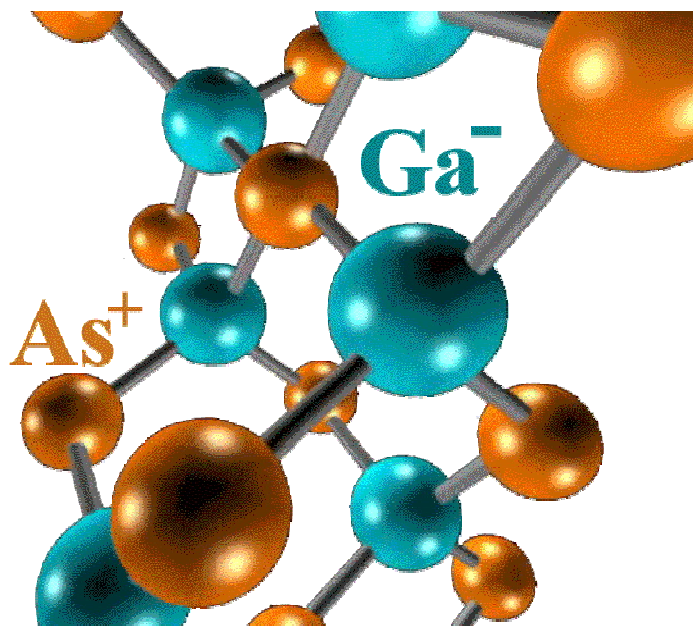


Министерство высшего и среднего специального образования
Республики Узбекистан

Ташкентский государственный технический университет
имени Абу Райхана Беруни

М.К. Бахадирханов, И.Б. Ортиков

МАЛЫЙ ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК ПО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ МАТЕРИАЛАМ



Ташкент – 2006

Малый энциклопедический справочник по полупроводниковым материалам.
М.К. Бахадирханов, И.Б. Ортиков. Ташкент: ТашГТУ, 2006. 199 с.

В представленном справочнике приведены основные физические и химические фундаментальные параметры полупроводниковых материалов, как элементарных, так и соединений типа $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, а также более сложных полупроводниковых соединений. В справочнике также рассмотрены основные параметры примесных атомов в полупроводниках, коэффициент диффузии, растворимость, энергетические уровни, создаваемые ими в запрещенной зоне. Читатели могут найти здесь информацию о современных достижениях ведущих компаний в производстве полупроводниковых материалов.

Книга предназначена для студентов, магистров, аспирантов и научных сотрудников, а также технологов и инженеров, работающих в области полупроводниковой электроники. Может быть также полезна преподавателям высших и специальных учебных заведений при чтении курсов лекций «Физика твердого тела», «Физика полупроводников», «Материалы электронной техники» и т.д.

Рецензенты: академик АН РУз А.Т. Мамадалимов
доктор физико – математических наук, профессор Х.М. Илиев
кандидат технических наук С.А. Тачилин

Печатается по решению научного совета Ташкентского государственного технического университета.

© Ташкентский государственный технический университет, 2006.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	
Глава I.	ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
	Введение	5
§1.1	Основные параметры полупроводниковых материалов	8
§1.2	Кристаллическая структура полупроводниковых материалов	17
§1.3	Сложные полупроводниковые материалы	22
§1.4	Структура энергетических зон полупроводников	31
§1.5	Энергия запрещенной зоны полупроводников	37
§1.6	Оксид кремния	43
§1.7	Материалы, используемые для создания барьеров Шоттки и омических контактов	51
§1.8	Современные достижения в производстве полупроводниковых материалов	57
Глава II.	ДИФФУЗИЯ, РАСТВОРИМОСТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	
	Введение	78
§2.1	Диффузионные характеристики примесей в полупроводниках	80
§2.1.1	Диффузионные параметры примесей в эпитаксиальных структурах	105
§2.2	Растворимость примесей в полупроводниках	119
§2.3	Энергетические уровни примесных атомов в полупроводниках	130
§2.4	Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примесных атомов	144
§2.5	Зависимость удельного сопротивления важнейших полупроводниковых материалов от концентрации примеси	154
Глава III	НЕОБХОДИМЫЕ ФОРМУЛЫ И СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ	
	Введение	157
§3.1	Проводимость твердых тел	158
§3.2	Распределение Ферми – Дирака	160
§3.3	Кинетические явления в полупроводниках	161
§3.4	Различные механизмы рассеяния носителей заряда	162
§3.5	Оптические и фотоэлектрические свойства полупроводников	163

§3.6	ВAX p – n перехода, барьера Шоттки	167
§3.7	Основные параметры фотоэлементов	168
§3.8.	Справочные данные по физическим величинам	170
§ 3.8.1	Соотношение между физическими единицами	173
§3.8.2	Физические постоянные (константы)	177
§3.8.3	Давление паров различных элементов	190
§3.8.4	Спектр электромагнитного излучения	192
§3.8.5	Изотопы некоторых элементов	193
§3.8.6	Влияние скорости на параметры тел	195
	Литература	198

ВВЕДЕНИЕ

Перемены мирового масштаба во второй половине 20 века в сфере науки и техники, промышленности и всех отраслях производства, в том числе освоение космоса, появление новых информационных технологий, автоматики, возникновение новых средств связи, несомненно, стало результатом быстрого развития электроники и микроэлектроники и ее применения во всех отраслях техники.

20 век в истории человечества можно назвать веком электроники. Еще в пятидесятых годах транзисторы и диоды, размеры которых были несколько миллиметров, заменили электронные лампы, имеющие размеры несколько десятков сантиметров. После начала эры интегральных микросхем в 1970-1990 годах, число элементов, создаваемых на одном кристалле, достигло миллиона, а их средний размер составил несколько микрон.

В конце второй половины 20 века уменьшение размеров микроэлектронных элементов, увеличение их быстродействия, уменьшение потребляемой энергии при работе и, наконец, снижение себестоимости, обеспечили не только широко-масштабное внедрение микроэлектроники во все отрасли техники, но и невиданный темп развития.

Сейчас человечество находится в начале 21 века. Мнение ученых и успехи в области электроники показывают, что 21 век станет веком нанотехнологии и наноэлектроники. Это есть объективная потребность в развитии и решении глобальных вопросов, с которыми человечество сталкивается в настоящее время. Ухудшение экологии, повышение потребности в энергии, потребность в совершенно новых информационных системах, разработка нового поколения приборов автоматики и робототехники и все прочее тесно связаны с электроникой и наноэлектроникой. Электроника только начала развиваться и в настоящее время является самой молодой наукой, развитие которой позволит решить не только упомянутые выше проблемы, но и существенно улучшить уровень жизни человечества и его безопасность. Основой электроники, микроэлектроники и наноэлектроники являются полупроводниковые материалы и современная сложная технология. Все специалисты – технологи, проектировщики, специалисты по эксплуатации элек-

тронных приборов и все, кто используют электронные приборы и установки, в первую очередь, должны хорошо знать основные свойства полупроводниковых материалов. Если специалист хорошо знаком со свойствами каждого полупроводникового материала, он может создать новый электронный прибор, используя функциональные возможности материала.

В этой книге собраны основные электрофизические, термодинамические и фундаментальные параметры всех известных полупроводниковых материалов, которые широко используются в настоящее время в электронной промышленности. Здесь также приведены коэффициенты диффузии различных элементов и их температурная зависимость, растворимость многих примесных атомов в полупроводниках, энергетические уровни, создаваемые в запрещенной зоне различными примесями. Эти данные позволят специалистам получать новые материалы с необходимыми электрофизическими параметрами. Отличительная особенность данной книги состоит в том, что название материала и его характеристики даны на двух языках для помощи читателю при использовании им различной литературы.

В справочнике собраны самые необходимые формулы и законы с целью обеспечения оперативной и точной работы специалистов при проектировании технологических и электронных приборов, а также для помощи студентам и аспирантам, которые ведут научные исследования.

В конце первой главы приведены ведущие компании, производящие самые важные полупроводниковые материалы, их физические и технологические параметры. Эти данные показывают достигнутый современный технологический уровень в производстве полупроводниковых материалов, а также дают читателю информацию, необходимую для приобретения нужных материалов.

Книга предназначена для специалистов, научных сотрудников, аспирантов, магистров и студентов, которые работают в сфере электронной техники и материаловедения. Надеемся, что данный справочник существенно облегчит труд и сэкономит время специалистов при решении различных вопросов электроники.

В заключение хотим выразить глубокую и искреннюю благодарность за оказанное внимание и поддержку, за ценные советы и плодотворную дискуссию

при обсуждении содержания глав энциклопедии: академику Мамадалимову А.Т., профессору Илиеву Х.М., профессору Зикриллаеву Н.Ф., профессору Эгамбердыеву Б.Э., доценту Курбановой У.Х., научному консультанту кандидату технических наук Тачилину С.А.

ГЛАВА I.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§1.1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полупроводниковые материалы по элементному составу и структуре кристаллической решетки делятся на 6 групп:

1. Элементарные полупроводники;
2. Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$;
3. Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$;
4. Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{IV}$;
5. Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{VI}$;
6. Сложные полупроводниковые материалы.

Практически все элементарные полупроводники и большинство полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$, а также сложные полупроводниковые материалы имеют кристаллическую структуру типа алмаза или цинковой обманки, которые относятся к тетраэдрическим фазам, где каждый атом окружен четырьмя эквидистантными ближайшими соседями расположенными в вершинах соответствующего тетраэдра. Связь между двумя ближайшими соседями обусловлена парой электронов с противоположными спинами. Поэтому химическая связь в элементарных полупроводниках является 100% ковалентной, в соединениях $A^{III}B^V$ связь имеет ионно - ковалентный вид. В соединениях $A^{II}B^{VI}$ доля ионной связи увеличивается.

Основным фундаментальным параметром полупроводников является ширина запрещенной зоны E_g . Величина E_g – это необходимая энергия для освобождения валентного электрона, участвующего в химической связи кристаллической решетки, который будет участвовать в обеспечении проводимости материала. Величина E_g в полупроводниках определяется в основном состоянием (расположением) валентных электронов атома, образующих кристаллическую решетку. Например:

Элемент	Электронная структура	E_g , эВ
C	$1s^2 2s^2 2p^2$	5,48
Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	1,17
Ge	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$	0,74
Sn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$	0,082

Хотя все эти элементы образуют алмазоподобную кристаллическую решетку с ковалентной связью, расположение валентных электронов у них в электронной структуре атома, энергия связи в решетке, величина запрещенной зоны E_g могут существенно отличаться. Такая закономерность имеет место в полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$ и сложных материалах. Поэтому комбинируя элементы (т.е. различные энергетические состояния валентных электронов в атоме), в соединениях можно получить полупроводниковый материал с управляемой E_g . Карбид кремния является представителем $A^{IV}B^{IV}$. Этот материал по своим физическим параметрам очень близок к алмазу.

Полупроводники условно можно разделить на широкозонные, где $E_g \geq 2$ эВ, нормальные, где $2 > E_g > 0,6$ эВ и узкозонные, где $E_g < 0,5$ эВ. Именно величина E_g полупроводниковых материалов определяет их функциональные возможности при разработке различных фото - и оптоэлектронных приборов микроэлектроники.

Таблица 1.1.1

Полупроводниковые материалы

Материал	Элемент или со- единение Element or compound	Название Name	Кристалли- ческая структура Crystal structure	Постоянная ре- шетки при 300К (Å) Lattice constant at 300K (Å)
Элемент	C	Углерод Carbon (diamond)	D	3,56683
	Ge	Германий Germanium	D	5,64613
	Si	Кремний Silicon	D	5,43095
	Sn	Олово Grey tin	D	6,48920
IV-IV	SiC	Карбид кремния Silicon carbide	W	a=3,086; c=15,117
III-V	AlAs	Арсенид алюминия Aluminum arsenide	Z	5,6605
	AlP	Фосфид алюминия Aluminum phosphide	Z	5,4510
	AlSb	Антимонид алюминия Aluminum antimonide	Z	6,1355
	BN	Нитрид бора Boron nitride	Z	3,6150
	BP	Фосфид бора Boron phosphide	Z	4,5380
	GaAs	Арсенид галлия Gallium arsenide	Z	5,6533
	GaN	Нитрид галлия Gallium nitride	W	a=3,189; c=5,185
	GaP	Фосфид галлия Gallium phosphide	Z	5,4512

III-V	GaSb	Антимонид галлия Gallium antimonide	Z	6,0959
	InAs	Арсенид индия Indium arsenide	Z	6,0584
	InP	Фосфид индия Indium phosphide	Z	5,8686
	InSb	Антимонид индия Indium antimonide	Z	6,4794
II-VI	CdS	Сульфид кадмия Cadmium sulfide	Z	5,8320
	CdS	Сульфид кадмия Cadmium sulfide	W	a=4,16; c=6,756
	CdSe	Селенид кадмия Cadmium selenide	Z	6,050
	CdTe	Теллурид кадмия Cadmium telluride	Z	6,482
	ZnO	Оксид цинка Zinc oxide	R	4,580
	ZnS	Сульфид цинка Zinc sulfide	Z	5,420
	ZnS	Сульфид цинка Zinc sulfide	W	a=3,82; c=6,26
IV-VI	PbS	Сульфид свинца Lead sulfide	R	5,9362
	PbTe	Теллурид свинца Lead telluride	R	6,4620
	PbSe	Селенид свинца Lead selenide	R	6,12

D-алмаз; W-вюрцит; Z-цинковая обманка; R-каменная соль

D-diamond; W-wurtzite; Z-zincblende; R- rock salt

В природе связи кристаллической решетки существенную роль играют не только фундаментальные параметры полупроводниковых материалов, но и подвижность носителей заряда. В таблице 1.1.2 приведены разность значения электроотрицательности и доля ионной связи в различных полупроводниковых материалах по расчету Паулинга.

Таблица 1.1.2

Материал	Элемент или соединение	Разность электроотрицательности	Доля ионной связи, %
IV	C	0	0
	Ge	0	0
	Si	0	0
	Sn	0	0
IV-IV	SiC	0,8	0
III-V	AlAs	0,6	11
	AlP	1,6	50
	AlSb	1,4	43
	BN	0,4	8
	BP	1,3	40
	GaAs	0,5	9
	GaN	1	22
	GaP	1,9	61
	GaSb	0,1	2
	InAs	0,5	9
	InP	0,6	11
	InSb	0,3	6
II-VI	CdS	1	22
	CdSe	0,9	19
	CdTe	0,6	11
	ZnO	2	64
	ZnS	1	22
	PbS	0,9	19
	PbTe	0,8	17
	PbSe	0,5	9

Таблица 1.1.3

Основные параметры важнейших полупроводниковых материалов
Basic parameters of more important semiconductor materials

	Ge	Si	GaAs	GaP	CdS	CdTe	ZnS	ZnS
Количество атомов в 1см^3 Atoms/ cm^3	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,0 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	$5,02 \cdot 10^{22}$	$4 \cdot 10^{22}$	$1,46 \cdot 10^{22}$	$5 \cdot 10^{22}$	
Атомная масса Atomic weight	72,60	28,09	144,63	100,7	144,46	240	97,45	
Напряжение пробоя, В/см Breakdown, V/cm	$\sim 10^5$	$\sim 3 \cdot 10^5$	$\sim 4 \cdot 10^5$					
Кристаллическая структура Crystal structure	Алмаз Diamond	Алмаз Diamond	Цинковая обманка Zincblende	Цинковая обманка Zincblende	Wurtzite Вюрцит	Цинковая обманка Zincblende	Цинковая обманка Zincblende	Wurtzite Вюрцит
Плотность, г/см ³ Density, g/ cm^3	5,3267	2,328	5,32	4,07	4,82	5,86	4,09	4,10
Относительная диэлектрическая проницаемость Dielectric constant	16,0	11,9	13,1	11,1	5,4	10,2	5,2	
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_c , см^{-3} Effective density of states in conduc- tion band N_c , см^{-3}	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$8,6 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{19}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне N_v , см^{-3} Effective density of states in valence band N_v , см^{-3}	$6,0 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$5,2 \cdot 10^{19}$	$8,32 \cdot 10^{19}$	$9,6 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{19}$	$1,42 \cdot 10^{19}$

Продолжение табл. 1.1.3.

Эффективная масса m^*/m_0 электронов Effective mass m^*/m_0 Electrons	$m_l^*=1,64$ $m_l^*=0,082$	$m_l^*=0,98$ $m_l^*=0,19$	0,067	0,82	0,21	0,096	0,27	
Дырок Holes	$m_{lh}^*=0,044$ $m_{hh}^*=0,28$	$m_{lh}^*=0,16$ $m_{hh}^*=0,49$	$m_{lh}^*=0,082$ $m_{hh}^*=0,45$	0,60	0,80	0,35	0,58	
Сродство к электрону, эВ Electron affinity, eV	4,0	4,05	4,07					
Ширина запрещенной зоны при 300K, эВ Energy gap (eV) at 300K	0,66	1,12	1,424	2,26	2,42	1,56	3,68	3,74
Собственная концентрация, см^{-3} Intrinsic carrier concentration, cm^{-3}	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$1,79 \cdot 10^6$	6,7	0,299	$4,03 \cdot 10^6$	$2,02 \cdot 10^{-12}$	
Собственная длина Дебая, мкм Intrinsic Debye length, μm	0,68	24	2250					
Собственное удельное сопротивление Intrinsic resistivity, $\Omega \cdot \text{cm}$	47	$2,3 \cdot 10^5$	10^8	$4,16 \cdot 10^{15}$	$5,26 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^9$	$1,8 \cdot 10^{27}$	
Постоянная решетки, Å Lattice constant, Å	5,64613	5,43095	5,6533	5,451	4,13(a) 6,75(c)	6,48	5,41	3,82(a) 6,26(c)
Температурный коэффициент линейного расширения, $\Delta L/L\Delta T$, $^\circ\text{C}^{-1}$ Linear coefficient of thermal expansion, $\Delta L/L\Delta T$, $^\circ\text{C}^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$6,86 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	

Окончание табл. 1.1.3.

Точка плавления, °C Melting point, °C	937	1415	1238	1467	1750	1041	1020	1780
Время жизни неосновных носителей, с Minority carrier lifetime, s	10^{-5}	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 10^{-8}$					
Дрейфовая подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ электронов дырок	3900 1900	1500 450	8500 400	110 75	340 50	1050 100		165 5
Энергия Рамановских фононов E_p , эВ Optical-phonon energy, eV	0,037	0,063	0,035					
Средняя длина свободного пробега фононов λ_0 , Å Phonon mean free path λ_0 , Å	105	76 (электрон) 55 (дырка)	58					
Удельная теплота, Дж/(г·°C) Specific heat, J/(g·°C)	0,31	0,7	0,35					
Теплопроводность при 300К, Вт/(см·°C) Thermal conductivity at 300K, W/(cm·°C)	0,6	1,5	0,46		0,2	0,075	0,026	
Коэффициент тепловой диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$ Thermal diffusivity, $\text{см}^2/\text{s}$	0,35	0,9	0,44					
Давление паров, Па Vapor pressure, Pa	1 при 1330°C 10^{-6} при 760°C	1 при 1650°C 10^{-6} при 900°C	100 при 1050°C 1 при 900°C		3,8 при тем. плавления	0,23 при тем. плавления	3,7 при тем. плавления	

Таблица 1.1.4

Свойства важнейших полупроводников
Properties of important semiconductors

Полупроводник		Ширина запрещенной зоны (эВ)		Подвижность при 300К (см ² /В·с)			Эффективная масса m*/m ₀		
Semiconductor		Bandgap (eV)		Mobility at 300K (cm ² /V·с)		Зона band	Effective mass m*/m ₀		ε _s /ε ₀
		300K	0K	электрон	дырка		электрон	дырка	
Элемент	C	5,47	5,48	1800	1200	I	0,2	0,25	5,7
	Ge	0,66	0,74	3900	1900	I	1,64 0,082	0,04 0,28	16,0
	Si	1,12	1,17	1500	450	I	0,98 0,19	0,16 0,49	11,0
	Sn		0,082	1400	1200	D			
IV-IV	α-SiC	2,996	3,03	400	50	I	0,60	1,00	10,0
III-V	AlSb	1,58	1,68	200	420	I	0,12	0,98	14,4
	BN	7,5				I			7,1
	BP	2,0							
	GaN	3,36	3,50	380			0,19	0,60	12,2
	GaSb	0,72	0,81	5000	850	D	0,042	0,40	15,7
	GaAs	1,42	1,52	8500	400	D	0,067	0,082	13,1
	GaP	2,26	2,34	110	75	I	0,82	0,60	11,1
	InSb	0,17	0,23	80000	1250	D	0,0145	0,40	17,7
	InAs	0,36	0,42	33000	460	D	0,023	0,40	14,5
	InP	1,35	1,42	4600	150	D	0,077	0,64	12,4
II-VI	CdS	2,42	2,56	340	50	D	0,21	0,80	5,4
	CdSe	1,70	1,85	800		D	0,13	0,45	10,0
	CdTe	1,56		1050	100	D			10,2
	ZnO	3,35	3,42	200	180	D	0,27		9,0
	ZnS	3,68	3,84	165	5	D	0,40		5,2
IV-VI	PbS	0,41	0,286	600	700	I	0,25	0,25	17,0
	PbTe	0,31	0,19	6000	400	I	0,17	0,20	30,0

I – непрямозонная структура

D – прямозонная структура

§1.2 КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кристаллическая структура полупроводников делится на 4 группы: структура алмаза, структура цинковой обманки, структура вюрцита и структура каменной соли. Основой структуры алмаза, цинковой обманки и каменной соли является гранецентрированная кубическая решетка.

Структура алмаза представляет собой сочетание двух гранецентрированных кубических подрешеток, вставленных друг в друга. У одной подрешетки начало координат совмещено с точкой 0.0.0., у другой сдвинуто вдоль диагонали куба на четверть ее длины в точку $\frac{1}{4}.\frac{1}{4}.\frac{1}{4}$. Решетка алмаза не относится к числу плотно упакованных структур.

Структуру цинковой обманки можно получить из структуры алмаза, в случае, если узлы каждой гранецентрированной кубической решетки будут иметь разные атомы. Например, в одной решетки Ga, в другой – As. Координаты атомов Ga и As в решетке, соответственно, 0.0.0. и $\frac{1}{4}.\frac{1}{4}.\frac{1}{4}$. Структура каменной соли состоит из двух гранецентрированных кубических подрешеток. Первая подрешетка состоит из атомов Na, а другая – из атомов Cl. Координаты этих атомов в такой структуре будут, соответственно, 0.0.0. и $\frac{1}{2}.0.0.$

Структура вюрцита – это плотно упакованная гексагональная решетка, которая состоит из двух взаимно проникающих простых гексагональных решеток Браве, смещенных относительно друг друга на $\frac{1}{3}.\frac{1}{3}.\frac{1}{3}$.

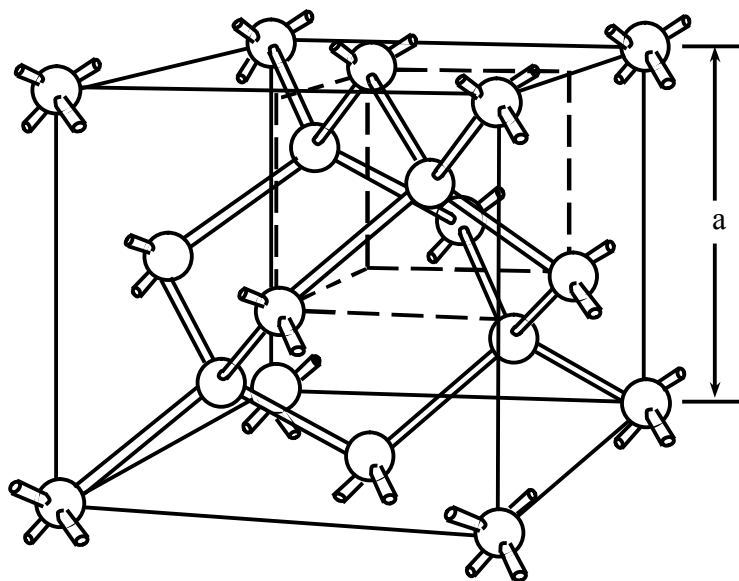


Рис. 1.2.1. Кристаллическая решетка алмаза
Crystal lattice of diamond.

Решетку алмаза, которую имеют элементарные полупроводники, можно представить как две гранецентрированные кубические решетки, сдвинутые относительно друг друга на четверть объемной диагонали элементарной ячейки (рис. 1.2.1). У элементарных полупроводников в узлах подрешетки находятся одинаковые атомы. Такую структуру имеют следующие элементарные полупроводниковые материалы: C, Si, Ge и Sn. На рисунке 1.2.2 представлена тетраэдрическая, ковалентная, химическая связь элементарных полупроводников.

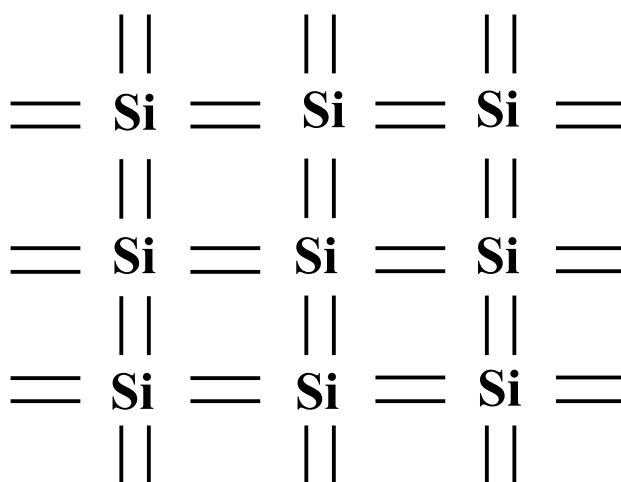


Рис 1.2.2. Ковалентная, тетраэдрическая связь.

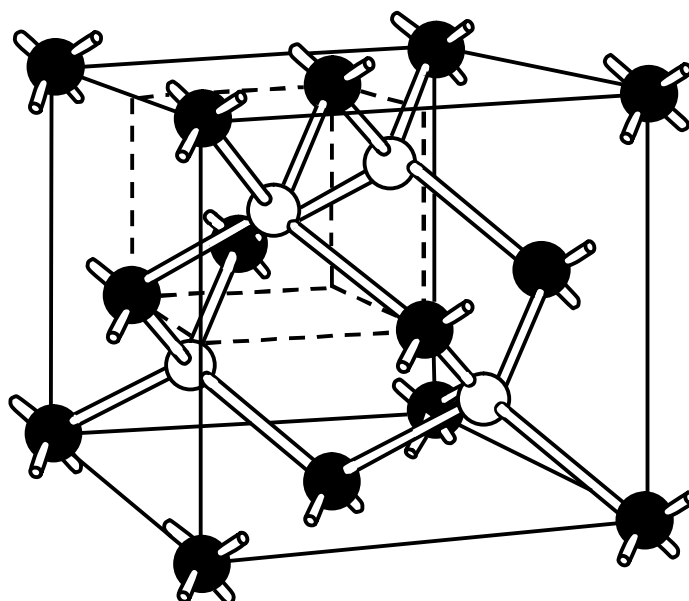


Рис. 1.2.3. Кристаллическая решетка цинковой обманки.
Crystal lattice of zincblende.

Решетку цинковой обманки можно представить как две гранецентрированные кубические решетки, сдвинутые относительно друг друга на четверть объемной диагонали элементарной ячейки (рис. 1.2.3). В отличие от алмаза и подобных полупроводников, в решетке типа цинковой обманки, одну подрешетку составляют атомы одного элемента, а другую – атомы другого элемента. Например Ga и As. Такую структуру имеют следующие полупроводниковые материалы: AlAs, AlP, AlSb, BN, BP, GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb, CdS, CdSe, CdTe, ZnS и т.д.

На рисунке 1.2.4. показана тетраэдрическая, ионно – ковалентная связь полупроводниковых материалов $A^{III}B^V$.

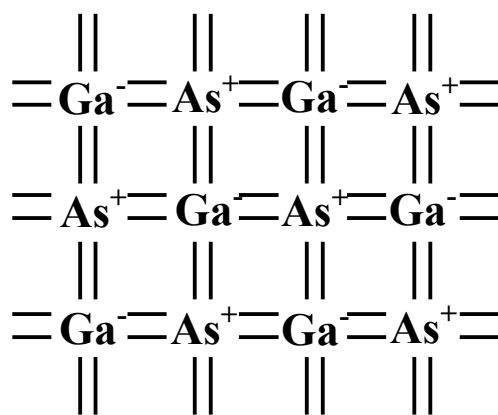


Рис 1.2.4. Ионно – ковалентная, тетраэдрическая связь полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$

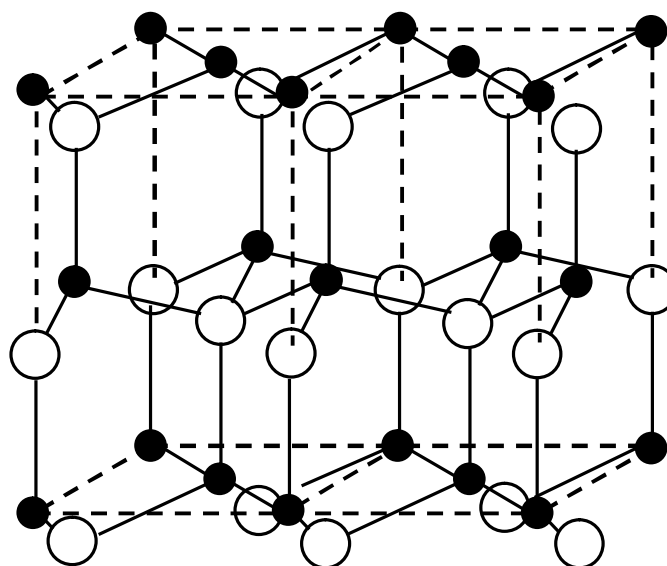


Рис. 1.2.5. Кристаллическая решетка вюрцита.
Crystal lattice of wurtzite.

Решетку вюрцита (рис. 1.2.5.), можно представить как две вставленные друг в друга плотно упакованные гексагональные подрешетки. В кристаллической структуре вюрцита, как и в решетках типа цинковой обманки, отдельный атом также находится в тетраэдрическом окружении четырех ближайших соседей. Такую структуру имеют следующие полупроводниковые материалы: SiC, GaN, CdS и ZnS.

На рисунке 1.2.6. показана тетраэдрическая, ионно – ковалентная связь полупроводниковых материалов $A^{II}B^{VI}$.

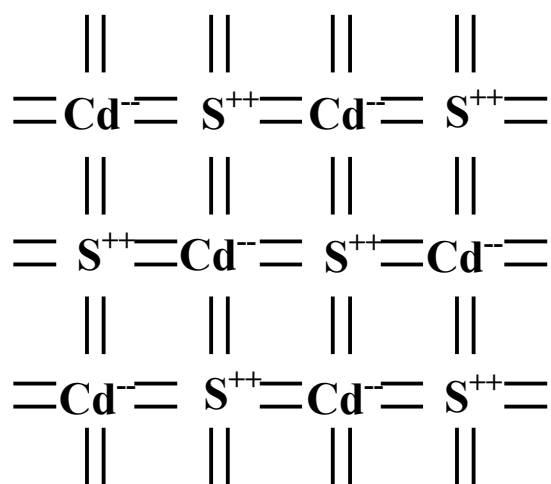


Рис. 1.2.6. Ионно – ковалентная тетраэдрическая связь полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$

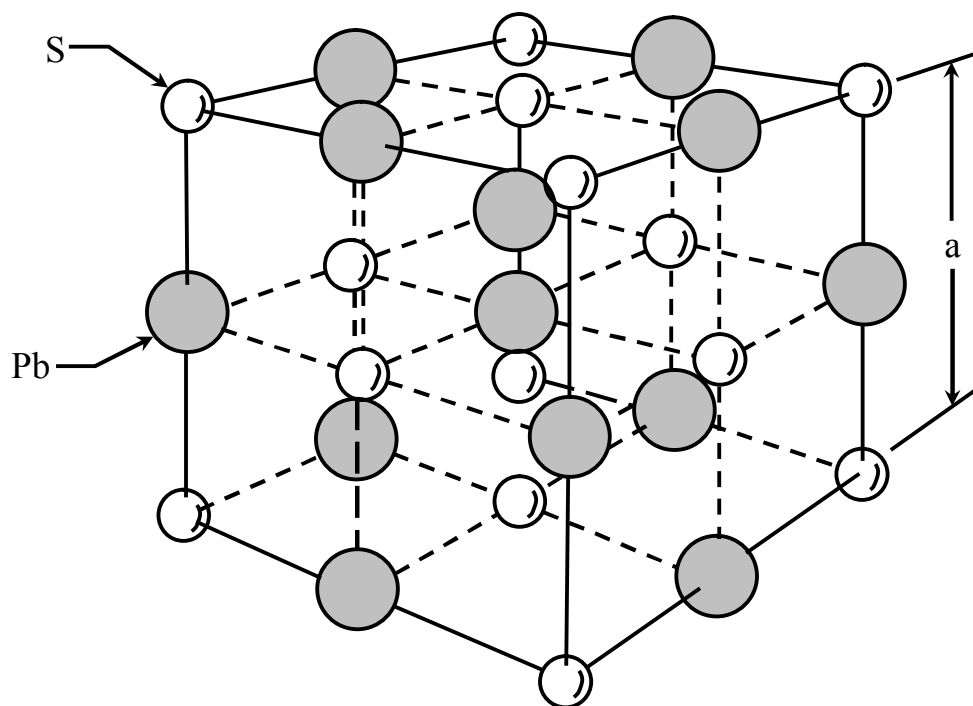


Рис. 1.2.7. Кристаллическая решетка каменной соли.
Crystal lattice of rock salt.

Решетку каменной соли, можно рассматривать как две гранецентрированные кубические решетки, вставленные друг в друга (рис. 1.2.7.), каждая из которых содержит ионы лишь одного знака (элемента). Заметим, что одной из важнейших характеристик любой структуры является координационное число. Координационное число равно числу ближайших соседей, окружающих данный атом. В представленной решетке каждый атом одного элемента окружен шестью ближайшими соседями – атомами другого элемента.

Такую структуру имеют следующие полупроводниковые материалы: PbS, PbSe, PbTe .

§1.3 СЛОЖНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В последние годы очень интенсивно исследуется получение многокомпонентных полупроводниковых соединений на основе $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$. Такие исследования необходимы, во – первых, для получения новых полупроводниковых материалов с заданными фундаментальными параметрами, во – вторых, на основе таких материалов создаются более совершенные, многокаскадные гетероструктуры, позволяющие расширить диапазон спектра излучения в полупроводниковых лазерах, и создать более эффективные солнечные элементы. Особенностью технологии получения таких материалов является частичная замена основных атомов соединений $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ изовалентными примесями в определенном процентном соотношении. При этом получаются новые сложные твердые растворы, параметры которых отличаются от базовых.

В таблице 1.3.1. приведена электронная структура некоторых элементов III, V, а также элементов II и VI групп, на основе которых создаются многокомпонентные соединения.

Таблица 1.3.1

Элементы III группы		Элементы V группы	
Элемент	Электронная структура	Элемент	Электронная структура
B	$1s^2 2s^2 2p^1$	N	$1s^2 2s^2 2p^3$
Al	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$	P	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
Ga	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$	As	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^3$
In	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^1$	Sb	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^1$

Элементы II группы		Элементы VI группы	
Элемент	Электронная структура	Элемент	Электронная структура
Zn	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$	S	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Cd	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2$	Se	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^4$
		Te	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^4$

Если в решетке GaAs частично заменить Ga алюминием (Al), то мы получим твердый раствор типа $Ga_{1-x}Al_xAs$. В зависимости от доли атомов Al такой твердый раствор будет всегда иметь больше E_g , чем GaAs вплоть до ширины запрещенной зоны AlAs. Так как валентные электроны Al, как видно из таблицы 1.3.1., находятся более близко к ядру, то энергия связи валентных электронов Al, больше чем энергия связи валентных электронов Ga. Если мы заменим в решетке Ga на В, то E_g будет еще больше. В случае замены Ga на In в решетке GaAs, в зависимости от доли In, ширина запрещенной зоны нового материала всегда будет меньше, чем E_g GaAs.

Аналогичная ситуация частичной замены элементов V группы в структурах $A^{III}B^V$, фосфором или азотом позволяет получить материал с большей E_g , чем у основного материала. Если заменить As на Sb, то получаем E_g всегда меньшее E_g GaAs независимо от доли атомов Sb в решетке (GaAs).

Такая же закономерность строго сохраняется и при получении сложных полупроводниковых соединений на основе $A^{II}B^{VI}$. Таким образом, целенаправленная замена одного из элементов $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$ соответствующим изовалентным атомом позволяет получить новый материал с управляемыми основными фундаментальными параметрами. Ниже приведены параметры сложных полупроводниковых соединений на основе $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$, а также зависимость E_g от состава для некоторых полупроводниковых соединений.

Ширина запрещенной зоны некоторых сложных полупроводников, эВ

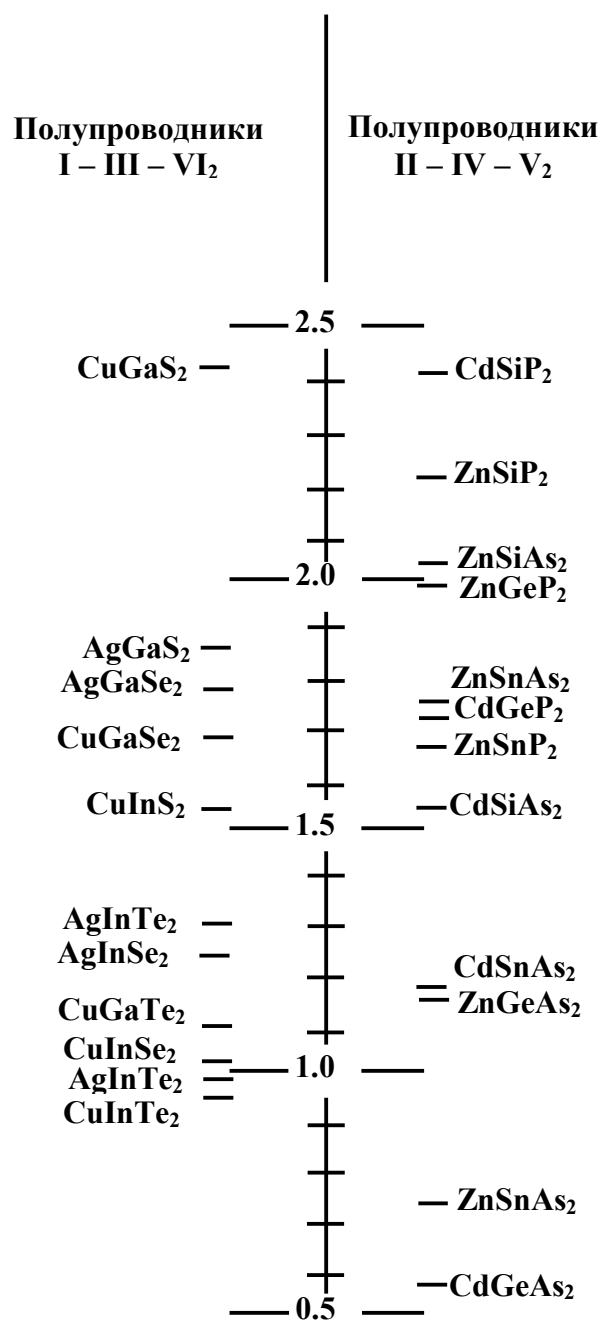


Рис.1.3.1 Ширина запрещенной зоны полупроводников I-III-VI₂ и II-IV-V₂.

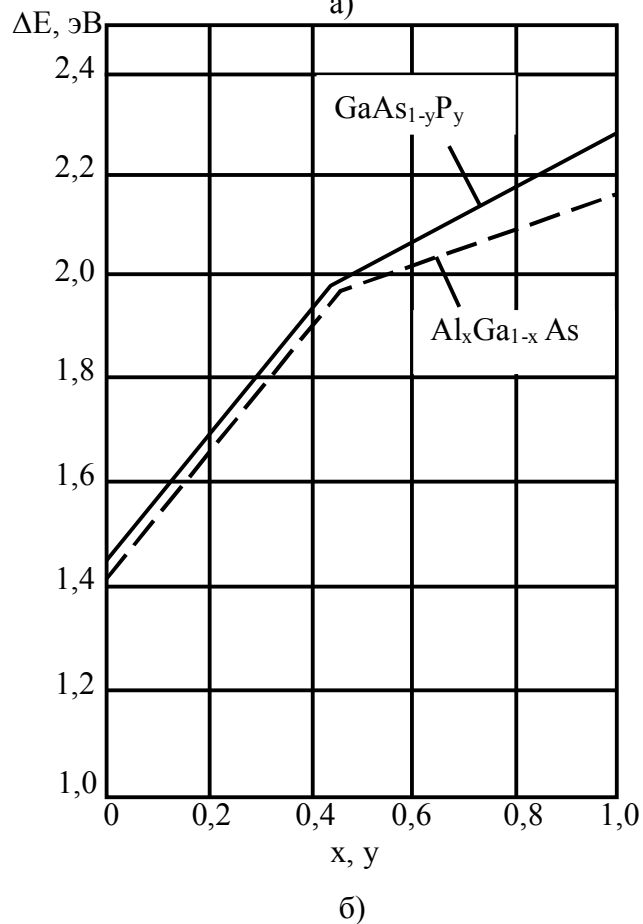
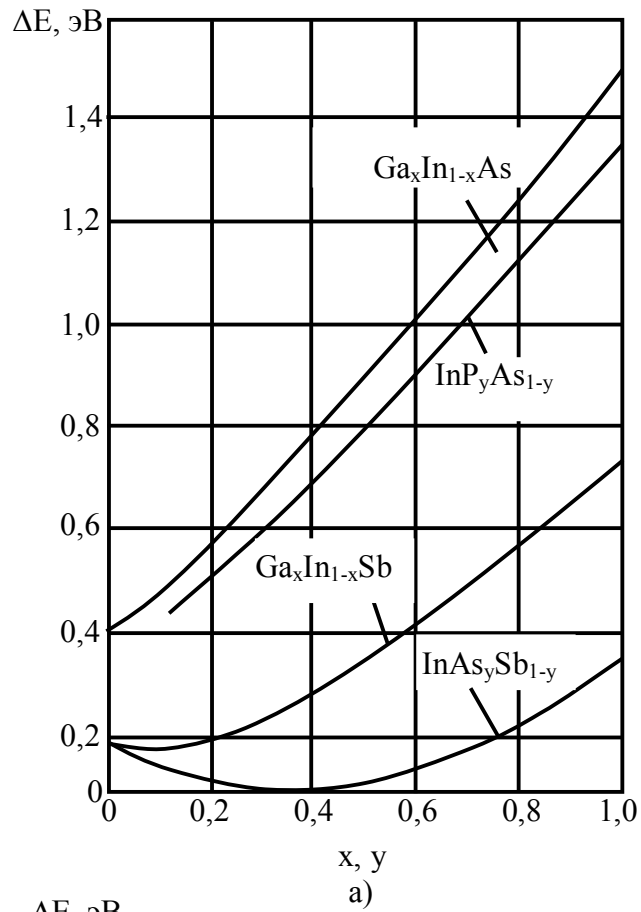


Рис. 1.3.2. Зависимость ширины запрещенной зоны от состава твердых растворов на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ($T=300\text{K}$);
 а – соединения – партнеры, имеющие одинаковую зонную структуру; б – соединения – партнеры, имеющие различную зонную структуру

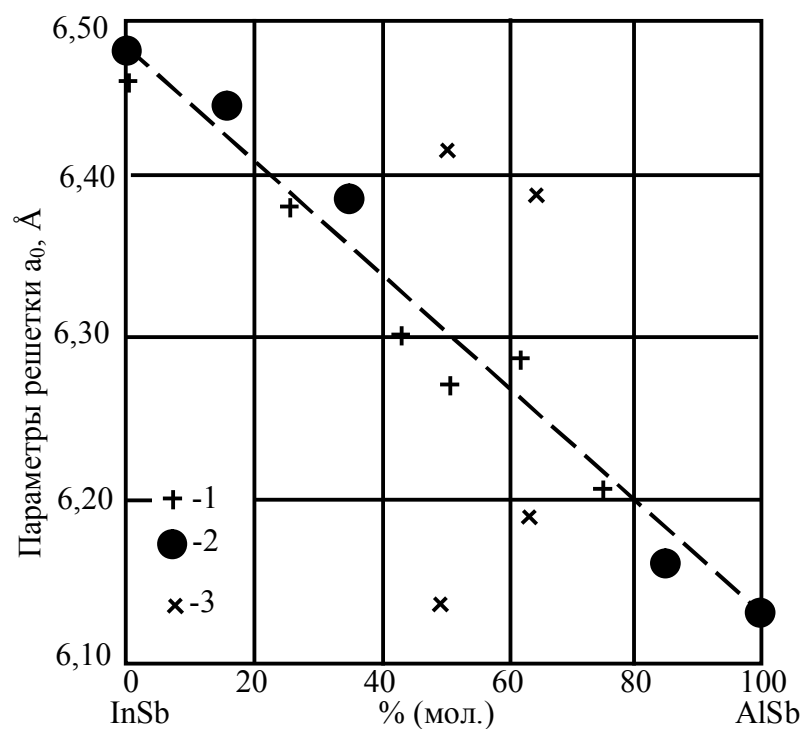


Рис. 1.3.3. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы AlSb – InSb.

1 – по данным Б.В. Баранова и Н.А. Горюновой; 2 – по данным Вуля и Смита (равновесные значения); 3 – по данным Вуля и Смита (неравновесные значения)

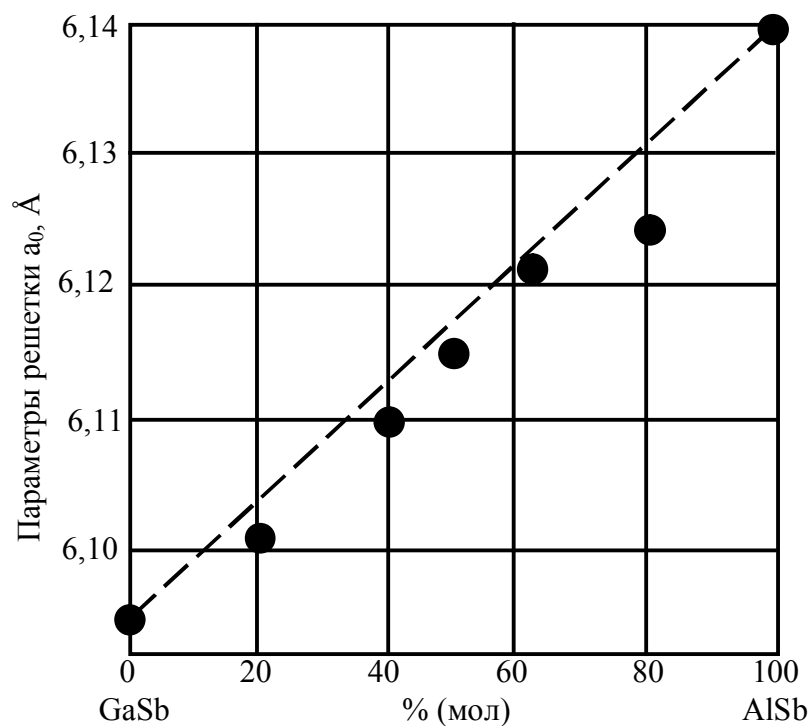


Рис. 1.3.4. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы AlSb – GaSb.

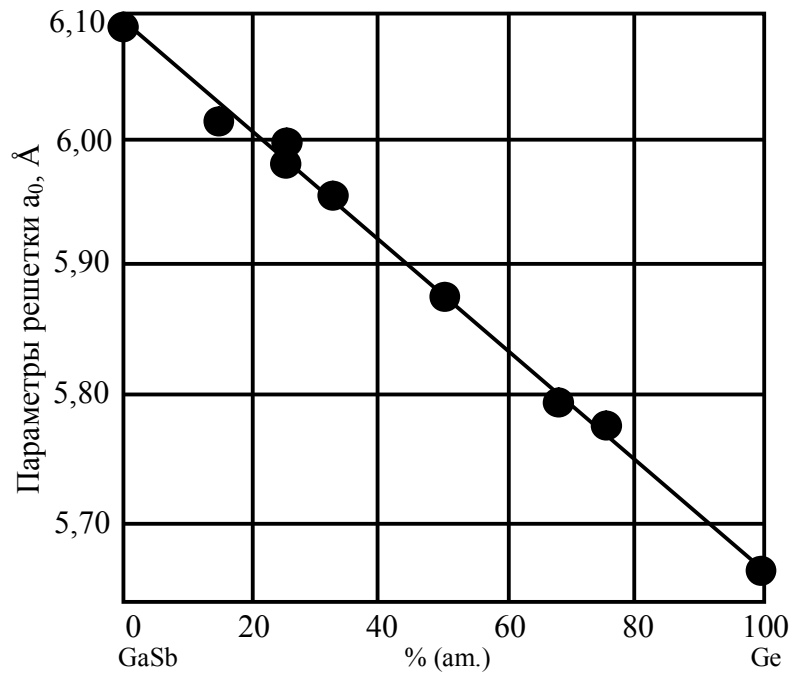


Рис. 1.3.5. Изменение параметров решетки при изменении состава закаленных сплавов Ge – GaSb.

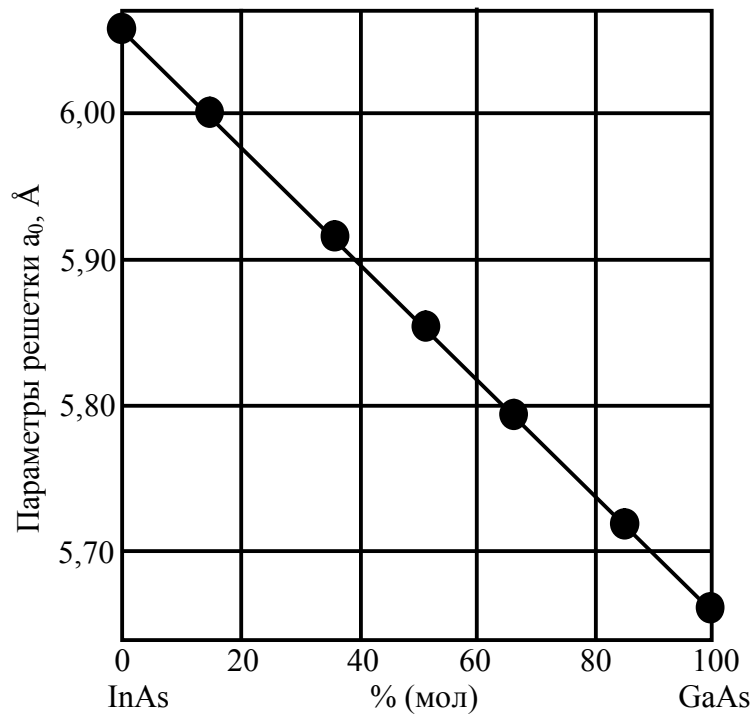


Рис. 1.3.6 Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы GaAs – InAs.

