

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Материалы электронной техники
Методические указания по организации практических работ
Направление подготовки 04.04.01 Химия
Химия современных материалов и технологий

Ставрополь
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИНДЕКСЫ	6
1.1. Краткие теоретические сведения.....	6
1.2. Задачи.....	7
ГЛАВА 2. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ПО КОМПЛЕКСНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА	11
2.1. Краткие теоретические сведения.....	11
2.2. Задачи.....	11
ГЛАВА 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	16
3.1. Характеристика основных свойств.....	16
3.2. Параметры полупроводниковых материалов.....	17
3.3. Классификация полупроводниковых материалов.....	18
3.4. Вопросы и задачи	19
3.5. Полупроводниковые компоненты.....	22
3.5.1. Диоды	22
3.5.2. Транзисторы	28
ГЛАВА 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	42
4.1. Определение и свойства проводников.....	42
4.2. Зависимость электрических свойств проводниковых материалов от внешних факторов.....	45
4.2.1. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников.....	45
4.2.2. Зависимость удельного сопротивления проводниковых материалов от давления	47
4.2.3. Сопротивление проводников на высоких частотах.....	47
4.2.4. Электроперенос в проводниках	48
4.3. Классификация проводниковых материалов	49
4.4. Вопросы и задачи.....	50
4.5. Проводниковые компоненты	55
4.6. Нелинейные резисторы	59
ГЛАВА 5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	62
5.1. Определение, основные свойства	62
5.2. Параметры диэлектриков	64
5.2.1. Электрические параметры.....	64
5.2.2. Тепловые параметры	68
5.2.3. Физические параметры	69
5.3. Вопросы и задачи	69
5.4. Диэлектрические компоненты.....	74
ГЛАВА 6. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	79
6.1. Классификация веществ по магнитным свойствам	79

6.2. Основные свойства и параметры магнитных материалов	84
6.3. Виды магнитных материалов	89
6.4. Вопросы и задачи.....	90
ГЛАВА 7. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СХЕМ И ПЕРЕЧНЯ ЭЛЕМЕНТОВ	94
7.1 Общие правила выполнения схем.....	94
7.2. Структурная схема (Э1).....	95
7.3. Функциональная схема (Э2)	96
7.4. Принципиальная схема (Э3).....	96
7.5. Перечень элементов.....	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания рекомендуются для выполнения практических занятий и самостоятельной работы направления 04.04.01 «Химия» профиля подготовки «Химия современных материалов и технологий» по дисциплине «Материалы электронной техники».

В методических указаниях приведены краткие теоретические сведения и задачи по отдельным вопросам основ материаловедения, полупроводникам, проводникам, диэлектрическим и магнитным материалам и компонентам на их основе, а также правила оформления электрических схем Э1, Э2, Э3 и перечня элементов в соответствии с требованиями ЕСКД. Они могут быть использованы студентами всех форм обучения для самоподготовки.

ГЛАВА 1. МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ; КЛАССИФИКАЦИЯ, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАЗНАЧЕНИЕ

1.1. Краткие теоретические сведения

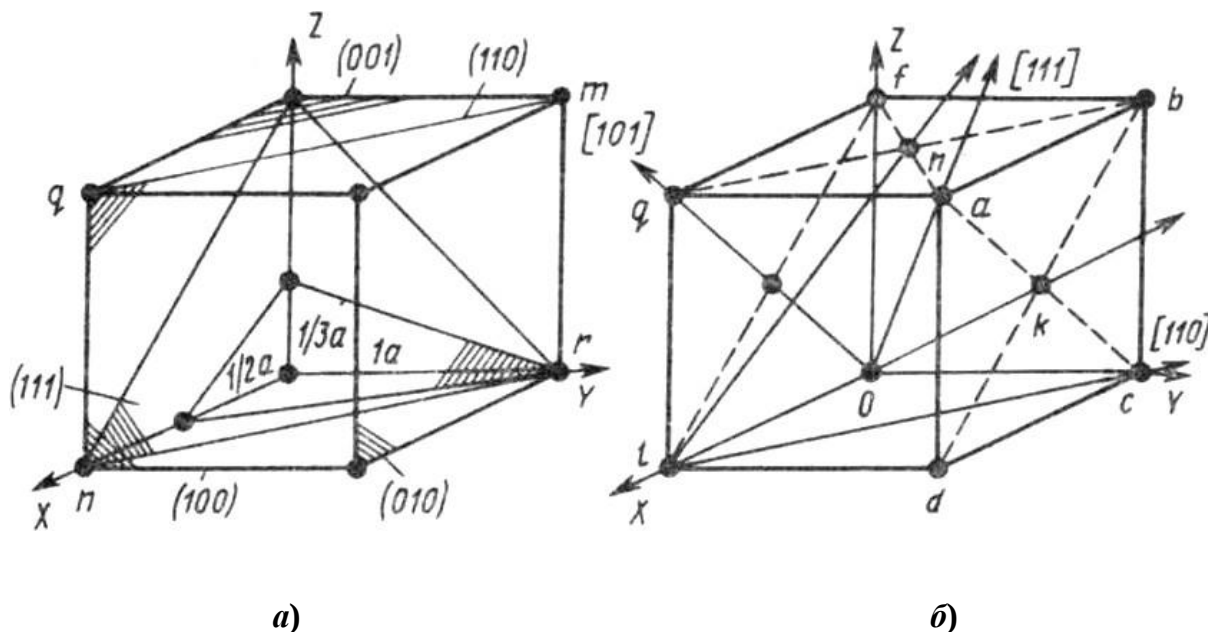


Рис. 1.1. Плоскости и направления в кристаллах:

a – индцирование кристаллографических плоскостей; *b* – индцирование кристаллографических направлений

Для определения индексов кристаллографической плоскости необходимо: установить координаты точек пересечения плоскости с осями координат в единицах периодов решетки; взять обратные значения этих величин; привести их к наименьшему целому, кратному каждому из полученных чисел. Полученные значения простых целых чисел (в круглых скобках), не имеющие общего множителя, являются индексами Миллера плоскости [6].

Рассмотрим индексы Миллера плоскости, пересекающей оси координат в точках $x=1/2a$, $y=1a$, $z=1/3a$ (a – период решетки, рис. 1.1,а). Обратные значения этих чисел 2, 1, 3. Эти числа являются простыми. Поэтому индексы этой плоскости будут (213). Следует читать: два, один, три.

Индекс по оси показывает, на сколько равных частей плоскость делит осевую единицу по данной координатной оси.

Плоскость, параллельная какой-либо координатной оси, имеет по этой оси индекс нуль, так как $1/\infty=0$. Так, например, плоскость $qmnp$ (рис. 1.1,а) имеет индексы (110).

Если плоскость пересекает ось в области отрицательных значений координат, то соответствующий индекс будет отрицательным и знак минус ставится над индексом.

Непараллельные плоскости, имеющие одинаковое атомное строение, кристаллографически эквиваленты (например, (001), (100) или (110) и (011) и т.д.).

Зная индексы (hkl) плоскости, можно подсчитать межплоскостное расстояние d между плоскостями (hkl) данного семейства для кубических кристаллов с периодом решётки a по формуле

$$d_{(hkl)} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}.$$

Эта зависимость широко используется при рентгеноструктурном анализе кристаллических тел, имеющих кубическую решетку.

Индицирование кристаллографических направлений рассмотрим по рис. 1.1,б. Ориентация прямой определяется координатами двух ее точек. При определении индексов направлений необходимо, чтобы: одна точка направления совпадала с началом координат (если прямая не проходит через начало координат, то ее необходимо путем параллельного переноса совместить ее с началом координат или перенести начало координат на прямую); установить координаты любой другой точки, лежащей на данной прямой, в единицах периода решетки; привести отношения этих координат к отношению трех наименьших целых чисел. Заключив полученные числа в квадратные скобки, получим индексы кристаллографического направления.

Пример, индексы направления oa (рис. 1.1,б) будут $[111]$.

Каковы индексы оси Y (рис. 1.1,б)?

Для получения индексов прямой, проходящей через точки l и центр грани k (рис. 1.1,б), необходимо перенести линию lk параллельно самой себе так, чтобы она проходила через начало координат, и определить новые координаты точки k по формулам $x = -1/2$, $y = +1$, $z = 1/2$.

Наименьшие целые числа без общего множителя будут $-1, 2, 1$. Знак минус у индекса 1 становится над индексом. Тогда индексы направления lk будут $[\bar{1}21]$.

В кубической решетке индексы направления, перпендикулярного плоскости (hkl), имеют те же индексы, т.е. $[hkl]$. Проверьте это, упражняясь по рис. 1.1,а,б.

1.2. Задачи

1. Определить, сколько атомов приходится на одну элементарную ячейку в кристаллах с простой, объемно-центрированной и гранецентрированной кубической решеткой.

2. Гранецентрированная кубическая решетка состоит из атомов одного вида, имеет шесть атомов в центрах граней и, кроме того, восемь атомов в вершинах куба. Доказать, что объем, занимаемый атомами ячейки, составляет $\pi\sqrt{2}/6$ объема куба.

3. Определить углы между следующими кристаллографическими направлениями в кубическом кристалле:

а) $[001]$ и $[111]$; б) $[011]$ и $[101]$; в) $[011]$ и $[111]$.

4. В кубической кристаллической решетке постройте плоскости с индексами Миллера (121) и $(1\bar{2}\bar{1})$.

5. В систему $\{111\}$ кубического кристалла входят плоскости (111) , $(\bar{1}\bar{1}1)$, $(11\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, $(1\bar{1}\bar{1})$, $(\bar{1}\bar{1}1)$ и $(11\bar{1})$.

Какие из этих плоскостей параллельны? Какую пространственную фигуру образуют все эти плоскости при взаимном пересечении?

6. Определить расстояние между ближайшими параллельными плоскостями $\{111\}$ в кубической кристаллической решетке с периодом a элементарной ячейки.

7. Вычислить, сколько атомов располагается на 1 мм^2 плоскостей (100) и (111) в кристаллической решетке кремния, если межатомное расстояние $l=0,2352 \text{ нм}$.

Решение

Кремний кристаллизуется в решетке алмаза, где межатомное расстояние l равно $1/4$ большей диагонали куба. Поэтому период решетки

$$a = \frac{4l}{\sqrt{3}} = \frac{4 \cdot 0,2352 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{3}} = 5,43 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

На плоскости (100) элементарной ячейки находятся два атома кремния (поскольку каждый угловой атом одновременно принадлежит четырем соседним ячейкам).

$$n = 4 \cdot \frac{1}{4} + 1 = 2.$$

Отсюда поверхностная плотность атомов

$$N_s = n/S = n/a^2 = 2/(5,43 \cdot 10^{-10})^2 = 6,78 \cdot 10^{12} \text{ мм}^{-2}.$$

На плоскости (111) равностороннему треугольнику площадью

$$S = (a\sqrt{2})^2 \cdot \sqrt{3}/4 = \frac{a^2 \sqrt{3}}{2}$$

принадлежит в среднем два атома

$$n = 3 \cdot \frac{1}{6} + 3 \cdot \frac{1}{2} = 2.$$

Поверхностная плотность атомов в этой плоскости

$$N_s = 2n/(a^2 \sqrt{3}) = 4/\sqrt{3} \cdot (5,43 \cdot 10^{-10})^2 = 7,84 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2} = 7,84 \cdot 10^{12} \text{ мм}^{-2}.$$

8. Докажите, что направление $[hkl]$ в кубической кристаллической решетке нормально плоскости (hkl) .

Решение

В кубической кристаллической решетке координатные оси ортогональны, причем масштабные коэффициенты по все трем осям одинаковы. Поэтому плоскость (hkl) отсекает на координатных осях отрезки в пропорции $OA:OB:OC = \frac{1}{h} : \frac{1}{k} : \frac{1}{l}$. На рис. 1.1 направлению $[hkl]$ соответству-

ет вектор ON . Для решения задачи достаточно доказать, что вектор ON перпендикулярен отрезкам BC и BA , являющимся следами плоскости (hkl) . Пусть ON' – проекция вектора ON на плоскость XOY . Легко убедиться, что треугольники OAB и OBD подобны. Поэтому отрезок AB нормален плоскости ZON' , а значит, и вектору ON . Аналогично можно показать, что ON и BC также взаимно перпендикулярны. Отсюда следует, что вектор ON является нормалью к плоскости ABC .

9. Укажите кристаллографические направления в ромбической решетке с размерами элементарной ячейки $a=0,25$ нм; $b=0,58$ нм; $c=0,43$ нм: $[210]$, $[112]$, $[211]$.

10. Известно, что алюминий кристаллизуется в решетке гранецентрированного куба с периодом идентичности $a=0,4041$ нм. Вычислите концентрацию свободных электронов, полагая, что на каждый атом кристаллической решетки приходится три электрона.

Решение

В решетке гранецентрированного куба на одну элементарную ячейку приходится четыре атома. Поэтому число атомов в единице объема

$$N = \frac{4}{a^3} = \frac{4}{(0,4041 \cdot 10^{-9})^3} = 6,06 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Отсюда концентрация электронов

$$n = 3N = 18,18 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

11. Вычислите период кристаллической решетки меди, если ее плотность равна 8920 г/м^3 , а элементарная ячейка представляет собой гранецентрированный куб. Определите объем, приходящийся на один атом.

Решение

Рентгеновская плотность кристалла связана с периодом кубической решетки соотношением $d = Km/a^3$, где m – масса атома; K – число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку (кратность ячейки). В случае гранецентрированного куба $K=4$. Учитывая, что $m = A/N_0$, получаем

$$a = \sqrt[3]{\frac{KA}{DN_0}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 63,54 \cdot 10^{-3}}{8920 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}} = 3,72 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,372 \text{ нм}.$$

На один атом решетки приходится объем

$$V_1 = a^3/K = (3,72 \cdot 10^{-10})^3/4 = 1,29 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

12. Расстояние между ближайшими атомами в кристаллической решетке вольфрама равно 0,2737 нм. Известно, что вольфрам имеет структуру объемно-центрированного куба. Найдите плотность материала.

13. Определите концентрацию свободных электронов в натрии, элементарная ячейка которого представляет собой объемно-центрированный куб с ребром $a=0,428$ нм.

14. В чем состоят различия между монокристаллами, поликристаллическими и аморфными веществами?

15. Приведите примеры точечных и протяженных дефектов структуры реальных кристаллов.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ И ПРОЦЕССЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИМС

2.1. Краткие теоретические сведения

Большое количество материалов и параметров затрудняют их выбор. Научный подход к выбору материалов выполняется на основе комплексного показателя качества.

$$K = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \chi_i,$$

где χ_i – значение i -го параметра в относительных единицах;

φ_i – коэффициент значимости данного параметра;

n – количество параметров;

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1.$$

Вес параметров материалов, по которым производится оценка, приводят к безразмерному виду:

$$\chi_i = \frac{A_{i \text{ абсолютное}}}{A_{i \text{ заданное}}}. \quad (2.1)$$

Это берется в том случае, если параметр минимизируется, то есть его значение при уменьшении дает улучшение свойств.

В случае если параметр максимизируется

$$\chi_i = \frac{A_{i \text{ заданное}}}{A_{i \text{ абсолютное}}}.$$

$A_{i \text{ заданное}}$ может быть задано в техническом задании или же определенными по совокупности параметрами. Значение коэффициента значимости определяется с помощью экспертной оценки. Определяется важность того или иного параметра, и этому параметру назначается наименьший коэффициент [1].

2.2. Задачи

Получить от преподавателя задание и произвести выбор материала по комплексному показателю. Данные по показателям материалов взять из таблицы, указанной преподавателем. Назначение аппаратуры:

- а) общего назначения;
- б) бортовая аппаратура;
- в) измерительная аппаратура.

Значение φ_i определять согласно назначению.

Таблица 2.1. Показатели фольгированных гетинаксов ГФ, ГФС, ГОФ, ГОФВМ

Показатель	ГФ-1-35Г ГФ-2-35Г ГФ-1-50Г ГФ-2-50Г	ГФС-1-35Г	ГОФ-1-35Г ГОФ-2-35Г	ГОФВМ-1-35Г ГОФВМ-2-35Г
Поверхностное электрическое сопротивление ρ_s , Ом	10^9	10^9	10^9	10^9
Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом·м	$5 \cdot 10^8$	10^9	$5 \cdot 10^9$	10^{10}
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, (10^6 Гц)	0,05	0,05	0,05	0,05
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r (10^6 Гц), не более:	5,5	5,5	5,5	5,5
Прочность на отслаивание на полосках 3 мм σ , Н, не менее: в исходном состоянии	3,75	3,8	4,0	4,0
Водопоглощение, мг	40	40	100	40

Таблица 2.2. Показатели фольгированных стеклотекстолитов ФТС, СТФ, СТНФ, ДФО, ДФС

Показатель	ФТС	СТФ-1 СТНФ-1	СТФ-2 СТНФ-2	ДФО-1, ДФО-2, ДФС-1, ДФС-2
Поверхностное электрическое сопротивление ρ_s , Ом	$5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{11}$
Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом м	10^{10}	10^{10}	10^{10}	10^{10}
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, (10^6 Гц)	0,035	0,035	0,035	0,025
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r (10^6 Гц), не более:	5,5	5,5	5,5	5,5

Окончание табл. 2.2

Прочность на отслаивание на полосках 3 мм σ , Н, не менее:	3,8	4,0	4,0	4,0
Водопоглощение, мг, не более:	8	25	25	20
Изменение линейных размеров после травления $\Delta l/l$, %, не более:	0,05	0,04	0,04	0,05

Таблица 2.3. Показатели гибких фольгированных материалов ЛФ и ПФ

Показатель	ЛФ-1	ПФ-1-35-0,1	ПФ-2-35-0,16
Поверхностное электрическое сопротивление ρ_s , Ом, не менее:	10^{11}	10^{12}	10^{11}
Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом м, не менее:	10^{12}	10^{12}	10^{12}
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$, (10^6 Гц), не более:	0,03	0,025	0,035
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r (10^6 Гц), не более:	3,5	3,5	4,0
Водопоглощение после кондиционирования в условиях 24ч/23 °С, мг, не более	7,5	9,0	10,0
Прочность на отслаивание на плоскостях 3 мм σ , Н, не менее:	2,4	2,4	2,4
Изменение линейных размеров после травления $\Delta l/l$, %, не более	0,5	0,25	0,25
Стойкость к многократным перегибам	400	600	125

Таблица 2.4. Основные характеристики материалов оснований печатных плат

Критерии оценки	ГФ-1 ГФ-2	СФ-1 СФ-2	СТНФ-1,2 СТФ-1,2	ФДМ-1,2	ФАФ-4Д	СТПА-5 СТАП	Полиимид
Поверхностное электрическое сопротивление ρ_s , Ом	10^8*	$5 \cdot 10^{10}*$ $2 \cdot 10^{12}**$	$1 \cdot 10^{12}***$	10^{14}		$5 \cdot 10^{11}$	10^{14}
Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом·м, не менее:	$5 \cdot 10^7*$	$1,4 \cdot 10^{13}**$	$2 \cdot 10^{12}***$	$9 \cdot 10^{11}$	$10 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{11}**$	10^{14}
Диэлектрическая постоянная ϵ_r при 1 МГц	7,0***	5,5* 4,3**	5,4* 4,6**	4,7	2,2	5,4* 4,6**	3,5

