

# **Физические основы работы базовых элементов ЭВМ**

**Интегральная микросхема (ИМС)** – это конструктивно законченное микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования информации, содержащее совокупность электрически связанных между собой элементов (транзисторов, диодов, резисторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле.

Условия для п/п материалов:

1. Ширина запрещенной зоны
2. Подвижность носителей зарядов
3. Время жизни носителей
4. Проводимость

# ***P–n переход как элемент ИМС***

3

## ***Технология изготовления переходов***

Сплавная

- непосредственно на поверхности германиевой пластины расплавляется таблетка индия в инертной газовой среде

Планарная

- получение р-п перехода с помощью локальной диффузии примеси. Границы переходов разделены окисной пленкой

Литография

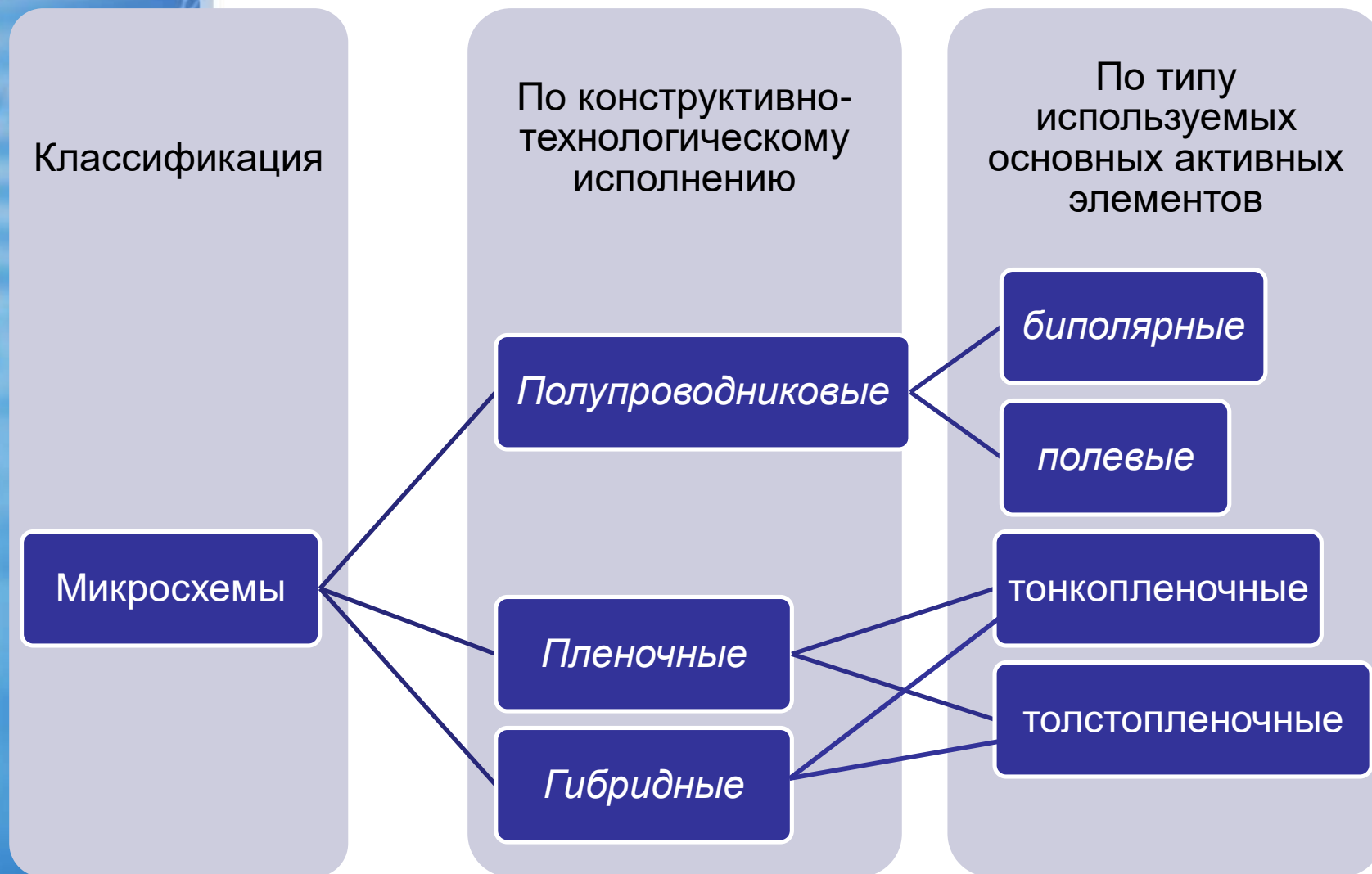
- способ формирования рельефа (рисунка) в слое металла, диэлектрика или полупроводника

Эпитаксия

- процесс ориентированного выращивания монокристаллических слоёв с контролируемой степенью легирования и кристаллической структурой, полностью повторяющей ориентацию подложки

