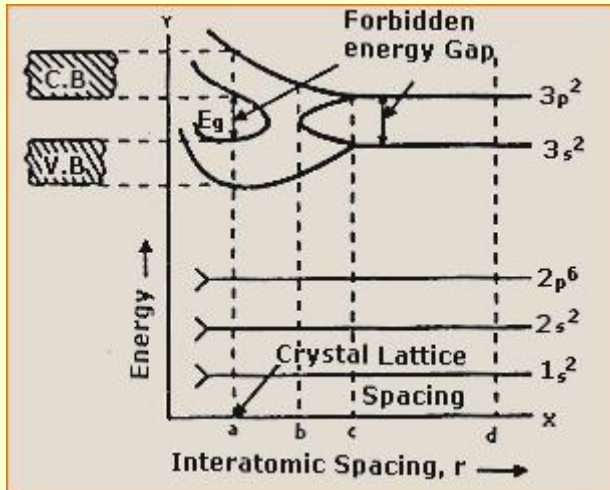


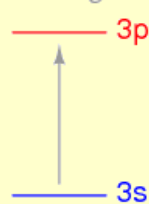
Лекция 1

Элементы зонной теории твердых тел. Барьерные структуры. Диод Шоттки (контакт металл-полупроводник)



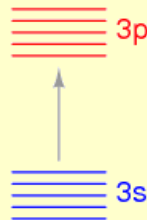
Одиночные атомы имеют отдельные уровни энергии электронов. При объединении их в кристаллическую решетку уровни расщепляются в энергетические зоны с расстоянием между соседними подуровнями 10^{-22} эВ. Валентный уровень образует валентную зону. Она является частично или полностью заполненной электронами. Выше нее располагается зона проводимости. Для переброса в нее электрона требуется дополнительная энергия.

