



Омский государственный технический университет  
каф. Технология электронной аппаратуры

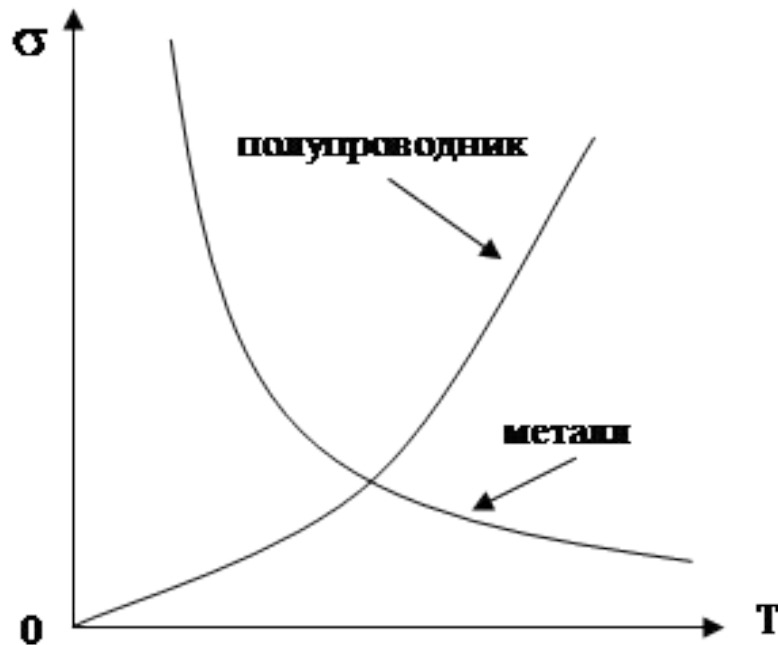
Дисциплина  
**Радиоматериалы и радиокомпоненты**

Лекция 6. Слайды  
**Полупроводниковые материалы**

Ст. преп. Пономарёв Д.Б.



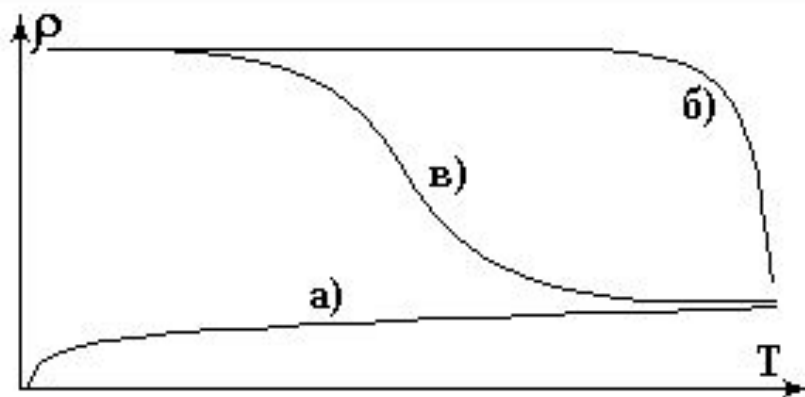
# Зависимость проводимости от температуры



$$E_k = (3/2)kT$$

$$E_k = 0,04 \text{ эВ}$$

при  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$



$$\rho = 1/\sigma$$

Рис.6. Зависимости удельных сопротивлений от температуры для:  
а) металлов, б) диэлектриков,  
в) полупроводников.



Полупроводники –  
неметаллические материалы, обладающие  
большой чувствительностью к содержанию  
примесей и к внешним энергетическим  
воздействиям



Основные характеристики, свойства



Электропроводность

Термоэлектрические  
свойства

Фотоэлектрические  
свойства

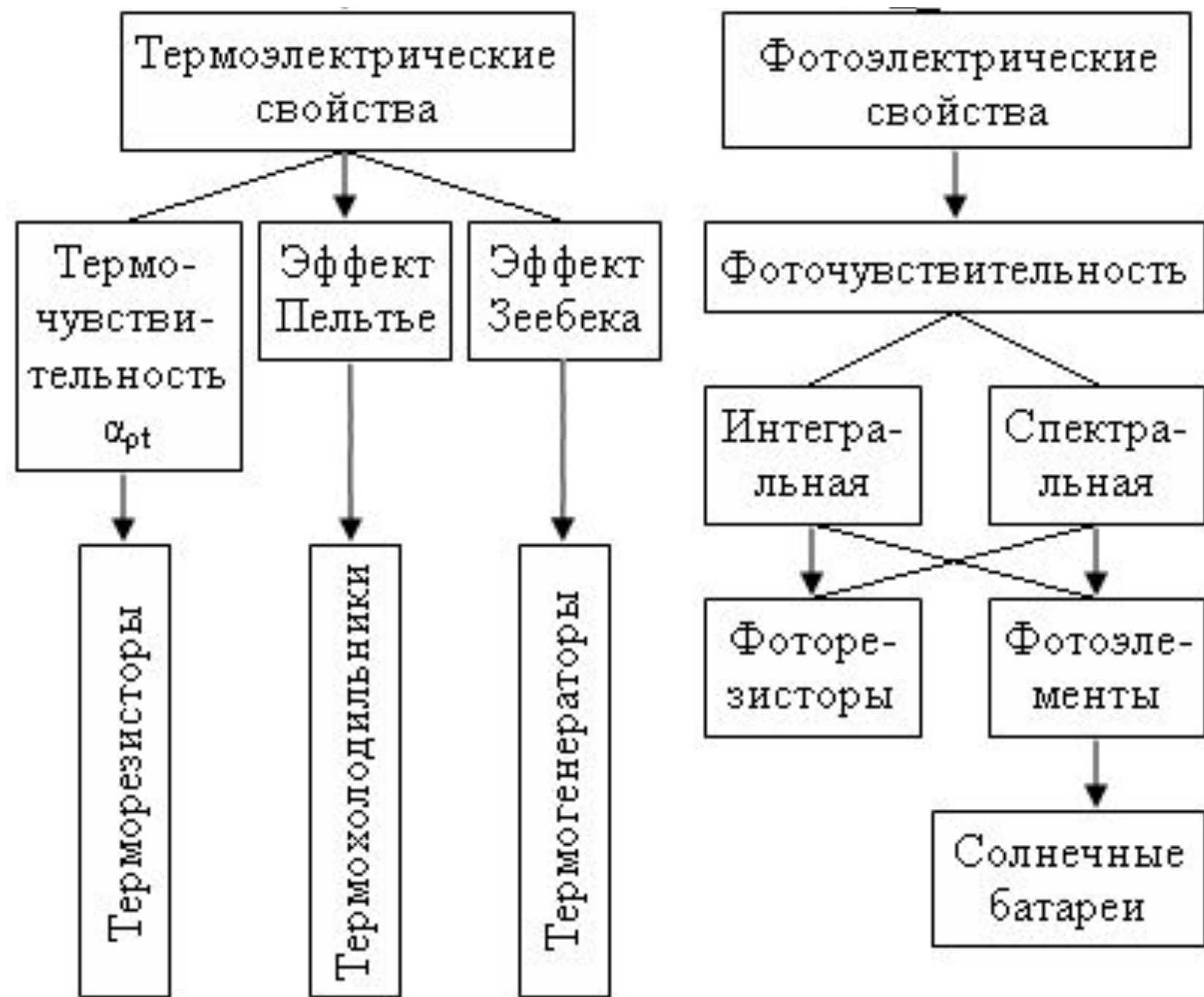
Электропроводность

Собственная  $\gamma_i$

Примесная,  
n-типа,  $\gamma_n$   
(содержит  
доноры)

Примесная,  
p-типа,  $\gamma_p$   
(содержит  
акцепторы)

Электронно-дырочный  
переход (p-n переход)



Полупроводники составляют обширную область материалов, отличающихся друг от друга большим многообразием электрических и физических свойств, а также большим многообразием химического состава, что и определяет различные назначения при их техническом использовании.

По химической природе современные **полупроводниковые материалы можно разделить на следующие четыре главные группы:**

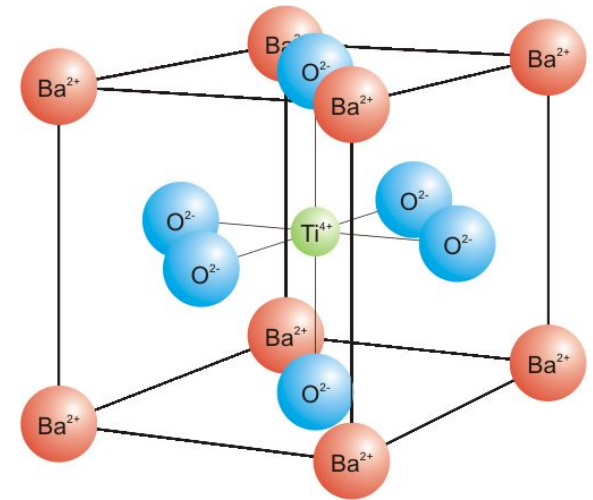
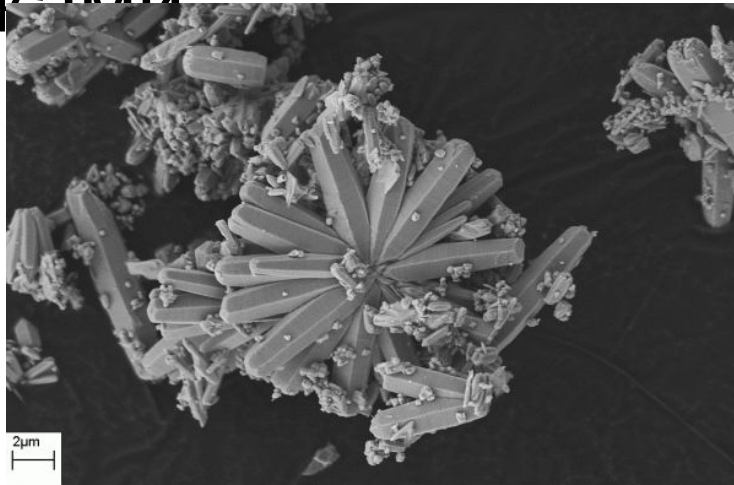


1. Кристаллические полупроводниковые материалы, построенные из атомов или молекул одного элемента. Такими материалами являются широко используемые в данное время германий, кремний, селен, бор, карбид кремния и др.





2. Окисные кристаллические полупроводниковые материалы, т. е. материалы из окислов металлов. Главные из них: закись меди, окись цинка, окись кадмия, двуокись титана, окись никеля и др. В эту же группу входят материалы, изготовляемые на основе титаната бария, стронция, цинка, и другие неорганические соединения с различными малыми добавками.





3. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений атомов третьей и пятой групп **АзБ<sub>5</sub>** системы элементов Менделеева. Примерами таких материалов являются антимониды индия, галлия и алюминия, т. е. соединения сурьмы с индием, галлием и алюминием. Они получили наименование интерметаллических





4. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений серы, селена и теллура с одной стороны и меди, кадмия и свинца с другой. Такие соединения называются соответственно: сульфидами, селенидами и теллуридами.





## **Органические полупроводники:**

а) ароматические углеводороды – антрацен, нафталин и др.

б) красители и пигменты – краска индиго, хлорофилл и др.

в) комплексы с переносом зарядов (донорно - акцепторные системы): бром-антрацен, иод-пирен.



# Классификация по различным признакам:

Простые - сложные

Твердые – жидкие

Неорганические - органические

Некристаллические (аморфные) –

Кристаллические (монокристаллические и поликристаллические)



Электропроводность

$$Y = Y_i + Y_{пр.}$$

Собственная  $\gamma_i$

$$Y_i = q \cdot n_i \cdot (u_n + u_p)$$

Примесная,  
n-типа,  $\gamma_n$   
(содержит  
доноры)

Примесная,  
p-типа,  $\gamma_p$   
(содержит  
акцепторы)

$$Y_n = q \cdot n \cdot u_n$$

$$Y_p = q \cdot p \cdot u_p$$

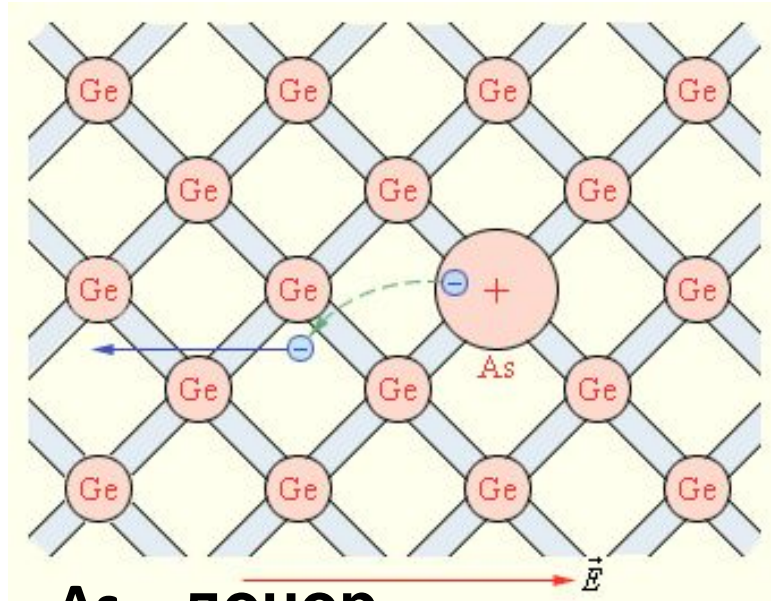
Электронно-дырочный  
переход (p-n переход)

Электропроводность

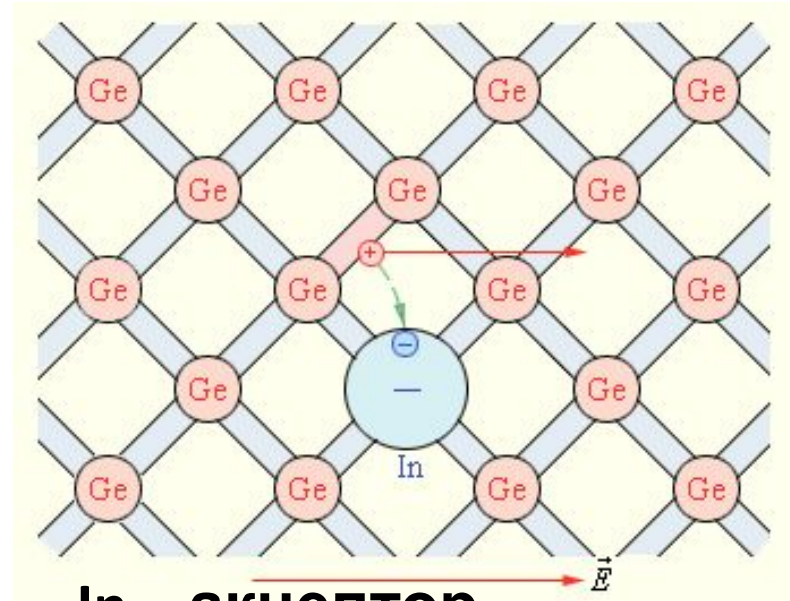




# Атом примеси в полупроводнике Ge

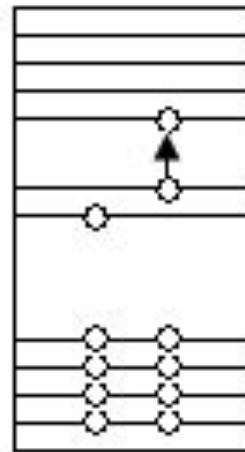
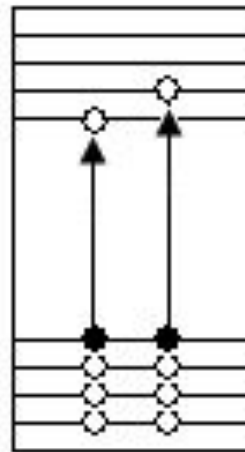


**As – донор**  
**Валентность 5**

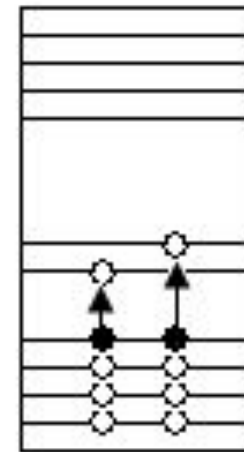


**In – акцептор**  
**Валентность 3**

Зона проводимости  
Запрещенная зона  
Валентная зона

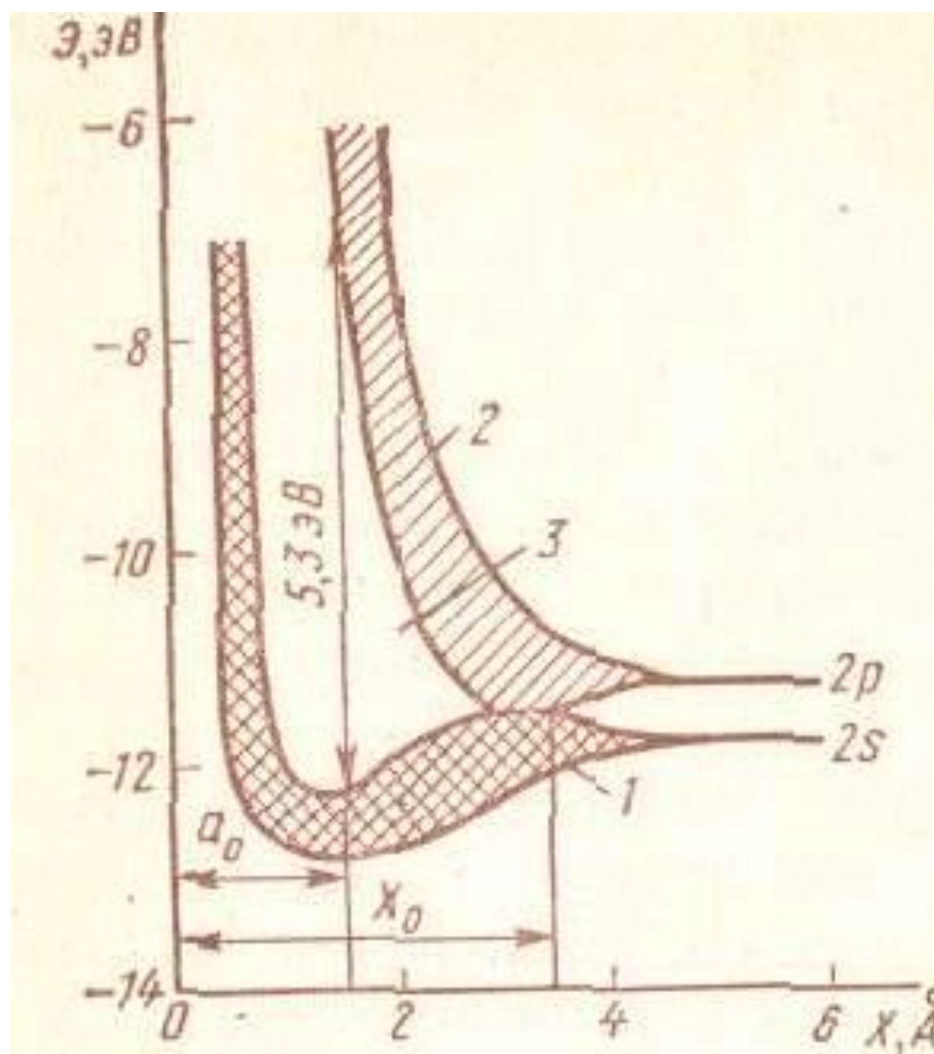


Wпр Д  
зона прим.  
(донор)



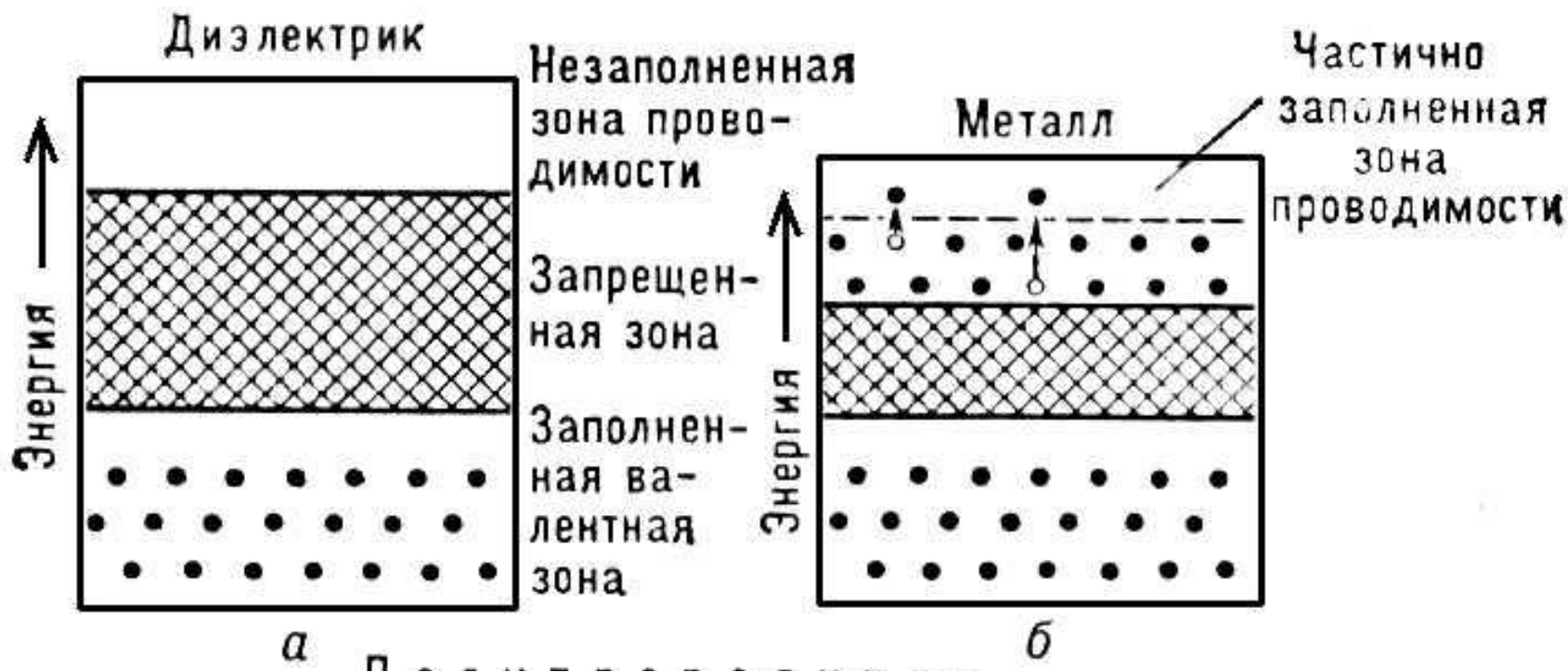
Wпр А  
зона прим.  
(акцептор)

