



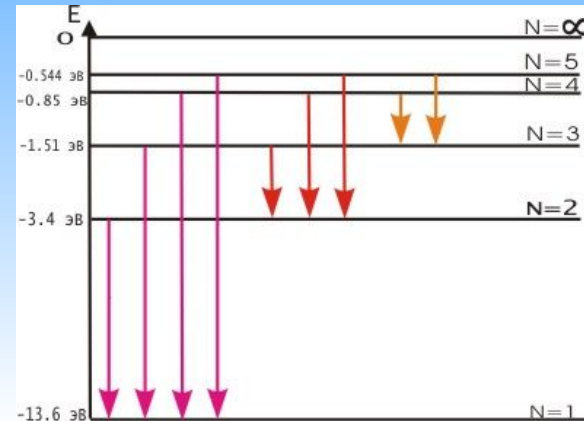
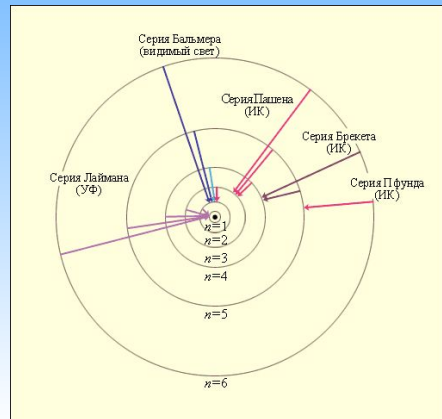
Диоды

Diode

# Полупроводники

## Твердое тело. Энергетические зоны.

### Модель атома



<http://e-science.ru/physics/theory/?t=4>

Уровень



1 атом

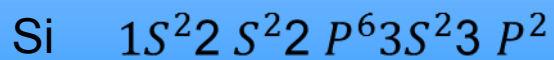
Уровень



2 атома



Твердое тело

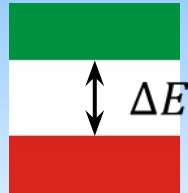


# Полупроводники

Твердое тело. Энергетические зоны.

Зона проводимости

Валентная зона



$$\Delta E \gg \kappa T$$

$$\Delta E > 3eV$$

Диэлектрики



$$\Delta E \sim \kappa T$$

$$0,01eV < \Delta E \leq 3eV$$

Полупроводники



$$\Delta E \leq 0$$

Проводники

Для кремния

$$\Delta E \approx 1,21 eV$$

$$\kappa T = 0,026 eV \quad (T = 300 \text{ K})$$

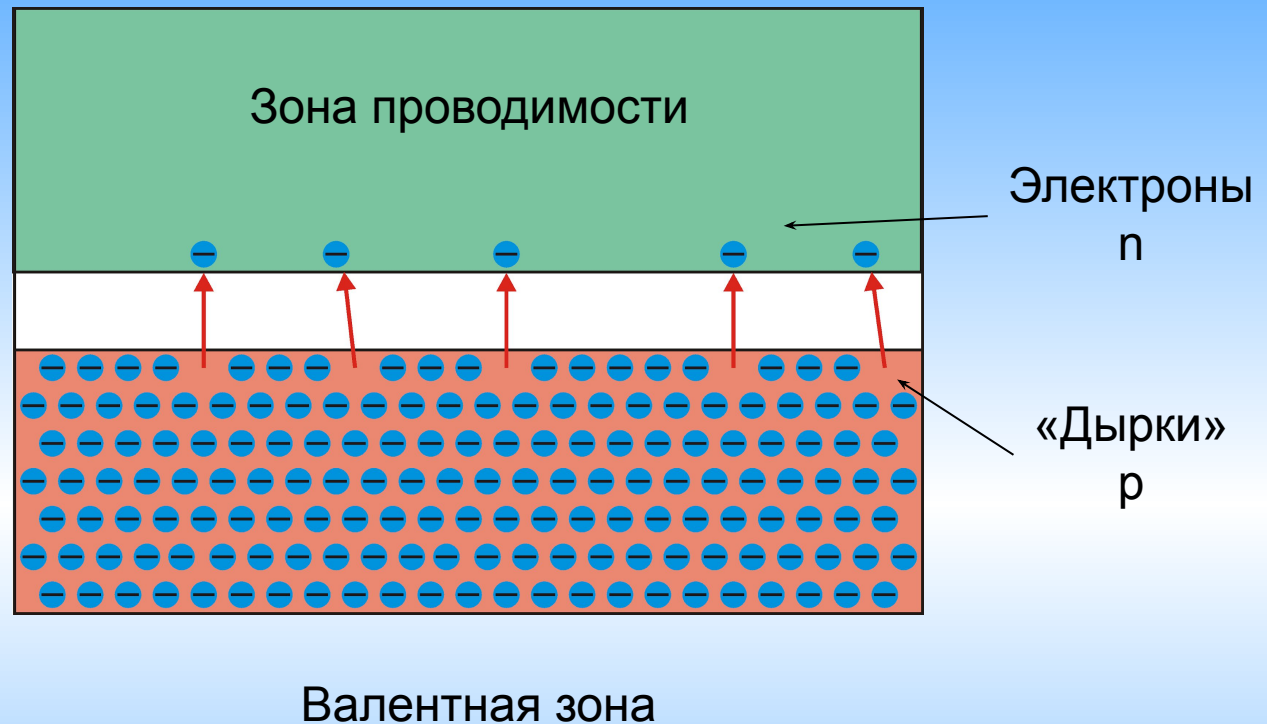
$T \sim 0K$



Валентная зона

Направленное движение зарядов (проводимость) невозможно

$T > 0K$



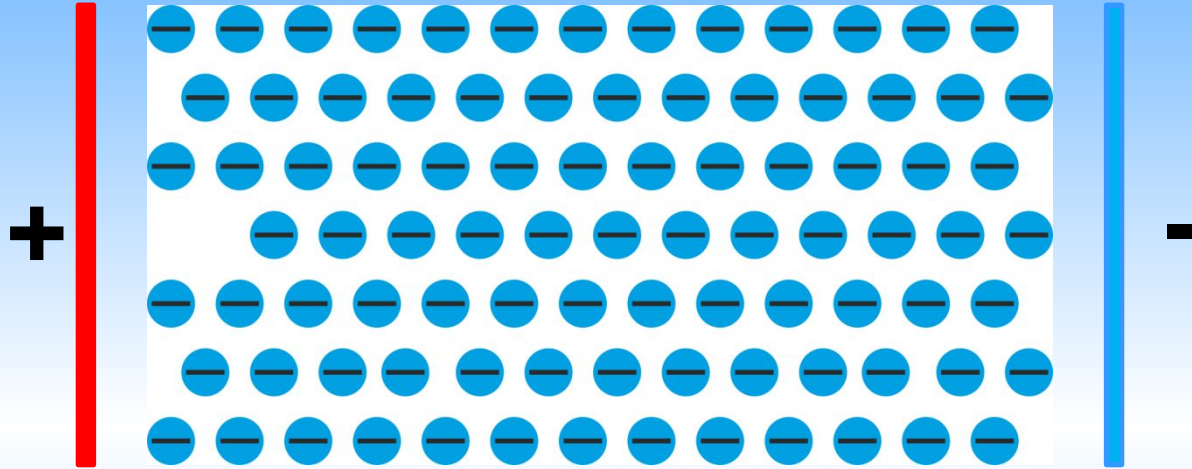
Направленное движение зарядов (проводимость) возможно как в зоне проводимости, так и в валентной зоне

