ВАХ	ЭП с S - образной ВАХ	ЭП с объёмной неустойчивостью	ЭП на эффекте лавинного пробоя
туннельный диод	тиристор	диод Ганна (ДГ) ВАХ N - типа	лавинно-пролётный диод (ЛПД), ВАХ S - типа

### ЛПД

Лавинно-пролётный диод – это диод, в котором для усиления или генерации сигнала используется эффект лавинного умножения носителей при пролёте в обратносмещённом  $p$ - $n$  переходе и взаимодействия этих носителей с СВЧ полем в течении времени пролёта.

В лавинно-пролётных диодах отрицательное дифференциальное сопротивление ( $-r_{\text{дифф}}$ ) получается только при условии наличия СВЧ сигнала и СВЧ резонатора.

Простейшая структура ЛПД:  $p^+-n-n^+$



При изготовлении диода главной задачей является получение резкого  $p$ - $n$  перехода с большой напряженностью собственного поля.

Область  $\Delta Z$  – это область  $p$ - $n$  перехода называется слоем умножения носителей, (в нём происходит лавинообразное образование новых носителей.)

Область  $W$  – это слой дрейфа лавины носителей под действием поля  $E_0$ .

К структуре ЛПД приложено постоянное напряжение обратного смещения  $U_0$  (величина  $U_0$  достигает десятков вольт), вызывающее начальные токи неосновных носителей  $I_{n0}$  и  $I_{p0}$ . Эти токи обусловлены экстракцией носителей под действием высокой напряжённости поля в области перехода. Одновременно к диоду приложено переменное напряжение  $U(t)$  СВЧ колебаний. Источником их служит внешняя цепь или объёмный резонатор, в который вставляется ЛП диод. Таким образом, в диоде существуют два поля: постоянное  $E_0$  и переменное  $E(t)$ .

Как правило,  $U(t) \ll U_0$ , где  $t$  – время.

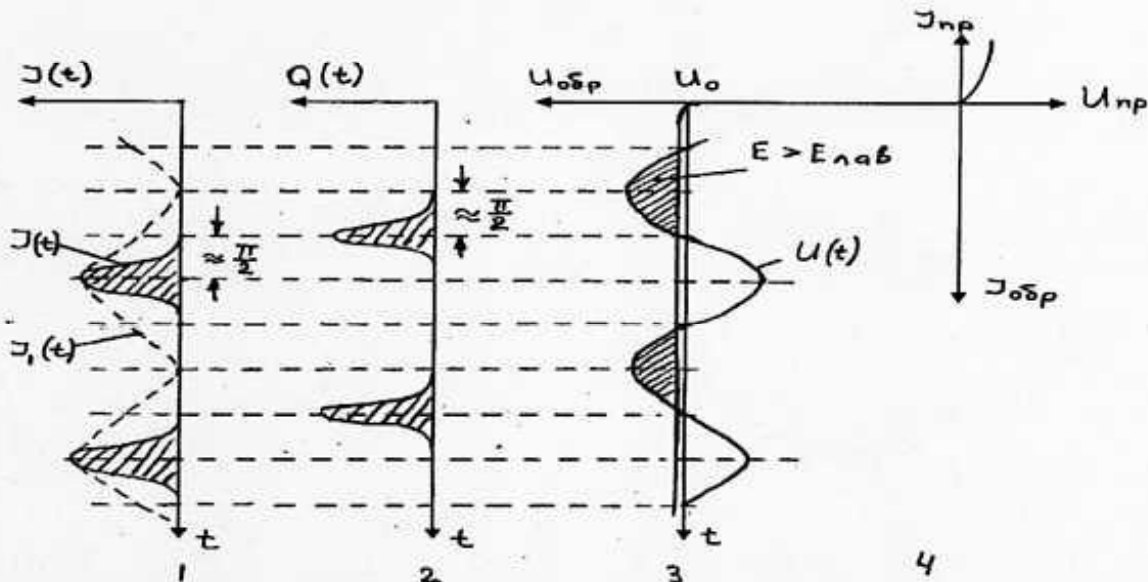
На переходе (участок  $\Delta Z$ ) величина поля максимальна и при положительных полупериодах

переменного СВЧ напряжения  $U(t)$  напряженность этого поля превышает  $E_{кр}$  (критическое) что вызывает лавинный пробой перехода.

Электроны, экстрагированные из области  $p^+$ , создают ток  $I_{n0}$ , а дырки, экстрагированные из нейтрального участка области  $n$ , образуют ток  $I_{p0}$ . Эти (неосновные) носители в результате

ударной ионизации вызывают процесс лавинного размножения новых пар носителей. Возникшие новые дырки (пакет дырок) дрейфуют налево, их число увеличивается у границы с  $p^+$ -областью, а пакет электронов дрейфует направо, в сторону нарастания положительного потенциала увеличиваясь в количестве к правой границе  $p^+-n$  перехода. Процесс развития лавины, хотя и является инерционным, заканчивается очень быстро, состояние пробоя исчезает, рождение новых носителей прекращается, пакет дырок уходит в область  $p$ , а пакет электронов в область  $n$ , где начинается слой дрейфа, в котором напряжённость поля меньше  $E_{кр}$ , но достаточно велика, чтобы проявился эффект насыщения величин скоростей носителей.

