

О некоторых электрических и фотоэлектрических свойствах полупроводников

Энергетические зоны в веществе.

Понятие о полупроводниках.

Собственные и легированные полупроводники.

p-n переходы и выпрямление тока.

Принцип работы диода и транзистора.

Фото-эдс. Эффект Холла.

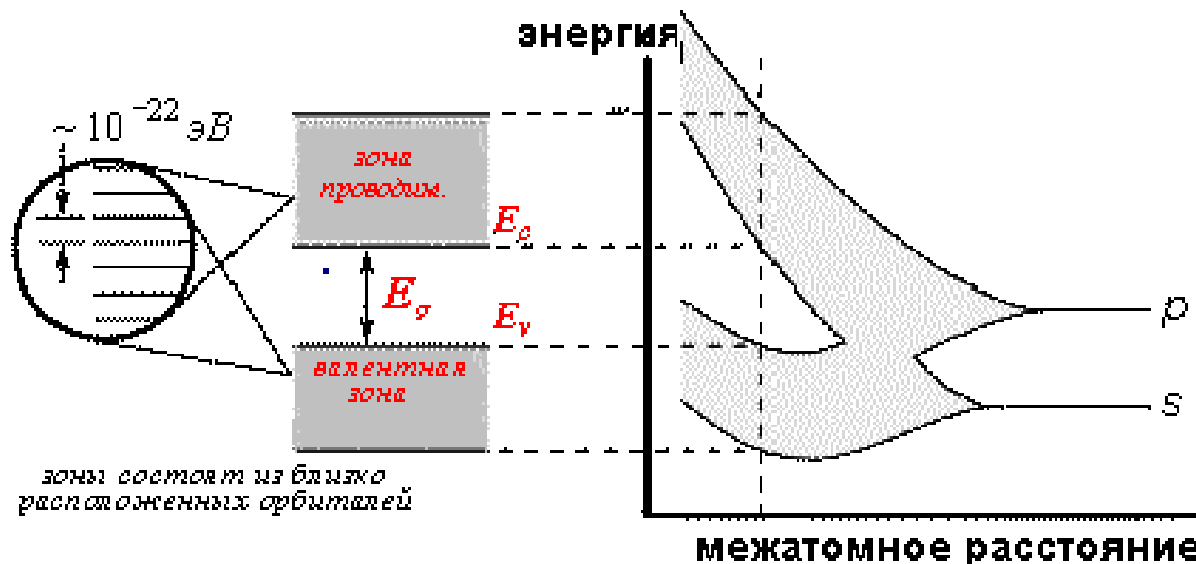
Полупроводники

Полупроводники – твердые тела с удельной проводимостью в диапазоне от 10^4 до 10^{-10} Ohm/cm (B, Si, Ge, P, As, Se, Te, соединения $A_{III}B_V$ и т.д.).

Основное отличие электрических свойств полупроводников от металлов – температурная зависимость сопротивления.

Почему это отличие возникает?

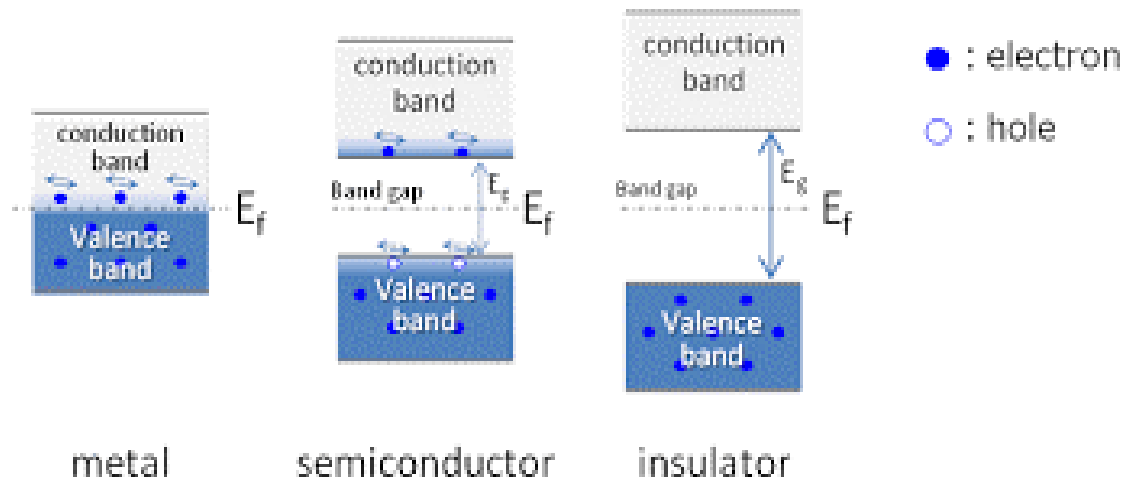
Когда атомы составляют твердое тело, их электронные уровни расщепляются на подуровни, т.к. электроны – фермионы, два из них не могут иметь одинаковые координаты, энергии и спины.