Количество электронов = количеству дырок в чистом полупроводнике



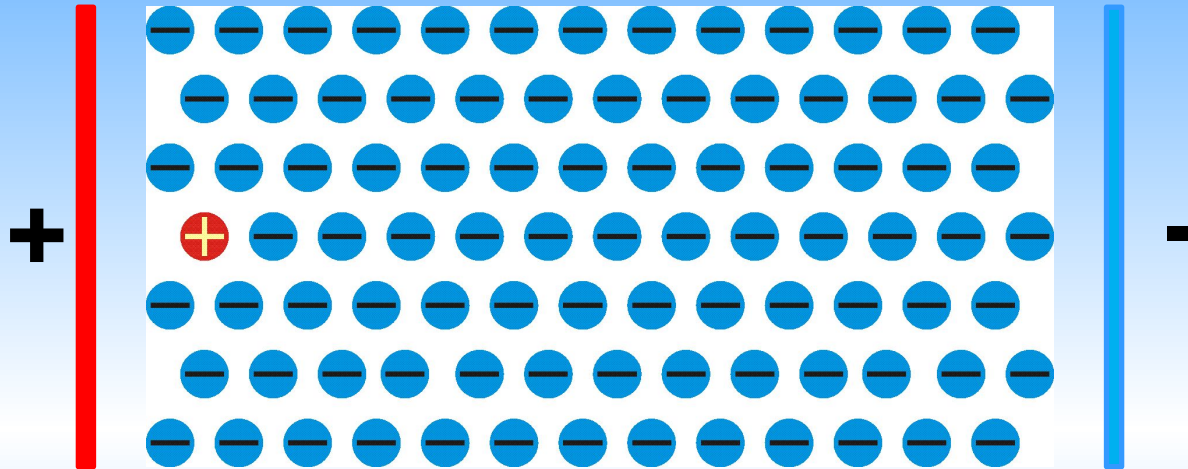
# Полупроводники

Дырки



# Полупроводники

## Дырки



## Кремний

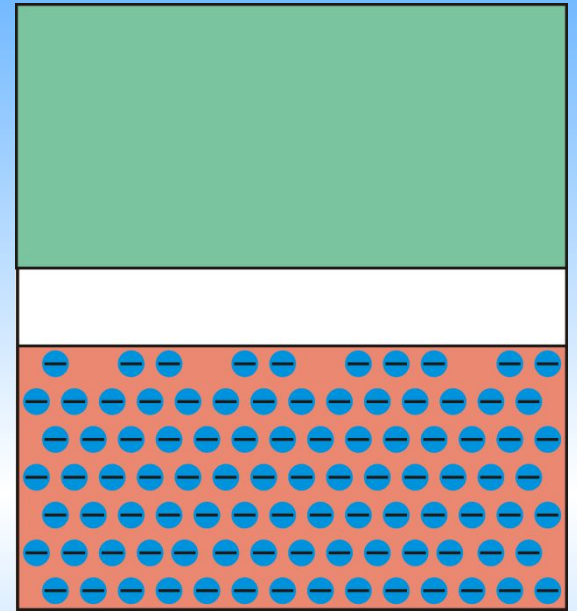
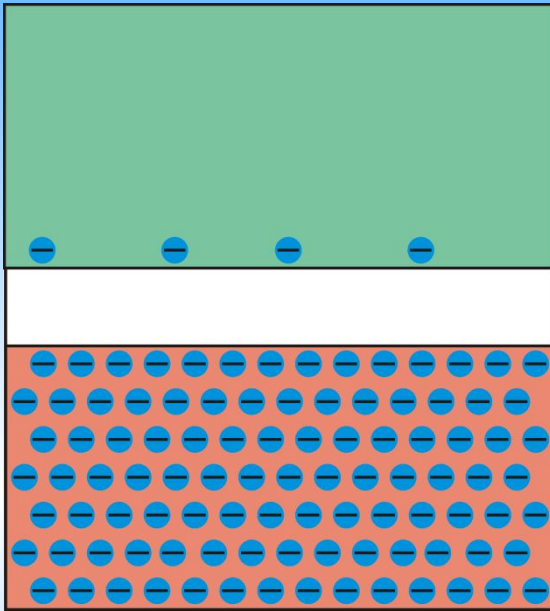
	n	p
Подвижность [см <sup>2</sup> /(В·с)]	1200 ÷ 1450	~ 500
Длина свободного пробега [см]	~ 0,1	0,02 ÷ 0,06



# Полупроводники

Примесная проводимость

$T \sim 0K$



Донорная примесь

Кремний (4) + немного мышьяка (5)

Полупроводник n - типа

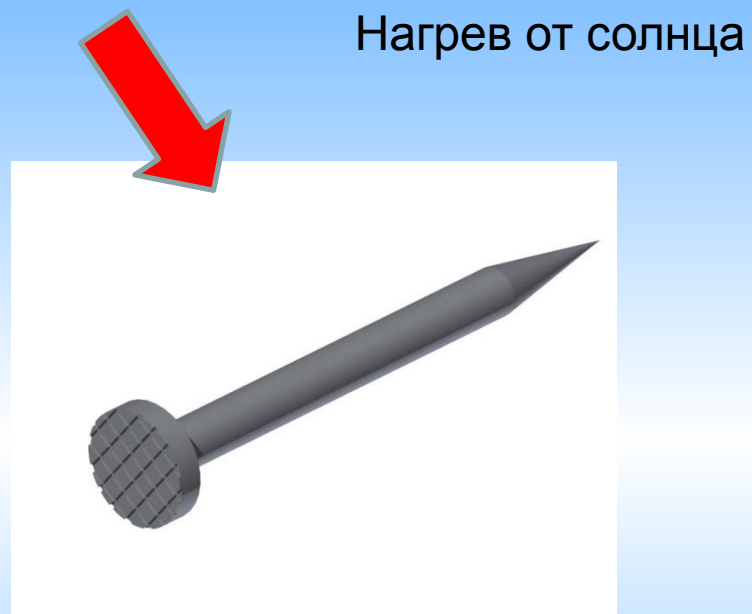
Акцепторная примесь

Кремний (4) + немного индия (3)

Полупроводник p - типа

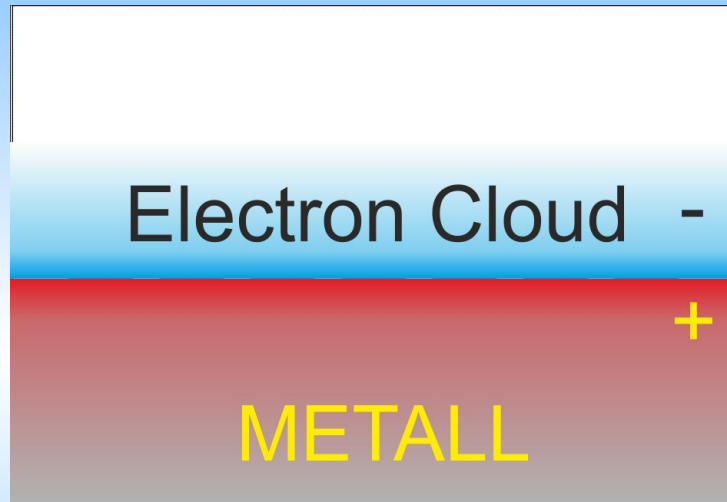
Проводимость при низких температурах возможна

# Электронное облако



Почему электроны бегают по металлу и не убегают в космос?

# Электронное облако

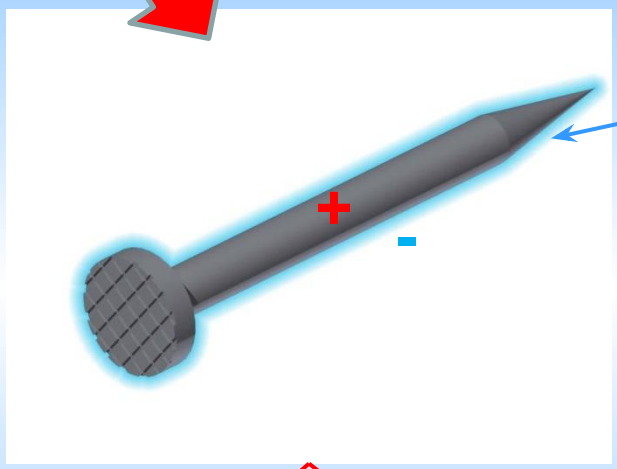


Плотность электронного облака  
спадает экспоненциально с ростом  
расстояния от поверхности

