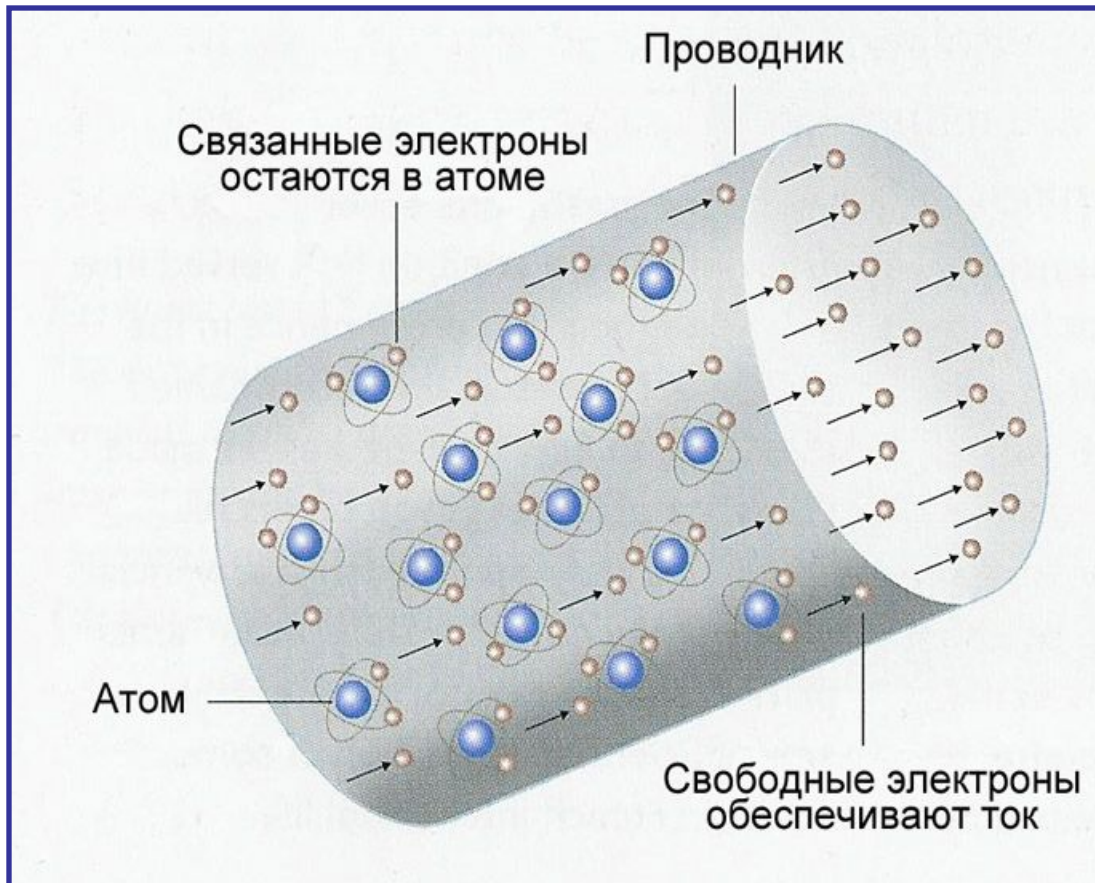


# **Тема. Квантовая статистика. Основы зонной теории**



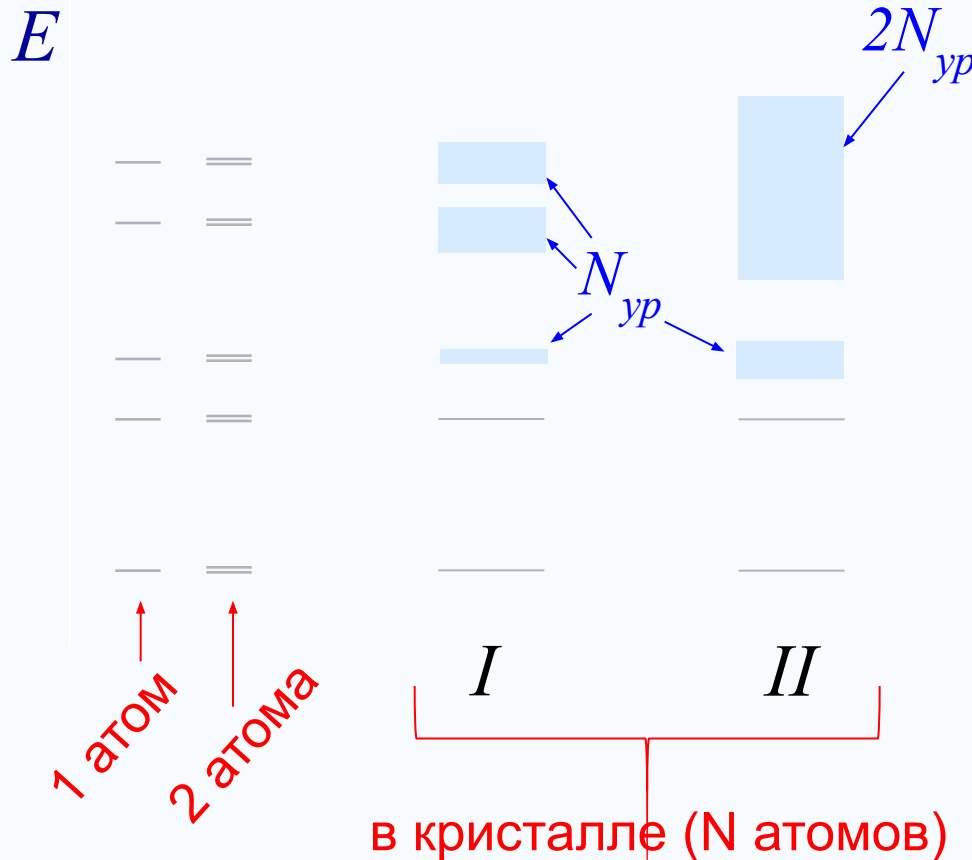
Свободные электроны в металле расположены в потенциальной яме глубиной  $E_{p0}$

Из решения уравнения Шрёдингера следует, что энергетические уровни электрона в кристалле  $E_i$  образуют квазинепрерывный спектр.



Электроны являются фермионами и подчиняются принципу Паули, согласно которому каждый энергетический уровень заселяется не более чем двумя электронами с противоположными спинами.

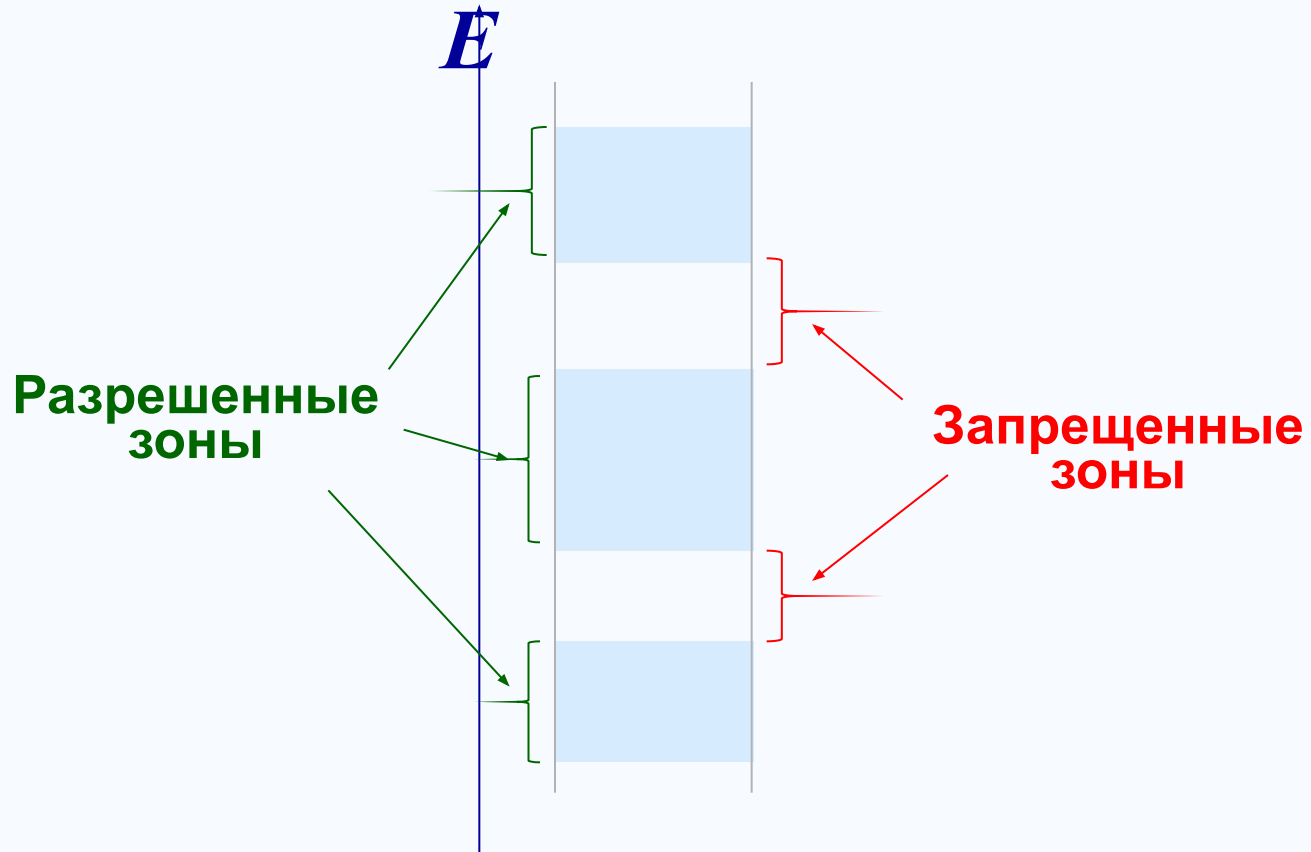
# § 3. Энергетические уровни в атоме и энергетические зоны в кристалле