Металлы, полупроводники и диэлектрики

При образовании зонной структуры возможны три варианта:

- 1) верхняя заполненная зона (т.н. основная зона) перекрывается с нижней незаполненной;
- 2) самая верхняя из заполненных зон имеет свободные подуровни; эти случаи характерны для металлов;
- 3) основная зона заполнена доверху и отделена от вышележащих зон запрещенной зоной (полоса невозможных значений энергии). Последний случай – полупроводник или диэлектрик.



Уровень Ферми

Вероятность заполнения того или иного уровня с энергией ε электронами определяется функцией распределения Ферми-Дирака:

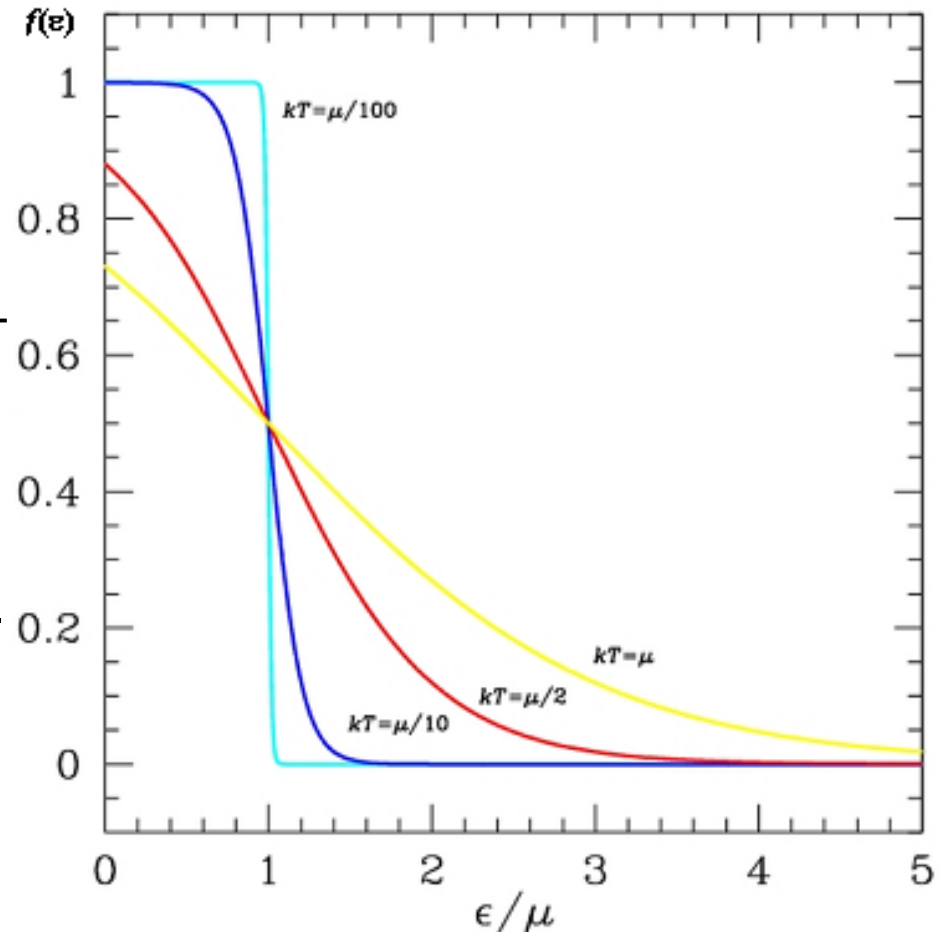
$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \mu}{kT}\right) + 1}$$

где μ – энергия (граница) Ферми. При $T = 0 \text{ K}$ этот уровень отделяет заполненные энергетические зоны ($f(\varepsilon) = 1$) от вакантных ($f(\varepsilon) = 0$) ~ голубая линия на графике.

Уровень энергии Ферми определяется концентрацией электронов n :