# Схема образования энергетических зон при сближении атомов углерода



Алмаз      Графит

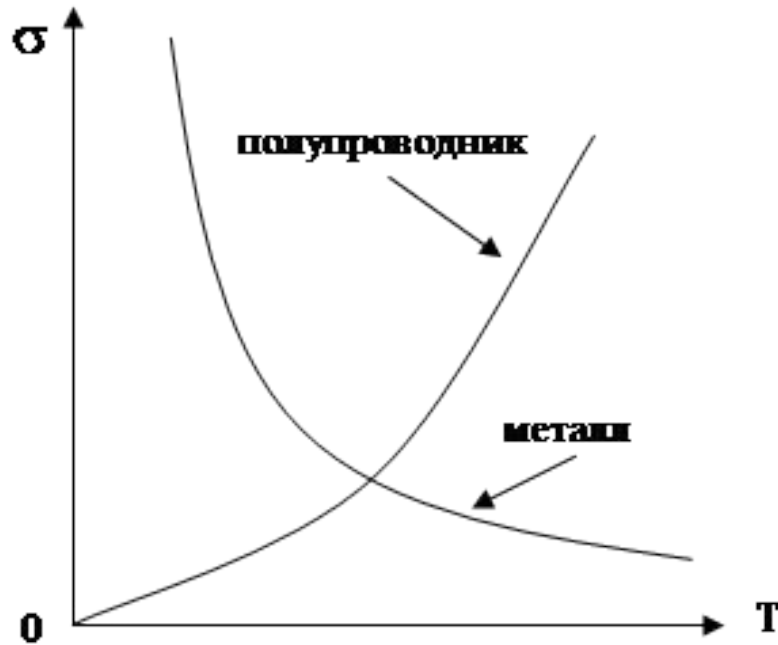
# Энергетические зоны







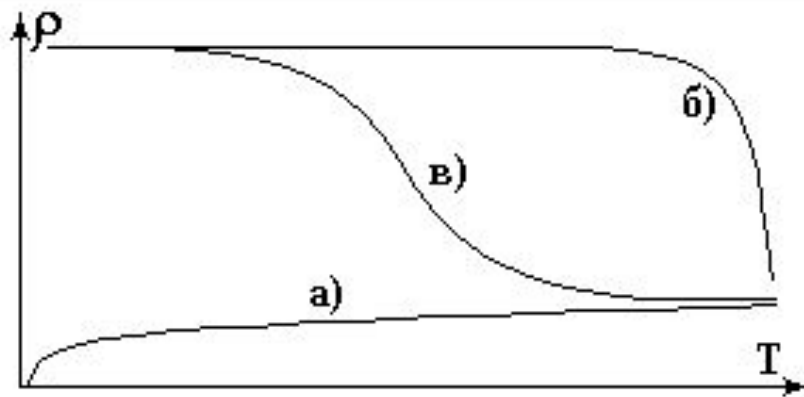
# Зависимость проводимости от температуры



$$E_k = (3/2)kT$$

$$E_k = 0,04 \text{ эВ}$$

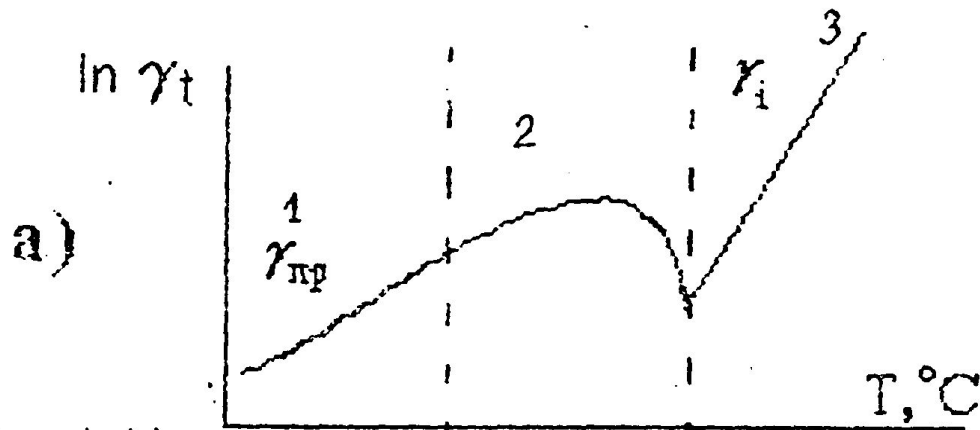
при  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$



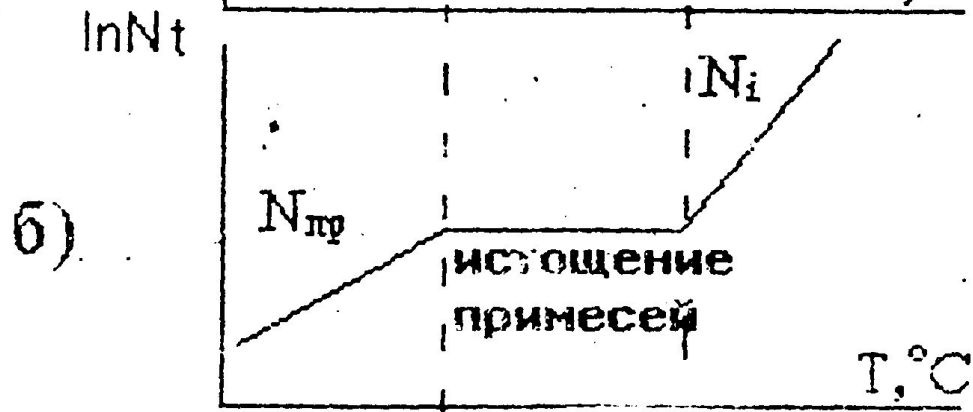
$$\rho = 1/\sigma$$

Рис.6. Зависимости удельных сопротивлений от температуры для:  
а) металлов, б) диэлектриков,  
в) полупроводников.

