

## Примесная проводимость

Добавка в полупроводник примеси в 0.01% увеличивает проводимость полупроводника в  $\sim 10^6$  раз  
Это – примесная проводимость полупроводников  
Она возникает, если в полупроводник добавить примесь с другой валентностью

Есть два типа примесных полупроводников:

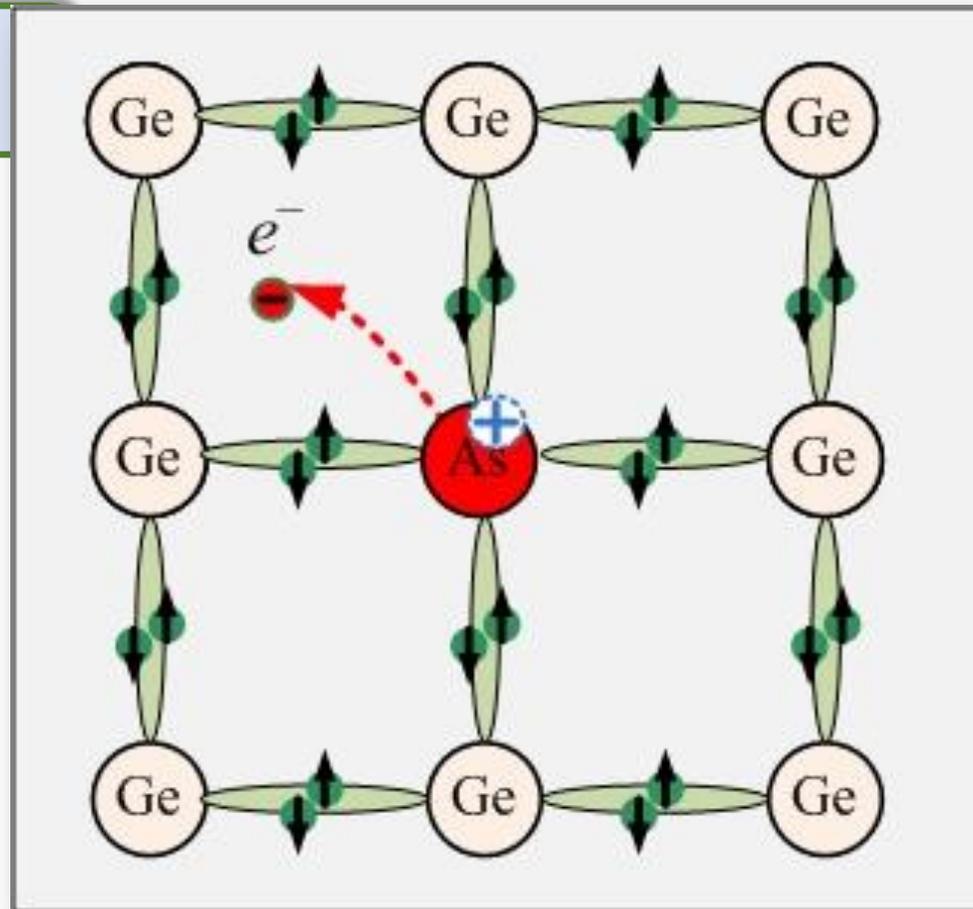
- донорные (*n*-тип);
- акцепторные (*p*-тип)

## Донорные полупроводники (*n*-тип)

Валентность примеси  
больше, чем основного  
материала

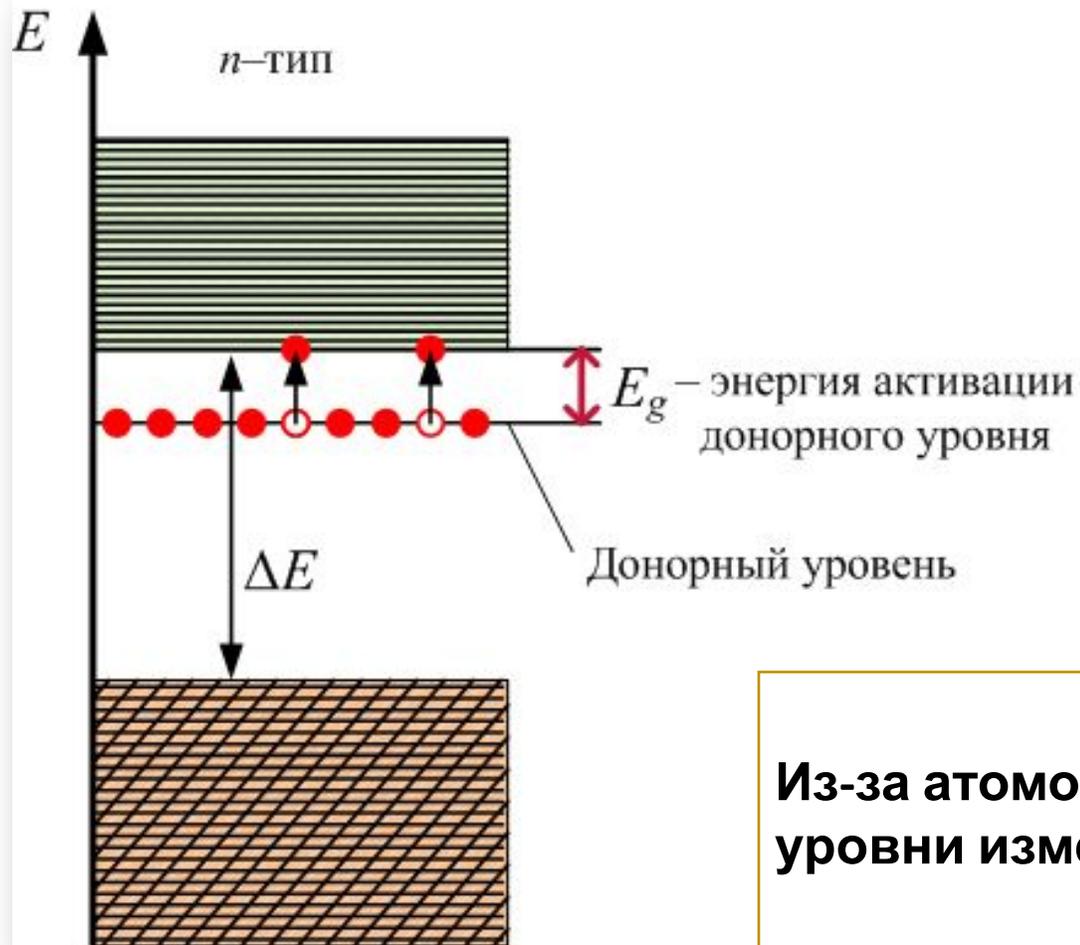
Пример:

В 4-валентный германий  
добавили 5-валентный мышьяк



Атомы примеси отдают «лишние» электроны  
Преимущественно электронная проводимость  
Свободных электронов много  
Электроны – основные носители  
Неосновные носители – дырки, их существенно  
меньше

## Донорные полупроводники ( $n$ -тип)



Из-за атомов примеси энергетические уровни изменяются:

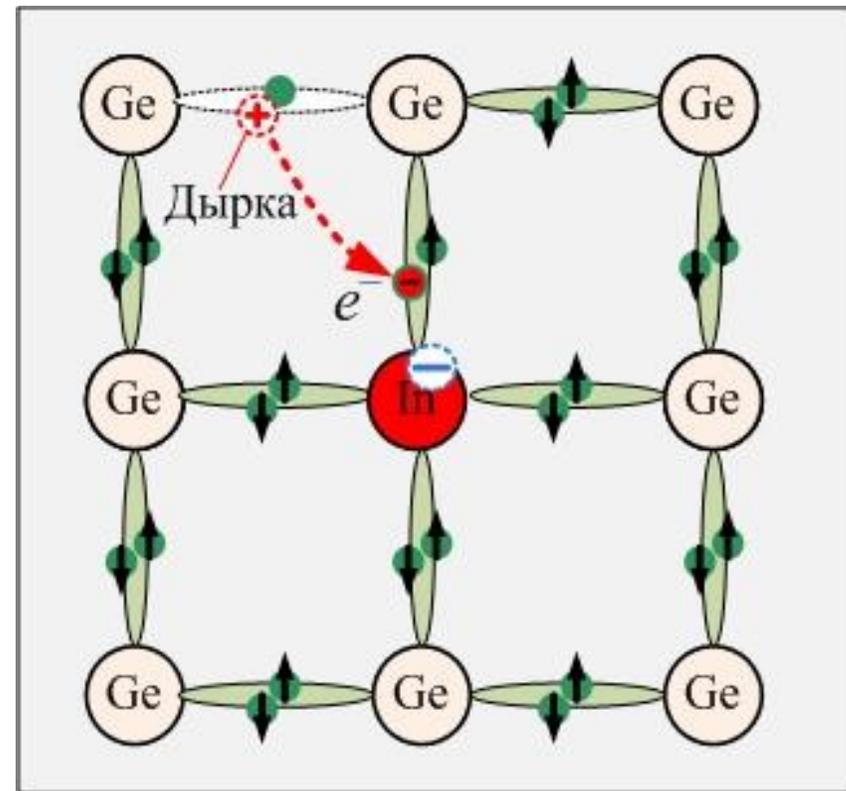
возникает примесный (донорный) уровень в запрещённой зоне вблизи зоны проводимости

