

Омский государственный технический университет  
каф. Электроника

Дисциплина  
**Радиоматериалы и радиокомпоненты**

Лекция 4. **Полупроводниковые  
материалы**

Доцент, к.т.н. Пономарёв Д.Б.

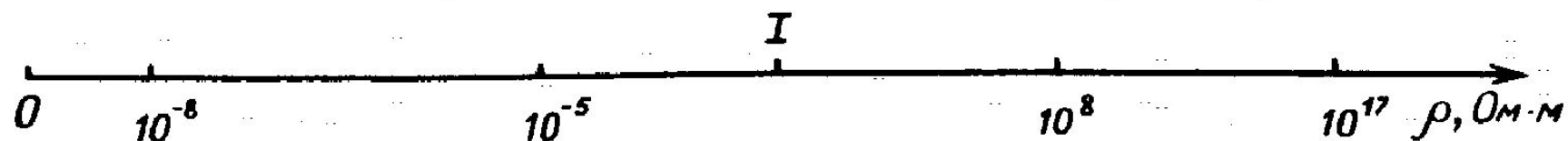


# Вещества

Проводники  
Сверхпроводники

Полупроводники

Диэлектрики



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

Основные характеристики, свойства

Электропроводность

Термоэлектрические  
свойства

Фотоэлектрические  
свойства

Электропроводность

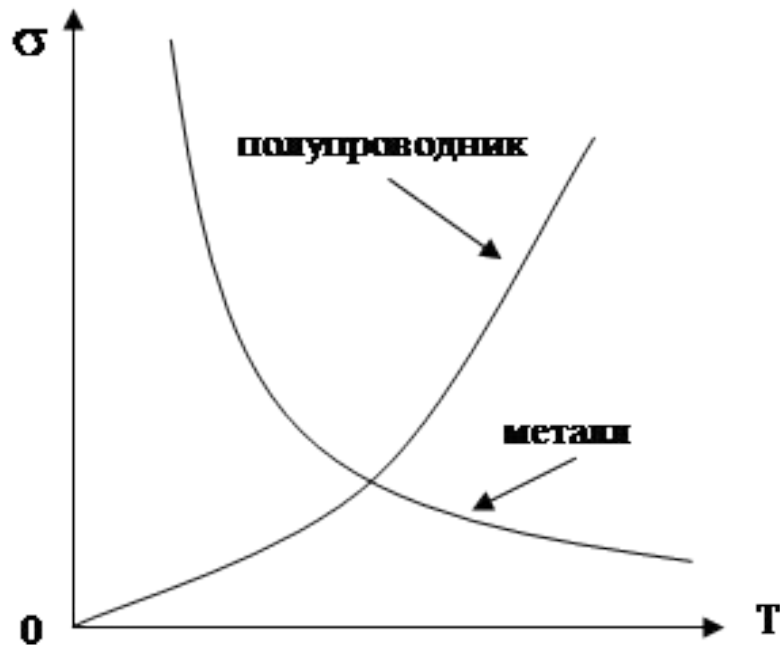
Собственная  $\gamma_i$

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

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

Электронно-дырочный  
переход (p-n переход)

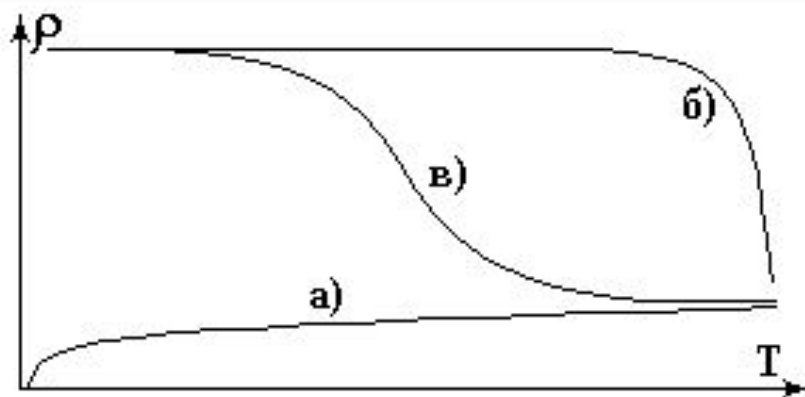
# Зависимость проводимости от температуры



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

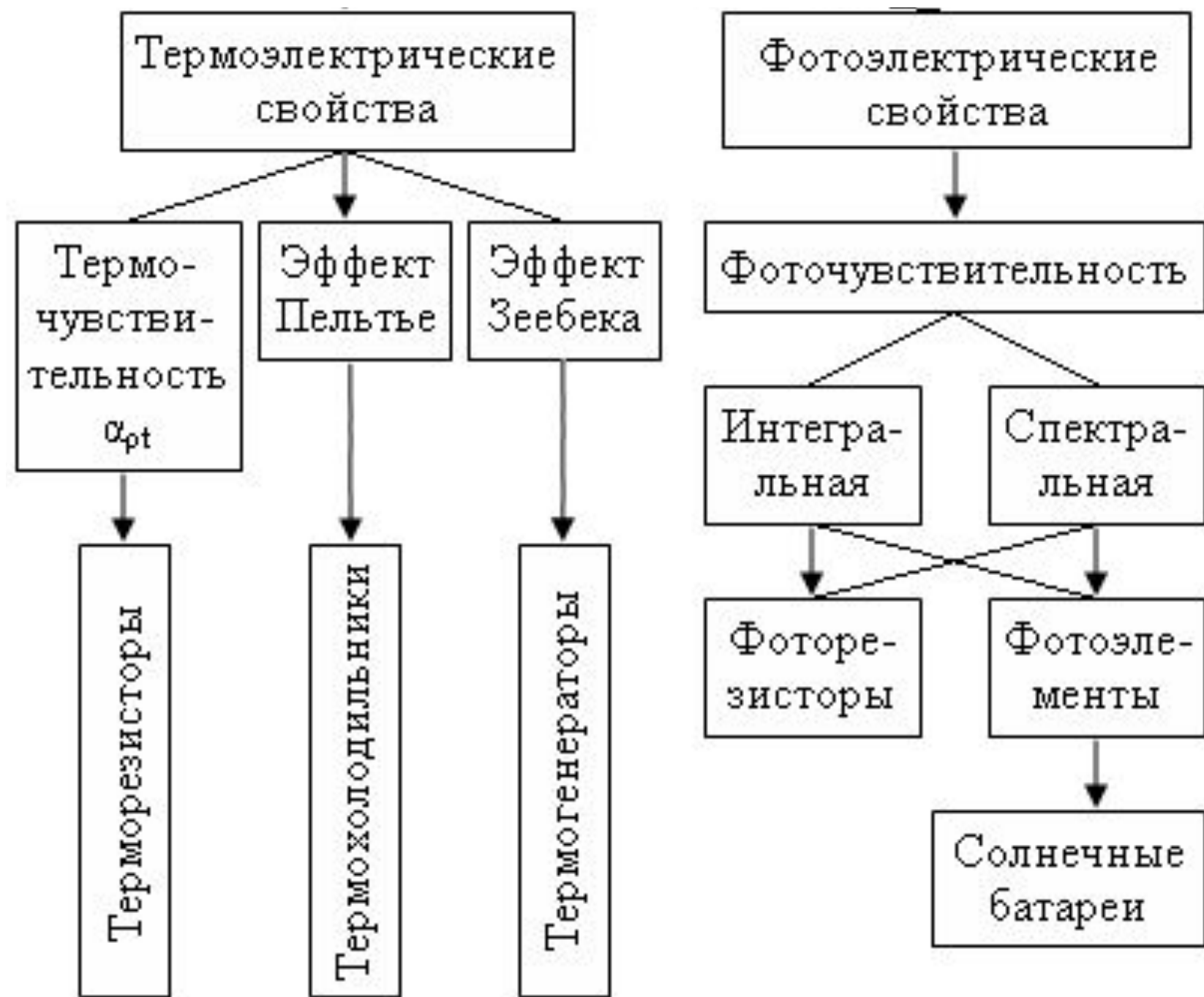
$$E_k = 0,04 \text{ эВ}$$

при  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$

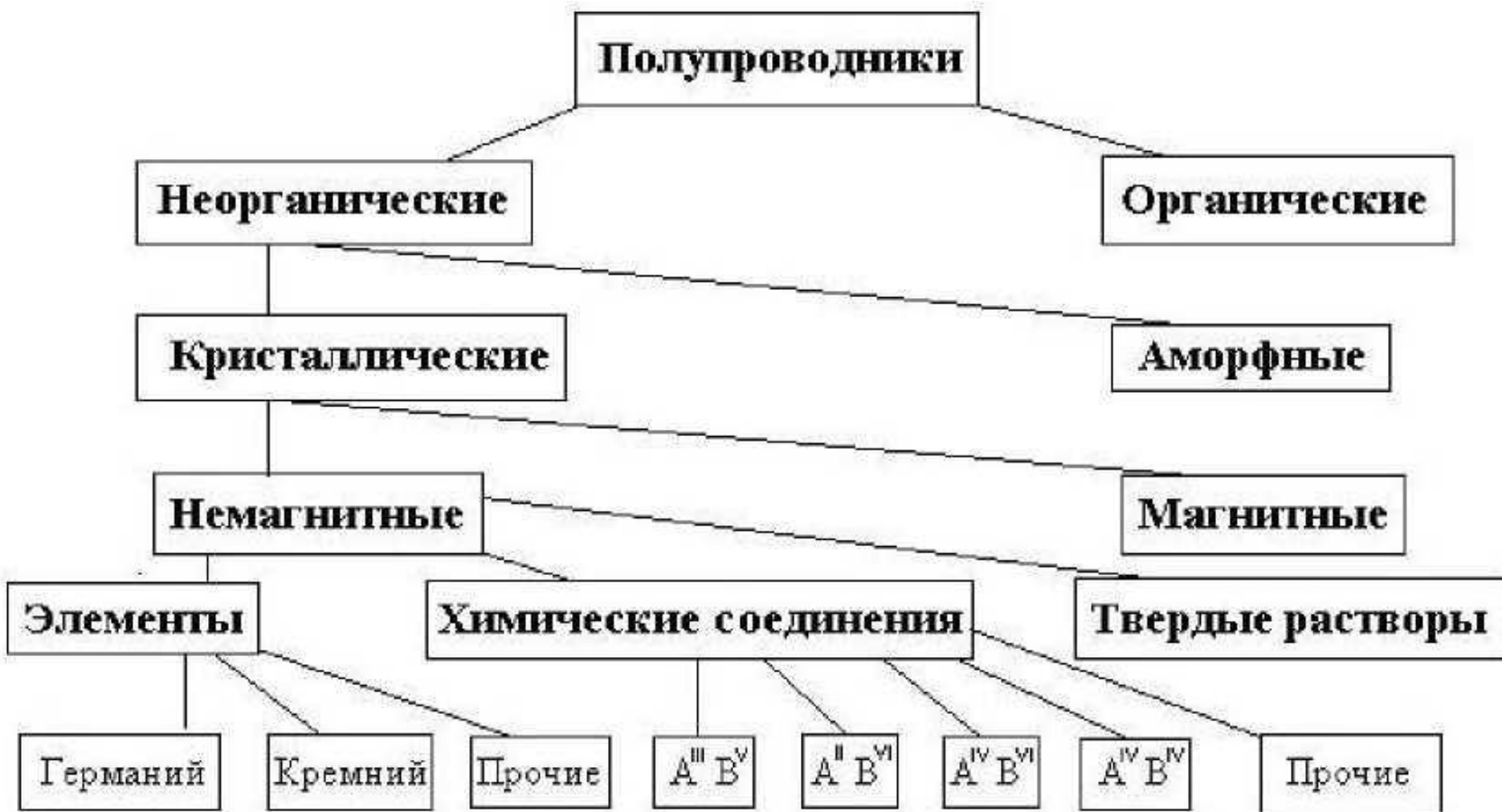


$$\rho = 1/\sigma$$

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



# Классификация



# Классификация

## Полупроводники

Неорганические  
(кристаллические,  
аморфные)