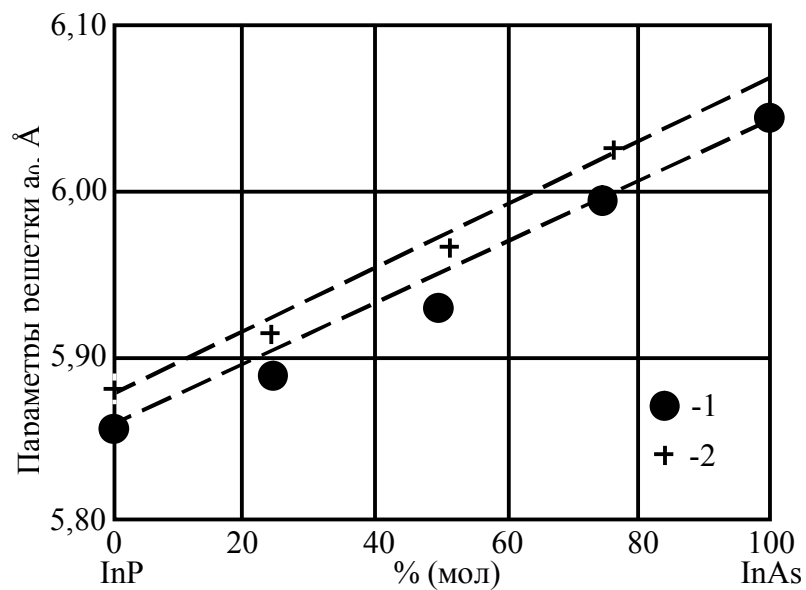


Рис. 1.3.8. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы InAs – InP.
1 – по данным Фольберта; 2 – по данным Кестера и Ульриха

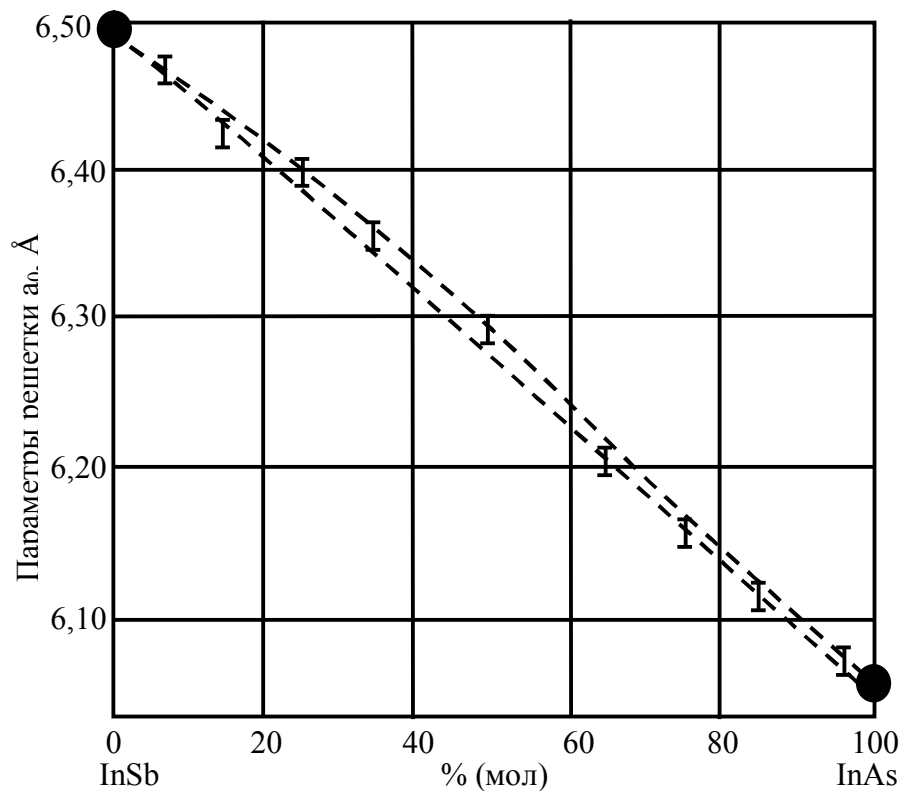


Рис. 1.3.9. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы InAs – InSb.

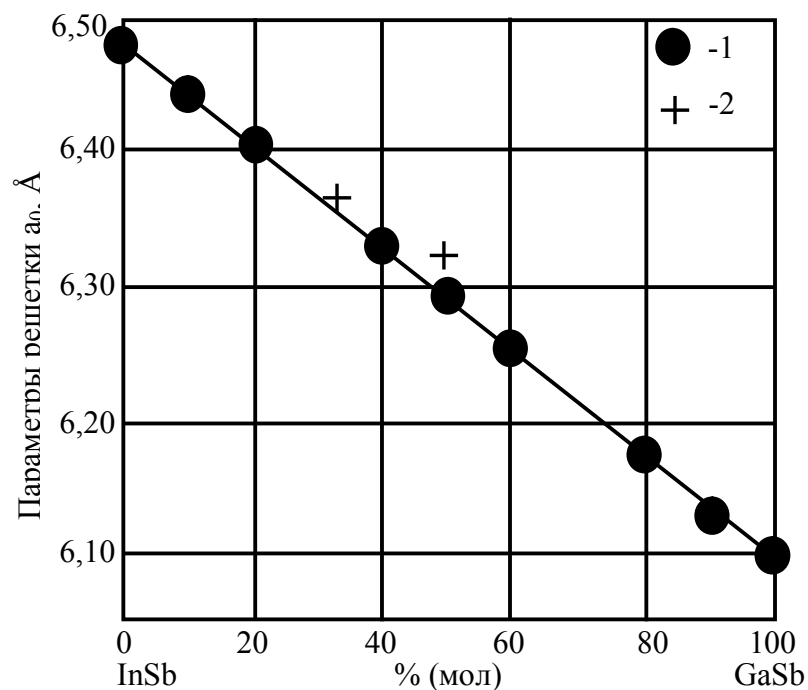


Рис. 1.3.10. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы GaSb – InSb.

1 – данные Вулея и Смита; 2 – данные Н.А. Горюновой и Н.М. Федоровой

Как видно из этих экспериментальных данных, при замене одного из компонентов полупроводниковых материалов соответствующими изовалентными примесями, меняется постоянная решетки нового материала. Следует отметить, что при этом с увеличением доли атомов, имеющих маленький атомный (ковалентный) радиус, постоянная решетки нового материала линейно уменьшается.

Таблица 1.3.2

Ширина запрещенной зоны сложных полупроводниковых материалов

$\text{GaAs}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}$	1,21 эВ
$\text{Ga}_{0,47}\text{In}_{0,53}\text{As}$	0,75 эВ
$\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Sb}$	0,36 эВ
$\text{Ga}_{0,3}\text{In}_{0,7}\text{Sb}$	0,24 эВ
$\text{InAs}_{0,2}\text{P}_{0,8}$	1,1 эВ
$\text{Ga}_{0,13}\text{In}_{0,87}\text{As}_{0,37}\text{P}_{0,63}$	1,05 эВ
$\text{GaAs}_{0,45}\text{P}_{0,55}$	1,977 эВ
$\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	1,59 эВ
$\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,86}\text{As}$	1,62 эВ
$\text{Ga}_{0,612}\text{In}_{0,388}\text{As}$	0,95 эВ
CdGaAs_2	0,55 эВ
CdSnP_2	1,15 эВ
ZnGeP_2	2,2 эВ
AgZnSe_2	1,2 эВ
AgZnS_2	2,0 эВ
AgGaS_2	2,7 эВ
CuAlS_2	3,5 эВ

§1.4 СТРУКТУРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗОН ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Структура энергетических зон показывает изменение энергии электрона, как функции волнового вектора в пространстве обратной решетки. Структура энергетических зон полупроводников определяет такие основные фундаментальные параметры, как ширина запрещенной зоны, эффективные массы электронов и дырок, их зависимость от кристаллографического направления. Также она определяет фотоэлектрические, оптические, тензометрические и гальваномагнитные свойства полупроводников. Структуру энергетических зон полупроводников можно разделить на две группы: прямозонную и непрямоzonную. Прямую зонную структуру имеют GaAs, InSb и многие другие полупроводниковые соединения типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$. При этом максимальная точка энергии в валентной зоне и минимальная точка энергии в зоне проводимости лежат при одинаковых значениях волнового вектора k (рис. 1.4.1, а). У второй группы полупроводников, имеющих непрямоzonную структуру, положение точки максимальной энергии в валентной зоне и точки минимальной энергии в зоне проводимости лежат при различных значениях волнового вектора (рис. 1.4.1, б). В полупроводниках с прямой зонной структурой преобладающим механизмом рекомбинации носителей заряда является излучательный. Поэтому такие полупроводниковые материалы используются для создания различных видов светоизлучательных приборов, как полупроводниковые лазеры, светодиоды и т.д. В непрямоzonных полупроводниках рекомбинация носителей заряда осуществляется с участием оптических и акустических фононов. Ниже приведены энергетические зоны некоторых полупроводников.

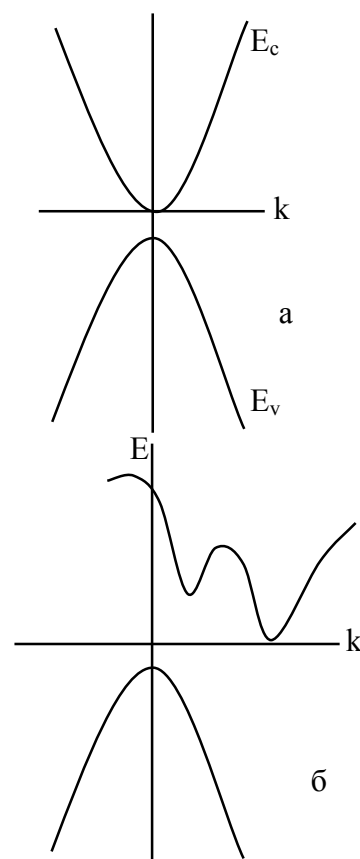


Рис. 1.4.1. Модель прямой (а) и непрямой (б) энергетической структуры полупроводников

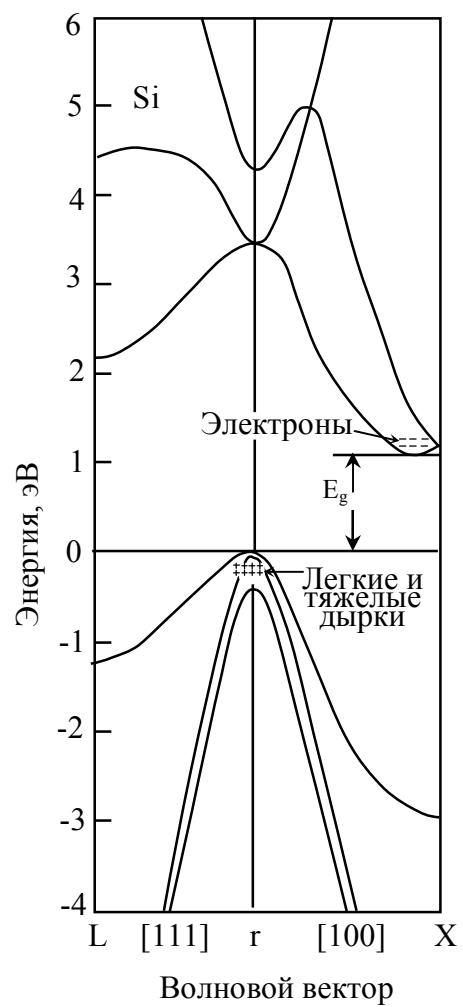


Рис. 1.4.1. Энергетические зоны для Si.
Energy – band structure of Si.

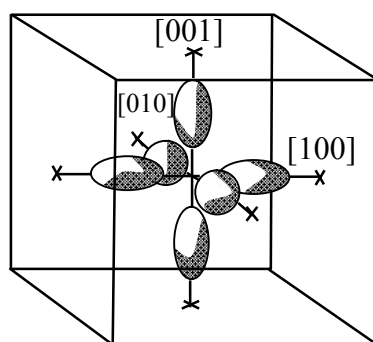


Рис. 1.4.2. Форма поверхностей постоянной энергии для Si.
Shape of constant energy surface in Si.

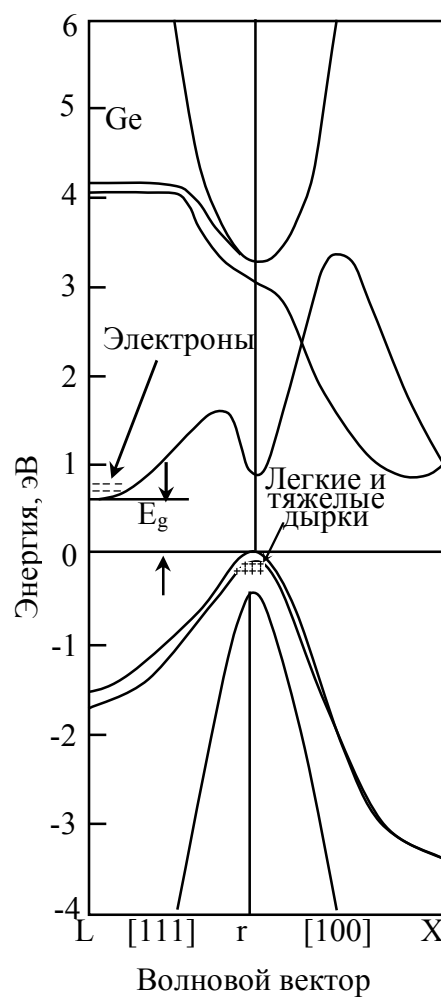


Рис. 1.4.3. Энергетические зоны для Ge.
Energy – band structure of Ge.

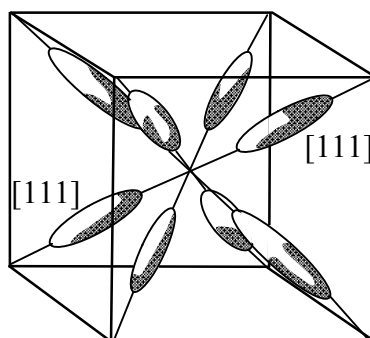


Рис. 1.4.4. Форма поверхностей постоянной энергии для Ge.
Shape of constant energy surface in Ge.

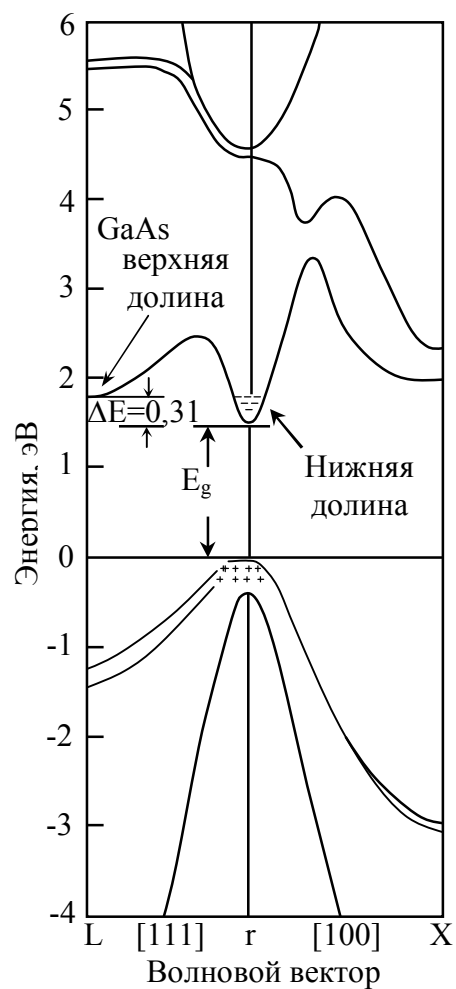


Рис. 1.4.5. Энергетические зоны для GaAs.
Energy – band structure of GaAs.

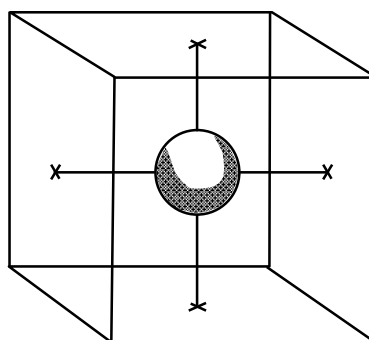


Рис. 1.4.6. Форма поверхностей постоянной энергии для GaAs.
Shape of constant energy surface in GaAs.

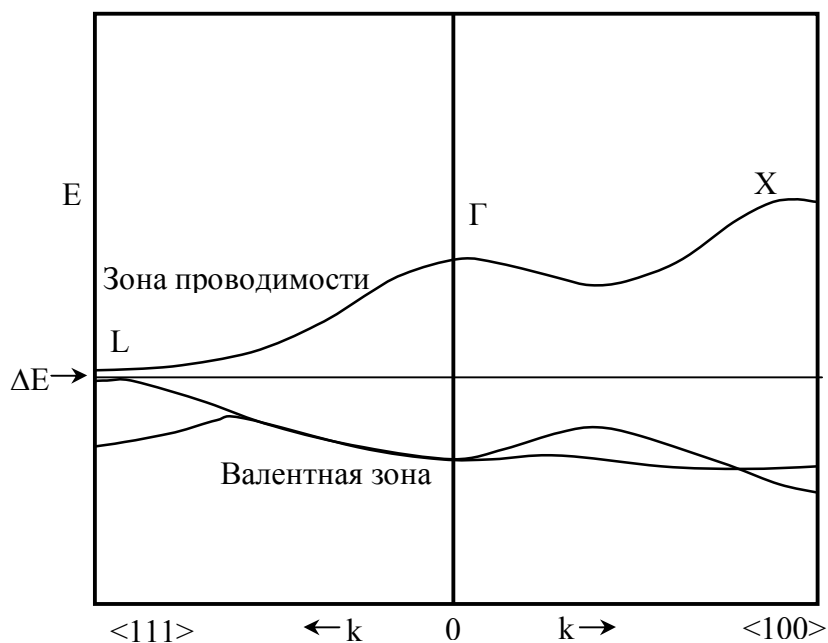


Рис. 1.4.7. Упрощенное схематическое изображение зонной структуры PbTe (не в масштабе).
PbS и PbSe имеют аналогичные зонные структуры.

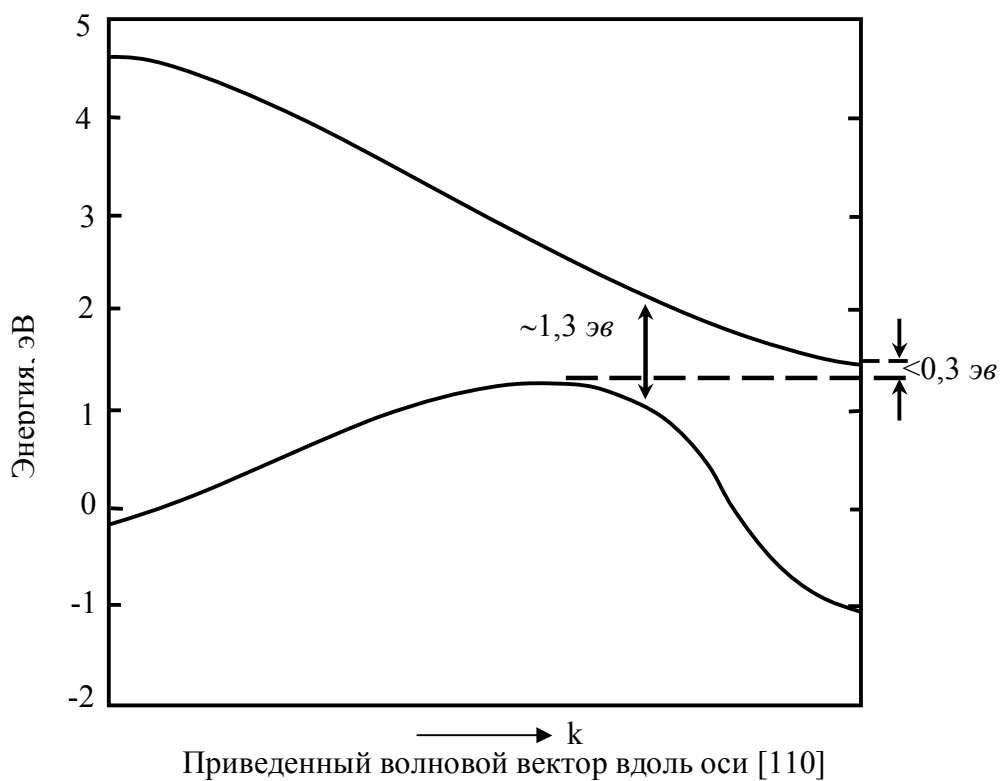


Рис. 1.4.8. Предполагаемая зонная структура для PbS.

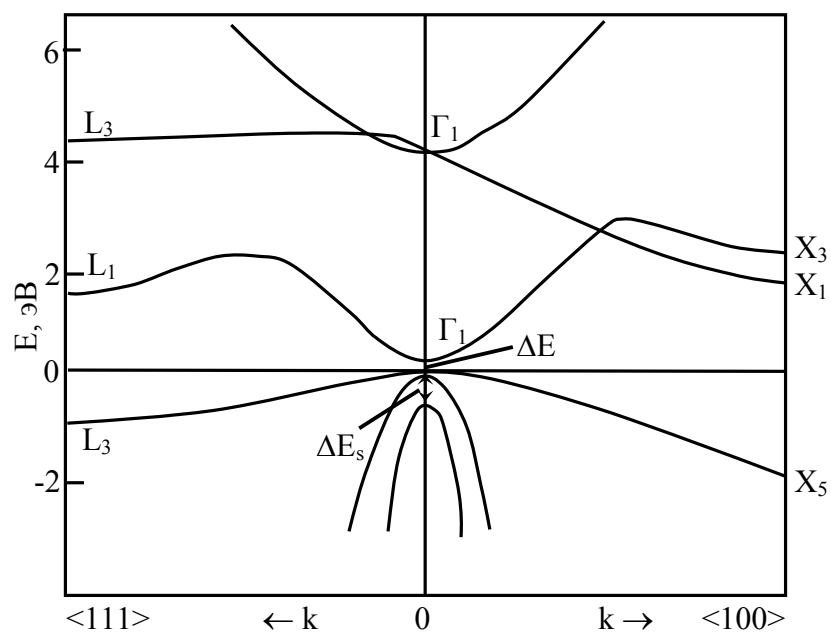


Рис. 1.4.9. Схематическое изображение зонной структуры InSb. Ширина запрещенной зоны (при 300 К) равна: $\Delta E = 0,18$ эВ.

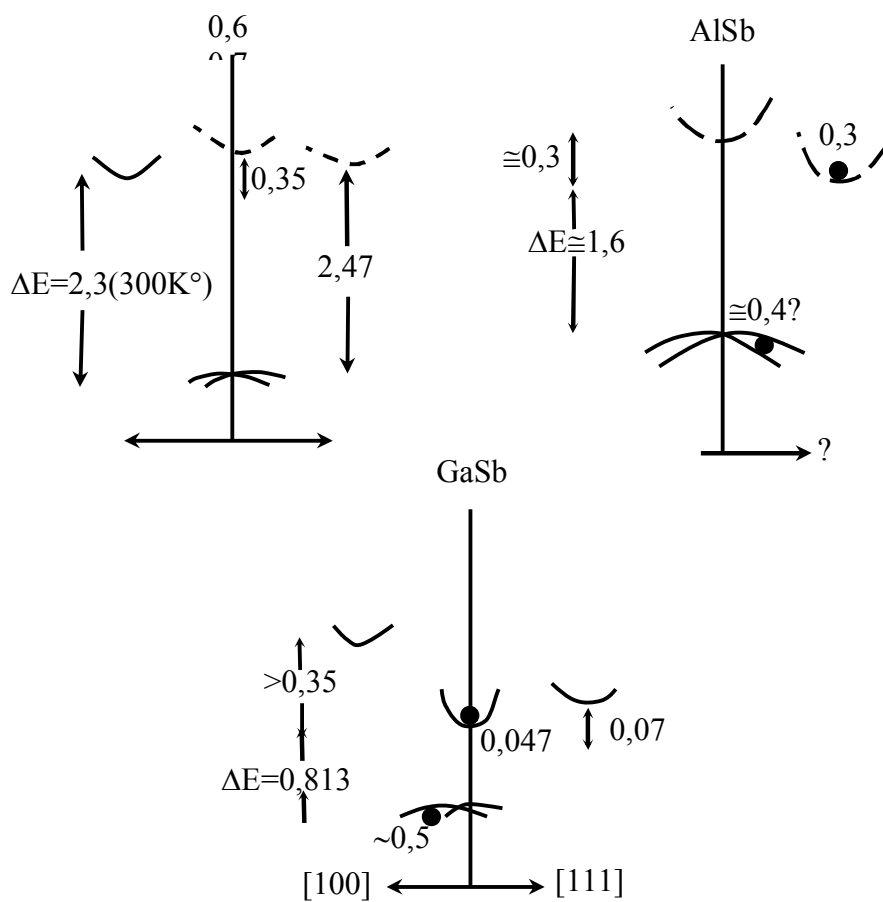


Рис. 1.4.10. Схема энергетических зон некоторых полупроводников.

§1.5 ЭНЕРГИЯ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Одним из фундаментальных параметров полупроводниковых материалов является энергия запрещенной зоны (E_g). Физический смысл E_g – это необходимая энергия для освобождения валентных, участвующих в ковалентной (или частично ионной) связи электронов кристаллической решетки для их участия в проводимости материала. Это необходимая энергия для перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Концентрация свободных носителей заряда, а также собственная проводимость материала зависит от величины E_g . Величина E_g определяется состоянием валентных электронов в электронной структуре атома и типом химической связи.

E_g не является постоянной величиной для данного полупроводника. Она зависит от температуры, давления и степени легирования материала. Температурную зависимость ширины запрещенной зоны, а также ее зависимость от давления можно описать в следующем виде:

$$E_g = E_{g_0} (1 \pm \alpha T), \text{ эВ} \quad (1.5.1)$$

$$E_g = E_{g_0} (1 \pm \beta T), \text{ эВ} \quad (1.5.2)$$

где α - температурный коэффициент E_g ; β - барьерный коэффициент E_g , знак α и β зависят от свойств материала.

Значение E_g определяет собственную концентрацию и соответственную проводимость полупроводникового материала при любой температуре.

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_{g_0}(1 - \alpha T)}{2kT}\right) \quad (1.5.3)$$

N_c , N_v – эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, k – постоянная Больцмана $k=8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К. Физический смысл N_c , N_v будет подробно рассмотрен во второй главе.

E_{g_0} - это ширина запрещенной зоны полупроводника при $T=0\text{K}$, значение которой дано в таблице 1.5.1

Таблица 1.5.1

Ширина запрещенной зоны (эВ) различных полупроводников при T=0K

Тип соединения	Вещество	Ширина запрещенной зоны	Тип соединения	Вещество	Ширина запрещенной зоны
Элементы	Si	1,10	II-VI	CaS	5,4
	Ge	0,68		CaSe	5,0
	Se	2,1		CaTe	4,3
	Te	0,34		MgSe	5,6
	α -Sn	0,08		MgTe	4,7
I-V	Na ₃ Sb	1,1		ZnO	3,2
	KSb	0,9		ZnS	3,7
	K ₃ Sb	1,1		ZnSe	2,6
	Pb ₃ Sb	1,0		ZnTe	2,1
	CsSb	0,8		SrO	5,8
	Cs ₃ Sb	1,6		SrS	4,8
	Cs ₃ Bi	0,5		SrSe	4,6
I-VI	Cu ₂ O	2,0		SrTe	4,0
	Ag ₂ S	0,9		CdS	2,4
	Ag ₂ Te	0,67 (при низких T) 0,98 (при высоких T)		CdSe	1,7
				CdTe	1,5
				BaO	4,2
				BaS	4,0
				BaSe	3,7
I-VII	CuBr	2,9		BaTe	3,4
	AgJ	2,8		HgS	2,0
				(<<красная>>)	
II-IV	Mg ₂ Si	0,7		HgSe	0,6
	Mg ₂ Ge	0,6	II-VII	HgTe	0,02
	Mg ₂ Sn	0,3		HgJ ₂	2,13 (при низких T) 2,55 (при низких T)
	Ca ₂ Si	1,9			
	Ca ₂ Sn	0,9			
	Ca ₂ Pb	0,46			
II-V	Mg ₃ Sb ₂	0,82	III-V	AlAs	2,4
	Zn ₃ P ₂	1,15		AlSb	1,5
	Zn ₃ As ₂	1,0		GaN	3,4
	ZnSb	0,56		GaP	2,24
	Cd ₃ P ₂	0,55		GaAs	1,4
	Cd ₃ As ₂	0,55		GaSb	0,67
	CdSb	0,50		InP	1,25
				InAs	0,33
				InSb	0,18

Таблица 1.5.2.

Температурная зависимость ширины запрещенной зоны

$$E_g = E_{g_0} \pm \alpha T$$

Вещество	$\alpha, 10^{-4} \text{ эв/}^\circ\text{C рад}$	Вещество	$\alpha, 10^{-4} \text{ эв/}^\circ\text{C рад}$
Si	-4	InP	-4,7
Ge	-4,5	InAs	-3,5
Se	-9	InSb	-2,7
Te	-0,2 (100 -300° K) -0,5 (300- 400° K)	Al ₂ S ₃	-11,5
Cu ₂ O	-2	Al ₂ Se ₃	-11,2
AgCl	-10,2	Ga ₂ O ₃	-8,3
Mg ₂ Si	-6	Ga ₂ S ₃	-6,7
Mg ₂ Ge	-9	GaSe	-4,0
Mg ₂ Sn	-3,5	Ga ₂ Se ₃	-4,4
ZnS	-4,6 (при 77° K) -8,5 (при 800° K)	GaTe	-6
ZnSe	-8	In ₂ O ₃	-5,4
CdS	-5,2	In ₂ S ₃	-7,7
CdSe	-4,6	In ₂ Se ₃	-6,8
CsTe	-2,3 (при 77° K) -5,4 (при 800° K)	In ₂ Te ₃	-4,0
HgJ ₂	-7 (низкотемпературная модификация при 150° C) -14 (низкотемпературная модификация при 350° K) -24 (высокотемпературная модификация)	SiC	-4,2
AlSb	-3,5	TiO ₂	-3,3
GaP	-5,5	PbS	-8,9
GaAs	-5,0	PbSe	+4,0
GaSb	-3,5	PbTe	+4,0
		As ₂ S ₃	+4,0
		Sb ₂ Se ₃	-5,6
		Sb ₂ Te ₃	-7,0
		Bi ₂ Se ₃	-2,0
		Bi ₂ Te ₃	-9,0
		AgInSe	-1,2
		CuInSe ₂	-1,5
		AgInSe ₂	-2,3
		CuInTe ₂	-3,2
		CuFeS ₂	-2,2

E_{g_0} – ширина запрещенной зоны при T=0

E_g – ширина запрещенной зоны при данной температуре

α – температурный коэффициент

Как видно из таблицы 1.4.2. для полупроводников типа IV-VI группы PbS, PbSe, PbTe температурный коэффициент α - является положительным, т.е. с ростом температуры величина E_g – увеличивается.

Температурная зависимость E_g для некоторых полупроводниковых материалов

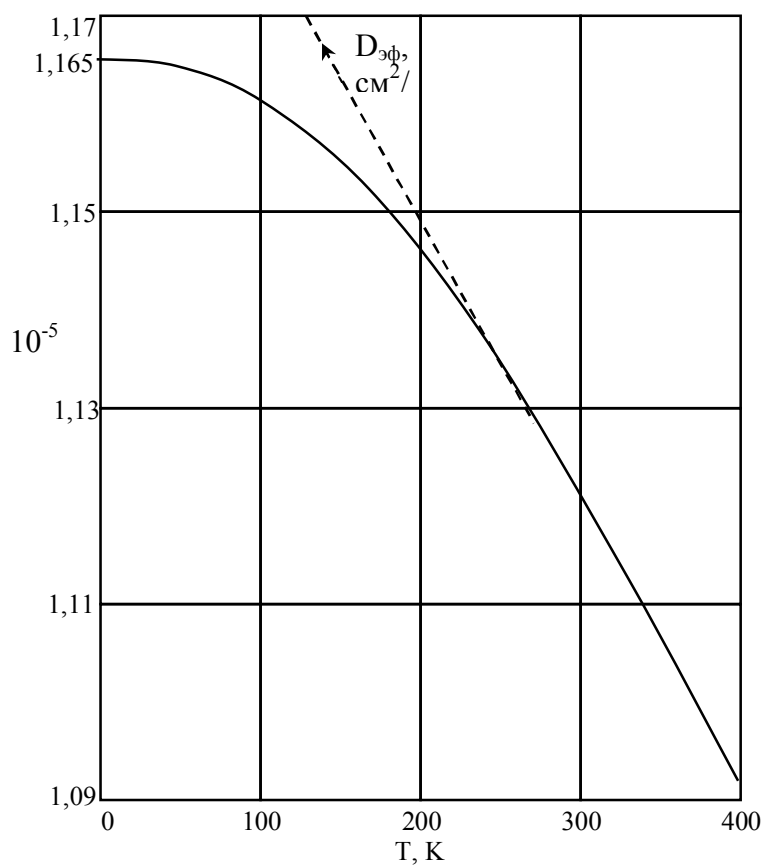


Рис. 1.5.1. Зависимость ширины запрещенной зоны ΔE_g в Si от температуры T .

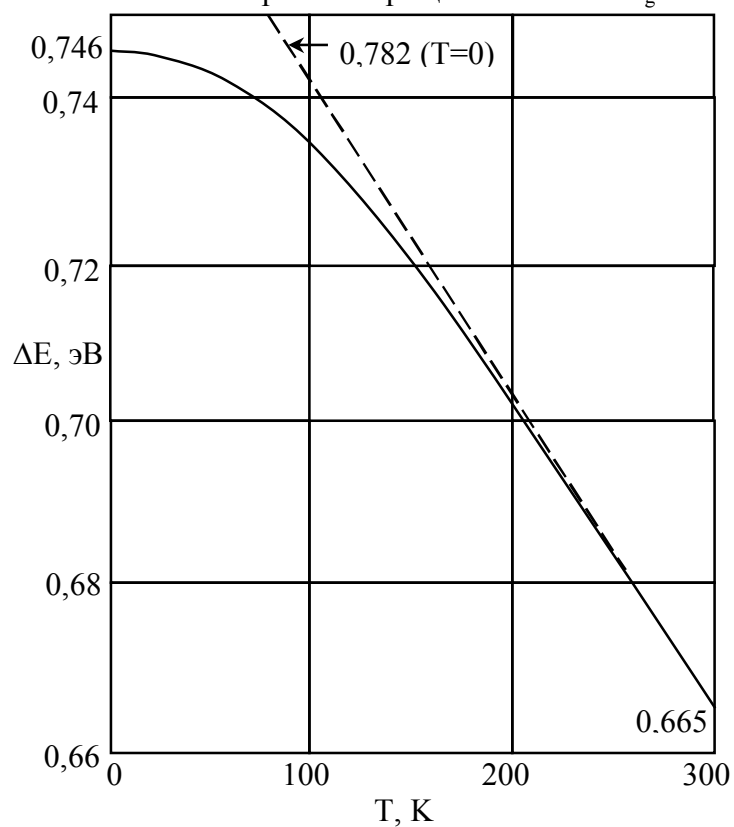


Рис. 1.5.2 Зависимость ширины запрещенной зоны ΔE_g в Ge от температуры.

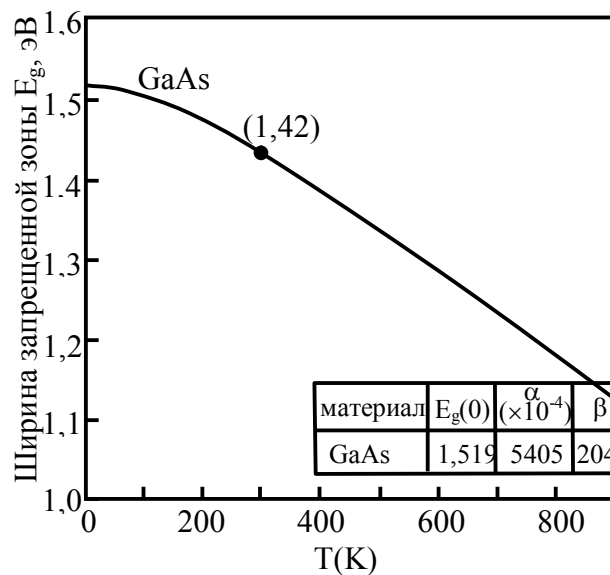


Рис. 1.5.3 Зависимость ширины запрещенной зоны GaAs от температуры

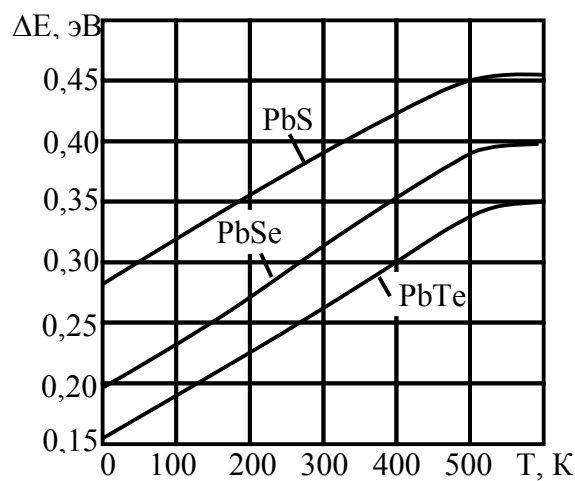


Рис. 1.5.4 Температурные зависимости ширины запрещенной зоны для халькогенидов свинца

Таблица 1.5.3.

Ширина запрещенной зоны халькогенидов свинца

Материал	T, K	$\Delta E, \text{эВ}$
PbS	290	0,41
	77	0,31
	4	0,29
PbSe	290	0,27
	77	0,17
	4	0,15
PbTe	290	0,32
	77	0,22
	4	0,19

Таблица 1.5.4

Зависимость ширины запрещенной зоны от давления

$$E_G = E_{G(p=0)} \pm \beta P$$

Вещество	β , 10^{-6} эВ/атм (при низком давлении)	Величина давления при $E_{G_{\text{макс}}}$, атм	β , 10^{-6} эВ/атм (при высоком давлении)	Величина давления при фазовом переходе	β , 10^{-6} эВ/атм (новая фаза)
Si	-2,0				
Ge	+8,0	50000	-1,2		
GaP	+1,8	22000	-1,7		
GaAs	+9,4	60000	-8,7		
GaSb	+12,3	50000			
ZnO	0,6-1,9			10^5	+1,9
ZnS (куб.)	+5,7				
ZnS (гекс)	+9				
ZnSe	+6,0	13000			
ZnTe	+6,0		-2,9		
CdS	+3,3			27500	$\ll 1$

§1.6 ОКИСЬ КРЕМНИЯ

Необходимым этапом при изготовлении полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, солнечных элементов на основе полированных пластин монокристаллического кремния является создание двуокиси кремния определенной толщины.

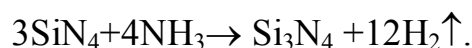
Двуокись кремния SiO_2 – это кварцевое стекло. По внешнему виду оно мало отличается от стекла, но обладает высокой химической стойкостью ко многим кислотам за исключением плавиковой (HF), которая взаимодействуя с кварцем, образует кремниевую кислоту.

Двуокись кремния обеспечивает избирательную диффузию примеси, управление коэффициентом диффузии, защиту поверхности пластин, уменьшение доли отраженного света, и соответственно увеличение доли поглощенного света.

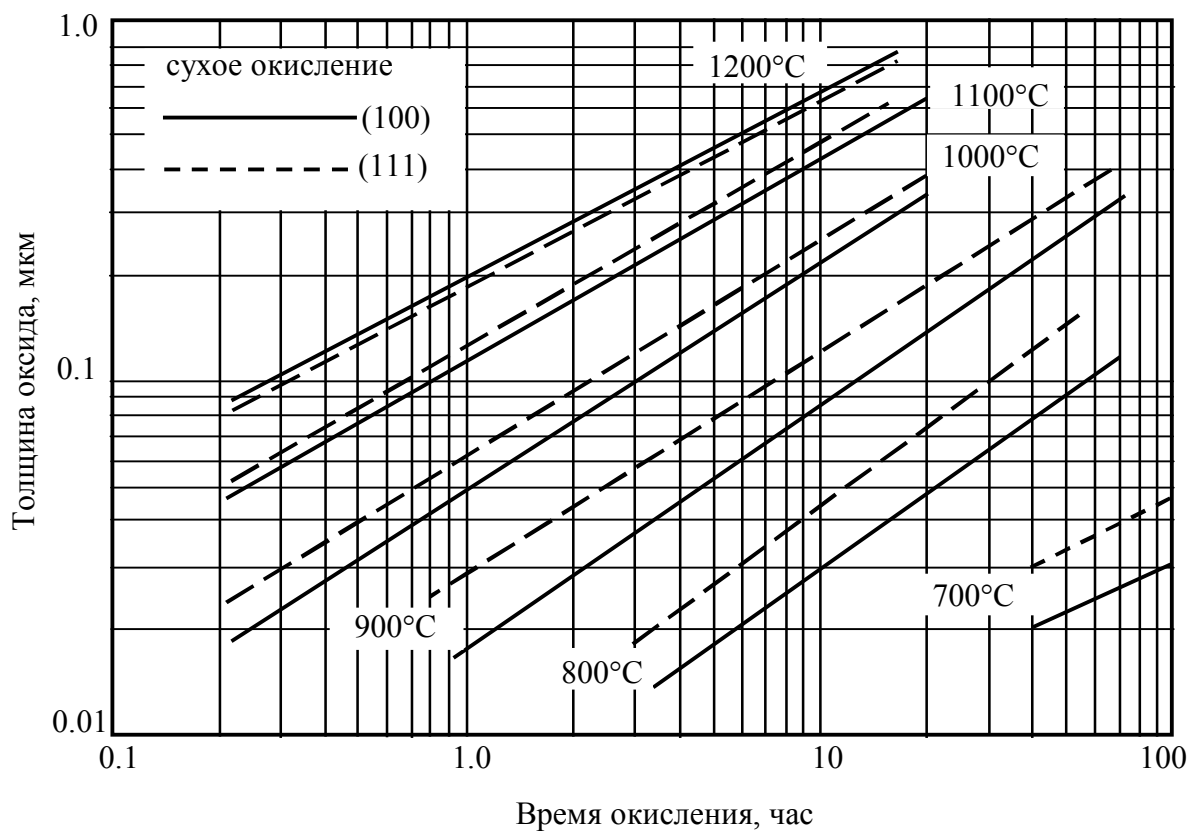
Наиболее часто окисные пленки на поверхности кремния получают методом термического окисления. Окисление проводят при температуре $T=1000\div 1300^\circ\text{C}$ в атмосфере чистого кислорода или паров воды в зависимости от требуемой толщины пленки. Пленки, выращенные в атмосфере чистого кислорода, имеют более совершенную структуру. Избирательная диффузия примесей используется при проведении локальной диффузии в заданную область пластины кремния через специальные окна, вскрытые в слое SiO_2 . Из акцепторных примесей только бор имеет меньший коэффициент диффузии в окисле, чем в кремнии. Галлий диффундируют в окисле в 400 раз быстрее, чем в кремнии, алюминий диффундируют еще быстрее, чем галлий. Донорные примеси P, As, Sb диффундируют относительно медленно в SiO_2 , чем в кремнии. Наиболее медленно диффундирующей примесью являются атомы фосфора. Двуокись кремния также существенно уменьшает глубину проникновения ионов при их имплантации в полупроводниковый материал.

Более лучшими защитными и диэлектрическими свойствами обладают пленки нитрида кремния Si_3N_4 . В пленке нитрида кремния большинство донорных и акцепторных примесей имеет очень маленький коэффициент диф-

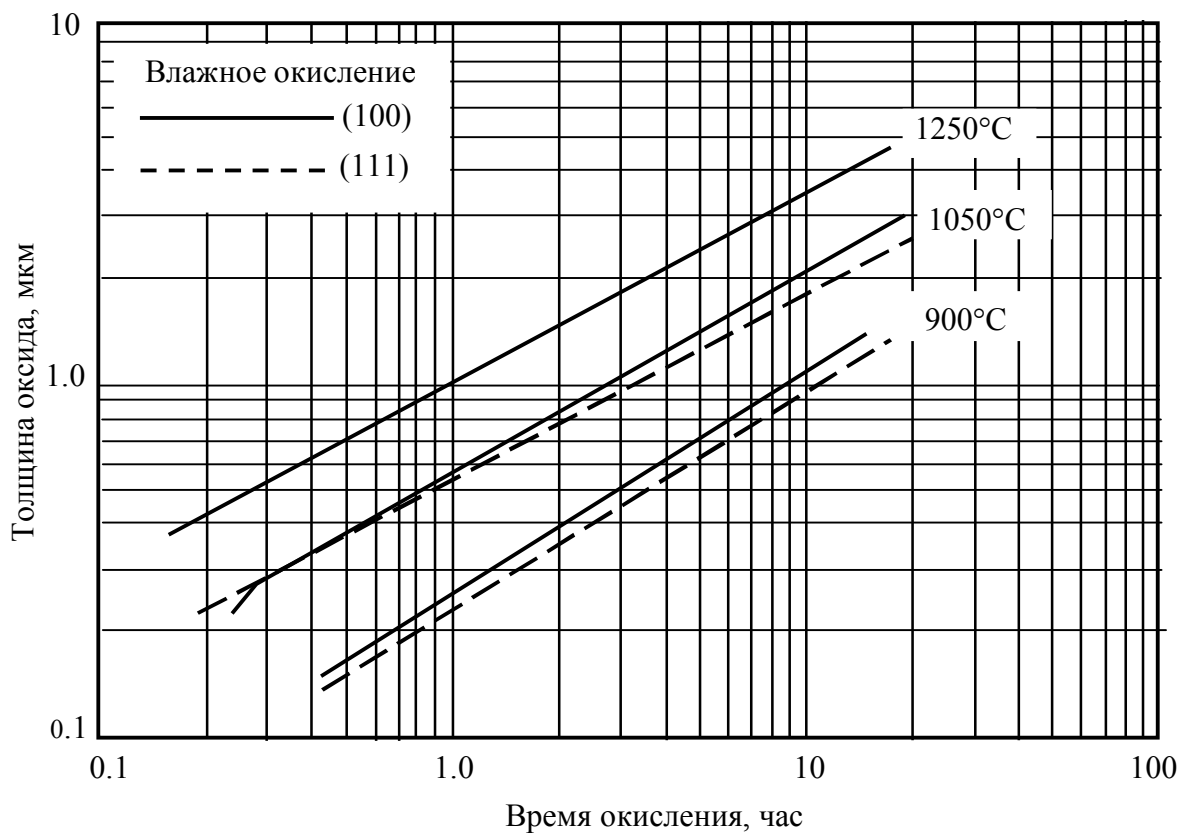
фузии, чем в кремнии. Пленки Si_3N_4 толщиной $d \sim 0,1$ мкм для большинства примесей могут стать практически непроницаемым защитным слоем при температуре диффузии $T = 1000 \div 1200^\circ\text{C}$. В основном пленки Si_3N_4 создаются с помощью реакции азотирования силана аммиаком при температуре $T = 700 \div 1000^\circ\text{C}$



Зависимость толщины пленки SiO_2 от температуры отжига при различных условиях, а также их маскирующие свойства, как при диффузии, так и при ионной имплантации, приведены в конце этого параграфа.



а)



б)

Рис. 1.6.1. Зависимость толщины оксида от времени окисления и температуры для ориентации двух типов. а) рост в сухом кислороде. б) рост в паре

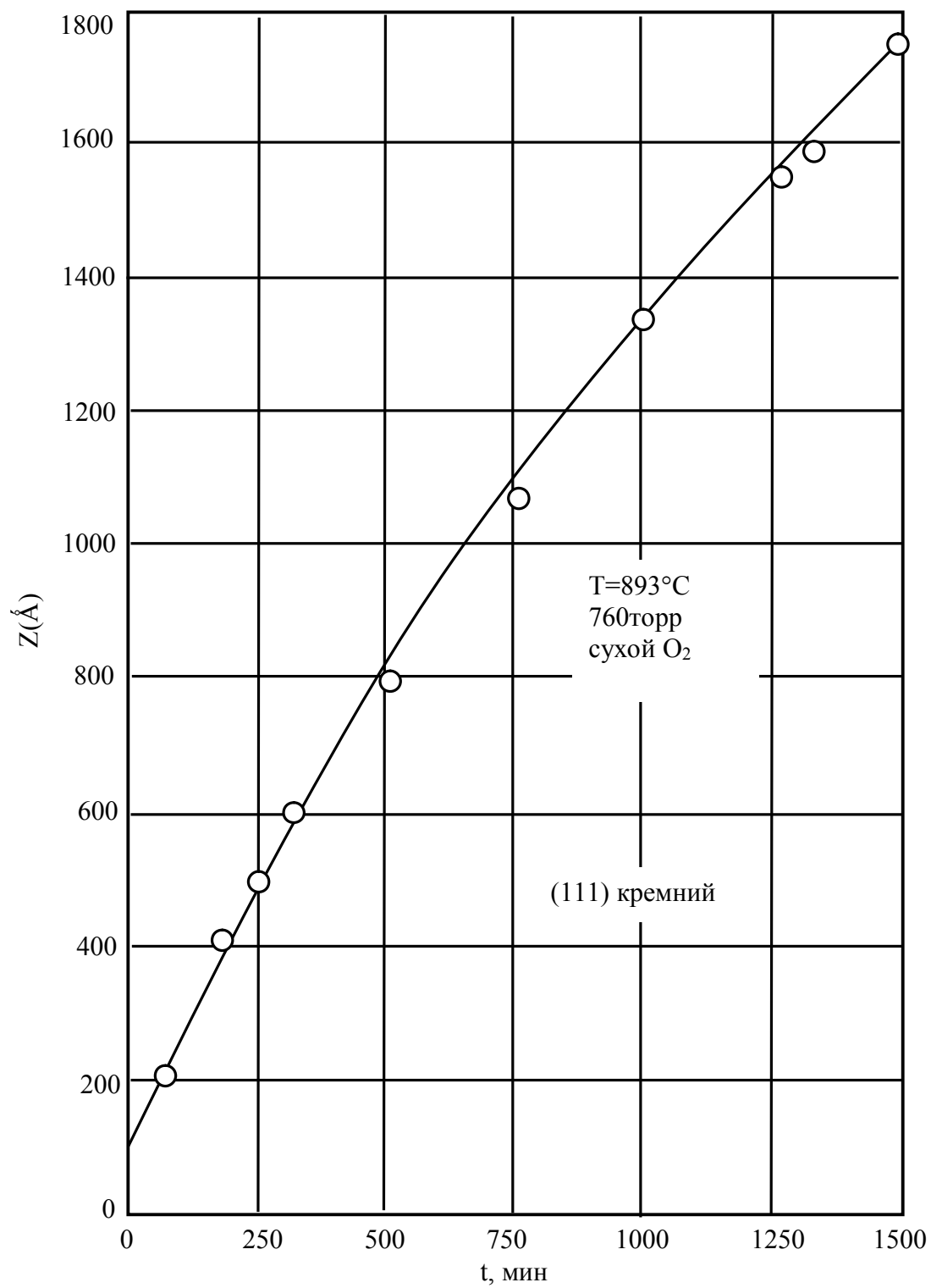


Рис. 1.6.2. Зависимость толщины оксида от времени окисления.