## Акцепторные полупроводники (p-тип)

Валентность примеси  
меньше, чем основного  
материала

Пример:

В 4-валентный германий  
добавили 3-валентный индий

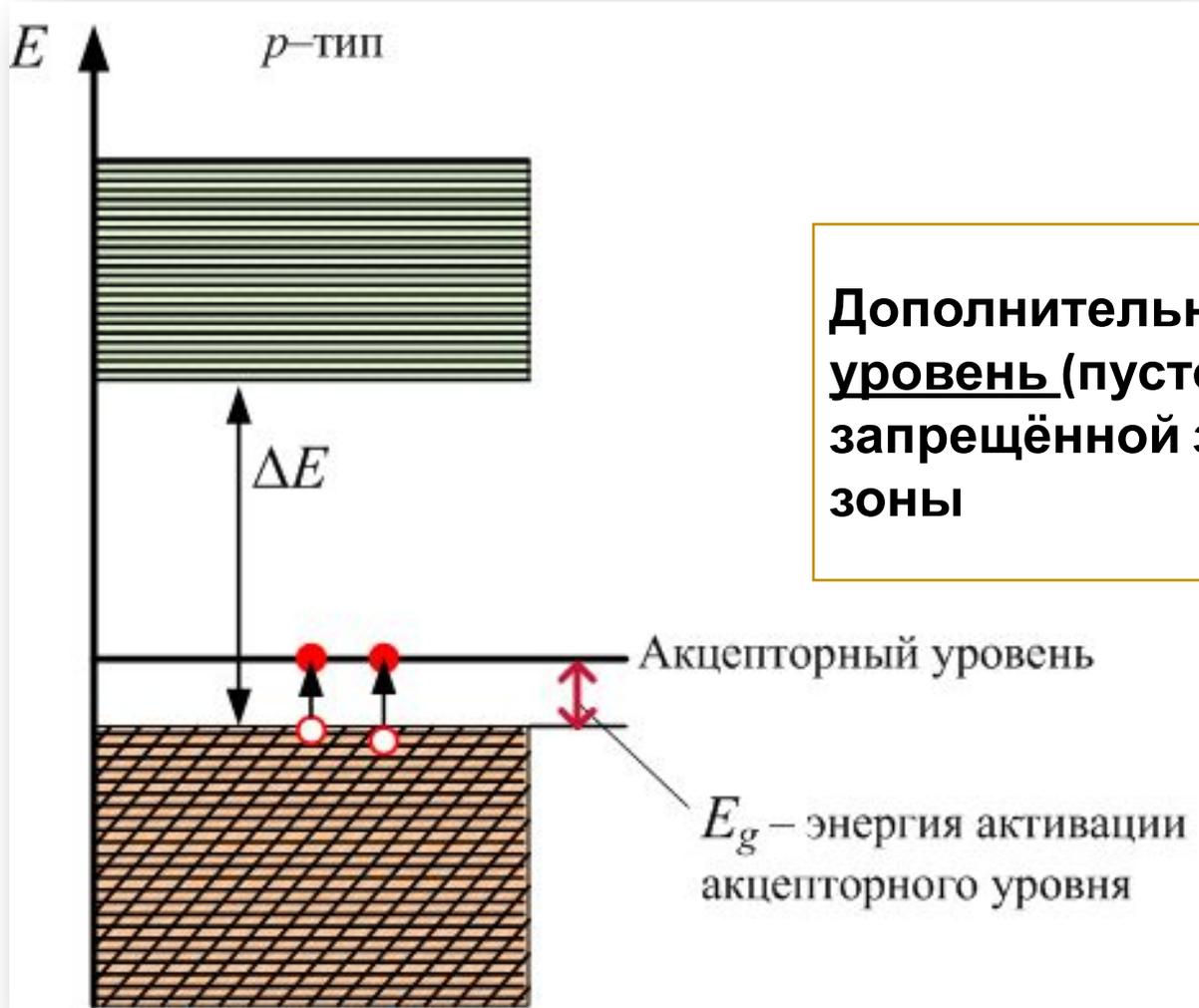


Для образования четвёртой связи захватывается электрон,  
образовавшийся при разрыве связи между двумя атомами германия

Получается дырка, а атом примеси превращается в отрицательный ион

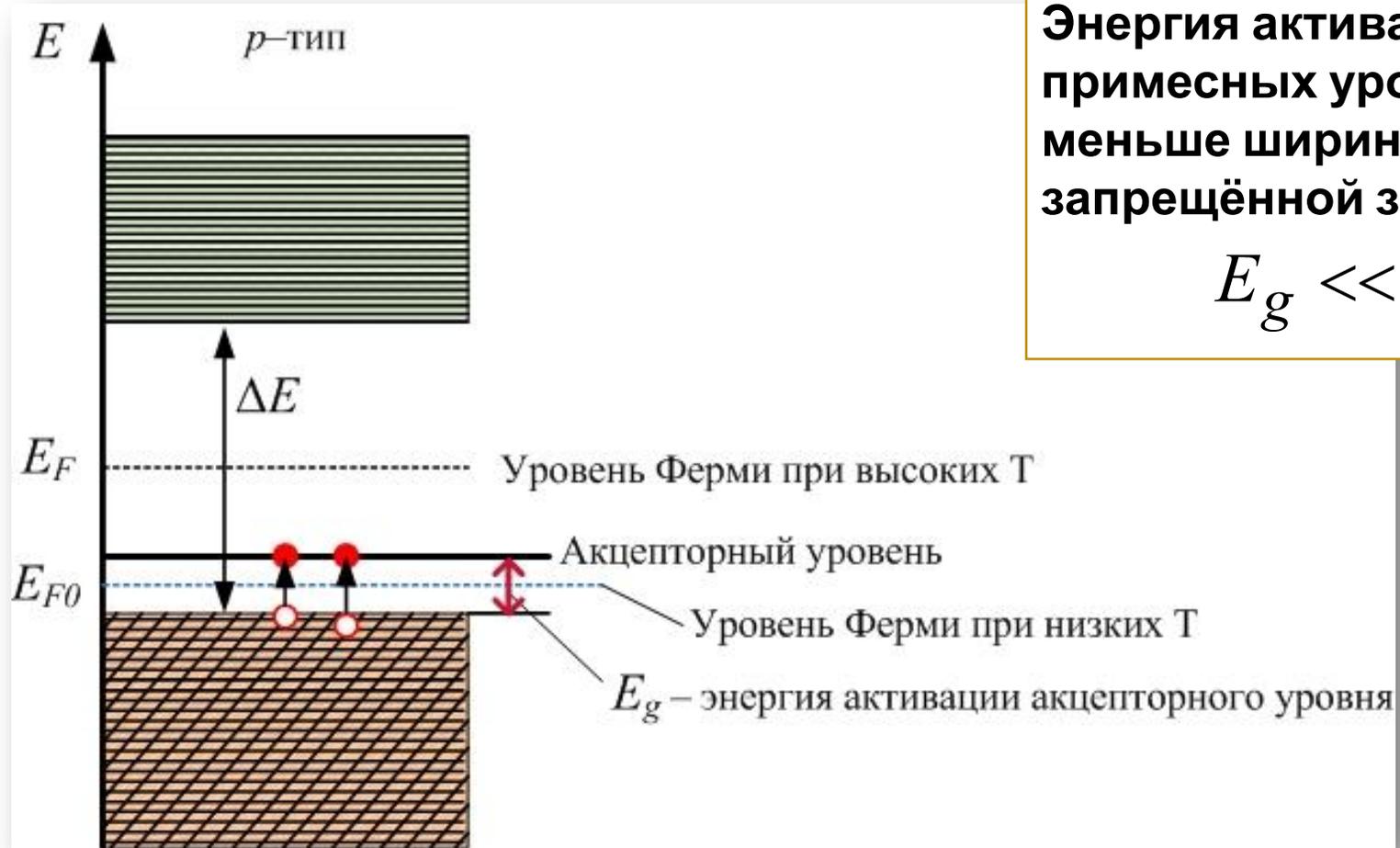
Основные носители – дырки,  
неосновные – электроны (их мало)  
Примесь называется акцепторной