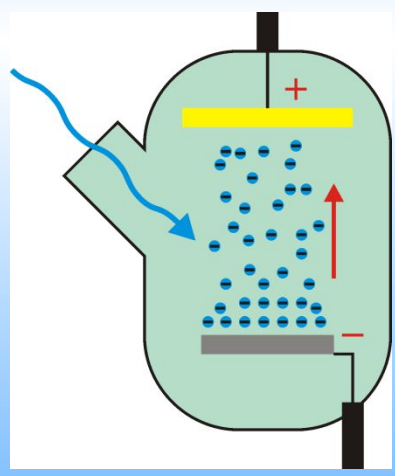
# Электронное облако



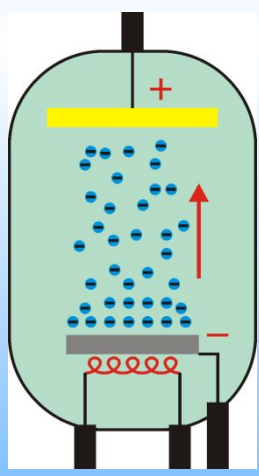
Нагрев от солнца



Динамическое электронное облако

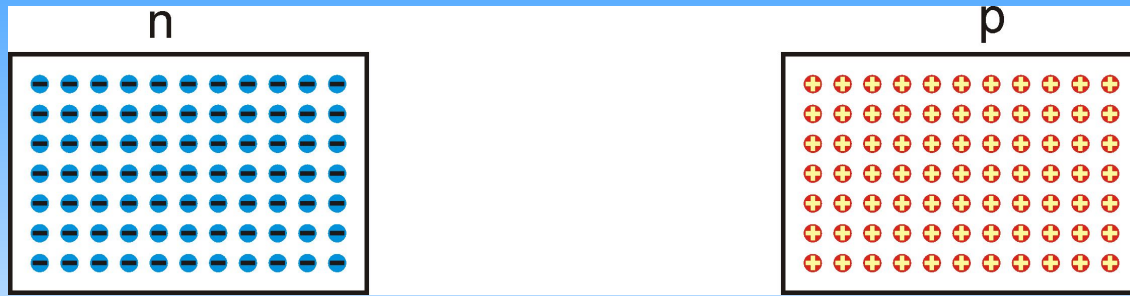


Внешний фотоэффект



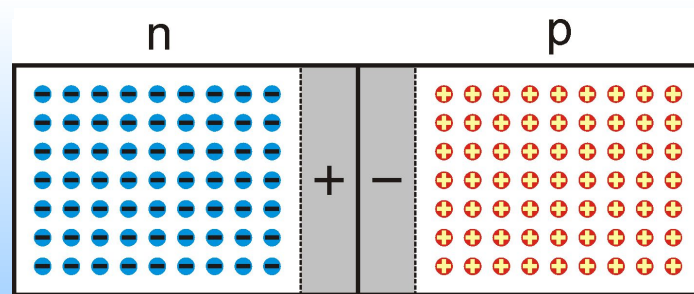
Термоэлектронная эмиссия

# *p-n переход*



↑  
Электрически нейтральный кусок  
полупроводника

↑  
Электрически нейтральный кусок  
полупроводника

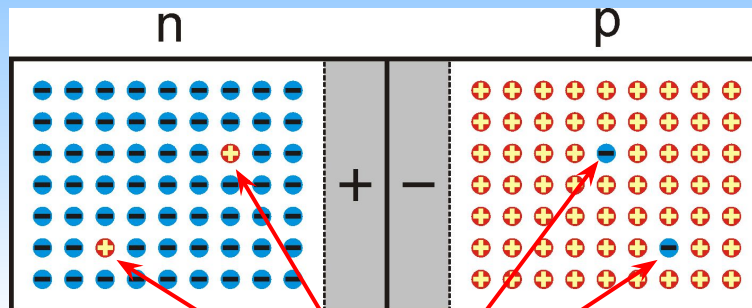


Depletion  
zone

# *p-n переход*

Более точно

Основные носители

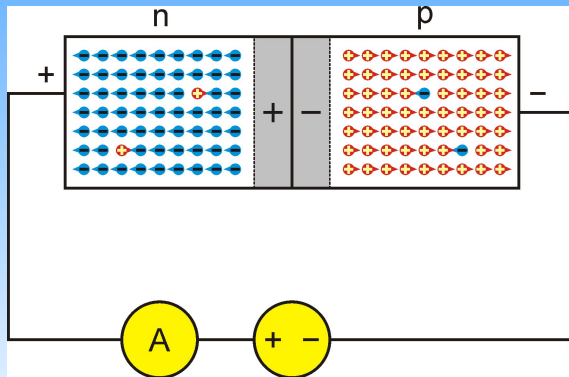


Неосновные носители.  
Их мало.  
(Собственная проводимость)

Количество неосновных носителей  
экспоненциально растет с ростом температуры

# Полупроводниковый диод

## Обратное смещение



$$I_R = I_0$$

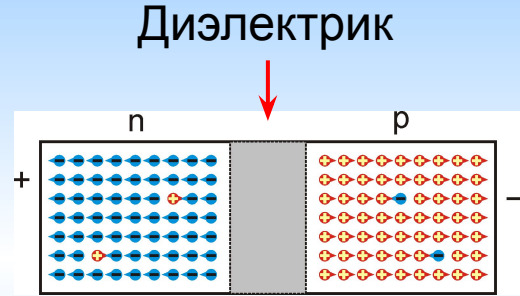
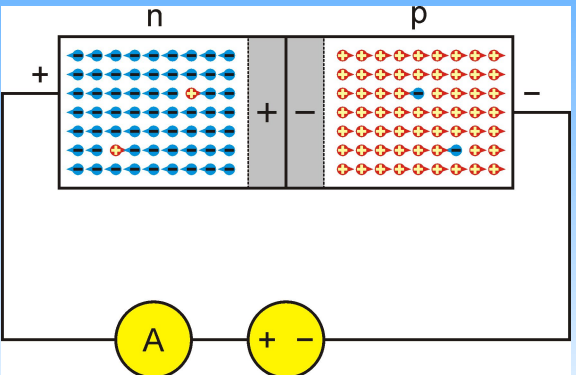
$$I_0 \rightarrow$$

Ток неосновных носителей  
(для кремния  $\sim 10^{-10}$  А)

$$I_R \cong 0$$

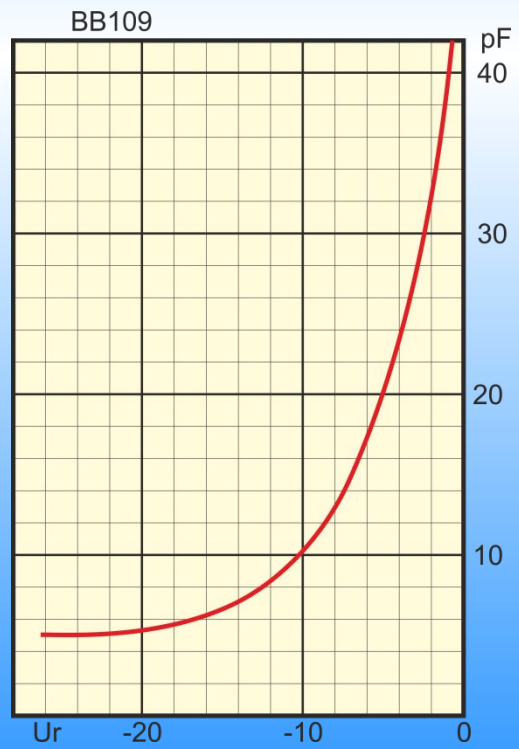
# Варикап

Обратное смещение диода  
Varicap. Varactor.



полуПРОВОДНИК

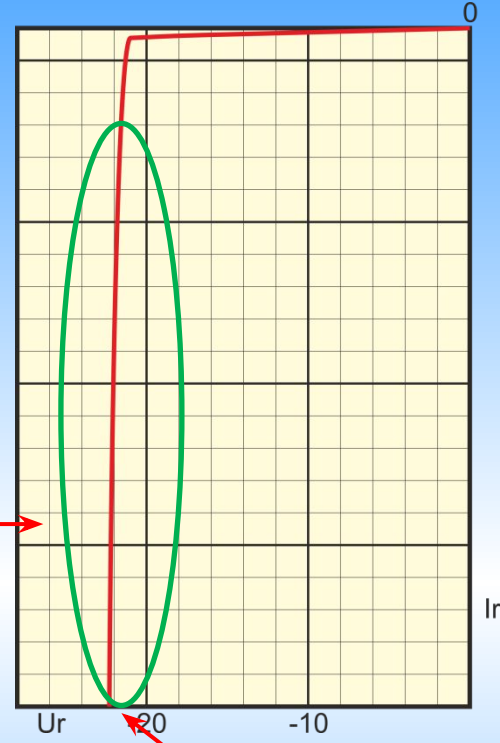
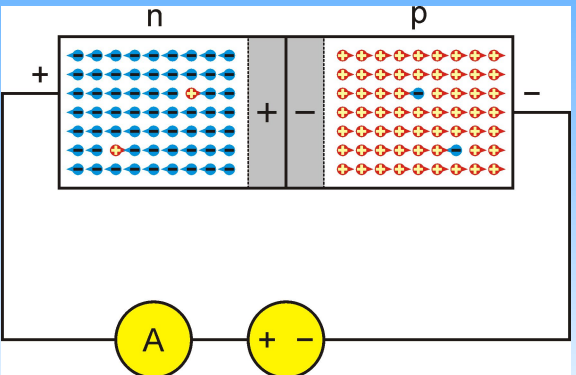
полуПРОВОДНИК



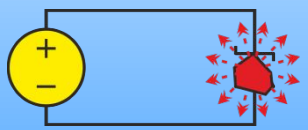


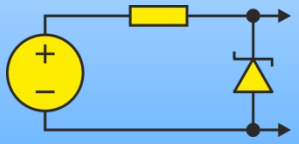
# Стабилитрон

## Обратное смещение диода



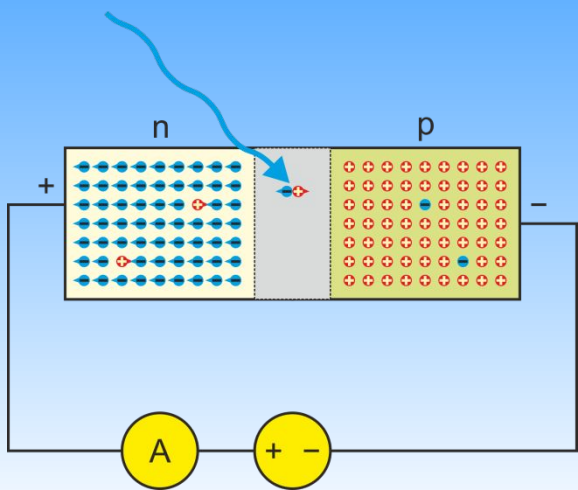
Пробой.  
Практически вертикальная линия.