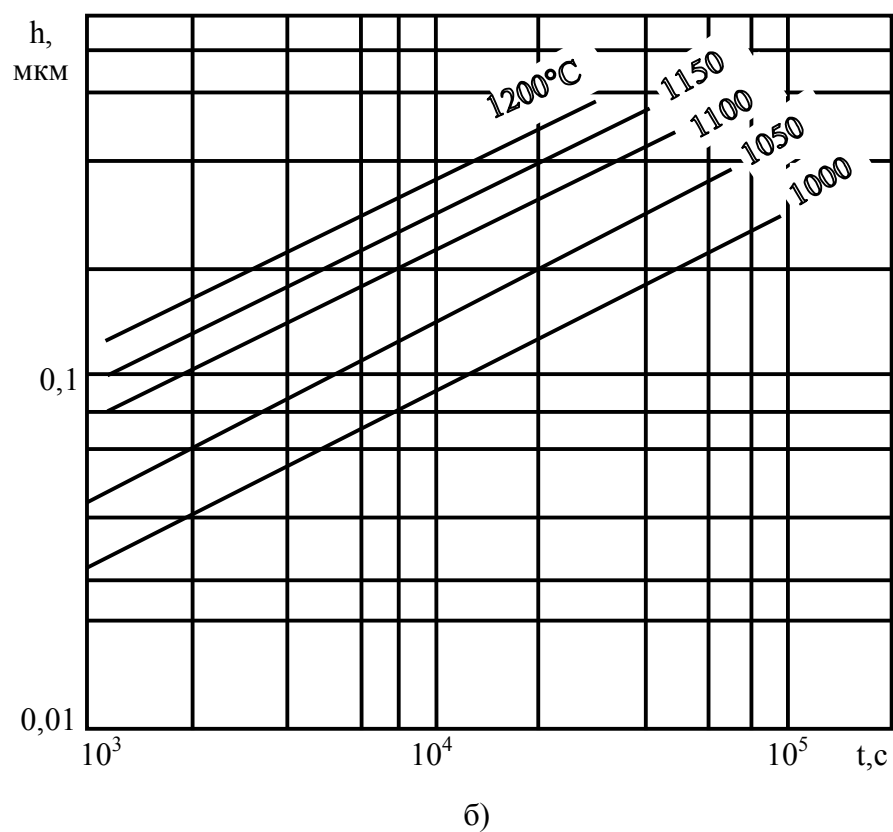
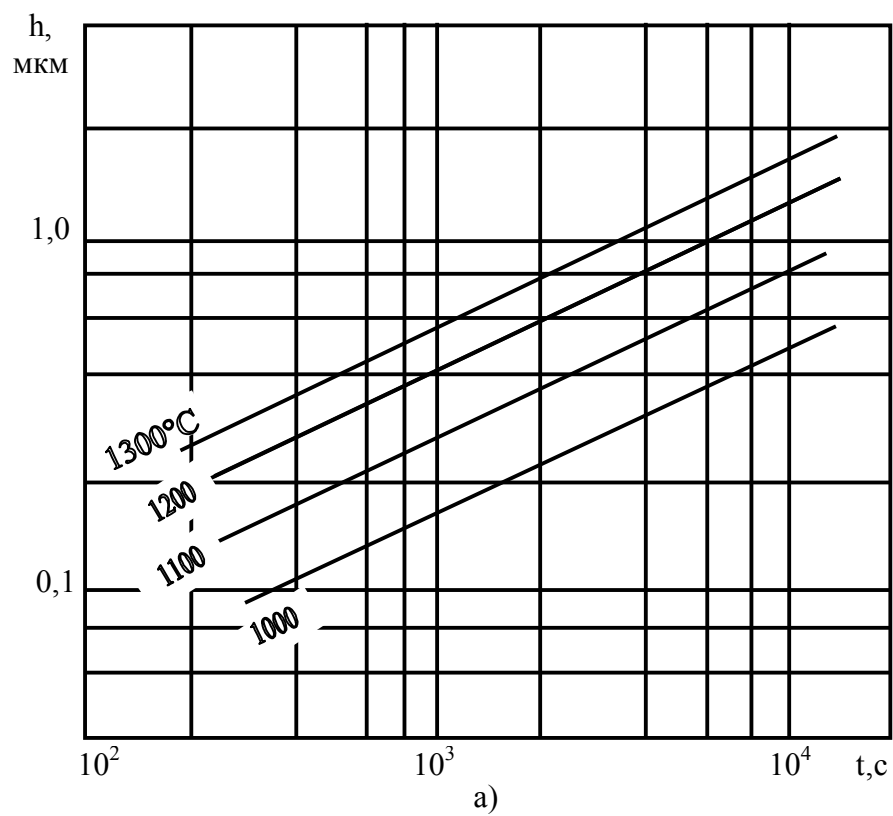


Рис. 1.6.3. Зависимость толщины окисла SiO_2 , необходимого для маскирования кремния, от времени диффузии для различных температур:
 а — при диффузии фосфора; б — при диффузии бора

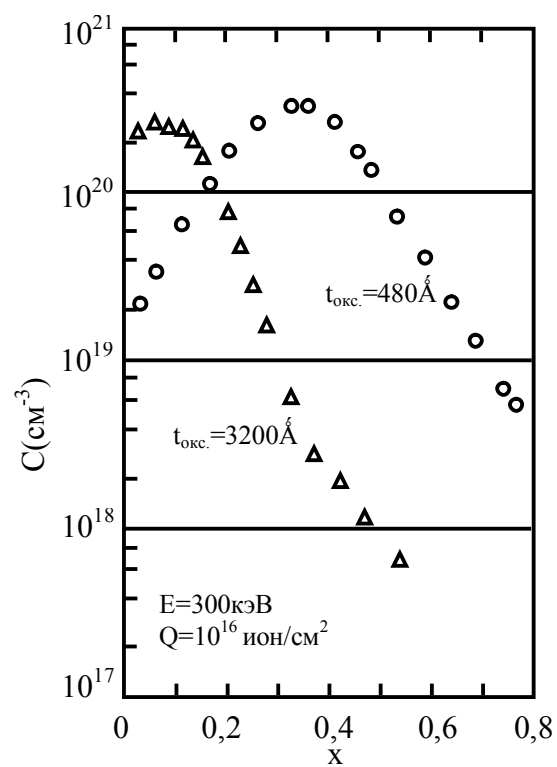


Рис. 1.6.4. Профиль распределения фосфора, имплантированного через оксидную пленку различной толщины.

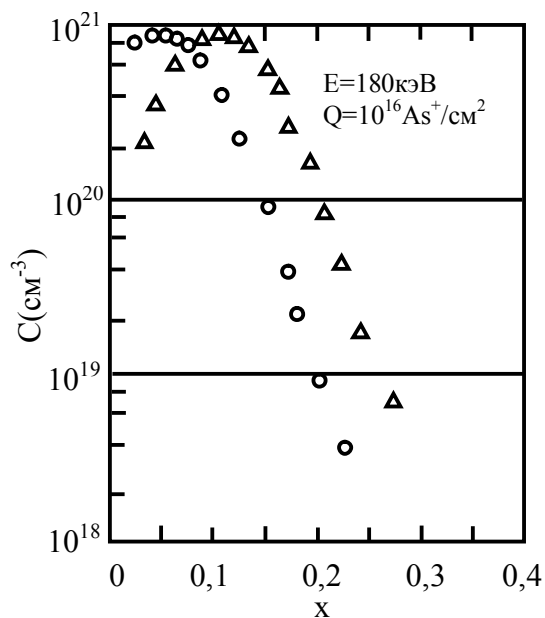


Рис. 1.6.5. Профиль распределения мышьяка, имплантированного в кремний через оксидную пленку ($\circ$), а также безоксидной пленки (Δ).

Таблица 1.6.1

Свойства SiO₂ и Si₃N₄ при 300K
Properties of SiO₂ and Si₃N₄ at 300K

Диэлектрик Insulator	SiO ₂	Si ₃ N ₄
Структура Structure	Аморфная Amorphous	Аморфная Amorphous
Точка плавления (°C) Melting point (°C)	~1600	-
Плотность (г/см ³) Density (g/cm ³)	2,2	3,1
Показатель преломления Refractive index	1,46	2,05
Диэлектрическая проницаемость Dielectric constant	3,9	7,5
Диэлектрическая прочность (В/см) Dielectric strength (V/cm)	10 ⁷	10 ⁷
Полоса инфракрасного поглощения (μм) Infrared absorption band (μm)	9,3	11,5-12,0
Энергия запрещенной зоны (эВ) Energy gap (eV)	9	~5,0
Коэффициент термического расширения (°C ⁻¹) Thermal-expansion coefficient (°C ⁻¹)	5·10 ⁻⁷	-
Теплопроводность (Вт/см·К) Thermal conductivity (W/cm·K)	0,014	-
Удельное сопротивление (Ом·см) при 25°C при 500°C dc resistivity (Ω·cm) at 25°C at 500°C	10 ¹⁴ -10 ¹⁶ -	~10 ¹⁴ ~2·10 ¹³
Скорость травления в HF (Å/мин) Etch rate in buffered HF (Å/min)	1000	5-10

Таблица 1.6.2

Зависимость цвета пленки SiO_2 и Si_3N_4 от её толщины
 Dependence film's color of SiO_2 and Si_3N_4 on its thickness

Порядок	Цвет	Интервал тол- щины SiO_2 , мкм	Интервал тол- щины Si_3N_4 , мкм
1	Металлический Silicon	0-0,027	0-0,020
	Коричневый Brown	0,027-0,053	0,020-0,040
	Золотисто-коричневый Golden brown	0,053-0,073	0,040-0,055
	Красный Red	0,073-0,097	0,055-0,073
	Темно – голубой Deep blue	0,097-0,010	0,073-0,077
	Голубой Blue	0,10-0,12	0,077-0,093
	Бледно – голубой Pale blue	0,12-0,13	0,093-0,10
	Очень бледно-голубой Very pale blue	0,13-0,15	0,10-0,11
	Металлический Silicon	0,15-0,16	0,11-0,12
	Светло - желтый Light yellow	0,16-0,17	0,12-0,13
	Желтый Yellow	0,17-0,20	0,13-0,15
	Оранжево - красный Orange red	0,20-0,24	0,15-0,18
1	Красный Red	0,24-0,25	0,18-0,19
	Темно - красный Dark red	0,25-0,28	0,19-0,21
2	Голубой Blue	0,28-0,31	0,21-0,23
	Голубовато - зеленый Blue – green	0,31-0,33	0,23-0,23
	Светло - зеленый Light green	0,33-0,37	0,25-0,28
	Оранжево - желтый Orange yellow	0,37-0,40	0,28-0,30
2	Красный Red	0,40-0,44	0,30-0,33

§1.7. МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ И ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

Очень важной задачей в полупроводниковой электронике является создание омического контакта к различным полупроводниковым материалам. Практически создать идеальный омический контакт невозможно. Омическим контактом принято считать контакт, когда ВАХ металл – полупроводникового перехода описывается законом Ома, или сопротивление контактной области значительно меньше, чем сопротивление объемного полупроводника, можно сказать, что такой контакт омический. Если на контактной области металл – полупроводник омический контакт отсутствует, то появляется потенциальный барьер, величина которого в основном зависит от работы выхода металла и полупроводника. Такой барьер называется барьером Шоттки или диодом Шоттки. В таких диодах, т.е. в барьерах металл – полупроводник ток через барьер осуществляется основными носителями. Поэтому диоду Шоттки свойственна высокая скорость переходных процессов, что позволяет использовать его для создания быстродействующих переключателей. Другой особенностью диодов Шоттки является низкое напряжение отпираания при $V > 0$. Это позволяет использовать их в качестве выпрямителей большой мощности. Для создания контактов, кроме чистых металлов, также часто используются силициды.

В последнее время очень интенсивно ведутся работы по разработке технологии получения и исследованию свойств различных силицидов. Силицид – это твердый раствор полупроводникового материала и металла. Силициды очень широко используются для создания барьеров Шоттки, различных гетероструктур, хороших омических контактов, а также могут быть использованы как самостоятельный полупроводниковый материал для разработки различных приборов.

В данном параграфе приведены свойства наиболее известных (применяемых) силицидов, а также металлы и сплавы, которые обычно применяются в качестве омического контакта для полупроводниковых соединений

$A^{III}B^V$ и других материалов. Эти данные весьма удобны для специалистов, работающих в этой области.

Таблица 1.7.1

**ВЫСОТА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА СИЛИЦИД МЕТАЛЛА – Si_n –
ТИПА И ИХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ**

Силицид металла	ϕ_B, V	Структура силицида	Температура образования, °C	Температура плавления, °C
CoSi	0,68	Кубическая	400	1460
CoSi ₂	0,64	Кубическая	450	1326
CrSi ₂	0,57	Гексагональная	450	1475
HfSi	0,53	Тригональная	550	2200
IrSi	0,93		300	—
MnSi	0,76	Кубическая	400	1275
Mn ₁₁ Si ₁₉	0,72	Тетрагональная	800а	1145
MoSi ₂	0,55	Тетрагональная	1000 а	1980
Ni ₂ Si	0,7-0,75	Тригональная	200	1318
NiSi	0,66-0,75	Тригональная	400	992
NiSi ₂	0,7	Кубическая	800 а	993
Pd ₂ Si	0,72-0,75	Гексагональная	200	1330
PtSi	0,84	Тригональная	300	1229
RhSi	0,69	Кубическая	300	—
TaSi ₂	0,59	Гексагональная	750 а	2200
TiSi ₂	0,60	Тригональная	650	1540
WSi ₂	0,65	Тетрагональная	650	2150
ZrSi ₂	0,55	Тригональная	600	1520

Таблица 1.7.2

Экспериментальные значения высоты потенциального барьера металл – полупроводник при 300К (в вольтах)

Полупроводник	Тип	E_g , эВ	Ag	Al	Au	Cr	Cu	Hf	In	Mg	Mo	Ni	Pb	Pd	Pt	Ta	Ti	W
Углерод	p	5,47			1,71													
Ge	n	0,66	0,45	0,48	0,59		0,52		0,64			0,49	0,38					0,48
Ge	p		0,50		0,30				0,55									
Si	n	1,12	0,78	0,72	0,80	0,61	0,58	0,58		0,40	0,68	0,61		0,81	0,90		0,50	0,67
Si	p		0,54	0,58	0,34	0,50	0,46				0,51	0,51	0,55				0,61	0,45
SiC	n	3,00			1,95													
AlAs	n	2,16		2,00	1,20										1,00			
AlSb	p	1,63			0,55													
BN	p	7,50			3,10													
BP	p	6,00			0,87													
GaSb	n	0,67			0,60													
GaAs	n	1,42	0,88	0,80	0,90		0,82	0,72							0,84	0,85		0,80
GaAs	p		0,63		0,42			0,68		1,04	1,13	1,27						
GaP	p	2,24	1,20	1,07	1,30	1,06	1,20	1,84							1,45		1,12	

Продолжение табл. 1.7.2.

GaP	n				0,72													
InSb	n	0,16	0,18 ¹		0,17 ¹													
InAs	p	0,33			0,47 ¹													
InP	n	1,29	0,54		0,52													
InP	p				0,76													
CdS	n	2,43	0,56		0,78		0,50					0,45	0,59	0,62	1,10		0,84	
CdSe	n	1,70	0,43		0,49		0,33								0,37			
CdTe	n		0,81	0,76	0,71										0,76			
ZnO	n	3,20		0,68	0,65		0,45		0,30						0,75	0,30		
ZnS	n	3,60	1,65	0,80	2,00		1,75		1,50	0,82					1,84	1,10		
ZnSe	n		1,21	0,76	1,36		1,10		0,91				1,16		1,40			
PbO	n		0,95						0,93			0,96	0,95					

¹ 77K

Таблица 1.7.3

Условия создания омических контактов к полупроводникам типа $A^{III}B^V$

Полупроводники типа $A^{III}-B^V$	E_g , эВ	Тип	Контактный материал	Технология	Температура всплавления, °C
AlN	5,9	Полуизолятор	Si	Формовка	
		Полуизолятор	Al, Al-In	Формовка	1500-1800
		Полуизолятор	Mo, W	Распыление	1000
AlP	2,45	n	Ga-Ag	Формовка	500-1000
AlSb	2,16	n, p	In-Te	Формовка	150
		n, p	Au	Формовка	160
		n, p	Au-Ge	Формовка	700
		n	Au-Sn	Формовка	
	3,36	Полуизолятор	Al-In	Формовка	
	2,25	p	Au-Zn(99:1)	Формовка	
				Напыление	700
		P	Au-Ge	Формовка	
		n	Au-Sn(62:38)	Формовка	360
		n	Au-Si(98:2)	Напыление	700
GaAs	1,42	p	Au-Zn(99:1)	Электролиз	600
				Напыление	
		p	In-Au(80:20)	Формовка	
		n	Au-Ge(88:12)	Напыление	
		n	In-Au(90:10)	Напыление	350-450
		n	Au-Se(94:6)	Напыление	550
		n	Au-Sn(90:10)	Напыление	300
		n	Au-Te(98:2)	Напыление	350-700
GaSb	0,72	p	In	Формовка	500
		n	In	Формовка	

Продолжение табл. 1.7.3.

InP	1,35	p	In	Формовка	
		n	In, In-Te	Формовка	350-600
		n	Ag-Sn	Формовка	350-600
				Напыление	600
InAs	0,36	n	In	Формовка	
			Sn-Te(99:1)	Формовка	
InSb	0,17	n	In	Формовка	
		n	Sn-Te(99:1)	Формовка	
GaAs _{1-x} P _x	1,42- 2,31	p	Au-Zn	Напыление	500
		p	Al	Напыление	500
		n	Au-Ge-Ni	Напыление	450
		n	Au-Sn	Напыление	450
AlGa _{1-x} As _x	1,42- 2,31	p	Au-In	Анодирование	400-450
		p	Au-Zn	Напыление	
		p	Al	Напыление	500
		n	Au-Ge-Ni	Напыление	500
		n	Au-Sn	Напыление	450-485
				Электролиз	450
		n	Au-Si	Напыление	
Ga _{1-x} In _x Sb	0,70- 0,17	n	Sn-Te	Напыление	
Al _x Ga _{1-x} P	2,31- 2,45	n	Sn	Формовка	
Ga _{1-x} In _x As	1,47- 0,35	n	Sn	Формовка	
InAs _x Sb _{1-x}	0,17- 0,35	n	In-Te	Формовка	

§1.8. СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 1.8.1

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО И ЗОННОЙ ПЛАВКИ

Параметры	Метод Чохральско- го	Метод зонной плавки
Максимальный диаметр пластины	150÷400	200
Удельное сопротивление р – типа, Ом·см	$5 \cdot 10^{-3} \div 50$	0,1÷3000
Удельное сопротивление n – типа, Ом·см	$5 \cdot 10^{-3} \div 50$	0,1÷800
Ориентация	[111], [110], [100]	[111], [100]
Время жизни неосновных носите- лей заряда, мкс	10÷50	100÷300
Содержание кислорода, атом/см ³	$10^{16}(10 \div 200)$	$<10^{16}$
Содержание углерода атом/см ³	10	$<10^{16}$
Общий объем	90%	10%

Параметры монокристаллического кремния, выпускаемого различными компа-
ниями. Как видно из табл.1.8.1, производство кремниевых монокристалличе-
ских кристаллов достигло достаточно высокого уровня.

Китайскими компаниями, выпускающими кремниевые пластины, являются компании Jing Hua Silicon material co. Ltd (<http://www.jhsilicon.com>) и Silicon conquest international (<http://www.siliconquest.com>). В таблице 1.8.2. приведены параметры кремниевых пластин, выпускаемых Silicon conquest international:

Таблица 1.8.2

Диаметр, мм	50,8	76,2	100	125	150	200	300
Точность диаметра, мм	+/-0.38	+/-0.63	+/-0.50	+/-0.20	+/-0.20	+/-0.20	+/-0.20
Толщина, мкм	278	381	525, 625	625	675	725	775
Точность толщины, мкм	+/-25	+/-25	+/-20	+/-20	+/-20	+/-20	+/-20
Ориентация	<100>, <111>						
Легирующая примесь для n для p	P, As, Sb B	P, As, Sb B	P, As, Sb B	P, As, Sb B	P, As, Sb B	P, As, Sb B	P B
Поверхность	Полированная с одной или двух сторон.						
Класс		T, P	T, P	T, P	T, P	T, P	M

M – Mechanical, T – Test, P – Prime

Американская компания Silicon Valley, microelectronics, Ins

(<http://www.svmi.com>) выпускает кремниевые пластины, имеющие следующие параметры:

Таблица 1.8.3

Диаметр, мм	50	150	200	300
Точность диаметра, мм		+/- 0.2	+/- 0.2	+/- 0.5
Толщина, мкм	250-300	650-700 660-690	700-750	750-800
Метод выращивания	Чохральского			
Ориентация	100, по заказу	100		
Удельное сопротивление, Ом·см	1-100 по заказу	1-30	0.005-0.02 1-100	0.005-0.02 1-100
Содержание углерода, ppm				≤30
Содержание кислорода		27-33		≤1
Концентрация металла на поверхности			$<5 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{10}$	$\leq 10^{10}$

Продолжение таб. 1.8.3.

Легирующая примесь				
Для n		P		
Для p	B	B	B	B
Лицевая сторона	Полированная			
Тыльная сторона	Полированная, травленая			

Японская компания SUMCO CORPORATION (JAPAN) (сайт компании www.sumcosi.com) выпускает кремниевые пластины со следующими параметрами.

Таблица 1.8.4

Тип	PW	H ₂ -отжиг	EW	LW	SOI	
					DBX	SIMOX
Диаметр, мм	100-300	125-200	100-300	100-150	100-150	300
Ориентация кристалла	<100>, <111>, <110>					
Легирующая примесь	B, P, Sb					

Американская компания Silicon Inc. (<http://www.silicon-wafers.com>) выпускает кремниевые пластины со следующими параметрами

Таблица 1.8.5

50 мм кремниевые пластины			
Тип и ориентация	Толщина	Удельное сопротивление (Ом·см)	Примечание
N(100)	280 +/-25 мкм	1-10	
P(111)	280 +/-25 мкм	1-10	
N(111)	280 +/-25 мкм	1-20	
N(111)	280 +/-25 мкм	0,005	
P(111)	280 +/-25 мкм	1-5	
P(100)	280 +/-25 мкм	1-10	
P(100)	280 +/-25 мкм	0,02-0,04	
P(110)	280 +/-25 мкм	1-10	

76 мм кремниевые пластины			
P(100)	356-406 мкм	0,01-0,02, 1-10, 10-20	
P(111)	356-406 мкм	Различные	Некоторые пластины имеют окисный слой толщиной 5000Å
N(100)	356-406 мкм	Различные	
P(100)	356-406 мкм	1-10	
N(111)	356-406 мкм	0,006-0,013	
N(111)	356-406 мкм	1-10	
100 мм кремниевые пластины			
P(100)	550 +/-25	5-15, 1-10, < 0.01	Полированные с одной или двух сторон
P(111)	525	10-20, < 1.0	
N(100)	475-525	2-6, 1-10, 0.005	
N(110)	525 +/-25	1-10	Полированные с одной или двух сторон
P(110)	525 +/-25	1-10	Полированные с одной или двух сторон
N(100)	475-525	1-10, <1.0, 0.008	Полированные с одной или двух сторон

125 мм кремниевые пластины			
P(100)	575 +/-25	1-25, <1.0	
N(100)	575 +/-25	1-10, <1	
N(100)	575 +/-25	3-20	
P(111)	575 +/-25	1-10	
P+(100) EPI	625 +/-15	0,01-0,02	Эпитаксиальные 20-40 Ом·см
N+(100) EPI	625 +/-15	различные	
150 мм кремниевые пластины			
P(100)	650 +/-25	10-25	
P(100)	650 +/-25	1-10	
P(100)	300 +/-10	1-10	
N(100)	650 +/-25	1-10, .008-.02	
P(110)	650 +/-25	10-20	
200 мм кремниевые пластины			
P(100)	750 +/-25	10-25	Notched, Test Grade
P(100)	750 +/-25	1-10	Notched
P(100)	725 +/-25	10-20	Mechanical Grade, Jeida Flatted
N(100)	750 +/-25	1-30	Notched
P(100)	725 +/-25	1-25	С оксидным слоем толщиной 20000 Å

Американская компания Montco Silicon Technology, Inc выпускает множество различных кремниевых пластин пригодных для применения в качестве подложек. Диаметры кремниевых платин составляют от 25 до 300мм. В качестве примеси для получения n типа применяют P, Sb, As. В качестве примеси для получения p типа - бор. Ориентациями пластин являются <100>, <111> и <110>. Выращивание осуществляется методами Чохральского и зонной плавки. Класс пластин: наилучший, пробный и исправленный.

В таблице 1.8.6 приведены параметры некоторых пластин, выпускаемых Montco Silicon Technology, Inc

Таблица 1.8.6

50 мм кремниевые пластины				
Тип	Ориентация	Удельное сопротивление	Толщина	Класс
собственный	100	80	254 ÷ 305	Test
N	111	0.001 ÷ 0.006	410 ÷ 450	Prime
N	111	0.005 ÷ 0.015	350 ÷ 390	Prime
N	111	10 ÷ 20	256 ÷ 356	Prime
200 мм кремниевые пластины				
любой	100	0,1 ÷ 100	625 ÷ 775	Reclaim
N	100	0.1 ÷ 10	700 ÷ 750	Prime
N	100	1 ÷ 2	700 ÷ 750	Prime
N	100	1 ÷ 10	700 ÷ 750	Prime
300 мм кремниевые пластины				
любой	100	0 ÷ 100	700 ÷ 800	CR / PATTERN
любой	100	0 ÷ 1000	700 ÷ 800	MECH / CLEAN
любой	100	0 ÷ 100	700 ÷ 800	PART MONITOR
P	100	0 ÷ 100	700 ÷ 800	CR
P	100	0 ÷ 100	750 ÷ 800	EPI
UNK	100	0 ÷ 100	700 ÷ 800	CASSETTED CR

Компания Silicon conquest international также производит германий. В таблице 1.8.7 приведены параметры германиевых пластин, выпускаемые Silicon conquest international

Таблица 1.8.7

Германиевые пластины р - типа	
Метод выращивания	VGF
Диаметр	100 мм
Ориентация	<100>
Примесь для получения р типа	галлий
Удельное сопротивление	<20 Ом·см
Плотность дислокаций	(обычно меньше чем 1000/см) 500/см
Германиевые пластины n - типа	
Метод выращивания	VGF
Диаметр	До 150 мм
Ориентация	<111>
Примесь для получения n типа	Sb, As или P
Удельное сопротивление	2-30 Ом·см
Плотность дислокаций	для 25-100 мм меньше чем 2000/см для 150 мм (обычно 3000/см), меньше чем 5000/см (обычно 1500/см)

Параметры монокристаллического арсенида галлия, выпускаемого различными компаниями.

Российская компания Girmet (сайт компаний www.girmet.com) выпускает слитки GaAs со следующими параметрами:

Таблица 1.8.8

Монокристаллы, выращенные методом вертикальной направленной кристаллизации (VGF)				
Материал		Полуизолирующий	Полупроводящий	
Легирующая примесь		нелегированный	Si	Zn
Тип проводимости		n	n	p
Концентрация носителей, см ⁻³		-	$5 \times 10^{17} - 3 \times 10^{18}$	$5 \times 10^{18} - 3 \times 10^{19}$
Удельное сопротивление, Ом.см		$> 1 \times 10^7$	-	-
Подвижность, см ² /В.с		> 5000	2400-1200	70-40
Плотность дислокаций, см ⁻²	Ø50.8 мм	< 5000	< 500 или < 5000	< 500 или < 5000
Монокристаллы, выращенные методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава (LEC)				
Материал		Полуизолирующий	Полупроводящий	
Легирующая примесь		нелегированный	Si или Te	Zn
Тип проводимости		n	n	p
Концентрация носителей, см ⁻³		-	$1 \times 10^{17} - 3 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$
Удельное сопротивление, Ом.см		$> 1 \times 10^7$	-	-
Подвижность, см ² /В.с		> 5000	4200-1200	170-40
Плотность дислокаций, см ⁻²	Ø50.8 мм Ø76.2 мм	$< 5 \times 10^4$ или $< 8 \times 10^4$ $< 8 \times 10^4$ или $< 1 \times 10^5$	$< 5 \times 10^4$ или $< 8 \times 10^4$ $< 8 \times 10^4$ или $< 1 \times 10^5$	$< 5 \times 10^4$ или $< 8 \times 10^4$ $< 8 \times 10^4$ или $< 1 \times 10^5$
Пластины				
Диаметр, мм		50.8 ± 0.3 , 76.2 ± 0.3		
Толщина, мкм		350 ± 15 , 400 ± 15 , 450 ± 15 , 500 ± 15		
Ориентация поверхности		(100), (111), (110), (211), (310)		
Точность ориентации		$\pm 0.5^\circ$ $\pm 0.1^\circ$		

Продолжение таб. 1.8.8.

Отклонение от точной ориентации	$(1 - 10) \pm 0.1^\circ$ в заданном направлении
Базовый и дополнительный срезы	согласно стандарту SEMI M9 (US SEMI или E/J SEMI) для (100), для других ориентаций - по выбору заказчика
Обработка поверхности лицевая сторона обратная сторона	полированная, годная к эпитаксии полированная, шлифовано-травленая
Упаковка	индивидуальная, двойная, внутренняя вакуумизированная, внешняя заполнена инертным газом

Польская компания Comscore (сайт компаний www.Comscore.com) выпускает слитки GaAs со следующими параметрами:

Таблица 1.8.9

Материал: легирующая примесь	Тип	Диаметр, мм	Плотность дислокации, см^{-2}	Концентрация носителей заряда, см^{-3}	Подвижность, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	Ориентация	Удельное сопротивление, Ом·см
GaAs:Si	N	50, 76	$<5 \cdot 10^4$	$10^{17} - 2 \cdot 10^{19}$		(100), (111)	
GaAs:Te	N	50, 76	$<5 \cdot 10^4$	$10^{17} - 10^{18}$		(100), (111), (110)	
GaAs:Zn	P	50, 76	$<5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{19}$		(100), (111), (110)	
GaAs:- нелигированный	SI	50, 76	$<5 \cdot 10^4$		$>6 \cdot 10^3$	(100), (111)	$>6 \cdot 10^7$
GaAs:Cr	SI	50, 76	$<5 \cdot 10^4$		$>4 \cdot 10^3$	(100), (111)	$>6 \cdot 10^7$

В таблице 1.8.10 приведены цены на GaAs в зависимости от параметров, выпускаемым Польской компанией Comscore

Таблица 1.8.10

Цена €/штука	Материал	Ориентация	Диаметр, мм	Толщина, мкм	Поверхность	Удельное сопротивление, Ом·см	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Плотность дислокации, см ⁻²
125.00	SI GaAs:-	[100]	76	500	P/E	(1.5-1.3)·10 ⁸	US Flats	(6.4-5.6)·10 ³	(1.3-4.5)·10 ⁴
91.00	SI GaAs:-	[100]	50	400	P/E	(2.3-0.96)·10 ⁸	US Flats	(6.8-6.4)·10 ³	<5,000
66.00	SI GaAs:-	[100]	50	350	P/E	(1.0-1.9)·10 ⁸	EJ Flats	(6.2-6.8)·10 ³	<10 ⁵
83.00	SI GaAs:-	[100]	50	500	P/E	3.26·10 ⁷	4.25·10 ⁷	4,800	5.4·10 ⁴

P – полированная, E - травленая

Германская компания Freiberger (<http://www.fcm-semicon.com>) выпускает GaAs пластины со следующими параметрами:

Таблица 1.8.11

Полуизолирующие GaAs-пластины

Параметры	Размер мер-	LEC		VGF	
Диаметр	мм	76	100 / 125 / 150	100	150 мм
Диапазон удельного сопротивления А					
Удельное сопротивление	Ом·см		(0.1 ÷ 5) · 10 ⁷		
Холловская подвижность	см ² /В·с		> 6 · 10 ³		
Содержание углерода	см ⁻³		(0,1 ÷ 1,0) · 10 ¹⁴		
Диапазон удельного сопротивления В					
Удельное сопротивление	Ом·см		(0.1 ÷ 2.0) · 10 ⁷		
Холловская подвижность	см ² /В·с		(5 ÷ 7) · 10 ³		

Продолжение табл. 1.8.21

Содержания углерода	см ⁻³		(1 ÷ 5) · 10 ¹⁴	
Диапазон удельного сопротивления С	Ом·см	(1 ÷ 4) · 10 ⁷	(1 ÷ 4) · 10 ⁷	
Удельное сопротивление	см ² /В·с	> 7 · 10 ³	> 7 · 10 ³	
Подвижность Холла	см ⁻³	(0.5 ÷ 2.0) · 10 ¹⁵	(0.5 ÷ 2.0) · 10 ¹⁵	
Содержания углерода	см ⁻³			
Диапазон удельного сопротивления D	Ом·см	> 1 · 10 ⁷	> 1 · 10 ⁷	> 1 · 10 ⁷
Удельное сопротивление	см ² /В·с	> 6 · 10 ³	> 6 · 10 ³	> 6 · 10 ³
Холловская подвижность	см ⁻³	> 0.5 · 10 ¹⁵	> 0.5 · 10 ¹⁵	> 0.5 · 10 ¹⁵
Содержание углерода	см ⁻³			
Диапазон удельного сопротивления E			(1 ÷ 4) · 10 ⁸	
Удельное сопротивление			(6.0 ÷ 4.5) · 10 ³	
Холловская подвижность			> 4 · 10 ¹⁵	
Содержание углерода	см ⁻²			
Плотность дислокации	см ⁻²	≤ 70 000	≤ 100 000 ≤ 150 000	≤ 3 000 ≤ 5 000
низкий стандарт	см ⁻²			≤ 5 000 10 000
Концентрация EL2	см ⁻³	(1. ÷ 1.7) · 10 ¹⁶		(1.0 ÷ 1.5) · 10 ¹⁶
Сред. значения на пластине	%	≤ 5		≤ 5
Отклонение от стандарта				

Таблица 1.8.12

Полупроводящие GaAs-пластины

Параметры	Размерность	LEC	VGF
Диаметр		76 мм	100 мм
Примесь Тип		Te n	Si n
Концентрация носителей заряда	см^{-3}	$(0.1 \div 2.0) \cdot 10^{18}$	$(0.2 \div 2.5) \cdot 10^{18}$
Холловская подвижность	$\text{см}^2/\text{Вс}$	$(4.2 \div 2.3) \cdot 10^3$	$(3.0 \div 1.5) \cdot 10^3$
Плотность дислокации Лазер класса А ≥ 80% площади пластины	См^{-2}		0
Лазер класса В ≥ 85% площади пластины	См^{-2}		400
Лазер класса С ≥ 90% площади пластины	см^{-2}		1,200
LED класса среднее значение ≥ 60% площади пластины	см^{-2} см^{-2}	< 70,000	5,000 5,000

Параметры монокристаллического фосфида галлия, выпускаемого различными компаниями.

Российская компания Girmet выпускает слитки GaP со следующими параметрами:

Таблица 1.8.13

Монокристаллы

Легирующая примесь	Нелегированный	S	Zn
Тип проводимости	n	n	p
Концентрация носителей, см ⁻³	$\leq 1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18}$	$2 \times 10^{17} - 2 \times 10^{18}$
Подвижность, см ² /В.с	≥ 100	≥ 60	≥ 60
Плотность дислокаций, см ⁻²	$\geq 2 \times 10^5$	$\geq 2 \times 10^5$	$\geq 2 \times 10^5$
Пластины			
Диаметр, мм	50.8 ± 0.3	76.2 ± 0.3	
Толщина, мкм	300 ± 15	400 ± 15	
Ориентация поверхности	(100)	(111)	
Точность ориентации	± 0.5°	± 0.1°	
Отклонение от точной ориентации	(1 - 10) ± 0.1° в заданном направлении		
Базовый и дополнительный срезы	По стандарту SEMI M9, US SEMI и E/J SEMI		
Обработка поверхности лицевая сторона обратная сторона	полированная, годная к эпитаксии полированная, шлифовано-травленая		
Упаковка	индивидуальная		

Польская компания Comscore выпускает слитки GaP со следующими параметрами:

Таблица 1.8.14

Материал: легирующая примесь	Тип	Диаметр, мм	Плотность дислокации, см ⁻²	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность, см ² /В.с	Ориентация	Удельное противл. Ом·с
GaP:S	N	2", 3"	$< 1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18}$	> 90	(100), (111), (110)	
GaP:- undoped	N	2", 3"	$< 1 \cdot 10^5$	$< 10^{16}$	> 90	(100), (111), (110)	

В таблице 1.8.15 приведена цена GaP в зависимости от параметров, выпускаемого Польской компанией Comscore

Таблица 1.8.15

Цена €/штук а	Мате- риал	Ориен- тация	Диа- метр, мм	Тол- щи- на, мкм	По- верх- ность	Удельное сопро- тивле- ние, Ом· см	Концен- трация носите- лей за- ряда, см ⁻³	Под- виж- ность, см ² /В· с	Плот- ность дисло- кации, см ⁻²
83.00	n- GaP:S	[110]	15x30 mm	400	P/P	0.081	8.2·10 ¹⁷	100	4.5·10 ⁴
135.0 0	n- GaP:-	[100]	2"	400	P/E		<1.5·10 ¹⁶	>100	<9·10 ⁴
135.0 0	n- GaP:S	[100]	2"	400	P/E	0.18	2.6·10 ¹⁷	120	2.8·10 ⁴

P – полированная, E – травленая

Параметры монокристаллического арсенида индия выпускаемого различными компаниями.

Российская компания Girmet выпускает слитки InAs со следующими параметрами:

Таблица 1.8.16

Монокристаллы

Легирующая при- месь	нелегированный	S	Zn , Mn
Тип проводимости	n	n	p
Концентрация носи- телей, см ⁻³	≤3x10 ¹⁶	1x10 ¹⁷ - 3x10 ¹⁸	5x10 ¹⁶ - 5x10 ¹⁸
Подвижность, см ² /В.с	≥20000	≥10000	≥100
Плотность дислока- ций, см ⁻²	≤5x10 ⁴		
Пластины			
Диаметр, мм	50.8 ± 0.3		
Толщина, мкм	450 ± 15		
Ориентация поверхности	(100)		
Точность ориентации	± 0.5° ± 0.1°		
Отклонение от точной ориен- тации	(1 - 10) ± 0.1° towards the specified face		
Базовый и дополнительный срезы	SEMI M9, US SEMI and E/J SEMI Stan- dard		
Обработка поверхности лицевая сторона обратная сторона	полированная, годная к эпитаксии полированная, шлифовано-травленая		
Упаковка	индивидуальная		

Польская компания Comscore выпускает слитки InAs со следующими параметрами:

Таблица 1.8.17

Материал: легирующая примесь	Тип	Диаметр, мм	Плотность дислокации, см ⁻²	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Ориентация	Удельное противл. Ом·см
InAs:- undoped	N	50	$<5 \cdot 10^4$	$<5 \cdot 10^{16}$	$>2 \cdot 10^4$	(100), (111), (110)	
InAs:S	N	50	$<5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{17}$ - $5 \cdot 10^{19}$	$>3 \cdot 10^3$	(100), (111), (110)	
InAs:Zn	P	50	$<5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{17}$ - $5 \cdot 10^{19}$	>80	(100), (111), (110)	

В таблице 1.8.18 приведена цена InAs в зависимости от параметров, выпускаемого Польской компаний Comscore

Таблица 1.8.18

Цена €/штука	Материал	Ориентация	Диаметр, мм	Толщина, мкм	Поверхность	Удельное сопротивление, Ом·см	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Плотность дислокации, см ⁻²
200.0 0	n- InAs:-	[100]	50	400	P/E	1 US Flat	$(2-6) \cdot 10^{16}$	$>20,000$	<120
165.0 0	n- InAs:S	[111]	40mm	400	P/E	~0.0002	$>1 \cdot 10^{18}$	$>5,000$	$<2 \cdot 10^3$
200.0 0	p- InAs:Zn	[100]	50	400	P/E	US Flats	$(1-5) \cdot 10^{18}$		$<1.0 \cdot 10^4$

P – полированная, E - травленая

Параметры монокристаллического антимонида галлия выпускаемого различными компаниями:

Российская компания Girmet выпускает слитки GaSb со следующими параметрами:

Таблица 1.8.19

Монокристаллы

Легирующая примесь	Нелегированный	Te	Si или Ge
Тип проводимости	p	n	p
Концентрация носителей, см ⁻³	$\leq 2 \cdot 10^{17}$ (300K) $\leq 2 \cdot 10^{16}$ (77K)	$2 \cdot 10^{17}$ - $1.2 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{17}$ - $1 \cdot 10^{19}$
Подвижность, см ² /В.с	≥ 700 (300K) ≥ 2000 (77K)	2500 - 3500	1000 - 250
Плотность дислокаций, см ⁻²	$\leq 5 \cdot 10^3$	$\leq 2 \cdot 10^3$	$\leq 2 \cdot 10^3$

Пластины

Диаметр, мм	50.8 ± 0.3
Толщина, мкм	450 ± 15
Ориентация поверхности	(100) (111)
Точность ориентации	± 0.5° ± 0.1°
Отклонение от точной ориентации	(1 - 10) ± 0.1° в заданном направлении
Базовый и дополнительный срезы	По стандарту SEMI M9, US SEMI и E/J SEMI
Обработка поверхности лицевая сторона обратная сторона	полированная, годная к эпитаксии полированная, шлифовано-травленая
Упаковка	индивидуальная

В таблице 1.8.20 приведена цена GaSb в зависимости от параметров, выпускаемого Польской компанией Comscore

Таблица 1.8.20

Цена €/штука	Материал	Ориентация	Диаметр, мм	Толщина, мкм	Поверхность	Удельное сопротивление, Ом·см	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Плотность дислокаций, см ⁻²
225.00	p-type GaSb:-	[100]	50	450	P/P	US Flts	(1-1.2)·10 ¹⁷ при 77°K	(760-810) при 77°K	(1,200-1,500)
200.00	n-type GaSb: Te	[100]	50	450	P/P	US Flts	(0.2-0.9)·10 ¹⁸ при 77°K	~3,200	<2,000
185.00	n-type GaSb: Te	[100]	50	450	P/E	US Flts	(0.2-2.0)·10 ¹⁸ при 77°K	~3,200	<2,000

P – полированная, E - травленая

Параметры монокристаллического антимонида индия, выпускаемого раз-

личными компаниями.

Российская компания Girmet выпускает слитки InSb со следующими параметрами:

Таблица 1.8.21

Монокристаллы

Легирующая примесь	Нелегированный	Te	Ge, Mn
Тип проводимости	n	n	p
Концентрация носителей, см^{-3} (77K)	$(3 - 7) \times 10^{14}$	$7 \times 10^{14} - 1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{15} - 5 \times 10^{18}$
Плотность дислокаций, см^{-2}	≤ 200		

Пластины

Диаметр, мм	50.8 ± 0.3
Толщина, мкм	450 ± 15
Ориентация поверхности	(100) (111)
Точность ориентации	$\pm 0.5^\circ$ $\pm 0.1^\circ$
Отклонение от точной ориентации	$(1 - 10) \pm 0.1^\circ$ в заданном направлении
Базовый и дополнительный срезы	по стандартам SEMI M9, US SEMI and E/J SEMI Standard
Обработка поверхности лицевая сторона обратная сторона	полированная, годная к эпитаксии полированная, шлифовано-травленая
Упаковка	индивидуальная

В таблице 1.8.22 приведена цена InSb в зависимости от параметров, выпускаемого Польской компанией Comscore

Таблица 1.8.22

Цена €/штука	Материал	Ориентация	Диаметр, мм	Толщина, мкм	Поверхность	Удельное сопротивление, Ом·см	Концентрация носителей заряда, см ⁻³	Подвижность, см ² /В·с	Плотность дислокации, см ⁻²
185.00	n-type InSb:-	[100]	50	450	P/P	US Flats	(5.0-7.1)·10 ¹⁴ при 77K	(4.3-3.8)·10 ⁵	120-150
185.00	n-type InSb:-	[100]	50	450	P/E	US Flats	(0.8-4.0)·10 ¹⁴ при 77K	(7.5-4.5)·10 ⁵	120-150
170.00	n-type InSb:-	[100]	50	450	P/E	US Flats	(5.0-7.1)·10 ¹⁴ при 77K	(4.3-3.8)·10 ⁵	120-150

P – полированная, E - травленая

Параметры монокристаллического фосфида индия выпускаемого различными компаниями.

Польская компания Comscore выпускает слитки InP со следующими параметрами:

Таблица 1.8.23

Материал: легирующая при- месь	Тип	Диаметр, мм	Плот- ность дисло- кации, см ⁻²	Концен- трация но- сителей заряда, см ⁻³	Подвиж- ность, см ² /В·с	Ориента- ция	Удельное сопротив- ление, Ом· см
InP:- undoped	N	2"		$1 \cdot 10^{16}$ - $5 \cdot 10^{17}$		(100), (111)	
InP:S (класс A)	N	50	<100 0	$(5-8) \cdot 10^{18}$		(100), (111)	
InP:S (класс B)	N	50	<500 0	$(1-20) \cdot 10^{18}$		(100), (111)	
InP:Sn	N	50		$2 \cdot 10^{17}$ - $1 \cdot 10^{19}$		(100), (111)	
InP:Zn	P	50	<100	$(3-5) \cdot 10^{18}$	60-80	(100), (111)	
InP:Fe	SI	50	<5*1 0 ⁴		>2*10 ³	(100), (111)	>10 ⁷

В таблице 1.8.24 приведена цена InP в зависимости от параметров, выпускаемого Польской компанией Comscore

Таблица 1.8.24

Цена €/штука	Матери- ал	Ориен- тация	Диа- метр, мм	Тол- щи- на, мкм	По- верх- ность	Удельное сопро- тивле- ние, Ом· см	Концен- трация носите- лей за- ряда, см ⁻³	Под- виж- ность, см ² /В· с	Плот- ность дисло- каций, см ⁻²
200.0 0	SI InP:Fe	[100]	50	400	P/E	3.2E7	$8.4 \cdot 10^7$	2,300	$7.5 \cdot 10^4$
200.0 0	SI InP:Fe	[100- 2°]	50	350	P/E	>1E7	EJ Flats		<5·10 ⁴
170.0 0	n-type InP:-	[100]	50	400	P/E	0.254	$6.2 \cdot 10^{15}$	3,980	$4.9 \cdot 10^4$

Компания по продаже полупроводниковых InP материалов (www.waferworld.com) предлагает следующее:

Таблица 1.8.25

Метод	Диаметр.	Тип	Ориентация	Удельное сопротивление	Толщина	Поверхность	Класс	Размер	Цена
VGF	150.0	SI	(100)	$1.0 \cdot 10^7$	600-650	P/P	Test	5	\$1,000.00
VGF	150.0	SI	(100)	$1.0 \cdot 10^7$	600-650	P/P	Test	25	\$2,500.00
VGF	150.0	SI	(100)	$1.0 \cdot 10^7$	600-650	P/P	Test	100	\$10,000.00
VGF	150.0	SI	(100) off 2° <110>	$1.0 \cdot 10^8$	650-700	P/P	Epi	5	\$2,500.00
VGF	150.0	SI	(100) off 2° <110>	$1.0 \cdot 10^8$	650-700	P/P	Epi	25	\$8,750.00

Параметры монокристаллических полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^{VI}$, выпускаемых различными компаниями.

Компания по продаже полупроводниковых материалов (<http://www.waferworld.com>) предлагает следующие материалы:

CdS

Отклонение от точной ориентации: $\pm 0.30^\circ$

Отклонение боковых размеров: ± 0.1 mm

Отклонение от точной толщины: ± 0.50 мкм

Шероховатость поверхности : $R_a < 5 \text{ \AA}$

Ровность поверхности: <1 мкм/см параллельность в пределах 1° .

MP: 1287 d: 4.821

MS: 1"x 40mm

Структура: гексагональная, $a = 4.1367$ $c = 6.7161$

Таблица 1.8.26

Метод	Диаметр	Тип	Примесь	Ориентация	Удельное сопротивление	Толщина	Поверхность	Класс	Размер	Цена
	5 X 5			(0001)		475-525	P/E	PRIME	1	\$250.00

CdTe

Отклонение от точной ориентации: $\pm 0.30^\circ$

Отклонение боковых размеров: $\pm 0.1 \text{ mm}$

Отклонение от точной толщины: $\pm 0.50 \text{ мкм}$

Шероховатость поверхности : $R_a < 5 \text{ \AA}$

Ровность поверхности: $<1 \text{ мкм/см}$ параллельность в пределах 1° .

MP: 1287 d: 4.821

MS: 1"х 40mm

Структура: кубическая, $a = 6.483$

Таблица 1.8.27

Метод	Диаметр	Тип	Примесь	Ориентация	Удельное сопротивление	Толщина	Поверхность	Класс	Размер	Цена
	10 X 10			(111)		475-525	P/E	PRIME	1	\$500.00

ГЛАВА II

ДИФФУЗИЯ, РАСТВОРИМОСТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от металлов, электрофизические, оптические и контактные свойства полупроводников очень чувствительны к наличию примесных атомов и других дефектов кристаллической решетки. Чистый полупроводниковый материал (где концентрация примесных атомов сравнима с концентрацией собственных носителей заряда) принято называть собственным полупроводником, обладающим достаточно высоким удельным сопротивлением при комнатной температуре (табл. 2.1.1). Такие полупроводники в основном представляют научный интерес. При разработке различных микроэлектронных приборов необходим полупроводниковый материал, который содержит примесные атомы в широком интервале концентрации $N=10^{13} \div 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Наличие таких примесных атомов позволяет управлять удельным сопротивлением и типом проводимости.

Легирование полупроводниковых материалов примесями с необходимой концентрацией является одной из основных и важной технологической операцией в электронике.

В настоящее время существует 4 способа легирования полупроводниковых материалов: **1 – легирование материала** в процессе выращивания. Этот способ позволяет получить однородно легированные монокристаллы различных размеров. Данный способ в основном применяется для получения однородно легированных полупроводниковых монокристаллических слитков, которые в дальнейшем используются как базовый материал для создания различных электронных приборов. **2 –диффузионное легирование**, которое является основным способом для создания различных приборов в планарной технологии. **3 – легирование материала** методом имплантации ионов примесных атомов высокой энергии (до несколько сотен кэВ). Этот метод позволяет внедрять примесные атомы в очень тонкую поверхностную область материала (в зависимости от энергии ионов от 10 Å до несколько сотен Å). При этом поверхностная

область полупроводника легируется неоднородно и нарушается её кристалличность (т.е. происходит аморфизация кристаллической решетки). Для восстановления поверхностных состояний и активизации примесных атомов необходим дальнейший низкотемпературный отжиг ($T \sim 600 \div 900^\circ\text{C}$) или отжиг с помощью концентрированного излучения. Этот метод позволяет, в отличие от диффузионного легирования, вводить примесные атомы с неограниченной концентрацией. Данный метод применяется при разработке отдельных классов приборов, но не является доступным для всех примесных атомов. **4 –радиационное легирование.** Этот способ основан на облучение кремния быстрыми нейтронами в реакторе, при котором часть атомов Si^{28} превращается в атомы фосфора. Данный способ позволяет осуществлять однородное легирование и используется только для очень узких специальных задач.

Таблица 2.1.1

Параметры собственных полупроводниковых материалов

Материал	Собственное удельное сопротивление при $T=300\text{ K}$, Ом·см	Собственная концентрация носителей заряда при $T=300\text{ K}$, см^{-3}
Ge	47	$2,3 \cdot 10^{13}$
Si	$2,3 \cdot 10^5$	$1,45 \cdot 10^{10}$
GaAs	10^8	$1,8 \cdot 10^6$
InP	$6 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^7$
CdTe	$5 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^6$

§2.1 ДИФФУЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУ- ПРОВОДНИКАХ

Как известно, диффузия происходит, когда существует градиент концентрации частиц. Диффузия описывается законами Фика. Первый закон Фика описывается выражением:

$$j = -D \frac{dN}{dx} \quad (1)$$

где j – поток частиц (N) пересекающих (диффундирующих) в единицу времени единичную площадку в направлении x , связанный с градиентом концентрации $\frac{dN}{dx}$. Величина D – коэффициент диффузии диффундирующих частиц.

