

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 γ_i

↓

Примесная,
n-типа, γ_n
(содержит
доноры)

↓

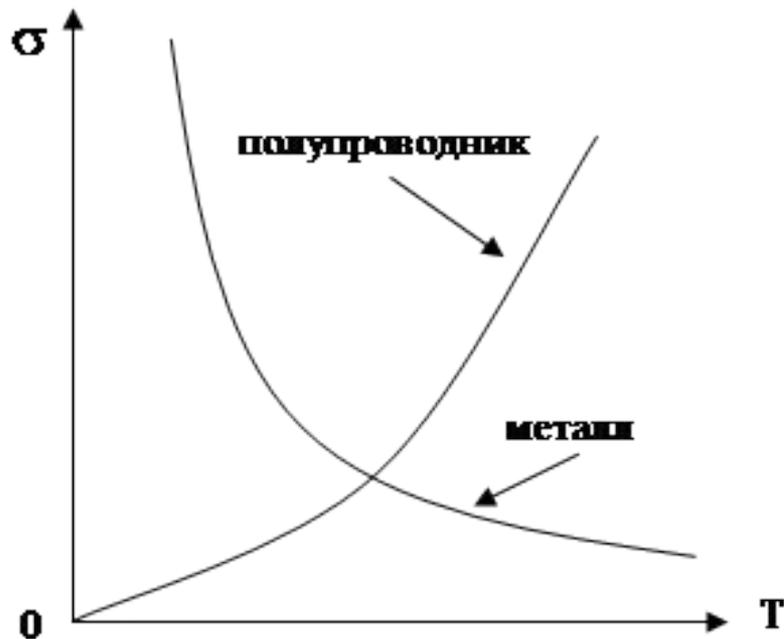
Примесная,
p-типа, γ_p
(содержит
акцепторы)

↓

↓

Электронно-дырочный
переход (p-n переход)

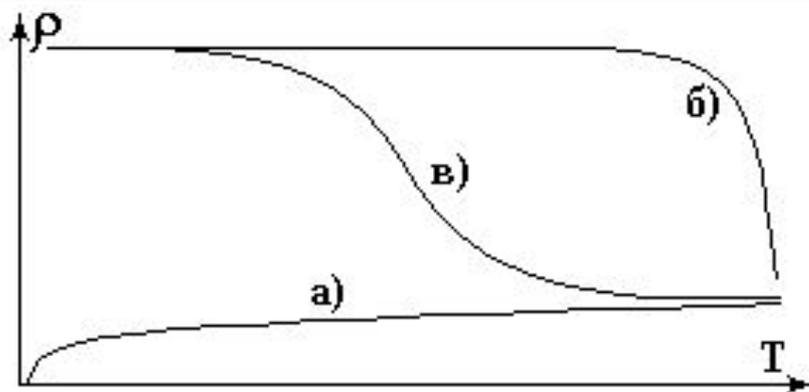
Зависимость проводимости от температуры



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

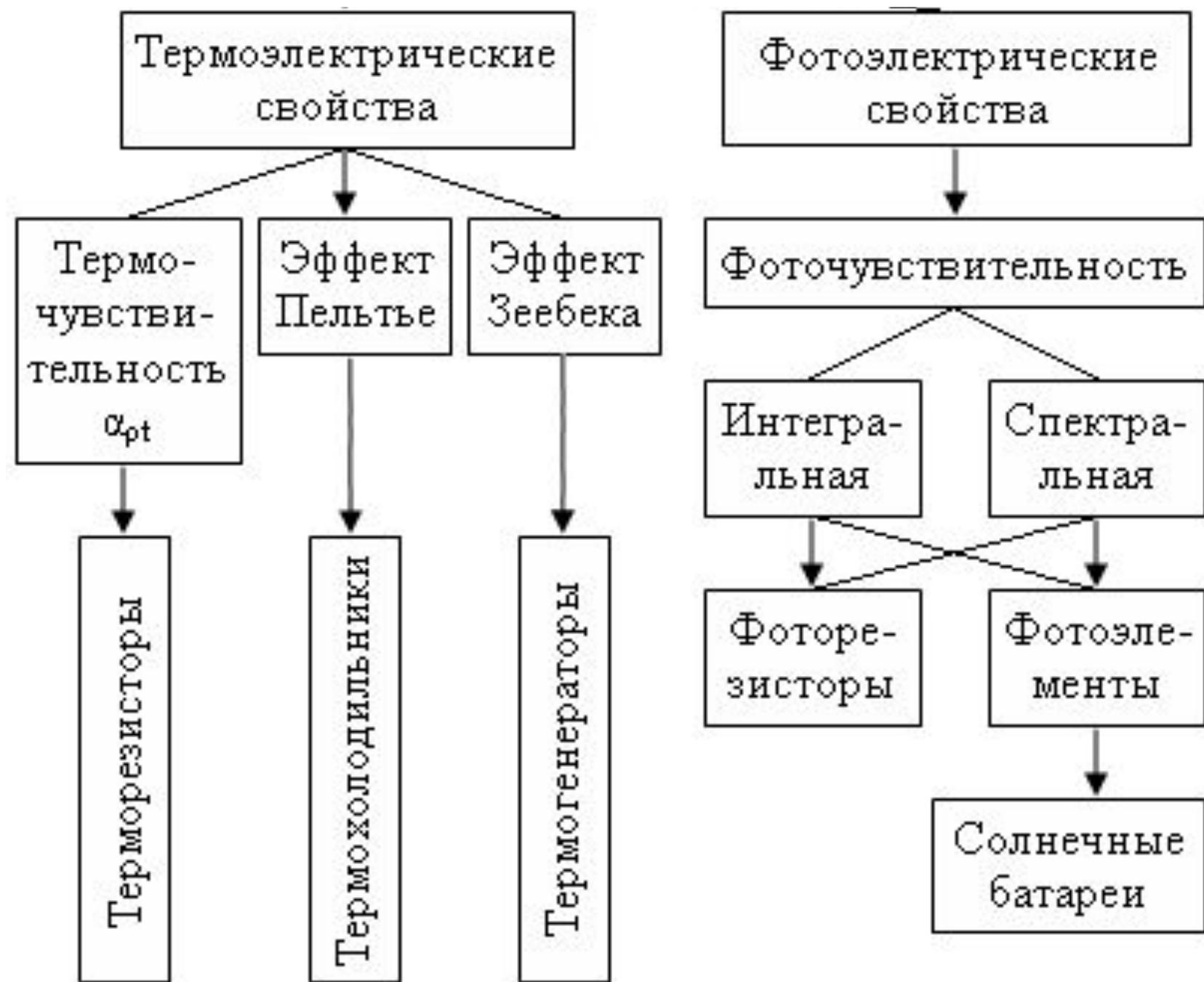
$$E_k = 0,04 \text{ эВ}$$

при $T=20^\circ\text{C}$

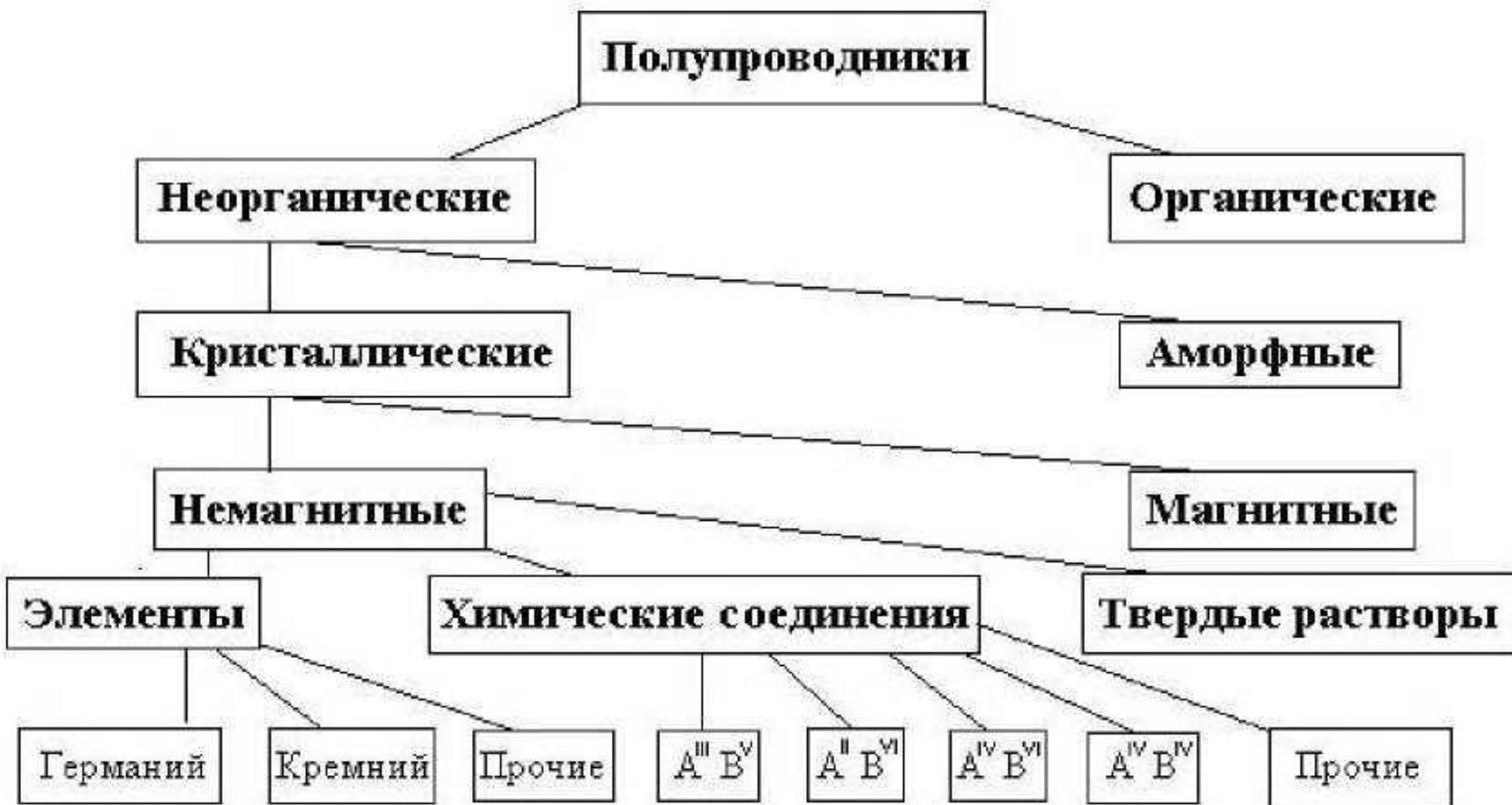


$$\rho = 1/\sigma$$

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



Классификация



Классификация

Полупроводники

Неорганические
(кристаллические,
аморфные)

Органические

Простые

Соединения

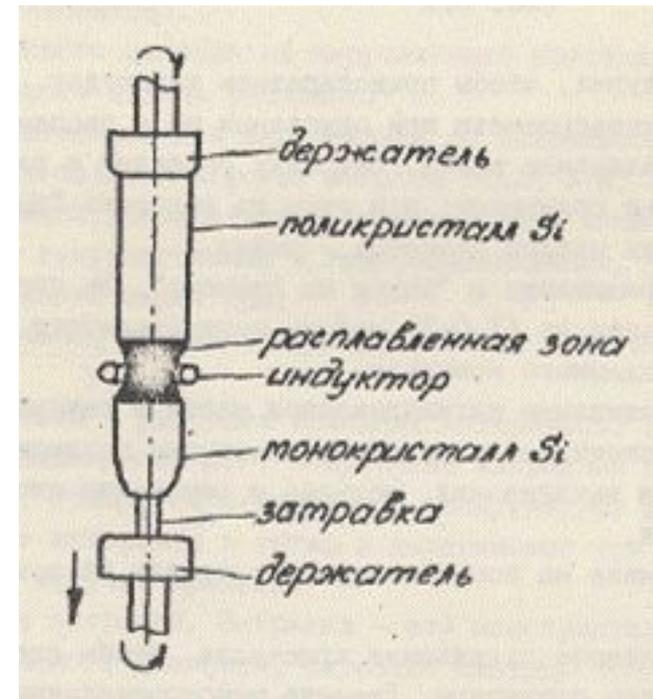
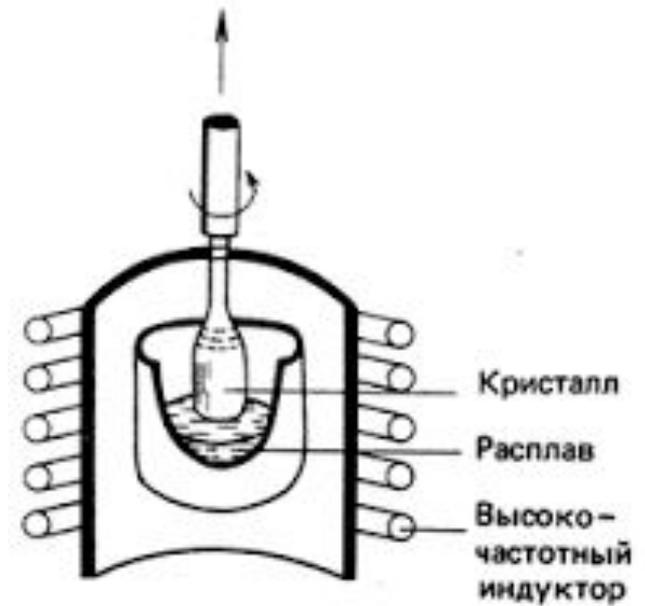
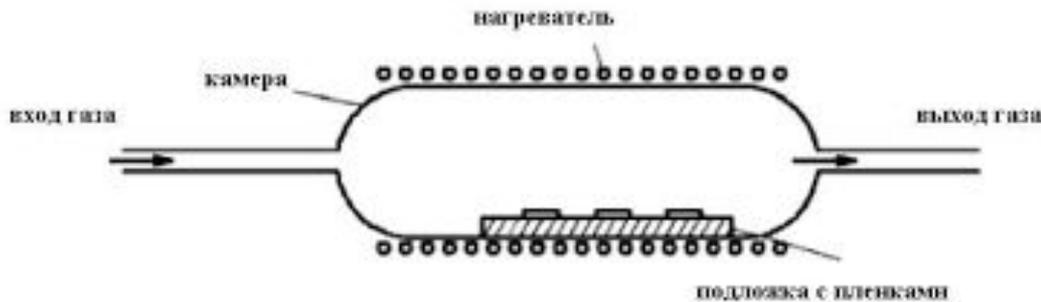
Si, Ge, Sb, Te, B, I, Se



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.