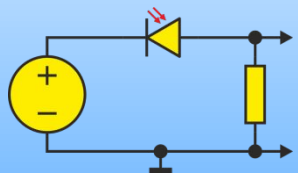
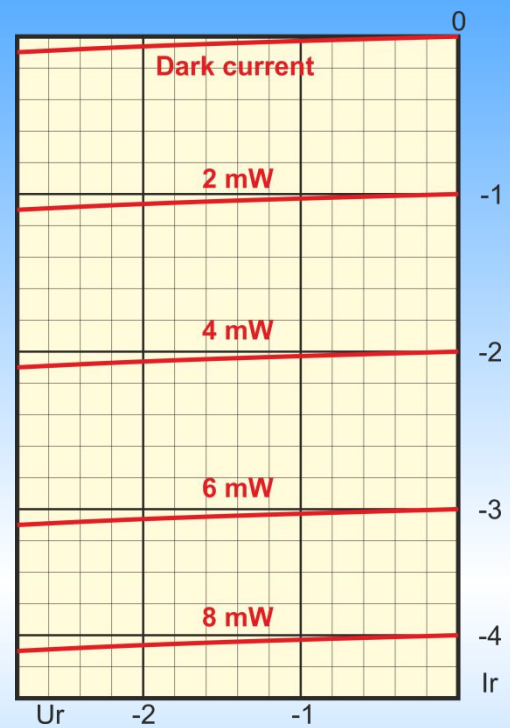
$V=25\div 35V$    $V_s=22V=const$

# Фотодиод

Обратное смещение диода



Внутренний фотоэффект

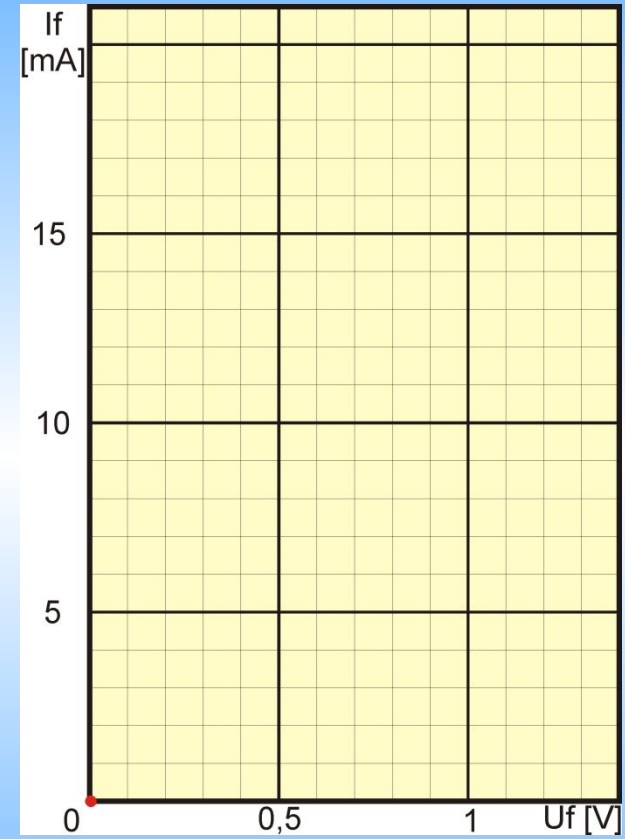
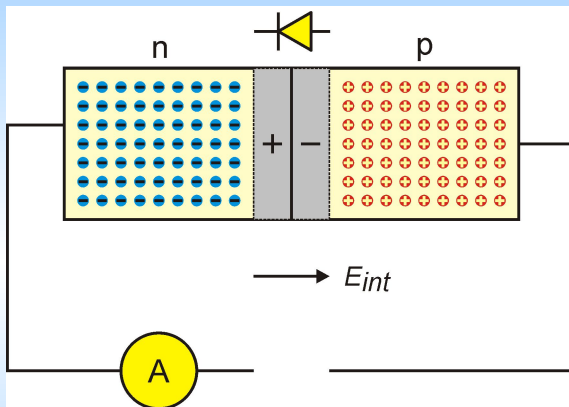


$$V_{out} \sim W_{light}$$



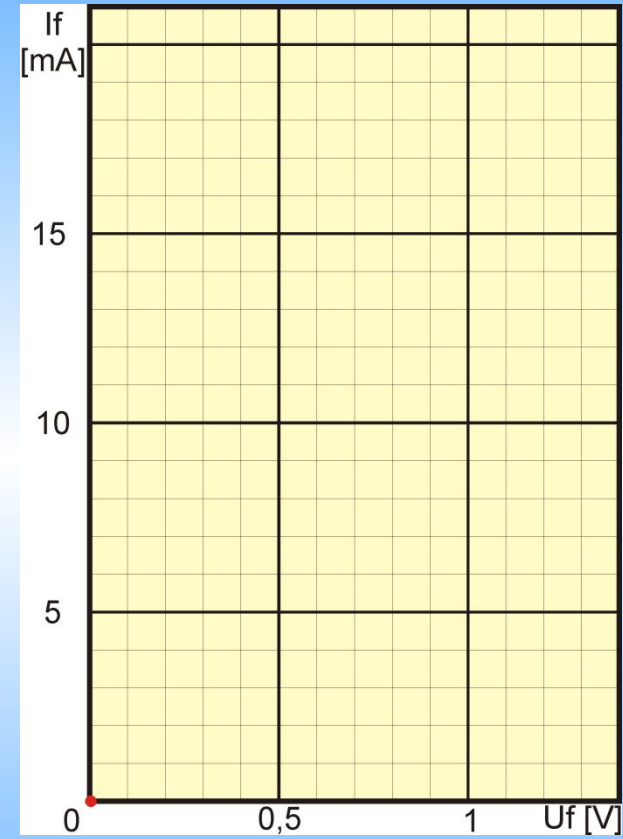
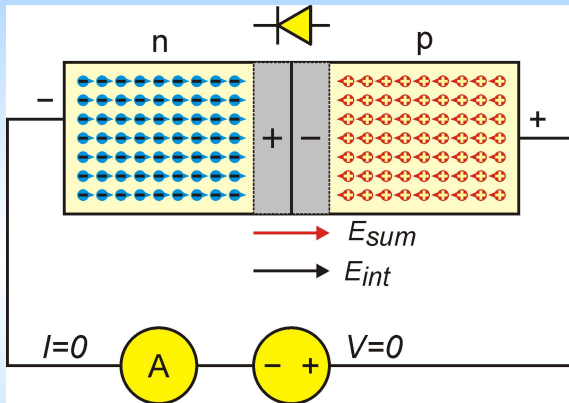
# Диод

## Прямое смещение диода



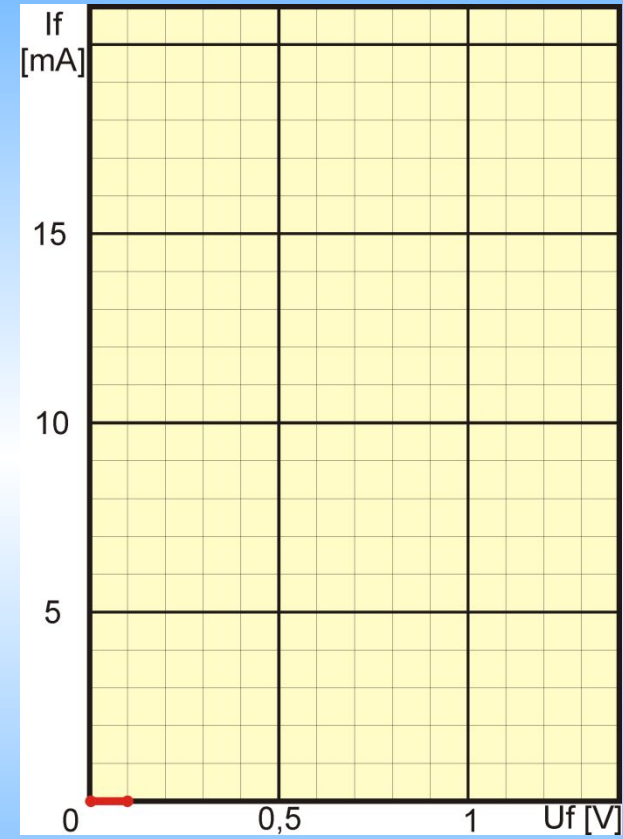
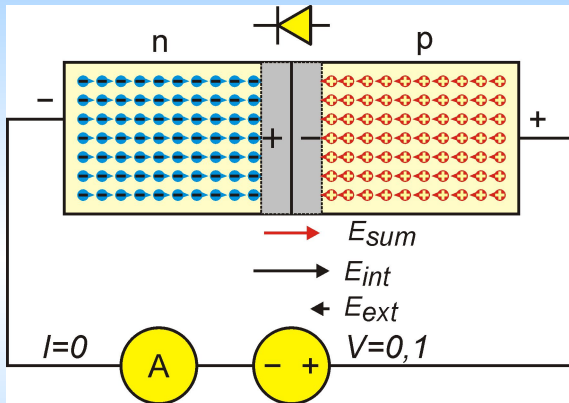
# Диод

