

Источники оптического импульсного когерентного излучения для информационных систем II

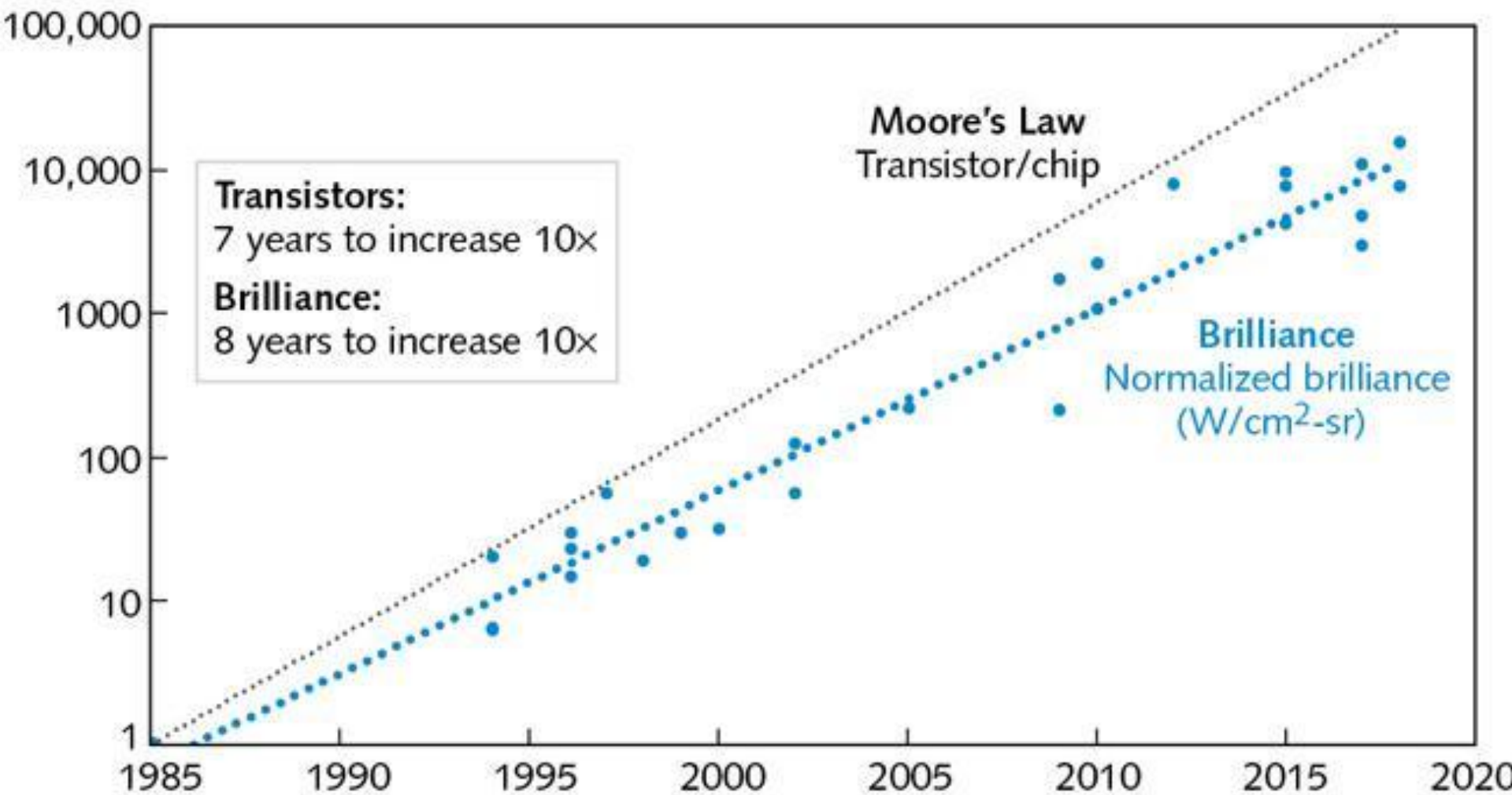
- Полупроводниковые лазеры

В 2007 г. изготовлено 827 097 534 п/п лазеров
В 2018 г. ожидается выпуск ~ 1,8 млрд.

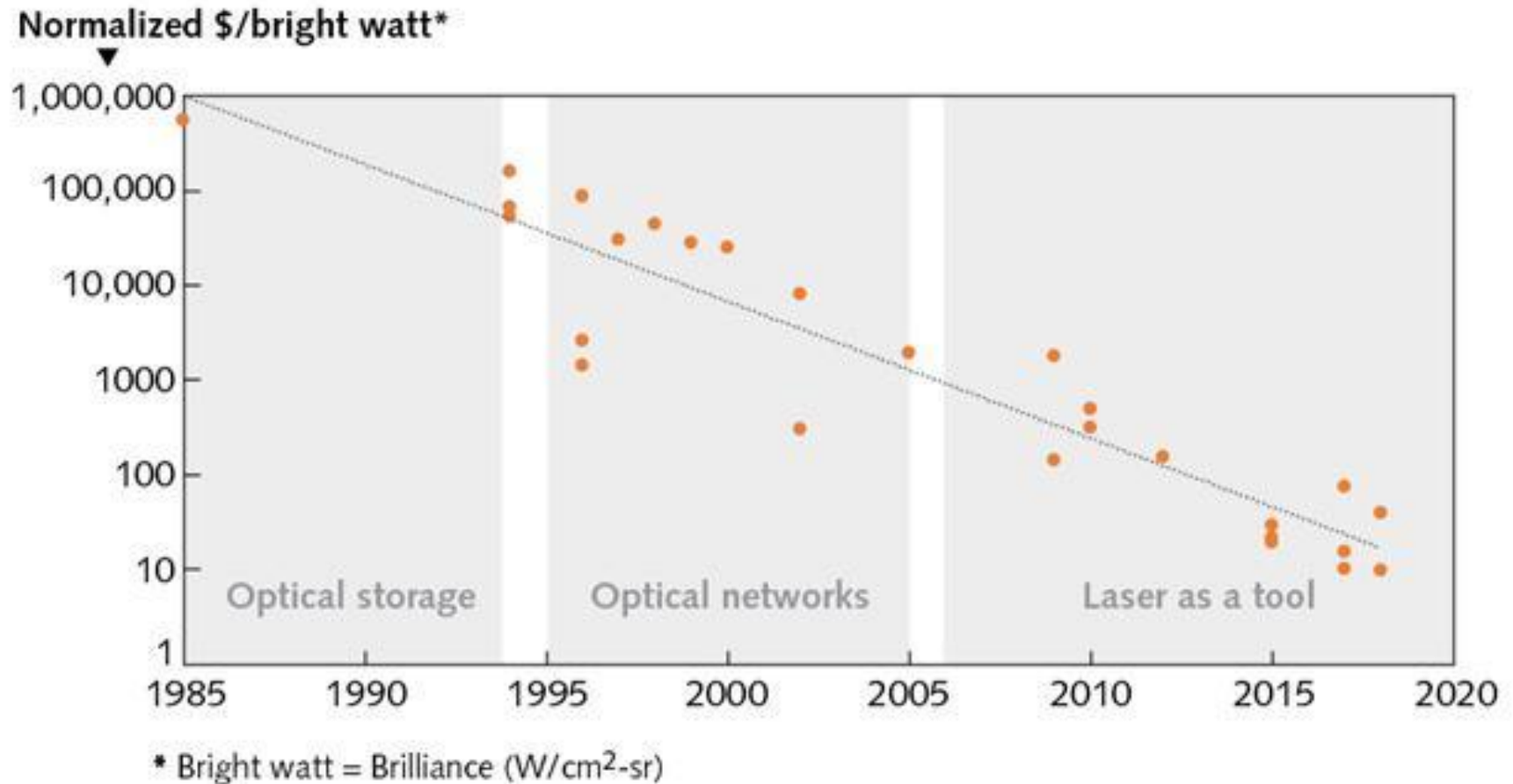
Table 1. Worldwide commercial diode-laser sales 2007–2008 (units)

DIODE UNITS		DIODE UNITS								DIODE UNITS					TOTALS
		Materials processing	Medical therapeutics	Instrumentation	Basic research	Telecommunications	Optical storage	Entertainment	Image recording	Inspection, measurement, and control	Barcode scanning	Sensing	Other	Solid-state laser pumping	
<700 nm	2007	0	0	0	0	0	355,000,000	25,000,000	21,500	15,090,000	6,950,000	0	0	10	402,061,510
	2008	0	50	0	0	0	369,000,000	20,000,000	21,500	15,100,000	6,990,000	0	0	50	411,111,600
750–980 nm <100 mW	2007	0	0	0	0	0	359,000,000	0	9,800,000	0	0	24,270,000	15,700,000	0	408,770,000
	2008	0	0	0	0	0	345,000,000	0	10,100,000	0	0	29,124,000	19,598,000	0	403,822,000
750–980 nm 100 mW–10 W	2007	0	195,000	0	0	207,000	0	0	102,500	0	0	0	1,700	538,000	1,044,200
	2008	0	185,350	0	0	207,000	0	0	100,750	0	0	0	1,800	807,000	1,301,900
750–980 nm >10 W	2007	7,150	147,400	0	1,000	0	0	0	5,000	0	0	10,000	31,100	29,000	230,650
	2008	7,475	162,900	0	1,000	0	0	0	5,000	0	0	10,000	31,100	30,050	247,525
908–1550 nm	2007	0	925	0	0	12,643,000	0	0	0	0	0	0	2,331,500	0	14,975,425
	2008	0	1,300	0	0	14,243,000	0	0	0	0	0	0	2,916,200	0	17,160,500
>1550 nm	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stacks	2007	500	3,609	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,840	9,800	15,749
	2008	525	4,713	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,080	10,750	18,068
TOTAL UNITS	2007	7,650	346,934	0	1,000	12,850,000	714,000,000	25,000,000	9,929,000	15,090,000	6,950,000	24,280,000	18,066,140	576,810	827,097,534
	2008	8,000	354,313	0	1,000	14,450,000	714,000,000	20,000,000	10,227,250	15,100,000	6,990,000	29,134,000	22,549,180	847,850	833,661,593

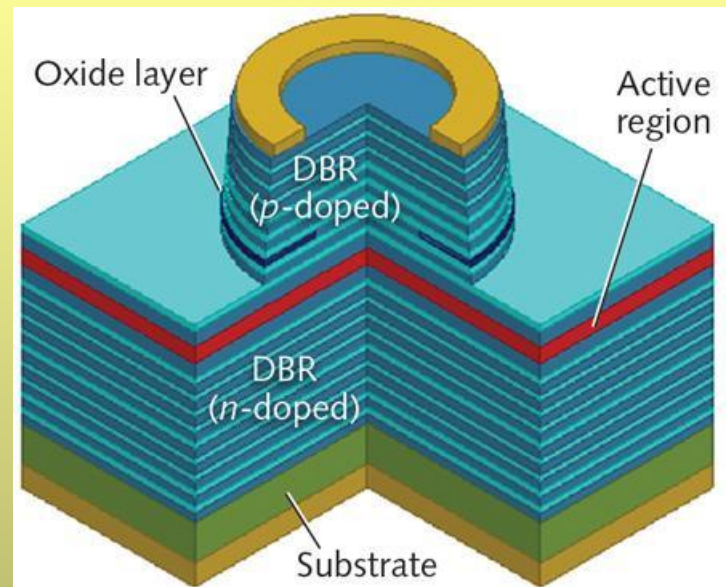
High-power semiconductor laser brilliance and Moore's Law



High-power semiconductor laser brilliance



<https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-54/issue-01/features/laser-diodes-the-power-of-brilliance-the-past-and-future-of-high-power-semiconductor-lasers.html>

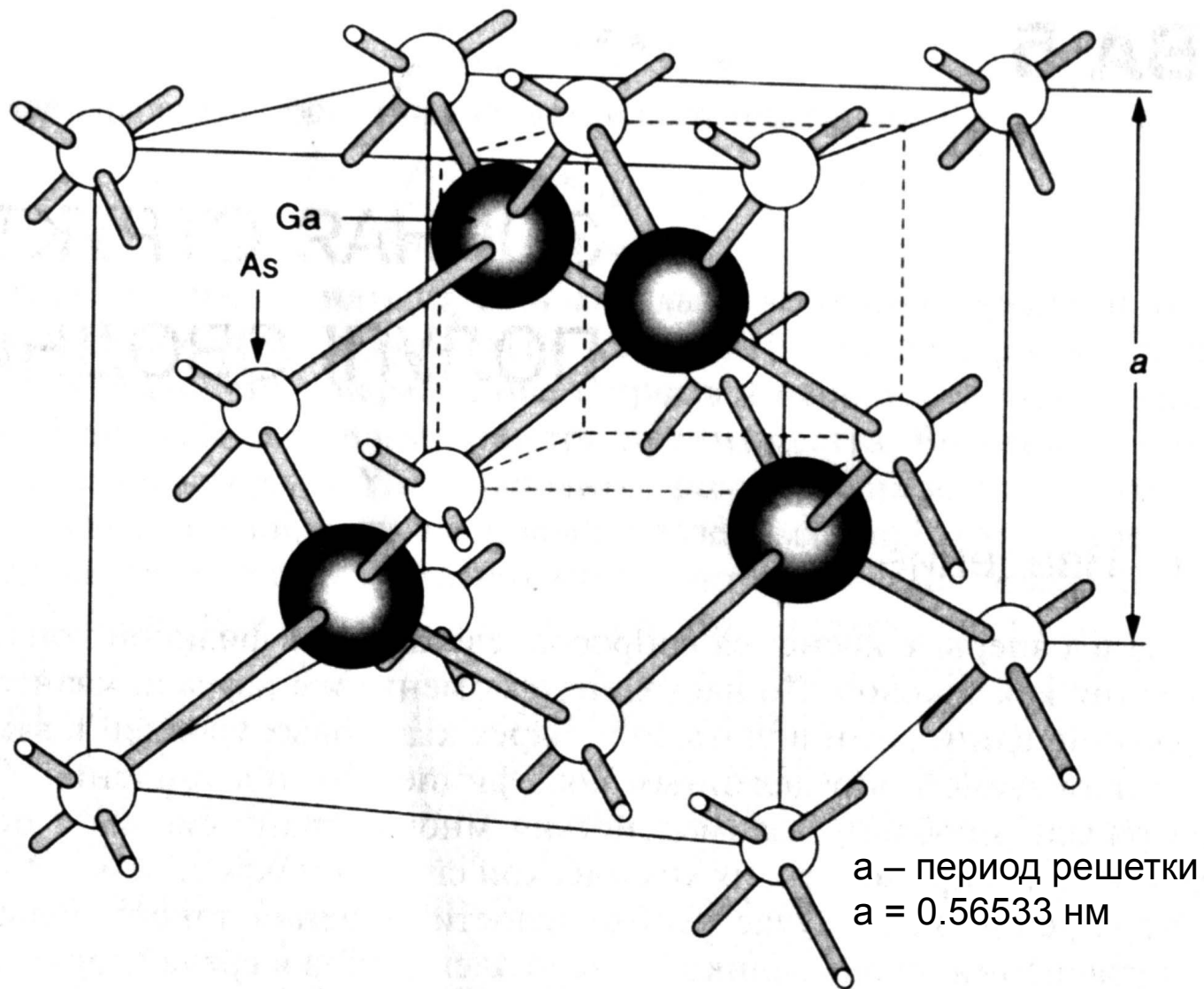


Вертикально-излучающие лазеры используются для лидаров, отслеживания движения глаз, ночного видения, 3D сканирования, и множество других приложений.
Philips Photonics

Основные положения зонной теории

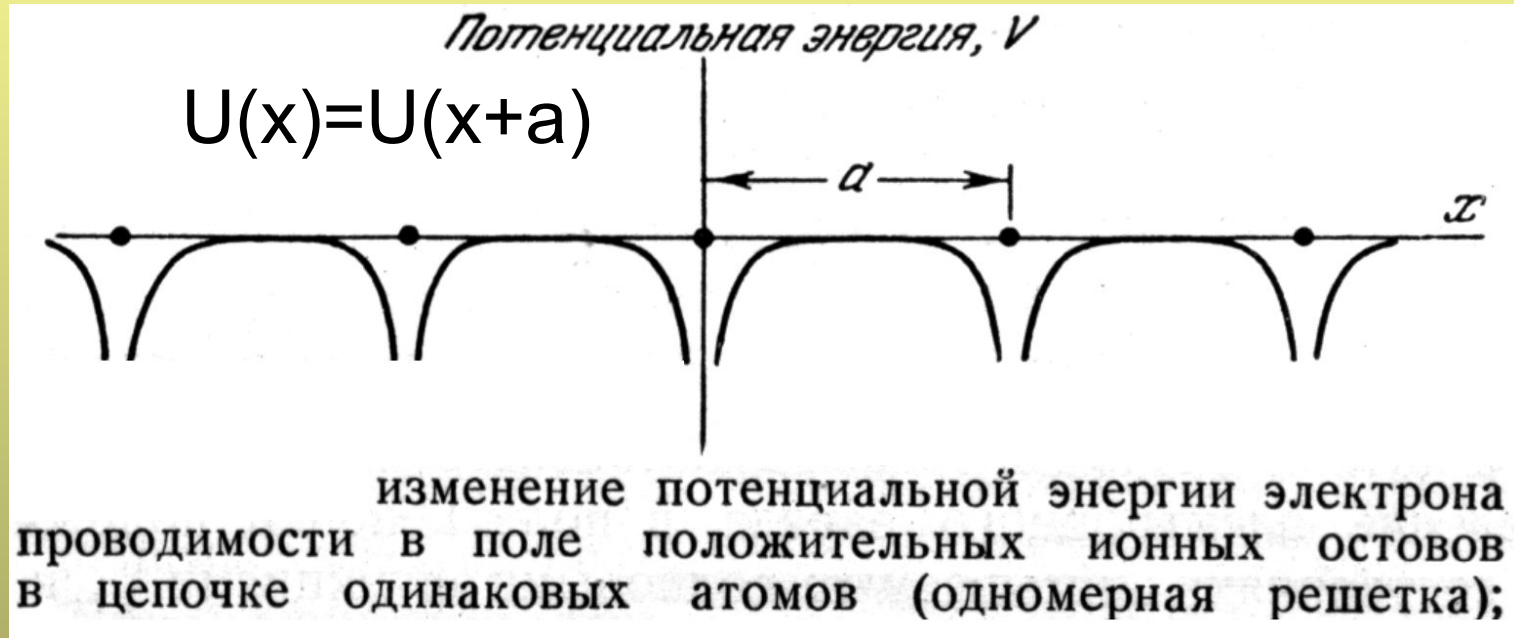
1. Атомные ядра рассматриваются как неподвижные источники поля, действующего на электроны.
2. Расположение ядер в пространстве считается точно периодическим: они размещены в узлах идеальной решетки данного кристалла
3. Взаимодействие электронов друг с другом заменяется некоторым эффективным внешним полем (идеальный электронный газ в эффективном внешнем поле).

GaAs



Кристаллическая структура цинковой обманки.

Электрон в периодическом электрическом поле



$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi$$

Теорема Блоха: волновая функция электрона в периодическом поле есть модулированная плоская волна

Волновой
вектор электрона

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{p}}{\hbar}$$

$$H_{\text{cris}} = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + V(\mathbf{r})$$

$$V(\mathbf{r} + \mathbf{r}_j) = V(\mathbf{r})$$

$$V(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G} \in \text{RL}} \tilde{V}(\mathbf{G}) e^{-i\mathbf{G}\mathbf{r}}$$

$$u_k(\mathbf{r}) = u_k(\mathbf{r} + \mathbf{a})$$

$$\psi(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k}\mathbf{r}) u_k(\mathbf{r})$$

$$\psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{k}\mathbf{R}).$$



Вставка функции Блоха в уравнение Шредингера

$$\left[\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\nabla}{i} + \mathbf{k} \right)^2 + U(\mathbf{r}) \right] u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \varepsilon_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}),$$

Дифференциальные уравнения такого типа при любых условиях на границах тел конечных размеров, а также при периодических граничных условиях имеют бесконечное дискретное множество решений. В данном случае им соответствует бесконечное множество волновых функций $\psi_{\mathbf{k}}$ и значений энергии $\varepsilon_{\mathbf{k}}$. Эти значения образуют энергетические зоны, которые могут быть пронумерованы числами $n = 1, 2, 3, \dots$. Номер зоны n является квантовым числом наряду со значением k .

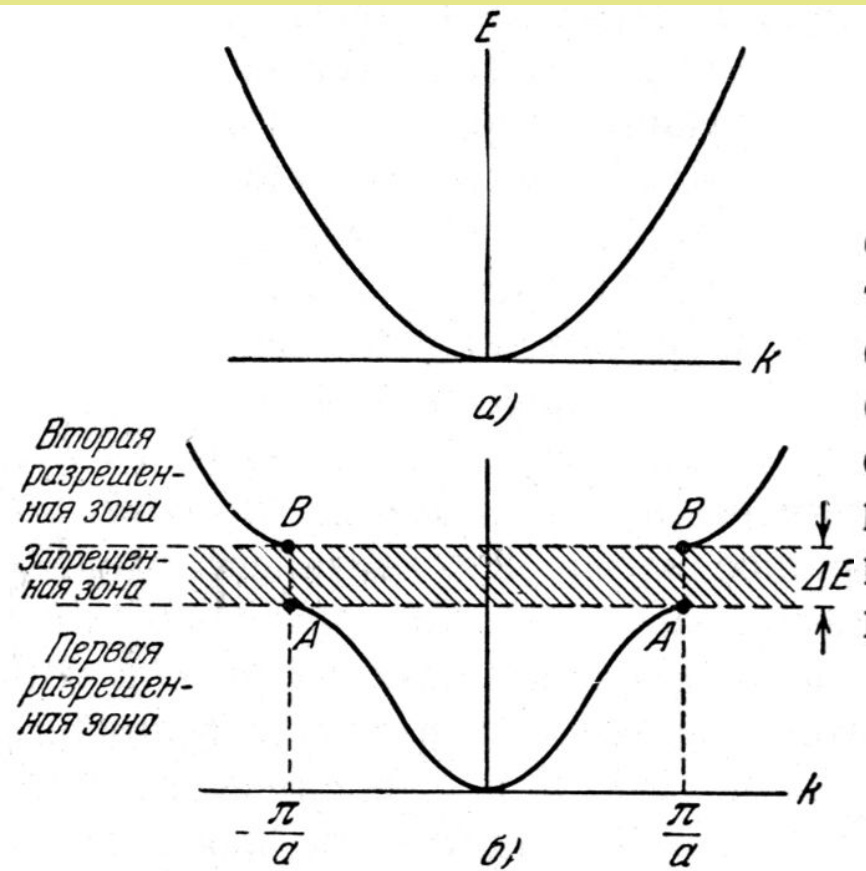
Уровни в зоне расположены близко друг к другу, и их заполнение подчиняется запрету Паули. Экспериментальные значения энергий, полученные для ширины зон, не превышают единиц электрон-вольт, поэтому в кристалле объемом в один кубический сантиметр, содержащем 10^{22} — 10^{23} атомов, количество уровней в разрешенных зонах равно 10^{22} — 10^{23} , а отличие в энергии между соседними уровнями составляет примерно 10^{-22} — 10^{-23} эВ.

**Следствием уравнения Блоха является выражение для
средней скорости блоховского электрона
в n зоне:**

$$\overline{\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)}_n \equiv \mathbf{v}_n(\mathbf{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} \varepsilon_n(\mathbf{k}) \equiv \frac{1}{\hbar} \frac{\partial \varepsilon_n}{\partial \mathbf{k}}.$$

Если мы знаем закон дисперсии для электрона (носителя заряда), то мы можем определить среднюю скорость (в данной зоне)

Образование зонной структуры на примере свободного электрона



a — график зависимости энергии от волнового числа для свободного электрона; b — график зависимости энергии от волнового вектора для цепочки из одинаковых атомов (линейная решетка) с расстоянием между атомами (постоянной решетки), равным a . Показана энергетическая щель, обусловленная первым брэгговским отражением при $k = \pm \pi/a$.

