

Лекция 1. Введение

«Применение материалов и компонентов для
создания устройств»

Содержание курса

1) Введение. Запрещенная зона кристалла.

Полупроводники примесные и собственные. Диэлектрики.
Гетероструктуры. Внешний и внутренний фотоэффект. Оптическое поглощение и люминесценция.

2) Детекторы на основе полупроводниковых материалов и структур. Фотоумножители (ФЭУ). Pin-фотодиоды. Лавинные фотодиоды. Микропиксельные фотодиоды. Гибридные ФЭУ. Матричные фотоприемники

Содержание курса

3) Полупроводниковые источники фотонов. Светоизлучающие диоды. Светодиоды белого света wLED. Лазерные диоды.

4) Применение полупроводниковых детекторов и источников. Фотоприёмники. Регистрация ионизирующих излучений.

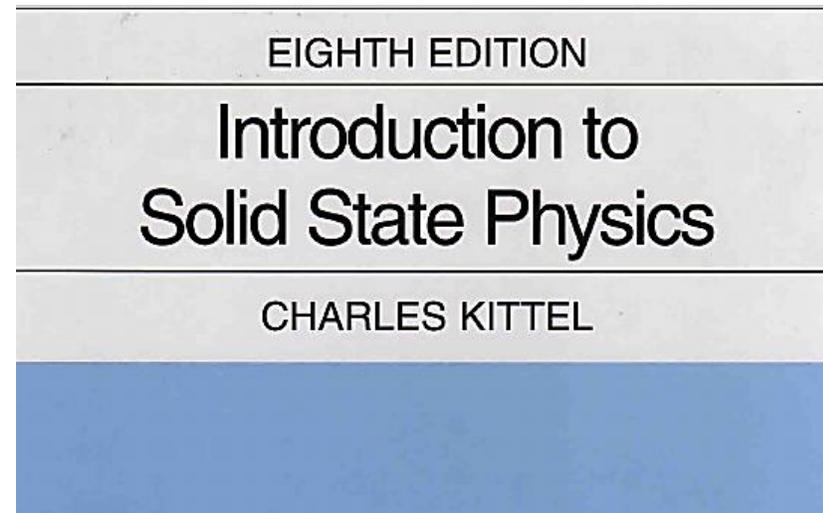
5) Наноразмерные излучающие системы. Конфайнмент. Квантовые точки. Практические применения.

Что нужно для зачета

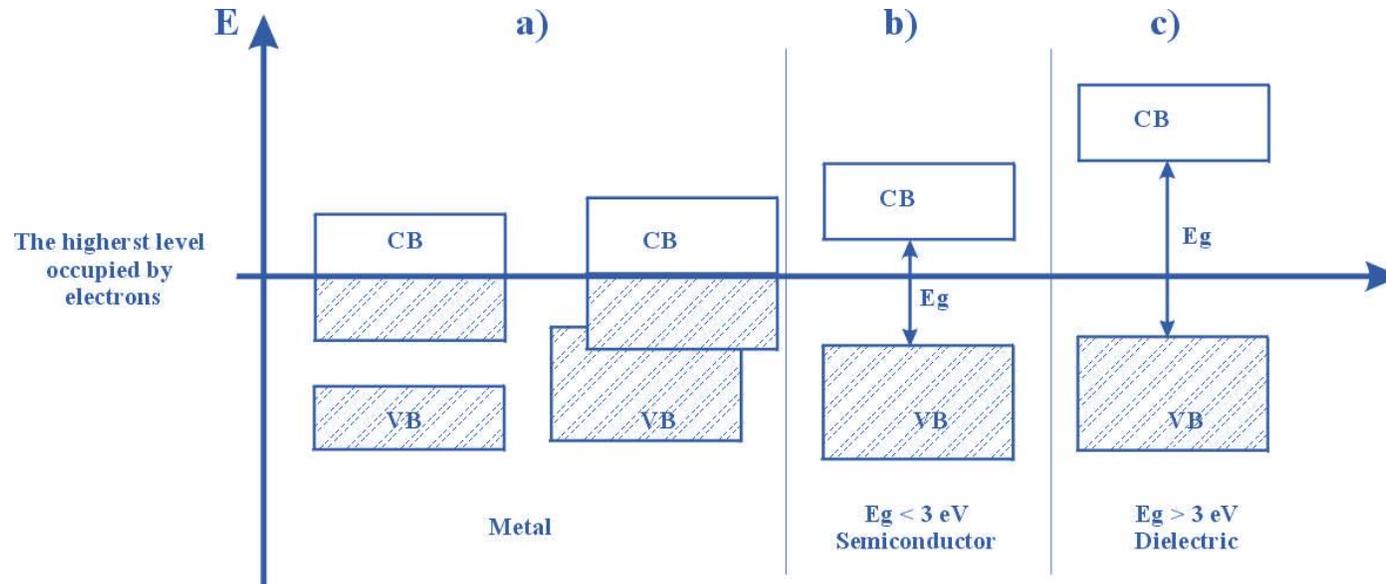
- Зачет от 55 баллов.
- На первом занятии у каждого 50 баллов
- Две контрольные от +1 до +10 баллов
- Неявка на контрольную -15 баллов
- Неявка на занятие -5 баллов

Литература

- Ч. Киттель Введение в физику твердого тела
- Б. Салех, М. Тейх Оптика и фотоника. Принципы и применения. Часть 2. Москва, Интеллект, 2012



Введение. Запрещенная зона



Запрещенная зона (bandgap) в твердых телах – это диапазон энергий, которые ни один электрон в твердом теле не может иметь.

Валентная зона (Valence Band) — энергетическая область разрешённых электронных состояний в твёрдом теле, заполненная валентными электронами.

Зона проводимости (Conductivity Band) — в зонной теории твёрдого тела первая из незаполненных электронами зон (диапазонов энергии, где могут находиться электроны) в полупроводниках и диэлектриках. Электроны из валентной зоны, преодолев запрещённую зону, при ненулевой температуре попадают в зону проводимости и начинают участвовать в проводимости, то есть перемещаться под действием электрического поля.

Введение. Модель почти свободных электронов

- В модели свободных электронов волновая функция электрона имеет следующий вид (плоская волна):

$$\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\Omega_r}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$$

значение их энергий имеет следующее распределение (электронный газ):

$$E_{\mathbf{k}} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

Пусть электроны находятся в некотором периодическом поле V , в котором периодический потенциал кристаллической решётки считается малым возмущением относительно свободного движения валентных электронов.

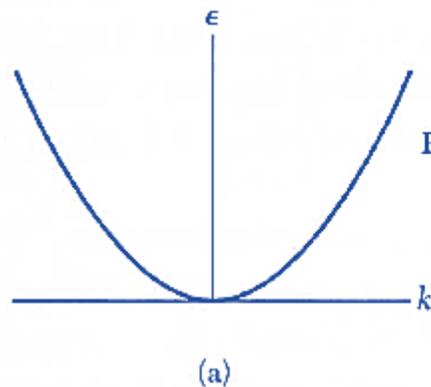
$$E = \langle H \rangle = \int_{\Omega_r} \psi_{\mathbf{k}}^*(\mathbf{r}) [T + V] \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$$

Введение. Модель почти свободных электронов

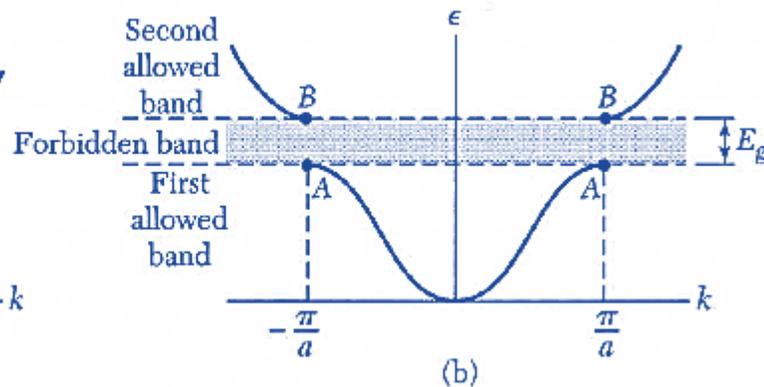
$$E_k = \frac{1}{\Omega_r} \int_{\Omega_r} e^{-ik \cdot r} \left[\frac{\hbar^2 k^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \right] e^{ik \cdot r} d\mathbf{r} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + |V|$$

Закон дисперсии на границе. В промежутке энергий между $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} - V$ и $E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + V$ электронных уровней нет, чем определяется существование узкой запрещенной зоны.

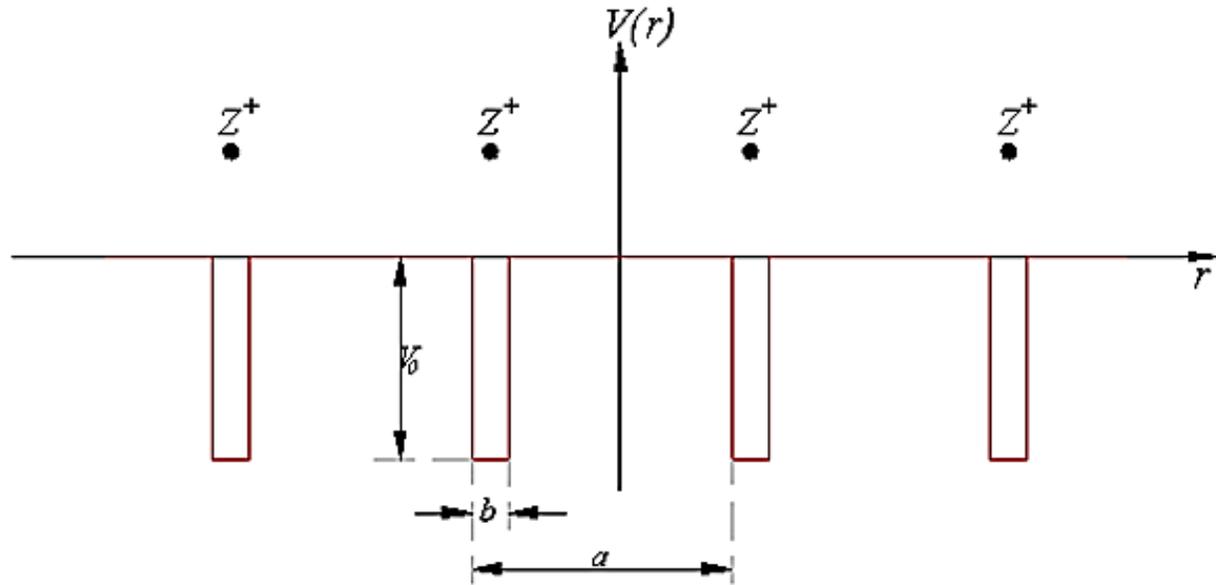
Свободный электрон



Почти свободный электрон



Введение. Модель Кроннига-Пенни

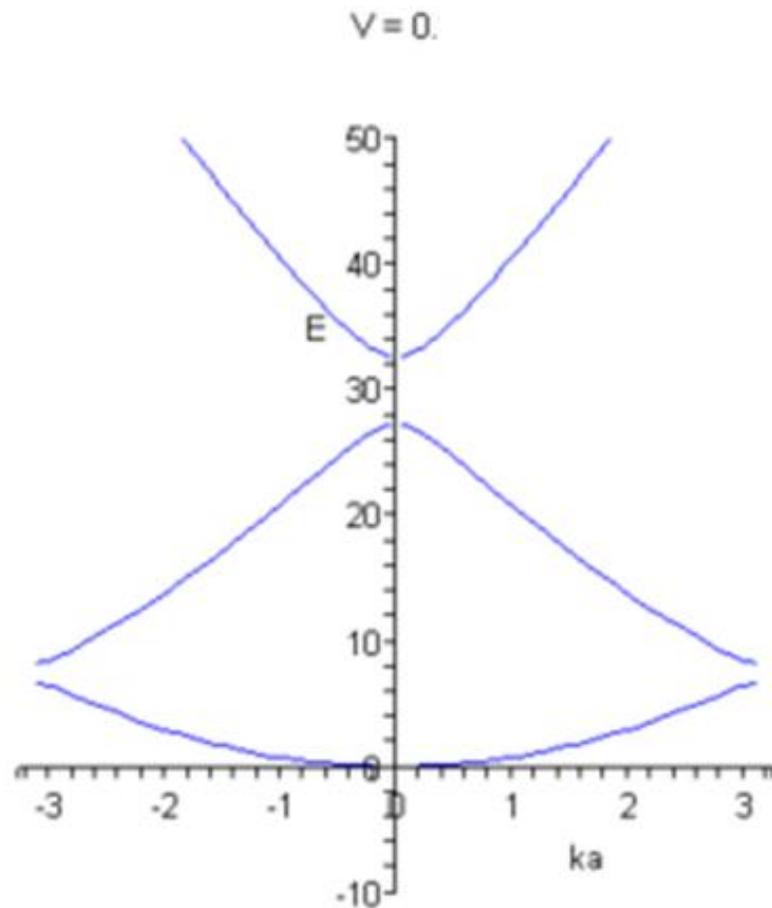


$$\cos(ka) = \cos(\alpha a) - P \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha a} \quad (P = \frac{\beta^2 ab}{2}), \text{ где}$$

$$\alpha^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

Это уравнение показывает соотношение между энергией (через α) и волнового вектора k , и, видно, что с левой стороны уравнения решения есть только в диапазоне от -1 до 1, то есть некоторые ограничения на возможные значения энергии, то есть существует зоны запрещенных энергий.

Введение. Модель Кроннига-Пенни



$$\cos(ka) = \cos(\alpha a) - P \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha a} \quad (P = \frac{\beta^2 ab}{2}), \text{ где}$$

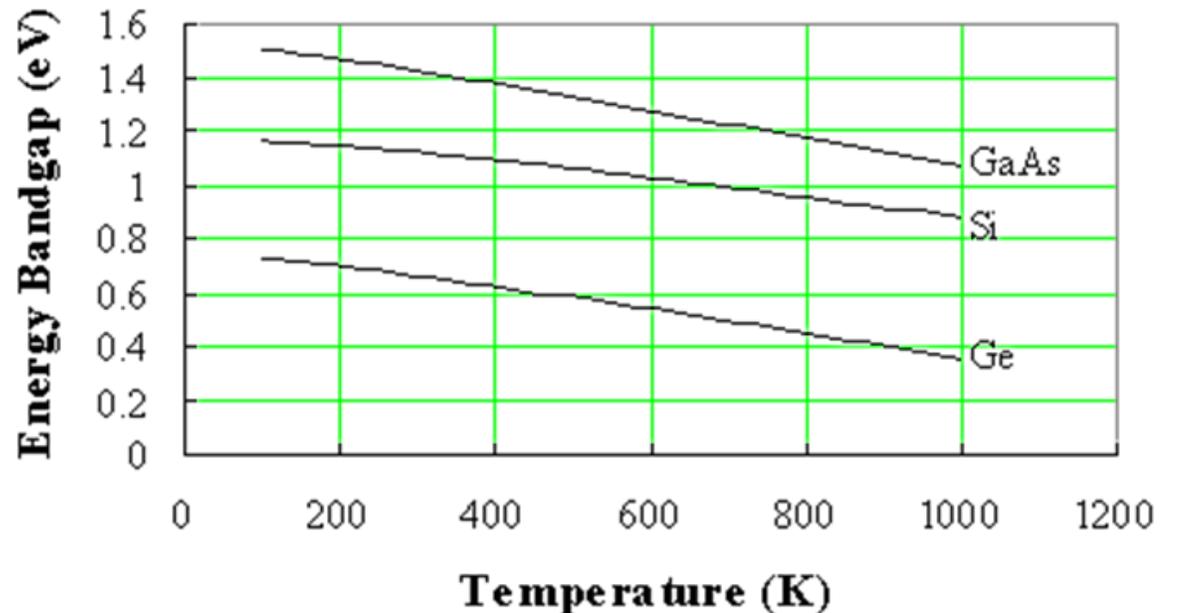
$$\alpha^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

Это уравнение показывает соотношение между энергией (через α) и волнового вектора k , и, видно, что с левой стороны уравнения решения есть только в диапазоне от -1 до 1, то есть некоторые ограничения на возможные значения энергии, то есть существует зоны запрещенных энергий.