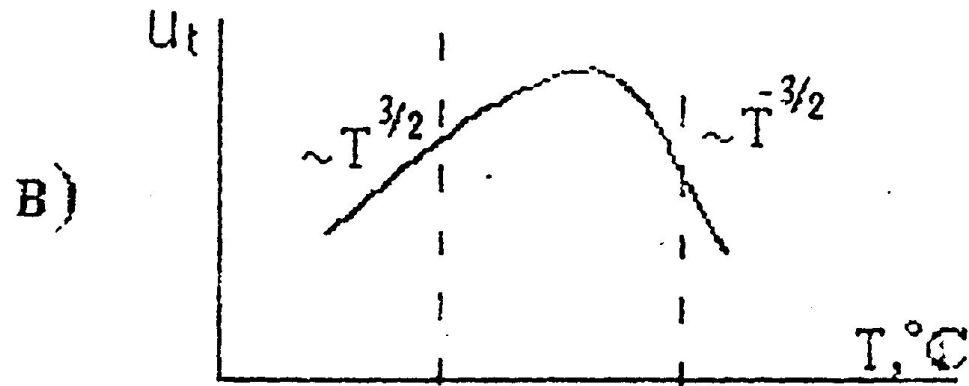
# Влияние температуры



$$\gamma_t = A \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}$$



$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}$$

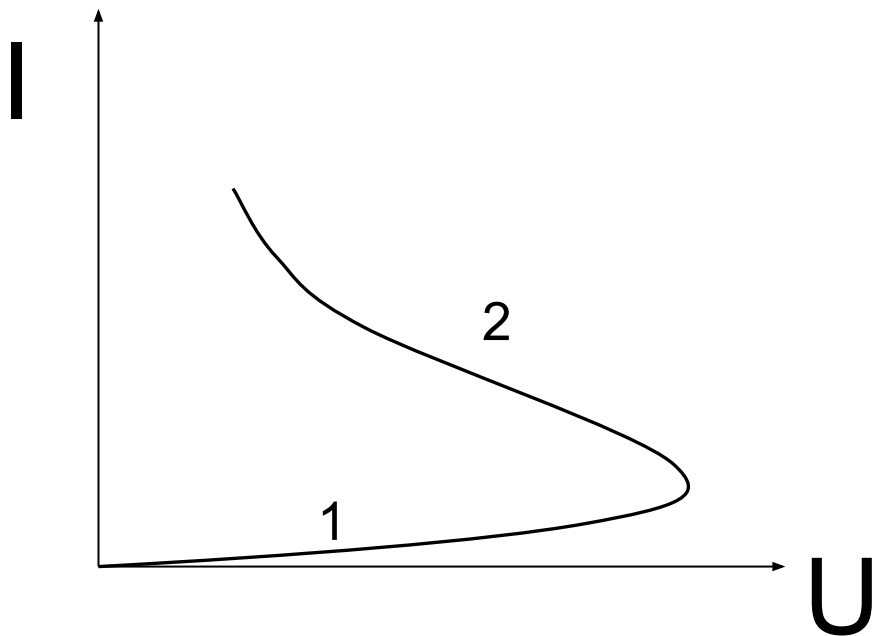


$$u_t \approx T^{\pm 3/2}$$

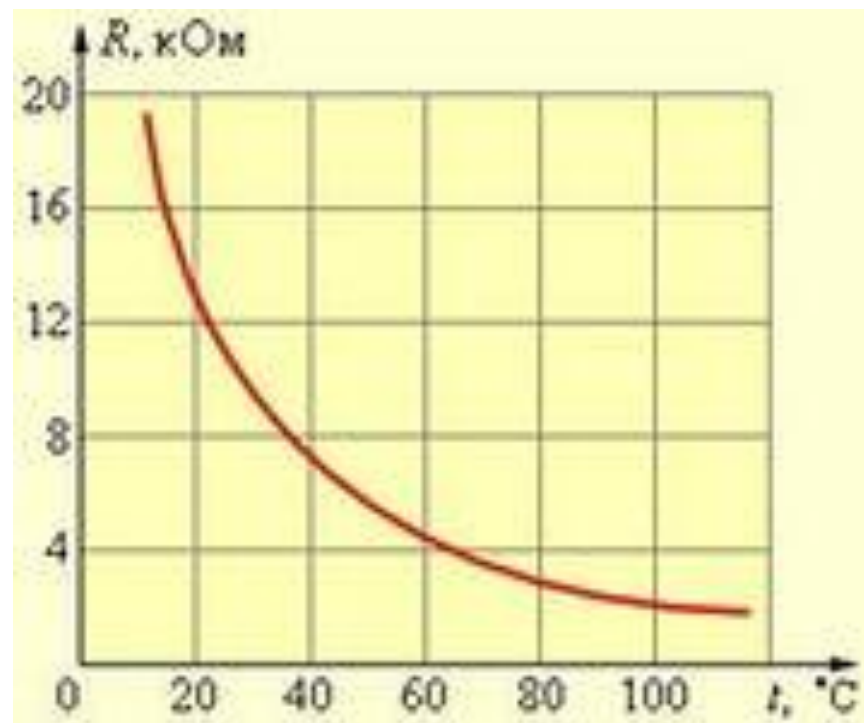
# Влияние температуры - терморезистор



$$TKR = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} < 0$$



Вольт-амперная характеристика терморезистора



Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

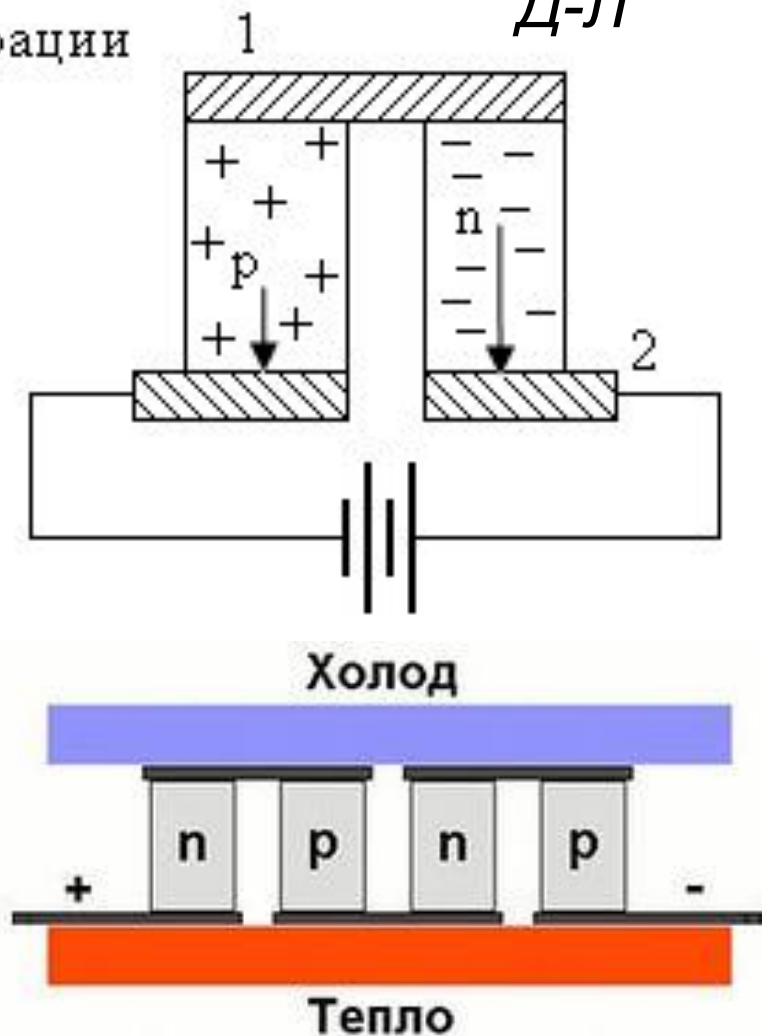
# Термоэлементы эффект Пельтье

$$Q_{\Pi} = \Pi \cdot I \cdot \tau,$$

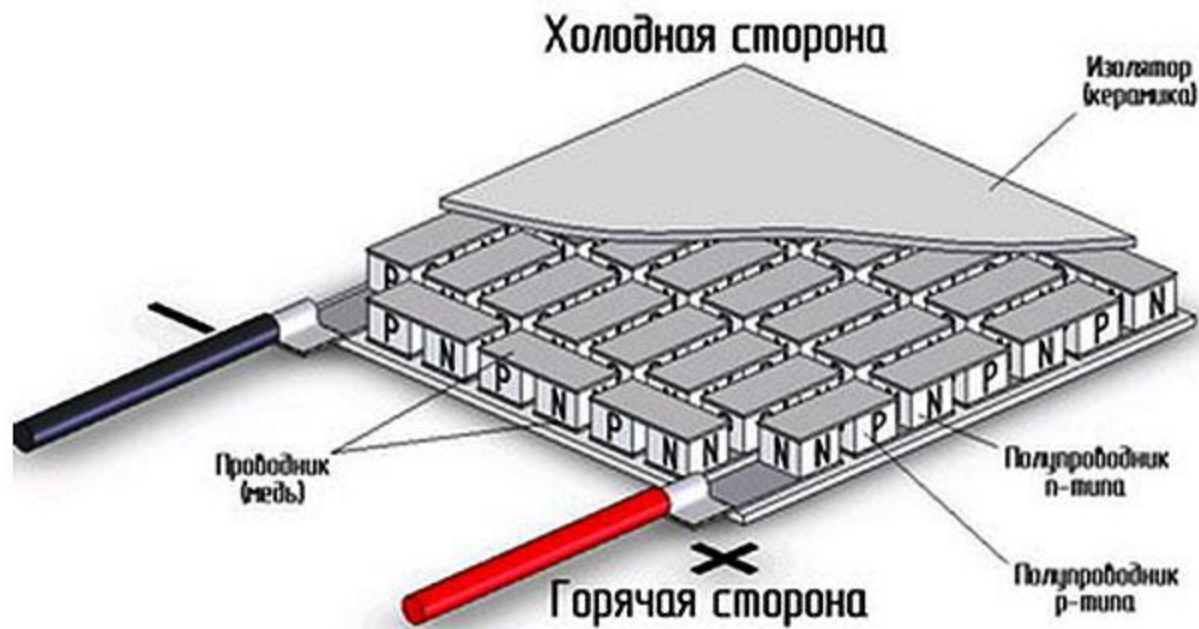
$$Q_{Д-Л} = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