## Прямое смещение диода



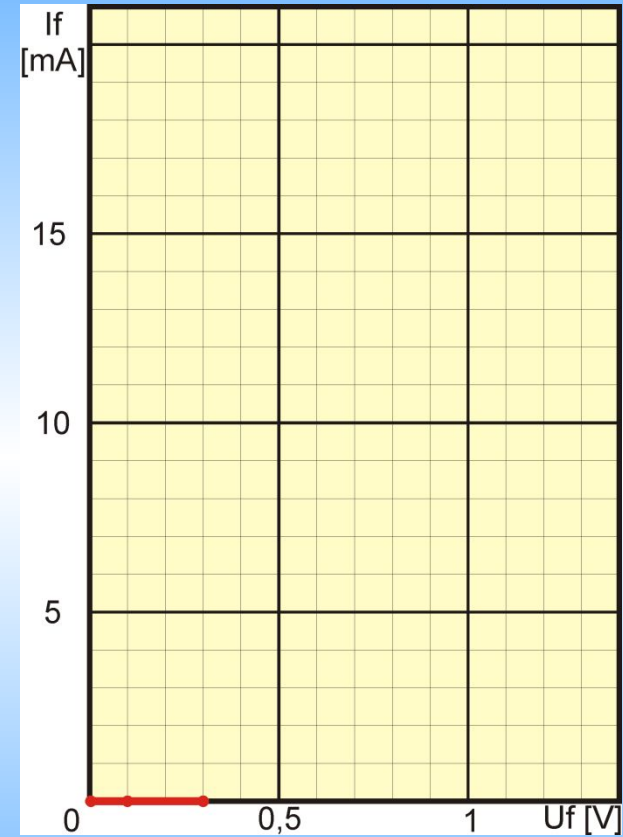
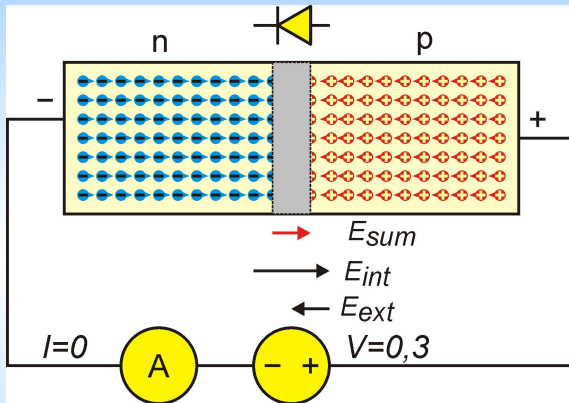
# Диод

## Прямое смещение диода



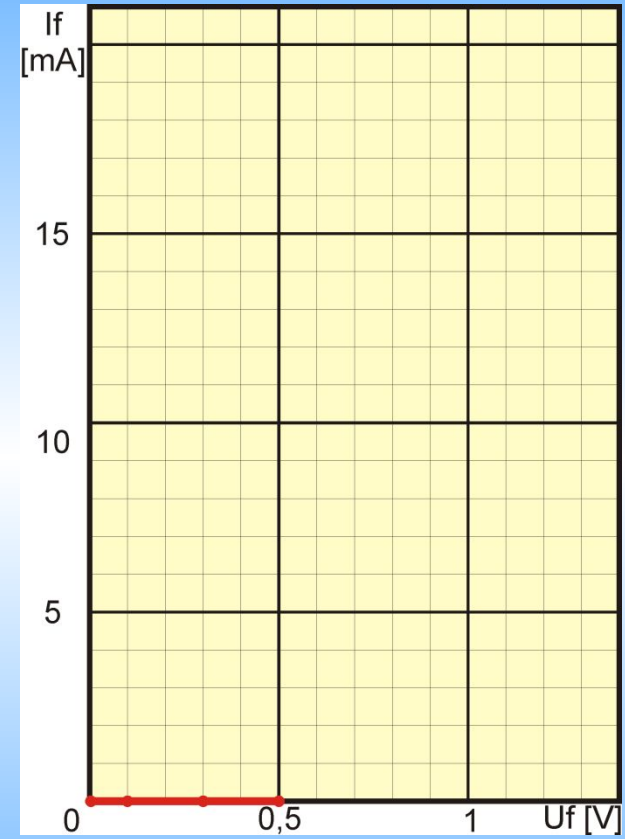
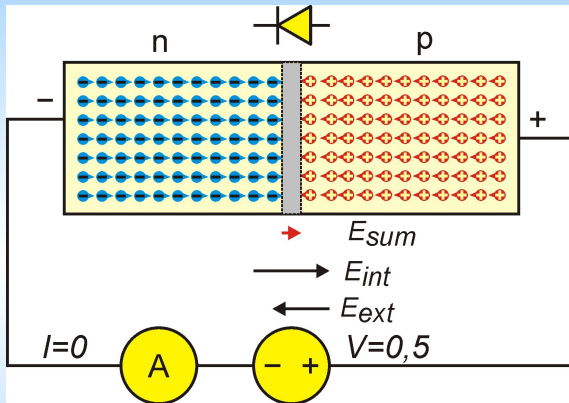
# Диод

## Прямое смещение диода



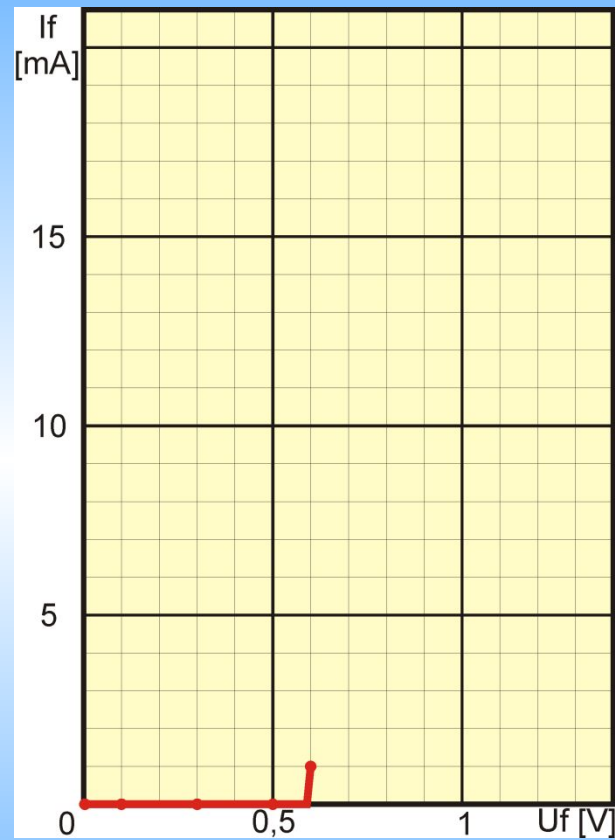
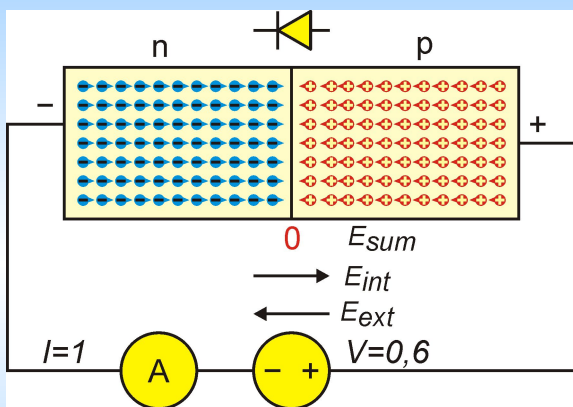
# Диод