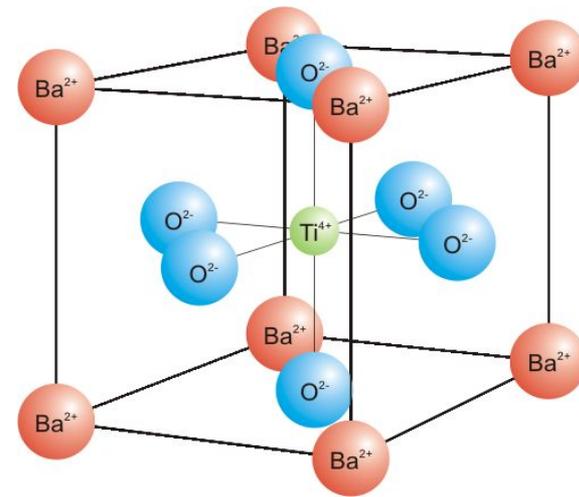
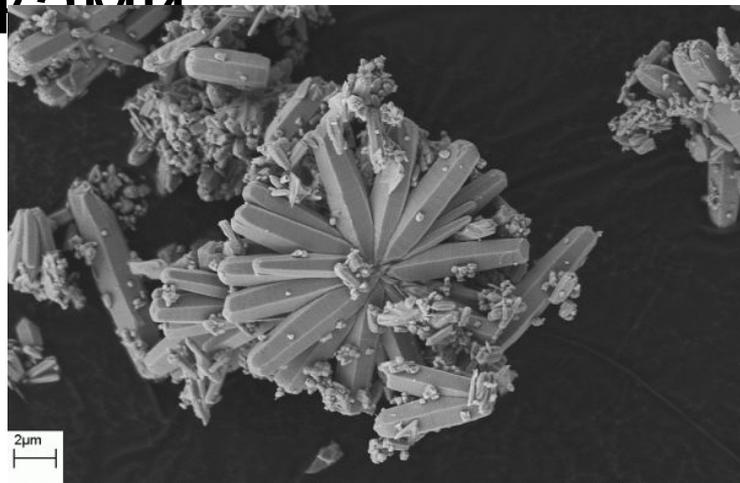
B БОР	C УГЛЕРОД	N АЗОТ	O КИСЛОРОД	F ФТОР	Ne НЕОН
Al АЛЮМИНИЙ	Si КРЕМНИЙ	P ФОСФОР	S СЕРА	Cl ХЛОР	Ar АРГОН
Ga ГАЛЛИЙ	Ge ГЕРМАНИЙ	As МЫШЬЯК	Se СЕЛЕН	Br БРОМ	Kr КРИПТОН
In ИНДИЙ	Sn ОЛОВО	Sb СУРЬМА	Te ТЕЛЛУР	I ИОД	Xe КСЕНОН
Tl ТАЛЛИЙ	Pb СВИНЕЦ	Bi ВИСМУТ	Po ПОЛОНИЙ	At АСТАТ	Rn РАДОН

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

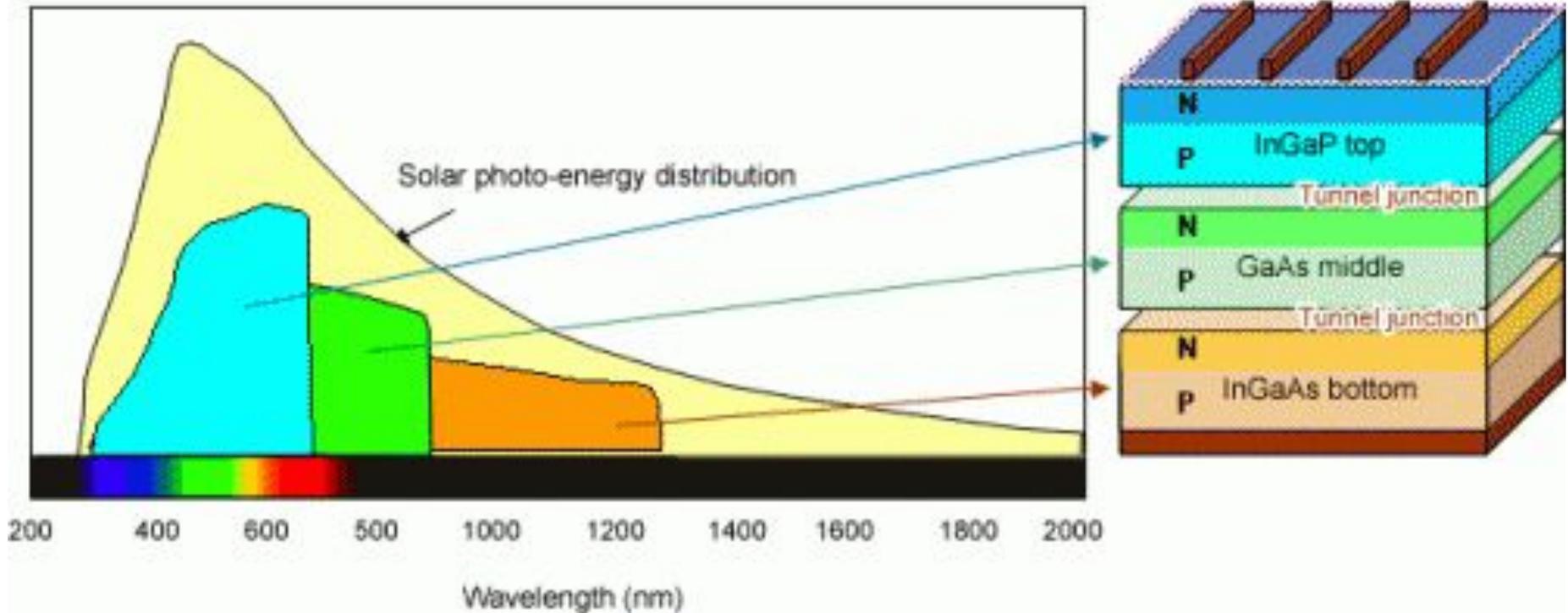


3. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений атомов третьей и пятой групп системы элементов Менделеева. Примерами таких материалов являются антимониды индия, галлия и алюминия, т. е. соединения сурьмы с индием, галлием и алюминием. Они получили наименование интерметаллических

A₃B₅



Арсенид-галиевые (GaAs) солнечные батареи



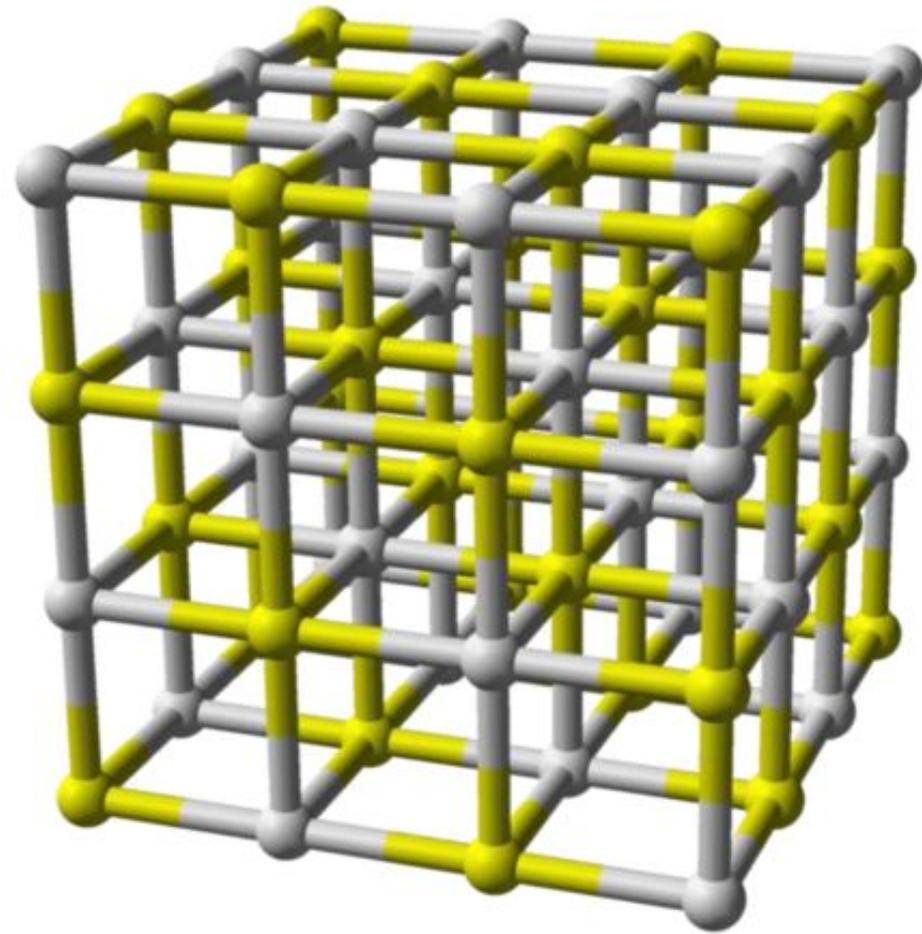
<http://solarb.ru/arsenid-galievye-solnechnye-batarei>

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, β -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 тιοфена с *p*-
типом проводимости

- Как светочувствительные материалы для ПЗС и фотоэлементов.