Окончание табл. 2.4

Тангенс угла ди- электрических потерь $\operatorname{tg}\delta$, (10^6 Гц) при $f=1$ МГц*	0,07*	0,035 0,014**	0,03..0,035	0,024	0,0002	0,025 0,015**	0,001- -0,002
Сопротивление изоляции, МОм	10^3	10^4	10^6	10^4			
Электрическая прочность, МВ/м	15...30***	15...35***		15...35***	25...250***		30...200***
Стойкость к воз- действию ванны для пайки, °C/с	260/5	260/20	260/30	260/20		260/30	260/60
Водопоглощение, мг, менее	2,9 60	0,3 6,4	0,20 -0,25 1,5	1,5		15	2,9
Предельные тем- пературы, °C	-60+85	-60+85	-60+105	-60+100	+113		-196+400
Прочность отслаи- вания полоски 3 мм, σ , Н не менее:	2,7	3,0	4,5	3...3,6		3,6****	2,6...3,9

Примечания: * после кондиционирования в условиях 96ч/40 °C /93% (96ч; при температуре 40 °C; относительной влажности 93%);

** после кондиционирования в условиях 96ч/40 °C /93%+1ч/23 °C /75;

*** верхние пределы указаны для тонких пленок;

**** после гальванической металлизации.

Таблица 2.5. Основные параметры базовых материалов фирмы ISOLA

Наименование параметра	Марка материала		
	(FR-4)	(CEM-1)	(FR-2)
Поверхностное сопротив- ление, Ом	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{10}$
Удельное объемное сопро- тивление ρ_v , Ом·см	$8 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{12}$
Диэлектрическая постоян- ная при 1МГц	4,7	4,7	5,0
Тангенс угла диэлектриче- ских потерь $\operatorname{tg}\delta$, (10^6 Гц), при 1 МГц	0,019	0,031	0,050
Усилие при отрыве кон- тактной площадки, Н	340	210	100
Прочность сцепления мед- ной фольги (без предвари- тельной обработки), Н/мм	2,0	1,8	1,9
Стойкость к воздействию припоя, °C/с	260/60	260/25	260/15
Предельные температуры, °C	130	130	105
Водопоглощение, мг	15	19	52

Таблица 2.6. Показатели фольгированных стеклотекстолитов СФГ-230 и ФДГ

Показатель	СФГ-230-1-35 СФГ-230-2-35 СФГ-230-1-50 СФГ-230-2-50	ФДГ-1, ФДГ-2
Поверхностное электрическое сопротивление ρ_s , Ом, не менее	$5 \cdot 10^{11}$	10^9
Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом·м не менее	$5 \cdot 10^{10}$	10^9
Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ (10^6 Гц), не более:	0,026	0,04
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r (10^6 Гц) не более: в исходном состоянии	5,4	6,0
Прочность на отслаивание на полосках 3мм, σ , Н, не менее: фольга 35 мкм	3,5	2,3

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Характеристика основных свойств

Важнейшая роль полупроводников в радиоэлектронике обусловлена тем, что они служат основой активных приборов, способных усиливать мощность или преобразовывать одни виды энергии в другие (но не в тепло) в малом объеме твердого тела без существенных потерь [7].

Приведем признаки полупроводниковых материалов.

1. Основным признаком полупроводника является большая, чем у металлов, но меньшая, чем у диэлектриков, электропроводность.

2. Полупроводники при комнатной температуре могут иметь удельное сопротивление $10^{-4} \div 10^9$ Ом·см, удобное для технических применений.

3. Удельное сопротивление любого полупроводника можно изменять в широких пределах (на несколько порядков значений ρ) с помощью концентраций электрически активных примесей – донорных и акцепторных. По этому признаку полупроводники отличаются от диэлектриков, удельное сопротивление которых слабо зависит от состава, поскольку электрически активных примесей для диэлектриков не существует.

4. Ширина запрещенной зоны полупроводников лежит в пределах $0 < \varphi_3 \leq 3$ эВ.

5. При неизменном составе и структуре удельное сопротивление полупроводников может изменяться за счет подвода внешней энергии: тепловой, электромагнитной, радиационной, ядерной, механической.

6. Удельное сопротивление полупроводников падает при нагревании, так как растет число свободных электронов за счет увеличения числа перебросов электронов (3) из валентной зоны (2) в зону проводимости (1) (рис. 3.1).

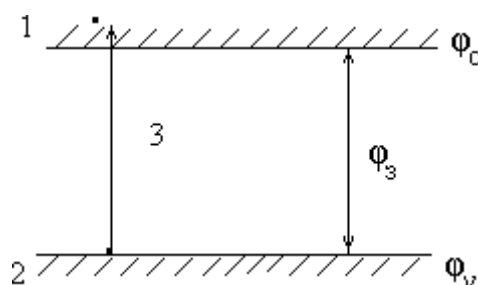


Рис. 3.1. Схема переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости:
1 – зона проводимости; 2 – валентная зона; 3 – зона переброса электронов; φ_c –
энергия дна зоны проводимости; φ_3 – ширина запрещенной зоны; φ_v – энергия
потолка валентной зоны

7. В широком диапазоне значений электрические параметры полупроводников строго однозначны и предсказуемы благодаря высокой чистоте и совершенной, как правило, монокристаллической структуре.

3.2. Параметры полупроводниковых материалов

1. Ширина запрещенной зоны - параметр, количественно отражающий структуру энергетического спектра электронов в кристалле данного полупроводника (рис. 3.1). Чем химически стабильнее данный полупроводник и чем выше его температура плавления, тем шире запрещенная зона. Значение ширины запрещенной зоны прямо определяет многие электрические и оптические свойства и параметры полупроводников (табл. 3.1):

а) температурную зависимость электропроводности и значение максимальной рабочей температуры;

б) край полосы пропускания, определяющий прозрачность полупроводника для света данной длины волны. Край полосы пропускания связан с шириной запрещенной зоны уравнением

$$\lambda_{\text{кр}} = 1,24/\varphi_z, \quad (3.1)$$

где λ измеряется в микрометрах (мкм);

в) длину волны света, испускаемого p - n переходом в результате излучательной рекомбинации.

2. Концентрация собственных носителей заряда n_i . Значение концентрации собственных зарядов определяется выражением

$$n_i = p_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp(-\varphi_z/2\varphi_T), \quad (3.2)$$

где $\varphi_T = kT/e$ – температурный потенциал, а N_c и N_v – мало зависящие от температуры множители, в которые входят эффективные массы соответственно электронов и дырок. Значения n_i для ряда полупроводников приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Значения n_i для ряда полупроводников

Параметры	Полупроводники						
	Ge	Si	GaAs	GaP	GaSb	InP	InSb
Ширина запрещенной зоны при 298 К, эВ	0,75	1,12	1,43	2,26	0,72	1,35	0,18
Концентрация свободных носителей заряда при 298 К, см ⁻³	$2,5 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{10}$	$1,29 \cdot 10^6$	2,73	$6,1 \cdot 10^{11}$	$6,9 \cdot 10^4$	-

Окончание табл. 3.1

Подвижность электронов в слаболегированном материале при 298 К, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	3900	1450	9500	190	4200	4600	78000
Подвижность дырок в слаболегированном материале при 298 К, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	1900	500	450	120	1400	150	750
Относительная диэлектрическая проницаемость	16,0	12,5	13,8	10	15,7	12,1	17,72

Концентрация носителей заряда сильно зависит от температуры и радиации. Она определяет концентрацию электронов и дырок в примесном полупроводнике. Это следует из закона действующих масс

$$np = n_i^2 = \text{const.} \quad (3.3)$$

3. Подвижность свободных зарядов μ_n и μ_p . Характеризует скорость дрейфа, приобретаемую свободными носителями в электрическом поле единичной напряженности, например, 1 В/см. Она имеет размерность квадратный сантиметр на вольт-секунду ($\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$). Почти все полупроводники имеют подвижность электронов μ_n больше, чем подвижность дырок μ_p ($\mu_n > \mu_p$). Подвижность свободных носителей зарядов зависит от температуры окружающей среды и концентрации примесей в полупроводнике. Подвижность является параметром, определяющим быстродействие полупроводниковых приборов. Подвижность связана с коэффициентом диффузии свободных зарядов соотношением Эйнштейна $D = \varphi_T \mu_n$, где $\varphi_T = T/11600$ - температурный потенциал, при температуре 300 К $\varphi_T = 0,026$ эВ [1].

3.3. Классификация полупроводниковых материалов

Наиболее полная классификация полупроводников проводится по типу химической связи. Согласно химической связи все полупроводниковые материалы можно разделить на два класса: простые и сложные полупроводники [7].

Простыми называются полупроводники, основным состав которых образован атомами одного химического элемента. Простыми полупроводниками являются, например, кремний (Si) и германий (Ge).

Сложные полупроводники – это химические соединения и сплавы на основе двух и большего числа компонентов. Среди них, прежде всего, выделяются двойные полупроводниковые сплавы и соединения типа

$A^I B^{VII}$, $A^{II} B^{VI}$, $A^{III} B^V$, $A^{III}_2 B^{VI}_3$, $A^V_2 B^{VI}$ и т.д., где А и В – символы элементов, римские цифры указывают номер группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, а арабские – число атомов. Важной группой сложных полупроводников являются соединения $A^{III} B^V$: антимониды – соединение сурьмы с кремнием; арсениды – соединение мышьяка с кремнием; фосфиды – соединение фосфора с кремнием. Основные параметры простых и сложных полупроводников приведены в таблице 3.1.

3.4. Вопросы и задачи

1. В каких пределах можно менять удельное сопротивление кремния, какими средствами?
2. Докажите, что в уравнении $\rho = 1/nq\mu$ размерности левой и правой частей совпадают.
3. В чем разница следующих выражений: 1) материал обладает полупроводниковыми свойствами; 2) материал - типичный полупроводник?
4. Какие особенности полупроводникового кремния обусловили его исключительное применение в интегральных схемах?
5. Почему германий не может конкурировать с кремнием в производстве интегральных схем?
6. Может ли удельное сопротивление полупроводника возрастать при увеличении температуры?
7. Почему в СВЧ-схемах используются *n*-канальные (а не *p*-канальные) МОП-транзисторы?
8. Во сколько раз увеличивается коэффициент диффузии легирующей примеси в кремнии при повышении температуры от 1000 до 1200 С?
9. Почему у антимонида индия собственная удельная проводимость определяется только концентрацией электронов?
10. Перечислите материалы подложек, пригодных: а) для эпитаксиального наращивания кремния; б) получения пленок аморфного кремния.
11. Диффузию примеси *n*-типа в *p*-кремний можно рассматривать как альтернативу выращиванию эпитаксиального слоя. Почему применяют эпитаксиальное наращивание?
12. Чем объясняется преимущественное применение кремния в микроэлектронике?
13. Определите коэффициент диффузии электронов для кремния при температуре 300 К.
14. Время жизни электронов в образце кремния при температуре 300 К составляет $2 \cdot 10^{-4}$ с. Определите диффузионную длину при $T = 300$ К.

Решение

Из выражений $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ и $D_n = q_n \mu_n$ находим диффузионную длину электронов $L_n = \sqrt{q_n \mu_n \tau_n}$. Значение μ_n определим из табл. 3.1.

Таким образом,

$$L_n = \sqrt{26 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 86,8 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 0,868 \text{ мм}.$$

15. Подвижность электронов в фосфиде индия равна $5000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а дырок $150 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Удельное сопротивление при температуре 300 К $\rho_i = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Определите концентрацию собственных полупроводников.

Решение

Удельное сопротивление полупроводников

$$\rho_i = \frac{1}{\sigma_i} = \frac{1}{n_i e (\mu_n + \mu_p)}.$$

Из этого выражения определяем концентрацию собственных носителей заряда

$$n_i = \frac{1}{\rho_i e (\mu_n + \mu_p)} = \frac{1}{0,5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} (5000 + 150)} = 2,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

16. Определите удельное сопротивление полупроводника n -типа при температуре 300 К , если известно, что концентрация доноров равна 10^{22} м^{-3} , подвижность электронов $\mu_n = 0,5 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

17. При напряженности электрического поля 100 В/м плотность дрейфового тока через полупроводник $j_n = 6 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Определите концентрацию электронов проводимости в полупроводнике, если их подвижность $0,375 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Дырочной составляющей тока пренебречь.

18. Кристалл германия легирован алюминием с концентрацией $N_a = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Определите удельное сопротивление при температуре 300 К , если известно, что подвижность дырок равна $1900 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

19. Удельное сопротивление собственного германия при $T = 300 \text{ К}$ $\rho = 0,43 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Подвижности электронов и дырок в германии $0,39$ и $0,19 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, соответственно. Определите собственную концентрацию электронов и дырок.

20. Определите коэффициенты диффузии электронов и дырок в кремнии при $T = 300 \text{ К}$, если подвижность электронов и дырок соответственно 1400 и $450 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

21. Определите концентрацию электронов и дырок при $T = 300 \text{ К}$: а) в собственном кремниевом полупроводнике; б) в кристалле кремния, содержащем $5 \cdot 10^{17}$ атомов сурьмы в 1 см^3 .

Решение

Концентрацию собственных носителей определяем из табл. 2.1:

$$n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}.$$

Концентрация электронов в кристалле кремния легированном сурьмой

$$n_n = N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

Концентрацию дырок в кристалле кремния, легированном сурьмой, находим из закона действующих масс:

$$p_n = n_i^2 / N_d = (2,1 \cdot 10^{20}) / (5 \cdot 10^{17}) = 0,42 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}.$$

22. Определите удельное сопротивление германия при $T = 300 \text{ К}$. Чему будет равно удельное сопротивление, если к этому образцу добавить донорную примесь в количестве $2,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$?

23. Образец кремния имеет удельное сопротивление $2000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и концентрацию электронов проводимости $n_i = 1,4 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Определите удельное сопротивление образца, легированного акцепторной примесью с концентрацией 10^{21} м^{-3} , если подвижности электронов и дырок связаны соотношением $\mu_p = 0,25 \mu_n$.

24. Удельная проводимость образца кремния при $T = 300 \text{ К}$ равна $4,3 \cdot 10^{-4} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$. Какова концентрация собственных носителей, если через образец проходит ток? Какая часть этого тока обусловлена электронами

25. Определить количество исходного материала необходимого для получения слитка кремния массой 1 кг : а) из тетрахлорида Кремния; б) из трихлорсилана кремния; в) из моносилана кремния.

26. Какое количество доноров необходимо ввести в германий для получения материала с удельным сопротивлением три $\text{Ом}\cdot\text{см}$?

27. Определить длину волны поглощения полупроводниковых материалов, если известна ширина запрещенной зоны: а) $\varphi_z = 0,67 \text{ эВ}$; б) $\varphi_z = 1,2 \text{ эВ}$.

28. Какое количество акцепторов необходимо ввести для того, чтобы в подложке кремния с концентрацией доноров 10^{14} см^{-3} создать область р-типа с удельным сопротивлением $0,03 \text{ Ом}\cdot\text{м}$?

29. При выращивании слитка кремния скорость подъема увеличили на 10% , как изменился диаметр слитка?

30. Какой будет ширина запрещенной зоны кремния при 300 К , если известно, что $\varphi_{30} = 1,21 \text{ эВ}$ при $T = 0 \text{ К}$, а температурный коэффициент $\varphi_z = -4,3 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$?

31. Концентрация донорных примесей в германии $N_g = 10^{15}$ при 300 К . Найти проводимость полупроводника.

32. Найти проводимость беспримесного полупроводника, если при повышенной температуре концентрация носителей $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

33. Построить график зависимости удельного сопротивления германия от температуры, значения которой приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Зависимость удельного сопротивления германия от температуры

T, K	385	458	556	714
$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$	0,028	0,0061	0,0013	0,00027

Считать, что подвижность электронов и дырок не меняется от температуры.

34. Чему равна относительная погрешность определения концентрации основных зарядов при 350 К, если учитывать температурную зависимость ширины запрещенной зоны φ_z . Считать, что $n_i(300) = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_z(300) = 1,12 \text{ эВ}$, $TK\varphi_z = -4,1 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

35. Определить, в каком диапазоне должна находиться ширина запрещенной зоны ν_z полупроводников, если излучение находится в видимой части спектра ($\lambda_{\text{виз}} = 0,4 - 0,75 \text{ мкм}$).

36. Определить диффузионную длину неосновных зарядов в полупроводнике n -типа из кремния при $T = 300 \text{ К}$, если среднее время жизни дырок составляет 15 мкс.

37. После отключения источника света концентрация свободных заряд уменьшилась в десять раз за 50 мкс, определить среднее время жизни свободных зарядов.

38. Уровень Ферми в кремнии при 300 К расположена 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости, определить концентрацию электронов и дырок. Данные по материалу из приложения А.

39. Определить сопротивление полупроводникового резистора из кремния размером $l = 20 \text{ мкм}$, $b = 100 \text{ мкм}$ $h = 2 \text{ мм}$, легированного фосфором с концентрацией $N_d = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ при 300 К.

40. Определить погрешность вычисления собственной концентрации в кремнии при 310 К возникающую из-за изменения φ_z с температурой; $n_i = 2,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ при 300 К; $TK\varphi_z = -1,4 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$.

41. Эпитаксиальный слой арсенида галлия легирован донорами в количестве $1,56 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Чему равно удельное сопротивление слоя.

42. Определить плотность тока через образец германия, имеющий цилиндрическую форму и длину $l = 5 \text{ мм}$, диаметр 3 мм, если полупроводник легирован донорами с концентрацией $N_d = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и к нему приложено напряжение 10 В.

3.5. Полупроводниковые компоненты

3.5.1. Диоды

Определения. Классификация

Полупроводниковый диод – это прибор с одним или несколькими электрическими переходами и двумя внешними выводами. Большинство

диодов имеют один электрический переход и только диносторы имеют три перехода [2].

Диоды по виду электрического перехода делятся на диоды с электронно-дырочным переходом и металл-полупроводниковым (диоды Шоттки). В зависимости от формы перехода они подразделяются на точечные и плоскостные.

По технологии изготовления они бывают сплавные, диффузионные, планарные, меза-диоды.

По диапазону рабочих частот диоды делятся на низкочастотные (НЧ), высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ). НЧ-диоды обычно являются диодами плоскостной формы. ВЧ-диоды имеют точечную форму p - n перехода, а в СВЧ диодах используются точечные контакты металл-полупроводник.

По назначению диоды бывают выпрямительные, опорные, варикапы, импульсные, туннельные, обращенные, фотодиоды, светодиоды.

По материалу полупроводника, из которого изготовлен диод, они подразделяются на кремниевые, германиевые, арсенидо-галлиевые.

Условные графические изображения диодов приведены на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Графическое обозначение диодов

В настоящее время классификация диодов по их назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам и т.д. отражена в их условном обозначении, использующем буквенно-цифровой код (ГОСТ 10862-73, ОСТ 11336, 919-81). Структура кода включает пять элементов (табл. 3.3) [4].