# Акцепторные полупроводники (p-тип)



Дополнительный акцепторный уровень (пустой) образуется в запрещённой зоне вблизи валентной зоны

## Примесная проводимость

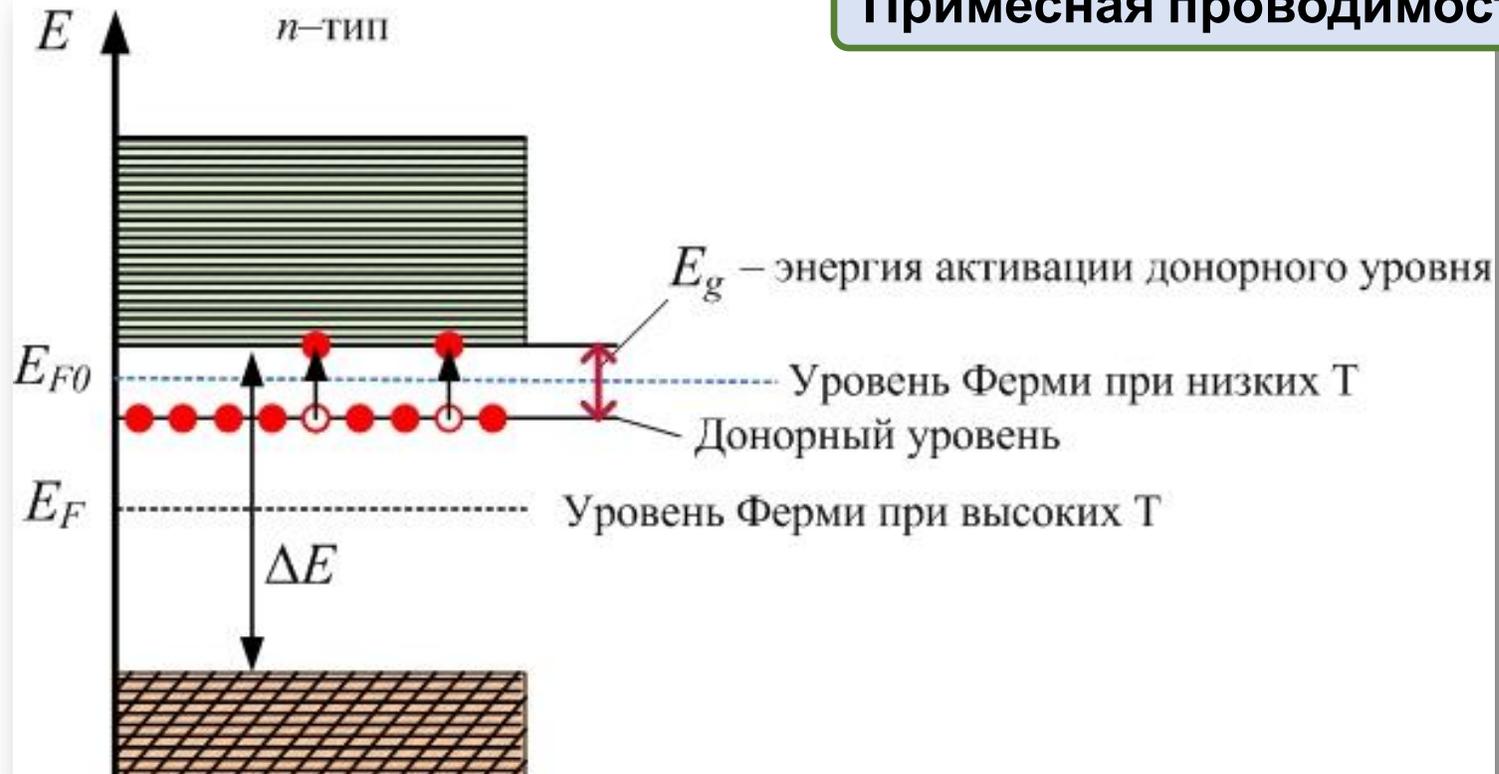


Энергия активации примесных уровней много меньше ширины запрещённой зоны:

$$E_g \ll \Delta E$$

При низких температурах электроны легче преодолевают небольшой зазор между примесным уровнем и ближайшей разрешённой зоной  
Преобладает примесная проводимость

## Примесная проводимость



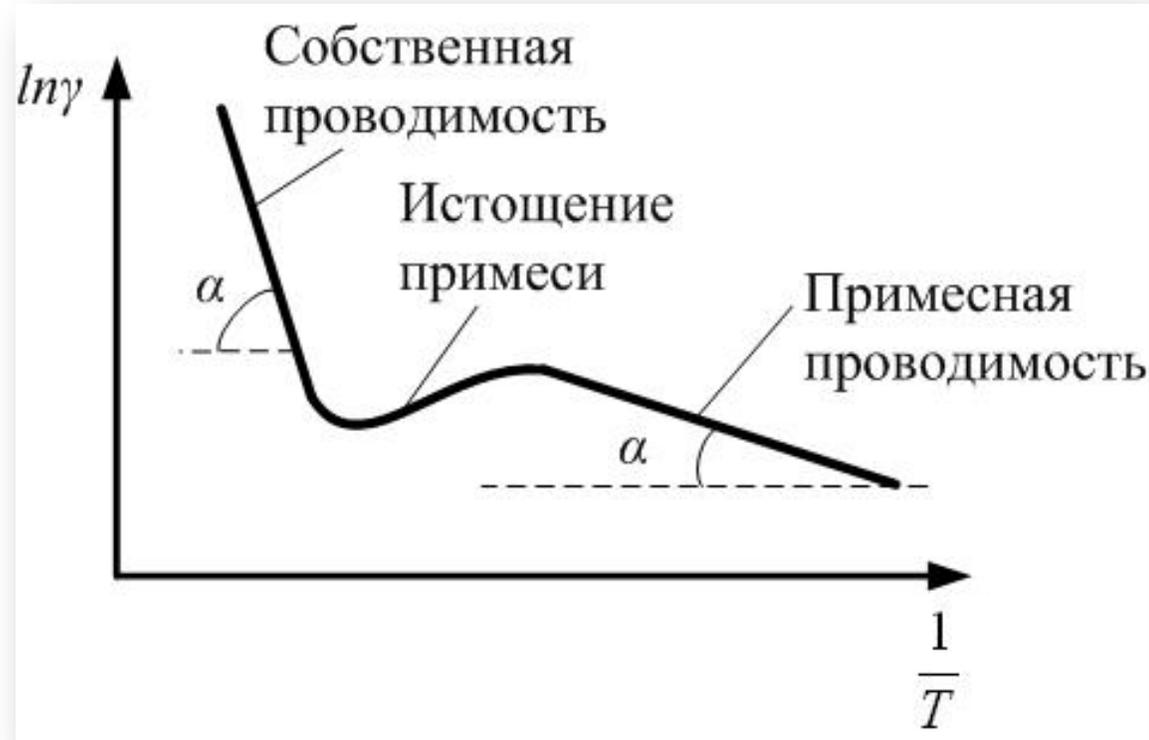
При низких температурах уровень Ферми почти совпадает с примесным уровнем

При высоких  $T$  примесный уровень истощается, а электроны перебрасываются из валентной зоны в зону проводимости – преобладает собственная проводимость

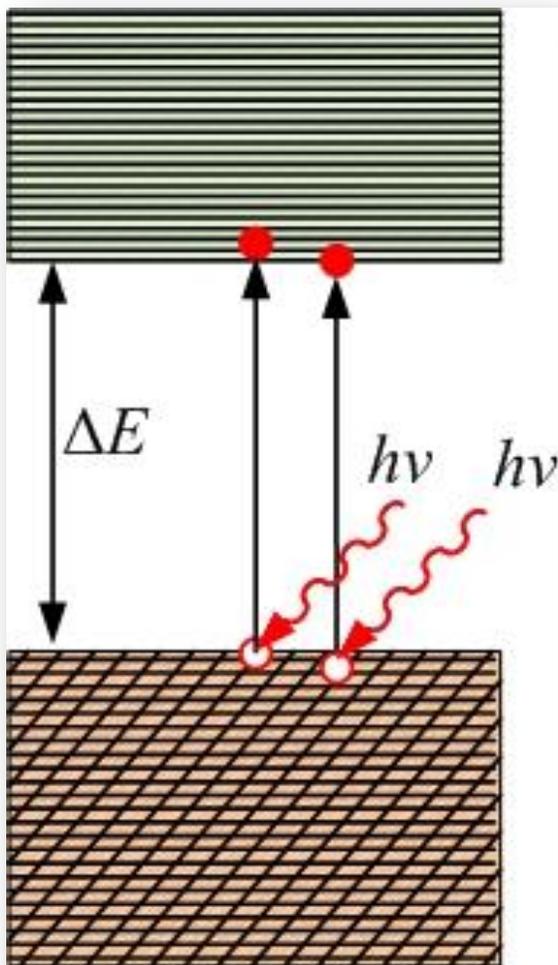
Уровень Ферми перемещается к центру запрещённой зоны, как в собственных полупроводниках