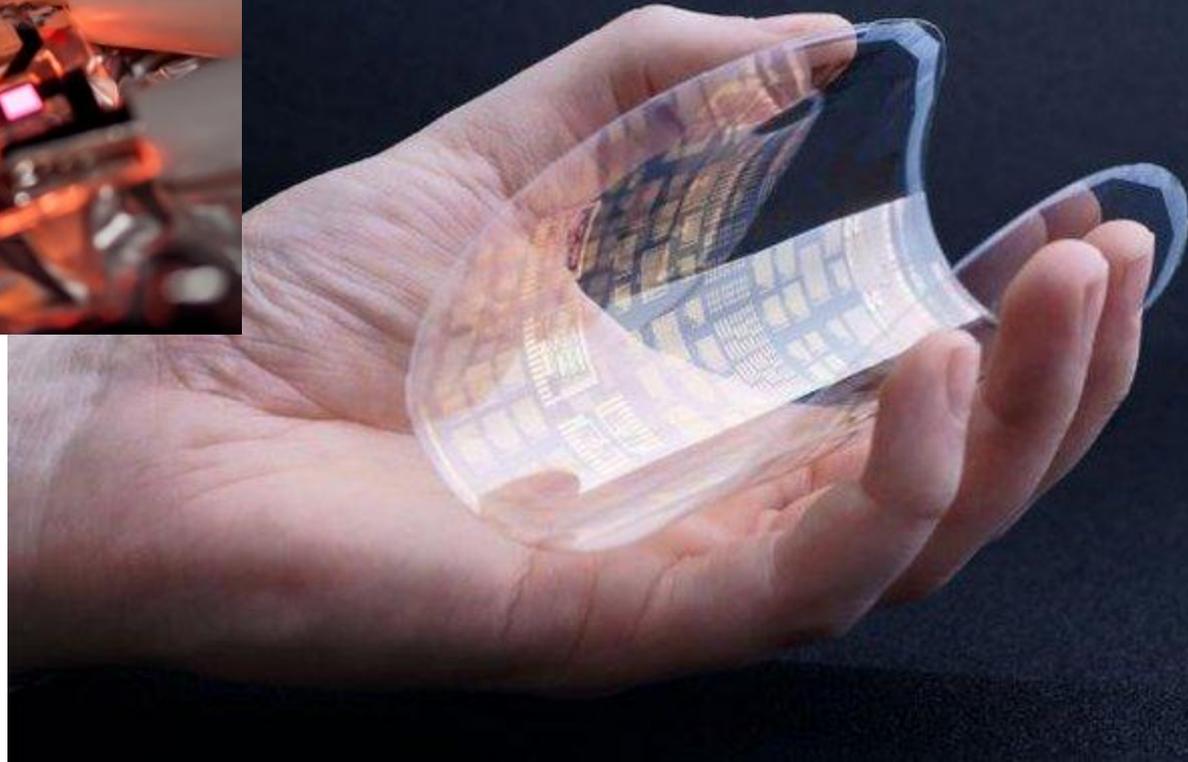
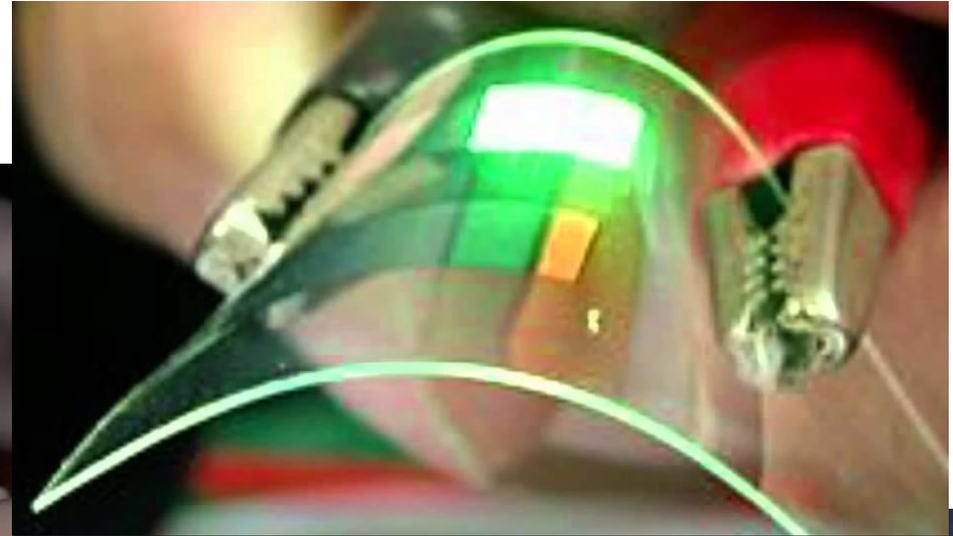
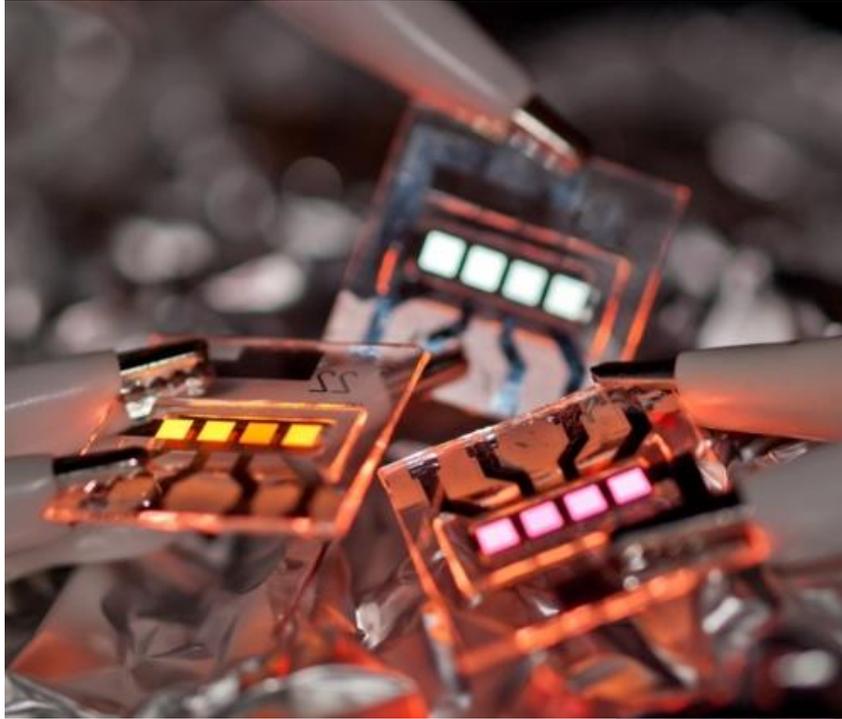
- Высокая стойкость к радиационному облучению некоторых органических полупроводников, делает возможным их использование в космосе.

- 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 γ_i

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

Примесная,
n-типа, γ_n
(содержит
доноры)

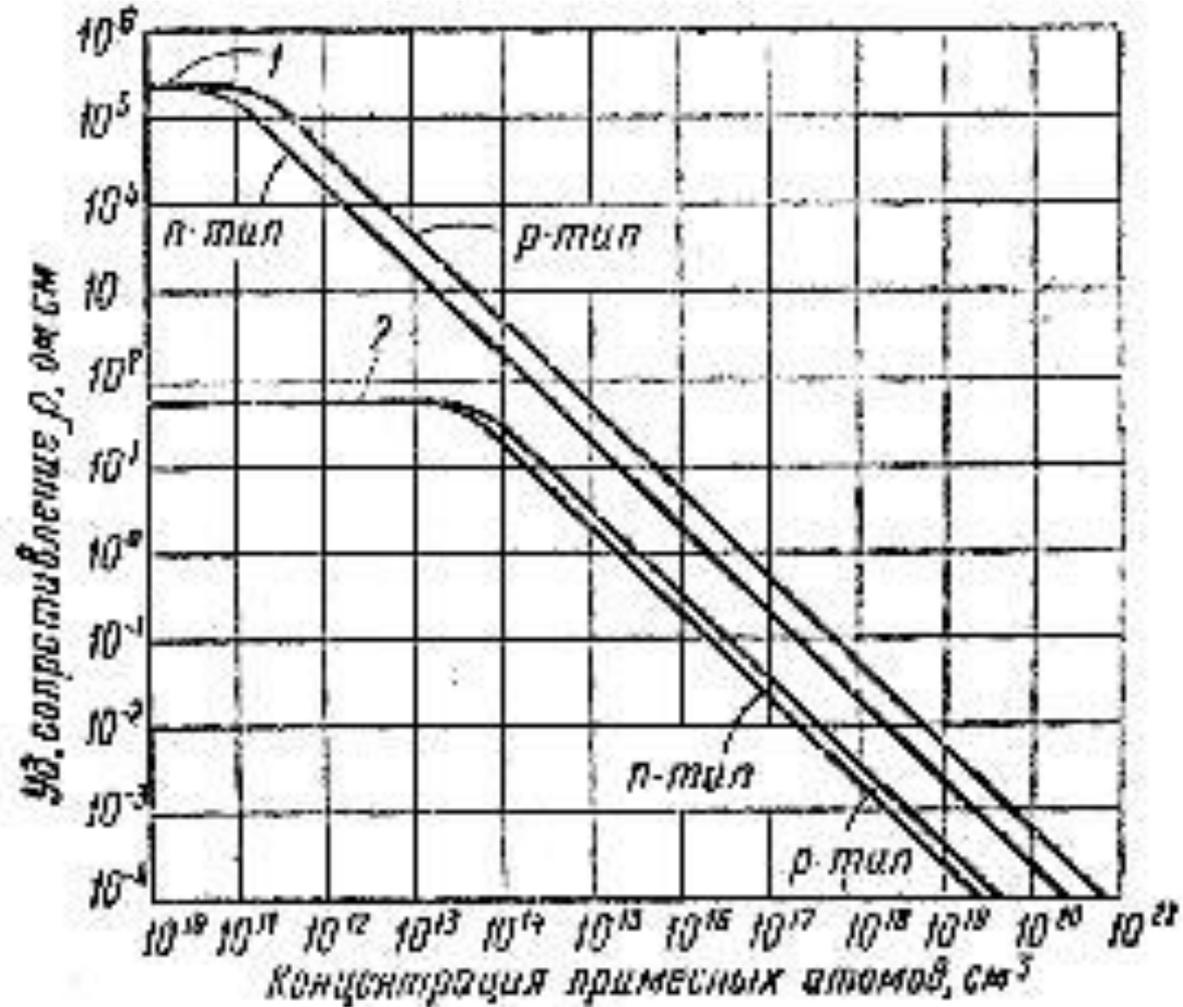
Примесная,
р-типа, γ_p
(содержит
акцепторы)

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

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

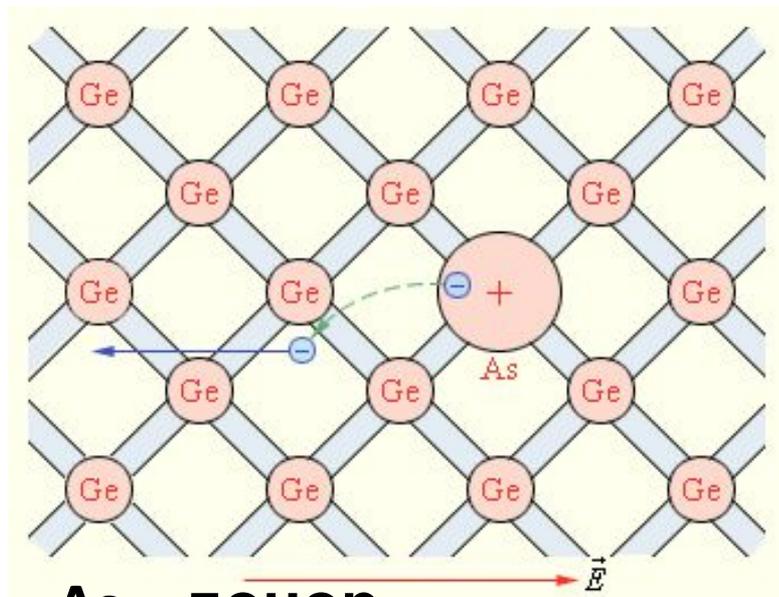
Электронно-дырочный
переход (р-n переход)

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

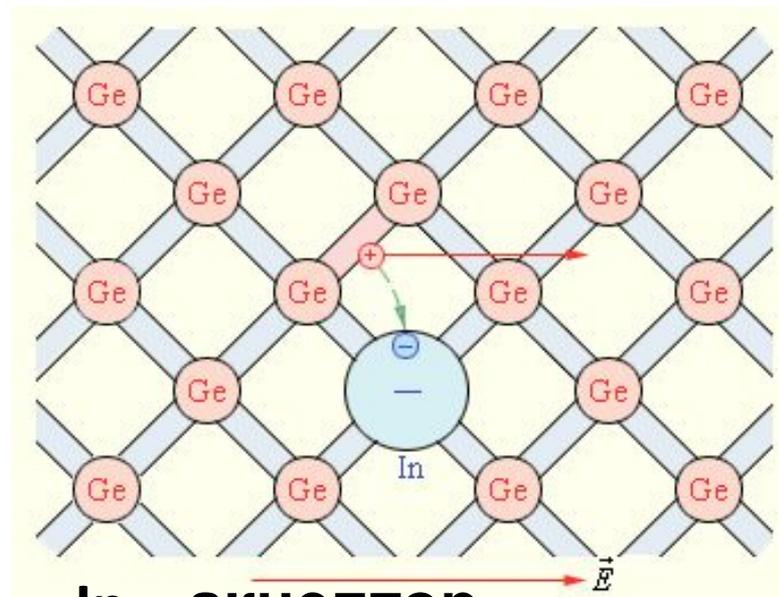


Кривые на рисунке показывают, что легирующие примеси оказывают огромное влияние на величину удельного сопротивления: у германия оно изменяется от величины собственного сопротивления $60 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, т. е. в $5 \cdot 10^5$ раз, а у кремния с $3 \cdot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