Органические

Простые

Соединения

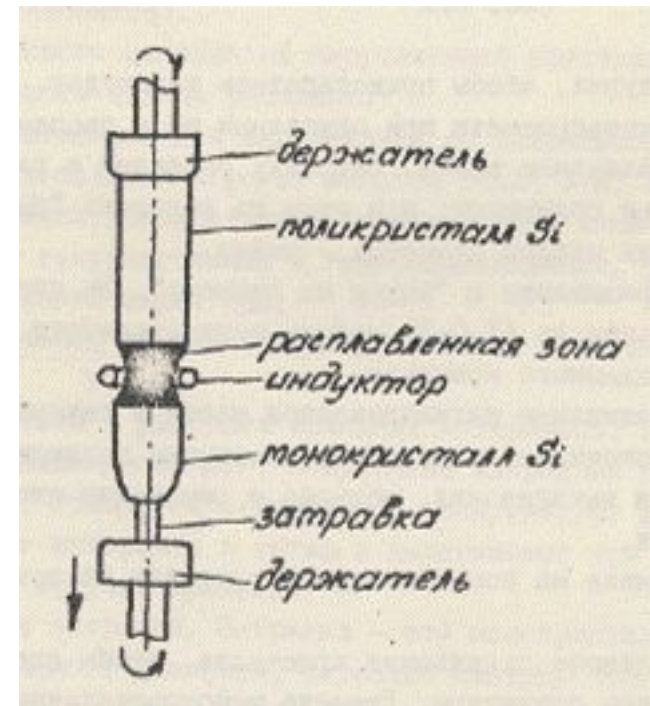
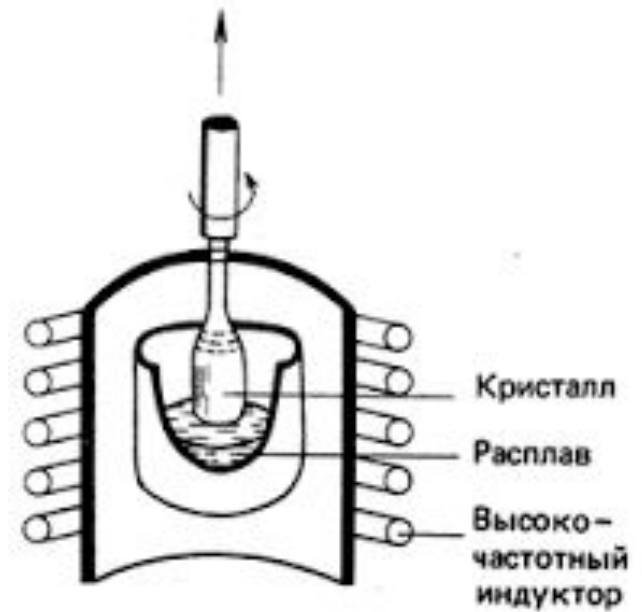
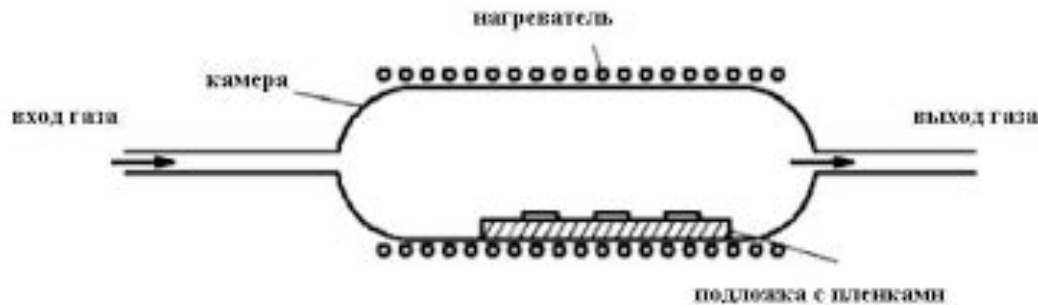
Si, Ge, Sb, Te, B, I, Se



оксиды

## Способы получения монокристаллов полупроводников

- 1. *Вытягивание из расплава по методу Чохральского.*
- 2. *Метод бестигельной зонной плавки.*
- 3. *Кристаллизация из газовой фазы с использованием методов сублимации из газовой фазы и химических транспортных реакций (CdS, ZnS, SiC).*





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 5 основных групп:**

**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.



# Элементарные полупроводники

ПЕРИОД	РЯД	ГРУППА ЭЛЕМЕНТОВ																
		A I B		A II B		A III B		A IV B		A V B		A VI B		A VII B				
I	1	<b>H</b> 1.00795 водород										<b>He</b>		<b>H</b>				
II	2	<b>Li</b> 6.9412 литий	<b>Be</b> 9.01218 бериллий	<b>B</b> 10.812 бор	<b>C</b> 12.0106 углерод	<b>N</b> 14.0067 азот	<b>O</b> 15.9994 кислород	<b>F</b> 18.99840 фтор	<b>Ne</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Ar</b>	
III	3	<b>Na</b> 22.98977 натрий	<b>Mg</b> 24.305 магний	<b>Al</b> 26.98154 алюминий	<b>Si</b> 28.086 кремний	<b>P</b> 30.97376 фосфор	<b>S</b> 32.06 сера	<b>Cl</b> 35.453 хлор	<b>Ar</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	
IV	4	<b>K</b> 39.0983 калий	<b>Ca</b> 40.08 кальций	21 44.9559	<b>Sc</b> скандий	22 47.88	<b>Ti</b> титан	23 50.9415	<b>V</b> ванадий	24 51.996	<b>Cr</b> хром	25 54.9380	<b>Mn</b> марганец	26 58.9326	<b>Fe</b> железо	27 63.546	<b>Cu</b> медь	
	5	29 63.546	<b>Cu</b> медь	30 65.38	<b>Zn</b> цинк	31 69.72	<b>Ga</b> галлий	32 72.59	<b>Ge</b> германий	33 74.9216	<b>As</b> мышьяк	34 78.96	<b>Se</b> селен	35 79.904	<b>Br</b> бром	36 83.798	<b>Kr</b> криpton	
V	6	<b>Rb</b> 85.4678 рубидий	<b>Sr</b> 87.62 стронций	39 88.9059	<b>Y</b> иттрий	40 91.22	<b>Zr</b> цирконий	41 92.9064	<b>Nb</b> ниобий	42 95.94	<b>Mo</b> молибден	43 98.9062	<b>Tc</b> технеций	44 101.07	<b>Ru</b> рутений	45 101.07	<b>Rh</b> родий	
	7	47 107.868	<b>Ag</b> серебро	48 112.41	<b>Cd</b> кадмий	49 114.82	<b>In</b> индий	50 118.69	<b>Sn</b> олово	51 121.75	<b>Sb</b> сурьма	52 127.60	<b>Te</b> теллур	53 126.9045	<b>I</b> йод	54 127.60	<b>Xe</b> ксенон	
6	80 200.59	<b>Hg</b> ртуть	81 204.38	<b>Tl</b> таллий	82 208.38	<b>Pb</b> свинец	83 208.98	<b>Bi</b> висмут	84 208.98	<b>Po</b> полоний	85 208.98	<b>At</b> астат	86 208.98	<b>Rn</b> радон	87 223.02	<b>Fr</b> франций	88 223.02	<b>Ra</b> радий

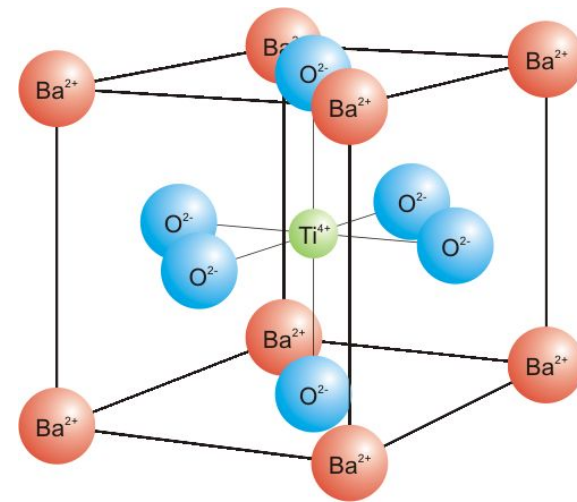
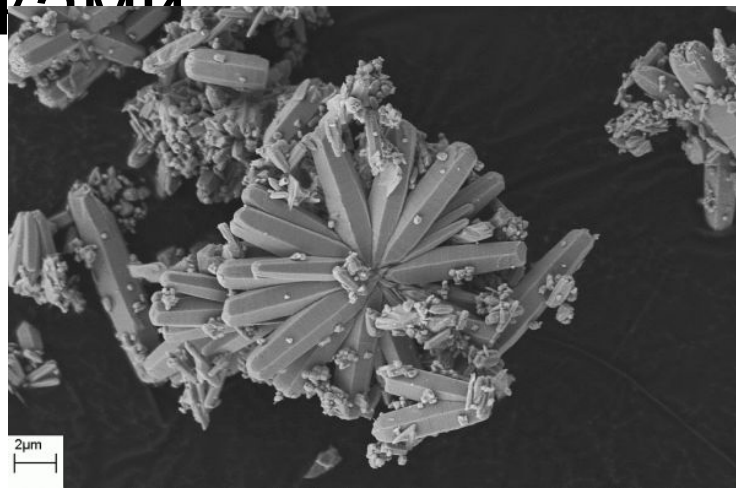
<b>B</b> БОР	<b>C</b> УГЛЕРОД	<b>N</b> АЗОТ	<b>O</b> КИСЛОРОД	<b>F</b> ФТОР	<b>Ne</b> НЕОН
<b>Al</b> АЛЮМИНИЙ	<b>Si</b> КРЕМНИЙ	<b>P</b> ФОСФОР	<b>S</b> СЕРА	<b>Cl</b> ХЛОР	<b>Ar</b> АРГОН
<b>Ga</b> ГАЛЛИЙ	<b>Ge</b> ГЕРМАНИЙ	<b>As</b> МЫШЬЯК	<b>Se</b> СЕЛЕН	<b>Br</b> БРОМ	<b>Kr</b> КРИПТОН
<b>In</b> ИНДИЙ	<b>Sn</b> ОЛОВО	<b>Sb</b> СУРЬМА	<b>Te</b> ТЕЛЛУР	<b>I</b> ИОД	<b>Xe</b> КСЕНОН
<b>Tl</b> ТАЛЛИЙ	<b>Pb</b> СВИНЕЦ	<b>Bi</b> ВИСМУТ	<b>Po</b> ПОЛОНИЙ	<b>At</b> АСТАТ	<b>Rn</b> РАДОН

МЕТАЛЛЫ

ПОЛУМЕТАЛЛЫ

НЕМЕТАЛЛЫ

**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, изготавливаемые на основе титаната бария, стронция, цинка, и другие неорганические соединения с различными малыми добавками.**



# Варистор на основе ZnO – оксида цинка

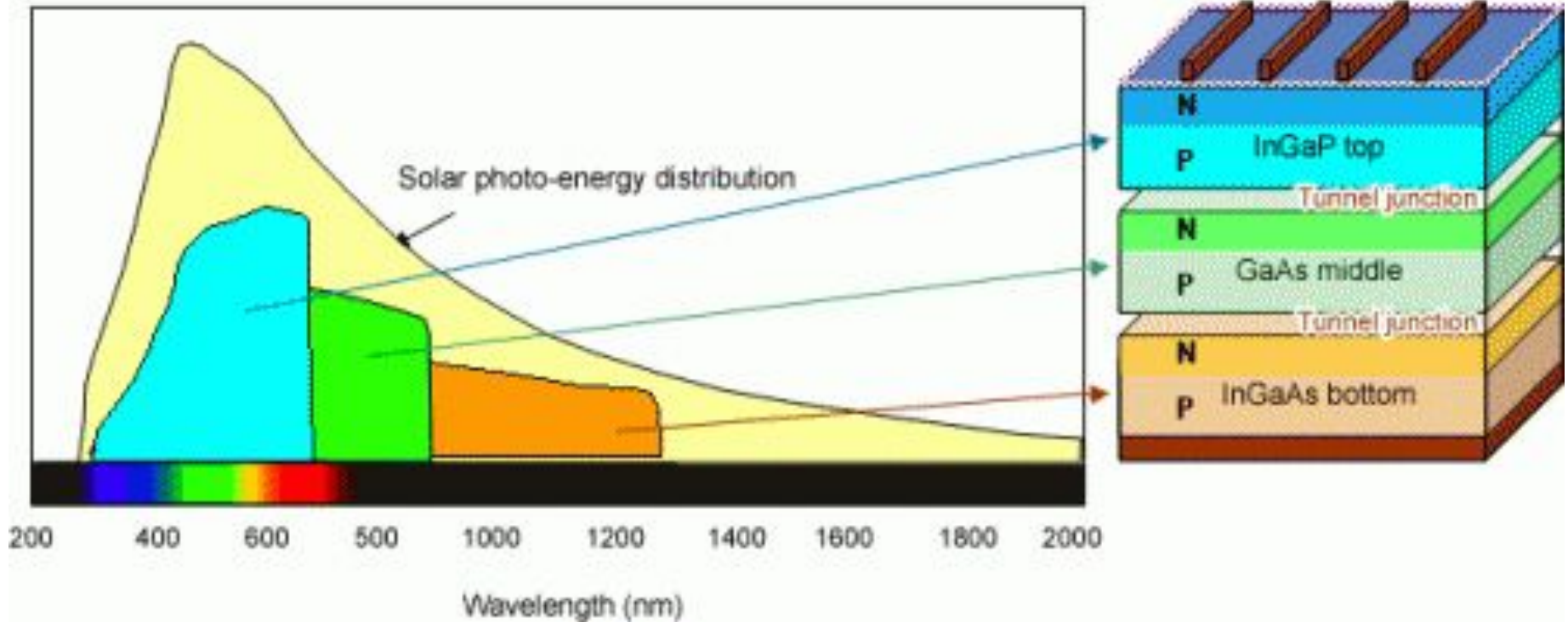


**3. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений атомов третьей и пятой групп системы элементов Менделеева. Примерами таких материалов являются антимониды индия, галлия и алюминия, т. е. соединения сурьмы с индием, галлием и алюминием. Они получили наименование интерметаллических**