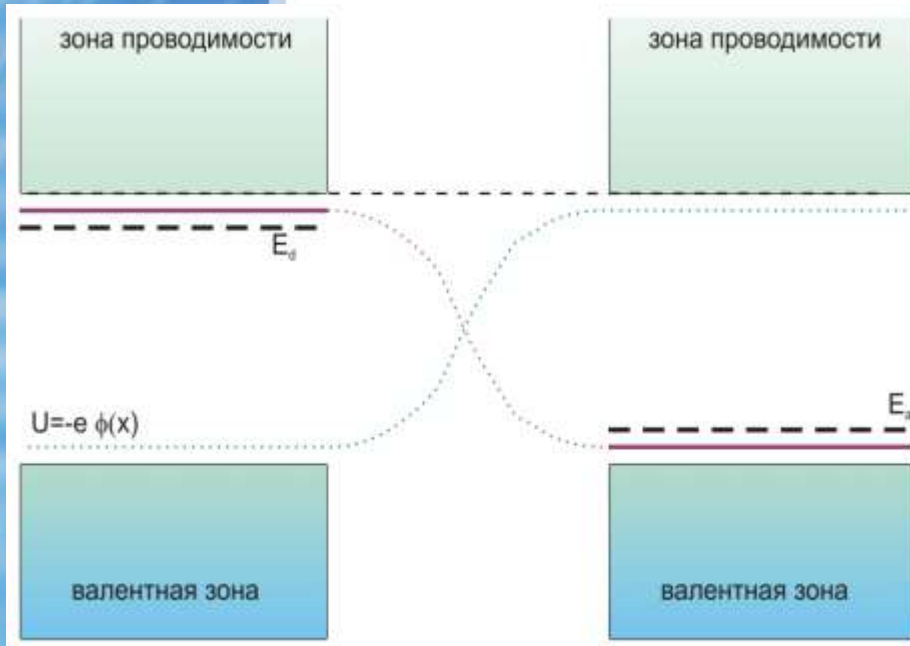
# ***P–n переход как элемент ИМС***

4



# ***P-n переход как элемент ИМС***

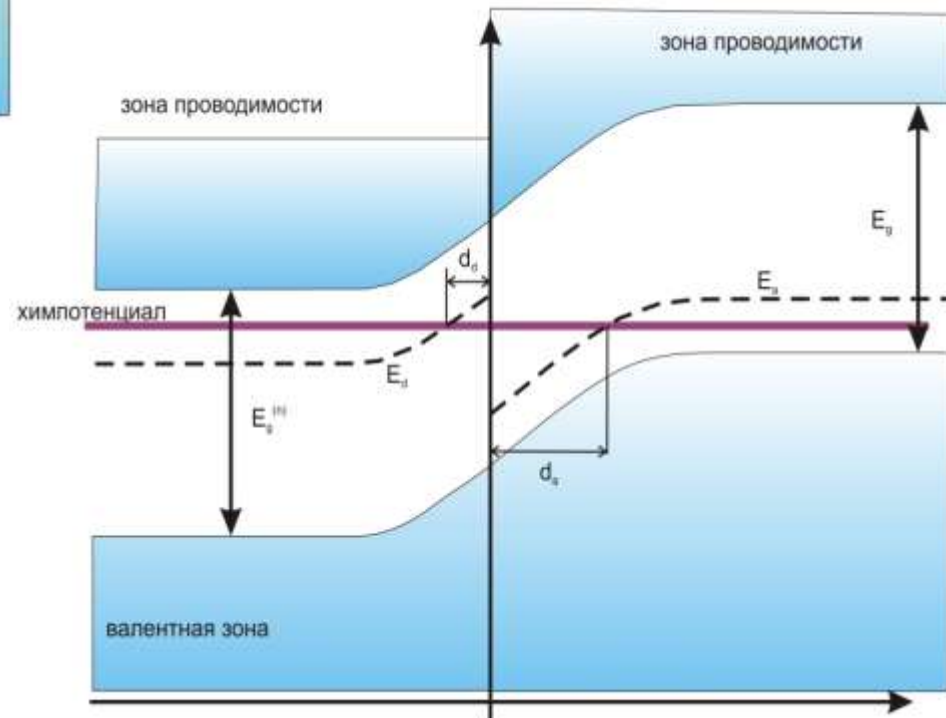
5



При соединении полупроводников электрохимический потенциал *должен быть постоянен.*

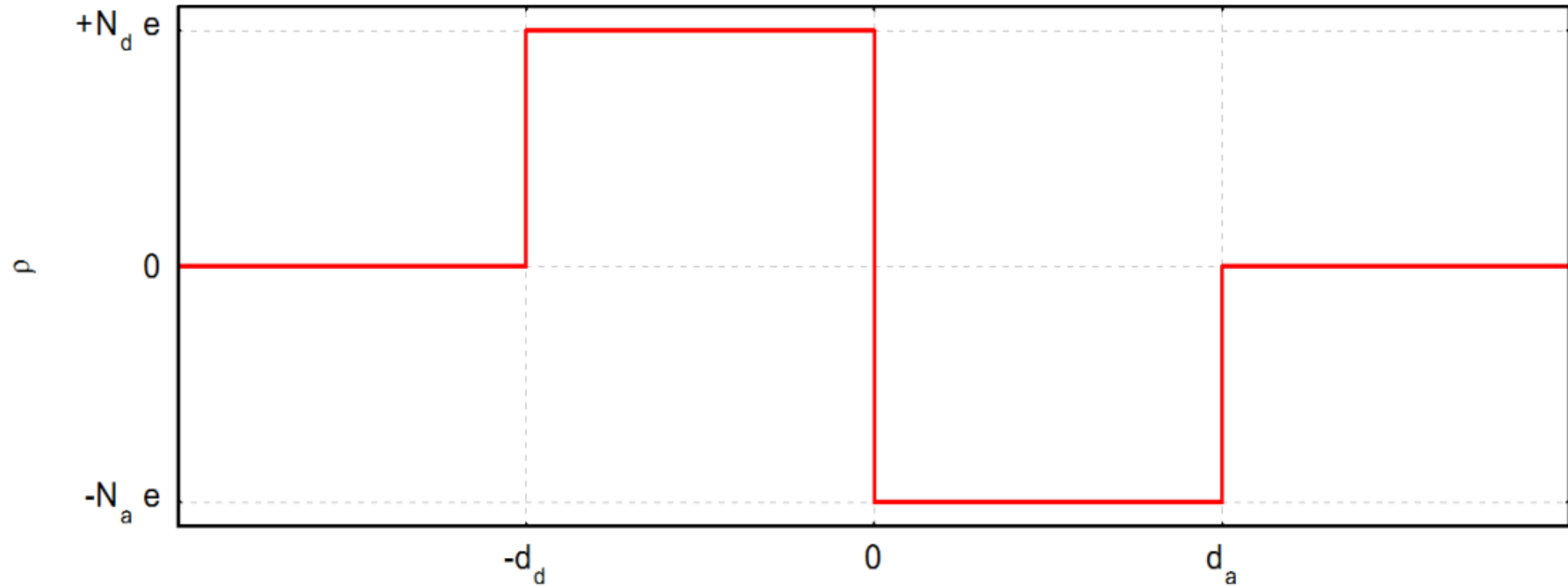
«Изгиб зон» возникает на масштабах длины, много больших межатомного расстояния

На большом удалении от перехода концентрация зарядов равновесная и электростатический потенциал перераспределённых зарядов не зависит от координаты: в n-области уровень химического потенциала находится вблизи дна зоны проводимости, в р-области – вблизи потолка валентной зоны.



# ***P–n переход как элемент ИМС***

6



Распределение плотности зарядов ионизованных примесей на p-n переходе при  $T=0$ .

При  $T=0$  все электронные состояния *ниже уровня химического потенциала заняты*, а все электронные состояния *выше уровня химического потенциала свободны*.

# ***P–n переход как элемент ИМС***

7

Потенциал границы раздела:  $\varphi(0) = -\frac{N_a}{N_a + N_d} \Delta\varphi$

Ёмкость на единицу площади перехода:

$$C = \frac{N_a d_a}{\Delta\varphi} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot N_a N_d}{2\pi e \Delta\varphi (N_a + N_d)}}$$

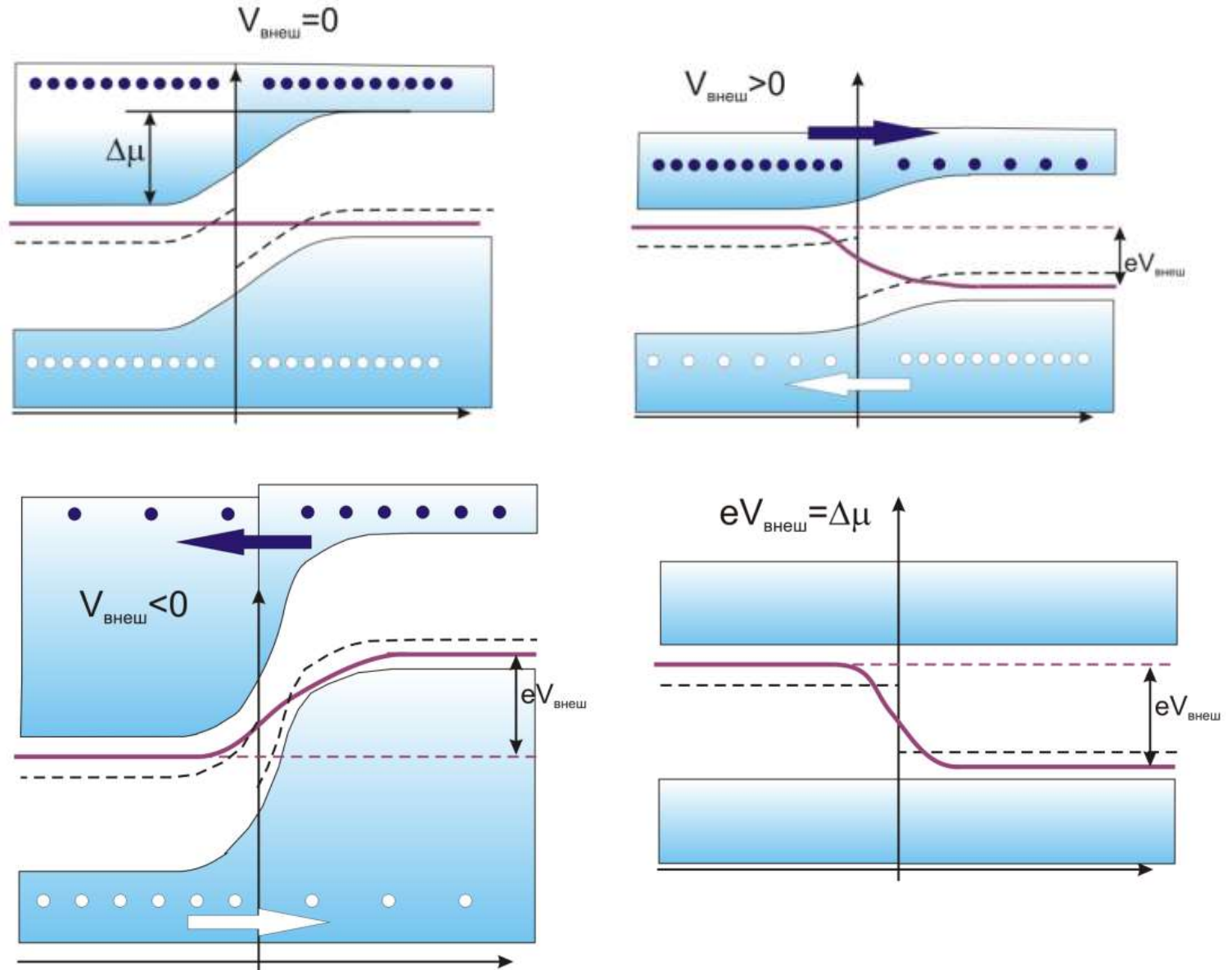
где  $N_a$ ,  $N_d$  – концентрация акцепторной и донорной примеси;  
 $d_a$  – глубина акцепторного уровня;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость

При разном уровне допирования слой ионизированных примесей шире в области с меньшей концентрацией примеси и большая часть контактной разности потенциалов «набегает» в области с меньшей концентрацией примеси. Ширина запирающего слоя обратно пропорциональна квадратному корню из концентрации примеси.



# ***P-n переход как элемент ИМС***

8





# ***P–n переход как элемент ИМС***

9

$I_{обр}$  представляет собой **ток дрейфа**, вызванный перемещением **неосновных носителей**. Величина  $I_{обр}$  мала (сопротивление перехода весьма велико), т.к. количество неосновных носителей мало.

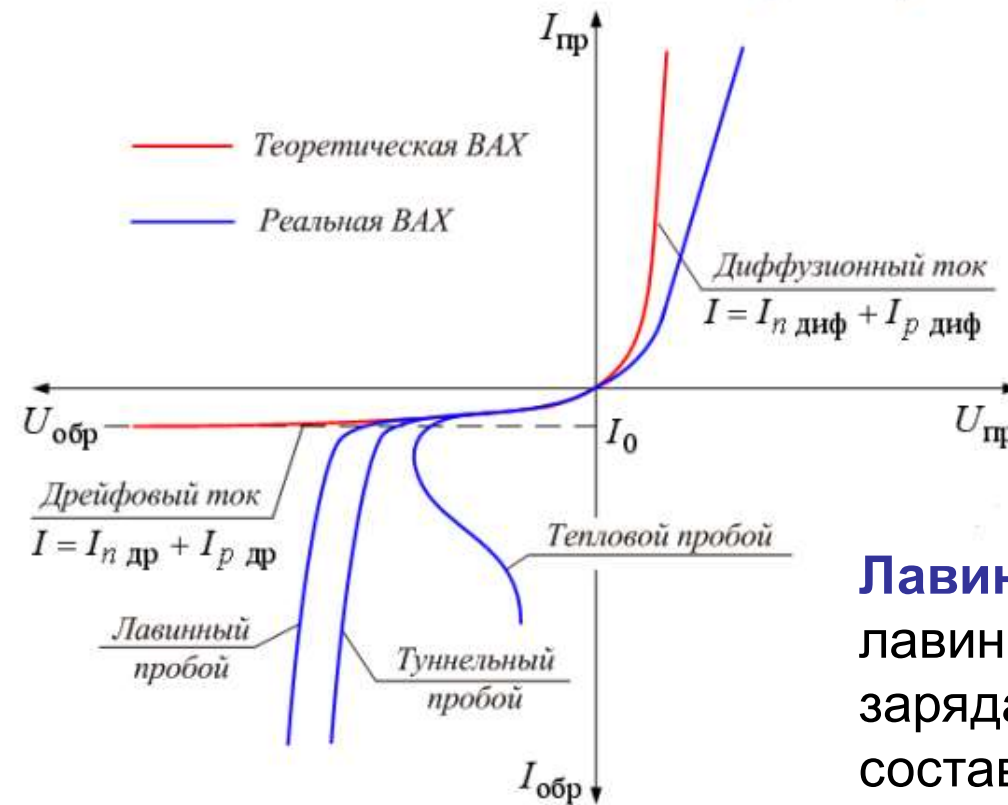
При повышении  $U_{обр}$  поле в месте перехода становится сильнее и больше основных носителей выталкивается из пограничных слоев вглубь p- и n-областей. Поэтому увеличивается не только высота потенциального барьера, но и ширина самого перехода.

Обратносмещенный p-n-переход подобен заряженному конденсатору с диэлектриком, в котором имеется значительный ток утечки ( $I_{обр}$ ). Диэлектрик – граница перехода. Ток утечки конденсатора в соответствии с законом Ома пропорционален приложенному напряжению, а  $I_{обр}$  сравнительно слабо зависит от напряжения.

**Вывод: p-n-переход обладает ярко выраженными вентильными свойствами: хорошо пропускает ток в прямом направлении и не пропускает ток в обратном, т.е. обладает односторонней проводимостью.**

# Пробой Р–п перехода

10



При некотором значении обратного напряжения ( $U_{\text{проб}}$ ) наступает пробой р-п-перехода, при котором обратный ток резко возрастает и сопротивление запирающего слоя уменьшается.

**Лавинный пробой** обусловлен лавинным размножением носителей заряда. Напряжение лавинного пробоя составляет десятки ÷ сотни вольт

**Туннельный пробой** объясняется явлением туннельного эффекта, который заключается в переходе электронов через потенциальный барьер с уровнем энергии меньше высоты потенциального барьера, при этом электроны своей энергии не теряют. Напряжение туннельного пробоя — не более единиц вольт.

# Пробой P–n перехода

11

Механизм теплового (необратимого) пробоя:

$$t_{pn}^{\circ} \uparrow \Rightarrow R_{pn} \downarrow \Rightarrow I_{обр} \uparrow \Leftrightarrow P_{подв} = I_{обр} \cdot U_{обр} \Leftrightarrow \text{перегрев}$$

$$I_{диода} = I_0 \left( e^{\frac{U_d}{m\varphi_T}} - 1 \right), \quad \varphi_T = \frac{kT}{e} = 8,62 \cdot 10^{-5} \cdot T$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от материала полупроводника:

$m = 1$  для Ge,  $m = 2$  для Si;  $I_0$  – тепловой ток (ток насыщения);

$U_d$  – напряжение на диоде с соответствующим знаком;

$\varphi_T$  – температурный потенциал при комнатной температуре:

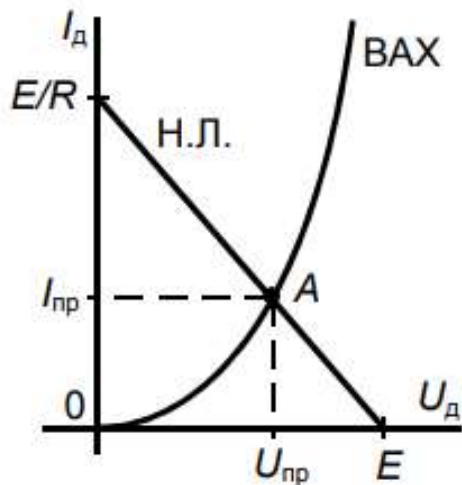
$t = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_T \approx 25\text{мВ}$ ;  $t = 27^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_T \approx 26\text{мВ}$ ;

Прямое статическое сопротивление p-n-перехода (сопротивление постоянному току):

$$R_{np} = \frac{U_{np}}{I_{np}}$$

Дифференциальное (динамическое) сопротивление p-n-перехода (сопротивление переменному току)

$$r_{np} = \frac{\Delta U_{np}}{\Delta I_{np}}$$



## Определение $I_{пр}$ и $U_{пр}$ с помощью ВАХ.

Составляется уравнение по 2-му закону Кирхгофа:

$$E = I_{\partial} R + U_{\partial}$$

Нагрузочная прямая (линия) строится по двум точкам:  $U_{\partial} = 0$ ;  $I_{\partial} = E/R$ ;  $I_{\partial} = 0$ ;  $U_{\partial} = E$ .