Significant leap required for an electron to move to the next higher level



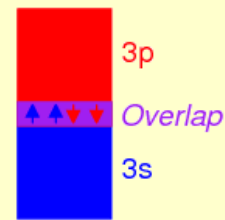
Single atom

Shorter leap required

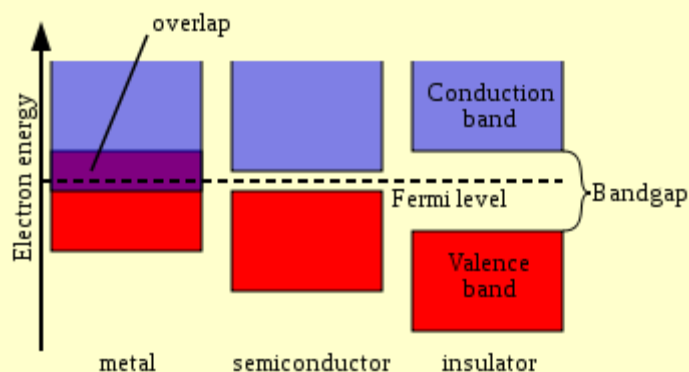


Five atoms in close proximity

Overlap permits electrons to freely drift between bands



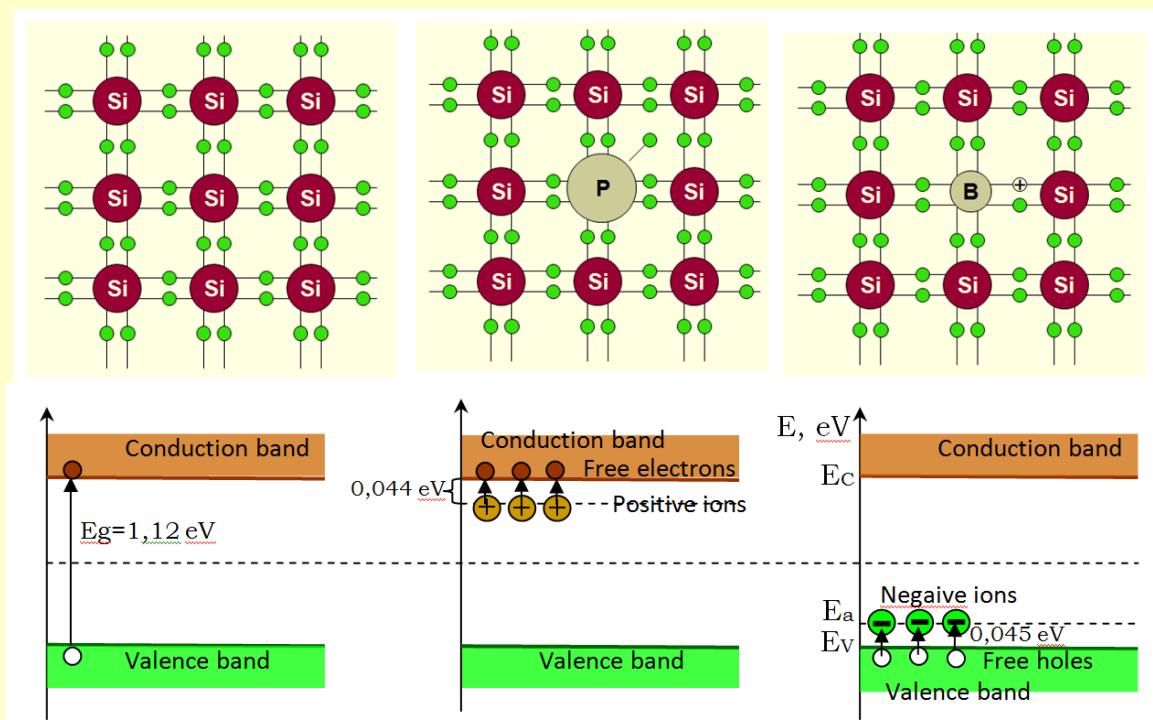
Multitudes of atoms in close proximity



В проводниках валентная зона и зона проводимости перекрываются и поэтому электроны свободно движутся, получив любую энергию. Этим объясняется хорошая проводимость металлов. В полупроводниках валентная зона отделена от зоны проводимости энергетическим зазором. Он называется запрещенной зоной. В валентной зоне каждый электрон связан со своим

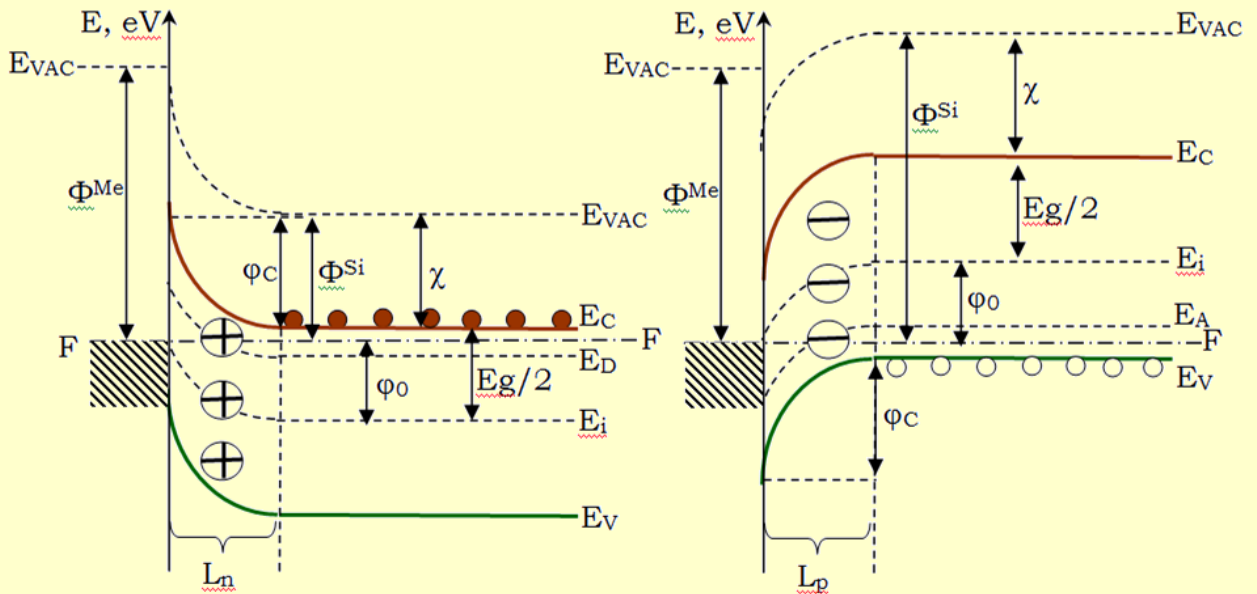
атомом. При температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена, а в зоне проводимости нет электронов. При повышении температуры часть электронов переходит в зону проводимости, где они становятся свободными и движутся от атома к атому также, как в металлах. Для полупроводников $E_g < 3$ эВ. Диэлектрики сходны по структуре с полупроводниками, но их $E_g > 3$ эВ. В электрических полях электроны не отрываются от своих атомов, а происходит образование диполей или поляризация со смещением зарядов ядер и электронных оболочек.