## Прямое смещение диода



# Диод

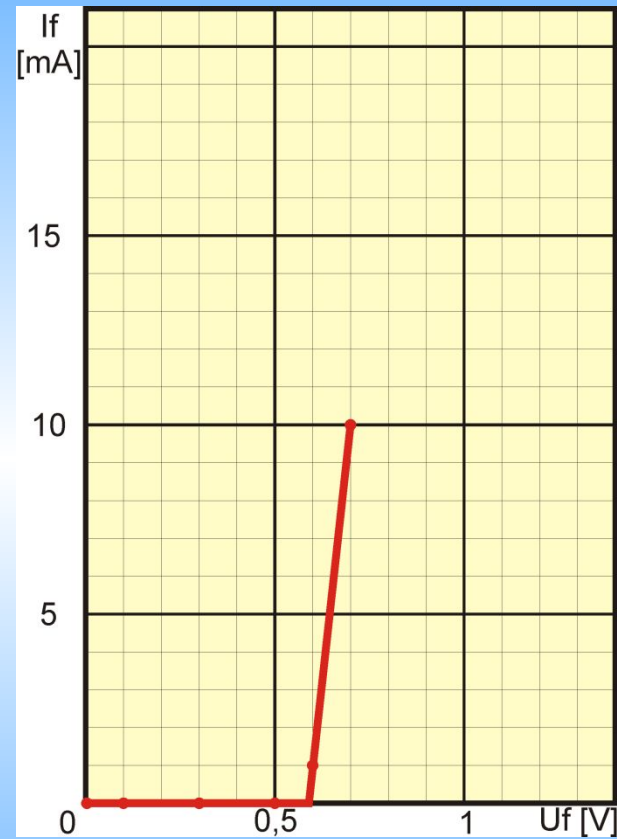
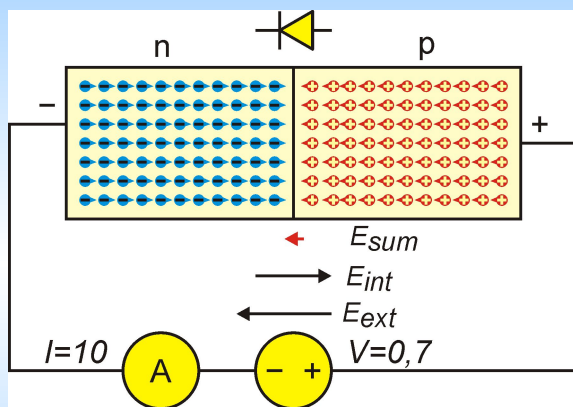
## Прямое смещение диода





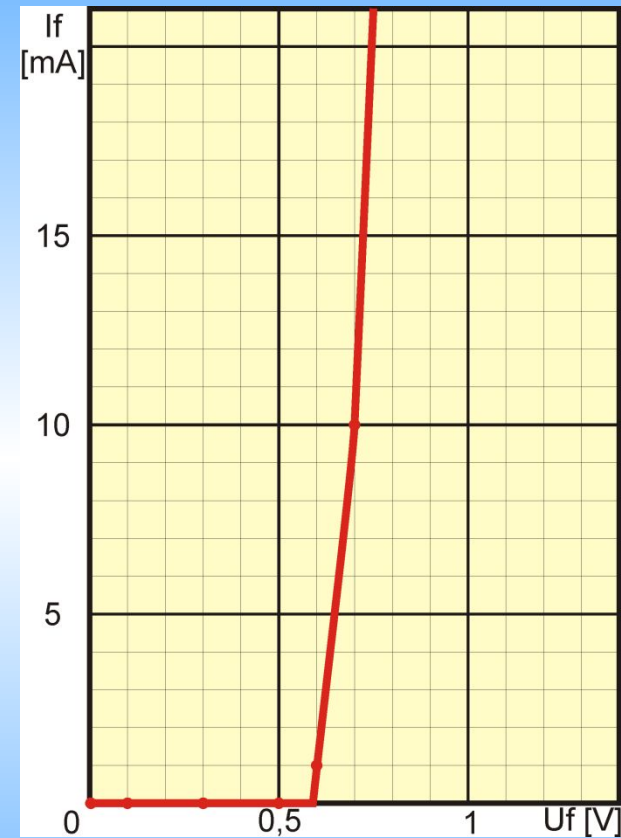
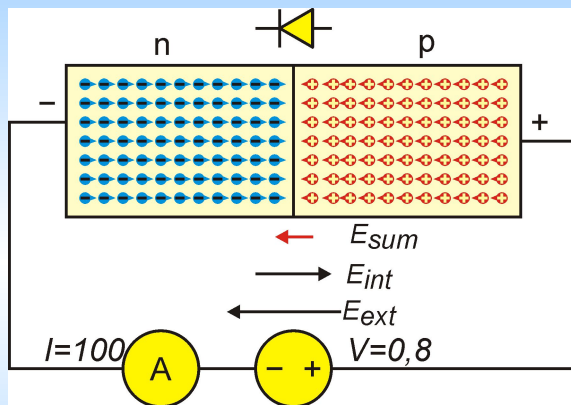
# Диод

## Прямое смещение диода



# Диод

## Прямое смещение диода



Тепловое движение сглаживает кривую

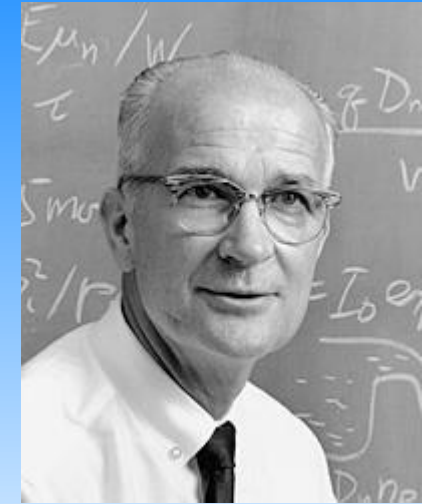
# Диод

Вольт-Амперная характеристика

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_d \times q}{n \times \kappa T}\right) - 1 \right]$$

Формула Шокли

	Значение
Напряжение на диоде	[В]
Обратный ток насыщения	$\approx 10^{-9}$ [А]
Коэффициент идеальности	1÷2
Постоянная Больцмана	$1,38 \times 10^{-23}$ [Кл]
Заряд электрона	$1,60 \times 10^{-19}$ [Дж/К]



Shockley

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_d}{n \times V_T}\right) - 1 \right]$$

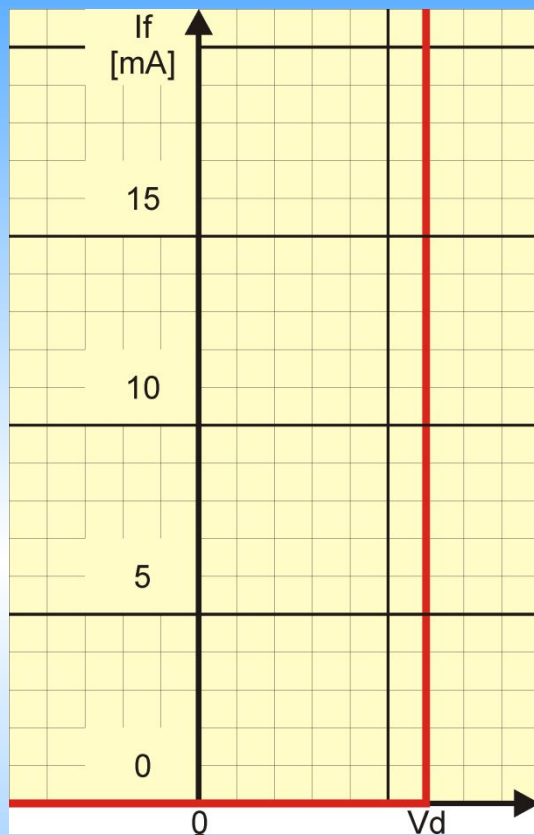
$$V_T = \frac{\kappa T}{q}$$

$V_T \cong 26$  мВ      При 300К

Формула описывает прямую и обратную ветви V-I характеристики за исключением области обратного пробоя.

# Диод

Упрощенная модель для практического использования

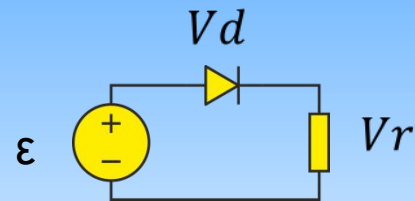


$V_d = \text{const}$  для конкретного p-n перехода

Для кремниевых диодов  $V_d \approx 0,6$  В

# Диод

## Практическое использование упрощенной модели



$$\varepsilon = V_d + V_r$$

~~$$V_d = n \times V_T \times \ln \frac{I}{I_0}$$
$$V_r = I \times R$$
$$\varepsilon = n \times V_T \times \ln \frac{I}{I_0} + I \times R$$~~