Образование энергетических зон в кристалле (следует из решения уравнения Шредингера для  $e$  в периодическом силовом поле кристалла)

В кристаллах энергетический спектр электронов распадается на  $N$  (число атомов в кристалле) близких уровней (взаимодействие атомов). «Расстояние» между уровнями внутри зон  $\sim 10^{-23}$  эВ

# Разрешенные и запрещенные зоны

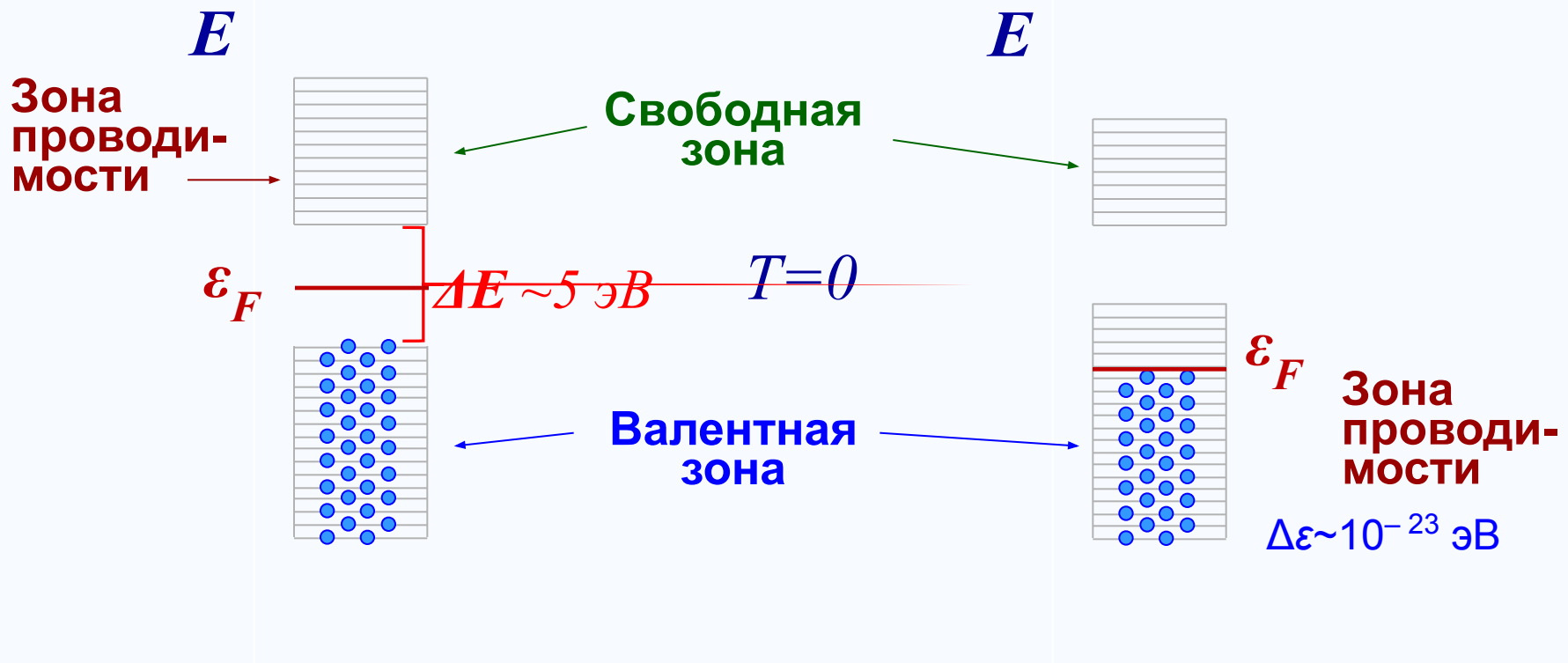


## § 4. Проводники и диэлектрики

- В зависимости от степени заполнения валентной зоны электронами и ширины запрещенной зоны кристаллы подразделяют на проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики.

диэлектрик

проводник



Условие массового термического перехода электронов в зону проводимости диэлектрика:

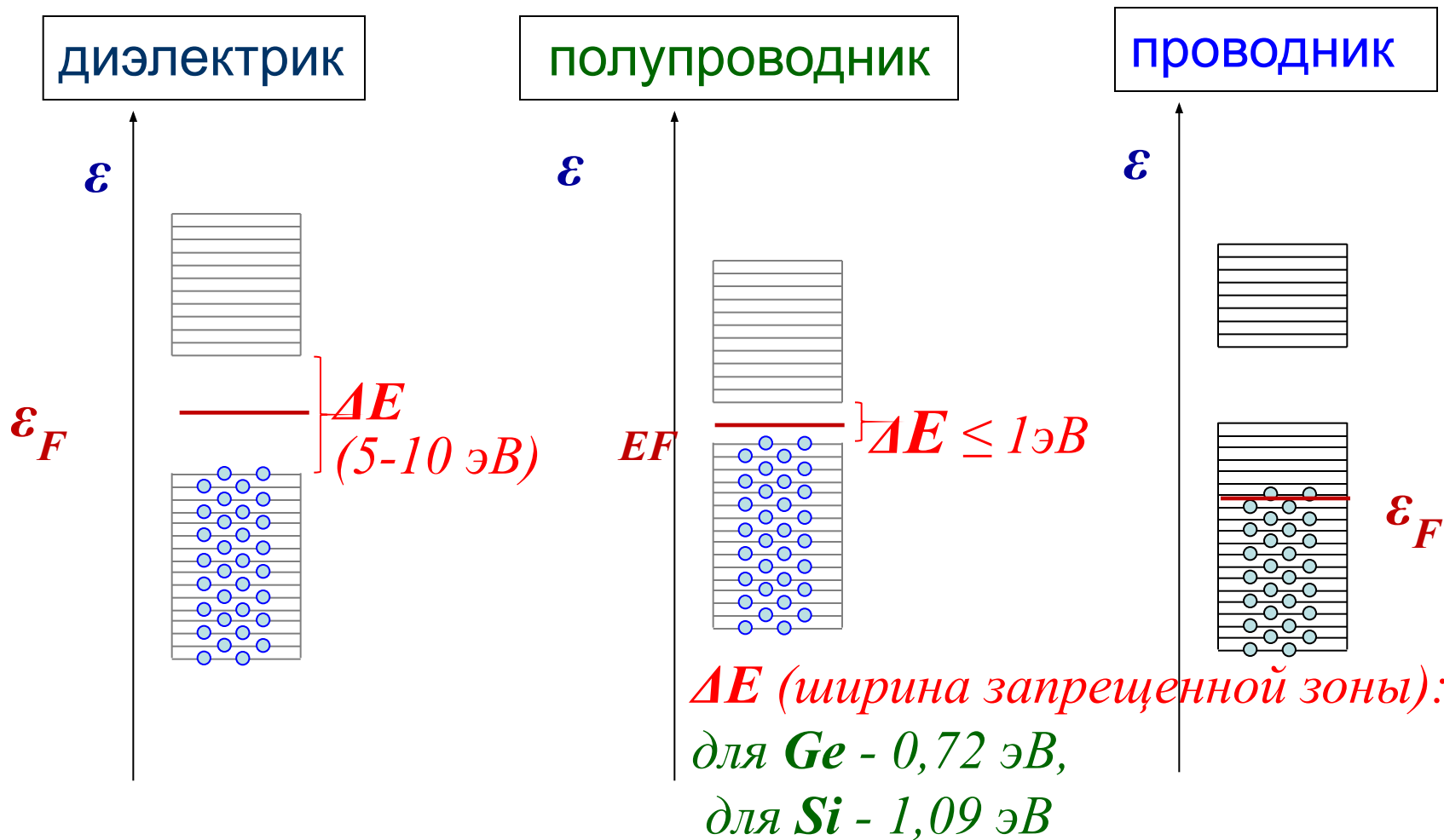
$$kT \sim \Delta E.$$

$$\text{При } \Delta E = 5 \text{ эВ} \quad T \sim 10^5 \text{ К.}$$

Условие электрического пробоя диэлектрика:

$$E \sim 10^8 \text{ В/м}$$

$$T=0$$





## § 5. Полупроводники.

### Электронны и дырки в полупроводниках

# Полупроводники. $T > 0$



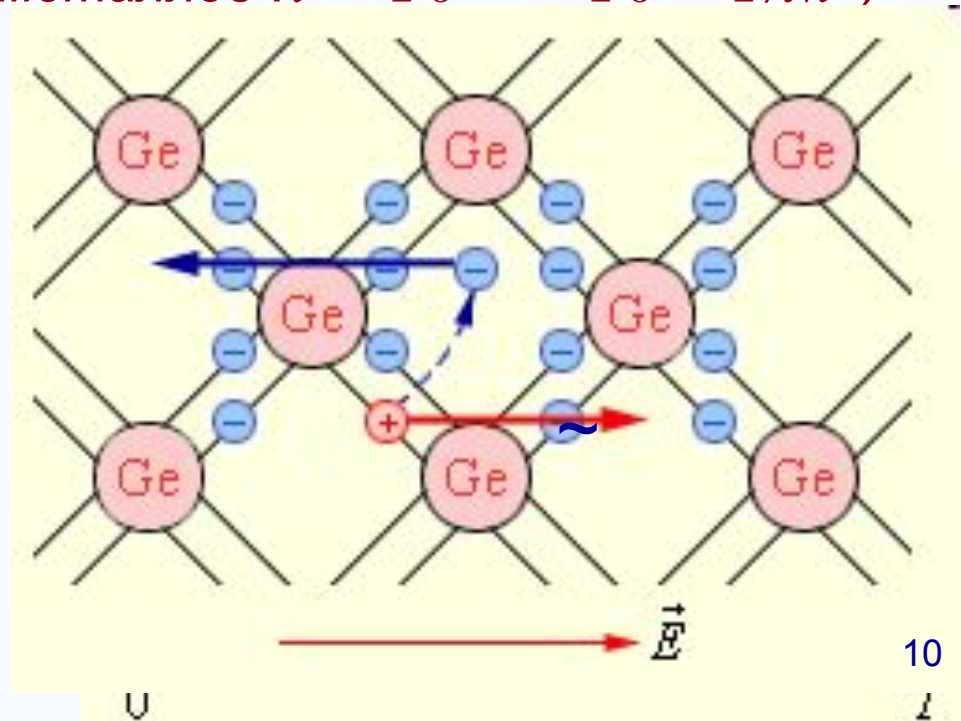
При  $T = 300 \text{ K}$  концентрация электронов в зоне проводимости  $n \sim 10^{17} \text{ 1/м}^3$ , а уд. сопротивление  $\rho \sim 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;

При  $T = 400 \text{ K}$  -  $n \sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$ ,  $\rho \sim 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

(у металлов  $n \sim 10^{28} - 10^{29} \text{ 1/м}^3$ )

Рекомбинация-встреча свободного электрона с дыркой, приводящая к взаимоничтожению («компенсации»)

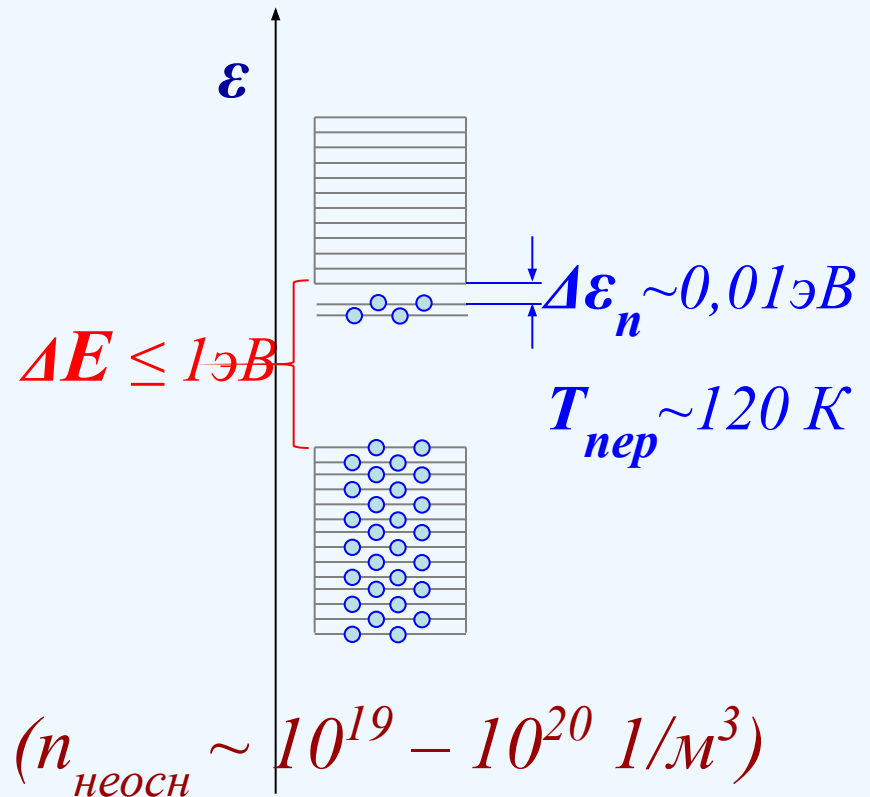
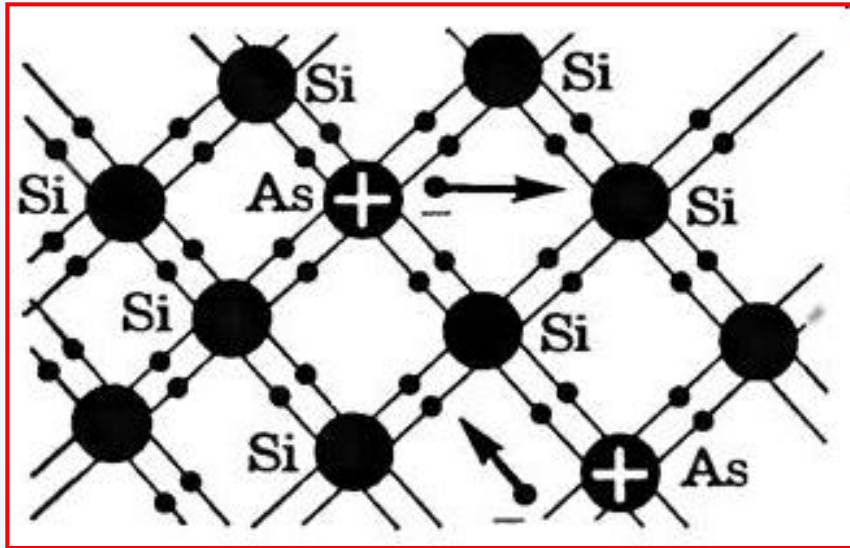
Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  чистого полупроводника от абсолютной температуры



# Примесная проводимость полупроводников

## 1. Полупроводники $n$ – типа (электронная проводимость)

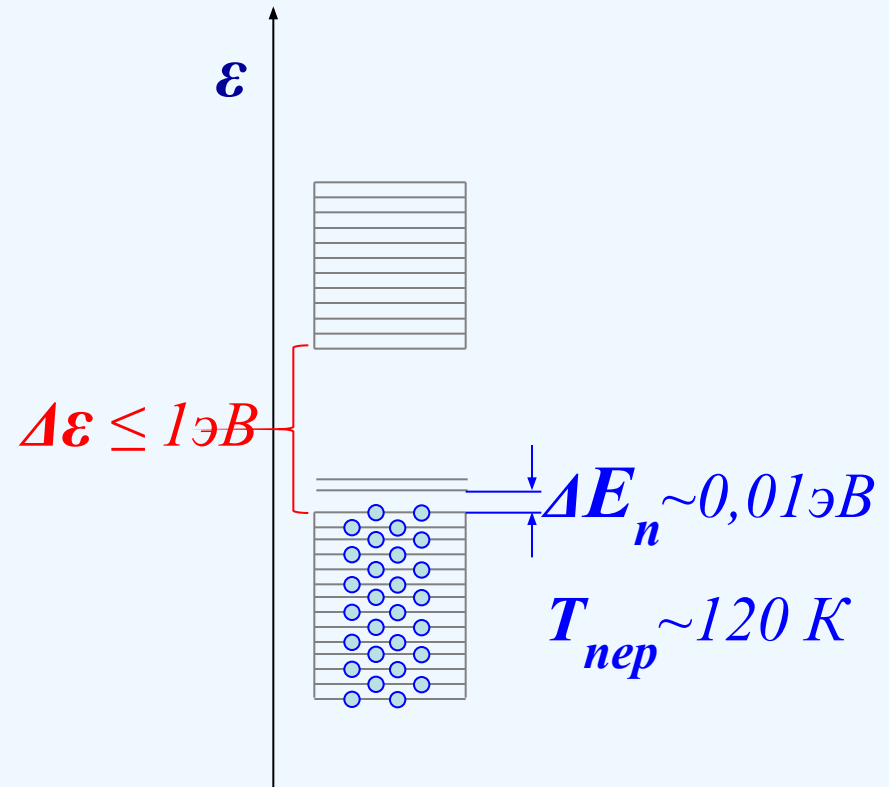
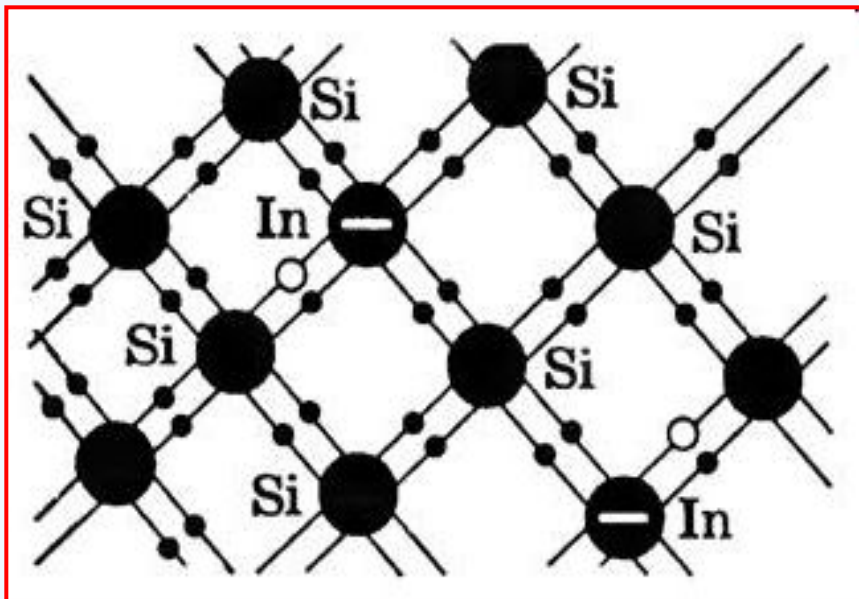
Доноры (5-вал.): фосфор **P**, мышьяк **As**, сурьма **Sb**