## Проводимость полупроводников

При низких температурах преобладает примесная проводимость,  
при высоких - собственная



## Фотопроводимость

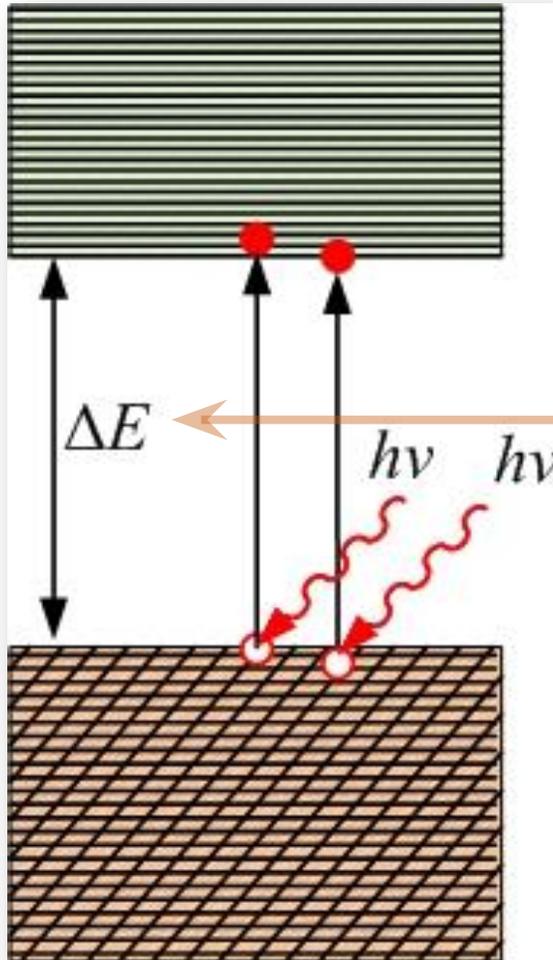


**Фотопроводимость (внутренний фотоэффект) – это увеличение электропроводимости под действием электромагнитного излучения (света)**

**Фотоэффект будет наблюдаться только в том случае, если энергии фотона хватит на переход электрона в зону проводимости:**

$$h\nu \geq \Delta E$$

Собственные  
е:



## Фотопроводимость

Красная граница фотоэффекта для  
собственных полупроводников

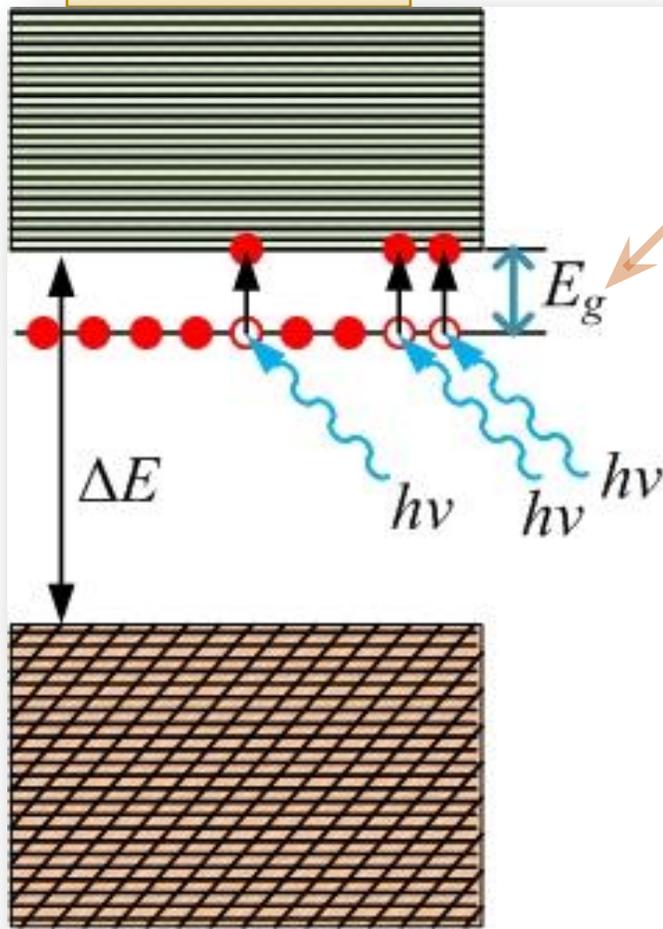
$$h\nu_0 = \Delta E$$

лежит в инфракрасной области спектра :  
при  $\Delta E \sim 1$  эВ

$$\lambda_0 = 1200 \text{ нм}$$

Примесные

:



## Фотопроводимость

Для примесных полупроводников длина волны красной границы больше, поскольку энергии для активации примесного уровня нужно меньше

$$E_g < \Delta E$$

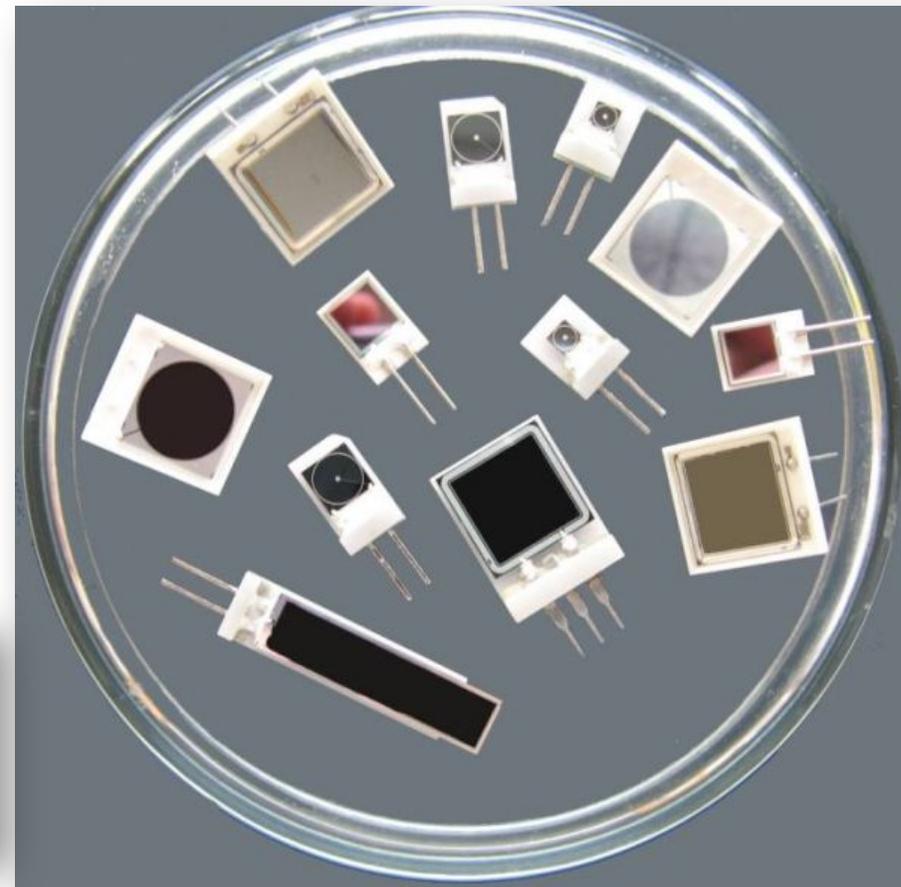
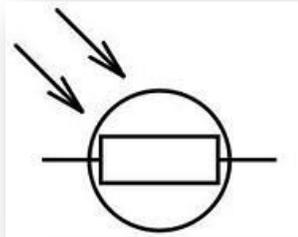
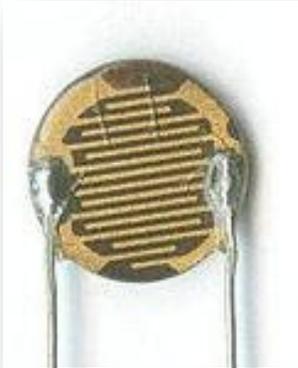
$$h\nu_0 = E_g$$

Пример:

Для германия энергия активации всех примесей примерно одинакова, порядка 0.01 эВ, и красная граница фотоэффекта

$$\lambda_0 = 100 \text{ мкм}$$

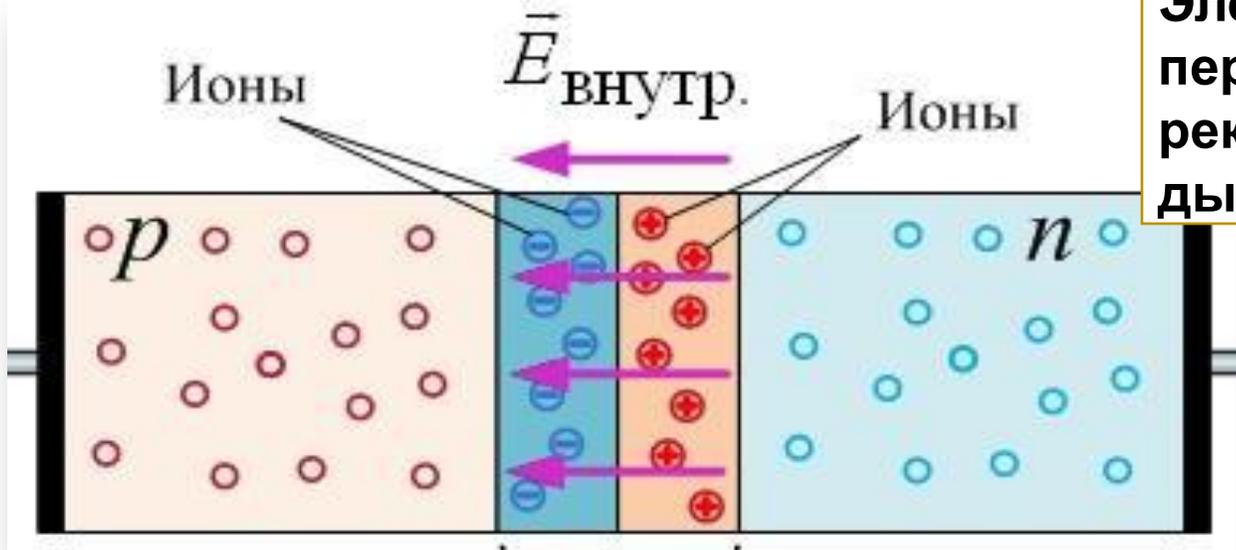
Явление  
фотопроводимости  
используется для  
создания  
фоторезисторов



Преимущества:

- Высокая чувствительность
- Безинерционность (постоянная времени  $\sim 10^{-3} \div 10^{-8}$  с)
- Малые размеры
- Работают в далёкой ИК-области

## Контактные явления в полупроводниках: $p$ - $n$ -переход

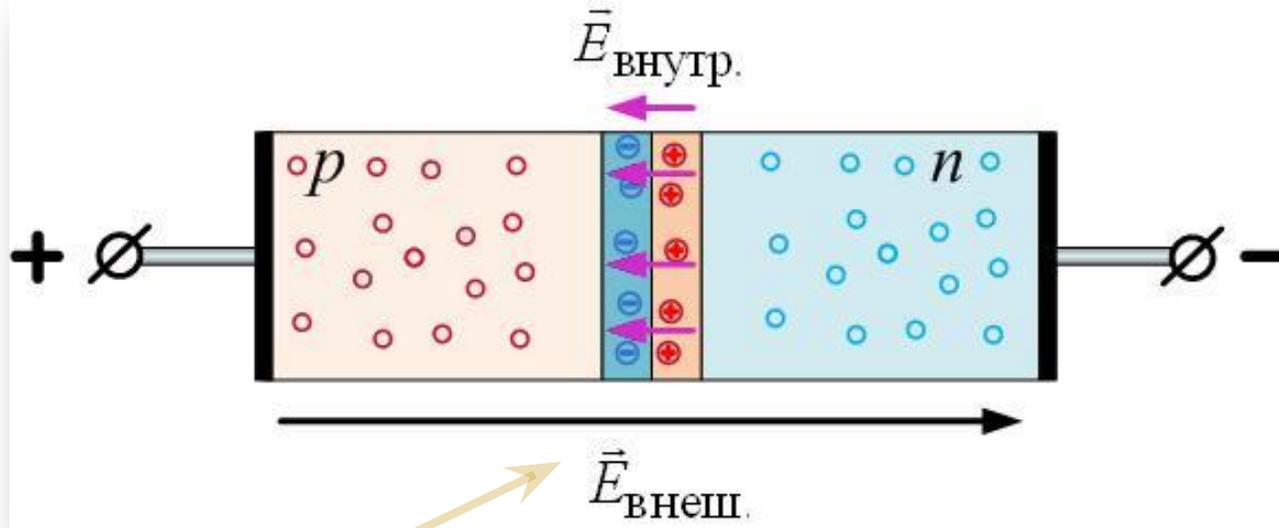


Электроны из  $n$ -области переходят в  $p$ -область и рекомбинируют с дырками

В контактном слое происходит обеднение свободными носителями заряда (образуется запирающий слой) толщиной около 1 мкм

В запирающем слое возникает внутреннее поле  $p$ - $n$ -перехода  
Возникает контактная разность потенциалов  $\Delta\varphi_{\text{к}}$   
(потенциальный барьер)

## Прямое включение $p$ - $n$ -перехода

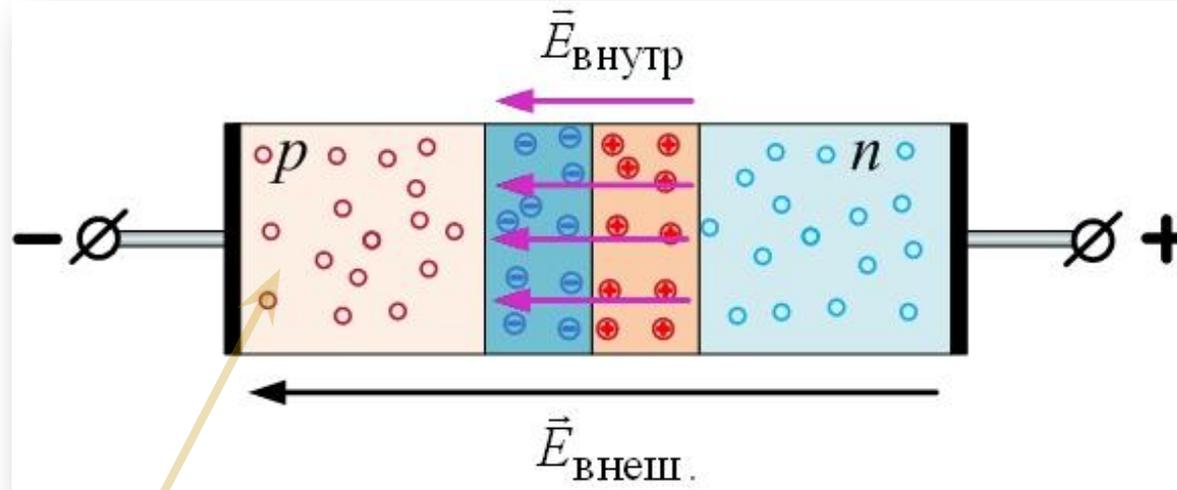


Внешнее поле уменьшает потенциальный барьер и способствует диффузии основных носителей тока

Ток идёт за счёт основных носителей, концентрация которых велика

Толщина запирающего слоя уменьшается

## Обратное включение $p$ - $n$ -перехода



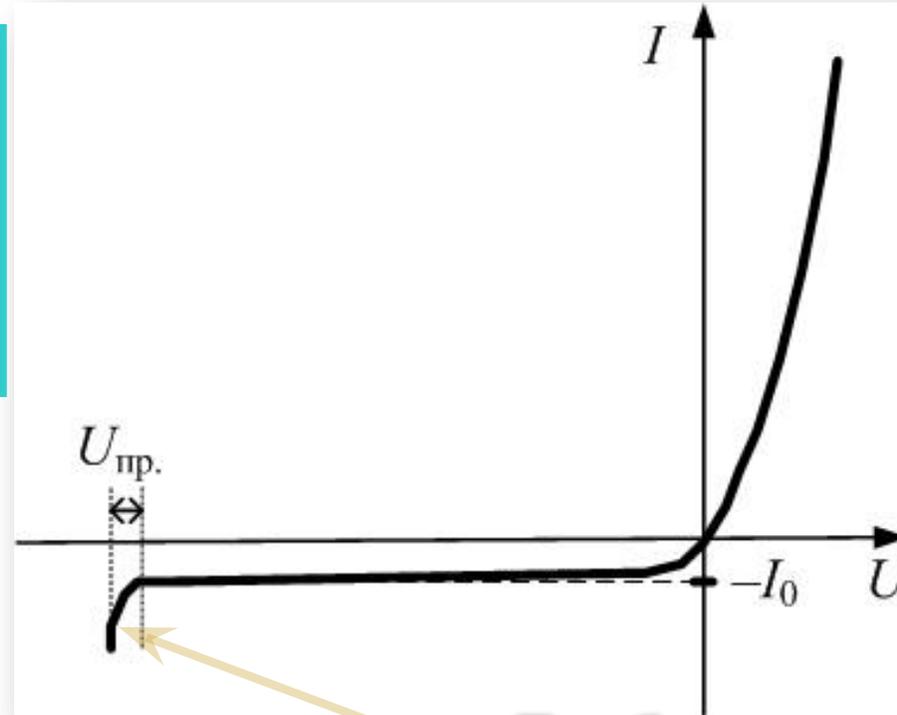
Основные носители оттягиваются на полюса источника тока, толщина запирающего слоя увеличивается

