

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Лектор: ст. преподаватель Баевич Г.А.

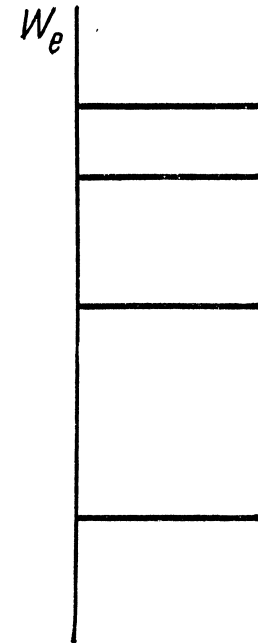
Лекция 1

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Состояние атома. Энергетические диаграммы. Отличия полупроводников от металлов.
2. Полупроводники. Структура полупроводников.
3. Электропроводность полупроводников.
4. Примесная проводимость полупроводника.
5. Время жизни носителей заряда.

Энергетическая диаграмма изолированного атома

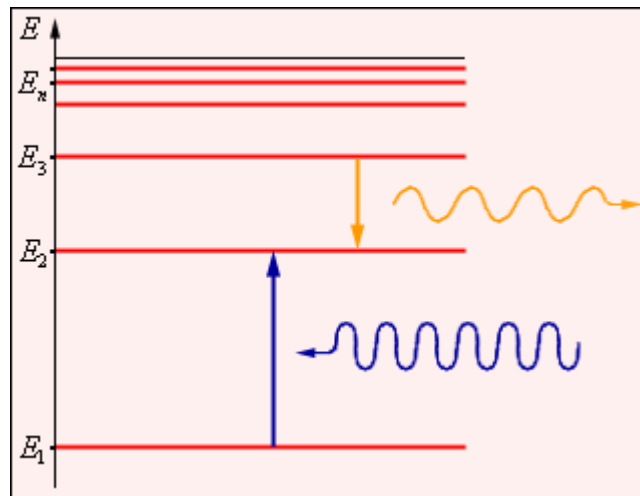
В соответствии с принципами квантовой механики электроны атома могут обладать определенными значениями энергии или находиться на определенных (разрешенных) энергетических уровнях.



В изолированном атоме существует конечное число энергетических уровней, на каждом из которых могут одновременно находиться не более двух электронов, различающихся направлением спиновых моментов (принцип Паули).

Состояния атома

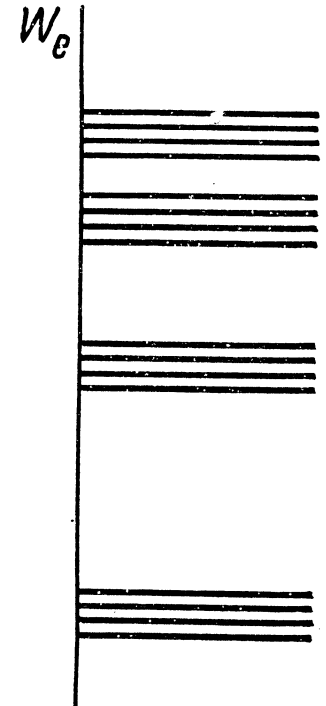
При наличии внешних воздействий (тепловые кванты — фононы, кванты света — фотоны, электрическое или магнитное поле и др.) электроны атома приобретают дополнительную энергию и переходят на более высокие энергетические уровни (возбуждение атома) или вовсе освобождаются от атома и становятся свободными, не связанными с атомом