$$V_d = 0,6$$

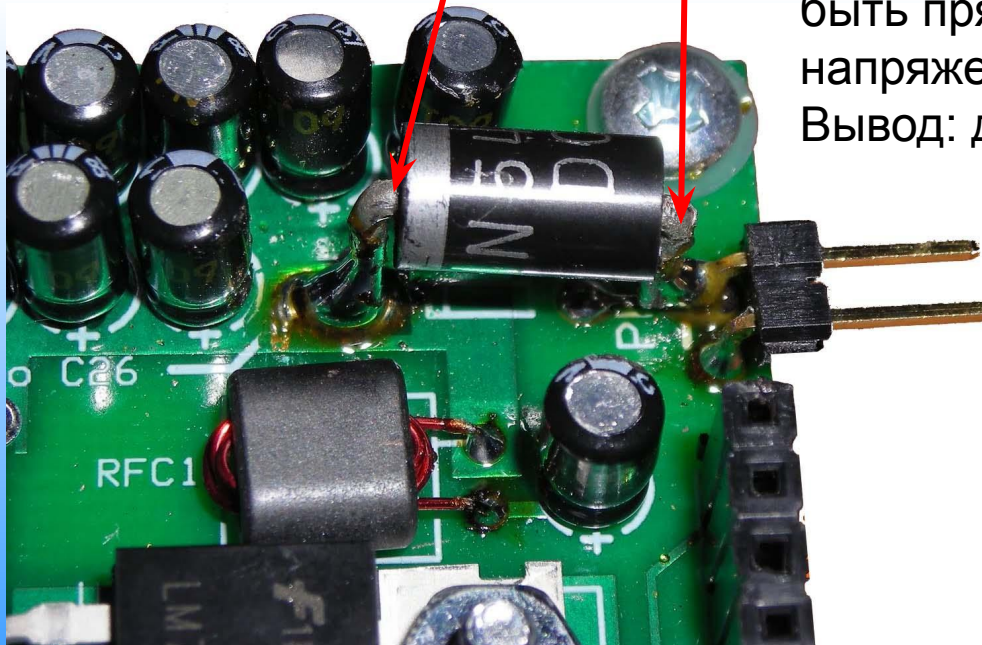
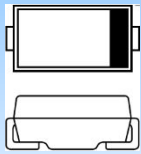
$$V_r = I \times R = \varepsilon - 0,6$$

$$I = \frac{\varepsilon - 0,6}{R}$$

# Диод

Практическое использование упрощенной модели  
Поиск неисправностей

Анод  Катод



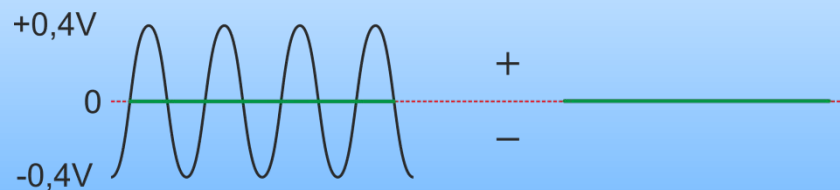
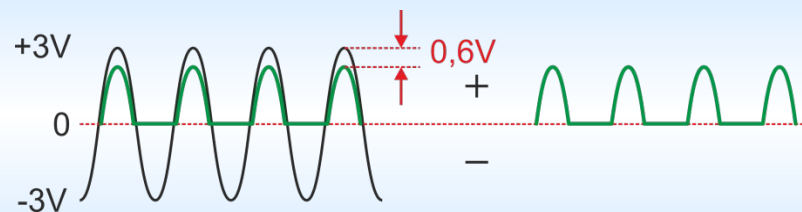
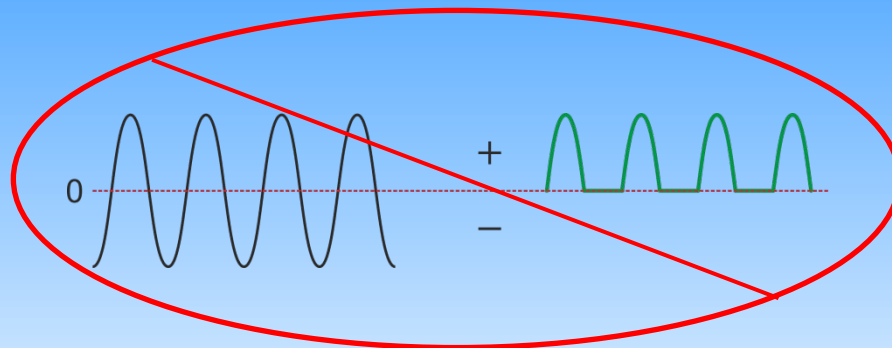
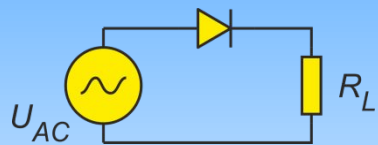
V=5 В

У исправного диода не может  
быть прямого падения  
напряжения в 5 Вольт!  
Вывод: диод неисправен.

# Диод

Практическое использование упрощенной модели

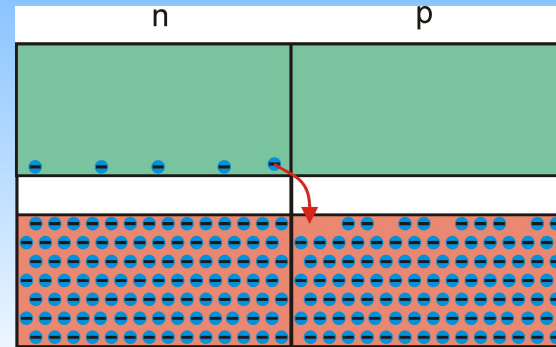
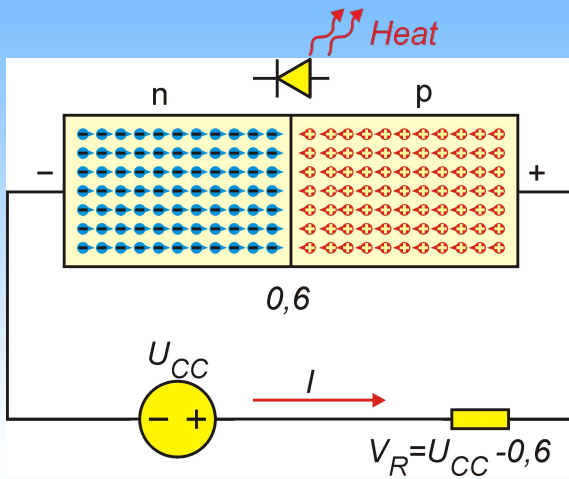
Выпрямитель



# Диод. Рассеиваемая мощность.

Прямое смещение

Si



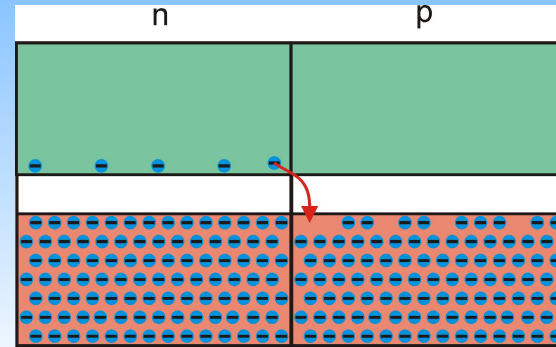
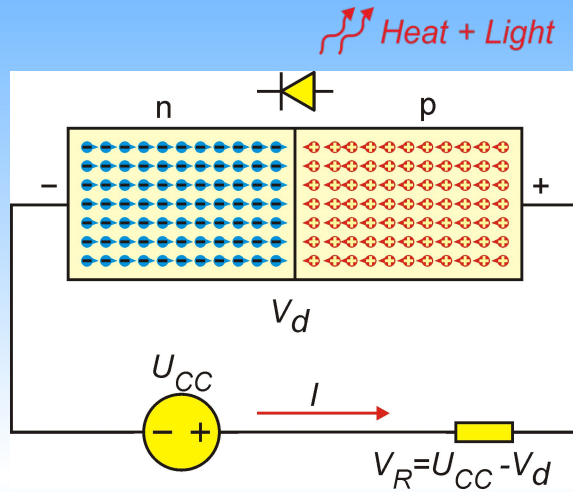
$$W = 0,6 \times I$$