Атом примеси в полупроводнике Ge

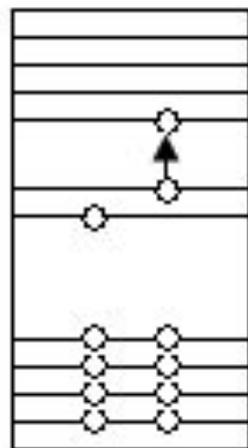
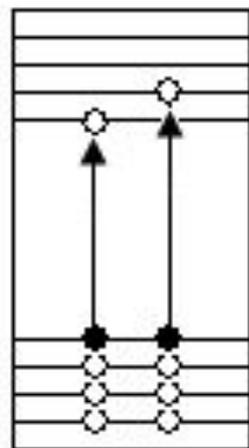


As – донор
Валентность 5

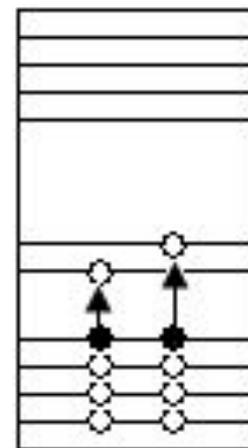


In – акцептор
Валентность 3

Зона проводимости
Запрещенная зона
Валентная зона

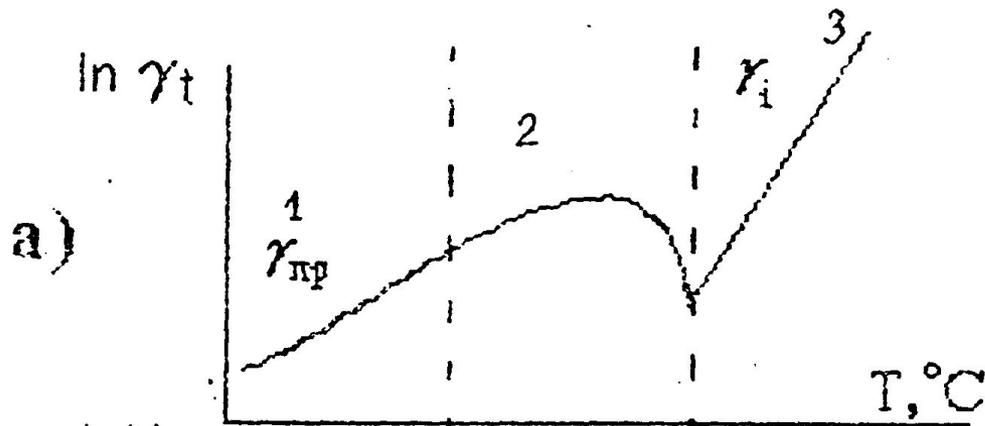


Wпр Д
зона прим.
(донор)

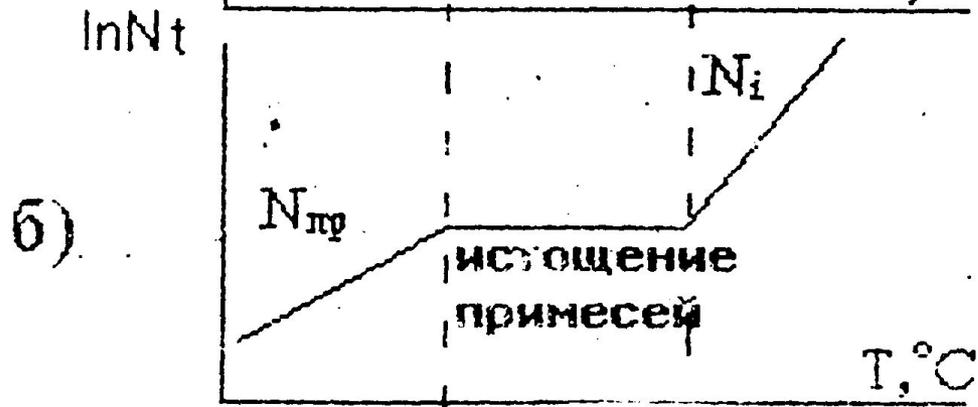


Wпр А
зона прим.
(акцептор)

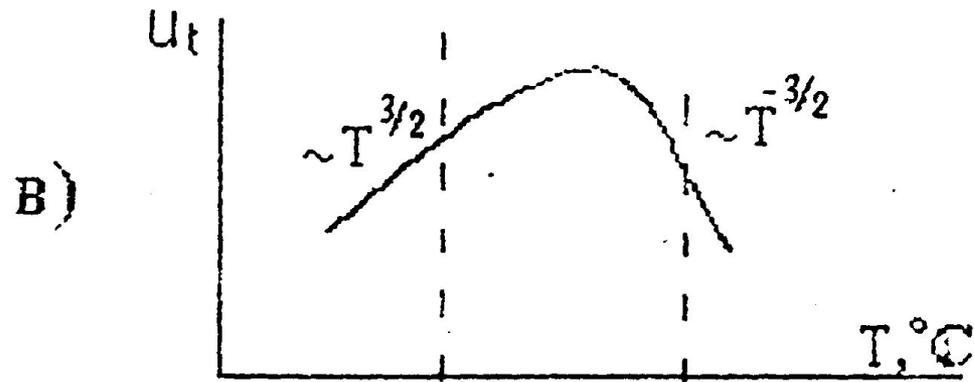
Влияние температуры



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

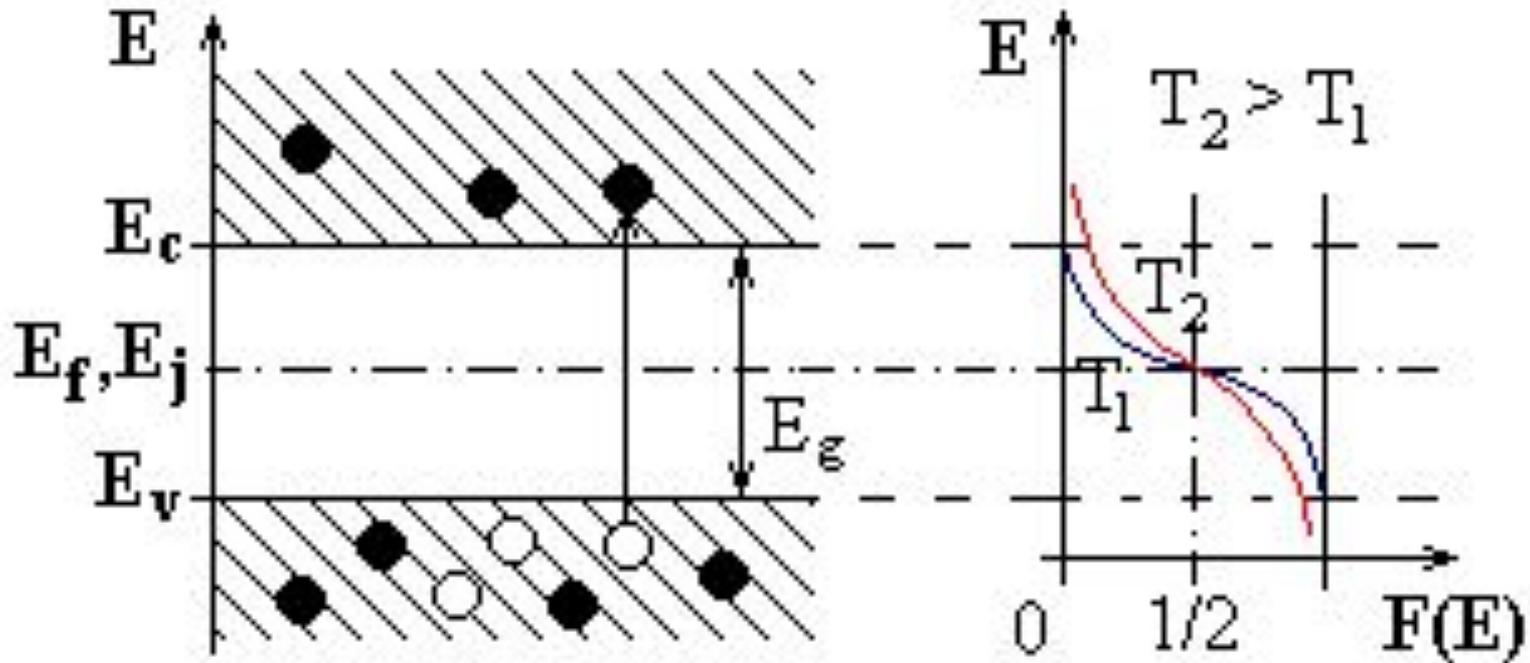


$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{W_t}{2KT}}$$



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

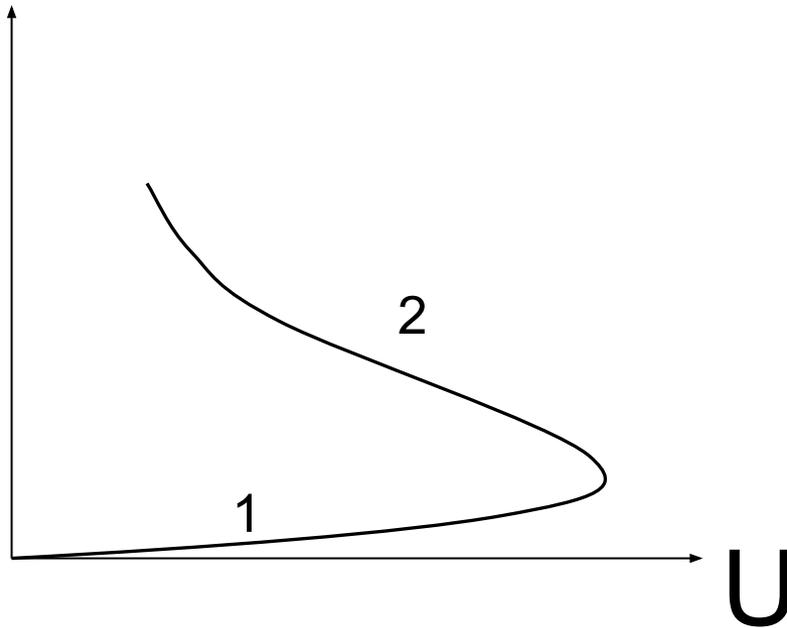
Влияние температуры



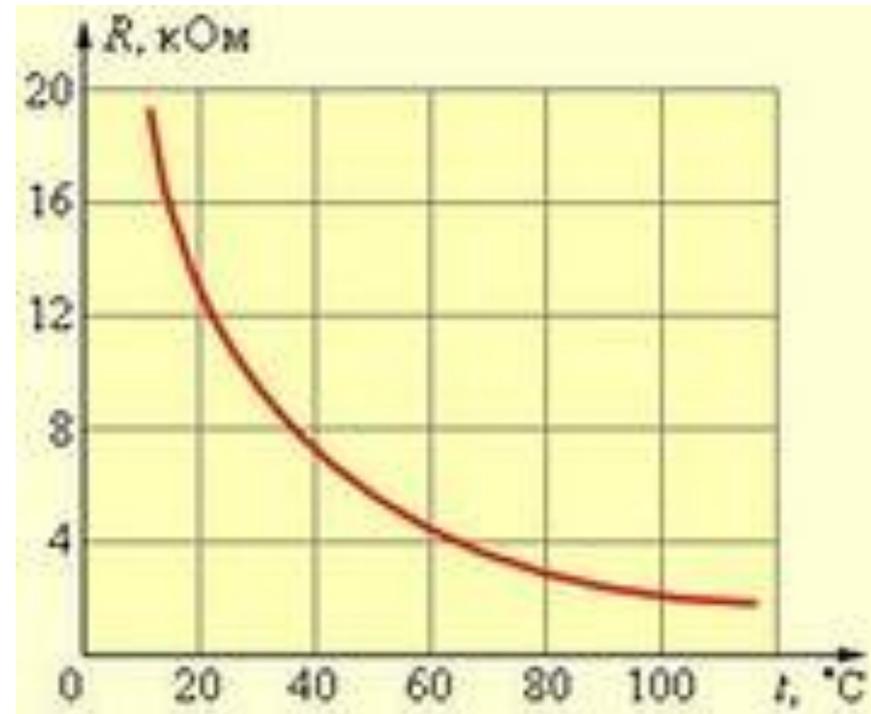
Энергетическая диаграмма и функция вероятности заполнения энергетических уровней для собственного полупроводника $F(E)$

