

Министерство высшего и среднего специального образования
Республики Узбекистан

Ташкентский государственный технический университет
имени Абу Райхана Беруни
Факультет: «Электроника и Автоматика»

Кафедра: «Электроника и Микроэлектроника»

УДК 621.315.592

И.Б. Ортиков

**На тему: "СОБРАТЬ ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СТРУКТУРЫ
ПО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ МАТЕРИАЛАМ"**

ДИССЕРТАЦИОННАЯ РАБОТА
на соискание степени магистра технических наук

Заведующий кафедры:

проф. Бахадирханов М. К.

Руководитель:

преп. Илиев Х.

Ташкент – 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | | |
|------------------|--|-----|
| | ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| Глава I. | ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ | |
| §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 | Окись 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 | |
| §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 | |
| §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 | ВАХ р – n перехода, барьера Шоттки | 167 |
| §3.7 | Основные параметры фотоэлементов | 168 |
| | 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, автоматизики, 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 широкомасштабное 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 автоматизики 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 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 электронном 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.

Работа 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 300К (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 |
| IV-VI | ZnS | Сульфид цинка Zinc sulfide | W | a=3,82; c=6,26 |
| | 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 1 см 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 , cm ⁻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 , cm ⁻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 300К, 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, см^{-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 сопротив- ление 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 ли- нейного расширения, $\Delta L/L\Delta T$, $^\circ\text{C}^{-1}$ Linear coefficient of thermal expan- sion, $\Delta L/L\Delta T$, $^\circ\text{C}^{-1}$ | $5,8 \cdot 10^{-6}$ | $2,6 \cdot 10^{-6}$ | $6,86 \cdot 10^{-6}$ | $4,7 \cdot 10^{-6}$ | $5,7 \cdot 10^{-6}$ | $4 \cdot 10^{-6}$ | $6,2 \cdot 10^{-6}$ | |

Окончание табл. 1.1.3.

| | | | | | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------|
| Точка плавления, °С Melting point, °С | 937 | 1415 | 1238 | 1467 | 1750 | 1041 | 1020 | 1780 |
| Время жизни неосновных носителей, с Minority carrier lifetime, s | 10^{-3} | $2,5 \cdot 10^{-3}$ | $\sim 10^{-8}$ | | | | | |
| 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·°С) Specific heat, J/(g·°С) | 0,31 | 0,7 | 0,35 | | | | | |
| Теплопроводность при 300К, Вт/(см·°С) Thermal conductivity at 300К, W/(cm·°С) | 0,6 | 1,5 | 0,46 | | 0,2 | 0,075 | 0,026 | |
| Коэффициент тепловой диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$ Thermal diffusivity, $\text{см}^2/\text{с}$ | 0,35 | 0,9 | 0,44 | | | | | |
| Давление паров, Па Vapor pressure, Pa | 1 при 1330°С 10^{-6} при 760°С | 1 при 1650°С 10^{-6} при 900°С | 100 при 1050°С 1 при 900°С | | 3,8 при тем. плавления | 0,23 при тем. плавления | 3,7 при тем. плавления | |

Свойства важнейших полупроводников
Properties of important semiconductors

| Полупроводник | | Ширина запрещенной зоны (эВ) | | Подвижность при 300К (см ² /В·с) | | Зона band | Эффективная масса m*/m ₀ | | ε _s /ε ₀ |
|---------------|-------|------------------------------|-------|---|-------|--------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|
| Semiconductor | | Bandgap (eV) | | Mobility at 300K (cm ² /V·c) | | | Effective mass m*/m 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 |
| II-VI | InP | 1,35 | 1,42 | 4600 | 150 | D | 0,077 | 0,64 | 12,4 |
| | 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 |
| IV-VI | ZnS | 3,68 | 3,84 | 165 | 5 | D | 0,40 | | 5,2 |
| | 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 $\frac{1}{3}.\frac{1}{3}.\frac{1}{3}$.

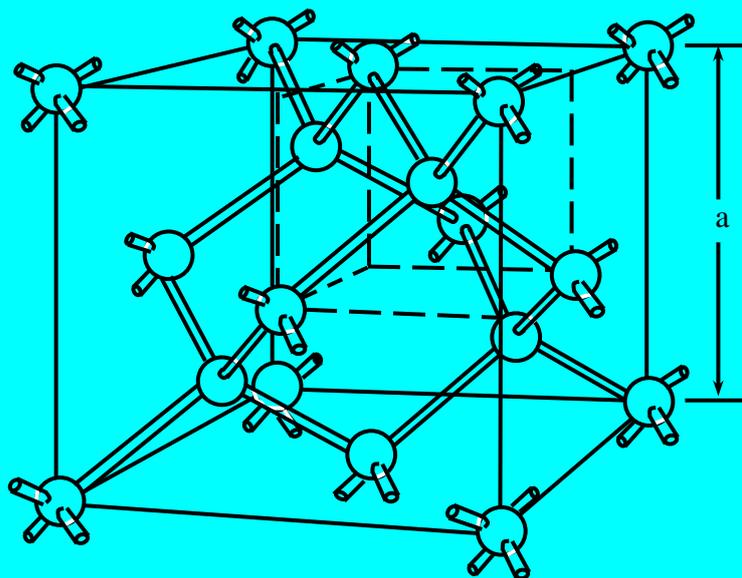


Рис. 1.2.1. Кристаллическая решетка алмаза
Crystal lattice of diamond.

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.

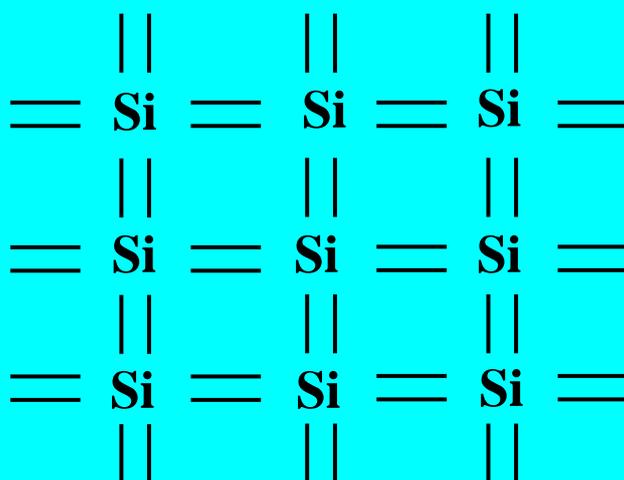


Рис 1.2.2. Ковалентная, тетраэдрическая связь.

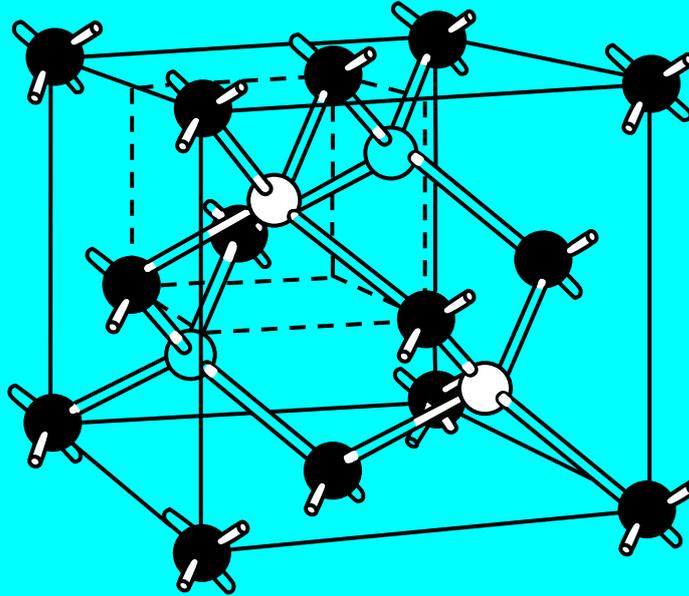


Рис. 1.2.3. Кристаллическая решетка цинковой обманки.
Crystal lattice of zincblende.

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 $A^{III}B^V$.

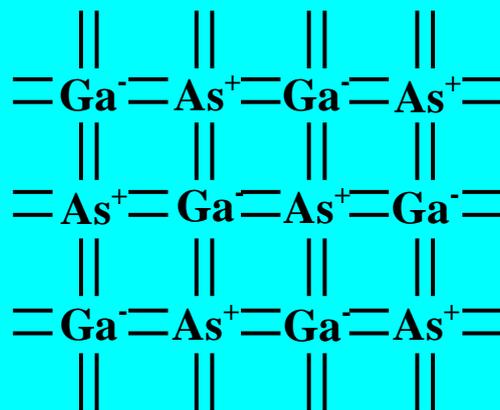


Рис 1.2.4. Ионно – ковалентная, тетраэдрическая связь полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$

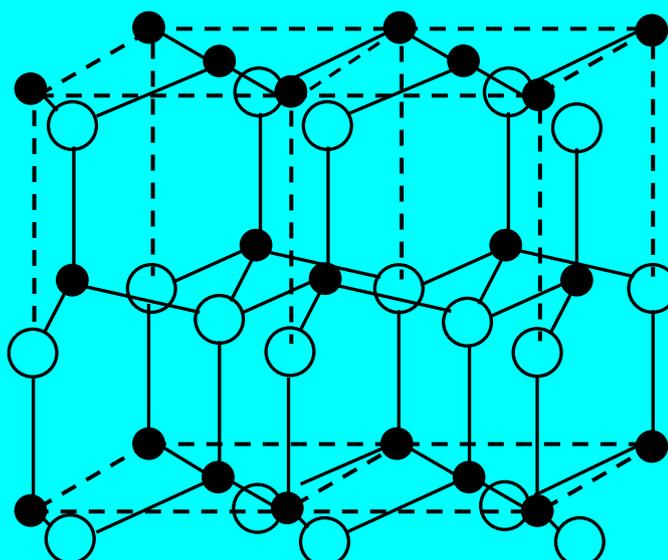


Рис. 1.2.5. Кристаллическая решетка вюрцита.
Crystal lattice of wurtzite.

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 $A^{II}B^{VI}$.

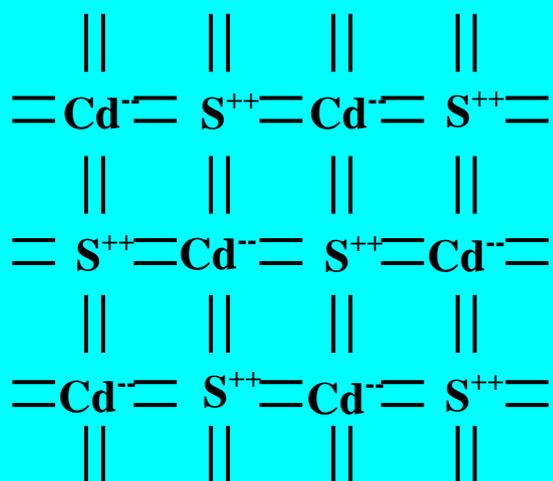


Рис. 1.2.6. Ионно – ковалентная тетраэдрическая связь полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$

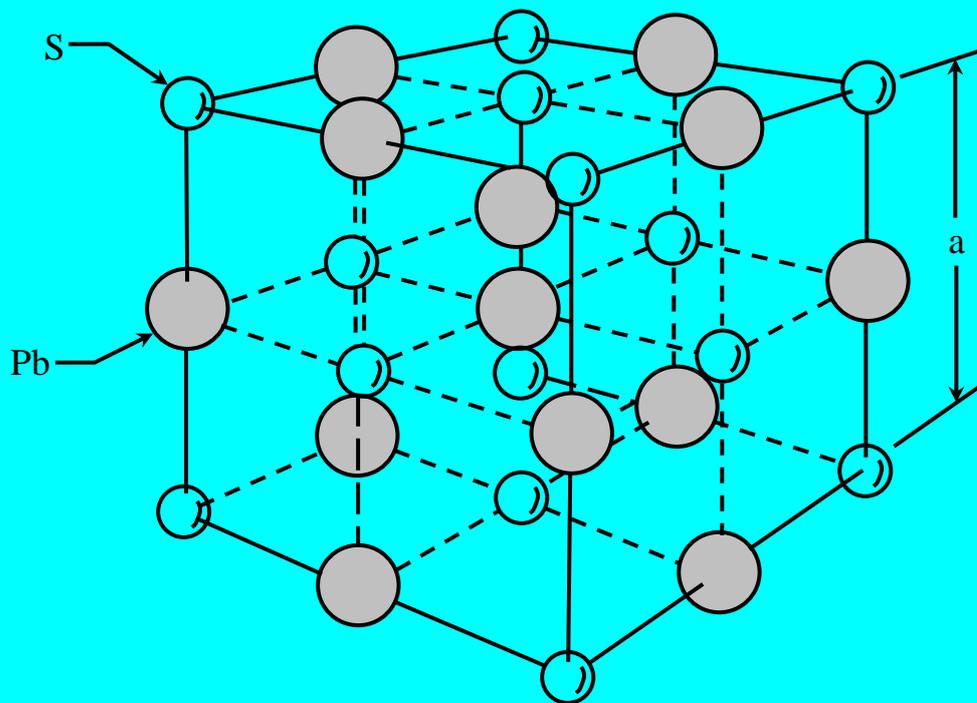


Рис. 1.2.7. Кристаллическая решетка каменной соли.
Crystal lattice of rock salt.

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 получают 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

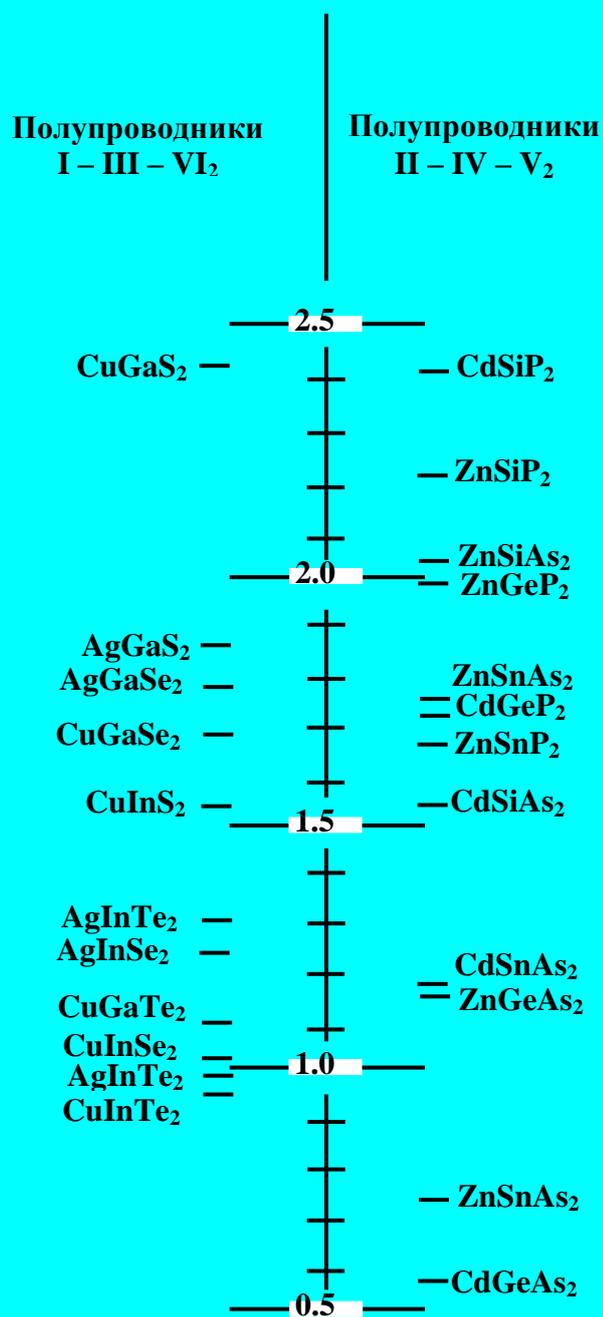


Рис.1.3.1 Ширина запрещенной зоны полупроводников I-III-VI₂ и II-IV-V₂.

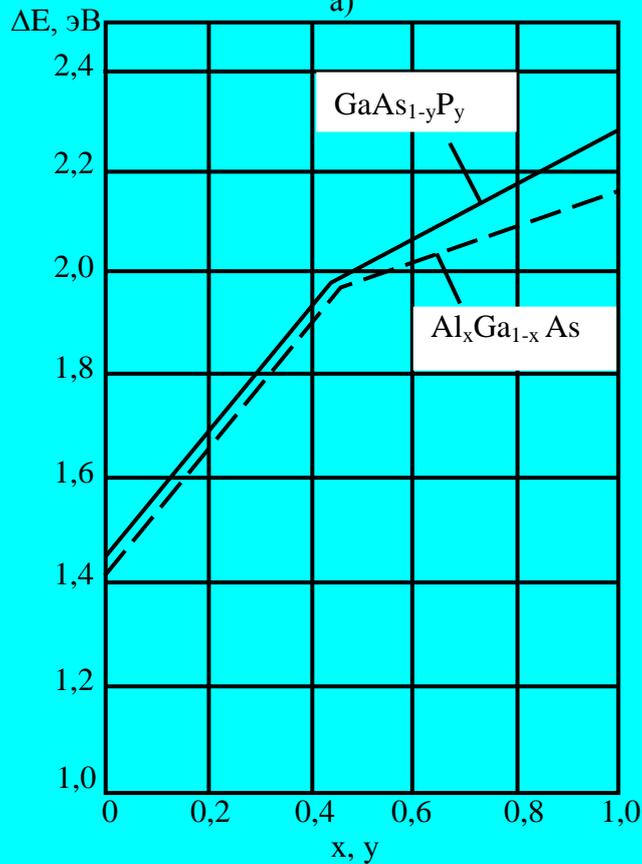
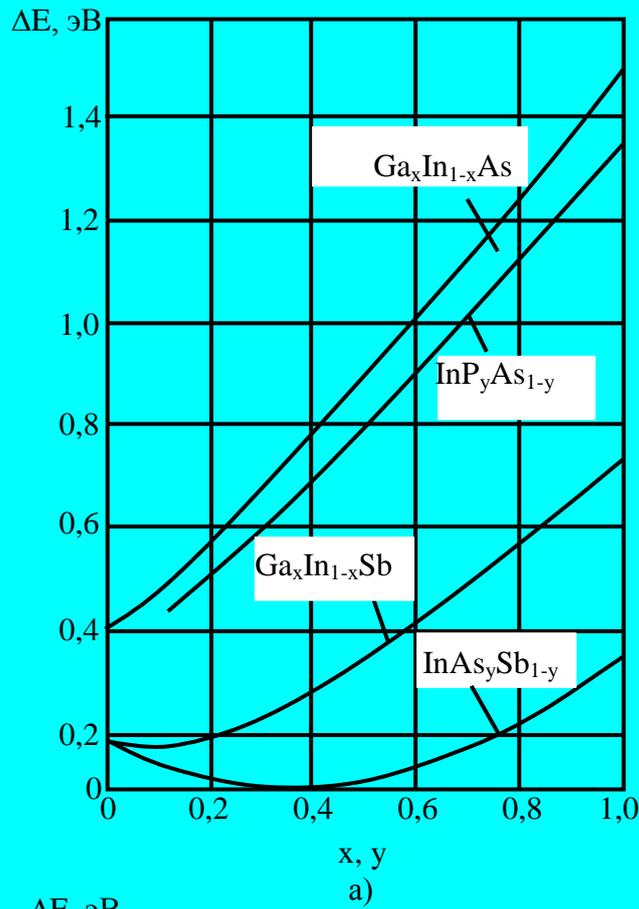


Рис. 1.3.2. Зависимость ширины запрещенной зоны от состава твердых растворов на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ ($T=300\text{K}$):
 а – соединения – партнеры, имеющие одинаковую зонную структуру; б – соединения – партнеры, имеющие различную зонную структуру

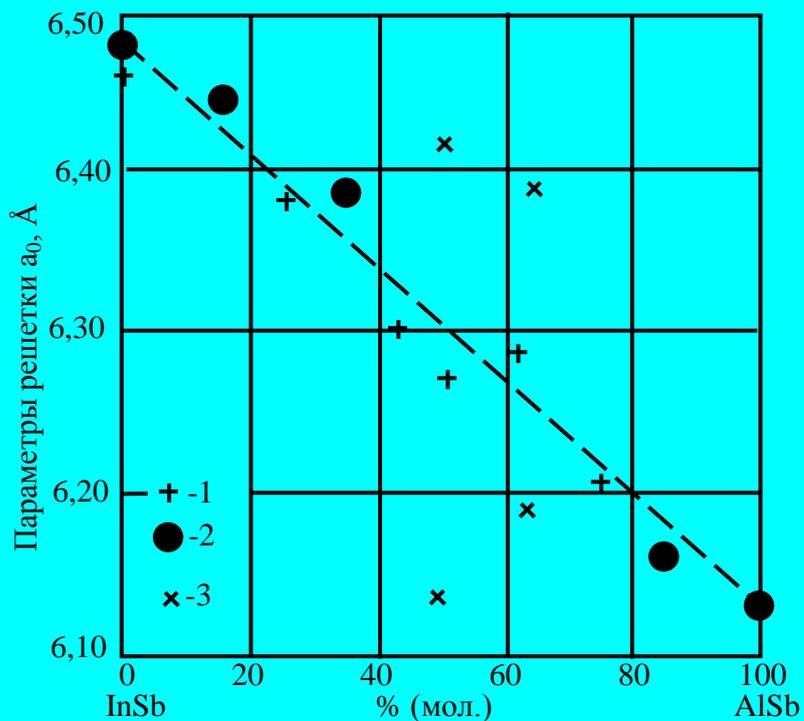


Рис. 1.3.3. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы AlSb – InSb.

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)

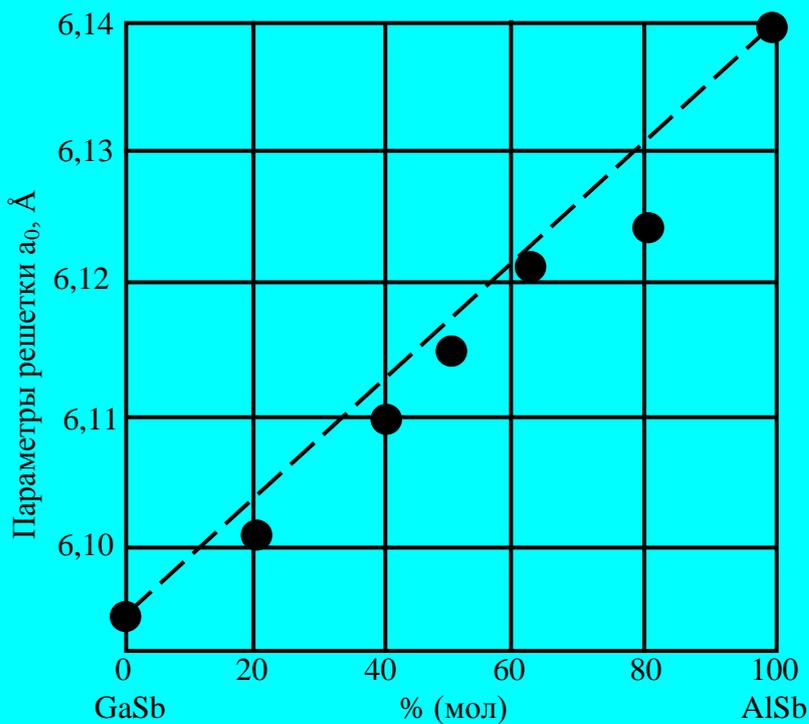


Рис. 1.3.4. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы AlSb – GaSb.

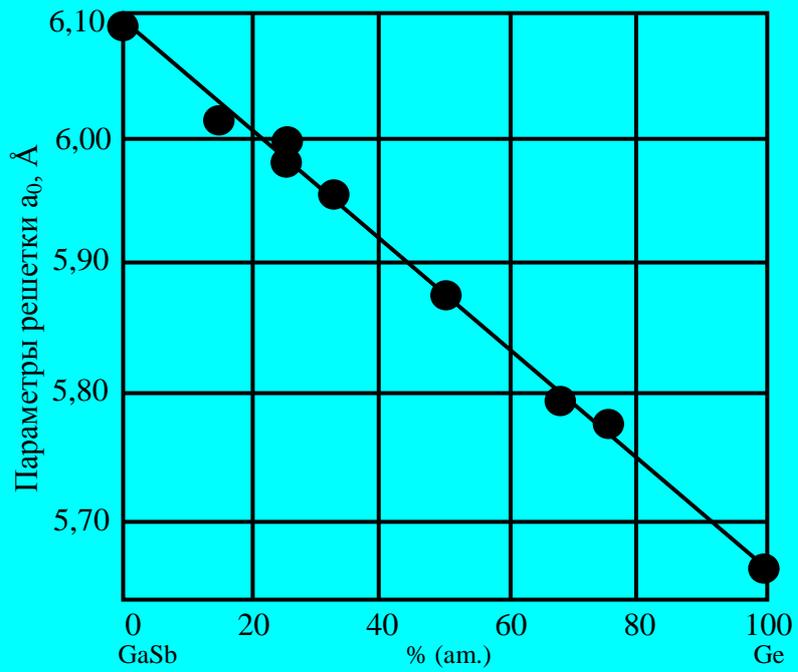


Рис. 1.3.5. Изменение параметров решетки при изменении состава закаленных сплавов Ge – GaSb.