# Светодиод. LED.

## Light-Emitting Diode

GaAsP

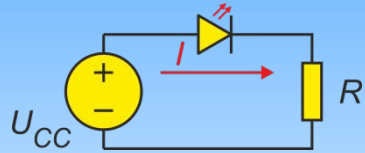
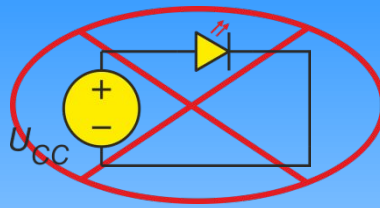


$$W = V_d \times I = W_{Light} + W_{Heat}$$

$$W_{Light} = \eta \times V_d \times I$$

$$\eta > 50\%$$

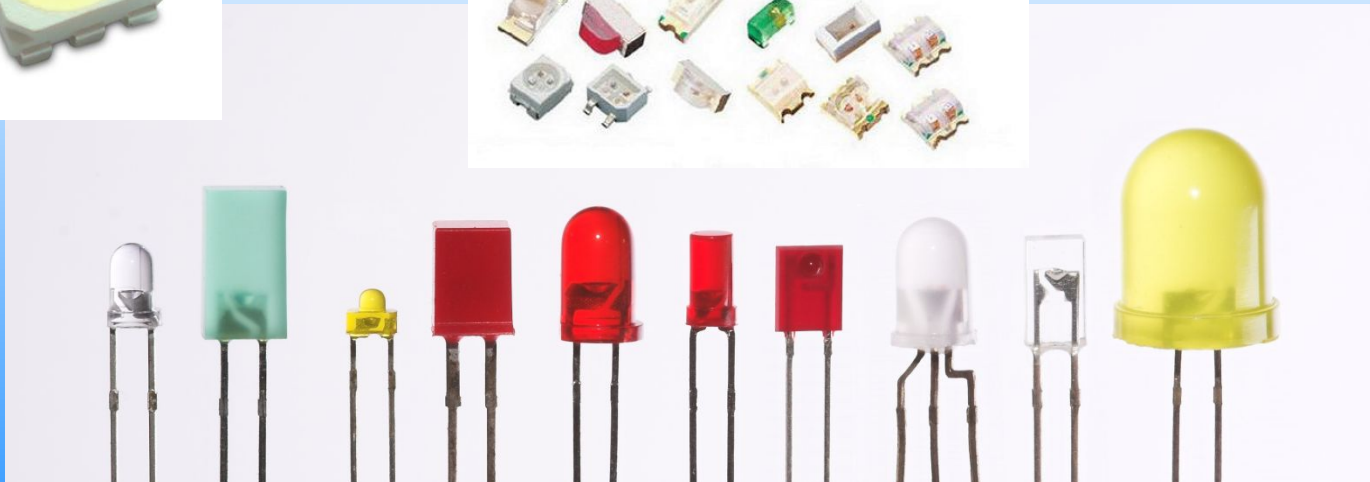
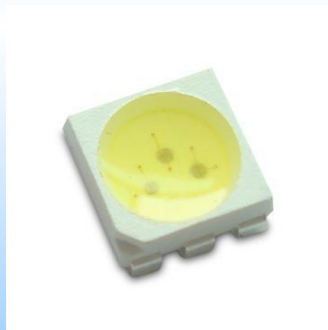
# Светодиод. LED. Light-Emitting Diode



$$R = \frac{U_{CC} - V_d}{I}$$

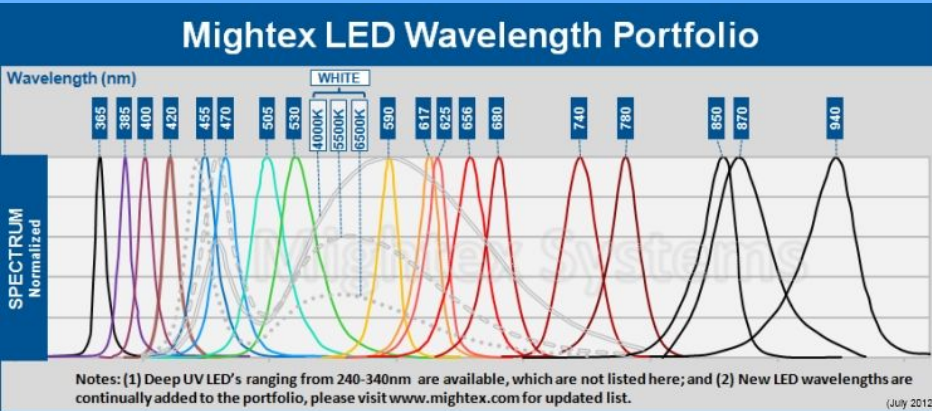
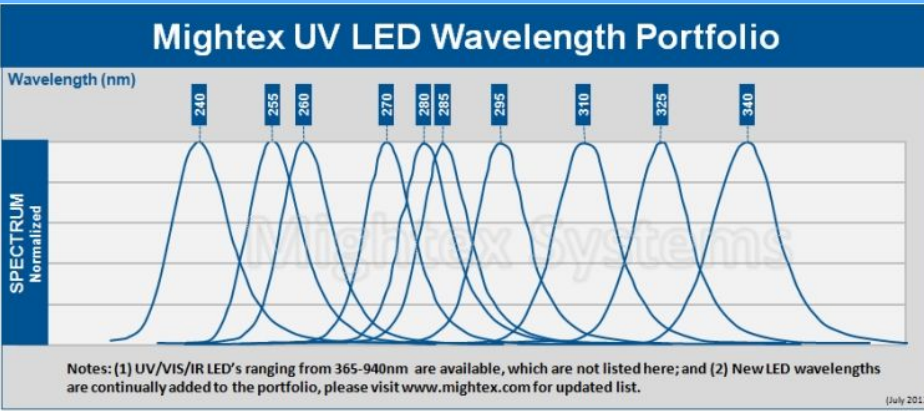
$I$  Номинальный ток через диод

$V_d$  Прямое напряжение на светодиоде



# Светодиод. LED.

## Light-Emitting Diode

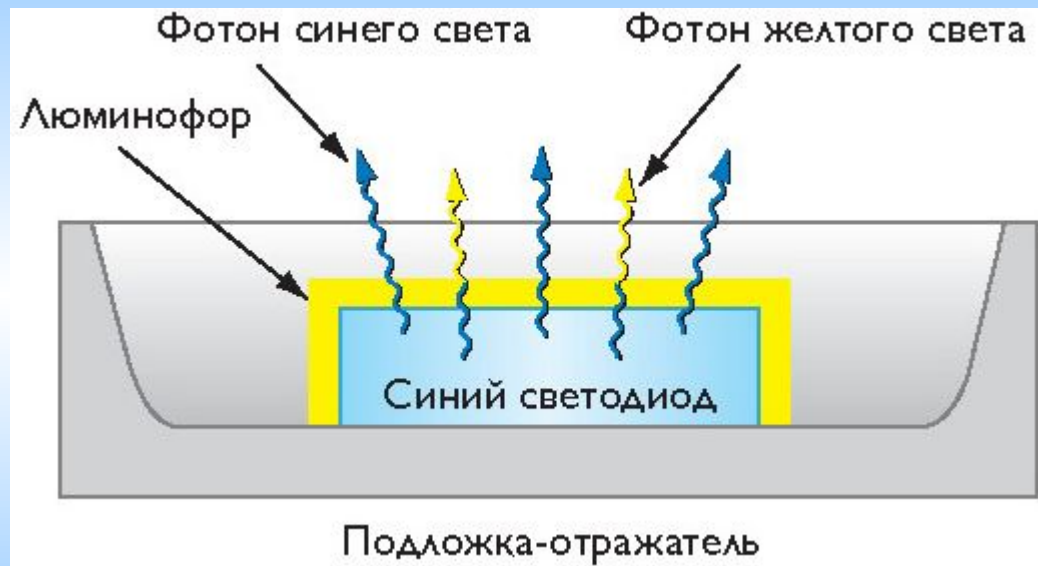
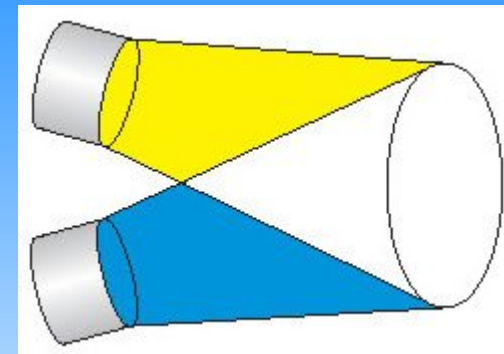


Цвет	Полупроводник	λ [nm]	Vd
High Efficiency Red	GaP	700	2÷2,5
Super Red	GaAlAs	660	1,7÷2,2
Super High Intensity Red	AlInGaP	636	2÷2,5
High Intensity Red	GaAsP	635	2÷2,5
TS AlInGaP Red	AlInGaP	630	2,2÷2,8
Super Orange	AlInGaP	610	2÷2,5
Amber	GaAsP	605	2÷2,5
Super Yellow	AlInGaP	590	2÷2,5
TS AlInGaP Yellow	AlInGaP	590	2,3÷2,5
Yellow	GaAsP	585	2,1÷2,5
Super Ultra Green	AlInGaP	574	2,2÷2,6
Green	GaP	565	2,2÷2,6
Super Green	GaP	565	2,2÷2,6
Pure Green	GaP	555	2,2÷2,6
Ultra White	InGaN	~	3,2÷4
Ultra Pure Green	InGaN	525	3,2÷4
Ultra Emerald Green	InGaN	505	3,2÷4
Ultra Super Blue	InGaN	470	3,2÷4
Super Blue	GaN	430	4,5÷5,5



# Белый светодиод

White LED



[http://www.lighting.philips.com/ru\\_ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/white\\_led.wpd](http://www.lighting.philips.com/ru_ru/lightcommunity/trends/led/anatomy/white_led.wpd)