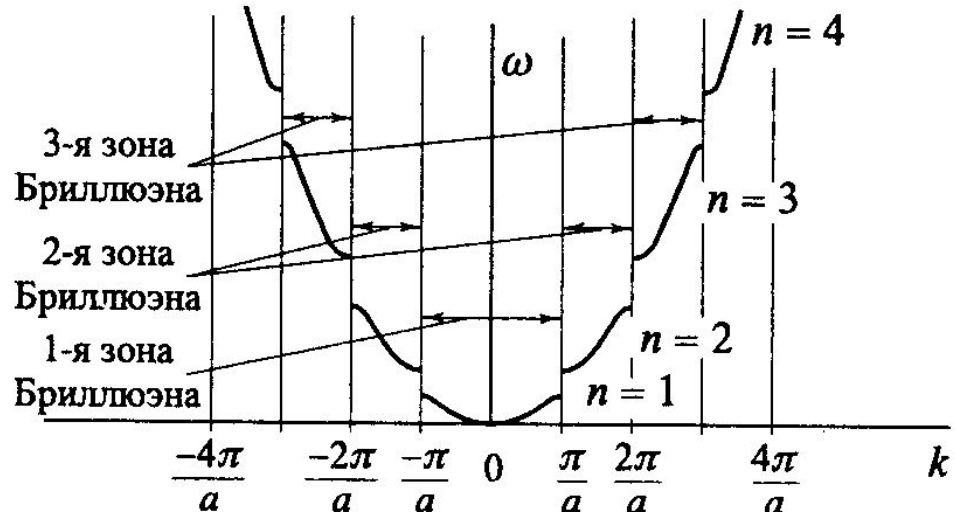
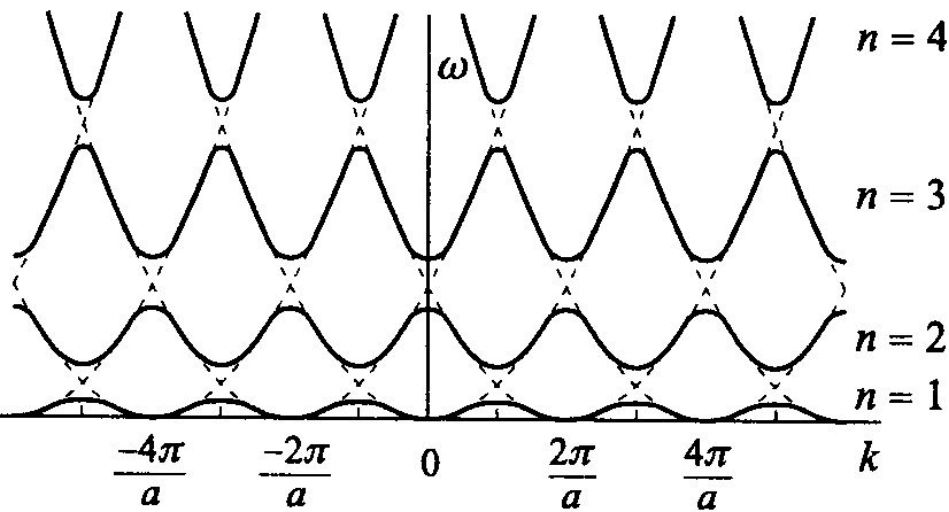
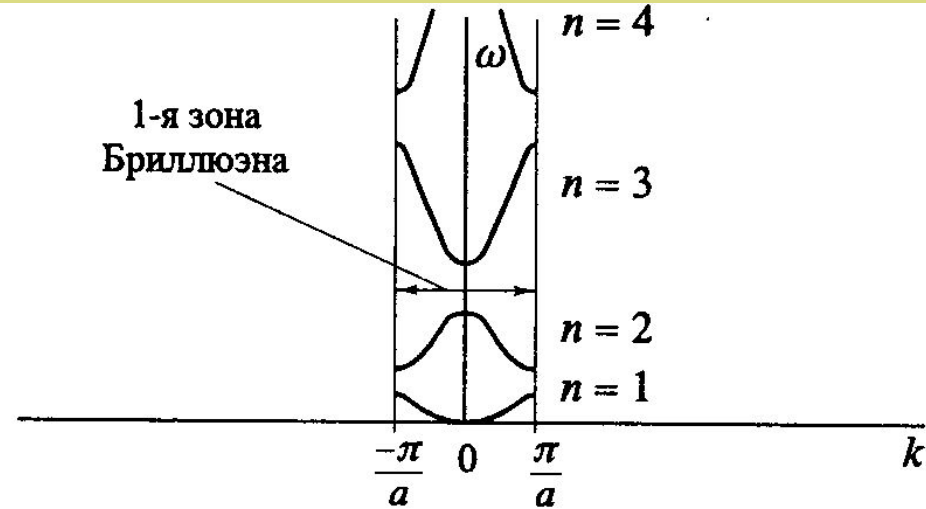
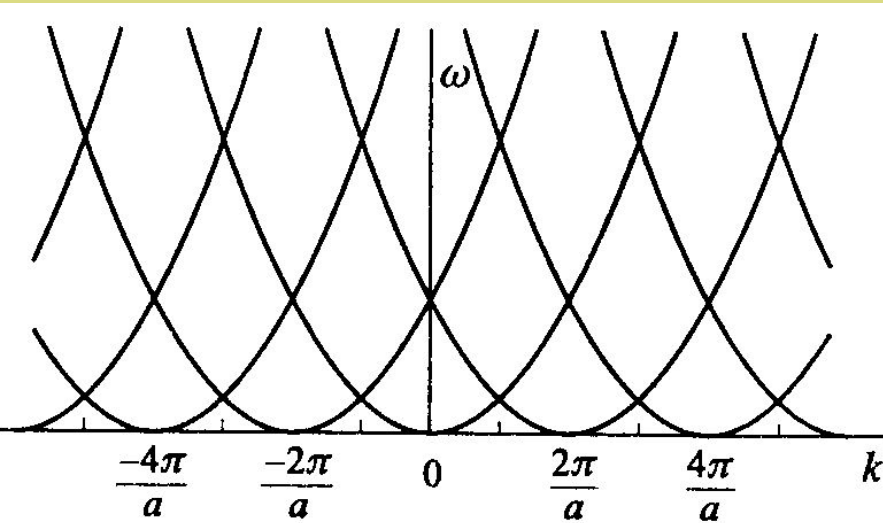
$$2d \sin \theta = n\lambda$$

$$k \rightarrow \frac{2\pi}{\lambda}$$

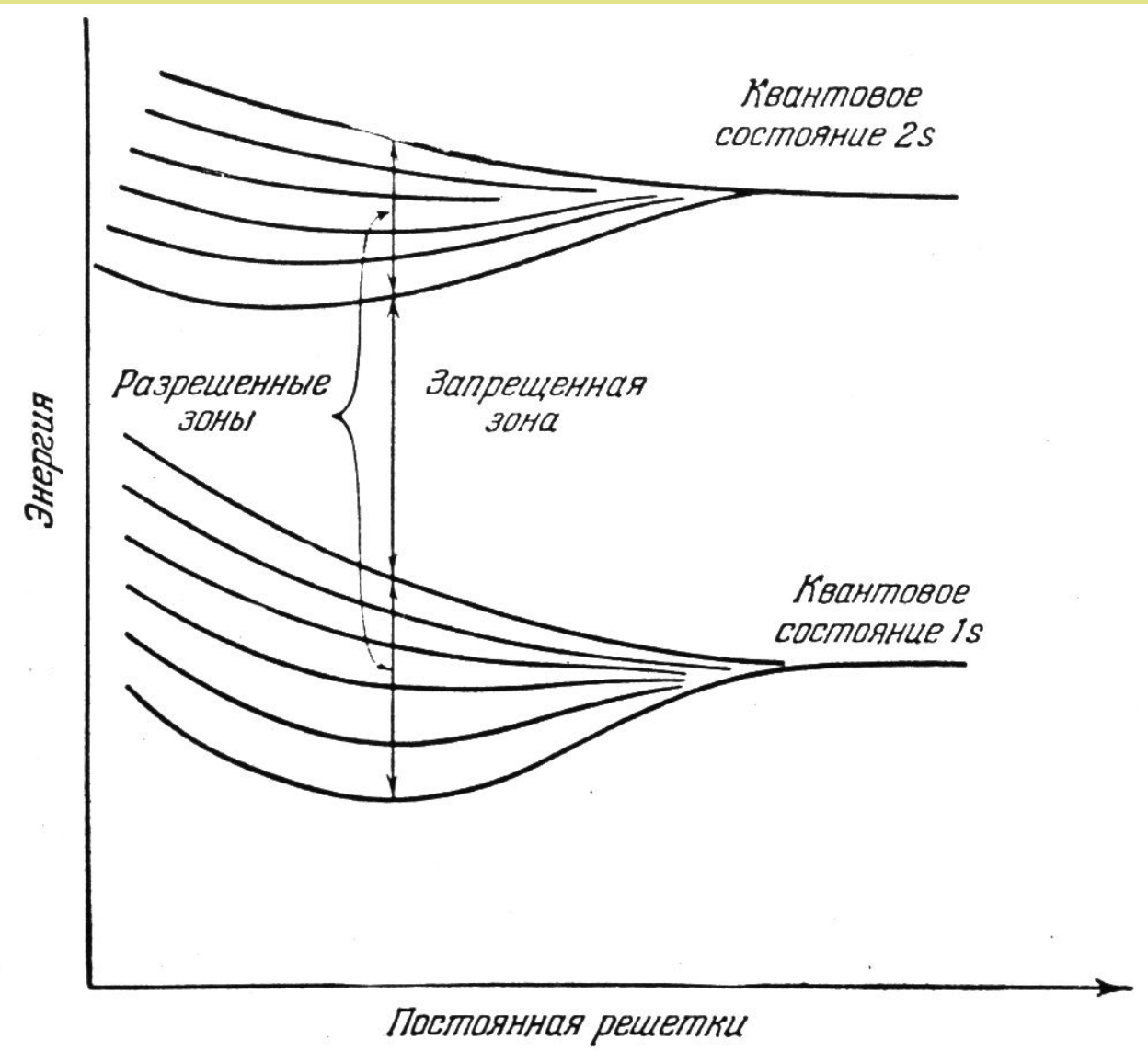
$$d \rightarrow a$$

Условие Брэгга в одномерном случае $k = n\pi/a$

Приближение слабого периодического потенциала, Энергия 5 эВ – $\lambda = 0,5$ нм



Образование энергетических уровней в системе из шести водородных атомов при их сближении (приближение сильной связи)



По мере сближения атомов связь между ними возрастает, уровни ранее изолированных атомов расщепляются.

Разрешенная энергетическая зона - интервал энергий, в пределах которых значения энергии электрона могут меняться непрерывно.

*Разрешенную энергетическую зону, в которой при абсолютном нуле температуры все энергетические уровни заняты электронами, называют **заполненной зоной**.*

*Верхнюю из заполненных зон полупроводника называют **валентной зоной**.*

*Разрешенную зону полупроводника, в которой отсутствуют электроны проводимости при абсолютном нуле, называют **свободной зоной**.*

*Свободную зону полупроводников, на уровнях которой при возбуждении могут находиться электроны проводимости, называют **зоной проводимости**.*

Запрещенная зона — интервал энергий, в пределах которых электрон в идеальной кристаллической решетке не может существовать (брэгговское отражение волны электрона).

Ширина запрещенной зоны — это разность энергий между нижним уровнем зоны проводимости и верхним уровнем валентной зоны.

Уровень Ферми — при нулевой температуре (0K) является границей между заполненными электронными состояниями под ним и незаполненными состояниями над ним.

Энергия уровня Ферми — это максимальная энергия, которую могут иметь электроны металла при абсолютном нуле.

Статистика носителей заряда в полупроводниках

Статистика Ферми и уровень Ферми

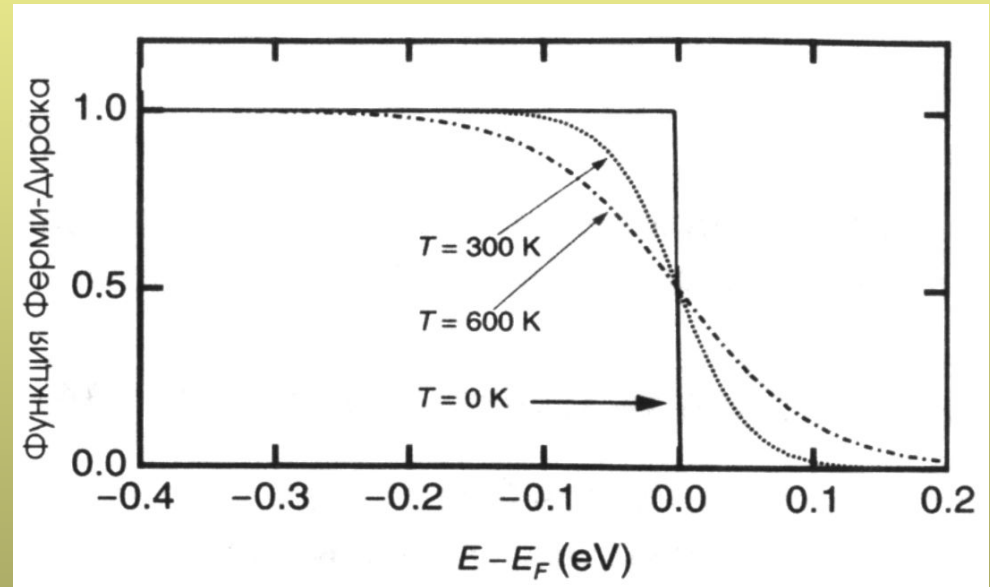
Статистика Ферми-Дирака
Распределение вероятности
заполнения

$f(E)$ состояния с энергией E

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

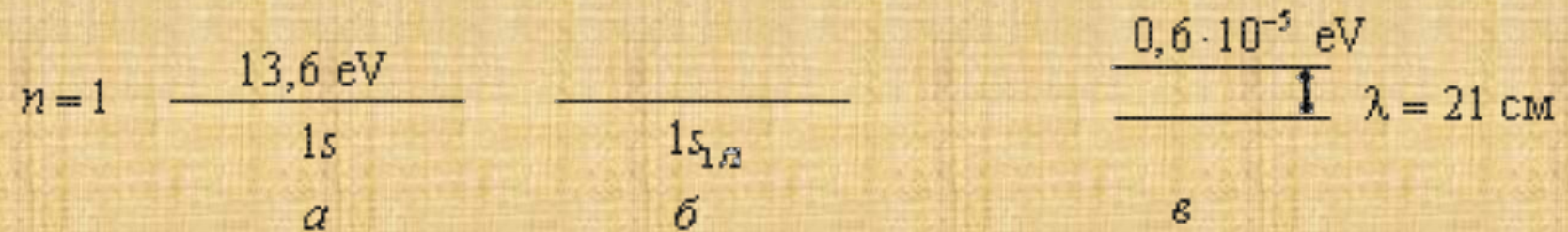
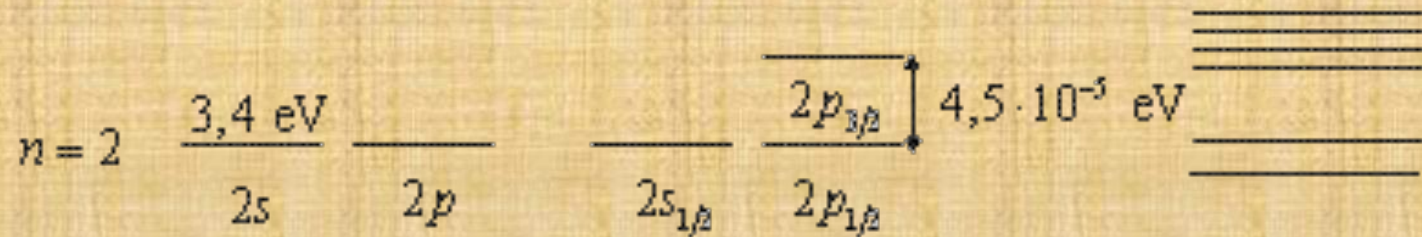
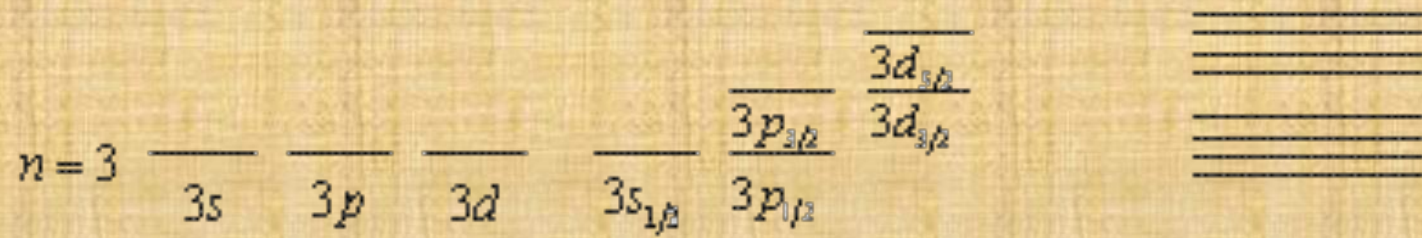
$$f = 1 \quad \text{при} \quad E < F$$

$$f = 0 \quad \text{при} \quad E > F$$



По определению, уровень Ферми есть химический потенциал частиц в системе. Он описывает количество энергии, которое должно быть потрачено для того, чтобы добавить одну частицу (расположенную изначально далеко) в систему. При *термодинамическом равновесии* этот химический потенциал одинаков для всех частиц и идентичен по всей структуре.

периоды	Периодическая система элементов Д.И.Менделеева						VII	VIII		ОБОЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТА	
1							1 1,0079 ВОДОРОД	2 4,0026 ГЕЛИЙ	Li 6,941 ЛИТИЙ 3 Атомный номер 6,941 Атомный вес название элемента -s-элемент -d-элемент -p-элемент		
2	Li ³ ЛИТИЙ	Be ⁴ БЕРИЛИЙ	B ⁵ БОР	C ⁶ УГЛЕРОД	N ⁷ АЗОТ	O ⁸ КИСЛОРОД	F ⁹ ФТОР	Ne ¹⁰ НЕОН			
3	Na ¹¹ НАТРИЙ	Mg ¹² МАГНИЙ	Al ¹³ АЛЮМИНИЙ	Si ¹⁴ КРЕМНИЙ	P ¹⁵ ФОСФОР	S ¹⁶ СЕРА	Cl ¹⁷ ХЛОР	Ar ¹⁸ АРГОН			
4	K ¹⁹ КАЛИЙ	Ca ²⁰ КАЛЬЦИЙ	Sc ²¹ СКАНДИЙ	Ti ²² ТИТАН	V ²³ ВАНАДИЙ	Cr ²⁴ ХРОМ	Mn ²⁵ МАРГАНЕЦ	Fe ²⁶ ЖЕЛЕЗО	Co ²⁷ КОБАЛЬТ	Ni ²⁸ НИКЕЛЬ	
	Cu ²⁹ МЕДЬ	Zn ³⁰ ЦИНК	Ga ³¹ ГАЛИЙ	Ge ³² ГЕРМАНИЙ	As ³³ АРСЕН	Se ³⁴ СЕЛЕН	Br ³⁵ БРОМ	Kr ³⁶ КРИПТОН			
5	Rb ³⁷ РУБИДИЙ	Sr ³⁸ СТРОНЦИЙ	Y ³⁹ ИТРИЙ	Zr ⁴⁰ ЦИРКОНИЙ	Nb ⁴¹ НИОБИЙ	Mo ⁴² МОЛИБДЕН	Tc ⁴³ ТЕХНЕЦИЙ	Ru ⁴⁴ РУТЕНИЙ	Rh ⁴⁵ РОДИЙ	Rd ⁴⁶ РАДИАЦИОННЫЙ	
	Ag ⁴⁷ СЕРЕБРО	Cd ⁴⁸ КАДМИЙ	In ⁴⁹ ИНДИЙ	Sn ⁵⁰ ОЛОВО	Sb ⁵¹ СУРЬМА	Te ⁵² ТЕЛЛУР	I ⁵³ ЙОД	Xe ⁵⁴ КСЕНОН			
6	Cs ⁵⁵ ЦЕЗИЙ	Ba ⁵⁶ БАРИЙ	La ⁵⁷ ЛАНТАН	Hf ⁷² ГАФНИЙ	Ta ⁷³ ТАНТАЛ	W ⁷⁴ ВОЛЬФРАМ	Re ⁷⁵ РЕНИЙ	Os ⁷⁶ ОСМИЙ	Ir ⁷⁷ ИРИДИЙ	Pt ⁷⁸ ПЛАТИНА	
	Au ⁷⁹ ЗОЛОТО	Hg ⁸⁰ РТУТЬ	Tl ⁸¹ ТАЛИЙ	Pb ⁸² СВИНЕЦ	Bi ⁸³ ВИСМУТ	Po ⁸⁴ ПОЛОНИЙ	At ⁸⁵ АСТАТ	Rn ⁸⁶ РАДОН			
7	Fr ⁸⁷ ФРАНЦИЙ	Ra ⁸⁸ РАДИЙ	Ac ⁸⁹ АКТИНИЙ	Ku ¹⁰⁴ КУРЧАТОВИЙ	105						
БЕШЕЛЕ	R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄			
РАД АКТИВНОСТИ НЕТАЛЛОВ	Li, K, Ba, Ca, Na, Mg, Al			Be, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Co, Ni, Sn, Pb			H ₂	Sb, Cu, Hg, Ag, Pt, Au			TIER & OP



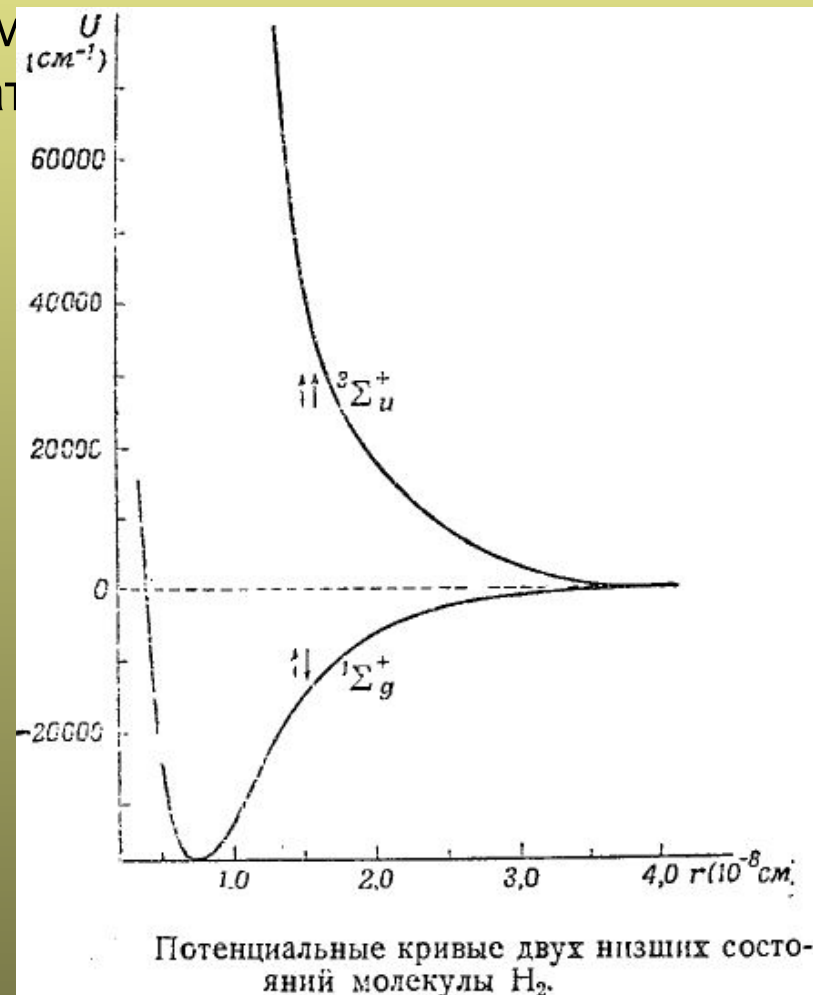
$$E_n = -2\pi\hbar c \frac{R}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ эВ},$$

Схема электронных уровней атома водорода: а – без учёта спина электрона и спина ядра, б – тонкое расщепление уровней, учитывающее спин электрона, в – сверхтонкое расщепление уровней, учитывающее взаимодействие магнитного момента электрона с магнитным моментом ядра. $\lambda = 21 \text{ см}$ (частота излучения 1420 МГц). Молекула водорода – диэлектрик – $1s$ состояние заполнено. При большом давлении – металл.

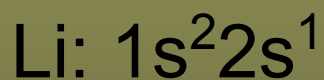
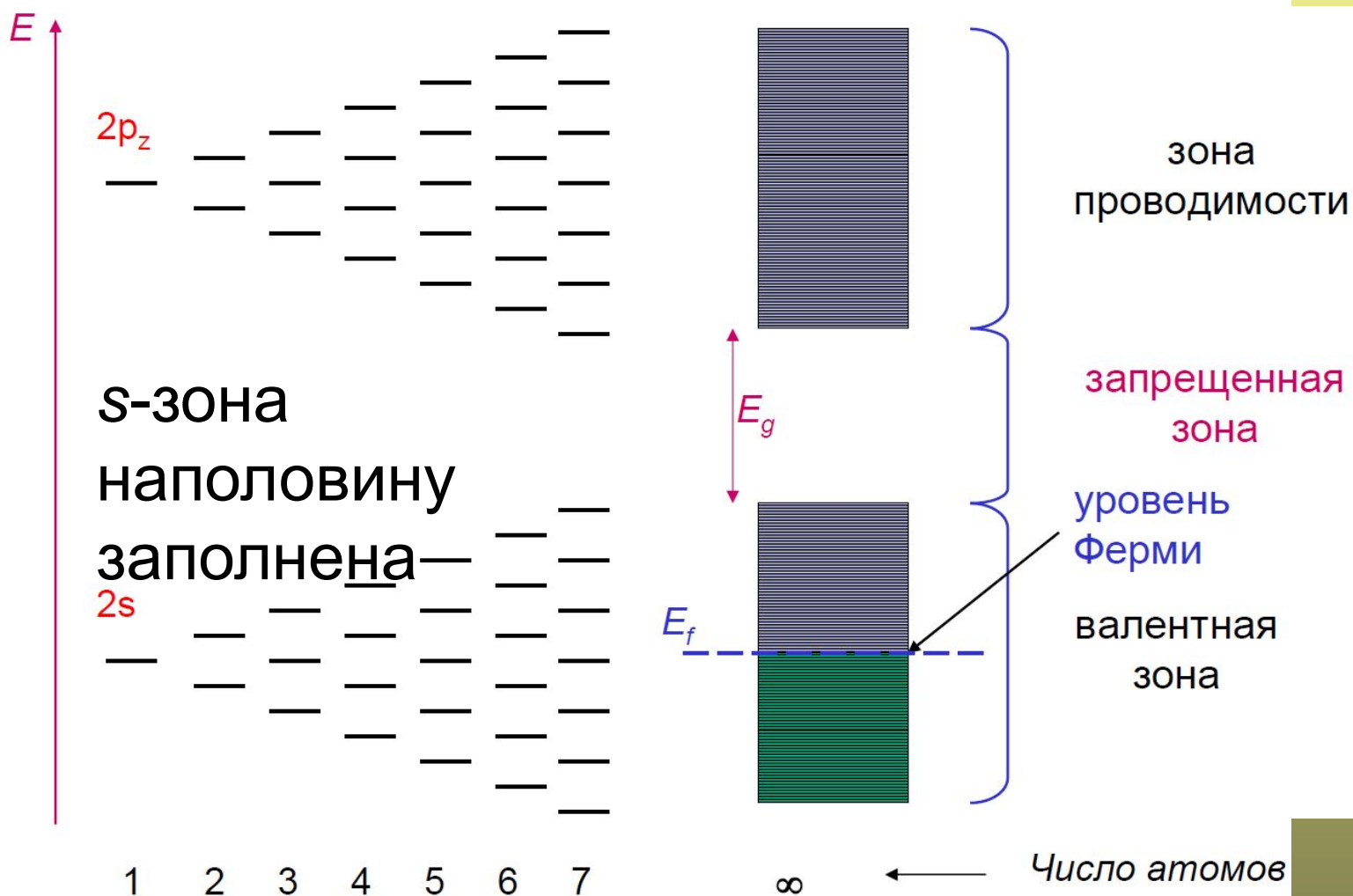
Если водород подвергнуть очень высокому давлению, он приобретает свойства металла. Сжатие водорода заставляет его молекулы сближаться друг с другом. Обычно пустые разрыхляющие молекулярные орбитали образуют зону проводимости с энергетическими уровнями, очень близкими к энергетическим уровням, очень близкими к энергетическим

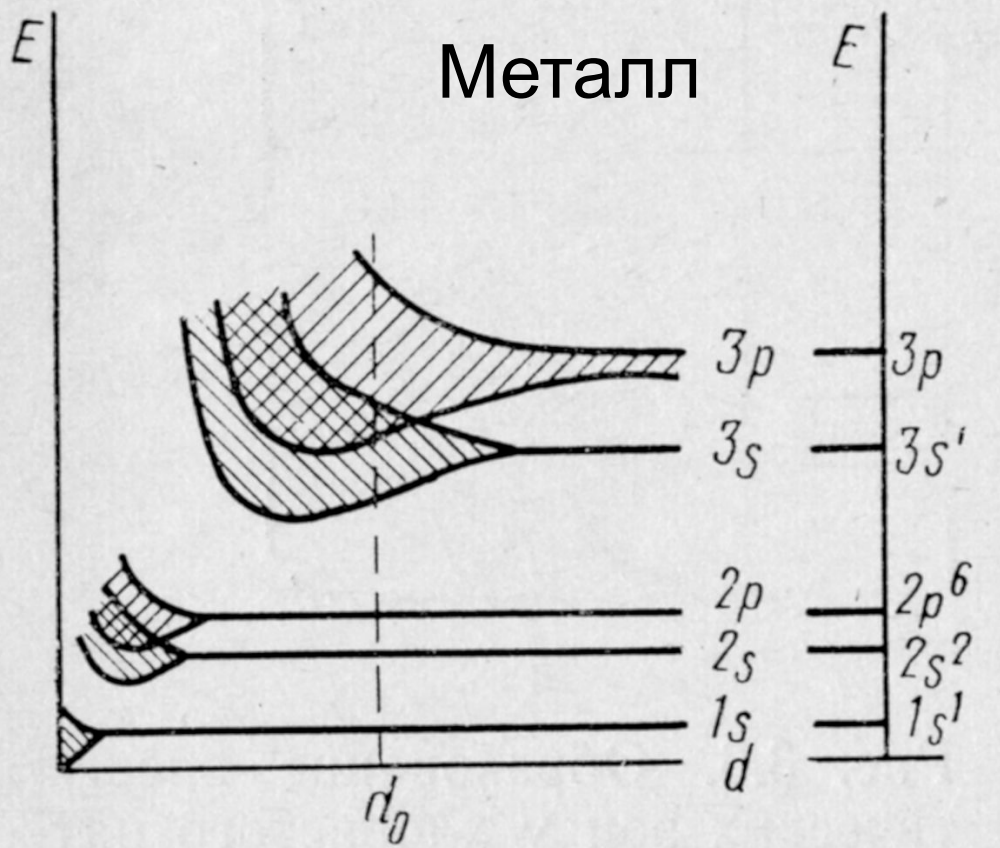


Зонная структура
металлического водорода.