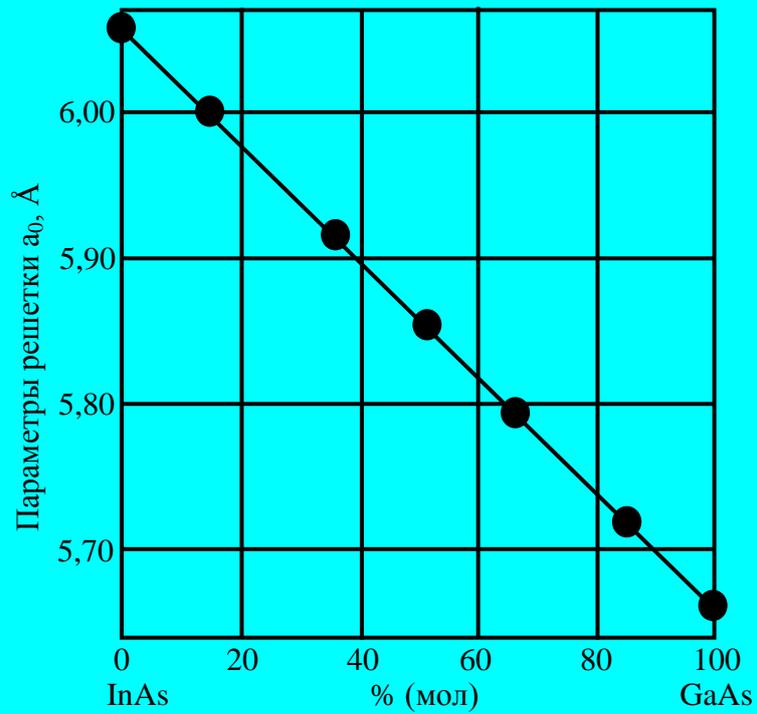


Рис. 1.3.6 Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы GaAs – InAs.

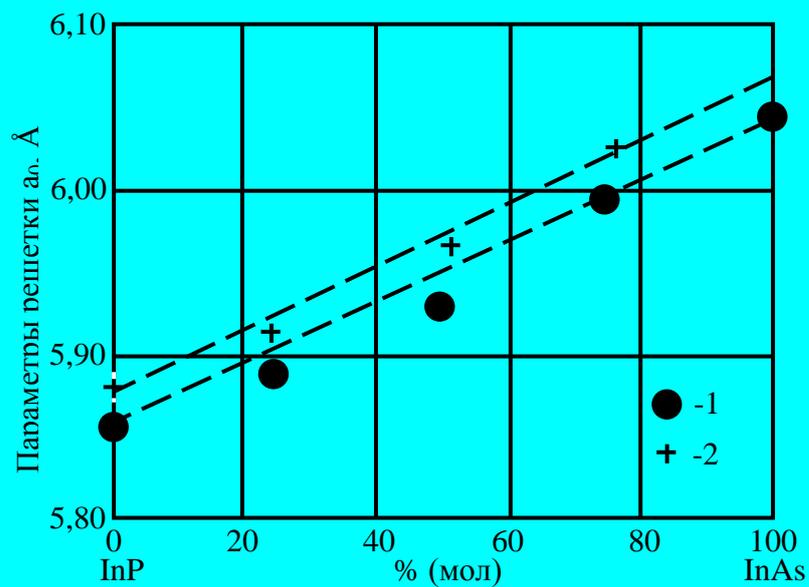


Рис. 1.3.8. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы InAs – InP.
1 – по данным Фольберга; 2 – по данным Кестера и Ульриха

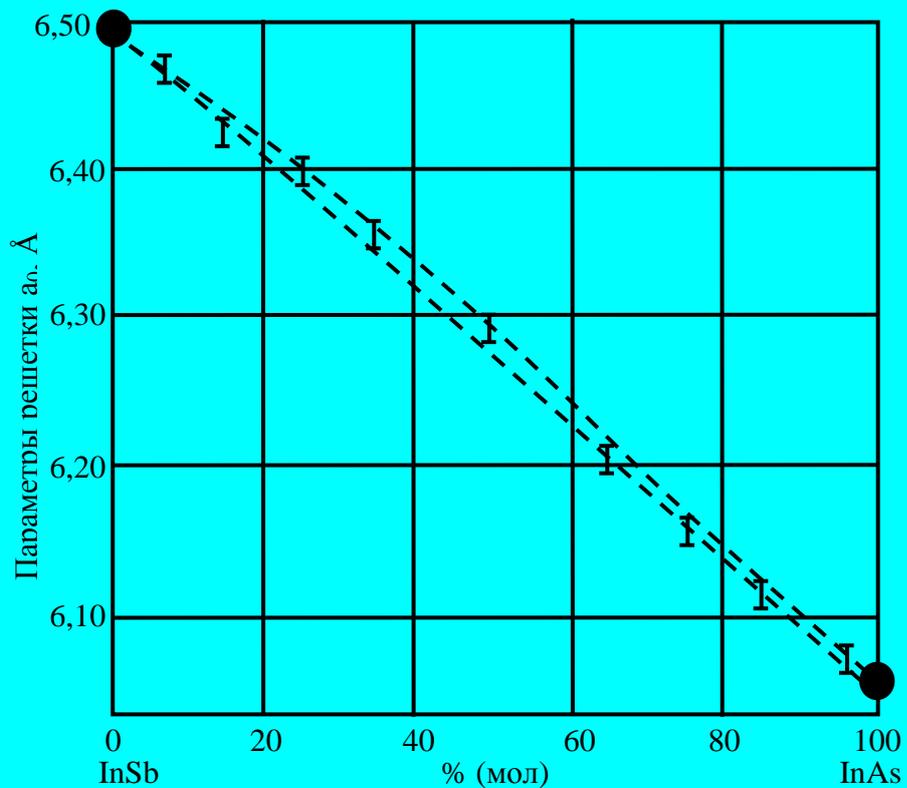


Рис. 1.3.9. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы InAs – InSb.

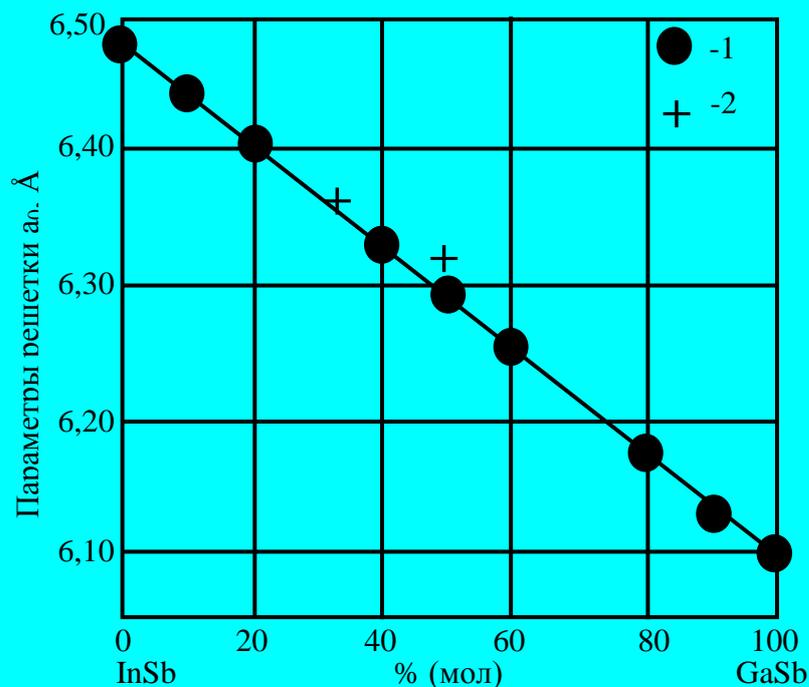


Рис. 1.3.10. Изменение параметров решетки в зависимости от состава системы GaSb – InSb.

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 непрямозонную. 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 непрямую зонную 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 непрямозонных полупроводниках рекомбинация носителей заряда осуществляется с участием оптических и акустических фононов. Ниже приведены энергетические зоны некоторых полупроводников.

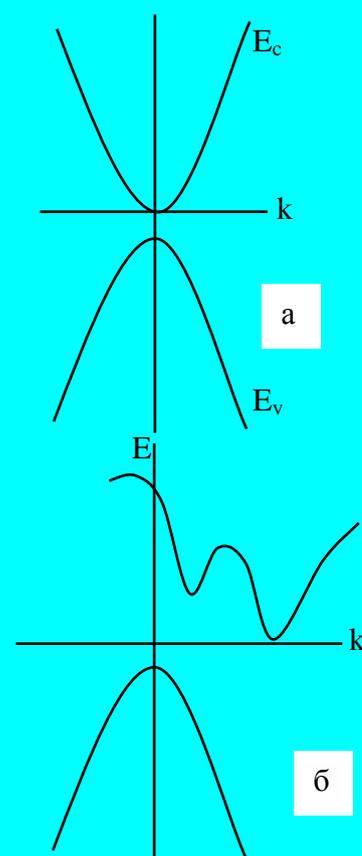


Рис. 1.4.1. Модель прямой (а) и непрямой (б) энергетической структуры полупроводников

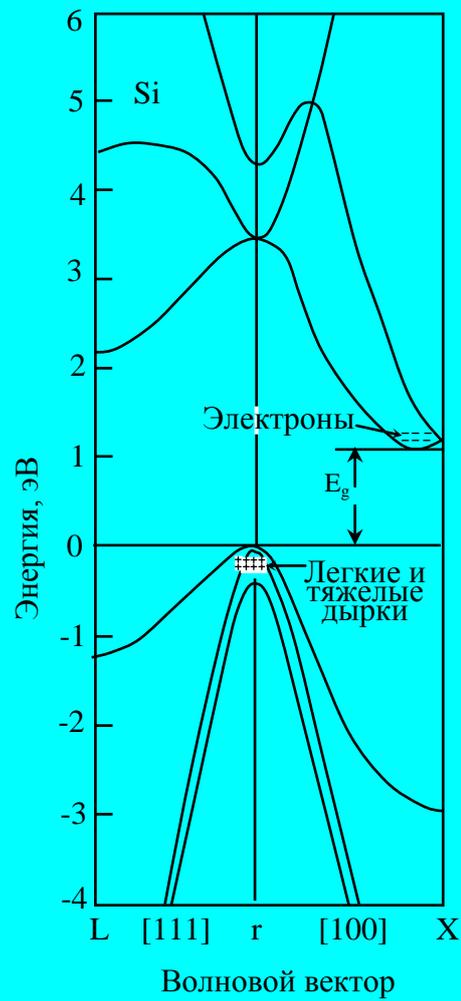


Рис. 1.4.1. Энергетические зоны для Si.
Energy – band structure of Si.

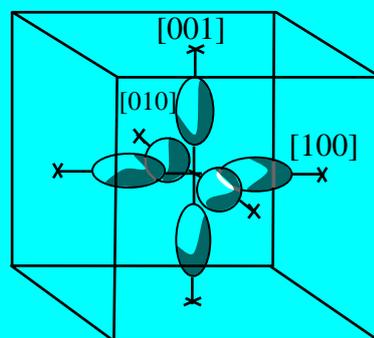


Рис. 1.4.2. Форма поверхностей постоянной энергии для Si.
Shape of constant energy surface in Si.

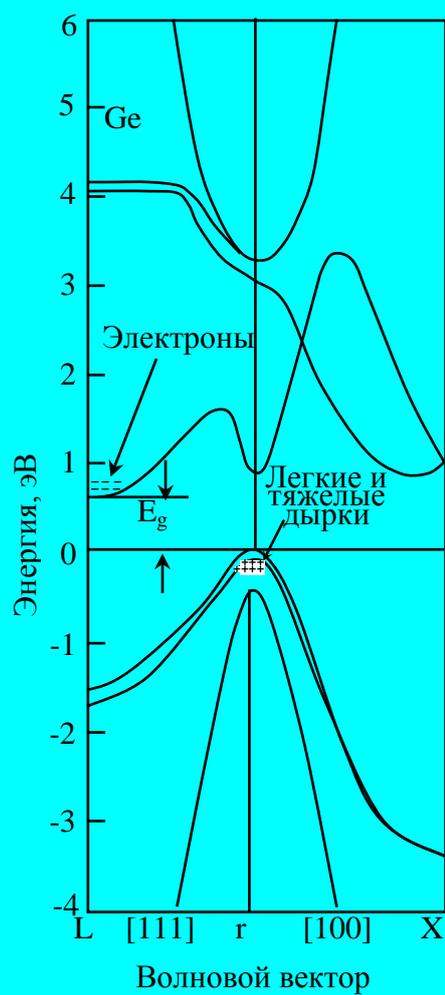


Рис. 1.4.3. Энергетические зоны для Ge.
Energy – band structure of Ge.

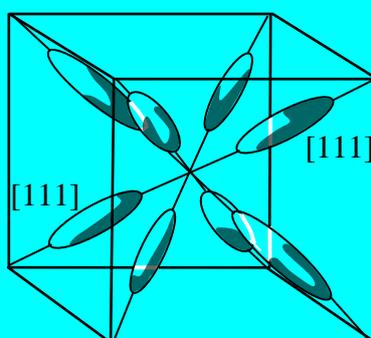


Рис. 1.4.4. Форма поверхностей постоянной энергии для Ge.
Shape of constant energy surface in Ge.

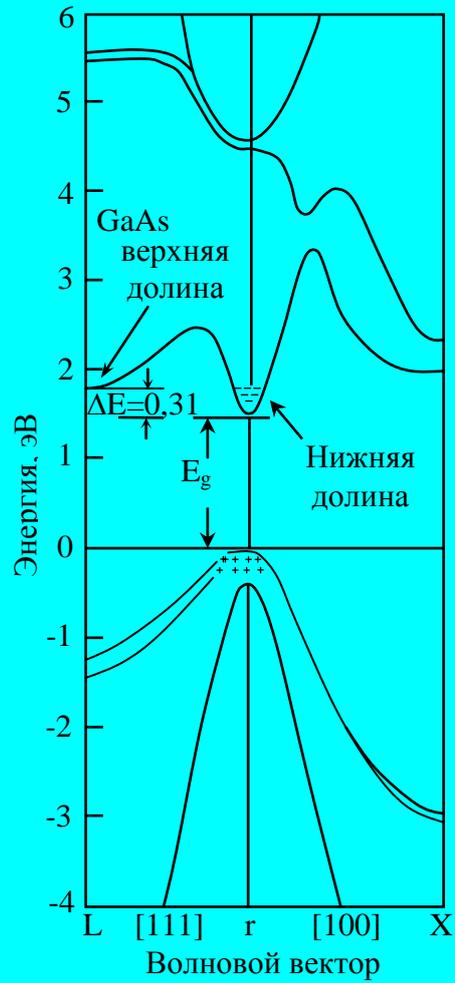


Рис. 1.4.5. Энергетические зоны для GaAs.
Energy – band structure of GaAs.

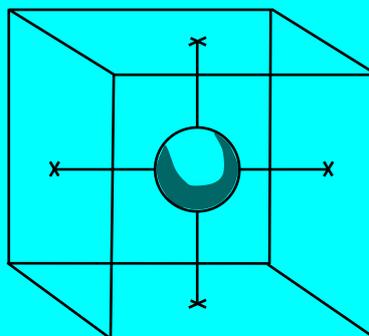


Рис. 1.4.6. Форма поверхностей постоянной энергии для GaAs.
Shape of constant energy surface in GaAs.

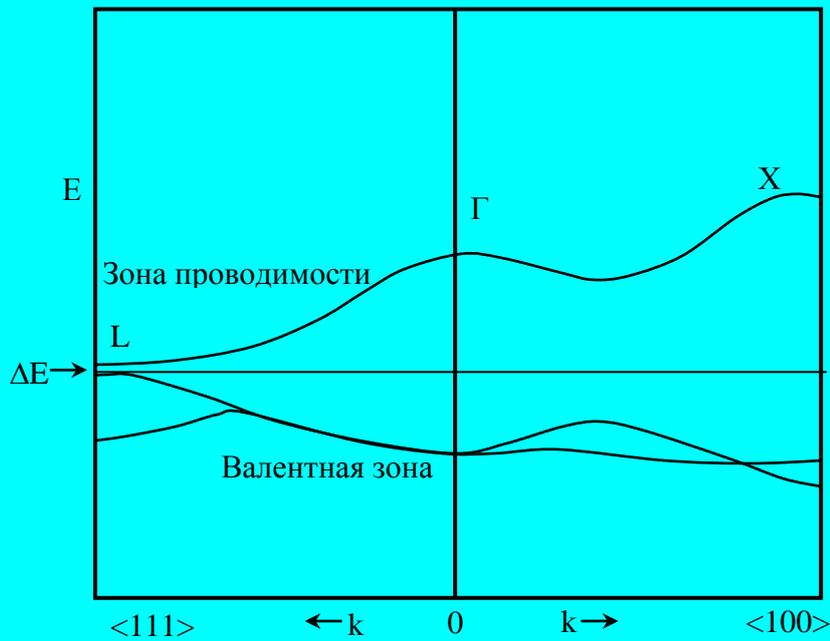


Рис. 1.4.7. Упрощенное схематическое изображение зонной структуры PbTe (не в масштабе).
PbS и PbSe имеют аналогичные зонные структуры.

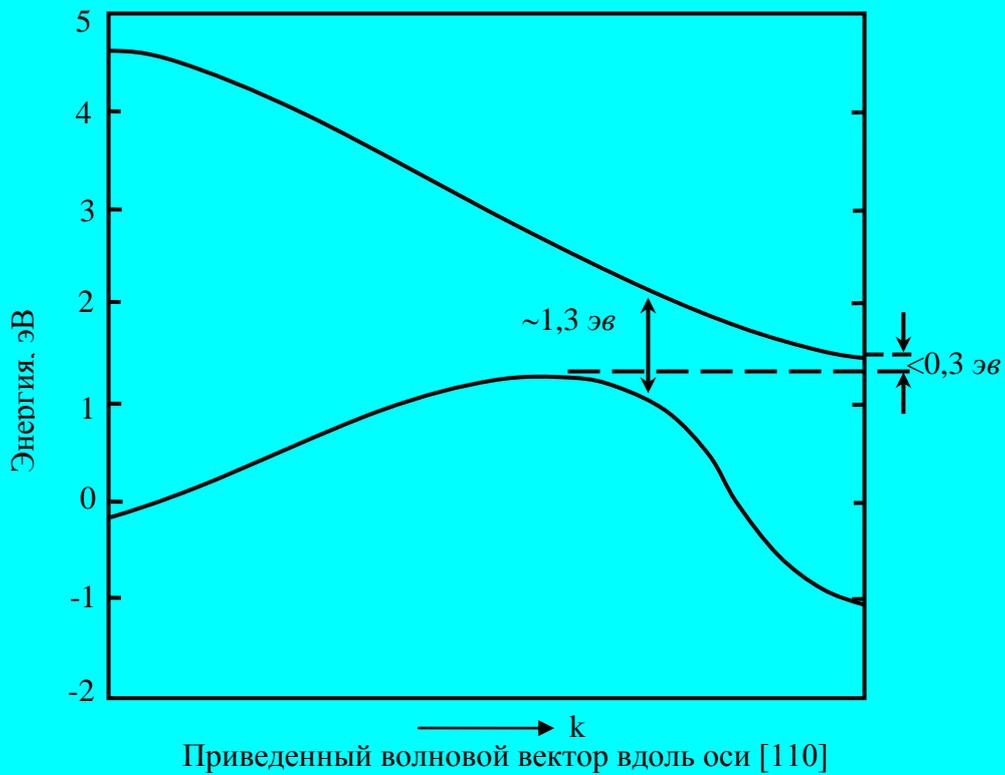


Рис. 1.4.8. Предполагаемая зонная структура для PbS.

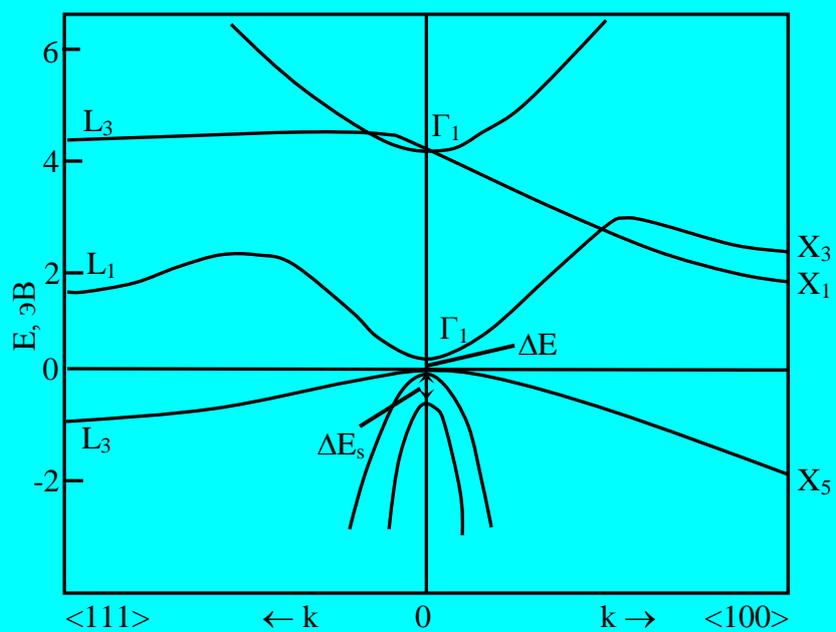


Рис. 1.4.9. Схематическое изображение зонной структуры InSb. Ширина запрещенной зоны (при 300 К) равна: $\Delta E=0,18$ эВ.

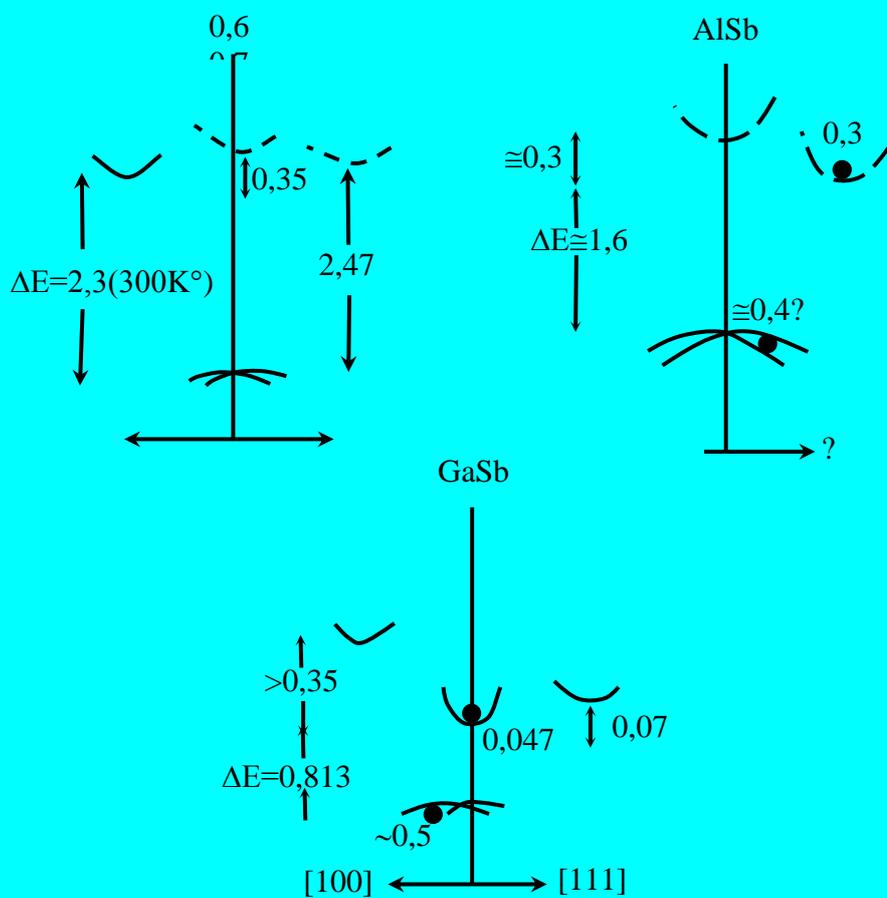


Рис. 1.4.10. Схема энергетических зон некоторых полупроводников.