**A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>**



# Арсенид-галиевые (GaAs) солнечные батареи



<http://solarb.ru/arsenid-galievye-solnechnye-batarei>

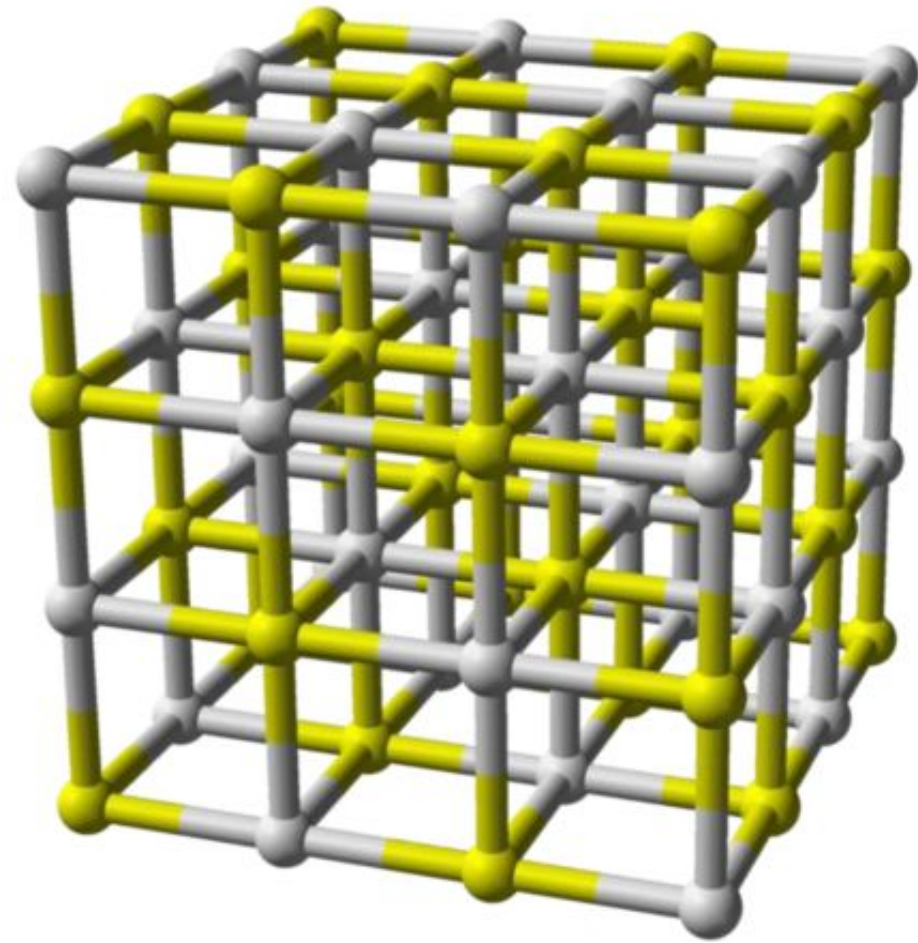


4. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений серы, селена и теллура с одной стороны и меди, кадмия и свинца с другой. Такие соединения называются соответственно: сульфидами, селенидами и теллуридами.



# Халькогениды свинца

## Фоторезистор



● – Pb ; ● – S/Se/Te

Рисунок X – Структура халькогенида свинца

## 5. Органические полупроводники:

- органические красители (метиленовый голубой, фталоцианины)
- ароматические соединения (нафталин, антрацен, виолантрен )
- полимеры с сопряженными связями
- природные пигменты (хлорофилл,  $\beta$ -каротин )
- молекулярные комплексы с переносом заряда (донорно - акцепторные системы): бром-антрацен, иод-пирен.
- ион-радикальные соли (тетрацианхинодиметан)

## Органические полупроводники:

- **Линейные** – пентацен
- **Двумерные соединения со сшитыми кольцами** –  
производные нафталина и фталоцианинов
- **Гетероциклические олигомеры** –  
производные тиафена с *p*-  
типом проводимости

- Как светочувствительные материалы для ПЗС и фотоэлементов.

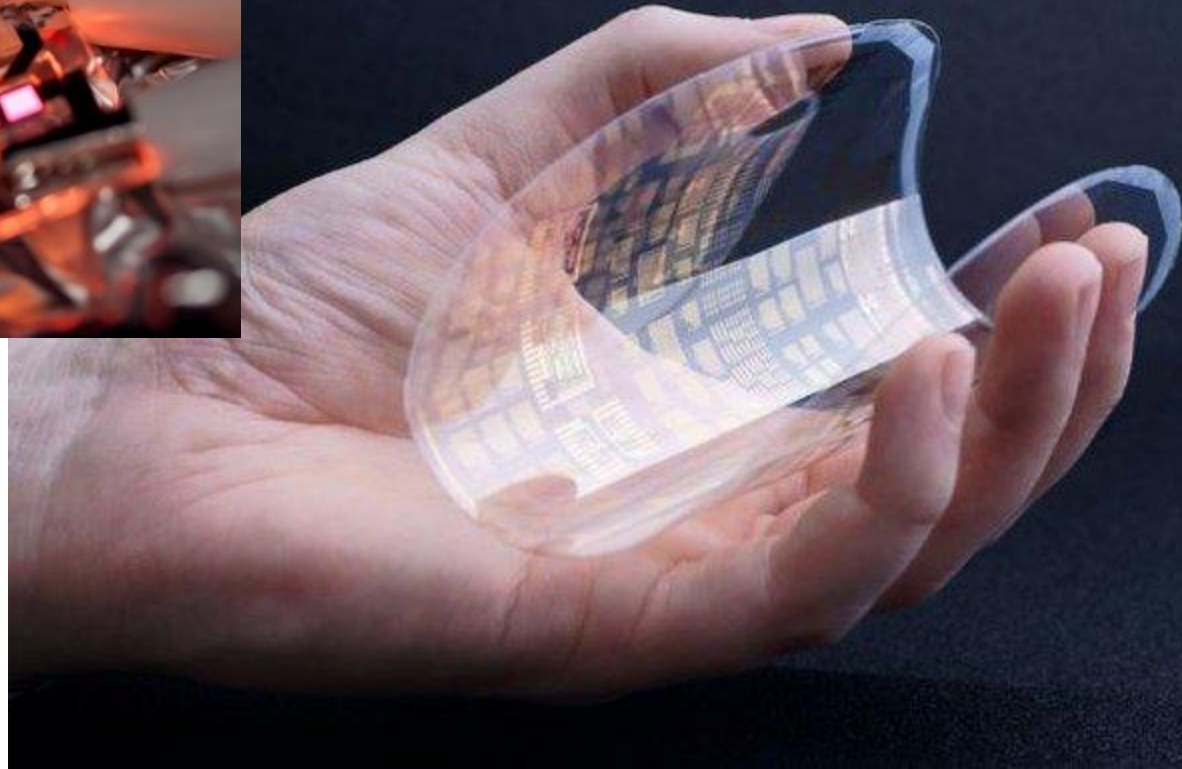
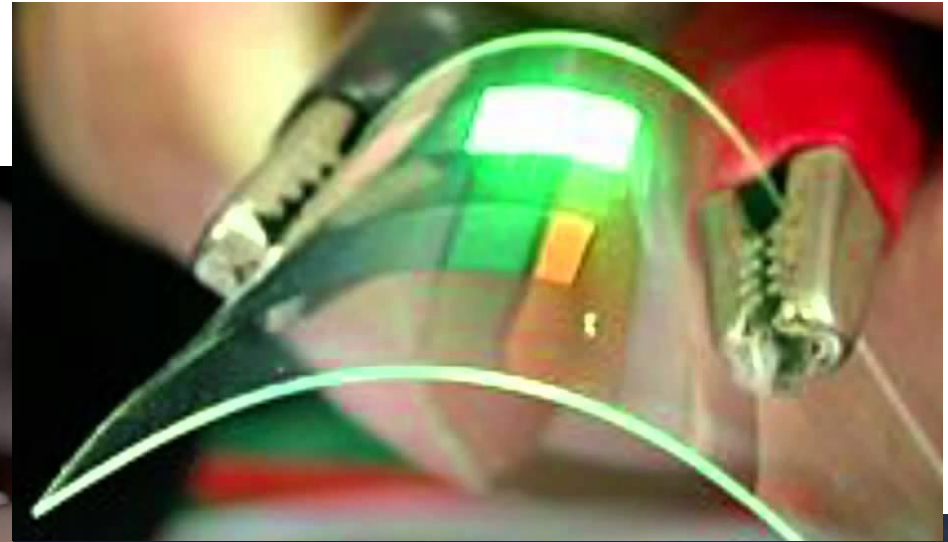
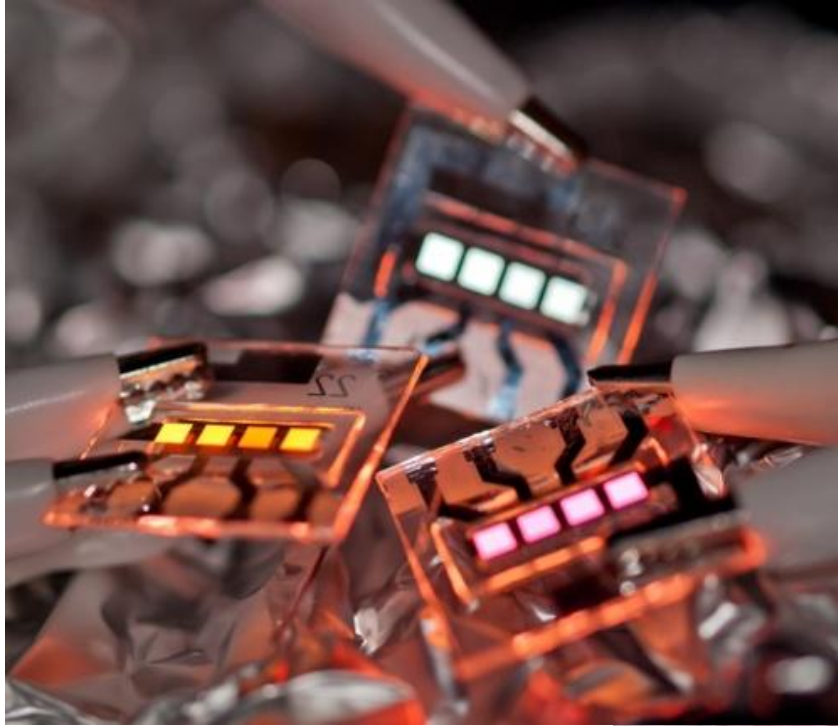
- Высокая стойкость к радиационному облучению некоторых органических полупроводников, делает возможным их использование в космосе.

- Создание транзисторов и датчиков, а также других полупроводниковых приборов.

- С ними связана перспектива создания сверхпроводников с высокой критической температурой.

OLED-телевизоры, OLED-мониторы, OLED-дисплеи, OLED-панели.

# 5. Органические полупроводники:



# 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,  
р-типа,  $\gamma_p$   
(содержит  
акцепторы)

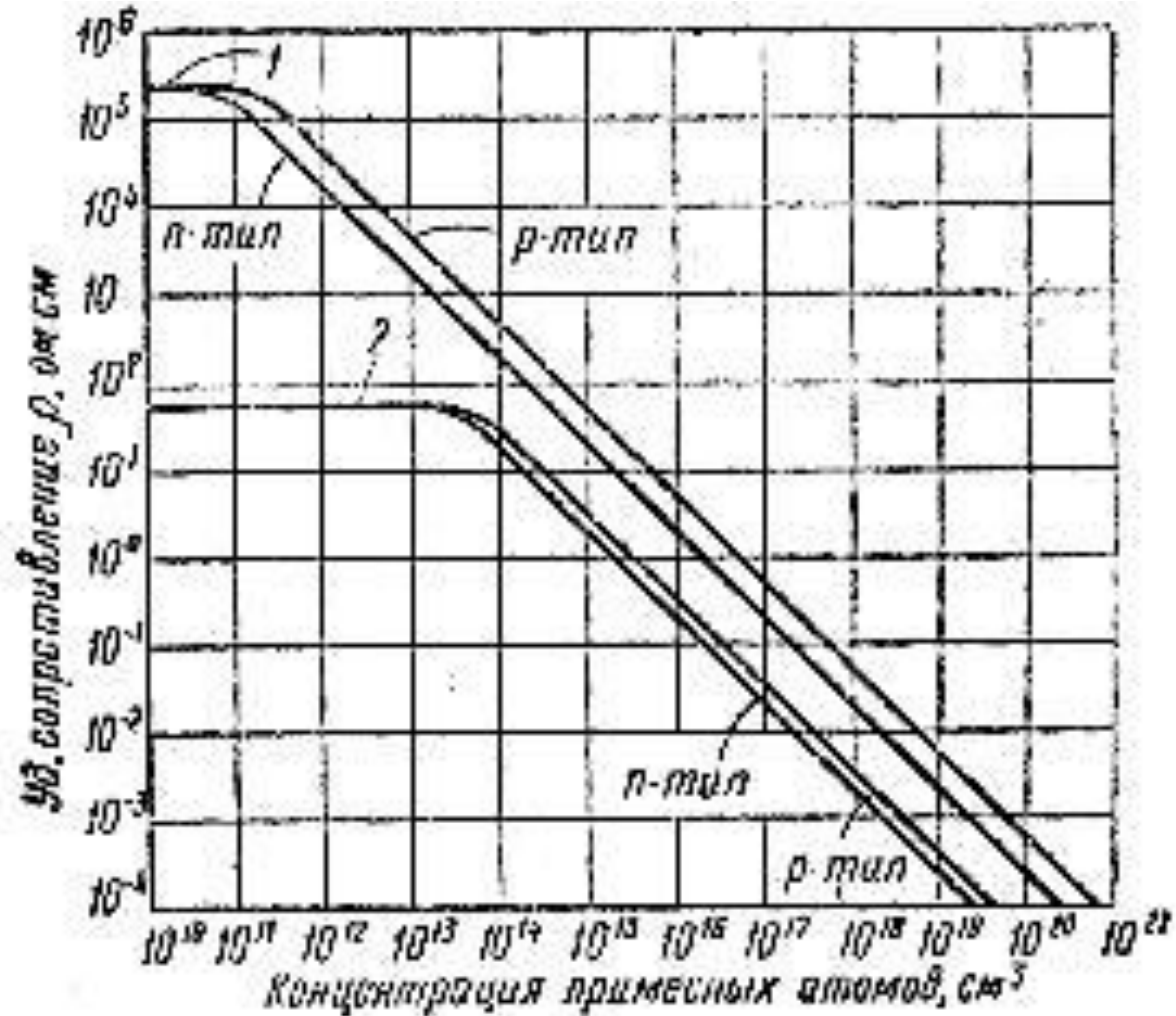
$$Y_n = q \cdot n \cdot u_n$$

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

Электронно-дырочный  
переход (р-n переход)