Зонная структура лития: формирование



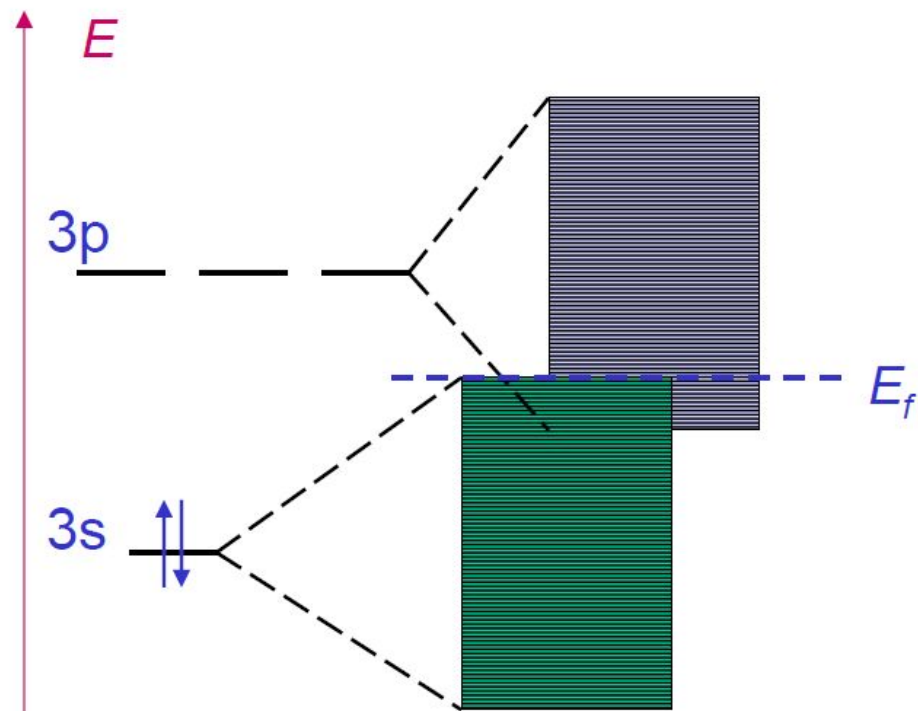


Na : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. При образовании твердого тела уровень $3s$ расщепляется в зону $3s$, в которой находится N электронов, заполняющих нижнюю половину зоны по два электрона на каждом уровне. Зона $3s^1$ перекрывается со свободной зоной $3p$, некоторые уровни зоны $3p$ оказываются расположенными в нижней половине зоны $3s$ и часть электронов зоны $3s$ располагается на уровнях зоны $3p$.

Образуется объединенная зона s-p, в которой может разместиться $8N$ электронов, а находится всего N электронов.

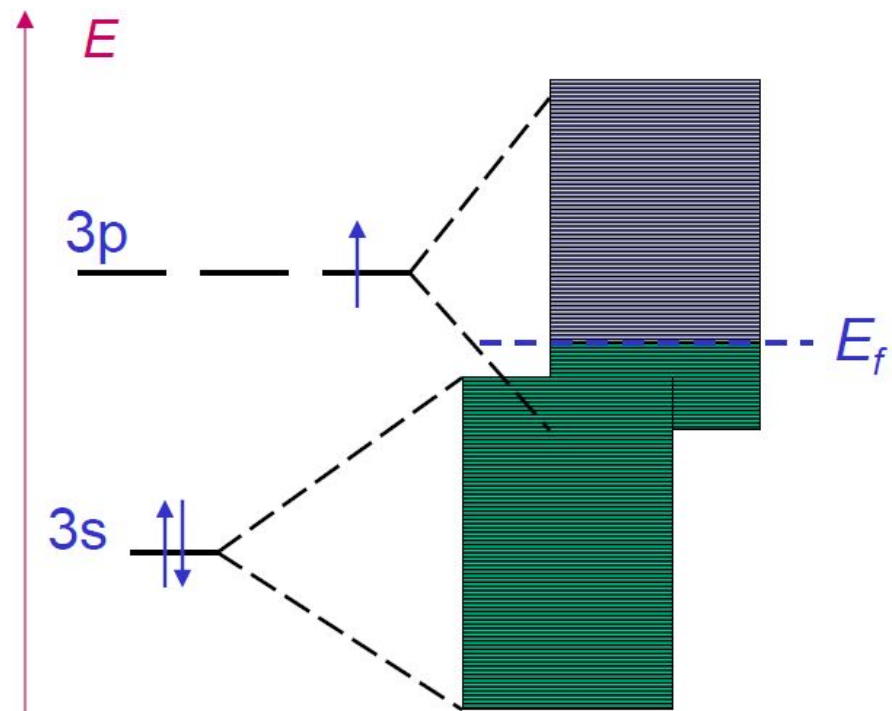
Металлами называют твердые тела, у которых разрешенная зона заполнена электронами не полностью, а если и полностью, то перекрывается со свободной зоной.

Mg



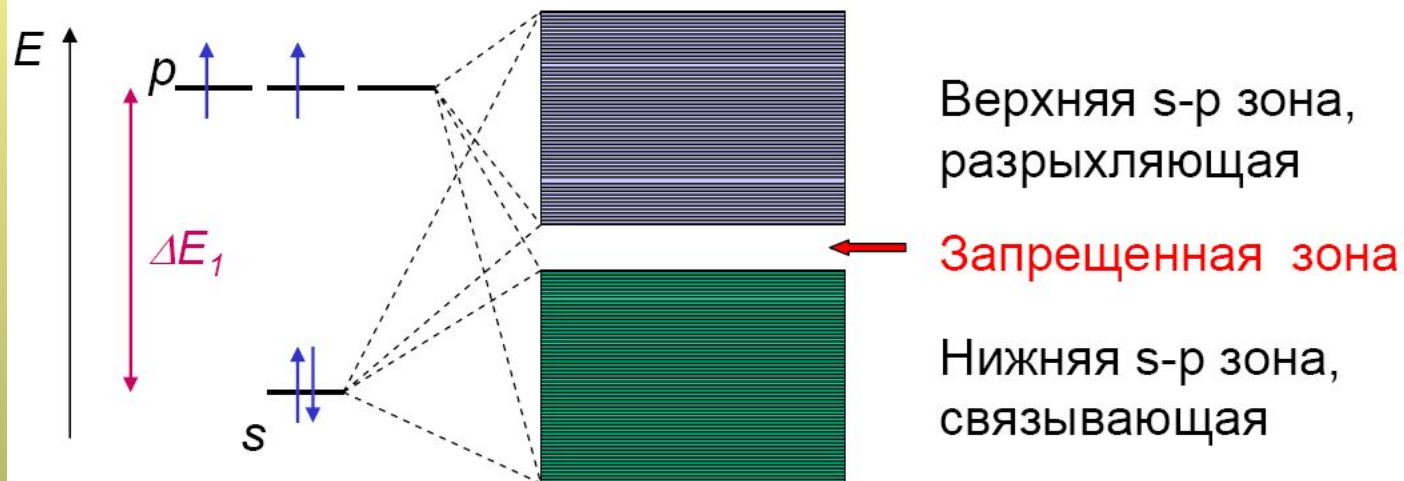
Mg: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^0$

Al

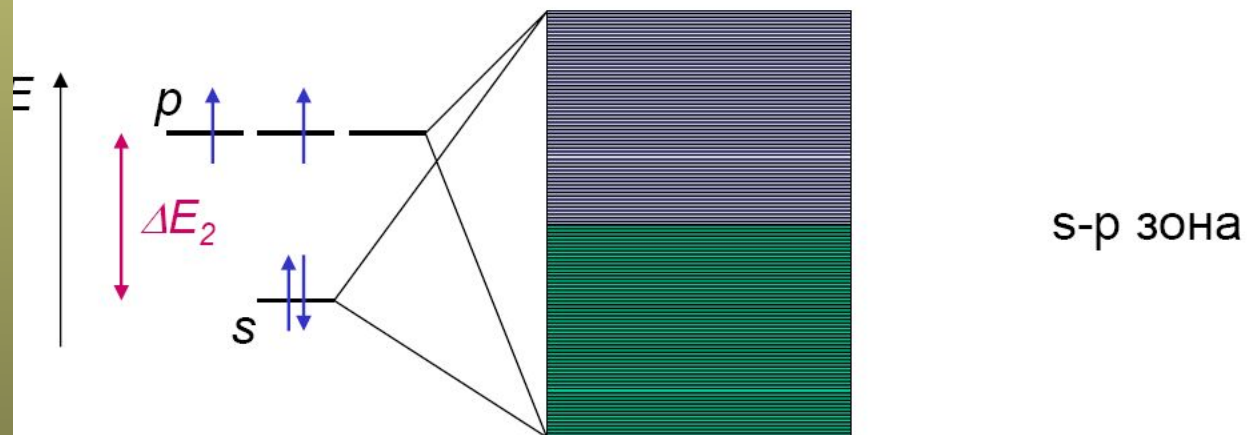


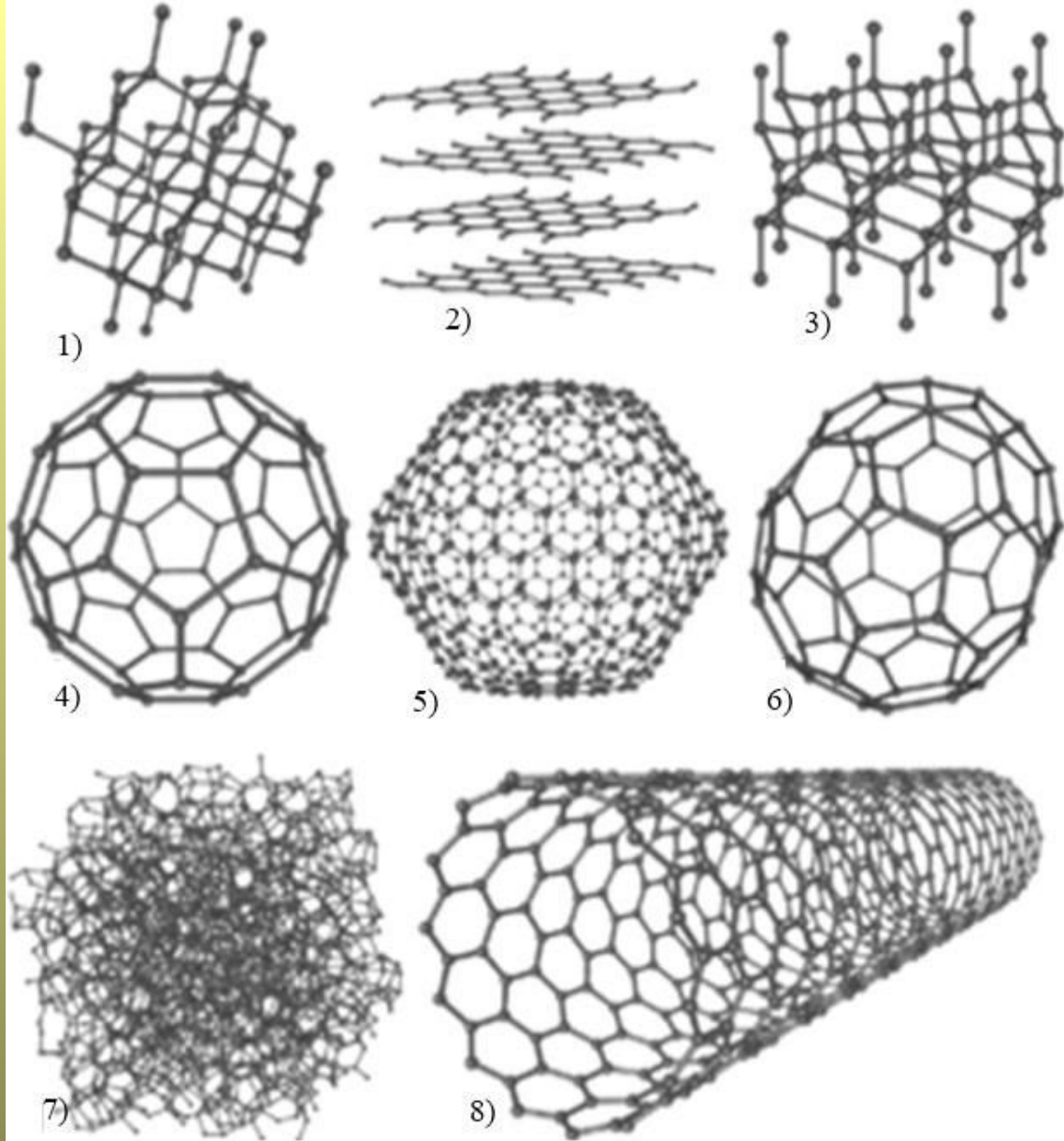
Al: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$

Элементы подгруппы углерода



$$\Delta E_1 > \Delta E_2$$

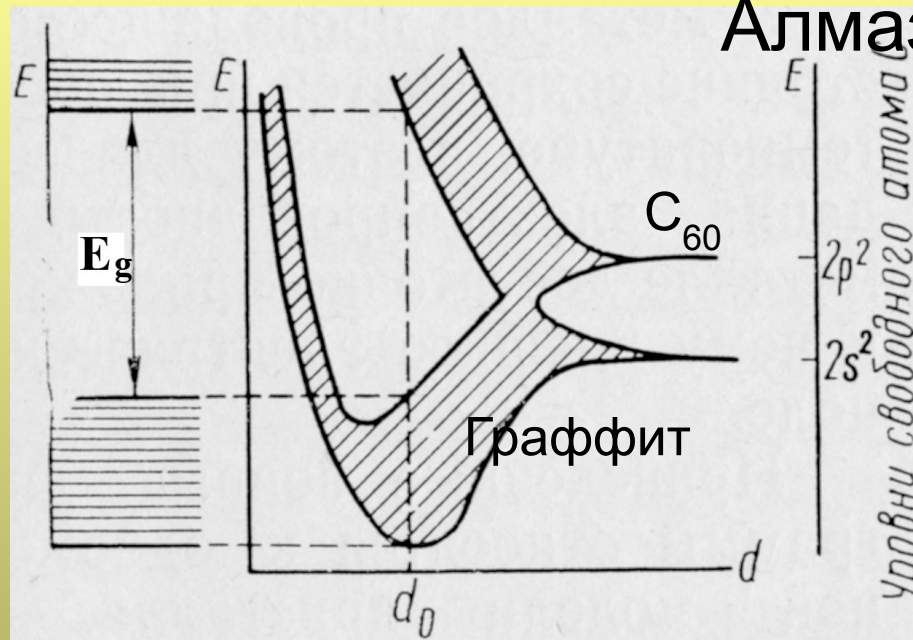




Схемы строения различных модификаций углерода: 1) алмаз, 2) графит, 3) лонсдейлит 4) фуллерен - C₆₀, 5) фуллерен – C₅₄₀, 6) фуллерен – C₇₀ 7) аморфный углерод, 8) углеродная нанотрубка.

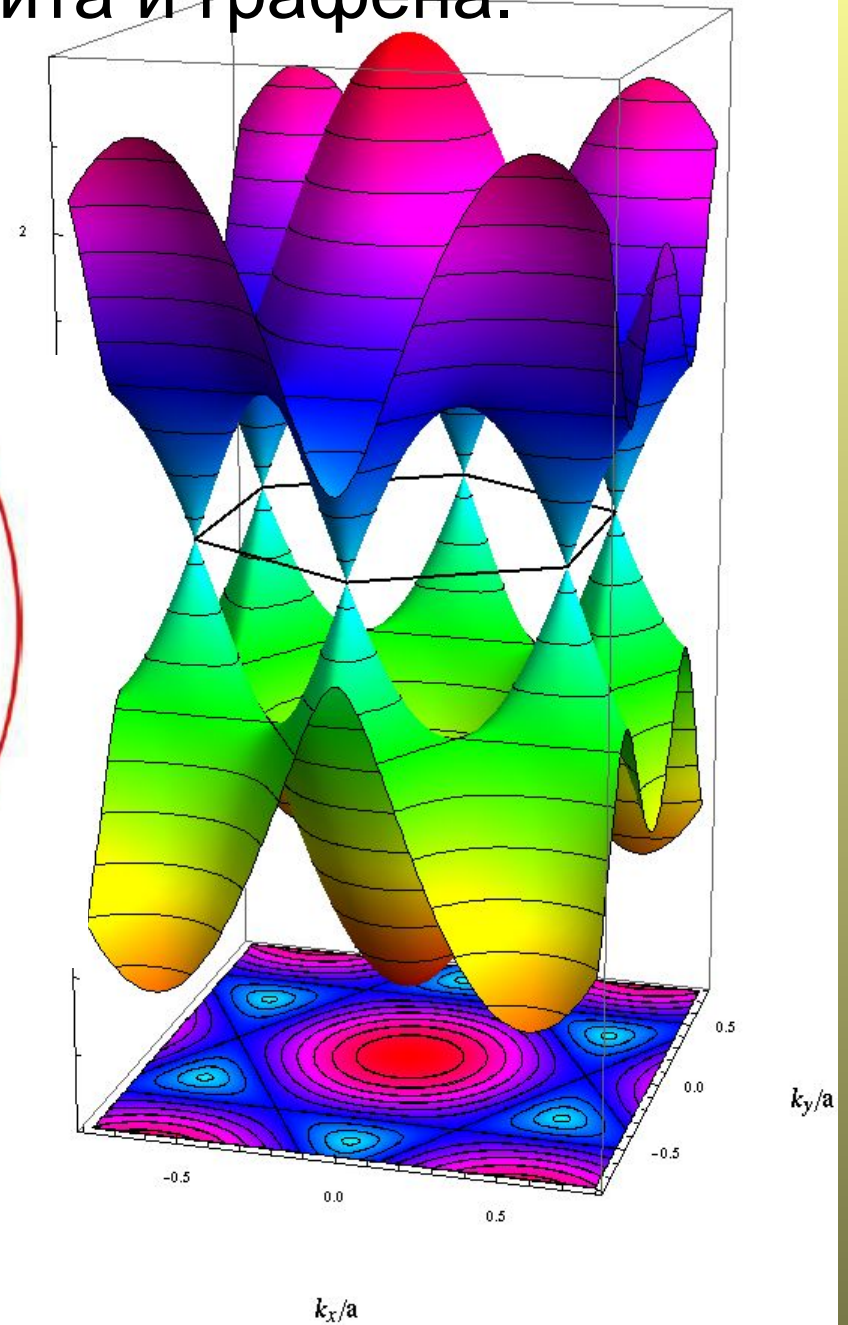
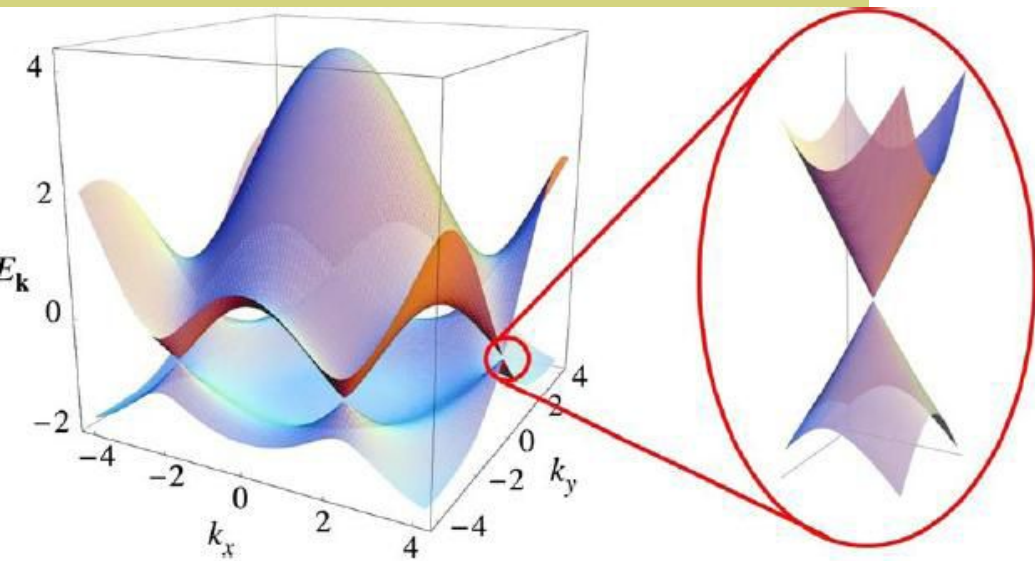
ДИЭЛЕКТРИКИ

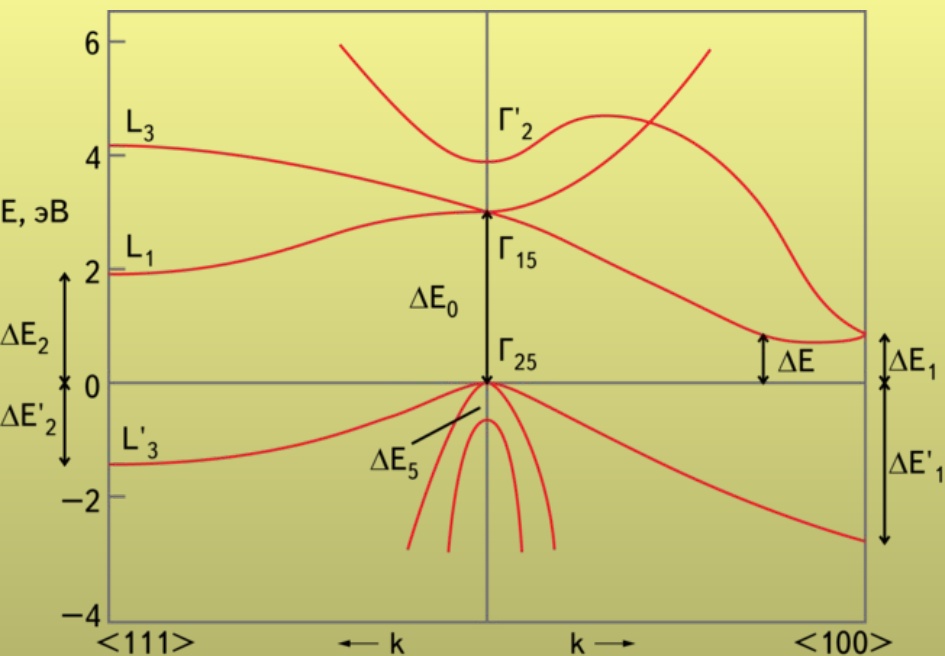
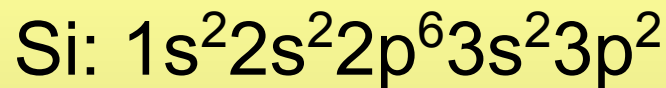
Алмаз



У атома углерода на последних энергетических уровнях $2s$ и $2p$ находится по два электрона. При сближении атомов углерода уровни $2s$ и $2p$ сначала расщепляются в отдельные зоны вместимостью $2N$ и $6N$ электронов соответственно, затем эти зоны сливаются в одну вместимостью $8N$ электронов, а при дальнейшем уменьшении расстояния до постоянной решетки эта зона распадается на две, в каждой из которых может находиться по $4N$ электронов, но одна из этих зон располагается энергетически значительно выше другой, поэтому $4N$ электронов состояний $2s$ и $2p$ целиком заполняют нижнюю зону, а верхняя остается свободной. Ширина запрещенной зоны ~ 6 эВ.

Зонная структура графита и графена.





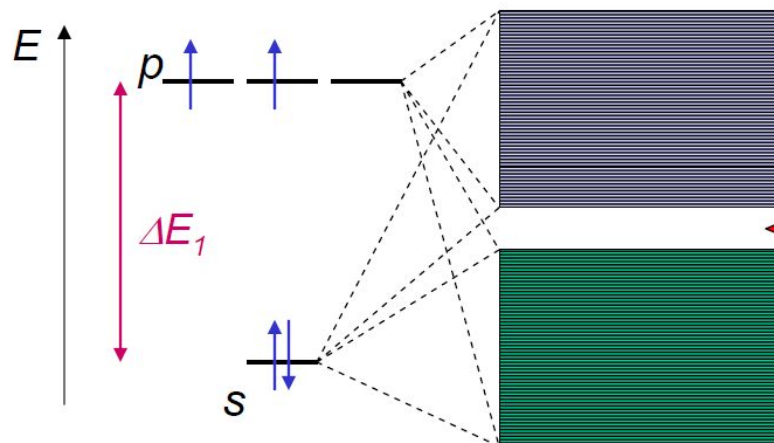
Схематическое изображение зонной структуры Si.

Ширины запрещенных зон равны:

$\Delta E = 1,12$ эВ, $\Delta E_0 = 3,4$ эВ, $\Delta E_5 = 0,035$ эВ,

$\Delta E_1 = 1,2$ эВ, $\Delta E'_1 = 3,1$ эВ,

$\Delta E_2 = 1,9$ эВ, $\Delta E'_2 = 2,2$ эВ.