Примеси искажают поле решетки, что приводит к возникновению примесных уровней в запрещенной зоне.

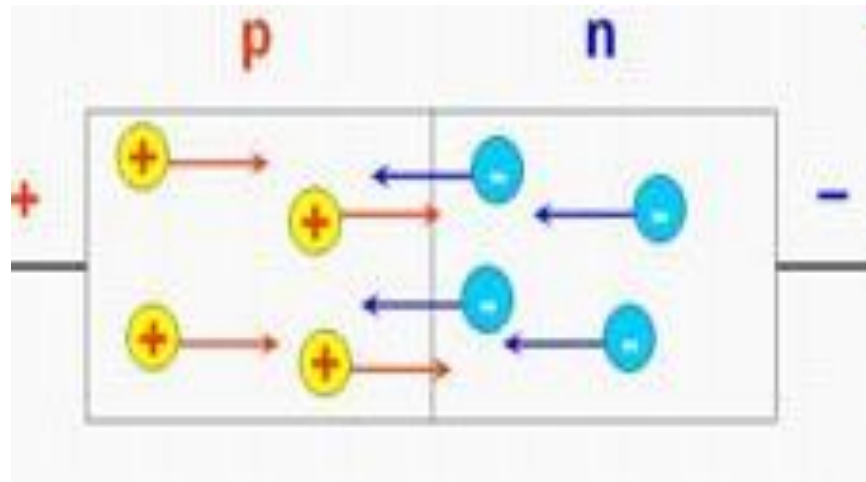
## 2. Полупроводники *p* – типа (дырочная проводимость)

Акцепторы (3-вал.): **B, Al, Ga, In**



## §6. P-n переход.

Через границу раздела областей кристалла с разным типом проводимости происходит диффузия электронов



На границе раздела возникает контактная разность потенциалов (около 0,35-0,6 В)

Способность перехода запирает электрический ток при включении P(отрицат. полюс), n(положит.полюс) используется для выпрямления переменного тока (полупроводниковый диод).

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

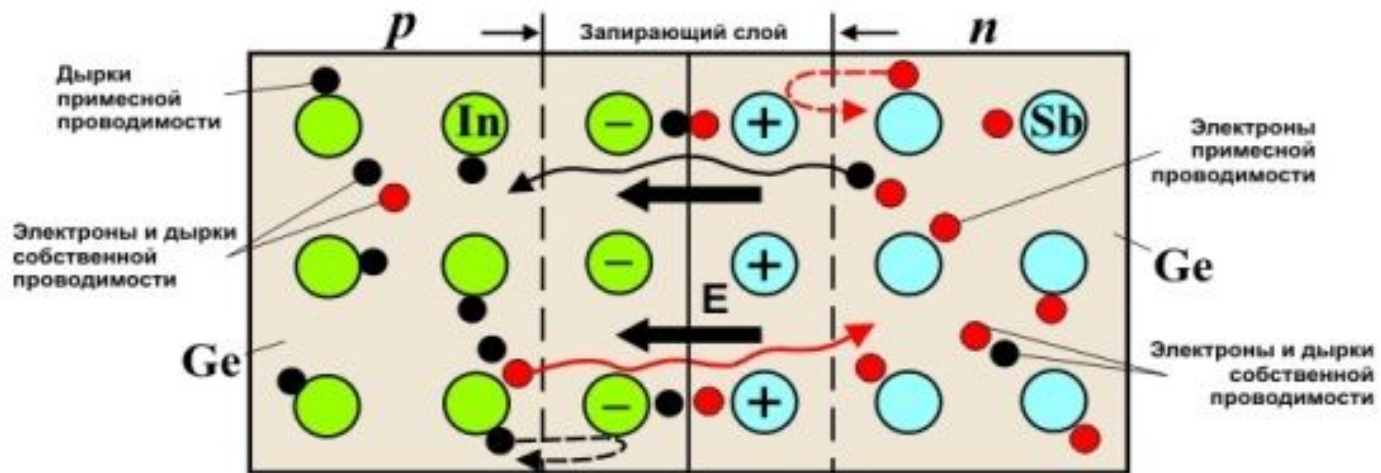
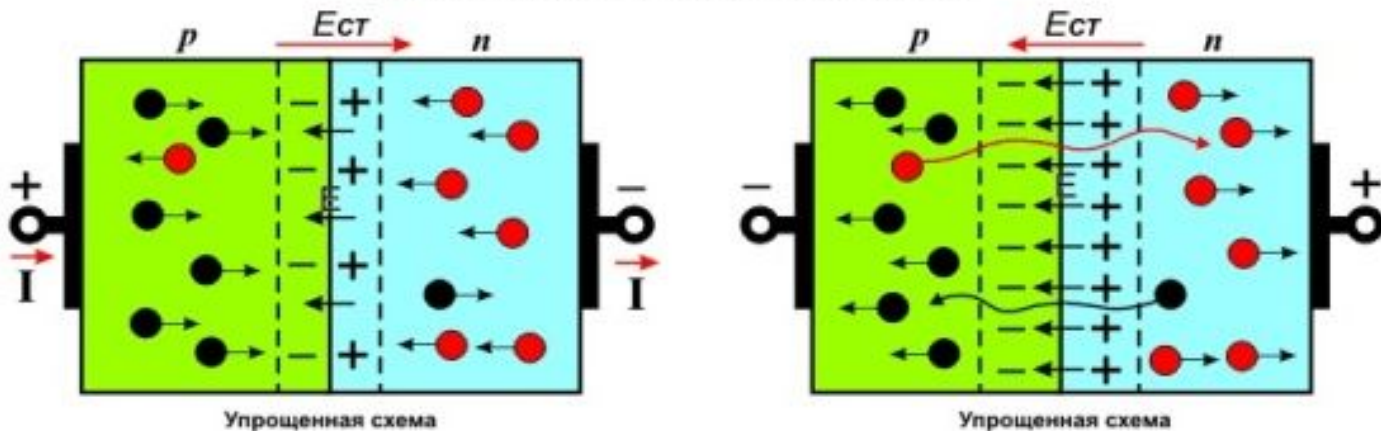


Схема образования электрического поля  $E$  на границе раздела  $p$ - и  $n$ -полупроводников



Прямое и обратное подключение диода

# Применение полупроводникового диода

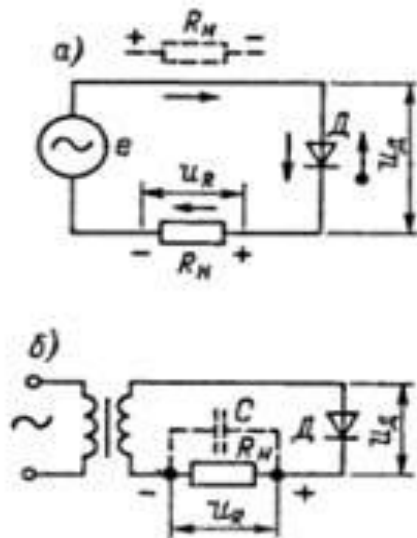
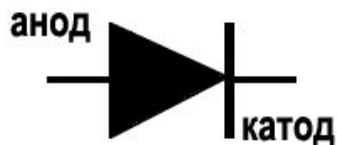