Внешнее поле направлено так же как и внутреннее, препятствует диффузии основных носителей, но способствует диффузии неосновных

Концентрация неосновных носителей мала, и обратный ток тоже мал

## Вольтамперная характеристика $p$ - $n$ -перехода

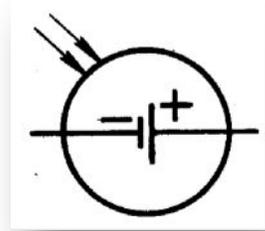
$$I = I_0 \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right)$$



Пробой

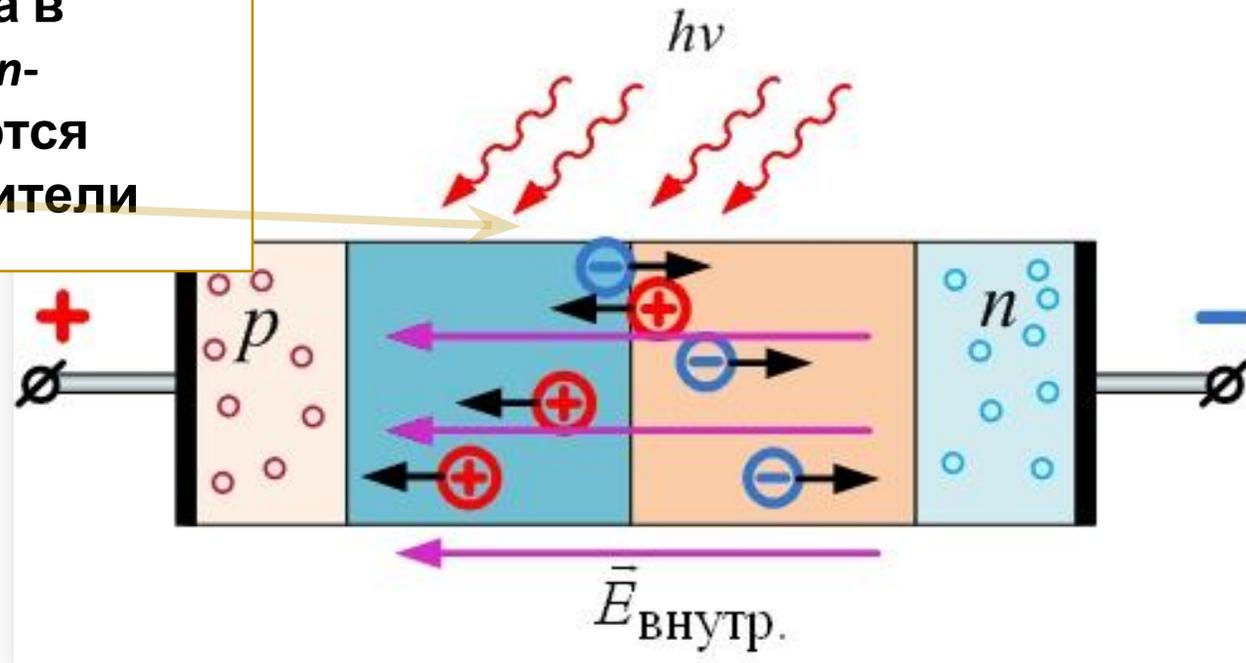
Односторонняя проводимость  $p$ - $n$ -перехода используется во многих приборах  
Простейший из них – диод,  
используется для выпрямления переменного тока

# Вентильный фотоэффект



В основе работы – внутренний фотоэффект

Под действием света в запирающем слое  $p$ - $n$ -перехода генерируются неравновесные носители заряда



Внутреннее поле «растаскивает» носители заряда:  
дырка движется в сторону полупроводника  $p$ -типа,  
а электрон – в сторону полупроводника  $n$ -типа

Возникает разность потенциалов – фото-ЭДС

## **Вентильный фотоэффект**

**Световая энергия в солнечных батареях непосредственно преобразуется в электрическую**

**Недостатки солнечных батарей:**

- малый КПД (12÷16%)
- хрупкость
- дороговизна

**Преимущества:**

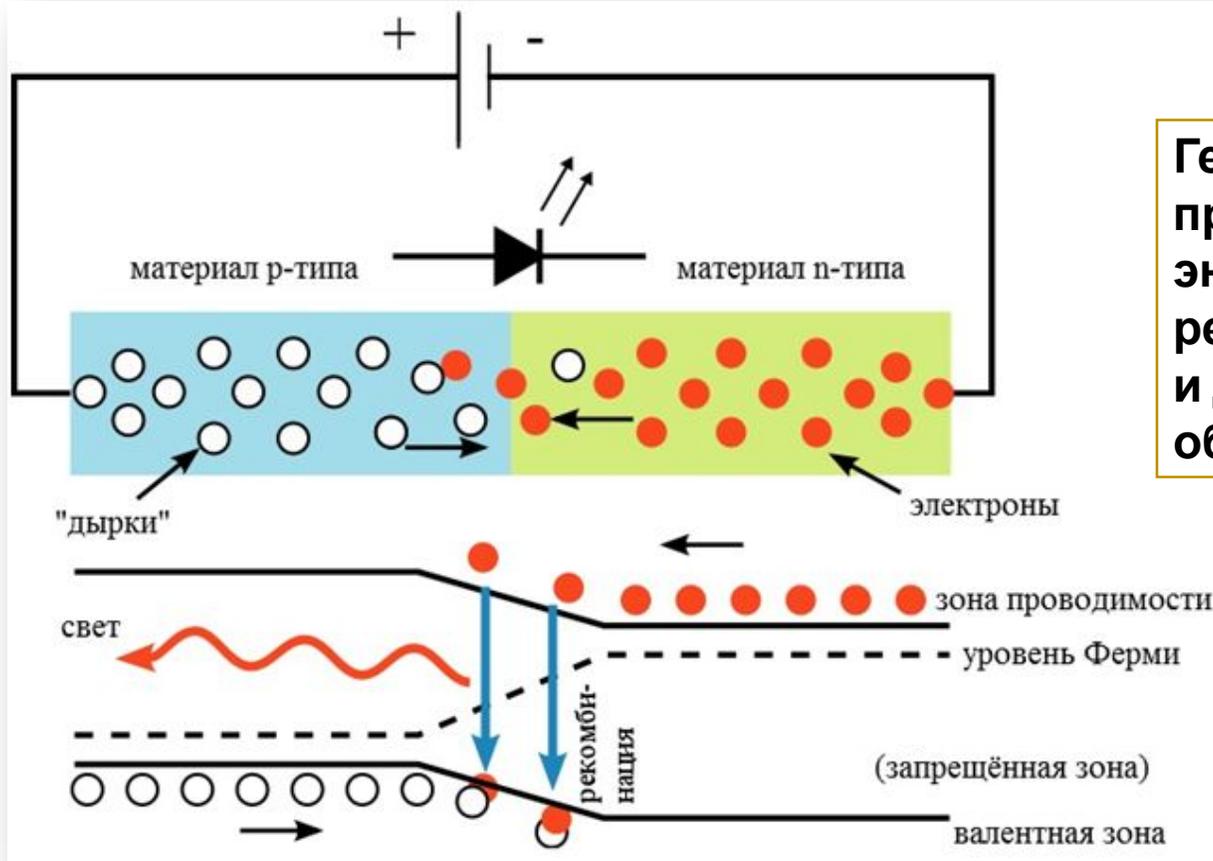
- экологическая чистота;
- возобновляемый альтернативный источник энергии, в отличие от ископаемых – угля и газа;
- можно использовать там, где нет линий электропередач, а солнечного света достаточно (в пустынях или на искусственных спутниках Земли)