Верхняя s-p зона,
разрыхляющая

← **Запрещенная зона**

Нижняя s-p зона,
связывающая

периоды	Периодическая система элементов Д. И. Менделеева						VII	VIII	ОБОЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТА	
1							1 1, 0079 ВОДОРОД	2 4, 0026 ГЕЛИЙ	Li 3 Атомный номер 6, 941 Атомный вес ЛИТИЙ название элемента -s-элемент -d-элемент -p-элемент	
2	Li ³ 6, 941 ЛИТИЙ	Be ⁴ 9, 01218 БЕРИЛИЙ	5 10, 81 B БОР	6 12, 011 C УГЛЕРОД	7 14, 0067 N АЗОТ	8 15, 994 O КИСЛОРОД	9 18, 99840 F ФТОР	10 20, 179 Ne НЕОН		
3	Na ¹¹ 22, 9897 НАТРИЙ	Mg ¹² 24, 305 МАГНИЙ	13 26, 9815 Al АЛЮМИНИЙ	14 28, 086 Si КРЕМНИЙ	15 30, 97376 P ФОСФОР	16 32, 06 S СЕРА	17 35, 453 Cl ХЛОР	18 39, 948 Ar АРГОН		
4	K ¹⁹ 39, 098 КАЛИЙ	Ca ²⁰ 40, 08 КАЛЬЦИЙ	Sc ²¹ 44, 9559 СКАНДИЙ	Ti ²² 47, 90 ТИТАН	V ²³ 50, 9414 ВАНАДИЙ	Cr ²⁴ 51, 996 ХРОМ	Mn ²⁵ 54, 9380 МАРГАНЕЦ	Fe ²⁶ 55, 847 ЖЕЛЕЗО	Co ²⁷ 58, 9332 КОБАЛЬТ	Ni ²⁸ 58, 71 НИКЕЛЬ
	29 63, 546 Cu МЕДЬ	30 65, 38 Zn ЦИНК	31 69, 72 Ga ГАЛИЙ	32 72, 59 Ge ГЕРМАНИЙ	33 74, 9216 As АРСЕН	34 78, 96 Se СЕЛЕН	35 79, 904 Br БРОМ	36 83, 80 Kr КРИПТОН		
5	Rb ³⁷ 85, 4678 РУБИДИЙ	Sr ³⁸ 87, 62 СТРОНЦИЙ	Y ³⁹ 88, 9059 ИТРИЙ	Zr ⁴⁰ 91, 22 ЦИРКОНИЙ	Nb ⁴¹ 92, 9064 НИОБИЙ	Mo ⁴² 95, 94 МОЛИБДЕН	Tc ⁴³ 98, 9062 ТЕХНЕЦИЙ	Ru ⁴⁴ 107, 07 РУТЕНИЙ	Rh ⁴⁵ 102, 9055 РОДИЙ	Rd ⁴⁶ 106, 4 ПАЛЛАДИЙ
	47 107, 868 Ag СЕРЕБРО	48 112, 40 Cd КАДМИЙ	49 114, 82 In ИНДИЙ	50 118, 37 Sn ОЛОВО	51 121, 75 Sb СУРЬМА	52 127, 60 Te ТЕЛЛУР	53 126, 9045 I ЙОД	54 131, 30 Xe КСЕНОН		
6	Cs ⁵⁵ 132, 9054 ЦЕЗИЙ	56 137, 34 Ba БАРИЙ	57 138, 9055 La ЛАНТАН	72 178, 49 Hf ГАФИЙ	73 180, 9479 Ta ТАНТАЛ	74 188, 85 W ВОЛЬФРАМ	Re ⁷⁵ 186, 2 РЕНИЙ	Os ⁷⁶ 190, 2 ОСМИЙ	Ir ⁷⁷ 192, 22 ИРИДИЙ	Pt ⁷⁸ 195, 08 ПЛАТИНА
	79 196, 9665 Au ЗОЛОТО	80 200, 59 Hg РТУТЬ	81 204, 37 Tl ТАЛИЙ	82 207, 2 Pb СВИНЕЦ	83 208, 9804 Bi ВИСМУТ	84 [209] Po ПОЛОНИЙ	85 [210] At АСТАТ	86 [222] Rn РАДОН		
7	Fr ⁸⁷ [233] ФРАНЦИЙ	Ra ⁸⁸ 226, 0254 РАДИЙ	Ac ⁸⁹ [227] АКТИНИЙ	Ku ¹⁰⁴ [261] КУРЧАТОВИЙ	105					
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ	R ₂ O	R O	R ₂ O ₃	R O ₂	R ₂ O ₅	R O ₃	R ₂ O ₇	R O ₄		
РЯД АКТИВНОСТИ МЕТАЛЛОВ	Li, K, Ba, Ca, Na, Mg, Al			Be, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Co, Ni, Sn, Pb			H ₂	Sb, Cu, Hg, Ag, Pt, Au		
TIER & OP										

Соединения A^{III}B^V – GaAs, InAs, GaP, A^{II}B^{VI} – ZnS, CdS, ZnTe
 AlGaInP – 0.6-0.8 мкм, AlGaAs – 0.7-0.9 мкм, InGaAsP – 1.0-1.65 мкм

Полупроводники и изоляторы

Типичные
изоляторы

E_g (эВ)

LiCl	9.5
NaCl	8.5
KCl	8.5
NaBr	7.5
KBr	7.5
BN (куб.)	6.4
C (алмаз)	6.0
AlN	5.8
KI	5.7

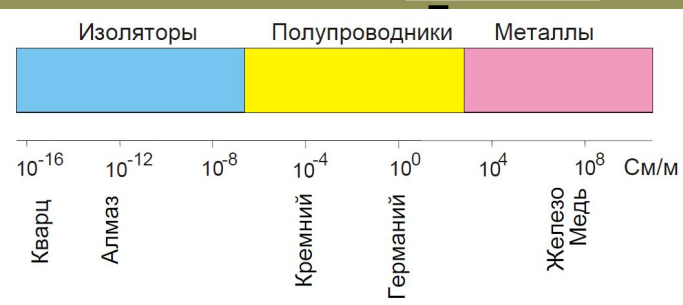
Типичные
полупроводники

E_g (эВ)

ZnS	3.8
ZnO	3.4
AlP	3.0
CdO	2.3
CdTe	1.5
GaAs	1.4
Si	1.1
Ge	0.7
PbTe	0.3

Зонная теория твёрдого тела

(Ф. Блох, Л. Бриллюэн – 1928-1934 гг.)



Шкала проводимости
симменс/м

В основу строгого определения полупроводников может быть положено заполнение электронами энергетических зон: полупроводники — это вещества, в которых при температуре $T = 0$ К над целиком заполненной зоной лежит пустая зона (т. е., в отличие от металлов, отсутствует поверхность Ферми), но в то же время зазор между этими зонами — так называемая запрещенная зона — достаточно мал (в отличие от диэлектриков), чтобы при представляющих интерес температурах количество электронов, «забрасываемых» тепловым движением в верхнюю (пустую при $T = 0$ К) зону, давало существенный вклад в проводимость и другие явления.

Заполненную при $T = 0$ К зону, в которой при $T > 0$ К образуется небольшое число пустых состояний — «дырок», принято называть **валентной зоной**, так как она (в терминах приближения сильной связи) образована электронами, определяющими валентность соответствующих атомов, а зону, пустую при $T = 0$ К, — **зоной проводимости**.

Полупроводники характеризуются следующими свойствами:

1. В чистом полупроводнике проводимость экспоненциально растет с температурой
2. В примесном полупроводнике проводимость сильно зависит от концентрации примесей.
3. Проводимость меняется при облучении полупроводника светом или электронами высокой энергии, а также при инжекции носителей тока из подходящего металлического контакта
4. В зависимости от характера легирования заряд может переноситься либо электронами, либо так называемыми положительно заряженными «дырками». В электрическом поле дырка движется так же, как позитрон.

Электрон проводимости - электрон полупроводников, энергия которого находится в частично заполненной энергетической зоне (зоне проводимости)

Дырка — квазичастица с положительным зарядом равным элементарному заряду в полупроводниках, энергия которой находится в заполненной энергетической зоне (валентной зоне)



Незаполненную валентную связь, которая проявляет себя как положительный заряд, равный заряду электрона, называют **дыркой проводимости или вакансией**. Возникновение в результате энергетического воздействия в полупроводнике пары электрон проводимости — дырка проводимости называется **генерацией пары носителей заряда**.

Нейтрализацию пары электрон проводимости — дырка проводимости называют *рекомбинацией носителей заряда*.

Носители заряда, возникновение которых явилось следствием тепловых колебаний кристаллической решетки полупроводника в условиях термодинамического равновесия, называют *равновесными носителями заряда*.

Электрический ток, возникающий в твердом теле под действием электрического поля, представляет собой направленный поток частиц— носителей заряда, который накладывается на хаотическое движение, совершаемое носителями заряда в отсутствие электрического поля.

При приложении внешнего электрического поля электроны приобретают некоторую направленную против поля скорость. Следовательно, электроны под действием приложенного поля, не переставая двигаться хаотически, смещаются в направлении против поля.

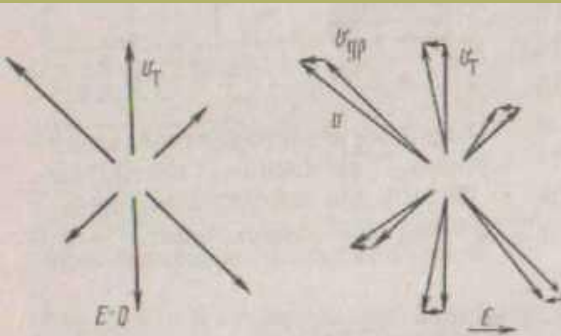


Рис. 4.1. Схема, иллюстрирующая возникновение электрического тока в твердом теле:

u_T — скорость теплового хаотического движения; $u_{др}$ — скорость дрейфа электрона, которую он приобретает на длине свободного пробега; u — результирующая скорость

**Гаркуша Ж.М. Основы физики полупроводников
— М.: Высш. школа, 1982. — 245 с, ил.**

Электропроводность полупроводников

Среднее значение скорости упорядоченного движения для одного электрона (с учетом соударений) будем обозначать через v , а среднее значение этой скорости для всей совокупности электронов — через $\langle v \rangle = v_d$.

$$v_d = \mu \mathcal{E}.$$

μ - дрейфовая подвижность
заряженных частиц

плотность электрического тока равна

$$\mathbf{j} = en v_d = en \mu \mathcal{E},$$

согласно закону Ома

$$\mathbf{j} = \sigma \mathcal{E},$$

где σ — удельная электропроводность вещества.

В анизотропных веществах

$$j_x = \sigma_{xx}\varepsilon_x + \sigma_{xy}\varepsilon_y + \sigma_{xz}\varepsilon_z,$$

$$j_y = \sigma_{yx}\varepsilon_x + \sigma_{yy}\varepsilon_y + \sigma_{yz}\varepsilon_z,$$

$$j_z = \sigma_{zx}\varepsilon_x + \sigma_{zy}\varepsilon_y + \sigma_{zz}\varepsilon_z.$$

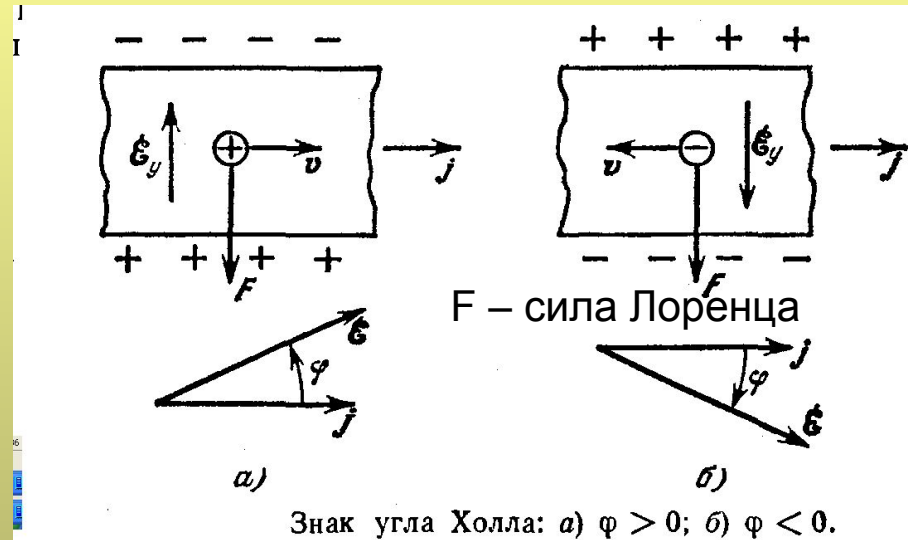
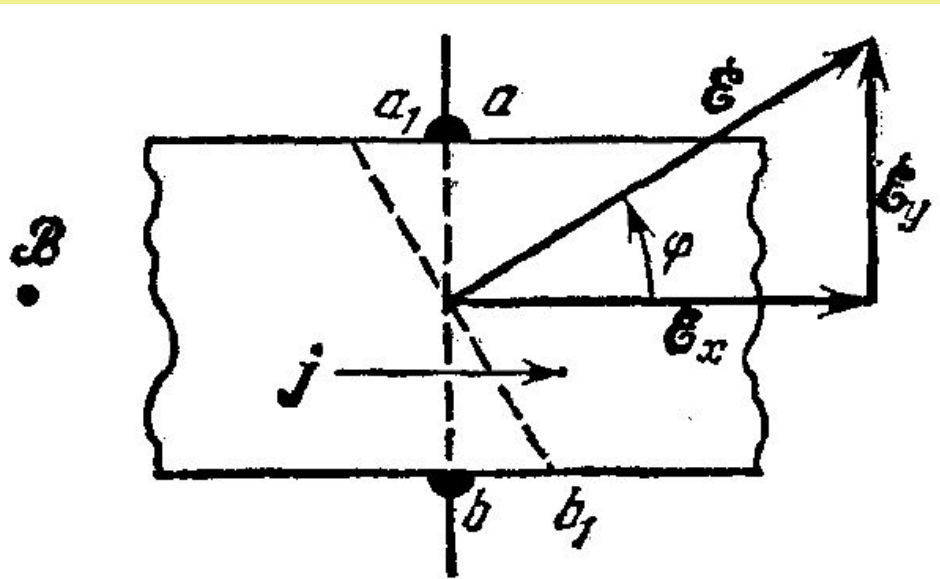
В сокращенном виде:

$$j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta}\varepsilon_\beta \quad (\alpha, \beta = x, y, z),$$

$\sigma_{\alpha\beta}$

- компоненты тензора второго ранга

Эффект Холла



$$\mathcal{E}_y = \frac{u}{d} = R \mathcal{B} j = R \mathcal{B} \frac{i}{ad}$$

Здесь d — толщина образца, a — его ширина (в направлении магнитного поля), i — полная сила тока, а R — коэффициент пропорциональности, который в слабых магнитных полях не зависит от магнитной индукции и характеризует только свойства вещества. Он получил название постоянной Холла.

$$\sigma_{xy} = -\sigma_{yx}, \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy}.$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\mathcal{E}_y}{\mathcal{E}_x} = -\frac{\sigma_{yx}}{\sigma_{yy}} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}}.$$

$$\mathcal{E}_y = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} j_x.$$

$$R = \frac{1}{\mathcal{B}} \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2}.$$

Изменение сопротивления в магнитном поле. Внешнее магнитное поле вызывает не только появление холловского поля $\mathcal{E}_y$, но изменяет также ток j_x . Это значит, что сопротивление проводника в поперечном магнитном поле изменяется. Опыт показывает, что в некотором интервале достаточно слабых магнитных полей изменения электропроводности $\Delta\sigma_{\perp}$ и удельного сопротивления $\Delta\rho_{\perp}$ подчиняются закону

$$-\frac{\Delta\sigma_{\perp}}{\sigma} = \frac{\Delta\rho_{\perp}}{\rho} = \kappa_{\perp} \mathcal{B}^2.$$

Здесь σ и ρ — значения при $\mathcal{B} = 0$, а $\kappa_{\perp}$ — «коэффициент поперечного магнетосопротивления», зависящий от свойств материала,

Эффект магнетосопротивления есть непосредственный результат того, что в магнитном поле электропроводность становится тензором. Поэтому магнетосопротивление можно выразить, как и угол Холла, через компоненты этого тензора. Полагая в соотношениях (1.5), как и раньше, $\mathcal{E}_z = j_y = 0$ и исключая из первых двух соотношений поле $\mathcal{E}_y$, получаем

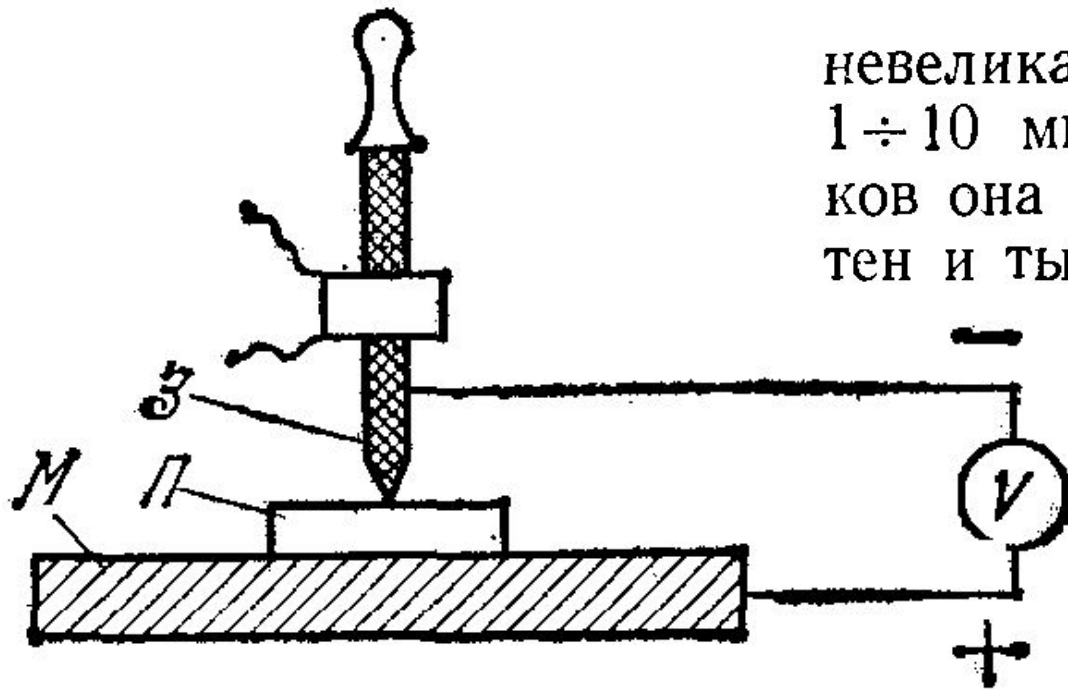
$$j_x = \left(\sigma_{xx} + \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_{xx}} \right) \mathcal{E}_x.$$

Удельная электропроводность в поперечном магнитном поле равна

$$\sigma_{\perp}(\mathcal{B}) = \frac{j_x}{\mathcal{E}_x} = \frac{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2}{\sigma_{xx}}.$$

Термоэдс (явление Зеебека)

Величина α у металлов невелика и обычно имеет порядок $1 \div 10$ мкВ/град. У полупроводников она может быть во много сотен и тысяч раз больше.



Термозонд. З — нагретый стержень, П — полупроводник, М — холодная металлическая пластина. Знак напряжения показан для положительных частиц.

$$dV_0 = \alpha \cdot dT.$$

Эффект Пельтье

Обратимое выделение тепла наблюдается также у границы контакта двух различных проводников. Количество тепла, выделяемое на единице площади контакта в единицу времени, Q_s , равно

$$Q_s = P_{12} \cdot j.$$

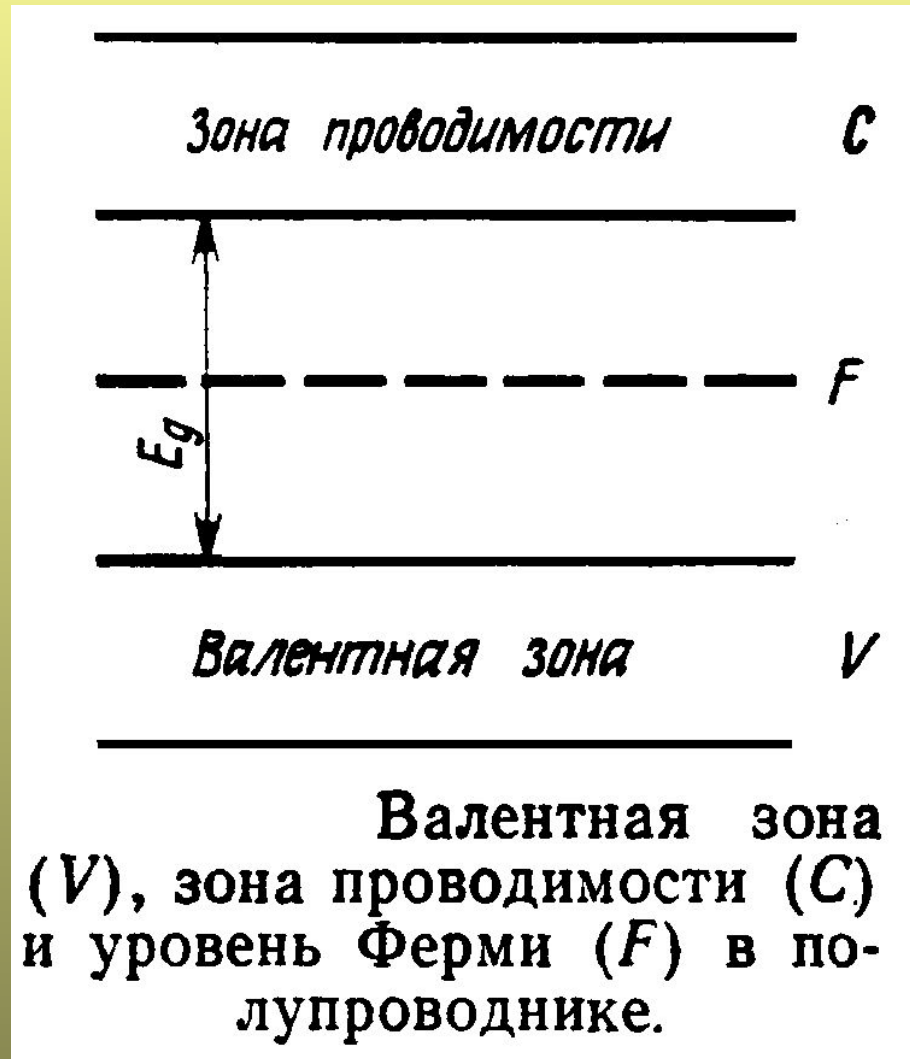
Здесь j — плотность тока через контакт, а P_{12} — коэффициент Пельтье, зависящий от свойств контактирующих проводников.

Причина выделения (поглощения) тепла Пельтье заключается в том, что средние энергии электронов E_1 и E_2 в различных проводниках 1 и 2 неодинаковы, даже если оба проводника имеют одну и ту же температуру. При переходе из одного проводника в другой изменяется, во-первых, потенциальная энергия электронов — $e\varphi$, так как на границе имеется скачок электростатического потенциала и поэтому $\varphi_1 \neq \varphi_2$. И, во-вторых, может меняться их средняя кинетическая энергия E_k . Последнее есть результат того, что электроны подчиняются не классической статистике Максвелла—Больцмана, а квантовой статистике Ферми—Дирака, согласно которой E_k зависит не только от температуры, но еще и от концентрации электронов. Поэтому при наличии тока для поддержания температуры контакта постоянной от него необходимо либо отводить энергию, если $E_1 > E_2$ (выделение тепла Пельтье), либо подводить ее к контакту, когда $E_1 < E_2$ (поглощение тепла Пельтье).

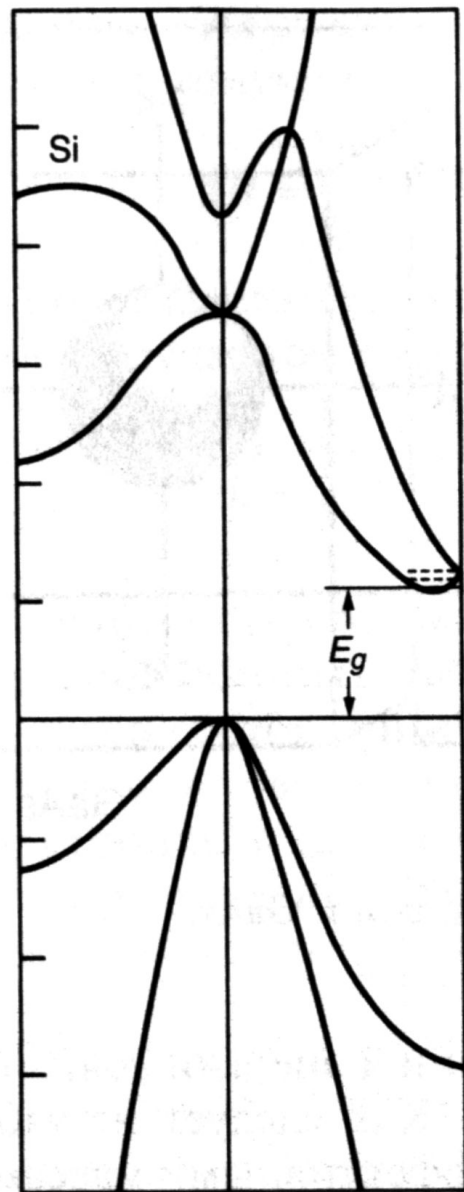
Эффект Пельтье



Зонная структура полупроводников

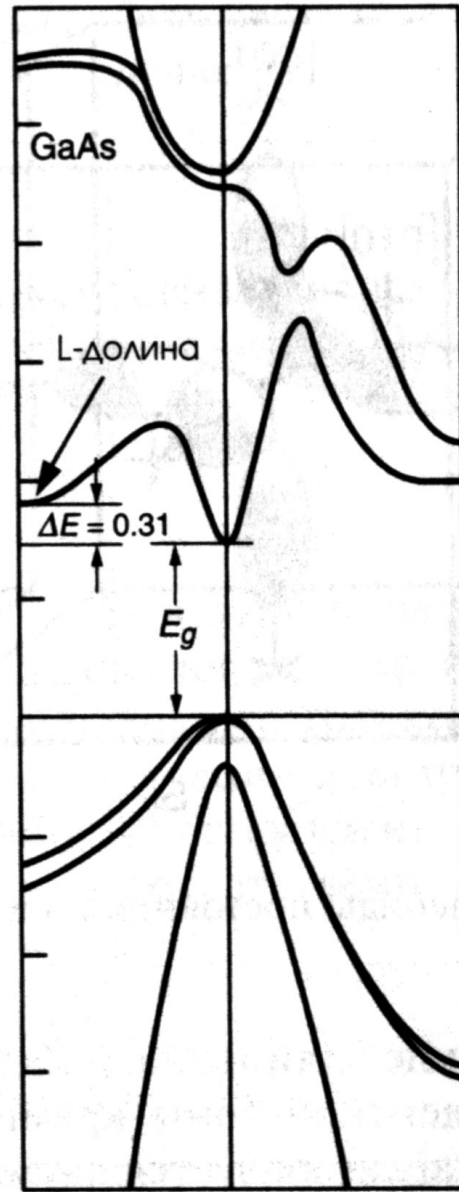


Прямая и непрямая запрещенные зоны



L [111] Γ [100] X

Волновой вектор



L [111] Γ [100] X

Волновой вектор

Эффективная масса носителей заряда

$$E(\mathbf{k}) = E_{\text{ext}} + \frac{\hbar^2}{2} (\mathbf{k} - \mathbf{k}_{\text{ext}})' \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{k} - \mathbf{k}_{\text{ext}})$$

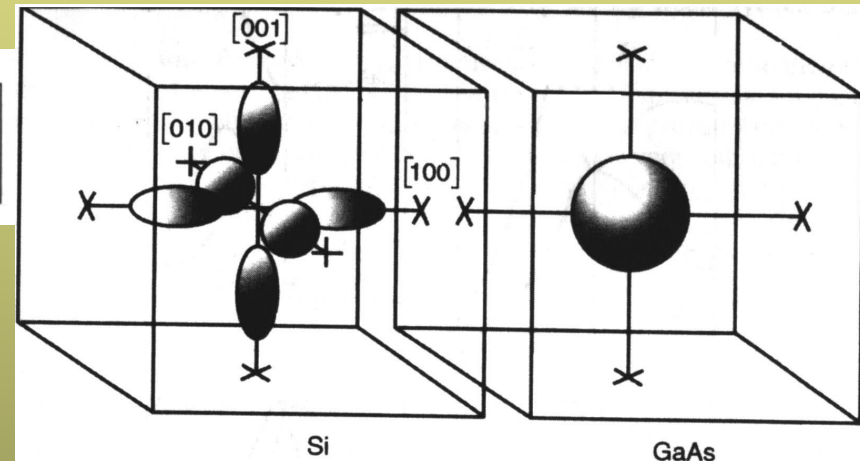
$(E = \hbar^2 k^2 / 2m)$ Для свободных электронов

$\mathbf{M}$ – матрица
эффективной массы

Эффективная масса > 0 , когда кривизна вверх
Эффективная масса < 0 , когда кривизна вниз

$$E(\mathbf{k}) = E_{\text{ext}} + \frac{\hbar^2}{2} \left[\frac{(k_1 - k_{\text{ext}, 1})^2}{m_1} + \frac{(k_2 - k_{\text{ext}, 2})^2}{m_2} + \frac{(k_3 - k_{\text{ext}, 3})^2}{m_3} \right]$$

$$E(\mathbf{k}) = E_c + \frac{\hbar^2}{2m_c} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c}$$



Эллипсоиды постоянной энергии в Si и GaAs.

Для большинства полупроводников валентные зоны вырождены при $\mathbf{k} = 0$. Причиной этого является преимущественно триплетная природа sp^3 -орбиталей, формирующих валентную зону. Однако вырождение снимается при $\mathbf{k} \neq 0$, что приводит к подзонам с различной кривизной. При этом подзоны с малой кривизной обладают большей эффективной массой. Такие подзоны называются подзонами *тяжелых дырок*. И напротив, подзоны с большей кривизной называются подзонами *легких дырок*.