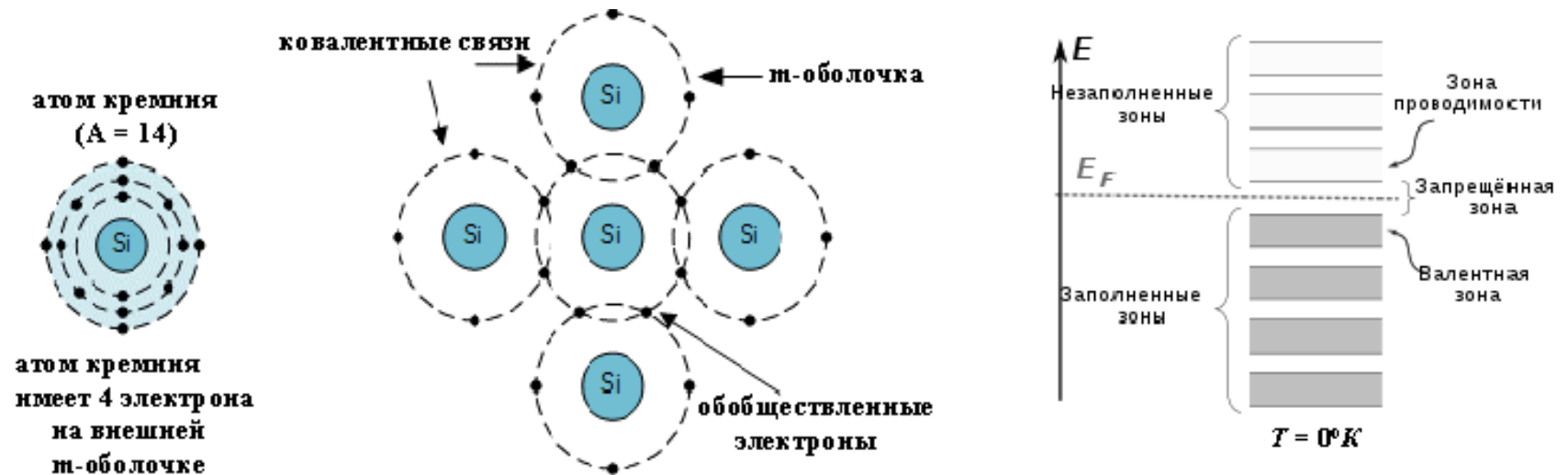
$$\mu = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}$$

h – постоянная Планка, m – масса электрона.



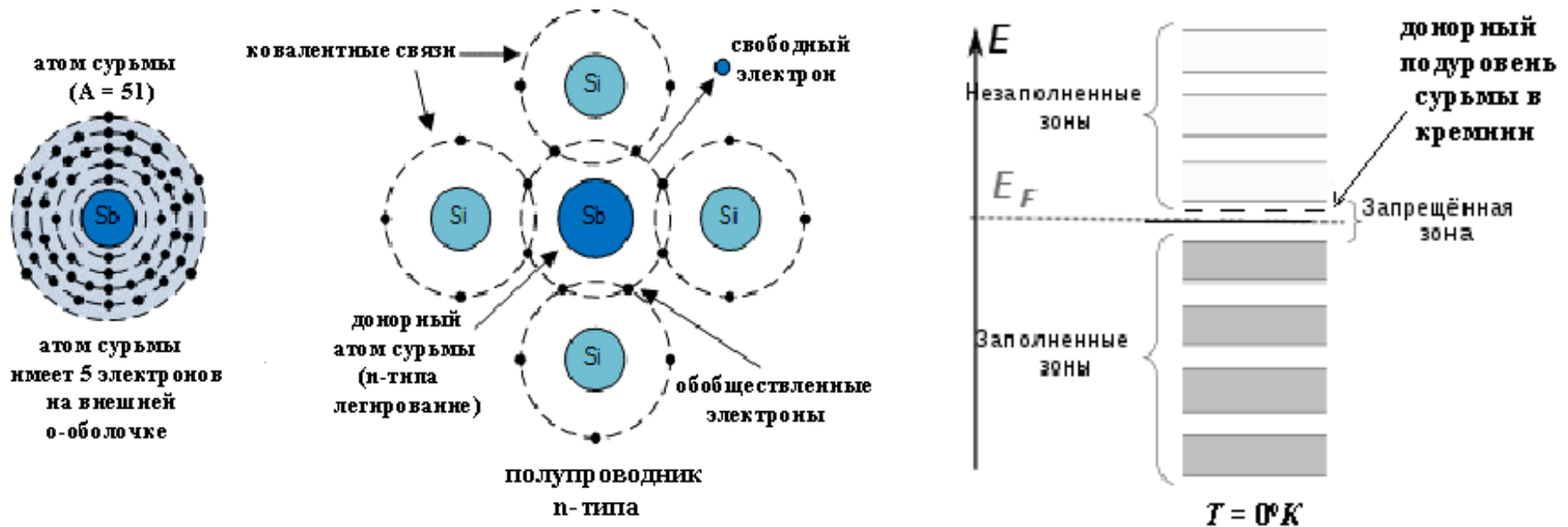
Собственные (беспримесные) полупроводники

В собственных полупроводниках уровень Ферми располагается в запрещенной зоне: при нулевой температуре основная зона была бы целиком заполнена и свободных электронов не было бы. С ростом температуры все больше электронов приобретают энергию, достаточную, чтобы перейти в зону проводимости и проводить эл.ток при наличии разности потенциалов. Одновременно в валентной зоне освобождаются вакансии (“дырки”) – положительно заряженные носители тока.