# Светодиод

Д

Светодиод – ещё один прибор на основе  $p-n$ -перехода  
Принцип работы – обратный вентильному фотоэффекту:  
если через  $p-n$ -переход пропускать электрический ток, возникает излучение



Генерация света происходит за счет энергии, выделяемой при рекомбинации электронов и дырок на границе  $p$ - и  $n$ -областей

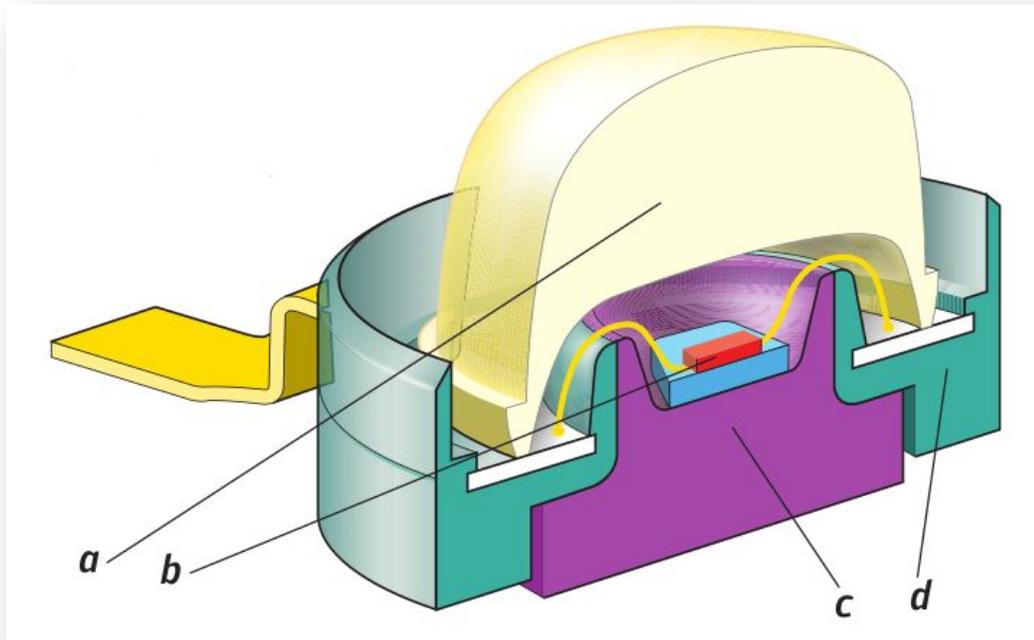
# Светодиод

Д

Величина энергии квантов зависит от ширины запрещенной зоны

При ширине запрещенной зоны от 1,7 до 3,4 эВ энергия излучаемых квантов соответствует видимому диапазону спектра с длинами волн от 700 до 400 нм

Излучаемый свет распространяется во всех направлениях. Для фокусировки излучения используется пластиковая линза



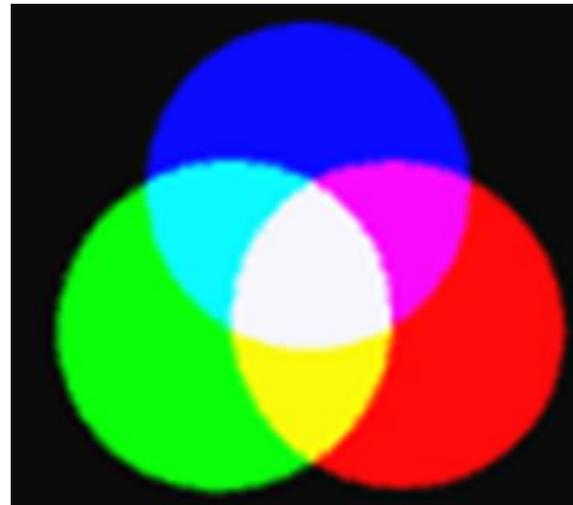
a – линза  
b – светоизлучающий кристалл  
d – корпус  
c – теплоотвод

Свет светодиода не монохроматичен, зависит от состава полупроводника

Для получения белого света используют смешивание цветов по технологии RGB:

На одной матрице плотно размещаются красные, голубые и зеленые светодиоды, излучение которых смешивается при помощи оптической системы, например линзы

В результате получается белый свет

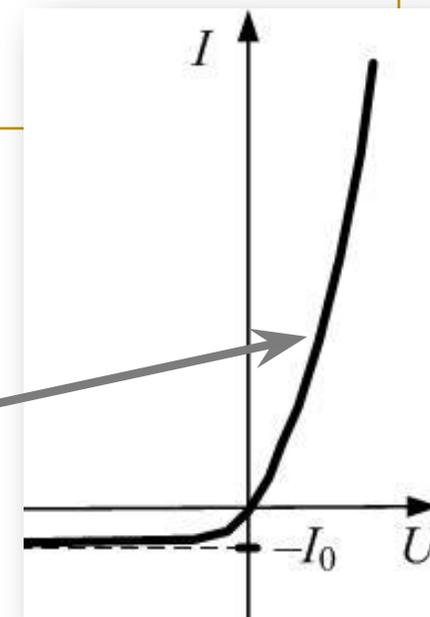


### Достоинства светодиодов:

- срок службы, измеряемый десятилетиями;
- работают при низком напряжении, то есть электробезопасны;
- отсутствие компонентов, вредных для окружающей среды (ртуть и др.), в отличие от люминесцентных ламп;
- высокая механическая прочность, вибростойкость;
- моментальное включение светодиодов после подачи на них напряжения дает возможность включать и выключать их практически с неограниченно большой частотой;
- новейшие достижения в технологии изготовления светодиодов позволяют получать все цвета видимого спектра;
- компактность, малые размеры

### Недостатки:

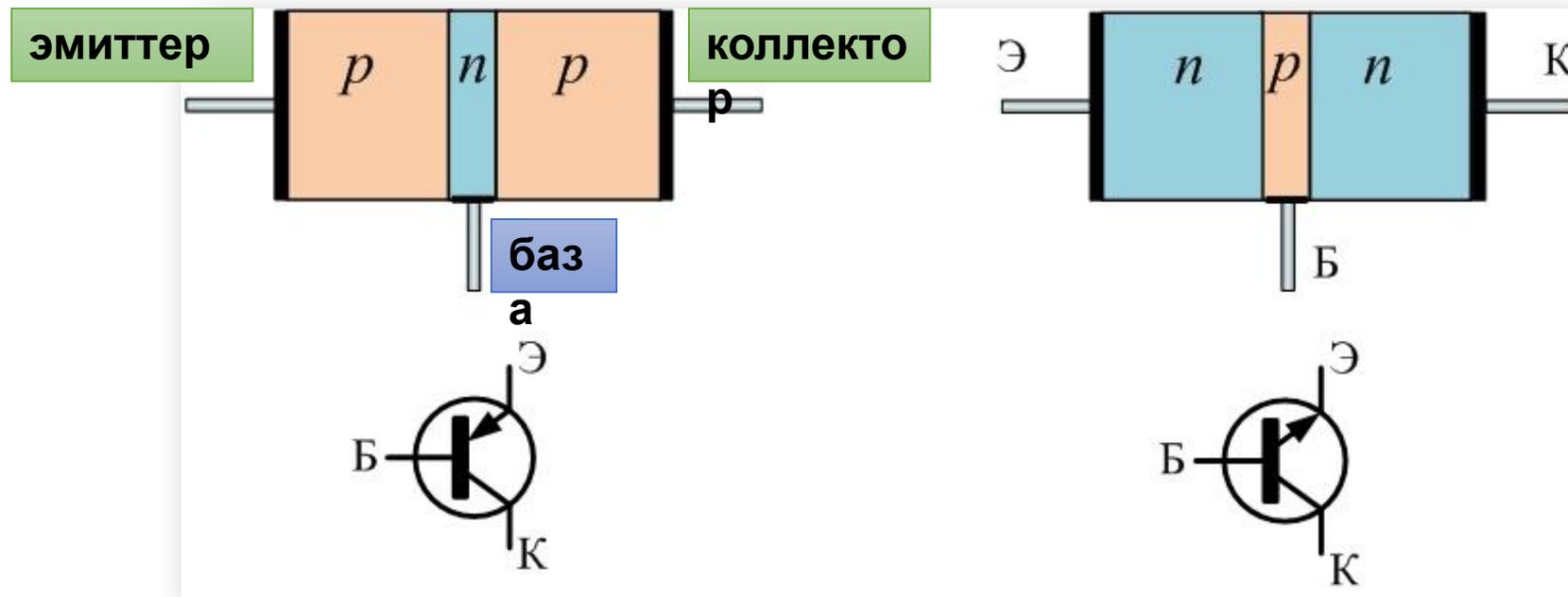
- дороговизна
- узкий спектральный диапазон света (это плохо при использовании светодиодов для освещения)
- ток необходимо стабилизировать (из-за крутизны характеристики)