Динамическая интерпретация эффективной массы

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sum_{\text{bands } m} \iiint a_m(\mathbf{k}) u_{m,\mathbf{k}}(\mathbf{r}) e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \frac{E(\mathbf{k})}{\hbar} t)} d^3 \mathbf{k}$$

$$v_g = d\omega/dk$$

$$\mathbf{v}_g = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} E$$

Работа, совершаемая внешней силой $\mathbf{F}$ в течение временного интервала dt равна:

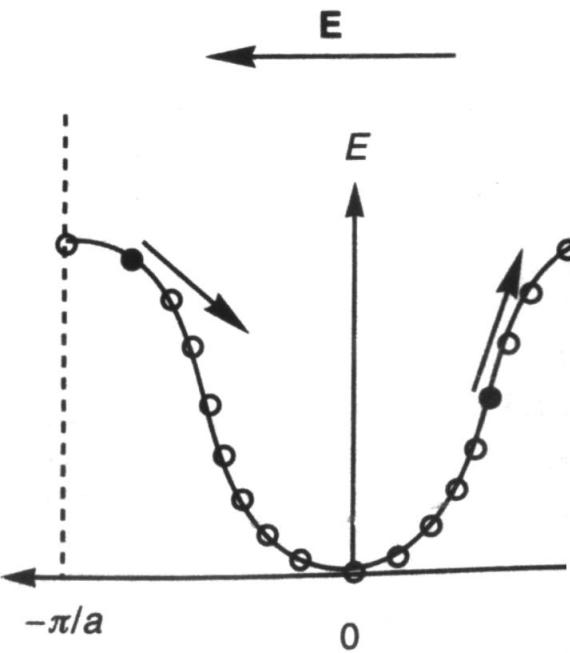
$$dE = -\mathbf{F} \cdot \mathbf{v}_g dt$$

при этом изменение энергии волнового пакета сопровождается также сдвигом среднего положения волнового пакета в зонной структуре и определяется соотношением:

$$dE = -\nabla_{\mathbf{k}} E d\mathbf{k} = -\hbar \mathbf{v}_g d\mathbf{k}$$

Рассмотрение показывает, что центр волнового пакета, подверженного воздействию силы $\mathbf{F}$, подчиняется таким образом соотношению:

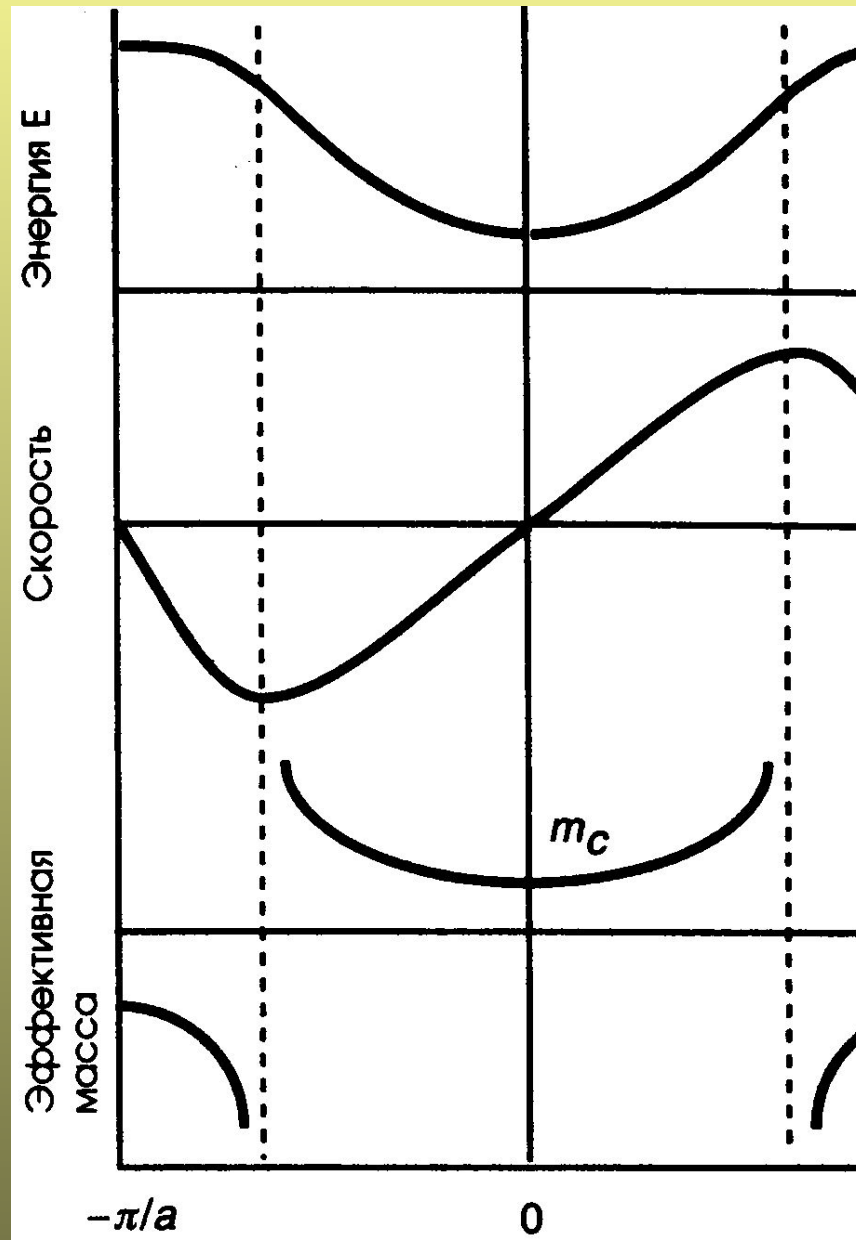
$$F = \hbar \frac{d\mathbf{k}}{dt}$$



Реакция волнового пакета может быть описана ньютоновской динамикой с заменой массы частицы на ее эффективную массу

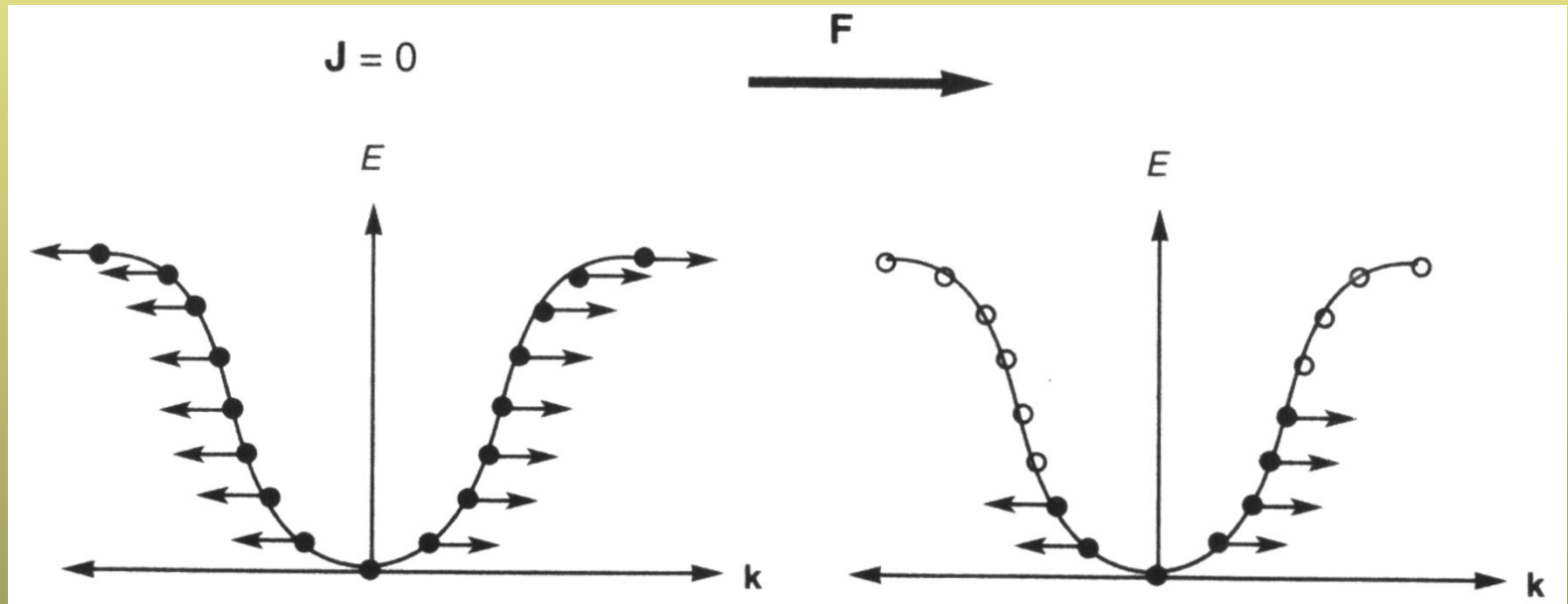
В отсутствие столкновений электроны под воздействием электрического поля будут циклично обращаться по зоне Бриллюэна периодическим образом. Это приводит к явлению, известному как блоховские осцилляции.

Связь между зонной структурой, групповой скоростью и эффективной массой



$$\mathbf{J} = -g \langle \mathbf{v}_g \rangle = -2q \iiint_{\text{Brillouin zone}} \frac{d^3 \mathbf{k}}{(2\pi)^3} \frac{1}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} E$$

$$\mathbf{J} = -\frac{g}{4\pi^3 \hbar} \iiint_{\text{Brillouin zone}} \nabla_{\mathbf{k}} E d^3 \mathbf{k}$$



В полностью заполненной зоне электрические токи, возникающие с участием заполненных состояний при $\mathbf{k}$ и $-\mathbf{k}$ будут компенсироваться. В частично незаполненной зоне электроны под воздействием силы $\mathbf{F}$ приобретают скорость $\mathbf{v}$. Таким образом, электроны переносятся вдоль оси симметрии, при этом полный баланс скоростей является ненулевым. Таким образом, такая неполная зона может быть проводящей.

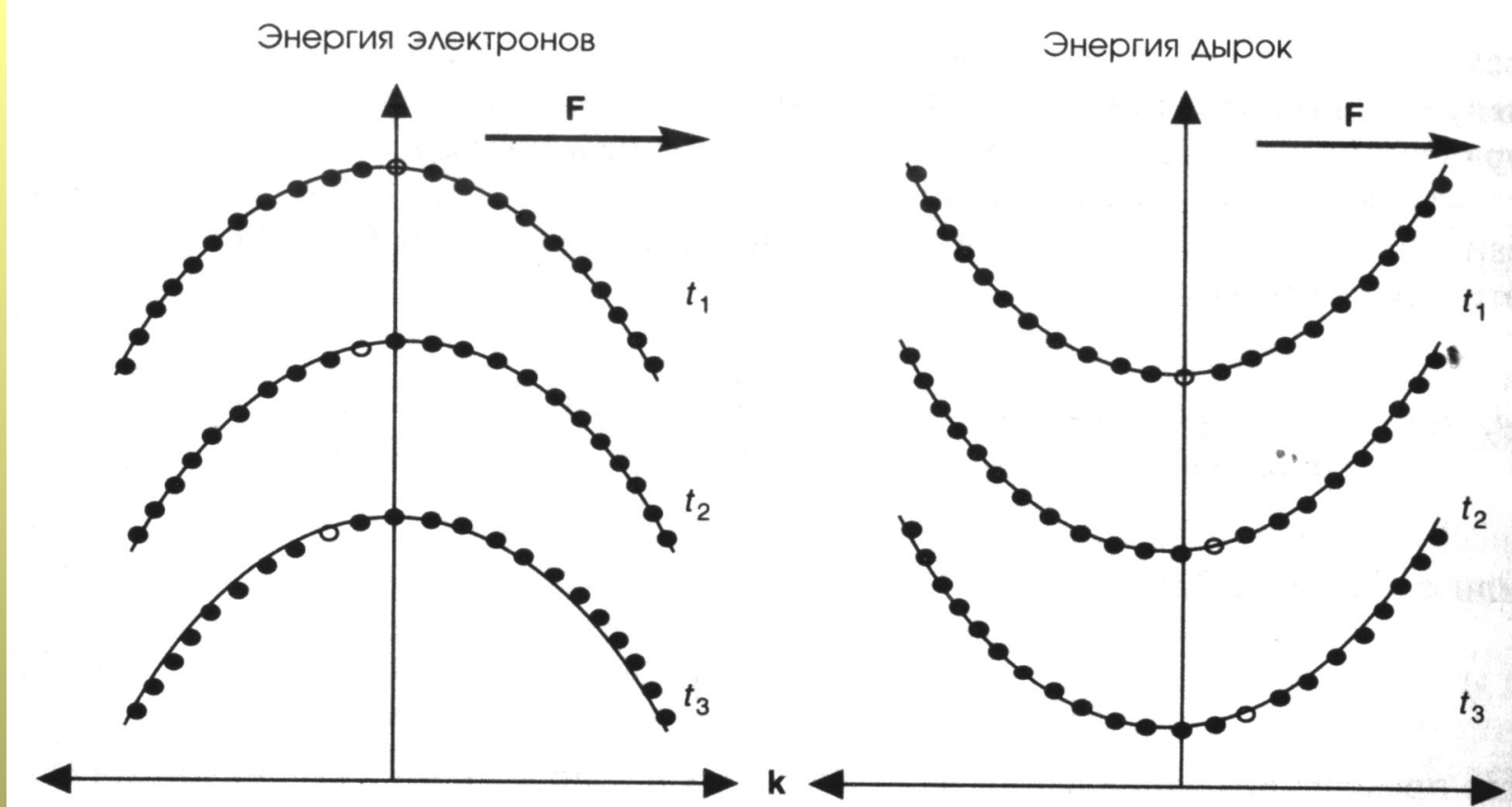


Рисунок слева представляет электроны в валентной зоне как частицы с отрицательным зарядом и эффективной массой. Под влиянием электрического поля электроны переносятся в направлении состояний с отрицательными значениями k . При определении дырки при $-k$ может рассматриваться как отсутствие электрона, при k дырка может рассматриваться как квазичастица с положительными зарядом и массой ($q = e$).

Статистика носителей заряда в полупроводниках

Статистика Ферми и уровень Ферми

Статистика Ферми-Дирака
Распределение вероятности
заполнения

$f(E)$ состояния с энергией E

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

$$f = 1 \quad \text{при} \quad E < F$$

$$f = 0 \quad \text{при} \quad E > F$$

$$n = N_c F_{1/2}\left(\frac{E_F - E_c}{kT}\right)$$

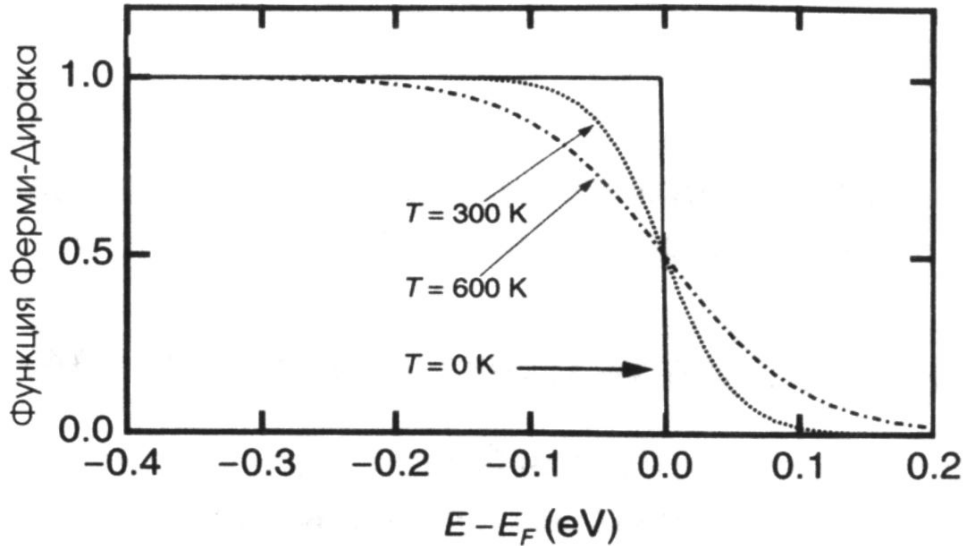
$$N_c = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_c^* kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$n = \int_{E_c}^{\infty} \rho_c(E) f(E) dE$$

$$F_{1/2}(u) = \frac{1}{\Gamma(3/2)} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2}}{1 + e^{(x-u)}} dx$$

По определению, уровень Ферми есть химический потенциал частиц в системе. Он описывает количество энергии, которое должно быть потрачено для того, чтобы добавить одну частицу (расположенную изначально далеко) в систему. При *термодинамическом равновесии* этот химический потенциал одинаков для всех частиц и идентичен по всей структуре.

Статистика Ферми и уровень Ферми



$$n = \int_0^{E_F} \rho_c(E) dE = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_0^{E_F} (E - E_c)^{1/2} dE$$

Для вырожденной системы

$$n = \frac{1}{3\pi^2} \left(\frac{2m_c}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_f - E_c)^{3/2}$$

$$n = \int_0^{\infty} \rho(E) e^{(E - E_F)/kT} dE = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{(E_F/kT)} \int_0^{\infty} (E - E_c)^{1/2} e^{-(E/kT)} dE$$

$$n = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

Концентрация электронов и уровень Ферми для невырожденной системы

$$f_v(E) = 1 - f_c(E) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} = \frac{1}{1 + e^{-(E - E_F)/kT}}$$

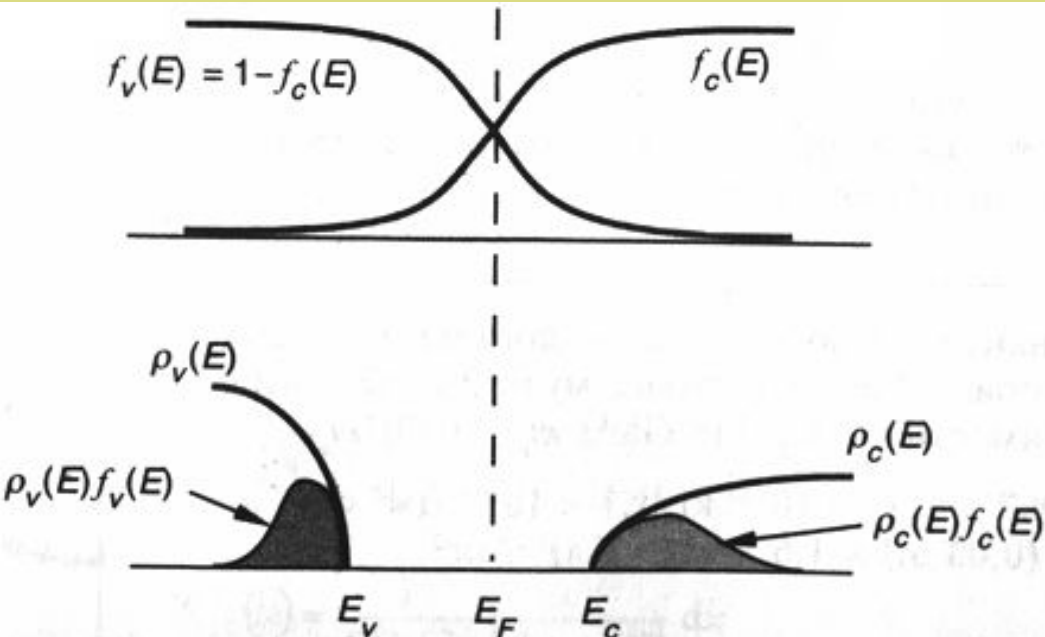
Статистика Ферми—Дирака для дырок

Способ расчета концентрации носителей в полупроводниковых зонах

В больцмановском режиме концентрация дырок в валентной зоне связана с уровнем Ферми соотношением:

$$p = \int_0^{\infty} \rho(E) e^{-(E-E_F)/kT} dE = N_v e^{-(E_F-E_v)/kT}$$

$$N_v = \frac{1}{4} \left(\frac{2m_v^* kT}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$



$$N_c = 2,5 \times 10^{19} \left(\frac{m_c^*}{m_e} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 2,5 \times 10^{19} \left(\frac{m_v^*}{m_e} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \text{ см}^{-3}$$

В случае GaAs при 300 К $m_c^* = 0,067$ и $m_v^* = 0,64$, что приводит к:

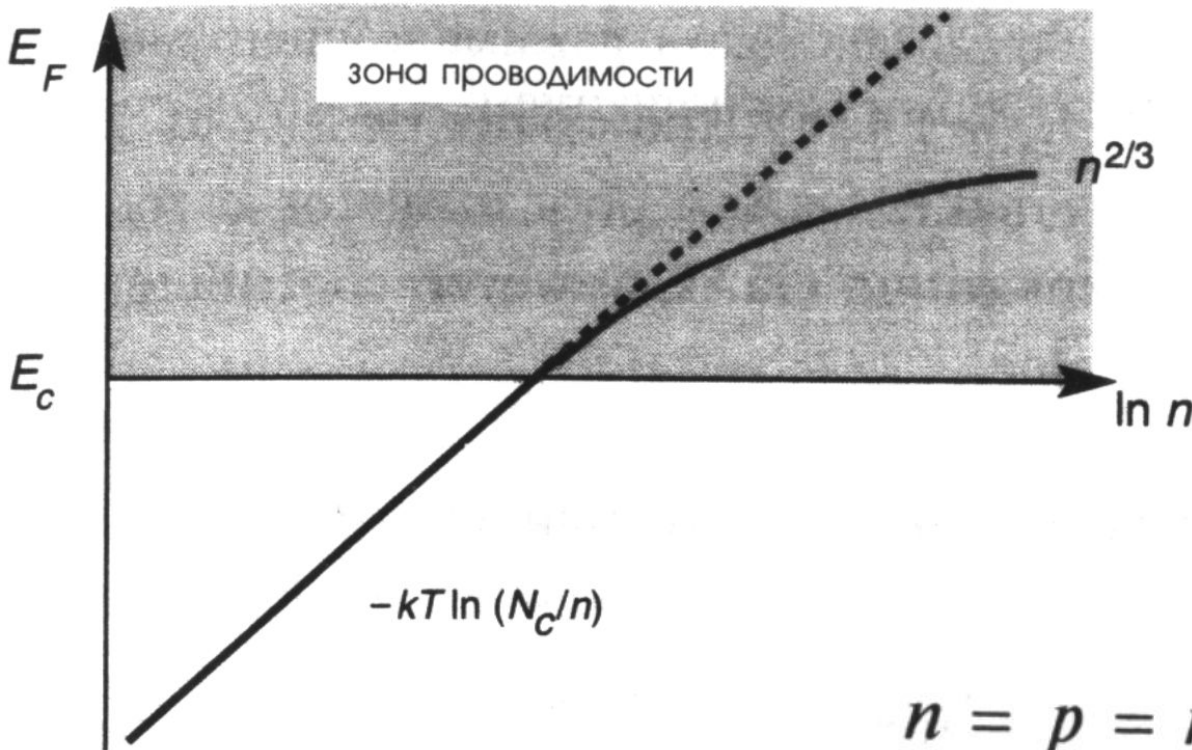
$$N_c = 4,3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

$$N_v = 1,3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

При условии, что концентрации электронов и дырок известны, для расчета положения уровня Ферми

$$E_F = E_c - kT \ln \frac{N_c}{n} = E_v + kT \ln \frac{N_v}{p}$$

Поведение уровня Ферми в функции концентрации свободных носителей n .



Закон действующих масс
для полупроводников

$$np = N_c N_v e^{-E_g / kT}$$

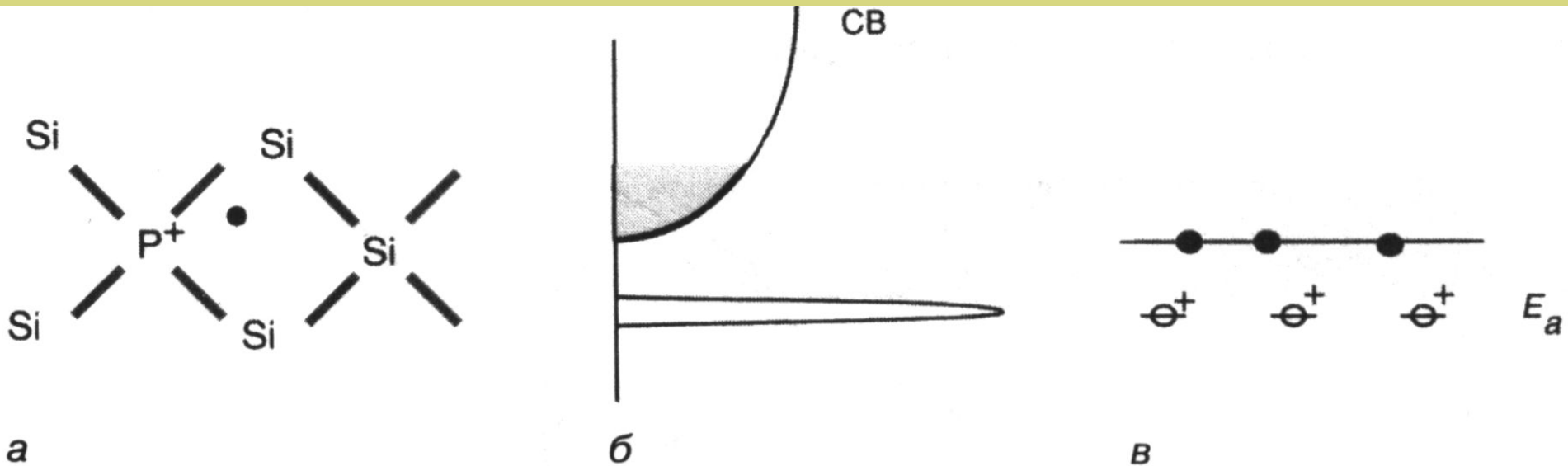
Собственная концентрация
носителей

$$n = p = n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-(E_g / 2kT)}$$

При концентрации носителей, превышающей эффективную плотность состояний N_c , полупроводник становится вырожденным, при этом его положение, как и в металлах, изменяется как $n^{2/3}$.

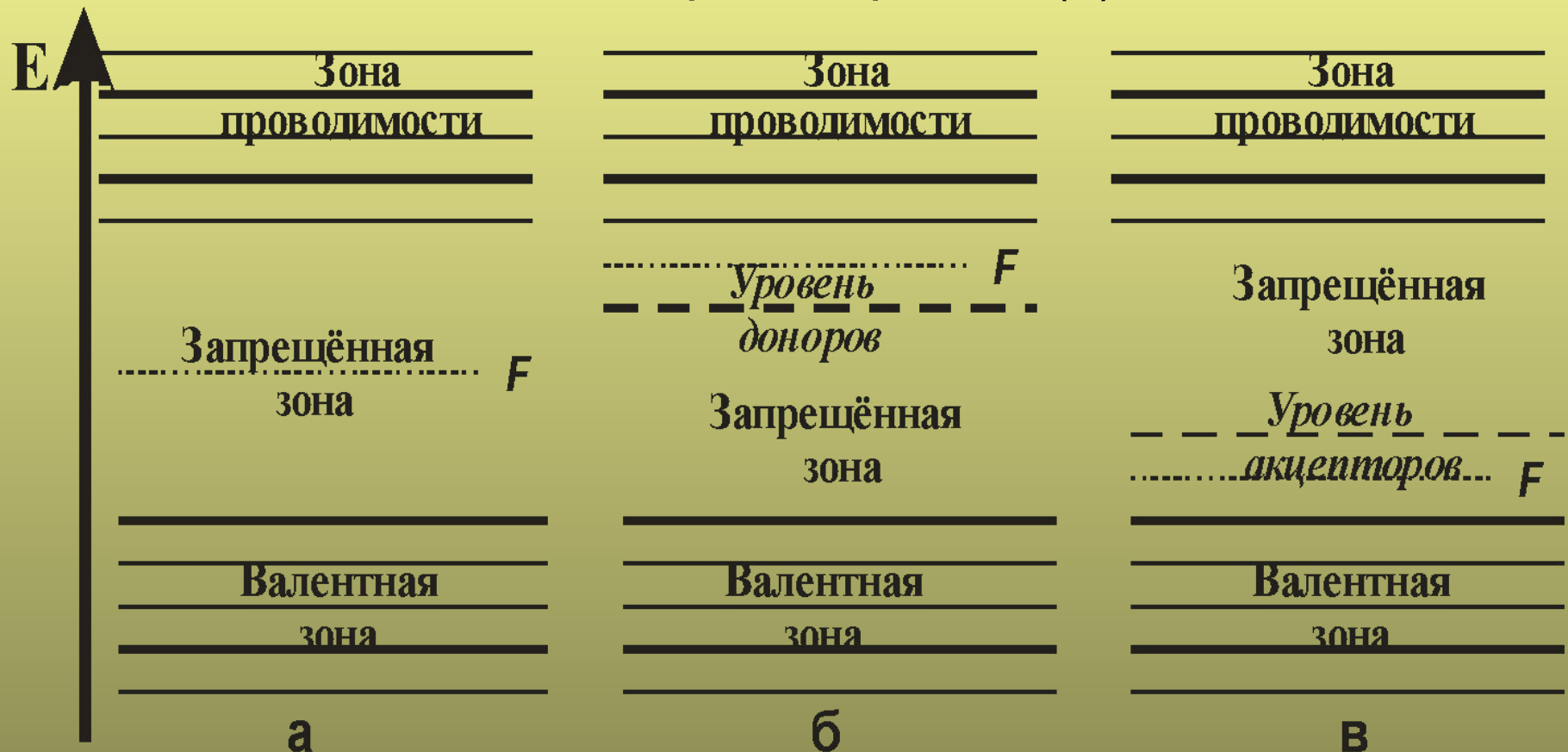
Можно показать, что эти типы примесей (доноры и акцепторы) ведут себя как водородоподобные примесные центры, связывающие электроны и дырки кулоновским потенциалом с характеристической энергией ионизации:

$$E_{\text{ion}} = \frac{m^* q^4}{8 \epsilon_R^2 \epsilon_0^2 h^2} \cong \frac{m^*}{m_e \epsilon_R^2} \times 13,6 \text{ эВ}$$



Пятивалентная примесь такая, как фосфор, введенная механизмом замещения в решетку кремния, гибридизируется с тетрагонально расположенными соседними атомами и высвобождает избыточный электрон в решетку как свободную частицу (а). Это состояние приводит к возникновению донорного состояния, расположенного в нескольких десятках мэВ ниже зоны проводимости (б).