Концентрация диффундирующих частиц при заданном времени и определенном расстоянии рассчитывается вторым законом Фика

$$\frac{dN}{dt} = D \frac{d^2 N}{dx^2} \quad (2)$$

Диффузию примесей в полупроводник осуществляют из газовой фазы (если давление паров достаточно) или из напылённого слоя на поверхность материала. Основным параметром в процессе диффузии является коэффициент диффузии примеси D , величина которого зависит от температуры по закону:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (3)$$

где Q – энергия активации примеси, показывающая необходимую энергию для перескока примесного атома в решетке из одного равновесного состояния в другое (из одного узла кристаллической решетки в другой узел, или из одного межузлия в другое). Используя кинетическую теорию газов, коэффициент диффузии атомов в твердых телах можно записать в следующем виде:

$$D \approx \frac{1}{6} \frac{\delta^2}{\tau_0} \quad (4)$$

где δ – расстояние между ближайшими равновесными положениями атомов (расстояние между двумя узлами или межузлиями), τ_0 – постоянная, по порядку величины равная периоду собственных колебаний атомов в узлах кристал-

лической решетки ($\sim 10^{-12}$ с). Величина Q , в зависимости от физических параметров примесного атома (структуры электронной оболочки, атомного и ковалентного радиуса атома) меняется в очень широком интервале (табл. 2.1.2). Обычно диффузия примесных атомов в полупроводниках происходит в условиях диффузии из постоянного источника (при диффузии концентрация примесных атомов на поверхности материала, или в среде, где идет диффузия не меняется) или диффузии из ограниченного источника (в процессе диффузии, со временем, концентрация примесных атомов на поверхности кристалла уменьшается).

Решение уравнения (2) для диффузии из постоянного источника дает следующее распределение концентрации примесных атомов по глубине кристалла:

$$N(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (5)$$

в случае диффузии из ограниченного слоя:

$$N(x,t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (6)$$

где t – время диффузии, x – расстояния от поверхности, D коэффициент диффузии при данной температуре.

Если коэффициент диффузии примесей при данной температуре известен и известно время диффузии, то можно определить максимальную глубину проникновения примесей L при диффузии:

$$L = 2\sqrt{Dt} \quad (7)$$

В данном параграфе нами приведены ионные и ковалентные радиусы примесных атомов, значения коэффициентов диффузии примесей в различных полупроводниках, значения энергии активации Q и предэкспоненциальные постоянные (D_0) для многих примесей, что позволит читателю определить коэффициент диффузии примесей при любой температуре согласно формуле (3), где $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, T – температура в кельвинах. В последнее время очень широко используются пленочные многоструктурные приборы различного назначения.

При этом основной способ получения таких структур является создание на основе (подложки) монокристаллических пластинок эпитаксиальных слоев как монокристаллического, так и поликристаллического характера различной толщины. Как показали результаты исследований последних лет, механизм и коэффициент диффузии, а также растворимость примесей в таких эпитаксиальных структурах существенно отличаются от объемных полупроводниковых материалов. Поэтому нами в конце данного параграфа приведены существующие данные по диффузии в эпитаксиальных слоях.

Таблица 2.1.2

Эффективные значения радиусов (в Å)

Элемент	Ионный радиус	Тетраэдрический ковалентный радиус	Металлический радиус	Ван – дервальсов радиус
Li	068 (Li ⁺)	0,68	1,58	
Na	0,9 (Na ⁺)		1,52	
			1,92	
K	1,33 (K ⁺)		1,86	
			2,38	
Pb	1,49 (Pb ⁺)		2,31	
			2,53	
Cs	1,65 (Cs ⁺)		2,43	
			2,72	
Be	0,34 (Be ²⁺)		2,62	
		1,12		
Mg	0,74 (Mg ²⁺)	1,07		
		1,60		
		1,55		
Ca	1,04 (Ca ²⁺)	1,97		
		1,91		
Sr	1,20 (Sr ²⁺)	2,15		
		2,07		
Ba	1,38 (Ba ²⁺)	2,24		
		2,17		
		1,47		
Ti	0,78 (Ti ²⁺)		1,42	
	0,69 (Ti ³⁺)			
	0,64 (Ti ⁴⁺)			
Zr	0,82 (Zn ⁴⁺)		1,60	
			1,54	
Ta	0,66 (Ta ⁵⁺)		1,49	
			1,44	
			1,30	
Cr	0,83 (Cr ²⁺)		1,26	
	0,64 (Cr ³⁺)			
	0,35 (Cr ⁶⁺)			
Mo	0,68 (Mo ⁶⁺)		1,39	
			1,36	
	0,65 (Mo ⁶⁺)			

Продолжение таблицы 2.1.2

Элемент	Ионный радиус	Тетраэдрический ковалентный радиус	Металлический радиус	Ван – дерва-альсов радиус
W	0,68 (W^{4+})		1,41	
	0,65 (W^{6+})		1,37	
	0,91 (Mn^{2+})		1,27	
Mn	0,70 (Mn^{3+})		1,24	
	0,52 (Mn^{4+})			
Fe	0,80 (Fe^{2+})		1,26	
	0,67 (Fe^{3+})		1,23	
Co	0,78 (Co^{2+})		1,25	
	0,64 (Co^{3+})		1,22	
Ni	0,74 (Ni^{2+})		1,25	
			1,22	
Pd	0,64 (Pd^{4+})		1,37	
			1,34	
Pt	0,64 (Pt^{4+})		1,39	
			1,35	
Cu	0,98 (Cu^{+})	(1,225)	1,28	
	0,80 (Cu^{2+})	1,35	1,24	
Ag	1,13 (Ag^{+})	1,53, (1,405)	1,44	
			1,40	
Au	1,37 (Au^{+})	1,50	1,46	
			1,42	
Zn	0,83 (Zn^{2+})	1,31, (1,225)	1,37	
			1,32	
Cd	0,99 (Cd^{2+})	(1,405)	1,54	
			1,49	
Hg	1,12 (Hg^{2+})		1,57	
			1,52	
B	0,20 (B^{3+})	0,88, (0,853)		
Al	0,57 (Al^{3+})	1,26, (1,230)	1,43	
			1,39	
Ga	0,62 (Ga^{3+})	1,26, (1,225)	1,53	
			1,48	
In	0,92 (In^{3+})	1,44, (1,405)	1,67	
			1,62	
Tl	1,49 (Tl^{+})		1,71	
	1,05 (Tl^{3+})	147	1,66	
C	0,2 (C^{4+})	0,77, (0,774)		
	2,60 (C^{4-})			
Si	0,39 (Si^{4+})	1,17, (1,173)		

Продолжение таблицы 2.1.2

Элемент	Ионный радиус	Тетраэдрический ковалентный радиус	Металлический радиус	Ван – дервальсов радиус
Ge	0,65 (Ge ²⁺) 0,44 (Ge ⁴⁺)	1,22, (1,225)		
Sn	1,02 (Sn ²⁺) 0,67 (Sn ⁴⁺)	1,40, (1,405)	3,06 3,17	
Pb	1,26 (Pb ²⁺) 0,76 (Pb ⁴⁺)	1,46	3,42	
N	0,15 (N ⁵⁺) 1,48 (N ³⁻)	0,70, (0,719)		1,5
P	0,35 (P ⁵⁺) 1,86 (P ³⁻)	1,10, (1,128)		1,9
As	0,69 (As ³⁺) 1,91 (As ³⁻)	1,225, (1,18)		2,0
Sb	0,90 (Sb ³⁺) 0,62 (Sb ⁵⁺) 2,08 (Sb ³⁻)	1,36 (1,405)		2,2
Bi	1,20 (Bi ³⁺) 2,13 (Bi ³⁻)	1,46		
O	1,36 (O ²⁺)	(0,678)		1,40
S	1,82 (S ²⁺)	(1,127)		1,85
Se	1,93 (Se ²⁺) 0,69 (Se ⁴⁺) 0,35 (Se ⁶⁺)	(1,225)		2,00
Te	2,1 (Te ²⁻) 0,89 (Te ⁴⁺)	(1,405)		2,20
Cl	1,18 (Cl ⁻)	(1,127)		1,80 1,95
Br	1,96 (Br ⁻)	(1,225)		2,05
I	2,20 (I ⁻)	(1,405)		

Диффузионные параметры примесей в германии

Элемент	Q, эВ		D ₀ , см ² /сек	
	По дан-ным [18]	По другим данным	По данным [18]	По другим дан-ным
1	2	3	4	5
Li	0,465	0,5	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$25 \cdot 10^{-4}$
		0,57	—	$9,1 \cdot 10^{-3}$
Cu	0,18	—	$1,9 \cdot 10^{-4}$	—
Ag	—	1,0	—	$4,4 \cdot 10^{-2}$
Au	—	2,5	—	$2,15 \cdot 10^{-2}$
Zn	2,8	2,5-2,16	10,0	$5,7 \cdot 10^{-2}$
B	4,6	—	$1,6 \cdot 10^{-9}$	—
Ga	3,14	2,5	40,0	—
Al	—	2,7		0,05
In	2,41	2,5-2,16	0,03	0,03
Ge	—	3,2	—	87
Sn	—	1,9	—	$1,7 \cdot 10^{-2}$
Pb	—	3,6	—	—
P	2,48	—	2,5	—
As	2,42	2,5-2,25	6,3	0,7—11,3
Sb	2,42	2,5-2,25	4,0	0,7—10
Fe	—	11	—	0,13
Ni	—	0,9	—	0,8
O	—	2,02	—	0,17
He	—	0,7	—	$6,1 \cdot 10^{-3}$
H	—	0,38	—	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Ta	—	1,16	—	$2,5 \cdot 10^{-6}$
	—	2,86	—	0,2
Be	—	2,5	—	0,5
Co	—	1,1	—	0,16
N	—	2,58	—	—
Bi	—	2,42	—	—

Таблица 2.1.4

Диффузионные параметры примесей в кремнии

Элемент	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	ΔT	Метод
1	2	3	4	5
H	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0,48	967÷1207	5
Li	$4,4 \cdot 10^{-3}$	0,78	450÷1000	2
	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,65	360÷860	4
	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,70	420÷800	1
	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,66	25÷125	
			80÷1350	4
	$2,65 \cdot 10^{-3}$	0,62	400÷500	3
Cu	$4 \cdot 10^{-2}$	1,0	800÷1100	1
	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,43	400÷700	2
Ag	$2,0 \cdot 10^{-3}$	1,59	1100÷1350	1
Au	$1,1 \cdot 10^{-3}$	1,11	800÷1200	1
	$2,44 \cdot 10^{-4} *$	0,38	700÷1300	1
	$2,75 \cdot 10^{-3} **$	2,0		
Na	$1,65 \cdot 10^{-3}$	0,72	520÷820	2
K	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,75	530÷790	2
Zn	0,1	1,4	980÷1270	4
B	10,5	3,66		2
	3,2	3,5		2
	17,1	3,66		2
	15,8	3,7		2
	10,7	3,64		2
	25	3,51		2
	$6 \cdot 10^{-7}$	1,68	700÷1150	1
Al	8	3,45		2
	4,8	3,34	1100÷1400	2
	2800	3,77		2
Ga	3,6	3,49		2
	270	4,15		2
	2,1	3,5		2

Продолжение таблицы 2.1.4

Элемент	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	ΔT	Метод
In	16,5	3,89		2
	19,4	3,86		1
Te	16,5	3,88		2
Sn	32	425	1050÷1200	1
C	0,33	2,92	1070÷1400	1
Si	1800	4,86	1220÷1400	1
	9000	5,14	1100÷1300	1
Ge	$6,26 \cdot 10^5$	5,28	1150÷1350	1
P	10,5	3,66		2
	29	3,88		1
As	0,32	3,55		2
	68,6	4,25		2
Sb	5,6	3,92		2
	12,9	3,95		1
Bi	1030	4,6		2
O	0,21	2,55		2
		3,5		2
S	0,92	2,2	1050÷1360	2
Cr	0,01	1	900÷1250	
Fe	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,65	1000÷1300	
He	0,11	1,26		1
Se	0,9	2,44	1000÷1300	3
Mn	$2,6 \cdot 10^{-1}$	1,3	1000÷1300	1
Ni	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,47	1000÷1300	1
Co	$8,5 \cdot 10^{-4}$	0,51	1000÷1300	4

Таблица 2.1.5

Диффузионные параметры примесей в соединениях $A^{III}B^V$

Элемент	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	ΔT	Метод
AlSb				
Al		1,8		
Sb		1,5		
Zn	0,33	1,93	660÷860	Меченые атомы
Cu	$3,5 \cdot 10^{-3}$	0,36	150÷500	>> >>
InAs				
In	$6 \cdot 10^5$	4	740÷900	Меченые атомы
As	$3 \cdot 10^7$	4,47	740÷900	>> >>
Cu	0,036	0,52		
Cu	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,54	600÷900	>> >>
Ag	$7,3 \cdot 10^{-4}$	0,26	460÷900	>> >>
Au	$5,8 \cdot 10^{-3}$	0,65	600÷900	>> >>
Mg	$1,98 \cdot 10^{-6}$	1,17	600÷900	p-n - переход
Zn	$3,11 \cdot 10^{-3}$	1,17	600÷900	>>
	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,96±0,02	600÷900	Меченые атомы
Cd	$4,35 \cdot 10^{-4}$	1,17	600÷900	p-n - переход
	$7,4 \cdot 10^{-4}$	1,15±0,03	600÷900	p-n - переход
Ge	$3,74 \cdot 10^{-6}$	1,17	600÷900	>>
Sn	$1,49 \cdot 10^{-6}$	1,17	600÷900	>>
S	6,78	2,2	600÷900	>>
Se	12,55	2,2	600÷900	>>
Te	$3,43 \cdot 10^{-5}$	1,28	600÷900	>>
P	$1,26 \cdot 10^{-2}$	2,7±0,2	650÷900	p/a
Al	$4,3 \cdot 10^{-4}$	1,17	650÷900	p/a
GaSb				
Ga	$3,2 \cdot 10^3$	3,15	658÷700	Меченые атомы
Sb	$3,4 \cdot 10^4$	3,45	658÷700	>> >>
Sb	$8,7 \cdot 10^{-3}$	1,13	320÷650	>> >>
In	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,53		
Sn	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,80	320÷650	>> >>
Te	$3,8 \cdot 10^{-4}$	1,2	320÷650	>> >>
Cd	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,72	500÷640	p-n – переход
Li	0,12	0,7	800	Меченые атомы

Продолжение таблицы 2.1.5

Элемент	D ₀ , см ² /сек	Q, эВ	ΔT	Метод			
GaSb							
Cu Mg Ni Se	2,3·10 ⁻⁴ 3,2·10 ³ 3,4·10 ⁴ 8,7·10 ⁻³ 3,8·10 ⁻⁴	1,9 3,15 3,44 1,13 1,2	>800° C 300÷700 300÷700 300÷700 300÷700				
	InP						
	In P Au Au Ag Cu Cd Zn	1·10 ⁵ 7·10 ¹⁰ 1,32·10 ⁻⁵ 1,37·10 ⁻⁴ 3,6·10 ⁻⁴ 3,8·10 ⁻³ 1,1·10 ⁻⁷ 1,6·10 ⁻⁸	3,85÷0,05 5,65÷0,06 0,48÷0,01 0,73 0,59÷0,03 0,69÷0,02 0,725 0,3			850÷100 850÷1000 600÷820 600÷900 500÷900 600÷900 700÷900	Меченые атомы >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> p–n – переход
	InSb						
In Sb Cu Ag Au Li Hg Cd Zn	1,8·10 ⁻⁹ 0,3 5·10 ⁻² 1,4·10 ⁻⁴ 5·10 ⁻² 3,5·10 ⁻⁵ 10 ⁻⁷ 7·10 ⁻⁴ 7·10 ⁻⁴ 4·10 ⁻⁶ 10 ⁻⁵ 1·26 10 ⁻⁹ 1,3·10 ⁻⁴ 2,6·10 ⁻² 6,32·10 ⁸ 5,5 1,4·10 ⁻⁷ 0,5±0,4 1,6·10 ⁶	0,28 1,75 1,82 3,75 1,94 0,37 0,25 0,32 0,28 1,17 1,1 1,75 0,52 1,2 1,36 2,61÷2,47 1,6 0,86 1,35±0,05 2,3±0,3	300÷500 455÷500 478÷520 300÷500 478÷520 230÷490 440÷510 140÷510 425÷500 250÷500 400÷500 434÷519 400÷500 400÷500 390÷512 362÷508 350÷500	Меченые атомы >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> >>> >> p–n-переход Меченые атомы >>> >> p–n-переход p/a >>> p–n-переход			

Продолжение таблицы 2.1.5

Элемент	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	ΔT	Метод
Sn	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,65	300÷500	Меченые атомы
	$5,5 \cdot 10^{-8}$	0,75	390÷512	>> >>
Ge	$5 \cdot 10^{-6}$	0,95	325÷495	>> >>
S	$4 \cdot 10^{-5}$	1,05	200÷450	>> >>
Se	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1,3	200÷450	>> >>
	1,6	1,87	380÷500	Емкостной
	$1,7 \cdot 10^{-7}$	0,57	300÷500	Меченые атомы
	10^{-6}	0,8	300÷500	>> >>
Co	$2,7 \cdot 10^{11}$	0,39	300÷450	>> >>
	10^{-7}	0,25	425÷500	>> >>
Fe	10^{-7}	0,25	440÷510	>> >>
Te	6610^{-5}	1,19	440÷510	Емкостной
S	0,09	1,4	360÷500	>> >>
GaP				
Zn	1,0	2,1		Меченые атомы
	$2,56 \cdot 10^{-19}$	1,12	600÷900	
	0,739			
	$7,5 \cdot 10^{-8}$	2,5	900	>> >>
	0,45			
	($N > 10^{18}$)			
S	$3,2 \cdot 10^3$	4,7	1100÷1300	>> >>
GaAs				
Ga	10^7	5,6	1100÷1225	Меченые атомы
As	$4 \cdot 10^4$	10,2	1100÷1225	>> >>
Li	0,53	1,0	250÷500	Спектральный анализ, электрические измерения
	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \pm 0,1$		Меченые атомы
	$6 \cdot 10^{-2}$	$0,98 \pm 0,06$	450÷750	Ультразвук
Au	10^{-3}	$1,1 \pm 0,1$	590 ÷ 1055	Меченые атомы
Ag	$4 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \pm 0,05$		>> >>
Be	$7,3 \cdot 10^{-6}$	1,2		
Mg	$4 \cdot 10^{-5}$	1,22	800 ÷ 1000	электрические измерения

Продолжение таблицы 2.1.5

Элемент	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	ΔT	Метод
Cd	$1,3 \cdot 10^{-3}$	2,2	800 ÷ 1100	электрические измерения
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,43	860 ÷ 1150	Меченые атомы
	$5 \cdot 10^{-2}$	2,8	900 ÷ 1100	электрические измерения
Zn	$3 \cdot 10^{-7}$	1,0	800 ÷ 1100	электрические измерения
	15	2,49	677 ÷ 903	Меченые атомы
	$8 \cdot 10^{-5}$	1,1	880 ÷ 1140	>> >>
	15	2,5		
Ge	$3 \cdot 10^{-5}$	1,8		
	7,5	3,6	1050 ÷ 1140	>> >>
Sn	$6 \cdot 10^{-4}$	2,5	1000 ÷ 1200	>> >>
S	1,6	2,8	900 ÷ 1075	>> >>
	$6 \cdot 10^{-5}$	2,6	900 ÷ 980	
	$4 \cdot 10^3$	4,04	1000 ÷ 1200	электрические измерения
	$1,85 \cdot 10^2$	2,6	800 ÷ 1200	Меченые атомы
	$2,6 \cdot 10^{-5}$	1,86	900 ÷ 1100	p–n-переход
Se	$3 \cdot 10^3$	4,16		
Mn	0,65	2,49	700 ÷ 1000	>> >>
Te	$2,6 \cdot 10^{-5}$	2,0	1000 ÷ 1100	>> >>
P	$7 \cdot 10^{10}$	5,65		

Таблица 2.1.6

Диффузионные параметры примесей в соединениях $A^{II}B^{VI}$

Соединение	Примесь	T, °C	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	Примечание
CdS	Cd	750÷1150	3	2,0	При насыщенном давлении паров кадмия
		400÷730	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,62	Для междоузельного кадмия
	S	—	—	2	
	Cu	400÷730	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,76	Анизотропия диффузии отсутствует
		380÷500	25	1,2	
		146÷400	$2 \cdot 10^3$	0,96	
	Ag	300÷500	0,24	0,8	В области малых концентраций серебра
			25	1,2	В области промежуточных концентраций серебра
	Au	500÷800	200	1,8	При давлении паров кадмия 500 торр
	Li	610÷960	$3 \cdot 10^{-6}$	0,68	
CdSe	Cd		$6 \cdot 10^{-5}$	0,99	В парах кадмия
	Se	950÷1430	$1,3 \cdot 10^5$	4,43	При давлении паров кадмия 1 ат ($D \sim P_{Cd}^{-1}$)
CdTe	P	800÷1000	—	2,1	При насыщенном давлении паров кадмия
	Cd		3,26	2,67	В образцах, отожденных в парах кадмия
			1,58	2,44	В образцах, отожденных в парах кадмия
			1,37	0,67	
	Se	680÷900	$1,7 \cdot 10^{-4}$	1,35	При наличии примеси Al ($5 \cdot 10^{17}$ см ⁻³)
	In	450÷1000	$4,1 \cdot 10^{-2}$	1,6	
	Au	330÷720	67	2	В атмосфере азота
	Ag		10÷100	0,61	
	Cu				
		97÷300	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,67	Диффузия из омического контакта

Продолжение таблицы 2.1.6

Соединение	Примесь	T, °C	D_0 , см ² /сек	Q, эВ	Примечание
ZnS	Zn	900÷930	$3 \cdot 10^{-4}$	1,52	В образцах, отжигавшихся при давлении паров цинка 1 ат
		940÷1030	$1,5 \cdot 10^{-4}$	3,26	То же
		1030÷1075	10^{-16}	6,52	То же
	S	700÷890	—	3,4	$P_s=0,5$ ат. Предварительный отжиг при насыщенном давлении паров цинка в течении 2 суток
ZnSe	Zn	720÷810	10^{-13}	3,45	В поликристалле
	Al		—	2	
	Cu	200÷570	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,56	В чистом и в легированном хлором материале
ZnTe	Zn	782÷950	10^{-2}	1,9	При наличии примеси Al (10^{19} см ⁻³)
			14	2,69	Ниже 950° С в чистом материале и выше 950° С независимо от Al
	Te	730÷1000	$2 \cdot 10^{-4}$	3,8	В образцах, отоженных в парах теллура
	Al		—	2	
HgTe	Cd	250÷ 350	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,69	В вакууме
	Hg			0,59	

Таблица 2.1.7

Диффузия меди в сульфиде свинца

$P_0 \times 10^{-18}, \text{см}^{-3}$	T, °C	t, мин.	$\delta_{\text{рп}}, \text{мм}$	$n_{\infty} \cdot 10^{-19}, \text{см}^{-3}$	$D_1 \cdot 10^7, \text{см}^2/\text{сек}$	$D_2 \cdot 10^7, \text{см}^2/\text{сек}$
Чистый PbS ($p_0 = N_v^+$)						
3	100	180	0,65	3	3,9	3,9
3	100	180	0,50	3	2,3	3,9
1	150	60	0,90	3	7,5	5,0
1	150	60	0,75	3	5,3	3,5
0,7	200	60	0,40	2	1,5	1,0
0,1	250	30	1,95	3	55	33
1	250	30	1,0	3	20	13
2	300	10	0,75	3	30	67
1	350	5	1,10	2	165	120
1	350	5	0,9	2	135	100
1	400	10	1,8	2	270	200
PbS+Ag ($p_0 = N_{\text{Ag}}^+ = 10^{18} \text{ см}^{-3}$)						
	100	60	0,70	3	2,3	5,3
	100	60	0,60	3	1,7	39
	150	60	1,00	2	6,9	17
	150	60	0,92	2	5,9	15
	200	60	1,09	1,5	11	22
	200	30	0,85	2	10	25
	300	10	0,96	1,5	53	106
	350	5	1,45	2	175	440
	350	5	1,50	2	190	470

Для удобства в определении коэффициента диффузии или растворимости примесей в полупроводниках в таблице 2.1.7 приведены значения kT в эВ, при различных температурах

Таблица 2.1.8

Значение kT в зависимости от температуры в электрон – вольтах

T, °K	kT, эВ	T, °K	kT, эВ	T, °K	kT, эВ	T, °K	kT, эВ
250	0,0215	450	0,0559	1050	0,0903	1450	0,1247
300	0,0258	700	0,0602	1100	0,0946	1500	0,1290
350	0,0301	750	0,0645	1150	0,0989	1550	0,1333
400	0,0344	800	0,0688	1200	0,1032	1600	0,1376
450	0,0387	850	0,07310	1250	0,1075		
500	0,0430	900	0,0774	1300	0,1118		
550	0,0473	950	0,0817	1350	0,1161		
600	0,0516	1000	0,086	1400	0,1204		

Пример расчета: $D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$

где $D_0=10^{-5}$ см²/сек; $Q=2,45$ тогда $D = 10^{-5} \exp\left(-\frac{2,45}{kT}\right)$

при $T=1000^\circ$ К

$$D = 10^{-5} \exp\left(-\frac{2,45}{0,086}\right) = 10^{-5} \exp(-28,49) = 10^{-5} \cdot 10^{-12,38} = 10^{-5} \cdot 4,110^{-13} = 4,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сек}$$

Так как $28,49:2,3=12,38$ это переход от натурального логарифма к десятичному логарифму.

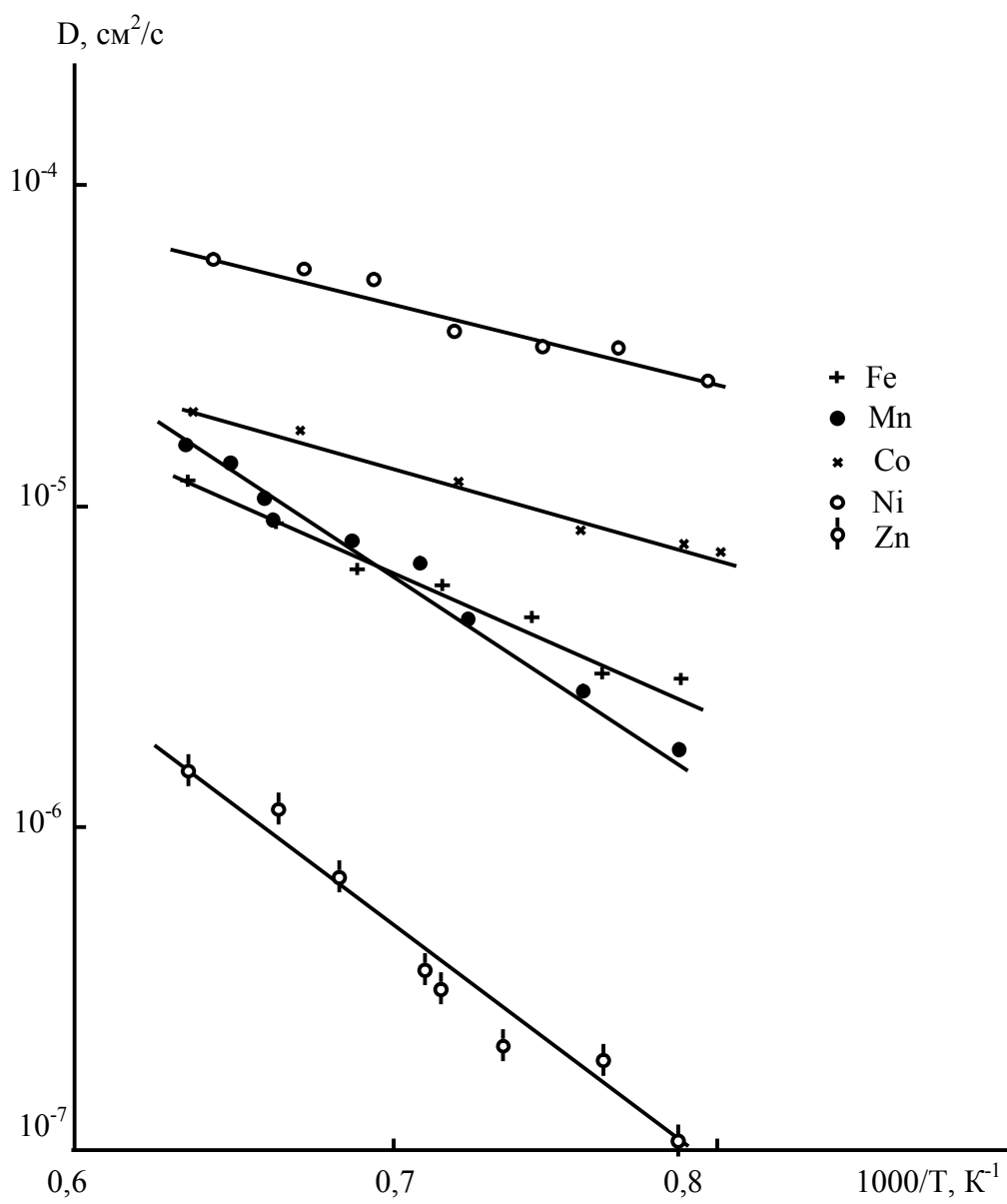


Рис. 2.1.1. Температурная зависимость коэффициентов диффузии элементов переходной группы в кремнии

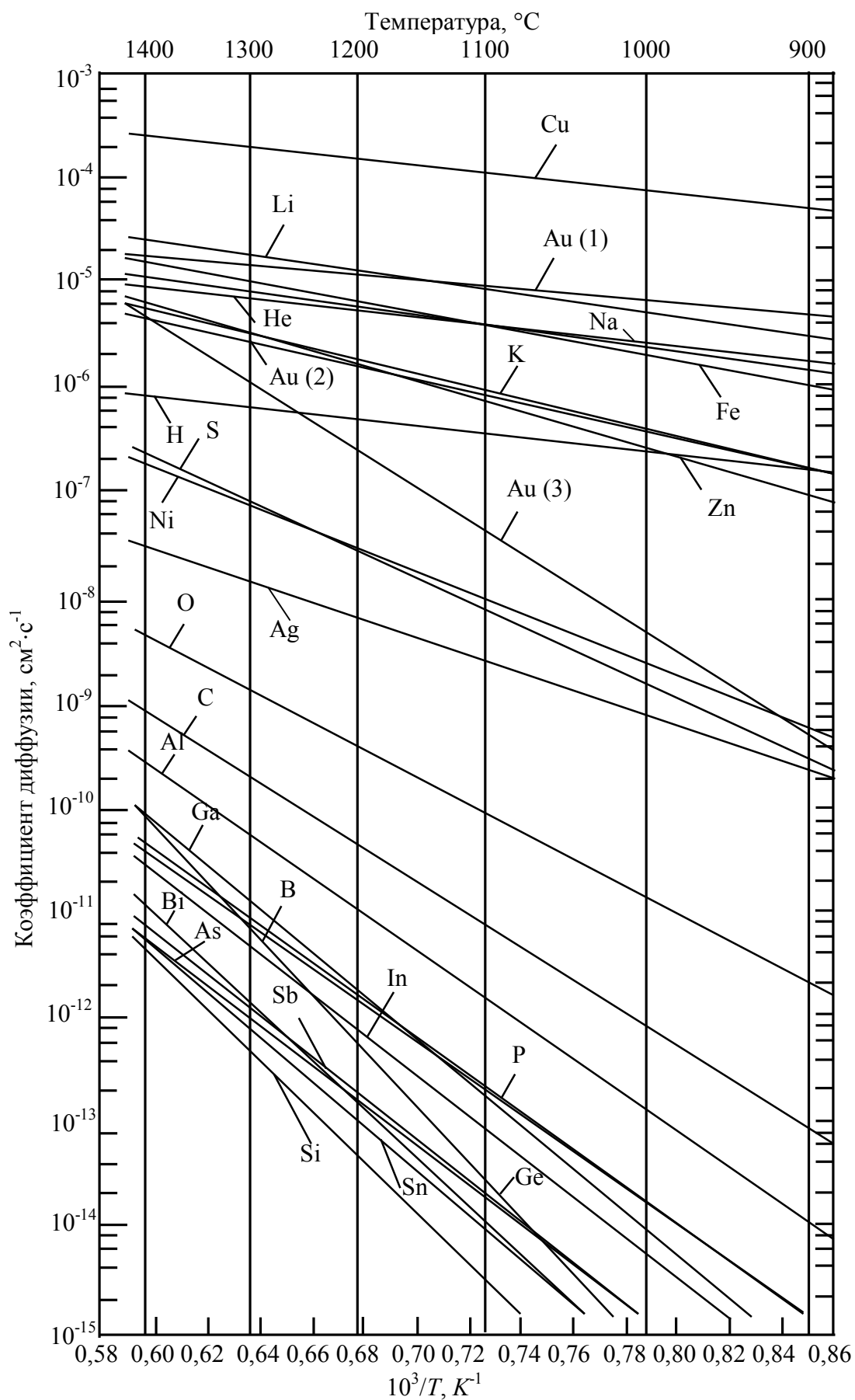


Рис. 2.1.2 Температурные зависимости коэффициентов диффузии примесей в кремнии при низком содержании примесей.

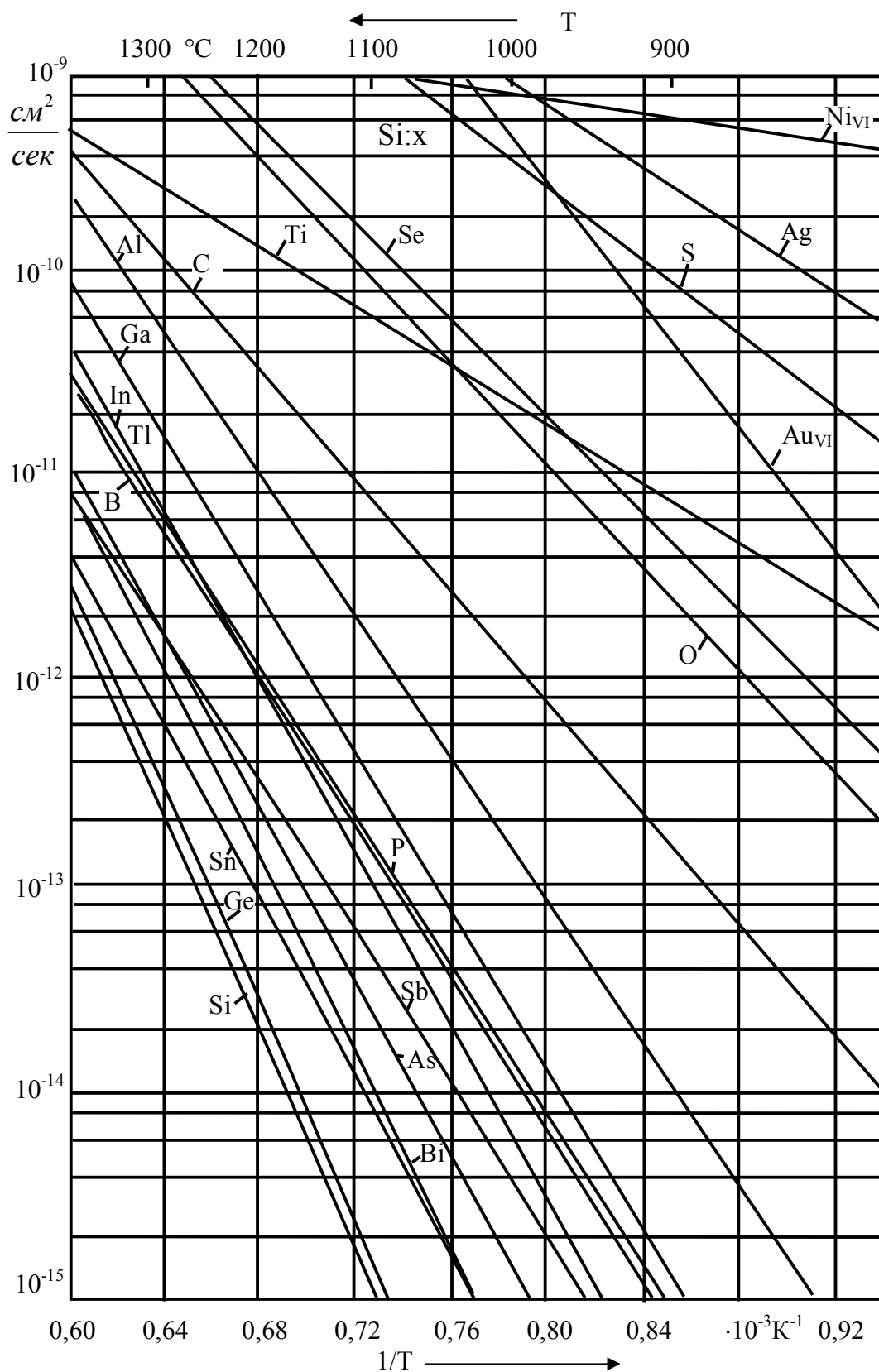


Рис. 2.1.3. Температурная зависимость коэффициента диффузии различных элементов в кремнии (согласно Landolt - Bornstein).

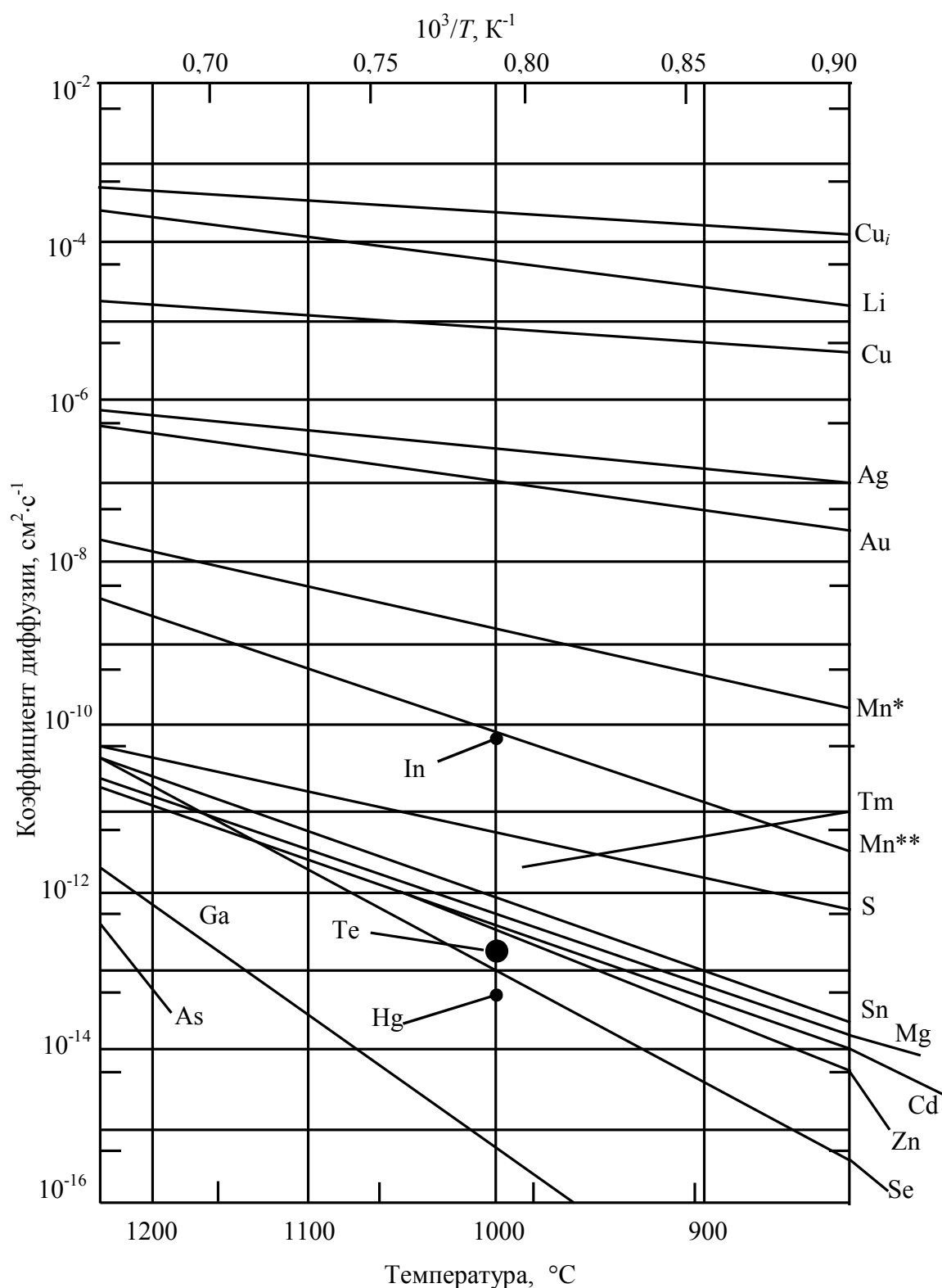


Рис. 2.1.4. Коэффициенты диффузии различных элементов в GaAs в области малых концентраций.

[* - измерения проводились в отсутствие избыточного давления паров мышьяка;

** - измерения проводились под давлением паров мышьяка $8,5 \cdot 10^{-3} \text{ атм.}$ -Прим. перев.]

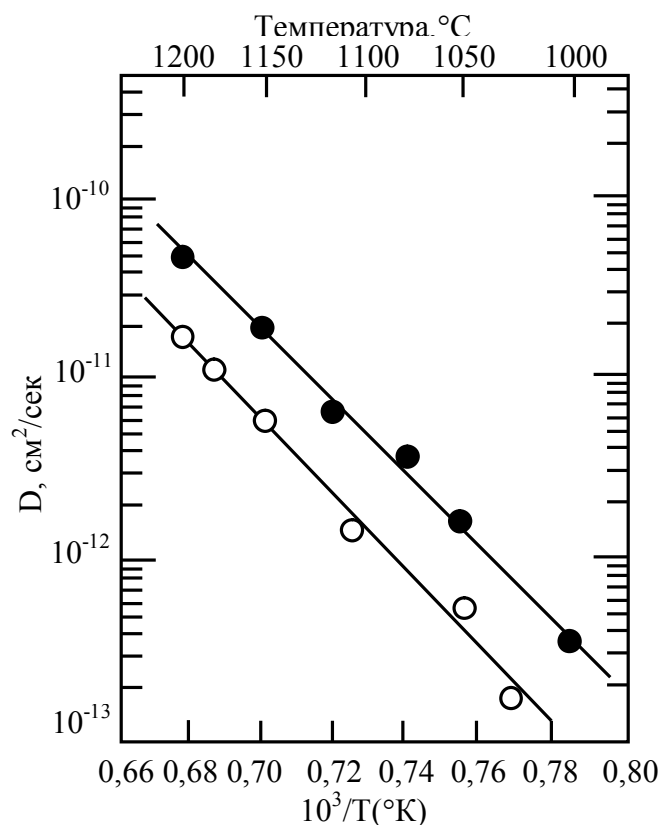


Рис. 2.1.5 Зависимость коэффициентов диффузии D серы и селена в арсениде галлия от температуры T . Константы в уравнении $D=D_0 e^{-E/kT}$ равны: для серы $E = 4,04$ эВ и $D_0 = 4 \cdot 10^3$ см²/сек и для селена $E = 4,16$ эВ и $D_0 = 3 \cdot 10^3$ см²/сек

$$D_s = 4 \cdot 10^3 \exp\left(-\frac{4,04}{kT}\right), \quad D_{se} = 3 \cdot 10^3 \exp\left(-\frac{4,16}{kT}\right)$$

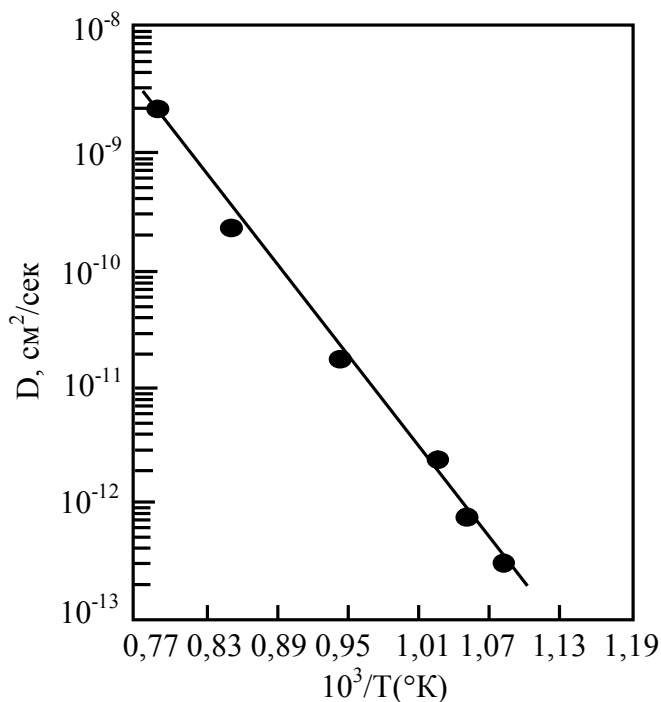


Рис. 2.1.6. Зависимость коэффициентов диффузии D кадмия в арсениде галлия от температуры T . Константы в уравнении $D=D_0 e^{-E/kT}$ равны: $E = 2,43$ эВ и $D_0 = 0,05$

$$\text{см}^2/\text{сек.} \quad D_{Cd} = 5 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{2,43}{kT}\right)$$

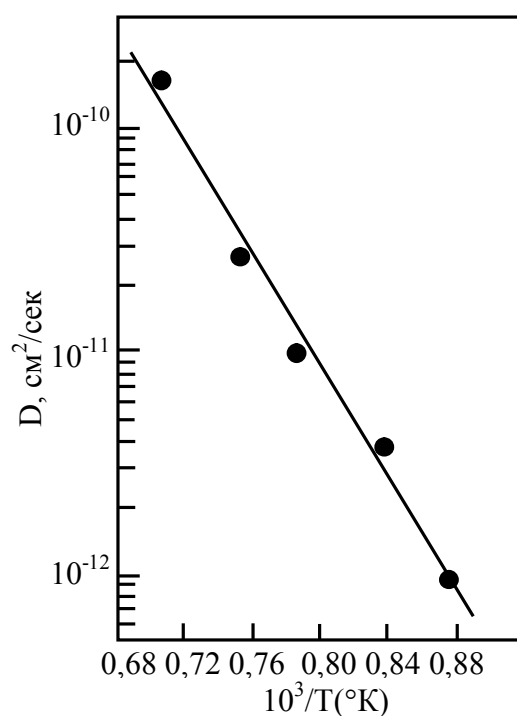


Рис. 2.1.7. Температурная зависимость коэффициента диффузии цинка в арсениде галлия при его диффузии из электролитически нанесенного слоя на поверхность арсенида галлия. Константы в уравнении $D=D_0 e^{-E/kT}$ равны: $E = 2,49$ эВ и $D_0 = 15 \text{ см}^2/\text{сек}$. $D_{\text{ям}} = 15 \exp\left(-\frac{2,49}{kT}\right)$

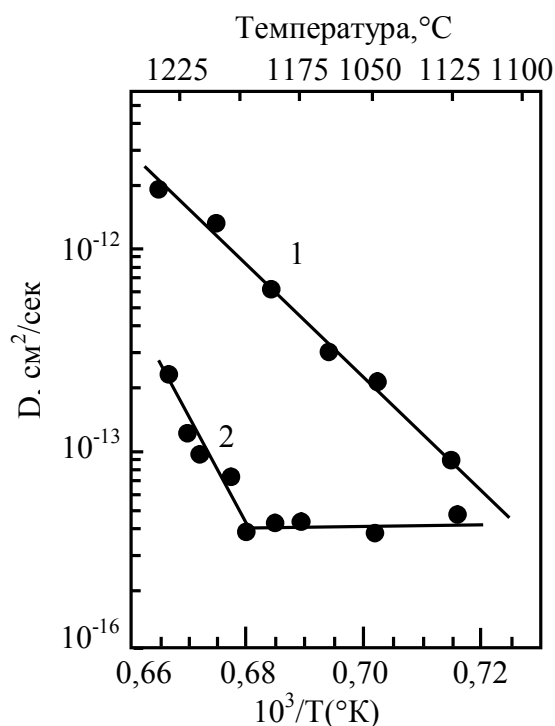


Рис. 2.1.8. Зависимость коэффициентов диффузии D галлия (1) и мышьяка в арсениде галлия от температуры T . Константы в уравнении $D=D_0 e^{-E/kT}$ равны: для галлия $E = 5,6$ эВ и $D_0 = 1 \cdot 10^7 \text{ см}^2/\text{сек}$ и для мышьяка $E = 10,2$ эВ и $D_0 = 4 \cdot 10^{21} \text{ см}^2/\text{сек}$. $D_{Ge} = 1 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{5,6}{kT}\right)$, $D_{As} = 4 \cdot 10^{21} \exp\left(-\frac{10,2}{kT}\right)$

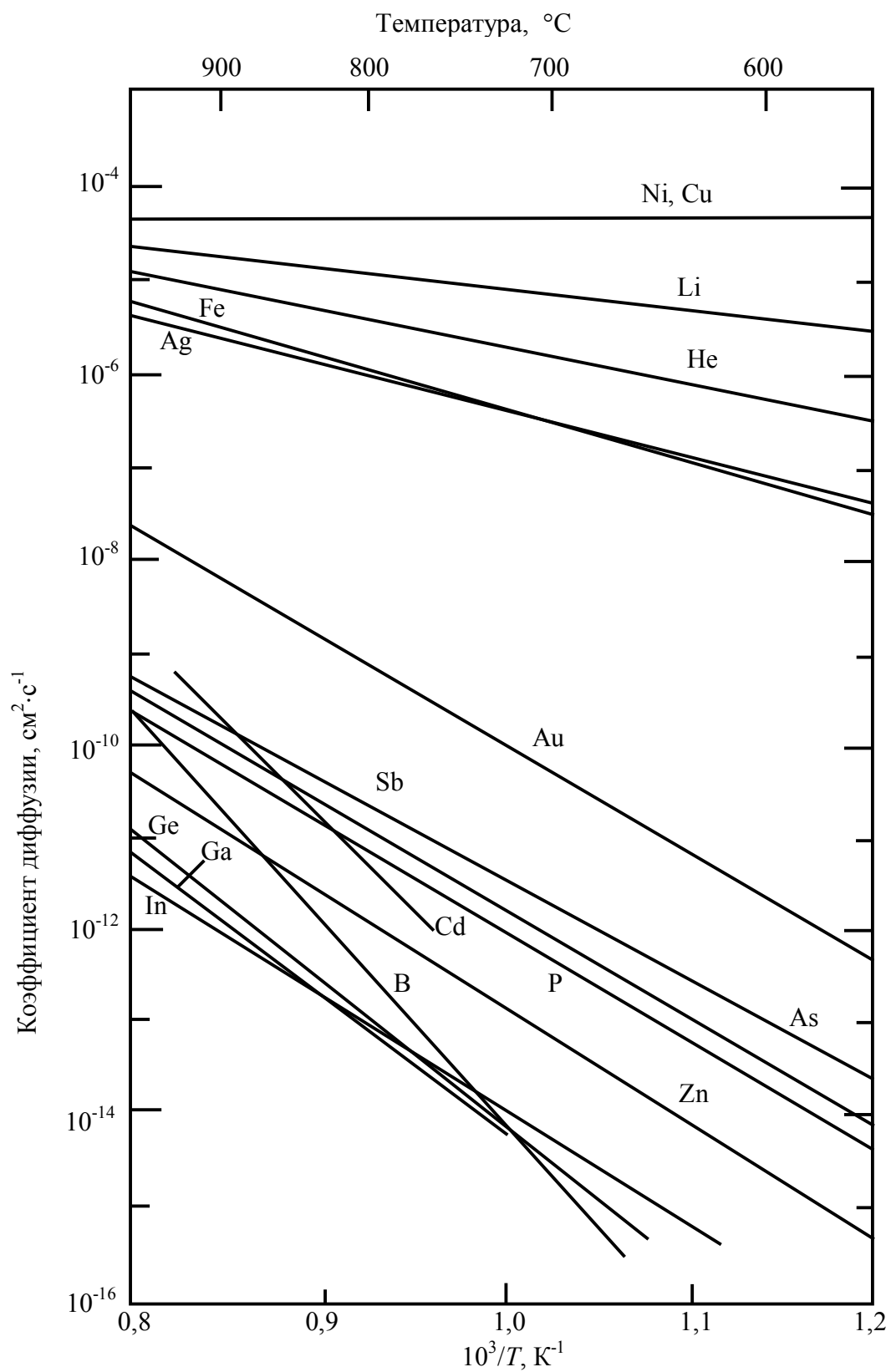


Рис. 2.1.9. Температурные зависимости коэффициентов диффузии примесей в германии.