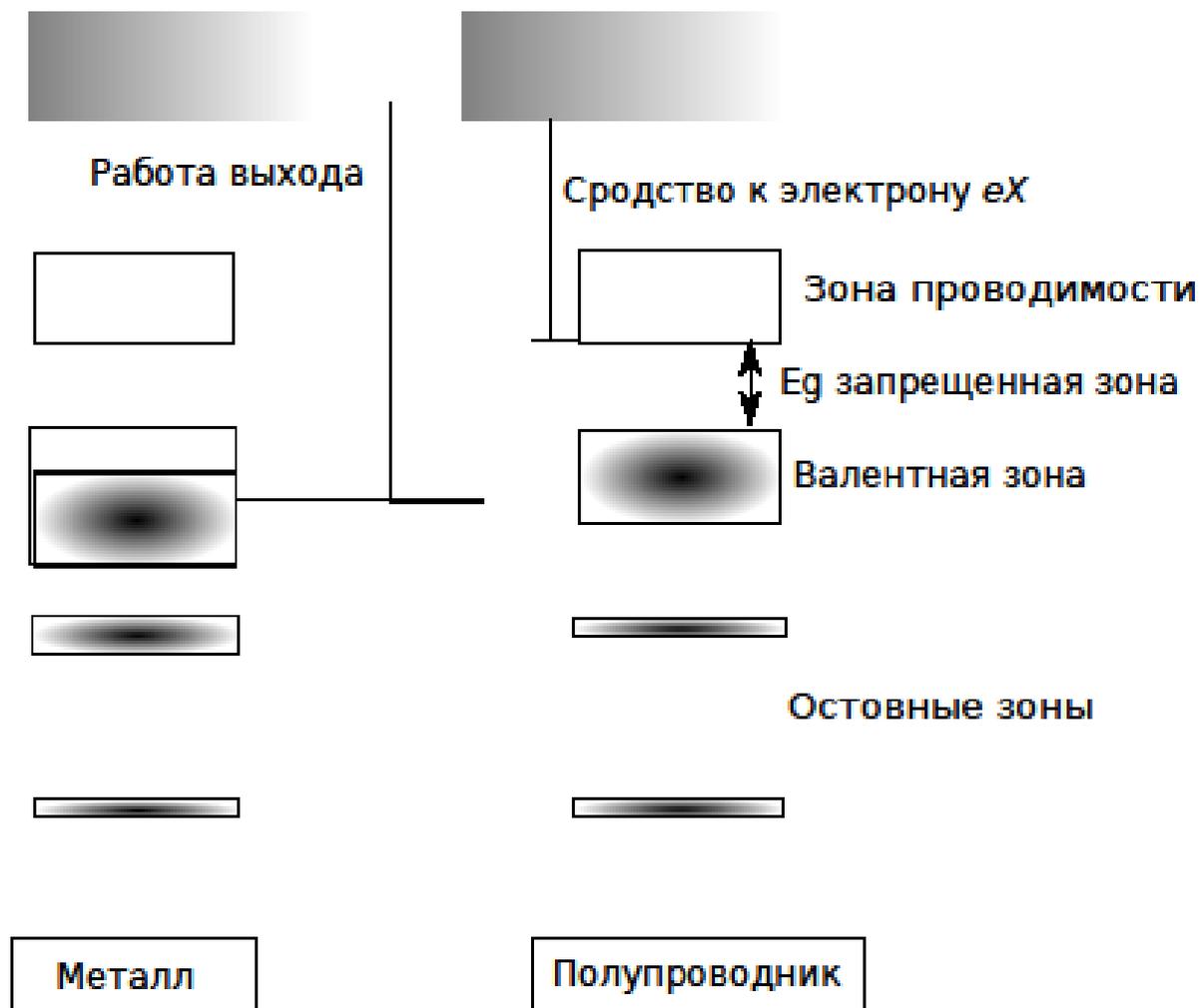
Температурная зависимость ширины запрещенной зоны

Энергия запрещенной зоны полупроводников уменьшается с повышением температуры. Это связано с тем, что межатомное расстояние увеличивается, когда амплитуда колебаний атомов увеличивается за счет увеличения тепловой энергии.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

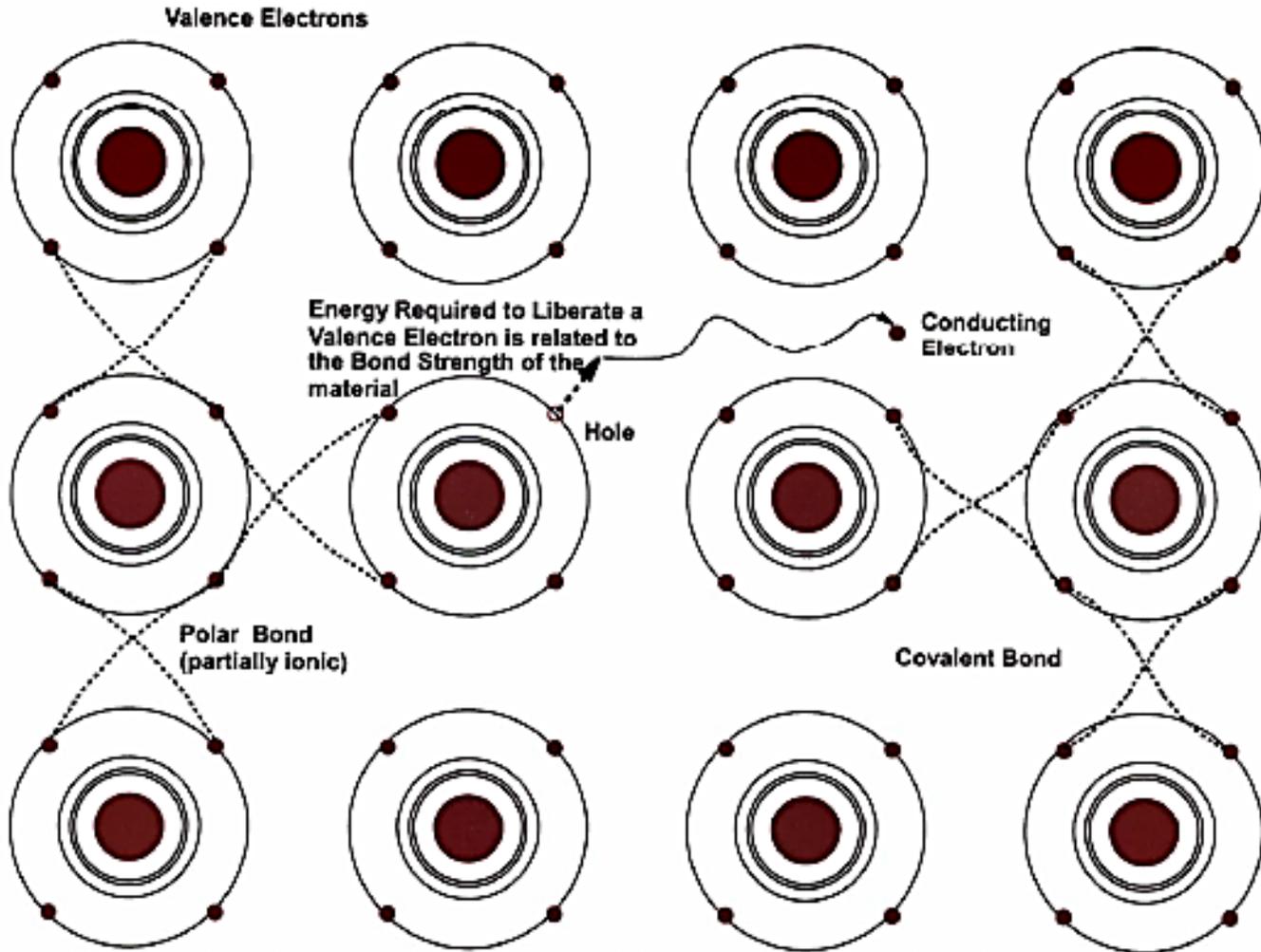


Отличие полупроводников от металлов



В полупроводнике существует полностью заполненная зона – валентная зона, поэтому подвижность электронов ограничена, в металле зона заполнена не полностью

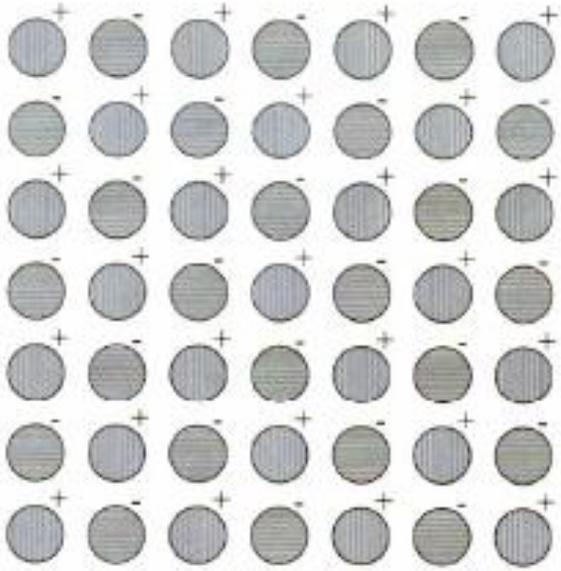
Отличие полупроводников от металлов



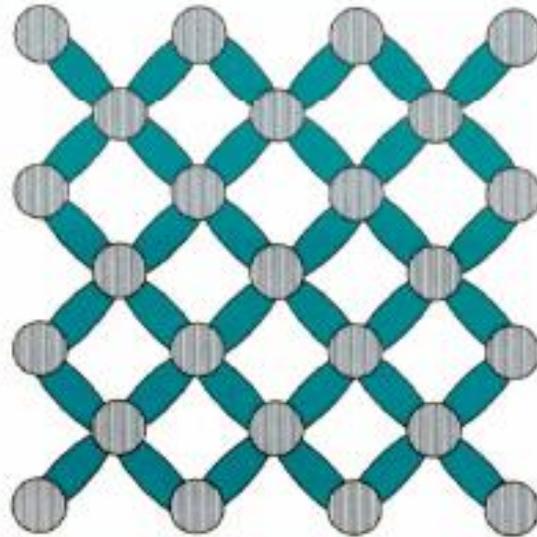
В металлах преобладает металлическая связь, то есть валентные электроны слабо связаны и могут свободно перемещаться по веществу

В полупроводниках и диэлектриках, где в основном имеется ковалентный и ионный тип связи, электроны достаточно хорошо связаны

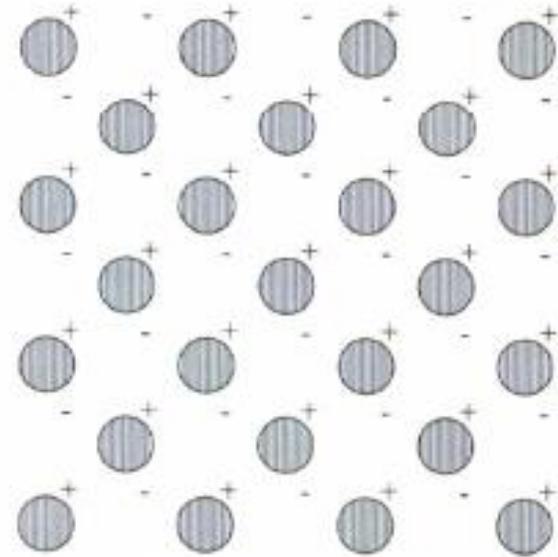
Типы химических связей



Ionic Bonding: One atom acquires and holds the electron(s) of an adjacent atom. Bonding is coulombic and strong.



Covalent Bonding: Atoms share electrons with the surrounding atoms. Bonding is moderately weak.



Metallic Bonding: Atoms give up electrons to the surrounding regions, forming an "electron cloud". Bonding is coulombic but weak due to screening of charge.

Классификация полупроводников

простые полупроводниковые материалы — собственно химические элементы: бор B, углерод C, германий **Ge**, кремний **Si**, селен Se, сера S, сурьма Sb, теллур Te и йод I

сложные полупроводниковые материалы входят химические соединения из двух, трёх и более химических элементов

AIIIBV: InSb, InAs, InP, GaSb, GaP, AlSb, GaN, InN

AIIIV: CdSb, ZnSb

AIIIVI: ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdTe, HgSe, HgTe, HgS

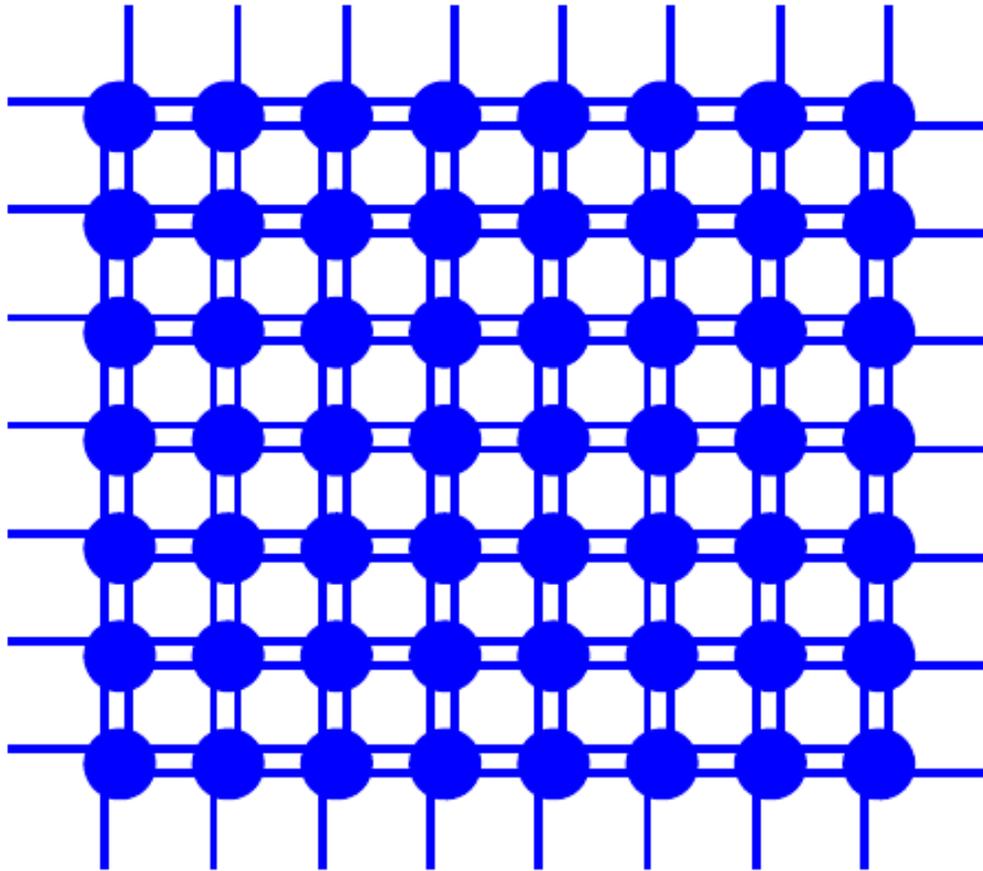
AIVBVI: PbS, PbSe, PbTe, SnTe, SnS, SnSe, GeS, GeSe