Легированные полупроводники n-типа

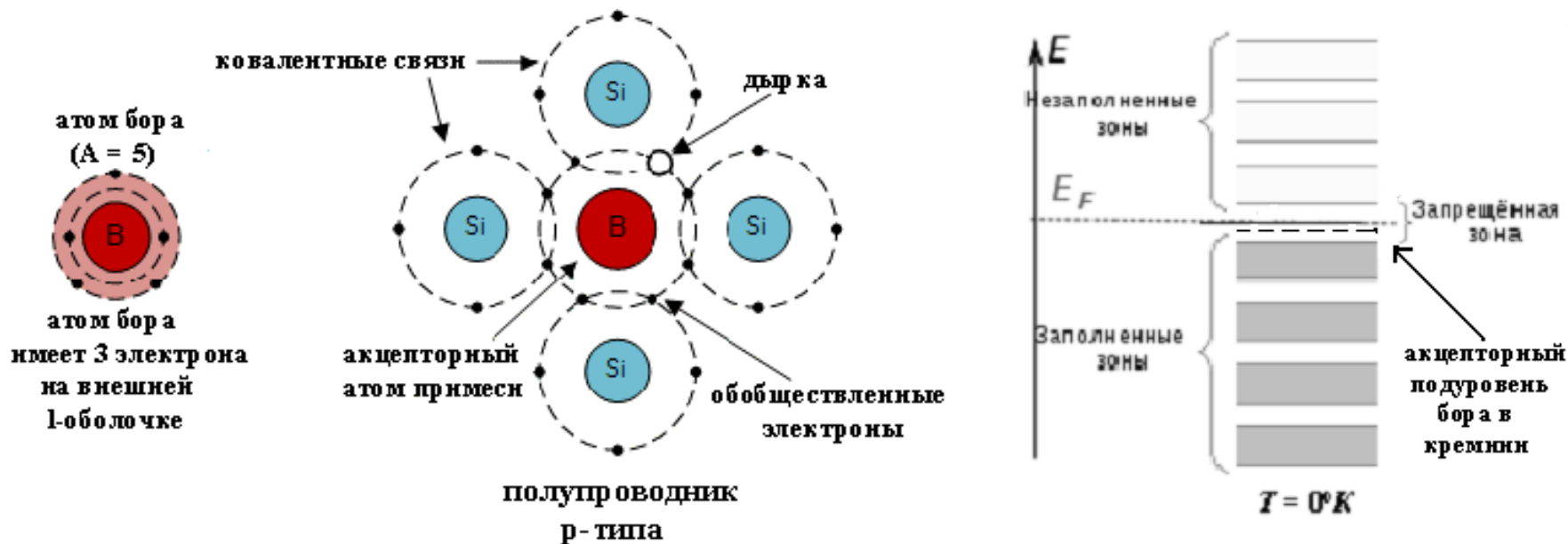
Ввиду того, что концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике при н.у. обычно очень мала, добавление малого количества примеси ($\sim 10^{-4}$ %) способно в разы увеличить проводимость. На схеме ниже легирование кремния атомами сурьмы добавляет некоторое количество свободных электронов: получается п/п n-типа:



На схеме энергетических зон это соответствует появлению донорного подуровня сурьмы вблизи зоны проводимости кремния, т.е. переход туда электронов примеси легче чем из валентной зоны.

Легированные полупроводники *p*-типа

Полупроводник *p*-типа содержит избыток незаполненных вакансий (дырок).



Это можно представить как появление в запрещенной зоне акцепторного подуровня между уровнем Ферми и верхом валентной зоны. Основные носители заряда в таком п/п – дырки, их большинство.