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

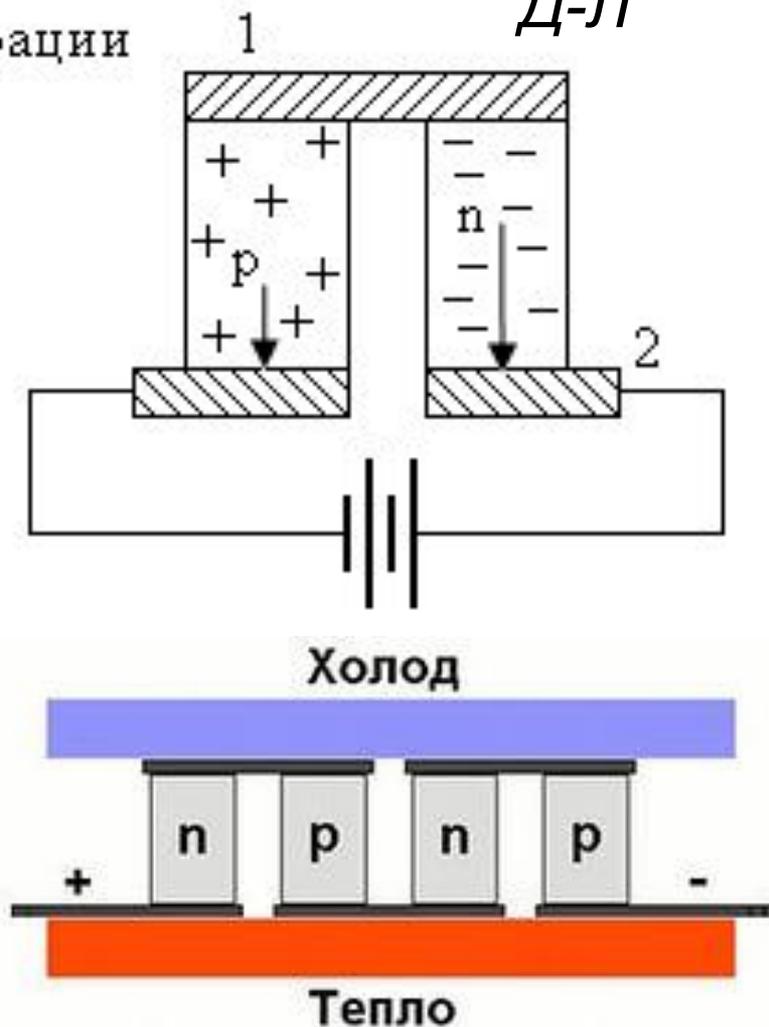
Термоэлементы эффект Пельтье

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

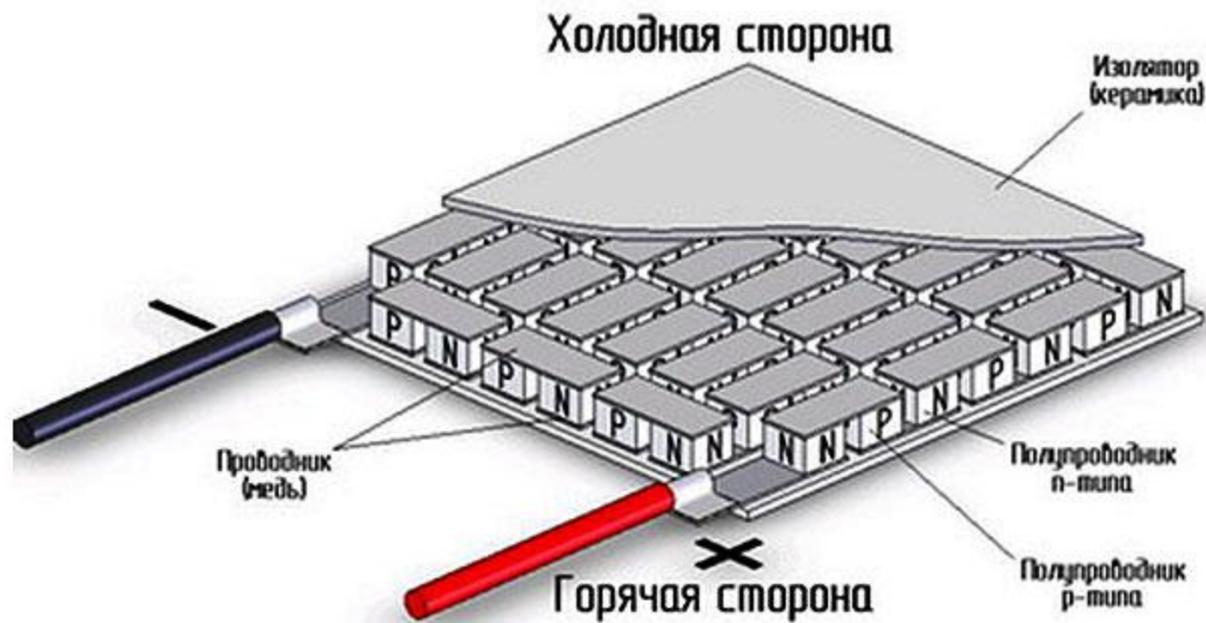
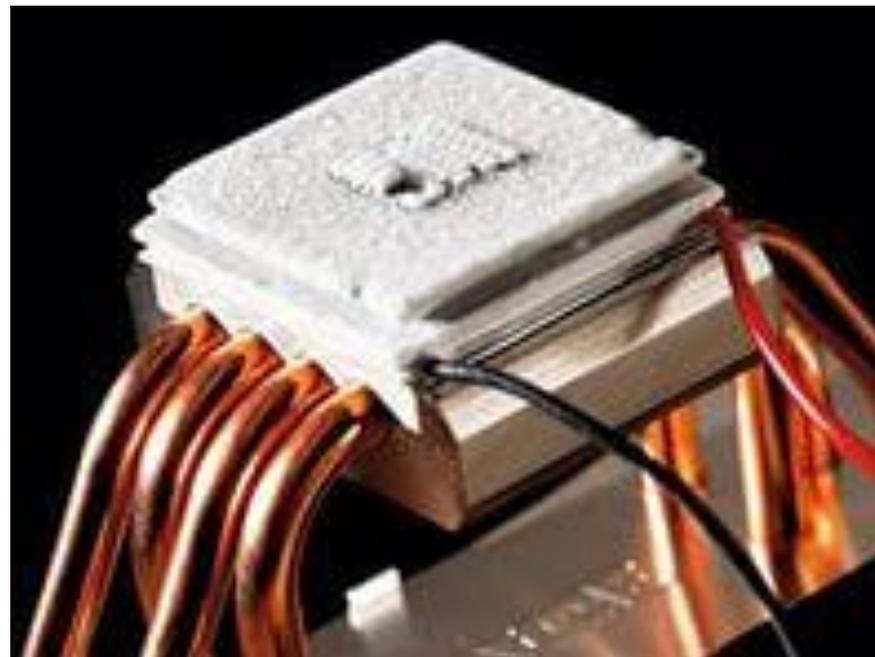
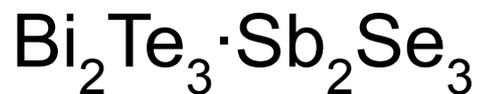
$$Q_{Д-Л} = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

Охлаждение за
счет генерации
p-n пар

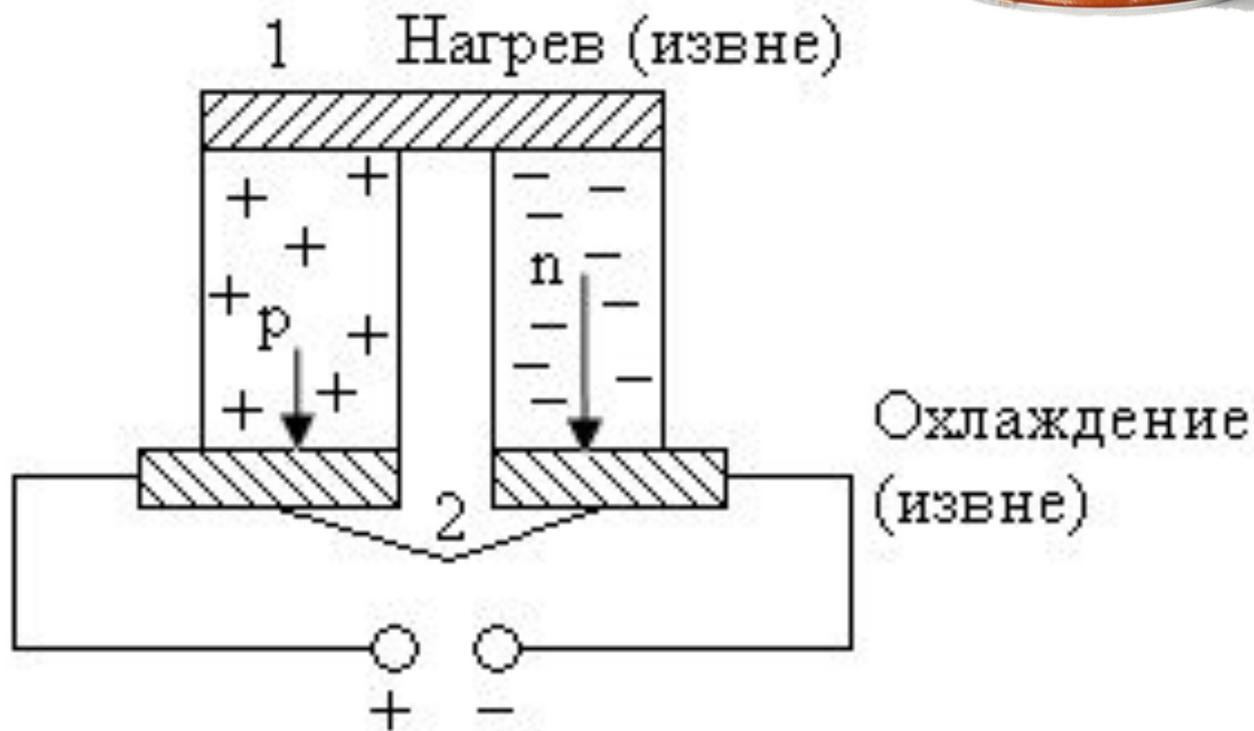
Нагрев за счет
рекомбинации
p-n пар



Термоэлементы элемент Пельтье



Термоэлементы эффект Зеебека



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

Электронно-дырочный (или p-n) переход

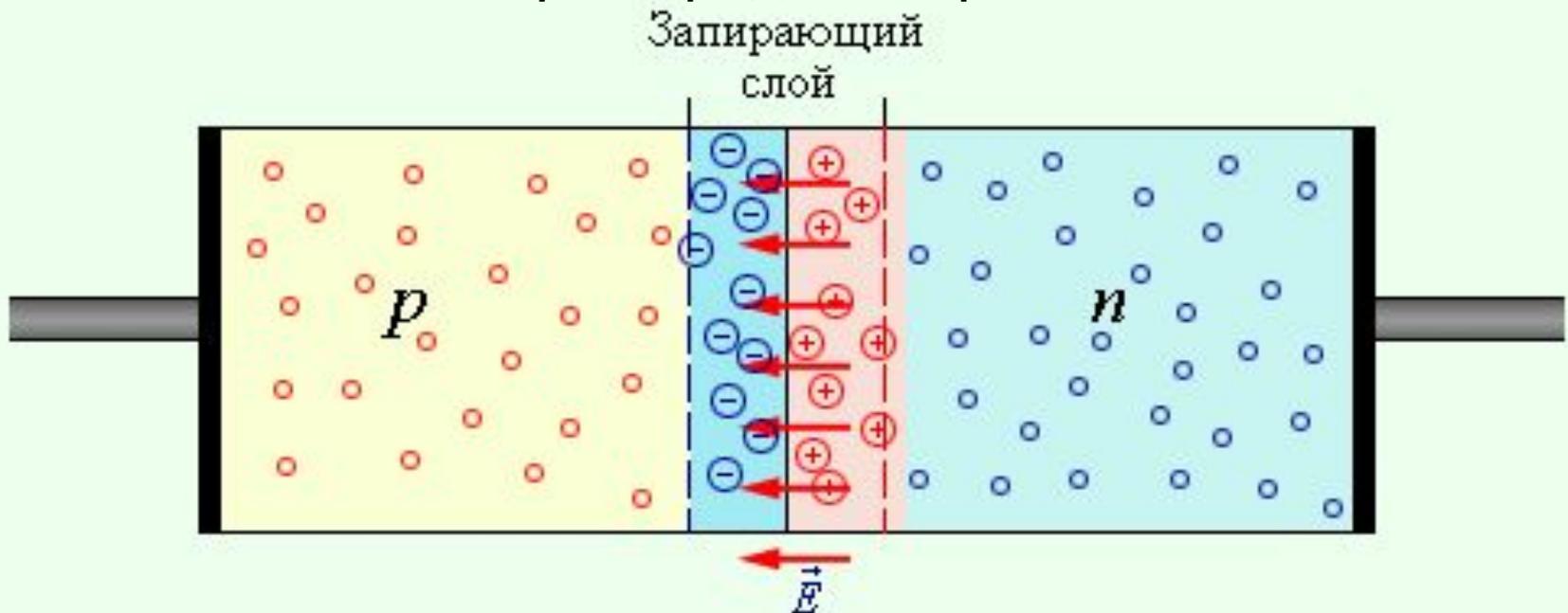
$$n_n \gg p_n \text{ и } p_p \gg n_p$$

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

где D – коэффициент диффузии;

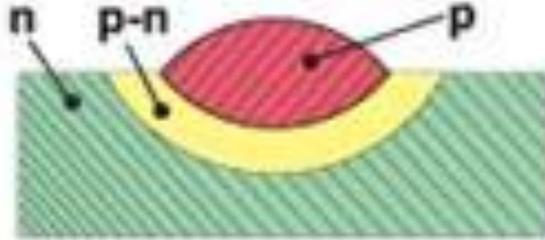
N – градиент концентрации носителей заряда;

q – заряд электрона.