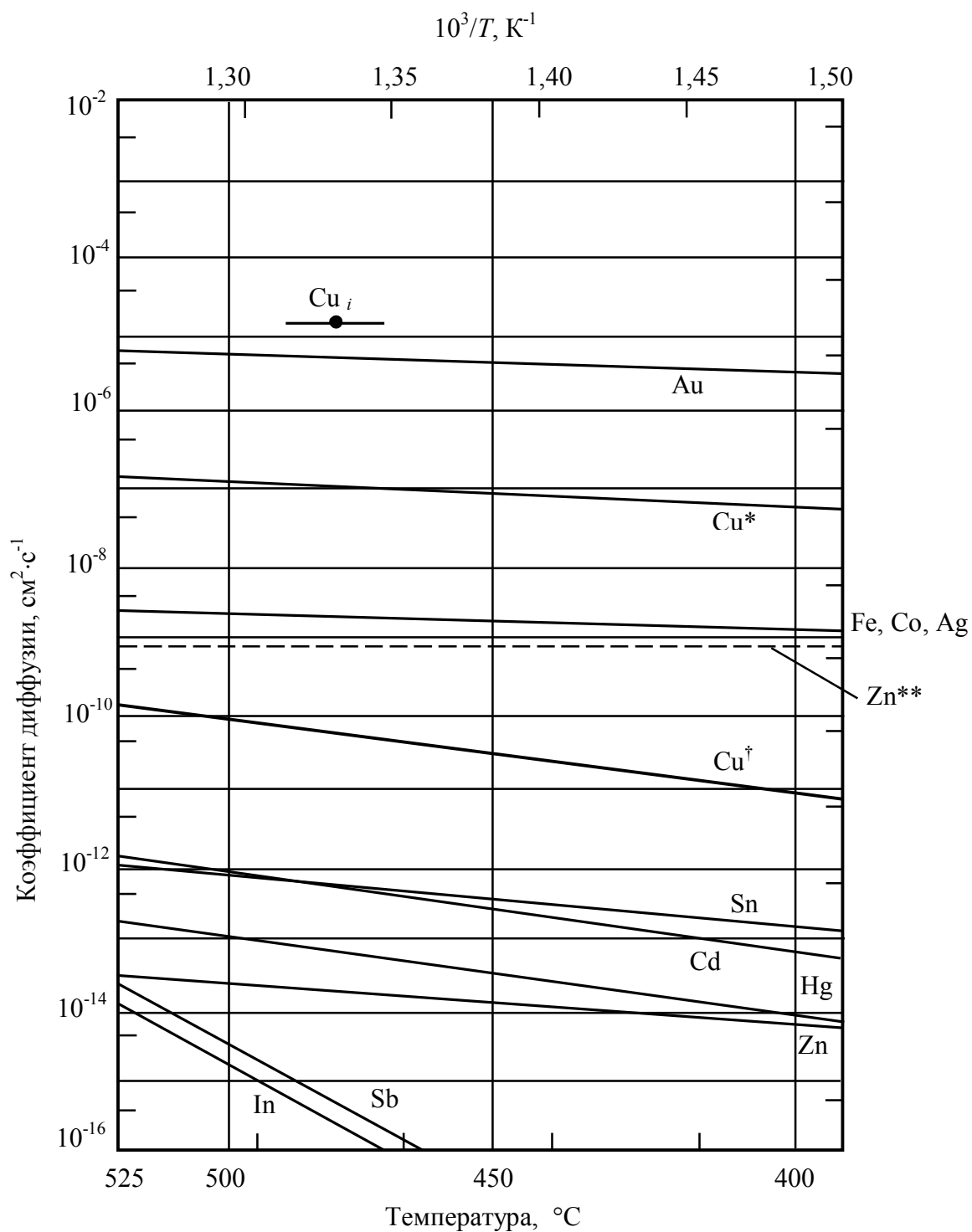


Рис. 2.1.10. Температурная зависимость коэффициентов диффузии примесей в InSb в области малых концентраций (за исключением случаев, отмеченных на фигуре).

** - при концентрации $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; $\dagger$ - материал не содержит дислокации; * - плотность дислокаций равна 10^4 см^{-3} .

§2.1.1 ДИФФУЗИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИМЕСЕЙ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

Под эпитаксией понимают ориентированный рост кристаллического слоя вещества на поверхности другого кристалла (подложки) с воспроизведением кристаллической ориентации подложки или с другой строго заданной ориентацией кристаллической решетки слоя относительно кристаллографической плоскости поверхности подложки. В последнее время очень широко исследуются многослойные пленочные структуры, полученные методом эпитаксии на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$. Так как на базе таких многослойных структур в настоящее время разрабатывается широкий класс функциональных приборов, лазеров, фотоэлементов и др.

Управление свойствами таких структур в основном определяется распределением концентрацией и диффузией примесных атомов. В связи с этим здесь приведены существующие экспериментальные данные коэффициентов диффузии и распределение примесей в пленочных структурах.

Таблица 2.1.1.1

Параметры диффузии примесей в эпитаксиальном и объемном кремнии

Материал	Примесь	T, C	D_0 , см ² /сек	Q, эВ
Эпислой, де- фекты упа- ковки	Sb ¹²⁴	950 – 1200	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,2
Эпислой	Sb ¹²⁴	1000 – 1200	10,5	3,47
Объемный кристалл	Sb ¹²⁴	1190 – 1398	12,9	3,98
	Sb	1050 – 1350	5,6	3,95
Эпислой, плотность дислокаций: $10^3 \div 10^4$ см ⁻² $(3 \div 6) \cdot 10^6$ см ⁻²	Sb ¹²⁴	1000 – 1250	7,9	3,97
	Sb ¹²⁴	1000 – 1250	4,7	3,75
Эпислой	P ³²	1130 – 1405	$7,4 \cdot 10^{-2}$	3,3
Эпислой	B	1130 – 1405	$2,1 \cdot 10^{-3}$	2,85
Эпислой	As	1167 – 1394	$6,6 \cdot 10^{-2}$	3,44
Эпислой	Sb	1190 – 1405	$2,1 \cdot 10^{-1}$	3,65
Эпислой	Bi	1190 – 1394	1,08	3,85
Объемный кристалл	P	1000 – 1350	10,5	3,69
	Al	1119 - 1390	1,385	3,41
	Ga	1143 - 1393	0,374	3,39
	In	1180 - 1398	0,785	3,63
	Tl	1244 - 1338	1,37	3,70

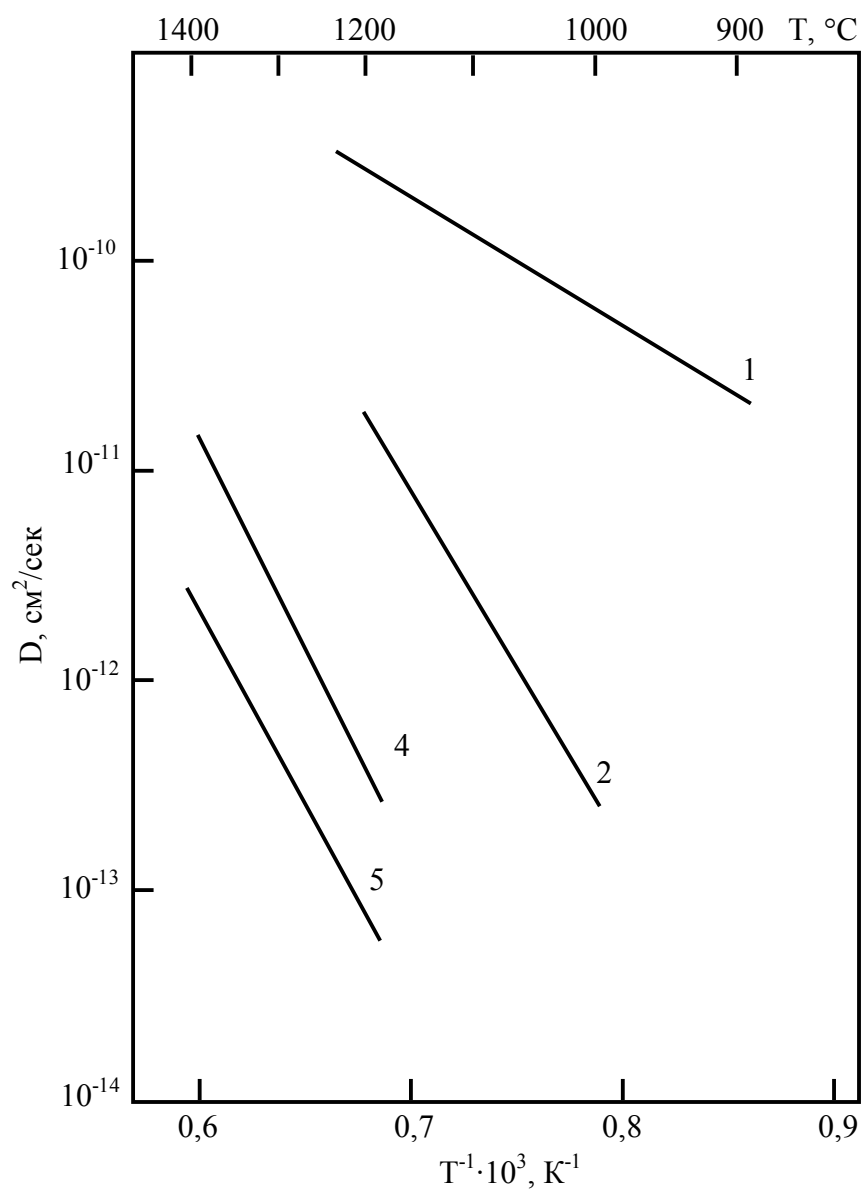


Рис. 2.1.1.1 Температурная зависимость коэффициента диффузии сурьмы в кремнии.

1 – диффузия по дефектам упаковки эпислой; 2 и 3 – в эпитаксиальном кремнии; 4- в объемном кристалле кремния

Таблица 2.1.1.2

Параметры диффузии примесей в соединениях $A^{III}B^V$ и их растворах ($D=D_0\exp(-Q/kT)$)

Материал	Примесь	T, °C	D_0 , см/сек	Q, эВ	Метод
GaAs (эпислой)	Zn^{65}	700÷1050	$2,9 \cdot 10^{-7}$	0,85	Меченые атомы
GaAs (подложка)			22	2,58	То же
GaAs (эпислой)	Cd	800÷1050	$4,5 \cdot 10^{-3}$	2,45	Профили распределения носителей тока
$Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ (эпислой)					
GaAs (подложка)	Zn^{65}	650÷950	9,0	2,4	Меченые атомы, метод Матано, $N=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
$In_{0,18}Ga_{0,82}As$ (эпислой)			2,0	2,2	
	$Zn(P_{As} - \text{равновесное})$	700÷950	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,15	p-n- переход
			$P_{As}=0,1 \text{ атм}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	То же
	$Zn(P_{As} - \text{равновесное})$	700÷950	$P_{As}=1,0 \text{ атм}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	>> >>
GaAs (подложка)			$4 \cdot 10^{-6}$	1,2	
InAs (подложка)	$Zn(P_{As} - \text{равновесное})$		$1 \cdot 10^{-3}$	1,1	>> >>
$In_{0,26}Ga_{0,74}As$ (эпислой)				2,77	
$In_{0,4}Ga_{0,6}As$ (эпислой)	Zn	629÷745		2,74	>> >>
InAs (объемный кристалл)				2,73	
GaAs (подложка)	Zn	775÷1050	$4,5 \cdot 10^{-3}$	3,10	>> >>
$GaAs_{0,67}P_{0,33}$ (эпислой)				1,04	
$Ga_{0,4}In_{0,6}P$ (эпислой)	Zn	500÷900	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,9	Меченые атомы, метод Матано, $N=2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$

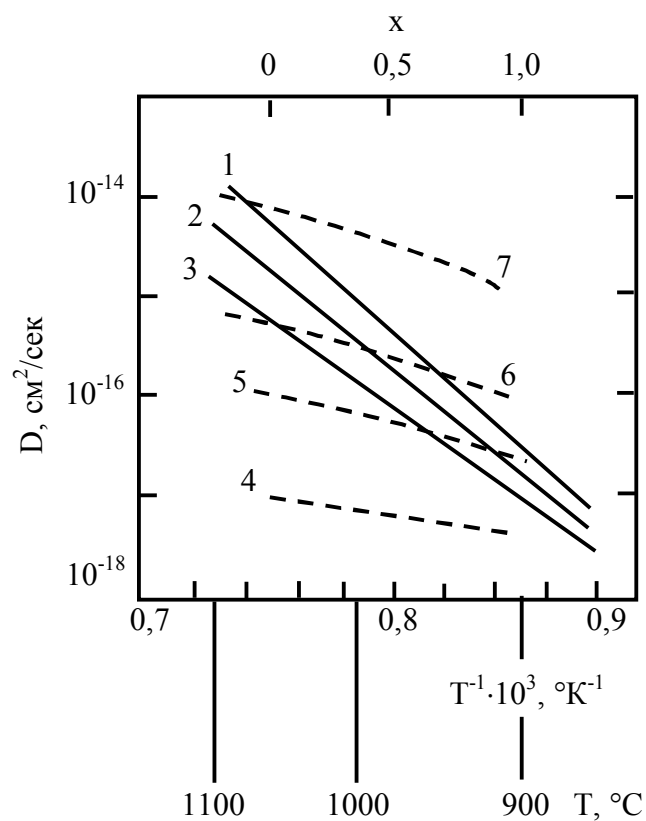


Рис.2.1.1.2. Зависимость коэффициентов взаимной диффузии D от температуры (1 – 3) и содержания алюминия в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (4 – 7).
 $x = 0; 0,5$ и $1,0$ для 1 – 3 соответственно. $T^\circ \text{C}$: 837, 937, 992 и 1088 для 4 – 7 соответственно.

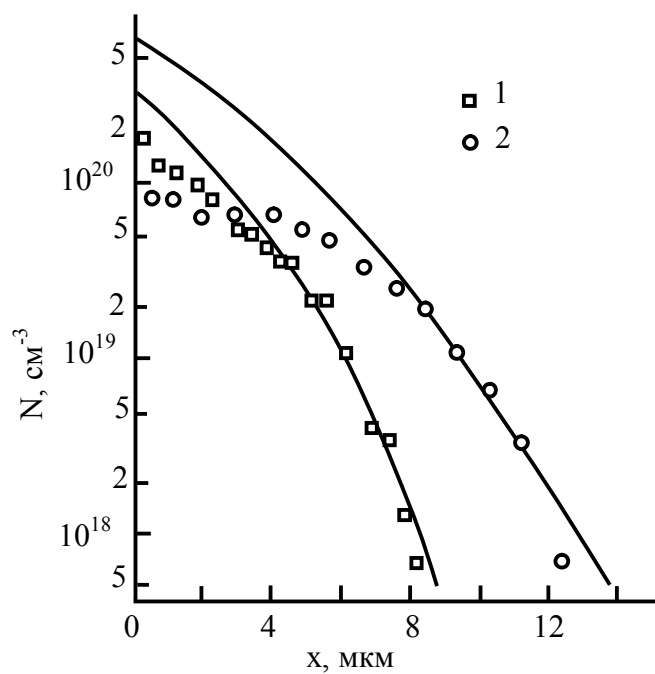


Рис. 2.1.1.3. Концентрационные профили цинка в эпислое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (1) и в подложке GaAs (2).
 $T = 800^\circ \text{C}$, $t = 20$ мин. Сплошные линии – $\text{erfc } Z$ – функция.

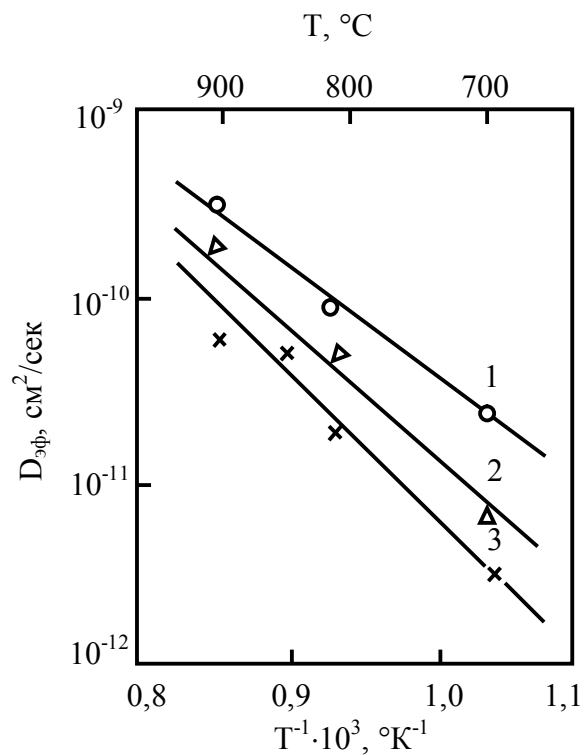


Рис. 2.1.1.4. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии $D_{эф}$ цинка в эпислоях $In_{0,18}Ga_{0,82}As$ при различных давлениях паров мышьяка.

1 – равновесное давление, 2 – $p=0,1$ атм, 3 – $p=1$ атм.

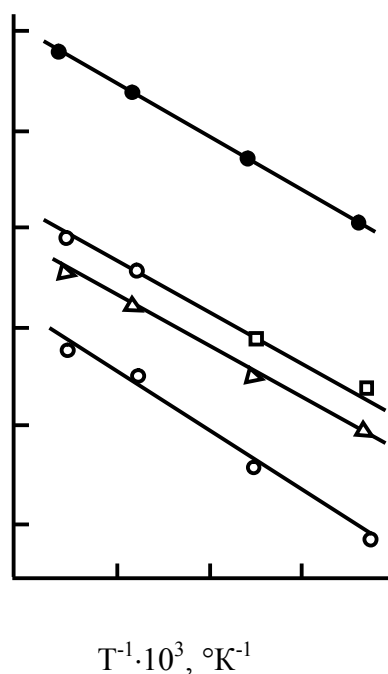


Рис. 2.1.1.5. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии $D_{эф}$ цинка в эпислоях $In_xGa_{1-x}As$.

1, 2, 3 и 4 соответствуют $x=0$; 0,26; 0,4; 1,0

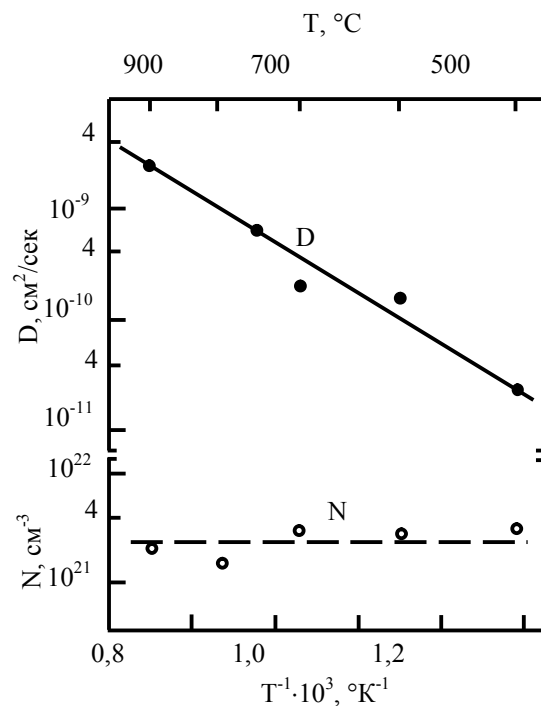


Рис. 2.1.1.6. Температурная зависимость коэффициента диффузии D и растворимости цинка N в эпислоях $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ ($x=0,4 \div 0,5$).

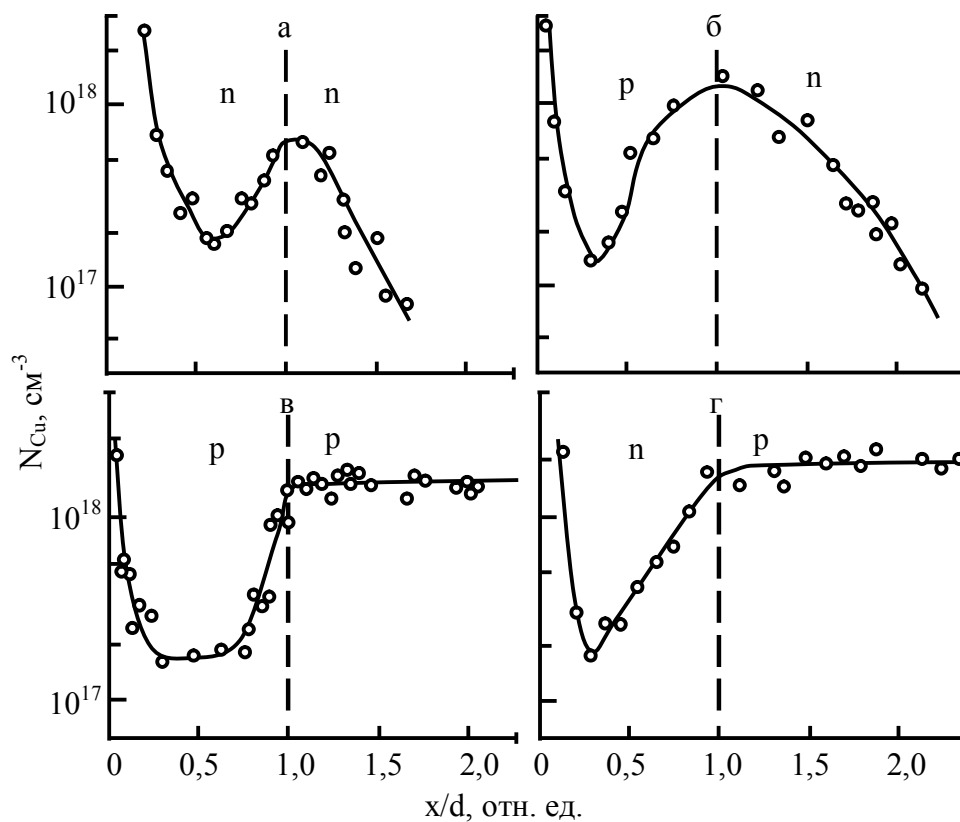


Рис. 2.1.1.7. Концентрационные профили меди в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ – гетероструктурах.

$T=950^\circ \text{C}$, $t=70$ сек., d – толщина; а – n – n, $d=32$ мкм; б – p – n, $d=50$ мкм.; в – p – p, $d=109$ мкм; г – n – p, $d=32$ мкм.

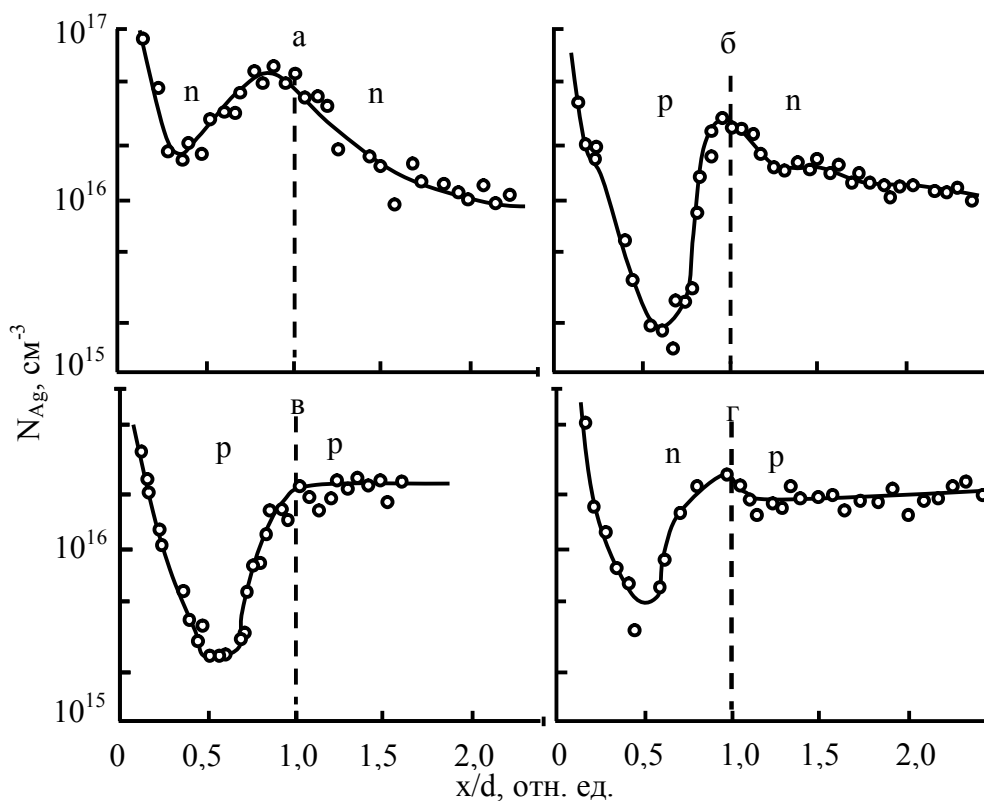


Рис. 2.1.1.8. Концентрационные профили серебра в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – GaAs – гетероструктурах.

а – $d=33$ мкм, 960°C , 70 сек.; б – 48 мкм, 960°C , 40 сек.; в – 48 мкм, 960°C , 40 сек.; г – 34 мкм, 960°C , 45 сек.;

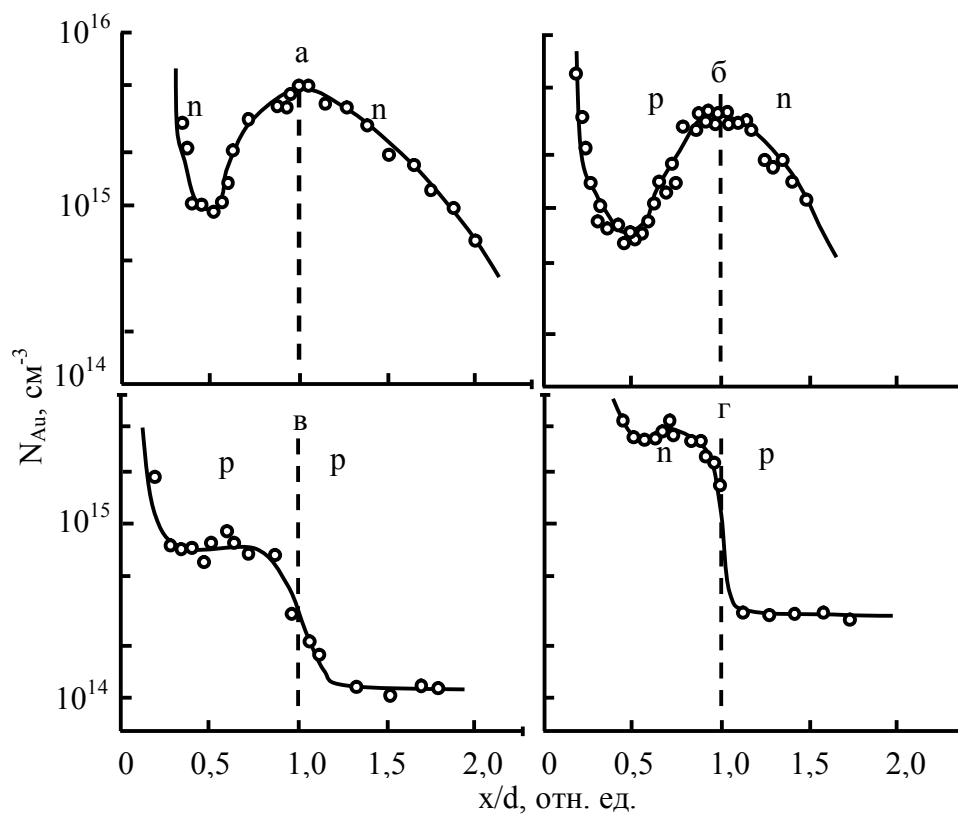


Рис. 2.1.1.9. Концентрационные профили золота в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – GaAs – гетероструктурах.

а – $d=33$ мкм, 960°C , 2 мин.; б – 62 мкм, 900°C , 1 мин.; в – 46 мкм, 900°C , 1 мин.; г – 33 мкм, 900°C , 6 мин.;

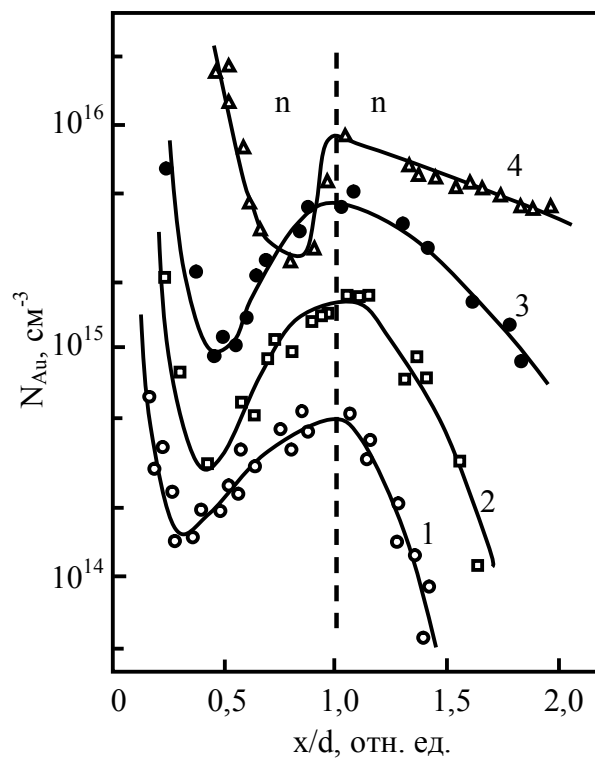


Рис. 2.1.1.10. Концентрационные профили золота в $n\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-n\text{GaAs}$ – гетероструктурах при различных температурах.
 1 – $T=800^\circ\text{C}$, $t=10$ мин., $d=55\text{мкм}$; 2 – 850°C , 9 мин., 43 мкм; 3 – 900°C , 2 мин., 33 мкм; 4 – 1000°C , 40 сек., 42 мкм;

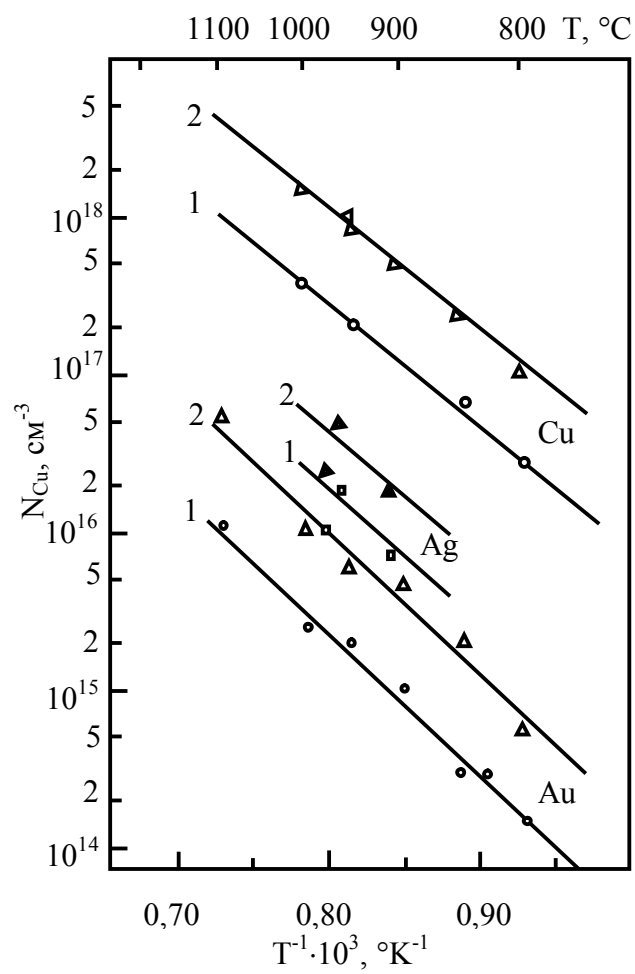


Рис. 2.1.1.11. Температурная зависимость концентрации меди (Cu), серебра (Ag) и золота (Au) в (AlGa)As – GaAs –структурах.

1 – концентрация в центре эпислоя (в минимуме), 2 – концентрация на гетерогранице (в максимуме).

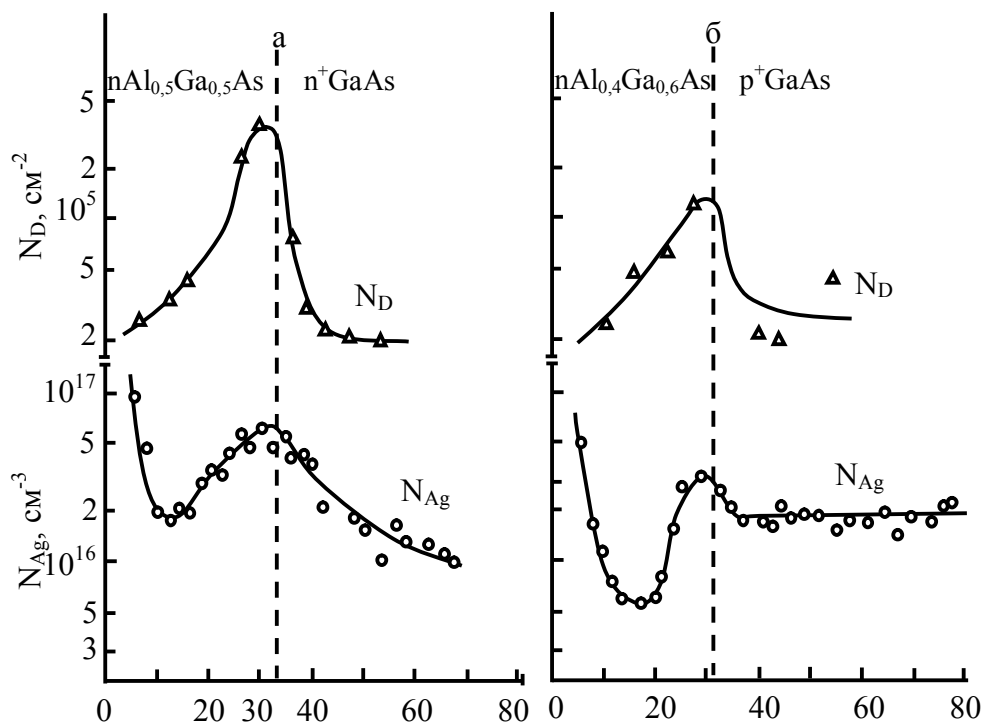


Рис. 2.1.1.12. Распределение концентрации серебра N_{Ag} и плотности дислокаций N_D в $Al_xGa_{1-x}As - GaAs$ – гетероструктуре.

а: n – n, $T=960^\circ C$, $t=70$ сек.; б: n – p, $T=970^\circ C$, $t=45$ сек.

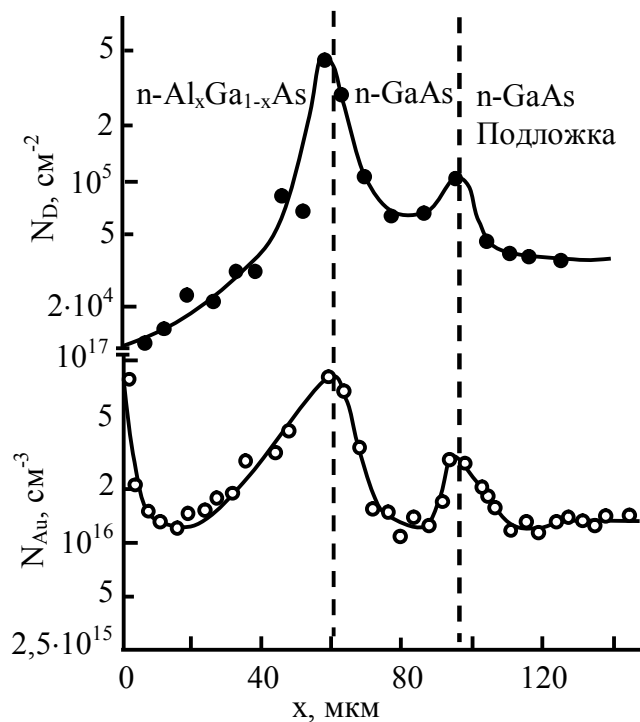


Рис. 2.1.1.13. Распределение концентрации цинка N_{Au} и плотности дислокаций N_D в $nAl_xGa_{1-x}As - nGaAs - nGaAs$ – гетероструктуре.

$T=1100^\circ C$, $t=50$ мин.

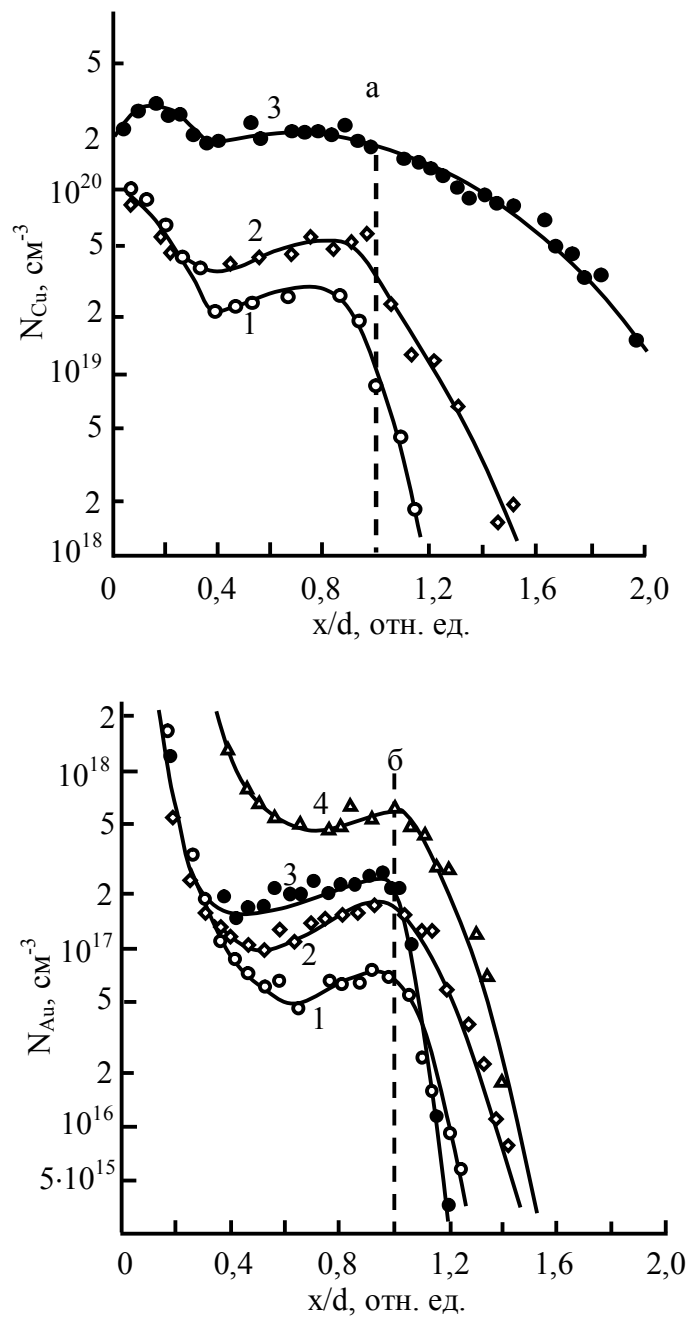


Рис. 2.1.1.14. Концентрационные профили меди (а) и золота (б) в (GaIn)P – GaAs – гетероструктурах.

а: 1 – 600°C , 10 мин., $d=30$ мкм; 2 – 700°C , 10 мин., 34 мкм; 3 – 800°C , 10 мин., 38 мкм.

б: 1 – 500°C , 60 мин., 35 мкм; 2 – 600°C , 50 мин., 35 мкм; 3 – 700°C , 23 мин., 40 мкм, 4 – 800°C , 10 мин., 40 мкм.

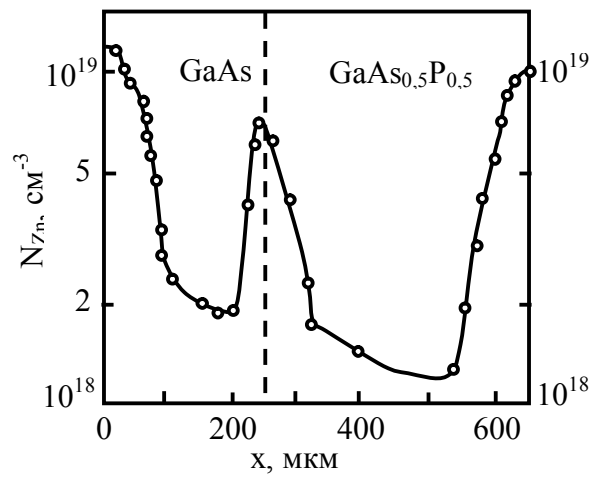


Рис. 2.1.1.15. Распределение концентрации цинка N_{Zn} в $GaAs_{0.5}P_{0.5} - GaAs$ – гетероструктуре.
 $T=975\text{ }^{\circ}C$, $t=35$ мин.

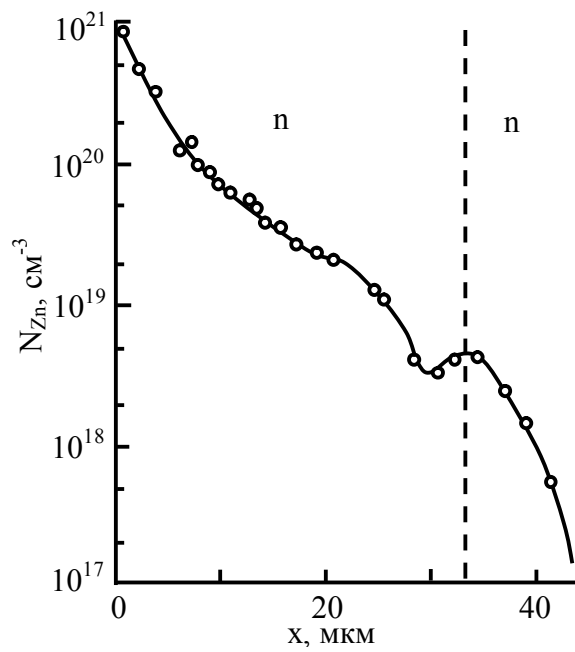


Рис. 2.1.1.16. Распределение концентрации цинка N_{Zn} в $Al_xGa_{1-x}As - GaAs$ – гетероструктуре.
 $T=800\text{ }^{\circ}C$, $t=30$ мин.

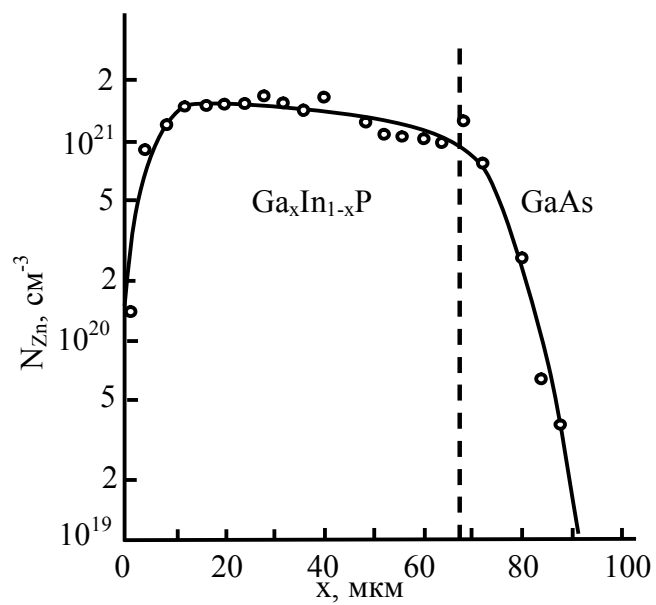


Рис. 2.1.1.17. Концентрационное распределение цинка в $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ – GaAs гетероструктуре.
 $T=800^\circ \text{C}$, $t=30$ мин.

§2.2 РАСТВОРИМОСТЬ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Понятие растворимости примесей непосредственно связано с диффузионным процессом в твердых телах. При легировании полупроводников в процессе выращивания ионной имплантации можно ввести количество примесных атомов сколько угодно много, при этом понятие растворимости не имеет места. В данном случае основная часть примесных атомов в решетке находится в виде скоплений, примесных преципитатов или выделяется в виде второй фазы. Такое поведение примесных атомов существенно искажает кристаллическую решетку и меняет свойства кристаллов.

Растворимость – это максимальная концентрация примесных атомов, которые можно ввести в решетку с помощью диффузии при данной температуре. Примесные атомы в кристаллической решетке могут находиться в узлах или в междуузлиях. Если примесный атом находится в узле кристаллической решетки, то он заменяет основной атом элементарного полупроводника. В полупроводниковых соединениях такие примеси называются примесями, образующими твердый раствор замещения. При этом примесный атом обязательно будет участвовать в химической связи. Если примесные атомы находятся в междуузельном состоянии, они образуют твердые растворы внедрения. При этом примесный атом не будет участвовать в химической связи с соседним основным атомом. Однако он может образовывать различные комплексы с другими дефектами решетки.

Температурная зависимость растворимости примесей в полупроводниках в основном описывается соотношением (8). Однако растворимость некоторых примесей в полупроводниках с изменением температуры носит ретроградный характер, т.е. значение растворимости с начала роста температуры увеличивается и при $T=T_m$ достигает своего максимального значения, затем при $T>T_m$ уменьшается. Наиболее типичный ретроградный характер растворимости имеет растворимость меди в германии. Максимальное значение растворимости меди имеет место при $T=875^\circ\text{C}$ и оно составляет значение $N_{\text{Cu}}=4\cdot 10^{16}\text{ ат/см}^3$. Для не-

которых примесей наблюдается явно ретроградный характер растворимости.

Растворимость примесных атомов в полупроводниках очень тесно связана с коэффициентом сегрегации примесных атомов. Коэффициент сегрегации (K) определяется соотношением концентрации примесей в твердой и жидкой фазах при равновесии между фазами

$$K = \frac{N_{тв}}{N_{ж}} \quad (9)$$

значение K зависит от природы примесных атомов. Обычно чем больше коэффициент сегрегации, тем больше значение растворимости примесей в твердых телах. Величина растворимости зависит от температуры диффузии и определяется выражением:

$$N = N_s \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (8)$$

где E – энергия растворения, N_s – растворимость примесей при $T = \infty$. Согласно (8), меняя температуру диффузии можно управлять растворимостью примесей или концентрацией примесных атомов, введенных с помощью диффузии в кристаллическую решетку. Меняя концентрацию примесных атомов в решетке, можно в широком интервале управлять удельным сопротивлением, т.е. получать материал с заданными параметрами.

Существует тесная взаимосвязь между коэффициентом диффузии и растворимостью примесей в полупроводниках. Чем меньше коэффициент диффузии, тем больше растворимость примесей. Чем больше D , тем меньше растворимость.

В данном параграфе нами приведены растворимости всех исследованных примесных атомов в различных полупроводниках, как в виде таблиц, так и в виде графиков эмпирических соотношений, установленных экспериментальными методами. Читатель сможет определить растворимость любых примесей в полупроводниках, зная их E и N_s , которые приведены для многих примесных атомов.

При диффузии из постоянного источника поверхностная концентрация примеси является постоянной величиной. На графике концентрационного рас-

предела легирования легирующей примеси при $x=0$ $N(0, T)$ является значением растворимости примеси при данной температуре. Положение точки $N(0, T)$ на графике (максимальное значение растворимости при данной температуре) не зависит от времени диффузии примеси.