	5 B	+3	6 C	+2 +4 -4	7 N	+1 +2 +3 +4 +5 -1	8 O	-2	9 F	-1	10 Ne	0		
	10.811		12.0107		14.00674		15.9994		18.9984032		20.1797		K-L	
	2-3		2-4		2-5		2-6		2-7		2-8			
	12 IIB IIB	+3	14 Si	+2 +4 -4	15 P	+3 +5 -3	16 S	+4 +6 -2	17 Cl	+1 +5 +7 -1	18 Ar	0		
	26.981538		28.0855		30.973761		32.066		35.4527		39.948		K-L-M	
	2-8-3		2-8-4		2-8-5		2-8-6		2-8-7		2-8-8			
+1 +2	30 Zn	+2	31 Ga	+3	32 Ge	+2 +4	33 As	+3 +5 -3	34 Se	+4 +6 -2	35 Br	+1 +5 -1	36 Kr	0
	65.39		69.723		72.61		74.92160		78.96		79.904		83.80	
	-8-18-2		-8-18-3		-8-18-4		-8-18-5		-8-18-6		-8-18-7		-8-18-8	
													-L-M-N	
+1	48 Cd	+2	49 In	+3	50 Sn	+2 +4	51 Sb	+3 +5 -3	52 Te	+4 +6 -2	53 I	+1 +5 +7 -1	54 Xe	0
	107.8682		112.411		114.818		118.710		121.760		126.90447		131.29	
	-18-8-1		-18-8-2		-18-10-2		-18-12-1		-18-13-1		-18-13-2		-18-15-1	
													-M-N-O	
	79 Au	+1 +3	80 Hg	+1 +2	81 Tl	+1 +3	82 Pb	+2 +4	83 Bi	+3 +5	84 Po	+2 +4	85 At	86 Rn
	196.96655		200.59		204.3833		207.2		208.98038		(209)		(210)	
	-8-1		-32-18-2		-32-18-3		-32-18-4		-32-18-5		-32-18-6		-32-18-7	
													(222)	
													-32-18-8	
														-N-O-P
														-O-P-Q
+3	67 Ho	+3	68 Er	+3	69 Tm	+3	70 Yb	+2 +3	71 Lu	+3				
	164.93032		167.26		168.93421		173.04		174.967					
	-2		-29-8-2		-30-8-2		-31-8-2		-32-9-2					-N-O-P
+3	99 Es	+3	100 Fm	+3	101 Md	+2 +3	102 No	+2 +3	103 Lr	+3				
	(252)		(257)		(258)		(259)		(262)					
	-2		-29-8-2		-30-8-2		-31-8-2		-32-9-2					-O-P-Q

... by Chemical Abstracts Service (CAS) are also shown. For radioactive

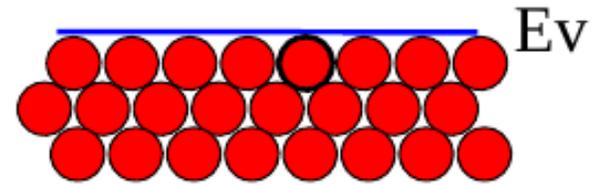
Классификация полупроводников

For $(E_{\text{thermal}}=kT)=0$



No electrons in
conduction band means
no electron conduction
is possible

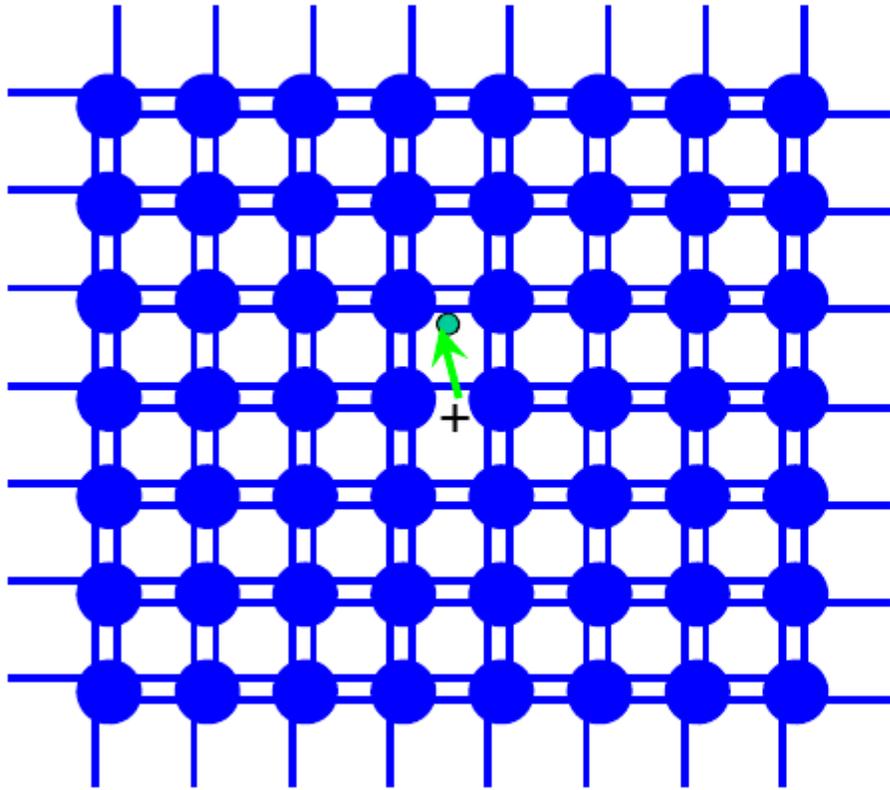
————— E_c



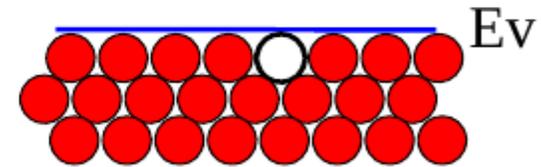
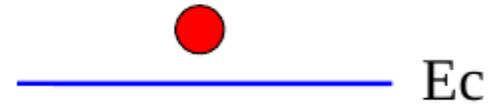
No "Holes" valence
band means no "hole"
conduction is possible

Классификация полупроводников

For $(E_{\text{thermal}}=kT) > 0$



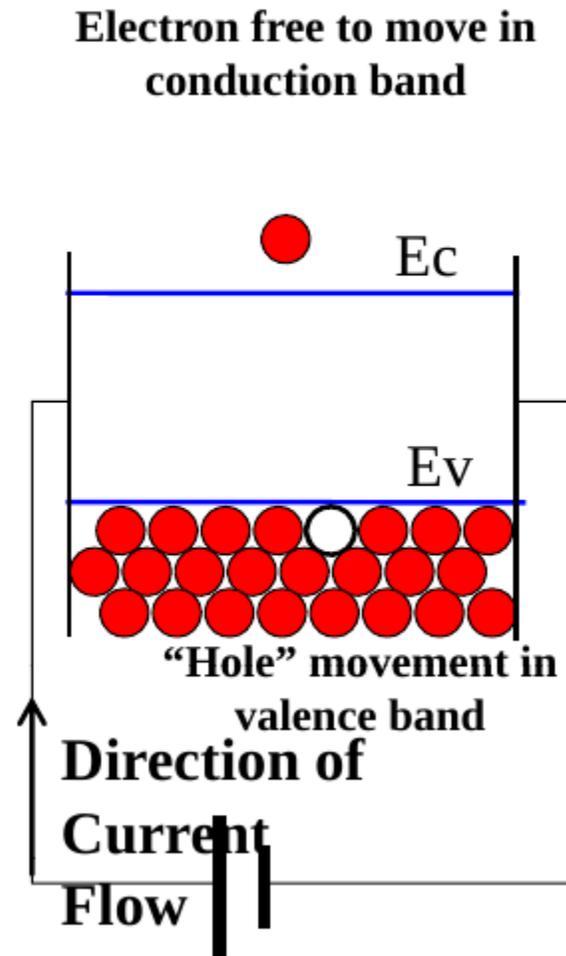
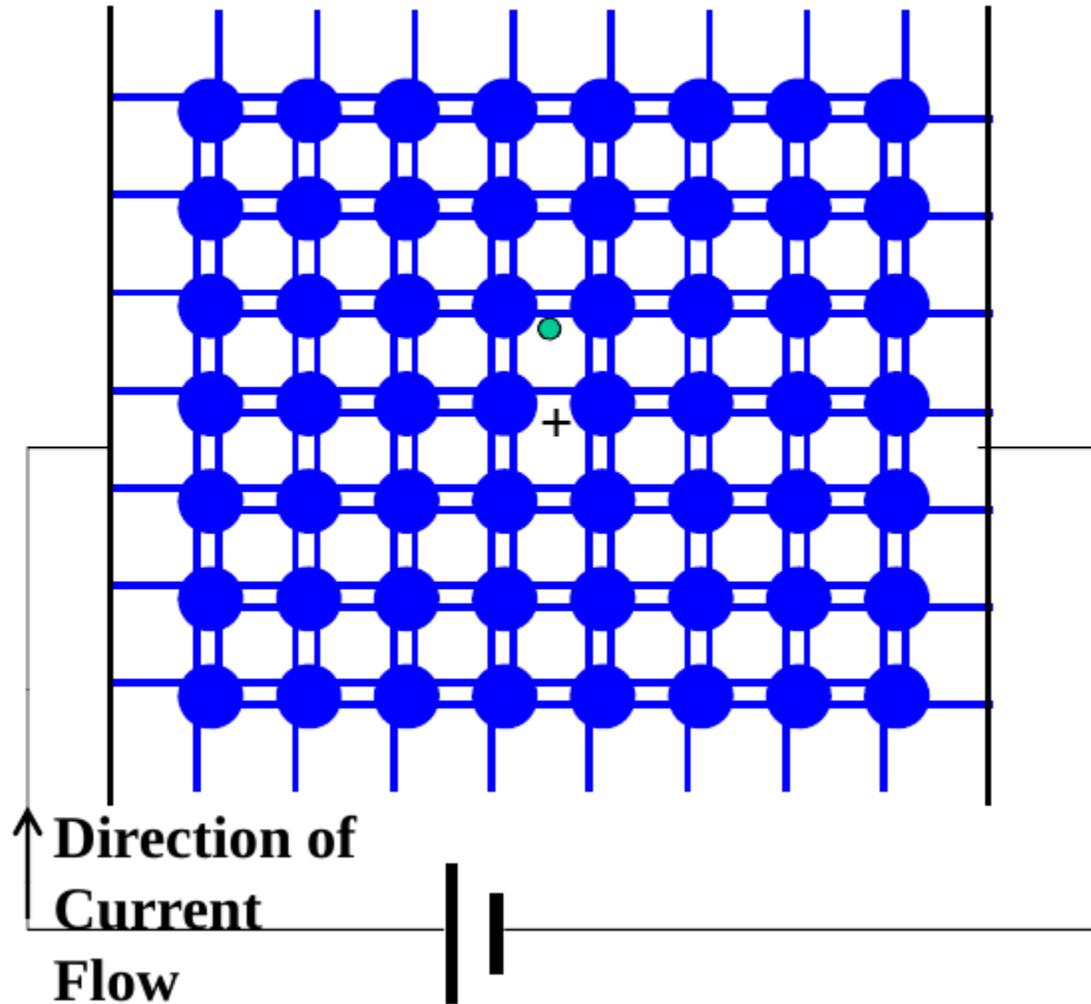
Electron free to move
in conduction band



“Hole” free to move in
valence band

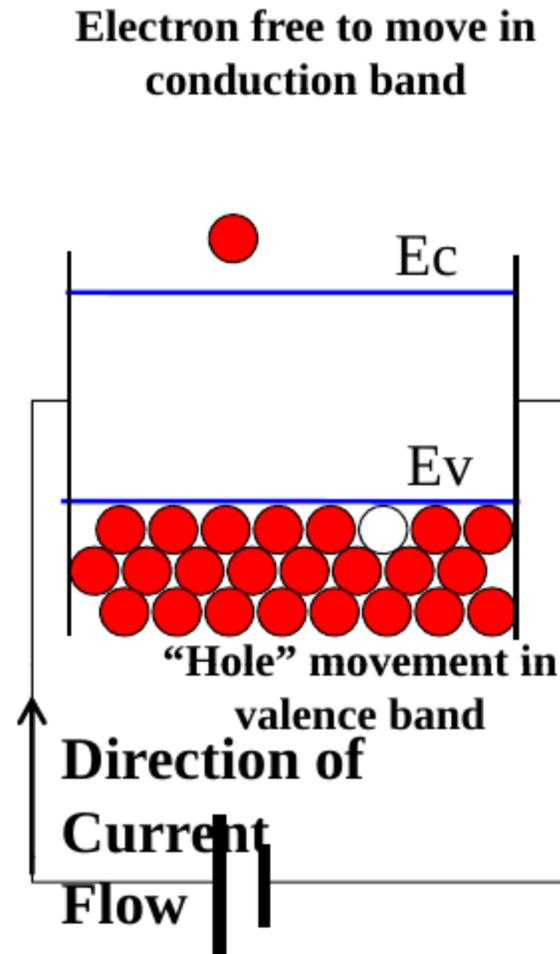
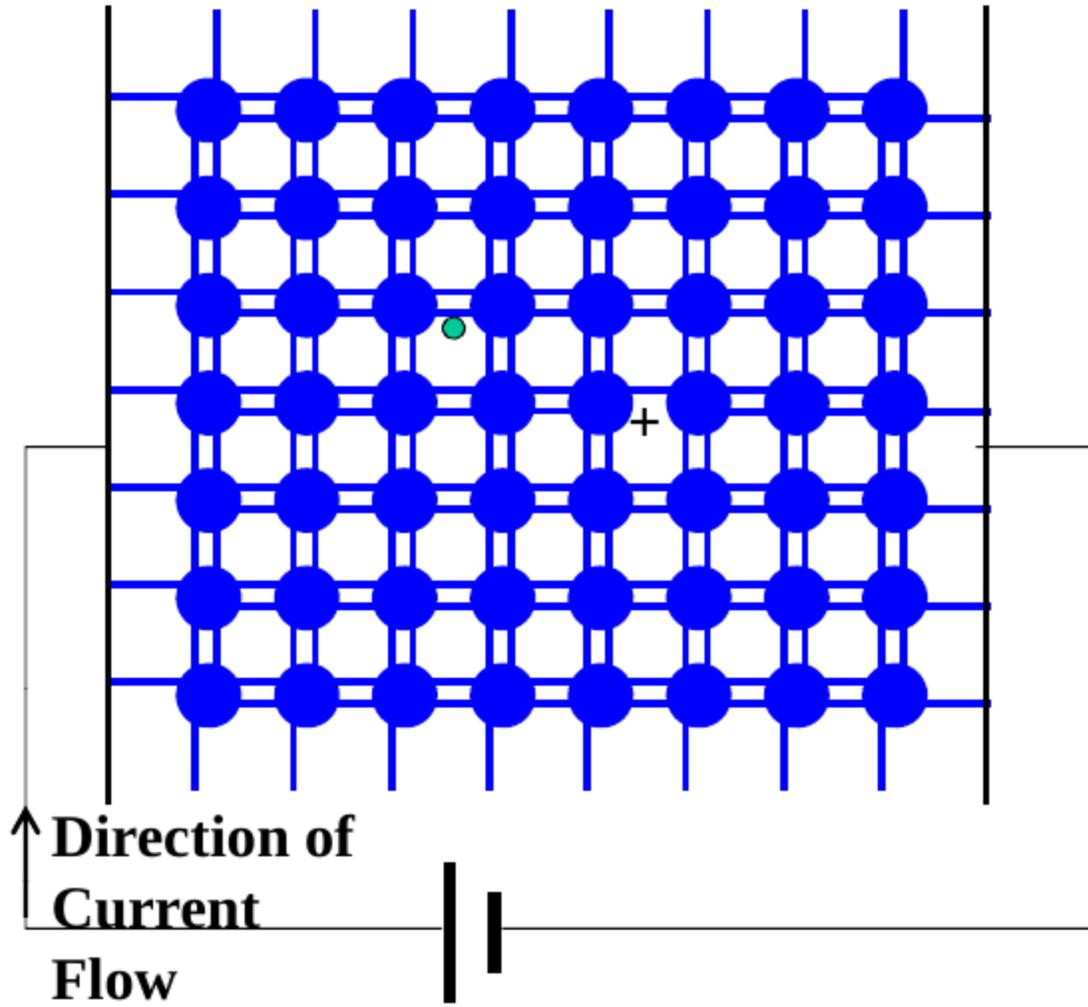
Классификация полупроводников