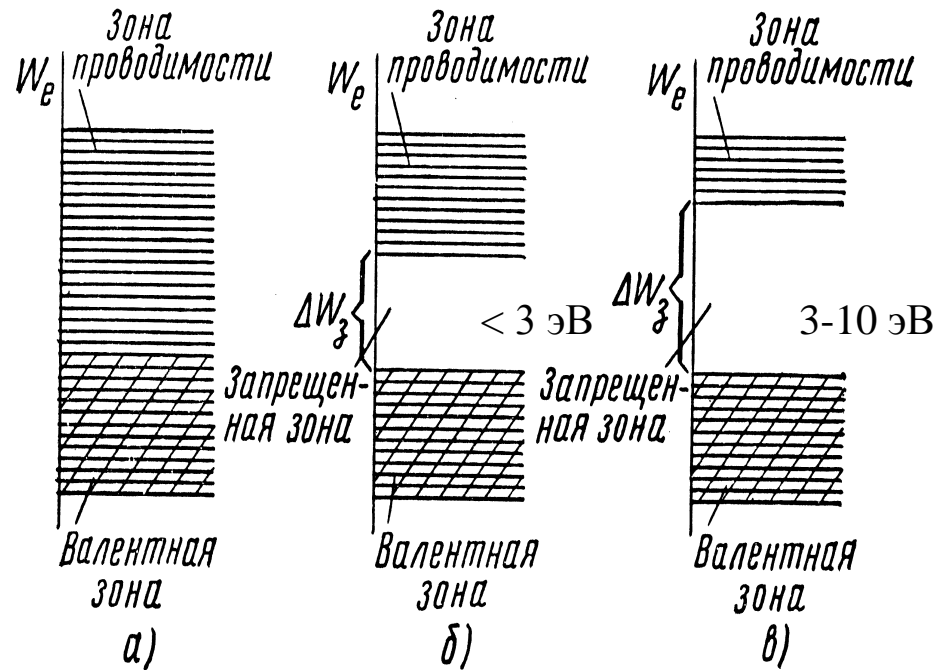
Энергетическая диаграмма группы близко расположенных атомов

Вследствие взаимодействия атомов друг с другом разрешенные уровни энергии электронов соседних атомов смещаются, образуя близко расположенные смещенные уровни энергии — подуровни.

Подуровни образуют так называемые зоны разрешенных уровней энергии, которые отделены друг от друга запрещенными зонами. Число подуровней в каждой из разрешенных зон равно количеству атомов в группе.



Энергетические диаграммы



Энергетическая диаграмма металла (а), полупроводника (б) и диэлектрика (в)

Зоны разрешенных значений энергии:

1. Нижняя (заполненная), или **валентная зона**
2. Верхняя (свободная), или **зона проводимости**.

Отличия полупроводников от металлов

1. Удельное сопротивление у полупроводников при обычных условиях гораздо больше, чем у металлов.
2. Удельное сопротивление чистых полупроводников уменьшается с ростом температуры (у металлов оно растёт).
3. При освещении полупроводников их сопротивление значительно уменьшается (на сопротивление металлов свет почти не влияет).
4. Ничтожное количество примесей оказывает сильное влияние на сопротивление полупроводников.

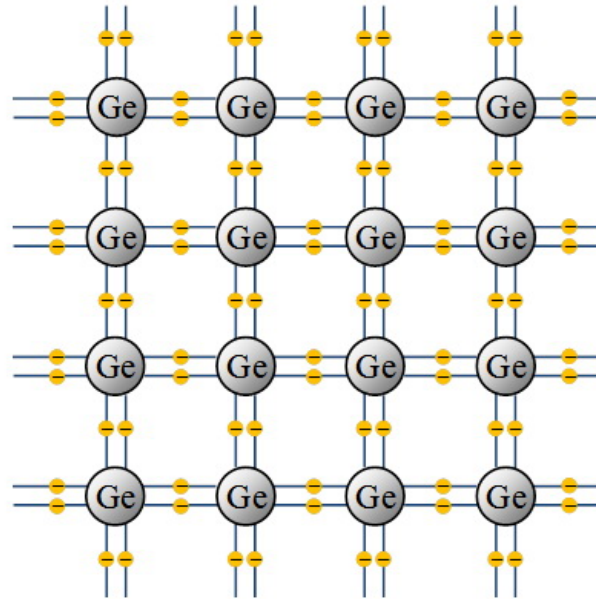
Полупроводники

К полупроводникам принадлежат 12 химических элементов в средней части таблицы Менделеева — В, С, Si, P, S, Ge, As, Se, Sn, Sb, Te, I, соединения элементов третьей группы с элементами пятой группы, многие оксиды и сульфиды металлов, ряд других химических соединений, некоторые органические вещества.