Наиболее интересными с точки зрения зонной теории являются полупроводники, потому что в них можно создавать проводимость трех типов: собственную (*i*-тип) и примесную – электронную (*n*-тип) и дырочную (*p*-тип). Дырки – это вакантное место в ковалентных связях, не занятое электроном. Они имеют положительный заряд. На рисунке приведены примеры всех трех типов проводимости для четырехвалентного кристалла кремния. Для создания *n*-типа области в кремнии используют элементы IV группы – фосфор, мышьяк и др. Например, фосфор образует мелкие уровни вблизи дна зоны проводимости на расстоянии от нее 0,044 эВ. Эту энергию необходимо сообщить электронам фосфора для перевода их в зону проводимости. Конечно, эта энергия на два порядка меньше ширины запрещенной зоны в кремнии, поэтому энергетически выгодно осуществлять переход с примесного уровня в разрешенную зону, чем межзонный переход. На донорном уровне при этом остаются положительно заряженные ионы примеси (фосфора). Для создания *p*-типа проводимости кремний легируют элементами III группы: бором, алюминием и реже другими. Эти примеси создают мелкие уровни, отстоящие от потолка валентной зоны на 0,045 эВ. Из валентной зоны электрон захватывается ловушкой бора с образованием отрицательно заряженного иона бора и высвобождает в валентной зоне дырку.



Схематическое расположение энергетических зон, показанное на этом рисунке, называется диаграммами плоских зон, характерных для объема полупроводника. На поверхности происходит изгиб зон, как показано на рисунке ниже. Допустим, металл и кремний приведены в контакт.

Энергетические зоны стремятся изогнуться так, чтобы уровень Ферми выходил посередине запрещенной зоны. При термодинамическом равновесии уровень Ферми одинаков во всех частях системы и представляет собой горизонтальную линию на диаграмме. Уровень Ферми – это энергия, необходимая для изменения числа частиц в системе на единицу. При температуре абсолютного нуля выше этого уровня электроны не могут находиться. Введем несколько энергетических характеристик. Расстояние от уровня Ферми до уровня вакуума (когда электрон удален из кристалла и не испытывает кулоновского притяжения) называется работой выхода. В металлах работа выхода является табличной величиной и она больше, чем в полупроводниках. Так, для металлов, часто используемых в контакте с полупроводниками, (Au, Ag, Pt, Cu, Al) $\Phi = 4.1-5.6$ эВ. В полупроводниках работа выхода зависит от уровня легирования материала, т. е. от концентрации примесных атомов и от типа примеси. Расстояние от дна зоны проводимости до уровня вакуума называется электронным сродством. Это табличная величина. Для определения Φ в полупроводниках вводится также потенциал ϕ_0 или расстояние от уровня Ферми до середины запрещенной зоны. Величина запрещенной зоны для каждого полупроводника индивидуальна и также занесена в таблицы. На границе металла с полупроводником существует энергетический барьер ϕ_c . Он представляет собой высоту изгиба зон. Ширину изгиба зон или область обеднения характеризуют величиной L_n .



$$\begin{aligned}\Phi^{Si} &= \chi + \frac{E_g}{2} - \phi_0 \\ \phi_0 &= kT \times \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \\ N_D &= \frac{1}{e\mu_n\rho} \\ \phi_c &= \Phi^{Me} - \Phi^{Si} \\ L_n &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(\phi_c - U)}{eN_D}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi^{Si} &= \chi + \frac{E_g}{2} + \phi_0 \\ \phi_0 &= kT \times \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \\ N_A &= \frac{1}{e\mu_p\rho} \\ \phi_c &= \Phi^{Me} - \Phi^{Si} \\ L_p &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(\phi_c - U)}{eN_A}}\end{aligned}$$

В этих формулах:

$kT = 0,026$ эВ – тепловая энергия при $T=300$ К

N_D, N_A – концентрации доноров и акцепторов, соответственно; измеряются в см^{-3}