Полупроводники с собственной (а) и примесной проводимостью: донорной – n-типа (б) и акцепторной – р-типа (в)



а – собственный полупроводник, б – полупроводник n-типа, в – полупроводник p-типа.
 F – уровень Ферми

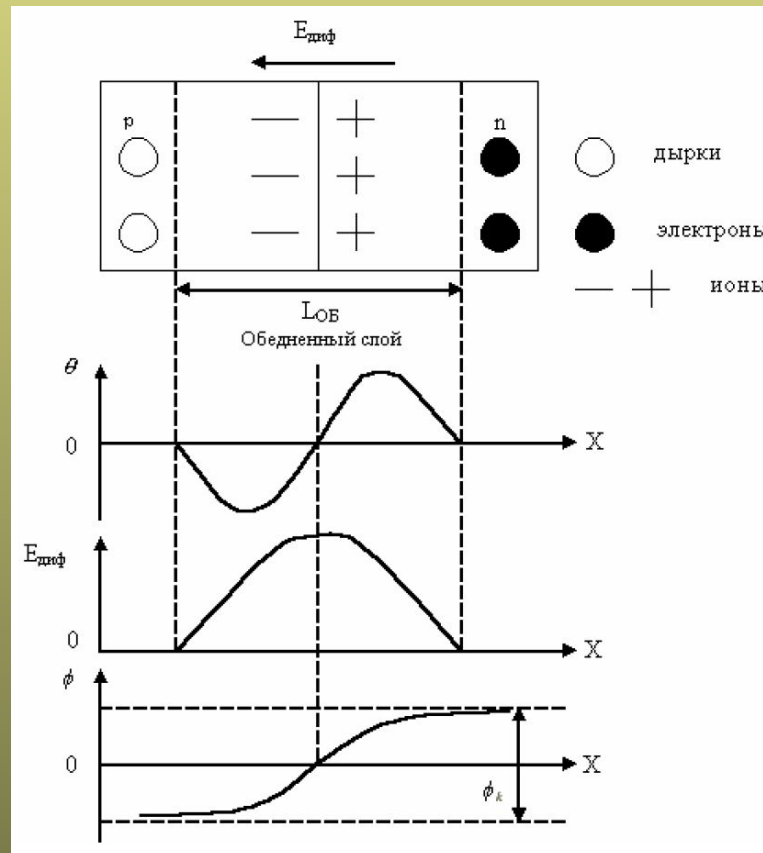
Примесные атомы – доноры: отдают электроны в зону проводимости.
Доноры в GaAs: Si, Ge, Te,...

Примесные атомы – акцепторы: захватывают электроны из валентной зоны и создают там дырки.
Акцепторы в GaAs: Cd, Mg, Be, Pb,...

В случае большой концентрации примесей (10^{18} - 10^{19} См⁻³ и более) примесные уровни расщепляются и образуют примесную зону. Обычно она сливается с ближайшей разрешенной зоной полупроводника. Получившаяся зона не полностью заполнена электронами, что соответствует структуре металла.

Сильно легированные полупроводники называются вырожденными или полуметаллами. Донорные и акцепторные уровни называют мелкими, имея в виду их малую удаленность от соответствующих разрешенных зон: $\Delta = (0,01 \dots 0,05)$ эВ и $\Delta = - (0,01 \dots 0,05)$ эВ. Существуют примеси, характеризующиеся глубокими уровнями, расположенными вблизи середины запрещенной зоны. Например, в кремнии глубокие уровни характерны для атомов золота (Au), меди (Cu), никеля (Ni).

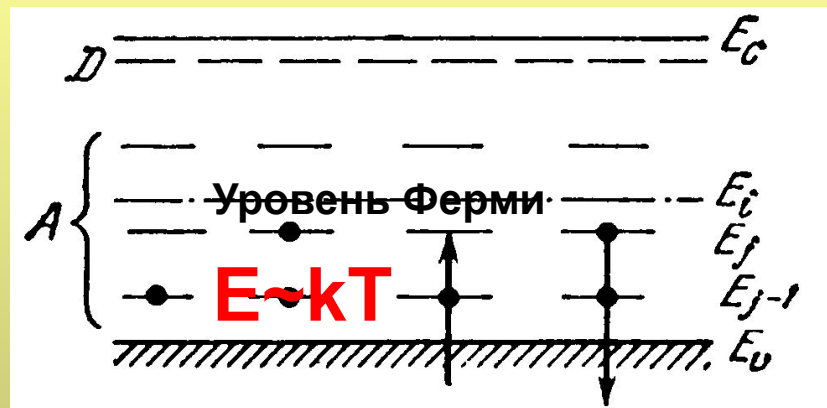
Электронно-дырочный переход (р-n-переход) – это переходный слой между двумя областями полупроводника с разной электропроводностью, в котором существует диффузионное электрическое поле



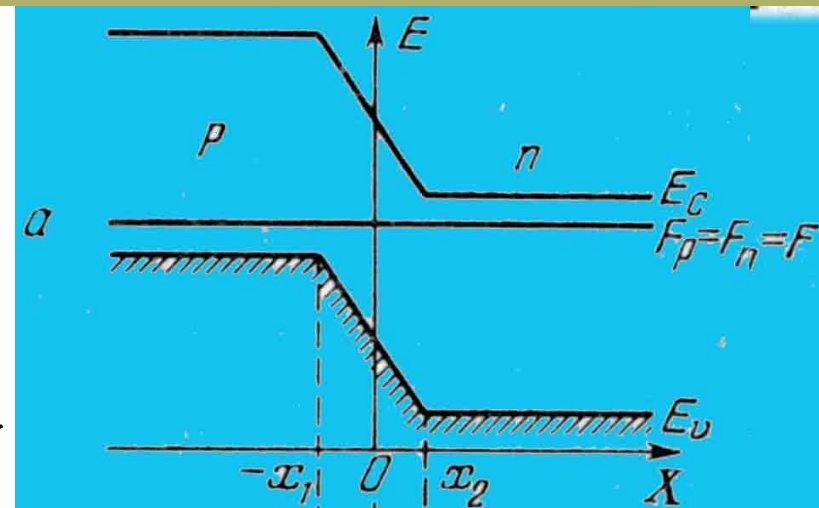
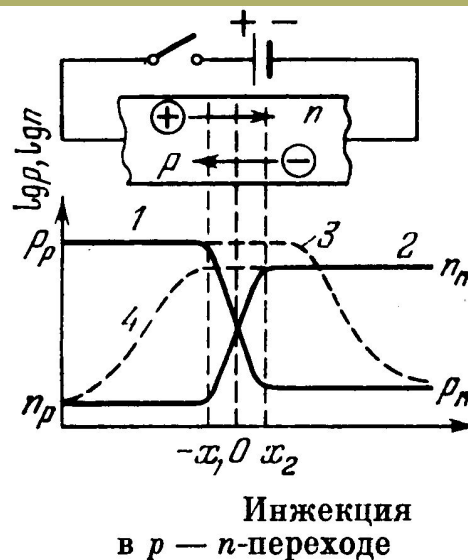
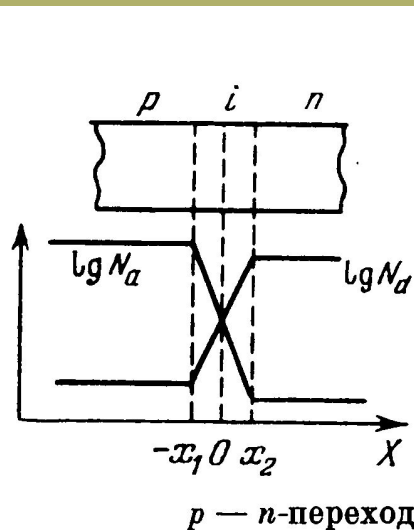
Полупроводниковый диод



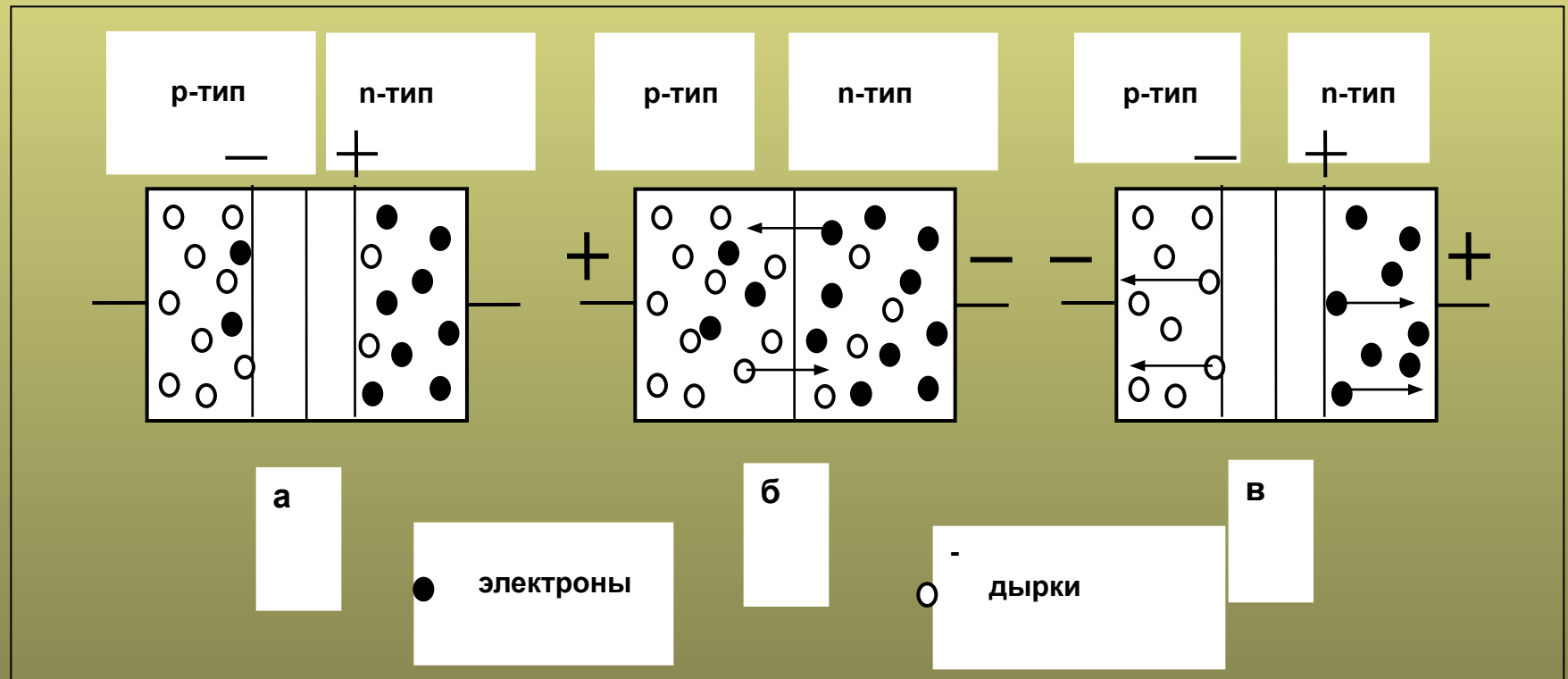
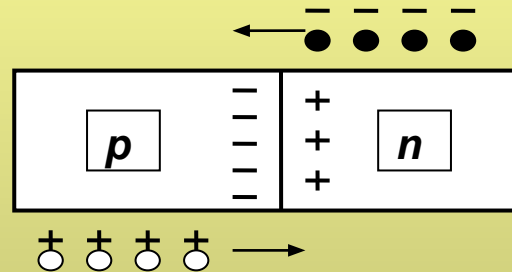
Частично компенсированные многозарядные доноры
Полупроводник n-типа



Частично компенсированные многозарядные акцепторы. Полупроводник p-типа

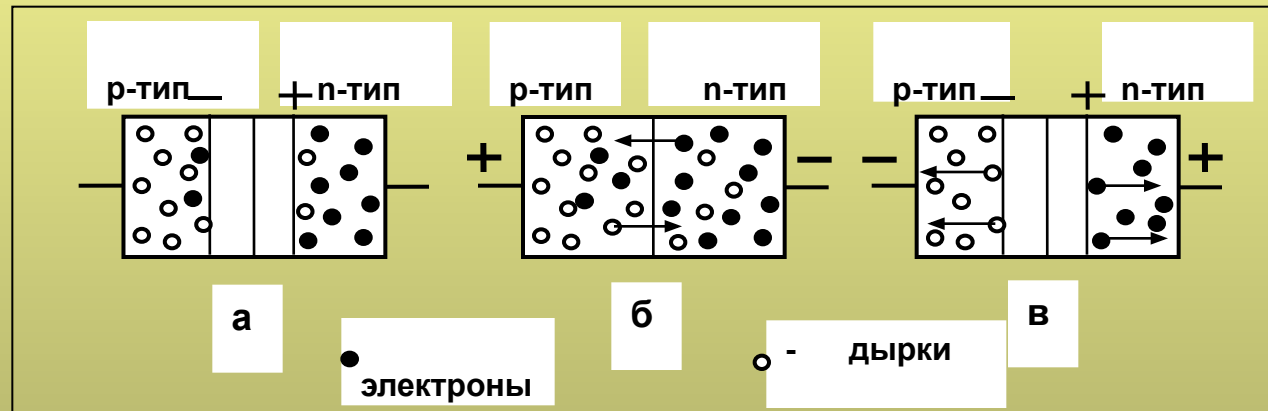


Полупроводниковый диод



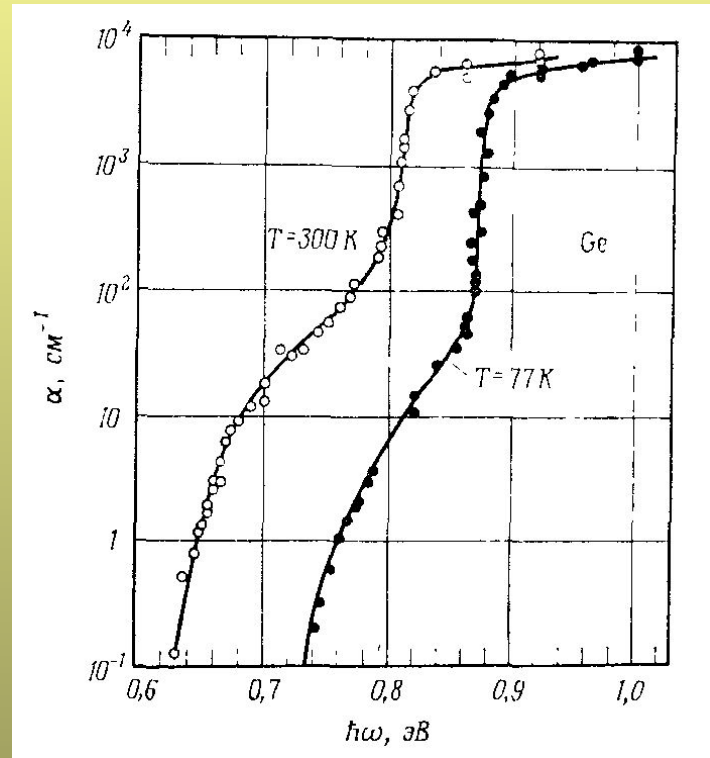
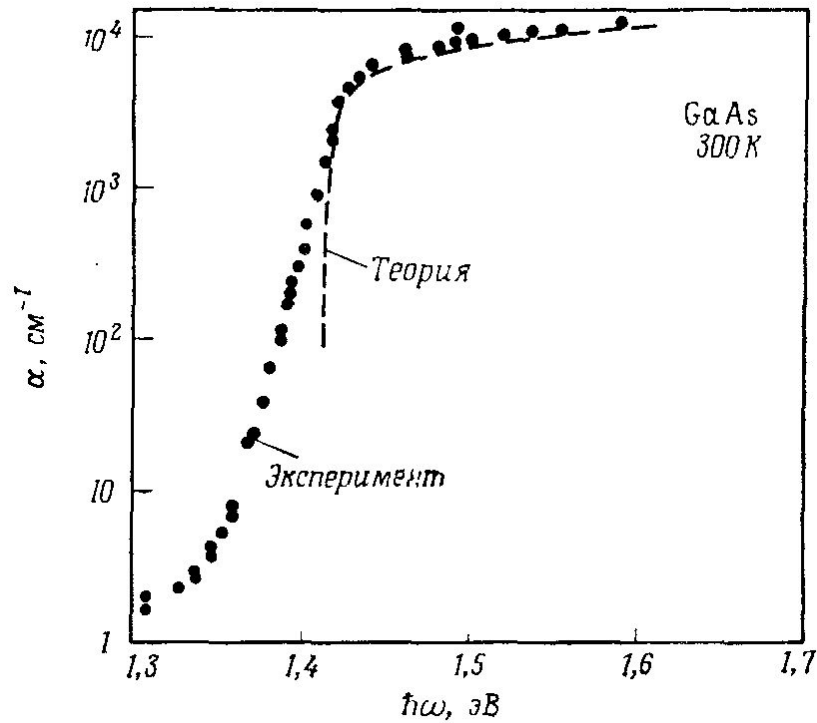
Движение электронов и дырок в области р-п перехода: а – внешнее электрическое поле отсутствует, б – внешнее электрическое поле приложено в прямом направлении, в – внешнее электрическое поле приложено в обратном направлении

Полупроводниковые приборы на основе р-n перехода



Внешнее воздействие	Используемое явление	Название прибора
Эл. поле E	Вольтамперная характеристика р-n перехода	Полупроводниковый диод -выпрямитель
Свет	Генерация электронов и дырок фотоном, в области р-n перехода	Полупроводниковый детектор оптического излучения - фотодиод
Свет	Генерация электронно-дырочных пар фотоном, влетающим в обеднённый слой	Полупроводниковый фотоэлемент, солнечная батарея
Эл. поле E	Излучательная рекомбинация электронов и дырок в области р-n перехода (спонтанная)	Светоизлучающий диод
Эл. поле E	Излучательная рекомбинация электронов и дырок в области р-n перехода (вынужденная)	Инжекционный полупроводниковый лазер

Оптические свойства полупроводников



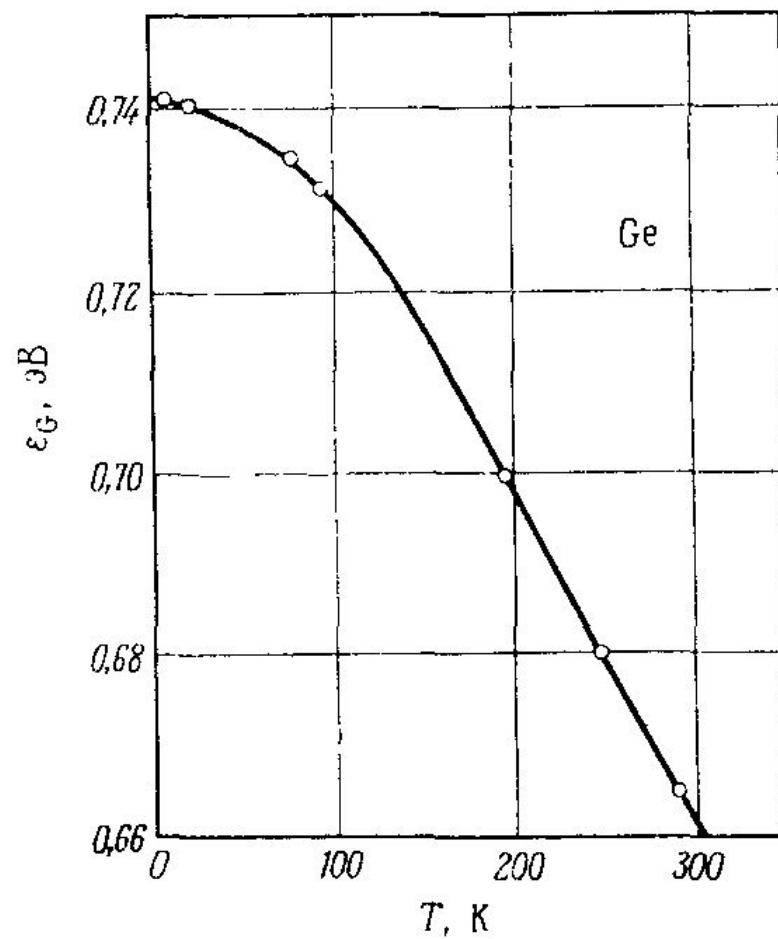
Перегиб на кривых при $\hbar\omega \approx E_g$ указывает на переход от непрямого поглощения к прямому поглощению.

(1) Собственное, или фундаментальное, поглощение света. Оно возможно при

$$\hbar\omega \geq E_g$$

и происходит в видимой или ближней инфракрасной областях в зависимости от ширины запрещенной зоны.

Температурная зависимость ширины запрещенной зоны в германии



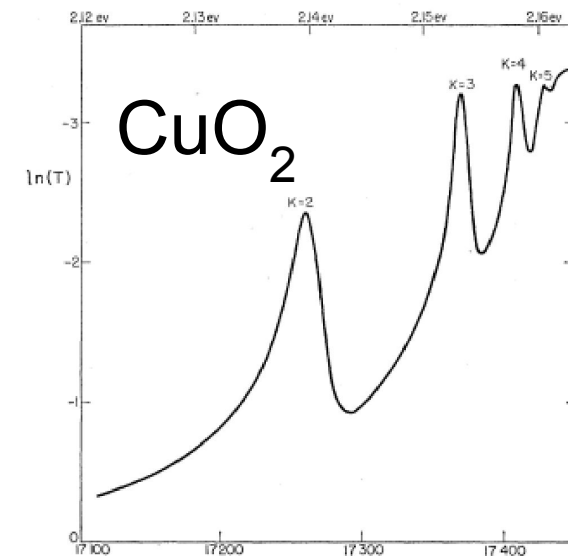
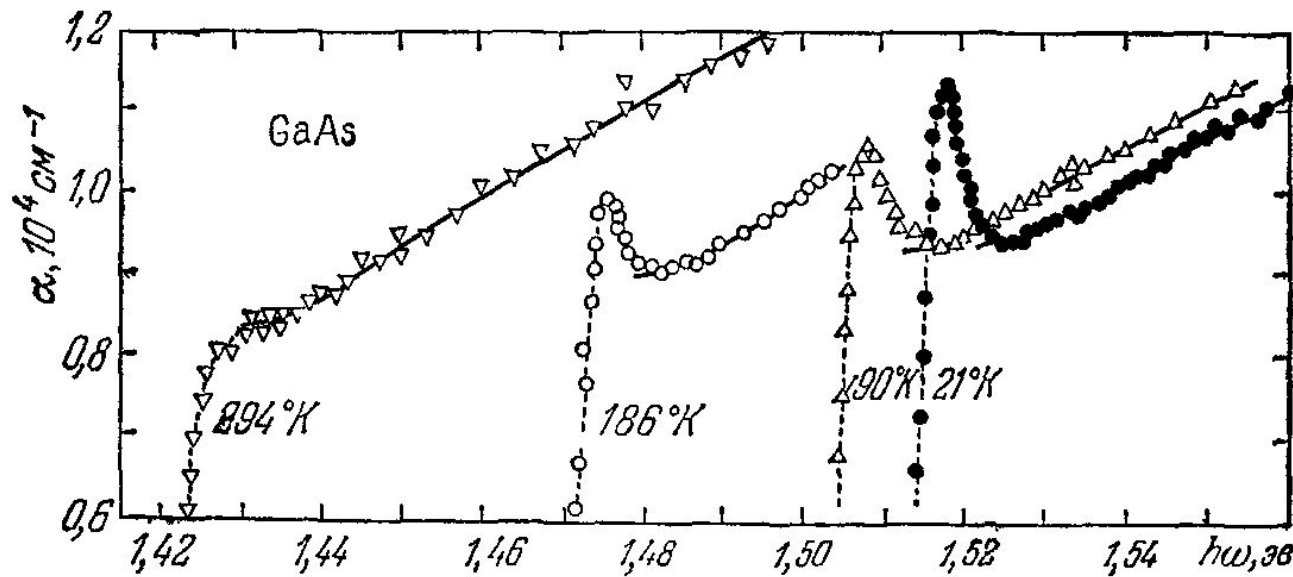
(2) Поглощение на свободных носителях заряда.

Для обозначения этого вида поглощения света иногда используется термин «друдевское» поглощение. Этот механизм поглощения связан с движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Это движение из-за рассеяния носителей заряда приводит к ненулевой действительной части проводимости, которая и ответственна за поглощение.

Поглощение на свободных носителях может быть основным механизмом поглощения света, в частотных областях, где нет межзонного поглощения и сильного поглощения на фононах (в полярных полупроводниках на частотах близких к частоте оптического фонона) и если концентрация носителей достаточно велика.

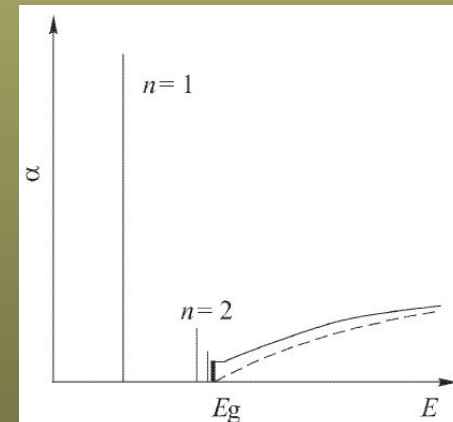
(3) Экситонное поглощение, при котором образуется связанная пара электрон — дырка.

Известны экситоны Френкеля, или экситоны малого радиуса ;
и экситоны Ванье-Мотта, или экситоны большого радиуса $r_{ex} \gg a_0$.