ПЕРИОД	РЯД	ГРУППА ЭЛЕМЕНТОВ															
		A I B	A II B	A III B	A IV B	A V B	A VI B	A VII B	A VIII B	A IX B	A X B	A XI B	A XII B	A XIII B	A XIV B	A XV B	
I	1	H 1.00795 водород														HI 7.016 йод	
II	2	Li 6.9412 литий	Be 9.01218 бериллий	B 10.812 бор	C 12.0106 углерод	N 14.0067 азот	O 15.9994 кислород	F 18.99843 фтор	Ne 20.1797 неон								
III	3	Na 22.98977 натрий	Mg 24.305 магний	Al 26.98154 алюминий	Si 28.086 кремний	P 30.97376 фосфор	S 32.06 сера	Cl 35.453 хлор	Ar 39.948 аргон								
IV	4	K 39.0983 калий	Ca 40.08 кальций	Sc 44.9559 скандий	Ti 47.88 титан	V 50.9415 ванадий	Cr 51.996 хром	Mn 54.9380 марганец	Fe 55.845 железо								
	5	Cu 63.546 медь	Zn 65.38 цинк	Ga 69.72 галлий	Ge 72.59 германий	As 74.9216 мышьяк	Se 78.96 селен	Br 79.904 бром	Kr 83.80 криpton								
V	6	Rb 85.4678 рубидий	Sr 87.62 стронций	Y 88.9059 иттрий	Zr 91.22 цирконий	Nb 92.9064 ниобий	Mo 95.94 молибден	Tc 98.9062 технеций	Ru 101.07 рутений								
	7	Ag 107.868 серебро	Cd 112.41 кадмий	In 114.82 индий	Sn 118.69 олово	Sb 121.75 сурьма	Te 127.60 теллур	I 126.9045 йод	Xe 131.29 ксенон								

На внешней оболочке атомов находятся четыре валентных электрона. Ширина запрещенной зоны германия равна 0,72 эВ, кремния — 1,12 эВ.

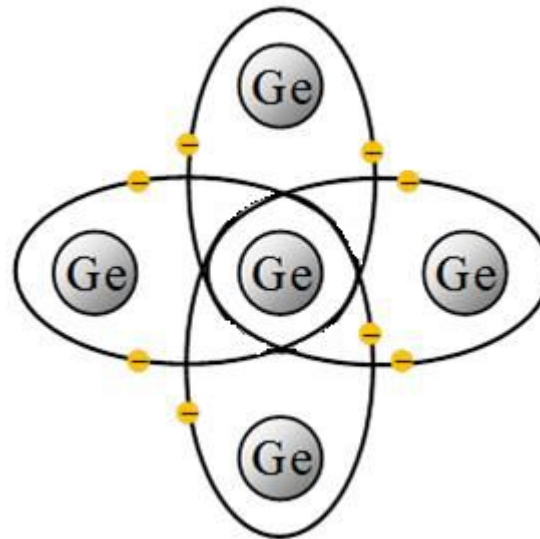
Плоская схема структуры германия



Четыре валентных электрона каждого атома германия связаны с такими же электронами соседних атомов химическими парноэлектронными (*ковалентными*) связями. В образовании этой связи от каждого атома участвует по одному валентному электрону, которые отщепляются от атомов (коллективизируются кристаллом) и при своем движении большую часть времени проводят в пространстве между соседними атомами.