Охлаждение за  
счет генерации  
p-n пар

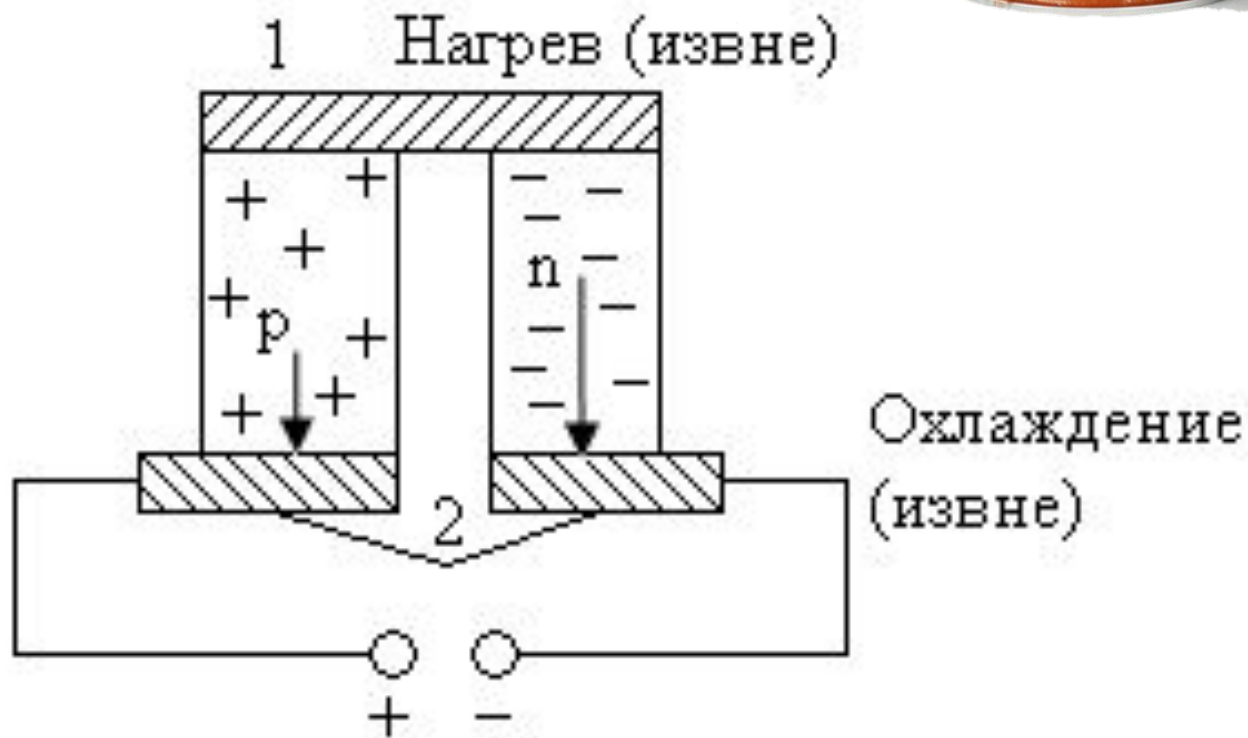
Нагрев за счет  
рекомбинации  
p-n пар



# Термоэлементы элемент Пельтье



# Термоэлементы эффект Зеебека



$$U = A \cdot (T_{\text{нагр.}} - T_{\text{охл.}}),$$

# Электронно-дырочный (или p-n) переход



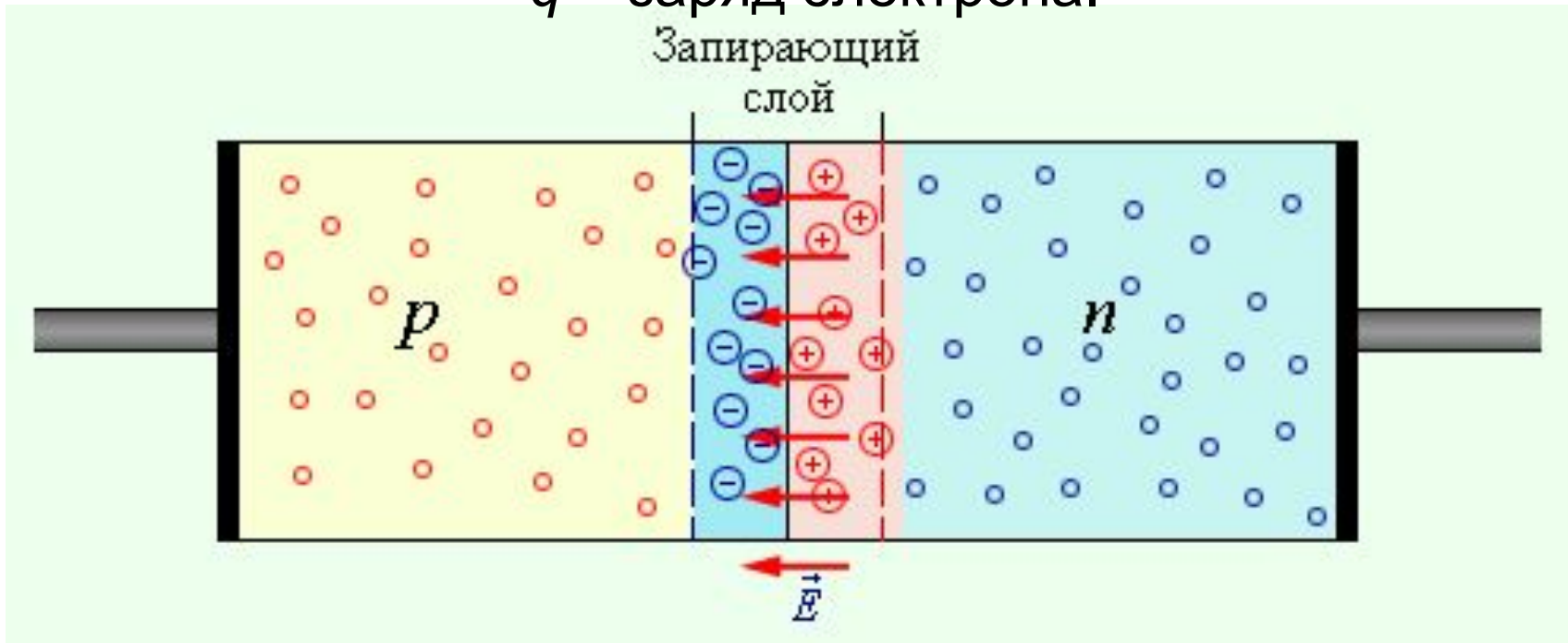
$$n_n \gg p_n \text{ и } p_p \gg n_p$$

$$I_D = q \cdot D \cdot N,$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;

$N$  – градиент концентрации носителей заряда;

$q$  – заряд электрона.