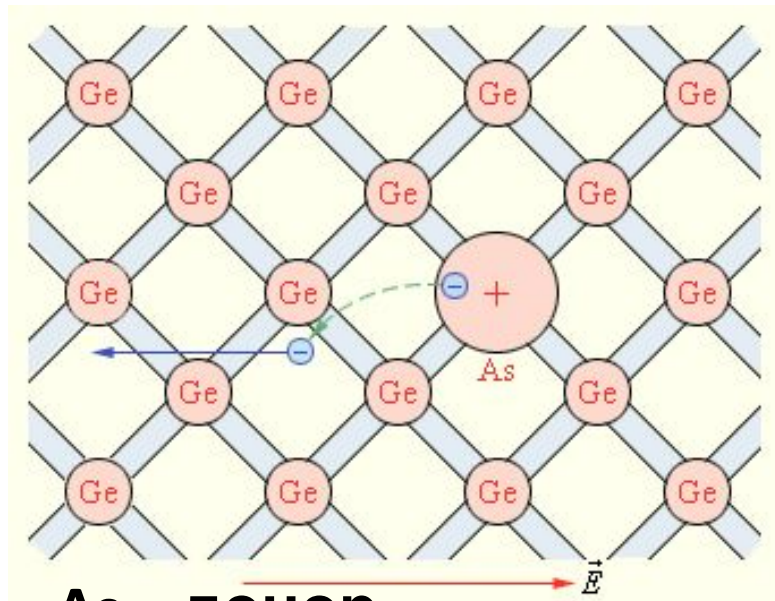


Влияние концентрации примесей на величину удельного сопротивления германия и кремния при комнатной температуре: 1 - кремний, 2 -



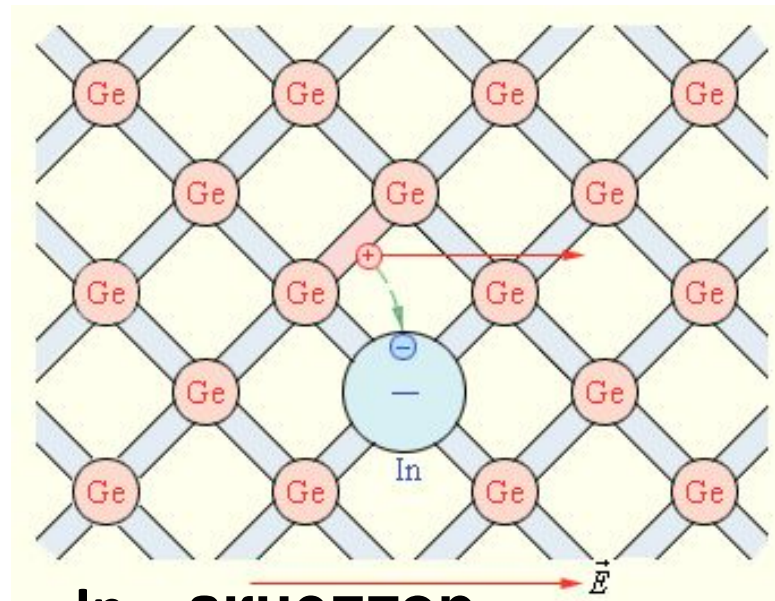
Кривые на рисунке показывают, что легирующие примеси оказывают огромное влияние на величину удельного сопротивления: у германия оно изменяется от величины собственного сопротивления  $60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  до  $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , т. е. в  $5 \cdot 10^5$  раз, а у кремния с  $3 \cdot 10^3$  до  $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , т. е. в  $3 \cdot 10^9$  раз.

# Атом примеси в полупроводнике Ge



As – донор

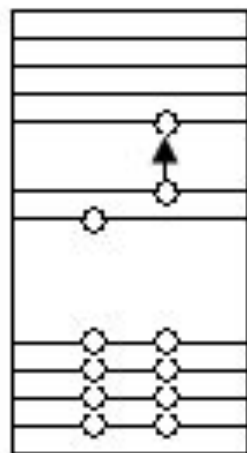
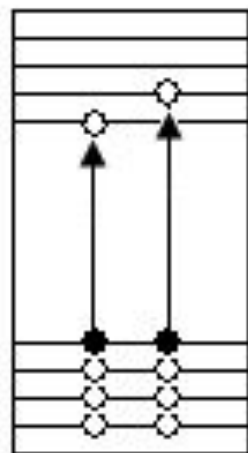
Валентность 5



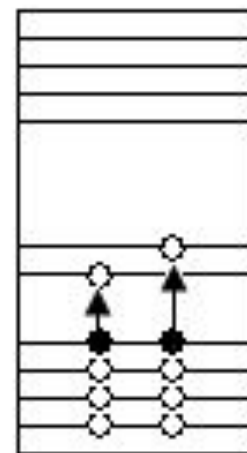
In – акцептор

Валентность 3

Зона проводимости  
Запрещенная зона  
Валентная зона

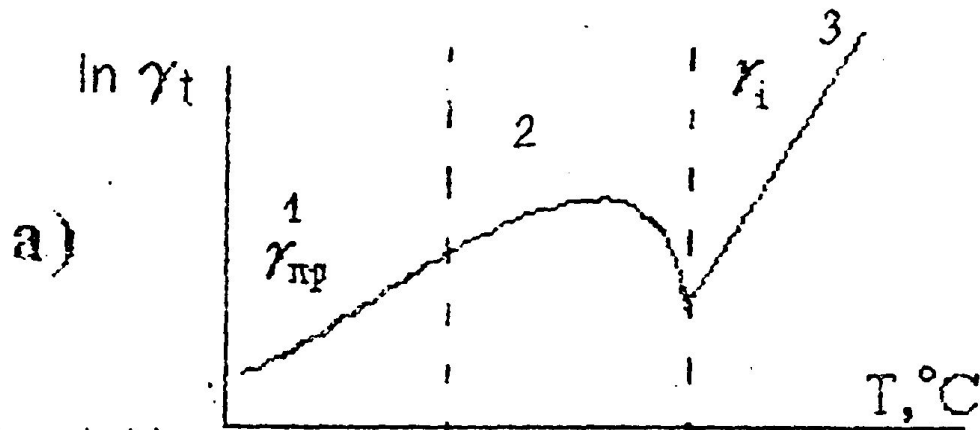


Wпр Д  
зона прим.  
(донор)

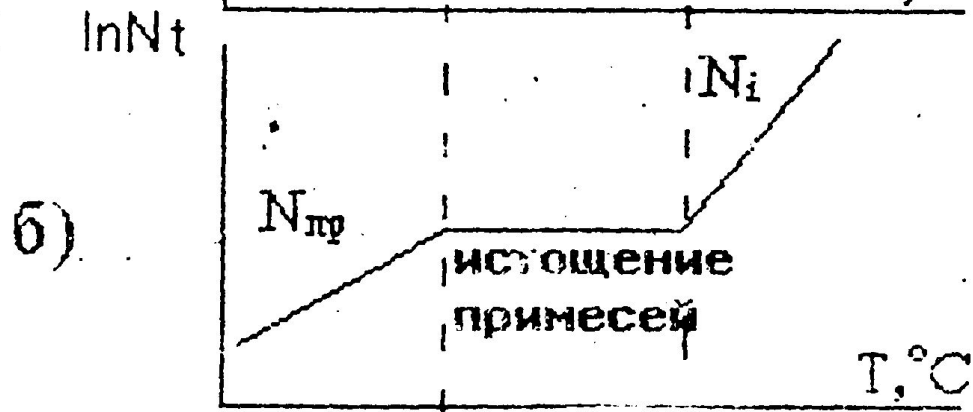


Wпр А  
зона прим.  
(акцептор)