For $(E_{\text{thermal}} = kT) > 0$



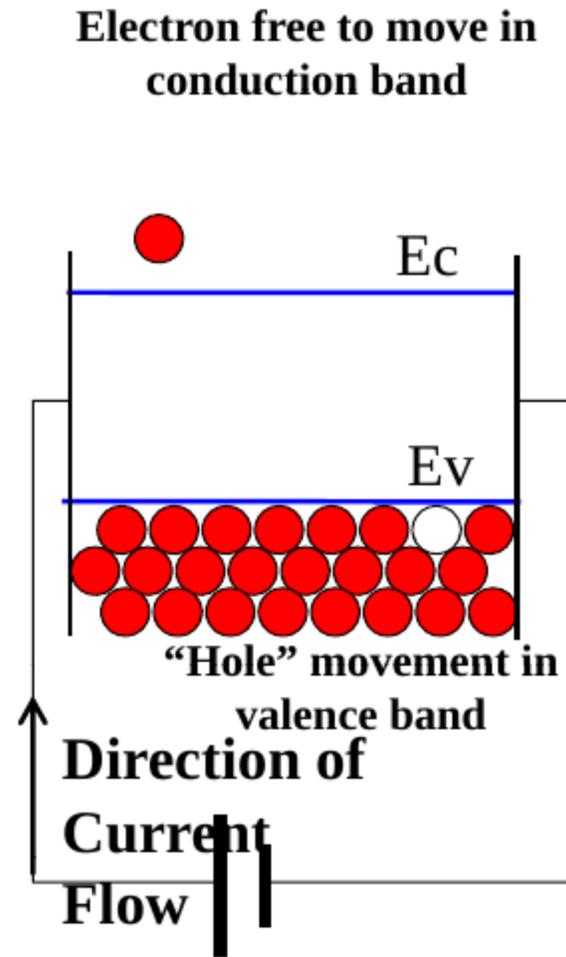
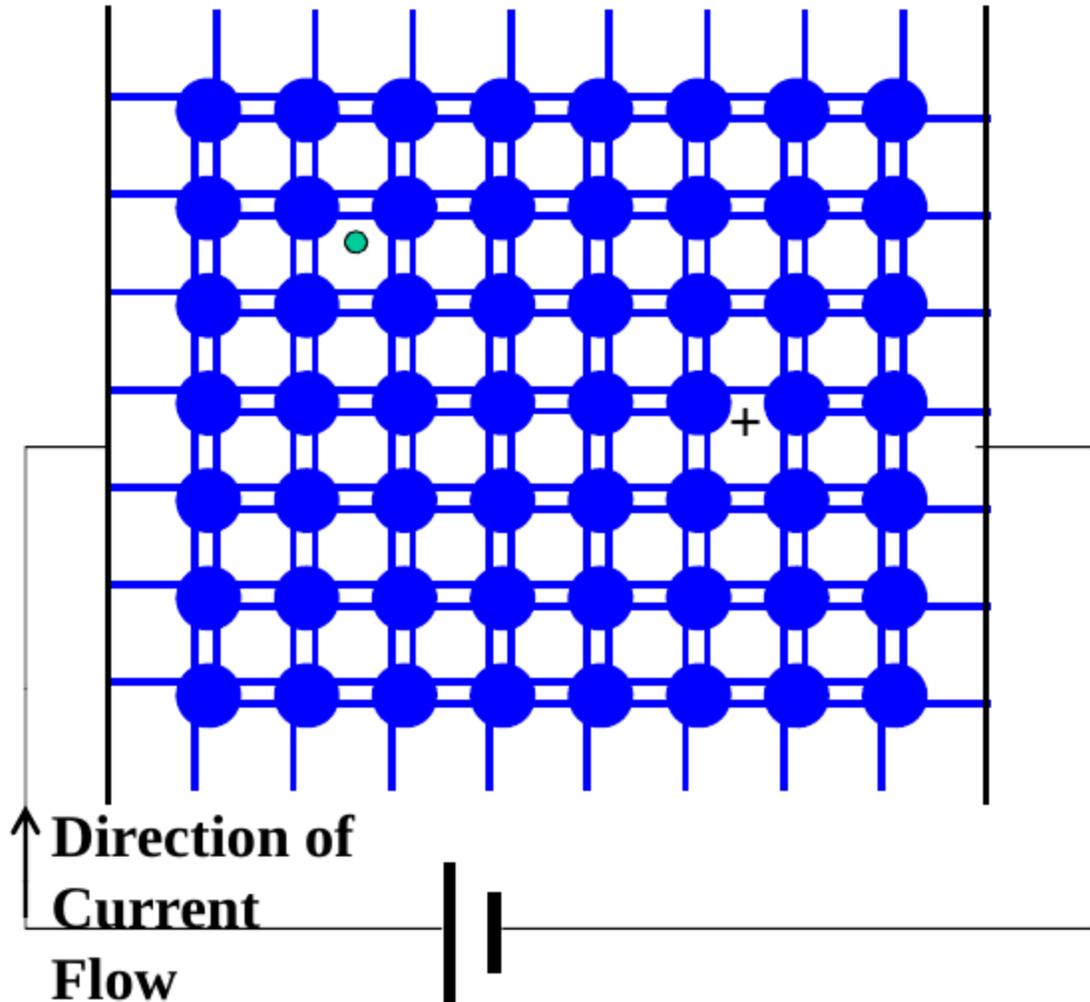
Классификация полупроводников

For $(E_{\text{thermal}}=kT) > 0$

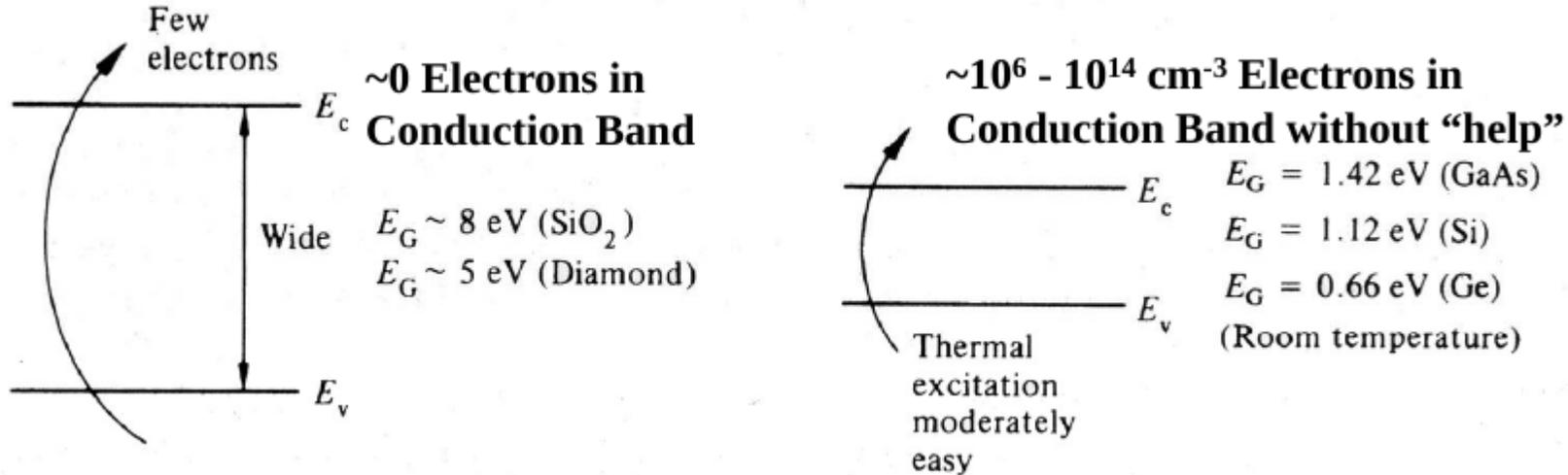


Классификация полупроводников

For $(E_{\text{thermal}}=kT)>0$



Классификация полупроводников

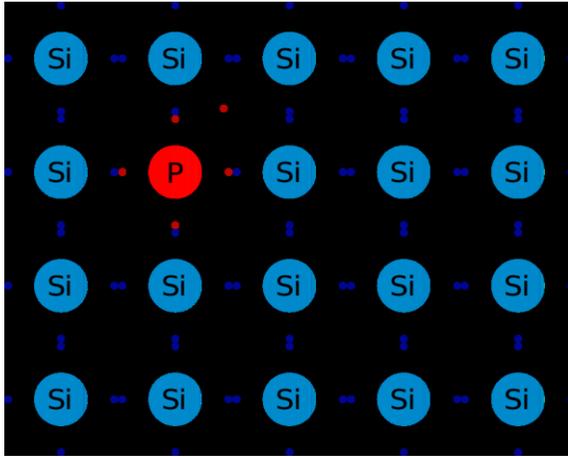


$4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ валентных электронов

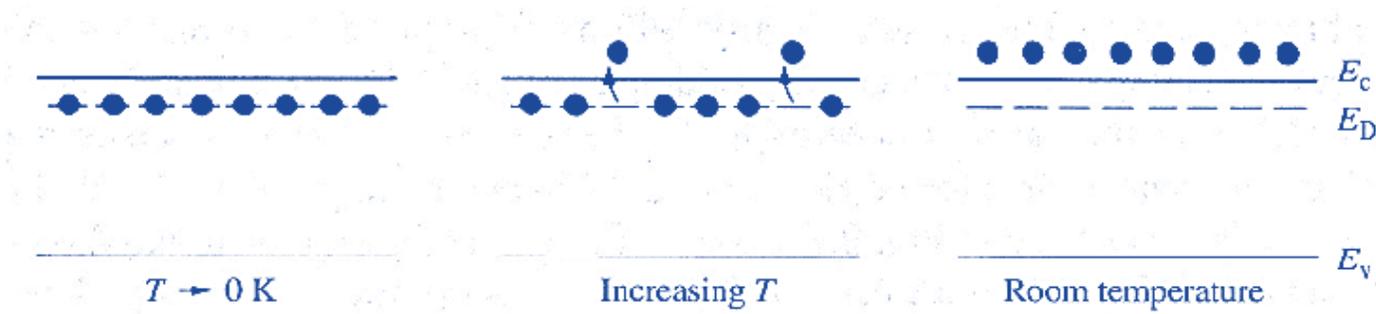
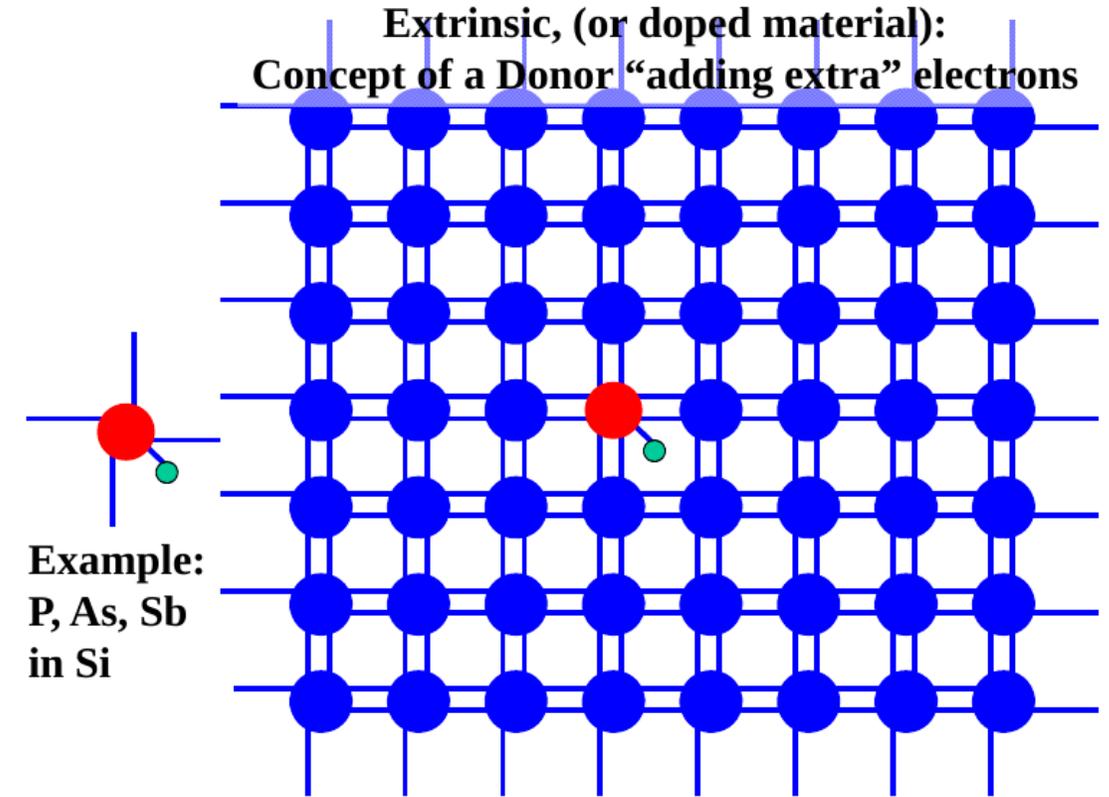
Концентрация собственных носителей заряда в полупроводниках при RT:

- $n_i \sim 2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ for GaAs with $E_g = 1.42 \text{ eV}$,
- $n_i \sim 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ for Si with $E_g = 1.1 \text{ eV}$,
- $n_i \sim 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ for Ge with $E_g = 0.66 \text{ eV}$,
- $n_i \sim 1 \times 10^{-14} \text{ cm}^{-3}$ for GaN with $E_g = 3.4 \text{ eV}$

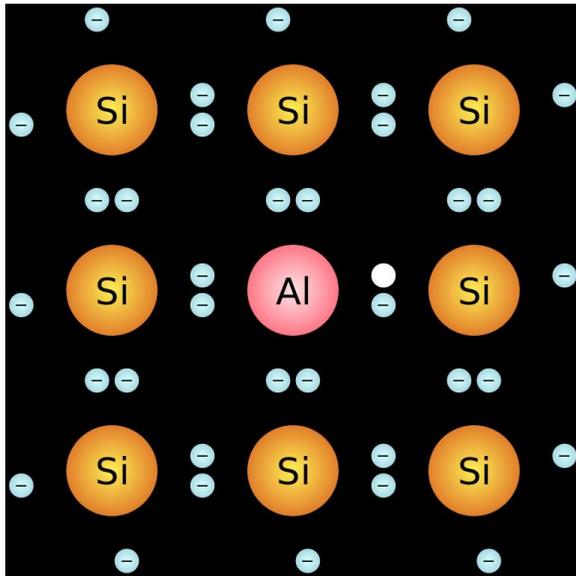
Примесные полупроводники. Донорные примеси



Концентрация доноров $1e13-1e19 \text{ cm}^{-3}$



Примесные полупроводники. Донорные примеси



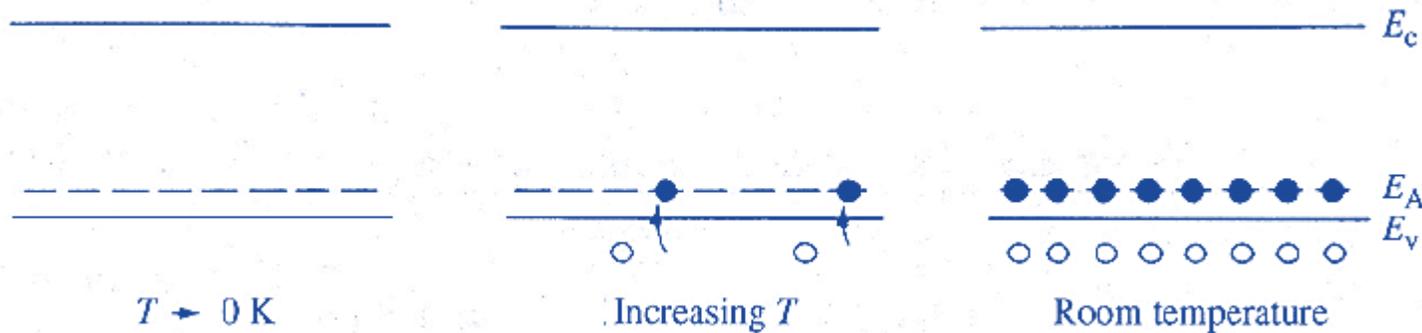
**Extrinsic, (or doped material):
Concept of an acceptor "adding extra" holes**

Example: B, Al, In in Si

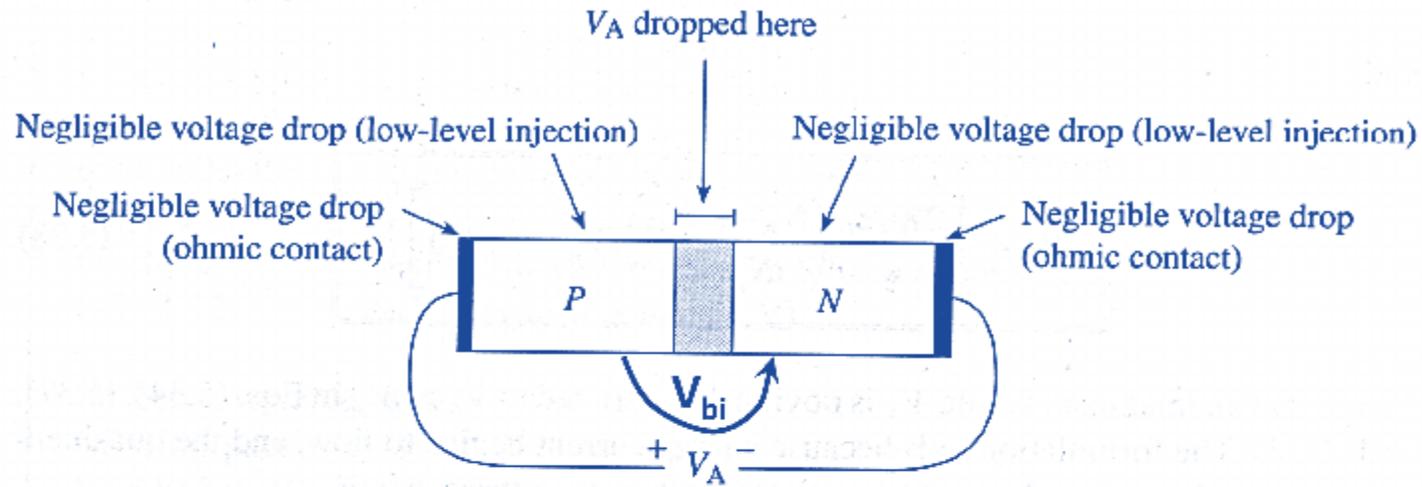
All regions of material are neutrally charged.

One less bond means the acceptor is electrically satisfied

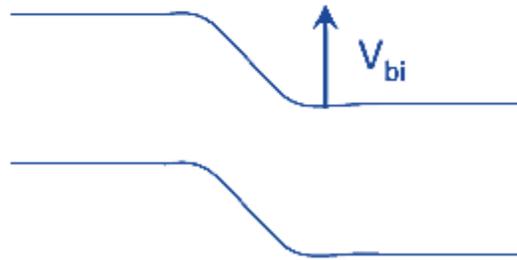
One less bond means the neighboring silicon is left with an empty state.



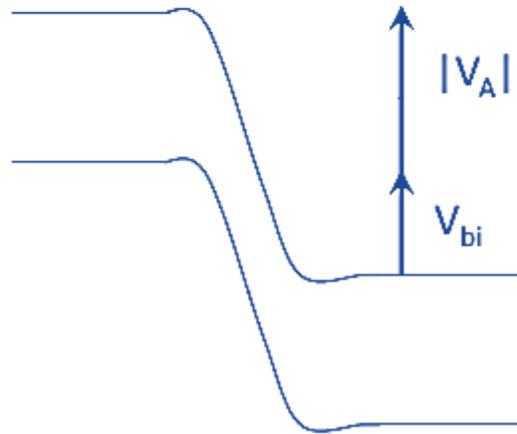
P-n переход



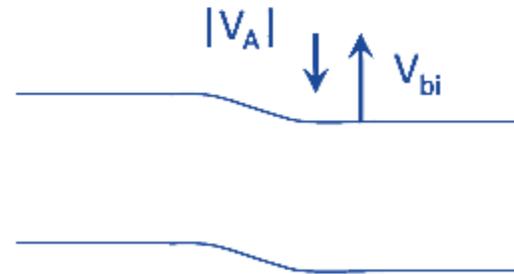
$V_A=0$: No Bias



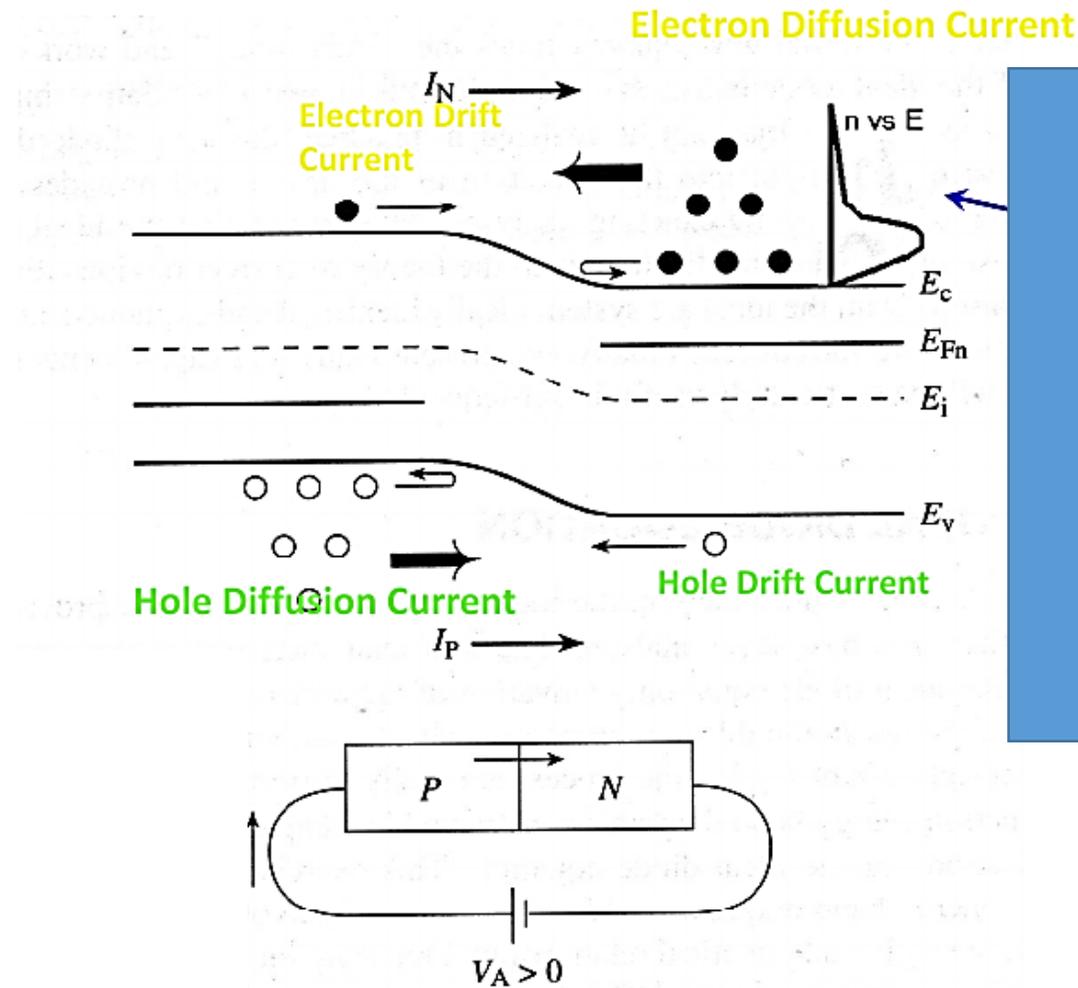
$V_A < 0$: Reverse Bias



$V_A > 0$: Forward Bias

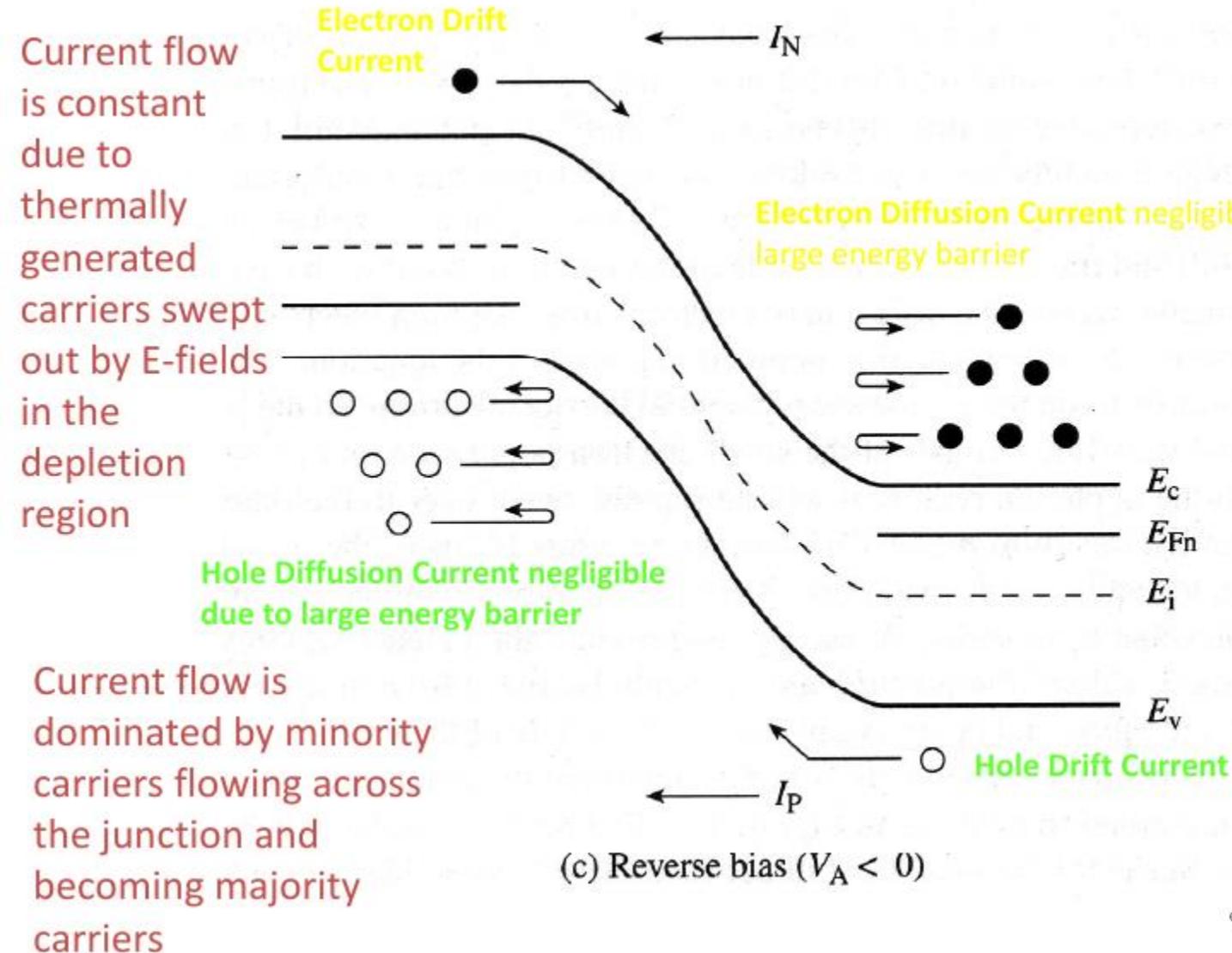


P-n переход



Если к слоям полупроводника приложить внешнее напряжение так, чтобы созданное им электрическое поле было направленным противоположно направлению электрического поля между областями пространственного заряда, то динамическое равновесие нарушается, и диффузионный ток преобладает над дрейфовым током, быстро нарастая с повышением напряжения. Такое подключение напряжения к p-n-переходу называется прямым смещением.