p-n переход

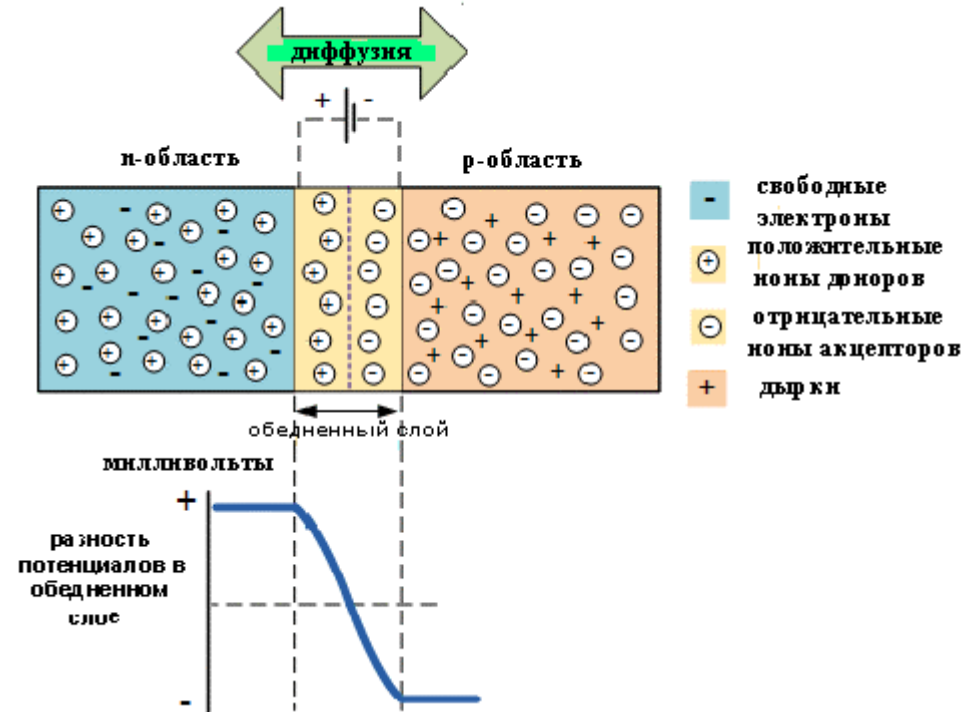
p-n переход – это сплавленная пара полупроводников *p*-типа и *n*-типа.

Диффундирующие через границу раздела свободные заряды оставляют на ней потенциальный барьер, образованный зарядами ионов (обедненный свободными зарядами слой).

То есть на границах обедненного слоя возникает разность потенциалов, равная

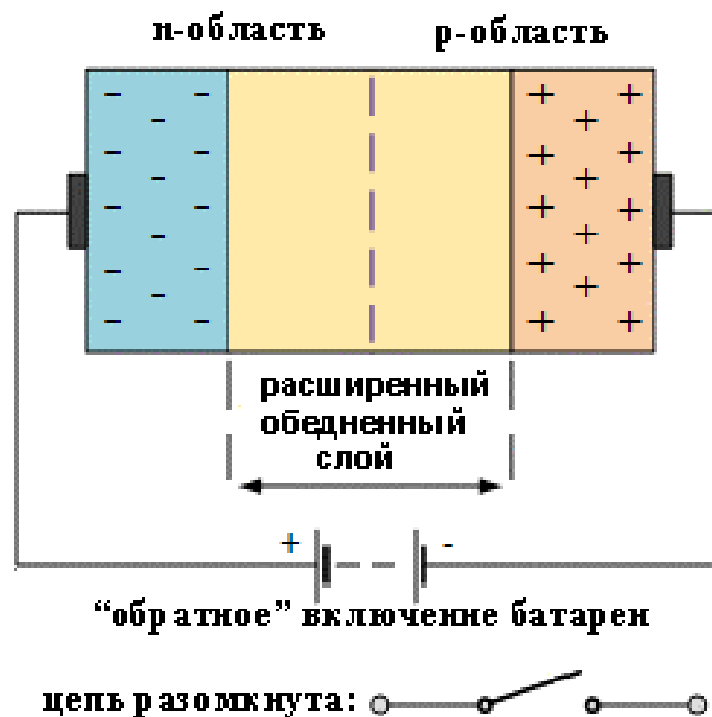
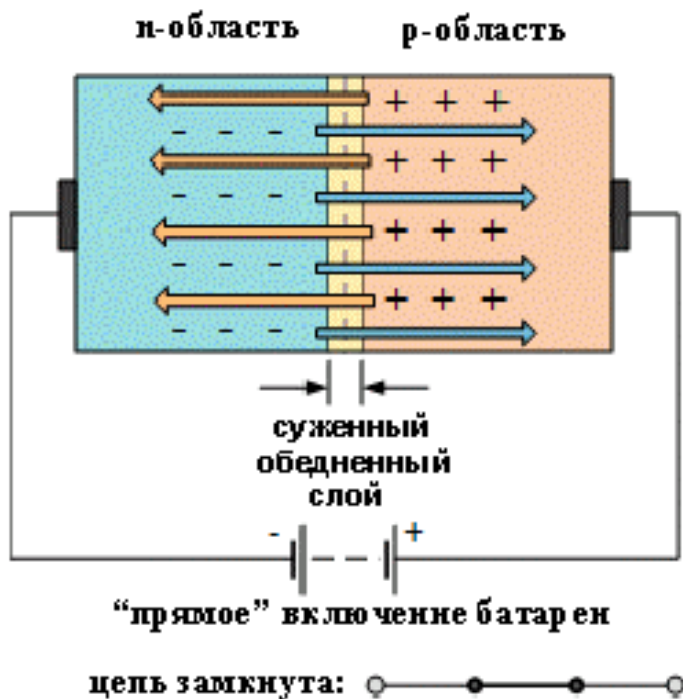
$$V_d = V_t \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} = \frac{kT}{q_e} n \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

где N_d – концентрация донорной примеси, N_a – концентрация акцепторной, n_i – собственная концентрация носителей в полупроводнике (до легирования) (Динамическое равновесие!)