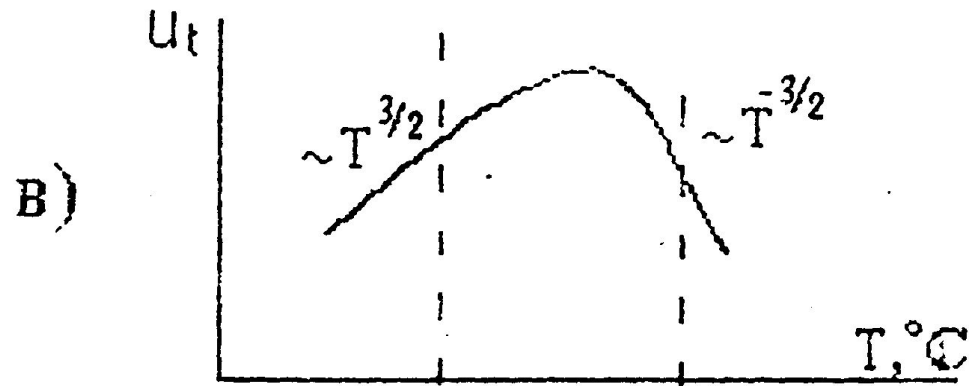
# Влияние температуры



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

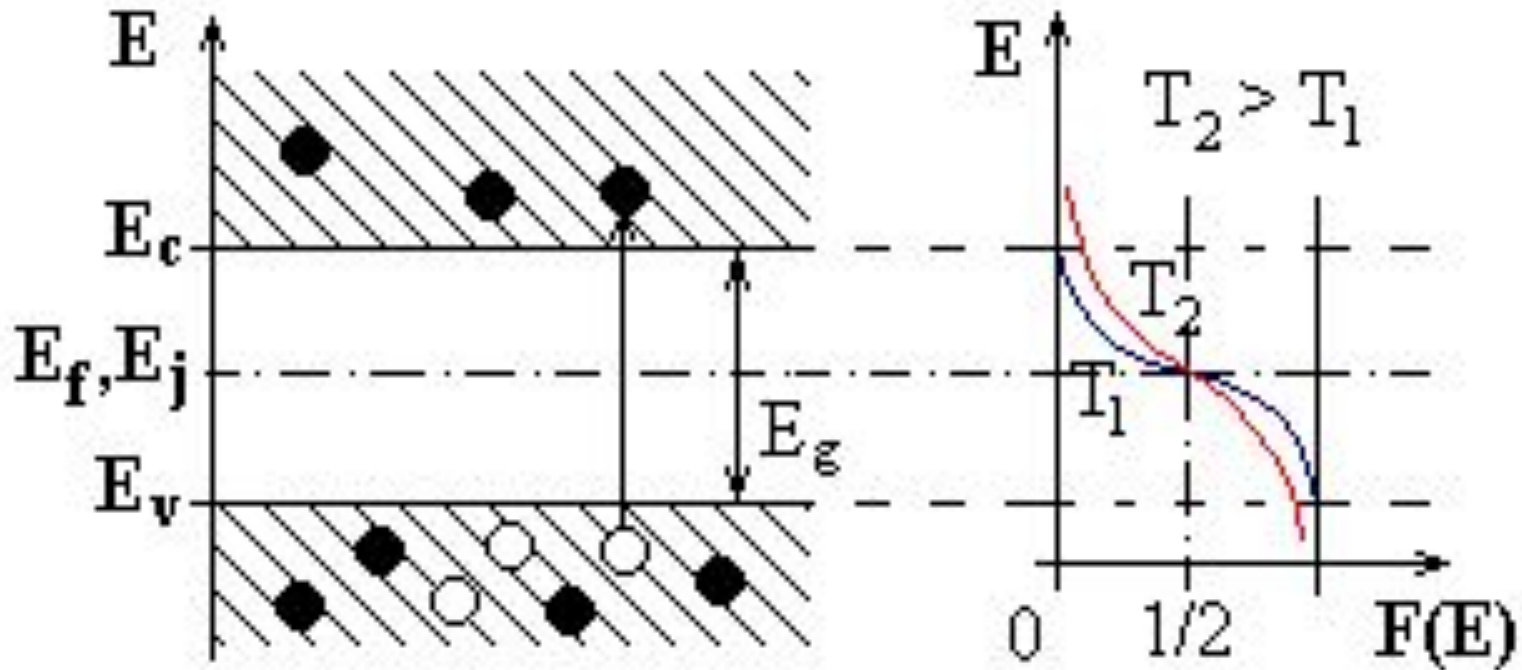


$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}$$



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

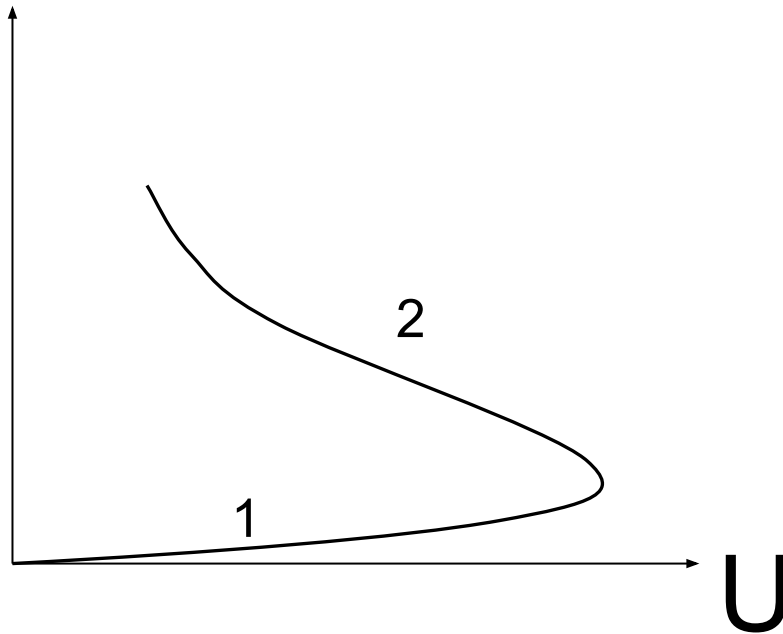
# Влияние температуры



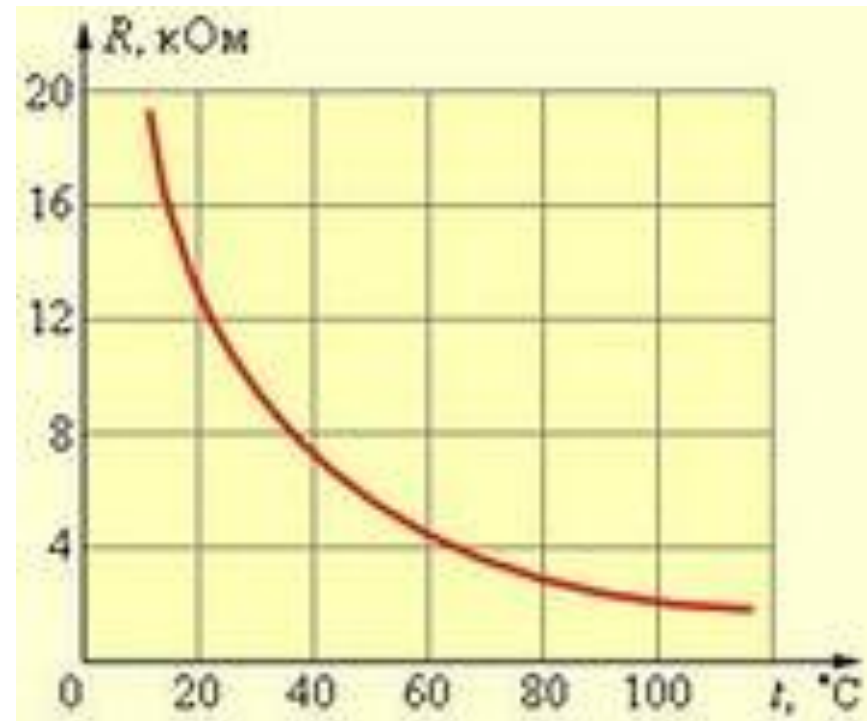
**Энергетическая диаграмма и функция вероятности заполнения энергетических уровней для собственного полупроводника  $F(E)$**

# Влияние температуры

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



Вольт-амперная характеристика терморезистора



Зависимость сопротивления терморезистора от температуры

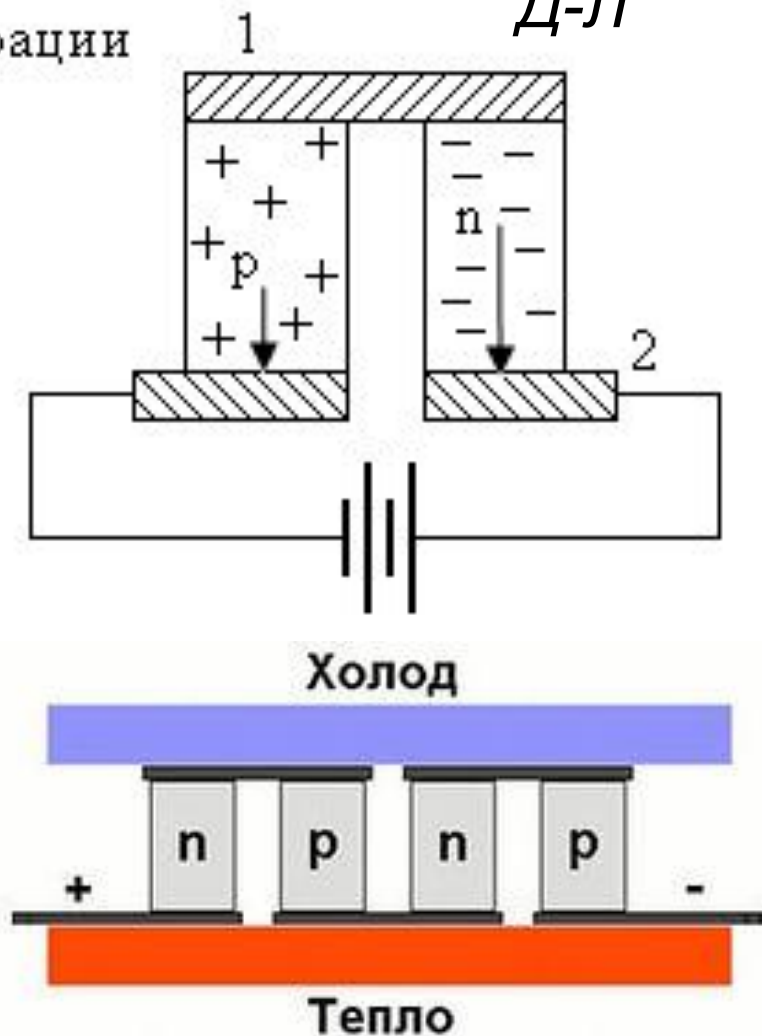
# Термоэлементы эффект Пельтье

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

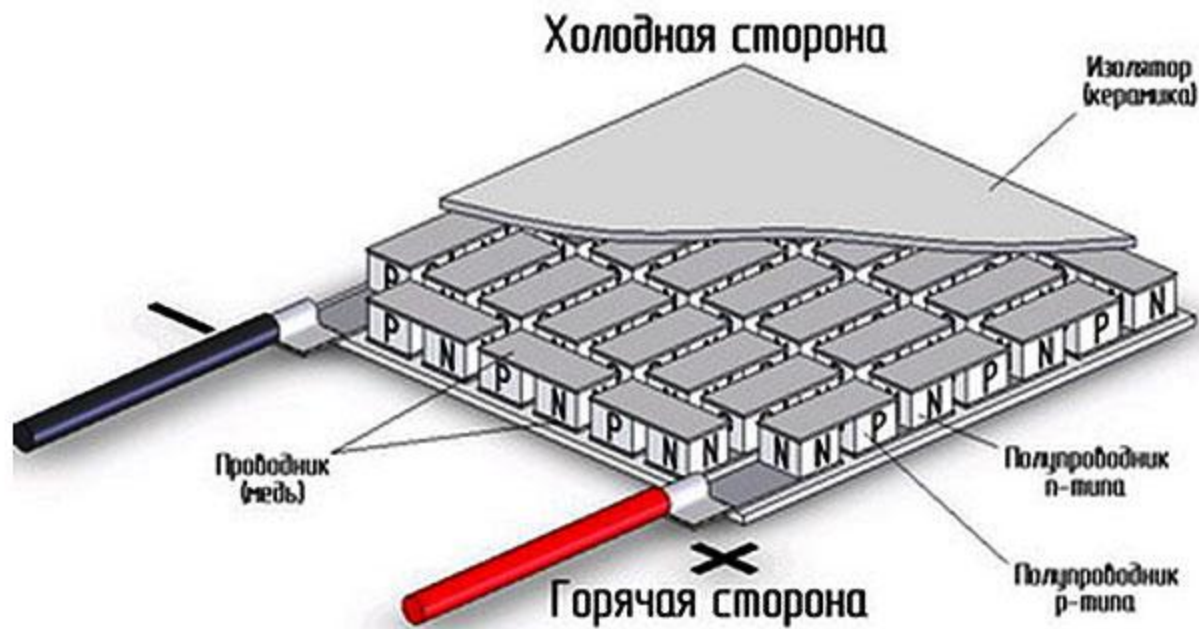
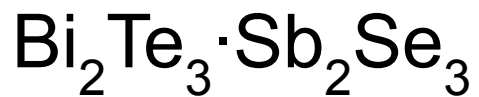
$$Q_{Д-Л} = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

Охлаждение за  
счет генерации  
p-n пар

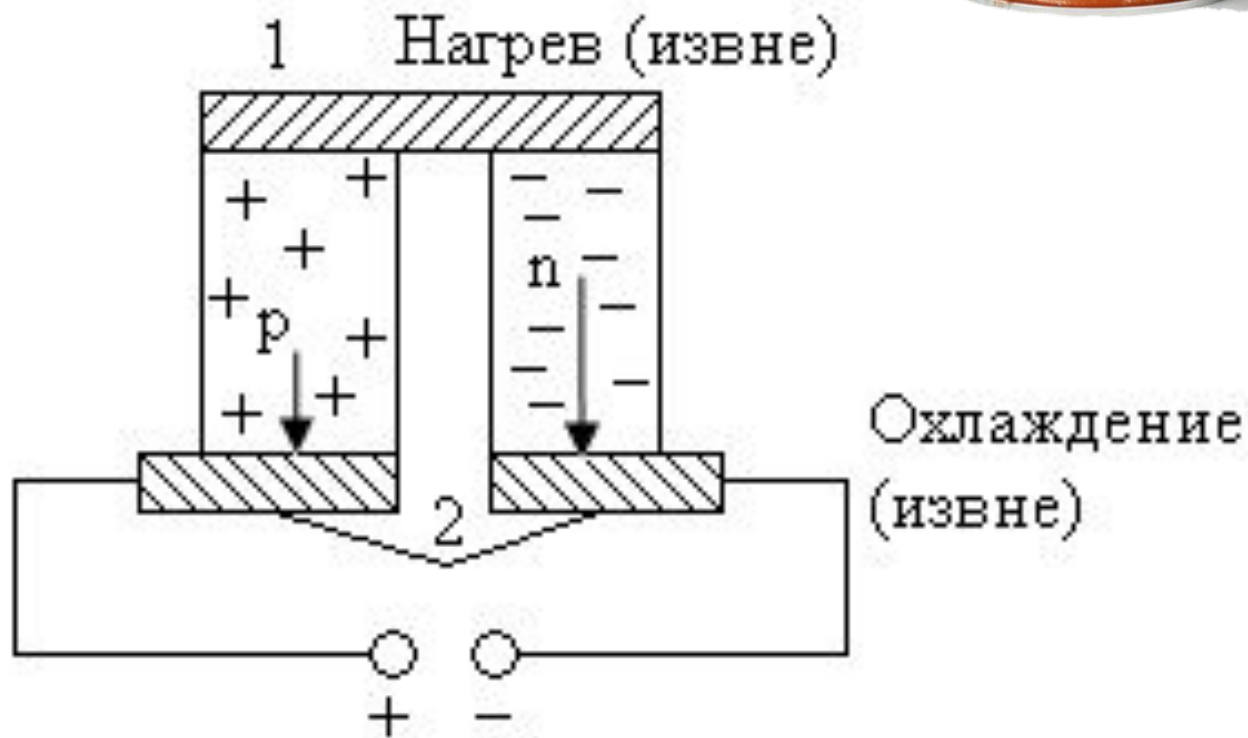
Нагрев за счет  
рекомбинации  
p-n пар



# Термоэлементы элемент Пельтье



# Термоэлементы эффект Зеебека



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



# Электронно-дырочный (или p-n) переход

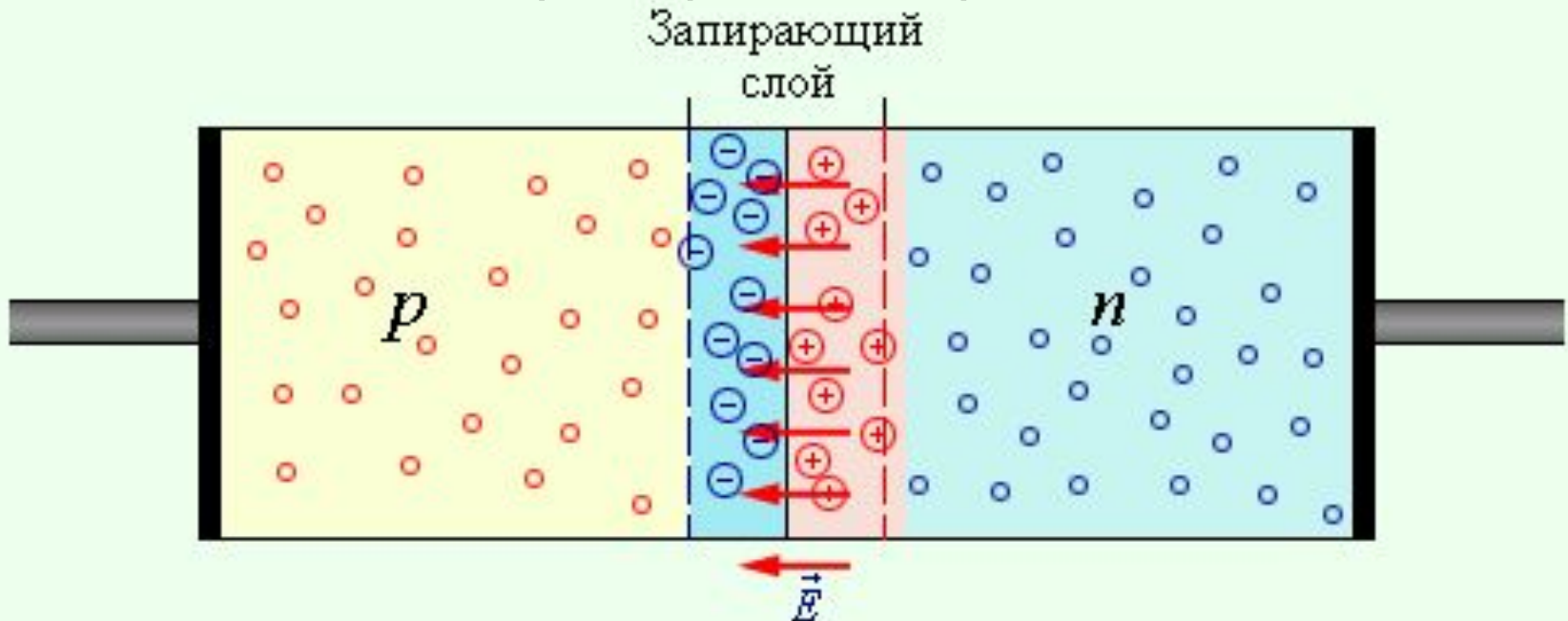
$$n_n \gg p_n \text{ и } p_p \gg n_p$$

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

где  $D$  – коэффициент диффузии;

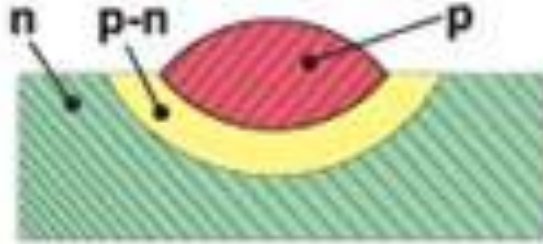
$N$  – градиент концентрации носителей заряда;

$q$  – заряд электрона.