§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 соответствующую 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) | | CdSe | 1,7 |
| | | 0,98 (при высоких T) | CdTe | 1,5 | |
| | | | BaO | 4,2 | |
| I-VII | CuBr | 2,9 | BaS | 4,0 | |
| | AgJ | 2,8 | BaSe | 3,7 | |
| | | | BaTe | 3,4 | |
| II-IV | Mg ₂ Si | 0,7 | HgS | 2,0 | |
| | Mg ₂ Ge | 0,6 | («красная») | | |
| | Mg ₂ Sn | 0,3 | HgSe | 0,6 | |
| II-V | Ca ₂ Si | 1,9 | HgTe | 0,02 | |
| | Ca ₂ Sn | 0,9 | | | |
| | Ca ₂ Pb | 0,46 | | | |
| | | | II-VII | HgJ ₂ | 2,13 (при низких T) |
| | | | | | 2,55 (при низких T) |
| 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 | |

Температурная зависимость ширины запрещенной зоны

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

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

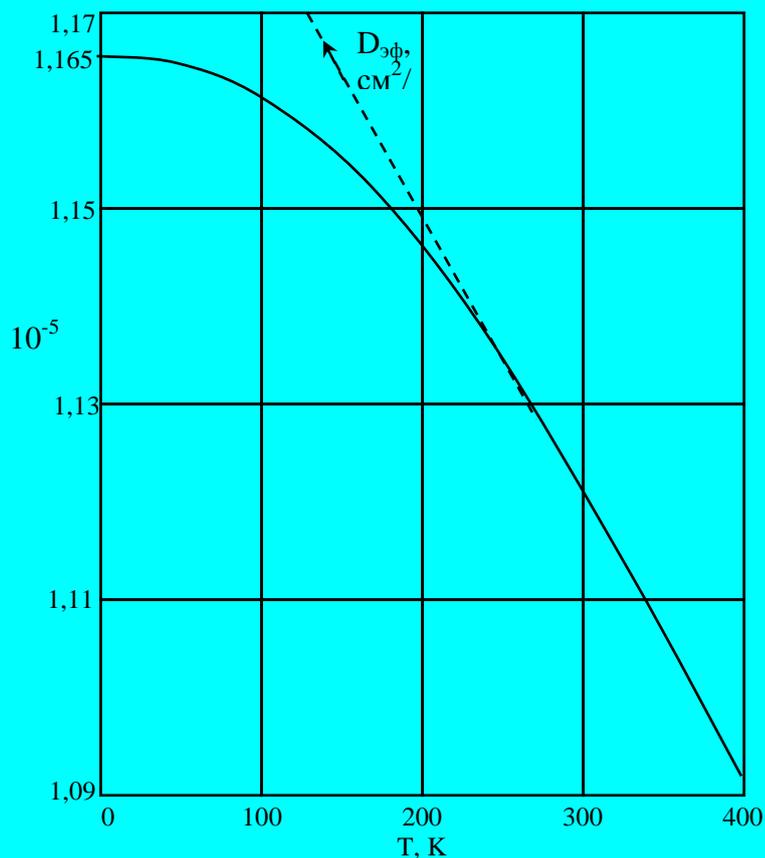


Рис. 1.5.1. Зависимость ширины запрещенной зоны ΔE_g в Si от температуры T.

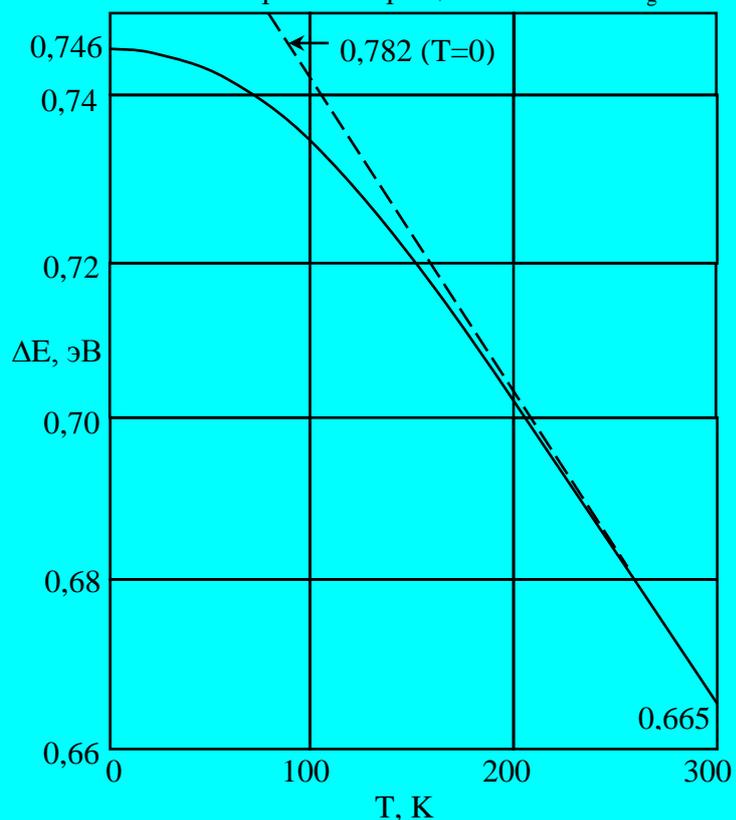


Рис. 1.5.2 Зависимость ширины запрещенной зоны ΔE_g в Ge от температуры.

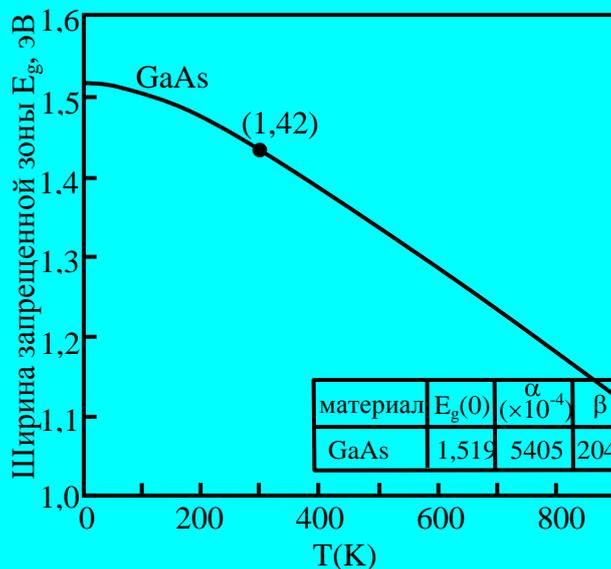


Рис. 1.5.3 Зависимость ширины запрещенной зоны GaAs от температуры

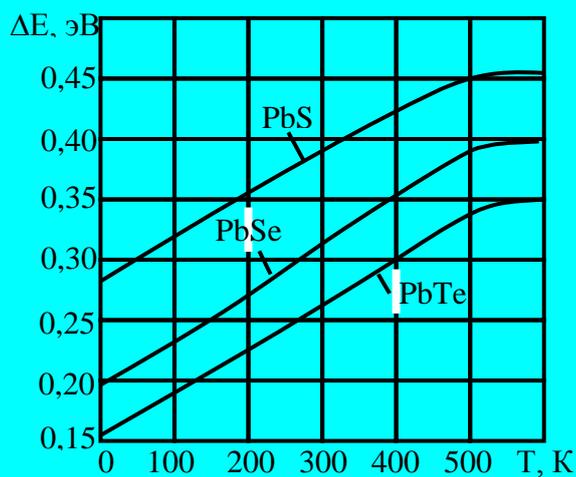


Рис. 1.5.4 Температурные зависимости ширины запрещенной зоны для халькогенидов свинца

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 $E_{G_{\text{мин}}}$, 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.

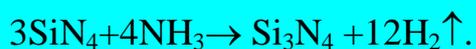
Двуокись кремния SiO_2 – это кварцевое стекло. По внешнему виду оно мало отличается от стекла, но обладает высокой химической стойкостью ко многим кислотам за исключением плавиковой (HF), которая взаимодействуя с кварцем, образует кремниевую кислоту.

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

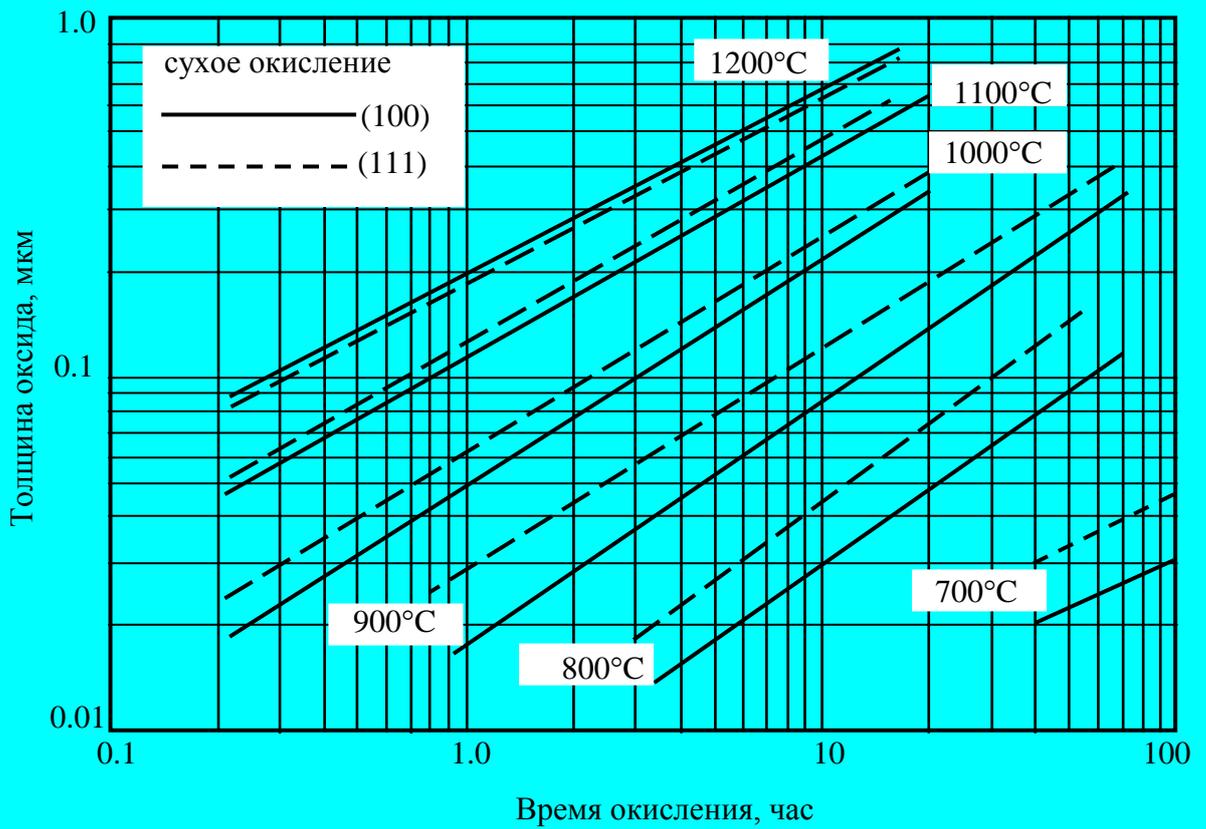
Наиболее часто окисные пленки на поверхности кремния получают методом термического окисления. Окисление проводят при температуре $T=1000\div 1300^\circ\text{C}$ в атмосфере чистого кислорода или паров воды в зависимости от требуемой толщины пленки. Пленки, выращенные в атмосфере чистого кислорода, имеют 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-

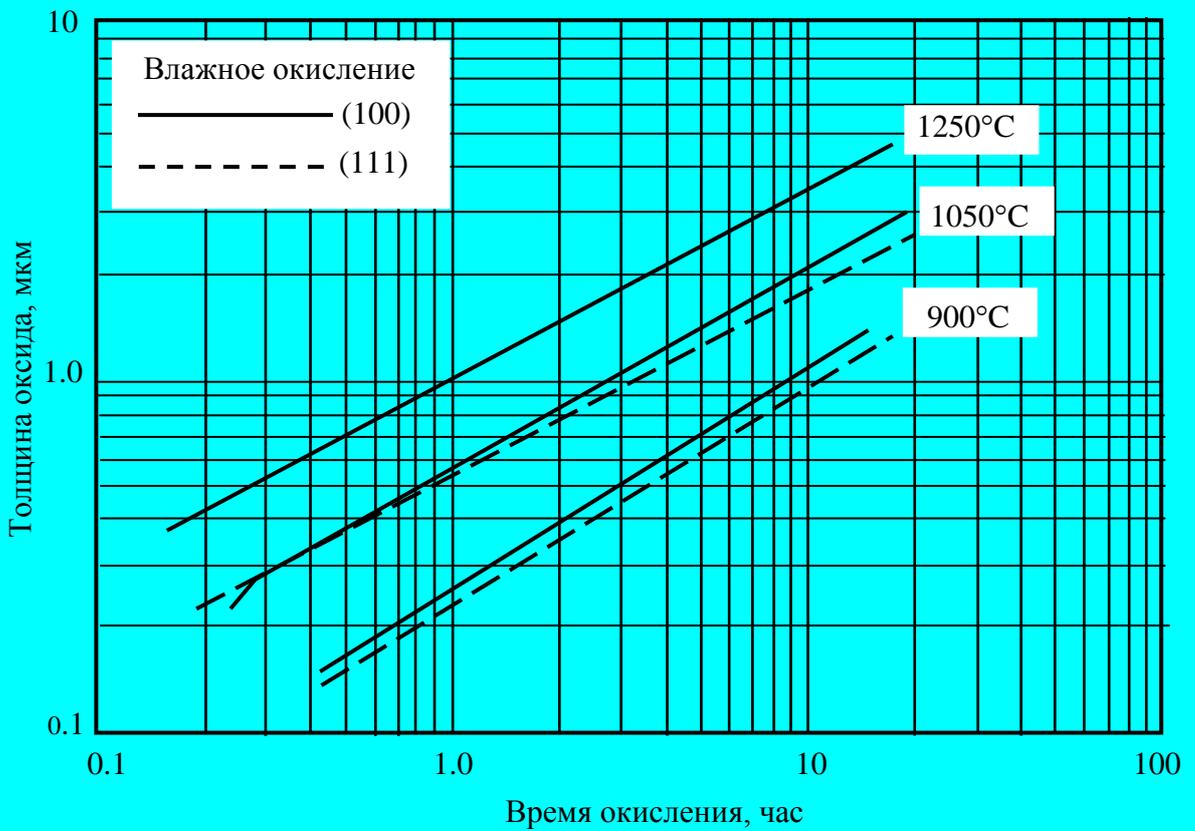
фузии, чем в кремнии. Пленки Si_3N_4 толщиной $d \sim 0,1$ мкм для большинства примесей могут стать практически непроницаемым защитным слоем при температуре диффузии $T = 1000 \div 1200^\circ\text{C}$. В основном пленки Si_3N_4 создаются с помощью реакции азотирования силана аммиаком при температуре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



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

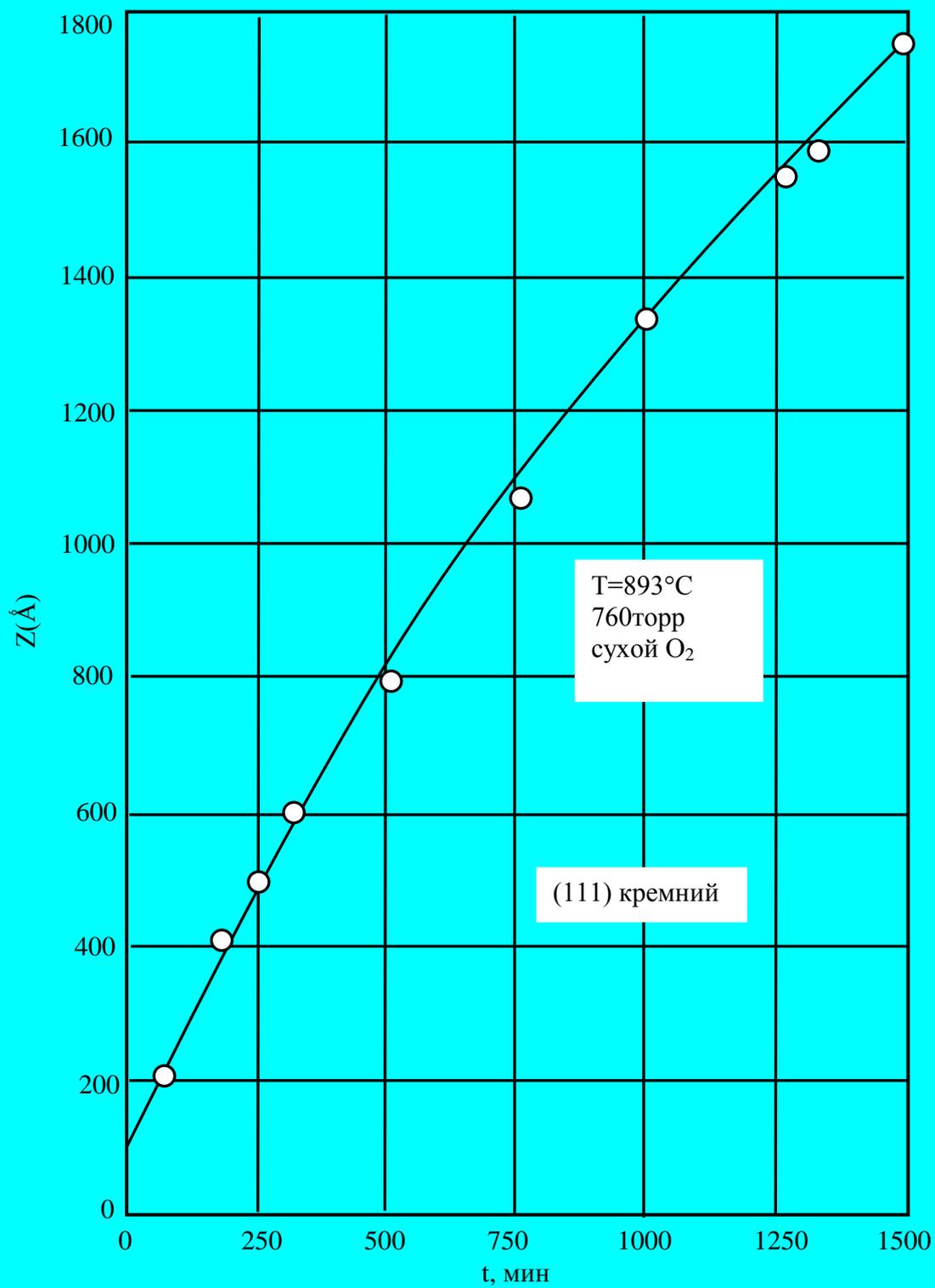


Рис. 1.6.2. Зависимость толщины оксида от времени окисления.

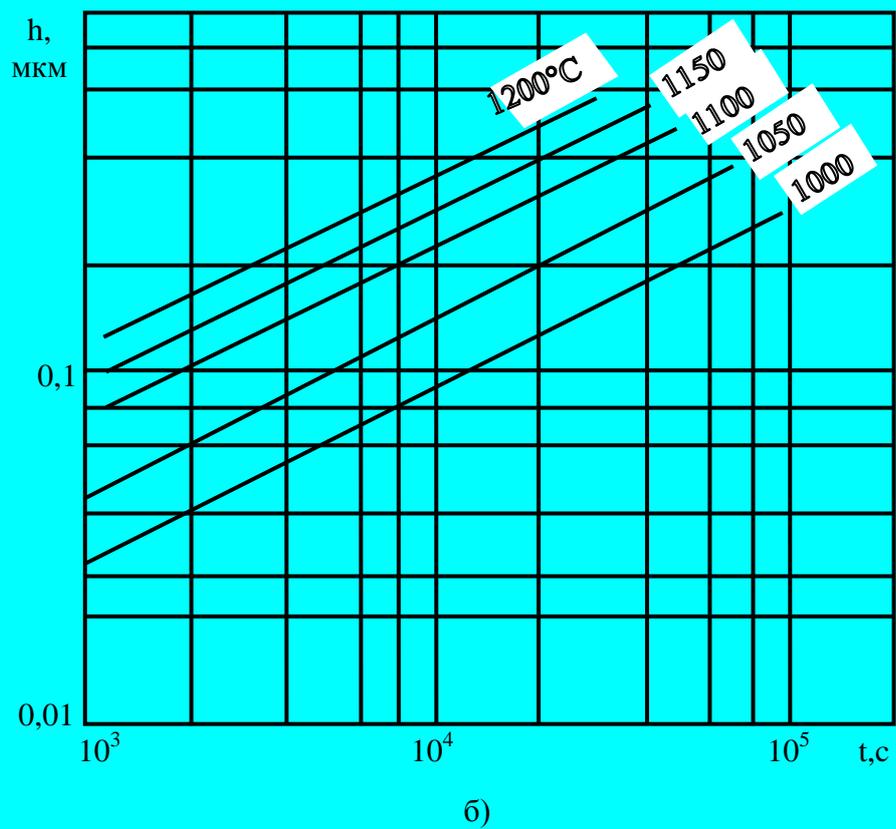
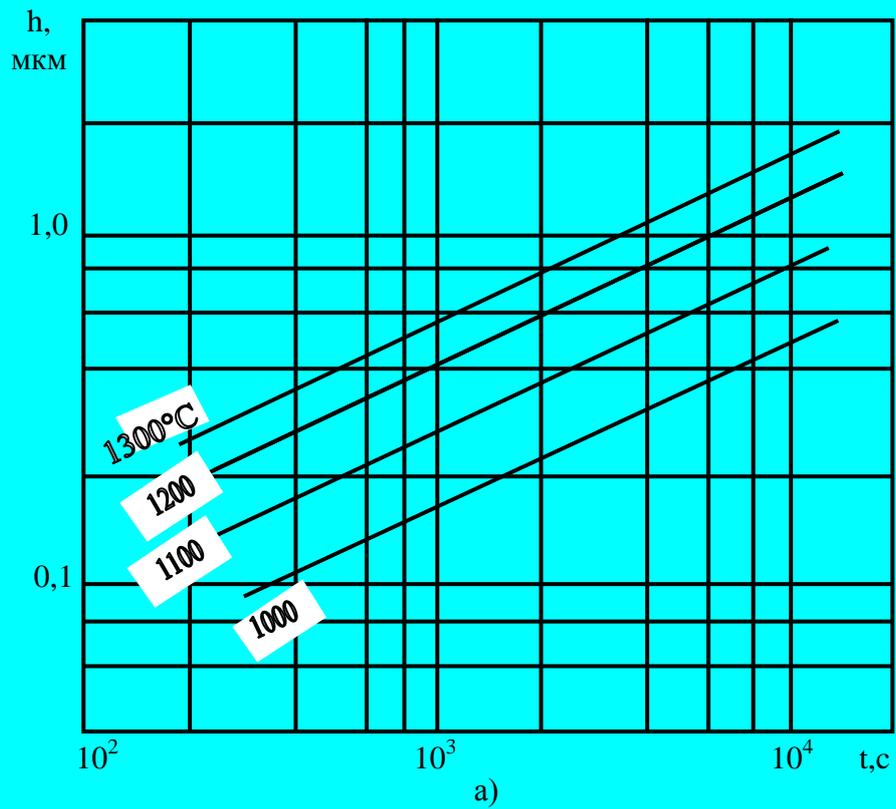


Рис. 1.6.3. Зависимость толщины окисла SiO_2 , необходимого для маскирования кремния, от времени диффузии для различных температур:
 а — при диффузии фосфора; б — при диффузии бора

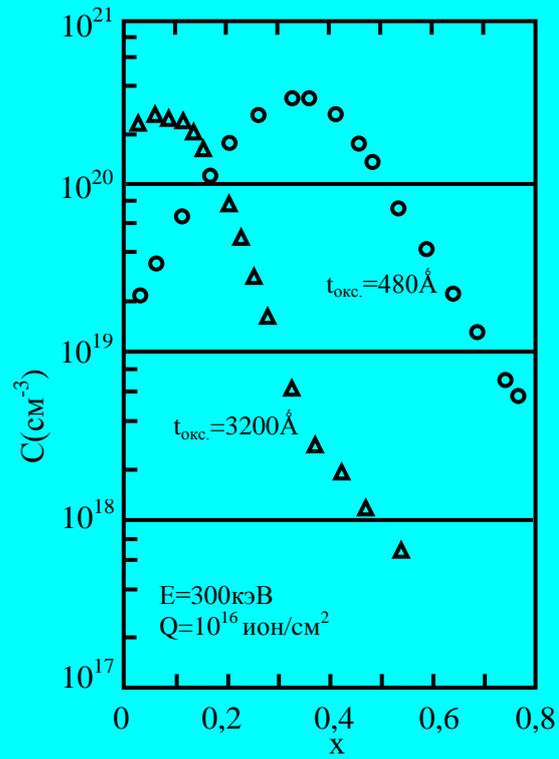


Рис. 1.6.4. Профиль распределения фосфора, имплантированного через оксидную пленку различной толщины.