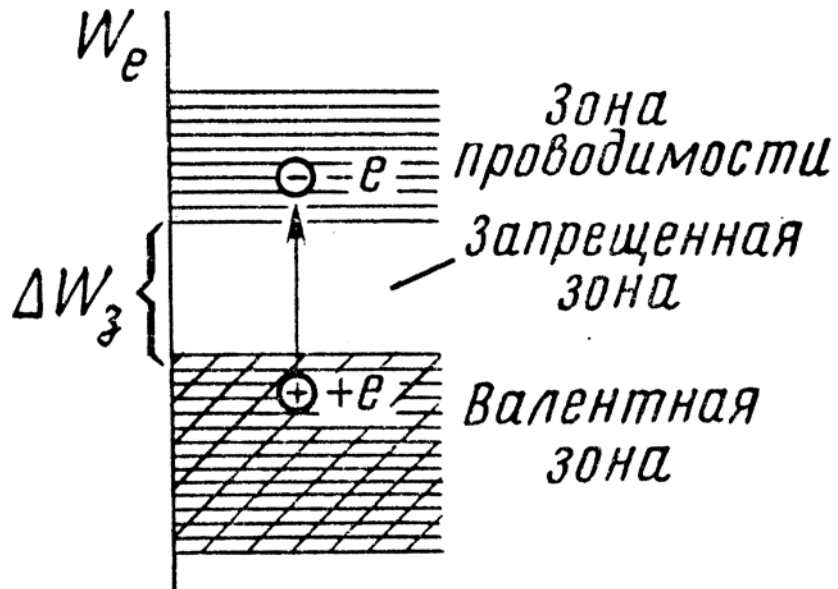
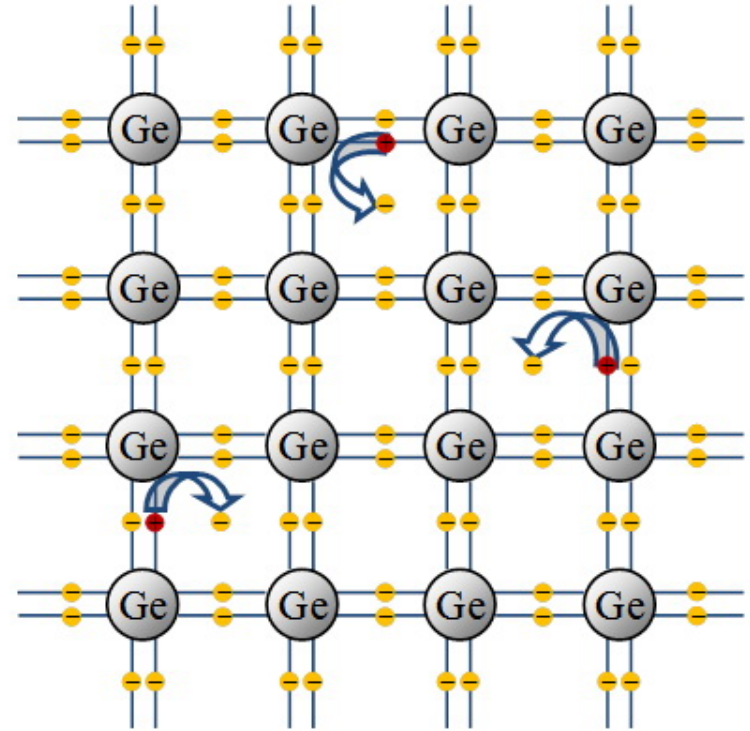
Плоская схема структуры германия

коллективизированная пара электронов принадлежит не только двум атомам. Каждый атом образует четыре связи с соседними, а данный валентный электрон может двигаться по любой из них. Дойдя до соседнего атома, он может перейти к следующему, а затем дальше вдоль всего кристалла. Коллективизированные валентные электроны принадлежат всему кристаллу.