Точка пересечения ВАХ и нагрузочной прямой соответствует точке A с координатами  $(U_{пр}, I_{пр})$ .

В общем случае, чтобы обеспечить смещение p-n-перехода в прямом направлении внешнее напряжение должно превышать прямое, т.е.  $E > U_{пр}$ , в противном случае p-n-переход (диод) не откроется.

**Температурный коэффициент напряжения** – показывает изменение прямого напряжения при заданном изменении температуры при протекании постоянного тока через p-n-переход

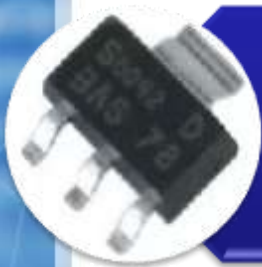
$$TKH = \left. \frac{\Delta U_{np}}{\Delta T} \right|_{I_{np} = const}$$

# Виды полупроводниковых диодов

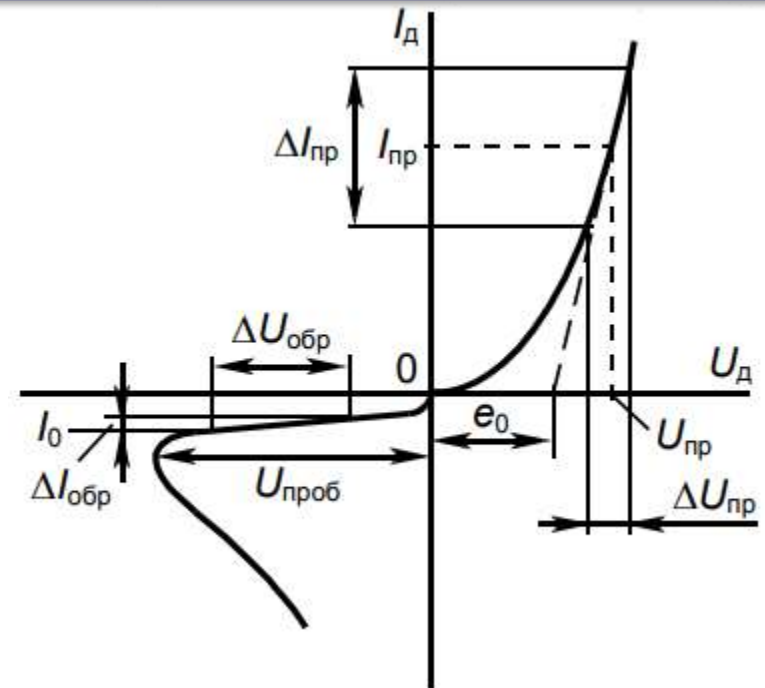
13



**Выпрямительные диоды** предназначены для выпрямления переменного тока



**Импульсные диоды** предназначены для работы в высокочастотных и импульсных схемах



# Виды полупроводниковых диодов

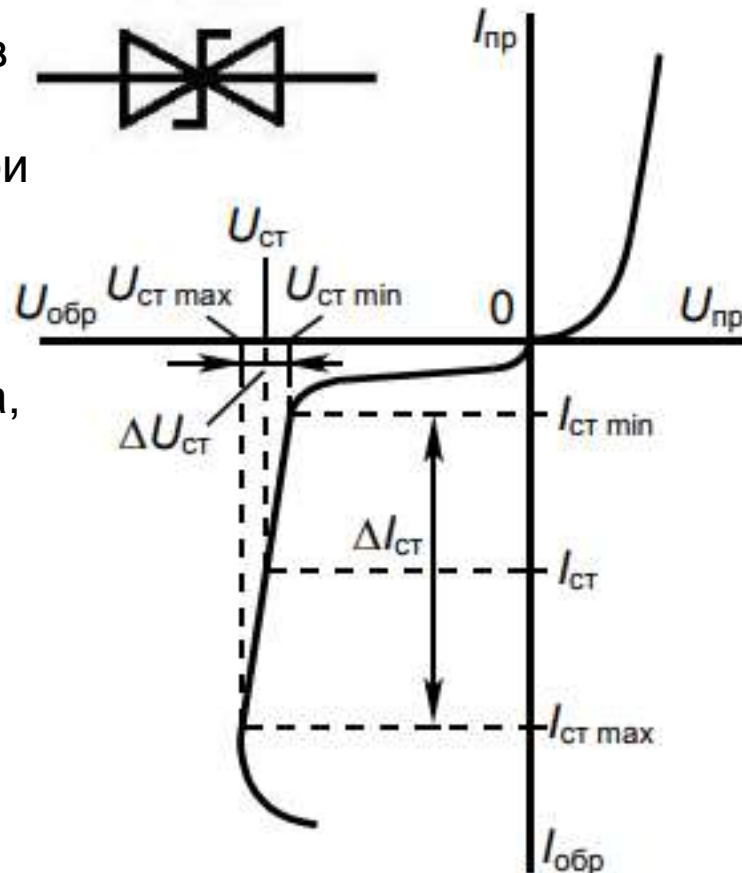
14



**Стабилитроны** (опорные диоды) предназначены для стабилизации напряжения, используются в источниках электропитания

Основные параметры стабилитронов

1.  $U_{ст}$  – напряжение стабилизации, возникающее на стабилитроне при протекании через него заданного тока стабилизации  $I_{ст}$ ;
2.  $I_{ст\ min}$ ,  $I_{ст\ max}$  – минимальный и максимальный токи стабилитрона, соответственно;
3.  $r_{диф}$  – дифференциальное сопротивление в режиме стабилизации ;
4. Температурный коэффициент напряжения (ТКН) стабилизации.