Рис. 3.8. Схемы выпрямителя с полупроводниковым диодом

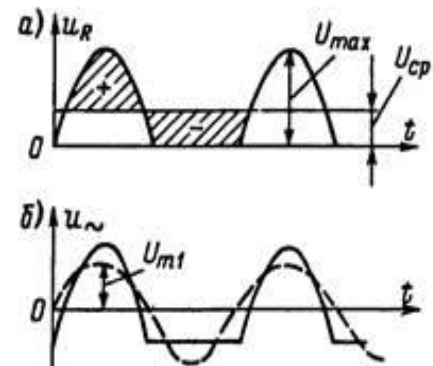
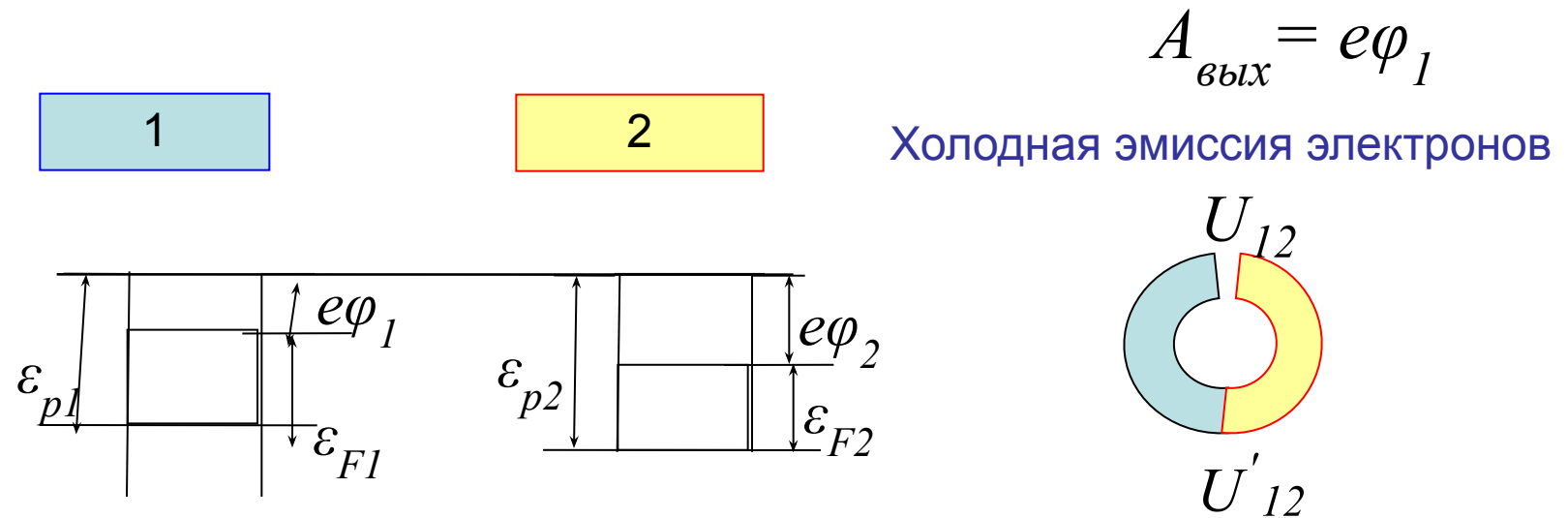


Рис. 3.10. Постоянная и переменная составляющие выпрямленного напряжения

- Полупроводниковый диод позволяет создавать асимметричные с точки зрения полярности сигнала схемы. Например, выпрямители, преобразующие переменный ток в пульсирующий однополярный, или детекторы, выделяющие низкочастотную огибающую из высокочастотного сигнала.

# §7. Другие контактные явления



Если привести в соприкосновение два разных металла, то между ними возникнет разность потенциалов, называемая контактной (у металла с большей Энергией Ферми больше концентрация электронов, начнется диффузия электронов).

Внешняя контактная разность потенциалов:

$$U_{12} = \frac{e\varphi_1 - e\varphi_2}{e} = \varphi_1 - \varphi_2$$

Внутренняя контактная разность потенциалов:

$$U'_{12} = \frac{\varepsilon_{F1} - \varepsilon_{F2}}{e}$$



- Контактная разность потенциалов возникает между находящимися в электрич. контакте проводниками в условиях термодинамич. равновесия.
- Между двумя проводниками, приведёнными в соприкосновение, происходит обмен электронами, в результате чего они заряжаются (проводник с меньшей работой выхода положительно, а с большей - отрицательно) до тех пор, пока потоки электронов в обоих направлениях не уравновесятся, и во всей системе уровень Ферми станет одинаковым.
- Установившаяся К. р. п. равна разности работ выхода проводников, отнесённой к заряду электрона.
- Сопротивление контакта изменяется несимметрично в зависимости от знака приложенного напряжения (выпрямляющее свойство контакта)

## 2. Эффект Зеебека

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает ЭДС (термоэдс), если места контактов поддерживают при разных температурах  $T_1$  и  $T_2$ . Происходит диффузия электронов от теплого к холодному концу проводника.

В небольшом интервале температур термоЭДС можно считать пропорциональной разности температур:

$$\varepsilon = \alpha_{12}(T_2 - T_1),$$

где  $\alpha_{12}$  — термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термоэдс)

# Термопара



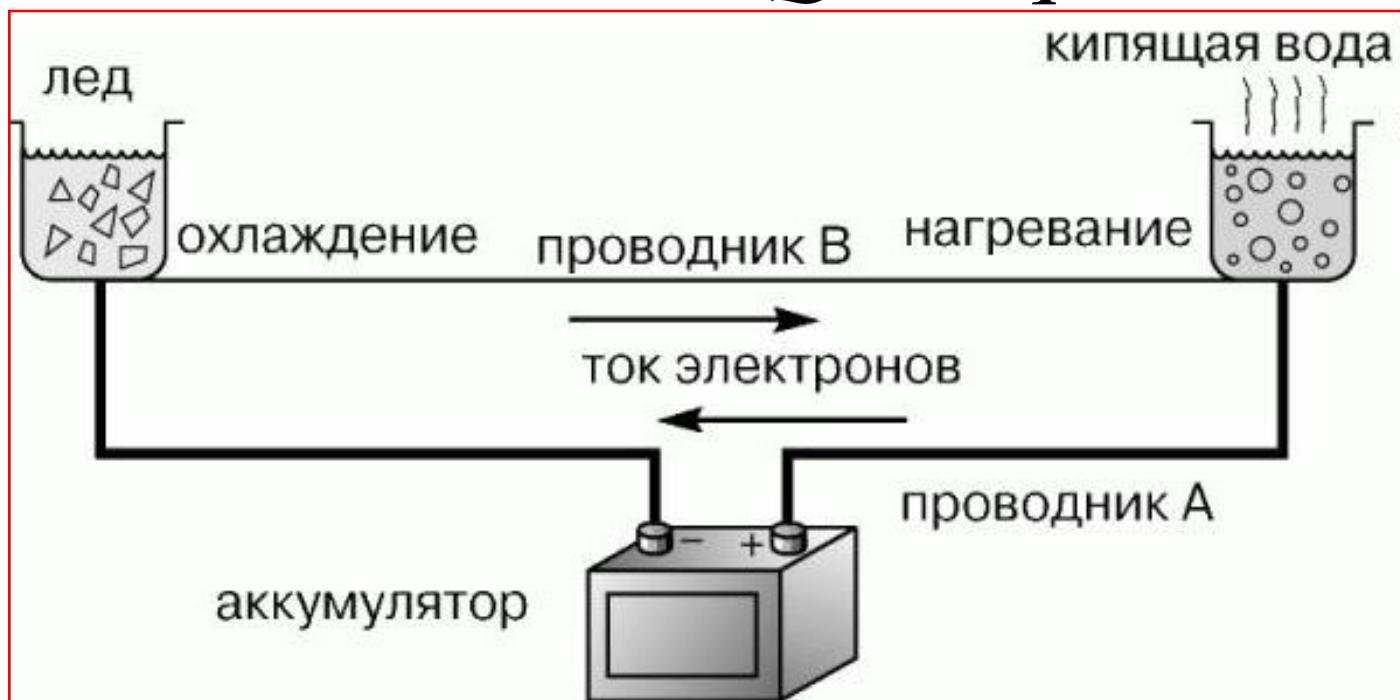
Термопара состоит из двух спаянных на одном из концов проводников, изготовленных из 2 разных металлов.

- Если места контактов Т. поддерживать при различных температурах, то в цепи возникает эдс (термоэдс), а при замыкании цепи — электрический ток.
- Это явление (Зеебека эффект) используется преимущественно для измерения температур либо др. физических величин, измерение которых может быть сведено к измерению температур: давления газа, скорости потока жидкости или газа, влажности, потока лучистой энергии.