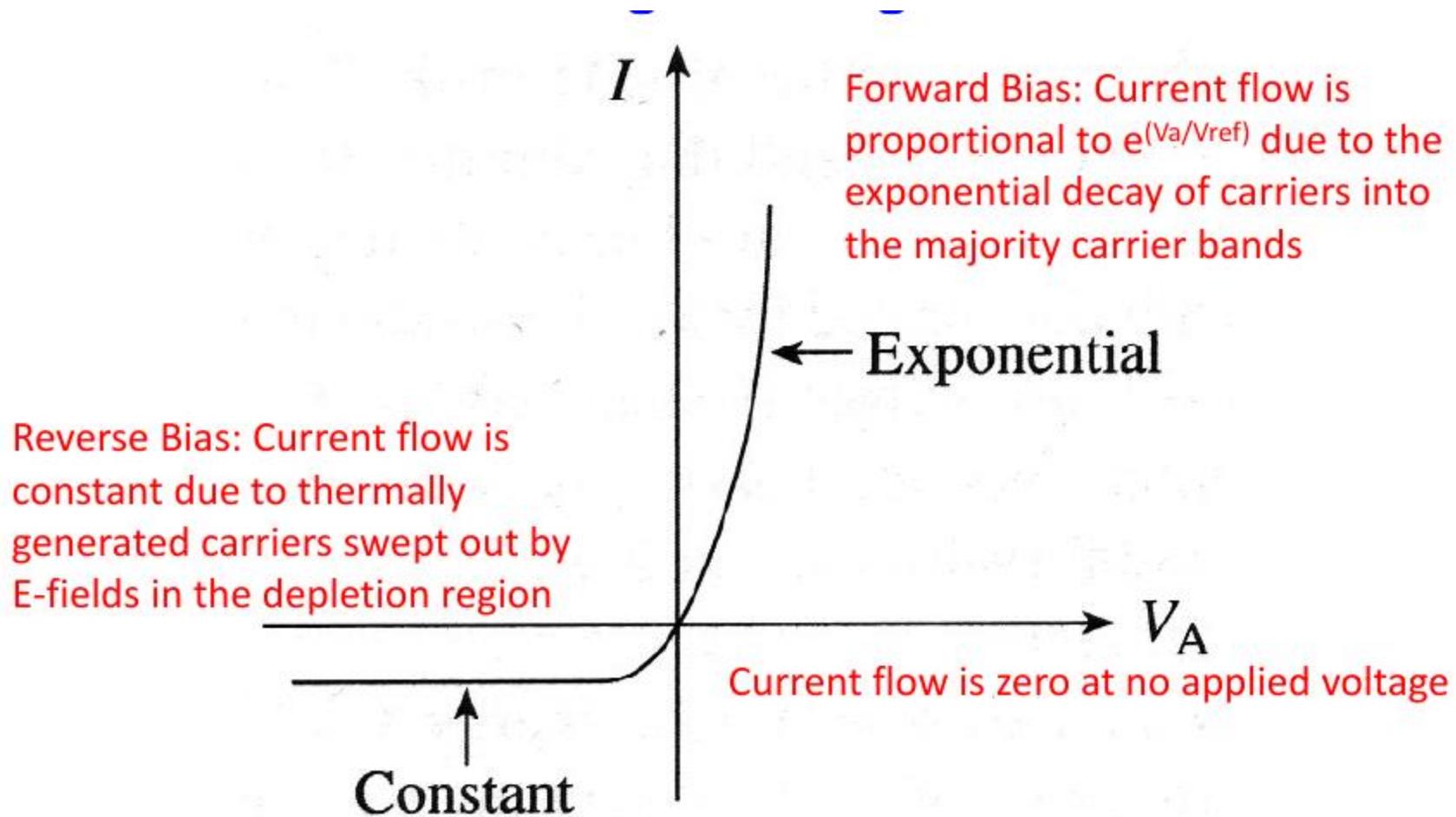
P-n переход



Если же внешнее напряжение приложено так, чтобы созданное им поле было одного направления с полем между областями пространства то это приведет лишь к увеличению толщины слоёв пространственного заряда, и ток через p-n-переход очень мал и определяется тепловой или фотонной генерацией пар электрон-дырка. Такое подключение напряжения к p-n-переходу называется обратным смещением.

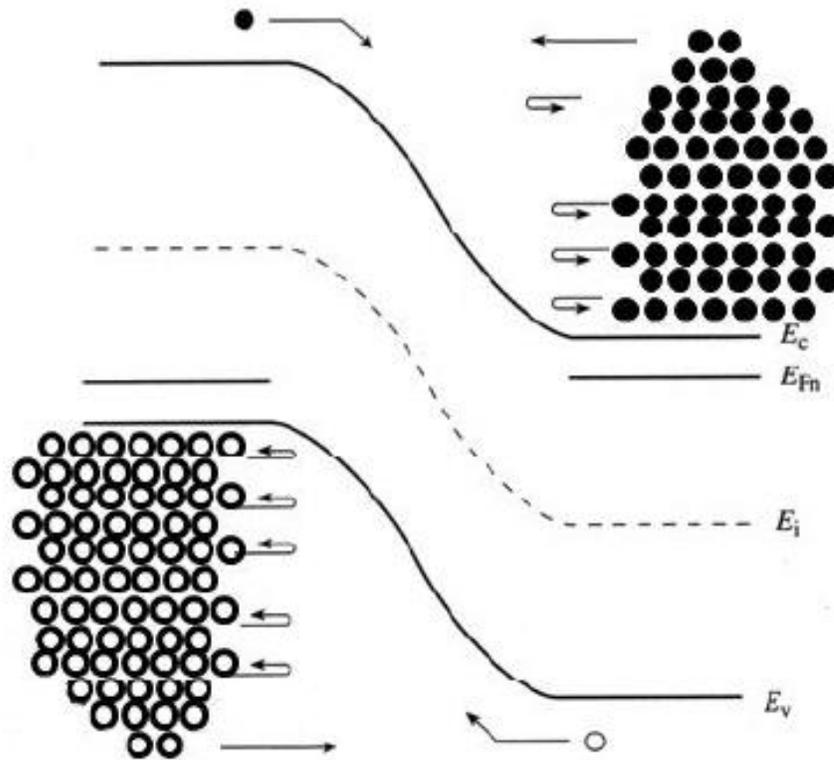


P-n переход



$$I = I_0(e^{V_A/V_{ref}} - 1)$$

ФОТОДИОД

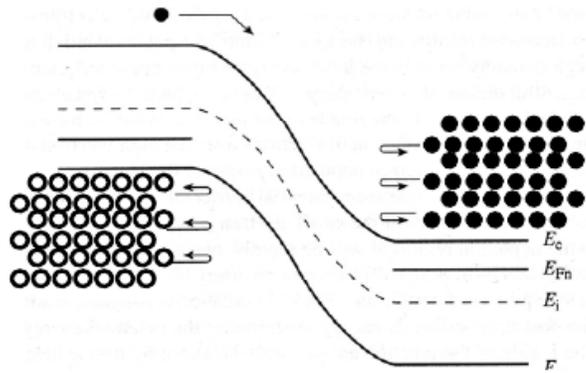


Zero Bias (Equilibrium) Diode with no light illumination has equal amounts of Drift and Diffusion current resulting in no net current flow.

Равновесное состояние

В равновесном состоянии, когда поток излучения полностью отсутствует, концентрация носителей, распределение потенциала и энергетическая зонная диаграмма фотодиода полностью соответствуют обычной p-n-структуре.

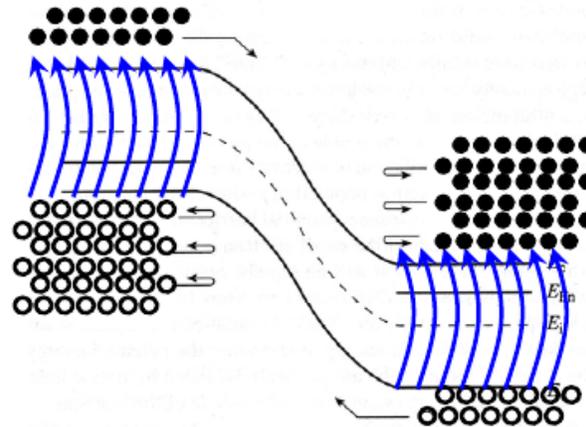
ФОТОДИОД



•Photodiodes are Reversed Biased Diodes. Case shown with no light illumination.

•Diffusion current is practically zero due to enormous energy barriers preventing diffusion.

•Drift current is small but finite due to minority carriers accelerated by the large electric fields.



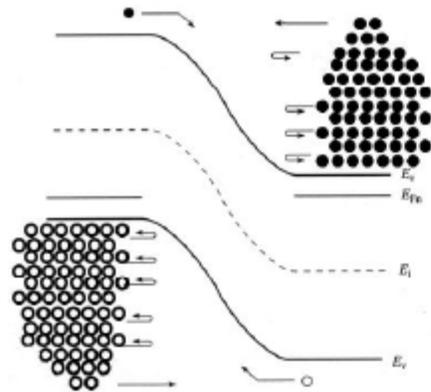
•Case Shown: Reversed Bias Diode(photodiode) WITH light illumination

•Again, Diffusion current is practically zero due to enormous energy barriers preventing diffusion.

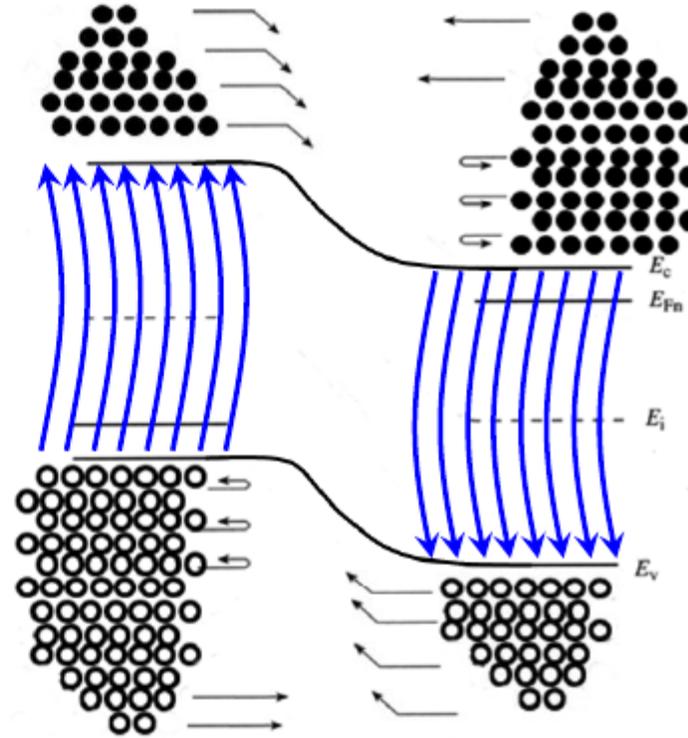
•Extra photogenerated ehp's that can reach the junction are collected as "extra" drift current

В фотодиодном режиме используется источник питания, который смещает фотодиод в обратном направлении. В этом случае через фотодиод течет обратный ток, пропорциональный падающему на него световому потоку. В рабочем диапазоне напряжений (то есть до наступления пробоя), этот ток практически не зависит от приложенного обратного напряжения.

Солнечная батарея



•Zero Bias (Equilibrium) Diode with no light illumination has equal amounts of Drift and Diffusion current resulting in no net current flow.



- Solar Cell: Forward Biased (due to light)
- Diode results in “extra” drift current due to photogenerated ehp’s (just like a photodiode) that can reach the junction and be collected.
- This extra collected charge flattens the bands resulting forward bias and partial offsetting by diffusion current.

ФОТОДИОДЫ

$$I_{total} = I_{dark} + I_{Due\ to\ Light}$$

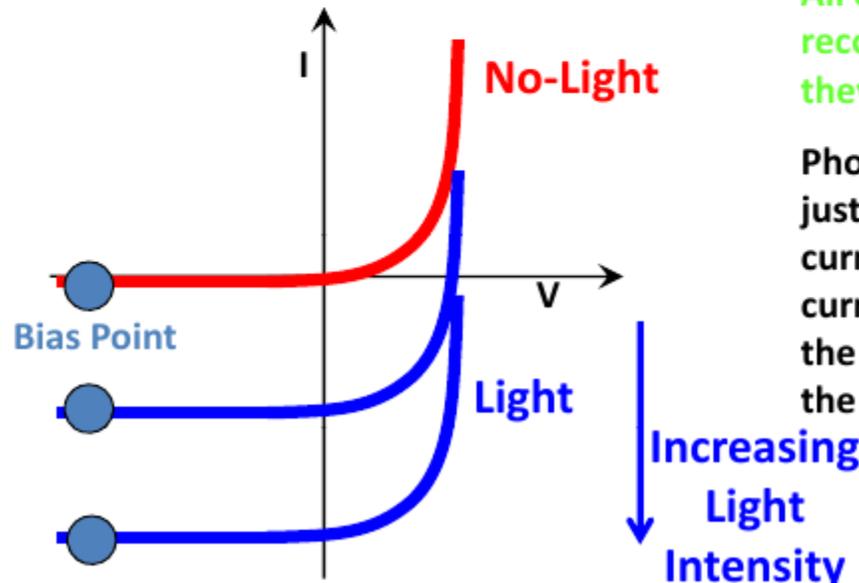
$$I_{total} = I_o \left(e^{\left(\frac{V_D}{V_T} \right)} - 1 \right) + I_{Due\ to\ Light}$$

$$I_{total} = \underbrace{\left(I_o e^{\left(\frac{V_D}{V_T} \right)} - I_o \right)}_{\text{No-Light}} + \underbrace{(-qA)(L_N + W + L_P)G_L}_{\text{Light}}$$

Every EHP created within the depletion region (W) and within a diffusion length away from the depletion region is collected (swept across the junction by the electric field) as photocurrent (current resulting from light). All other EHP's recombine before they can be collected.

Photodiode current, just like leakage current is Drift current and thus is in the same direction as the leakage current.

Explanation of these curves: The IV curve is found by sweeping all voltages and measuring the resulting currents. During operation, the device is held at one operating voltage call the bias point.