В слое дрейфа пакет электронов под воздействием поля ( $E_0 + E(t)$ ) движется с постоянной скоростью насыщения  $V_{нас}$ . По мере расхождения пакетов электронов и дырок разность потенциалов на участке растёт, и к следующему положительному полупериоду СВЧ колебаний снова возникают условия для лавинного пробоя. Процессы в ЛП диоде:



1-й график – величина тока через ЛПД; 2-й график – величина заряда  $Q(t)$  электронов в  $p^+-n$  переходе; график 3;4 – изменение обратного  $I(t)_{обр}$  (3) и прямого  $I(t)_{пр}$  (4) токов через переход от времени  $t$ .

В период положительной полувольты СВЧ сигнала  $U(t)$  суммарная напряженность поля  $E = (E_0 + E(t)) > E_{кр}$  или  $E_{лав}$ , при этом в области  $\Delta Z$  идёт процесс ударной ионизации, образуются короткие пакеты носителей. Задержка между  $U(t)_{макс}$  и  $Q(t)_{макс}$  на величину примерно равную полупериоду  $\pi/2$  СВЧ колебаний связана с инерционностью процесса образования лавины.

Пакеты носителей проходят слой дрейфа за время  $t_{пол} = W/V_{нос}$  ( $W$  – длина слоя дрейфа,  $V_{нос}$  – скорость носителей), что приводит к задержке импульса тока примерно на полупериод  $\pi/2$  от момента образования лавины до момента появления  $I(t)$  во внешней цепи. Суммарная задержка между  $I(t)_{макс}$  и  $U(t)_{макс}$  составляет примерно  $\pi/2$ , т.е. пакеты носителей летят в тормозящем электрическом поле и тем самым отдают свою энергию этому СВЧ полю.

Резонансная цепь (СВЧ резонатор) выделяет из импульсного сигнала  $I(t)$  первую (самую мощную) гармонику тока  $I_1(t)$ . Ток  $I_1(t)$  и напряжение  $U(t)$  находятся в противофазе, что эквивалентно наличию динамического дифференциального отрицательного сопротивления  $-r_{диф}$ .

Режимы работы ЛП диода: 1- пролётный режим (нормальный). Этот режим рассмотрен выше. Условие его наличия:  $U(t) \ll U_0$ . Параметры:  $U_0 = 30 \div 120$  В;  $F_{рез} = 0,5 \div 400$  ГГц; мощность в непрерывном режиме – до 100 Вт; мощность в импульсном режиме – до 1,5 кВт; КПД до 25%; возможны режимы усиления и генерации сигналов; недостаток – высокий уровень собственных шумов. 2 – режим с захваченной плазмой (режим аномальный). Условие возникновения этого режима: величина  $U(t)$  соизмерима с величиной  $U_0$ . Особенности режима: лавина развивается очень быстро; лавина развивается в слое дрейфа  $W$ ; Электроны больше энергии отдают СВЧ полю, но замедляются. Параметры режима: рабочая частота на порядок меньше; КПД достигает 40%.

## Диод Ганна

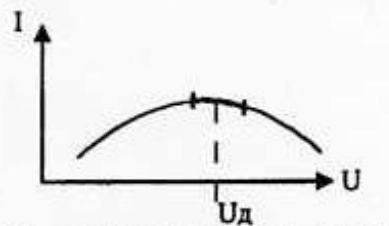
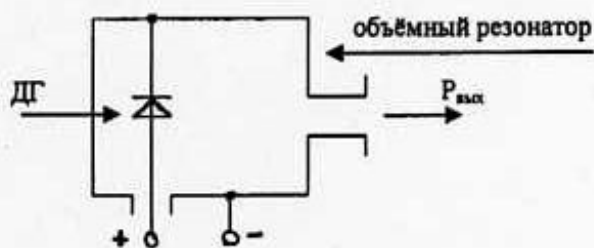
При исследовании высокочастотных шумов в образце арсенида галлия Дж. Ганн обнаружил самопроизвольные колебания тока с периодом равном времени пролёта электрона через образец. Частота этих колебаний соответствовала сантиметровому диапазону волн.

Возникновение колебаний было обусловлено объёмной неустойчивостью зарядов, что приводило к появлению отрицательного дифференциального сопротивления или, иначе, отрицательной проводимости. Это явление получило название - **эффект Ганна**.

Отсюда и определение диода Ганна – это диод в котором генерация СВЧ сигнала обеспечивается объёмной неустойчивостью заряда в полупроводнике из-за отрицательной дифференциальной подвижности носителей. ДГ применяются как маломощные генераторы и усилители СВЧ сигналов. Рабочий частотный диапазон диода – от 2 до 300 ГГц.

Эффект Ганна наблюдается и в кремнии, но только при очень низких температурах.

Схема включения ДГ в объёмный резонатор:



N - образная ВАХ диода Ганна