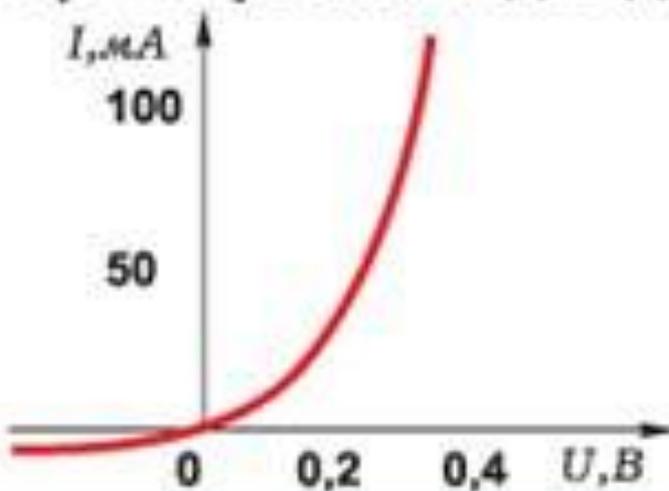


Электронно-дырочный (или p-n) переход

Образование p-n перехода



Вольт-амперная характеристика диода



Устройство диода



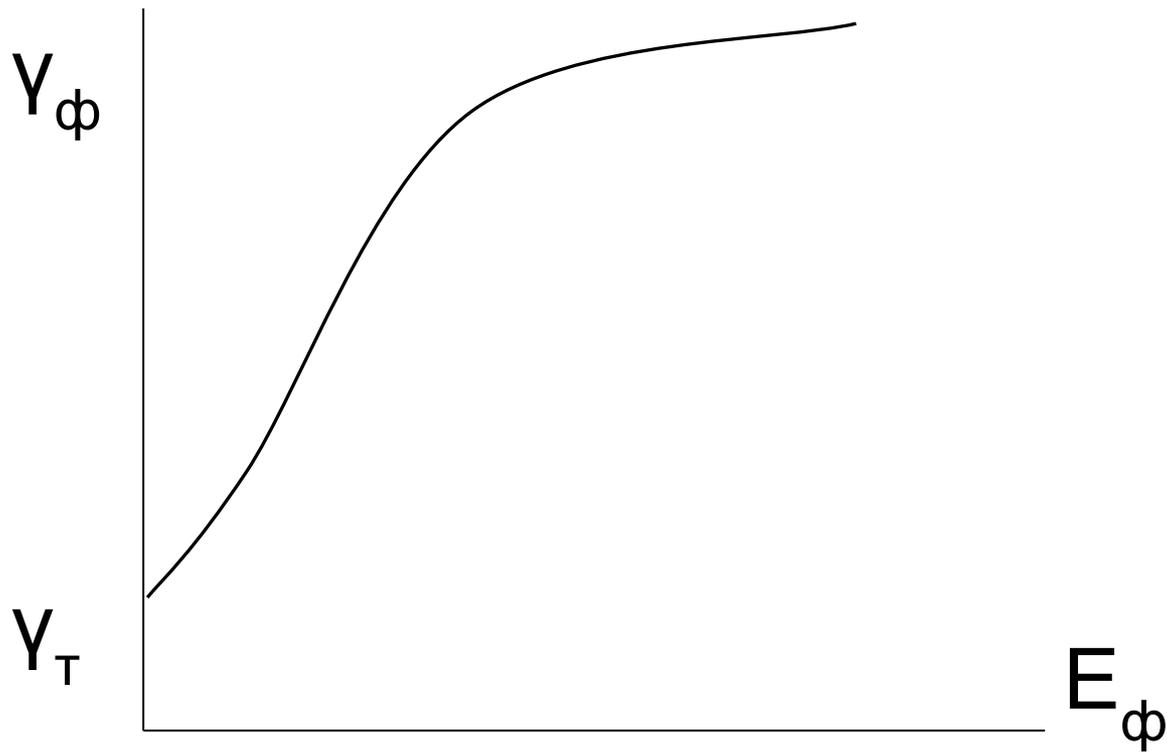
Изображение диода на схемах



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

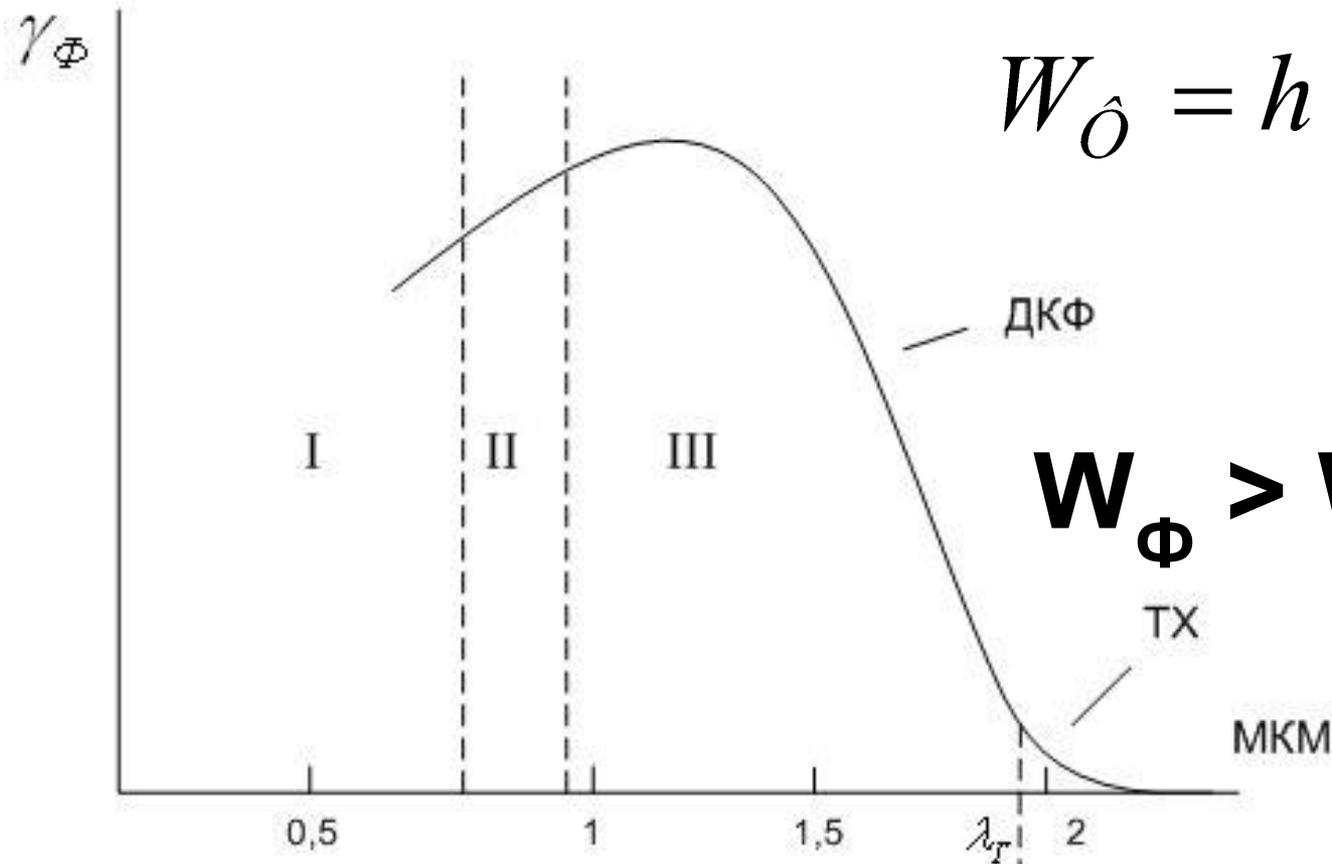
$$W_{\phi} > W_g$$

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



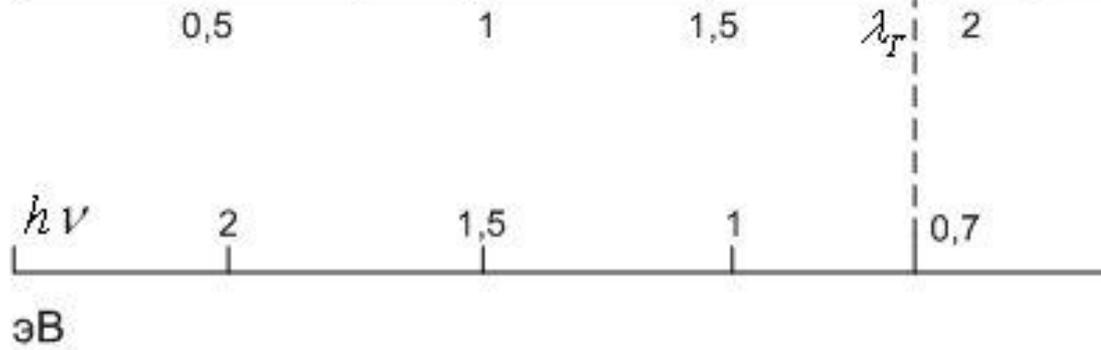
Интегральная характеристика
фотосопротивления
(фотопроводимости полупроводника)

Воздействие света на электропроводность ПП-ков.



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

$$W_{\Phi} > W_g$$



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

фотоэффект

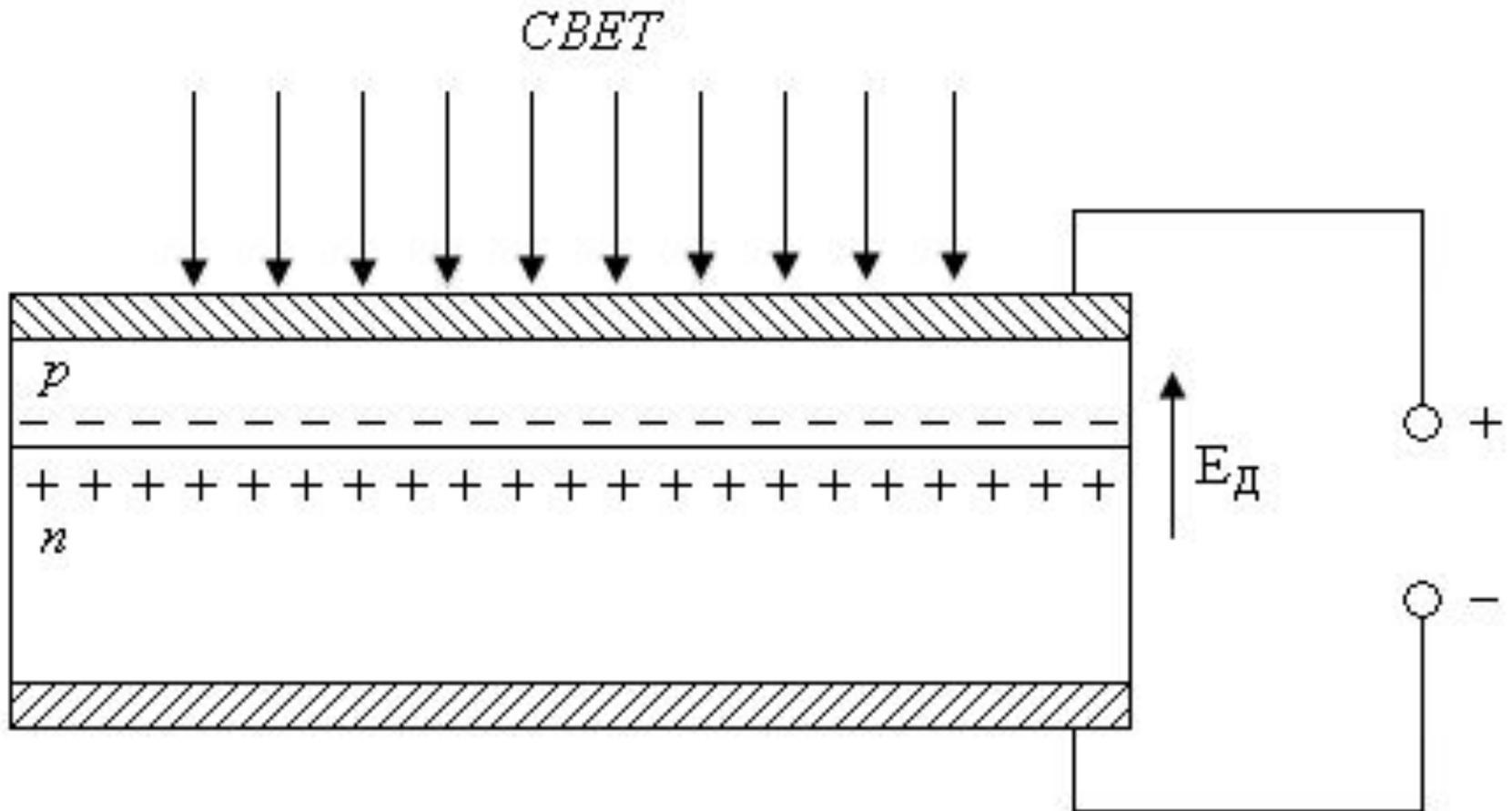
Электронно-дырочный (р-п) переход

+

фотоэффект

=

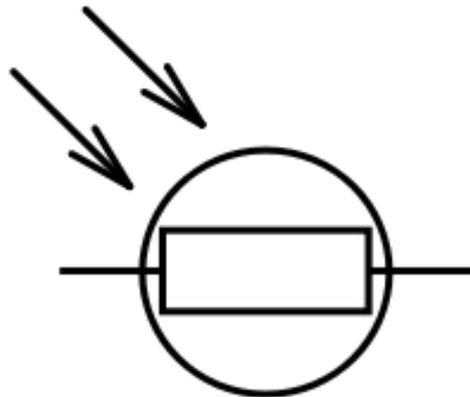
Фотоэлектрический эффект (вентильный)