Таблица 3.3. Структура кода

Номер элемента	1	2	3	4	5
Символ	Буква или цифра	Буква	Цифра	Буква	Буква или цифра

Первый элемент обозначает используемый материал (или его соединения):

- Г (или цифра 1) – германий,
- К (или цифра 2) – кремний,
- А (или цифра 3) – арсенид галлия,
- И (или цифра 4) – арсенид индия.

Второй элемент описывает подкласс диода:

- Д – диоды выпрямительные и импульсные,
- Ц – выпрямительные столбы и блоки,
- В – варикапы,
- А – СВЧ диоды,
- С – стабилитроны,
- Г – генераторы шума,
- Л – излучающие,
- О – оптопары,
- Н – диодные тиристоры,
- У – триодные тиристоры.

Третий элемент определяет характерные эксплуатационные признаки диода, задаваемые согласно таблице 3.4.

Таблица 3.4. Обозначение третьего элемента

101-199	Выпрямительные диоды и столбы с прямым током до 0,3 А	101-199	Стабилитроны и стабисторы мощностью до 0,3 Вт и напряжением стабилизации $U_{ст}$ до 10 В
201-299	Выпрямительные диоды и столбы с прямым током до 10 А	201-299	Стабилитроны и стабисторы мощностью до 0,3 Вт и напряжением стабилизации $U_{ст}$ до 110 В
301-399	Выпрямительные блоки с прямым током до 0,3 А	301-399	Стабилитроны и стабисторы мощностью до 0,3 Вт и напряжением стабилизации $U_{ст}$ до 199 В
401-499	Выпрямительные блоки с прямым током до 10 А	401-499	Стабилитроны и стабисторы мощностью до 5 Вт и $U_{ст}$ до 10 В
401-499	Диоды на частоты до 1 ГГц	501-599	Стабилитроны и стабисторы мощностью до 5 Вт и $U_{ст}$ до 100 В
501-599	Импульсные диоды с временем восстановления сопротивления больше 150 нс	601-699	Стабилитроны и стабисторы мощностью до 5 Вт и $U_{ст}$ до 199 В
601-699	Импульсные диоды с временем восстановления сопротивления больше 30 нс	701-799	Стабилитроны и стабисторы мощностью более 5 Вт и $U_{ст}$ до 10 В

701-799	Импульсные диоды с временем восстановления сопротивления больше 5 нс	801-899	Стабилитроны и стабисторы мощностью более 5 Вт и $U_{ст}$ до 100 В
801-899	Импульсные диоды с временем восстановления сопротивления больше 1 нс	901-999	Стабилитроны и стабисторы мощностью более 5 Вт и $U_{ст}$ до 199 В
901-999	Импульсные диоды с временем восстановления сопротивления меньше 1 нс	101-199	Варикапы подстроечные
		201-299	Умножительные диоды

Четвертый элемент классифицирует прибор по параметрам.

Пятый элемент обозначает конструктивное исполнение бескорпусных приборов:

Цифры 1,2 – с гибкими выводами;
3,4 – с жесткими выводами;
5,6 – с контактными площадками.

Буква «Р» после обозначения – приборы с парными подобранными элементами,

Г – с подбором в четверки,

К – в шестерки.

Условное обозначение диодов разработанных до 1973 г имели вид трехэлементного обозначения.

Д	Цифры	Буква
---	-------	-------

Цифры от 1...100 – точечные Ge
101...200 – точечные Si
201...300 – плоскостные Si
301...400 – кремниевые плоскостные.

Конструктивное оформление диодов зависит от мощности и частоты.

По мощности выпрямительные диоды делятся:

- маломощные $I_{доп} \leq 0,3 \text{ А};$
- среднеспособные $0,3 < I_{доп} \leq 10 \text{ А};$
- мощные $I_{доп} > 10 \text{ А}.$

По частоте:

$f_{РАБ} \leq 100 \text{ кГц}$ – Si – низкочастотные;
 $f_{РАБ} \leq 50 \text{ кГц}$ – Ge – низкочастотные;
 $f_{РАБ} < 300 \text{ МГц}$ – Si – высокочастотные;
 $f_{РАБ} > 300 \text{ МГц}$ – сверхвысокочастотные.

Диоды выпускаются в металлостеклянных, пластмассовых, металло-пластмассовых, металлокерамических корпусах и бескорпусные.

Конструкция низкочастотных диодов представлена на рис. 3.3. Они выпускаются в металлостеклянных корпусах.

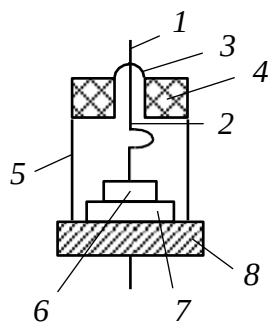


Рис. 3.3. Конструкция низкочастотных диодов: 1 - внешние выводы, 2 - внутренний вывод, 3 - трубка из ковара, 4 - стеклянный изолятор, 5 - корпус из ковара, 6 - кристалл полупроводника, 7 – кристаллодержатель, 8 - основание корпуса

Полупроводниковую пластину припаивают к кристаллодержателю с помощью припоя, содержащего сурьму. Допустимая мощность диода определяется площадью p - n -перехода. Маломощные диоды имеют гибкие цилиндрические выводы. Мощные диоды имеют жесткие выводы. Один из выводов имеет резьбу и крепится на плату с помощью гайки. В мощных диодах пластина полупроводника устанавливается на медное основание, между медью и полупроводниковой пластиной делается молибденовая (Mo) прокладка для того, чтобы компенсировать разность ТКЛР между медью и полупроводником. Внутренний вывод делается с изгибом для того, чтобы изменение температуры не нарушало работу диода. Маломощные кремниевые диоды, в которых p - n -переход создается по диффузионной технологии, имеют некоторые особенности в изготовлении полупроводниковой пластины: p - n -переход делается более широким в периферийной части. Этим снижают вероятность поверхностного пробоя. Такие диоды можно соединять последовательно без шунтирующих сопротивлений [10].

Конструкция высокочастотных и импульсных диодов представлена на рис. 3.4. Они изготавливаются в стеклянных, пластмассовых, металлопластмассовых корпусах. Диоды этой группы имеют точечные контакты.

Основу конструкции составляет стеклянный или металлокерамический патрон, в торцах которого установлены металлические контакты, имеющие гибкие ленточные выводы. Внутренний вывод представляет собой электрод из вольфрамовой проволоки, имеющей изгибы с целью уменьшения механических напряжений.

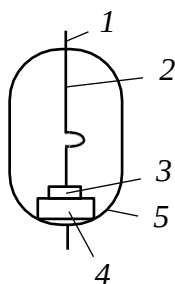


Рис. 3.4. Конструкция высокочастотных и импульсных диодов: 1 - внешние выводы, 2 - внутренние выводы, 3 - полупроводниковая пластина, 4 - кристаллодержатель, 5 - корпус

Конструкция СВЧ диодов представлена на рис. 3.5.

В СВЧ диодах в основном используется точечный контакт металл – полупроводник. Основные типы конструкций СВЧ диодов – патронная, коаксиальная, волноводная. Такая конструкция позволяет встраивать эти диоды в устройства СВЧ. Выпускаются в металлокерамическом корпусе.

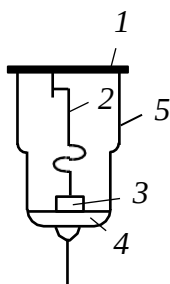


Рис. 3.5. Патронная конструкция СВЧ диодов: 1 - внешние выводы, 2 - внутренний вывод, 3 – кристалл полупроводник, 4 - кристаллодержатель, 5 – керамический корпус

Металлокерамический корпус используется для уменьшения диэлектрических потерь. С целью обеспечения лучшего контакта, устойчивости против коррозии, меньшего поверхностного сопротивления плоские металлические выводы покрываются серебром или золотом. Изгиб предотвращает скольжение внутреннего вывода по кристаллу.

Конструкция туннельных диодов представлена на рис. 3.6.

Разработка конструкций туннельных диодов требует выполнения условия $f_0 < f_R$. Для этого индуктивность выводов должна быть по возможности минимальной. Уменьшение емкости путем уменьшения площади перехода приводит к увеличению r , уменьше-

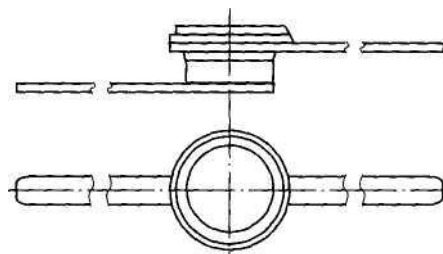


Рис. 3.6. Конструкция туннельных диодов в металлокерамическом корпусе

нию пикового тока, но не повлияет на f_R . Поэтому частотные свойства туннельного диода удобно характеризовать отношением $I_{\Pi} / C_{\text{бар}}$. Корпус металлокерамический. Выводы, с целью уменьшения индуктивности, ленточные и короткие. В диапазоне сверхвысоких частот используют патронную конструкцию [8].

Порядок выполнения практической работы

1. Получить от преподавателя или лаборанта набор диодов.
2. Определить по справочнику параметры и характеристики указанных диодов.
3. Описать конструкцию диодов, указать их особенности.
4. Записать диоды согласно их записи в перечне элементов по требованиям ГОСТ.
5. Оформить работу.

Контрольные вопросы

1. Какие радиоэлементы называются диодами?
2. Дать классификацию диодов.
3. Указать способы условного обозначения диодов.
4. Указать основные параметры выпрямительных диодов.
5. Указать основные параметры опорных диодов.
6. Указать основные параметры варикапов.
7. Указать основные параметры туннельных диодов.
8. Какие существуют конструкции низкочастотных диодов?
9. Какие существуют конструкции высокочастотных диодов?

3.5.2. Транзисторы

Транзисторы – полупроводниковые приборы с тремя выводами, предназначенные для усиления, генерации и других преобразований электрических сигналов. По физическому принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые [2].

Биполярные транзисторы. Структура биполярных транзисторов

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор, имеющий два взаимодействующих электронно-дырочных p - n перехода, предназначенный для усиления и преобразования электрических сигналов. По принципу управления его можно назвать токовым, поскольку выходным сигналом управляют с помощью входного тока. Биполярный транзистор содержит три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости n - p - n (рис. 3.7,а) и p - n - p (рис. 3.7,б), которые называются соответственно эмиттером (Э), базой (Б) и коллектором (К). Эти области раз-

делены двумя взаимодействующими между собой p - n -переходами – эмиттерным П1 и коллекторным П2 [14].

Взаимодействие между переходами обеспечивается благодаря тому, что расстояние между ними W_B много меньше диффузионной длины L_B неосновных носителей в базе. **Диффузионная длина** – это среднее расстояние, проходимое свободными зарядами за время их жизни.

Транзисторы n - p - n и p - n - p имеют одинаковый принцип действия и отличаются только полярностью напряжения на электродах и направлением токов в одностипных режимах. На рис. 3.7 представлена структурная модель транзистора, которая используется для изучения его принципа действия.

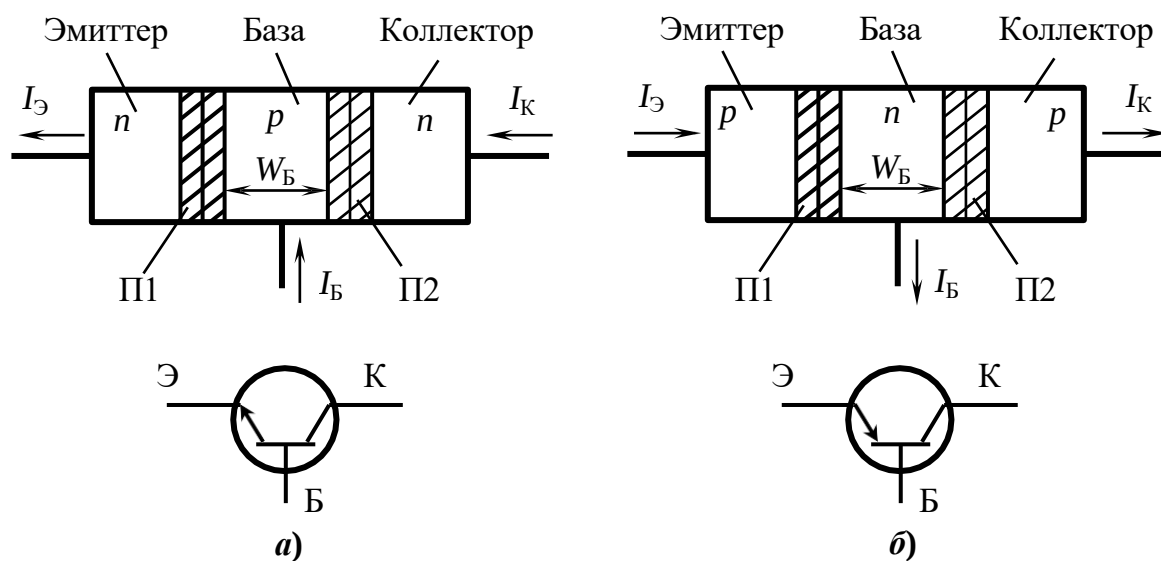


Рис. 3.7. Структура и условное графическое обозначение n - p - n транзистора (а) и p - n - p транзистора (б)

Реальная структура (рис. 3.8) отличается от приведенной на рис. 3.7. Площадь эмиттерного перехода S_E меньше площади коллекторного перехода S_K . Кроме того, концентрация примесей в областях транзистора подбирается так, чтобы обеспечить максимальную эффективность эмиттера. Следует подчеркнуть, что транзистор представляет собой обратимый прибор, т.е. эмиттер и коллектор можно поменять местами, сохранив при этом работоспособность прибора. Графическое условное обозначение транзисторов приведено на рис. 3.7.

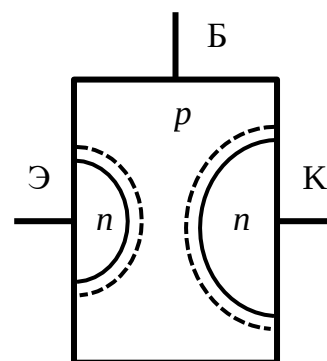


Рис. 3.8. Реальная структура биполярного транзистора

Полевые транзисторы. Определения и классификация полевых транзисторов

Полевыми транзисторами называются трехэлектродные приборы, в которых выходным током управляют с помощью электрического поля входного электрода. Полевой транзистор содержит три полупроводниковые области одного и того же типа проводимости, называемые соответственно **исток**, **канал** и **сток**, а также три электрода – **исток**, **сток**, **затвор**.

В зависимости от типа проводимости канала полевые транзисторы делятся на транзисторы с каналом ***n-типа*** и каналом ***p-типа***. Полевые транзисторы работают на носителях одного знака, а именно – на основных носителях заряда, поэтому их называют **униполярными** транзисторами.

По физической структуре и способу управления проводимостью канала полевые транзисторы делятся на следующие группы [2]:

1. **Полевые транзисторы с изолированным затвором** (или МДП-транзисторы). В этих транзисторах металлический электрод затвора отделен от полупроводника (область канала) диэлектриком. Аббревиатура МДП расшифровывается как металл-диэлектрик-полупроводник. В качестве диэлектрика часто используется диоксид кремния, поэтому встречается другое название этих транзисторов – МОП (металл-окисел-полупроводник). Транзисторы такого типа делятся на две группы: со **встроенным** каналом; с **индуцированным** каналом. Условные графические обозначения транзисторов с изолированным затвором приведены на рис. 3.9 в,г.

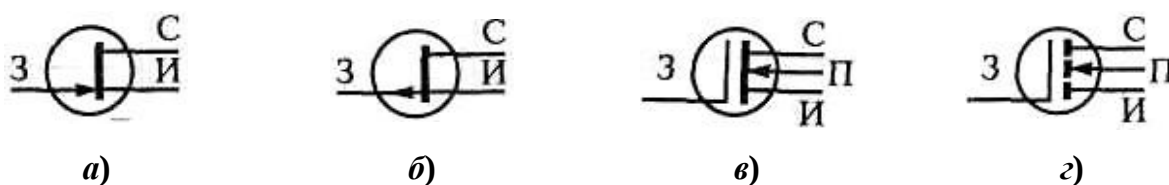


Рис. 3.9. Условное графическое обозначение полевых транзисторов с управляющим переходом с каналом *n*-типа (*а*); с управляющим переходом с каналом *p*-типа (*б*); с изолированным затвором и встроенным каналом *n*-типа (*в*); с изолированным затвором и индуцированным каналом *n*-типа (*г*): З – затвор, С – сток, И – исток, П – подложка (для канала *p*-типа направление стрелки противоположно)

Транзисторы первой группы имеют канал, созданный в процессе изготовления. В этих транзисторах канал существует при напряжении затвора, равном нулю, поэтому их называют **нормально открытыми** (НО) транзисторами.

В транзисторах второй группы канал формируется в процессе работы, когда на затвор подается напряжение, по величине превышающее не-

которое определенное напряжение, называемое **пороговым напряжением** ($U_{\text{пор}}$). Эти транзисторы получили наибольшее применение в больших интегральных схемах. В них при напряжении на электроде затвора, равном нулю, канал отсутствует, и их называют **нормально закрытыми** (НЗ).

2. **Полевые транзисторы с управляющим переходом.** Транзисторы этого типа делятся на следующие группы:

- с управляющим *p-n*-переходом;
- с управляющим переходом металл-полупроводник (МЭП-транзисторы);
- с гетеропереходом и переходом металл-полупроводник (ГМЭП).

Условные графические обозначения транзисторов с управляющим переходом приведены на рис. 3.9 а,б.

Конструктивное оформление транзисторов и особенности их использования в РЭС. Классификация и условные обозначения корпусов транзисторов

Транзисторы выполняются в виде полупроводниковых кристаллов, которые непосредственно в РЭС использовать сложно. Кристаллы помещают в корпуса, которые предназначены для их защиты от климатических и механических воздействий, снижения трудоемкости включения транзистора в электрическую схему. Корпуса транзисторов должны отводить теплоту от кристалла, обеспечивать удобство и надежность монтажа кристаллов при сборке, заданные электрические характеристики и надежный монтаж в аппаратуре, выдерживать допустимые для кристаллов электрические нагрузки, обладать коррозионной стойкостью, простотой конструкции и низкой стоимостью [14].

Корпуса транзисторов классифицируют по следующим признакам:

- **по мощности рассеивания:** для маломощных, средней и большой мощности транзисторов;
- **по частотным свойствам:** для низкочастотных, средней, высокой и сверхвысокой частоты транзисторов;
- **по конструкции изоляторов корпуса:** с индивидуальными изолированными выводами и с несколькими, проходящими через одну изолирующую деталь; с наружными одно- и многорядными выводами;
- **по материалам изоляторов:** стеклянные и металlostеклянные, керамические и металлокерамические, пластмассовые и металлопластмассовые, опрессованные (залитые) пластмассой, а также комбинированные;
- **по способу изготовления корпусов:** герметичные и негерметичные;
- **по методу герметизации:** герметизированные контурной контактной электросваркой, холодной сваркой, пайкой, стеклом, пластмассой [14].