# Виды полупроводниковых диодов

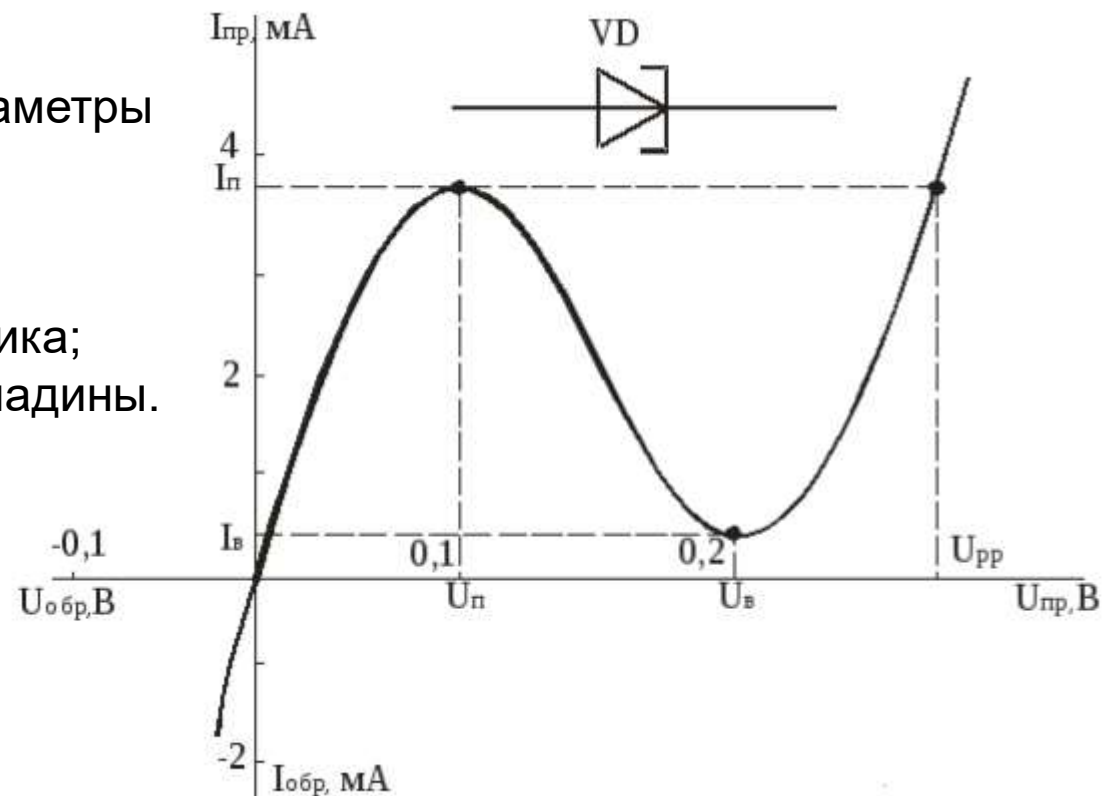
15



**Туннельные диоды** обладают малой емкостью перехода применяются на частотах более 1 ГГц и до  $30 \div 100$  ГГц

Характерные параметры  
ВАХ:

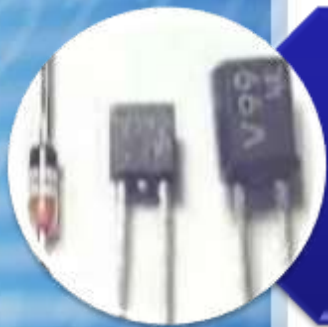
$I_p$  – пиковый ток;  
 $I_v$  – ток впадины;  
 $U_p$  – напряжение пика;  
 $U_v$  – напряжение впадины.





# Виды полупроводниковых диодов

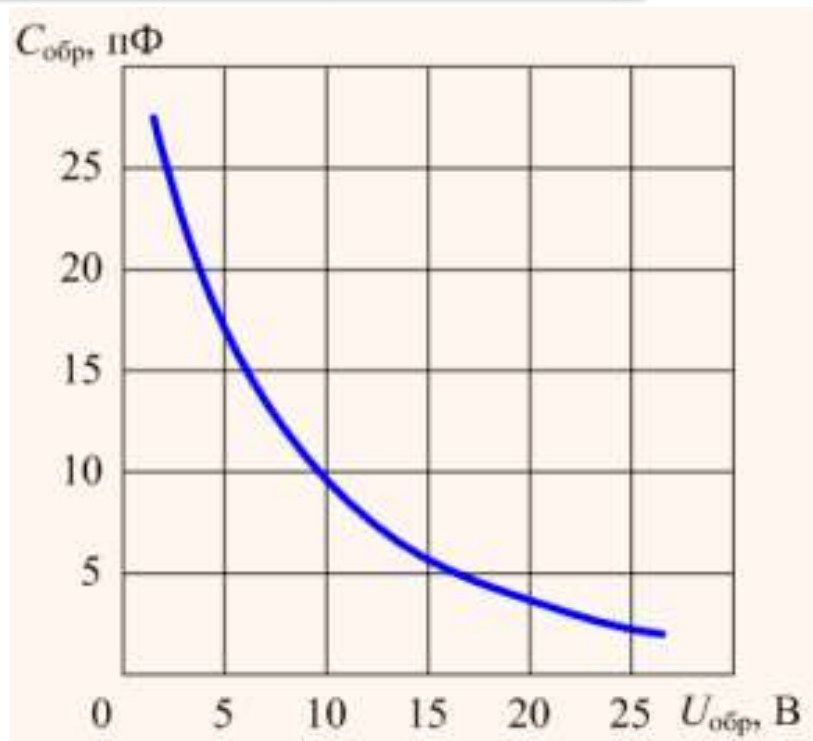
16



**Варикапы** предназначены для работы в качестве конденсатора с управляемой емкостью


Основные параметры варикапа

1.  $C_{ном}$  – номинальная емкость варикапа (при  $U_{обр} = const$ ).
2.  $K_c = C_{в max} / C_{в min}$  – коэффициент перекрытия по емкости при двух заданных  $U_{обр}$

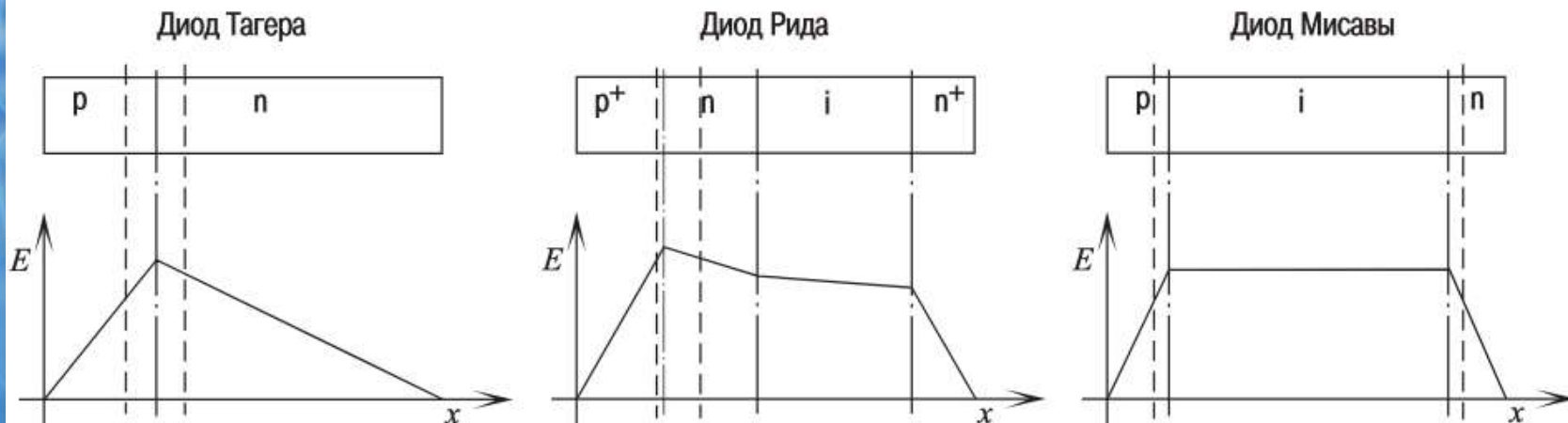


# Виды полупроводниковых диодов

17



**Лавинно-пролетный диод** предназначен для генерации СВЧ колебаний на основе эффекта динамического отрицательного диф. сопротивления, возникающего в результате уд. ионизации атомов п/п при лавинном пробое



В лавинно-пролетных диодах с несимметричным p-n-переходом чаще всего бывает одно пространство дрейфа - для электронов. Этим пространством является либо часть легированного полупроводника n-типа, либо собственный полупроводник перед омическим контактом - анодом, которые не охвачены лавинным пробоем. Генерируемые в слое умножения дырки почти сразу же захватываются p-областью и в энергообмене участия не принимают. Поэтому частотный диапазон таких ЛПД достаточно узок и определяется областью пролетной частоты.