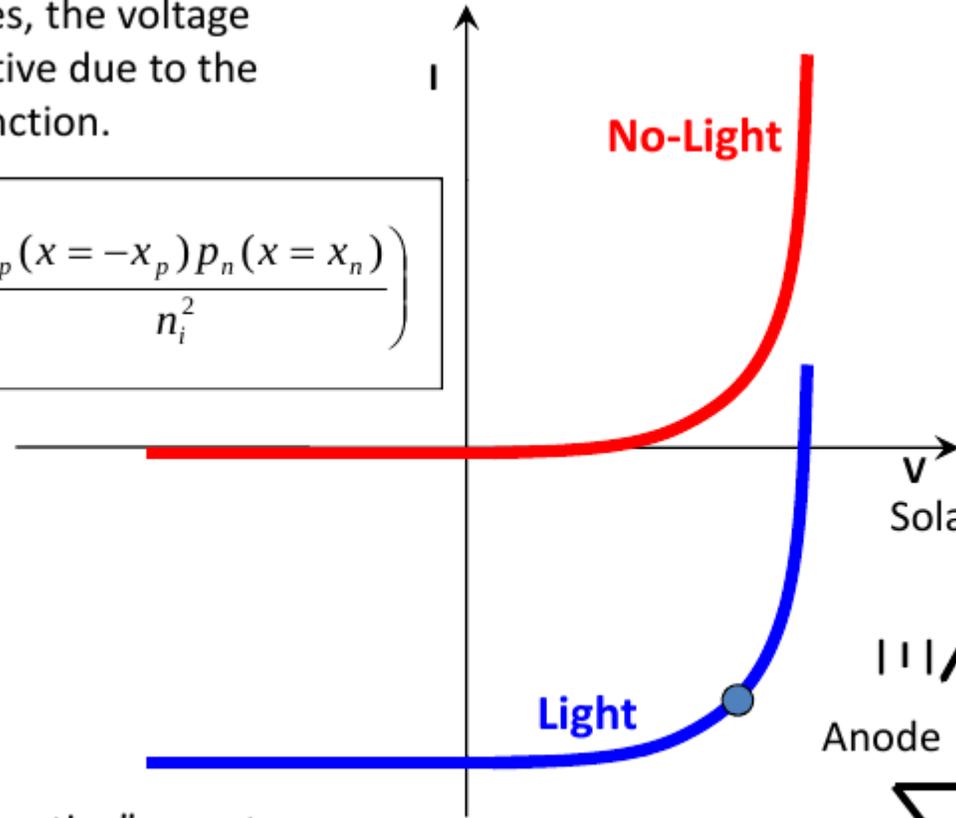
ФОТОДИОДЫ

Since $n_p > n_o$ and $p_n > p_o$ at the junction edges, the voltage must be positive due to the law of the junction.

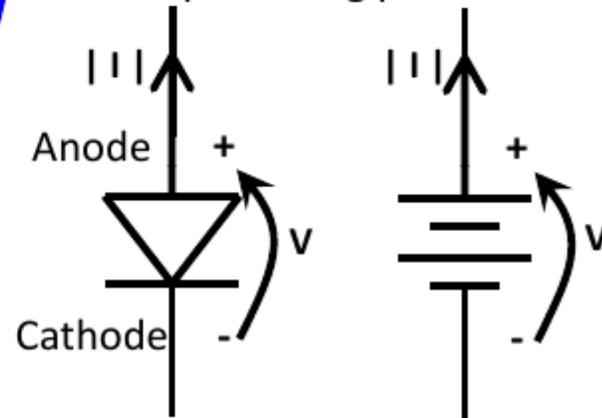
$$V_A = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_p(x = -x_p) p_n(x = x_n)}{n_i^2} \right)$$

Current is "negative" or out of the p-type side (anode)

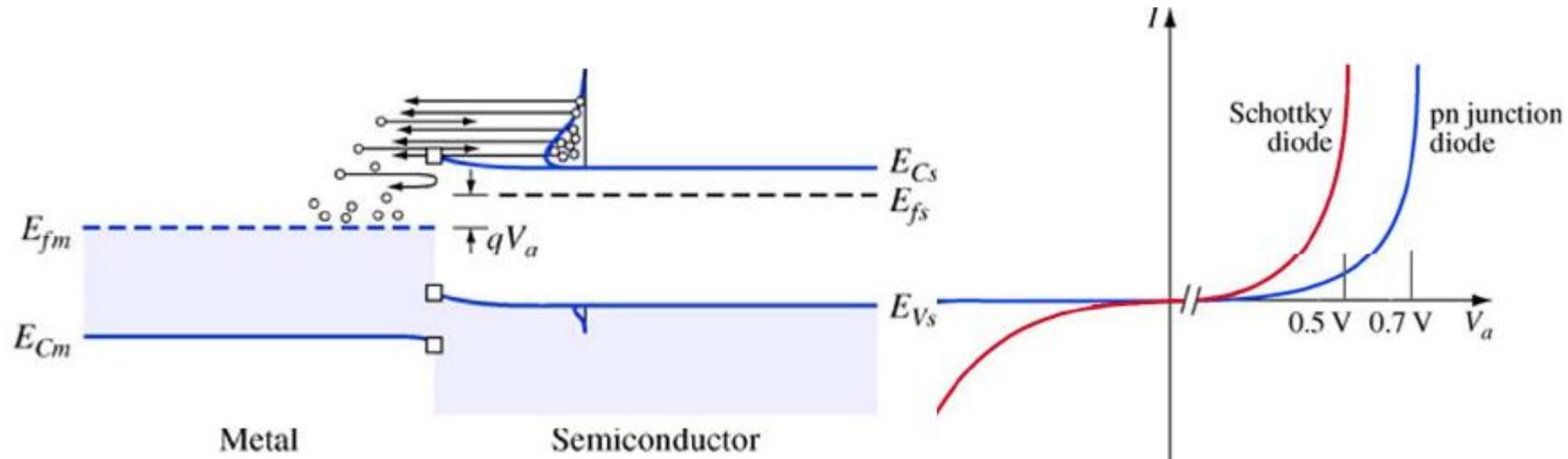
Direct Voltage



Solar Cell acts as a battery producing power



Диод Шоттки



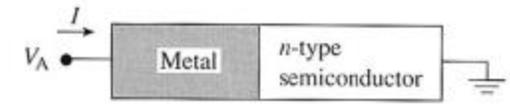
потенциальный барьер, образующийся в приконтактном слое полупроводника, граничащего с металлом, равный разности работ выхода (энергий, затрачиваемых на удаление электрона из твёрдого тела или жидкости в вакуум) металла и полупроводника

Диод Шоттки

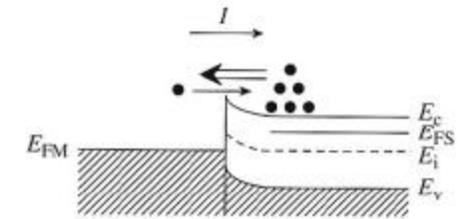
Барьер Шоттки обладает выпрямляющими свойствами. Ток через него при наложении внешнего электрического поля создается почти целиком основными носителями заряда. Контакты металл — полупроводник с барьером Шоттки широко используются в сверхвысокочастотных детекторах, транзисторах и фотодиодах

При приложении прямого смещения ток возрастает с экспоненциально с увеличением напряжения

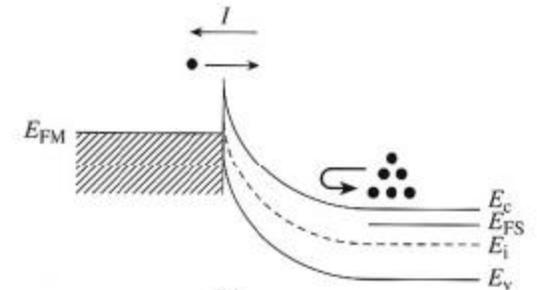
При приложении обратного смещения величина барьера увеличивается, и ток определяется туннельными процессами.



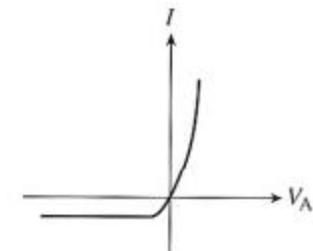
(a)



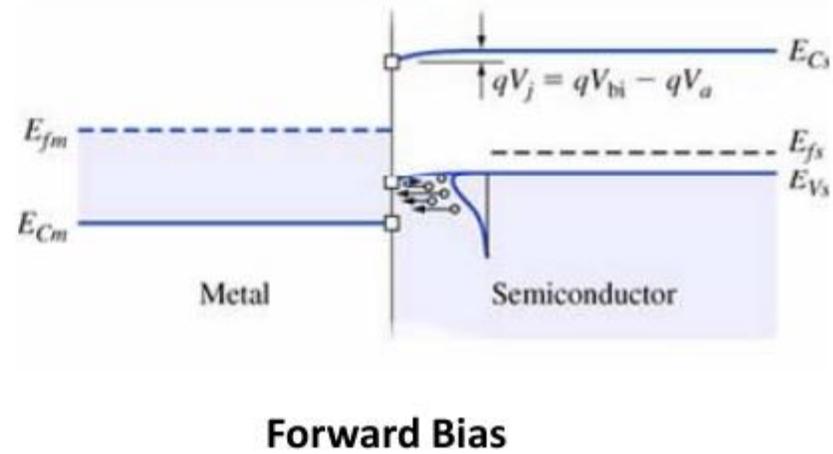
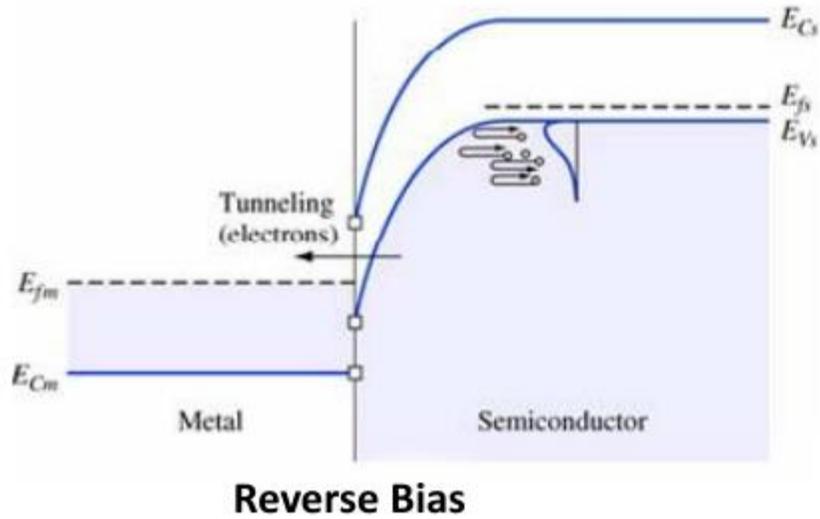
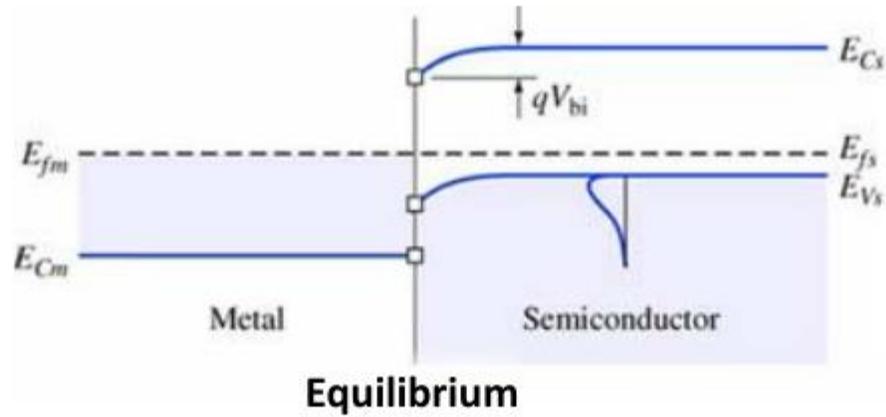
(b)



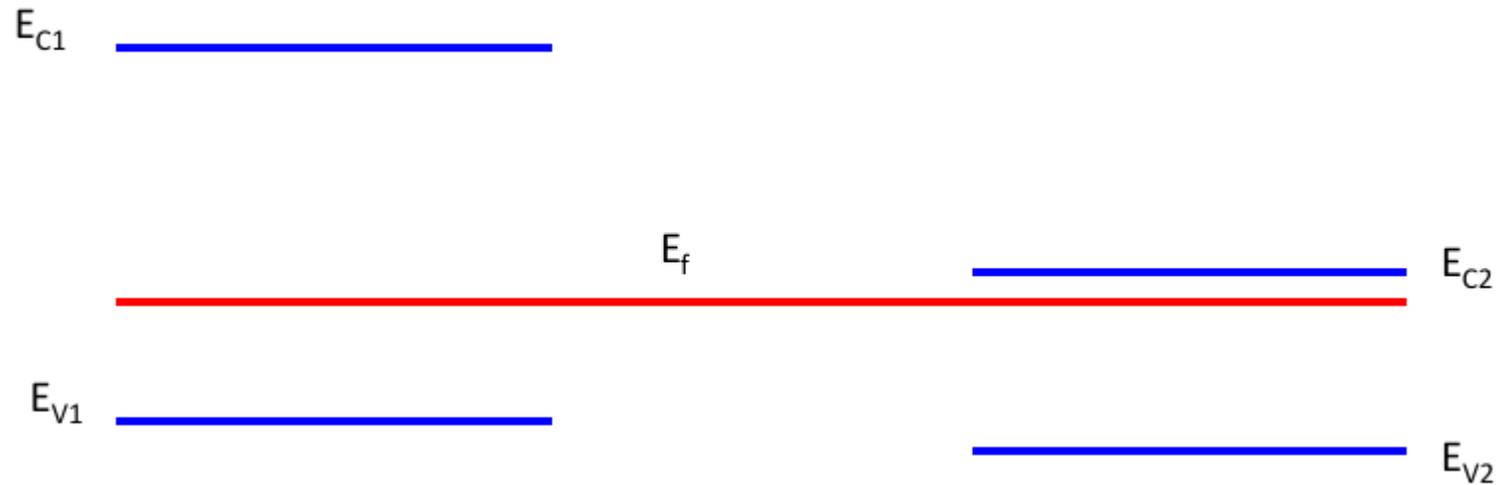
(c)



Диод Шоттки



Гетероструктуры



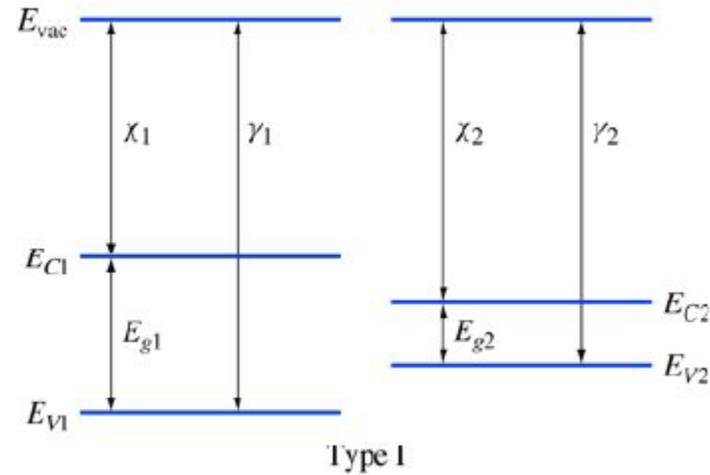
Гетеропереход - Контакт двух различных полупроводников с различными типами проводимости

Гетероструктуры

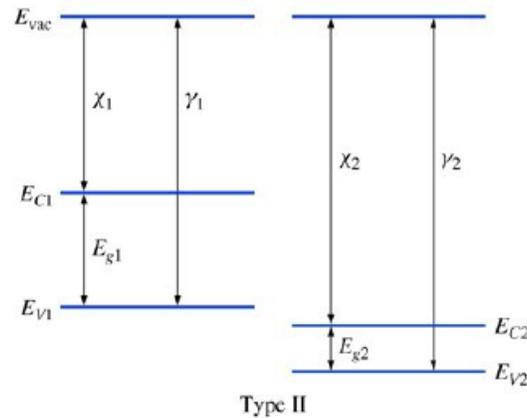
Определения:

Сродство к электрону – энергия необходимая, чтобы электрон из зоны проводимости перешел на уровень вакуума