Важнейшим параметром корпусов транзисторов средней и большой мощности является **тепловое сопротивление** $R_{\text{КС}}$, определяемое по формуле

$$R_{\text{КС}} = (T_{\text{К}} - T_{\text{С}}) / P_{\text{К}},$$

где $T_{\text{К}}$ и $T_{\text{С}}$ – температура корпуса и окружающей среды соответственно, °С;

$P_{\text{К}}$ – выделяемая на корпусе мощность (средняя или постоянная), Вт.

Тепловое сопротивление дает возможность по мощности, рассеиваемой корпусом, определить температуру его перегрева.

Ряд типов корпусов, как в России, так и за рубежом унифицированы и стандартизированы по габаритным и присоединительным размерам, а также конфигурациям. Так, согласно ГОСТ 18472-82, корпуса транзисторов обозначают двумя буквами (КТ – корпус транзистора), после которых через дефис следует число, указывающее номер разработки. Унификация также произведена МЭК (Международной электротехнической комиссией) и DATA (Derivation And Tabulation Associates) – организацией, занимающейся сбором и распространением информации по полупроводниковым приборам западных стран с указанием их параметров, габаритных и присоединительных размеров. Условные обозначения унифицированных корпусов транзисторов приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Условные обозначения унифицированных корпусов транзисторов

ГОСТ 18472-82	КТ-1	КТ-4	КТ-7	КТ-9	КТ-10	КТ-16
МЭК	С7	А31М	-	С14А	-	РА-63
DATA	ТО-71	ТО-60	ТО-63	ТО-3	-	Т-74
ГОСТ 18472-82	КТ-17	КТ-20	КТ-22	КТ-26	КТ-27	КТ-28
МЭК	-	-	-	А40	А56	С68
DATA	-	W-24	W-984	ТО-92	ТО-126	ТО-220

Конструкции базовых корпусов транзисторов

Несмотря на многотипность корпусов, их конструктивное оформление и технология изготовления имеют много общего. Это позволяет рассматривать некоторые базовые конструкции корпусов с однотипными технологическими процессами их производства.

Металлостеклянные корпуса в настоящее время широко применяют для герметизации кристаллов, так как они дешевы и просты в изготовлении, надежны, хотя обладают худшими электрическими параметрами, чем металлокерамические.

Металлостеклянный корпус КТ-1 (рис. 3.10) маломощного транзистора включает следующие элементы: 1 – фланец в виде чашечки с тремя отверстиями в дне, штампуется из ленточного ковара толщиной 0,25 мм, имеет выступ, служащий ключом к расположению выводов; 2 – выводы из

ковара: эмиттерный, базовый и коллекторный; 3 - корпусный вывод, приваренный к фланцу 1; 4 - таблетку из стекла, которая с фланцем 1, выводами 2 и 3 образует надежный металлостеклянный спай; 5 - крышку корпуса (изготовлена из ленточной стали), которая обеспечивает защиту кристалла от внешних воздействий.

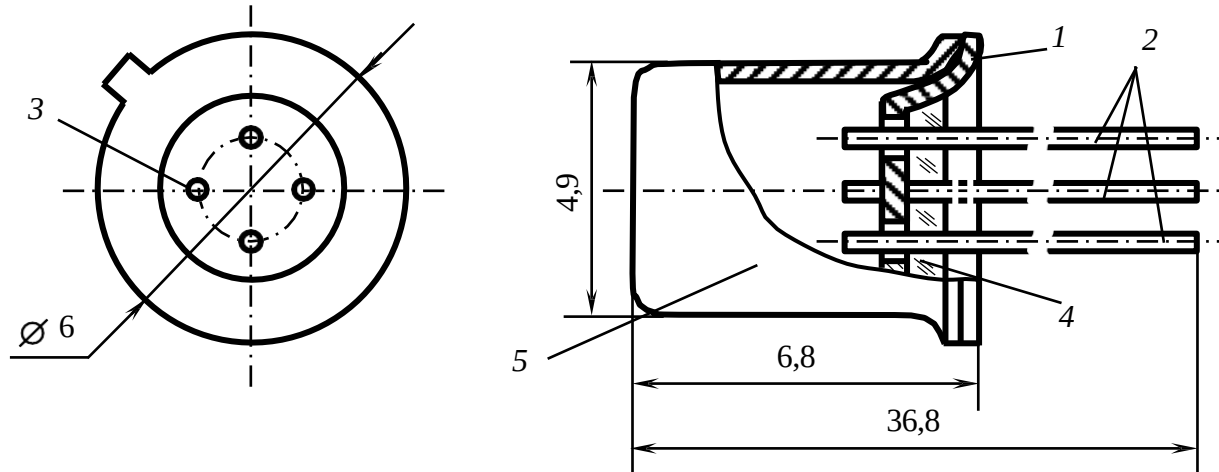


Рис. 3.10. Металлостеклянный корпус КТ-1

Металлостеклянный корпус КТ-9 (рис. 3.11) мощных высоковольтных транзисторов позволяет рассеивать значительные мощности и содержит следующие элементы: 1 - стальной фланец; 2 - молибденовый диск (толщина 0,7 мм), припаиваемый к фланцу; 3 - полупроводниковый кристалл, монтируемый на диск 2; 4 - эмиттерный и базовый выводы из ковара, проходящие через таблетки 5 из стекла, 6 - крышку корпуса (из стали толщиной 0,5 мм), герметизирующую кристалл. Корпус КТ-9 прост и дешев в изготовлении, в нем использовано стекло, хорошо работающее на сжатие.

Металлокерамические корпуса являются наиболее подходящими для корпусиро-

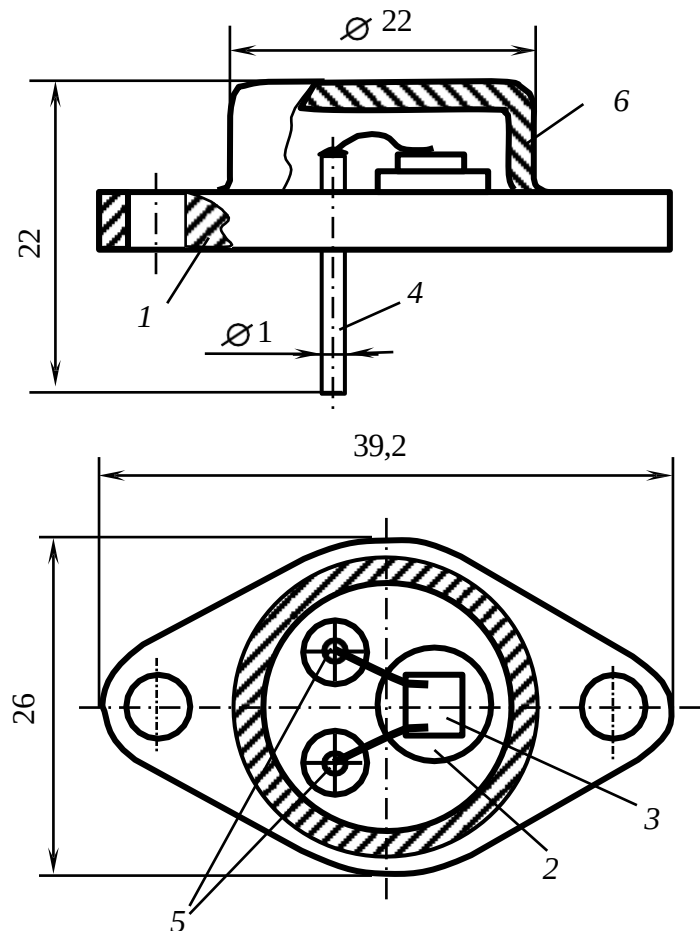


Рис. 3.11. Металлостеклянный корпус КТ-9

вания СВЧ-транзисторов, поскольку керамика превосходит стекло практически по всем параметрам.

Металлокерамический корпус КТ-22 маломощного СВЧ-транзистора (рис. 3.12,а) имеет следующие элементы: 1 - основание в виде диска (диаметр 3 мм) из корундовой керамики; 2 - выводы толщиной 0,1 мм, выполненные плоскими, это обеспечивает меньшую индуктивность при том же сечении, что и для круглых выводов (вывод, обрубленный под углом 45°, служит ключом и является коллекторным, а противоположный ему – базовым; перпендикулярно им расположены эмиттерные выводы; перпендикулярность обеспечивает также минимизацию индуктивности выводов); 3 - крышку корпуса из корундовой керамики, герметизирующую кристалл (на рис. 3.12,а не показан), который монтируется на металлизированную площадку, связанную с коллекторным выводом.

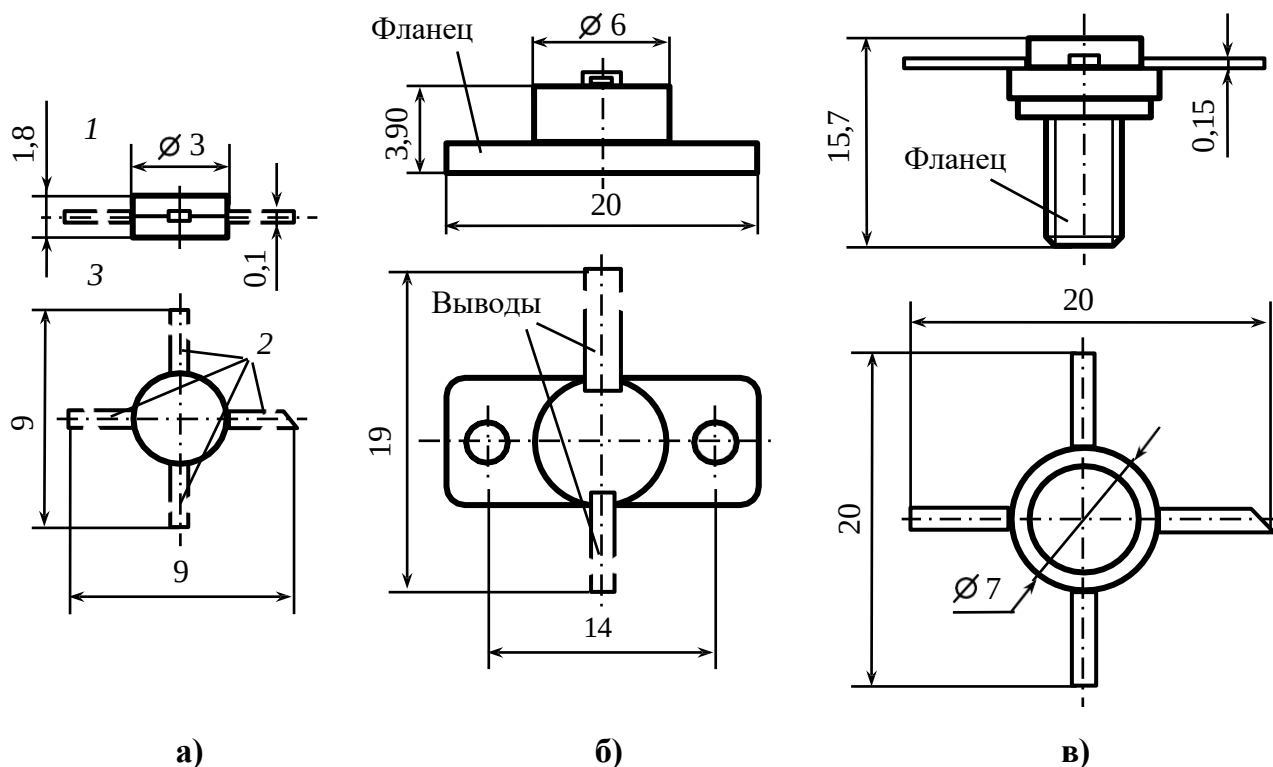


Рис. 3.12. Металлокерамический корпус СВЧ транзисторов

Конструкция корпуса КТ-22 при использовании материалов, имеющих минимальные диэлектрическую и магнитную проницаемости на СВЧ-частотах, позволяет уменьшить межэлектродные емкости и индуктивности выводов, влияющие на полосу рабочих частот и к.п.д.

Металлокерамические корпуса мощных СВЧ-транзисторов эффективно рассеивают выделяемую при их работе теплоту. Это достигается применением в конструкциях корпусов фланцев, обеспечивающих помимо отвода тепла еще и удобство монтажа транзисторов в аппаратуру (КТ-20 на рис. 3.12,б и КТ-17 на рис. 3.12,в). Фланец золотится по слою нике-

ля, что обеспечивает снижение индуктивного сопротивления вблизи поверхности, являющейся областью прохождения СВЧ-тока. Транзисторы в таких корпусах имеют небольшое тепловое сопротивление (менее $3,5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) и их электрические параметры хорошо сочетаются с параметрами полосковых линий, однако они довольно сложны и трудоемки в изготовлении (рис. 3.13).

Металлокерамический корпус КТ-10 мощного высоковольтного транзистора (рис. 3.13) содержит следующие основные элементы: 1 - фланец (изготовлен из бескислородной меди холодной высадкой) в форме шестигранника с винтом; 2 - керамическую пластину, где монтируется кристалл, эмиттерная и базовая области которого соединяются с медными выводами 3, а коллекторная область - с фланцем 1; 4 - изолятор из керамики, в котором размещены коваровые трубки 5, в трубках находятся выводы 3, запаиваемые с одной стороны высоко-температурным припоем 6; 7 - изоляторы из корундовой керамики, расположенные на фланце 1, к которым присоединены выводы 3.

Такие корпуса имеют надежную электрическую изоляцию выводов, что позволяет использовать их в схемах с напряжениями выше 1,5 кВ. В то же время наличие наружных паяных и сварных соединений усложняет производство этих корпусов и требует повышенного расхода припоя на основе серебра.

Металлокерамические корпуса обладают высокой надежностью, механической прочностью и небольшими электрическими потерями в СВЧ-диапазоне. Недостатками их являются сложный технологический процесс изготовления, высокая трудоемкость получения керамического материала и, следовательно, общая стоимость.

Пластмассовые корпуса появились на рынке в 1962 году, в настоящее время большинство кристаллов транзисторов корпусируется в них. Основные причины, способствующие массовому распространению транзисторов в пластмассовых корпусах:

- сокращение стоимости по сравнению с транзисторами в герметичных корпусах (металлостеклянных и металлокерамических), что обусловлено, прежде все-

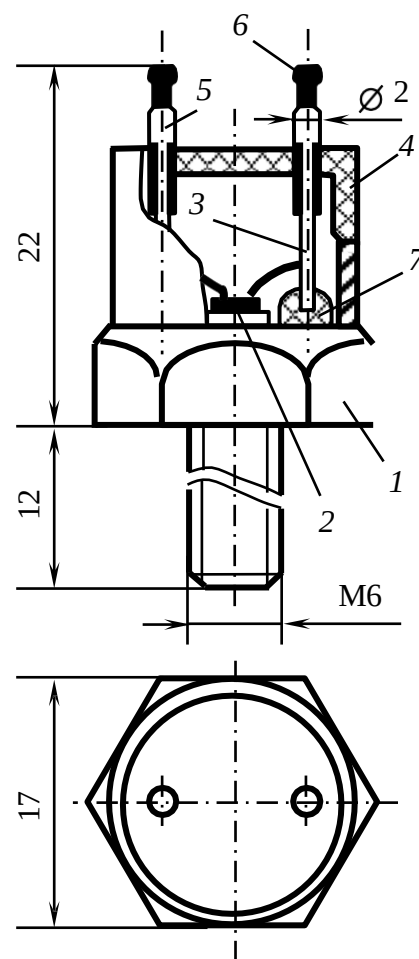


Рис. 3.13.
Металлокерамический корпус мощного высоковольтного транзистора

го, возможностью механизации и автоматизации технологических процессов сборки и испытаний;

- повышенная устойчивость к значительным механическим перегрузкам, что связано с отсутствием у приборов в пластмассовых корпусах внутренних полостей и невозможностью перемещения внутренних элементов конструкции;

- меньшие габариты и вес, возможность изменения внешнего вида.

Для корпусирования маломощных транзисторов широко используется корпус типа КТ-26 (рис. 3.14,а), а мощных - корпуса КТ-27 (рис. 3.14,б) и КТ-28 (рис. 3.14,в). Максимально допустимые значения электрических параметров описанных корпусов приведены в табл. 3.6.

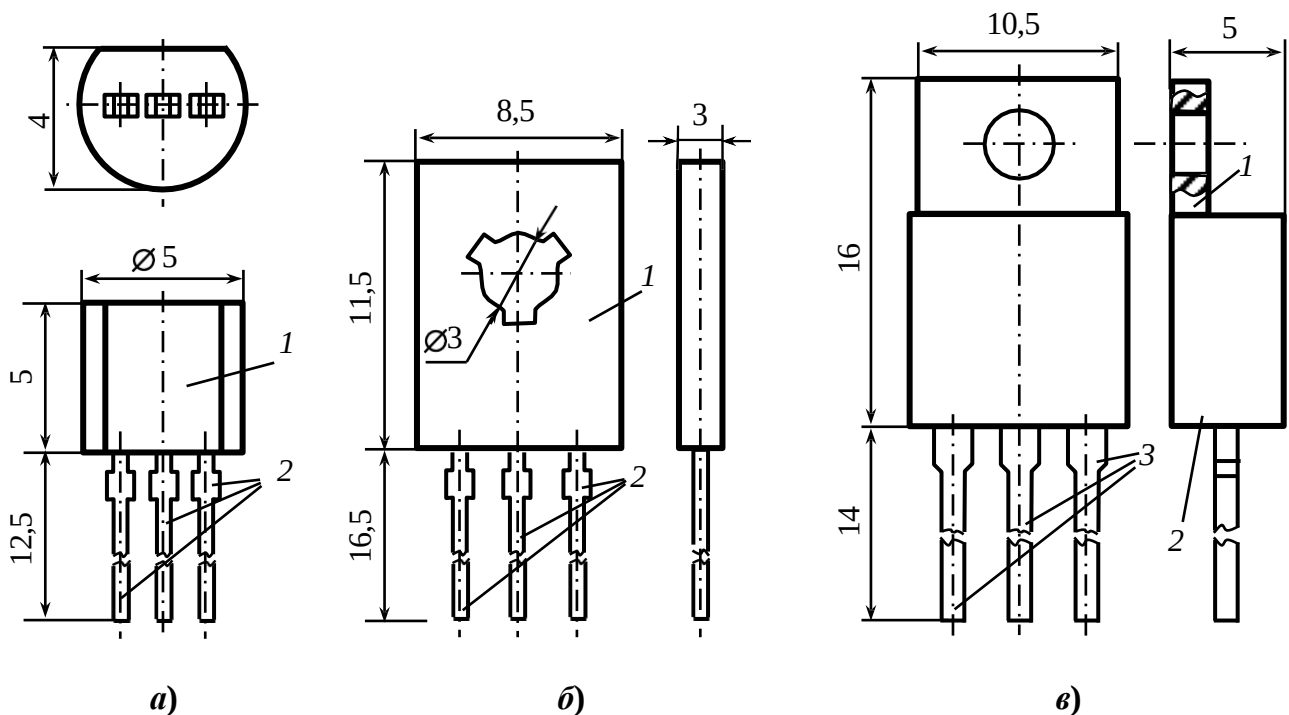


Рис. 3.14. Конструкция пластмассовых корпусов

Таблица 3.6. Максимально допустимые значения электрических параметров корпусов

Тип корпуса	P_K , Вт	$U_{KЭ}$, В	I_K , А	$T_{K \max}$, °С
КТ-26	1,1	120	0,6	135
КТ-27	36	400	5	200
КТ-28	75	400	16	200

Если сравнить данные табл. 3.6 с аналогичными параметрами герметичных корпусов, то можно сделать вывод, что пластмассовые корпуса

проигрывают по всем параметрам: P_K – допустимой мощности рассеивания коллектора; $U_{КЭ}$ – напряжению коллектор - эмиттер; I_K – току коллектора.