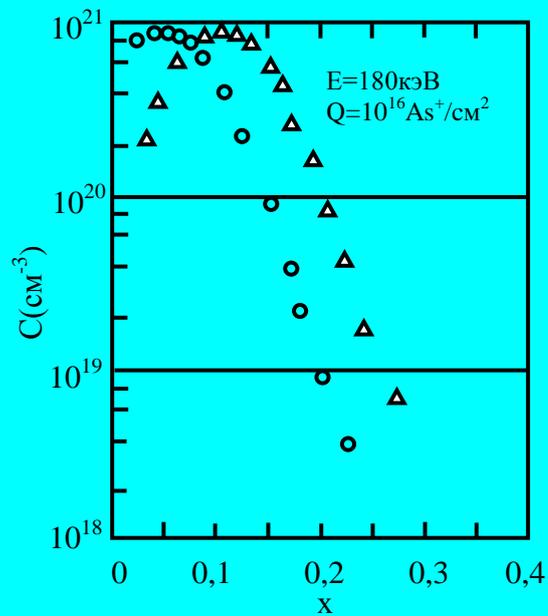


Рис. 1.6.5. Профиль распределения мышьяка, имплантированного в кремний через оксидную пленку (о), а также безоксидной пленки (Δ).

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

| | | |
|--|---|--|
| Диэлектрик Insulator | SiO ₂ | Si ₃ N ₄ |
| Структура Structure | Аморфная Amorphous | Аморфная Amorphous |
| Точка плавления (°С) 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 (°С ⁻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°С при 500°С dc resistivity (Ω·cm) at 25°С at 500°С | 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 ШОТКИ 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 | | | | |

Таблица 1.7.3

Условия создания омических контактов к полупроводникам типа А^{III}В^V

| Полупроводники типа А ^{III} -В ^V | E _g , эВ | Тип | Контактный материал | Технология | Температура вплавления, °С |
|---|------------------------|--------------|------------------------|-------------|----------------------------------|
| 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 | |
| | | 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 носителей 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 компаниями. Как видно из табл.1.8.1, производство кремниевых монокристаллических 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 | P, As, Sb | P, As, Sb | P, As, Sb | P, As, Sb | P, As, Sb | P, As, Sb | P |
| для p | B | B | B | B | B | B | B |
| Поверхность | Полированная с одной или двух сторон. | | | | | | |
| Класс | | 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 | | | $5 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{10}$ | ≤ 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 платины име- ют 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 20000Å |

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 p - типа | |
|-------------------------------|---|
| Метод выращивания | VGF |
| Диаметр | 100 мм |
| Ориентация | <100> |
| Примесь для получения p 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 | | - | 5x10 ¹⁷ - 3x10 ¹⁸ | 5x10 ¹⁸ - 3x10 ¹⁹ |
| Удельное сопротивление, Ом.см | | >1x10 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 | | - | 1x10 ¹⁷ - 3x10 ¹⁸ | 1x10 ¹⁷ - 3x10 ¹⁹ |
| Удельное сопротивление, Ом.см | | >1x10 ⁷ | - | - |
| Подвижность, см ² /В.с | | >5000 | 4200-1200 | 170-40 |
| Плотность дислокаций, см ⁻² | Ø50.8 мм Ø76.2 мм | <5x10 ⁴ или <8x10 ⁴ <8x10 ⁴ или <1x10 ⁵ | <5x10 ⁴ или <8x10 ⁴ <8x10 ⁴ или <1x10 ⁵ | <5x10 ⁴ или <8x10 ⁴ <8x10 ⁴ или <1x10 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 | | ± 0.5° ± 0.1° | | |

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

Полупроводящие GaAs-пластины

| Параметры | Размерность | LEC | VGF |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Диаметр | | 76 мм | 100 мм |
| Примесь | | Te | Si |
| Тип | | n | n |
| Концентрация носителей заряда | см ⁻³ | $(0.1 \div 2.0) \cdot 10^{18}$ | $(0.2 \div 2.5) \cdot 10^{18}$ |
| Холловская подвижность | см ² /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-травленная | | |
| 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 сопротивление Ом·см |
|------------------------------|-----|-------------|--|---|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 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 €/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 |
|--------------|----------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| 83.00 | n-GaP:S | [110] | 15x30 mm | 400 | P/P | 0.081 | 8.2·10 ¹⁷ | 100 | 4.5·10 ⁴ |
| 135.00 | n-GaP:- | [100] | 2" | 400 | P/E | | <1.5·10 ¹⁶ | >100 | <9·10 ⁴ |
| 135.00 | 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 примесь | нелегированный | S | Zn , Mn |
|--|--|---|---|
| Тип проводимости | n | n | p |
| Концентрация носителей, см ⁻³ | ≤3x10 ¹⁶ | 1x10 ¹⁷ - 3x10 ¹⁸ | 5x10 ¹⁶ - 5x10 ¹⁸ |
| Подвижность, см ² /В·с | ≥20000 | ≥10000 | ≥100 |
| Плотность дислокаций, 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 ориентации | (1 - 10) ± 0.1° towards the specified face | | |
| Базовый и дополнительный срезы | SEMI M9, US SEMI and E/J SEMI Standard | | |
| Обработка поверхности | | | |
| лицевая сторона | полированная, годная к эпитаксии | | |
| обратная сторона | 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*10 ⁴ | <5*10 ¹⁶ | >2*10 ⁴ | (100), (111), (110) | |
| InAs:S | N | 50 | <5*10 ⁴ | 1*10 ¹⁷ - 5*10 ¹⁹ | >3*10 ³ | (100), (111), (110) | |
| InAs:Zn | P | 50 | <5*10 ⁴ | 1*10 ¹⁷ - 5*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) ·10 ¹⁶ | >20, 000 | <120 |
| 165.0 0 | n- InAs:S | [111] | 40mm | 400 | P/E | ~0.0002 | >1·10 ¹⁸ | >5,0 00 | <2·10 ³ |
| 200.0 0 | p- InAs:Z n | [100] | 50 | 400 | P/E | US Flats | (1-5) ·10 ¹⁸ | | <1.0·10 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 | ≤ 2.10 ¹⁷ (300K) ≤ 2.10 ¹⁶ (77K) | 2×10 ¹⁷ - 1.2×10 ¹⁸ | 3×10 ¹⁷ - 1×10 ¹⁹ |
| Подвижность, см ² /В.с | ≥ 700 (300K) ≥ 2000 (77K) | 2500 - 3500 | 1000 - 250 |
| Плотность дислокаций, см ⁻² | ≤ 5×10 ³ | ≤ 2×10 ³ | ≤ 2×10 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 | полированная, годная к эпитаксии | |
| обратная сторона | 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 (77К) | (3 - 7)×10 ¹⁴ | 7×10 ¹⁴ - 1×10 ¹⁸ | 1×10 ¹⁵ - 5×10 ¹⁸ |
| Плотность дислокаций, см ⁻² | ≤200 | | |

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 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 77К | (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 77К | (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 77К | (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 примесь | Тип | Диаметр, мм | Плотность дислокации, см ⁻² | Концентрация носителей заряда, см ⁻³ | Подвижность, см ² /В·с | Ориентация | Удельное сопротивление, Ом·см |
|------------------------------|-----|-------------|--|---|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| InP:-undoped | N | 2" | | 1*10 ¹⁶ - 5*10 ¹⁷ | | (100), (111) | |
| InP:S (класс А) | N | 50 | <100 0 | (5-8)*10 ¹⁸ | | (100), (111) | |
| InP:S (класс В) | N | 50 | <500 0 | (1-20)*10 ¹⁸ | | (100), (111) | |
| InP:Sn | N | 50 | | 2*10 ¹⁷ - 1*10 ¹⁹ | | (100), (111) | |
| InP:Zn | P | 50 | <100 | (3-5)*10 ¹⁸ | 60-80 | (100), (111) | |
| InP:Fe | SI | 50 | <5*10 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 | 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 |
|--------------|-----------------|------------|-------------|--------------|-------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|--|
| 200.0 0 | SI InP:Fe | [100] | 50 | 400 | P/E | 3.2E7 | 8.4·10 ⁷ | 2,300 | 7.5·10 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 | 6.2·10 ¹⁵ | 3,980 | 4.9·10 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 $A^{II}B^{VI}$, 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 : $Ra < 5 \text{ \AA}$

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 | \$250.0 0 |

CdTe

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: 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 | \$500.0 0 |

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 ПОЛУПРОВОДНИКАХ

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 междуузлия 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 междуузлиями), 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.

Эффективные значения радиусов (в Å)

| Элемент | Ионный радиус | Тетраэдрический ковалентный радиус | Металлический радиус | Ван – дервальсов радиус |
|---------|--|------------------------------------|----------------------|-------------------------|
| Li | 0,68 (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⁺) | (0,975) | 2,62 1,12 | |
| Mg | 0,74 (Mg ²⁺) | (1,301) | 1,07 1,60 | |
| Ca | 1,04 (Ca ²⁺) | (1,333) | 1,55 1,97 | |
| Sr | 1,20 (Sr ²⁺) | (1,689) | 1,91 2,15 | |
| Ba | 1,38 (Ba ²⁺) | | 2,07 2,24 | |
| Ti | 0,78 (Ti ²⁺) 0,69 (Ti ³⁺) 0,64 (Ti ⁴⁺) | | 2,17 1,47 1,42 | |
| Zr | 0,82 (Zn ⁴⁺) | | 1,60 1,54 | |
| Ta | 0,66 (Ta ⁵⁺) | | 1,49 1,44 | |
| Cr | 0,83 (Cr ²⁺) 0,64 (Cr ³⁺) 0,35 (Cr ⁶⁺) | | 1,30 1,26 | |
| Mo | 0,68 (Mo ⁶⁺) 0,65 (Mo ⁶⁺) | | 1,39 1,36 | |

Продолжение таблицы 2.1.2

| Элемент | Ионный радиус | Тетраэдрический ковалентный радиус | Металлический радиус | Ван – дерваальсов 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 данным [18] | По другим данным | По данным [18] | По другим данным |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Li | 0,465 | 0,5 | 1,3·10 ⁻⁴ | 25·10 ⁻⁴ |
| | | 0,57 | — | 9,1·10 ⁻³ |
| Cu | 0,18 | — | 1,9·10 ⁻⁴ | — |
| Ag | — | 1,0 | — | 4,4·10 ⁻² |
| Au | — | 2,5 | — | 2,15·10 ⁻² |
| Zn | 2,8 | 2,5-2,16 | 10,0 | 5,7·10 ⁻² |
| B | 4,6 | — | 1,6·10 ⁻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 | — | 1,7·10 ⁻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 | — | 6,1·10 ⁻³ |
| H | — | 0,38 | — | 2,7·10 ⁻³ |
| Ta | — | 1,16 | — | 2,5·10 ⁻⁶ |
| | — | 2,86 | — | 0,2 |
| Be | — | 2,5 | — | 0,5 |
| Co | — | 1,1 | — | 0,16 |
| N | — | 2,58 | — | — |
| Bi | — | 2,42 | — | — |

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 |

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 | 3,5·10 ⁻³ | 0,36 | 150÷500 | >> >> |
| InAs | | | | |
| In | 6·10 ⁵ | 4 | 740÷900 | Меченые атомы |
| As | 3·10 ⁷ | 4,47 | 740÷900 | >> >> |
| Cu | 0,036 | 0,52 | | |
| Cu | 2,2·10 ⁻² | 0,54 | 600÷900 | >> >> |
| Ag | 7,3·10 ⁻⁴ | 0,26 | 460÷900 | >> >> |
| Au | 5,8·10 ⁻³ | 0,65 | 600÷900 | >> >> |
| Mg | 1,98·10 ⁻⁶ | 1,17 | 600÷900 | p-n - переход |
| Zn | 3,11·10 ⁻³ | 1,17 | 600÷900 | >> |
| | 4,2·10 ⁻³ | 0,96±0,02 | 600÷900 | Меченые атомы |
| Cd | 4,35·10 ⁻⁴ | 1,17 | 600÷900 | p-n - переход |
| | 7,4·10 ⁻⁴ | 1,15±0,03 | 600÷900 | p-n - переход |
| Ge | 3,74·10 ⁻⁶ | 1,17 | 600÷900 | >> |
| Sn | 1,49·10 ⁻⁶ | 1,17 | 600÷900 | >> |
| S | 6,78 | 2,2 | 600÷900 | >> |
| Se | 12,55 | 2,2 | 600÷900 | >> |
| Te | 3,43·10 ⁻⁵ | 1,28 | 600÷900 | >> |
| P | 1,26·10 ⁻² | 2,7±0,2 | 650÷900 | p/a |
| Al | 4,3·10 ⁻⁴ | 1,17 | 650÷900 | p/a |
| GaSb | | | | |
| Ga | 3,2·10 ³ | 3,15 | 658÷700 | Меченые атомы |
| Sb | 3,4·10 ⁴ | 3,45 | 658÷700 | >> >> |
| Sb | 8,7·10 ⁻³ | 1,13 | 320÷650 | >> >> |
| In | 1,2·10 ⁻⁷ | 0,53 | | |
| Sn | 2,4·10 ⁻⁵ | 0,80 | 320÷650 | >> >> |
| Te | 3,8·10 ⁻⁴ | 1,2 | 320÷650 | >> >> |
| Cd | 1,5·10 ⁻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 | $2,3 \cdot 10^{-4}$ $3,2 \cdot 10^3$ | 1,9 3,15 | $>800^\circ \text{C}$ 300÷700 | |
| Mg | $3,4 \cdot 10^4$ | 3,44 | 300÷700 | |
| Ni | $8,7 \cdot 10^{-3}$ | 1,13 | 300÷700 | |
| Se | $3,8 \cdot 10^{-4}$ | 1,2 | 300÷700 | |
| InP | | | | |
| In | $1 \cdot 10^5$ | 3,85±0,05 | 850÷100 | Меченые атомы |
| P | $7 \cdot 10^{10}$ | 5,65±0,06 | 850÷1000 | >> >> |
| Au | $1,32 \cdot 10^{-5}$ | 0,48±0,01 | 600÷820 | >> >> |
| Au | $1,37 \cdot 10^{-4}$ | 0,73 | 600÷900 | >> >> |
| Ag | $3,6 \cdot 10^{-4}$ | 0,59±0,03 | 500÷900 | >> >> |
| Cu | $3,8 \cdot 10^{-3}$ | 0,69±0,02 | 600÷900 | >> >> |
| Cd | $1,1 \cdot 10^{-7}$ | 0,725 | 700÷900 | p-n – переход |
| Zn | $1,6 \cdot 10^{-8}$ | 0,3 | | |
| InSb | | | | |
| In | $1,8 \cdot 10^{-9}$ 0,3 $5 \cdot 10^{-2}$ | 0,28 1,75 1,82 | 300÷500 455÷500 478÷520 | Меченые атомы >> >> >> >> |
| Sb | $1,4 \cdot 10^{-4}$ $5 \cdot 10^{-2}$ | 3,75 1,94 | 300÷500 478÷520 | >> >> >> >> |
| Cu | $3,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,37 | 230÷490 | >> >> |
| Ag | 10^{-7} | 0,25 | 440÷510 | >> >> |
| Au | $7 \cdot 10^{-4}$ | 0,32 | 140÷510 | >> >> |
| Li | $7 \cdot 10^{-4}$ | 0,28 | | |
| Hg | $4 \cdot 10^{-6}$ | 1,17 | 425÷500 | >> >> |
| Cd | 10^{-5} 1,26 10^{-9} | 1,1 1,75 0,52 | 250÷500 400÷500 434÷519 | >> >> >> >> >> >> |
| Zn | $1,3 \cdot 10^{-4}$ $2,6 \cdot 10^{-2}$ $6,32 \cdot 10^8$ 5,5 $1,4 \cdot 10^{-7}$ 0,5±0,4 $1,6 \cdot 10^6$ | 1,2 1,36 2,61±2,47 1,6 0,86 1,35±0,05 2,3±0,3 | 400÷500 400÷500 400÷500 390÷512 362÷508 350÷500 | 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 |

| 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 |
| Zn | $5 \cdot 10^{-2}$ | 2,8 | 900 ÷ 1100 | электрические измерения |
| | $3 \cdot 10^{-7}$ | 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 | | |

Диффузия меди в сульфиде свинца

| $P_0 \times 10^{-18}, \text{см}^{-3}$ | $T, \text{°C}$ | $t, \text{мин.}$ | $\delta_{\text{рп}}, \text{мм}$ | $n_{\infty} \cdot 10^{-19}, \text{см}^{-3}$ | $D_1 \cdot 10^7, \text{см}^2/\text{сек}$ | $D_2 \cdot 10^7, \text{см}^2/\text{сек}$ |
|---|----------------|------------------|---------------------------------|---|--|--|
| 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.

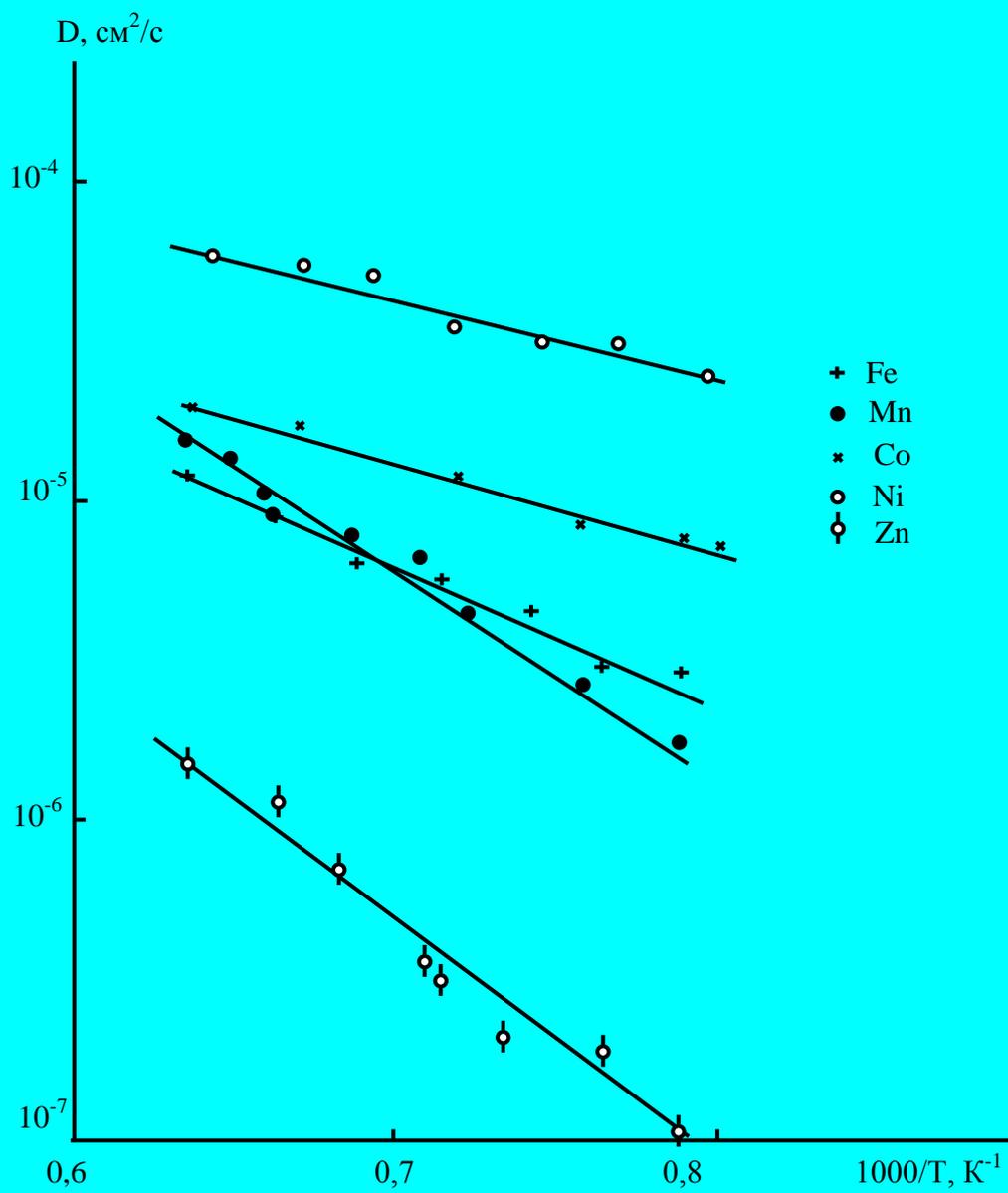


Рис. 2.1.1. Температурная зависимость коэффициентов диффузии элементов переходной группы в кремнии

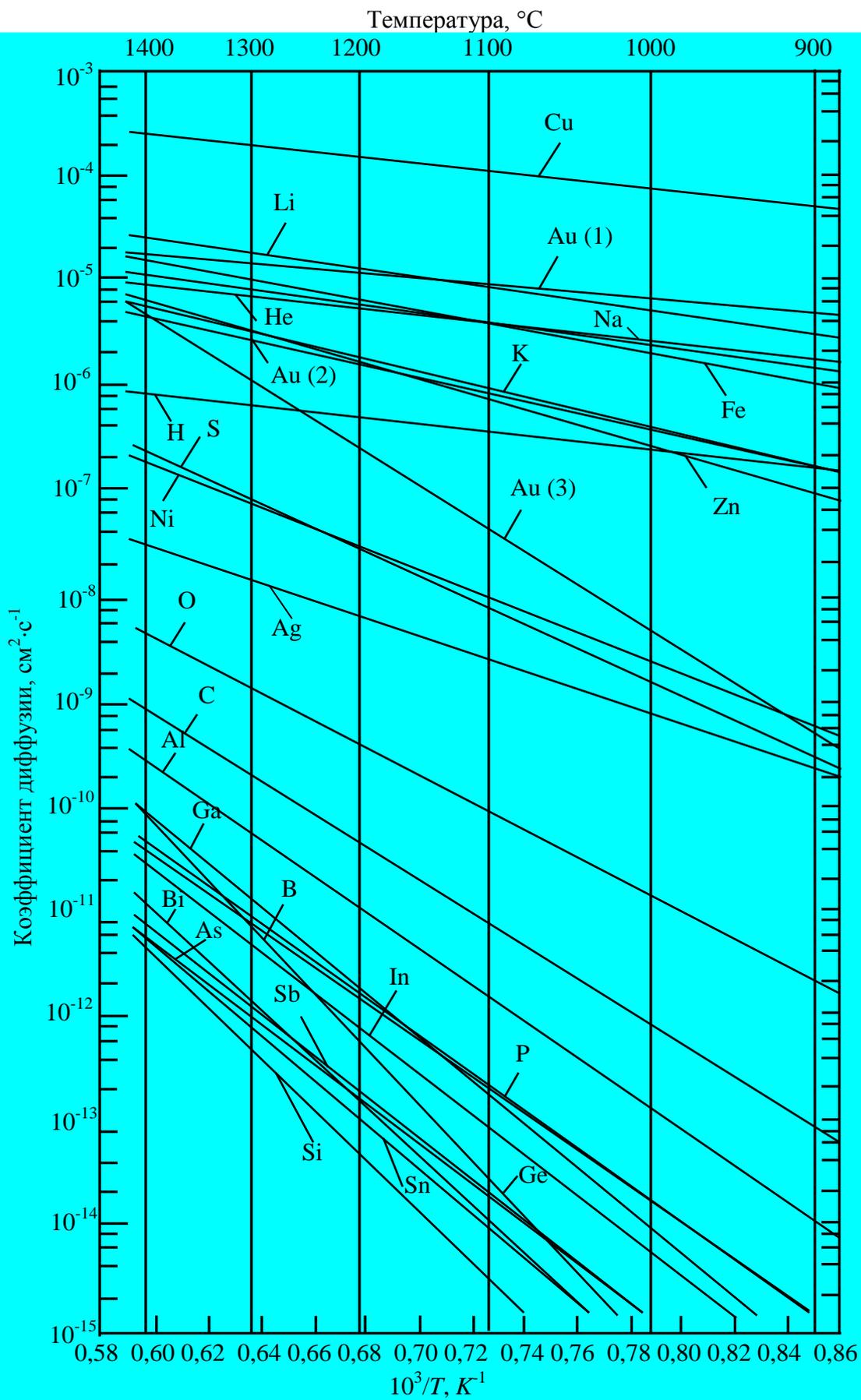


Рис. 2.1.2 Температурные зависимости коэффициентов диффузии примесей в кремнии при низком содержании примесей.