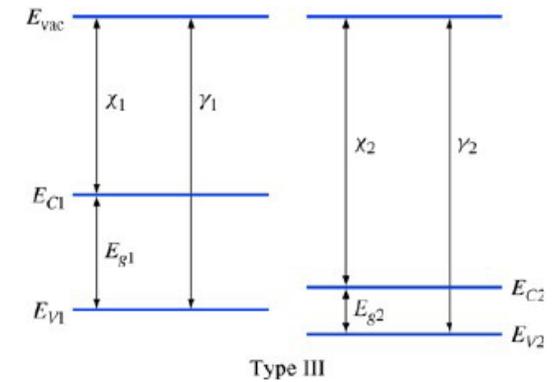
Потенциал ионизации – энергия, необходимая валентному электрону для перехода на уровень вакуума



Type I: Straddling (small Eg material is within large Eg band edges)

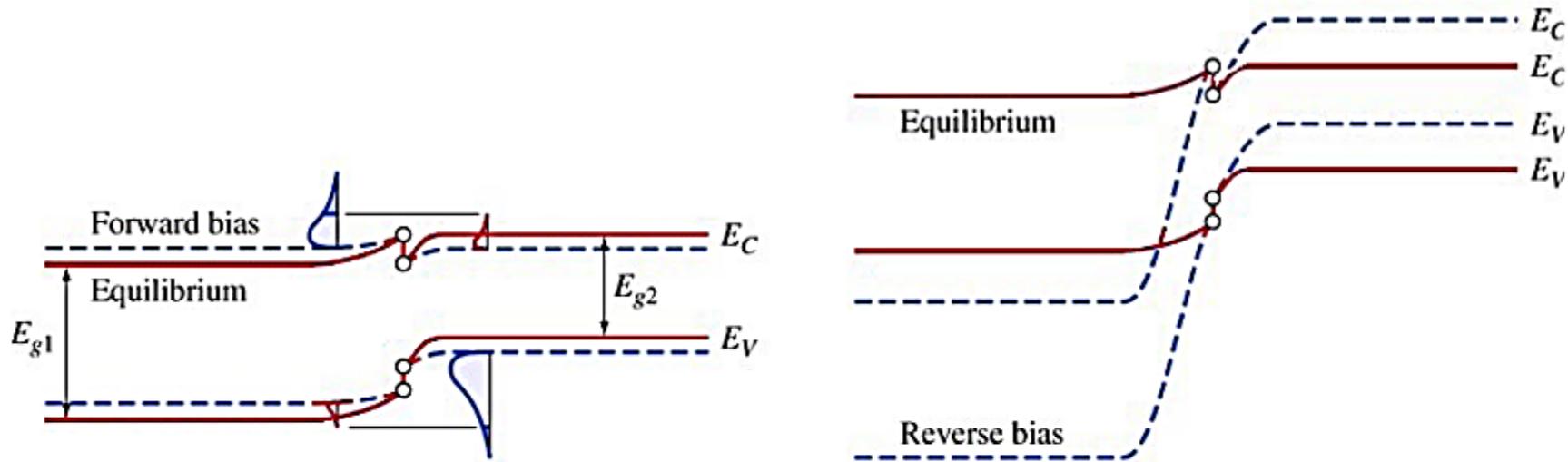


Type II: Staggered (small Eg material is outside of large Eg band edges – either above or below)



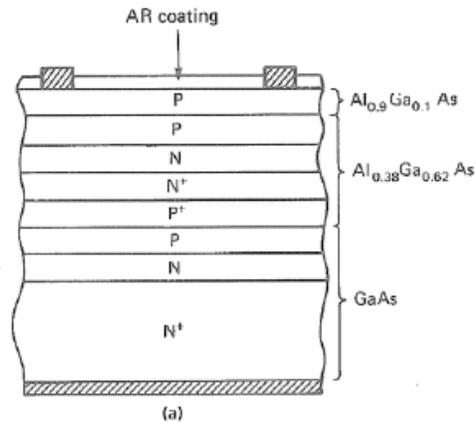
Type III: Broken Gap (One band edge of small Eg is within large Eg band edges – either above or below)

Гетероструктуры

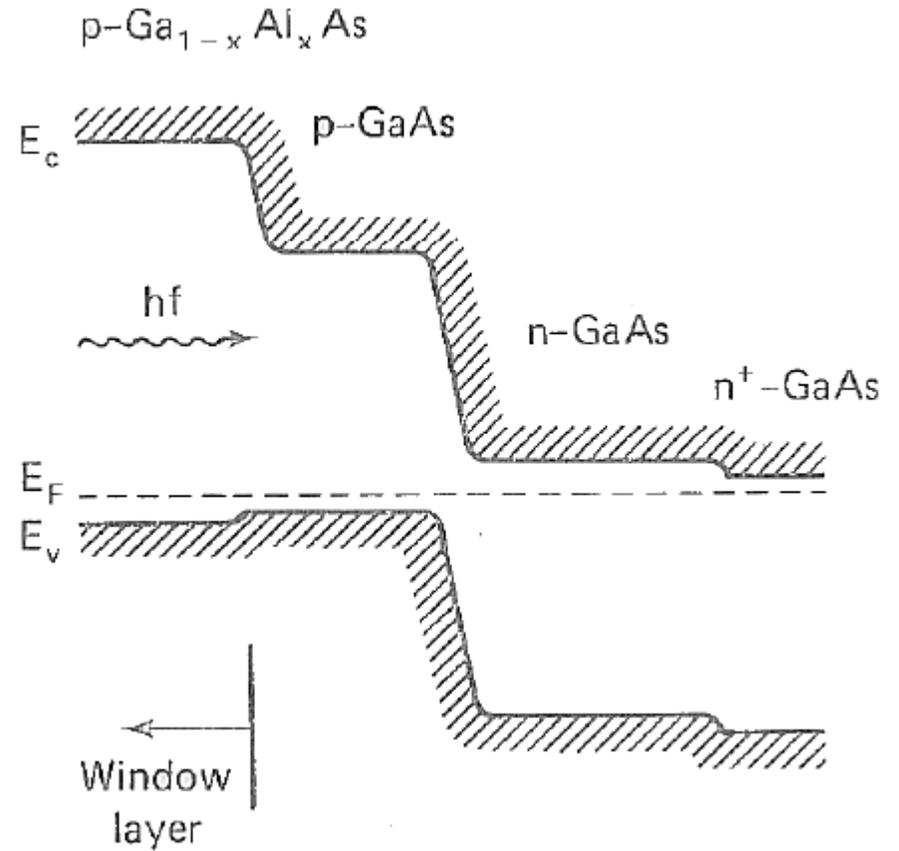
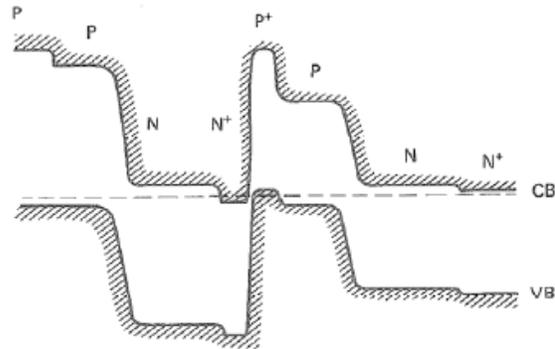


- Electrons may be easier to inject (lower barrier as in this case) than Holes or vice versa making these junctions inherently asymmetric (useful in both transistors and optical devices).
 - Heterojunction Emitter-Base junctions in Heterojunction Bipolar Transistors result in increased emitter injection efficiency using this effect

Гетероструктуры



Tunnel junction makes a semiconductor-semiconductor ohmic contact between sub-cells in tandem devices.

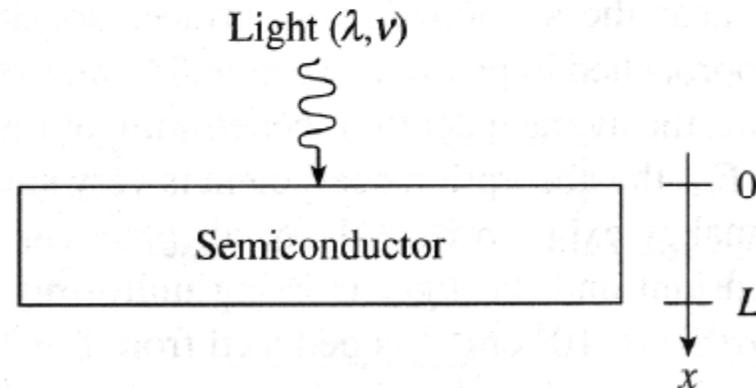
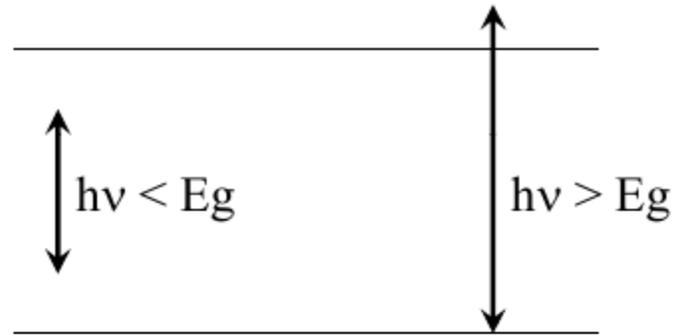


Оптическое поглощение

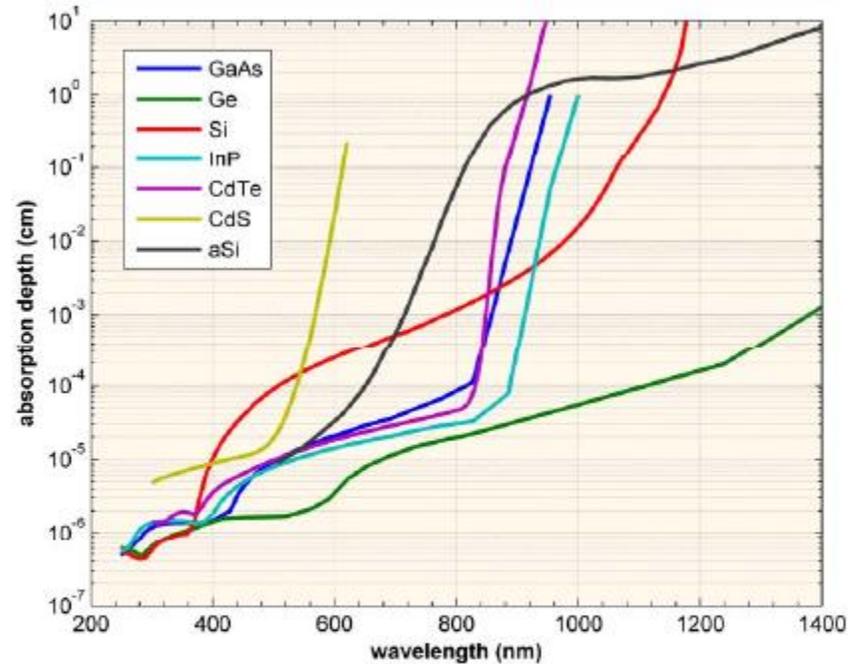
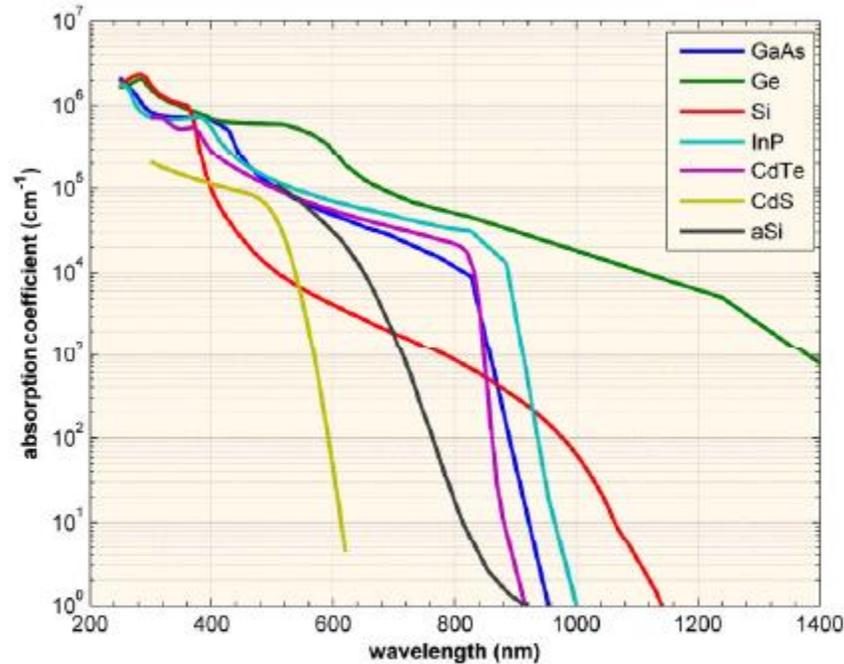
Light with photon energy, $h\nu < E_g$ is not easily absorbed. A convenient expression for the energy of light is $E = 1.24/\lambda$ where λ is the wavelength of the light in μm .

Light with energy, $h\nu > E_g$ is absorbed with the “unabsorbed” light intensity as a function of depth into the semiconductor is $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$

where I_0 is the initial light intensity, x is distance and α is the absorption coefficient [1/cm].



Оптическое поглощение

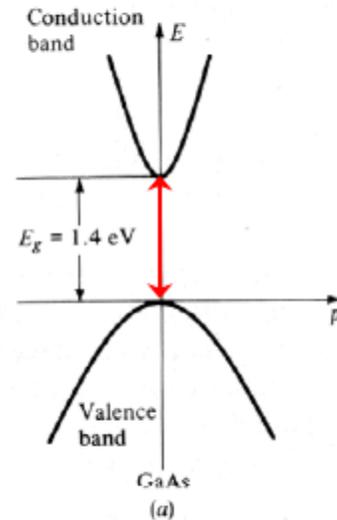


The absorption depth is given by the inverse of the absorption coefficient, or α^{-1} . The absorption depth gives the distance into the material at which the light at that wavelength drops to about 36% of its original intensity (by a factor of $1/e$).

Оптическое поглощение. Прямозонные полупроводники

Probability of a “direct transition” from valence band to conduction band is high!

Direct Bandgap



Indirect Bandgap

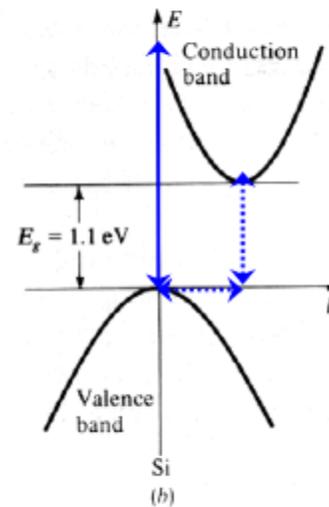


FIGURE 1-12

Energy-band diagram with energy vs. momentum for (a) GaAs (direct) and (b) Si (indirect).

Вероятность прямого перехода выше.
Оптическая плотность пропорциональна вероятности перехода

Выводы

- 1) Вспомнили отличия полупроводников от металлов и диэлектриков
- 2) Узнали чем полупроводники р-типа отличаются от полупроводников n-типа
- 3) Изучили различные типы р-n переходов
- 4) На следующей лекции будем изучать фотоприемники