В производстве пластмассовых корпусов большое распространение получила опрессовка транзисторов пластмассой, или капсулирование (пластмассовая герметизация). Транзисторы, опрессованные пластмассой (корпуса КТ-26 и КТ-27), показаны на рис. 3.14, а, б. Полупроводниковый кристалл монтируется на коллекторном выводе (фланце). При этом эмиттерная и базовая области p - n -перехода соединяются с соответствующими выводами 2 транзистора посредством электродных выводов. Далее кристалл с электродными выводами и металлической арматурой (базовым, коллекторным и эмиттерным выводами) опрессовывается пластмассой 1. Перед опрессовкой полупроводниковый кристалл защищают компаундом. Материал арматуры по своим свойствам (коэффициент теплового расширения, адгезия и др.) должен быть согласован с герметизирующим материалом.

Мощный транзистор, опрессованный пластмассой (корпус КТ-28), состоит из кристалла, медного никелированного фланца (теплоотвода) 1, пластмассовой опрессовки 2 и выводов 3 (рис. 3.14, в). На медном теплоотводе монтируется термокомпенсационная подложка, на ней – полупроводниковый кристалл с p - n -переходами, к контактным площадкам которого присоединены выводы 3. Коллекторный вывод присоединен непосредственно к теплоотводу. Перед опрессовкой на кристалл и часть выводов 3 наносят защитные покрытия.

Мощные транзисторы, опрессованные пластмассой (корпуса КТ-27 и КТ-28), имеют отверстия (у корпуса КТ-28 в теплоотводе) для крепления к шасси аппаратуры. Возможны и другие способы крепления.

Транзисторы в пластмассовых корпусах помимо ухудшенных электрических характеристик по сравнению с транзисторами в герметичных корпусах имеют и более низкую эксплуатационную надежность. Последнее связано с тем, что пластмасса не обеспечивает требуемой герметичности. При длительной эксплуатации наблюдается коррозия материалов под действием влаги, особенно интенсивно этот процесс протекает при повышенной температуре. Возможны дефекты конструктивно-технологического характера, в частности, обрывы выводов при эксплуатации в широком диапазоне изменения температур.

Классификация транзисторов и их параметров **Выбор и применение транзисторов в РЭС**

Классификация транзисторов по их назначению, физическим свойствам, основным электрическим параметрам и т.д. отражена в их условном обозначении, использующем семизначный буквенно-цифровой код (ОСТ 11336.919-81). Структура кода включает пять элементов (табл. 3.7) [14].

Таблица 3.7. Структура кода классификации транзисторов

Номер элемента	1	2	3	4	5
Символ	Буква или цифра	Буква	Цифра	Три или две цифры	Буква

Первый элемент обозначает используемый полупроводниковый материал (или его соединения): Г (или цифра 1) - германий, К (или цифра 2) - кремний, А (или цифра 3) - арсенид галлия.

Второй элемент описывает подкласс транзистора: Т - биполярный, П - полевой.

Третий элемент определяет характерные эксплуатационные признаки (допустимое значение рассеиваемой мощности и граничную рабочую частоту) транзистора, задаваемые согласно табл. 3.8.

Таблица 3.8. Эксплуатационные признаки транзистора

Параметры		Цифра
P_K , Вт	$f_{гр}$, МГц	
$P_K \leq 0,3$	$f_{гр} \leq 3$	1
	$3 < f_{гр} \leq 30$	2
	$f_{гр} > 30$	3
$0,3 < P_K \leq 1,5$	$f_{гр} \leq 3$	4
	$3 < f_{гр} \leq 30$	5
	$f_{гр} > 30$	6
$P_K > 1,5$	$f_{гр} \leq 3$	7
	$3 < f_{гр} \leq 30$	8
	$f_{гр} > 30$	9

Четвертый элемент обозначает порядковый номер разработки технологического типа транзистора: используются числа от 01 до 99 или от 101 до 999.

Пятый элемент показывает разделение транзисторов данного типа на группы по значению тех или иных параметров, в качестве классификационной литеры используются буквы русского алфавита (за исключением З, О, Ч, Ы, Ш, Щ, Ю, Ь, Ъ, Э).

Для обозначения дополнительных элементов применяют следующие символы:

- цифра от 1 до 9 – обозначение модернизаций транзистора, определяет особенности его конструкции или электрических параметров;
- буква С – обозначение транзисторных сборок;

- цифра, написанная через дефис – обозначение бескорпусных транзисторов.

Современная система обозначений позволяет по наименованию типа получить информацию о свойствах транзистора.

Примеры обозначения некоторых транзисторов:

2Т920А – кремниевый биполярный, большой мощности, высокочастотный, номер разработки 20, группа А;

КТ3107Г – кремниевый биполярный, маломощный, высокочастотный, номер разработки 107, группа Г.

Для ряда транзисторов используется система обозначений, приведенная в ГОСТ 10862-64 и 10862-72, в своей основе совпадающая с описанной выше. Для транзисторов, разработанных до 1964 года, применялась система обозначений, принятая в [4, 8].

Параметры транзисторов объединены в группы: электрические, предельные эксплуатационные и тепловые.

Электрические параметры:

- статический коэффициент усиления β в схеме с ОЭ;
- напряжения насыщения $U_{КЭ\text{ нас}}$, $U_{БЭ\text{ нас}}$;
- обратный ток коллектора $I_{КБ0}$;
- пробивные напряжения $U_{БК}$ и $U_{КЭ}$;
- граничная частота коэффициента передачи тока $f_{гр}$ в схеме с ОЭ;
- емкости коллекторного и эмиттерного переходов.

К электрическим параметрам относят также входные и выходные сопротивления в режиме малого или большого сигналов и для транзисторов, работающих в импульсном режиме, данные о времени включения и выключения, времени рассасывания заряда и т.д.

Предельные эксплуатационные параметры: максимально допустимые токи ($I_{К\text{ доп}}$, $I_{Б\text{ доп}}$), напряжения ($U_{КЭ\text{ доп}}$, $U_{БЭ\text{ доп}}$) и рассеиваемая мощность на коллекторе с теплоотводом ($P_{К\text{ доп}}$) в постоянном или (и) импульсном режиме.

Тепловые параметры: $R_{пк}$, $R_{пс}$ - тепловые сопротивления между переходом и корпусом, переходом и средой соответственно; $T_{п}$, $T_{с}$ – температура p - n -перехода и окружающей среды соответственно.

Особенность практически всех параметров транзистора – зависимость от рабочего режима (токов и напряжений) и температуры.

Особенности выбора транзисторов в РЭС

Высокая надежность транзисторов в РЭС обеспечивается не только их качеством, но и правильным выбором номенклатуры, использованием в соответствующих электрических и температурных режимах и условиях эксплуатации. Рассмотрим основные принципы выбора транзисторов РЭС.

Выбор транзистора *по частотным свойствам* должен соответствовать требованиям схемы. Использование более высокочастотных типов транзисторов нежелательно, так как они дороги, склонны к самовозбуждению, имеют меньшие допустимые напряжения, токи и т.д. Высокочастотные транзисторы иногда дают возможность уменьшить уровень собственных шумов, а также разогрев транзистора в импульсных схемах, поскольку чем выше $f_{гр}$, тем быстрее рабочая точка проходит рабочий режим.

Выбор режима работы транзистора *по напряжениям, токам и мощностям* всегда связан с компромиссом. Применение транзисторов при малых напряжениях (токах, мощностях) приводит к снижению устойчивости их работы в диапазоне температур и нестабильности усиления во времени. В то же время нельзя превышать предельно допустимые значения напряжений (токов, мощностей) независимо от длительности импульсов напряжения или тока. Это требование приводит к тому, что необходимо защищать транзисторы от мгновенных изменений токов и напряжений, возникающих при переходных процессах (моменты включения и выключения, изменения режимов работы и т.д.), колебаниях питающих напряжений.

Не допускается работа транзисторов в совмещенных предельных режимах (например, по току и напряжению). Для повышения надежности транзисторов при эксплуатации следует выбирать рабочие режимы с коэффициентами нагрузки по напряжению (k_U) и мощности (k_P) не более $0,7 \div 0,8$. Для коэффициентов нагрузки менее $0,5 \div 0,6$ надежность работы транзисторов практически не зависит от режима работы.

Расчет коэффициента нагрузки по мощности выполняется по формуле

$$k_P = P_K / P_{K \text{ доп}},$$

где мощность P_K может быть как импульсной, так и средней за период.

Коэффициент нагрузки по напряжению равен

$$k_U = \max \{ k_{U_1}, k_{U_2} \},$$

где $k_{U_1} = U_{КЭ} / U_{КЭ \text{ доп}}$ – нагрузка по напряжению коллектор-эмиттер;
 $k_{U_2} = U_{БК} / U_{БК \text{ доп}}$ – нагрузка по напряжению база-коллектор.

Порядок выполнения практической работы

1. Получить от преподавателя или лаборанта набор транзисторов.
2. Определить номинальные значения сопротивления, допуск по маркировке.
3. Описать конструкцию всех транзисторов, указать их особенности.

4. Записать все транзисторы согласно их записи в перечне элементов, указанном в табл. 3.7.

5. Оформить работу.

Контрольные вопросы

1. Какие радиоэлементы называются транзисторами?
2. Дать классификацию транзисторов.
3. Указать способы сокращенного и полного обозначения транзисторов.
4. Указать основные параметры транзисторов.
5. Какие существуют конструкции постоянных транзисторов?
6. Какие существуют конструкции переменных транзисторов?

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.

4.1. Определение и свойства проводников

Проводниковые материалы – это материалы, обладающие удельным сопротивлением меньше 10^{-4} Ом·см и предназначенные для коммутации, контактирования и накопления зарядов. На основе проводников (как и полупроводников) можно изготовить и резистивные элементы. К проводникам относятся все металлы, а также углерод. В микроэлектронике в качестве проводников чаще всего используют металлы, сплавы и композиции на их основе [5].

Металлы в твердом состоянии являются кристаллическими веществами, для которых характерен особый вид металлической связи. Металлы характеризуются пластичностью, имеют характерный металлический блеск, хорошо проводят электрический ток и тепло. Количественно эти явления описываются законами Ома и Фурье соответственно:

$$j = \gamma E; \quad \omega = \lambda \cdot \Delta T, \quad (4.1)$$

где j – плотность электрического тока; E – напряженность электрического поля; ω – плотность теплового потока; ΔT – разность температур на единичном участке длины; γ и λ – коэффициенты удельной электрической проводимости и теплопроводности соответственно [13].

Для металлических проводников характерна также связь между удельной электрической проводимостью и удельной теплопроводностью, описанная эмпирическим законом Видемана - Франца:

$$\lambda/\gamma = L_0 T,$$

где $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8}$ В²К⁻² – число Лоренца, значение которого мало отличается для всех металлов при всех температурах.

Основными параметрами, определяющими свойства проводников, являются:

- 1) удельное объемное электрическое сопротивление ρ или удельная проводимость γ ,
- 2) температурный коэффициент удельного сопротивления;
- 3) коэффициент теплопроводности;
- 4) коэффициент термо-э.д.с.

Удельное объемное электрическое сопротивление проводника с сопротивлением R , поперечным сечением S и длиной L

$$\rho_v = R \cdot S/L. \quad (4.2)$$

Величина, обратная $\gamma=1/\rho_v$, есть *удельная проводимость*. Для тонких пленок удельное сопротивление проводников выше, чем для массивных проводников. В гибридных интегральных схемах (ГИС) проводники и резисторы изготавливаются в едином технологическом цикле, поэтому имеют одинаковую малую толщину. Для них вводят удельное сопротивление квадрата пленки $\rho_{\square} = \rho_v/h$, где h – толщина пленки проводникового или резистивного материала.

Температурный коэффициент удельного сопротивления (K^{-1}) при заданной температуре вычисляется по формуле:

$$TK\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}, \quad (4.3)$$

где $d\rho$ – элементарное приращение сопротивления проводника, соответствующее элементарному приращению температуры dT .

Средний температурный коэффициент удельного сопротивления в диапазоне температур (α_p):

$$\alpha_p = (\rho_T - \rho_0)/\rho_0(T - T_0), \quad (4.4)$$

где ρ_0, ρ_T – значения ρ , соответствующие температурам измерения T_0 и T .

Из этой формулы легко рассчитать значения ρ_T для температуры T :

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha_p(T - T_0)]. \quad (4.5)$$

Коэффициент теплопроводности λ прямо пропорционален удельной проводимости. Поэтому наивысшим значением λ обладают металлы с максимальной проводимостью: серебро, медь, алюминий. Используя коэффициент теплопроводности, можно определить тепловое сопротивление проводника по формуле

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{L}{S}. \quad (4.6)$$

Коэффициент термо-э.д.с. определяет контактную разность потенциалов, возникающую при контакте двух металлов. Если в замкнутой цепи двух проводников один контакт нагреть до температуры T_1 , другой до температуры T_2 , то в цепи возникает термо-э.д.с.

$$\varepsilon = K(T_1 - T_2), \quad (4.7)$$

где K (В/К) – коэффициент термо-э.д.с., постоянный для данной пары проводников.

Механические свойства проводников характеризуют обычно пределом прочности при растяжении σ_p и относительным удлинением при разрыве $\Delta l/l$.

Пределом прочности при растяжении называют напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца:

$$\sigma_p = F_D/S_0 \text{ (Па)}, \quad (4.8)$$

где F_D – наибольшая физическая нагрузка, которую может выдержать образец; S_0 – первоначальное сечение образца, м^2 .

Относительным удлинением называют отношение абсолютного удлинения образца к его первоначальной расчетной длине l_0 , выраженное в процентах:

$$\Delta l/l = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (4.9)$$

где l_p – длина образца после разрыва. Необходимо отметить, что у всех материалов механические свойства сильно зависят от режимов механической и термической обработки.

Для проводников, используемых в электровакуумных приборах, важной механической характеристикой является **температурный коэффициент длины** (линейного расширения), позволяющий определить изменение любых геометрических размеров (длины, ширины, толщины) при нагревании. Однако наиболее легко изменение размеров изделия при нагревании фиксируется по максимальному размеру – длине. Различают температурный коэффициент длины при заданной температуре (TKI) и его среднее значение (α_l) в интервале температур:

$$\text{TKI} = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}; \quad \alpha_l = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_T - l_0}{T - T_0}, \quad (4.10)$$

где l_0 и l_T – геометрические размеры изделий, соответствующие температурам T_0 и T .

Минимальные значения TKI характерны для тугоплавких металлов, которые используются для получения вакуумно-плотных спаев со стеклом, керамикой и другими диэлектрическими материалами. Созданы специальные сплавы, согласованные по величине TKI с определенными сортами электровакуумных стекол и керамики.

Для проводниковых материалов при измерении α_p (TKR) часто бывает полезной следующая формула: $\alpha_p = \alpha_R + \alpha_l$, где α_R – температурный коэффициент сопротивления данного резистора. У чистых металлов $\alpha_p \gg \alpha_l$,

поэтому у них $\alpha_\rho \approx \alpha_R$. Однако для термостабильных металлических сплавов такое приближение несправедливо [13].

4.2. Зависимость электрических свойств проводниковых материалов от внешних факторов

4.2.1. Температурная зависимость удельного сопротивления металлических проводников

Удельное сопротивление металлических проводников выражается эмпирическим правилом Маттиссена:

$$\rho_v = \rho_{\text{чист}} + \rho_{\text{прим}}; \quad \frac{d\rho}{dT} = \frac{d\rho_{\text{чист}}}{dT}, \quad (4.11)$$

где $\rho_{\text{чист}}$ — это удельное сопротивление чистого металла, обусловленное рассеянием на тепловых колебаниях атомов решетки, оно зависит от температуры; $\rho_{\text{прим}}$ — постоянная добавка, обусловленная рассеянием носителей заряда на примесях и дефектах кристаллической решетки; $\rho_{\text{прим}}$ часто называют *остаточным сопротивлением*. Его оценивают по измерению при температуре жидкого азота (4,2 К). Обычно

$$\rho_{\text{прим}} = \rho_{\text{ост}} = (10^{-2} \dots 10^{-4}) \cdot \rho_{300\text{К}}. \quad (4.12)$$

Измерение остаточного удельного сопротивления монокристаллических металлов дает возможность оценить степень их чистоты [1].

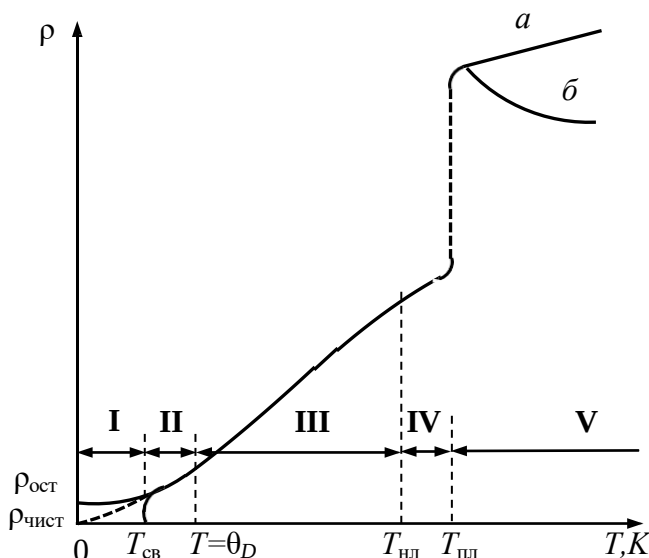


Рис. 4.1. Характер изменения удельного сопротивления проводника от температуры: а, б — варианты изменения удельного сопротивления у различных расплавленных металлов

Типичная кривая изменения удельного сопротивления металлического проводника в зависимости от температуры представлена на рис. 4.1.

В области I, составляющей несколько кельвинов, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости, и наблюдается падение до нуля удельного сопротивления при температуре $T_{\text{св}}$. В реальных металлах при наличии дефектов и примесей наблюдается остаточное значение удельного сопротивления.

В пределах области II наблюдается быстрый рост удельного сопротивления $\rho \sim T^n$, где значение n может быть до 5 и постепенно убывает с ростом температуры до 1 при $T = \theta_D$, где θ_D – температура Дебая. Она определяет максимальную частоту тепловых колебаний, которые могут возбуждаться в кристалле:

$$\theta_D = h \cdot \nu_{\max} / K, \quad (4.13)$$

где h – постоянная Планка; K – постоянная Больцмана; $\nu_{\max}$ – максимальная частота.