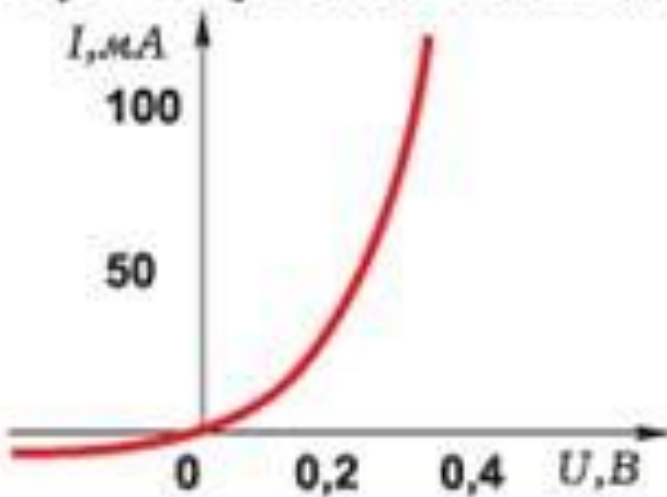


# Электронно-дырочный (или p-n) переход

## Образование p-n перехода



## Вольт-амперная характеристика диода



## Устройство диода



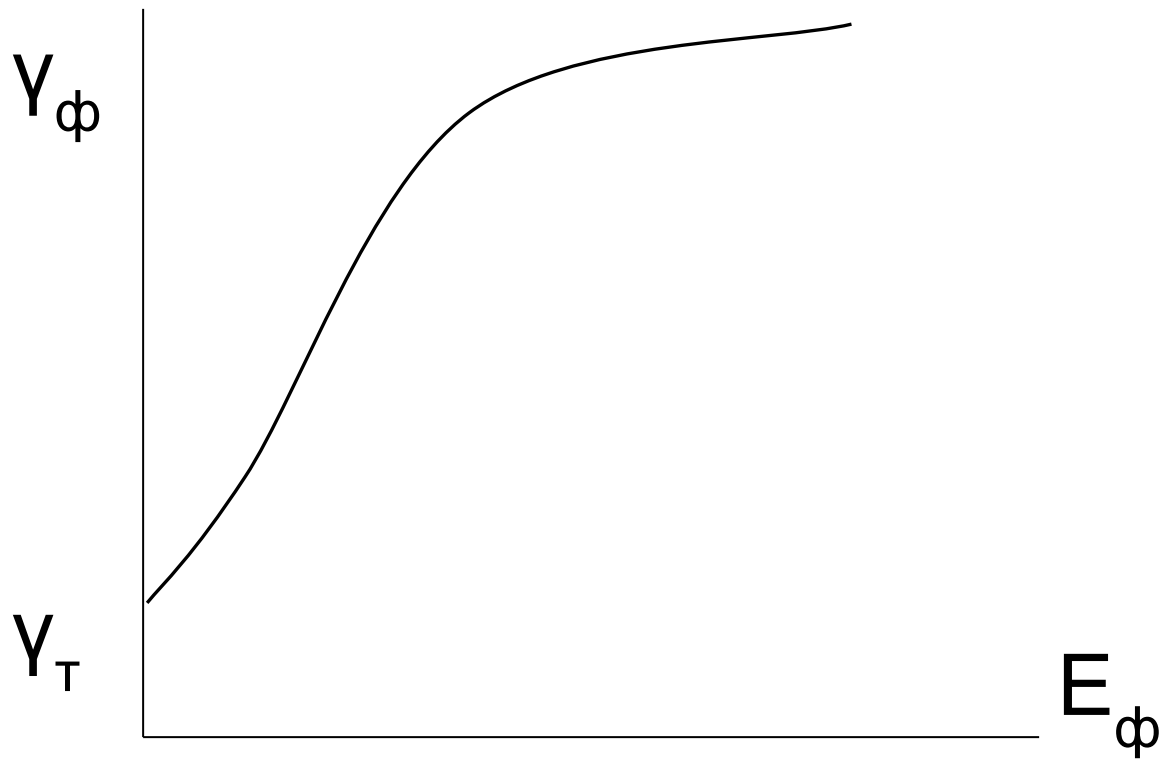
Изображение диода на схемах



**Внутренним фотоэффектом** называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в полупроводниках, происходящее под действием излучений.

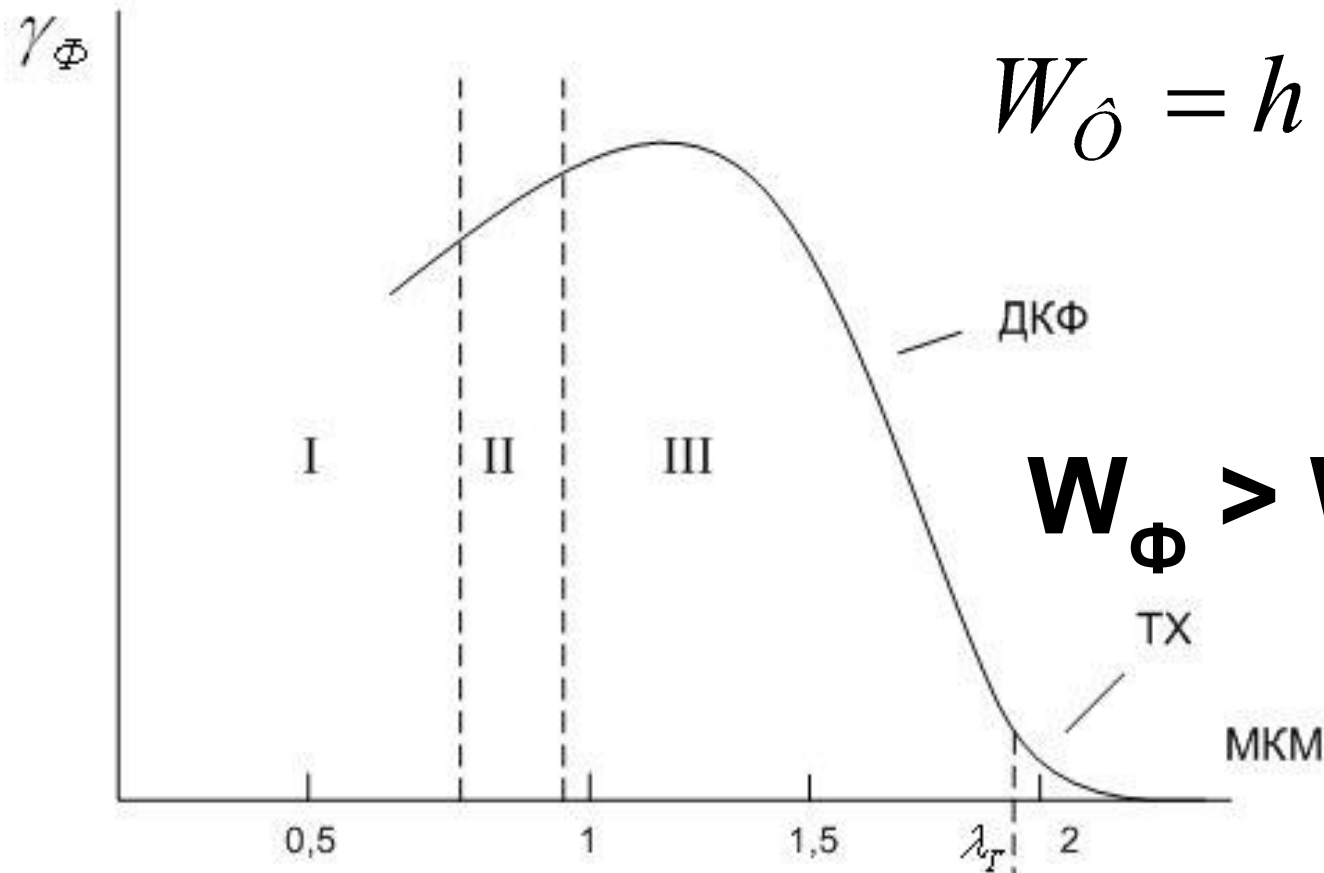
$$W_{\phi} > W_g$$

Он проявляется в изменении концентрации носителей зарядов в среде и приводит к возникновению *фотопроводимости* или *вентильного фотоэффекта*.



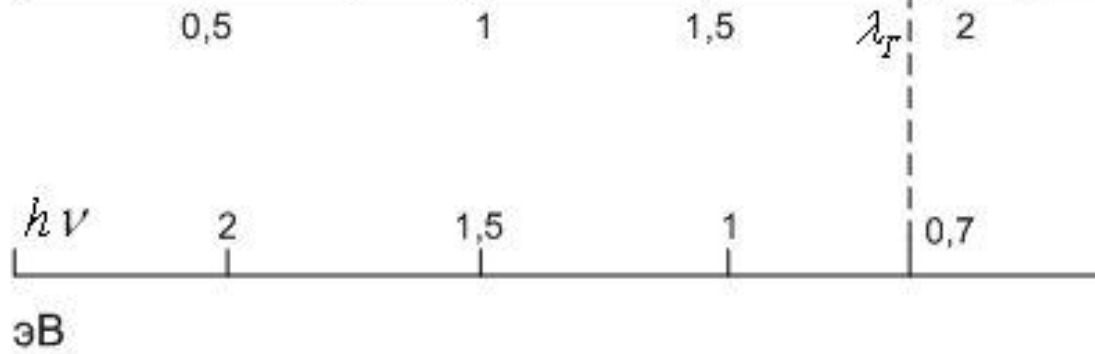
Интегральная характеристика  
фотосопротивления  
(фотопроводимости полупроводника)