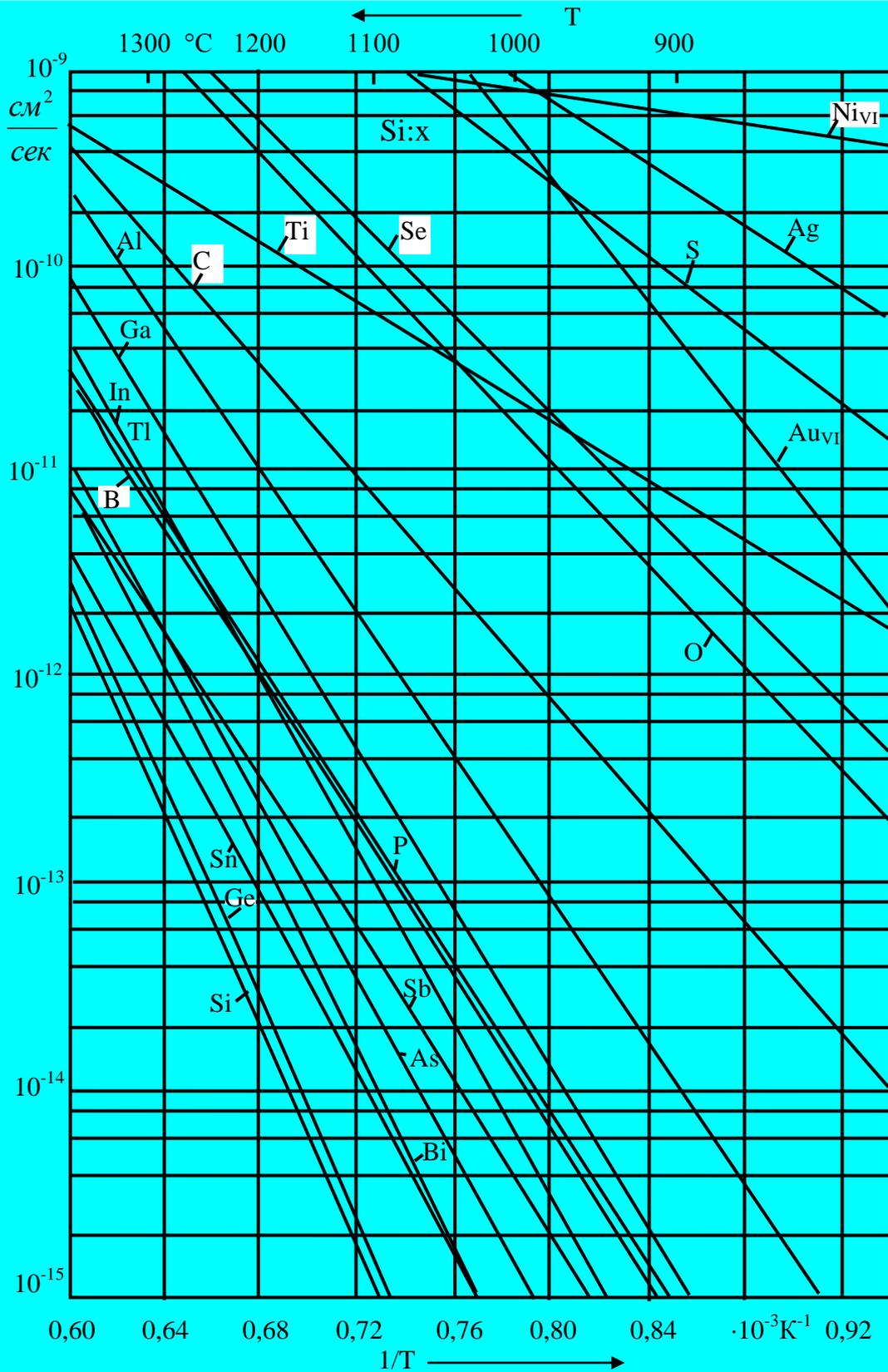


Рис. 2.1.3. Температурная зависимость коэффициента диффузии различных элементов в кремнии (согласно Landolt - Bornstein).

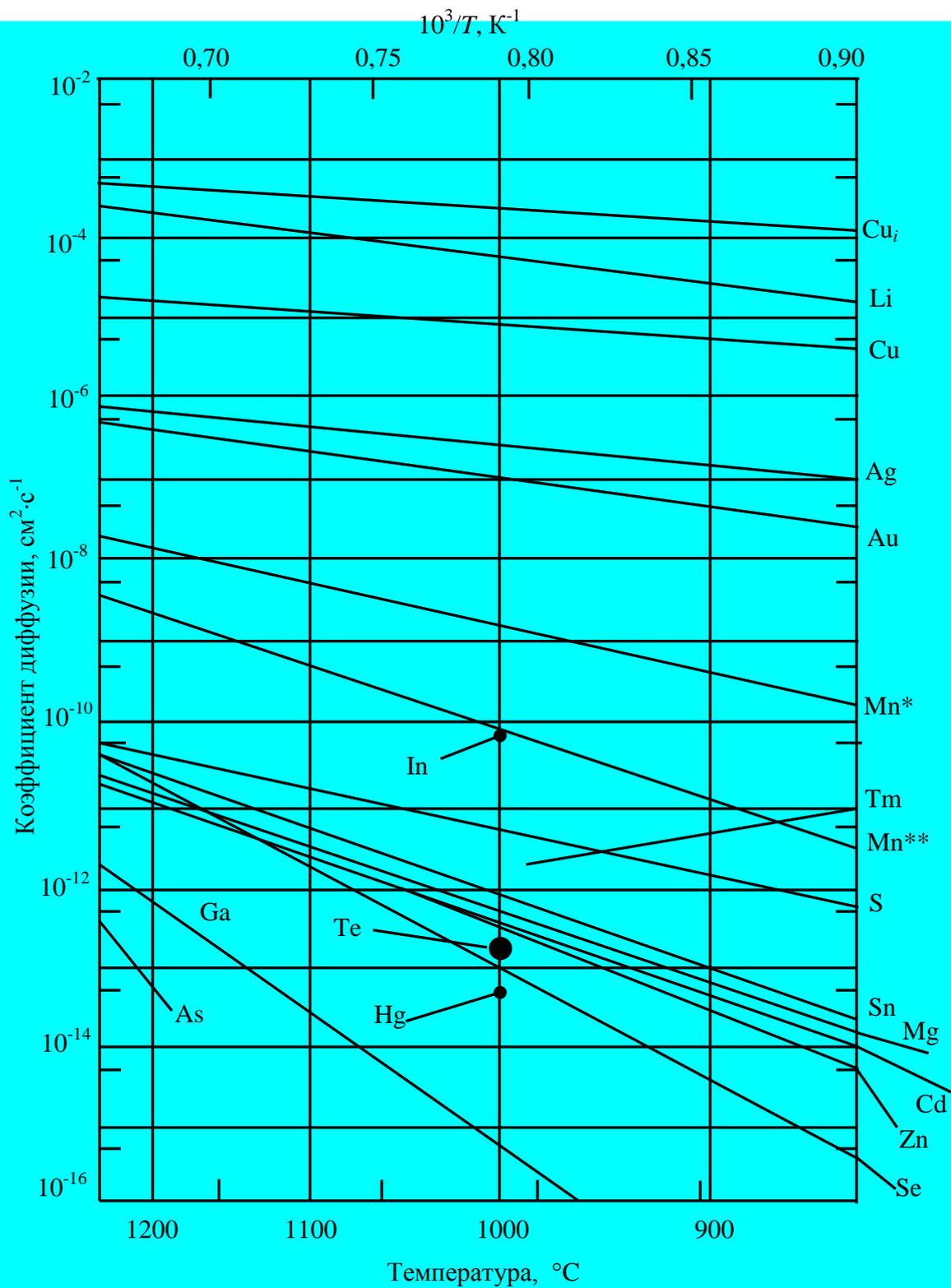


Рис. 2.1.4. Коэффициенты диффузии различных элементов в GaAs в области малых концентраций.

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

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

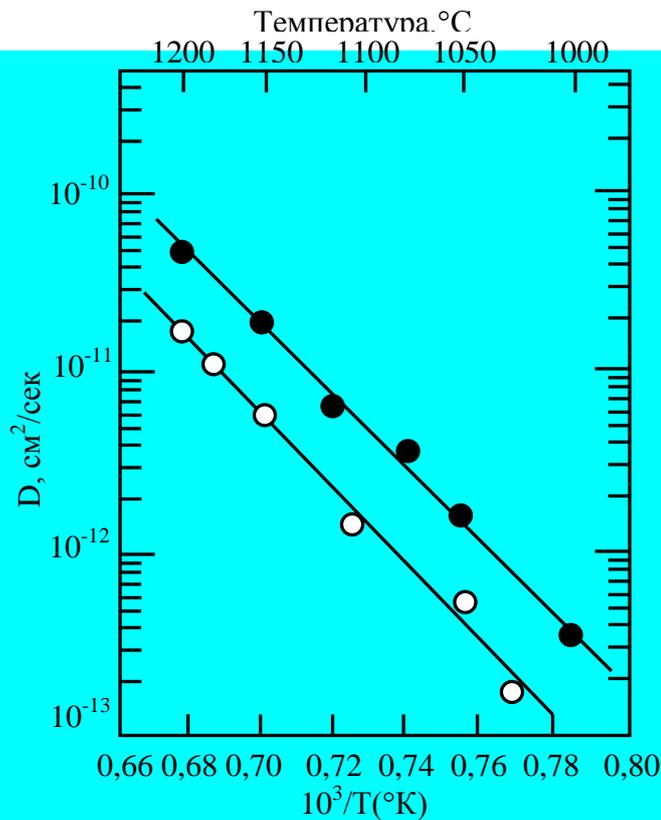


Рис. 2.1.5 Зависимость коэффициентов диффузии D серы и селена в арсениде галлия от температуры T . Константы в уравнении $D=D_0e^{-E/kT}$ равны: для серы $E = 4,04$ эВ и $D_0 = 4 \cdot 10^3$ см²/сек и для селена $E = 4,16$ эВ и $D_0 = 3 \cdot 10^3$ см²/сек

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

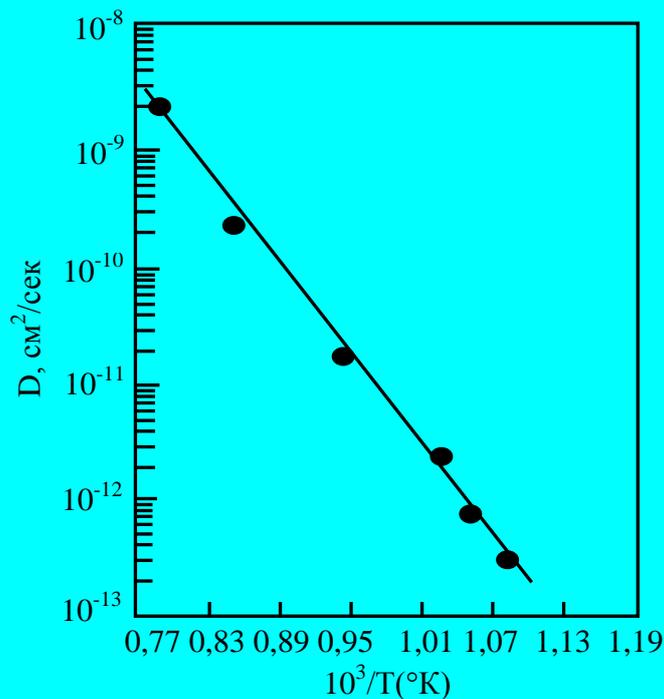


Рис. 2.1.6. Зависимость коэффициентов диффузии D кадмия в арсениде галлия от температуры T . Константы в уравнении $D=D_0e^{-E/kT}$ равны: $E = 2,43$ эВ и $D_0 = 0,05$

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

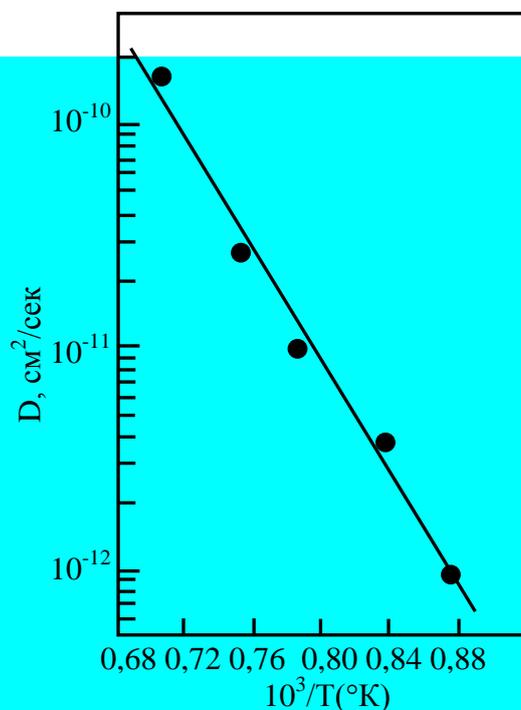


Рис. 2.1.7. Температурная зависимость коэффициента диффузии цинка в арсениде галлия при его диффузии из электролитически нанесенного слоя на поверхность арсенида галлия. Константы в уравнении $D=D_0e^{-E/kT}$ равны: $E = 2,49$ эВ и $D_0 = 15$ см²/сек. $D_{Zn} = 15 \exp\left(-\frac{2,49}{kT}\right)$

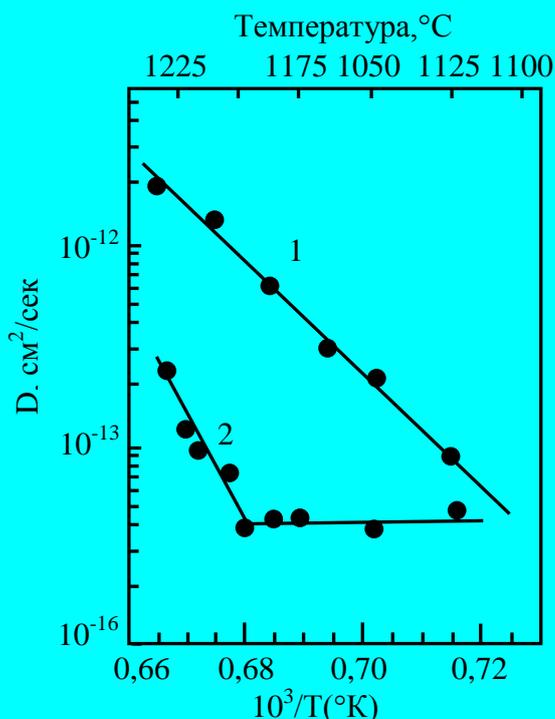


Рис. 2.1.8. Зависимость коэффициентов диффузии D галлия (1) и мышьяка в арсениде галлия от температуры T . Константы в уравнении $D=D_0e^{-E/kT}$ равны: для галлия $E = 5,6$ эВ и $D_0 = 1 \cdot 10^7$ см²/сек и для мышьяка $E = 10,2$ эВ и $D_0 = 4 \cdot 10^{21}$ см²/сек. $D_{Ge} = 1 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{5,6}{kT}\right)$, $D_{As} = 4 \cdot 10^{21} \exp\left(-\frac{10,2}{kT}\right)$

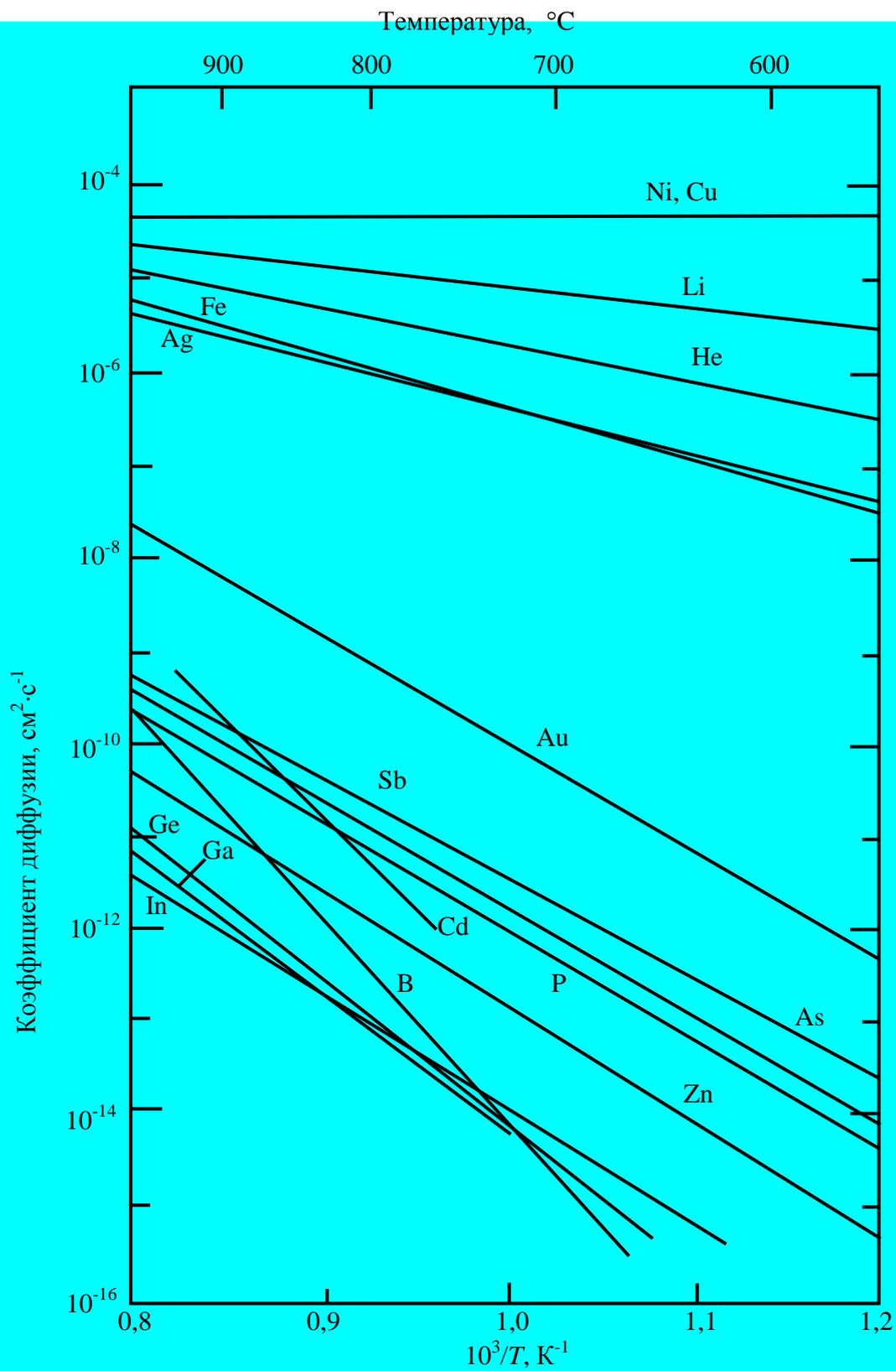


Рис. 2.1.9. Температурные зависимости коэффициентов диффузии примесей в германии.

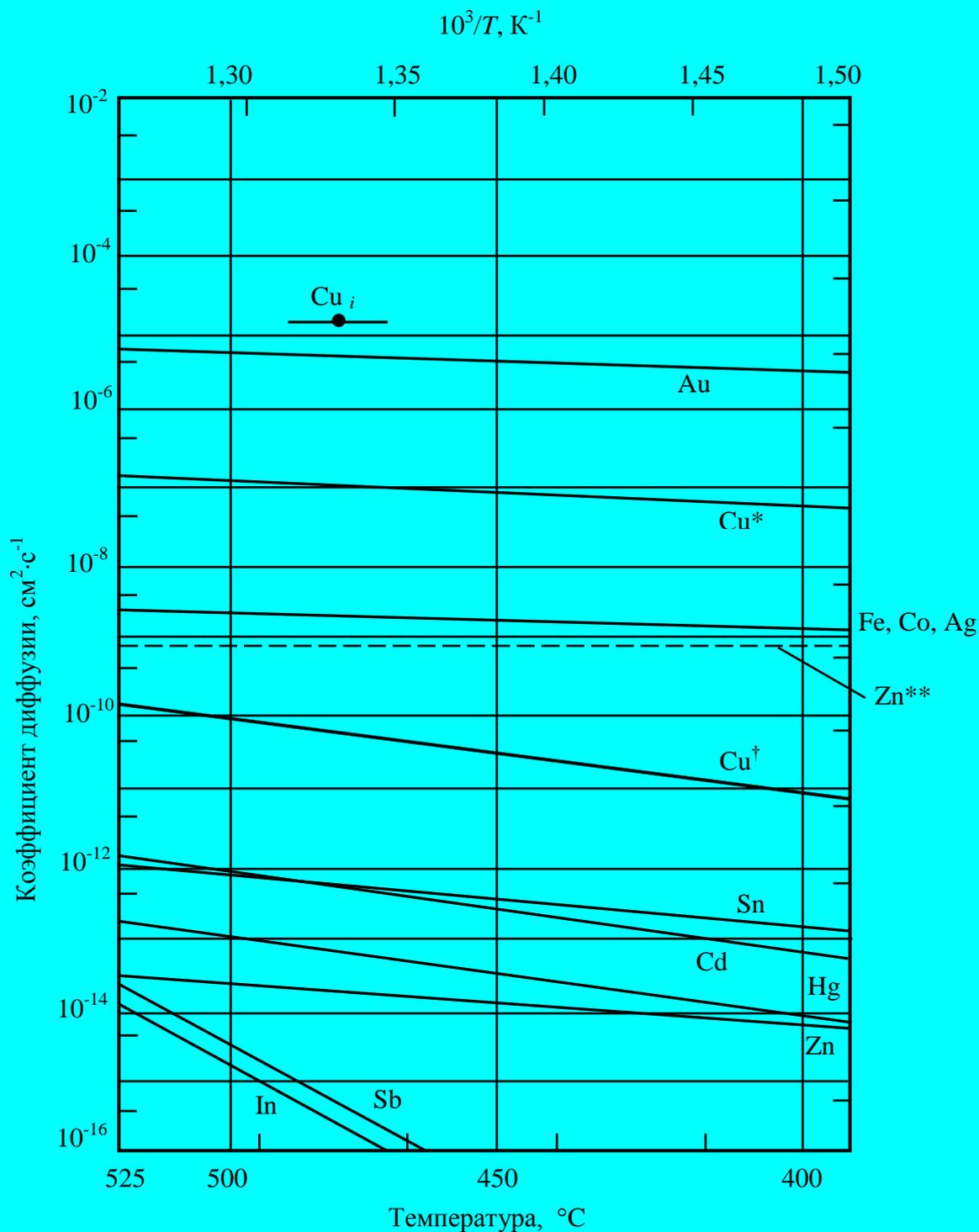


Рис. 2.1.10. Температурная зависимость коэффициентов диффузии примесей в InSb в области малых концентраций (за исключением случаев, отмеченных на фигуре).

** - 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, дефекты упаковки | 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 |

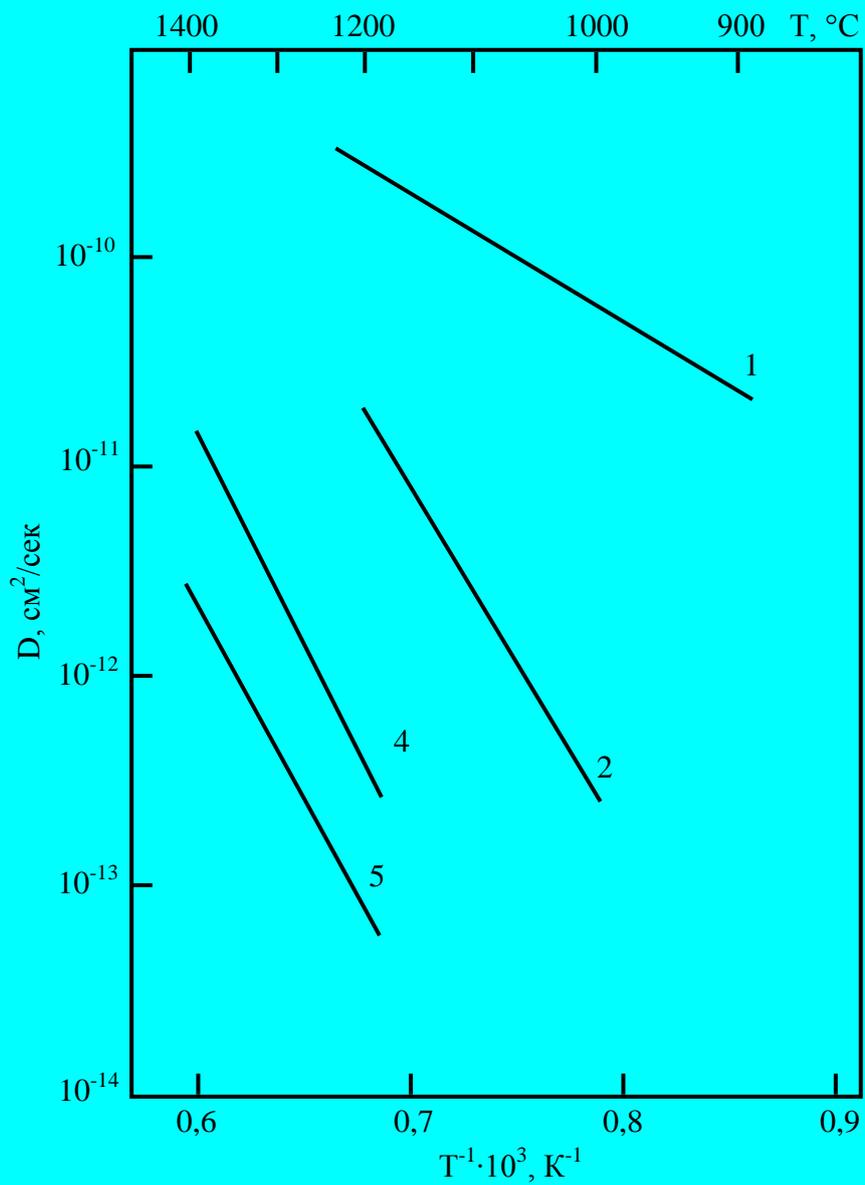


Рис. 2.1.1.1 Температурная зависимость коэффициента диффузии сурьмы в кремнии.