Возникновение свободного электрона

Валентный электрон освобождается от связей и становится **свободным**

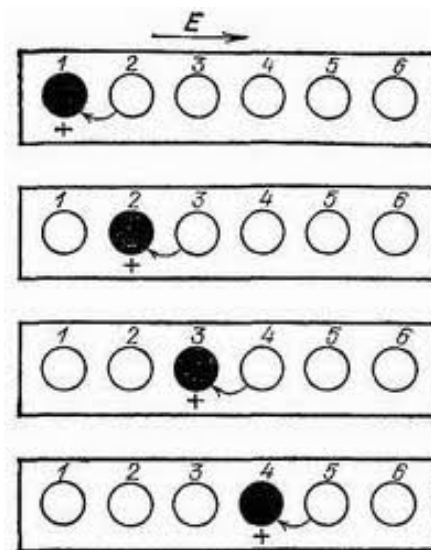
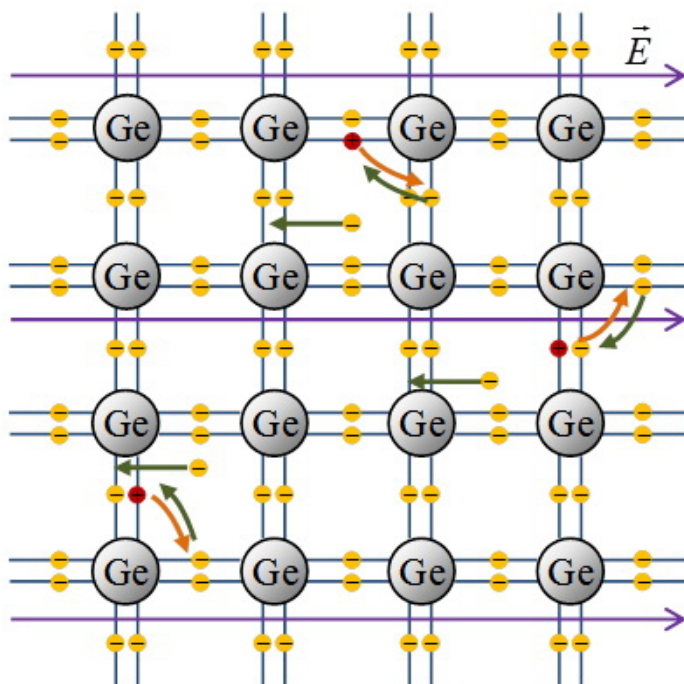


Освобождение электрона от связей с атомами соответствует его переходу с уровня валентной зоны на уровень зоны проводимости

Полупроводник во внешнем поле

В отсутствие внешнего электрического поля эти свободные электроны и дырки движутся в кристалле полупроводника хаотически.

Во внешнем электрическом поле электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля. Положительные дырки перемещаются в направлении напряженности электрического поля. Процесс перемещения электронов и дырок во внешнем поле происходит по всему объему полупроводника.

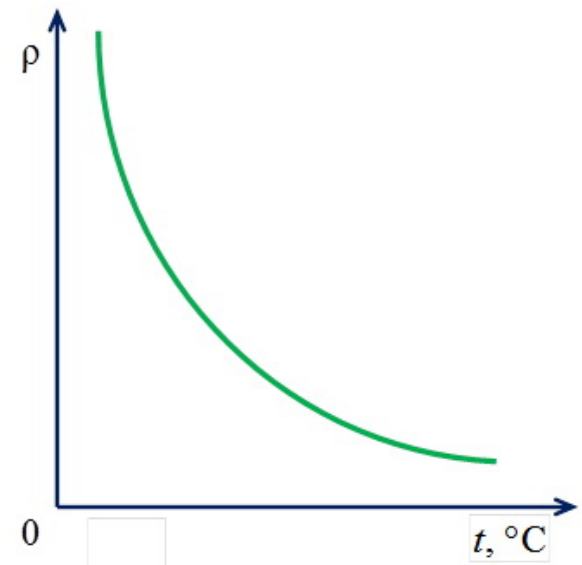


Электропроводность полупроводника

Общая удельная электропроводность полупроводника складывается из дырочной и электронной проводимостей. При этом у чистых полупроводников число электронов проводимости всегда равно числу дырок. Поэтому говорят, что чистые полупроводники обладают **электронно-дырочной проводимостью**, или **собственной проводимостью**.

С повышением температуры возрастает число разрывов ковалентных связей и увеличивается количество свободных электронов и дырок в кристаллах чистых полупроводников, а, следовательно, возрастает удельная электропроводность и уменьшается удельное сопротивление чистых полупроводников.

График зависимости удельного сопротивления чистого полупроводника от температуры



Термогенерация

В полупроводнике создается некоторая концентрация электронов n_i в свободной зоне и равная ей концентрация дырок p_i в валентной зоне.