Область III – (линейный участок температурной зависимости «–») у большинства металлов простирается до температур, близких к точке плавления. Исключение составляют ферромагнитные металлы. Вблизи точки плавления, т.е. в области IV, начало которой отмечено температурой $T_{\text{пл}}$, и в обычных металлах может наблюдаться некоторое отступление от линейной зависимости [5].

При переходе из твердого состояния в жидкое (область V) у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления приблизительно в 1,5-2 раза – зона a на рис. 4.1, хотя у веществ со сложной кристаллической структурой (висмут, галлий) плавление сопровождается уменьшением ρ – зоны b на рис. 4.1.

За счет введения примесей удельное сопротивление сплавов значительно выше, чем удельное сопротивление чистого металла $\rho_{\text{прим}} \gg \rho_{\text{чист}}$. Повышение удельного сопротивления сплава по сравнению с чистым металлом отражает эмпирическое уравнение Нордхейма для двухкомпонентного сплава:

$$\rho_{\text{спл}} = \rho_{\text{Me}} + Ax(1-x),$$

где x – доля металла-примеси в сплаве; A – постоянная, характеризующая эффективность примесных атомов как рассеивающих центров.

Чем больше удельное сопротивление сплава, тем меньше его α_ρ . Это вытекает из того, что в твердых растворах $\rho_{\text{прим}}$ значительно больше $\rho_{\text{чист}}$ и не зависит от температуры. В соответствии с определением формула температурного коэффициента

$$TK\rho_{\text{спл}} = \frac{1}{\rho_{\text{спл}}} \frac{d\rho_{\text{спл}}}{dT} = \frac{1}{1 + (\rho_{\text{спл}}/\rho_{\text{Me}})} \frac{1}{\rho_{\text{Me}}} \frac{d\rho_{\text{Me}}}{dT} \ll TK\rho_{\text{Me}}. \quad (4.14)$$

В концентрированных твердых растворах $\rho_{\text{спл}}$ будет отличаться от ρ_{Me} на порядок и больше. Поэтому $\alpha_{\rho_{\text{спл}}}$ может быть значительно ниже α_ρ чистого металла. На этом основано получение термостабильных проводя-

щих материалов. Во многих случаях температурная зависимость удельного сопротивления сплавов более сложная, чем та, которая вытекает из правила Маттиссена. Температурный коэффициент сплавов может быть близким к нулю и даже отрицательным.

4.2.2. Зависимость удельного сопротивления проводниковых материалов от давления

Большое влияние на удельное сопротивление металлов и сплавов оказывают искажения, вызываемые напряженным состоянием. Однако степень этого влияния определяется характером напряжений. Например, при всестороннем сжатии у большинства металлов удельное сопротивление уменьшается. Это объясняется сближением атомов и уменьшением амплитуды тепловых колебаний решетки [3].

При упругом растяжении и кручении межатомные расстояния увеличиваются. Это сопровождается усилением рассеяния электронов и возрастанием ρ .

Влияние упругого растяжения или сжатия при условии пропускания тока вдоль действующей силы учитывается формулой

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 \pm \varphi \sigma), \quad (4.15)$$

где $\varphi = (1/\rho)(\partial\rho/\partial\sigma)$ – коэффициент удельного сопротивления по давлению; σ – механическое напряжение в сечении образца. Знак плюс в формуле соответствует деформации при растяжении, а знак минус – при сжатии. Обычно величина коэффициента $\varphi = (1 \dots 5) \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$.

4.2.3. Сопротивление проводников на высоких частотах

На высоких частотах наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводников: плотность тока максимальна на поверхности и убывает по мере проникновения вглубь проводника. Это явление получило названия поверхностного эффекта (скин-эффект). Приняв для проводящего полупространства направление тока за ось x , нормаль к поверхности за ось z и считая, что распределение остается неизменным вдоль осей x и y , получим следующее уравнение распределения тока по сечению проводника:

$$j_x(z) = j_0 \cdot e^{-\frac{z}{\Delta}}, \quad (4.16)$$

где j_0 – плотность тока на поверхности; Δ – глубина проникновения поля в проводник, мм [13].

Глубина проникновения поля численно равна расстоянию, на котором амплитуда напряженности поля, а, следовательно, и плотности тока

уменьшается примерно до 37 % по отношению к своему значению на поверхности проводника. Значения глубины проникновения поля Δ связаны с физическими характеристиками материала выражением

$$\Delta = \sqrt{1/(\pi f \mu_0 \mu \gamma)}, \quad (4.17)$$

где f – частота поля, Гц; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гц/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость проводника; γ – удельная проводимость проводника. В справочной литературе иногда приводятся упрощенные формулы для расчета Δ , например, для Al :

$$\Delta = \frac{3,1}{\sqrt{f}}.$$

В случае сильно выраженного поверхностного эффекта значение тока рассчитывается по формуле

$$I = \Pi \int_0^{\infty} j_0 e^{-z/\Delta} dz = j_0 \Pi \Delta, \quad (4.18)$$

где Π – периметр сечения проводника. Для провода круглого сечения $\Pi = \pi d$.

На основании этого вводится понятие *эквивалентной площади сечения* проводника, занятой током при воздействии высокочастотного поля:

$$S_{\text{эКВ}} = \Pi \Delta = \pi d \Delta. \quad (4.19)$$

Поскольку центральная часть сечения проводника почти не используется, активное сопротивление проводника $R_{\sim}$ при прохождении по нему переменного тока больше, чем его активное сопротивление R_0 при постоянном токе. Коэффициент увеличения сопротивления k_R определяется по выражению

$$k_R = R_{\sim} / R_0 = S_0 / S_{\text{эКВ}}. \quad (4.20)$$

Для проводников круглого сечения $k_R = d/4\Delta$. Для плоских проводников используют специальную характеристику – сопротивление квадрата поверхности R_s , определяемое в Омах из выражения $R_s = \rho/\Delta$, которое показывает, что активное сопротивление R_s плоского проводника бесконечной толщины в случае поверхностного эффекта равно сопротивлению плоского проводника толщиной Δ для постоянного тока [13].

4.2.4. Электроперенос в проводниках

В современной полупроводниковой микроэлектронике площади поперечного сечения межсоединений достигают величины порядка 1 мкм² и

менее, что обуславливает высокие плотности тока в них. В этом случае активизируется **эффект электропереноса** (массопереноса), разрушающий токоведущие дорожки и контакты к полупроводниковым областям. Электроперенос и некоторые другие эффекты в межсоединениях являются серьезной проблемой на пути повышения степени интеграции интегральных схем, обеспечения их надежности. Время безотказной работы (τ_m) межсоединений оценивается

$$\tau_m = cSj^{-2} \exp(E/KT) \quad (4.21)$$

где c – коэффициент пропорциональности; S – поперечное сечение проводника, см^2 ; j – плотность тока, А/см^2 ; E – энергия активизации атомов, эВ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; K – постоянная Больцмана. Для алюминия, например, $c = 10^{12} \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{см}^6$, $E = 1,2$ эВ.

4.3. Классификация проводниковых материалов

В настоящее время не существует общепринятой классификации проводниковых материалов. В физике, химии и технике проводящие материалы классифицируют по различным признакам:

1) **по составу**: чистые металлы, металлические сплавы, неметаллические проводящие материалы;

2) **по значению проводимости**: материалы высокой проводимости, материалы высокого сопротивления и сверхпроводящие материалы.

Материалы высокой проводимости – это металлы (серебро, медь, алюминий, золото и др.), которые применяются для изготовления проводников, контактных площадок, проводящих покрытий и пленок, различных токопроводящих деталей. Они используются как основа в контактных материалах, припоях. **Материалы высокого сопротивления** – это металлические сплавы, сплавы металлов с полупроводниками, композиции из проводника и диэлектрика, а также углерод и ряд переходных металлов, применяются в виде тонких пленок (тантал, рений, хром). Материалы высокого сопротивления используются для изготовления резисторов.

Из сплавов для проволоочных резисторов наибольшее распространение получили сплавы на основе меди и никеля (манганин), меди и марганца (констант), а также никеля и хрома (нихром) [7].

Для изготовления постоянных и переменных резисторов различных типов используют **пленочные резистивные материалы**. Пленочные материалы на основе металлов и их соединений преимущественно применяются в микроэлектронике. Среди резистивных материалов, используемых в производстве пленочных резисторов, выделяются: резистивные сплавы,

содержащие кремний, силициды. Наибольшее распространение получили три из них: РС3001, РС3710, МЛТ-3М [7].

Одним из традиционных материалов в производстве резисторов являются композиции. **Композиционные материалы** представляют собой механическую смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. В качестве компонентов проводящей фазы используют металлы, графит, некоторые окислы и карбиды. Функции связывающего вещества выполняют как органические, так и неорганические диэлектрики. Металло-диэлектрические композиции с неорганическим связующим называются **керметами**. Наибольшее распространение получили керметы на основе хрома и окиси кремния.

4.4. Вопросы и задачи

1. Удельное сопротивление меди при комнатной температуре равно $1,60 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Рассчитайте теплопроводность меди.

2. Удельное сопротивление золота 0,024 мкОм·м, относительная атомная масса 197, плотность 19300 кг/м^3 . Рассчитайте для этого металла концентрацию и подвижность свободных электронов, а также коэффициент теплопроводности.

3. Найдите электрическое сопротивление медного провода круглого сечения длиной 100 м и поперечным сечением 1 мм^2 , $\rho = 0,0168 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

4. Адгезия, а, следовательно, и прочность оксидной пленки в структуре металл - собственный оксид зависит от разницы ТКЛР металла и оксида. Какая из двух пар Si - SiO₂ или Al - Al₂O₃ предпочтительна в этом отношении? Значения ТКЛР приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Значения ТКЛР

Материал	Al	Al ₂ O ₃	Si	SiO ₂
ТКЛР, 1/К	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$

5. Удельное сопротивление пленочного алюминия значительно выше справочных значений для массивного образца. Почему? Определите соотношение $\rho_{\text{пл}}/\rho_{\text{мас}}$, если известно, что сопротивление шины размером $1 \times 100 \times 1000 \text{ мкм}$ равно 6 Ом, а $\rho_{\text{мас}} = 0,028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

6. Чем, помимо возможного обрыва проводника, опасна электромиграция алюминиевых коммутационных слоев в интегральных схемах? Какими способами можно снизить опасность электромиграции?

7. Сочетание каких материалов дает явление, называемое «пурпурной чумой»? В чем оно заключается и какие имеет последствия?

8. Почему алюминий в полупроводниковых интегральных схемах применяется для создания проводников и контактных площадок, а в тонкопленочных ГИС для контактных площадок используется ограниченно?

9. Контакт между пленками алюминия двух уровней разводки обычно имеет высокое сопротивление. Почему? Как обработать пленку алюминия, чтобы снизить ее сопротивление?

10. Удельное объемное сопротивление алюминиевой пленки толщиной 1 мкм на 10% больше, чем удельное объемное сопротивление в массивном образце, $\rho_{\text{мас}} = 0,028 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Каково ρ_v пленки?

11. В пленочном состоянии ρ_v алюминия на 10% выше, чем в массивном образце. При какой температуре замерено ρ_v алюминиевой пленки, если его величина составляет $0,03 \text{ Ом}/\square$, а $\text{TK}\rho_v = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$?

12. При пайке компонентов печатной платы она нагревается до температуры около 260°C . Какие из коммутационных шин более критичны: прилегающие по поверхности плат или переходные с одной стороны на другую? Учесть, что предел прочности при удлинении меди около 5%. ТКЛР стеклотекстолита вдоль поверхности $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, поперек $250 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур $0 \dots 300^\circ\text{C}$.

13. Докажите, что уменьшение ширины шин коммутационных плат есть непременно условие уменьшения их длины.

14. Каким должен быть ТКР резистивного материала, пригодного для изготовления прецизионного резистора, сопротивление которого изменяется не более 2% в диапазоне температур $-60 \dots +120^\circ\text{C}$?

15. Нихром марки Н80Х20 при $T = 20^\circ\text{C}$ имеет $\rho = 1,03 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Температурный коэффициент сопротивления в диапазоне температур $20 \dots 100^\circ\text{C}$ равен $2,31 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Определите: а) удельное сопротивление при температуре 100°C ; б) остаточное сопротивление, обусловленное рассеянием на примесях, используя правило Маттиссена.

16. Почему для терморезисторов более пригодны чистые металлы, чем сплавы?

17. ТКЛР меди, серебра, золота, алюминия заметно выше, чем у подавляющего большинства остальных металлов ($(15 \dots 23) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ против $(5 \dots 10) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Чем это можно объяснить? Какими еще свойствами отличаются перечисленные металлы?

18. Сколько витков нихромовой проволоки диаметром 0,1 мм надо намотать на керамическое основание радиусом 2,5 мм, чтобы получить резистор сопротивлением 100 Ом?

19. Определите падение потенциала на медном проводе длиной 50 м и диаметром 0,2 мм, если сила тока в нем 2 А.

20. По медному проводу течет ток плотностью $j = 10^4 \text{ А/м}^2$. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов, полагая, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости.

21. Две проволоки - медная и алюминиевая - имеют одинаковую массу. Длина медной проволоки в 10 раз больше длины алюминиевой. Во сколько раз отличаются их сопротивления? Плотность меди в 3,3 раза больше плотности алюминия, удельное сопротивление в 1,65 раза меньше.

22. Докажите справедливость закона Видемана - Франца для стандартной меди при $T = 293 \text{ К}$. Параметры меди $\gamma = 58 \text{ мСм/м}$; $\lambda_T = 390 \text{ Вт/(м·К)}$.

23. Рассчитайте время безотказной работы алюминиевого проводника при температурах $T = 25^\circ\text{С}$ и $T = 150^\circ\text{С}$, $S = 10^{-7} \text{ см}^2$ и $j = 10^6 \text{ А/см}^2$. Сравните полученные результаты.

24. Одинаковым ли будет относительное изменение удельного сопротивления меди для двух температурных интервалов: $20\text{-}60^\circ\text{С}$ и $60\text{-}100^\circ\text{С}$ (по отношению к начальному значению в каждом из этих интервалов)?

25. Удельное сопротивление чистой меди при 20 и 100°С равно соответственно $0,0168$ и $0,0226 \text{ мОм·м}$. Пользуясь линейной аппроксимацией зависимости $\rho(T)$, определить температурный коэффициент удельного сопротивления при 0°С .

26. Доказать, что между температурными коэффициентами сопротивления проводника α_R , удельного сопротивления материала α_ρ и линейного расширения α_l существует следующая взаимосвязь: $\alpha_\rho = \alpha_R + \alpha_l$.

27. Определить температурный коэффициент линейного расширения α_l и удлинение нихромовой проволоки, если известно, что при повышении температуры от 20 до 1000°С электрическое сопротивление проволоки изменяется от 50 до $56,6 \text{ Ом}$. Длина проволоки в холодном состоянии $l = 50 \text{ м}$. Температурный коэффициент удельного сопротивления нихрома принять равным $15 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Решение

Температурный коэффициент сопротивления проволоки:

$$\alpha_R = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} = \frac{56,6 - 50}{50(1000 - 20)} = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1},$$

тогда

$$\alpha_l = \alpha_\rho - \alpha_R = (15 - 13,5) \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1},$$

отсюда

$$\Delta l = l \alpha_l \Delta T = 50 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 980 = 0,735 \text{ м}.$$

28. При нагревании провода из манганина длиной $1,5 \text{ м}$ и диаметром $0,1 \text{ мм}$ от 20 до 100°С его сопротивление уменьшается на $0,07 \text{ Ом}$, а длина

возрастает на 0,16 %. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления. При расчетах принять, что при комнатной температуре для манганина удельное сопротивление $\rho = 0,47$ мкОм·м.

29. Пользуясь законом Видемана - Франца, определить отношение удельных теплопроводностей серебра и олова при температуре: а) 20 и б) 200 °С. Принять, что при температуре 20 °С удельные сопротивления серебра и олова равны соответственно 0,015 и 0,113 мкОм·м, а температурные коэффициенты удельного сопротивления составляют соответственно $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

30. Определить, во сколько раз изменится удельная теплопроводность λ_T меди при изменении температуры ΔT от 20 до 200 °С.

Решение

Согласно закону Видемана - Франца

$$\lambda_T / \gamma = L_0 T,$$

где γ – удельная проводимость; $L_0 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ B}^2 \cdot \text{K}^{-2}$ – число Лоренца.

Отсюда следует, что

$$\frac{\lambda_{T1}}{\lambda_{T2}} = \frac{\rho_2 T_1}{\rho_1 T_2} = \frac{(1 + \alpha \Delta T) T_1}{T_2} = \frac{(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 180) 293}{573} = 0,91.$$

31. Вычислить удельную теплопроводность меди при комнатной температуре по измеренному значению ее удельного сопротивления $\rho = 0,017$ мкОм·м.

32. Определить, во сколько раз отличаются удельные теплоемкости серебра и свинца при комнатной температуре. Характеристическая температура Дебая равна 225 К для серебра и 105 К для свинца.

33. Оценить удельную теплопроводность магния при 400 °С, если удельное сопротивление при 0 °С составляет 0,044 мкОм·м, а ТК $\rho = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

34. Определить напряженность электрического поля, возникающего в зазоре между пластинами плоского конденсатора, одна из которых изготовлена из алюминия, а другая из пластины. Пластины соединены между собой медным проводом, а длина зазора $l = 5$ мм. Работа выхода электронов из алюминия, меди и платины составляет соответственно 4,25, 4,4 и 5,32 эВ. Как изменится напряженность поля, если алюминиевую и медную пластины закоротить проводом из пластины при той же длине зазора?

Решение

Разность потенциалов на концах последовательной разнородной цепи определяется разницей в работах выхода электронов из крайних проводников и не зависит от числа и состава промежуточных звеньев. Поэтому в первом случае имеем

$$E_1 = \frac{A_{Al} - A_{Pt}}{el} = \frac{4,25 - 5,32}{5 \cdot 10^{-3}} = -214 \text{ В/м};$$

во втором

$$E_2 = \frac{A_{Al} - A_{Cu}}{el} = \frac{4,25 - 4,4}{5 \cdot 10^{-3}} = -30 \text{ В/м}.$$

35. Из никелевой ленты шириной 1 мм необходимо изготовить шунт сопротивлением 0,4 Ом. Какой длины должна быть никелевая лента, если удельное сопротивление никеля 0,068 мкОм·м.

36. В цепь включены последовательно медная и нихромовая проволоки равной длины и диаметра. Найти отношение количеств теплоты, выделяющейся в этих проводниках, и отношение падений напряжений на проводах. Удельное сопротивление меди и нихрома равно соответственно 0,017 и 1 мкОм·м.

37. Пленочный резистор состоит из трех участков, имеющих различные сопротивления квадрата пленки $R_1=10$ Ом; $R_2=20$ Ом; $R_3=30$ Ом (рис. 4.2). Определить сопротивление резистора.