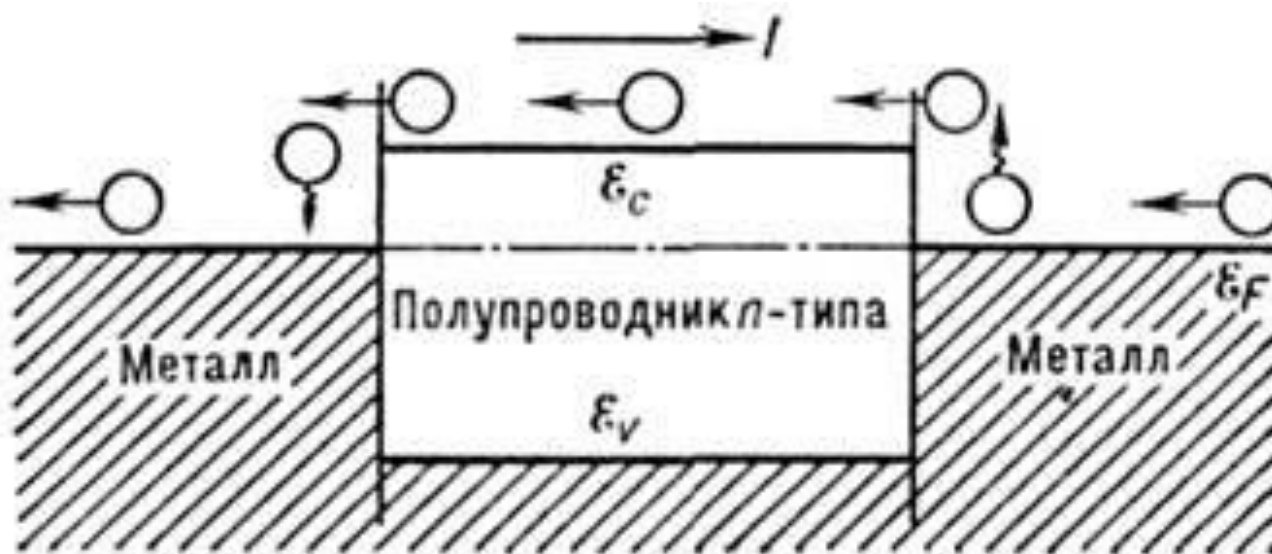
## 3.Эффект Пельтье

- **Термоэлектрический эффект** или **эффект Пельтье** заключается в том, что при включении в электрическую цепь двух различных проводников в месте их контакта поглощается или выделяется теплота (в зависимости от направления тока). Эффект особенно заметен при использовании разнородных полупроводников, с дырочной – p и электронной – n проводимостью.

$$Q = \Pi q = \Pi \cdot I \cdot t$$



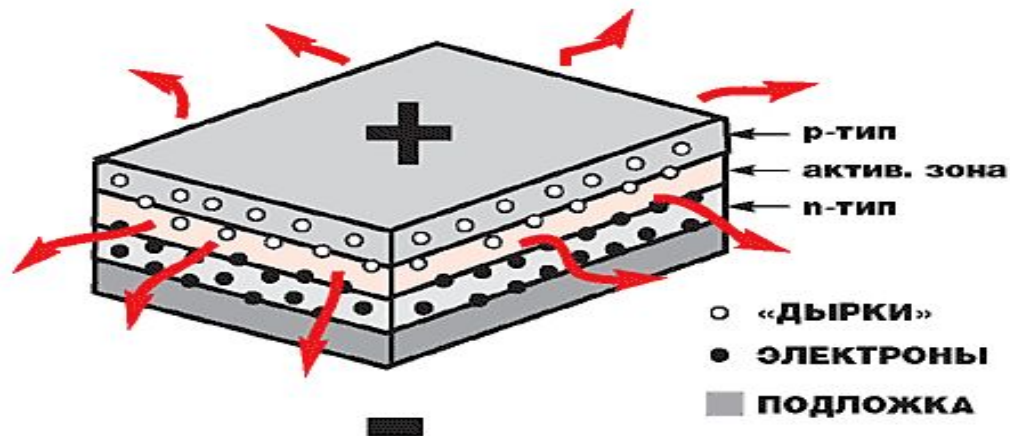
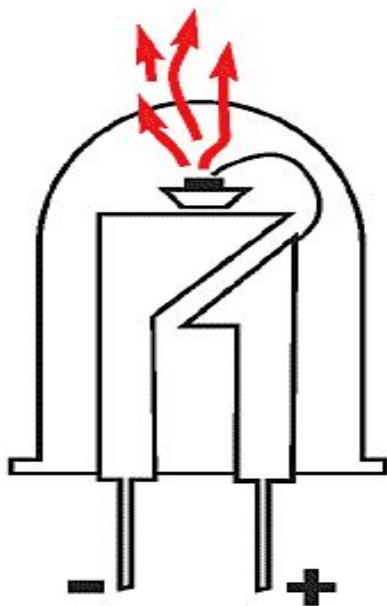
# Причина возникновения эффекта Пельтье



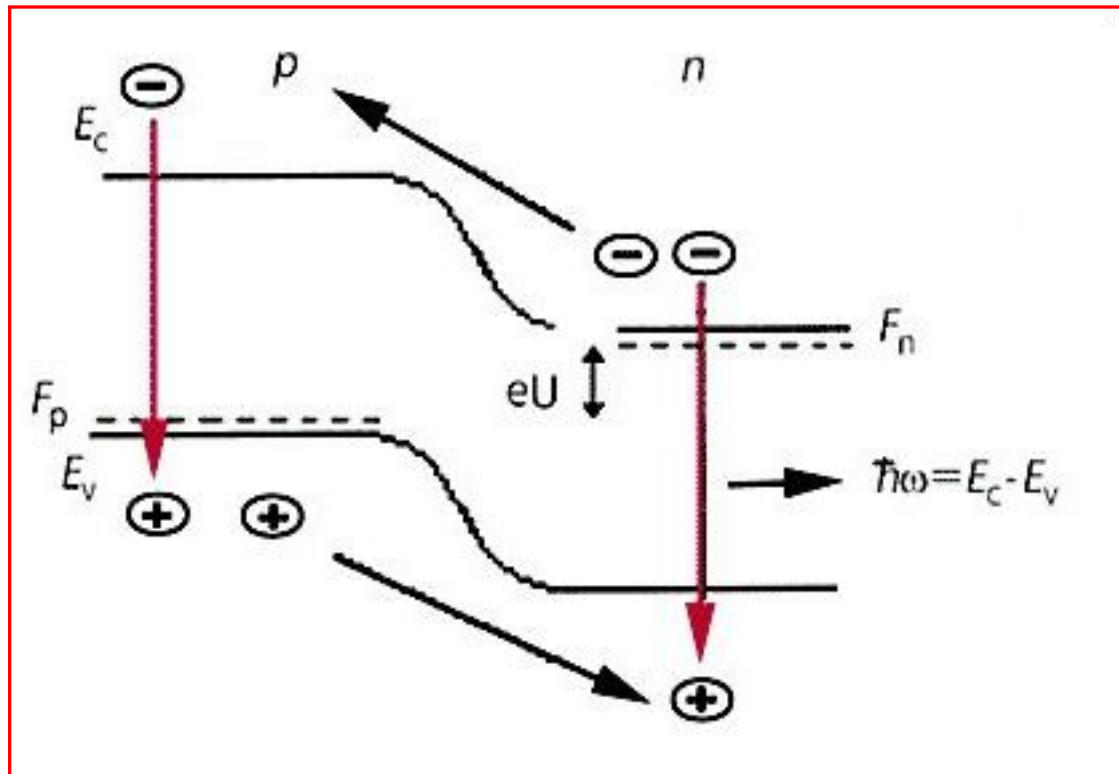
- Средняя энергия носителей заряда (например, электронов), участвующих в электропроводности, в разл. проводниках различна, т. к. зависит от их энергетич. спектра, концентрации и механизма рассеяния. При переходе из одного проводника в другой электроны либо передают избыточную энергию решётке (нагрев), либо пополняют недостаток энергии за её счёт (охлаждение)

## 4. Светодиод

- полупроводниковый прибор, действие которого основано на явлении испускания фотонов света в области р-п перехода при протекании электрического тока.



- При пропускании тока в прямом направлении электроны и дырки рекомбинируют (электроны переходят на более низкий энергетический уровень) и испускают «избыточную» энергию в виде фотона.



# Устройство светодиода

- Основу светодиода составляет искусственный полупроводниковый кристаллик размером  $0,3 \times 0,3$  мм, в котором реализован р-n-переход. Цвет свечения зависит от материала кристаллика.

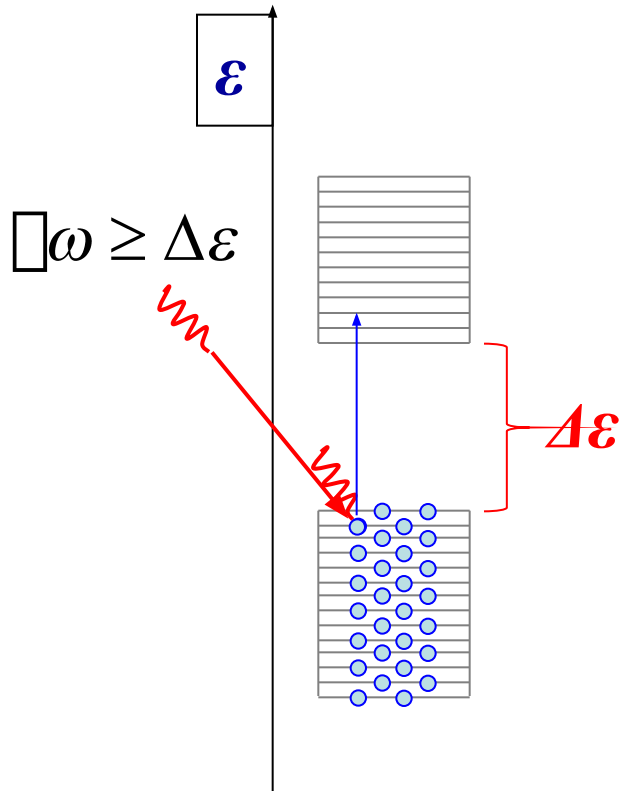




## §8. Внутренний фотоэффект

- **Внутренним фотоэффектом** называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в твердых и жидких полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием света. Проявляется в изменении концентрации носителей тока в среде и приводит к возникновению фотопроводимости .