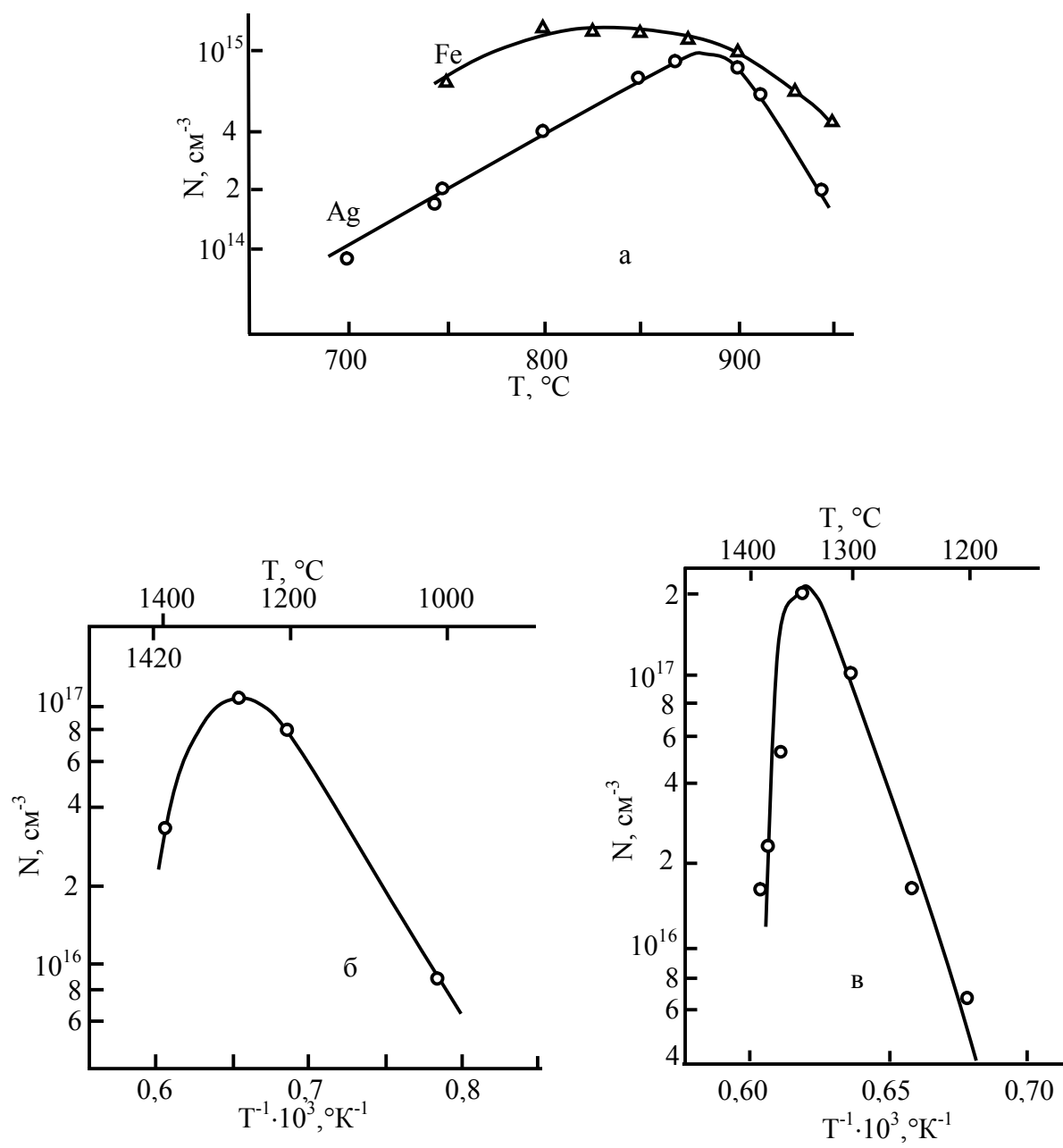


Рис. 2.2.1. а – растворимость железа и серебра в германии;
 б – растворимость золота в кремнии;
 в – растворимость серебра в кремнии

Таблица 2.2.1

Растворимость и коэффициент распределения примесей в германии

Примесь	Максимальная раство- римость, ат/см ⁻³	Коэффициент сегрегации, %	Максимальная температура, °С
Cu	$4 \cdot 10^{16}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	875
Fe	10^{15}	$3,5 \cdot 10^{-5}$	850
Ag	$7 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-6}$	870
Ni	$5 \cdot 10^{15}$	$3 \cdot 10^{-6}$	875
Au	10^{15}	$1,5 \cdot 10^{-5}$	Максимальное значение
Pt	10^{14}	10^{-6}	
Li	$2,5 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-3}$	800
Zn	$5 \cdot 10^{18}$		
Sb	10^{19}		
As	10^{20}	10^{-2}	
In	$5 \cdot 10^{20}$	10^{-3}	
Ga	$5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{-2}$	
Sn	$5 \cdot 10^{20}$	10^{-2}	
Al	10^{21}		

Таблица 2.2.2

Растворимость и коэффициент распределения примесей в кремнии

Примесь	Максимальная растворимость, ат/см ⁻³	Коэффициент сегрегации, %	Максимальная температура, °С
Cu	$3 \cdot 10^{18}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1300
Ag	$2 \cdot 10^{17}$		1350
Au	$1 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{-5}$	1250
Li	$4 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	1200
B	10^{20}	0,9	1200
Al	$1,7 \cdot 10^{20}$	10^{-1}	1200
In	10^{19}	$5 \cdot 10^{-4}$	1200
P	$2 \cdot 10^{20}$	0,35	1200
As	10^{20}	0,3	1200
Sb	10^{20}	0,4	1200
Zn	10^{17}	$4 \cdot 10^{-4}$	1250
Mg	10^{16}		1250
Cd	10^{16}		1250
Hg	10^{16}		1270
Sc	10^{16}		1250
V	10^{16}		1250
Sn	10^{21}		1350
Ge	10^{22}		1430
Cr	10^{16}		1200
Fe	$5 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{-6}$	1250
Co	$2 \cdot 10^{16}$		1250
Ni	$7 \cdot 10^{17}$		1250
Mn	$2 \cdot 10^{16}$		1250
Re	10^{16}		1250
Ru	10^{17}		1260
Os	10^{16}		1300
Rn	10^{16}		1250
Ir	$5 \cdot 10^{16}$		1250
Pd	$4 \cdot 10^{16}$		1250
Pt	10^{16}		1250
Sm	10^{18}		1300
Gd	10^{18}		1300
Ho	10^{17}		1300
O	$1,7 \cdot 10^{18}$		1250
S	$5 \cdot 10^{16}$		1250
Se	10^{17}		1250
Te	$5 \cdot 10^{17}$		1250
Mo	10^{15}		1200
W	10^{15}		1200

Таблица 2.2.3

**Температурная зависимость растворимости некоторых
примесей в кремнии**

$N_{Mn} = 2,5 \cdot 10^{22} \exp(-2,4 / kT)$
$N_{Fe} = 3,6 \cdot 10^{26} \exp(-3 / kT)$
$N_{Co} = 1,8 \cdot 10^{21} \exp(-1,65 / kT)$
$N_{Ni} = 1,4 \cdot 10^{25} \exp(-2,3 / kT)$
$N_{Zn} = 4 \cdot 10^{21} \exp(-1,6 / kT)$
$N_S = 1,5 \cdot 10^{27} \exp(-1,65 / kT)$
$N_{Se} = 10^{25} \exp(-2,1 / kT)$

Таблица 2.2.4

Растворимость и коэффициент распределения примесей в GaAs

Примесь	Максимальная раство- римость, ат/см ⁻³	Коэффициент сегрегации, %
Cu	$3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Ag	$8 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Au	$2,6 \cdot 10^{18}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Ca		$2 \cdot 10^{-3}$
Mg	$5 \cdot 10^{18}$	0,1
Zn	10^{20}	0,4
In		$7 \cdot 10^{-3}$
Al		0,2
Be		3
C	$2 \cdot 10^{17}$	
Ge		$\cdot 10^{-2}$
Si	10^{19}	0,14
Sn		$8 \cdot 10^{-3}$
Pb		$1 \cdot 10^{-5}$
P		3
Sb		$1,6 \cdot 10^{-2}$
S	10^{20}	0,3
Se	10^{19}	0,3
Te		$5,9 \cdot 10^{-2}$
Cr	$2 \cdot 10^{17}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$
Mn	$> 10^{17}$	$2 \cdot 10^{-2}$
Fe	$> 10^{17}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Co	$> 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Ni	$> 10^{17}$	$5 \cdot 10^{-5}$

**Максимальная растворимость и коэффициент
распределения примесей в InAs**

Элемент	Растворимость примесей, см ⁻³	Коэффициент распределения примесей
Cu	$4 \cdot 10^{17}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$
Ag	$3 \cdot 10^{17}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$
Au	$2 \cdot 10^{17}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Mg	$5,2 \cdot 10^{18}$	0,7
Zn	$3 \cdot 10^{19}$	0,72
Cd	$1 \cdot 10^{19}$	0,13
Si	$5 \cdot 10^{19}$	0,4
Ge	$1 \cdot 10^{19}$	0,07
Sn	$1 \cdot 10^{19}$	0,19
S	$8 \cdot 10^{19}$	1
Se	$7 \cdot 10^{19}$	0,93
Te	$2 \cdot 10^{19}$	0,44

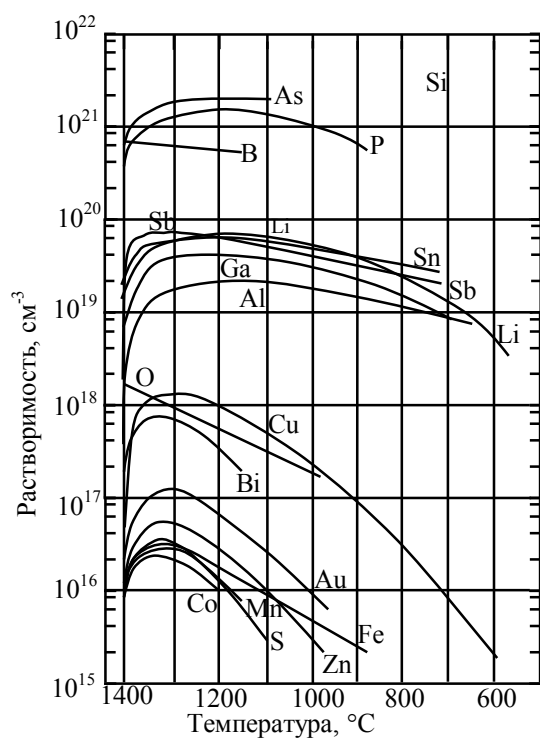


Рис.2.2.2. Температурная зависимость растворимости некоторых примесей в кремнии .

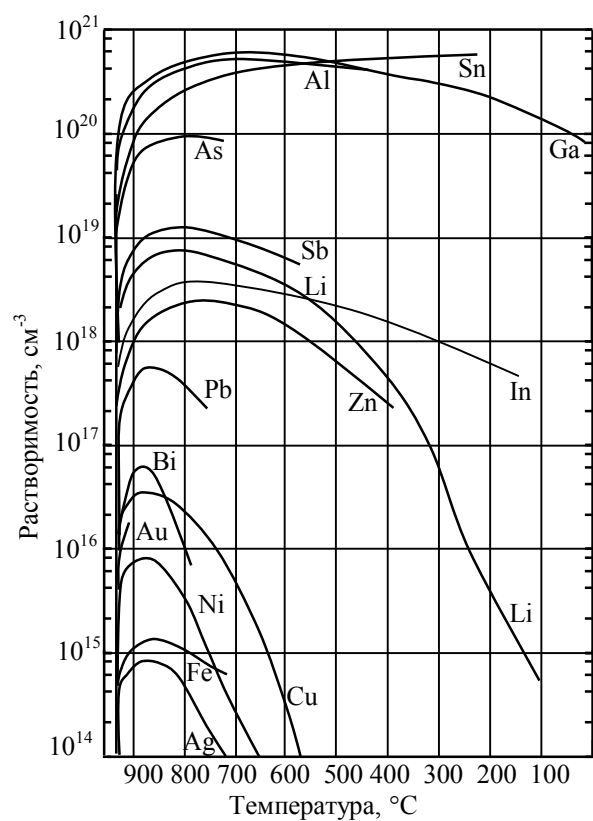


Рис. 2.2.3. Температурные зависимости растворимости различных примесей в германии.

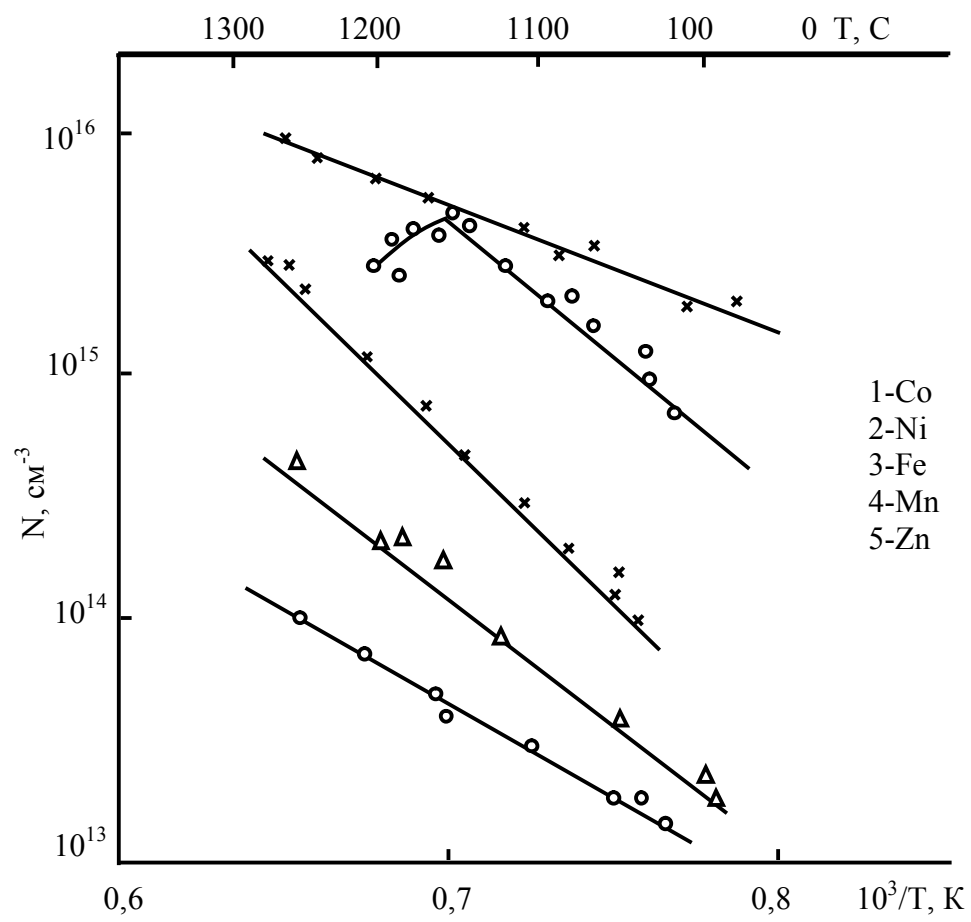


Рис. 2.2.4. Температурная зависимость электроактивных атомов примесей

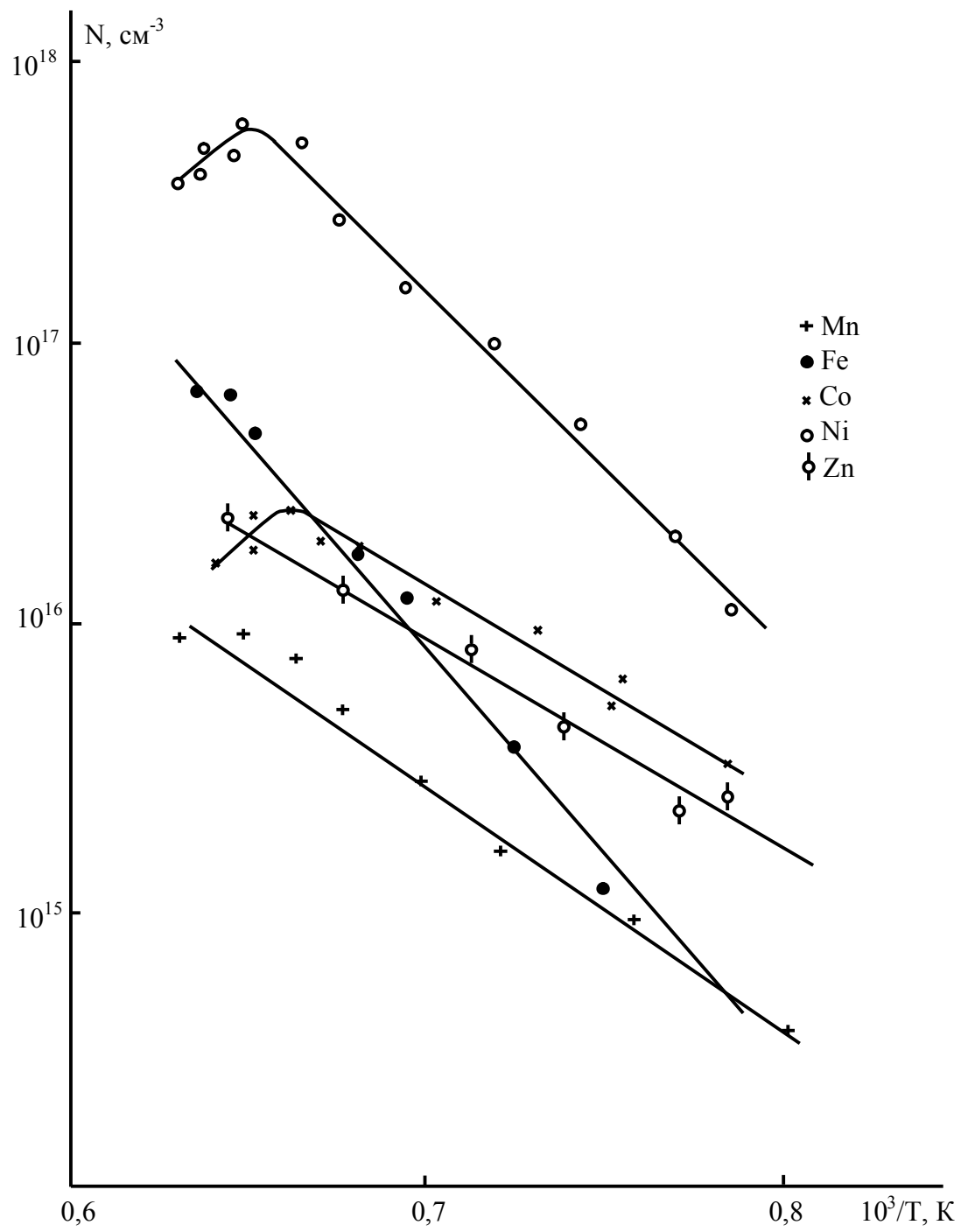


Рис. 2.2.5. Температурная зависимость растворимости примесей в кремнии.

§2.3 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Примесный атом, введенный в решетку, может быть электроактивным или неактивным (нейтральным). Электроактивными атомами являются те атомы, которые непосредственно поставляют электроны в зону проводимости и дырки в валентную зону (при тепловой или оптической генерации), или захватывают электроны из зоны проводимости и дырки из валентной зоны, т.е. при введении таких примесных атомов существенно меняется концентрация электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне, проводимость материала существенно меняется в зависимости от концентрации введенных примесных атомов. Электроактивность примесных атомов проявляется в основном у тех атомов, у которых число валентных электронов отличается от числа валентных электронов основного атома решетки. Электронеактивными примесными атомами являются примесные атомы, у которых число валентных электронов совпадает с числом валентных электронов основного атома решетки. Типичными примесями нейтральных атомов в кремнии являются Ge, C, Sn; в GaAs - Zn, Al; в CdS –Zn и т.д.

Электроактивные примесные атомы могут быть донорами – когда эти атомы поставляют электроны в зону проводимости или захватывают дырки из валентной зоны, или акцепторами - когда эти примесные атомы поставляют дырки в валентную зону, или захватывают электроны из валентной зоны.

Необходимая энергия для перехода электрона в зону проводимости или дырки в валентную зону называется энергией ионизации примесных атомов. Она определяют донорные или акцепторные уровни в запрещенной зоне полупроводника в соответствии с энергией ионизации.

В реальных условиях не все примесные атомы будут электроактивными, всегда определенная их часть остается электронеutralной. Некоторые примесные атомы в кристаллической решетке могут находиться в различных состояниях – в узлах, в межузлиях, простых или сложных комплексах. Поэтому, в зависимости от положения примесных атомов в решетке, они могут соз-

давать как донорные, так и акцепторные уровни. Такие примеси называются амфотерными.

В зависимости от энергии ионизации донорных или акцепторных примесных атомов, примесные энергетические уровни делятся на мелкие и глубокие. Когда мы говорим мелкие примесные энергетические уровни то мы имеем в виду, что их энергия ионизации ΔE существенно меньше чем ширина запрещенной зоны. Поэтому не только при комнатной, но и при более низких температурах эти уровни будут полностью ионизованы. Концентрация электронов в зоне проводимости будет равна $n = N_d^+$ (где N_d^+ - концентрация ионизованных донорных примесных атомов) и концентрация дырок в валентной зоне будет $p = N_a^-$ (где N_a^- - концентрация ионизованных акцепторных примесных атомов).

У глубоких энергетических уровней значение энергии ионизации ΔE имеет такой же порядок как $\frac{E_g}{2}$.

Введение примесных атомов, создающих глубокие энергетические уровни в решетке не увеличивает, а наоборот, уменьшает концентрацию носителей тока. Поэтому такие примесные атомы называются компенсирующими примесными атомами. Далее приведены более менее достоверные данные по энергетическим спектрам примесных атомов в полупроводниковых материалах, определенных фотоэлектрическими, фотоемкостными и гальваномагнитными методами независимо друг от друга.

Концентрация электроактивных примесных атомов определяется всегда решением уравнения нейтральности на основе экспериментальных результатов, полученных из температурной зависимости эффекта Холла или фотопроводимости.

Таблица 2.3.1

Примеси, создающие мелкие энергетические уровни в Ge и в Si

Акцепторные примеси					
Материал	Энергия ионизации примесных уровней, эВ				
	B	Al	Ga	In	Ti
Ge	$E_v + 0.0104$	$E_v + 0.0102$	$E_v + 0.0108$	$E_v + 0.012$	$E_v + 0.010$
Si	$E_v + 0.044$	$E_v + 0.069$	$E_v + 0.079$	$E_v + 0.155$	$E_v + 0.26$
Донорные примеси					
Материал	Энергия ионизации примесных уровней, эВ				
	P	As	Sb	Li	
Ge	$E_c - 0.012$	$E_c - 0.0127$	$E_c - 0.069$	$E_c - 0.0066$	$E_c - 0.0093$
Si	$E_c - 0.044$	$E_c - 0.049$	$E_c - 0.069$	$E_c - 0.039$	$E_c - 0.033$

Примесные уровни в кремнии

Элемент Element	Название Name	Уровень Level	Энергия ионизации Ionization energy
Li	Литий Lithium	Donor	$E_c - 0.033$
Sb	Сурьма Stibium	Donor	$E_c - 0.039$
P	Фосфор Phosphorus	Donor	$E_c - 0.045$
As	Мышьяк Arsenic	Donor	$E_c - 0.054$
Bi	Висмут Bismut	Donor	$E_c - 0.069$
Te	Теллур Telluriu	Donor	$E_c - 0.14$
Ti	Титан Titanium	Donor	$E_c - 0.21$
C	Углерод Carbon	Donor	$E_c - 0.25$
Mg	Магний Magnesium	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.11$ $E_v + 0.25$
Se	Селен Selenium	Donor Donor	$E_c - 0.25$ $E_c - 0.4$
Cr	Хром Chromium	Donor	$E_c - 0.41$
Ta	Тантал Tantalum	Donor Donor	$E_c - 0.14$ $E_c - 0.43$
Cs	Цезий Caesium	Donor Acceptor	$E_c - 0.3$ $E_v + 0.5$
Ba	Барий Barium	Donor Acceptor	$E_c - 0.32$ $E_v + 0.5$
S	Сера Sulphur	Donor Donor	$E_c - 0.26$ $E_c - 0.48$
Mn	Марганец Manganese	Donor Donor Acceptor	$E_c - 0.43$ $E_c - 0.53$ $E_v + 0.45$
Ag	Серебро Silver	Acceptor Donor	$E_v + 0.36$ $E_c - 0.33$
Cd	Кадмий Cadmium	Acceptor Acceptor Acceptor Acceptor	$E_v + 0.2$ $E_v + 0.45$ $E_v + 0.55$ $E_v + 0.3$

Pt	Платина Platinum	Acceptor Acceptor Donor	$E_v + 0.25$ $E_v + 0.36$ $E_c - 0.3$
Si	Кремний Silicon	Acceptor Donor Donor	$E_v + 0.34$ $E_c - 0.49$ $E_c - 0.19$
B	Бор Boron	Acceptor	$E_v + 0.045$
Al	Алюминий Aluminum	Acceptor	$E_v + 0.067$
Ga	Галлий Gallium	Acceptor	$E_v + 0.072$
In	Индий India	Acceptor	$E_v + 0.16$
Tl	Таллий Thallium	Acceptor	$E_v + 0.3$
Pd	Палладий Palladium	Acceptor	$E_v + 0.34$
Na	Натрий Sodium	Donor	$E_c - 0.35$
Be	Бериллий Beryllium	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.42$ $E_v + 0.17$
Zn	Цинк Zinc	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.55$ $E_v + 0.26$
Au	Золото Gold	Acceptor Acceptor Donor	$E_v + 0.54$ $E_v + 0.49$ $E_c - 0.29$
Co	Кобальт Cobalt	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.53$ $E_v + 0.35$
V	Ванадий Vanadium	Donor Acceptor	$E_c - 0.49$ $E_v + 0.4$
Ni	Никель Nickel	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.35$ $E_v + 0.23$
Mo	Молибден Molybdenum	Donor Donor Donor	$E_c - 0.33$ $E_c - 0.34$ $E_c - 0.3$
Hg	Ртуть Quicksilver	Acceptor Acceptor Donor Donor	$E_v + 0.31$ $E_v + 0.36$ $E_c - 0.33$ $E_c - 0.25$
Sr	Стронций Strontium	Donor Donor	$E_c - 0.28$ $E_c - 0.5$

Продолжение таблицы 2.3.2

Ge	Германий Germanium	Donor Donor	$E_c - 0.27$ $E_c - 0.5$
Cu	Медь Copper	Acceptor Acceptor Acceptor	$E_v + 0.53$ $E_v + 0.4$ $E_v + 0.24$
K	Калий Tungsten	Donor Donor	$E_c - 0.26$ $E_c - 0.35$
Sn	Олово Grey tin	Donor Acceptor	$E_c - 0.25$ $E_v + 0.27$
W	Вольфрам Potassium	Donor Donor Donor Donor Donor	$E_c - 0.22$ $E_c - 0.3$ $E_c - 0.37$ $E_c - 0.34$ $E_c - 0.31$
Pb	Свинец Lead	Donor Acceptor	$E_c - 0.17$ $E_v + 0.37$
O	Кислород Oxygen	Donor Acceptor Acceptor	$E_c - 0.16$ $E_v + 0.38$ $E_v + 0.41$
Fe	Железо Iron	Donor Donor Donor	$E_c - 0.14$ $E_c - 0.51$ $E_c - 0.4$

Примесные уровни в германии

Элемент Element	Название Name	Уровень Level	Энергия ионизации Ionization energy
Li	Литий Lithium	Donor	$E_c - 0.0093$
Sb	Сурьма Stibium	Donor	$E_c - 0.0096$
P	Фосфор Phosphorus	Donor	$E_c - 0.12$
As	Мышьяк Arsenic	Donor	$E_c - 0.013$
S	Сера Sulphur	Donor	$E_c - 0.18$
Se	Селен Selenium	Donor Donor	$E_c - 0.14$ $E_c - 0.28$
Te	Теллур Tellurium	Donor Donor	$E_c - 0.11$ $E_c - 0.3$
Cu	Медь Copper	Acceptor Acceptor Acceptor	$E_v + 0.26$ $E_v + 0.33$ $E_v + 0.04$
Au	Золото Gold	Acceptor Acceptor Acceptor Donor	$E_v + 0.04$ $E_v + 0.2$ $E_v + 0.15$ $E_c - 0.04$
Ag	Серебро Silver	Acceptor Acceptor Acceptor	$E_v + 0.09$ $E_v + 0.28$ $E_v + 0.13$
B	Бор Boron	Acceptor	$E_v + 0.01$
Al	Алюминий Aluminum	Acceptor	$E_v + 0.01$
Tl	Таллий Thallium	Acceptor	$E_v + 0.01$
Ga	Галлий Gallium	Acceptor	$E_v + 0.011$
In	Индий India	Acceptor	$E_v + 0.011$
Be	Бериллий Beryllium	Acceptor	$E_v + 0.06$
Zn	Цинк Zinc	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.095$ $E_v + 0.035$

Продолжение таблицы 2.3.3

Cr	Хром Chromium	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.12$ $E_v + 0.07$
Cd	Кадмий Cadmium	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.16$ $E_v + 0.055$
Hg	Ртуть Quicksilver	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.23$ $E_v + 0.067$
Co	Кобальт Cobalt	Acceptor Acceptor Donor	$E_v + 0.3$ $E_v + 0.25$ $E_c - 0.09$
Ni	Никель Nickel	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.3$ $E_v + 0.23$
Mn	Марганец Manganese	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.29$ $E_v + 0.16$
Fe	Железо Iron	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.27$ $E_v + 0.31$
Pt	Платина Platinum	Acceptor Acceptor Acceptor	$E_v + 0.12$ $E_v + 0.2$ $E_v + 0.04$

Примесные уровни в арсениде галлия

Элемент Element	Название Name	Уровень Level	Энергия ионизации Ionization energy
Si	Кремний Silicon	Donor Acceptor	$E_c - 0.0058$ $E_v + 0.035$
Ge	Германий Germanium	Donor Acceptor Acceptor	$E_c - 0.006$ $E_v + 0.07$ $E_v + 0.04$
S	Сера Sulphur	Donor	$E_c - 0.006$
Sn	Олово Grey tin	Donor Acceptor	$E_c - 0.006$ $E_v + 0.17$
Te	Теллур Tellurium	Donor	$E_c - 0.03$
Se	Селен Selenium	Donor Donor	$E_c - 0.0059$ $E_c - 0.53$
O	Кислород Oxygen	Donor Donor	$E_c - 0.4$ $E_c - 0.67$
C	Углерод Carbon	Acceptor	$E_v + 0.026$
Be	Бериллий Beryllium	Acceptor	$E_v + 0.028$
Mg	Магний Magnesium	Acceptor	$E_v + 0.028$
Zn	Цинк Zinc	Acceptor	$E_v + 0.031$
Cd	Кадмий Cadmium	Acceptor	$E_v + 0.035$
Li	Литий Lithium	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.05$ $E_v + 0.023$
Au	Золото Gold	Acceptor	$E_v + 0.09$
Mn	Марганец Manganese	Acceptor	$E_v + 0.095$
Ag	Серебро Silver	Acceptor	$E_v + 0.11$
Pb	Свинец Lead	Acceptor	$E_v + 0.12$
Co	Кобальт Cobalt	Acceptor	$E_v + 0.16$
Ni	Никель Nickel	Acceptor	$E_v + 0.21$

Продолжение таблицы 2.3.4

Cu	Медь Copper	Acceptor Acceptor Acceptor Acceptor Acceptor	$E_v + 0.44$ $E_v + 0.24$ $E_v + 0.19$ $E_v + 0.14$ $E_v + 0.023$
Fe	Железо Iron	Acceptor Acceptor	$E_v + 0.52$ $E_v + 0.37$
Cr	Хром Chromium	Acceptor	$E_v + 0.63$

Таблица 2.3.5

**Электрические характеристики атомов IV группы
в полупроводниках типа $A^{III}B^{VI}$)**

Примесь	AlSb	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
C	<i>A</i>		<i>A</i> (0,019)				
Si	<i>A</i>	<i>D</i> (0,082)	<i>D</i> (0,02) <i>A</i> (0,03)	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>A</i>
Ge	<i>A</i>	<i>A</i> (0,082)	<i>A</i> (комплекс) <i>D</i> (мелкий)	<i>A</i>	<i>D</i> (мелкий)	<i>D</i>	<i>A</i>
Sn	<i>D</i> + <i>A</i>	<i>A</i> (0,30)	<i>A</i> (0,03) <i>A</i> (комплекс)	<i>A</i>		<i>D</i>	<i>D</i>
Pb	<i>A</i>	<i>D</i> (0,058)	<i>D</i> (мелкий) <i>A</i> (0,20) <i>A</i> (0,12)	<i>N</i>	<i>D</i> (мелкий) <i>N</i>	<i>N</i>	<i>D</i> (?)

- 1) А – акцептор, D – донор, N – примесь, не влияющая на электрические свойства.

Энергия ионизации примесей в GaP

Примесь	Донор, эВ	Акцептор, эВ
Sn	$E_c - 0,065$	
Si	$E_c - 0,082$	
Te	$E_c - 0,0895$	
Se	$E_c - 0,102$	
S	$E_c - 0,104$	
Неизвестна	$E_c - \leq 0,165$	
>>	$E_c - 0,24$	
>>	$E_c - 0,6$	Ловушка для электронов
O		
Cu	$E_c - 0,896$	$E_v + 0,41$
Co		$E_v + 0,30$
Ge		$E_v + 0,203$
Si		$E_v + 0,097$
Cd		$E_v + 0,064$
Zn		$E_v + 0,056$
Be		$E_v + 0,054$
Mg		$E_v + 0,048$
C		$E_v + 0,041$
C		$E_v - 0,008$
N		
Bi	Изоэлектронная ловушка	$E_v + 0,038$
Zn-O	То же	$E_v - 0,30$
Cd-O	>> >>	$E_v - 0,40$
	>> >>	

Таблица 2.3.7

Энергетические уровни примесей в InSb

Cu	Двойной донор	$E_c - 0.023$ эВ, $E_c - 0.056$ эВ
Ag	Двойной акцептор	$E_v + 0.028$ эВ, $E_v + 0.039$ эВ
Au	Двойной акцептор	$E_v + 0.032$ эВ, $E_v + 0.066$ эВ
Zn	Акцептор	$E_v + 0.075$ эВ
Sn	Донор	Уровни практически сливаются с зоной проводимости
Pb	Донор	
Si, Ge	Акцептор	
S, Se, Te	Донор	
Mn	Акцептор	

Таблица 2.3.8

**Энергии ионизации примесей в фотопроводящих
соединениях элементов II и VI групп**

Веще- ство	Примесь	Груп- па	Замещае- мый атом	Донор или акцеп- тор	Энергия ионизации ($E_c - E_I$), эв	Энергия ионизации ($E_I - E_V$), эв
ZnS	Cl, Br	VII	S	D	0,25	
	Al.	III	Zn	D	0,25	
	Sc	III	Zn	D	0,35	
	Ga	III	Zn	D	0,42	
	In	III	Zn	D	0,50	
	Cu	I	Zn	A		
	Ag	I	Zn	A		
ZnSe	Br	VII	Se	D	0,21	
	Cu	I	Zn	A		
	Ag	I	Zn	A		
	Sb	V	Se	A		
				A		
	As	V	Se	A		
CdS	Cl, Br, J	VII	S	D	0,03	0,6 ; 1,0 ($\leq 1,0$) 1,0
	Al, Ga, In	III	Cd	D	0,03	
	Cu *	I	Cd	A		
	Ag	I	Cd	A		
	Вакансия			A		
	Cd					
ZnTe	Cu **	I	Zn	A		

Продолжение таблицы 2.3.8

CdSe	Cl,Br,J Cu Вакансия Se Вакансия Cd	VI I	Se Cd	D A D D A A	0,14 ~ 0,6	0,6 1,0
CdTe	J Li	VII I	Te Cd	D A	~ 0,01	
CdTe	Sb P Na Вакансия Cd	V V I	Te Te Cd	A A A A		0,36 0,38 0,29 0,3
ZnO	H Li Zn	I I II	Примесь внедрения Примесь внедрения Примесь внедрения	D D D	0,05 0,05 0,05	

§2.4 ЗАВИСИМОСТЬ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ

Подвижность носителей заряда μ - это среднее расстояние, проходимое в единичном электрическом поле в направлении поля за время между столкновениями, деленное на это время. Размерность подвижности μ ($\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$). Существуют различные виды подвижности:

- Микроскопическая подвижность – подвижность, которую свободные носители имеют в действительности;
- Подвижность по проводимости – подвижность, вычисляемая из равенства $\mu = \frac{\sigma}{en}$, практически идентична микроскопической подвижности;
- Дрейфовая подвижность – скорость дрейфа носителей в электрическом поле на единицу напряженности поля. Дрейфовая подвижность совпадает с микроскопической подвижностью только тогда, когда прилипание носителей отсутствует;
- Холловская подвижность – произведение постоянной Холла (R) на проводимость (σ) $\mu_x = R\sigma$. Эта подвижность, когда на носители заряда действуют одновременно электрическое и магнитное поле;
- Амбиполярная подвижность - это эффективная подвижность, когда кроме равновесных носителей заряда с концентрацией (n_0, p_0) существуют неравновесные носители заряда с концентрацией (n', p') (например, при наличии инжекции).

Подвижность носителей заряда в полупроводниках определяется выражением:

$$\mu_n = \frac{e}{m_e^*} \langle \tau \rangle \quad (9)$$

$$\mu_p = \frac{e}{m_h^*} \langle \tau \rangle \quad (10)$$

где $(m_e^*), (m_h^*)$ – эффективная масса электрона и дырки, $\langle \tau \rangle$ – время релаксации. Для определенного полупроводника, где m_e^* и m_h^* - постоянные значения, подвижность в основном определяется величиной времени релаксации. Время

релаксации $\langle \tau \rangle$ зависит от многих факторов – концентрации нейтральных, ионизованных примесных атомов, плотности дислокаций, концентрации носителей заряда и колебаний решетки (оптических и акустических фононов). Каждый из перечисленных факторов может быть доминирующим в определенной области температур. Поэтому при изменении температуры подвижность носителей заряда меняется не монотонно, а по определённой закономерности.

При комнатной температуре величина τ в основном определяется колебаниями решетки, так как в кристалле концентрация ионизованных примесных атомов или концентрация носителей заряда не высокая ($N \leq 10^{16}$, или $n \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$). С ростом концентрации носителей заряда (или примесных атомов) значение подвижности носителей заряда монотонно падает.

Далее приведены экспериментальные результаты, показывающие зависимость подвижности электронов и дырок от концентрации донорных и акцепторных примесных атомов соответственно. Такие данные необходимы при разработке различных приборов на основе сильно легированных полупроводниковых материалов.

Таблица 2.4.1

**Величины подвижностей носителей заряда (см²/в·сек)
в полупроводниках при температуре T=300K**

Вещество	Подвижность электронов, см ² /В·с	Подвижность дырок, см ² /В·с
Алмаз	900-3900	1200-4800
Ge	3600-3900	1700-1900
Si	1200-1900	350-500
Te	910	570
NaCl	250 (при 84° K)	
KCl	100 (при 90° K); 3	
KBr	110 (при 84° K); 12,5	
KJ	155 (при 84° K)	2-6
AgCl	300 (при 85° K); 50-70	40
AgBr	240	
Cs ₂ Sb	500	10
MgO		2
ZnO	180	
BaO	3-9	
Mg ₂ Ge	500	100
Mg ₂ Si	400	70
Mg ₂ Sn	200-300	150-250
Mg ₂ Sb ₂		100
ZnSb		300
CdSb	360-660	300-700
CdS	200	
CdSe	500	
CdTe	800	100
HgTe	16000	16000
AlSb	50-200	100-200
GaP		17
GaAs	2000-6800	200-680
GaSb	2500-5000	400-1000
InP	3400-5000	50-700
InAs	20000-30000	100-240
InSb	65000-80000	700-4000
InSe	900	
In ₂ Se ₃	30	
PbS	600	250-800
PbSe	1200-1400	500-1400
PbTe	1200-2100	750-870
AgFeSe ₂	>250	70
AgFeTe ₂	> 2000	150

Подвижности носителей заряда в полупроводниках в области $T > 120 \div 150$ К, в основном определяется рассеянием на колебаниях решетки. Поэтому в области $120^\circ\text{К} < T \leq 500^\circ\text{К}$, при концентрации примесей $N \leq 10^{16} \text{см}^{-3}$, температурную зависимость можно описать следующим соотношением:

$$\mu = \mu_0 T^n$$

При больших концентрациях примесных атомов такая зависимость уже не работает, в данном преобладающим будет рассеяние носителей заряда на свободных носителях заряда.

Таблица 2.4.2

Температурная зависимость подвижности носителей заряда полупроводниковых материалов

Вещество	Значения n для зависимости $\mu \sim T^n$	
	n электроны	p дырки
Ge	-1,66	-2,33
Si	-2,5	-2,5
Алмаз	-1,5	-2,8
AgCl	-1,5	
Cs ₃ Sb	-1,5	
ZnO	-1,5	
Mg ₃ Si	От - 2,5 до - 3	От - 2,5 до - 3
Mg ₃ Ge		
Mg ₃ Sn		
Mg ₃ Sb ₂		-1,5
GaSb	-1,5	-1,5
InP	-2	
InAs	-1,5	>-2
InSb	-1,7	-2,1
PbS	От - 2,5 до - 2,2	От - 2,2 до - 2,5
PbSe		
PbTe		

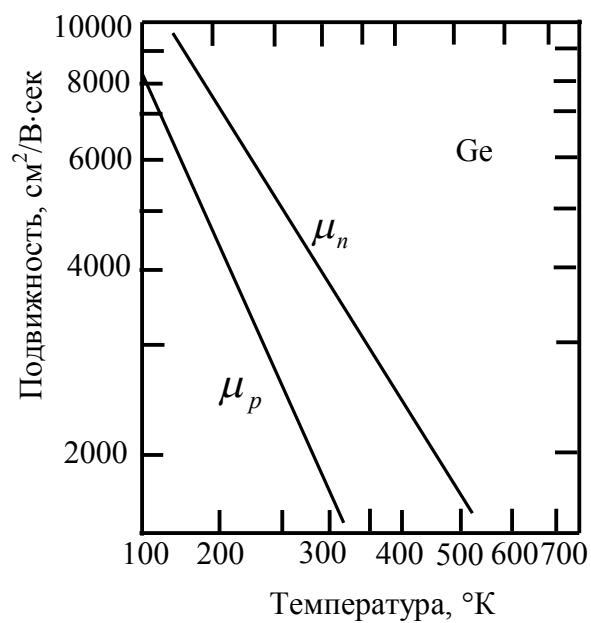


Рис. 2.4.1. Зависимость подвижности от температуры для германия.

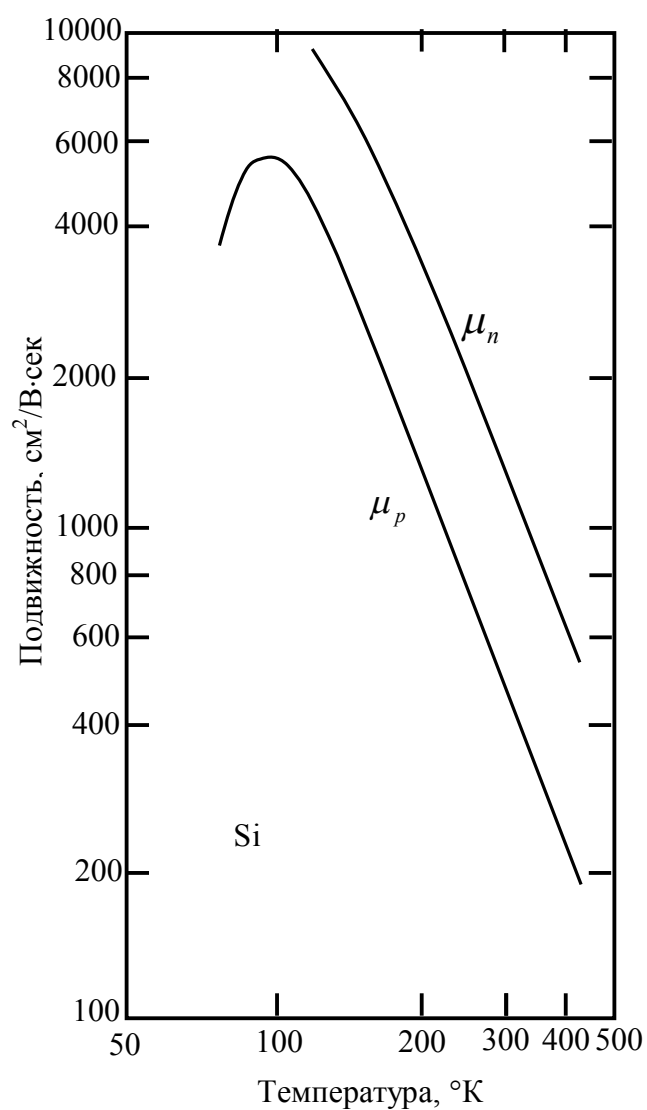


Рис. 2.4.2. Зависимость подвижности от температуры для кремния.

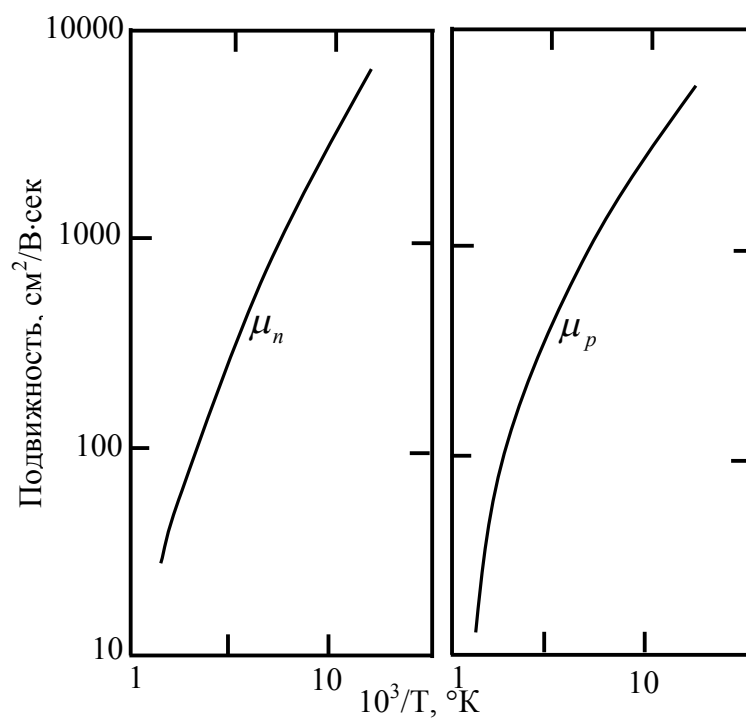


Рис. 2.4.3. Зависимость подвижности от температуры для сульфида свинца.

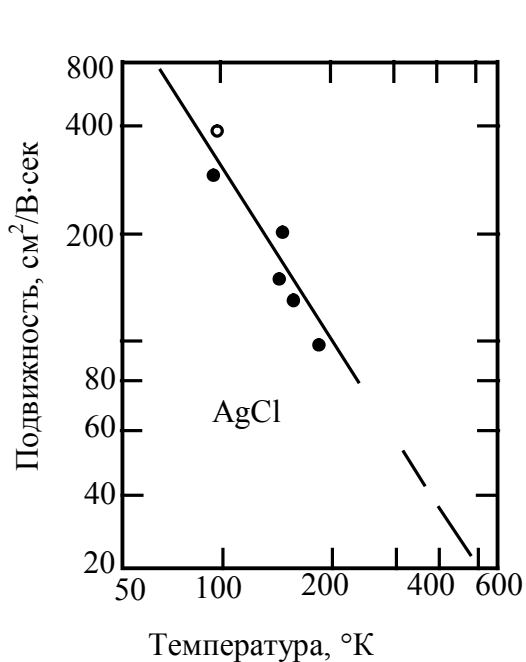


Рис. 2.4.4. Зависимость подвижности от температуры для хлористого серебра свинца.

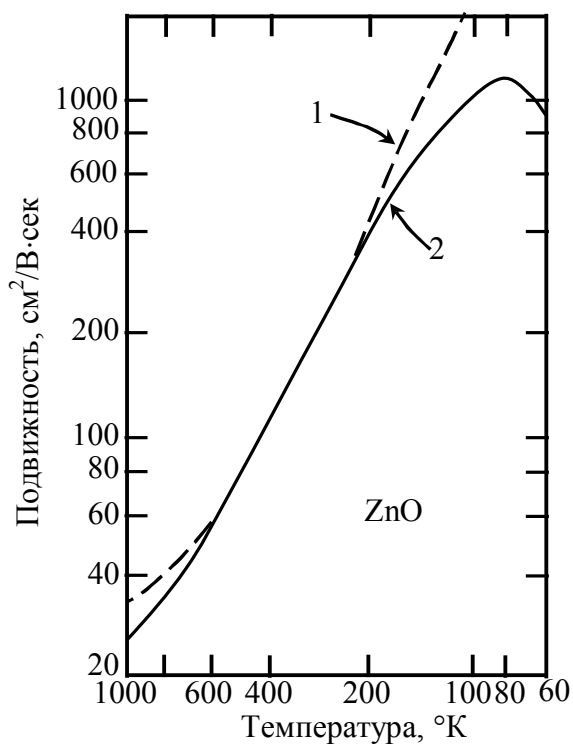


Рис. 2.4.5. Зависимость подвижности от температуры для окиси цинка.
1-вычисленная кривая для рассеяния на колебаниях решетки; 2-экспериментальная зависимость μ_n .

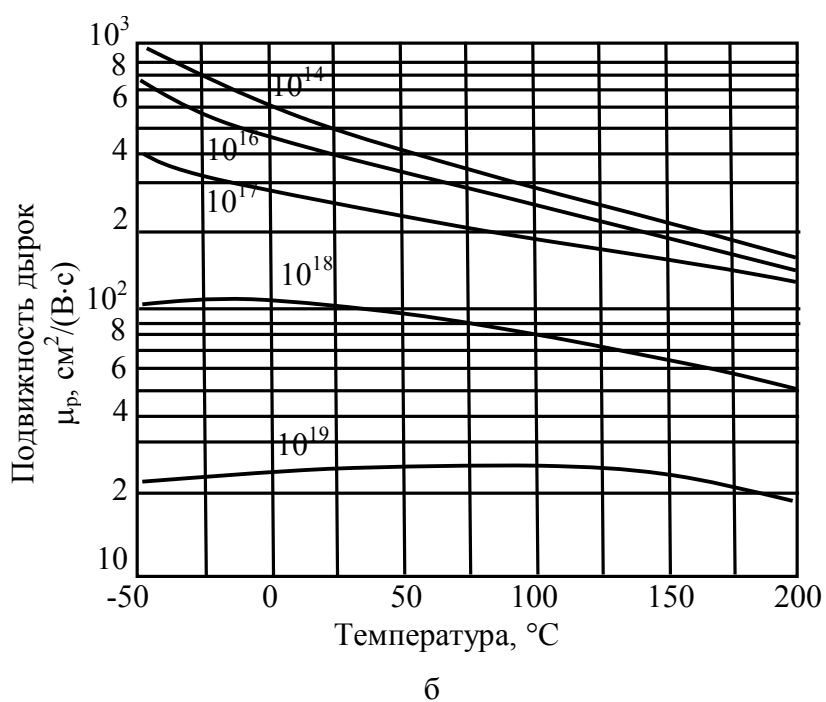
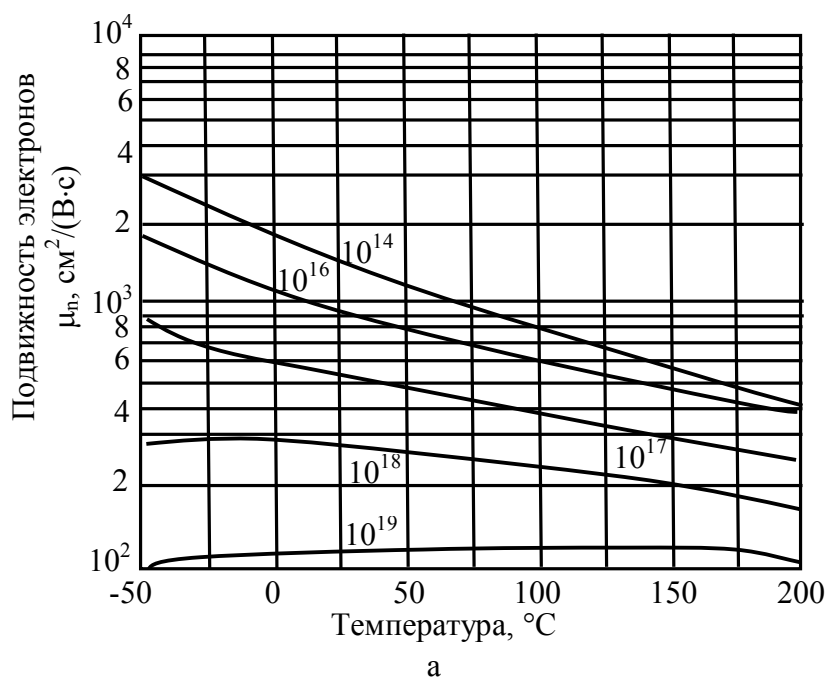


Рис. 2.4.6. Зависимости подвижности основных носителей от температуры при различных концентрациях примесей:
 а – подвижность электронов в кремнии n – типа; б – подвижность дырок в кремнии p – типа.