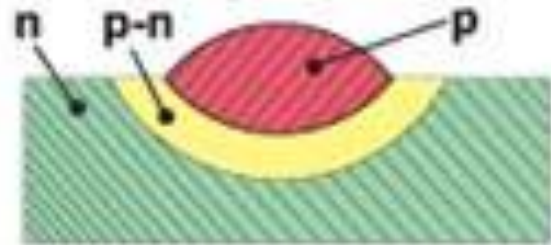




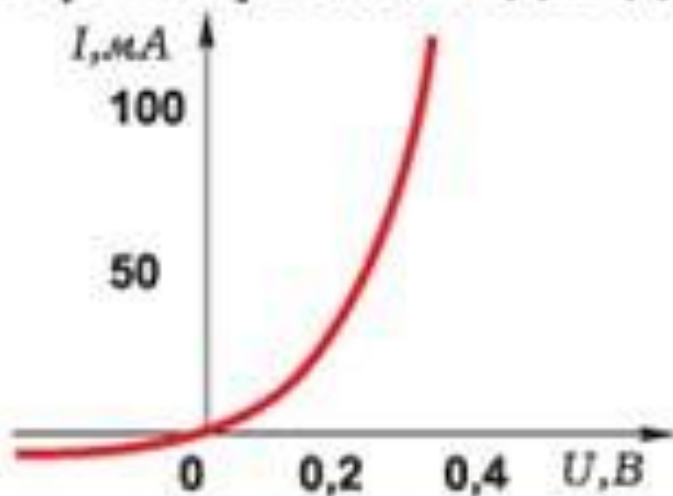
# Электронно-дырочный (или p-n) переход



## Образование p-n перехода



## Вольт-амперная характеристика диода



## Устройство диода

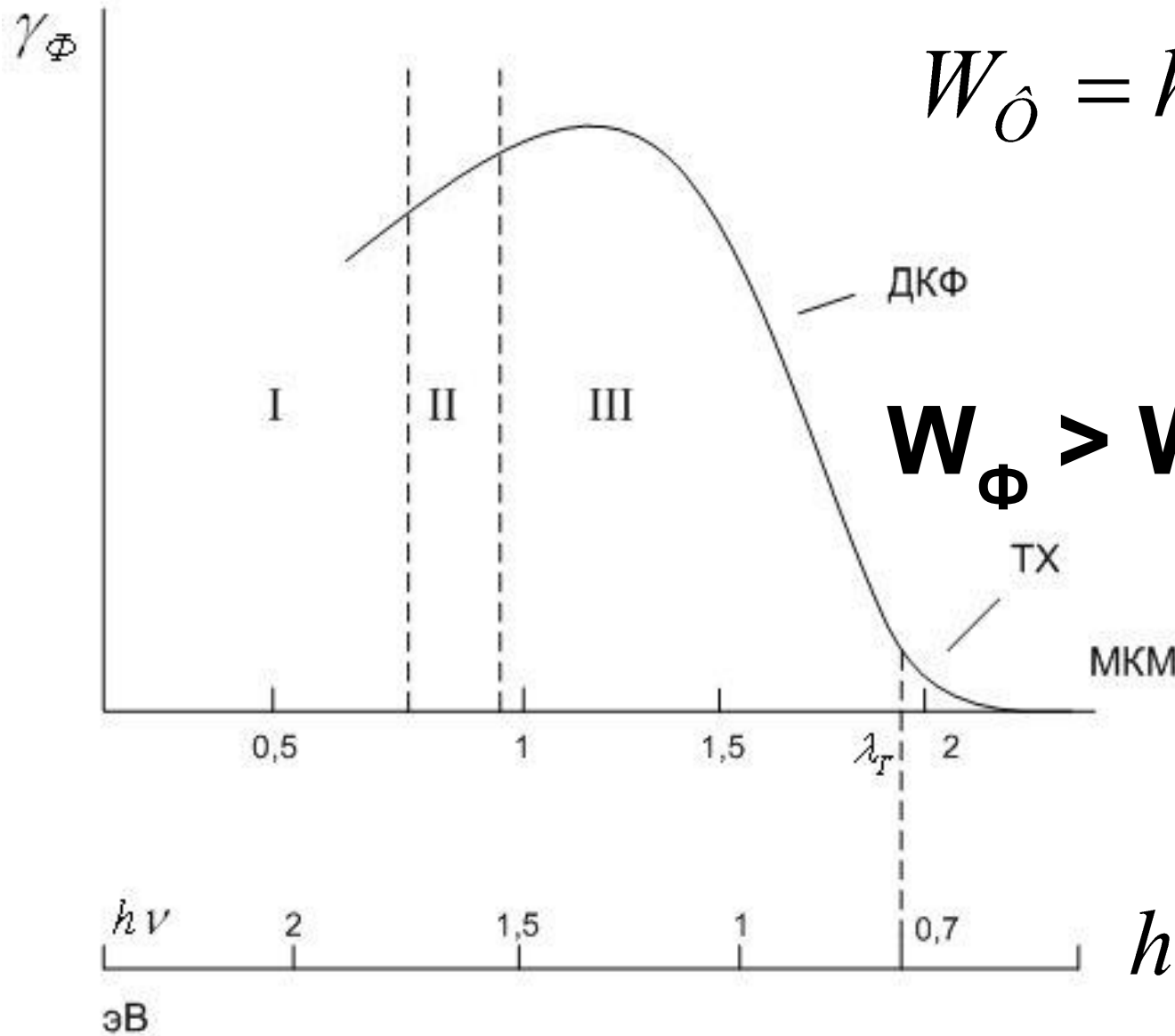


Изображение диода на схемах





# Воздействие света на электропроводность ПП-ков.

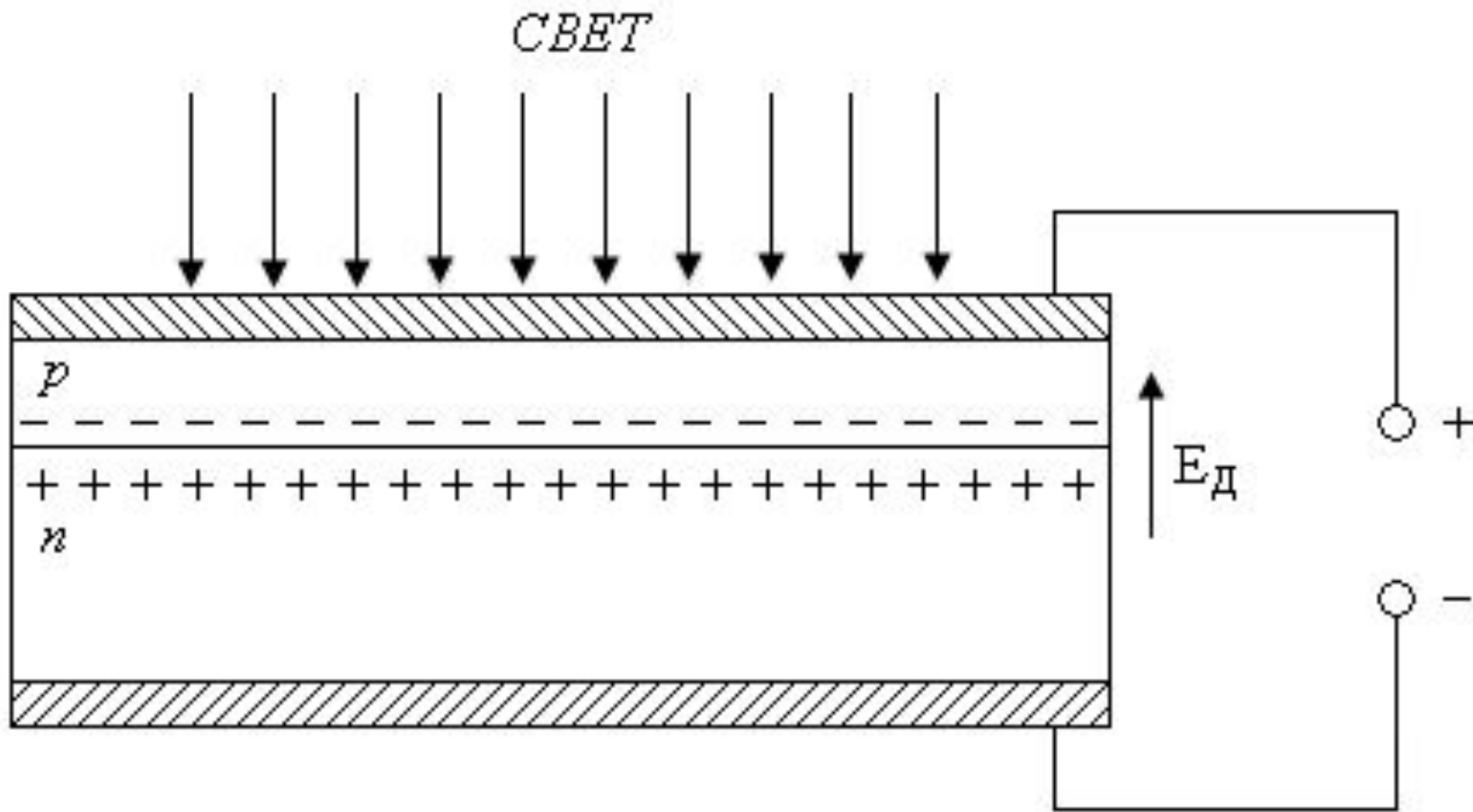


$$W_{\delta} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

$$W_{\Phi} > W_g$$

$$h\nu = \frac{1,23}{\lambda(\mu\text{m})}$$

# Фотоэлектрический эффект



# Фоторезисторы

**Фоторезисторы** – это фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения, принцип действия которых основан на **эффекте фотопроводимости**. Эффект фотопроводимости (фоторезистивный эффект) заключается в уменьшении электросопротивления полупроводникового материала при освещении.

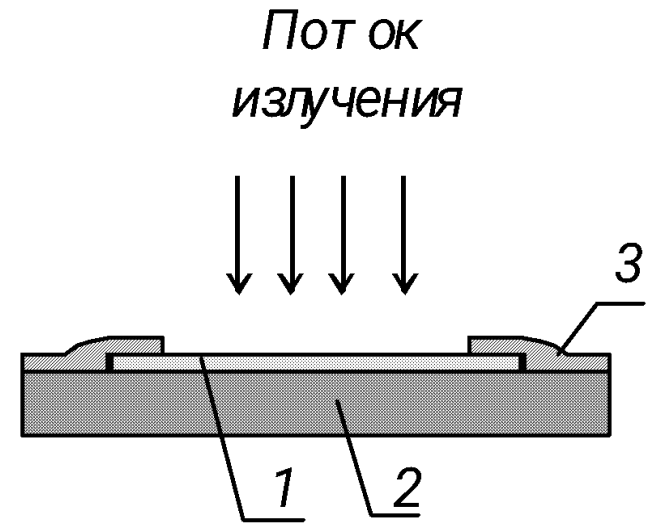
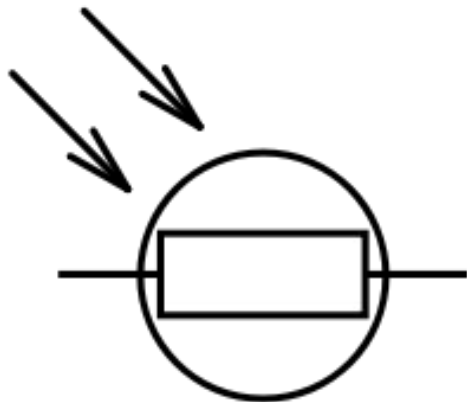
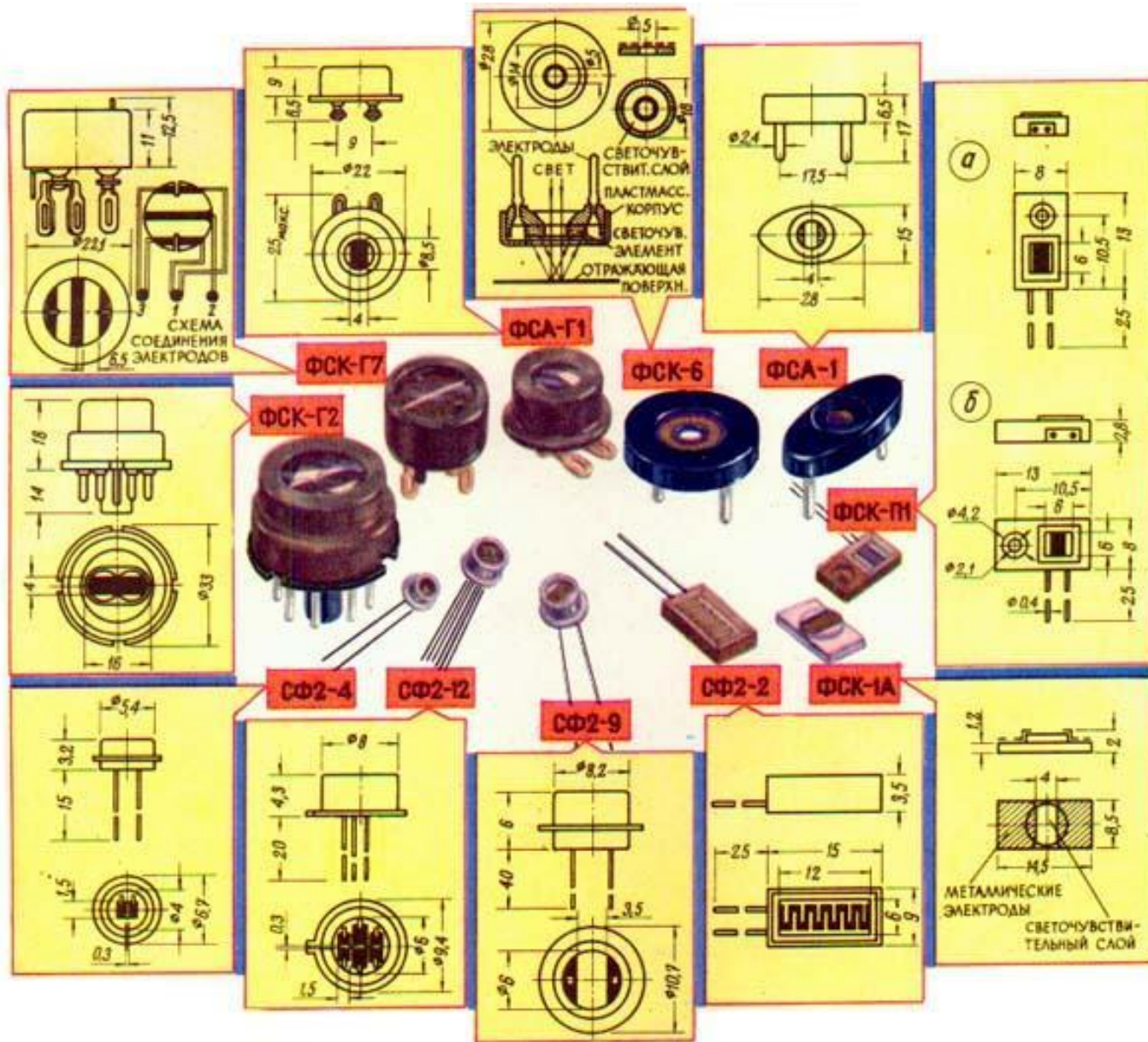


Рис. 7.15. Принципиальное устройство фоторезистора  
1 – светочувствительный полупроводниковый слой,  
2 – изоляционное основание,  
3 – металлические электроды

# Фоторезисторы

Наиболее распространенными являются фоторезисторы на основе сернистого свинца ( $\text{PbS}$ ), селенистого свинца ( $\text{PbSe}$ ), сернистого кадмия ( $\text{CdS}$ ) и селенистого кадмия ( $\text{CdSe}$ ). Высокая фоточувствительность сульфида и селенида кадмия обеспечивается введением в их состав *сенсibiliзирующих примесей*, способствующих увеличению времени жизни основных носителей заряда. Донорной примесью обычно служит хлор, в качестве акцепторных примесей используются медь или серебро. Существенную роль в механизме проводимости играют также структурные дефекты фоточувствительных полупроводниковых материалов.