Концентрация носителей заряда зависит от температуры кристалла и ширины запрещенной зоны:

$$n_i = p_i = A e^{-\frac{\Delta W_3}{2kT}}$$

A — коэффициент, зависит от рода кристалла;

k — $1,37 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Рекомбинация носителей заряда - исчезновение электронов и дырок за счет возвращения электронов из зоны проводимости на вакантные уровни валентной зоны.

Примесная проводимость

Примесная проводимость - проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике.

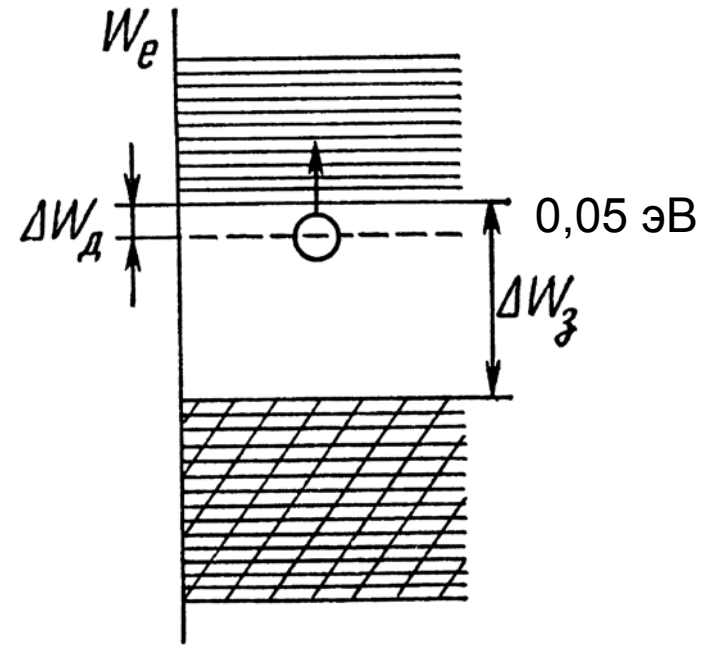
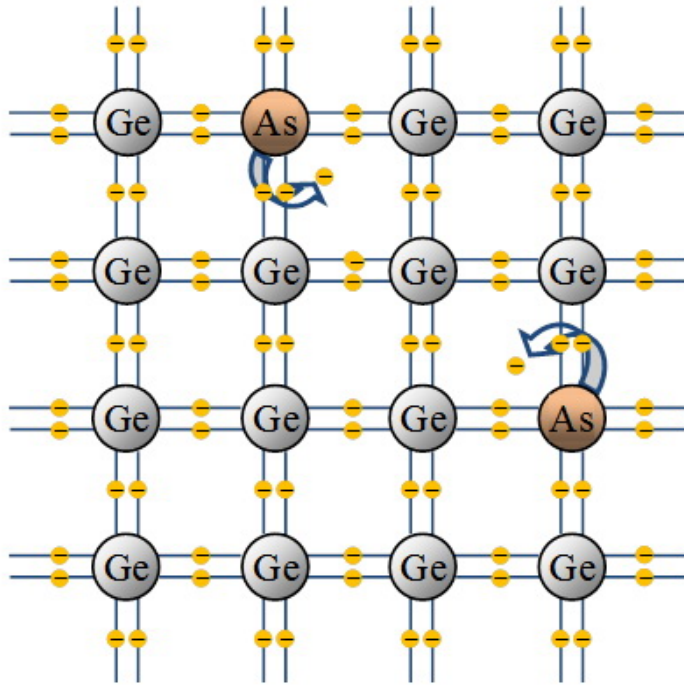
Примесными центрами могут быть:

1. атомы или ионы химических элементов, внедренные в решетку полупроводника;
2. избыточные атомы или ионы, внедренные в междоузлия решетки;
3. различного рода другие дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, трещины, сдвиги, возникающие при деформациях кристаллов, и др.

Для получения полупроводника с электропроводностью *n*-типа в чистый полупроводник вводят примесь, создающую в полупроводнике только свободные электроны. Вводимая примесь является «поставщиком» электронов, в связи, с чем ее называют **донорной**. Для германия и кремния донорной примесью служат элементы V группы (сурьма, фосфор мышьяк), атомы, которых имеют, пять валентных электронов.