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

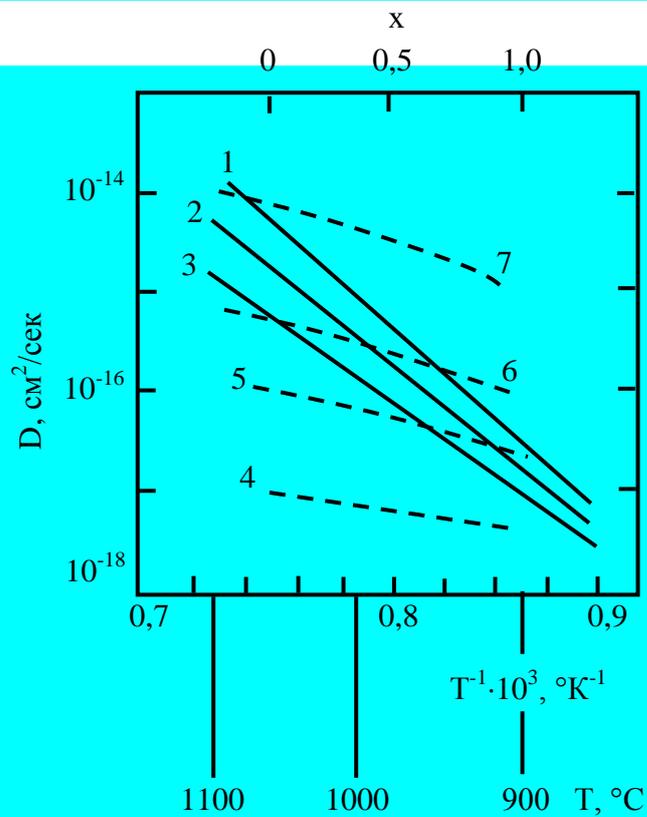


Рис.2.1.1.2. Зависимость коэффициентов взаимной диффузии D от температуры (1 – 3) и содержания алюминия в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (4 – 7).
 $x = 0; 0,5$ и $1,0$ для 1 – 3 соответственно. $T^\circ\text{C}$: 837, 937, 992 и 1088 для 4 – 7 соответственно.

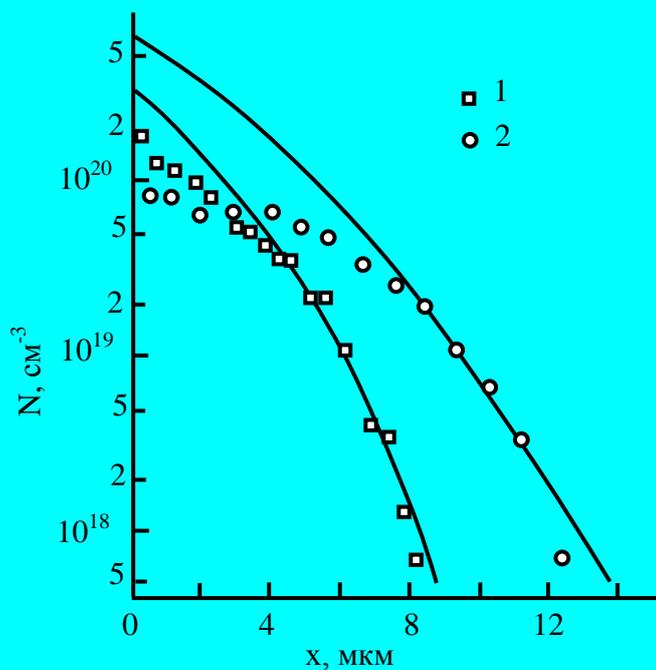


Рис. 2.1.1.3. Концентрационные профили цинка в эпислое $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (1) и в подложке GaAs (2).
 $T = 800^\circ\text{C}$, $t = 20$ мин. Сплошные линии – $\text{erfc } Z$ – функция.

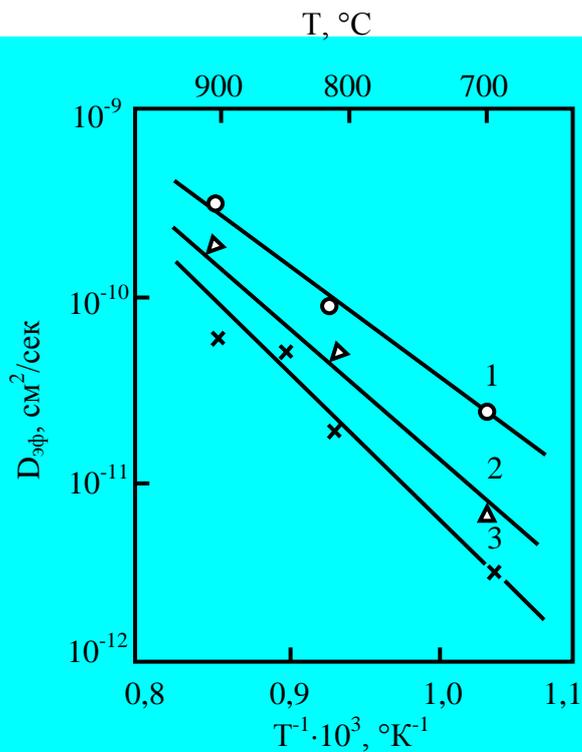


Рис. 2.1.1.4. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии $D_{\text{эф}}$ цинка в эпислоях $\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}$ при различных давлениях паров мышьяка.

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

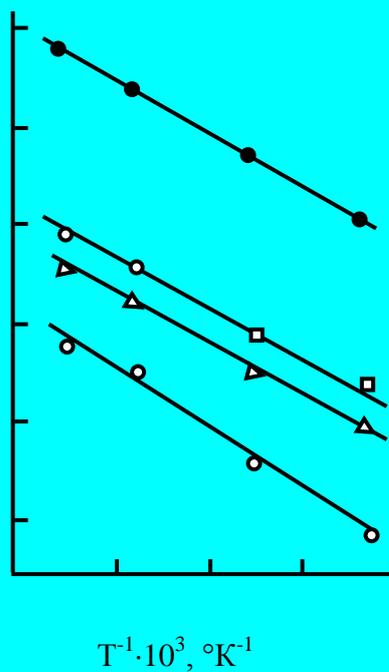


Рис. 2.1.1.5. Температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии $D_{\text{эф}}$ цинка в эпислоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

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

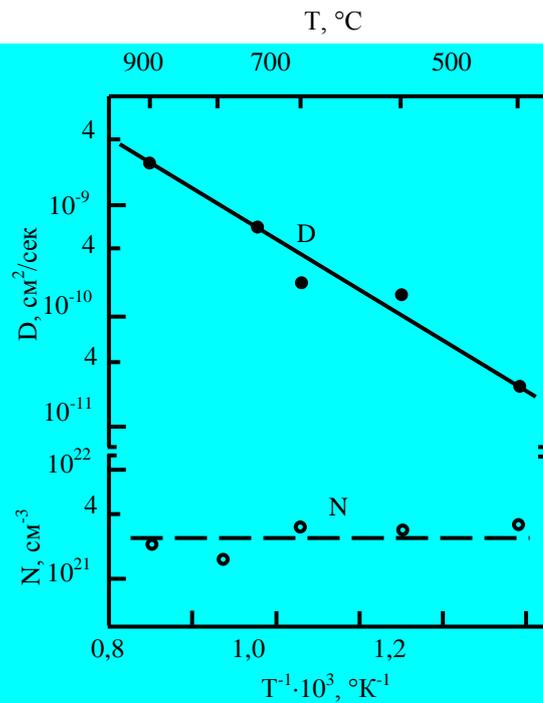


Рис. 2.1.1.6. Температурная зависимость коэффициента диффузии D и растворимости цинка N в эпислоях $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ ($x=0,4\div 0,5$).

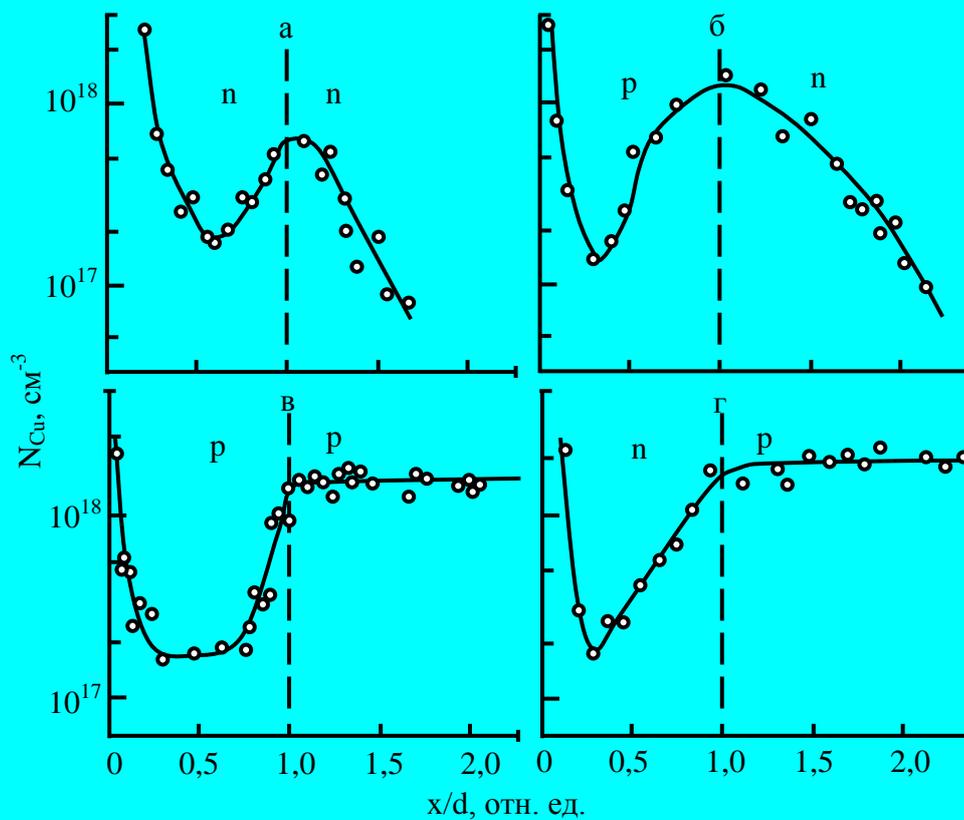


Рис. 2.1.1.7. Концентрационные профили меди в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ – гетероструктурах.

$T=950^\circ\text{C}$, $t=70$ 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.

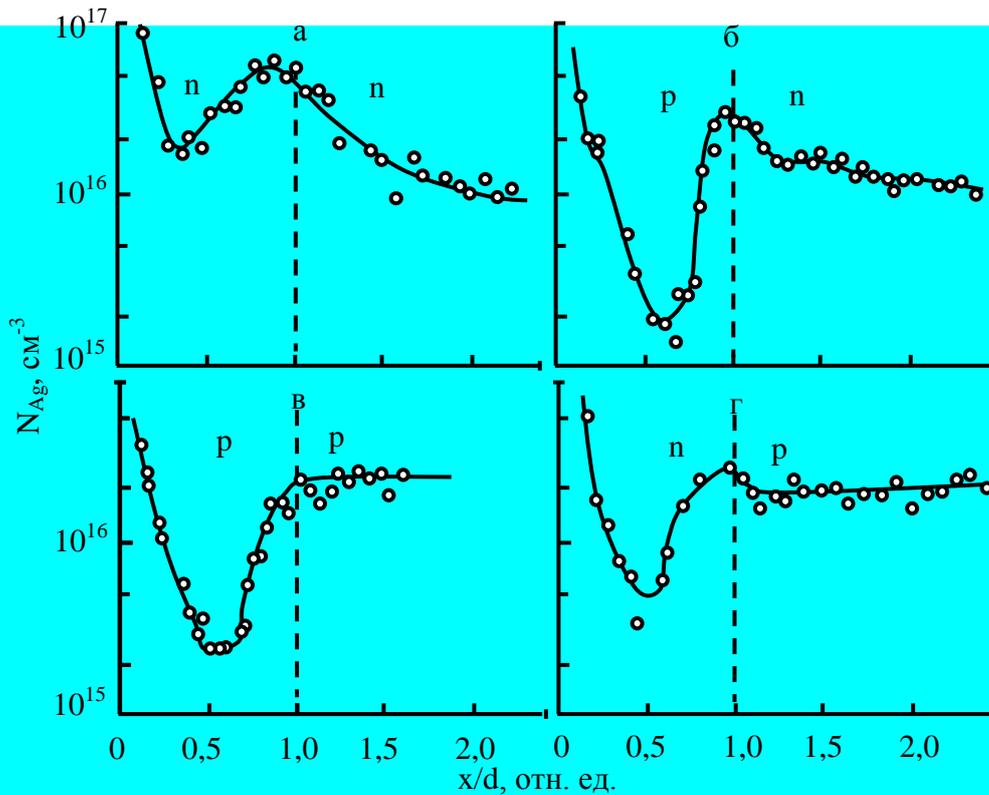


Рис. 2.1.1.8. Концентрационные профили серебра в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ – гетероструктурах.

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.:

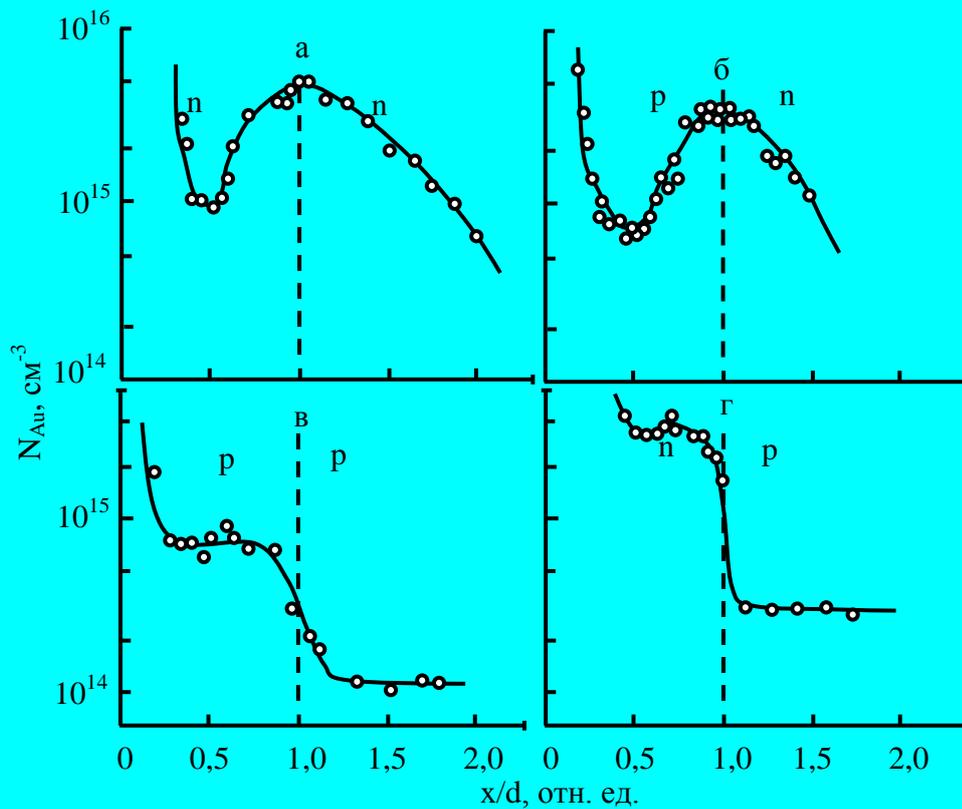


Рис. 2.1.1.9. Концентрационные профили золота в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} - \text{GaAs}$ – гетероструктурах.

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.:

§2.2 РАСТВОРИМОСТЬ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Понятие растворимости примесей непосредственно связано с диффузионным легированием 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 $N_{\text{Cu}}=4\cdot 10^{16}$ ат/см³. 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

$$K = \frac{N_{мс}}{N_{жс}} \quad (9)$$

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.

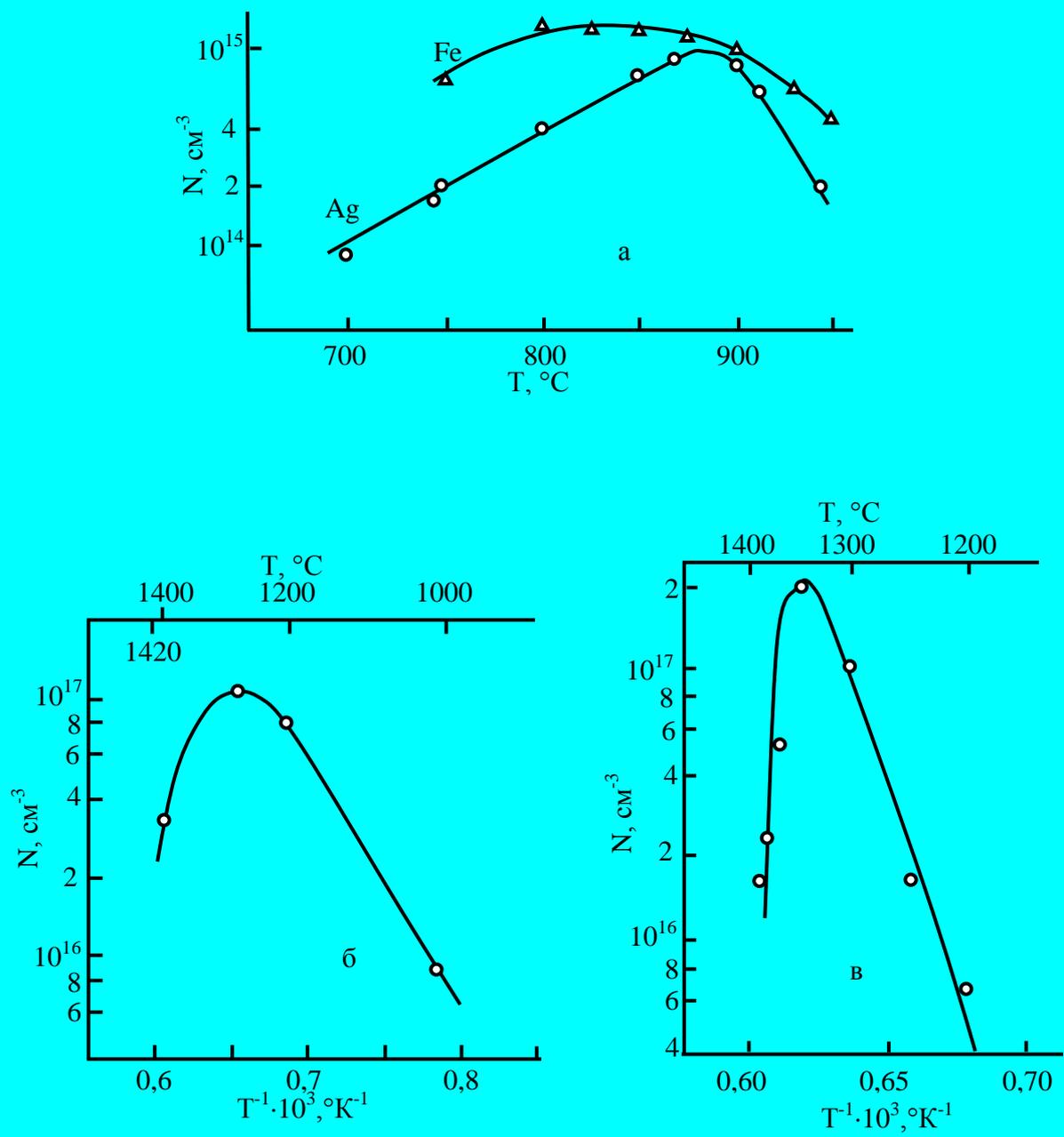


Рис. 2.2.1. а – растворимость железа и серебра в германии;
 б – растворимость золота в кремнии;
 в – растворимость серебра в кремнии

Таблица 2.2.1

Растворимость и коэффициент распределения примесей в германии

| Примесь | Максимальная растворимость, 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} | | |

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 |

**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 |

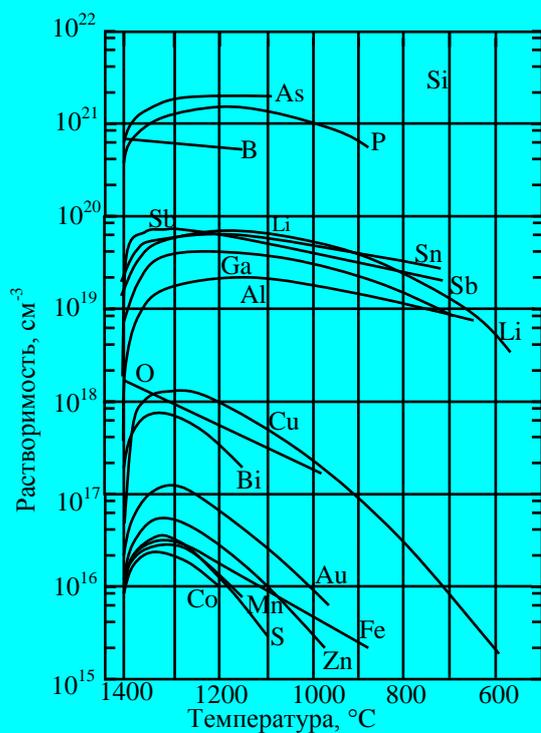


Рис.2.2.2. Температурная зависимость растворимости некоторых примесей в кремнии .

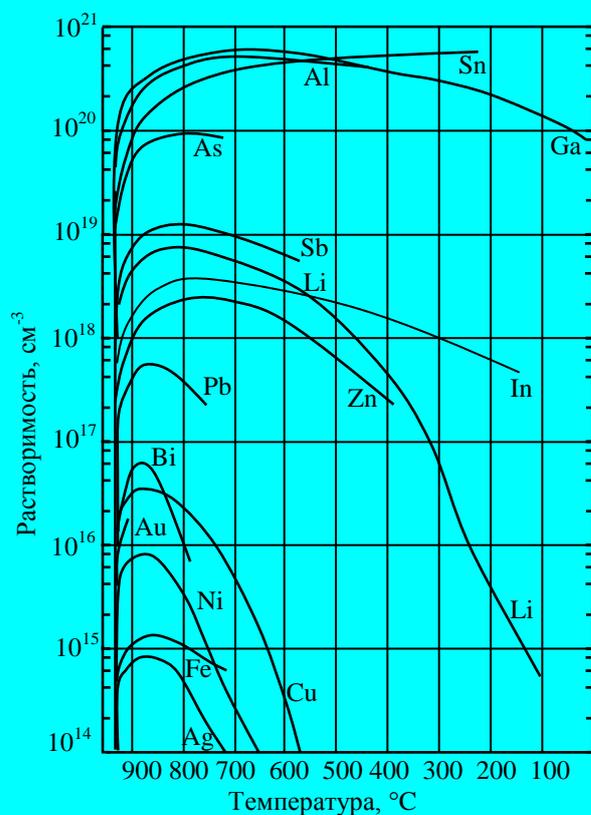


Рис. 2.2.3. Температурные зависимости растворимости различных примесей в германии.