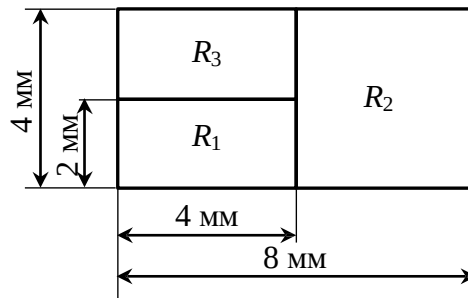


Рис. 4.2

38. Сопротивление провода из константана при 20 °С равно 500 Ом. Определить сопротивление этого провода при 450 °С, если при 20 °С температурный коэффициент удельного сопротивления константана $\alpha_p = -15 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, а температурный коэффициент линейного расширения составляет 10^{-5} К^{-1} .

39. Вычислить глубину проникновения электромагнитного поля в медный проводник на частотах 50 Гц и 1 МГц.

40. Определить отношение глубин проникновения электромагнитного поля в алюминиевый и стальной проводники на частоте 50 Гц и 1 мГц. При расчете полагать, что для малоуглеродистой стали $\mu=1000$; $\rho=0,1$ мкОм·м.

41. На керамическое основание нанесена пленка резистивного материала с удельным сопротивлением 0,56 мкОм·м. Основание имеет диаметр 8 мм, длину 15 мм. Найти сопротивление резистора. Как изменится это сопротивление, если сделать спиральную нарезку с шириной канавки 0,2 мм и шагом спирали 1 мм.

4.5. Проводниковые компоненты

Краткие теоретические сведения.

Резисторы – электро-радиоэлементы, предназначенные для регулирования и перераспределения электрической энергии [10].

Система условных обозначений и маркировка резисторов

Система сокращенных обозначений резисторов введена в 1968 г. До этого четкой системы обозначений не существовало. В основу обозначений (названий) резисторов брались различные признаки: конструктивные разновидности, технологические особенности, эксплуатационные характеристики, область применения и т.п. [4].

Например: ППБ – проволочные переменные бескаркасные;
МЛТ – металлопленочные лакированные теплостойкие;
ПКВ – проволочные керамические влагостойкие;
УЛИ – углеродистые лакированные измерительные;
СПО – сопротивления переменные объемные;
ЮС – юстировочные.

ГОСТ 13453-68 введена система сокращенных обозначений в зависимости от группы свойств резисторов, состоящая из букв и цифр.

Буквы обозначают группу изделий: С – резисторы постоянные; СП – резисторы переменные (буква С осталась от старого названия резисторов – «сопротивления»). Число, стоящее после букв, обозначает специфическую разновидность резистора в зависимости от материала токопроводящего элемента:

- 1 – непроволочные тонкослойные углеродистые и бороуглеродистые;
- 2 – непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические и металлоокисные;
- 3 – непроволочные композиционные пленочные;
- 4 – непроволочные композиционные объемные;
- 5 – проволочные;

6 – непроволочные тонкослойные металлизированные.

После первой цифры через дефис ставится вторая цифра (цифры), обозначающая регистрационный номер конкретного типа резистора. Например, С2-26 обозначает резисторы постоянные, непроволочные, тонкослойные металлодиэлектрические, регистрационный номер – 26.

С 1980 г. введена новая система сокращенных условных обозначений по которой:

- первый элемент – буква или сочетание букв – обозначает подкласс резистора: Р – постоянные резисторы, РП – переменные резисторы, НР – наборы резисторов;

- второй элемент – цифра (цифры) – обозначает группу резистора по материалу резистивного элемента: 1 – непроволочные, 2 – проволочные;

- третий элемент – цифра – обозначает регистрационный номер конкретного типа резистора. Между вторым и третьим элементом ставится дефис. Например, резисторы постоянные непроволочные с номером 26 следует писать Р1-26 [8].

Полное условное обозначение состоит из сокращенного обозначения, варианта конструктивного исполнения (при необходимости), обозначений и величин основных параметров и характеристик резисторов, климатического исполнения и обозначения документа на поставку.

Параметры и характеристики, входящие в полное условное обозначение резистора, указывается в следующей последовательности.

Для резисторов постоянных:

- номинальная мощность рассеяния и буквенное обозначение;
- единицы измерения мощности (Вт, кВт);
- номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения (Ом, кОм, МОм, ГОм);
- допускаемое отклонение сопротивления в процентах (допуск);
- группа по уровню шумов (для непроволочных резисторов);
- группа по температурному коэффициенту сопротивления;
- документ на поставку.

Пример: Р1 – 33И – 0,25 Вт – 100 кОм $\pm$ 2%А 0.467.027 ТУ.

Для резисторов переменных:

- номинальная мощность рассеяния и буквенное обозначение единицы обозначения измерения мощности (Вт);
- номинальное сопротивление и буквенное обозначение единицы измерения (Ом, кОм, МОм);
- допускаемое отклонение сопротивления в процентах (допуск);
- функциональная характеристика (для непроволочных резисторов);
- обозначение конца вала и длины выступающей части вала (размер от монтажной плоскости до конца вала) по ГОСТ 4907-73 (ВС-1 - сплош-

ной гладкий, ВС-2 – сплошной со шлицем, ВС-3 – сплошной с лыской, ВС-4 – сплошной с двумя лысками, ВП-1 – полый гладкий, ВП-2 – полый с лыской);

- документ на поставку.

Для многоэлементных резисторов в полном условном обозначении параметры и характеристики записываются в виде дроби в порядке набора секций от выхода вала.

Пример:

	<u>0,25 Вт – 1,5 кОм$\pm$ 10% А</u>	
РП1-33У	<u>0,25 Вт – 2,2 кОм$\pm$ 20% А</u>	
	<u>0,25 Вт – 4,7 МОм$\pm$ 20% А</u>	ВП-1 – 32 ОЖО.468.185 ТУ
	0,25 Вт – 3,3 МОм $\pm$ 20% А	

Маркировка на резисторах введена также буквенно-цифровая, соответствующая международным стандартам. Она содержит: вид, номинальную мощность, номинальное значение сопротивления, допуск и дату изготовления. В зависимости от размеров маркируемых резисторов и вида технической документации могут применяться полные и сокращенные (кодированные) обозначения номинальных сопротивлений и их допускаемых отклонений.

Полное обозначение номинальных сопротивлений состоит из значения номинального сопротивления (цифра) и обозначения единицы измерения (Ом – омы, кОм – килоомы, МОм – мегаомы, ГОм – гигаомы, ТОм – тераомы). Например, 365 Ом, 100 кОм, 4,7 МОм, 3,3 ГОм, 1 ТОм.

Кодированное обозначение номинальных сопротивлений состоит из трех или четырех знаков, включающих две цифры и букву или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского алфавита (в скобках) обозначает множитель, составляющий значение сопротивления, и определяет положение запятой десятичного знака. Буквы Е (R), К, М, Г (G), Т обозначают соответственно множители 1 , 10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12} для значений сопротивления, выраженных в омах. Для приведенного выше примера следует писать: 365Е (365R), 100К, 4М7, 3Г3, 1Т0 [8].

Полное обозначение допускаемого отклонения состоит из цифр, а кодирование – из буквы. На практике могут встречаться различные варианты кодирования допусков, приведенные в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Сравнительная таблица по составу и обозначению допускаемых отклонений сопротивлений

ГОСТ 9664-74	ГОСТ 11076-69	РС 3542-72	Публикация 62 МЭК	Проект стандарта СЭВ
1	2	3	4	5
$\pm 0,001$				$\pm 0,001$ Е(Е)
$\pm 0,002$				$\pm 0,002$ Л(Л)

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5
$\pm 0,005$				$\pm 0,005$ Я(R)
$\pm 0,01$				$\pm 0,01$ П(P)
$\pm 0,02$				$\pm 0,02$ У(U)
$\pm 0,05$				$\pm 0,05$ Х(X)
$\pm 0,1$	$\pm 0,1$ Ж	$\pm 0,1$ Ж(B)	$\pm 0,1$ (B)	$\pm 0,1$ В(B)
$\pm 0,25$	$\pm 0,2$ У	$\pm 0,25$ У(C)	$\pm 0,25$ (C)	$\pm 0,25$ С(C)
$\pm 0,5$	$\pm 0,5$ Д	$\pm 0,5$ Д(D)	$\pm 0,5$ (D)	$\pm 0,5$ Д(D)
± 1	± 1 Р	± 1 Р(F)	± 1 (F)	± 1 Ф(F)
± 2	± 2 Л	± 2 Л(G)	± 2 (G)	± 2 Ж(G)
± 5	± 5 И	± 5 И(I)	± 5 (I)	± 5 И(I)
± 10	± 10 С	± 10 С(K)	± 10 (K)	± 10 К(K)
± 20	± 20 В	± 20 В(M)	± 20 (M)	± 20 М(M)
± 30	± 30 Ф	± 30 Ф(N)	± 30 (N)	± 30 Н(N)

На постоянных резисторах в соответствии с ГОСТ 17598-72 и требованиями Публикации 62 МЭК допускается маркировка цветным кодом. Ее наносят знаками в виде кругов и полос [4].

Для маркировки цветным кодом номинальное сопротивление резисторов в омах выражается двумя или тремя цифрами (в случае трех цифр последняя цифра не равна 0) и множителем 10^n , где n – любое число от минус 2 до плюс 9.

Маркировочные знаки сдвигают к одному из торцов резистора и располагают слева направо в следующем порядке:

- | | | |
|-----------------|---|----------------------------|
| 1) первая цифра | } | номинальное сопротивление. |
| 2) вторая цифра | | |
| 3) третья цифра | | |
| 4) множитель | | |
| 5) допуск | | |

Если размеры резистора не позволяют разместить маркировку ближе к одному из торцов резистора, площадь первого знака делается приблизительно в 2 раза больше площади других знаков.

Цвета знаков маркировки значения номинального сопротивления и допусков должны соответствовать указанным в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Цвета знаков маркировки номинального сопротивления и допусков

Цвет знака	Номинальное сопротивление, Ом				Допуск, %
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множители	
1	2	3	4	5	6
Серебристый	-	-	-	10^{-2}	± 10
Золотистый	-	-	-	10^{-1}	± 5
Черный	-	0	-	1	-

Окончание табл. 4.3

1	2	3	4	5	6
Коричневый	1	1	1	10	± 1
Красный	2	2	2	10^2	± 2
Оранжевый	3	3	3	10^3	-
Желтый	4	4	4	10^4	-
Зеленый	5	5	5	10^5	$\pm 0,5$
Голубой	6	6	6	10^6	$\pm (0,25) (\pm 0,2)$
Фиолетовый	7	7	7	10^7	$\pm 0,1$
Серый	8	8	8	10^8	$\pm 0,05$
Белый	9	9	9	10^9	-

Порядок выполнения

1. Получить от преподавателя или лаборанта набор резисторов.
2. Определить номинальные значения сопротивления, допуск по маркировке и произвести измерения фактических сопротивлений, определить допустимое отклонение.
3. Описать конструкцию всех резисторов, указать их особенности.
4. Записать все резисторы согласно их записи в перечне элементов.
5. Оформить работу.

Контрольные вопросы

1. Какие радиоэлементы называются резисторами?
2. Дать классификацию резисторов.
3. Указать способы сокращенного и полного обозначение резисторов.
4. Указать основные параметры резисторов.
5. Какие существуют конструкции постоянных резисторов?
6. Какие существуют конструкции переменных резисторов?

4.6. Нелинейные резисторы

Задачи

1. Было обнаружено, что удельное сопротивление собственного германия изменяется с температурой T следующим образом:

T, K	385	458	556	714
$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м.}$	0,028	0,0061	0,0013	0,00027
σ_i	35,7	164	769	3703,7

Определить ширину запрещенной зоны ν_z в германии, предполагая, что она не изменяется с температурой. Предположите, что подвижности электронов и дырок, μ_n и μ_p изменяются пропорционально $T^{3/2}$.

2. Сравнить концентрации свободных электронов в беспримесных образцах германия и кремния при температурах 40 и 80°C с их концентрациями при температуре 300 К. Пренебрегите изменением эффективных плотностей состояний в зоне проводимости N_c и валентной зоне N_v при изменении температуры. Ширина запрещенной зоны в германии $\varphi_z = 0,72$ эВ, в кремнии $\varphi_z = 1,12$ эВ. Определить значения удельного сопротивления при указанных температурах (температурные изменения подвижности не учитывать). Удельные сопротивления собственных германия и кремния при комнатной температуре принять равными 0,45 и $2 \cdot 10^3$ Ом·м соответственно.

3. В полупроводниковом кристалле под действием света образуется равномерно распределенная избыточная концентрация носителей заряда Δn . Начальная концентрация неосновных носителей заряда составляет $2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а начальная скорость уменьшения концентрации равна $2,8 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1}$. Определить: а) время жизни неосновных носителей заряда; б) значение Δn через 2 мс после выключения источника света.

4. Образец полупроводника длиной 30 мм, шириной 5 мм и толщиной 1 мм имеет сопротивление 500 Ом. При перемещении его в магнитное поле с индукцией $B = 0,5$ Тл, перпендикулярное плоскости пластины, на гранях образца возникает ЭДС Холла 5 мВ при токе через образец 10 мА. Определить подвижность Холла и плотность носителей в полупроводнике, считая, что он является ярко выраженным полупроводником p -типа.

До какого значения изменится ЭДС Холла, если в то же поле поместить образец меди таких же размеров и несущий такой же ток? Концентрация электронов проводимости в меди примерно равна $8,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

5. Термистор из собственного кремния имеет сопротивление $R = 600$ Ом при $T_1 = 300 \text{ К}$. Вычислить его сопротивление при $T_2 = 325 \text{ К}$, если ширина запрещенной зоны для кремния $\varphi_z = 1,1$ эВ и что подвижности носителей μ_p и μ_n заметно не изменяются в этом интервале температур.

6. Пользуясь люкс-амперной характеристикой фоторезистора ФСК-1, изображенной на рис. 4.3, определить его удельную чувствительность, если темновой ток $I_T = 15$ мкА, освещенность $E = 800$ лк, напряжение на фоторезисторе $U = 25$ В, площадь светочувствительной поверхности $P = 0,3 \text{ см}^2$.

7. Фоторезистор ФСК-1, люкс-амперная характеристика которого изображена на рис. 4.6 используется в схеме на рис. 4.4. Напряжение источника питания $E = 50$ В, сопротивление резистора нагрузки $R_H = 10$ кОм, мак-

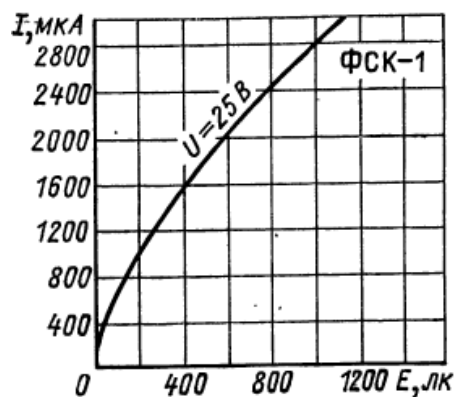


Рис. 4.3. Люкс-амперная характеристика ФСК-1

симально допустимая мощность, рассеиваемая фоторезистором, $P_{\max}=125$ мВт. Площадь светочувствительной поверхности $\Pi=0,3$ см².

Определить: а) световой поток Φ , при котором падение напряжения на нагрузке $U_R=25$ В;

б) мощность P , рассеиваемую фоторезистором в этом случае;

в) минимальное значение сопротивления резистора нагрузки $R_{\min}$, при котором мощность, рассеиваемая фоторезистором, не превышает максимально допустимую, если значение светового потока $\Phi=0,03$ лм.

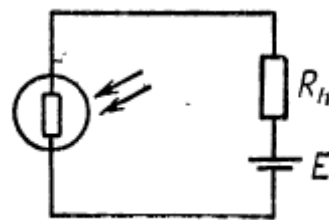


Рис. 4.4. Схема включения ФСК-1

ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИИ И ТИПОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТОНКОПЛЁННОЙ ТЕХНОЛОГИИ. НАНОТЕХНОЛОГИЯ

5.1. Определение, основные свойства

Диэлектрическими материалами являются материалы с высоким удельным сопротивлением (более 10^9 Ом·см), с шириной запрещенной зоны более 3 эВ, способные к поляризации [1]. **Поляризация** - это состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема. Способность диэлектриков поляризоваться в электрическом поле определяется относительной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_r = C_d / C_0, \quad (5.1)$$

где C_d - емкость конденсатора с данным диэлектриком; C_0 - емкость того же конденсатора в вакууме. Абсолютная диэлектрическая проницаемость

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (5.2)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная. Значение ε_r зависит от механизма поляризации диэлектрика.

Наиболее важные виды поляризации:

- **электронная** - смещение орбит электронов относительно атомных ядер в электрическом поле. Время установления поляризации 10^{-15} с. Встречается у всех диэлектриков;

- **ионная** - смещение относительно друг друга ионов, образующих кристаллическую решетку. Время установления поляризации 10^{-13} с;

- **дипольная** - поворот дипольных молекул в полярных диэлектриках. Принадлежит к числу медленных видов поляризации.

Диэлектрическая проницаемость зависит от частоты приложенного напряжения у полярных диэлектриков. Для неполярных диэлектриков, имеющих только электронную поляризацию, характерно то, что ε_r не зависит от частоты электрического поля. Диэлектрическая проницаемость зависит от температуры (рис. 5.1). Помимо частоты и температуры на диэлектрическую проницаемость может влиять влажность. Так, ε_r гигроскопичных диэлектриков обычно возрастает при увеличении влажности. На практике часто приходится встречаться с композиционными диэлектриками, представляющими смесь двух или большего числа компонентов [1].

Для модели плоского конденсатора, диэлектрик которого состоит из двух сплошных диэлектриков, имеющих различные ε , запишем:

а) для параллельного соединения $\varepsilon_r^* = y_1 \varepsilon_{r1} + y_2 \varepsilon_{r2}$;

б) для последовательного соединения $\varepsilon_r^* = \varepsilon_{r1} \varepsilon_{r2} / (y_1 \varepsilon_{r2} + y_2 \varepsilon_{r1})$, где

ε_{r1} , ε_{r2} - относительные диэлектрические проницаемости компонентов; y_1 ,

y_2 - объемные концентрации компонентов ($y_1 + y_2 = 1$) [9].

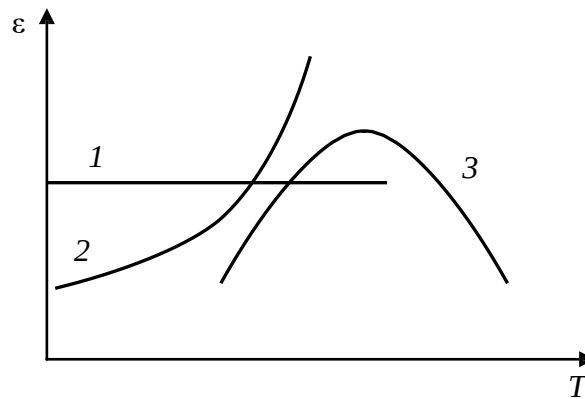


Рис. 5.1. Графики зависимости диэлектрической проницаемости от температуры: 1 - для неполярных диэлектриков; 2 - для ионных диэлектриков; 3 - для полярных диэлектриков

Во многих случаях (пластические массы, керамики и т.д.) диэлектрик представляет собой неупорядоченную статистическую смесь компонентов. Для расчета ϵ_r^* статистической смеси используется формула Лихтенеккера, или логарифмический закон смешения: $\lg \epsilon_r^* = y_1 \lg \epsilon_{r1} + y_2 \lg \epsilon_{r2}$. Для вспененных пластмасс (пенопласты)

$$\lg \epsilon_r = d_n / d_m \lg \epsilon_m, \quad (5.3)$$

где d_n , d_m – средние плотности вспененного материала и сплошного материала соответственно; ϵ_m – диэлектрическая проницаемость сплошного материала [12].