Донорная примесь

Электрон, не участвующий в ковалентной связи, оказывается значительно слабее связанным со своим атомом.



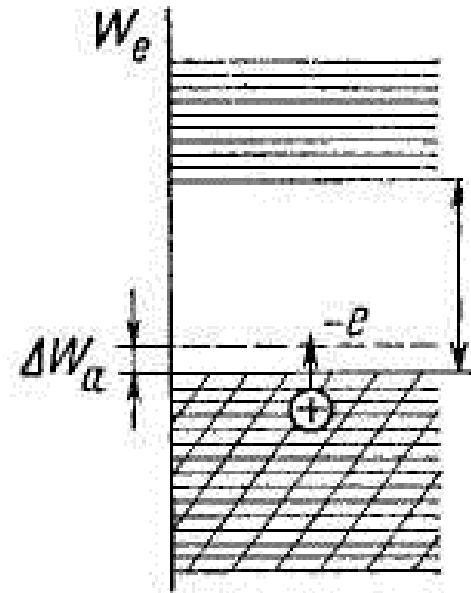
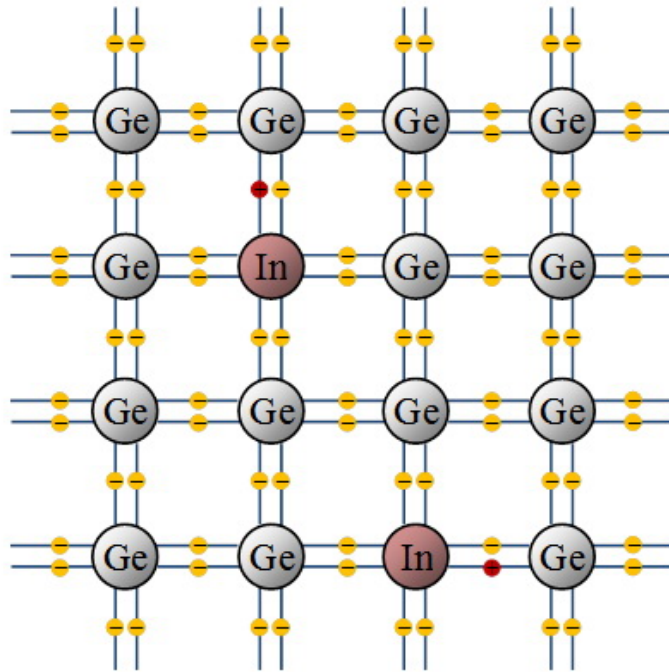
$$\Delta W_d = 0,01 \div 0,07 \text{ эВ}$$

Концентрация электронов n_n в полупроводнике n -типа существенно выше концентрации дырок p_n

Электроны являются **основными** носителями заряда, а дырки — **неосновными**.

Акцепторная примесь

В полупроводниках p -типа введение примеси направлено на повышение концентрации дырок. Примеси - элементы III группы (индий, галлий, алюминий, бор), атомы которых имеют по три валентных электрона.



$$\Delta W_a = 0,01 \div 0,07 \text{ эВ}$$

Дырки являются **основными** носителями заряда, а электроны — **неосновными**.

Атомы примеси, принимающие валентные электроны соседних атомов, называют **акцепторными**

Примесная проводимость

Общая удельная электропроводность полупроводника складывается из дырочной и электронной проводимостей

Произведение концентраций основных и неосновных носителей заряда при данной температуре является постоянной величиной и определяется соотношением

$$n_n p_p = p_n n_p = p_i n_i = A^2 e^{-\frac{\Delta W_3}{kT}}$$

$n_i = p_i$ — собственные концентрации носителей заряда в чистом полупроводнике

Рабочий диапазон температур $n_n \gg p_n, p_p \gg n_p$

Верхний температурный предел

- германий 75—85° С,
- кремний 150—170° С

Нижний температурный предел от -55 до -60°С