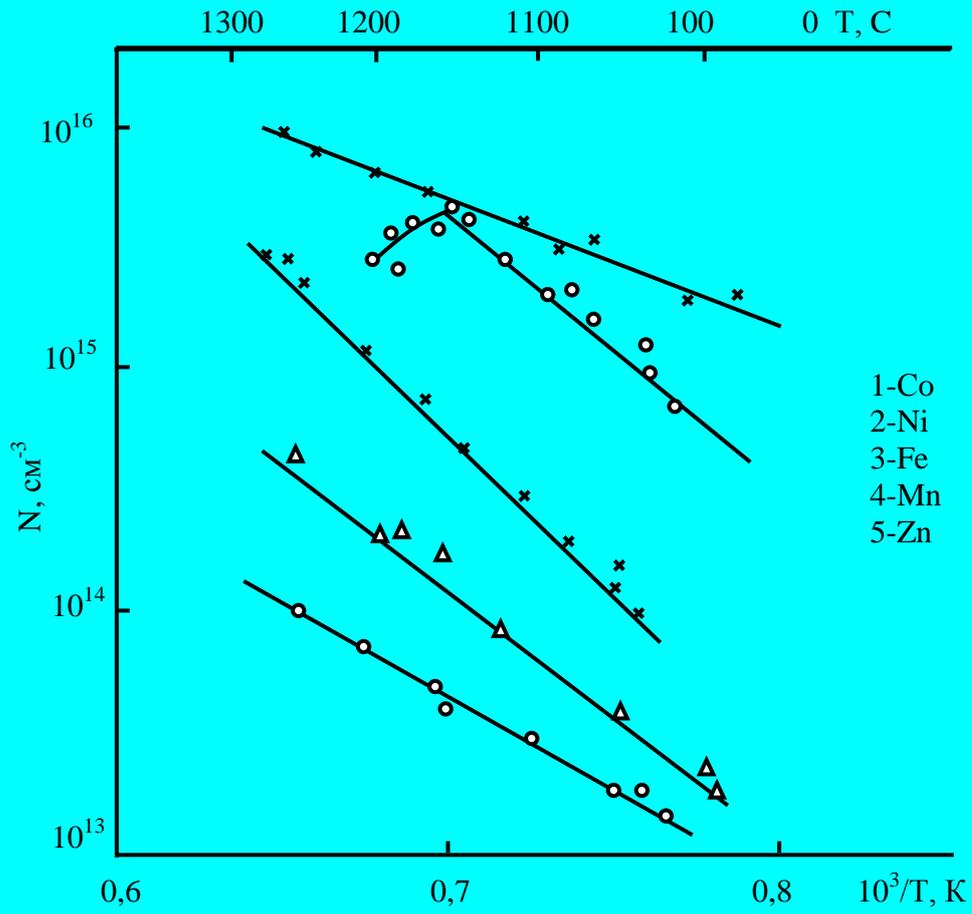


Рис. 2.2.4. Температурная зависимость электроактивных атомов примесей

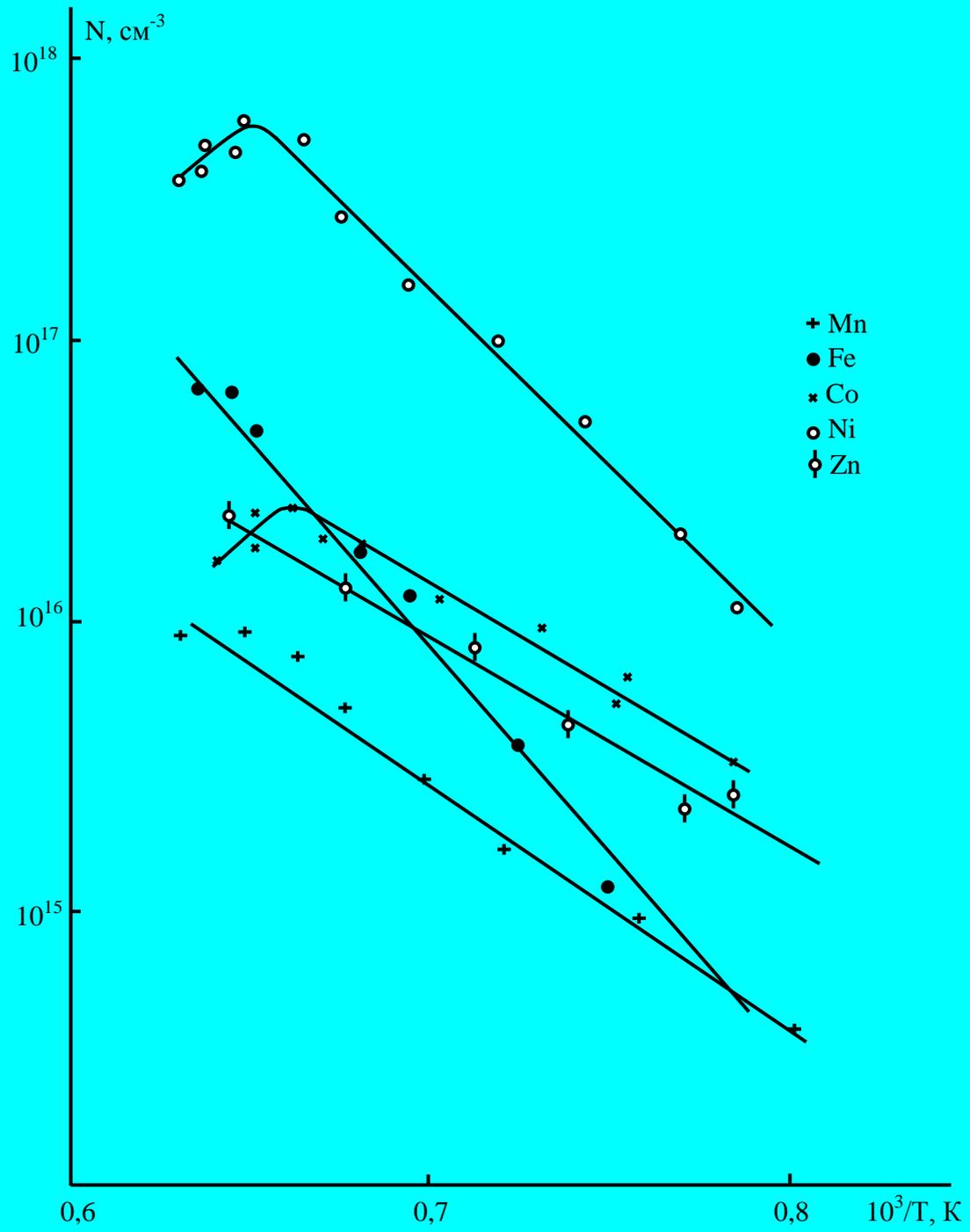


Рис. 2.2.5. Температурная зависимость растворимости примесей в кремнии.

§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. Электроннеактивными 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 электронейтральной. Некоторые примесные атомы в кристаллической решетке могут находиться в различных состояниях – в узлах, в междуузлиях, простых или сложных комплексах. Поэтому, в зависимости от положения примесных атомов в решетке, они могут со-

здавать 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.

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

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 | $E_v + 0.21$ |

| | | | |
|----|------------------|----------|---------------|
| Cu | Медь Copper | Acceptor | $E_v + 0.44$ |
| | | Acceptor | $E_v + 0.24$ |
| | | Acceptor | $E_v + 0.19$ |
| | | Acceptor | $E_v + 0.14$ |
| | | Acceptor | $E_v + 0.023$ |
| Fe | Железо Iron | Acceptor | $E_v + 0.52$ |
| | | Acceptor | $E_v + 0.37$ |
| 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 | A | | A (0,019) | | | | |
| Si | A | D (0,082) | D (0,02) A (0,03) | A | D | D | A |
| Ge | A | A (0,082) | A (комплекс) D (мелкий) | A | D (мелкий) | D | A |
| Sn | D + A | A (0,30) | A (0,03) A (комплекс) | A | | D | D |
| Pb | A | D (0,058) | D (мелкий) A (0,20) A (0,12) | N | D (мелкий) N | N | D (?) |

1) A – 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 | $E_c - 0,896$ | |
| Cu | | $E_v + 0,41$ |
| 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 | | $E_v + 0,041$ |
| N | Изоэлектронная ловушка | $E_v - 0,008$ |
| Bi | То же | $E_v + 0,038$ |
| Zn-O | >> >> | $E_v - 0,30$ |
| 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 | |

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

| Веще- ство | Примесь | Группа | Замещае- мый атом | Донор или accep- 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 | | 0,95 |
| | Ag | I | Zn | A | | 0,55 |
| ZnSe | Br | VII | Se | D | 0,21 | |
| | Cu | I | Zn | A | | 0,6 |
| | Ag | I | Zn | A | | 0,6 |
| | Sb | V | Se | A | | 0,7 |
| | | | | A | | 1,3 |
| | As | V | Se | A | | 0,7 |
| CdS | Cl, Br, J | VII | S | D | 0,03 | |
| | Al, Ga, In | III | Cd | D | 0,03 | |
| | Cu * | I | Cd | A | | 0,6 ; 1,0 |
| | Ag | I | Cd | A | | ($\leq 1,0$) |
| | Вакансия | | | A | | 1,0 |
| | Cd | | | | | |
| ZnTe | Cu ** | I | Zn | A | | |

Продолжение таблицы 2.3.8

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

§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.

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

| 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° К) | |
| KCl | 100 (при 90° К); 3 | |
| KBr | 110 (при 84° К); 12,5 | |
| KJ | 155 (при 84° К) | 2-6 |
| AgCl | 300 (при 85° К); 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 $120^\circ\text{K} < T \leq 500^\circ\text{K}$, 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 - | } От - 2,2 до - |
| PbSe | | |
| PbTe | | |

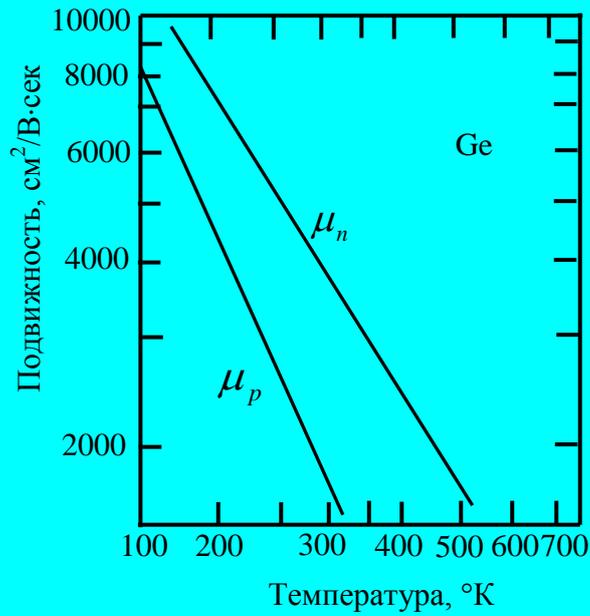


Рис. 2.4.1. Зависимость подвижности от температуры для германия.

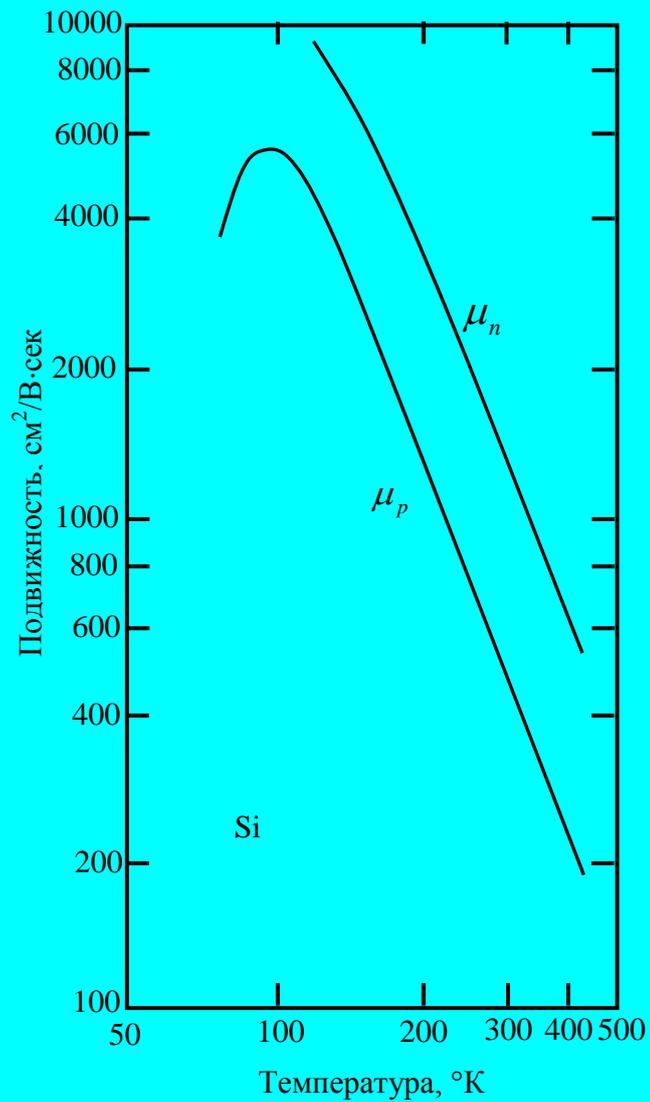


Рис. 2.4.2. Зависимость подвижности от температуры для кремния.

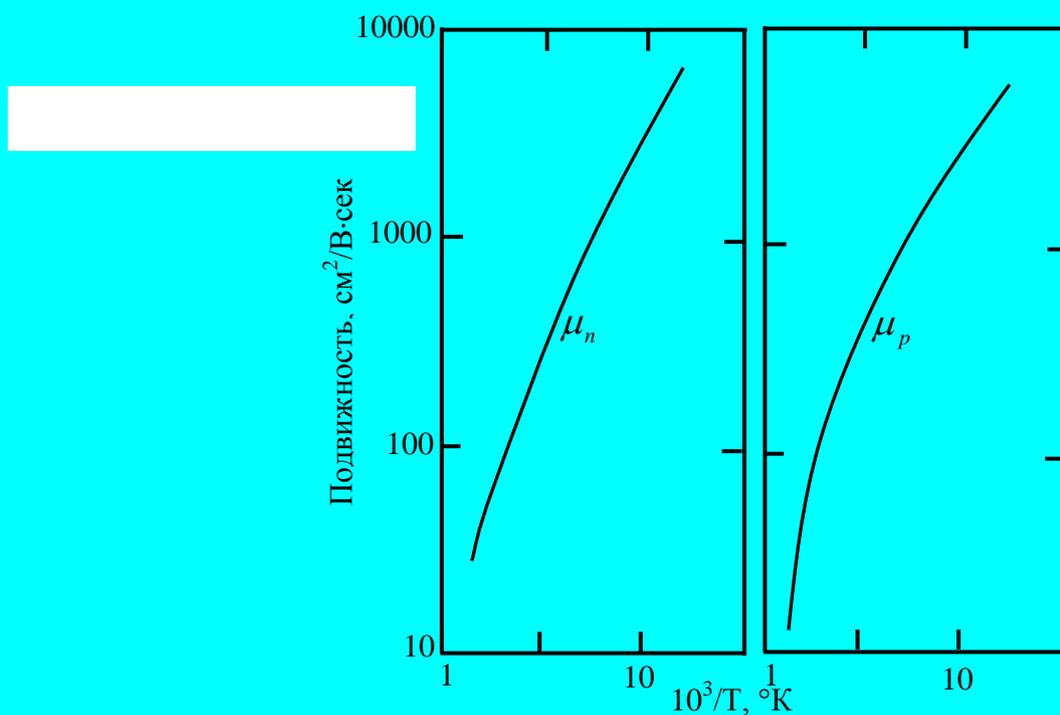


Рис. 2.4.3. Зависимость подвижности от температуры для сульфида свинца.

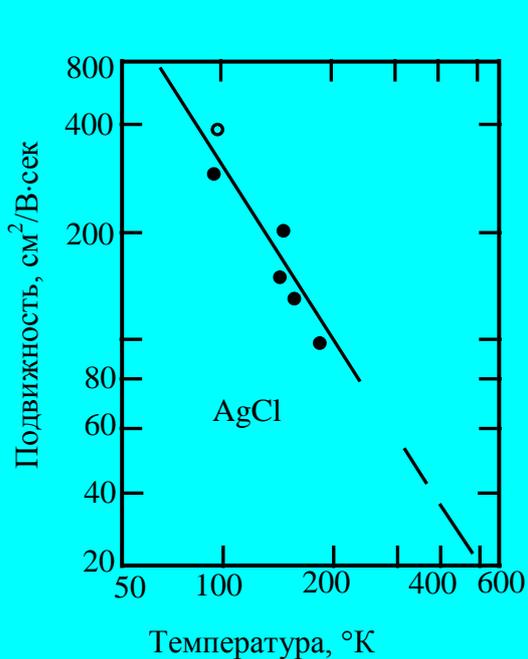


Рис. 2.4.4. Зависимость подвижности от температуры для хлористого серебра свинца.

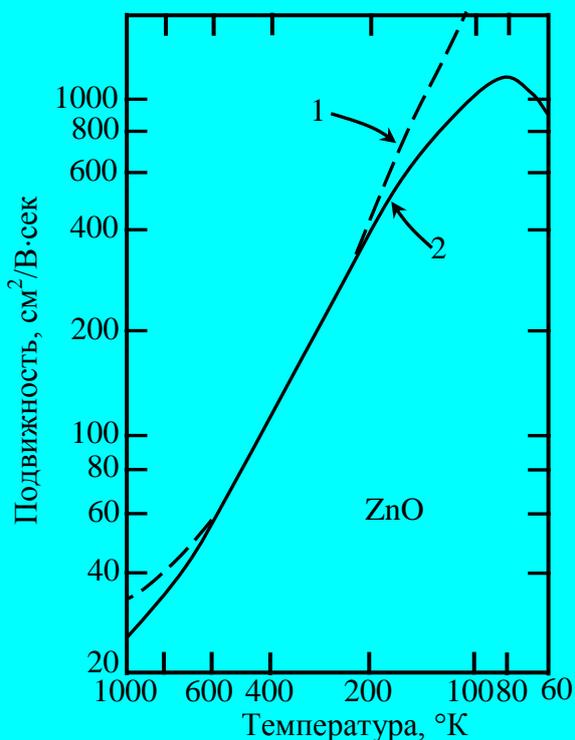
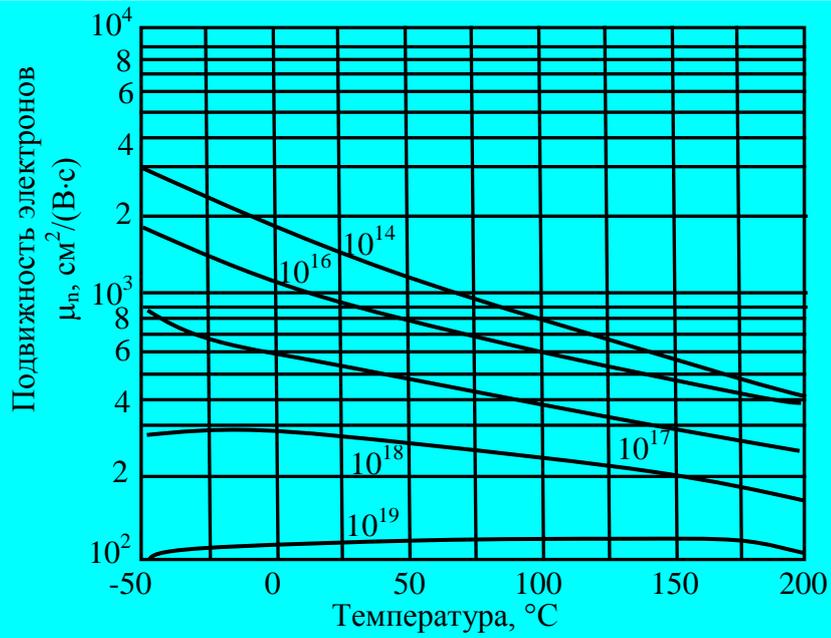
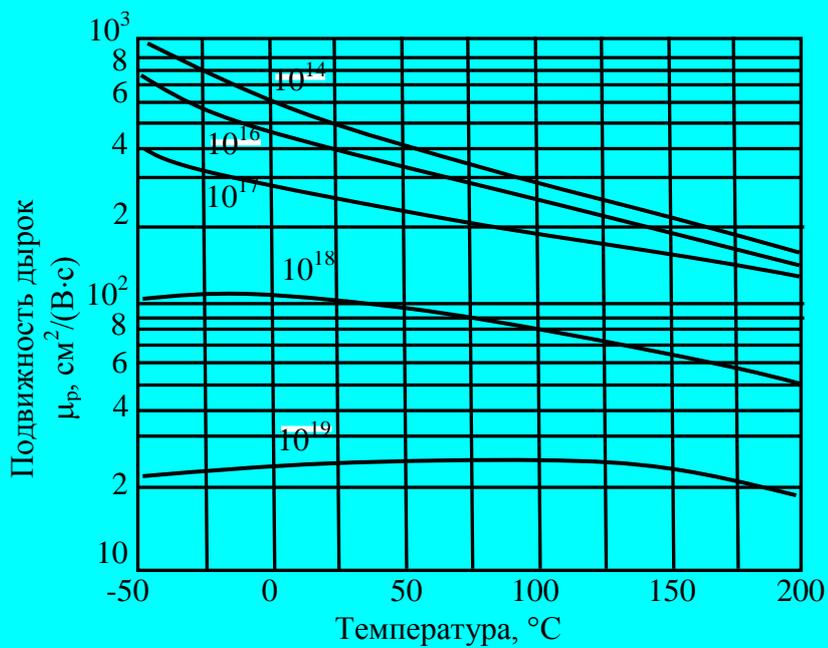


Рис. 2.4.5. Зависимость подвижности от температуры для окиси цинка. 1-вычисленная кривая для рассеяния на колебаниях решетки; 2-экспериментальная зависимость μ_n .



а



б

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.

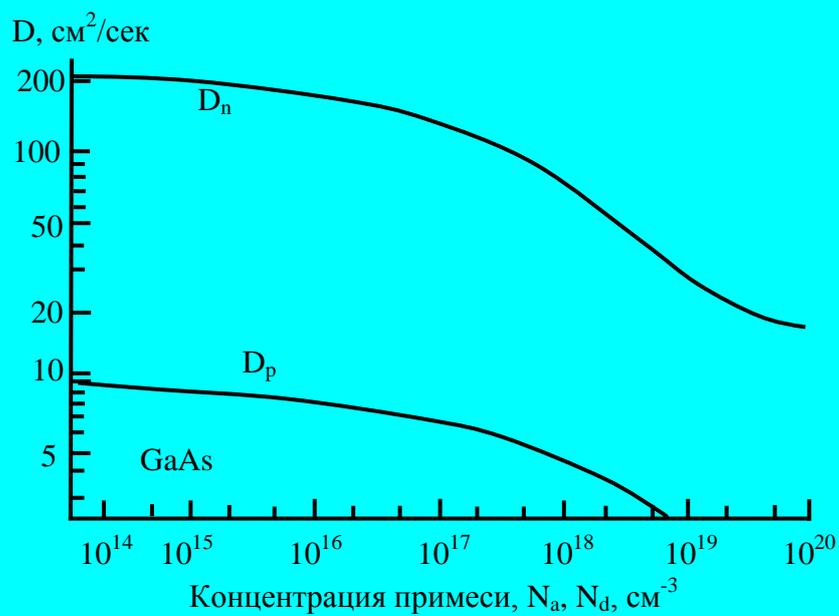
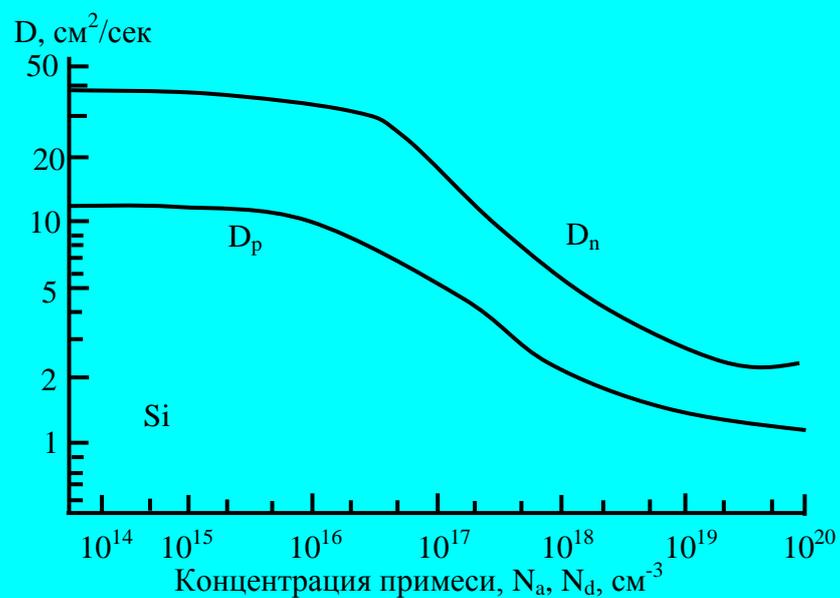


Рис. 2.4.7. Зависимости коэффициентов диффузии от концентрации примесей для полупроводников Si и GaAs при комнатной температуре.