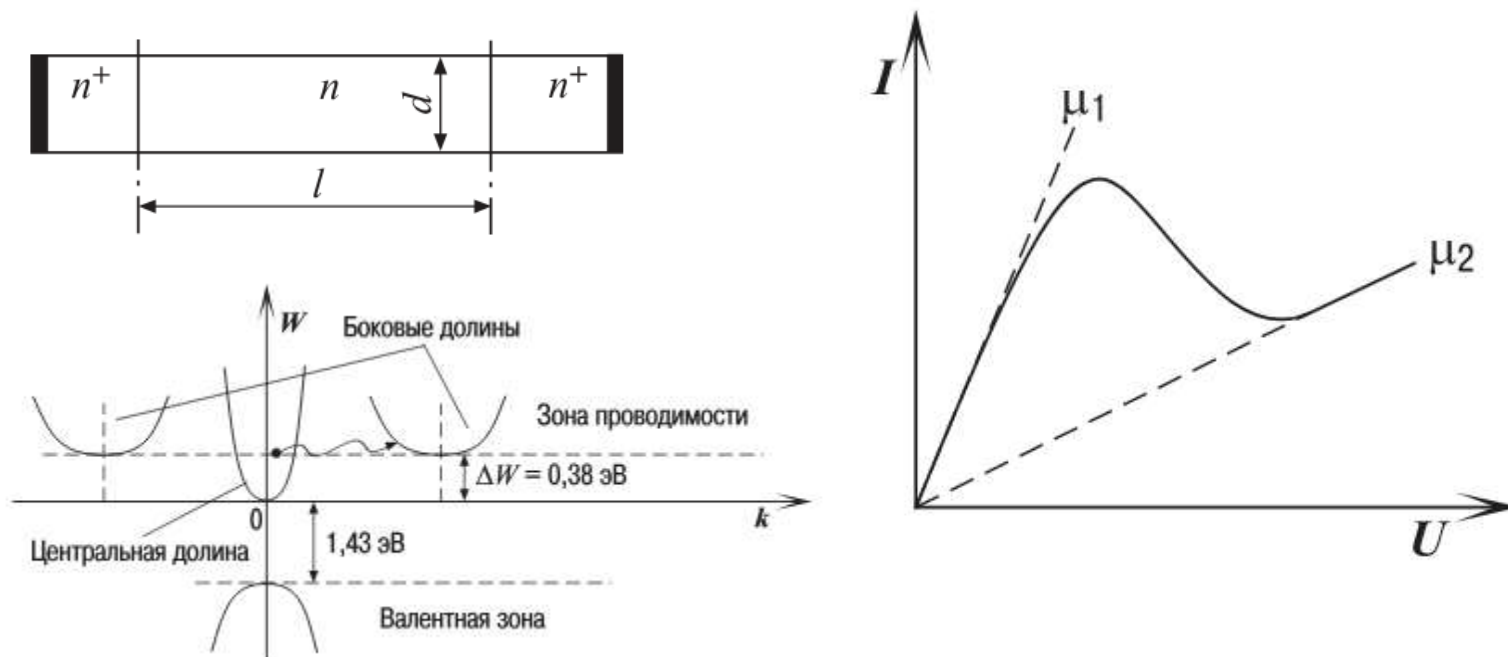
# Виды полупроводниковых диодов

18



**Диод Ганна**— это полупроводниковый прибор с двумя электродами, не содержащий р-п-переходов

Эффект Ганна заключается в том, что в объёме полупроводникового кристалла возникает ВЧ электрические колебания при приложении к электродам диода постоянного напряжения достаточно большой величины.



# Виды полупроводниковых диодов

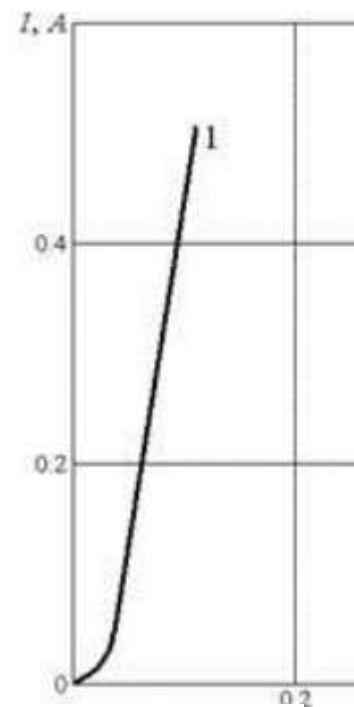
19



**Диод Шоттки** используются для выпрямления малых напряжений высокой частоты, в высокочастотных смесителях, в ключах и коммутаторах, умножителях частоты и для создания высокоскоростных логических элементов и в импульсных источниках питания

Диоды с барьером Шоттки построены на переходе металл-полупроводник. Они имеют малое падение напряжение, практическое отсутствие заряда восстановления и ток через переход обусловлен одним типом носителей, поэтому это быстродействующие приборы (до 20 ГГц). Их используют в качестве импульсных и высокочастотных диодов. Прямая ветвь ВАХ диодов Шоттки представляет собой идеальную экспоненту, поэтому их используют в качестве логарифмирующих диодов.

**Недостатки:** сравнительно небольшое обратное напряжение ( $U_{обр} < 250\text{В}$ ) и большие обратные токи.





**Фотодиоды** – фоточувствительный полупроводниковый прибор с одним электрическим переходом, обратный ток которого зависит от освещенности

Фотодиоды могут строиться как на базе обычных р-п-переходов, так и с переходами типа металл – полупроводник, а также с гетеропереходами.

При освещении электрического перехода в нем и в прилегающих к нему областях возникают электронно-дырочные пары. Неосновные носители, возникающие в прилегающих к переходу областях на расстоянии, не превышающем диффузионной длины, диффундируют к переходу и проходят через него под действием электрического поля. К аналогичному результату приводит поглощение квантов света непосредственно в электрическом переходе. Таким образом, при освещении фотодиода обратный ток через него возрастает на величину, называемую фототоком.



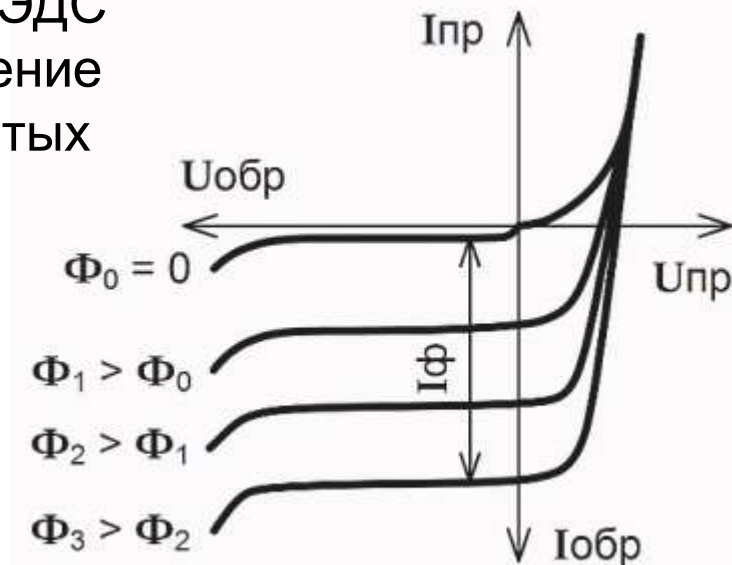
## Фотодиоды

Фотодиод создает собственную ЭДС под действием излучения. Значение ЭДС может достигать неск. десятых долей вольта.

Режимы работы фотодиода:

1. фотогальванический;
2. фотодиодный.

На основе фотодиодов строятся солнечные батареи.