**Фоторезистор** - полупроводниковый прибор полупроводниковый прибор, изменяющий величину своего сопротивления при облучении светом.



Для изготовления фоторезисторов используют полупроводниковые материалы с шириной запрещенной зоны, оптимальной для решаемой задачи.

1. Видимая часть спектра  
( $\lambda \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ):

$$\Delta E \approx \frac{hc}{\lambda} \approx 2,5 \quad - \text{CdS}$$

2. Инфракрасная часть спектра  
( $\lambda \sim 10^{-6} \text{ м}$ ):

$$\Delta E \approx 1,2 \div 2,5 \text{ эВ}$$

**PbS, PdSe, PbTe, InSb**

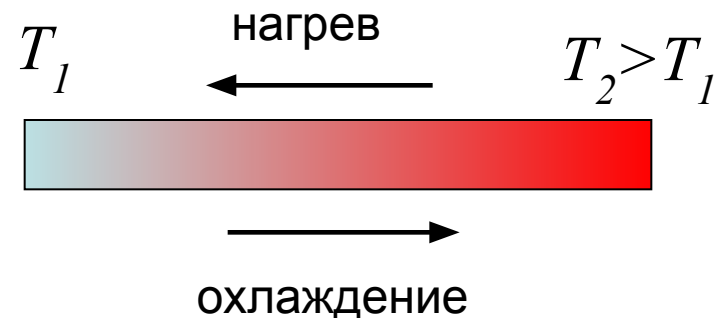
Применяют в автоматике в качестве датчиков, обнаруживающих изменение температуры или освещенности



# Эффект Томпсона

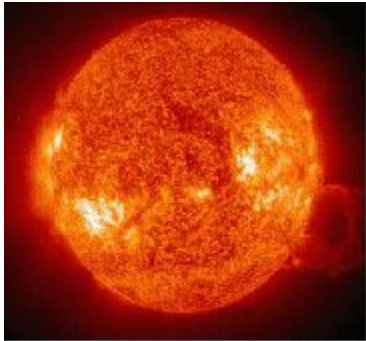
- Теплота выделяется (поглощается) при прохождении тока по однородному проводнику, вдоль которого имеется градиент температуры:

$$dQ = \tau \cdot I \cdot \frac{dT}{dl} \cdot dl$$



При переходе из одного проводника в другой электроны либо передают избыточную энергию атомам, либо пополняют недостаток энергии за их счёт (в зависимости от направления тока). В первом случае вблизи контакта выделяется, а во втором — поглощается теплота.

# Тема. Тепловое равновесное излучение



**Тепловое излучение** — электромагнитное излучение — электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела. Имеет сплошной спектр — электромагнитное излучение, возникающее за счёт внутренней энергии тела. Имеет сплошной спектр, расположение и интенсивность максимума которого зависят от **Термодинамическое равновесие** — состояние системы, при котором температуры тела. При остывании последний смещается в длинноволновую часть спектра. Остаются неизменными по времени макроскопические величины этой системы (температура, давление, объём, энтропия) в условиях изолированности от окружающей среды.

**АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО** - тело, которое полностью поглощает любое падающее на его поверхность электромагнитное излучение, независимо от температуры этого тела. Таким образом, для абсолютно черного тела поглощательная способность (отношение поглощённой энергии к энергии падающего излучения) равна 1 при излучениях всех частот, направлений распространения и поляризаций.



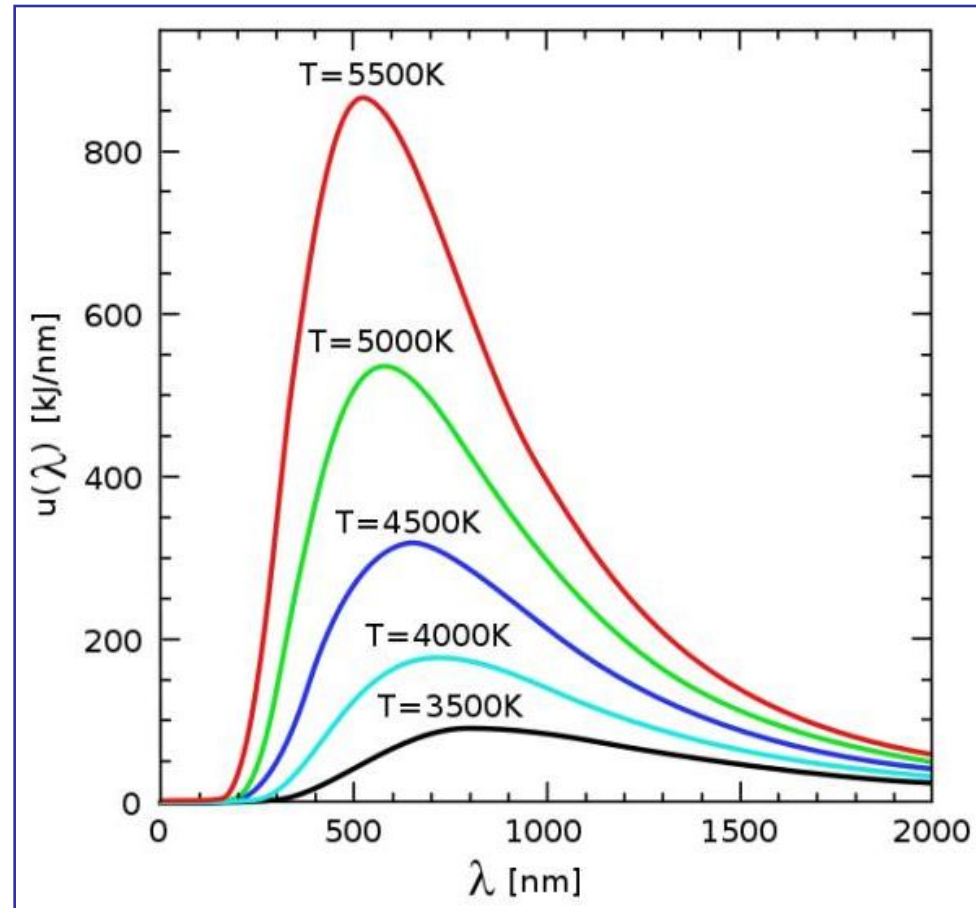
В случае, если излучение находится в термодинамическом равновесии с веществом, то такое излучение называется *равновесным*. Спектр такого излучения эквивалентен спектру абсолютно чёрного тела и описывается законом Планка.

# Формула Планка

Спектральная объемная плотность энергии излучения АЧТ (энергия, излучаемая в узком спектральном интервале):

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$u_\lambda = \frac{\pi h\nu^3}{c^2 \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$



# Закон Стефана -Больцмана

- Энергетическая светимость:

$$u = \int_0^{\infty} u_{\nu} d\nu = aT^4$$

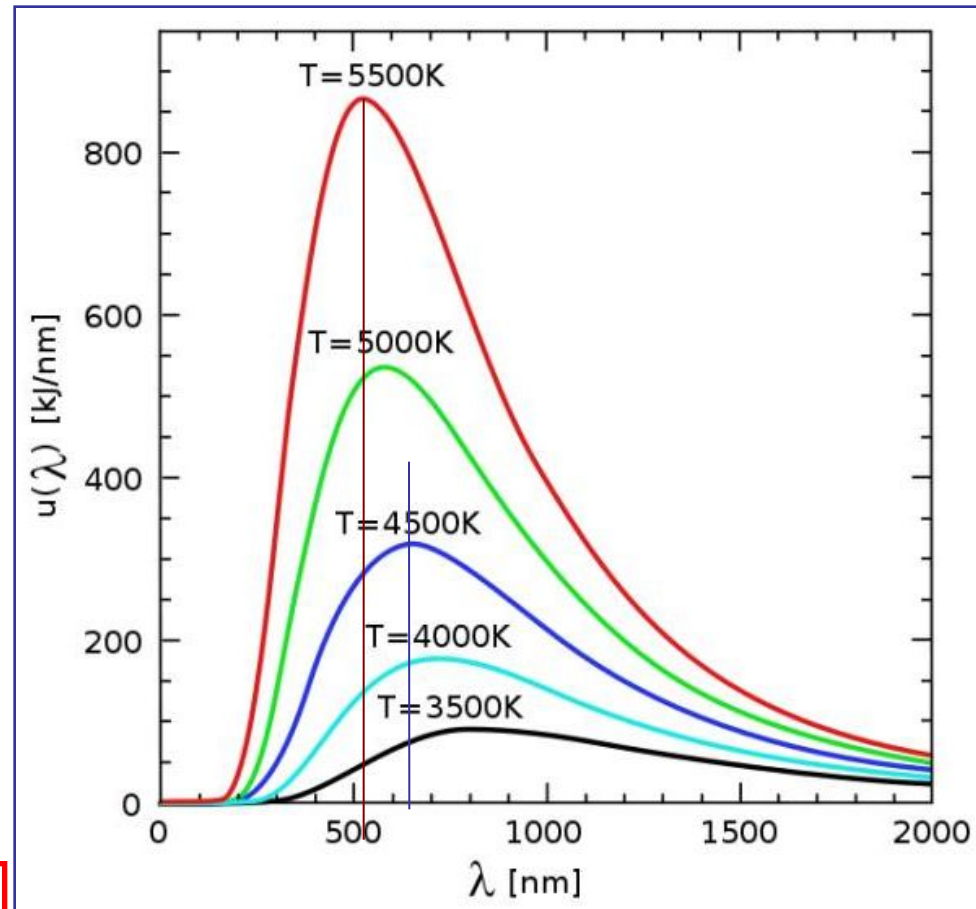
$$R_{\text{э}} = \frac{c}{4} u = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / ( м}^2 \text{ К}^4 \text{ )}$$

Полная интегральная по спектру энергия, излучаемая единичной площадкой в единицу времени, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры тела.