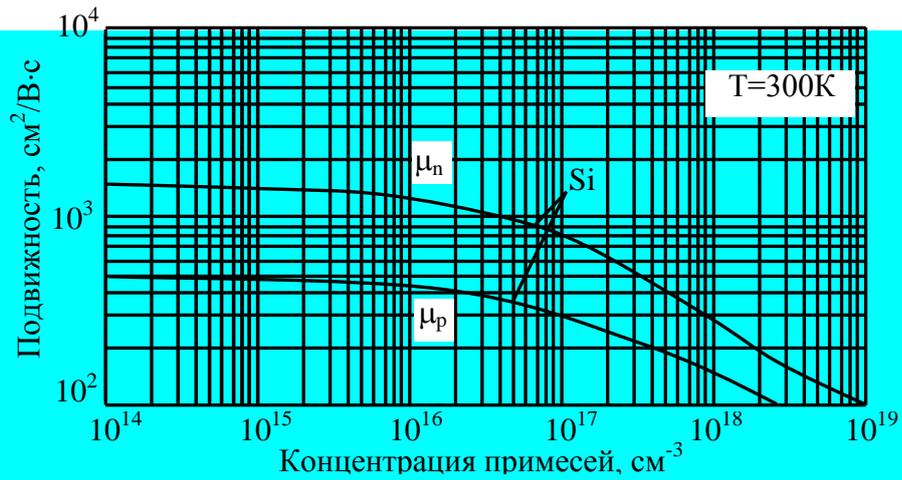


Рис. 2.4.8. Зависимость дрейфовой подвижности в кремнии от концентрации примесей при T=300К.

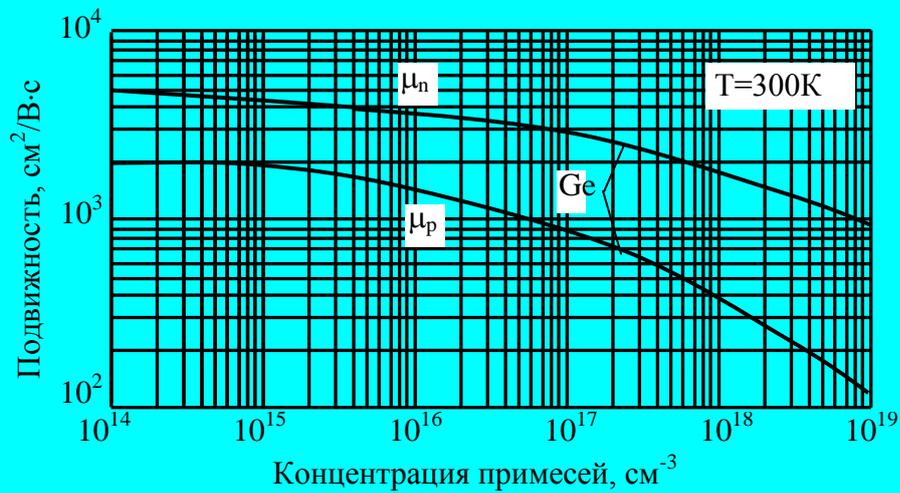


Рис. 2.4.9 Зависимость дрейфовой подвижности в германии от концентрации примесей при T=300К.

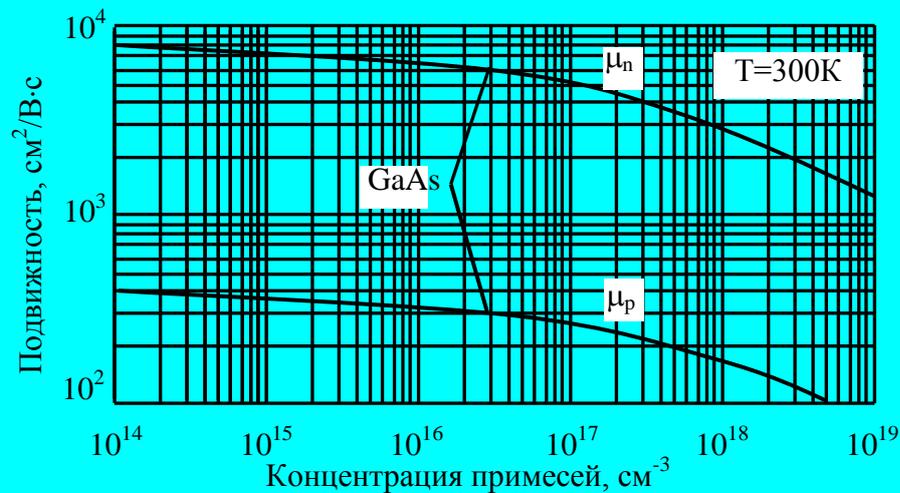


Рис. 2.4 10. Зависимость дрейфовой подвижности в арсениде галлия от концентрации примесей при T=300К.

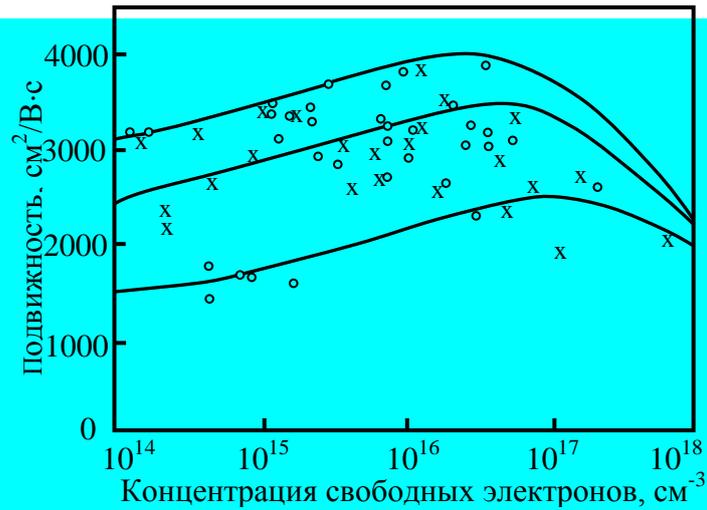


Рис. 2.4.11. Связь подвижности свободных электронов в InP с их концентрацией.

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).

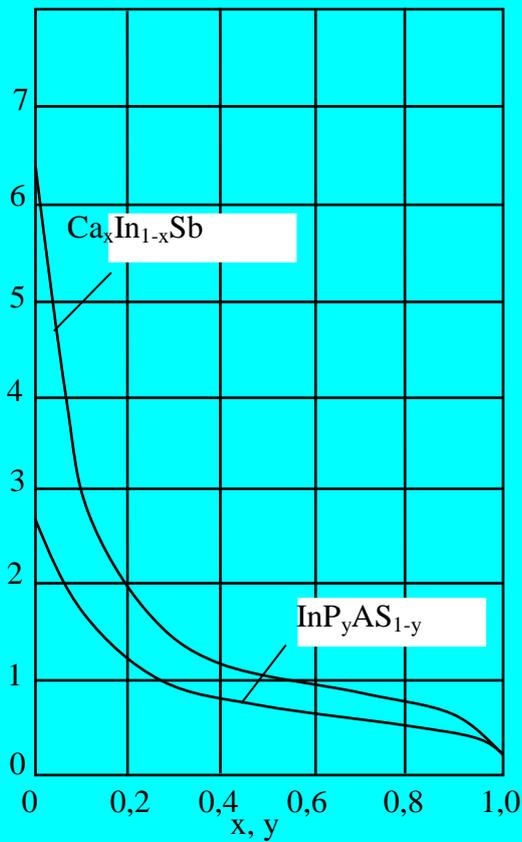


Рис.2.4.12 Зависимость подвижности электронов в твердых растворах $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$ и $\text{InP}_y\text{As}_{1-y}$ от состава ($T=300\text{K}$)

§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.

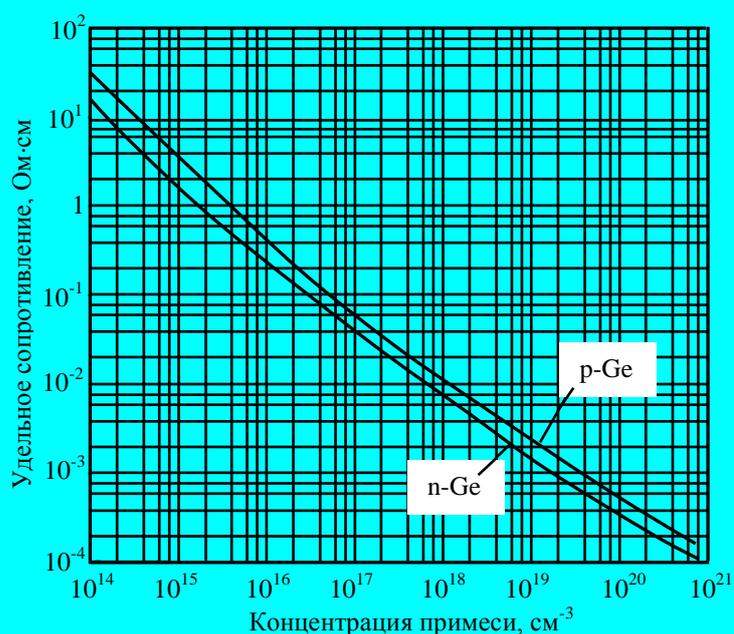


Рис. 2.4.13. Зависимость удельного сопротивления германия от содержания примесей ($T=300\text{K}$)

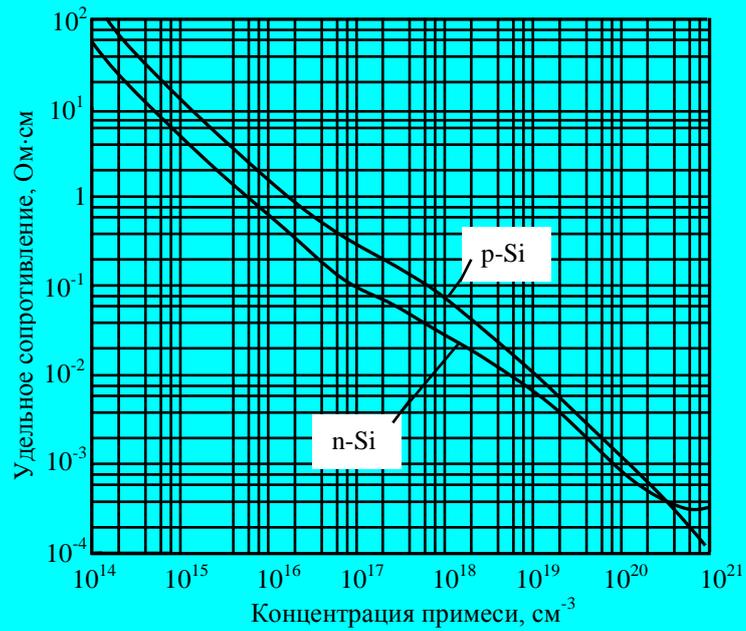


Рис . 2.4.14. Зависимость удельного сопротивления кремния от содержания примесей ($T=300\text{K}$)

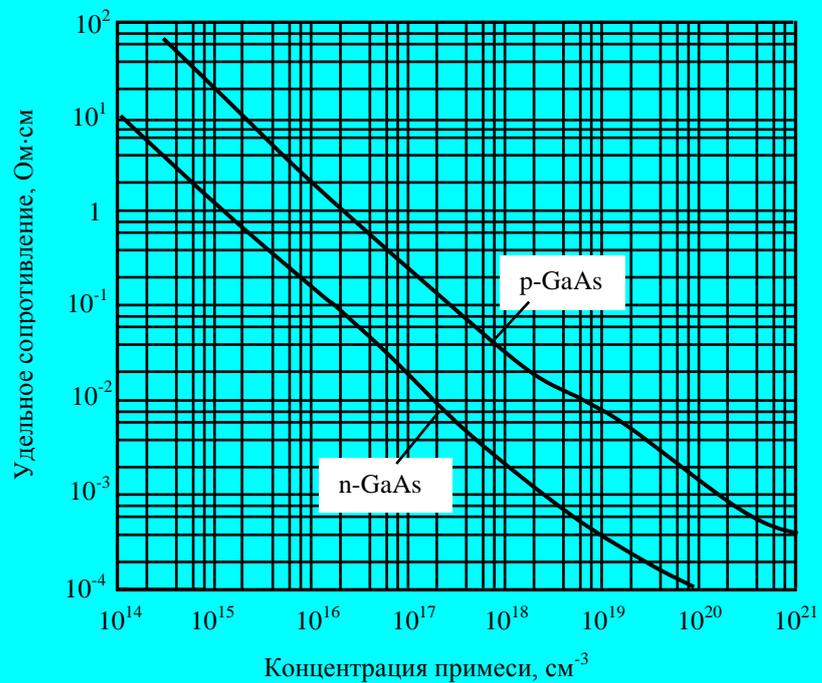


Рис. 2.4.15. Зависимость удельного сопротивления арсенида галлия от содержания примесей ($T=300\text{K}$)

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

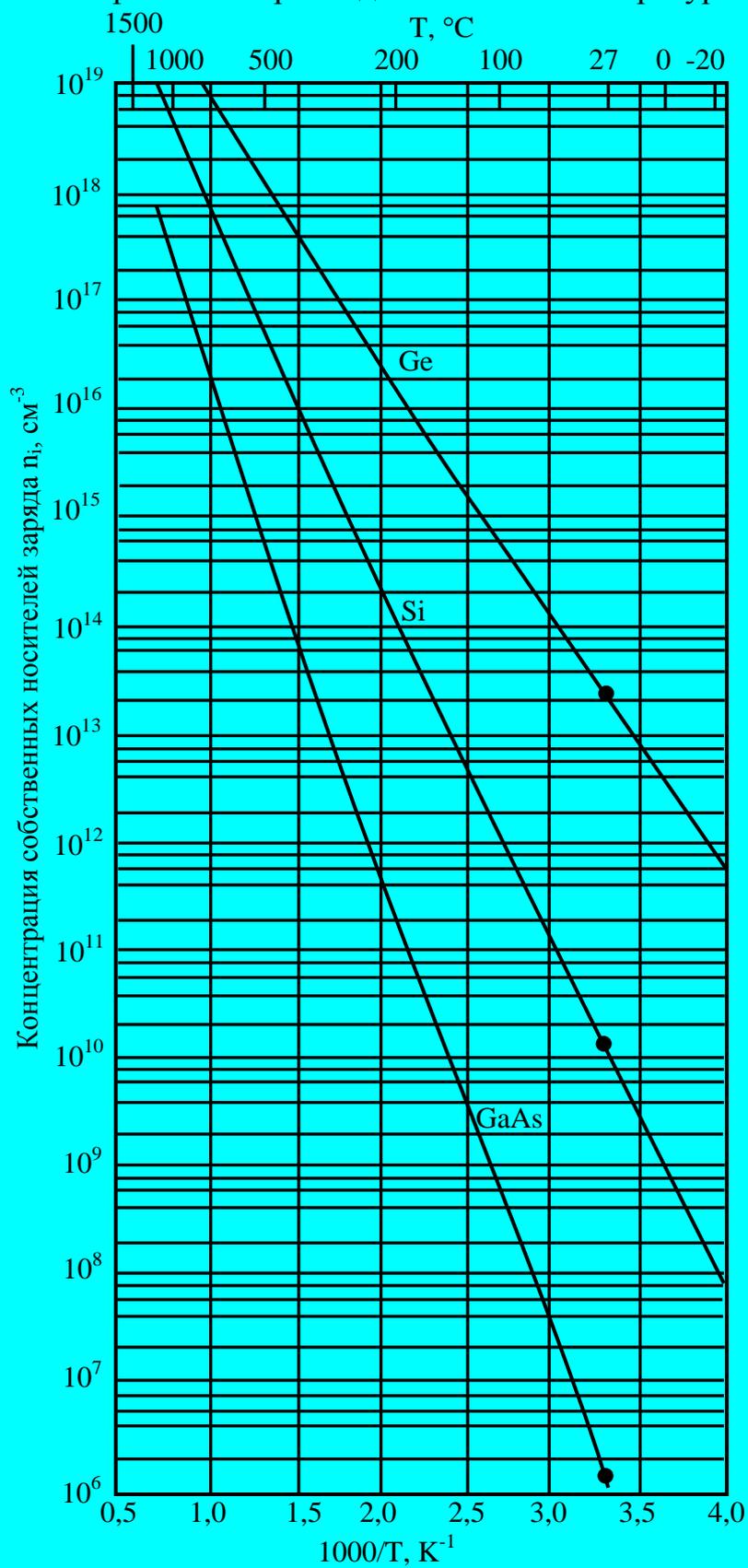


Рис. 2. 4. 16.

ГЛАВА III

НЕОБХОДИМЫЕ ФОРМУЛЫ И СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО ФИЗИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ

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) $n \ll p$:

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

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, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$)

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

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

$E_c(k)$ 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:

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

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 $T=300\text{K}$, $H \geq 30000$ 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:

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

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:

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

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 $T=300\text{К}$

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

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 P – 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 p–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:

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

U – величина внешнего потенциала.

$I_{нас}$ – 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:

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

Коэффициент полезного действия:

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

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

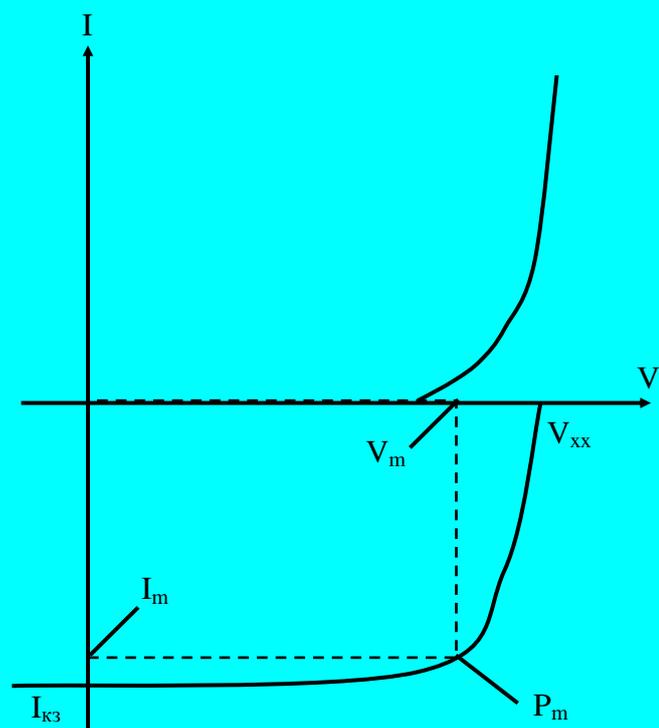


Рис. 3.1. Вольт- амперная характеристика солнечных элементов

§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 | T | 7,28 | 156,4 | 2000 |
| 50 | Олово | Sn | 127,60 | T | 7,30 | 231,9 | 2270 |
| 51 | Сурьма | Sb | 126,90 | P | 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 | P | 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 | Мг | г | 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 Мг | 10^9 | 1 | 10^6 | 10^7 | 10^{12} | 10^{15} | $6,02 \cdot 10^{33}$ |
| 1 г | 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) = $980,665 \cdot 10^3$ дин; 1 гс = $9,80655 \cdot 10^{-3}$ Н (точно) = 980665 мН (точно); 1 тс = $9,80655 \cdot 10^3$ Н (точно); 1 дин = 10^{-5} Н = $1,01972 \cdot 10^{-6}$ 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 ($t=0^\circ\text{C}$, $p=101,325$ кПа) | V_m | $2,241 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль |
| Постоянная Авогадро | N_a | $6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ |
| Постоянная Ломмонта | 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°С |
| Температура замерзания воды (плавления льда) | | 0°С=273,15К |
| Атомная единица массы | u | $1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Электрон – вольт | eV | $1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж |
| Нормальное атмосферное давление | $p_{\text{атм.н}}$ | 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 | $5,29 \cdot 10^{-6}$ м |
| Электрохимический эквивалент серебра | k_{Ag} | 13595 кг/м ³ |
| Плотность ртути при нормальных условиях ($t=0^\circ\text{C}$, $p=101,325$ кПа) | Q_{Hg} | |
| Плотность воздуха при нормальных условиях ($t=0^\circ\text{C}$, $p=101,325$ кПа) | $Q_{\text{вод}}$ | $1,293$ 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 | $< 10^{-16}$ |
| | К- 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 | l | 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 | |
| | | | | ± 2 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | 2 | 3d | 0 | $\pm 1/2$ | 2 | |
| | | | | ± 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 | |
| | | | | ± 2 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | 2 | 4d | 0 | $\pm 1/2$ | 2 | |
| | | | | ± 1 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | | | ± 2 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | 3 | 4f | 0 | $\pm 1/2$ | 2 | |
| | | | | ± 1 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | | | ± 2 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | | | ± 3 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| | | | | ± 1 | $\pm 1/2$ | 4 | |
| ± 2 | $\pm 1/2$ | | | 4 | | | |

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 | $H = \frac{IN}{l}$ | 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

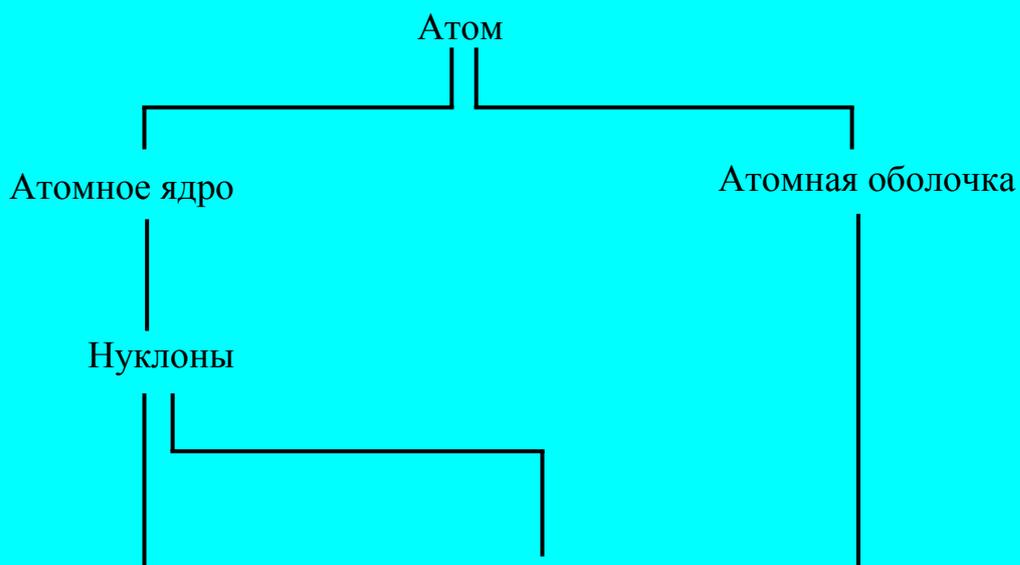
$m_{e0}=9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона

Единицы измерения важнейших физических величин

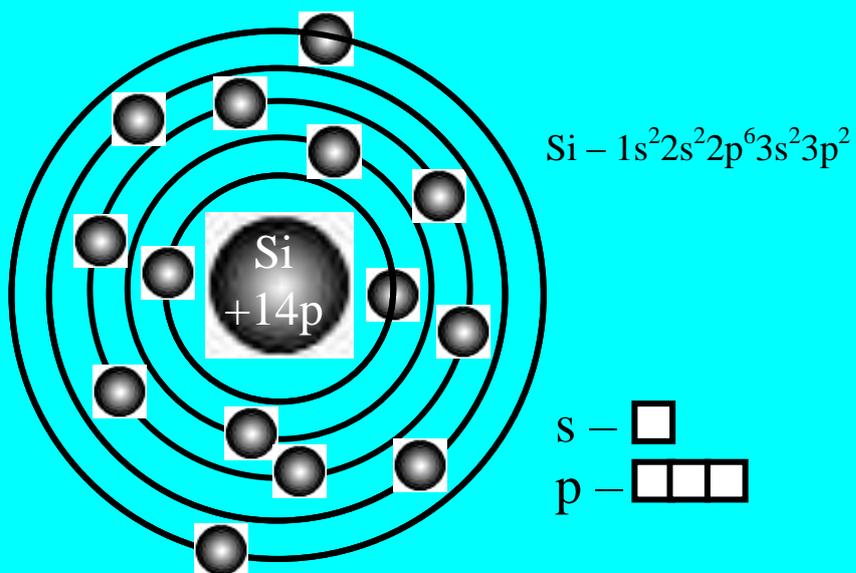
| Физическая величина | Обозначение | Единица измерения, краткие обозначения |
|-------------------------------|-------------|---|
| Длина | l, s | метр, м |
| Площадь | A | m^2 |
| Объем | V | m^3 |
| Время | t | секунд, с |
| Частота | ν | герц, Гц= $1/c$ |
| Частота вращения | n | оборот/секунд |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

| | | |
|--------------------------------------|-----------|---|
| 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 ПАРЫ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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 | $l = 0,00045 l_0$ |

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 Медведова**, 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, Bernhard 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