Фоторезисторы

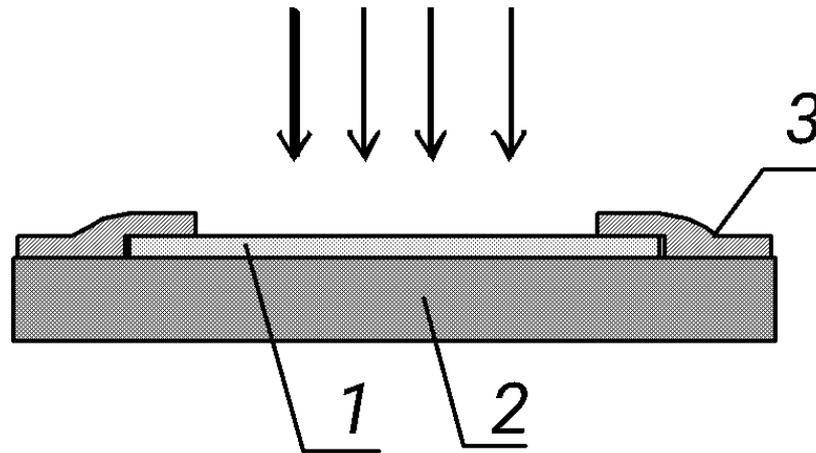
Фоторезисторы – это фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения, принцип действия которых основан на **эффekte фотопроводимости**.

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

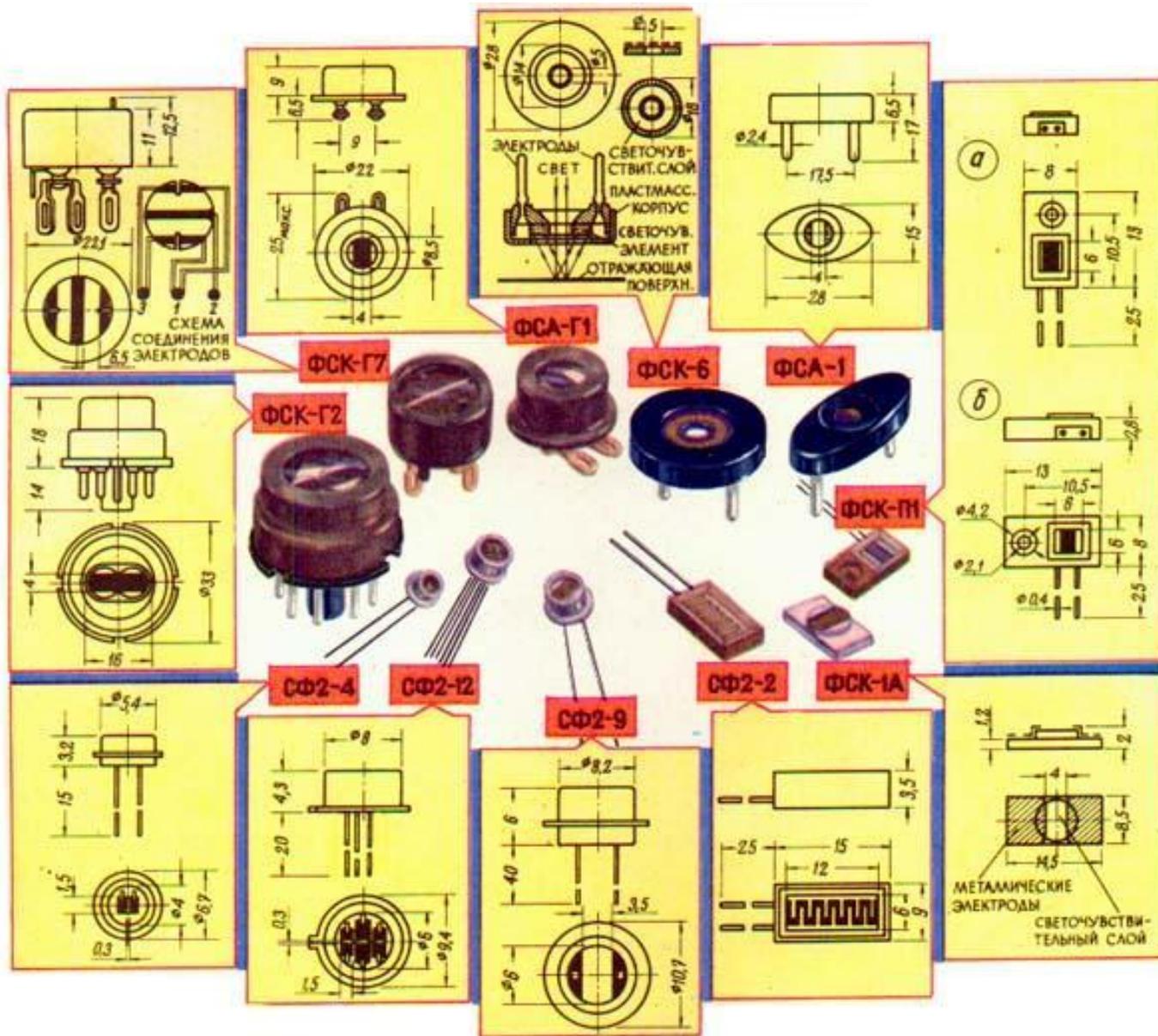
Фоторезисторы

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

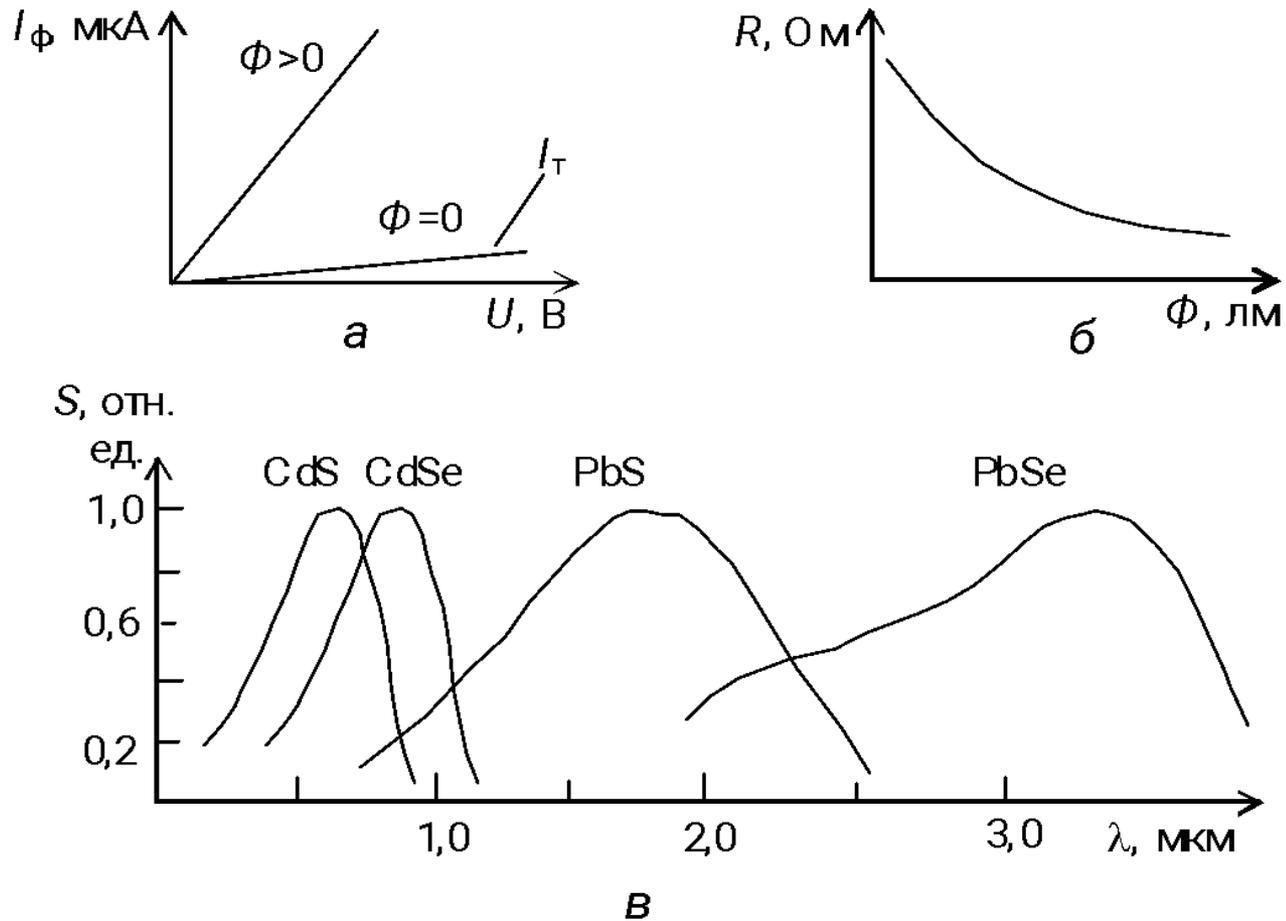


Рис. 7.16. Характеристики фоторезисторов: а – вольтамперные характеристики; б – функциональная характеристика $R = f(\Phi)$; в – спектральные характеристики различных фоточувствительных элементов

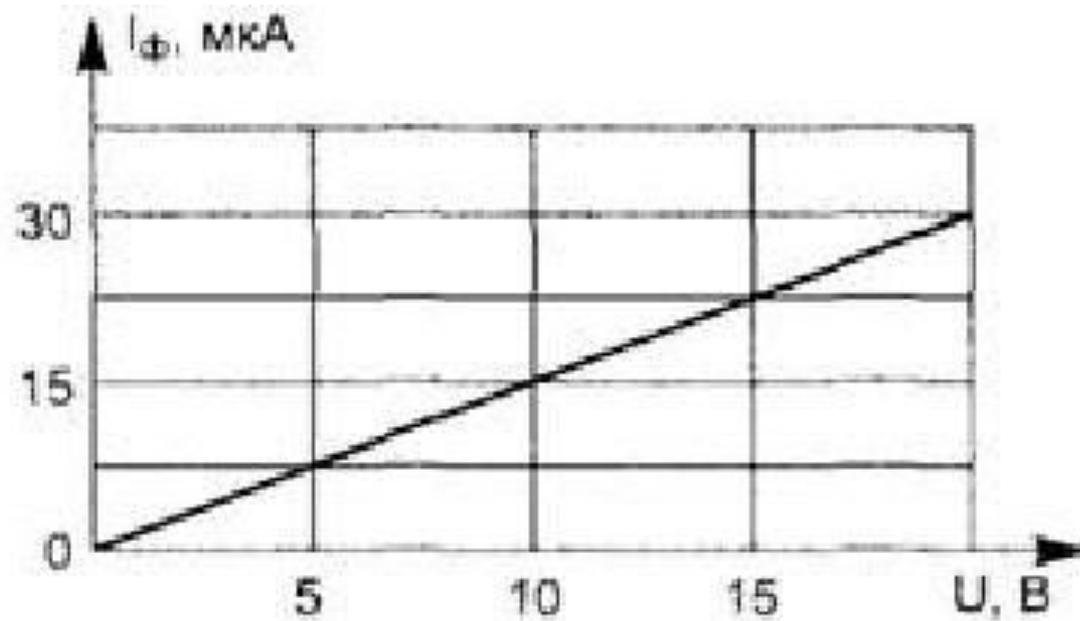


Рис.2 Вольт-амперная характеристика фоторезистора.