U, V – внешнее напряжение на контакте

μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок (сведены в таблицу), транспортная характеристика носителей заряда во внешних электромагнитных полях:

$$\mu = \frac{v}{E}, \frac{\text{см}^2}{\text{В} \times \text{с}}$$

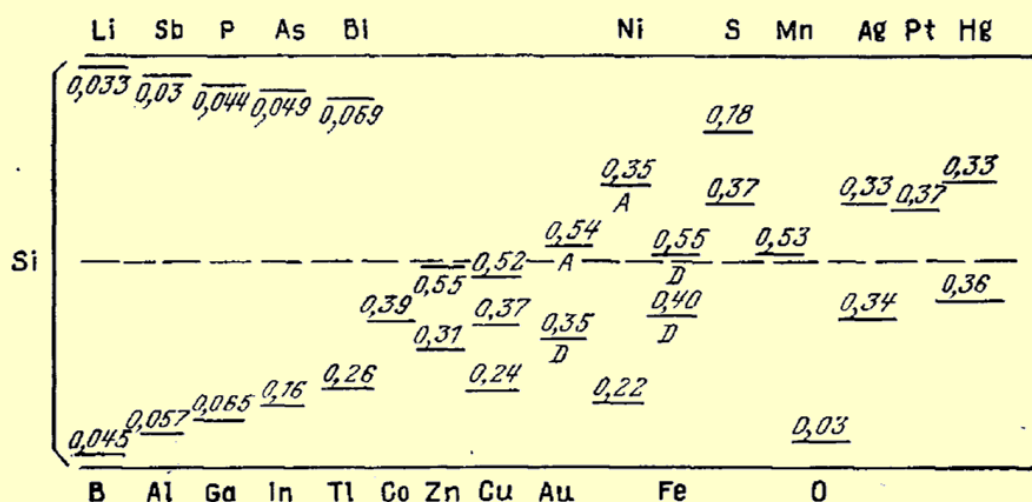
v – скорость носителей заряда, E – напряженность электрического поля

ρ – удельное сопротивление, Ом×см. В задачах вводится маркировка полупроводниковых материалов:

КДБ-10 – кремний дырочный, легированный бором с удельным сопротивлением 10 Ом×см,

КЭФ-1 – кремний электронный, легированный фосфором, $\rho = 1$ Ом×см

ГЭС-1 – германий электронный, легированный сурьмой, $\rho = 1$ Ом×см



Энергетические уровни различных примесей в запрещенной зоне кремния. Уровни, расположенные ближе к разрешенным зонам создают электрически активную примесь. Уровни глубокие, находящиеся ближе к середине E_g являются паразитными ловушками, захватывающими носители обоих знаков и таким образом выводящие их из процесса переноса заряда вдоль кристалла.

В области изгиба зон существует встроенное электрическое поле объемных ионов примеси.

Работа выхода из металлов (эВ)

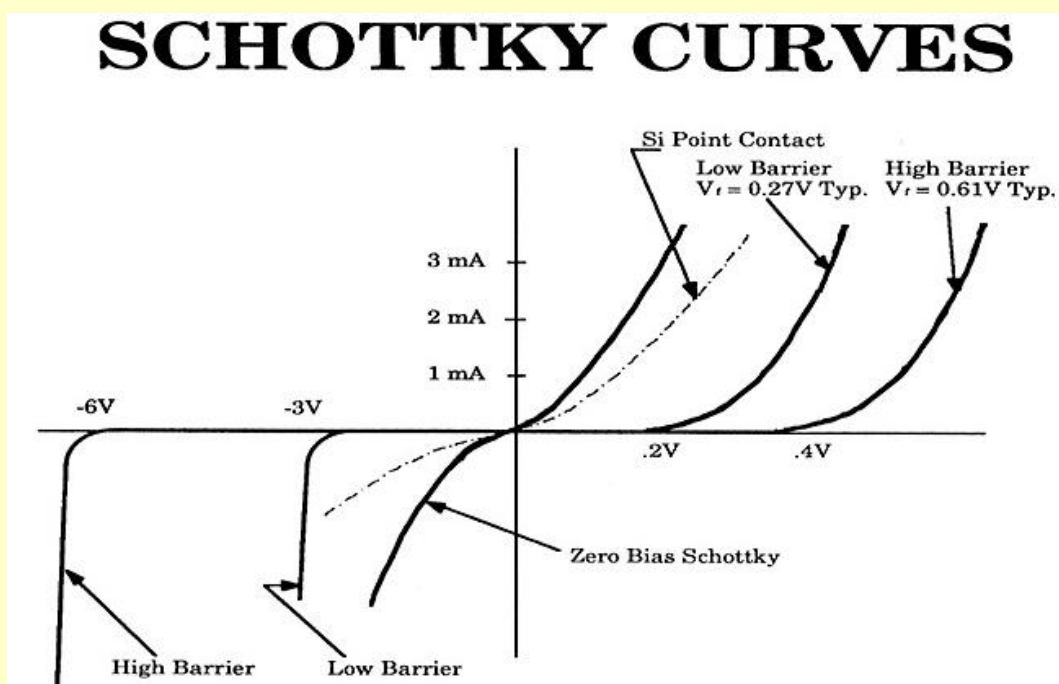
Mg	Al	Ni	Cu	Ag	Au	Pt
3,4	4,1	4,5	4,4	4,3	4,7	5,3