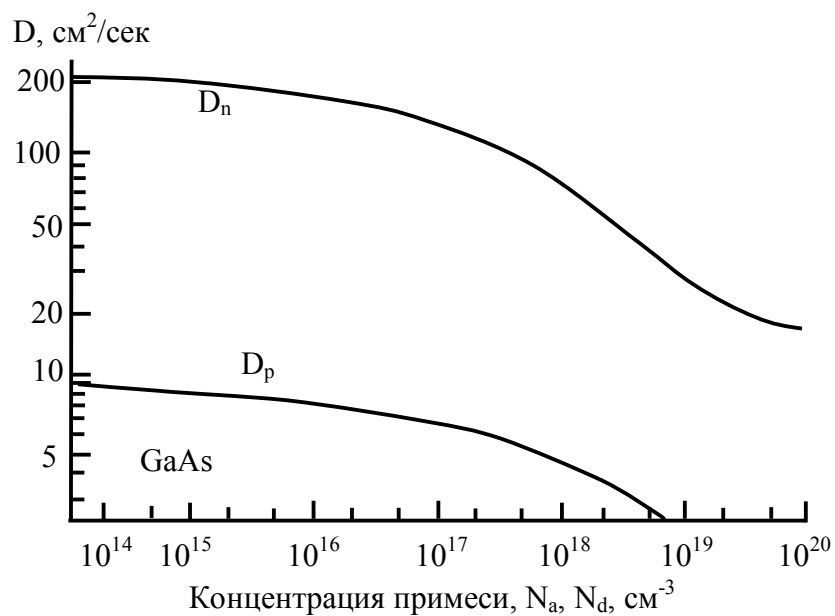
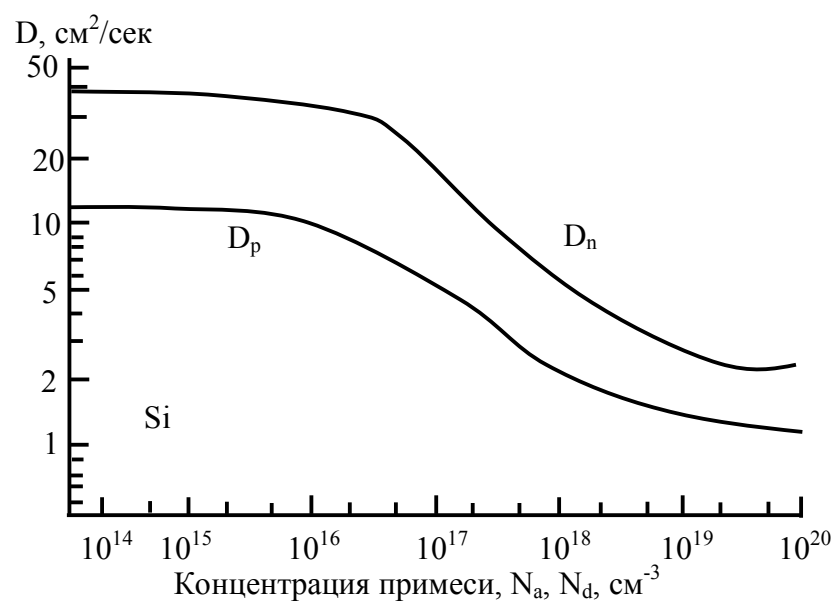


Рис. 2.4.7. Зависимости коэффициентов диффузии от концентрации примесей для полупроводников Si и GaAs при комнатной температуре.

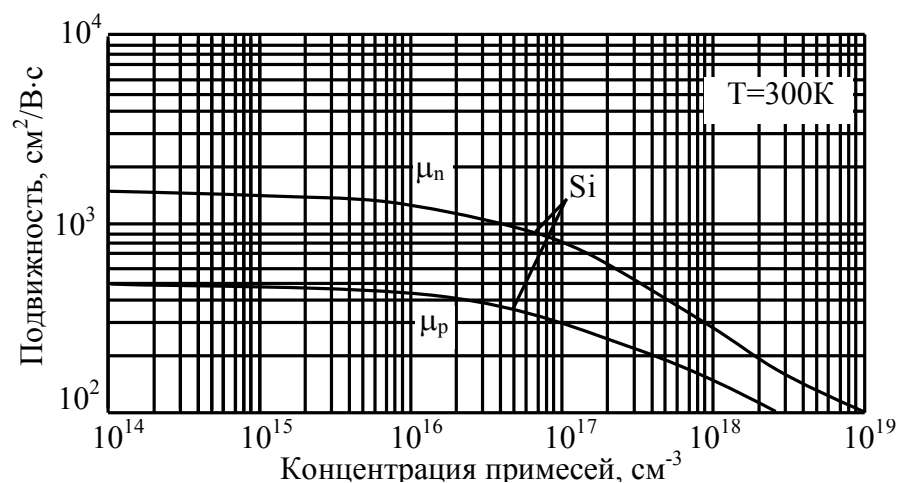


Рис. 2.4.8. Зависимость дрейфовой подвижности в кремнии от концентрации примесей при $T=300\text{K}$.

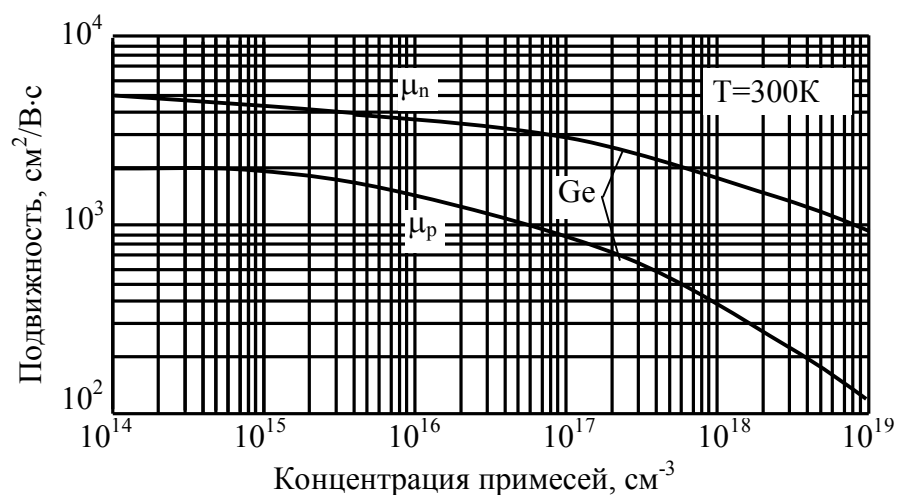


Рис. 2.4.9 Зависимость дрейфовой подвижности в германии от концентрации примесей при $T=300\text{K}$.

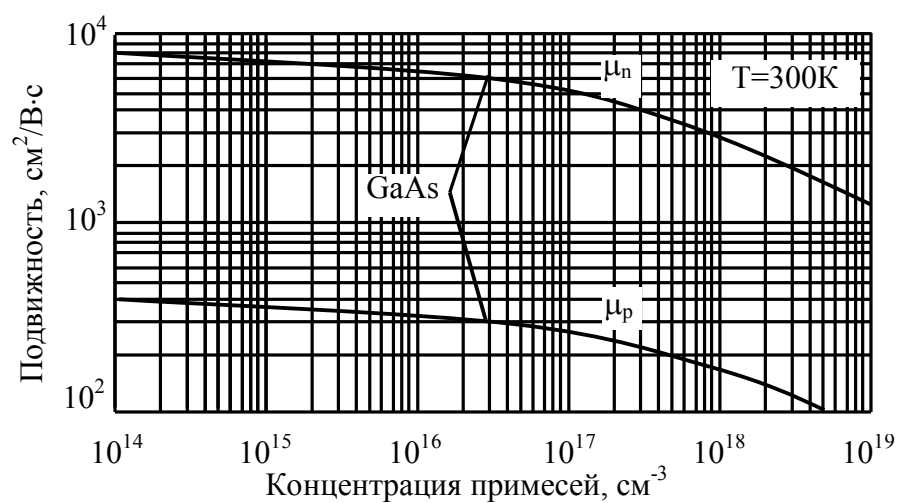


Рис. 2.4 10. Зависимость дрейфовой подвижности в арсениде галлия от концентрации примесей при $T=300\text{K}$.

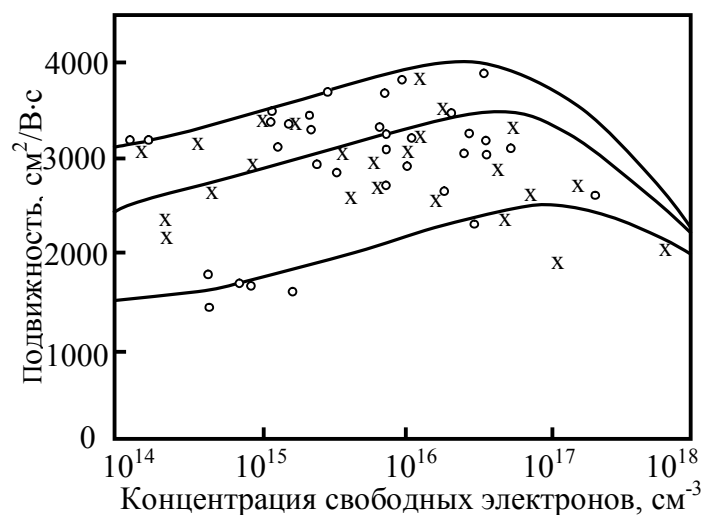


Рис. 2.4.11. Связь подвижности свободных электронов в InP с их концентрацией.

Кружочками и крестиками обозначены экспериментальные точки, полученные при измерениях на верхней и нижней частях кристалла соответственно. Кривые представляют результаты теоретических расчетов при концентрациях акцепторов $6,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (верхняя кривая), $8,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (средняя кривая) и $1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (нижняя кривая).

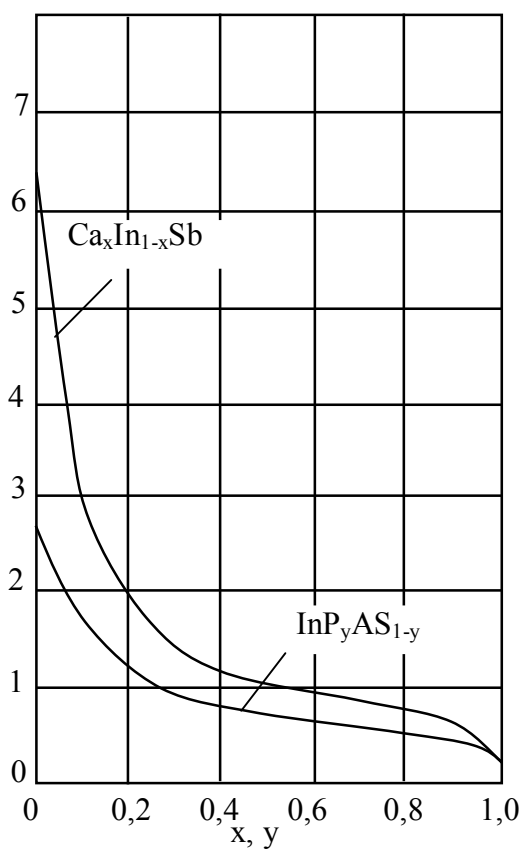


Рис.2.4.12 Зависимость подвижности электронов в твердых растворах $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ и $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ от состава ($T=300\text{K}$)

§2.5. ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВАЖНЕЙШИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ

При использовании полупроводниковых материалов для решения конкретных задач, очень важно знать концентрацию примесей в данном материале, так как во всех паспортных данных полупроводниковых материалов указывается только их удельное сопротивление. Например, КДБ-10 или КЭФ-2 (Кремний, дырочный, легированный бором, удельное сопротивление $\rho=10$ Ом·см или кремний, электронный, легированный фосфором, удельное сопротивление $\rho=2$ Ом·см), или для монокристаллической германии ГДС-10 или ГЭФ-2, или для GaAs-10. Поэтому нижеприведены графические зависимости, которые позволяют, зная удельное сопротивление материала, определить концентрацию доноров или акцепторов в данном материале.

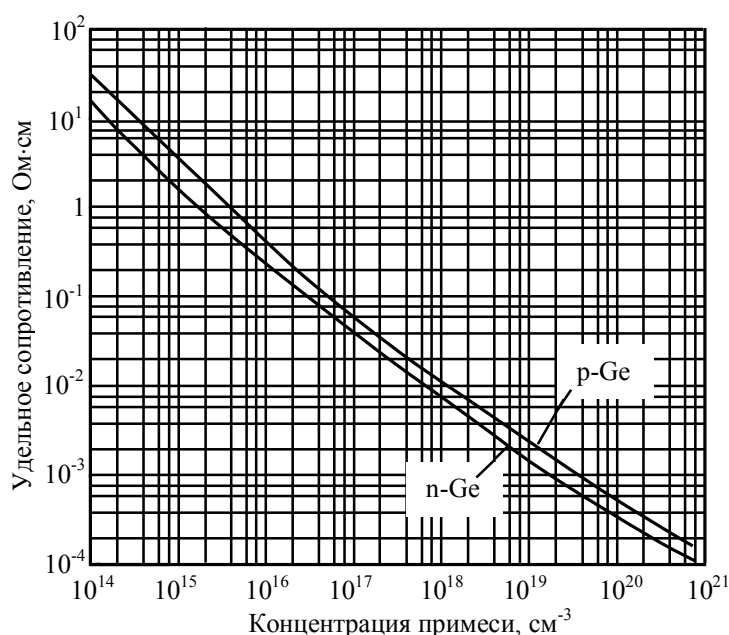


Рис. 2.4.13. Зависимость удельного сопротивления германия от содержания примесей ($T=300\text{K}$)

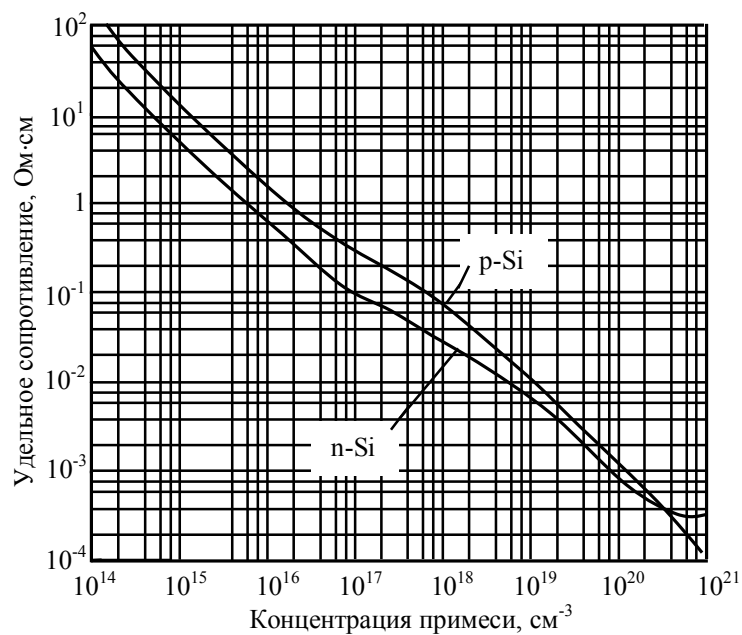


Рис . 2.4.14. Зависимость удельного сопротивления кремния от содержания примесей ($T=300\text{K}$)

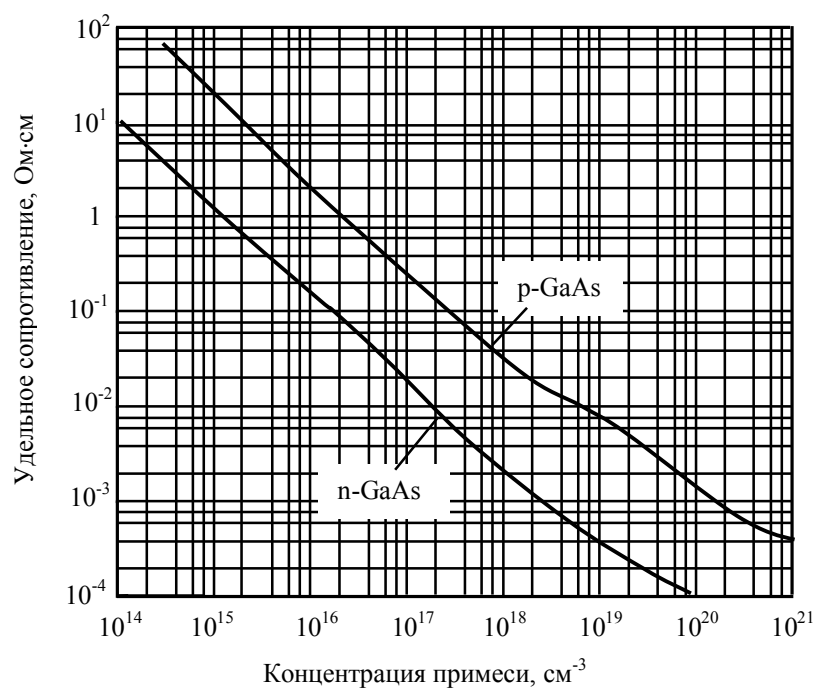


Рис. 2.4.15. Зависимость удельного сопротивления арсенида галлия от содержания примесей ($T=300\text{K}$)

Зависимость собственной концентрации носителей заряда в германии, кремнии и арсениде галлии от температуры

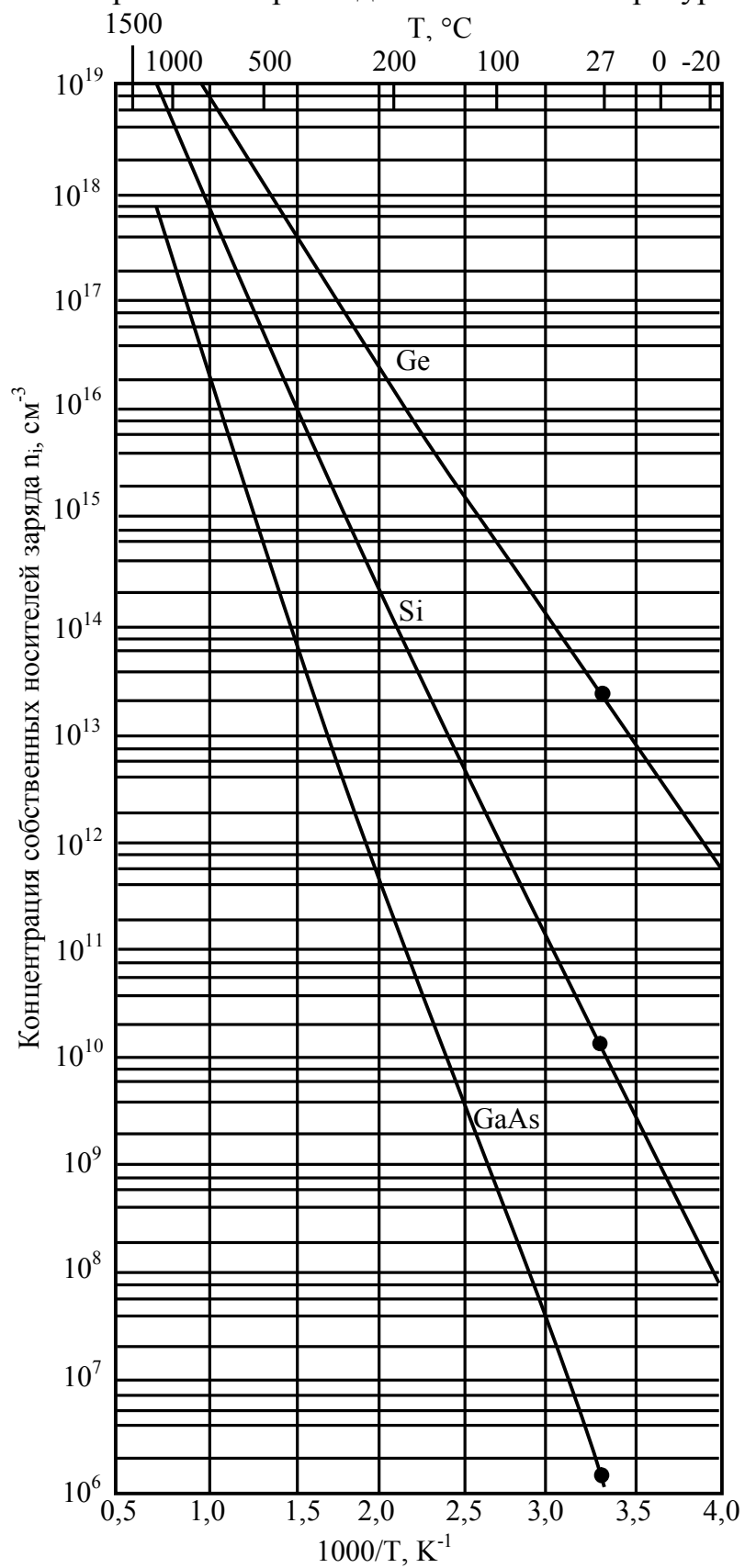


Рис. 2. 4. 16.

ГЛАВА III

НЕОБХОДИМЫЕ ФОРМУЛЫ И СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ

Введение

При подготовке дипломных работ, диссертаций или при статистической обработке экспериментальных результатов, а также при анализе различных экспериментальных и расчетных данных часто приходится сталкиваться с различными формулами, физическими законами и закономерностями изменения физических величин. В данной главе приведены самые необходимые и часто используемые формулы. Здесь также приведены физический смысл данных формул и единицы измерения физических величин, входящих в формулы.

В конце главы приведены таблицы физических свойств практически всех элементов таблицы Менделеева. Такие данные необходимы специалистам при решении различных технологических задач, а также при объяснении экспериментальных данных. Приведены графики давления паров различных элементов, которые используются как диффузانت или омический контакт при различных температурах. Эти данные очень важны для технологов, которые занимаются диффузией. В главе также приведен ряд таблиц физических величин, которые часто используются при решении различных теоретических, экспериментальных и технологических задач. Надеемся, что приведенные формулы, физические параметры различных веществ и элементов облегчат ваш труд и сэкономят ваше время при решении различных проблем.

§3.1. ПРОВОДИМОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Закон Ома:

$$I = \frac{U}{R}, U = IR, R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

I , U , R – сила тока (А), напряжение (В) и сопротивление материала (Ом) соответственно.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

ρ , l , S – удельное сопротивление материала (Ом·см), длина образца (см) и сечение образца (см²) соответственно.

$$\rho = \frac{1}{\sigma}, \sigma = en\mu \quad (3)$$

σ – удельная проводимость, e , n , μ – заряд электрона (кл), концентрация электронов (см⁻³), подвижность носителей заряда – (электрона) (см²/В·с) соответственно.

В отличие от металлов, в полупроводниках существуют два носителя заряда – электроны (e^-) и дырки (e^+). Поэтому проводимость в полупроводниках:

$$\sigma = en\mu_n + ep\mu_p \quad (4)$$

p , μ_n , μ_p – концентрация дырок, подвижность электронов и дырок соответственно.

В электронном полупроводнике (полупроводник n-типа) $n \gg p$:

$$\sigma_n = en\mu_n \quad (5)$$

В дырочном полупроводнике (полупроводник p-типа) $p \gg n$:

$$\sigma_p = ep\mu_p \quad (6)$$

В собственном полупроводнике:

$$n=p \quad (7)$$

Закон действующих масс:

$$np = (n_i)^2 \quad (8)$$

Этот закон показывает, что в любом полупроводнике произведение концентрации электронов и дырок величина всегда постоянная равная - $(n_i)^2$. Этот закон

справедлив только в условиях равновесия.

n_i – концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике:

$$n_i = (N_v N_c)^{1/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (9)$$

N_c – эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости:

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (10)$$

N_v – эффективная плотность состояний дырок в валентной зоне:

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (11)$$

где m_n^* , m_p^* , E_g , $\hbar$ – эффективная масса электронов и дырок, величина ширины запрещенной зоны и постоянная Планка ($\hbar = 1,05458 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$)

$$m_n^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\partial^2 E_c(k)}{\partial k^2}} = \hbar^2 \left(\partial^2 E_c(k) / \partial k^2 \right)^{-1} \quad (12)$$

$$m_p^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\partial^2 E_v(k)}{\partial k^2}} = \hbar^2 \left(\partial^2 E_v(k) / \partial k^2 \right)^{-1} \quad (13)$$

$E_c(k)$ и $E_v(k)$ – структура энергетических зон (зоны проводимости и валентной зоны) в k – пространстве.

k – волновой вектор, величина которого:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (14)$$

энергия свободного электрона:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k^2 \quad (15)$$

импульс электрона $p = \hbar k$ (16)

E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника зависит от температуры по закону:

$$E_g = E_{g_0} - \alpha T \quad (17)$$

E_{g_0} - ширина запрещенной зоны при $T=0K$, α - температурный коэффициент.

§3.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЕРМИ – ДИРАКА

Вероятность заполнения энергетического уровня E электронами при данной температуре и при данном значении уровня Ферми F определяется (в условиях равновесия) выражением:

$$f = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)} \quad (18)$$

g – спиновый фактор вырождения.

Вероятность опустошения этого уровня E :

$$(1 - f) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{F - E}{kT}\right)} \quad (19)$$

Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике:

$$F = \frac{E_c - E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \quad (20)$$

$$F = \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)$$

Концентрация электронов в зоне проводимости:

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right) \quad (21)$$

E_c – энергия, соответствующая дну зоны проводимости.

Положение уровня Ферми в электронном полупроводнике, при известной концентрации электронов при данной температуре T :

$$F = E_c - kT \ln\left(\frac{N_c}{n}\right) \quad (22)$$

концентрация дырок в валентной зоне:

$$p = N_v \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right) \quad (23)$$

E_v – энергия, соответствующая потолку валентной зоны.

Положение уровня Ферми в дырочном полупроводнике, при известной концентрации дырок и данной температуре T :

$$F = E_v - kT \ln\left(\frac{N_v}{p}\right) \quad (24)$$

Условие вырождения полупроводников как n , так и p типа:

$$\mu - E_c > 3kT, \quad E_v - \mu > 3kT \quad (25)$$

§3.3. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Постоянная Холла:

$$R = -\frac{1}{ne} \quad R = \frac{1}{pe} \quad (25)$$

e – заряд электрона, n , p - концентрация электронов и дырок.

Холловская подвижность носителей заряда:

$$\mu_x = \sigma R \quad (26)$$

Дрейфовая подвижность:

$$\mu_s = \frac{L^2}{Vt} \quad (27)$$

L – расстояние между двумя электродами, V - напряжение подаваемого импульса,

t – необходимое время для прохождения расстояния L .

Магнитосопротивление:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = B \left(\frac{\mu H}{e} \right)^2 \quad (28)$$

Условие для сильного магнитного поля:

$$\frac{\mu H}{e} \gg 1 \quad (29)$$

Условие для слабого магнитного поля:

$$\frac{\mu H}{e} < 1 \quad (30)$$

Для кремния при $T=300\text{K}$, $N \geq 30000$ Эр является слабым магнитным полем.

§3.4. РАЗЛИЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАССЕЯНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА

Подвижность электронов и дырок в полупроводниках:

$$\mu_n = \frac{e}{m_n^*} \langle \tau \rangle \quad \mu_p = \frac{e}{m_p^*} \langle \tau \rangle \quad (31)$$

$\langle \tau \rangle$ - время релаксации, которое показывает необходимое время восстановления системы из неравновесного состояния в равновесное.

$$\langle \tau \rangle = \quad (32)$$

При рассеянии на нейтральных примесных атомах $\langle \tau \rangle$ меняется в зависимости от их концентрации N :

$$\langle \tau \rangle = \frac{m_n^*}{20a_B \hbar N}, \quad (33)$$

где a_B – радиус первой боровской орбиты.

Соответственно подвижность с ростом концентрации нейтральных примесных атомов меняется по закону:

$$\mu \approx \frac{1}{N} \quad (34)$$

При рассеянии на ионах примесных атомов время релаксации с изменением температуры меняется по закону:

$$\langle \tau \rangle \sim T^{3/2} \quad \text{и} \quad \langle \tau \rangle \sim \mu^{3/2} \quad (35)$$

При рассеянии на тепловых колебаниях решетки время релаксации с изменением температуры меняется по закону:

$$\langle \tau \rangle \sim T^{-3/2} \quad \text{и} \quad \langle \tau \rangle \sim \mu^{-3/2} \quad (36)$$

Соотношение Эйнштейна

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \quad (37)$$

D коэффициент диффузии носителей заряда, μ - подвижность, e – заряд электрона, $k=8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/К, T -температура

Коэффициент диффузии электронов в полупроводнике:

$$D_n = \left(\frac{kT}{e} \right) \mu_n \quad (38)$$

Коэффициент диффузии дырок в полупроводнике:

$$D_p = \left(\frac{kT}{e} \right) \mu_p \quad (39)$$

диффузионная длина электронов и дырок в полупроводниках:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}, \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (40)$$

§3.5. ОПТИЧЕСКИЕ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Энергия кванта:

$$h\nu = E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda}, \text{ эВ} \quad (41)$$

Здесь λ - длина волны светового излучения в микронах, c – скорость света $c=3 \cdot 10^{10}$ см/с.

Коэффициент пропускания света в твердых телах:

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha x)}{1-R^2 \exp(-2\alpha x)} \quad (42)$$

I_T, I_0 – интенсивность падающего и пропущенного света, падающее число квантов на один см^2 в течение одной секунды, α - коэффициент поглощения (см^{-1}), x – толщина материала, R – коэффициент отражения:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{(1-\bar{n})^2 + k^2}{(1+\bar{n})^2 + k^2} \quad (43)$$

I_R – интенсивность отраженного света, $\bar{n}$ – коэффициент преломления, k – показатель поглощения света, как функции длины светового излучения:

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (44)$$

Интенсивность падающего света в твердых телах уменьшается по закону Бугера – Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (45)$$

I – интенсивность света на расстоянии x в твердом теле.

Спектральная зависимость коэффициента поглощения света при собственном поглощении в полупроводниках с прямозонной энергетической структурой:

$$\alpha(\lambda) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (46)$$

Спектральная зависимость коэффициента поглощения света при собственном поглощении в полупроводниках с непрямоzonной энергетической структурой:

$$\alpha(\lambda) = A(h\nu - E_g \pm E_\phi)^2 \quad (47)$$

E_g , E_ϕ – ширина запрещенной зоны полупроводников и энергия фононов.

Спектральная зависимость коэффициента поглощения света α , при поглощении света примесными атомами акцепторов с концентрацией N_a и доноров с концентрацией N_d – соответственно:

$$\alpha(\lambda) = AN_a(h\nu - E_g + E_a)^{1/2} \quad (48)$$

$$\alpha(\lambda) = AN_d(h\nu - E_g + E_d)^{1/2} \quad (49)$$

E_a и E_d – энергия ионизации акцепторного и донорного уровня.

Спектральная зависимость коэффициента поглощения света α , при поглощении света свободными носителями:

$$\alpha(\lambda) = A\lambda^{1,5} + B\lambda^{2,5} + C\lambda^{3,5} \quad (50)$$

При этом коэффициент поглощения зависит от механизма рассеяния носителей заряда как $\lambda^{1,5}$, $\lambda^{2,5}$, $\lambda^{3,5}$ соответственно, когда имеет место рассеяние носителей заряда на акустических, оптических и ионизированных примесных атомах.

Фотопроводимость – это изменение проводимости полупроводника, при освещении светом. Определяется концентрацией неравновесных электронов Δn и дырок Δp (концентрация электронов и дырок, которые появляются дополнительно из-за освещения светом):

$$\Delta\sigma_\phi = e\Delta n\mu_n + e\Delta p\mu_p \quad (51)$$

При этом можно считать, что подвижность носителей заряда не меняется.

$$\Delta n = I_0 k \beta \tau_p \quad \Delta p = I_0 k \beta \tau_p \quad (52)$$

I_0 , α , β , τ_n , τ_p – интенсивность падающего света, коэффициент поглощения света, коэффициент квантового выхода (показывающий число электронно – дырочных пар, генерируемых при поглощении одного фотона. Величина $\beta \approx 1$, при $h\nu < 3E_g$), время жизни электронов (время прибывания электронов в зоне проводимости) и время жизни дырок (время прибывания дырок в валентной зоне) соответственно:

$$\tau_n = \frac{1}{\nu S_n N_n} \quad \tau_p = \frac{1}{\nu S_p N_p} \quad (53)$$

S_n , S_p – сечения захвата электронов и дырок на центрах рекомбинации N_n , N_p – концентрация центров захвата, ν - тепловая скорость электронов:

$$\nu = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \approx 10^7 \text{ см/с при } T=300\text{K}.$$

Величина сечения захвата определяется распределением потенциала вблизи центра захвата. Предполагается, что свободный электрон (дырка) будет захвачен центром, если он приблизится к центру на расстояние, при котором энергия связи, обусловленная кулоновским притяжением, будет равна или больше kT .

$$\frac{e^2}{r\epsilon} = kT \quad (54)$$

при $T=300\text{K}$

$$S = \pi r^2 \approx \frac{10^{-10}}{\epsilon^2} [\text{см}^2] \quad (55)$$

Сечение захвата электронов и дырок однократно заряженного донора соответственно S_n^+ , S_p^0 :

$$S_n^+ > S_p^0 \quad (56)$$

однократно заряженного акцептора соответственно S_n^0 , S_p^-

$$S_p^- > S_n^0 \quad (57)$$

Если примесный атом в запрещенной зоне полупроводника создает два донорных уровня, то атом может находиться в состоянии: N_d^0 , N_d^+ , N_d^{++} . Сечение за-

хвата электронов и дырок на таких центрах: S_n^+ , S_n^{++} , S_p^0 , S_p^+ .

$$S_p^+ \ll S_n^{++} \quad (58)$$

Такие центры называются центрами притяжения для электронов и отталкивания для дырок.

Если примесный атом в запрещенной зоне полупроводника создает два акцепторных уровня, то атом может находиться в состоянии: N_a^0 , N_a^- , N_a^{--} . Сечение захвата электронов и дырок на таких центрах: S_n^0 , S_n^- , S_p^- , S_p^{--}

$$S_p^{--} \gg S_n^- \quad (59)$$

Такие центры называются центрами притяжения для дырок и отталкивания для электронов.

Обычно значение сечения захвата центров в зависимости от их зарядового состояния меняется в пределах:

$$S_n = 10^{-13} \div 10^{-21} \text{ см}^2, S_p = 10^{-13} \div 10^{-21} \text{ см}^2. \quad (60)$$

Скорость рекомбинации :

$$\gamma = \frac{n_t - n_0}{\tau_n} \quad (61)$$

n_t , n_0 – концентрация неравновесных и равновесных электронов.

Фоточувствительность – это число носителей, проходящих между электродами в течение 1 сек на каждый поглощенный в течение 1 сек фотон.

$$\frac{\Delta I}{e} = GM \quad (62)$$

ΔI - фототок, M – число электронно – дырочных пар, G – коэффициент фотоэлектрического усиления:

$$G = \frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p} \quad (63)$$

t_n , t_p – время пролета электронов и дырок соответственно между электродами, которые определяются выражениями:

$$t_n = \frac{L^2}{\mu_n V}, t_p = \frac{L^2}{\mu_p V} \quad (64)$$

L – расстояние между электродами, V – приложенное напряжение, μ_n , μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно. Коэффициент усиления:

$$G = (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \frac{V}{L^2} \quad (65)$$

§3.6. ВАХ Р – N ПЕРЕХОДА, БАРЬЕРА ШОТТКИ

Плотность диффузионного тока электронов $I_{\text{диф}}$ пропорциональна градиенту их концентрации:

$$j_{\text{диф}}^n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad (66)$$

Плотность диффузионного тока дырок:

$$j_{\text{диф}}^p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (67)$$

где D_n , D_p – коэффициент диффузии электронов и дырок.

Плотность дрейфового тока для электронов и дырок:

$$j_{\text{др}}^n = q\mu_n nE \quad (68)$$

$$j_{\text{др}}^p = q\mu_p pE \quad (69)$$

Общая плотность тока:

$$j_n = j_{\text{др}}^n + j_{\text{диф}}^n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (70)$$

$$\varphi = kT \ln \frac{n_n p_p}{(n_i)^2} = \frac{N_d N_a}{(n_i)^2} \quad (71)$$

для кремния $D_n=38 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p=13 \text{ см}^2/\text{с}$.

Контактная разность потенциалов на р–n переходе:

$$j_n = j_{\text{др}}^n + j_{\text{диф}}^n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (72)$$

где n_n , p_p – концентрация электронов в материале n типа и концентрация дырок в p типа. N_d , N_a – концентрация донорных и акцепторных примесных атомов.

$$n_n=N_d, p_p=N_a \quad (73)$$

Барьерная емкость:

$$C = \left[\frac{\varepsilon \cdot q}{2(\varphi - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right] \quad (74)$$

Вольт-амперная характеристика р-п – перехода:

$$I = I_{\text{нас}} \left(e^{\frac{\varphi - U}{kT}} - 1 \right) \quad (75)$$

U – величина внешнего потенциала.

$I_{\text{нас}}$ – ток насыщения.

$$I_{s0} = q(N_v N_c) \left[\frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} + \frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \right] e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (76)$$

τ_n, τ_p – время жизни электронов и дырок.

Вольт – амперная характеристика диодов Шоттки:

$$I = \left[AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_k}{kT}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (77)$$

$$\text{где } A = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (78)$$

$$I = I_{s0} \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (79)$$

$$I_{s0} = AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_k}{kT}\right) \quad (80)$$

где φ_k величина потенциала барьера металл- полупроводник.

§3.7. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

Напряжение холостого хода фотоэлемента:

$$V_{xx} = \frac{kT}{e} \ln \left[\frac{I_L}{I_s} + 1 \right] \approx \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_{s0}} \right) \quad (81)$$

Коэффициент заполнения ВАХ:

$$F = V_m I_m / V_{xx} I_{\kappa 3} \quad (82)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{W} = \frac{F V_{xx} I_{\kappa 3}}{W} \quad (83)$$

V_{xx} – напряжение холостого хода фотоэлемента;

$I_{кз}$ – ток короткого замыкания;

W – мощность солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлемента.

I_m , V_m – показано на рис. 3.1

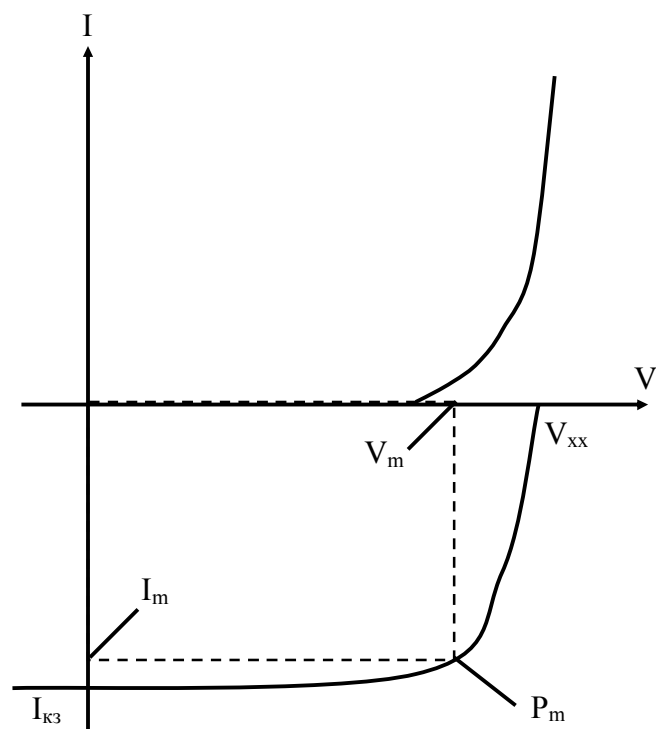


Рис. 3.1. Вольт- амперная характеристика солнечных элементов

§3.8. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ

Таблица 3.8.1.

Некоторые свойства химических элементов

Атом- ный номер	Название	Сим- вол	Атомная масса	Кристалл- лическая структура	Плотность, г/см ³	Темпера- тура плав- ления, °С	Темпе- ратура кипения, °С
1	Водород	H	1,00797	Газ	$8,988 \cdot 10^{-5}$	-259,1	-252,7
2	Гелий	He	4,0026	Газ	$1,785 \cdot 10^{-4}$	-272	-268,9
3	Литий	Li	6,939	ОЦК	0,534	186	1336
4	Бериллий	Be	9,0122	ГПл	1,845	1280	2970
5	Бор	B	10,811	ГПр	2,34	2300	2550**
6	Углерод	C	12,0111	ГЦК	3,51	3500	4200
7	Азот	N	14,0067	Газ	$1,25 \cdot 10^{-3}$	-209,9	-195,8
8	Кислород	O	15,9994	Газ	$1,43 \cdot 10^{-3}$	-2,18,4	-182,9
9	Фтор	F	18,9815	Газ	$1,69 \cdot 10^{-3}$	-223	-118
10	Неон	Ne	20,183	Газ	$9,0 \cdot 10^{-4}$	-248,7	-245,9
11	Натрий	Na	22,9898	ОЦК	0,971	97,5	880
12	Магний	Mg	24,312	ГПл	1,74	651	1107
13	Алюминий	Al	26,9815	ГЦК	2,70	660	2060
14	Кремний	Si	28,086	ГЦК	2,42	1415	2355
15	Фосфор	P	30,9738	Сложн.	1,83	44,1	280
16	Сера	S	32,064	Сложн.	2,07	112,8	444,6
17	Хлор	Cl	35,453	Газ	$3,21 \cdot 10^{-3}$	-101,6	-34,6
18	Аргон	Ar	39,948	Газ	$1,78 \cdot 10^{-3}$	-189,2	-185,7
19	Калий	K	39,102	ОЦК	0,87	62,3	760
20	Кальций	Ca	40,08	ГЦК	1,545	845	1240
21	Скандий	Sc	44,956	ГЦК	3,02	1200	2400
22	Титан	Ti	47,90	ГПл	4,5	1800	3300
23	Ванадий	V	50,942	ОЦК	5,96	1710	3000
24	Хром	Cr	51,996	ОЦК	7,14	1890	2480
25	Марганец	Mn	54,938	ОЦК	7,2	1260	1900
26	Железо	Fe	55,847	ОЦК	7,87	1535	3000
27	Кобальт	Co	58,933	ГЦК	8,9	1495	2900
28	Никель	Ni	58,71	ГЦК	8,9	1453	2900
29	Медь	Cu	63,54	ГЦК	8,93	1083	2340
30	Цинк	Zn	65,37	ГПл	7,14	419,5	907
31	Галлий	Ga	69,72	Сложн.	5,91	29,8	1983
32	Германий	Ge	72,59	ГЦК	5,36	958	2700
33	Мышьяк	As	74,922	ГПр	5,73	615**	—
34	Селен	Se	78,96	ГПр	4,8	217	688
35	Бром	Br	79,909	Жидк.	3,12	-7,2	58,8

Продолжение табл. 3.8.1.

36	Криптон	Kr	83,80	Газ	$3,74 \cdot 10^{-3}$	-156,6	-152,9
37	Рубидий	Rb	85,47	ОЦК	1,53	38,5	700
38	Стронций	Sr	87,62	ОЦК	2,60	757	1150
39	Иттрий	Y	88,906	ГПл	5,51	1490	2500
40	Цирконий	Zr	95,94	ГПл	6,44	1857	2900
41	Ниобий	Nb	(99)	ОЦК	8,57	2500	3700
42	Молибден	Mo	101,07	ОЦК	10,2	2620	4800
43	Технеций	Tc	102,905	ГПл	—	(2700)	—
44	Рутений	Ru	106,4	ГПл	12,1	2450	4900
45	Родий	Rh	107,87	ОЦК	12,5	1966	4500
46	Палладий	Pd	112,40	ОЦК	12,16	1550	2200
47	Серебро	Ag	114,82	ОЦК	10,50	960,5	1950
48	Кадмий	Cd	118,69	ГПл	8,65	320,9	767
49	Индий	In	121,75	Т	7,28	156,4	2000
50	Олово	Sn	127,60	Т	7,30	231,9	2270
51	Сурьма	Sb	126,90	Р	6,69	630,5	1380
52	Теллур	Te	131,3	ГПр	6,24	452	1390
53	Йод	I	132,905	Сложн.	4,93	113,5	184,4
54	Ксенон	Xe	137,34	Газ	$5,9 \cdot 10^{-3}$	-112	-107,1
55	Цезий	Cs	137,34	ОЦК	1,873	28,5	670
56	Барий	Ba	138,91	ОЦК	3,5	850	1140
57	Лантан	La	138,91	ГПл	6,16	866	4340
58	Церий	Ce	140,12	ГЦК	6,8	804	2400
59	Празеодим	Pr	140,97	ГЦК	6,5	940	3020
60	Неодим	Nd	144,24	ГПл	7,0	1024	3300
61	Промеций	Pm	(147)	Неизв.	—	—	—
62	Самарий	Sm	150,35	Р	7,5	1052	(1900)
63	Европий	Eu	151,96	ОЦК	5,2	1150	(1700)
64	Гадолиний	Gd	157,25	ГПл	7,9	(1350)	(3000)
65	Тербий	Tb	158,92	ГПл	8,3	325	(2800)
66	Диспрозий	Dy	162,5	ГПл	8,6	(1500)	(2600)
67	Гольмий	Ho	164,93	ГПл	8,8	(1500)	(2700)
68	Эрбий	Er	167,26	ГПл	9,1	(1530)	(2600)
69	Тулий	Tm	168,93	ГПл	9,3	(1530)	(2400)
70	Иттербий	Yb	173,04	ГЦК	7,0	824	(1800)
71	Лютеций	Lu	174,94	ГПл	9,9	(1700)	(3500)
72	Гафний	Hf	178,49	ГПл	11,3	2130	3200
73	Тантал	Ta	180,948	ГЦК	16,6	2996	4100
74	Вольфрам	W	183,85	ГЦК	19,3	3400	5900
75	Рений	Re	186,2	ГПл	20,5	3180	5050
76	Осмий	Os	190,2	ГПл	22,5	2700	5400

Продолжение табл. 3.8.1.

77	Иридий	Ir	192,2	ГЦК	22,4	2450	5300
78	Платина	Pt	195,09	ГЦК	21,37	1770	4300
79	Золота	Au	196,967	ГЦК	19,32	1063	2600
80	Ртуть	Hg	200,59	Жидк.	13,55	—38,9	356,9
81	Таллий	Tl	204,37	ГПл	11,85	303,5	1457
82	Свинец	Pb	207,19	ГЦК	11,35	327,3	1620
83	Висмут	Bi	209,98	Р	9,78	271,3	1440
84	Полоний	Po	(210)	М	—	260	—
85	Астат	At	(211)	Неизв.	—	—	—
86	Радон	Rn	222	Газ	$9,8 \cdot 10^{-3}$	—71	—61,8
87	Франций	Fr	(223)	Неизв.	—	—	—
88	Радий	Ra	226,05	Неизв.	5,0	700	1140
89	Актиний	Ac	227,05	Неизв.	—	(1600)	—
90	Торий	Th	232,038	ГЦК	11,5	1845	4500
91	Протактиний	Pa	231,1	Т	(15,4)	(3000)	—
92	Уран	U	238,03	Сложн.	19,05	1150	(3800)

Обозначения: ОЦК – объемно – центрированная кубическая; ГЦК – гранецентрированная кубическая; ГПл – гексагональная с плотной упаковкой; ГПр – гексагональная простая; Т – тетрагональная; М – моноклинная; Р – ромбическая.

§ 3.8.1. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ЕДИНИЦАМИ

Таблица 3.8.1.1

Соотношение между единицами длины

Единицы длины	м	км	см	мм	мкм	нм
1 м	1	10^{-3}	100	10^3	10^6	10^9
1 км	10^3	1	10^5	10^6	10^9	10^{12}
1 см	0,01	10^{-5}	1	10	10^4	10^7
1 мм	10^{-3}	10^{-6}	0,1	1	10^3	10^6
1 мкм	10^{-6}	10^{-9}	10^{-4}	10^{-3}	1	10^3
1 нм	10^{-9}	10^{-12}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-3}	1

Таблица 3.8.1.2

Соотношение между единицами массы

Единицы массы	кг	Мт	т	ц	г	мг	а.е.м.
1 кг	1	10^{-9}	10^{-3}	0,01	10^3	10^6	$6,02 \cdot 10^{26}$
1 Мт	10^9	1	10^6	10^7	10^{12}	10^{15}	$6,02 \cdot 10^{33}$
1 т	10^3	10^{-6}	1	10	10^6	10^9	$6,02 \cdot 10^{29}$
1 ц	100	10^{-7}	0,1	-1	10^5	10^8	$6,02 \cdot 10^{28}$
1 г	10^{-3}	10^{-12}	10^{-6}	10^{-5}	1	10^3	$6,02 \cdot 10^{23}$
1 мг	10^{-6}	10^{-15}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-3}	1	$6,02 \cdot 10^{20}$
1 а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$	$1,66 \cdot 10^{-36}$	$1,66 \cdot 10^{-30}$	$1,66 \cdot 10^{-29}$	$1,66 \cdot 10^{-24}$	$1,66 \cdot 10^{-21}$	1
Примечание. Более точное значение атомной единицы массы: 1 а.е.м. = $1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг							

Таблица 3.8.1.3

Соотношение между единицами времени

Единицы времени	с	Мс	сут	ч	мин	мкс	нс
1 с	1	10^{-6}	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	10^6	10^9
1 Мс	10^6	1	11,6	278	$1,67 \cdot 10^4$	10^{12}	10^{15}
1 сут	86400	$8,64 \cdot 10^{-2}$	1	24	1440	$8,64 \cdot 10^{10}$	$8,64 \cdot 10^{13}$
1 ч	3600	$3,6 \cdot 10^{-3}$	0,04167	1	60	$3,6 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^{12}$
1 мин	60	$6 \cdot 10^{-5}$	$6,9445 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$	1	$6 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^{10}$
1 мкс	10^{-6}	10^{-12}	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$2,78 \cdot 10^{-10}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$	1	10^{10}
1 нс	10^{-9}	10^{-15}	$1,16 \cdot 10^{-14}$	$2,78 \cdot 10^{-13}$	$1,67 \cdot 10^{-11}$	10^{-3}	1
Примечание. 1 год = 365,24219878 сут = 31556925,9747 с $\approx 3,16 \cdot 10^7$ с							

Таблица 3.8.1.4

Соотношение между единицами силы

Единицы силы	Н	тс	кгс	гс	дин	мгс
1 Н	1	$1,02 \cdot 10^{-6}$	0,102	102	10^5	$1,02 \cdot 10^5$
1 тс	$9,81 \cdot 10^3$	1	10^3	10^6	$9,81 \cdot 10^8$	10^9
1 кгс	9,81	10^{-3}	1	10^3	$9,81 \cdot 10^5$	10^6
1 гс	$9,81 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}	10^{-3}	1	981	10^3
1 дин	10^{-5}	$1,02 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	1	1,02
1 мгс	$9,81 \cdot 10^{-6}$	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	0,981	1
Примечание. 1 кгс=9,80655 Н (точно)=980,665·10 ³ дин; 1 гс =9,80655·10 ⁻³ Н (точно)= 980665 мН (точно); 1 тс=9,80655·10 ³ Н (точно); 1 дин= 10 ⁻⁵ Н =1,01972·10 ⁻⁶ кгс.						