# Закон смещения Вина

- Длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности излучения тела, обратно пропорциональна его температуре.



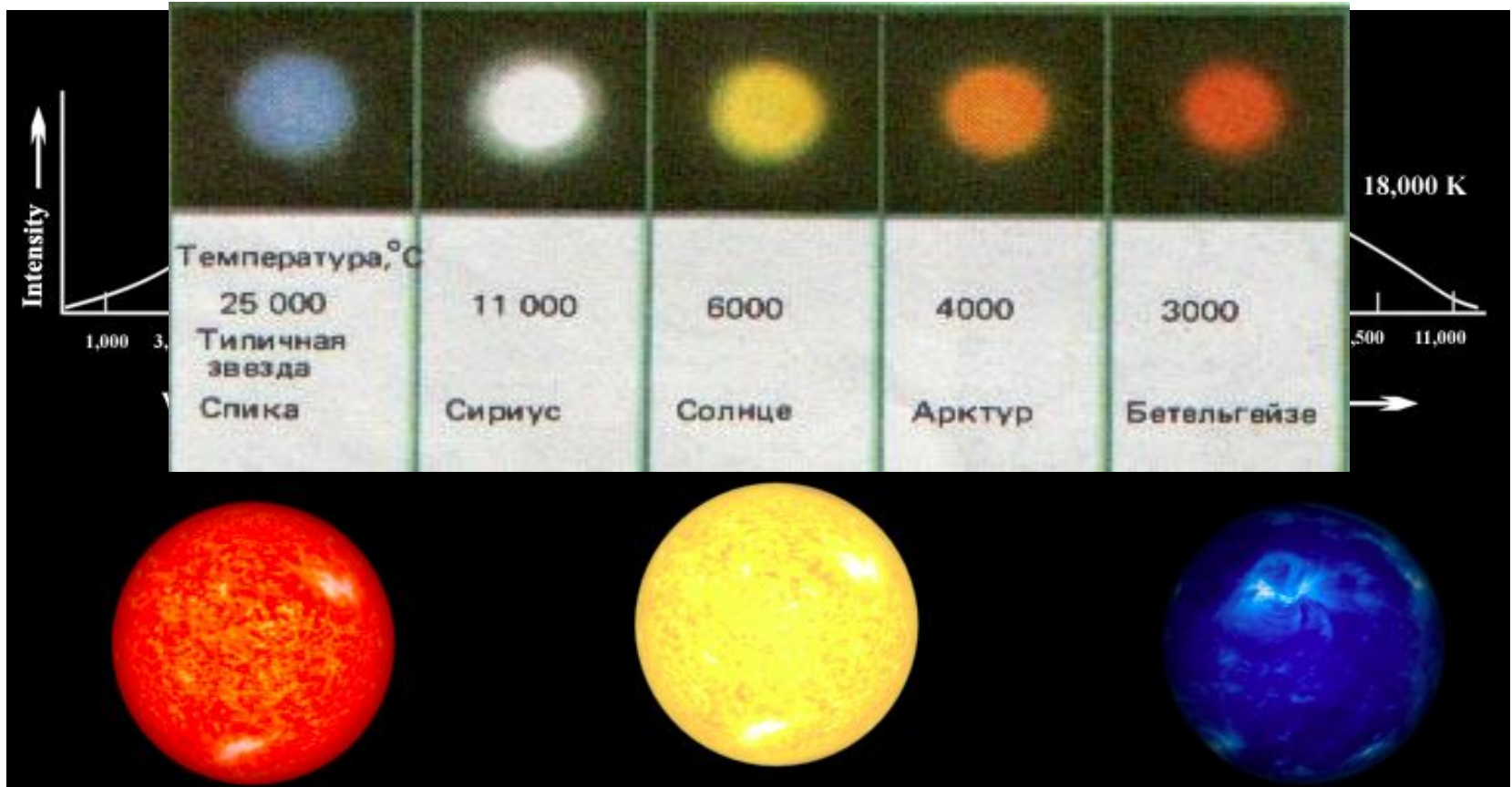
$$T\lambda_m = b = 0,29\text{см} \cdot \text{K}$$



# Какая звезда горячее?

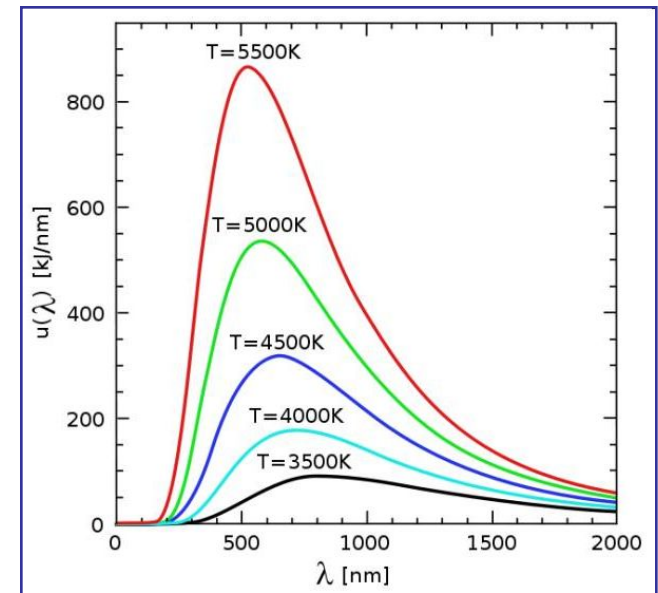
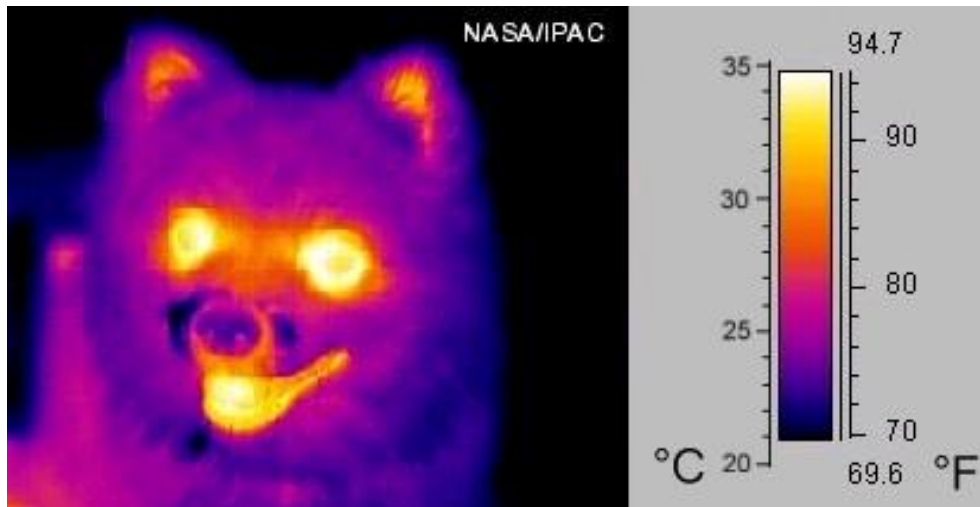
$$T\lambda_m = b = 0,29 \text{ см} \cdot \text{К}$$

- Цвет звезды зависит от температуры ее фотосферы



# Тепловизор

- устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета.





# Пирометр -

- прибор для бесконтактного измерения температуры тел. Принцип действия основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в диапазонах инфракрасного излучения - прибор для бесконтактного измерения температуры тел.

- **Оптические.** Позволяют визуально определять, как правило, без использования специальных устройств, температуру нагретого тела. Позволяют визуально определять, как правило, без использования специальных устройств, температуру нагретого тела, путем сравнения его цвета с цветом эталонной нити.
- **Радиационные.** Оценивают температуру посредством пересчитанного показателя мощности. Оценивают температуру посредством пересчитанного показателя мощности теплового излучения. Если пирометр измеряет в широкой полосе спектрального излучения, то такой пирометр называют пирометром полного излучения.