**Внешний вид и размеры наиболее распространенных типов отечественных фоторезисторов**

# Характеристики фоторезисторов

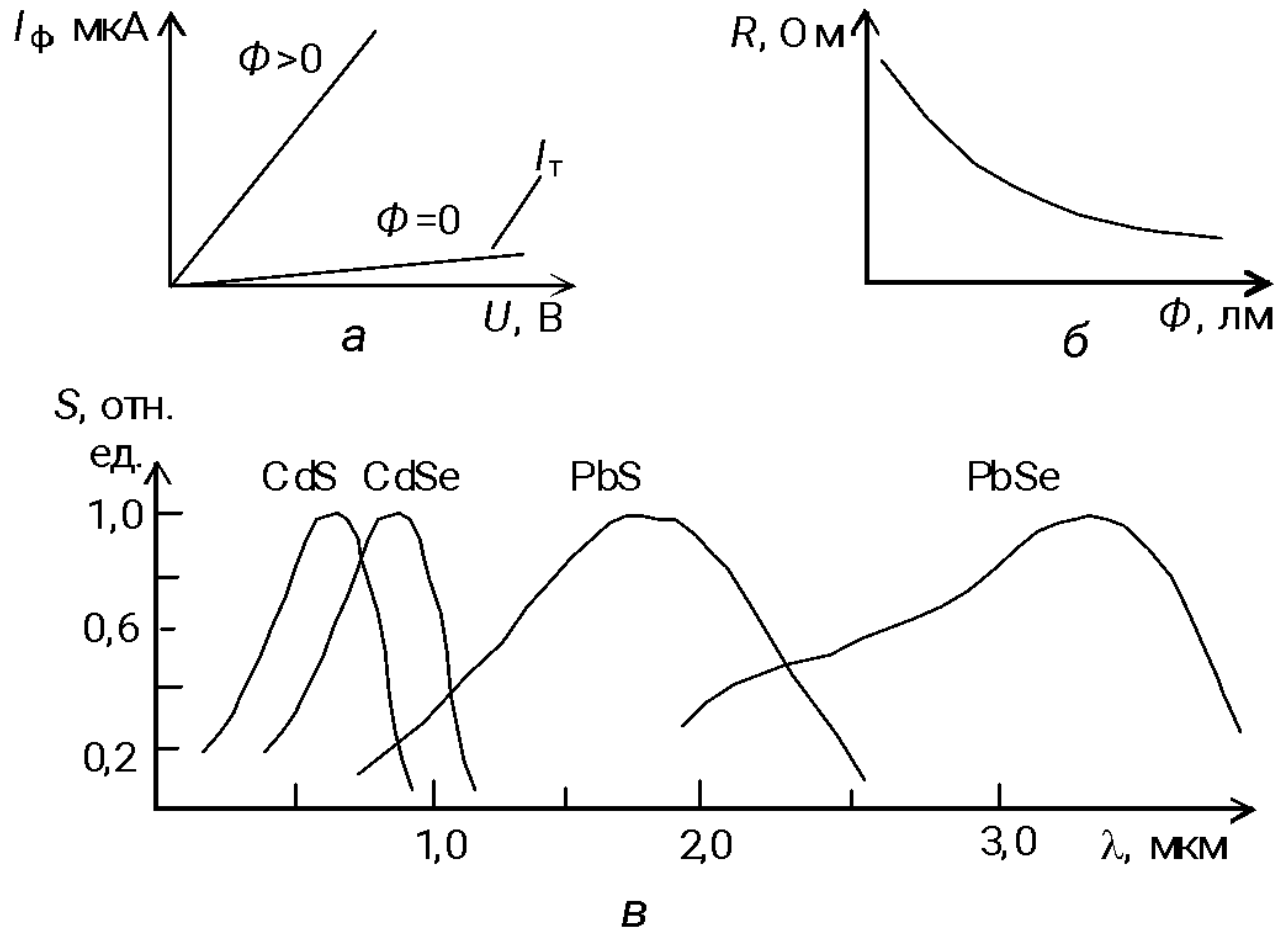


Рис. 7.16. Характеристики фоторезисторов: а – вольтамперные характеристики; б – функциональная характеристика  $R = f(\Phi)$ ; в – спектральные характеристики различных фоточувствительных элементов

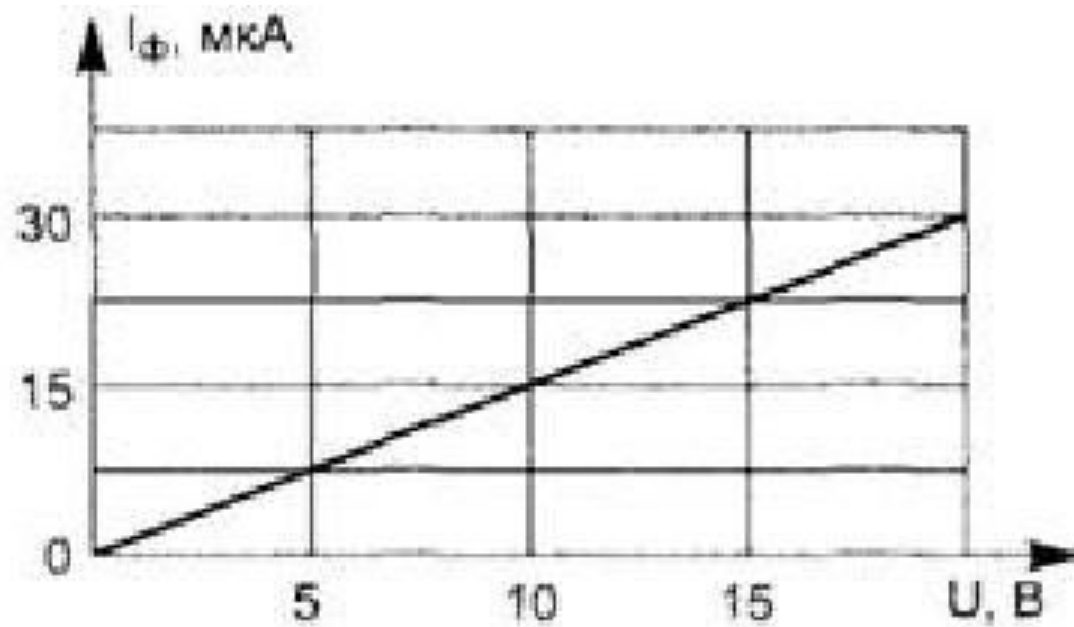


Рис.2 Вольт-амперная характеристика фоторезистора.

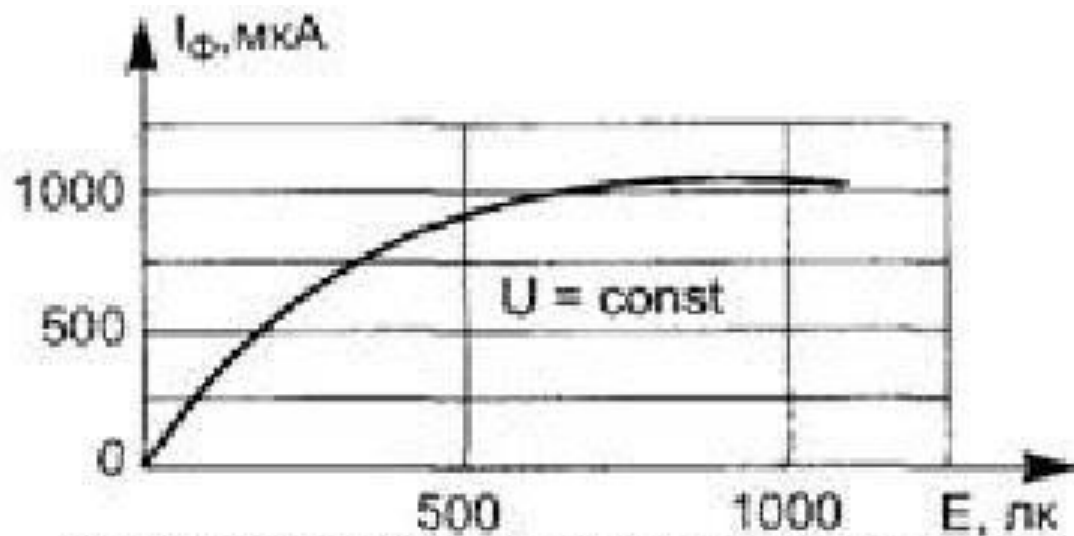


Рис.3 Световая характеристика фоторезистора

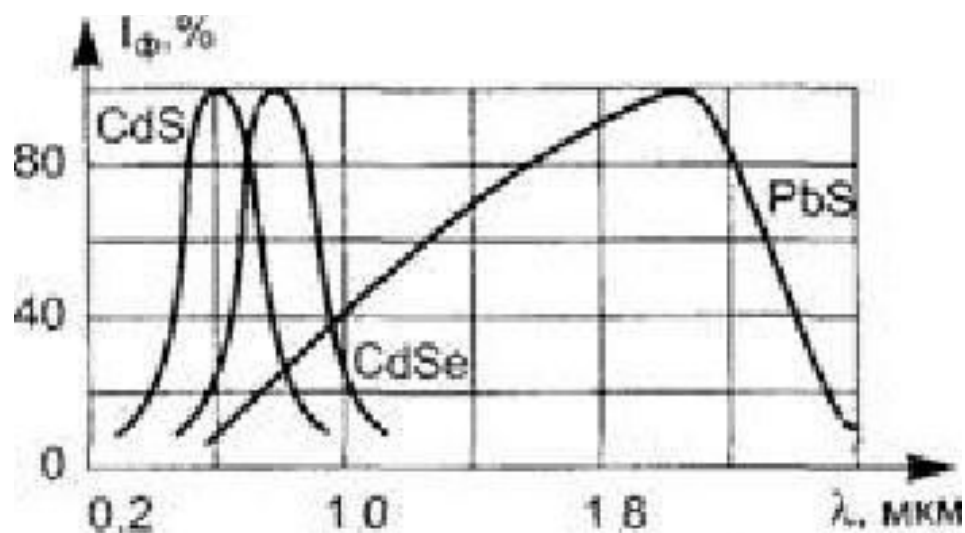


Рис.4 Спектральные характеристики фоторезистора.

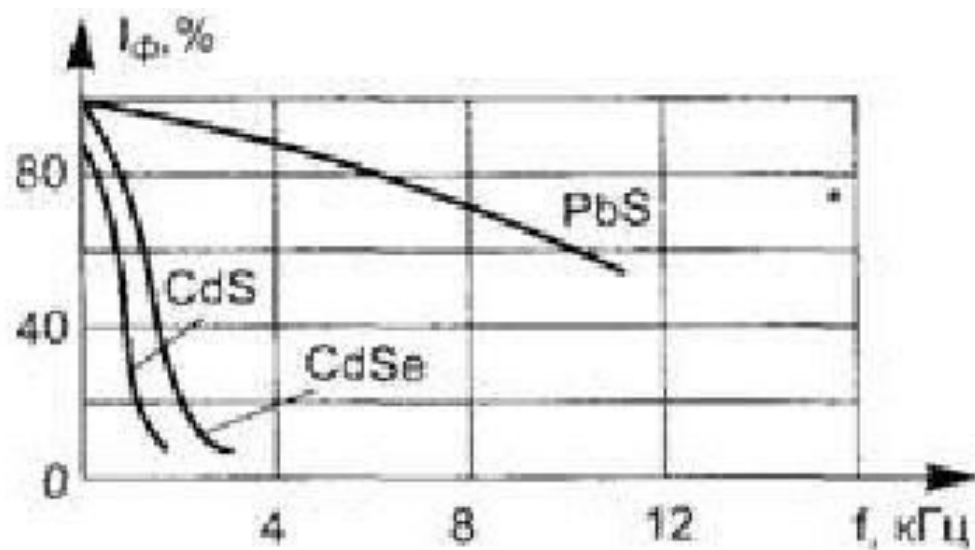


Рис.5 Частотные характеристики фоторезистора.



# Параметры фоторезисторов 1

**1. Темновое сопротивление  $R_T$**  – это сопротивление фоторезистора при полной защите чувствительного элемента от излучения. В зависимости от материала фоточувствительного элемента значение  $R_T$  составляет  $(0,022...100) \times 10^6$  Ом.

**2. Кратность изменения сопротивления** – отношение темнового сопротивления  $R_T$  фоторезистора к световому сопротивлению  $R_{CB}$  измеренному при освещенности в 200 лк. Значение отношения  $R_T/R_{CB}$  для различных типов фоторезисторов на основе CdS и CdSe колеблется в широком диапазоне от 3,5 до  $1,5 \times 10^6$  (обычно 150...1500), для фоторезисторов на основе PbS значение  $R_T/R_{CB}$  постоянно и равно 1,2 отн. ед.