Таблица 3.8.1.5

Соотношение между единицами энергии (работы)

Единицы энергии (работы)	Дж	кгс·м	эрг	кал	Вт·ч	эВ
1 Дж	1	0,102	10^7	0,239	$2,78 \cdot 10^{-4}$	$6,24 \cdot 10^{18}$
1 кгс·м	9,81	1	$9,81 \cdot 10^7$	2,34	$2,72 \cdot 10^{-3}$	$6,12 \cdot 10^{19}$
1 эрг	10^{-7}	$1,02 \cdot 10^{-8}$	1	$2,39 \cdot 10^{-8}$	$2,78 \cdot 10^{-11}$	$6,24 \cdot 10^{11}$
1 кал	4,19	0,427	$4,19 \cdot 10^7$	1	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,61 \cdot 10^{19}$
1 Вт·ч	3600	367	$3,60 \cdot 10^{10}$	860	1	$2,25 \cdot 10^{22}$
1 эВ	$1,60 \cdot 10^{-19}$	$1,63 \cdot 10^{-20}$	$1,60 \cdot 10^{-12}$	$3,83 \cdot 10^{-20}$	$4,45 \cdot 10^{-23}$	1
Примечание. 1 Вт·ч=3,6 МДж (точно)= $3,6 \cdot 10^6$ Дж= $3,6 \cdot 10^{13}$ эрг= =367098 кгс·м= $224,71 \cdot 10^{23}$ эВ=859,845 ккал=1,3596 л.с. ·ч; 1 ккал=4186,8 Дж (точно)= 10^{-3} Мкал= $4,1868 \cdot 10^{10}$ эрг (точно)= =4,26,935 кгс·м= $2,6147 \cdot 10^{22}$ эВ= $1,163 \cdot 10^{-3}$ кВт·ч= $1,5812 \cdot 10^{-3}$ л.с. ·ч; 1 кгс·м=9,80665 Дж (точно)= $9,80665 \cdot 10^7$ эрг= $2,72407 \cdot 10^{-6}$ кВт·ч= =2,34228 кал= $3,70370 \cdot 10^{-6}$ л.с. ·ч; 1 эВ= 10^{-6} МэВ= $1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж=0,160219 аДж= $4,4502 \cdot 10^{-26}$ кВт·ч						

Таблица 3.8.1.6

Соотношение между единицами мощности

Единицы мощности	Вт	кВт	МВт	кгс·м/с	эрг	л.с.
1 Вт	1	10^{-3}	10^{-6}	0,102	10^7	$1,36 \cdot 10^{-3}$
1 кВт	10^3	1	10^{-3}	102	10^{10}	1,36
1 МВт	10^6	10^3	1	$1,02 \cdot 10^5$	10^{13}	$1,36 \cdot 10^3$
1 кгс·м/с	9,81	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-6}$	1	$9,81 \cdot 10^7$	$1,33 \cdot 10^{-2}$
1 эрг	10^{-7}	10^{-10}	10^{-13}	$1,02 \cdot 10^{-8}$	1	$1,36 \cdot 10^{-10}$
1 л.с.	735,5	0,7355	$7,355 \cdot 10^{-4}$	75	$7,355 \cdot 10^9$	1
Примечание. 1 Вт=0,101972 кгс·м/с= 10^{-3} кВт= 10^{-6} МВт= =367098 кгс·м= $1,3596 \cdot 10^{-3}$ л.с. =0,238846 ккал/с; 1 кВт= 10^{-3} МВт= 1000 Вт=101,972 кгс·м/с=1,3596 л.с.=367098 кгс·м/ч; 1 кгс·м/с=9,80665 Вт (точно)= $9,80665 \cdot 10^7$ эрг/с (точно); 1 л.с. =735,499 Вт=75 кгс·м/ч=270000 кгс·м/ч; 1 кал/с=4,1868 Вт (точно)= $41,868 \cdot 10^6$ эрг/с (точно)=0,0426935 кгс·м/с;						

Таблица 3.8.1.6

Соотношение между единицами массы и энергии

Единицы	кг	г	эВ	МэВ	эрг	Дж	кВт·ч	а.е.м.
1 кг	1	10^3	$5,61 \cdot 10^{35}$	$5,61 \cdot 10^{29}$	$8,99 \cdot 10^{23}$	$8,99 \cdot 10^{16}$	$2,50 \cdot 10^{10}$	$6,02 \cdot 10^{26}$
1 г	10^{-3}	1	$5,61 \cdot 10^{32}$	$5,61 \cdot 10^{26}$	$8,99 \cdot 10^{20}$	$8,99 \cdot 10^{15}$	$2,50 \cdot 10^7$	$6,02 \cdot 10^{23}$
1 эВ	$1,78 \cdot 10^{-36}$	$1,78 \cdot 10^{-33}$	1	10^6	$1,60 \cdot 10^{-12}$	$1,60 \cdot 10^{-19}$	$4,45 \cdot 10^{-26}$	$1,074 \cdot 10^{-9}$
1 МэВ	$1,78 \cdot 10^{-30}$	$1,78 \cdot 10^{-27}$	10^{-6}	1	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$1,60 \cdot 10^{-13}$	$4,45 \cdot 10^{-20}$	$1,074 \cdot 10^{-3}$
1 эрг	$1,11 \cdot 10^{-24}$	$1,11 \cdot 10^{-21}$	$6,24 \cdot 10^{11}$	$6,24 \cdot 10^5$	1	10^7	$2,78 \cdot 10^{-14}$	$6,70 \cdot 10^2$
1 Дж	$1,11 \cdot 10^{-17}$	$1,11 \cdot 10^{-14}$	$6,24 \cdot 10^{18}$	$6,24 \cdot 10^{12}$	10^{-7}	1	$2,78 \cdot 10^{-7}$	$6,70 \cdot 10^9$
1 кВт·ч	$4,00 \cdot 10^{-11}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{25}$	$2,25 \cdot 10^{19}$	$3,60 \cdot 10^{13}$	$3,60 \cdot 10^6$	1	$2,41 \cdot 10^{16}$
1 а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$	$1,66 \cdot 10^{-24}$	$9,21 \cdot 10^8$	$9,21 \cdot 10^2$	$1,49 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-10}$	$4,14 \cdot 10^{-17}$	1

Примечание. Энергетический эквивалент атомной единицы массы ($1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$) равен $\approx 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} \approx 149 \text{ пДж}$ ($931,48 \text{ МэВ}$)
Энергетический эквивалент массы электрона ($m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$) равен $8,16 \cdot 10^{-3} \text{ пДж} = 0,511 \text{ МэВ}$

§3.8.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ (КОНСТАНТЫ)

Таблица 3.8.2.

Физические постоянные (константы)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение постоянной
Скорость распространения электромагнитных волн (скорость света) в вакууме (в свободном пространстве)	c	399792458 м/с
Элементарный заряд электрона	e	$1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9,10953 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n (1839 \cdot m_e)$	$1,67495 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя протона	$m_p (1836 \cdot m_e)$	$1,67265 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Больцмана	k	$1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Газовая постоянная (молярная)	R	8,314 Дж/(моль·К)
Гравитационная постоянная	G	$6,672 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Постоянная Планка	h $\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с $1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Фарадея	F	96484,56 Кл/моль
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях (t=0°C, p=101,325 кПа)	V_m	$2,241 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль
Постоянная Авогадро	N_a	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Лошмидта	N_t	$2,687 \cdot 10^{25}$ м ⁻³
Температурный коэффициент объемного расширения газов	β	$1/273,16$ К ⁻¹ =0,00367 К ⁻¹
Абсолютный нуль температуры	T_0	0К=-273,15°C
Температура замерзания воды (плавления льда)		0°C=273,15К
Атомная единица массы	u	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрон – вольт	eV	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж
Нормальное атмосферное давление	$p_{атм.н}$	101325 Па
Скорость звука в воздухе при нормальных условиях	c	331,5 м/с
Ускорение свободного падения (нормальное)	g_n	$9,80665$ м/с ²
Радиус первой электронной орбиты в атоме водорода	a_0	$5,29 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл
Электрохимический эквивалент серебра	k_{Ag}	13595 кг/м ³
Плотность ртути при нормальных условиях (t=0°C, p=101,325 кПа)	Q_{Hg}	
Плотность воздуха при нормальных условиях (t=0°C, p=101,325 кПа)	$Q_{вод}$	$1,293$ кг/м ³

Элементарные частицы

Название частицы		Символ		Масса покоя $m_e=1$	Заряд Q	Среднее время жизни, с
		Частица	Анти- частица			
	Фотон	γ	γ	0	0	-
Лептоны	Нейтрино	ν		0	0	Стабильная
	Антинейтрино		$\bar{\nu}$	0	0	
	Электрон	e^-		1	-e	Стабильная
	Позитрон		e^+	1	+e	
	Мюон	μ^-	μ^+	207	$\mp e$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Мезоны	π -мезон	π^0	π^0	264	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$
		π^-	π^+	273	$\mp e$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	η - мезон	η^0	η^0	1074	0	$< 10^{-16}$
	K- мезон	K^0	$\bar{K}_0$	974	0	10^{-10}
		K^+	K^-	966	$\pm e$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
Барионы	Протон	p^+		1836	+e	Стабильная
	Антипротон		$\bar{p}$	1836	-e	
	Нейтрон	n		1839	0	10^3
	Антинейтрон		$\bar{n}$			
	Λ -гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183	0	$2,6 \cdot 10^{-10}$
	Σ - гиперон	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	2328	$\pm e$	$0,8 \cdot 10^{-10}$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2334	0	$< 10^{-14}$
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	2343	$\mp e$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
	Ξ - гиперон	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2573	0	$3 \cdot 10^{-10}$
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^+$	2586	$\mp e$	$1,7 \cdot 10^{-10}$
	Ω - гиперон	Ω^-	Ω^+	3278	$\pm e$	$1,3 \cdot 10^{-10}$

Электронные состояния

Оболочка	n	<i>l</i>	Обозначение	m	s	Число состояний	Число состояний в каждой оболочке
K	1	0	1s	0	$\pm 1/2$	2	2
L	2	0	2s	0	$\pm 1/2$	2	8
		1	2p	0	$\pm 1/2$	2	
				± 1	$\pm 1/2$	4	
M	3	0	3s	0	$\pm 1/2$	2	18
		1	3p	0	$\pm 1/2$	2	
				± 1	$\pm 1/2$	4	
				0	$\pm 1/2$	2	
		2	3d	± 1	$\pm 1/2$	4	
				± 2	$\pm 1/2$	4	
N	4	0	4s	0	$\pm 1/2$	2	32
		1	4p	0	$\pm 1/2$	2	
				± 1	$\pm 1/2$	4	
				0	$\pm 1/2$	2	
		2	4d	± 1	$\pm 1/2$	4	
				± 2	$\pm 1/2$	4	
				0	$\pm 1/2$	2	
		3	4f	± 1	$\pm 1/2$	4	
				± 2	$\pm 1/2$	4	
				± 3	$\pm 1/2$	4	
				0	$\pm 1/2$	2	

n-главное квантовое число; l-орбитальное квантовое число;
m-магнитное квантовое число; s-спиновое квантовое число

Спектр атома водорода

m	n	Серия	Область спектра	Длина волны λ , нм
5	1	Лаймана	Ультрафиолетовая	94
4	1			97
3	1			103
2	1			122
7	2	Бальмера	Видимая	397
6	2			410
5	2			434
4	2			486
3	2			656
7	3	Пашена	Инфракрасная	1005
6	3			1094
5	3			1282
4	3			1875
7	4	Брекета	Инфракрасная	2165
6	4			2625
5	4			4051
7	5	Пфунда	Инфракрасная	4652
6	5			7458

Электрические величины

Величина	Уравнение	Единица
Сила тока	$I = \frac{dQ}{dt}$	А
Заряд	$Q=It$	Кл=А·с
Напряжение	$U=Ed$	В
Напряженность поля	$E = \frac{U}{d}$	В/м
Электрическое смещение	$D = \frac{Q}{A}$	Кл/м ²
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	Ф/м
Относительная диэлектрическая проницаемость	ε	-
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_m = \varepsilon_0 \varepsilon$	Ф/м
Емкость	$C = \frac{Q}{U}$	Ф=Кл/В
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\varepsilon_m A}{d}$	Ф
Энергия поля	$W = \frac{CU^2}{2}$	Дж=Вт·с
Энергия плоского конденсатора	$W = \frac{\varepsilon_a E^2 V}{2}$	Дж=Вт·с
Плотность энергии	$w = \frac{\varepsilon_a E^2}{2} = \frac{DE}{2}$	Дж/м ³

Магнитные величины

Величина	Уравнение	Единица
Напряжение индукции	$U = -N \frac{d\Phi}{dt}$	В
Магнитный поток	$\Phi = BA$	Вб=В·с
Магнитодвижущая сила	$F = NI$	А
Напряженность поля	$H = \frac{NI}{l}$	А/м
Магнитная индукция	$B = \frac{\Phi}{A}$	Тл=В·с/м ²
Магнитная постоянная	$\mu = \frac{1}{\epsilon_0 c^2}$	Гн/м
Относительная магнитная проницаемость	μ	-
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_m = \mu_0 \mu$	Гн/м
Индуктивность	$L = \frac{\Phi N}{I}$	Гн=В·с/А
Индуктивность тороидальной катушки	$L = \frac{\mu_m AN^2}{l}$	Гн
Энергия поля	$W = \frac{LI^2}{2}$	Дж=Вт·с
Энергия тороидальной катушки	$W = \frac{\mu_m H^2 V}{2}$	Дж=Вт·с
Плотность энергии	$w = \frac{\mu_m H^2}{2} = \frac{BH}{2}$	Дж/м ³

Удельное электрическое сопротивление ρ (при 20°C)

Полупроводник	ρ		Изоляторы	ρ , Ом·м
	Ом·мм ² /м	Ом·м		
Алюминий	0,027	$2,7 \cdot 10^{-8}$	Бакелит	10^{16}
Провод	0,0287	$2,87 \cdot 10^{-8}$	Бензол	$10^{15} \dots 10^{16}$
Вольфрам	0,055	$5,5 \cdot 10^{-8}$	Бумага	10^{15}
Графит	8,0	$8,0 \cdot 10^{-6}$	Вода дистиллированная	10^4
Железо чистое	0,1	$1,0 \cdot 10^{-7}$	Вода морская	0,3
Золото	0,022	$2,2 \cdot 10^{-8}$	Дерево сухое	$10^9 \dots 10^{13}$
Иридий	0,0474	$4,74 \cdot 10^{-8}$	Земля влажная	10^2
Константан	0,50	$5,0 \cdot 10^{-7}$	Кварцевое стекло	10^{16}
Литая сталь	0,13	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Керосин	$10^{10} \dots 10^{12}$
Магний	0,044	$4,4 \cdot 10^{-8}$	Мрамор	10^8
Манганин	0,43	$4,3 \cdot 10^{-7}$	Парафин	$10^{14} \dots 10^{16}$
Медь провод	0,0172	$1,72 \cdot 10^{-8}$	Парафиновое масло	10^{14}
	0,0178	$1,78 \cdot 10^{-8}$	Плексиглас	10^{13}
Молибден	0,054	$5,4 \cdot 10^{-8}$	Полистирол	10^{16}
Нейзильбер	0,33	$3,3 \cdot 10^{-7}$	Полихлорвинил	10^{13}
Никель	0,087	$8,7 \cdot 10^{-8}$	Полиэтилен	$10^{10} \dots 10^{13}$
Нихром	1,12	$1,12 \cdot 10^{-6}$	Силиконовое масло	10^{13}
Олово	0,12	$1,2 \cdot 10^{-7}$	Слюда	10^{14}
Платина	0,107	$1,07 \cdot 10^{-7}$	Стекло	10^{11}
Ртуть	0,96	$9,6 \cdot 10^{-7}$	Трансформаторное масло	$10^{10} \dots 10^{13}$
Свинец	0,208	$2,08 \cdot 10^{-7}$		
Серебро	0,016	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Фарфор	10^{14}
Серый чугун	1,0	$1,0 \cdot 10^{-6}$	Шифер	10^5
Угольные щетки	40	$4,0 \cdot 10^{-5}$	Эбонит	10^{16}
Цинк	0,059	$5,9 \cdot 10^{-8}$	Янтарь	10^{18}

Температура плавления $t_{пл}$ и удельная теплота плавления q

	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	q	
		кДж/кг	ккал/кг
Азот	-210,0		
Алюминий	660,1	397	98,4
Аммиак	-77,7		
Ацетон	-949	98	23,4
Бензол	5,53	128	30,6
Висмут	271,3	52,2	12,5
Вода	0	333,7	79,7
Водород	-259,2	58,6	14
Вольфрам	3380	192	45,9
Глицерин	18,4	201	48
Двуокись углерода	-56,6		
Диэтилэфир	-116,3	98,4	23,5
Железо чистое	1535	277	66,2
Золото	1063	65,7	15,7
Иридий	2454	117	27,9
Кислород	-218,8		
Кремний	1420	164	39
Латунь	920		
Медь	1083	205	49
Цинк	419,5	111	25,8
Никель	1453	303	72,4
Цезий	28,64	16,4	3,9
Олово	231,9	59,6	14,2
Парафин	54		
Платина	1769,3	111	26,5
Ртуть	-38,87	11,8	2,8
Свинец	327,4	23,0	5,5
Серебро	960,8	104,5	25
Цинк	419,5	111	26,6
Этиловый спирт	-114,5	108	25,8

Температура кипения t_k и удельная теплота парообразования r

$t_k, ^\circ\text{C}$		r	
		кДж/кг	ккал/кг
Азот	-195,82	198	47,3
Алюминий	2450	10900	2603
Аммиак	-33,4	1370	327
Ацетон	56,25	525	125
Бензол	80,1	394	94,1
Вода	100	2256	538,9
Водород	-252,77	454	108
Гелий	-268,94	20,6	4,92
Глицерин	290,5		
Двуокись серы	-10,02	390	93,1
Диметилэфир	-24,8	467	112
Диэтилэфир	34,5	384	91,7
Железо чистое	2735	6340	1514
Золото	2700	1650	394
Кислород	-182,97	213	50,9
Криптон	-153,4	108	25,8
Медь	2590	4790	1140
Метан	-161,5	510	122
Метиловый спирт	64,6	1100	263
Никель	2800	6480	1550
Олово	2430	2450	585
Пентан	36,1	360	86
Ртуть	356,58	285	68,1
Свинец	1750	8600	2054
Сера	444,6	290	69,3
Толуол	110,62	364	86,9
Углерод	4350	$5 \cdot 10^4$	12000
Фосфор	280	400	96
Фреон 12 (CCl_2F_2)	-24,9	162	38,7
Хлороформ	61,3	279	66,6
Цинк	907	1755	419
Четыреххлористый углерод	76,6	195	46,6
Этиловый спирт	78,33	840	201

Зависимость массы электрона от скорости

Ускоряющее напряжение U , В	Скорость электрона		Масса электрона	
	$\frac{v}{c}$	v , км/с	$\frac{m_e}{m_{e0}}$	m , кг
1	$1,95 \cdot 10^{-3}$	548	1,000	$0,911 \cdot 10^{-30}$
10	$6,24 \cdot 10^{-3}$	1872	1,000	0,911
10^2	0,0198	5929	1,000	0,911
10^3	0,0625	18728	1,002	0,913
10^4	0,195	58455	1,020	0,929
10^5	0,548	174352	1,196	1,089
$1 \cdot 10^6$	0,941	282128	2,957	2,694
$2 \cdot 10^6$	0,979	293519	4,914	4,476
$3 \cdot 10^6$	0,989	296600	6,870	6,258
$5 \cdot 10^6$	0,996	298501	10,78	9,824
$8 \cdot 10^6$	0,998	299252	16,66	$1,517 \cdot 10^{-29}$
$1 \cdot 10^7$	0,999	299438	20,57	1,874
$2 \cdot 10^7$	$1-3,1 \cdot 10^{-4}$	299699	40,14	3,656
$3 \cdot 10^7$	$1-1,4 \cdot 10^{-4}$	299750	59,71	5,439
$5 \cdot 10^7$	$1-5,12 \cdot 10^{-5}$	299777	97,85	8,913
$8 \cdot 10^7$	$1-2,02 \cdot 10^{-5}$	299786	157,6	$1,435 \cdot 10^{-28}$
$1 \cdot 10^8$	$1-1,3 \cdot 10^{-5}$	299789	196,7	1,792
$1 \cdot 10^9$	$1-2 \cdot 10^{-7}$	299792	1958	$1,784 \cdot 10^{-27}$

$c=2,998 \cdot 10^8$ м/с-скорость света в вакууме

m_e - масса электрона, движущегося со скоростью v

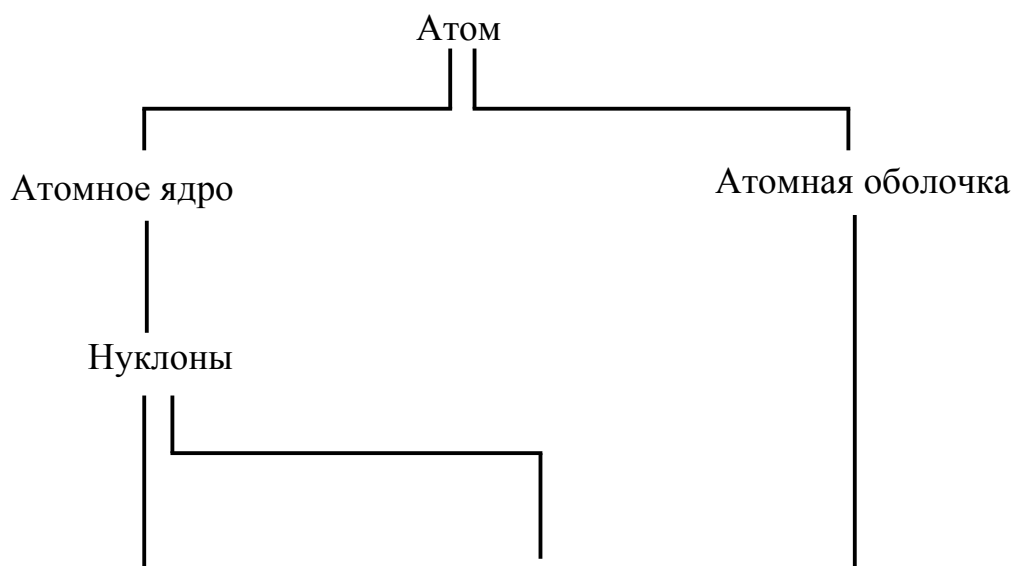
$m_{e0}=9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона

Единицы измерения важнейших физических величин

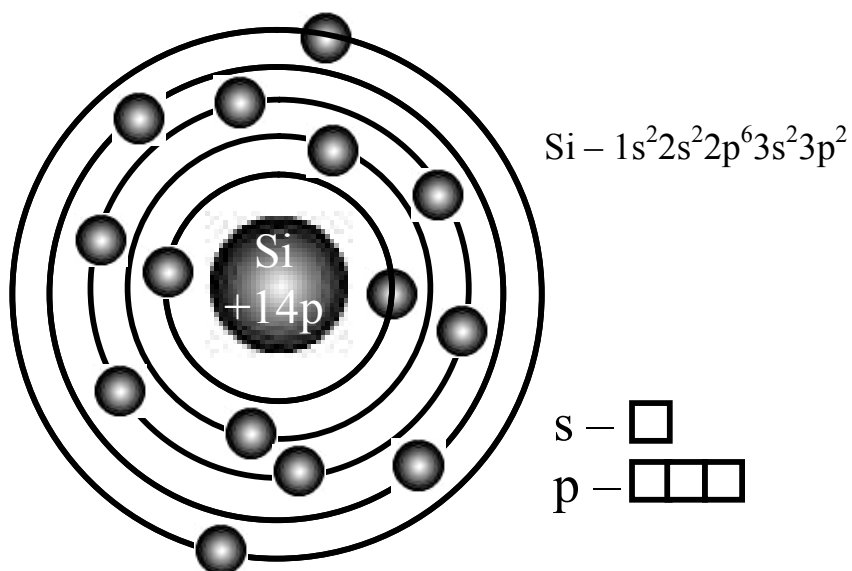
Физическая величина	Обозначение	Единица измерения, краткие обозначения
Длина	l, s	метр, м
Площадь	A	м^2
Объем	V	м^3
Время	t	секунд, с
Частота	ν	герц, Гц=1/с
Частота вращения	n	оборот/секунд
Угловая частота	ω	1/с
Скорость	v	м/с
Масса	m	килограмм, кг
Плотность	ρ	$\text{кг}/\text{м}^3$
Сила	F	ньютон, Н=кг·м/с ²
Вес	G	килограмм-сила, кгс=9,80665Н
Момент силы	M	ньютон-метр, Н·м=кг·м ² /с ²
Коэффициент упругости	k	кгс/см==980,665Н/м
Коэффициент трения	β	кг/с
Работа	W, A	Джоуль, Дж=Н·м
Энергия	W, E	кгс·м=9,80665Дж
Количество теплоты	Q	киловатт-час, кВт·ч=3,6·10 ⁶ Дж электрон-вольт, эВ=1,60219·10 ⁻¹⁹ Дж
Мощность	P	ватт, Вт=Дж/с=кг·м ² /с ²
Давление	p	паскаль, Па=Н/м ² =кг/(с ² ·м)
Импульс	p	Н·с=кг·м/с
Температура по шкале Кельвина	T	кельвин, К градус Кельвина, °K=K
Температура по шкале Цельсия	t	градус Цельсия, °C $t=T-T_0$; $T_0=273,15\text{K}$
Теплоемкость	C	Дж/К=Вт·с/К=Н·м/К=кг·м ² /(с ² ·К)

Теплопроводимость	λ	Вт/(м·К)=кг·м/(с ³ ·К) ккал/(м·ч·К)=1,163Вт/(м·К)
Сила электрического тока	I	ампер, А
Количество электричества, заряд	Q	кулон, Кл=А·с
Электрическое напряжение	U	вольт, В=Вт/А=кг·м ² /(с ³)
Электрическое сопротивление	R	Ом, Ом=В/А=кг·м ² /(с ³ ·А ²)
Электрическая проводимость	G	сименс, См=1/Ом=А/В=с ³ ·А ² /(кг·м ²)
Удельное электрическое сопротивление	ρ	Ом·метр, Ом·м=В·м/А=кг·м ³ /(с ³ ·А ²)
Удельная электрическая проводимость	σ	См/м=1/Ом·м=с ³ ·А ² /(кг·м ³)
Электрическая емкость	C	Фарад, Ф=Кл/В=с ⁴ ·А ² /(кг·м ²)
Напряженность электрического поля	E	В/м=кг·м/(с ³ ·А)
Напряженность магнитного поля	H	А/м эрстед, Э=79,5775 А/м
Магнитный поток	F	вебер, Вб=В·с=кг·м ² /(с ² ·А)
Магнитная индукция	B	Тесла, Тл=Вб/м ² =В·с/м ² =кг/(с ² ·А)
Индуктивность	L	генри, Гн= Вб/А=кг·м ² /(с ² ·А ²)
Поток излучения	Φ_e	Вт=кг·м ² /с ²
Энергетическая сила света	I_e	Вт/ср=кг·м ² /(с ³ ·ср)
Сила света	I	кандела, кд
Яркость	B	кд/м ²
Световой поток	Φ	люмен, лм=кд·ср
Освещенность	E	люкс, лк=лм/м ² =кд·ср/м ²
Световая энергия	Q	люмен·секунд, лм·с=с·кд·ср
Количество вещества	n	моль, моль
Молярная масса	M	кг/мол
Молярный объем	V_m	м ³ /мол
Молярная теплоемкость	C_m	Дж/(моль·К)=кг·м ² /(с ² ·моль·К)

Строение атома



Элементарные частицы	Протоны	Нейтроны	Электроны
Заряд Q	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ кл	0	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ кл
Масса покоя m_0	$1836m_e$	$1839m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг = m_e
Обозначение	p	n	e



§3.8.3. ДАВЛЕНИЕ ПАРОВ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

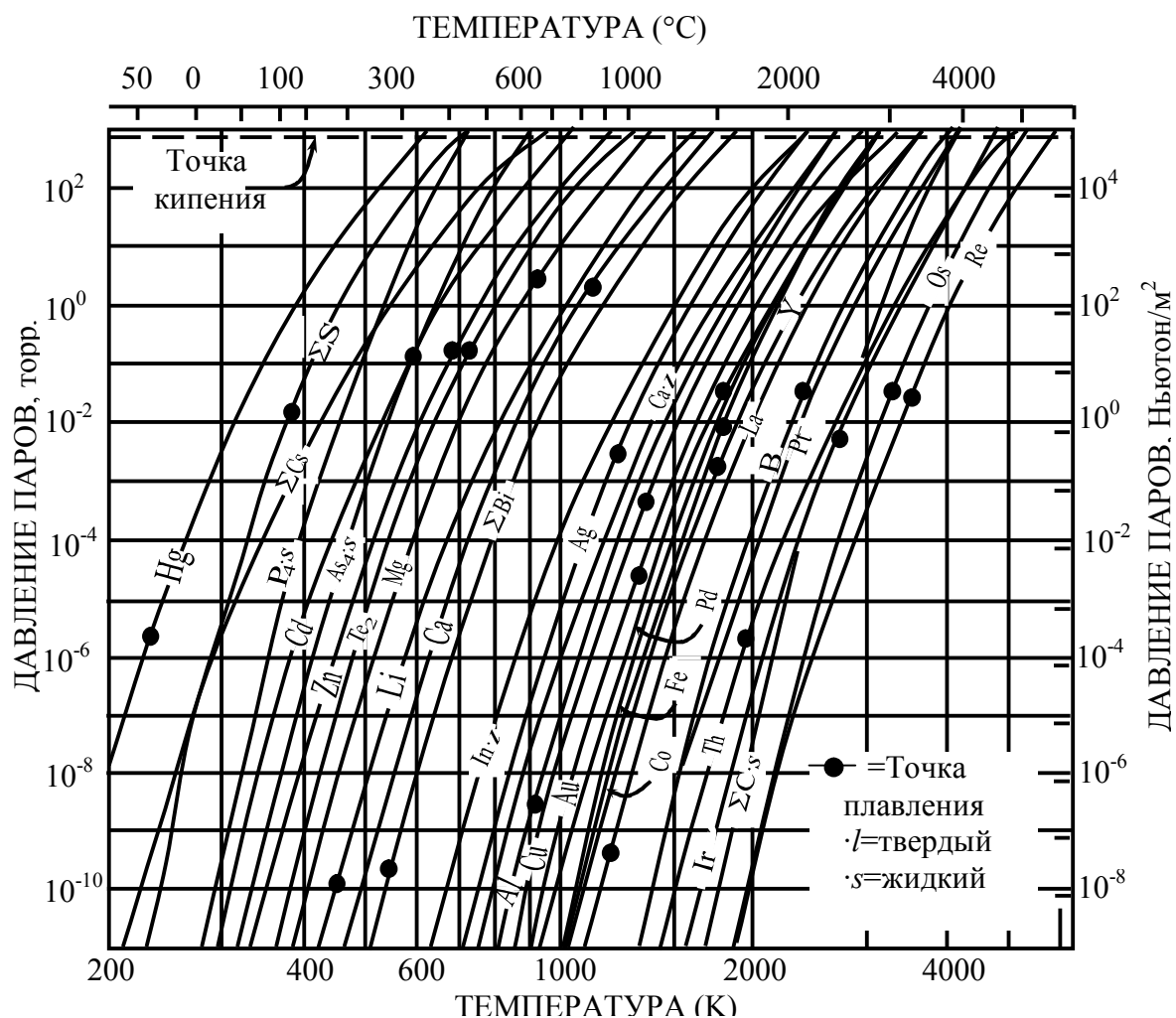


Рис. 3.2. Зависимость давления паров от температуры твердых элементов

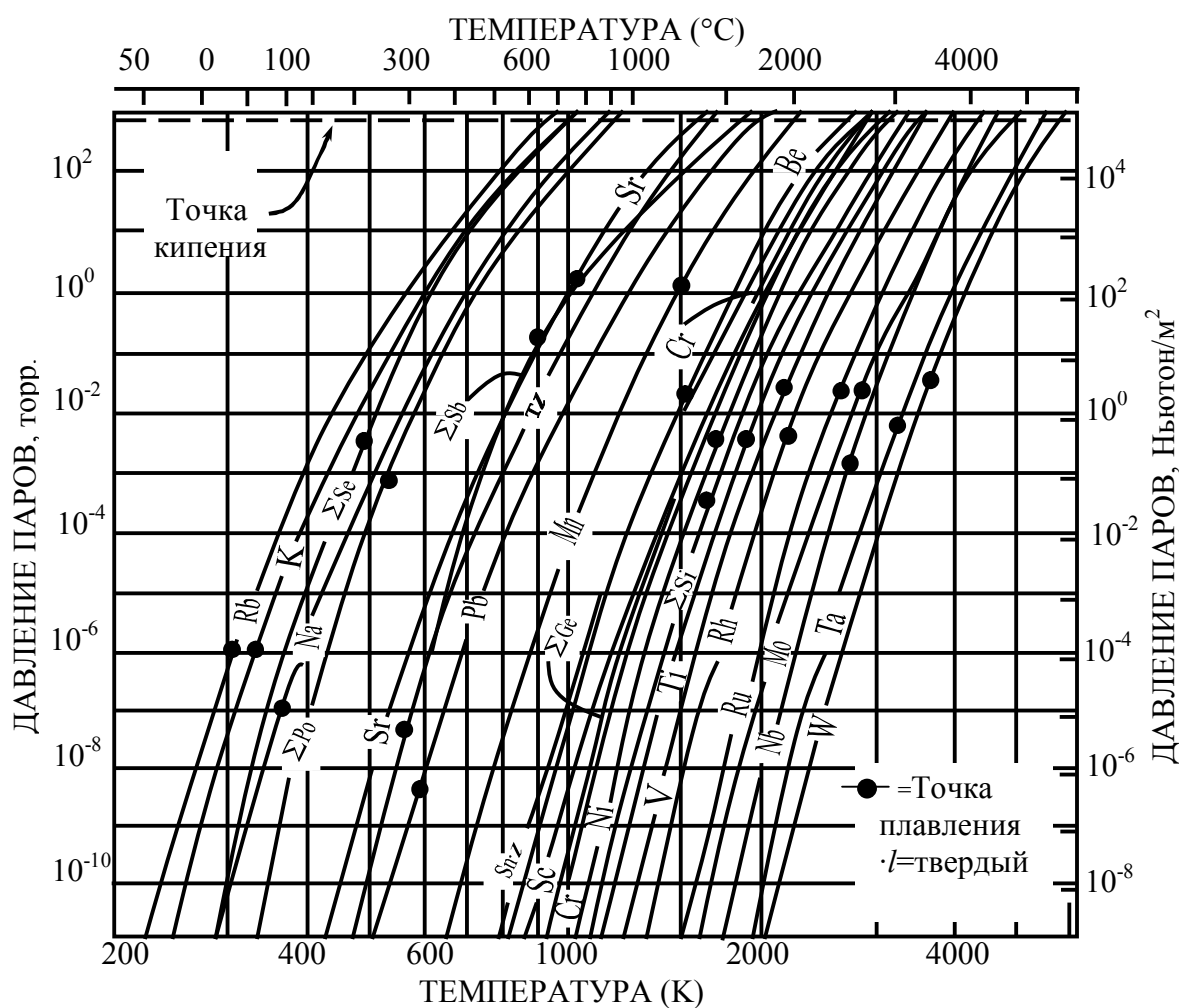


Рис. 3.3. Зависимость давления паров от температуры для жидких элементов

§3.8.4. СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

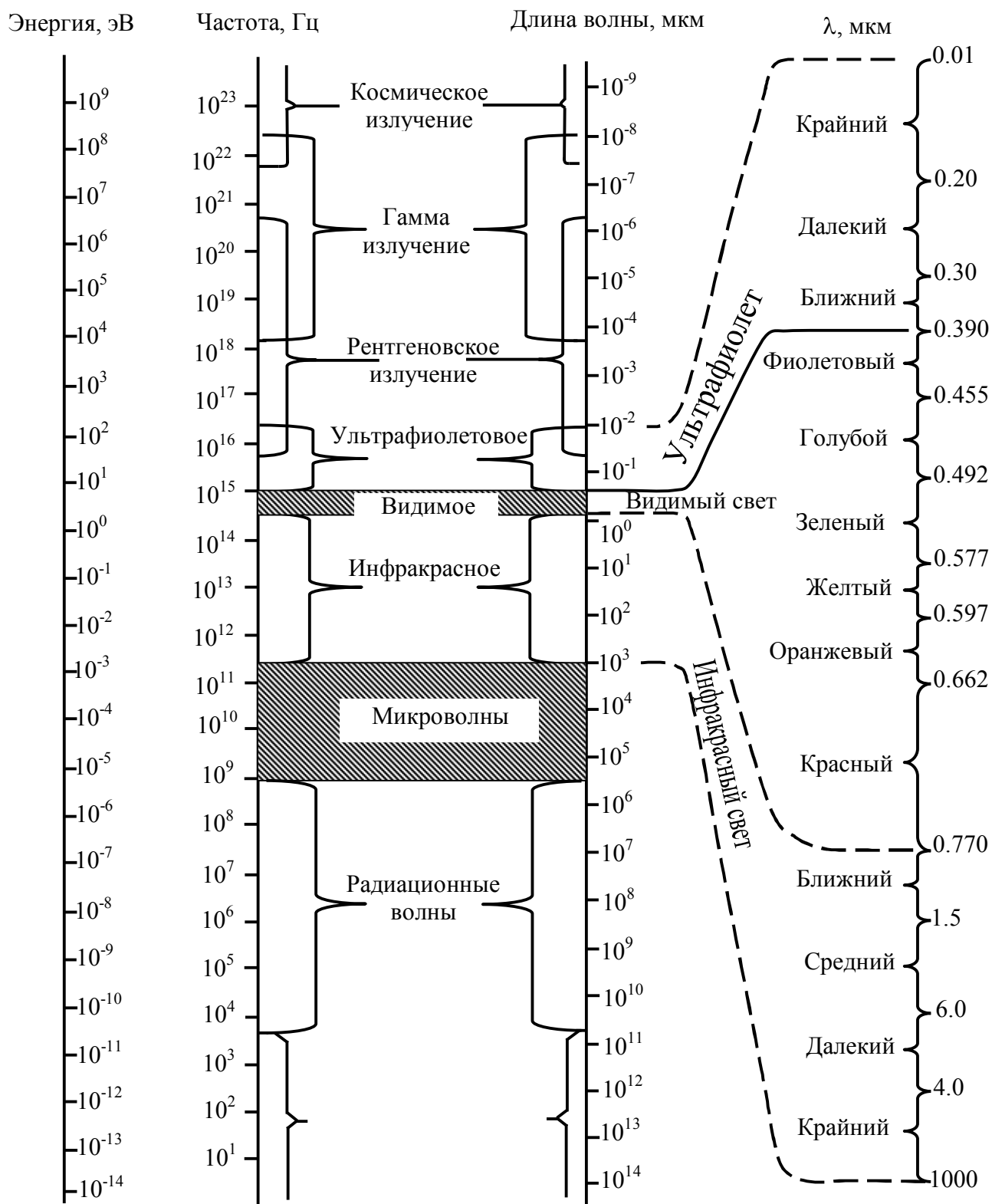


Рис. 3.3. Диаграмма электромагнитного спектра.

§3.8.5. ИЗОТОПЫ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Первый, наиболее легкий элемент периодической системы Менделеева – водород имеет три изотопа: два стабильных (протий и дейтерий) и один радиоактивный – тритий (период его полураспада 12,3 года)

Таблица 3.8.3.1

Изотопы водорода

Показатели	Название изотопа		
	Протий* (легкий водород)	Дейтерий** (тяжелый водород)	Тритий *** (сверхтяжелый водород)
Название ядра атома водорода	протон	дейтрон	тритон
Число протонов в ядре	1	1	1
Число нейтронов в ядре	-	1	2
Число электронов в атоме	1	1	1
Массовое число изотопа	1	2	3
Встречающиеся обозначения изотопа	H; ${}^1\text{H}$; ${}^1_1\text{H}$; p	${}^2\text{H}$; ${}^2_1\text{H}$; D; ${}^2\text{D}$; ${}^2_1\text{D}$; d	${}^3\text{H}$; ${}^3_1\text{H}$; T; ${}^3\text{T}$; ${}^3_1\text{T}$; t
Природный изотопный состав водорода, %	99,985	≈0,0156	≈10 ⁻¹⁵ -10 ⁻¹⁶
Примечание 1. В соединениях с кислородом протий образует обычную воду (H₂O), дейтерий – тяжелую (D₂O), тритий – сверхтяжелую воду (T₂O). 2. Тяжелая вода содержится в природной воде в очень небольшом количестве (0,016%): на одну молекулу тяжелой воды приходится примерно 6800 молекул обычной воды. Сверхтяжелая вода в природе образуется в ничтожно малых количествах (например, в дождевой воде 1 атом трития приходится примерно на 10¹⁸ атомов протия). Во всей воде Земли содержится лишь 15 – 20 кг сверхтяжелой воды. 3. В промышленности тритий получают при облучении лития нейтронами. * Протий от греч. protos – первый. ** Дейтерий от греч. deuterios – второй. ***Тритий от греч. tritos – третий.			

Таблица 3.8.3.2

Изотопный состав некоторых элементов

Атомный номер элемента	Обозначение элемента	Обозначение изотопа	Содержание изотопа в данном эле- менте, %	В состав изотопа входят		
				электронов	протонов	нейтронов
2	He	${}^3_2\text{He}$	0,0001	2	2	1
2	He	${}^4_2\text{He}$	99,9999	2	2	2
3	Li	${}^6_3\text{Li}$	7,52	3	3	3
3	Li	${}^7_3\text{Li}$	92,48	3	3	4
4	Be	${}^9_4\text{Be}$	100	4	4	5
5	B	${}^{10}_5\text{B}$	19,6	5	5	5
5	B	${}^{11}_5\text{B}$	80,4	5	5	6
6	C	${}^{12}_6\text{C}$	98,88	6	6	6
6	C	${}^{13}_6\text{C}$	1,12	6	6	7
7	N	${}^{14}_7\text{N}$	99,64	7	7	7
7	N	${}^{15}_7\text{N}$	0,36	7	7	8
8	O	${}^{16}_8\text{O}$	99,759	8	8	8
8	O	${}^{17}_8\text{O}$	0,037	8	8	9
8	O	${}^{18}_8\text{O}$	0,204	8	8	10
9	F	${}^{19}_9\text{F}$	100	9	9	10
....						
92	U	${}^{234}_{92}\text{U}$	0,0056	92	92	142
92	U	${}^{235}_{92}\text{U}$	0,7205	92	92	143
92	U	${}^{238}_{92}\text{U}$	99,2739	92	92	146

§3.8.6. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕЛ

Изменение массы тела при его движение. Масса тела m , движущегося со скоростью v , возрастает с увеличением скорости. Эта зависимость массы тела от скорости выражается формулой:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

где m_0 – масса тела в покое; c – скорость распространения света в вакууме. График, выражающий зависимость массы тела от скорости его движения, показан на рис. 3.8.6.1.

В таблице 3.8.6.1 при расчетах по указанной формуле значение скорости света c округлено и принято 300000 км/с.

Скорость v движения тела	Масса m движущего тела при указанной скорости
8,0 км/с (1-я космическая скорость)=0,000027 с	$m=1,000000000355m_0$
11,2 км/с (2-я космическая скорость)=0,000037 с	$m=1,000000000697m_0$
16,7 км/с (3-я космическая скорость)=0,000056 с	$m=1,00000000155m_0$
30 км/с (скорость движения Земли вокруг Солнца)=0,0001 с	$m=1,000000005m_0$
30000 км/с=0,1с	$m=1,005m_0$
70000 км/с (скорость электронов в телевизионной трубке) $\approx 0,23$ с	$m=1,032m_0$
150000 км/с=0,5 с	$m=1,155m_0$
270000 км/с=0,9	$m=2,294m_0$
297000 км/с=0,99 с	$m=7,089m_0$
299700 км/с=0,999 с	$m=22,366m_0$
299999,7 км/с=0,999999 с	$m=706,667m_0$
299999,97 км/с=0,9999999 с	$m=2209,709m_0$

Изменение длины тела при его движении. Длина тела l , движущего со скоростью v , уменьшается с увеличением скорости. Эта зависимость продольных размеров тела от скорости выражается формулой:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (2)$$

где l_0 – длина тела в покое; c – скорость распространения света в вакууме. График, выражающий зависимость массы тела от скорости его движения, показан на рис. 3.8.6.2.

В таблице 3.8.6.2 при расчетах по указанной формуле значение скорости света c округлено и принято 300000 км/с.

Скорость v движения тела	Длина l движущего тела при указанной скорости
8,0 км/с (1-я космическая скорость)=0,000027 с	$l = 0,999999999645 l_0$
11,2 км/с (2-я космическая скорость)=0,000037 с	$l = 0,999999999303 l_0$
16,7 км/с (3-я космическая скорость)=0,000056 с	$l = 0,99999999845 l_0$
30 км/с (скорость движения Земли вокруг Солнца)=0,0001 с	$l = 0,99999995 l_0$
30000 км/с=0,1с	$l = 0,995 l_0$
70000 км/с (скорость электронов в телевизионной трубке)≈0,23 с	$l = 0,966 l_0$
150000 км/с=0,5 с	$l = 0,866 l_0$
270000 км/с=0,9	$l = 0,436 l_0$
297000 км/с=0,99 с	$l = 0,141 l_0$
299700 км/с=0,999 с	$l = 0,0447 l_0$
299999,7 км/с=0,999999 с	$l = 0,00142 l_0$
299999,97 км/с=0,9999999 с	$l = 0,00045 l_0$

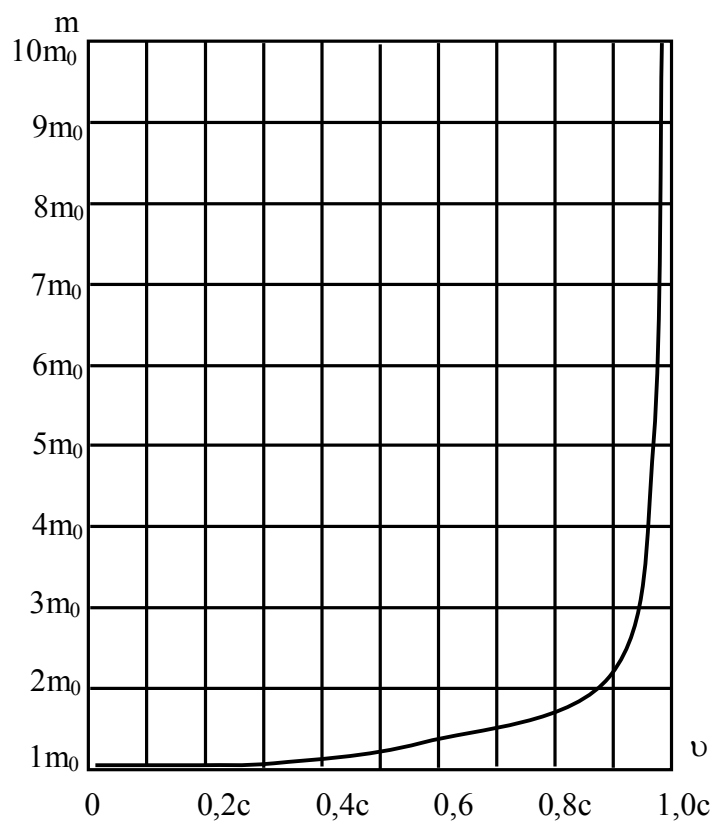


Рис. 3.8.6.1. Зависимость массы тела от скорости его движения.

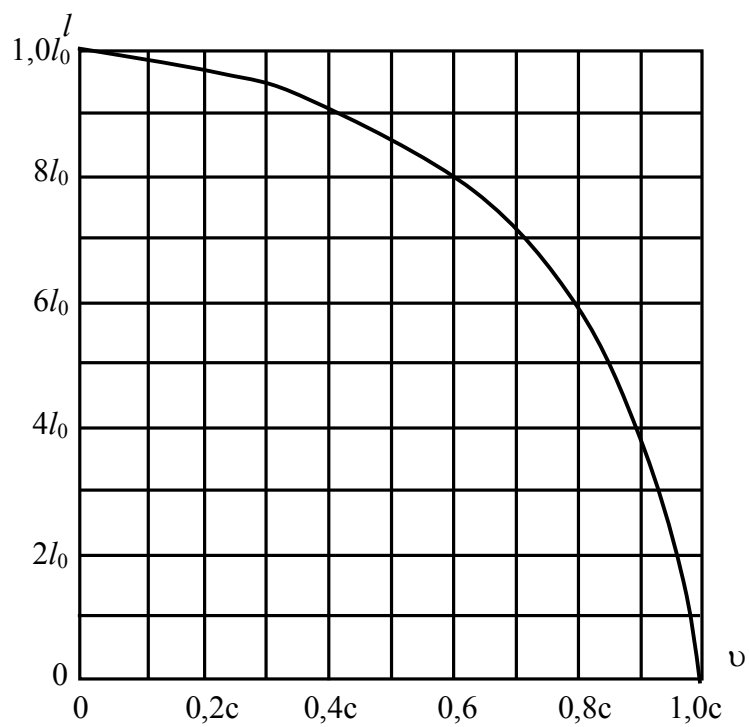


Рис. 3.8.6.2. Зависимость длины тела от скорости его движения.

Литература:

1. **Ч. Китель** Введение в физику твердого тела. Под ред. Гусева, М.:1963.
2. **Н. Ашкрофт, Н. Мертап** Физика твердого тела. Под ред. Каганова, М.: Мир, 1979.
3. **М.П. Шаскольская** Кристаллография. М.: Высшая школа, 1984.
4. **Рейвн** Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. Под редакцией С.Н. Горина, М: Мир, 1984.
5. **Бьюб Р.** Физика и химия соединений $A^{II}B^{VI}$. М.: Мир, 1970.
6. **К.Д. Глинчук.** Полупроводниковая техника и микроэлектроника Примеси в германии, кремнии и арсениде галлия. 1972 . №7 57-70с.
7. **А. Милнс** Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1972.
8. **Р. Бьюб** Фотопроводимость твердых тел. М.: 1962 .
9. Физика и химия соединений $A^{II}B^{VI}$. Под ред. **С.А Медведева**, 1970.
10. Полупроводниковые соединений $A^{III}B^V$. Под ред. **Роберта Виллардсона и Харвия Гёринга**, М: 1962.
11. **К. Хилсум, А. Рауз – инг** Полупроводники типа $A^{III}B^V$ М: 1963.
12. **А.С. Енохович** Справочник по физике и техники, М: Просвещение, 1989.
13. **В.И. Фистуль** Введение в физику полупроводников, М: Высшая школа, 1975.
14. Технология полупроводниковых соединений. Под ред. **Нашельского**, М: Металлургия, 1962.
15. **Л. Росада** Физическая электроника и микроэлектроника. М: Высшая школа, 1991.
16. **Т.Д. Джафаров** Дефекты и диффузия в эпитаксиальных структурах. Ленинград, Наука, 1978.
17. **М. Омеляновский, В.И. Фистуль** Примеси переходных металлов в полупроводниках. М.: Металлургия, 1981 .
18. **Б.И. Болтакс** Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Ленинград, Наука, 1971.
19. **В.В. Пасынков, В.С. Сорокин** Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1981 .
20. **М.К. Бахадирханов** Докторская диссертация. Ленинград, 1982.
21. **А.Т. Мамадалимов** Докторская диссертация. 1975.
22. **Stanley Middleman** Process engineering analysis in semiconductor device fabrication. New York, 1993 .
23. **Jacob Millman**, Ph.D. Microelectronics. New York Book company, 1994.
24. **S.M. She** Physics of semiconductor divices, New Delhi, 1993.
25. **П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов** Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000.

26. **Adolf Goerzherger, Joachim Knobloch, Bepnhard Voss** Crystalline silicon solar cells, New York, 1998.
27. **С.З. Зайнобиддинов, А.Т. Тешабоев** Қаттиқ жисмлар физикаси. Тошкент, 2000.
28. **Ф.М. Толипов** Докторская диссертация. Ташкент, 2002.
29. **Н.Ф. Зикриллаев** Докторская диссертация. Ташкент, 2002.
30. **Х.М. Илиев** Докторская диссертация. Ташкент, 2002.
31. Silicon compounds: silanes and silicones. 2004.
32. Solar energy, Special issues thin film PV, v. 77, №6, 2004.
33. www.jhsilicon.com
34. www.siliconquest.com
35. www.svmi.com)
36. www.sumcosi.com
37. www.silicon-wafers.com
38. www.girmet.com
39. www.Comsecore.com
40. www.fcm-semicon.com
41. www.waferworld.com