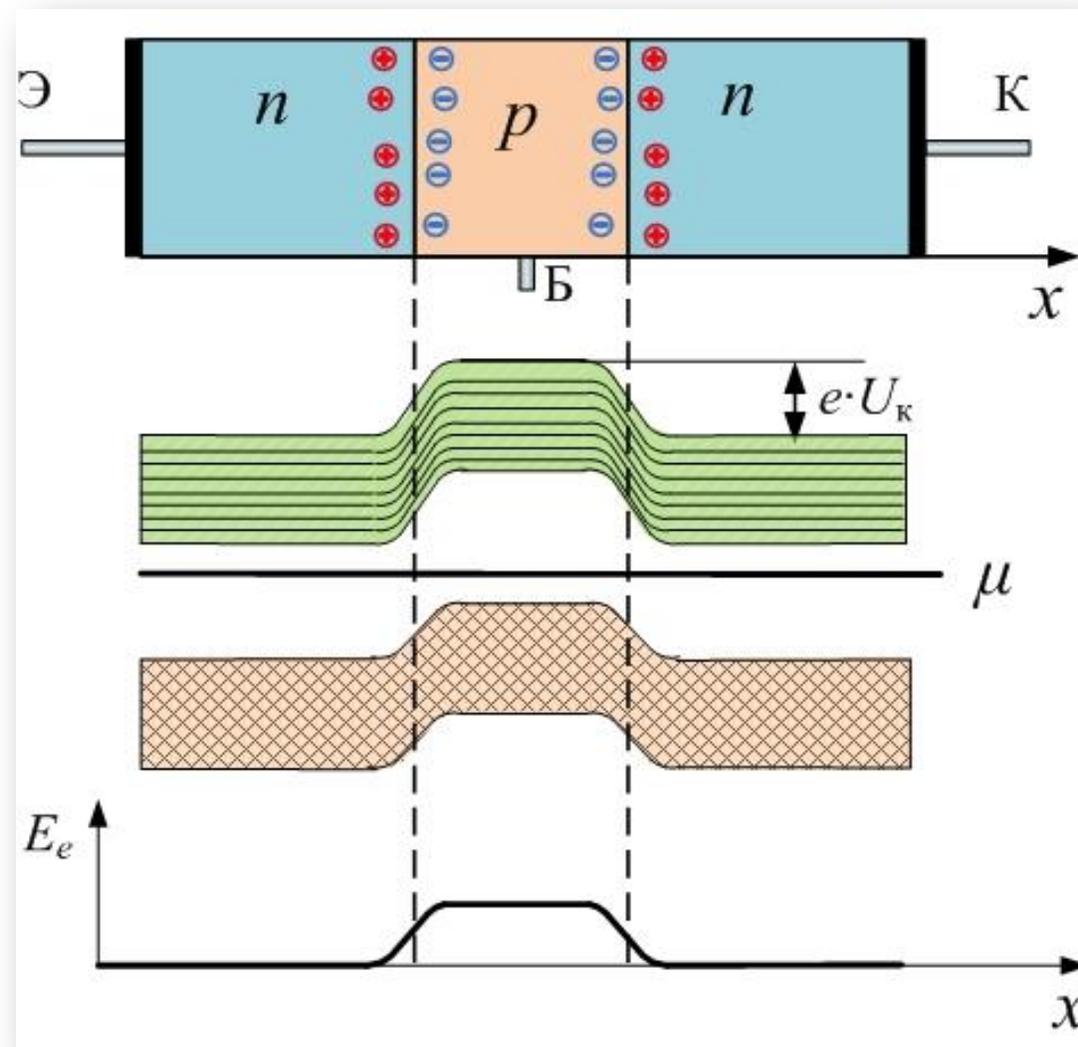
# Транзистор

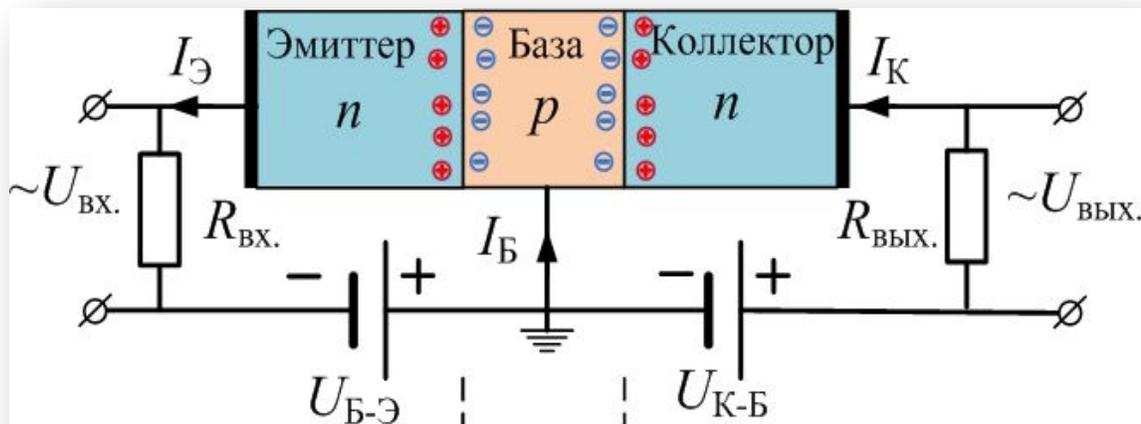
Транзистор – кристалл с двумя *p-n*-переходами

По типу чередования дырочной и электронной проводимостей:



# Транзистор *n-p-n*- типа



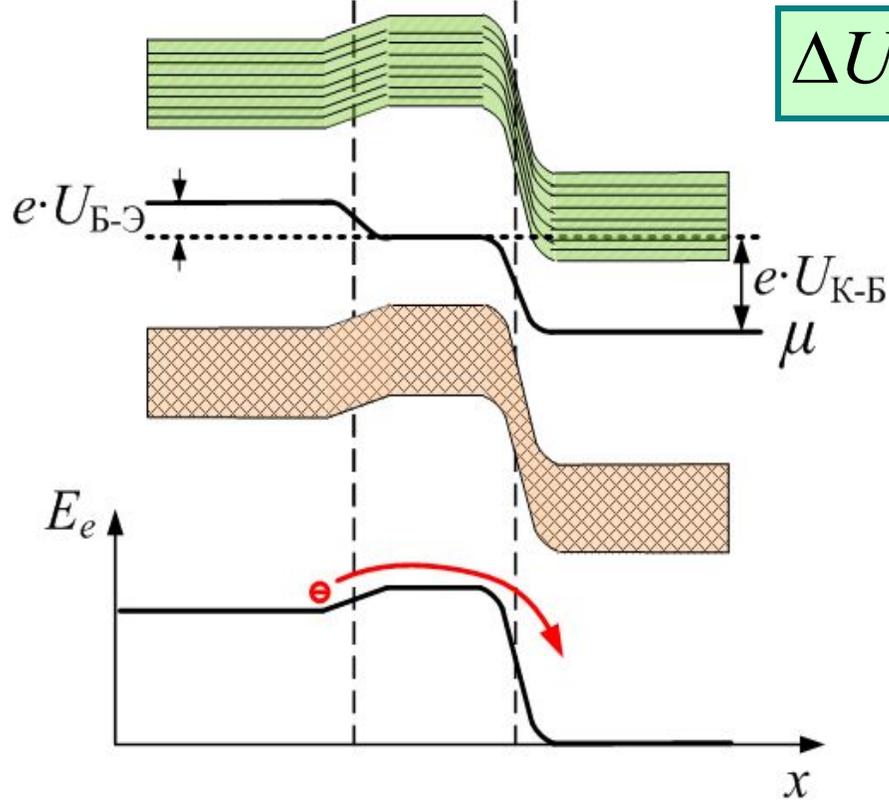


$$I_B \ll I_K$$

$$I_{\text{Э}} = I_B + I_K \approx I_K$$

$$R_{\text{ВЫХ}} \gg R_{\text{ВХ}}$$

$$\Delta U_{\text{ВЫХ.}} = R_{\text{ВЫХ.}} \cdot \Delta I_K \gg \Delta U_{\text{ВХ.}}$$



**Транзистор  
работает как  
усилитель**