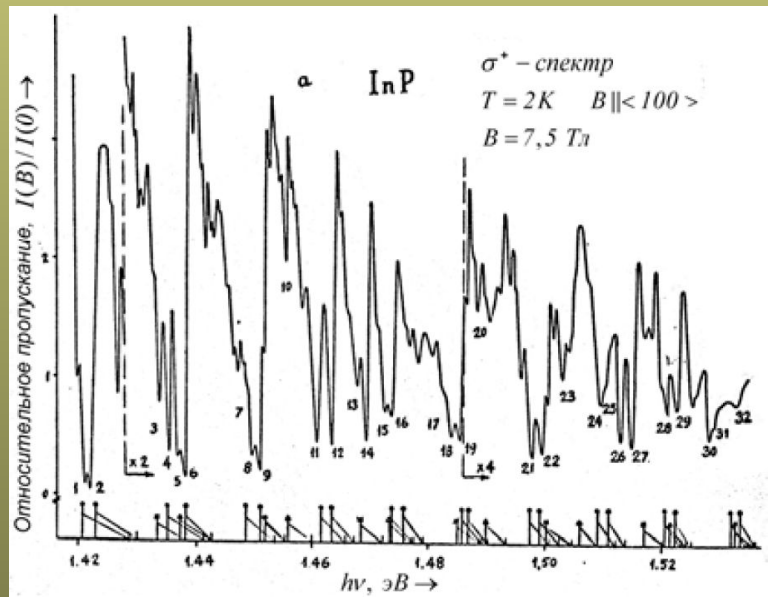
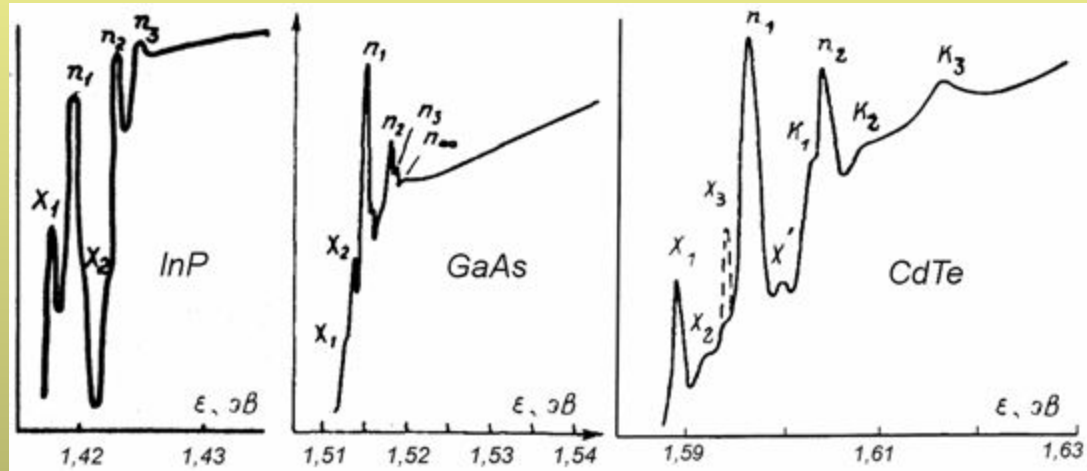


Спектр покоящегося экситона в простейшем случае изотропного и квадратичного закона дисперсии электронов и дырок аналогичен спектру атома водорода:

$$E_n = E_g - \frac{e^4 m^*}{2\hbar^2 \kappa^2 n^2}$$

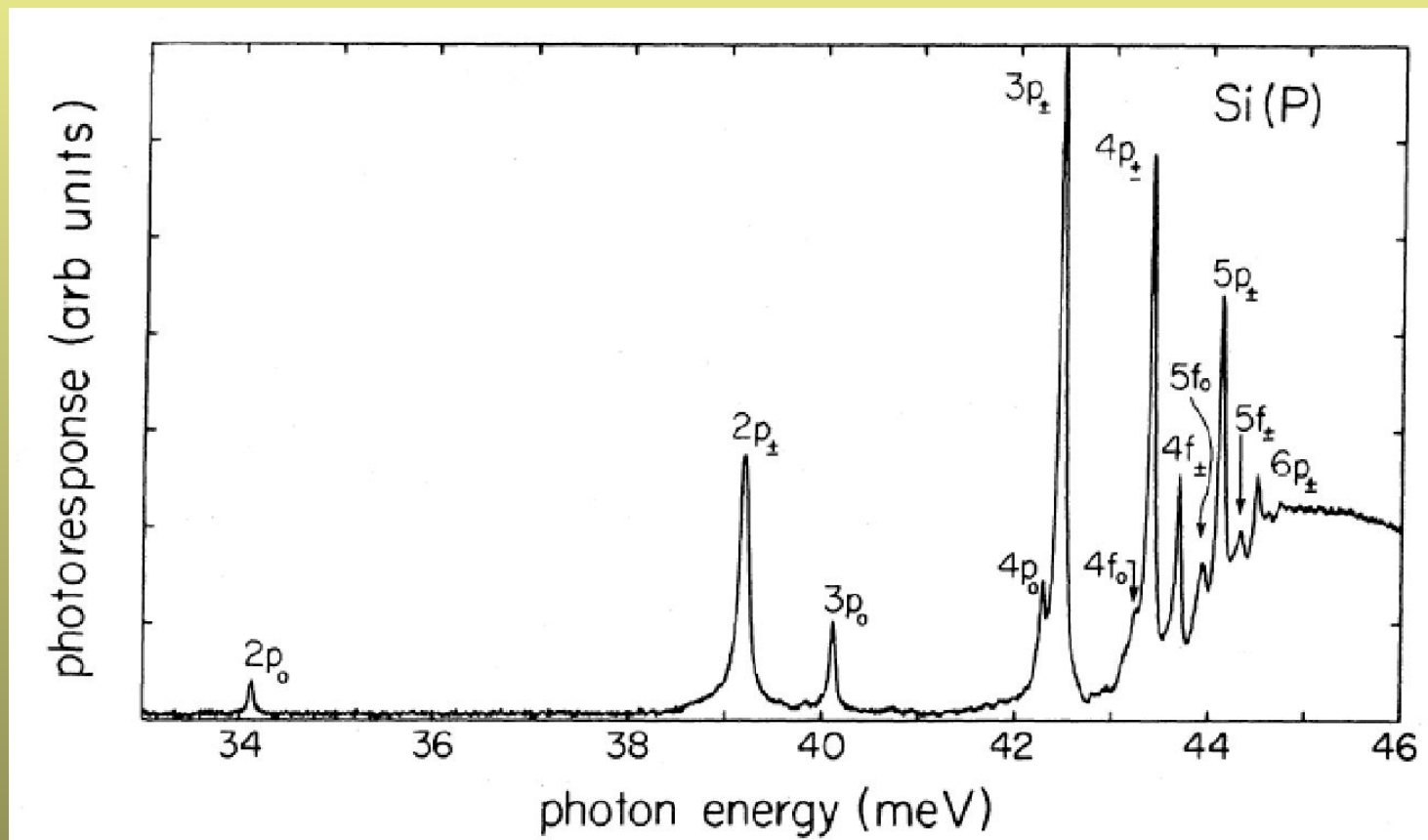


Край поглощения при $B = 0$ и $T = 2$ К.



Р.П. Сейсян, М.А. Абдуллаев, 1973

(4) Примесное поглощение



Спектр фото термической ионизации кремния легированного бором, измеренный при $T=4.2$ К. Концентрация доноров $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

(5) Решеточное (фононное) поглощение

В полярных кристаллах под действием электрического поля электромагнитной волны атомы разных подрешеток двигаются в противоположных направлениях – возбуждаются оптические колебания. Этот процесс можно рассматривать как рождение фононов за счет поглощения фотонов.

Резонанс возможен, когда частота и волновой вектор фононов и фотонов совпадают. Это условие может выполняться лишь для оптических фононов. Решетка должна обладать дипольным моментом, чтобы при раскачивании подрешеток (оптический фонон) возникали колебания дипольного момента и взаимодействие с полем волны. В гомеополярных кристаллах (Si, Ge) такого поглощения не будет, а в полярных (GaAs, AlSb,... NaCl, KCl) — будет.

Фононы должны быть поперечными, чтобы вектора поляризации фононов и фотонов были параллельны.

Поглощение происходит на ИК-частотах ($\omega \ll E_g$) . Длина волны: 61,1 мкм в NaCl, 32 – InP, 36 – GaAs, 54,6 – InSb/

(6) Внутризонное поглощение наблюдается в веществах, имеющих сложную структуру зон.

(7) Плазменное поглощение — поглощение света свободными электронами и дырками, возникает при достаточно больших концентрациях свободных носителей заряда и имеет важную особенность, так называемый плазменный резонанс.

Эффект Бурштейна-Мосса

В сильно легированных полупроводниках уровень Ферми располагается в области разрешенных значений энергии. В этом случае заселенность электронами зоны проводимости в полупроводнике n-типа или дырками потока валентной зоны в полупроводнике p-типа приводит к коротковолновому сдвигу края межзонного поглощения света.

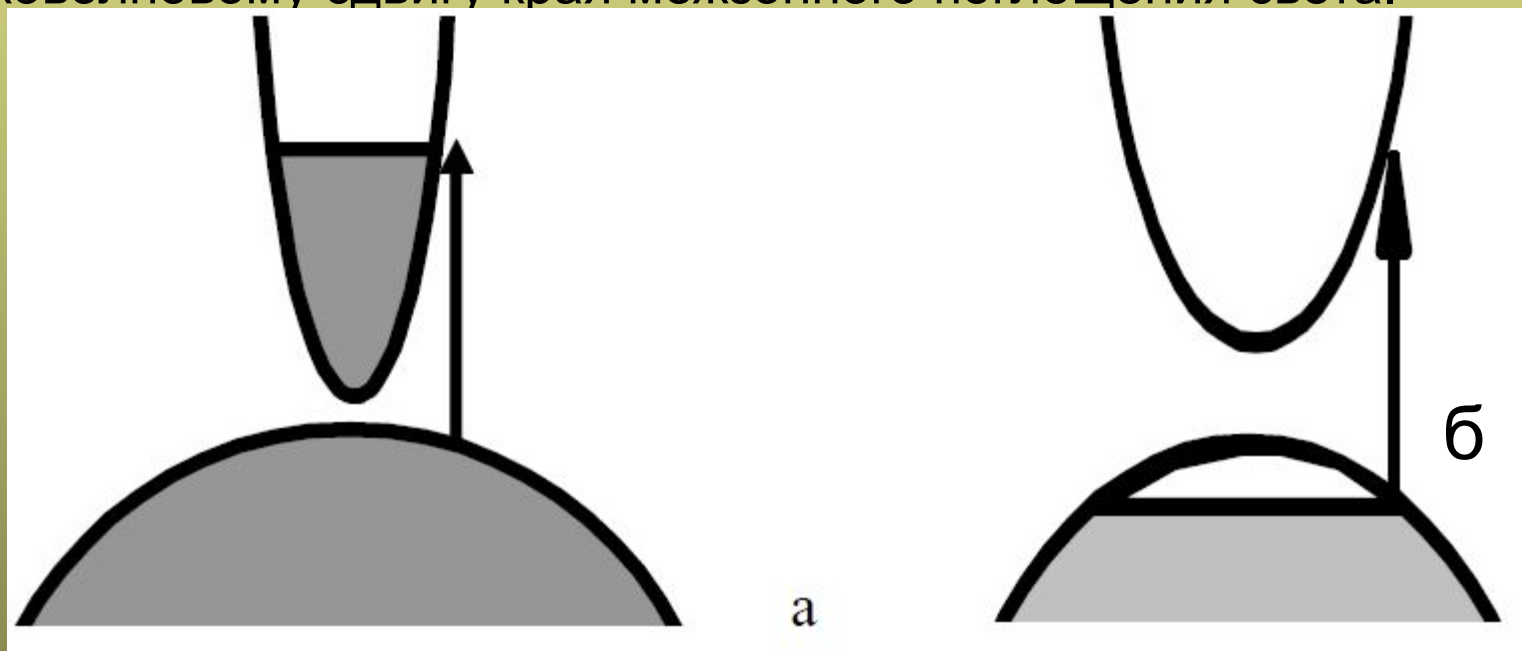
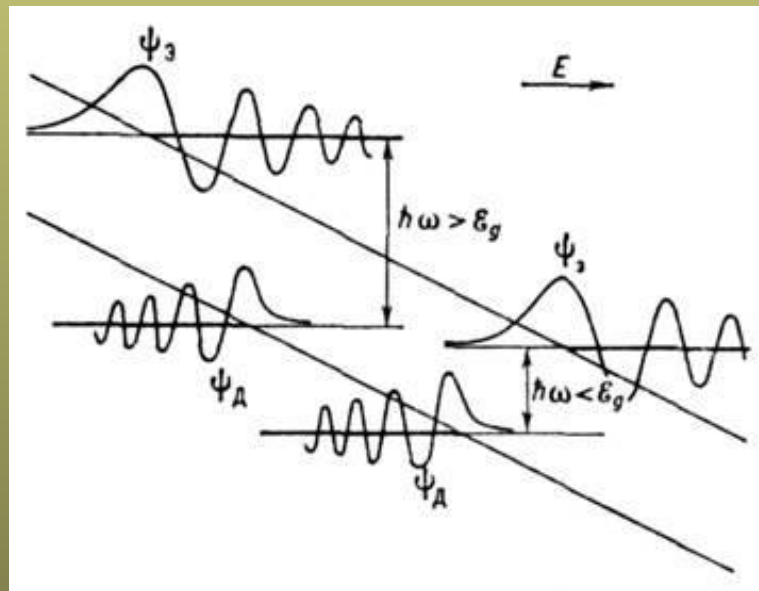


Схема межзонных оптических переходов в полупроводниках n-типа (а) и p-типа (б). В полупроводнике n-типа переходы вблизи края зоны запрещены, поскольку соответствующие состояния в зоне проводимости заполнены электронами.

Эффект Франца-Келдыша

В присутствии электрического поля отсутствует порог поглощения света - появление поглощения на частотах, меньших ширины запрещённой зоны полупроводника.



Лосев, Олег Владимирович

Класс 21 а, 27



ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

ОПИСАНИЕ

светового реле.

К патенту **О. В. Лосева**, заявленному 28 февраля 1927 года (заяв. свид. № 14672).

О выдаче патента опубликовано 31 декабря 1929 года. Действие патента распространяется на 15 лет от 31 декабря 1929 года.

Предлагаемое изобретение использует общеизвестное явление свечения в карборундовом детекторе и состоит в том, что в световом реле для быстрописущего телеграфного или телефонного приема, передачи изображений на расстояние и других целей, в качестве модулируемого электрическим током источника света, применяется свечение в точке контакта карборундового детектора, включенного непосредственно в цепь модулирующего тока.

На чертеже фиг. 1 изображает схему предлагаемого светового реле и фиг. 2 — схему устройства для фотографической записи сигналов с применением светового реле.

К зажимам *A* источника тока сигналов, подлежащих записи, через потенциометр *P* включается светящийся карборундовый детектор *D*, в цепь которого включена батарея *B*, дающая дополнительное постоянное напряжение для наложения его на напряжение тока сигналов и усиления действия реле; путем регулировки этой батареи создаются наиболее благоприятные условия работы детектора *D*. Оптическая система *L* предназначена направлять световой поток, излучаемый карборундовым детектором, на движущуюся фотографическую пла-

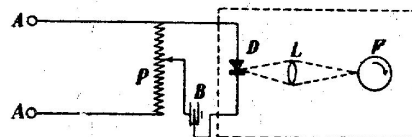
стинку *F*, на которой производится запись изменений этого потока. Детектор *D*, оптическая система *L* и пластина *F* заключены в светонепроницаемую камеру. Примерное включение светового реле показано на чертеже 2, где *E* — приемник-усилитель высокой частоты, *T* — автотрансформатор высокой частоты, а остальная часть схемы вполне аналогична только что описанной.

Предмет патента.

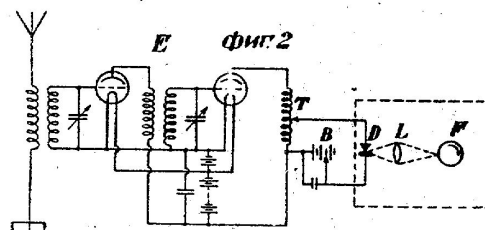
1. Световое реле для быстрописущего телеграфного или телефонного приема, передачи изображений на расстояние и для других целей, характеризующееся применением, в качестве модулируемого электрическим током источника света, свечения в точке контакта карборундового детектора общеизвестного устройства, каковой детектор включен непосредственно в цепь модулирующего тока.

2. Видоизменение охарактеризованного в п. 1 светового реле, отличающееся тем, что последовательно с указанным детектором *D* включен источник дополнительного напряжения постоянного тока *B* (фиг. 1 и 2) с целью усиления действия реле.

Фиг. 1



Фиг. 2



Дата рождения: 27 апреля (10 мая) 1903

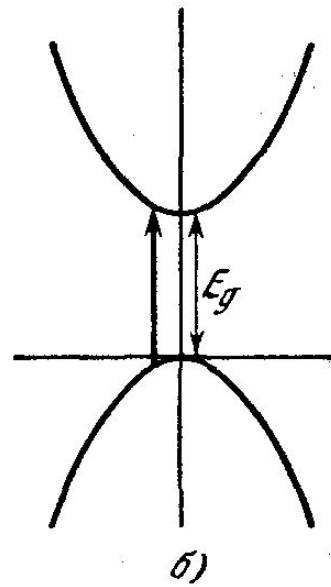
Место рождения: Тверь, Российская империя

Дата смерти: 22 января 1942 (38 лет)

Место смерти: Ленинград, СССР

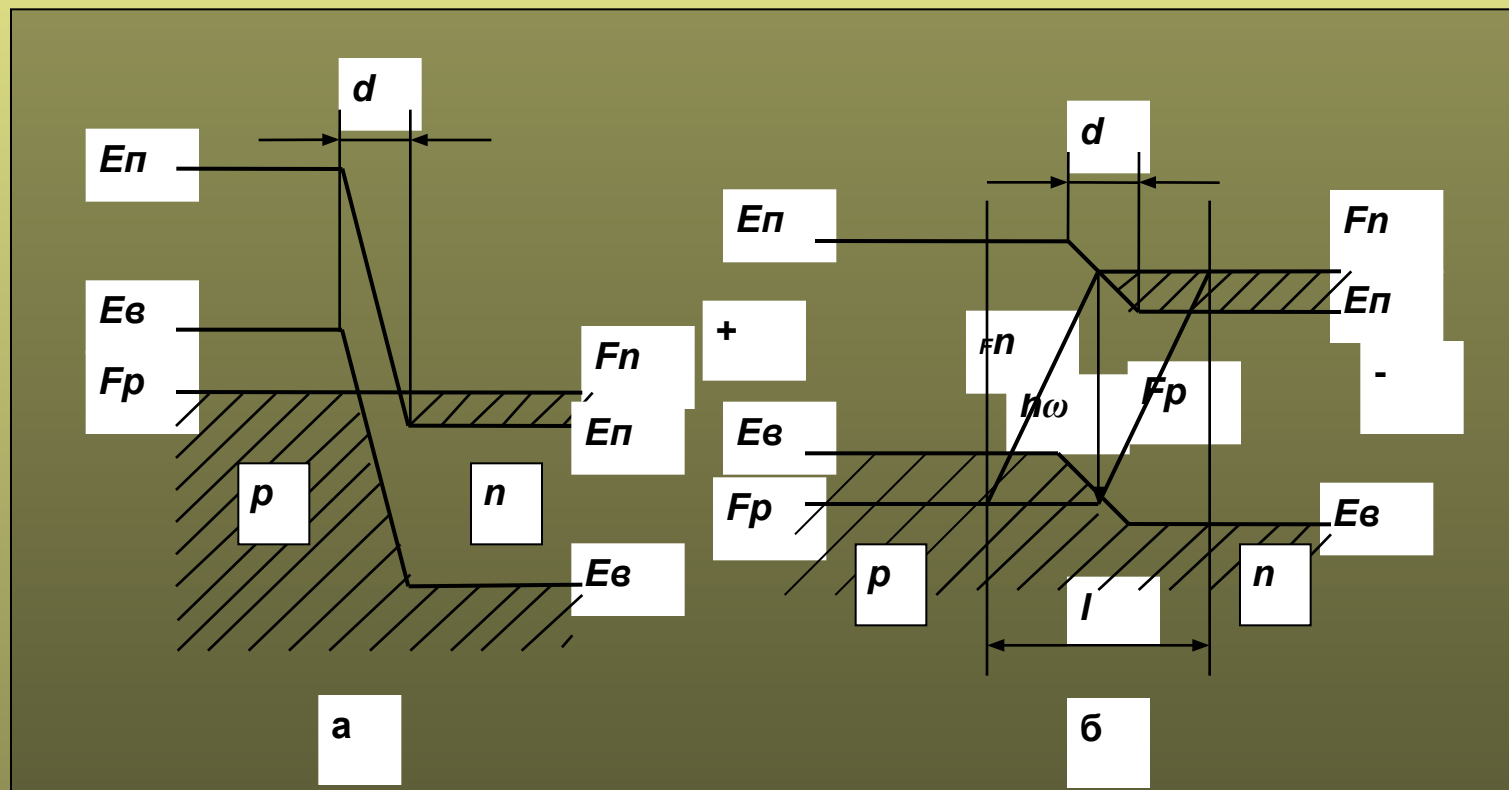
ИНЖЕКЦИОННАЯ

ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ



Электронные переходы в
многодолинном полупроводнике (гер-
маний) с участием фонона.

Принцип работы полупроводникового светодиода



Энергетическая диаграмма инжекционного светодиода. а – р-п переход без приложенного внешнего напряжения, б – р-п переход при приложении внешнего напряжения в прямом направлении, d – ширина р-п перехода, l – реальная ширина области, обеспечивающей работу лазера

Светодиоды

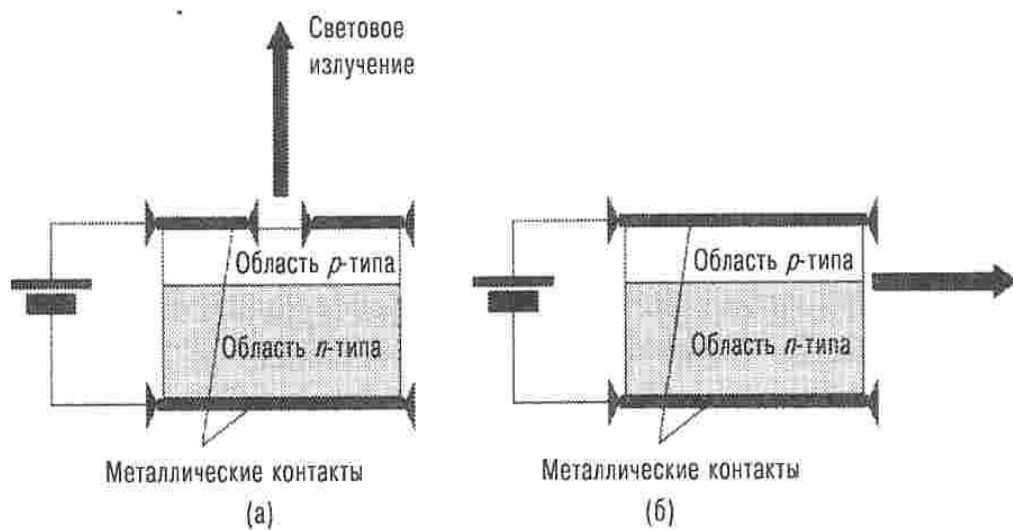
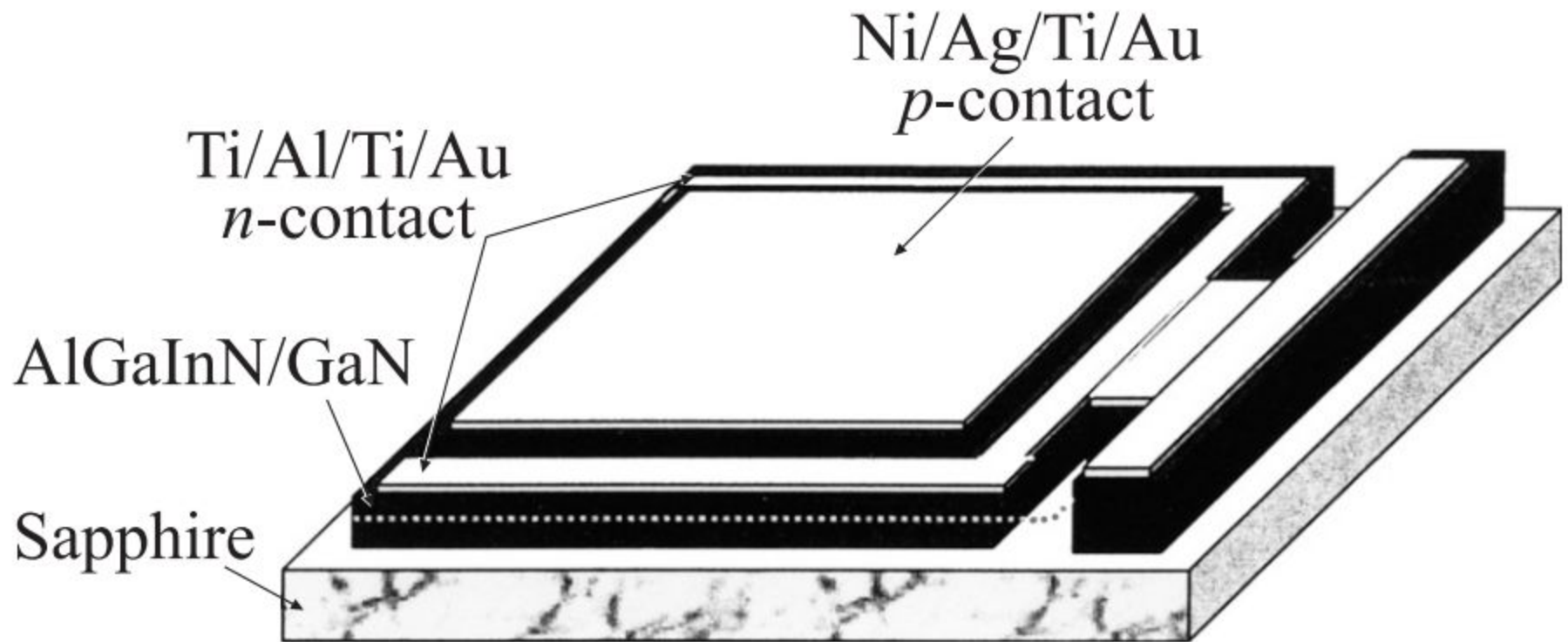


Рис. 4.2. Поперечный разрез СИДа с излучающей поверхностью (а) и СИДа с излучающим срезом (б)