# Воздействие света на электропроводность ПП-ков.



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

$$W_{\Phi} > W_g$$



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

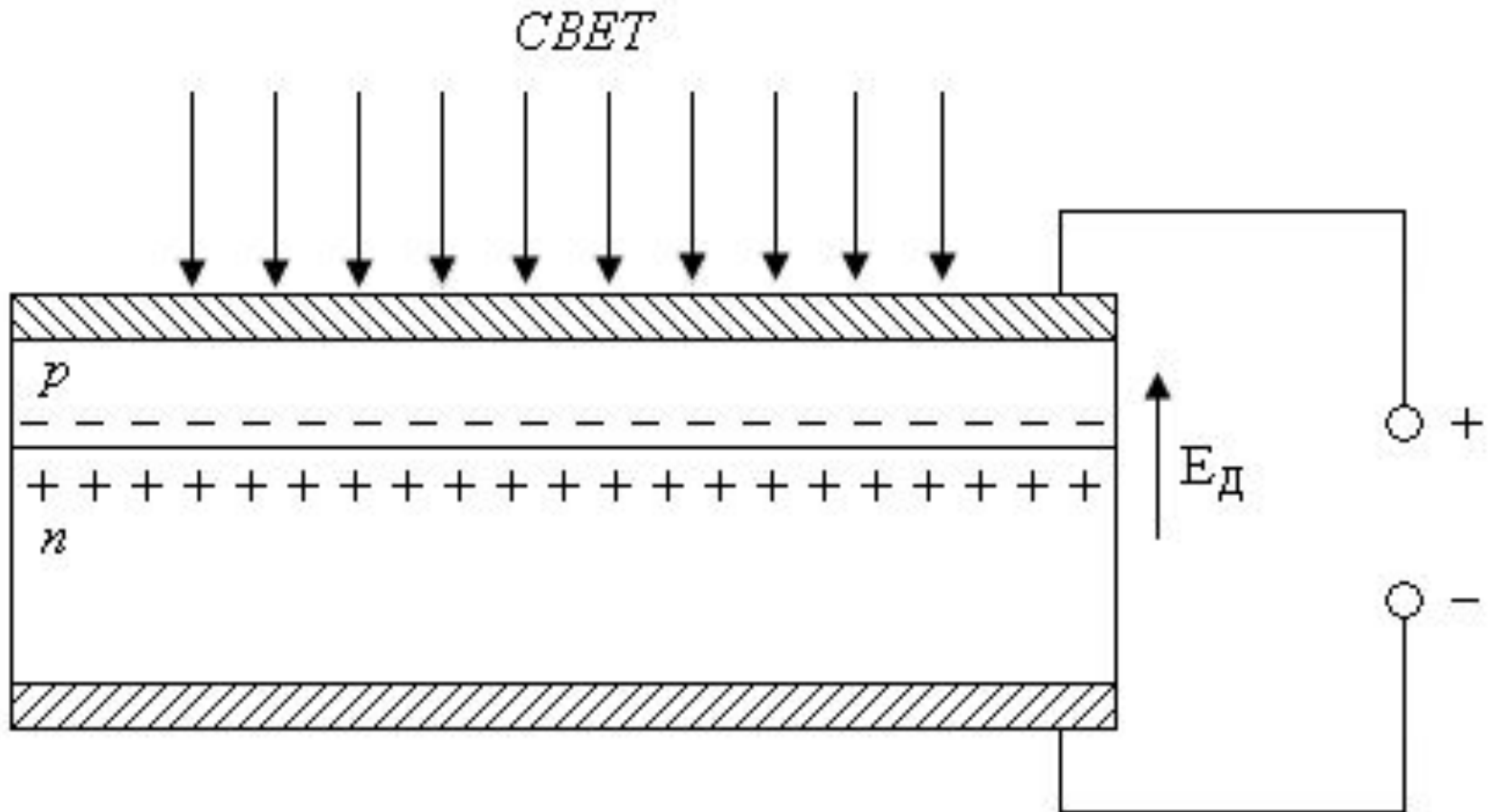
Электронно-дырочный (р-n) переход

+

фотоэффект

=

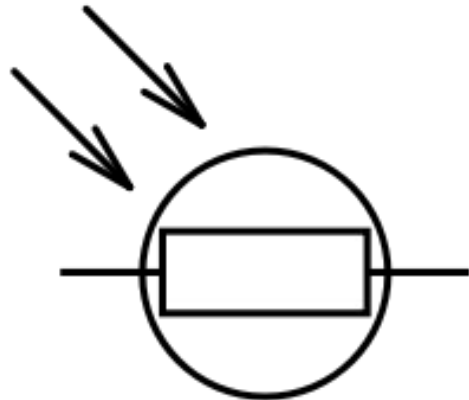
Фотоэлектрический эффект (вентильный)



# Фоторезисторы

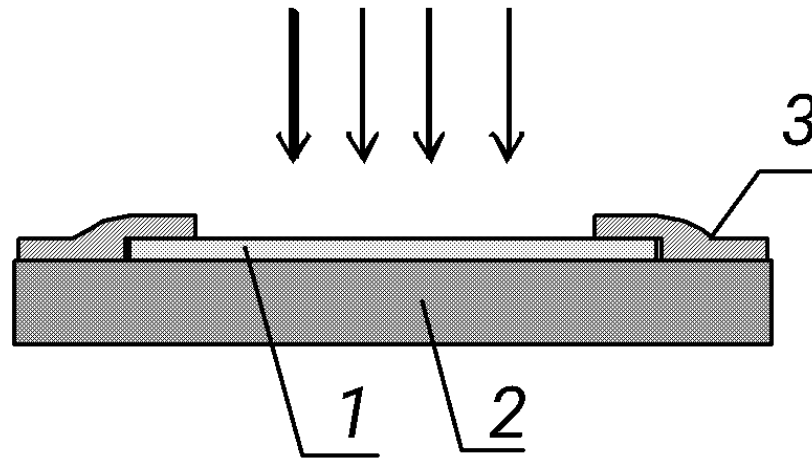
**Фоторезисторы** – это фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения, принцип действия которых основан на **эффekte фотопроводимости**.

Эффект фотопроводимости (фоторезистивный эффект) заключается в уменьшении электросопротивления полупроводникового материала при освещении.



# Фоторезисторы

Поток  
излучения



Принципиальное устройство  
фоторезистора

- 1 – светочувствительный полупроводниковый слой,
- 2 – изоляционное основание,
- 3 – металлические электроды



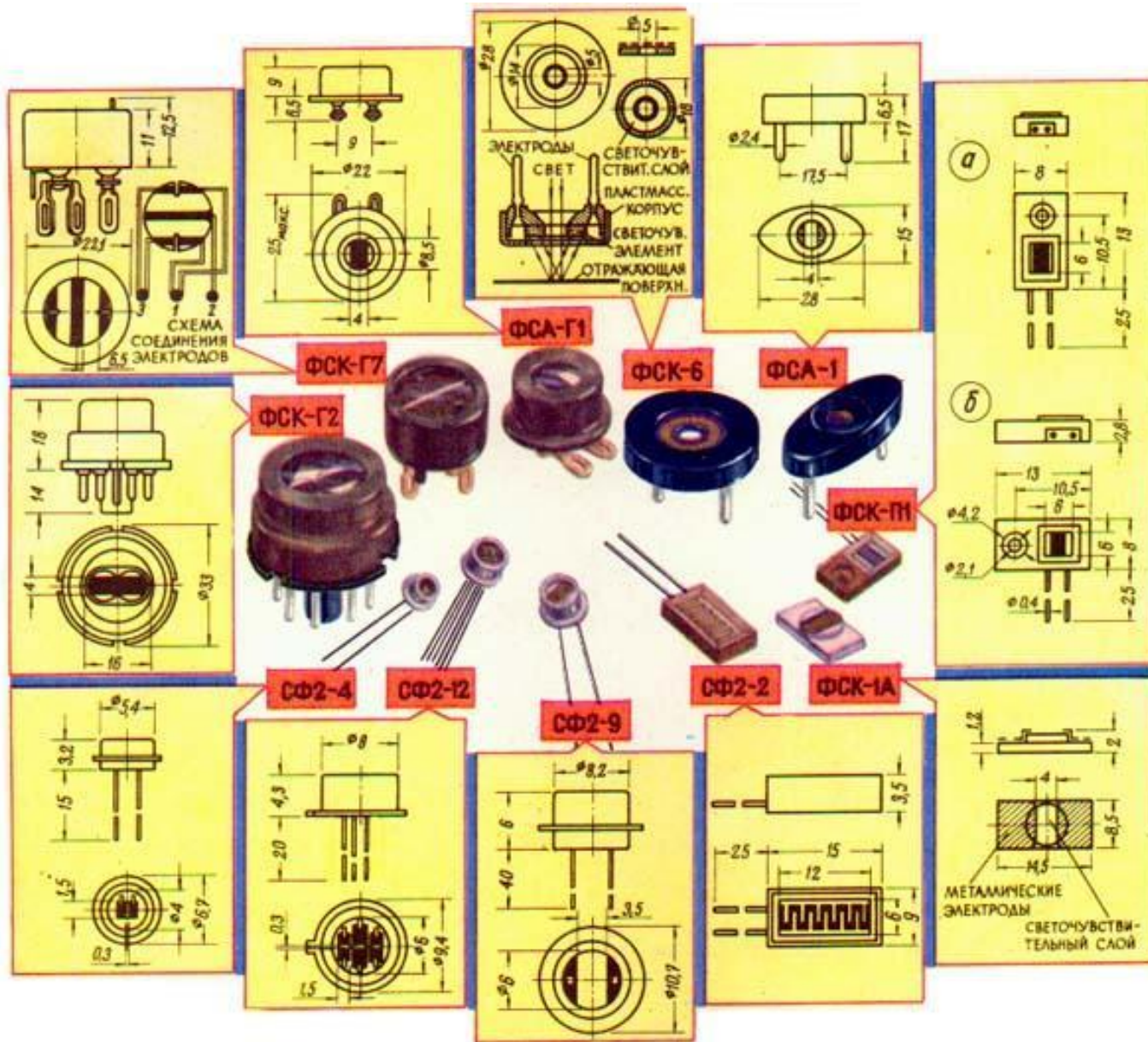
# Фоторезисторы

Наиболее распространенными являются фоторезисторы на основе сернистого свинца (PbS), селенистого свинца (PbSe), сернистого кадмия (CdS) и селенистого кадмия (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 фоторезистора**



<http://elektrik.info>



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

# Характеристики фоторезисторов

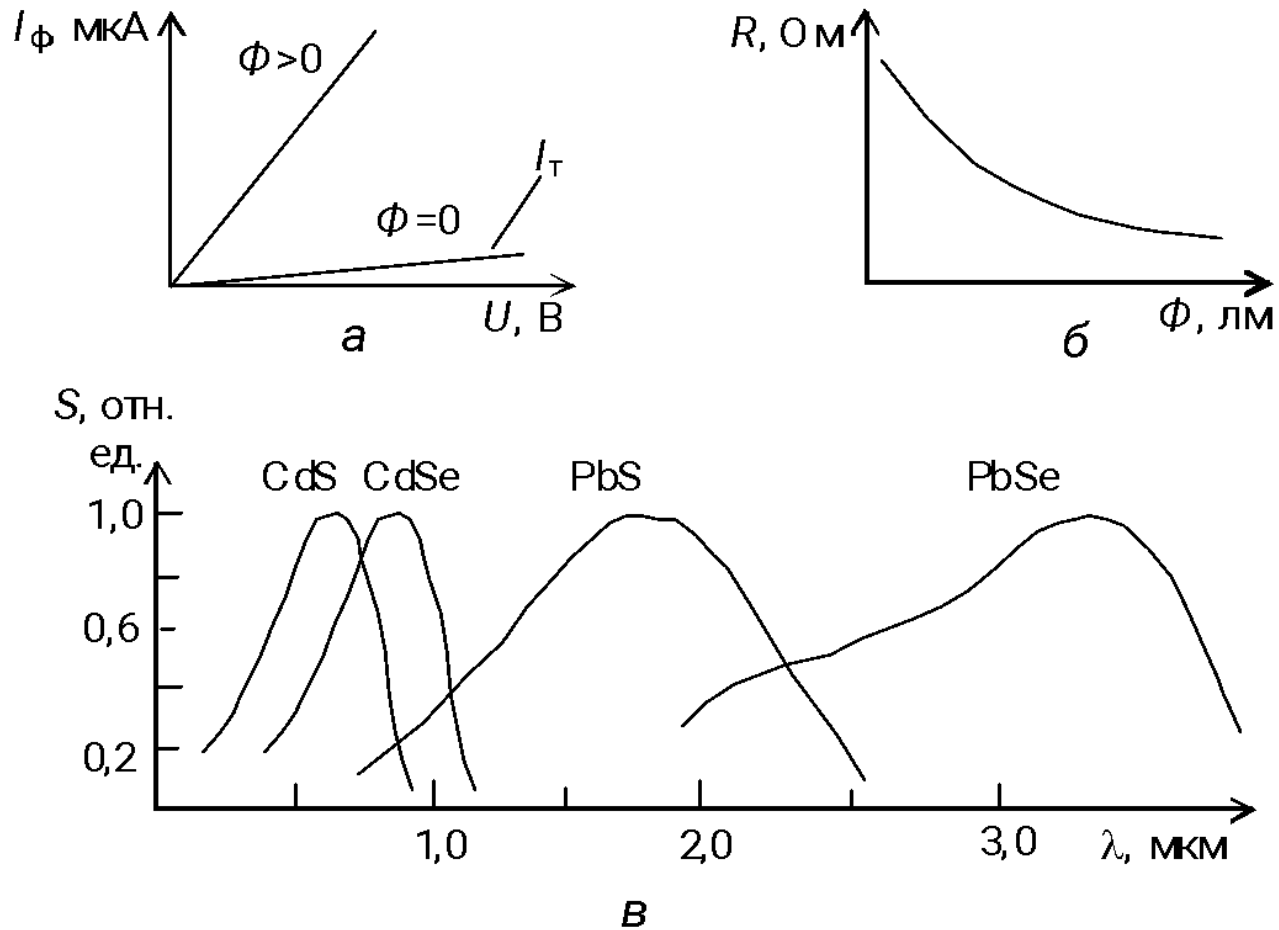


Рис. 7.16. Характеристики фоторезисторов: а – вольтамперные характеристики; б – функциональная характеристика  $R = f(\Phi)$ ; в – спектральные характеристики различных фоточувствительных элементов

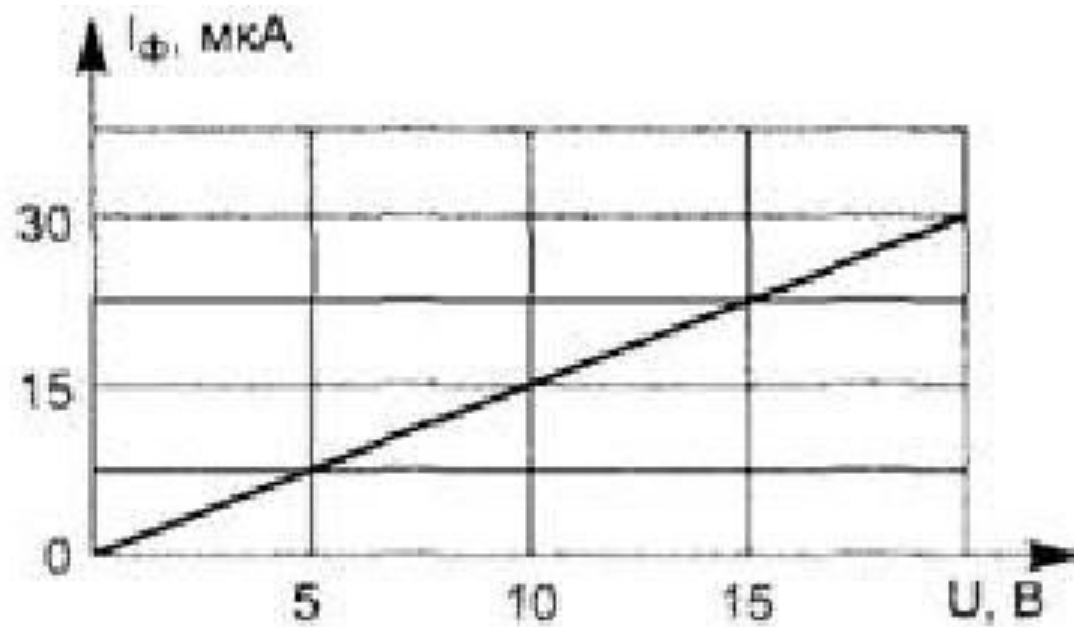


Рис.2 Вольт-амперная характеристика фоторезистора.