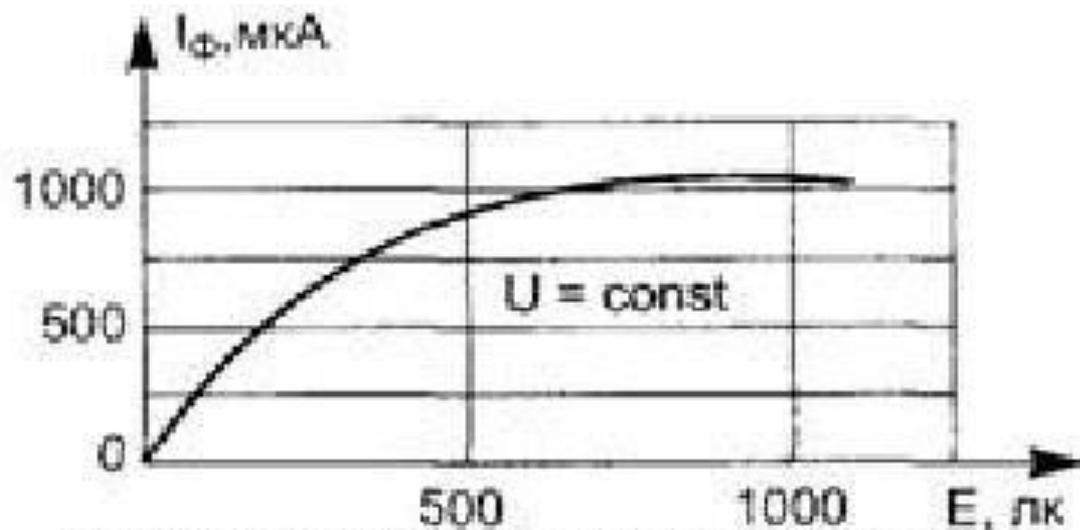


Рис.3 Световая характеристика фоторезистора

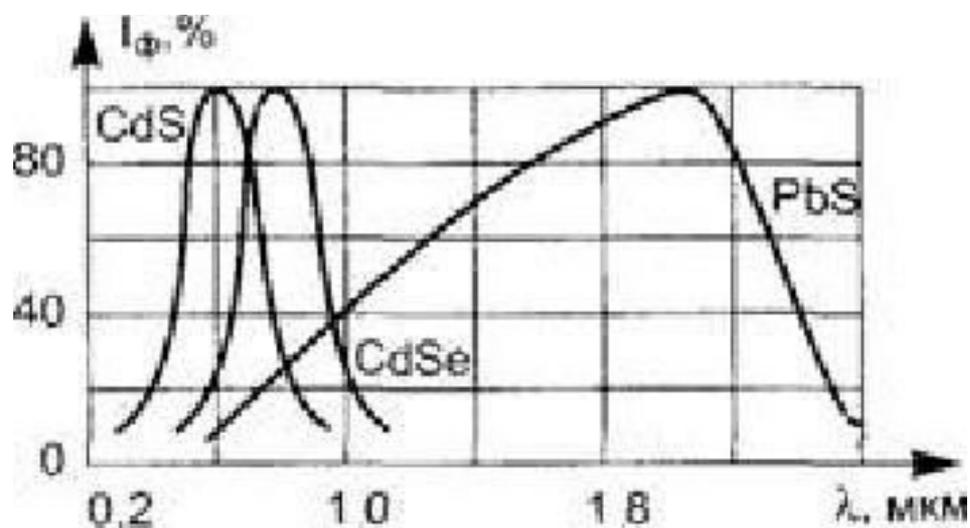


Рис.4 Спектральные характеристики фоторезистора.

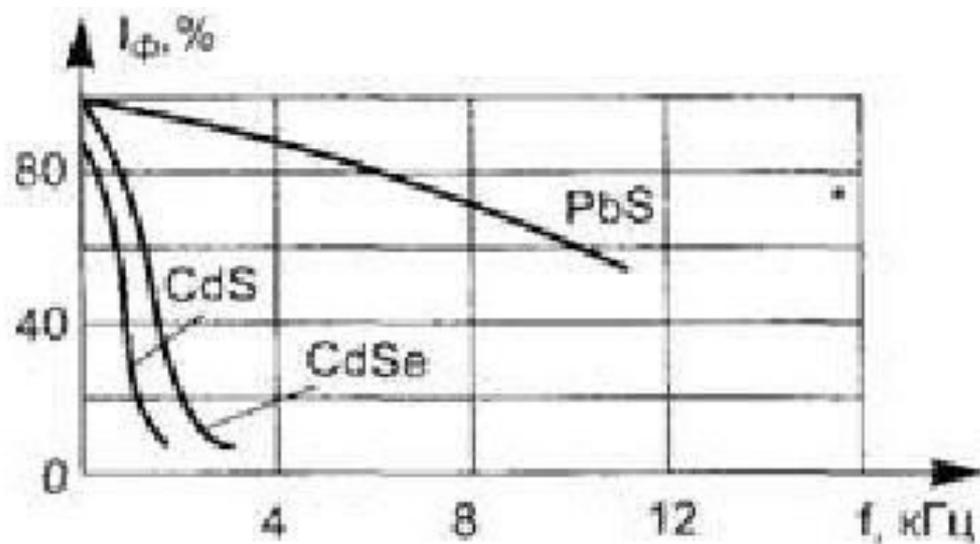


Рис.5 Частотные характеристики фоторезистора.

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/м² 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 ΔI_{ϕ} к падающему на фоторезистор световому потоку Φ , 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 600×10^3 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 λ регистрируемого потока излучения. Очевидно, $S = \frac{K}{K_{\max}}$ где K – значение фототока, соответствующее максимальной чувствительности фоторезистора.

9. **Инерционность τ** – 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_{ϕ})** 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_{ϕ} 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);

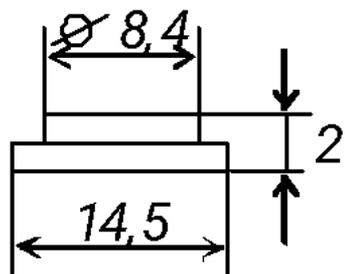
СФ3 – селенисто-кадмиевые (ранее обозначались ФСД);

СФ4 – на основе селенида свинца.

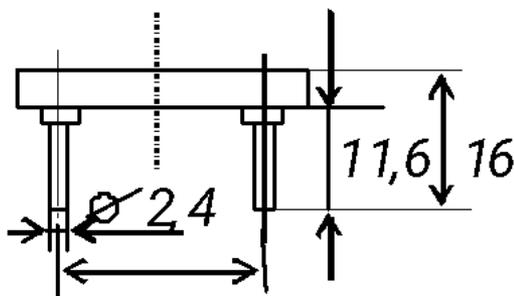
Далее через дефис указывается номер разработки и вариант конструктивного исполнения.

Конструкции фоторезисторов

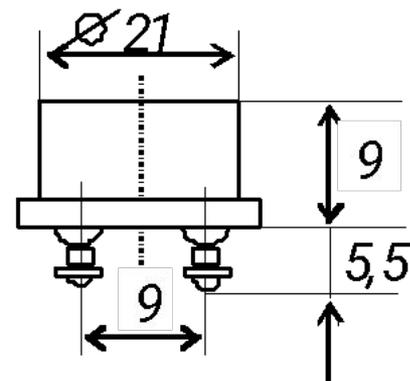
ФСК-0, ФСК-1а



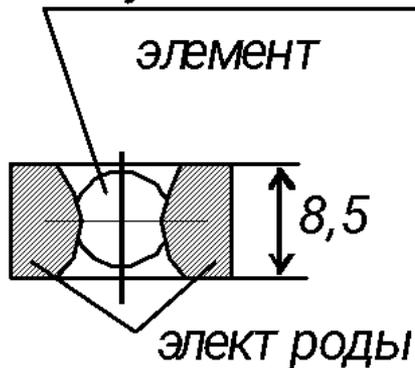
ФСК-1, ФСК-М1



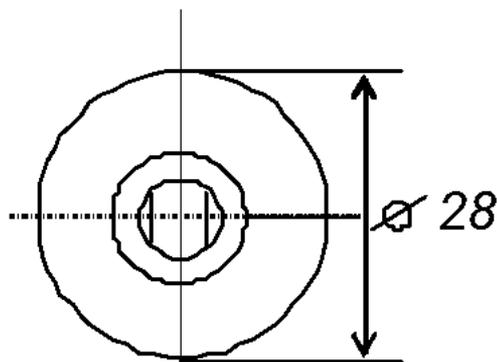
ФСК-Г1



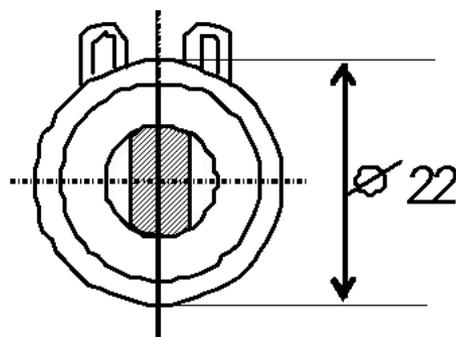
фоточувствительный элемент



а



б



в

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

Оптопары

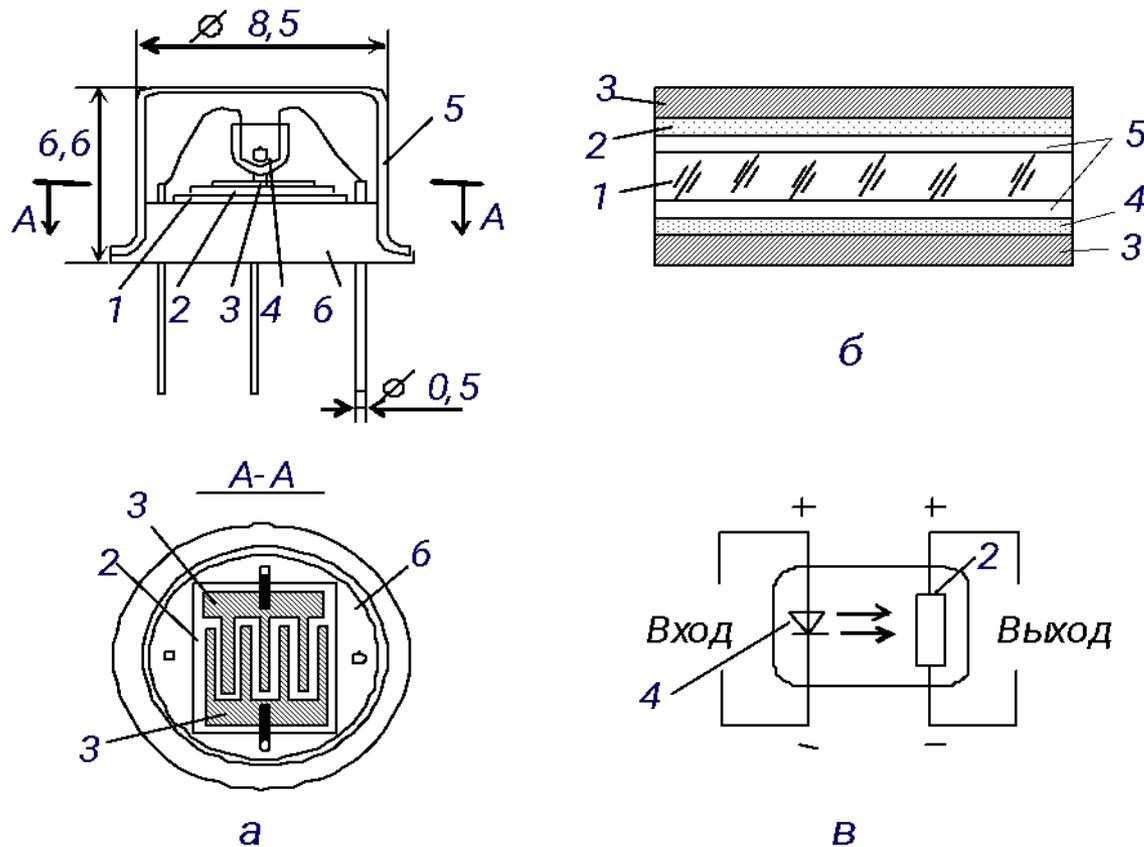


Рис. 7.18. Устройство резисторных оптронов

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!