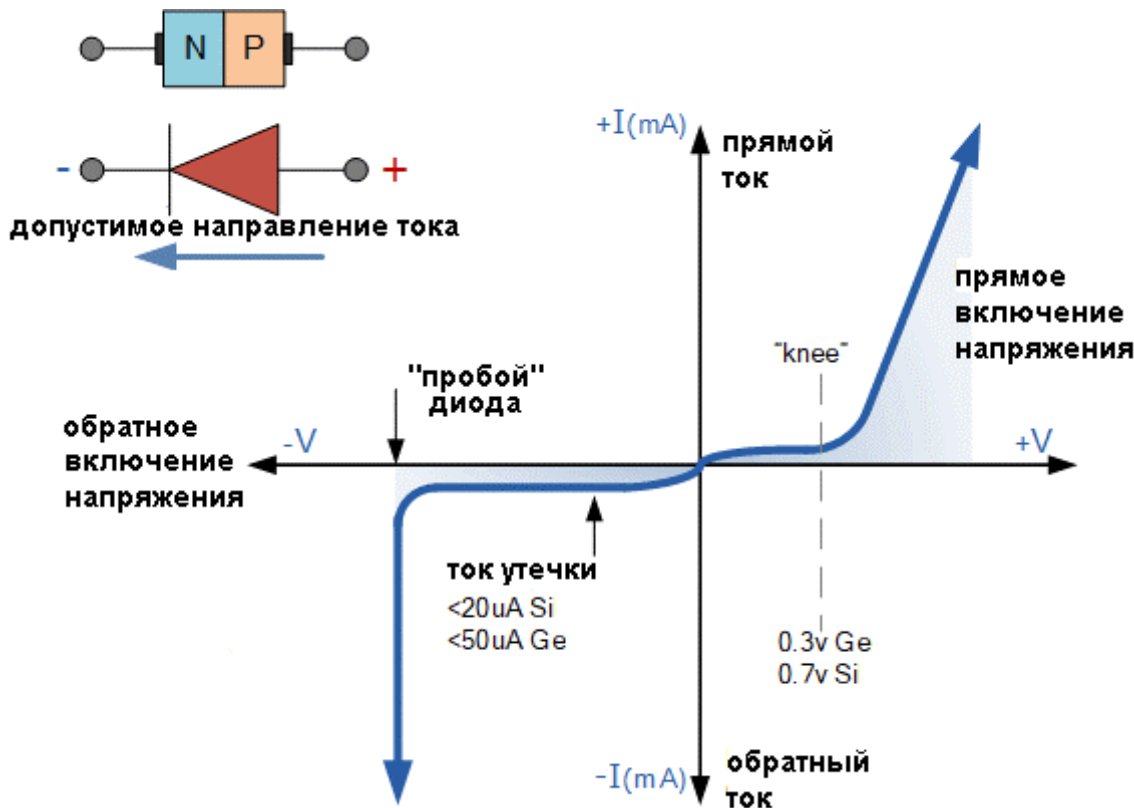
p-n переход в роли диода

Под действием напряжения обедненный слой меняет свою толщину. При этом меняется и высота потенциального барьера. Если к области *p*-типа подключить “+” батареи, а к области *n*-типа “-”, барьер понижается, и проводимость диода возрастает. При противоположном подключении барьер возрастает и диод “запирается”:



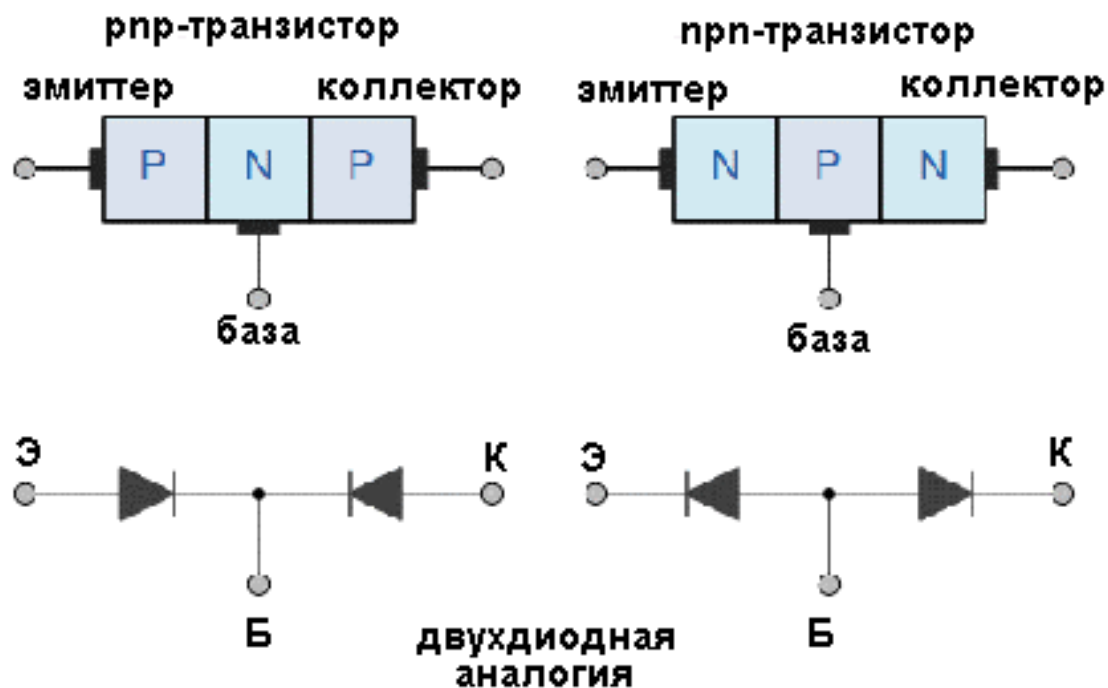
ВАХ полупроводникового диода

Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода несимметрична: в “прямом” направлении приложенное внешнее напряжение дает достаточно большой ток, в противоположном направлении при тех же значениях напряжения ток (“ток утечки” неосновных носителей заряда) гораздо меньше.



p-n переходы в биполярном транзисторе

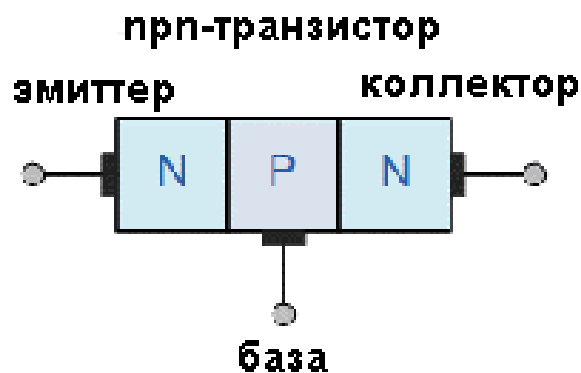
Транзистор (полупроводниковый триод) содержит 2 *p-n* перехода, включенных навстречу друг другу:



В отличие от диодов, транзисторы способны усиливать ток или напряжение.

Принцип работы биполярного транзистора

Рассмотрим для примера *npn*-транзистор. Для усиления тока на эмиттер подается отрицательный потенциал по отношению к коллектору. На базе потенциал выше, чем на эмиттере, на ниже, чем на коллекторе.



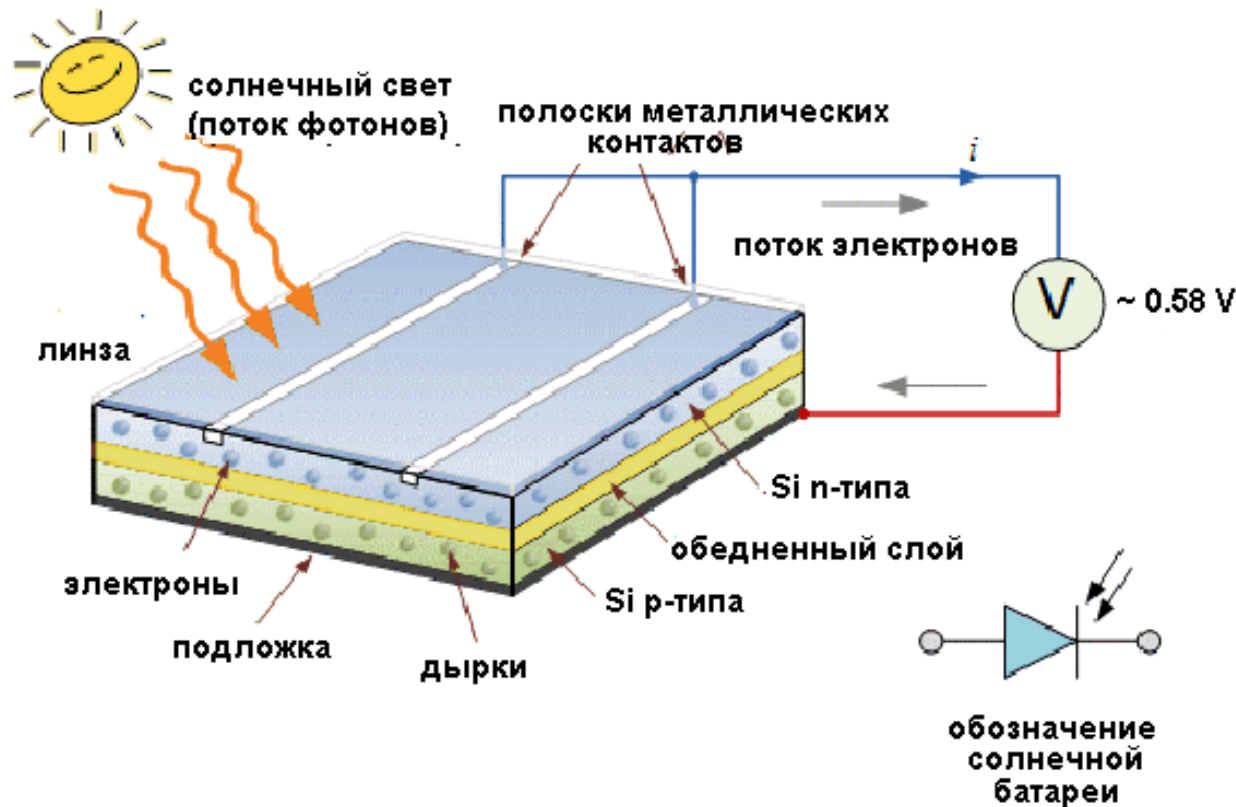
Из-за этого поток электронов с эмиттера устремляется на базу (для них этот диод включен в прямом направлении. Если бы база была достаточно широкой, то с нее на