Параметр		Обозначение	Si	Ge	GaAs	InSb
Ширина запрещенной зоны, эВ	300 К	E_g	1,12	0,66	1,43	0,18
	0 К		1,21	0,80	1,56	0,23
Подвижность при 300 К, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	электронов	μ_n	1500	3900	8500	78000
	дырок	μ_p	600	1900	400	5000
Эффективная масса	электронов	$m_{\text{дн}}^*$	1,08	0,56	0,068	0,013
	дырок	$m_{\text{дп}}^*$	0,56	0,35	0,45	0,6
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см^{-3}		N_C	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$3,7 \cdot 10^{16}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне, см^{-3}		N_V	$1,02 \cdot 10^{19}$	$6,11 \cdot 10^{18}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$1,16 \cdot 10^{19}$
Диэлектрическая постоянная		ϵ_s	11,9	16,0	10,9	17,0
Электронное сродство		χ	4,05	4,00	4,07	4,60
Собственная концентрация носителей, см^{-3}		n_i	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{16}$
Время жизни носителей, с		τ	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Дебаевская длина, мкм		L_d	24	0,68	2250	
Показатель преломления		n	3,44	4,0	3,4	3,75
Температурный коэффициент		α	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$

Для n - и p -областей численное значение поля можно рассчитать по формулам:

$$E_n = \frac{eN_D L_n}{\epsilon_0 \epsilon} \quad E_p = \frac{eN_A L_p}{\epsilon_0 \epsilon}$$

Рассмотрим вольт-амперную характеристику диода Шоттки:



Уравнение ВАХ контакта металл-полупроводник:

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

где I (мА, мкА) – ток через переход при внешнем напряжении U (В),

j_S – плотность тока насыщения или тока утечек, мА/см²,

S – площадь перехода (в задачах это известная величина).

j_S неизвестно в этом уравнении, но ее можно записать через дырочную и электронную составляющие неосновных носителей заряда, проникающих через барьер, смещенный в обратном направлении (запорном):

$$j_S = j_n + j_p = \frac{eD_n n_p}{l_n} + \frac{eD_p p_n}{l_p}$$

Здесь $D_n = \mu_n \frac{kT}{e}$, $D_p = \mu_p \frac{kT}{e}$, $\frac{cm^2}{c}$ – коэффициенты диффузии электронов и дырок,

$l_n = \sqrt{D_n \tau}$, $l_p = \sqrt{D_p \tau}$ – диффузионные длины этих неосновных носителей заряда, см. τ – время жизни носителей заряда.

Концентрации $n_p = n_n e^{-\frac{\varphi_C}{kT}} = N_D e^{-\frac{\varphi_C}{kT}}$, $p_n = p_p e^{-\frac{\varphi_C}{kT}} = N_A e^{-\frac{\varphi_C}{kT}}$

При приложении к переходу внешнего напряжения энергетические зоны меняются в зависимости от его величины и знака. Прямое смещение осуществляется при подключении n -области к отрицательному полюсу источника питания, на p -область подается положительный потенциал. На зонной диаграмме клеммы присоединяются к уровню Ферми. При прямом смещении потенциальный барьер уменьшается (уменьшается контактная разность потенциалов φ_C) и сокращаются области пространственного заряда L . Подключенный в обратном, запиорном направлении, барьер увеличивается, а область пространственного заряда расширяется (как показано на рисунках). Емкости перехода соответственно:

$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{L} \text{ для обратного включения}$$

$$C_{\text{диф}} = \frac{I \tau}{kT} \text{ для прямого включения}$$

Дифференциальное сопротивление базы соответствует соотношению

$$r_d = \frac{dU}{dI}$$

Литература:

- 1 Гуртов В.А. Твердотельная электроника. – М.: Техносфера. – 2005. – 408 с.
- 2 Шалимова К. В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат. – 1985. – 392 с.