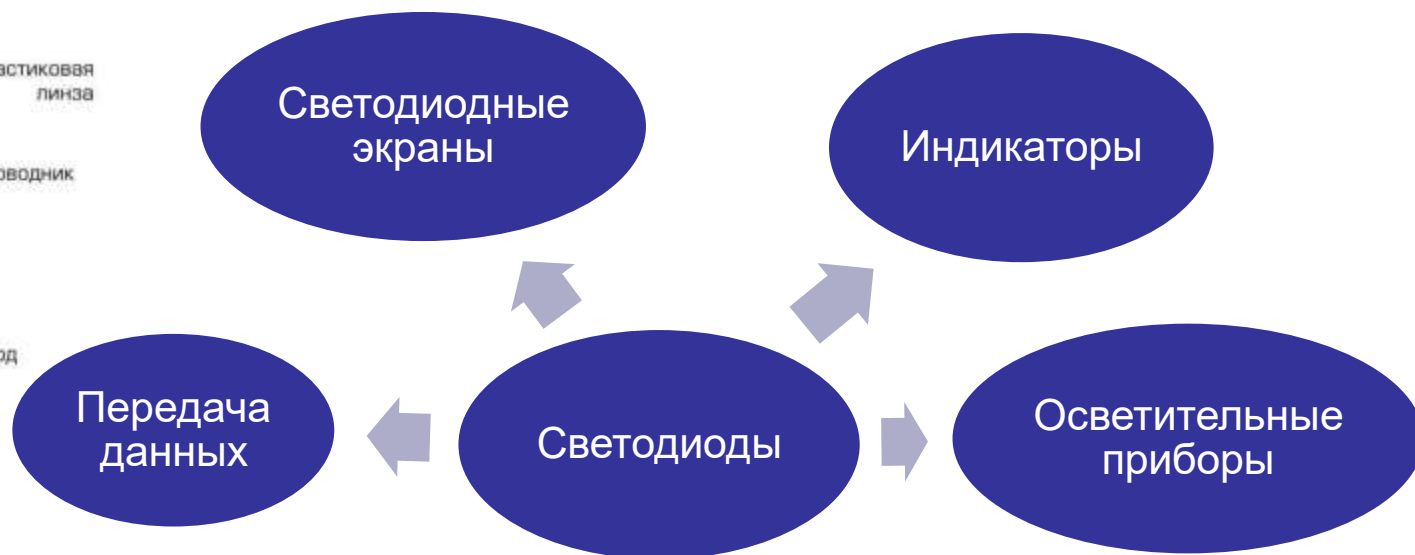
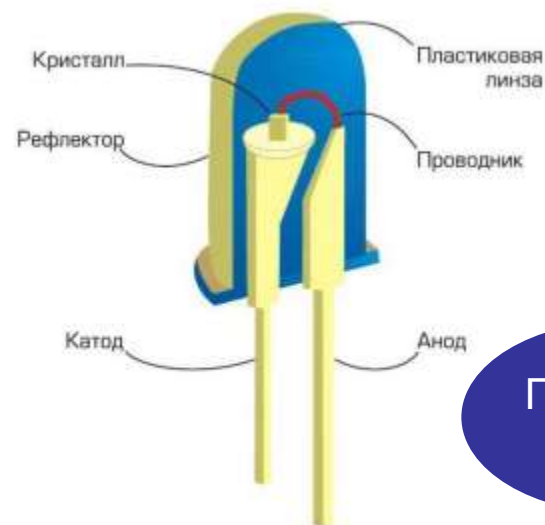


# Виды полупроводниковых диодов

22



**Светодиод** - полупроводниковый прибор, излучающий некогерентный свет при пропускании через него электрического тока



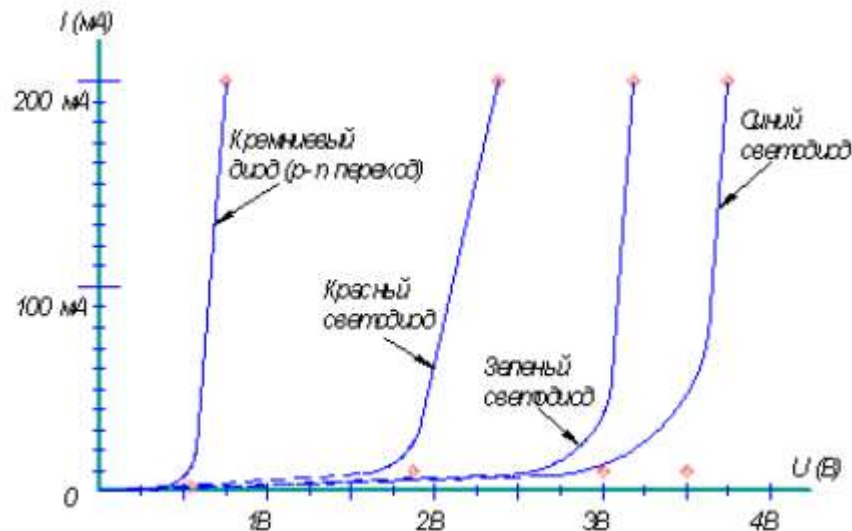
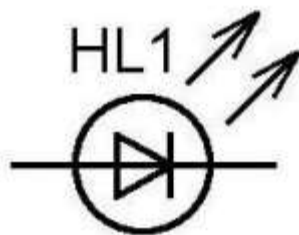
При протекании через р-п переход прямого электрического тока происходит рекомбинация носителей: электронов и дырок, сопровождающаяся излучением фотонов





## Светодиод

В современных светодиодах применяют GaAs, InP и другие полупроводники. Цвет свечения светодиода определяется химическим составом используемого полупроводника.

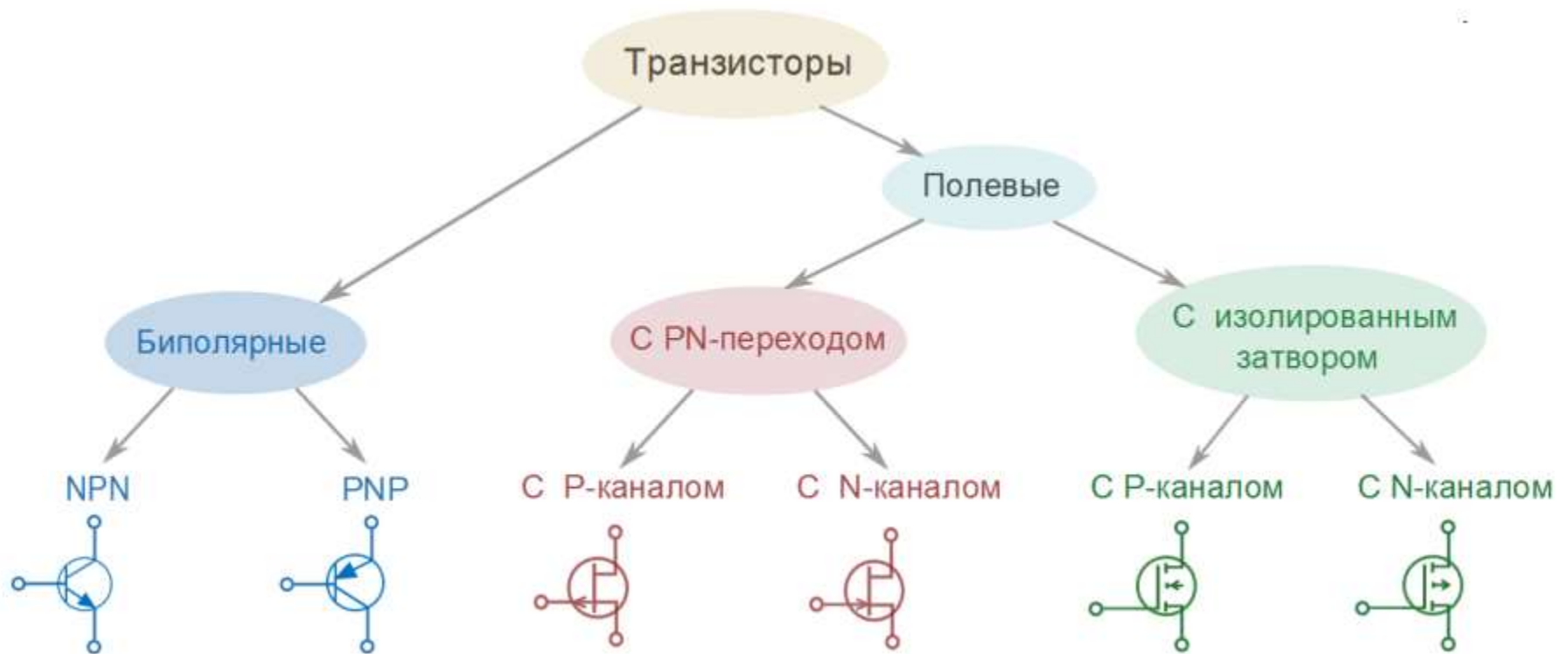


Яркость свечения светодиода зависит от величины пропускаемого прямого тока.