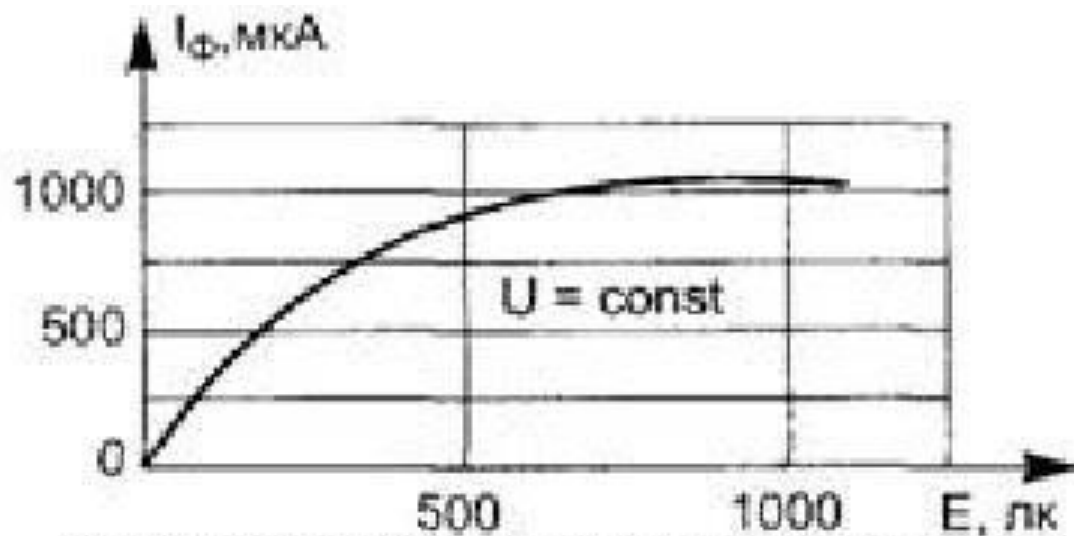


Рис.3 Световая характеристика фоторезистора

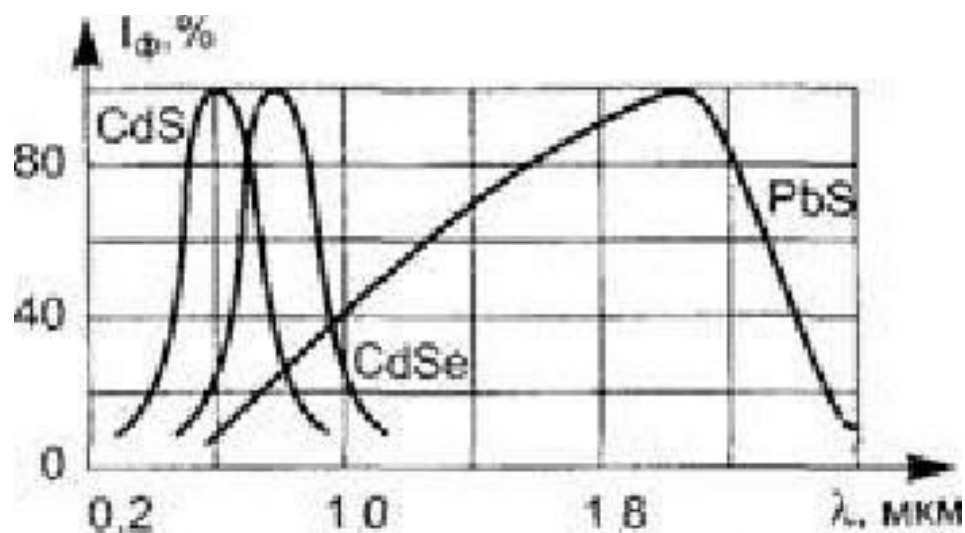


Рис.4 Спектральные характеристики фоторезистора.

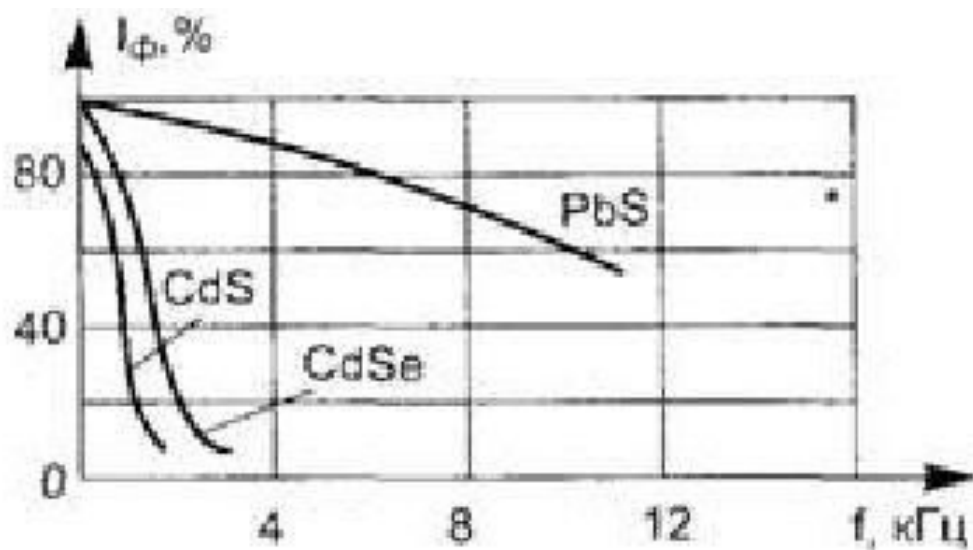


Рис.5 Частотные характеристики фоторезистора.

# 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  $R_{св}$  измеренному при освещенности в 200 лк. Значение отношения  $R_T/R_{св}$  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  $R_T/R_{св}$  постоянно и равно 1,2 отн. Ед.

# Параметры фоторезисторов 2

**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  $P_n$**  – 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  $P_n$  для фоторезисторов невелико и составляет 0,01...0,35 Вт.



# Параметры фоторезисторов 3

**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 4

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  $K$  – 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);

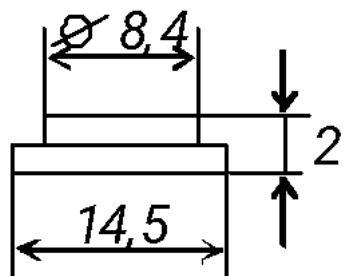
СФ3 – селенисто-кадмиевые (ранее обозначались ФСД);

СФ4 – на основе селенида свинца.

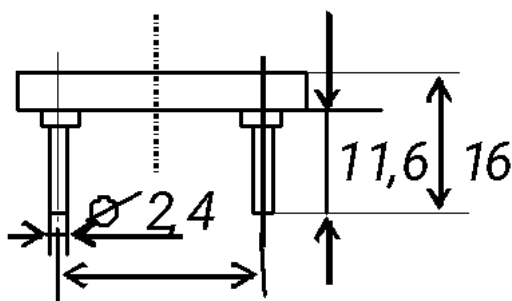
Далее через дефис указывается номер разработки и вариант конструктивного исполнения.

# Конструкции фоторезисторов

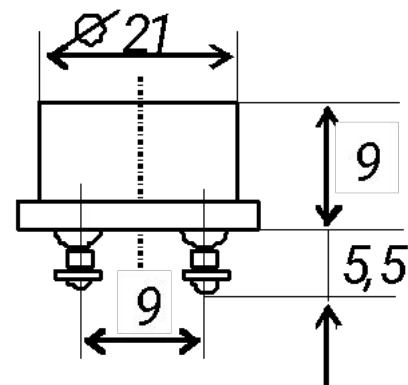
ФСК-0, ФСК-1а



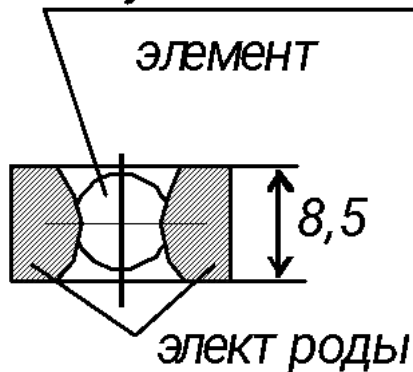
ФСК-1, ФСК-М1



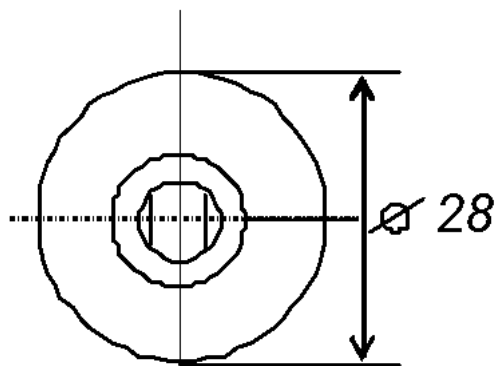
ФСК-Г1



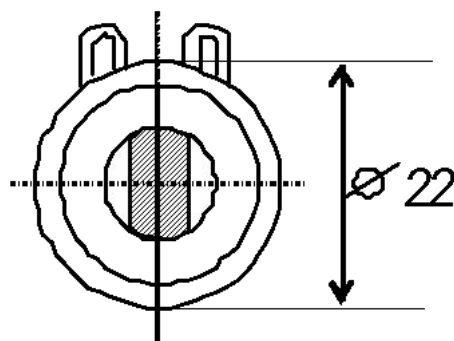
фоточувствительный элемент



а



б



в

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

# Оптопары

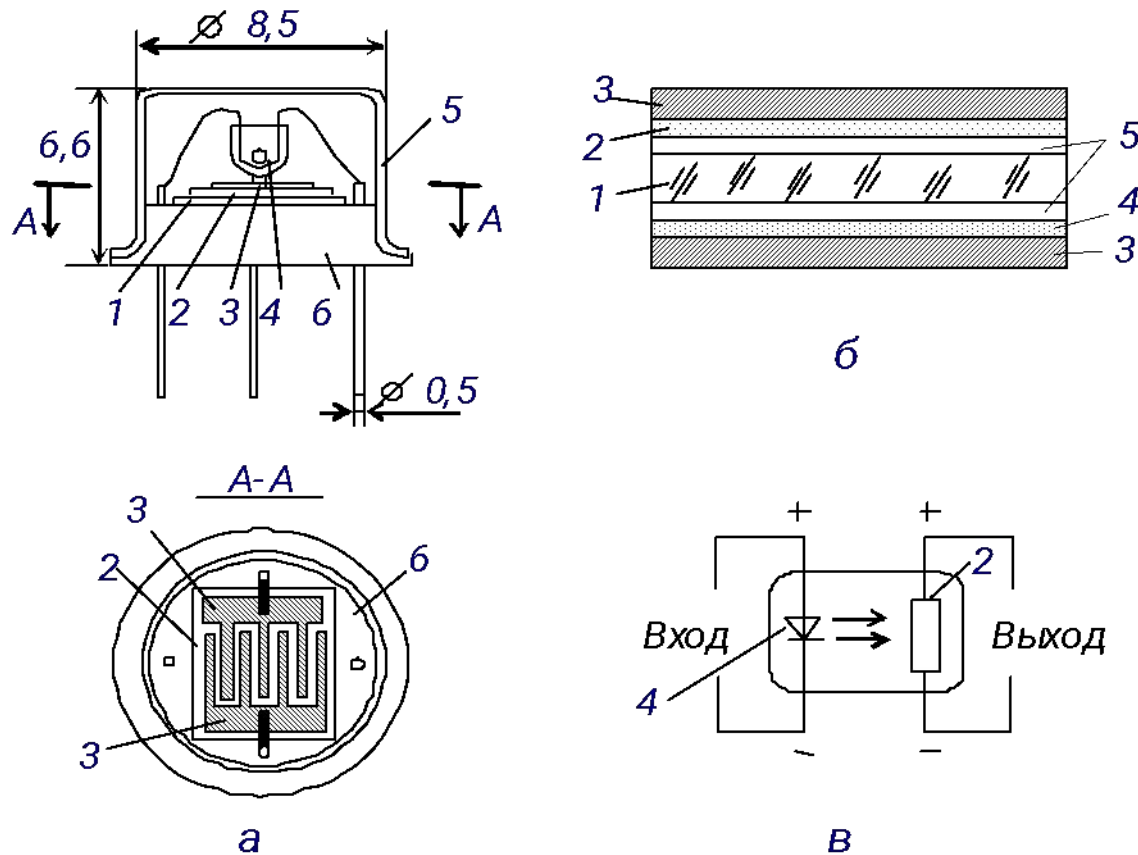


Рис. 7.18. Устройство резисторных оптронов

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!