коллектор тек бы только очень слабый ток утечки (левая половина ВАХ диода), т.к. в базе (полупроводник *p*-типа) электронов очень мало (неосновные носители). Но базу делают очень тонкой, поэтому часть электронного потока $\mathcal{E} \Rightarrow \mathcal{B}$ просто из-за диффузии попадают в обедненную область перехода $\mathcal{B} \Rightarrow \mathcal{K}$, а здесь они становятся основными носителями, усиливая ток неосновных (правая половина ВАХ диода).

Аналогично можно рассмотреть работу *pnп*-транзистора, но с эмиттера на базу здесь будут уходить уже дырки.

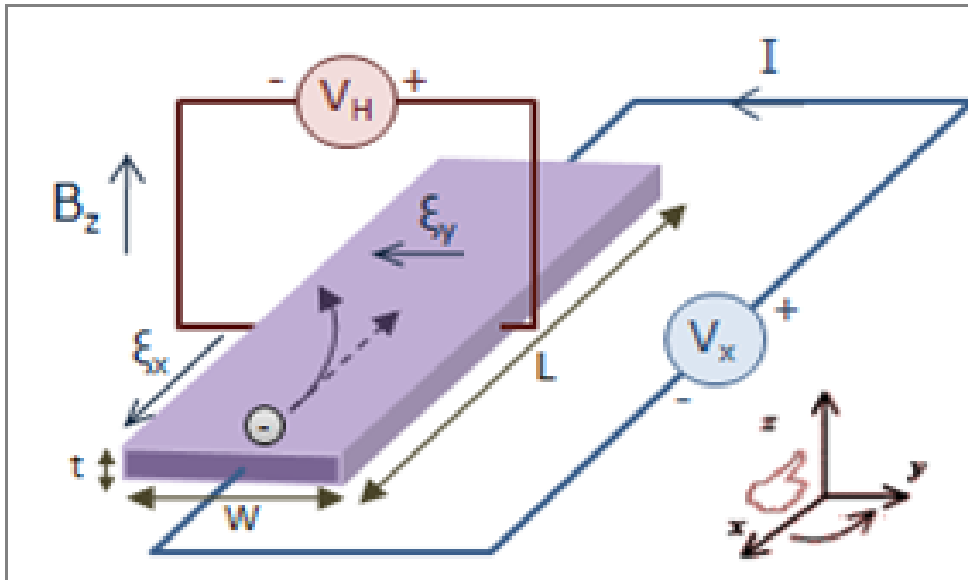
p-n переход в солнечной батарее

В солнечных батареях используется способность электрического поля в обедненном слое *p-n* перехода разделять носители заряда противоположного знака (электроны и дырки), которые парами генерируются в полупроводнике при поглощении энергии света. Разделенные носители формируют разность потенциалов (электр. напряжение).



Эффект Холла

В солнечных батареях используется способность электрического поля в обедненном слое *p-n* перехода разделять носители заряда противоположного знака (электроны и дырки). А в эффекте Холла разделение зарядов, движущихся в магнитном поле (ток), приводит к появлению разности потенциалов в направлении, перпендикулярном и электрическому току, и магнитному полю:



$$V_H = R \cdot B_z \cdot I$$

Эффект Холла широко используется для измерений как свойств полупроводников, так и величины магнитной индукции.