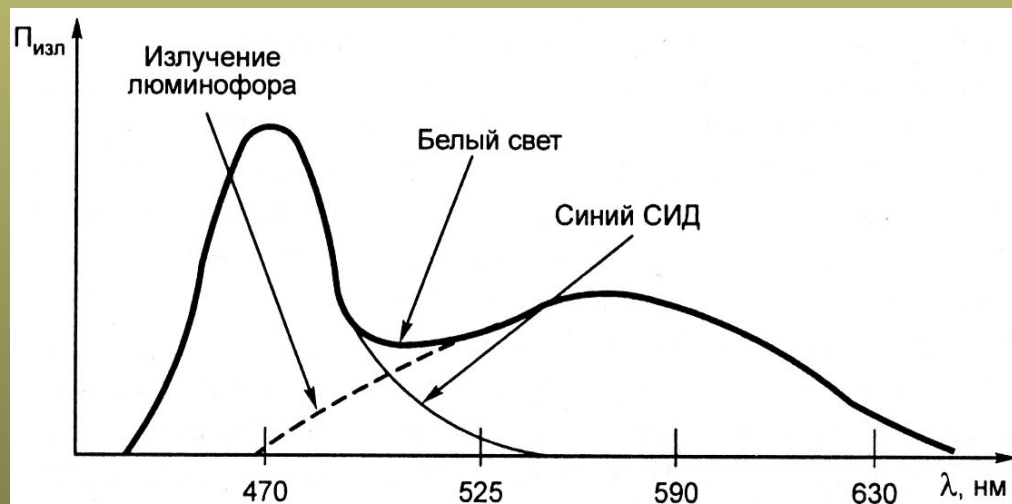
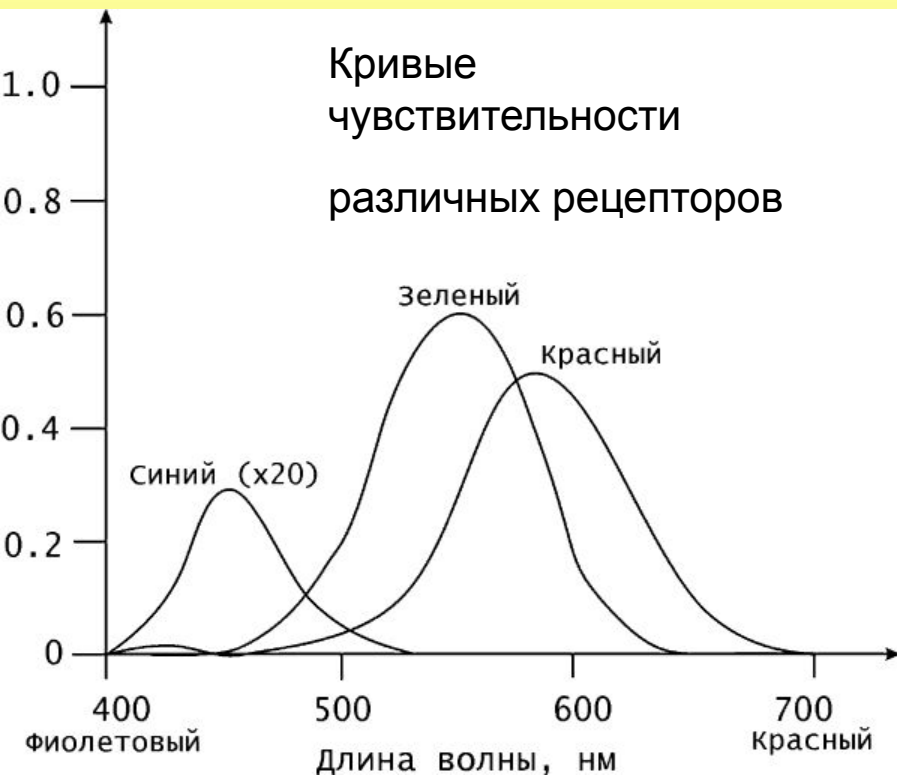


Излучение светодиода: некогерентно, широкий спектр (~ 50 нм), большая расходимость

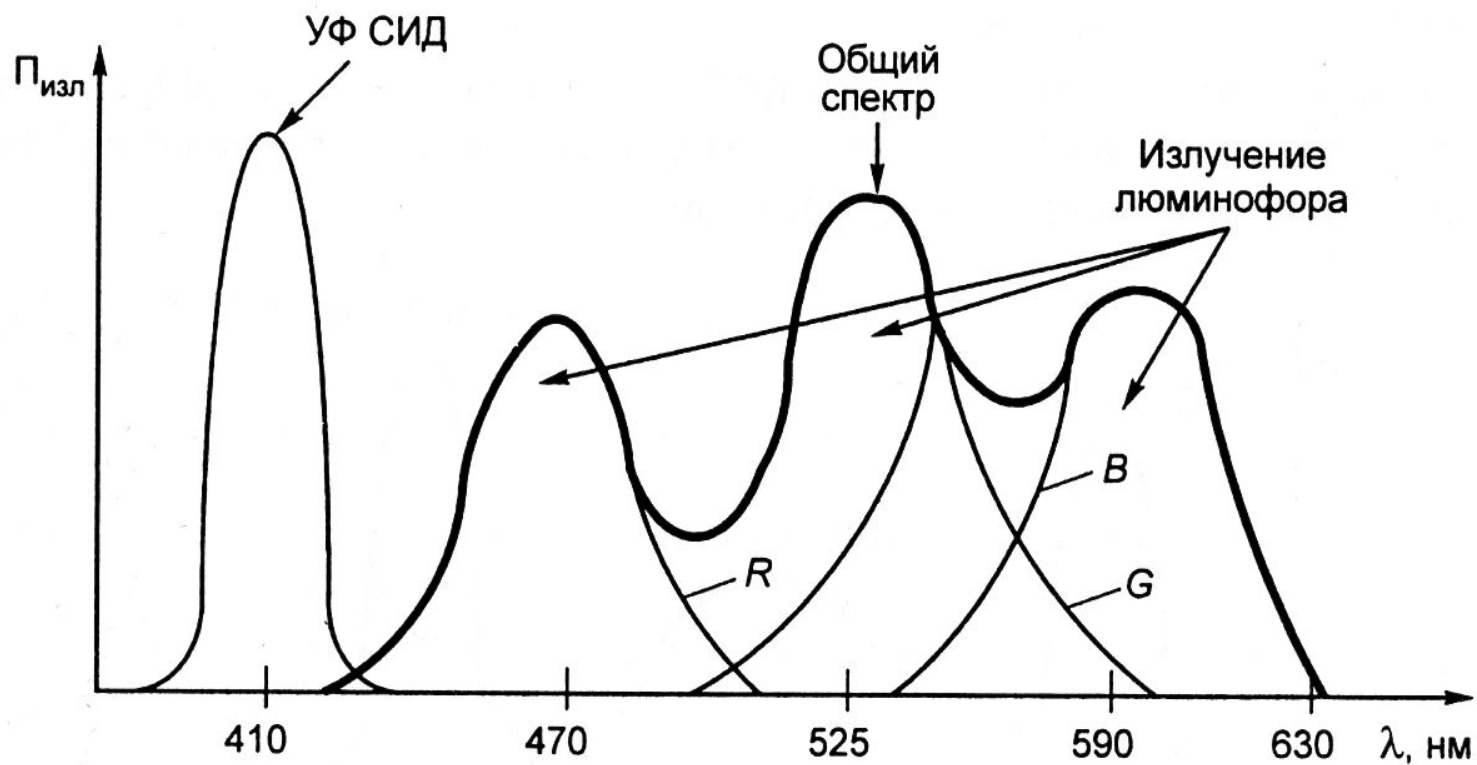
Цвет	длина волны (нм)	Напряжение (В)	Материал полупроводника
Инфракрасный	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1.9$	Арсенид галлия (GaAs) Алюминия галлия арсенид (AlGaAs)
Красный	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta U < 2.03$	Алюминия-галлия арсенид (AlGaAs) Галлия арсенид-фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Оранжевый	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta U < 2.10$	Галлия фосфид-арсенид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Жёлтый	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta U < 2.18$	Галлия арсенид-фосфид (GaAsP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Галлия(III) фосфид (GaP)
Зелёный	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta U < 4.0$	Индия-галлия нитрид (InGaN) / Галлия(III) нитрид (GaN) Галлия(III) фосфид (GaP) Алюминия-галлия-индия фосфид (AlGaInP) Алюминия-галлия фосфид (AlGaP)
Голубой	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta U < 3.7$	Селенид цинка (ZnSe) Индия-галлия нитрид (InGaN) Карбид кремния (SiC) в качестве субстрата Кремний (Si) в качестве субстрата — (в разработке)
Фиолетовый	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta U < 4.0$	Индия-галлия нитрид (InGaN)
Пурпурный	Смесь нескольких спектров	$2.48 < \Delta U < 3.7$	Двойной: синий/красный диод, синий с красным люминофором, или белый с пурпурным пластиком
Ультрафиолетовый	$\lambda < 400$	$3.1 < \Delta U < 4.4$	Алмаз (235 нм) Нитрид бора (215 нм) Нитрид алюминия (AlN) (210 нм) Нитрид алюминия-галлия (AlGaInN) Нитрид алюминия-галлия-индия (AlGaInN) — (менее 210 нм)



3–4 мкм — нижний *n*-GaN контактный слой, легированный Si до уровня $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
~ 500Å — 5-ямная квантово-размерная активная область InGaN/GaN;
~ 200Å — блокирующий слой AlGaInN; °
~ 0.15–0.2 мкм — верхний слой *p*-GaN.

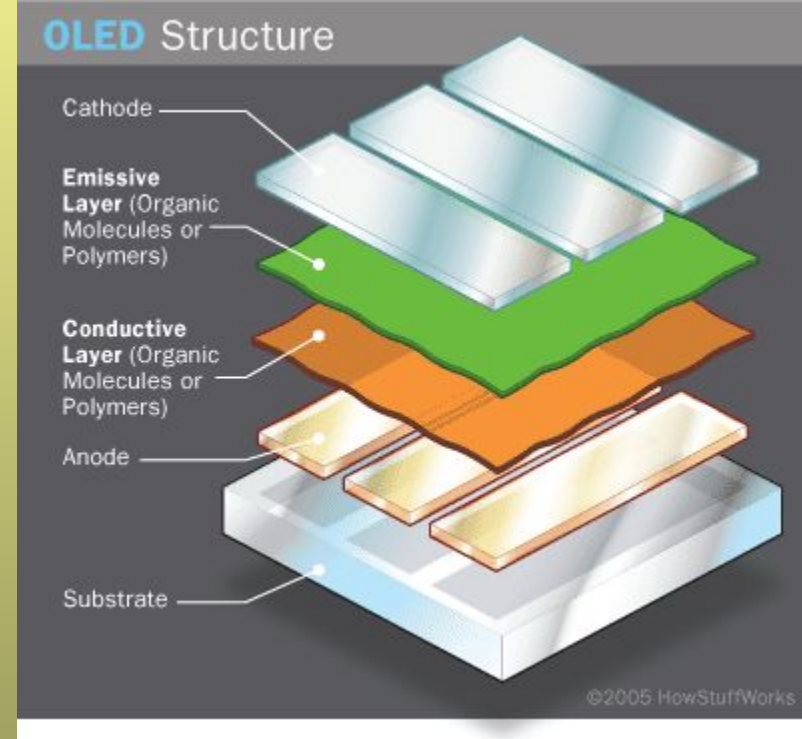


Получение белого света с помощью кристалла синего светодиода и нанесенного на него слоя желтого люминофора



Получение белого света с помощью светодиода и *RGB*-люминофора:
тонкие линии — характеристики трех люминофоров (*R*, *G*, *B*);
толстая линия — результирующая характеристика

OLED (*Organic Light-Emitting Diode* — органический светодиод) — тонкоплёночные светодиоды, в которых в качестве излучающего слоя применяются органические соединения

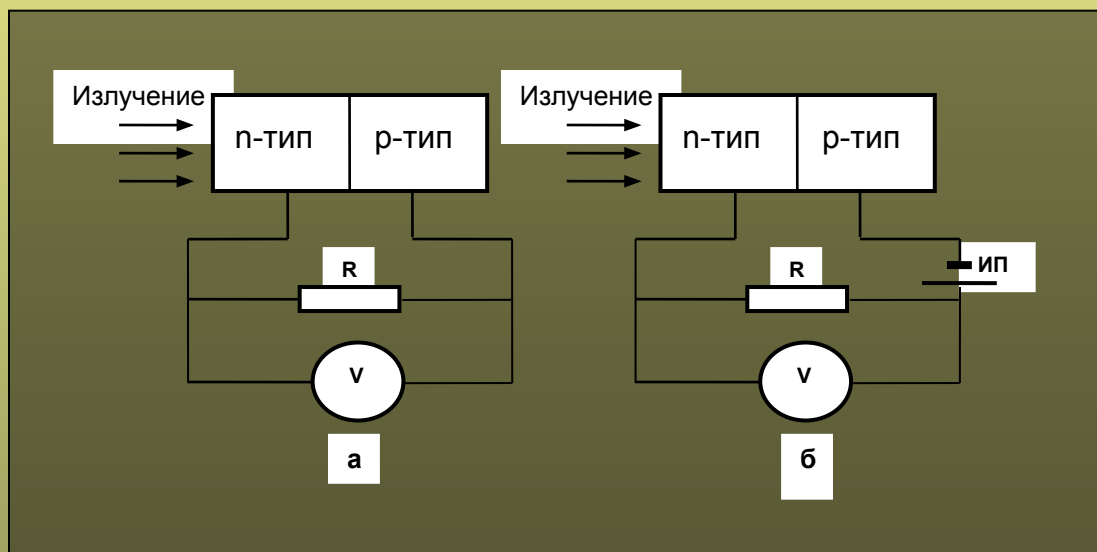


Приёмники оптического излучения на основе полупроводников с р-п переходом (фотодиоды)

- Основными параметрами приёмников оптического излучения являются:
- Энергетическая (световая) характеристика, которая определяет зависимость реакции приёмника от интенсивности падающего излучения (ампер-ваттная, вольт-ваттная, люкс-ваттная).
- Спектральная характеристика чувствительности, которая определяет зависимость реакции фотоприёмника на воздействие излучения с различной длиной волны.
- Частотная характеристика, которая определяет зависимость чувствительности фотоприёмника от частоты модуляции и характеризует инерционность приёмника.
- Пороговая чувствительность, которая определяет минимальный уровень мощности излучения, который может быть обнаружен на фоне собственных шумов.

Использование фотодиода в фотогальваническом (а) и фотодиодном (б) режимах.

R – сопротивление нагрузки, V – вольтметр, ИП – источник питания



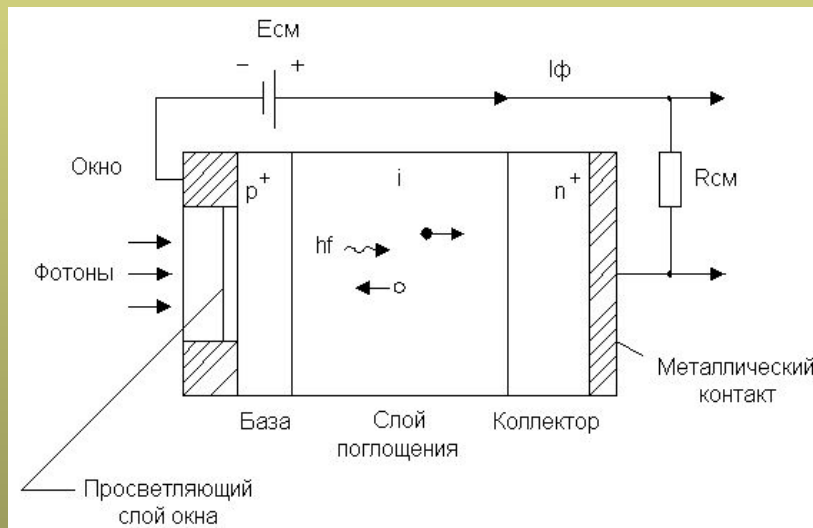
Фотодиодный режим обладает рядом достоинств по сравнению с фотогальваническим: малой инерционностью, повышенной чувствительностью к длинноволновой части спектра, широким динамическим диапазоном линейности характеристик. Основным недостатком этого режима – наличие шумового тока, протекающего через нагрузку.

Поэтому, при необходимости обеспечения низкого уровня шума фотоприёмника в ряде случаев фотогальванический режим может оказаться более выгодным, чем фотодиодный.

р-і-п фотодиод

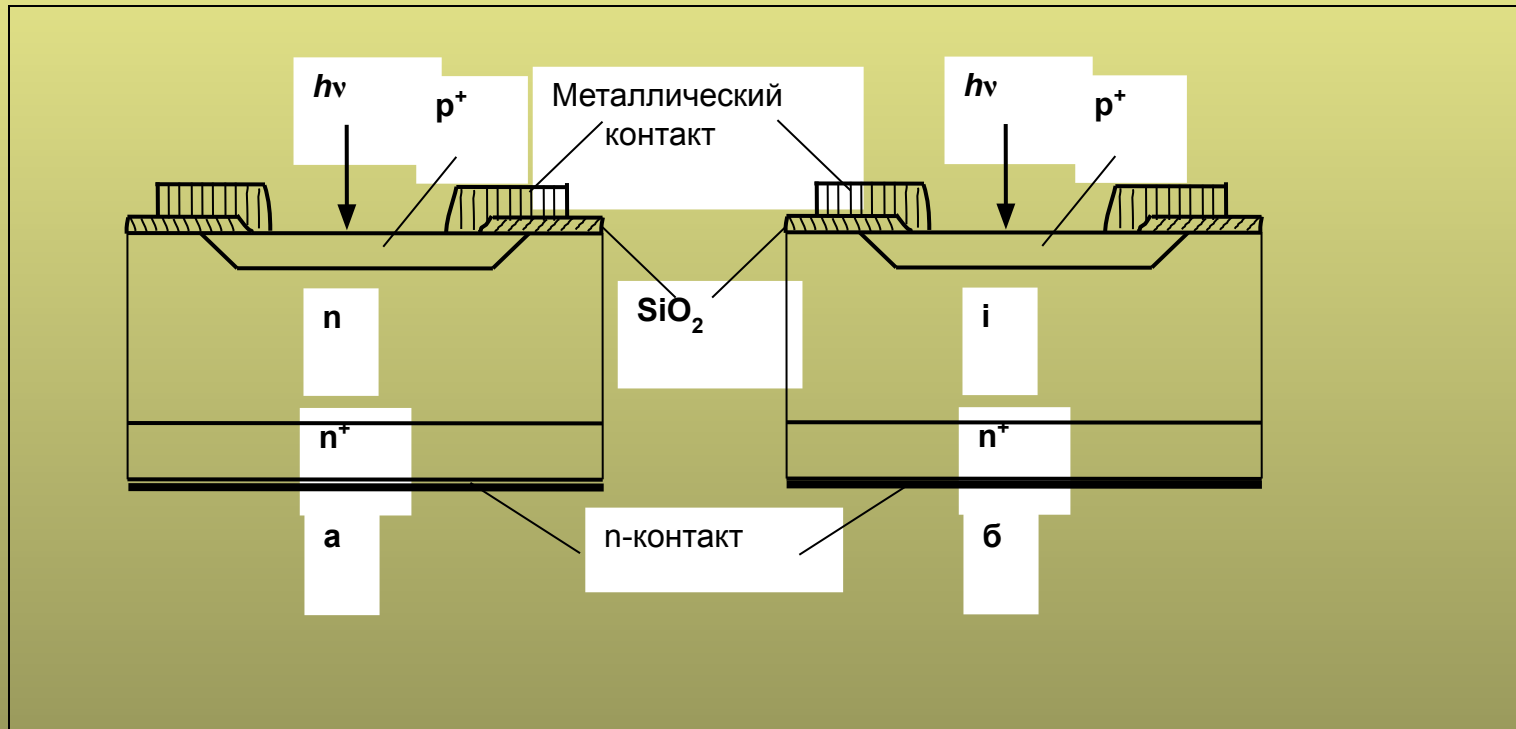
- Ограничения применения р-п фотодиодов в устройствах оптоинформатики:
 - 1) обеднённая зона составляет достаточно малую часть всего объёма фотодиода (толщина – единицы микрон) и поэтому большая часть поглощённых фотонов не приводит к генерации тока во внешней цепи,
 - 2) наличие медленного отклика делает его непригодным для средне- и высокоскоростных применений (десятки МГц).
- В р-і-п структуре между р- и п-слоями, образованными полупроводниками с примесной проводимостью, помещен слой беспримесного полупроводника – полупроводника і-типа (с собственной проводимостью) толщиной в несколько десятков или сотен микрометров, что: 1) значительно увеличивает рабочий объём фотодиода, а значит и его чувствительность, 2) основное преимущество р-і-п фотодиода заключается в высоких скоростях переключения (единицы ГГц)

р-і-п фотодиод – скоростной фотоприёмник



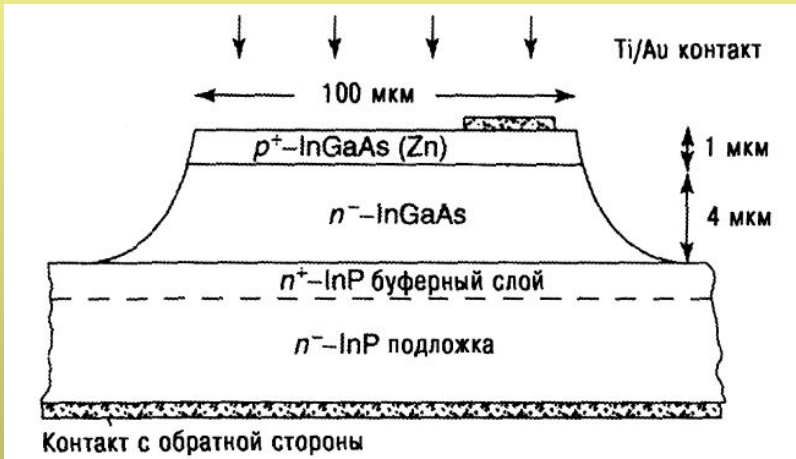
- Быстрый фотоотклик р-і-п фотодиодов объясняется меньшей по сравнению с р-п фотодиодами электроёмкостью. Фотодиод можно представить как плоский конденсатор, ёмкость которого прямопропорциональна электрическому заряду одной из его обкладок (Q) и обратнопропорциональна расстоянию между обкладками ($C \sim Q/L$). А так как длина і-слоя у р-і-п фотодиодов в 10-100 раз больше, чем длина обеднённого слоя у р-п фотодиодов то и их электроёмкость значительно меньше ёмкости р-п фотодиодов. Время заряда/разряда такого конденсатора прямопропорционально электроёмкости ($t \sim C$), что и обеспечивает возможность детектирования более высокочастотного сигнала с помощью р-і-п фотодиодов

Принципиальная конструкция фотодиода на основе р-п перехода (а) и р-і-п фотодиода (б)

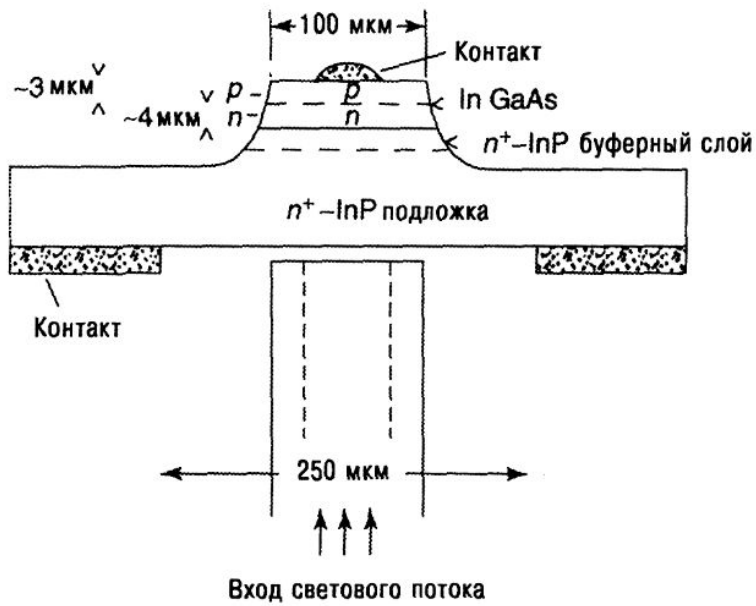


Чаще всего р-і-п фотодиоды на длину волны 0,85 мкм изготавливают из кремния (Si), а на большие длины волн (1,2 - 1,6 мкм) - из германия (Ge) или InGaAs

Обобщенная схема PIN-диодного детектора на основе InGaAs

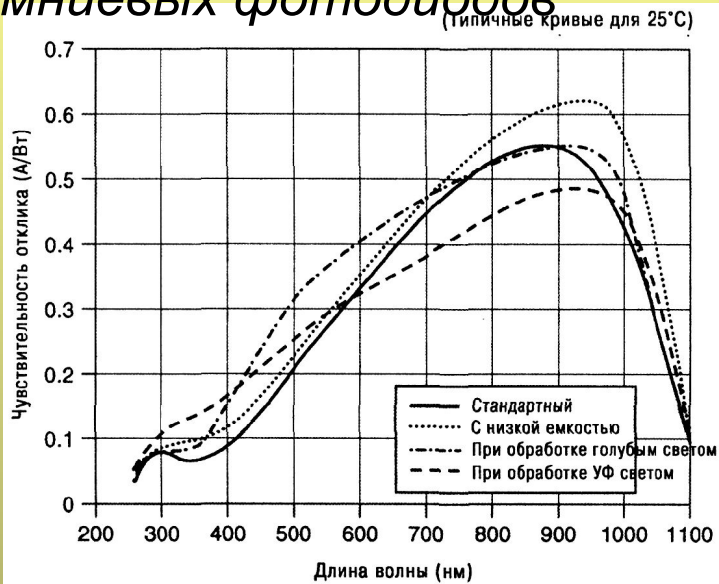


(a)

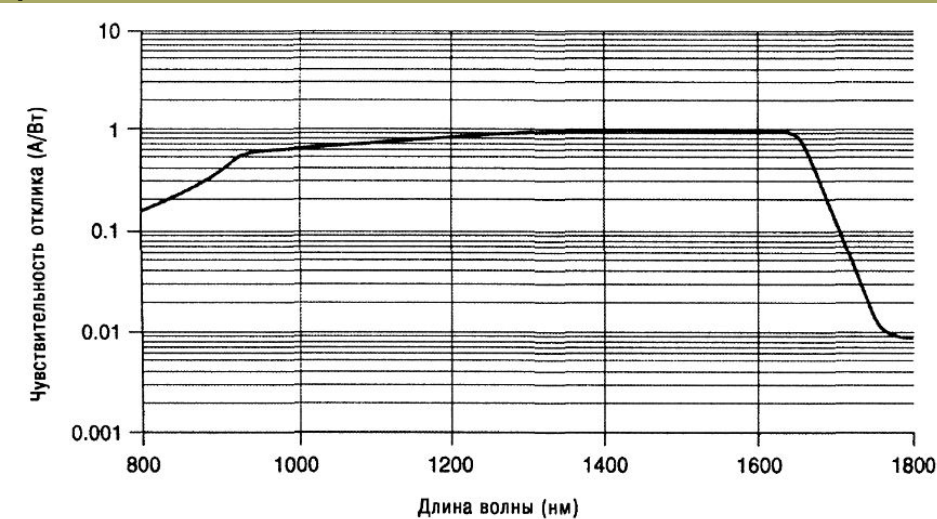


(б)

Зависимость чувствительности отклика от длины волны для кремниевых фотодиодов



Зависимость чувствительности отклика от длины волны для фотодиодов типа InGaAs



Литература

- О.Звелто. Принципы лазеров.-М.:Мир, 1984
- Физика полупроводниковых лазеров.- М.:Мир, 1989
- Laser Focus World, 2000, Vol. 36, No. 4, 5, 6, 7
Semiconductor Lasers 2000.

www.optoelectronics-world.com

Контрольные вопросы.

1. Полупроводниковые лазеры – области применения.
2. Основные свойства полупроводников
3. Образование запрещенной зоны
4. Зонная структура полупроводников, уровень Ферми.
5. Инжекция в p-n переходе, светодиод.
6. Устройство и работа простейшего полупроводникового лазера.
7. Полупроводниковые лазеры с гетероструктурами.
8. Волновые свойства гетероструктуры, удержание носителей.
9. Оптическая схема считывания информации в CD-ROM.
10. Зависимость энергии запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки двойных соединений и их растворов.
11. Понятие о квантово-размерной структуре.
12. Преимущества лазеров на многослойных КРС.
13. Методы генерации сверхкоротких импульсов.
14. Ячейка Поккельса, принцип работы.
15. Генерация сверхкоротких импульсов путем возбуждения короткими импульсами тока.
16. Синхронизация мод в резонаторе как метод получения цуга сверхкоротких импульсов.
17. Частота синхронизации мод в современных полупроводниковых лазерах.