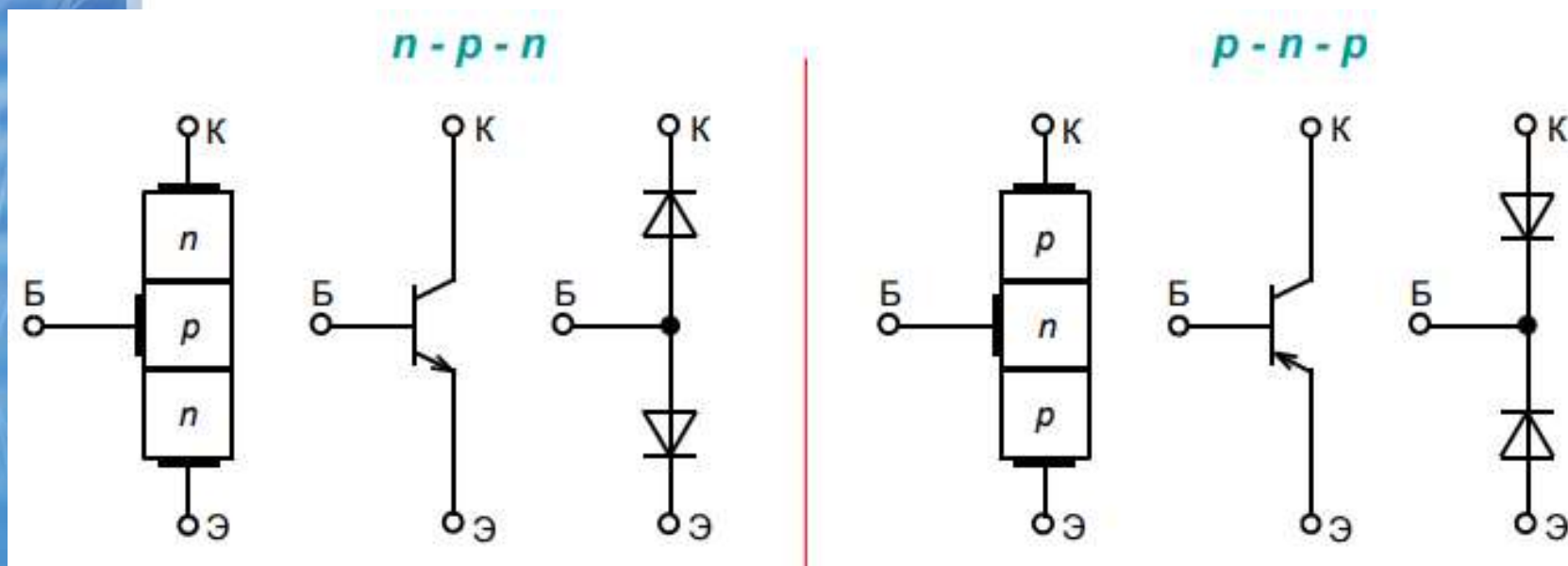
# Транзисторы

24

**Транзисторы** – полупроводниковые приборы, предназначенные для усиления, генерирования и преобразования электрических сигналов. Позволяют регулировать ток в электрической цепи.



**Биполярные транзисторы** – полупроводниковые приборы с двумя взаимодействующими р-п-переходами и тремя выводами



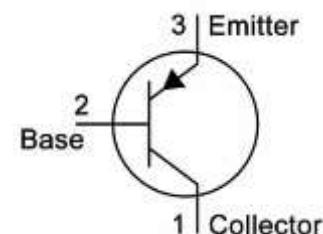
ЭП – эмиттерный переход (между Б и Э)

КП – коллекторный переход (между К и Б)

Б – база

К – коллектор

Э – эмиттер

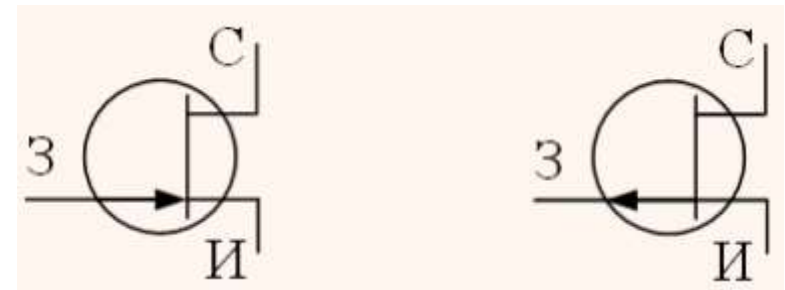


## Режимы работы биполярного транзистора

1. **активный** (усилительный) используется в усилителях и генераторах: КП смещен в обратном направлении; ЭП смещен в прямом направлении;
2. **режим отсечки** (транзистор заперт) используется в ключевых схемах (ключ разомкнут); КП, ЭП смещены в обратном направлении;
3. **режим насыщения** (транзистор открыт) используется в ключевых схемах (ключ замкнут); КП, ЭП смещены в прямом направлении;
4. **инверсный режим** (К и Э меняют местами) используется редко, т.к. все параметры падают: КП смещен в прямом направлении; ЭП смещен в обратном направлении.

**Полевые транзисторы** (FET) управляются электрическим полем (напряжением).

В основе управления током полевых транзисторов лежит изменение сопротивления канала, через который протекает этот ток под действием электрического поля.



n-канал

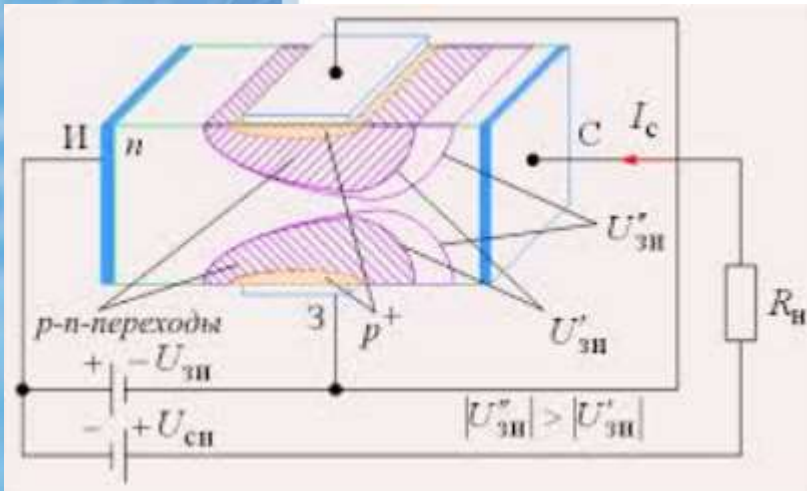
p-канал

И — исток — электрод, от которого движутся носители заряда.

С — сток — электрод, к которому движутся носители заряда.

З — затвор — электрод, управляющий сечением канала, а => сопротивлением канала

## Принцип действия транзистора с управляющим р-п-переходом



1. При  $U_{зи} = 0$  и  $U_{си} > 0$  входная цепь закорочена. Толщина р-п-переходов минимальна, через канал протекает максимальный ток стока  $I_c$ .
2. При возрастании напряжения  $U_{зи} < 0$  и  $U_{си} > 0$  толщина переходов увеличивается, сечение канала и его проводимость уменьшаются, ток  $I_c$  снижается.
3. При некотором значении  $U_{си}$  канал сужается настолько, что границы р-п-переходов смыкаются и сопротивление канала становится достаточно высоким.



***Спасибо за внимание!***