**3. Рабочее напряжение  $U_p$**  – это напряжение, при котором фоторезистор работоспособен в течение заданного срока службы. Для различных типов фоторезисторов значение  $U_p$  находится в пределах 2...100 В.

**4. Номинальная мощность рассеяния  $P_H$**  – максимально допустимая мощность, которую фоторезистор может рассеивать при непрерывной электрической нагрузке и температуре окружающей среды, указанной в технической документации, при атмосферном давлении  $10^5$  Н/м<sup>2</sup> и рабочем напряжении на фоторезисторе. Значение  $P_H$  для фоторезисторов невелико

## Параметры фоторезисторов 2

**5. Темновой ток  $I_T$**  – величина тока через фоторезистор, определяемая при рабочем напряжении и полной защите фоточувствительного элемента от излучения. Величина  $I_T = 0,01 \dots 100$  мкА.

**6. Световой ток  $I_{св}$**  – величина тока через фоторезистор, определяемая при рабочем напряжении и освещенности 200 лк. Величина  $I_{св} = 0,3 \dots 6$  мА.

**7. Удельная чувствительность  $K$**  – это отношение фототока  $\Delta I_{\phi}$  к падающему на фоторезистор световому потоку  $\Phi$ , лм, и приложенному к нему напряжению  $U$ , В:

$$K = \frac{\Delta I_{\phi}}{\Phi U}, \quad (7.17)$$

где  $\Delta I_{\phi} = I_{св} - I_T$  – фототок, равный разности светового и темнового токов, протекающих через фоторезистор. Значение  $K$  для различных фоторезисторов составляет от 500 до  $600 \times 10^3$  мкА/лм×В.

# Параметры фоторезисторов 3

8. **Спектральная характеристика,  $S(\lambda)$** , представляет зависимость монохроматической чувствительности фоторезистора,  $K$ , отнесенную к значению максимальной чувствительности,  $K_{\max}$ , от длины волны  $\lambda$  регистрируемого потока излучения. Очевидно,  $S = \frac{K}{K_{\max}}$  где  $K_{\max}$  – значение фототока, соответствующее максимальной чувствительности фоторезистора.

9. **Инерционность  $\tau$**  – это длительность промежутка времени, в течение которого фототок после включения или выключения источника света увеличивается или уменьшается в  $2,73$  раза.

$$I_{\phi}(f_{\text{мод}}) = \frac{I_{\phi}(0)}{\sqrt{1 + (2\pi f_{\text{мод}} \tau)^2}}, \quad (7.18)$$

где  $I_{\phi}(0)$  – значение фототока при постоянном световом потоке, падающем на фоторезистор ( $f_{\text{мод}} = 0$ ).

10. **Температурный коэффициент фототока ( $TKI_{\phi}$ )** представляет собой относительное изменение фототока при изменении температуры на 1 градус:  $\frac{\Delta I_{\phi}}{\Delta T} \frac{1}{I_{\phi}}$

$\alpha_{I,T} = TKI_{\phi}$ . Значение  $TKI_{\phi}$  является отрицательной величиной,

поскольку общий фототок уменьшается с увеличением температуры.

# Система обозначений фоторезисторов

До введения ОСТ 11.074.009–78 (согласно которому фоторезистор обозначается буквами ФР) в основу обозначения фоторезисторов входил состав материала, из которого изготовлялся их термочувствительный элемент:

СФ1 – на основе сульфида свинца (ранее обозначались ФСА);

СФ2 – сернисто-кадмиевые (ранее обозначались ФСК);

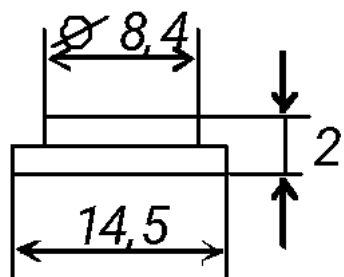
СФ3 – селенисто-кадмиевые (ранее обозначались ФСД);

СФ4 – на основе селенида свинца.

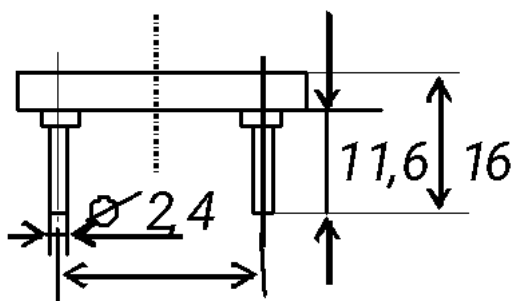
Далее через дефис указывается номер разработки и вариант конструктивного исполнения.

# Конструкции фоторезисторов

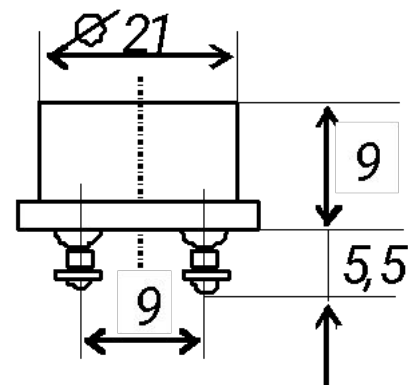
ФСК-0, ФСК-1а



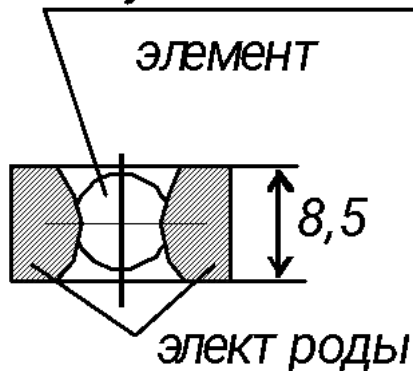
ФСК-1, ФСК-М1



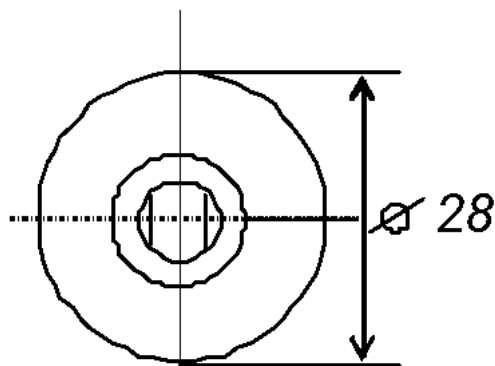
ФСК-Г1



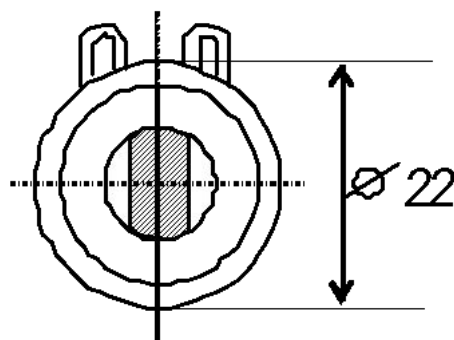
фоточувствительный элемент



а



б



в

Рис. 7.17. Конструкции фоторезисторов: а – бескорпусная; б – в пластмассовом корпусе; в – в металлостеклянном корпусе

# Оптопары

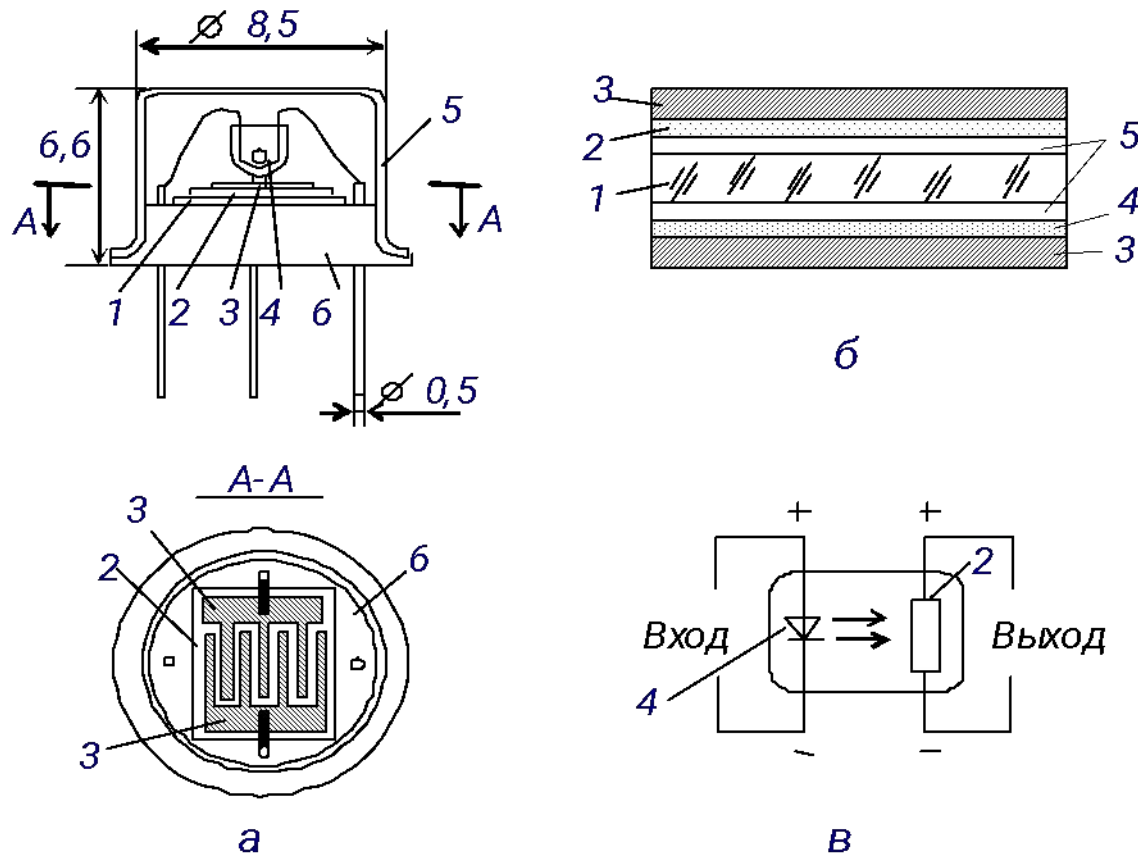


Рис. 7.18. Устройство резисторных оптронов

а – составной оптрон (1 – изоляционная подложка, 2 – полупроводниковый светочувствительный слой, 3 – металлические контакты, 4 – миниатюрный источник света, 5 – светонепроницаемый корпус, 6 – основание светонепроницаемого корпуса); б – пленочный оптрон (1 – стеклянная изоляционная подложка, 2 – полупроводниковый светочувствительный слой, 3 – металлические электроды, 4 – электролюминофор (электролюминесцентный излучатель), 5 – прозрачные электроды); в – электрическая схема оптрона



Спасибо за внимание!