Реальные диэлектрики обладают конечным значением удельного сопротивления. Причиной этого является наличие подвижных ионов как основного материала, так и примесей. Значение ионной электропроводности диэлектриков определяется таким же выражением, как и у полупроводников: $\gamma = e\mu n$, где n – концентрация свободных ионов; μ – подвижность ионов. Ионная электропроводность происходит подобно диффузии по вакантным узлам. Поэтому, используя соотношение Эйнштейна $D = \phi_T \mu$, можно выразить электропроводность диэлектриков

$$\gamma = en (D_n / \phi_T). \quad (5.4)$$

Электропроводность диэлектриков зависит в основном от быстро диффундирующих примесей, для которых $D_n = 10^{-5} \dots 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$. К таким примесям относятся ионы меди, золота, серебра, калия, натрия, водорода. Ионы натрия и водорода при комнатной температуре легко проникают через тонкие пленки, а при высоких температурах – и через стенки кварцевой аппаратуры. Коэффициент диффузии экспоненциально увеличивается с повышением температуры. Поэтому температурная зависимость проводимости диэлектриков

$$\gamma = A \exp(-\theta/v_T), \quad (5.5)$$

где A – константа, θ – энергия активации диффузии, такая же, как у собственных полупроводников.

Рассмотренная выше электропроводность является объемной. Однако благодаря неизбежному увлажнению, окислению и загрязнению поверхностных слоев твердых диэлектриков создается заметная поверхностная электропроводность.

В диэлектриках наблюдаются потери энергии приложенного электрического поля. Эти потери называются **диэлектрическими**. Они возникают как на постоянном, так и на переменном токе. Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства изоляционного материала, если напряженность поля превышает некоторое критическое значение. Это явление называется **пробоем**. В диэлектриках возможны следующие виды пробоя: тепловой, электрический, электрохимический, ионизационный.

5.2. Параметры диэлектриков

Для полной характеристики свойств диэлектриков используются электрические, механические, тепловые, физические параметры [3].

5.2.1. Электрические параметры

1. **Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r** . Значение ϵ_r вакуума равно единице, а всякого диэлектрического материала – больше единицы. Если C_0 – емкость вакуумного конденсатора произвольной формы и размеров, то емкость того же конденсатора с диэлектриком $C = \epsilon_r C_0$.

Значения емкости C конденсаторов наиболее важных конфигураций приведены ниже. Для плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S / h,$$

где S – площадь обкладок; h – толщина диэлектрика.

Для цилиндрического конденсатора

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} = 2,42 \cdot 10^{-11} \frac{\epsilon_r L}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (5.6)$$

где L – длина цилиндра; r_1 – радиус внутреннего цилиндра; r_2 – радиус внешнего цилиндра. При $r_2 - r_1 \gg r_1$

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \pi L \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}. \quad (5.7)$$

Для систем параллельных проводов вводят понятие **удельной (погонной) емкости**, т.е. емкости, отнесенной к единице длины $C_n = C/L$,

где C - емкость изоляции участка кабеля длиной L . Для одножильного кабеля удельная емкость (нФ/м) между жилой радиусом r_1 и металлическим экраном с внутренним радиусом r_2

$$C_n = 0,02416 \varepsilon_r / \lg(r_2 / r_1). \quad (5.8)$$

При $r_2 - r_1 \ll r_1$

$$C_n = 0,0278 \varepsilon_r (r_2 + r_1) / (r_2 - r_1).$$

Для двух параллельных круглых проводов радиусом r при расстоянии h между осями проводов при условии $2r \ll h$ [11]

$$C_n \approx 0,01208 \varepsilon_r / \lg(h / r_n). \quad (5.9)$$

Для двух параллельных проводников прямоугольного сечения, расположенных на коммутационной плате (рис. 5.2), взаимная емкость (Ф/м) на единицу длины составляет:

$$\text{при } b/d \gg 1 \quad C_n = 5,65 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{эф}} \cdot \ln(4 + 8b / d);$$

$$\text{при } b/d \ll 1 \quad C_n = 27,8 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{эф}} / \ln(4 + 4d / b),$$

где $\varepsilon_{\text{эф}} = (\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}) / 2$; ε_{r1} и ε_{r2} - диэлектрические проницаемости окружающей среды и платы соответственно. Внутри указанной области отношения b/d обе эти формулы обеспечивают точность, достаточную только для оценочных расчетов.

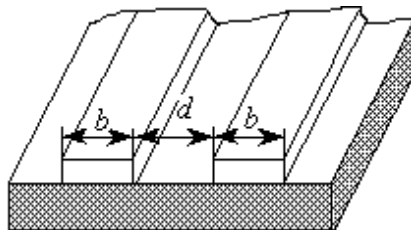


Рис. 5.2. Схема коммуникационной платы с параллельными проводниками

2. Удельное объемное сопротивление ρ_v , измеряемое в омметрах (Ом·м). Сопротивление участка изоляции с поперечным сечением S и толщиной h

$$R = \rho_v \frac{h}{S}. \quad (5.10)$$

Сопротивление участка изоляции коаксиального кабеля длиной L

$$R_k = \frac{\rho_v}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (5.11)$$

При $r_2 - r_1 \ll r_1$

$$R \approx \frac{\rho_v}{\pi L} \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2}.$$

3. **Удельное поверхностное сопротивление** ρ_s . Характеризует свойство электроизоляционного материала создавать в изготовленной из него изоляции поверхностное сопротивление. Поверхностное сопротивление между двумя электродами с параллельными обращенными друг к другу прямыми кромками (рис.5.3) [11] равно

$$R_s = \rho_s \frac{a}{b}. \quad (5.12)$$

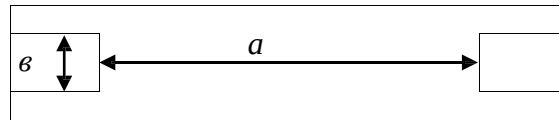


Рис. 5.3. Схема с параллельно расположенными электродами, обращенными друг к другу

Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата (любого размера) на поверхности данного материала, если ток подводится к электродам, образующим две противоположные стороны этого квадрата. Единицей измерения ρ_s является ом на квадрат (Ом/□).

4. **Тангенс угла диэлектрических потерь** $\operatorname{tg} \delta$ - количественная мера потерь в диэлектрике. Определение $\operatorname{tg} \delta$ следует из векторной диаграммы, показанной на рис. 5.4, где φ - угол сдвига фаз между током и напряжением в реальном конденсаторе, $\varphi + \delta = \pi/2$. Тангенс угла диэлектрических потерь определяется как отношение активной составляющей тока к реактивной составляющей: $\operatorname{tg} \delta = I_a / I_R$.

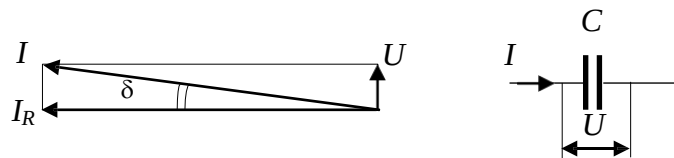


Рис. 5.4. Векторная диаграмма

Добротность изоляционного материала есть величина, обратная тангенсу угла потерь

$$\Theta = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta} = \operatorname{ctg} \delta = \frac{I_p}{I_a}. \quad (5.13)$$

Значение $\text{tg}\delta$ для лучших диэлектриков, используемых в технике высоких частот и высоких напряжений, составляет тысячные и даже десяти-тысячные доли единиц; для материалов более низкого качества, применяемых в менее ответственных случаях, $\text{tg}\delta$ может быть много больше [11].

Практическое значение $\text{tg}\delta$ как одного из важнейших диэлектрических параметров материала состоит в том, что он определяет потери мощности на переменном токе частотой f :

$$P = \frac{U^2}{R_{\text{из}}} = UI = I^2 R_{\text{из}}, \quad (5.14)$$

где U – постоянное напряжение на участке изоляции; I – сквозной ток утечки через изоляцию.

5. **Электрическая прочность** (В/м, или кВ/м, или МВ/м) – способность диэлектрика сохранять высокое удельное сопротивление в полях большой напряженности:

$$E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} / d, \quad (5.15)$$

где $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя; d – толщина диэлектрика.

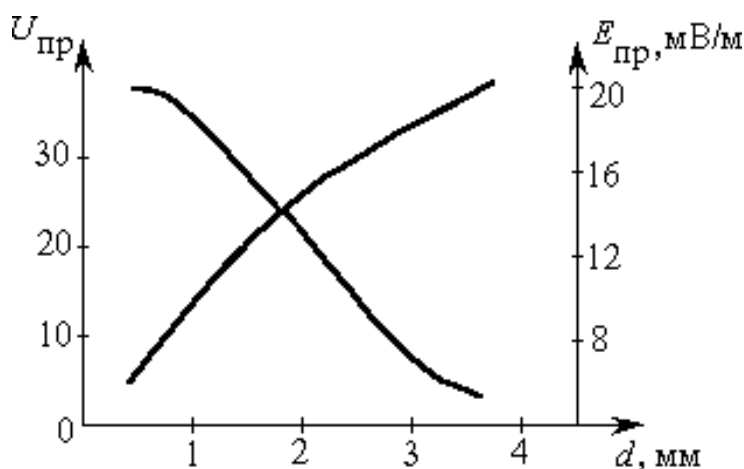


Рис. 5.5. График изменения напряжения пробоя от расстояния между электродами

В большинстве случаев при возрастании d электрическая прочность уменьшается (рис. 5.5), так как $U_{\text{пр}}$ возрастает с увеличением толщины не линейно, а медленнее. Однако при переходе к особо тонким слоям (лаковые пленки, напыленные пленки диэлектрика) начинают сказываться неизбежные неоднородности материала и $E_{\text{пр}}$ снижается [11]. У неоднородных тонких материалов (бумага, лакоткань и т.д.) $E_{\text{пр}}$ уменьшается с уве-

личением площади электродов, что объясняется ростом вероятности паданий под электроды слабых мест диэлектрика.

Для надежной работы любого электротехнического устройства рабочее напряжение изоляции $U_{\text{раб}}$ должно быть существенно меньше пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$. Отношение $U_{\text{пр}}/U_{\text{раб}}$ называют коэффициентом запаса электрической прочности изоляции

$$k_{\text{зап}} = U_{\text{пр}} / U_{\text{раб}} . \quad (5.16)$$

5.2.2. Тепловые параметры

1. **Нагревостойкость** – это способность диэлектрических материалов без повреждения и существенного ухудшения практически важных свойств выдерживать воздействия повышенной температуры как временно, так и длительно.

2. **Холодостойкость** – способность диэлектрических материалов работать при низких температурах, без недопустимого ухудшения эксплуатационных характеристик [7].

3. **Теплопроводность** – это способность отводить тепло, выделяющееся при работе радиокомпонента.

Уравнение установившегося процесса передачи теплоты через тело с полным термическим сопротивлением R_T при разности температур на горячих и холодных поверхностях тела ΔT :

$$P = \Delta T / R_T , \quad (5.17)$$

где P - мощность теплового потока, т.е. количество теплоты, проходящей через тело за единицу времени. Для плоского слоя материала значение теплового сопротивления определяется по формуле

$$R_T = \rho_T (h/S), \quad (5.18)$$

где ρ_T - удельное тепловое сопротивление; h - толщина слоя материала; S - площадь материала.

Величина $\lambda_T = 1/\rho_T$ обратная ρ_T , называется коэффициентом теплопроводности материала (Вт/(м·К)).

Расчет термического сопротивления производится по формулам, аналогичным формулам для расчета электрического сопротивления.

Величина $y = \lambda_T / cd$, где c - удельная теплоемкость, d - плотность материала, называется коэффициентом температуропроводности.

4. **Температурный коэффициент линейного расширения** ТКЛР α_i :

$$\alpha_i = \Delta l / l \Delta T . \quad (5.19)$$

Единицей измерения α_i является кельвин в минус первой степени.

5.2.3. Физические параметры

1. **Гигроскопичность** – это способность материала впитывать в себя влагу из окружающей среды. Оценивается относительным изменением массы материала [7]

$$\omega_1 = \frac{M_b - M_c}{M_c} 100\%, \quad (5.20)$$

где M_b - масса образца после увлажнения; M_c - масса сухого образца.

2. **Коэффициент влагопроницаемости Π** , измеряется с помощью основного уравнения влагопроницаемости

$$M = \Pi \frac{(p_1 - p_2)S}{h} t, \quad (5.21)$$

где M - количество паров воды, проходящее при стационарном режиме за время t сквозь участок площадью S и толщиной h ; p_1 и p_2 - парциальные давления водяного пара с двух сторон.

3. **Коэффициент влагорастворимости a** - это коэффициент пропорциональности закона Генри

$$C_b = ap, \quad (5.22)$$

где C_b - равновесная влажность, отнесенная к единице объема материала; p - упругость водяного пара в воздухе, с которым соприкасается материал. Единицей измерения a является сантиметр в квадрате на метр в квадрате ($\text{см}^2/\text{м}^2$).

5.3. Вопросы и задачи

1. Цилиндрический стержень из фенолформальдегидной пластмассы диаметром 5 мм, длиной 15 мм, удельным объемным сопротивлением 10^{12} Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением 10^{12} Ом покрыт с торцов слоем металла. Эти слои металла служат электродами, через которые стержень включен под постоянное напряжение 1 кВ. Определите сквозной ток утечки через стержень и потери мощности в нем.

Решение

$$I_{yt} = I + I_S. \quad I = UG. \quad I_S = UG_S.$$
$$G = \frac{1}{R} = \frac{S}{\rho_v l}. \quad G_S = \frac{1}{R_S} = \frac{\pi d}{\rho_s l} = \frac{\pi d^2}{4\rho_v l}.$$

$$I_S = U \left(\frac{\pi d^2}{4\rho_v l} + \frac{\pi d}{\rho_s l} \right) = U \frac{\pi d}{l} \left(\frac{d}{4\rho_v} + \frac{1}{\rho_s} \right) = 10^{-3} \frac{3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{12}} + \frac{1}{10^{12}} \right) = 0,42 \cdot 10^{-9} \text{ А.}$$

$$P = I_S U = 0,42 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3 = 0,42 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} = 0,42 \text{ мкВт.}$$

2. Стержень с параметрами, указанными в задаче 3.4.1, был подвергнут кратковременному увлажнению, в результате чего удельное поверхностное сопротивление снизилось до 10^{10} Ом, но удельное объемное сопротивление не успело измениться. Каковы будут значения сквозного тока и потерь мощности в стержне?

3. Определите емкость пересечения проводников шириной 100 мкм, разделенных пленкой SiO_2 толщиной 0,7 мкм ($\epsilon_r = 4$).

4. Определите рабочее напряжение двухслойного диэлектрика SiO_2 (толщиной 0,3 мкм) и Si_3N_4 (0,1 мкм), если электрическая прочность SiO_2 $7 \cdot 10^6$ В/см, а Si_3N_4 $3 \cdot 10^6$ В/см. Коэффициент запаса принять равным 3.

5. Любые диэлектрические пленки, кроме термической, имеют высокую пористость, в лучшем случае на уровне 25 см^{-2} . Объясните, почему они не могут использоваться в качестве межуровневой изоляции полупроводниковых интегральных схем?

6. Вследствие каких причин в пленках SiO_2 могут образовываться трещины? Учтите, что ТКЛР аморфного SiO_2 – $5 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$, а кристаллического – $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

7. Чем объясняются высокие маскирующие свойства пленки SiO_2 при диффузии доноров и акцепторов в Si?

8. Почему стеклотекстолит нельзя использовать для изготовления пленочных резисторов? Какие диэлектрические материалы пригодны для этой цели?

9. Как определить чистоту отмывки печатной платы после травления с помощью электрических измерений? Почему при соблюдении отмывки $\rho_s \gg \rho_v$?

10. В каком состоянии эксплуатируется полимер, если температура его стеклования ниже комнатной?

11. В чем состоят преимущества стеклотекстолита перед гетинаксом?

12. Оксид алюминия, полученный методом анодного окисления, имеет $\epsilon_r = 7$, тогда как согласно справочным данным его значение для монокристаллического оксида алюминия $\epsilon_r = 9,5$. О чем говорит это расхождение?

13. Лучшее пятикомпонентное стекло С-41-1 для тонкопленочных конденсаторов имеет плотность пор (каналов высокой проводимости) на

уровне 1 мм^{-2} . Определите площадь конденсатора, при которой выход годных изделий превышает 80%. Какова будет его емкость, если $c_{\text{уд}} = 10 \text{ нФ/см}^2$?

Решение

Плотность дефектов $d = 1/\text{мм}^2$.

Коэффициент поражаемости $B = 1$.

Вероятность выхода годных изделий $P = \exp(-BdS)$.

$$S = -\frac{\ln P}{Bd} = -\frac{\ln 0,8}{1} = 0,223 \text{ мм}^2 = 0,223 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2.$$

$$C = c_{\text{уд}} \cdot S = 1 \cdot 10^8 \cdot 0,223 \cdot 10^{-2} = 223 \text{ мкФ}.$$

14. Определите мощность теплового потока, а также количество теплоты, переносимой за 1 ч через пластину гетинакса размером $10 \times 10 \text{ см}$ и толщиной 5 мм , если температура нагретой поверхности 300 К , а холодной 250 К , коэффициент теплопроводности гетинакса равен $0,35 \text{ Вт/(м·К)}$.

Решение

$$P = \Delta T / R_T,$$

где

$$R_T = \frac{h}{\lambda_T S}.$$

$$P = \frac{\Delta T \lambda_T S}{h} = \frac{(300 - 250) \cdot 0,35 \cdot 100 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 35 \text{ Вт}.$$

$$\Theta = Pt = 35 \cdot 3600 = 12,6 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

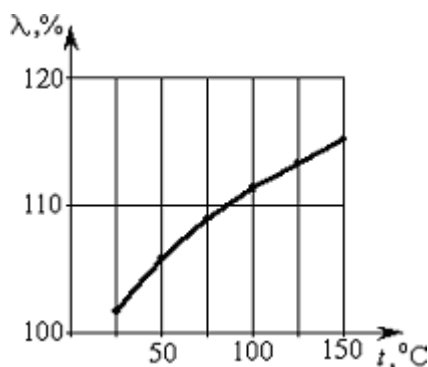


Рис. 5.6. Изменение теплопроводности в зависимости от температуры

15. Определите температурный коэффициент теплопроводности при температуре $100 ^\circ\text{C}$, а также средний температурный коэффициент в диапазоне от 50 до $150 ^\circ\text{C}$ для фторопласта-4. График изменения теплопроводности от температуры приведен на рис. 5.6.

16. Определите теплопроводность глиноземистой керамики при пористости 12, 30 и 49%, используя формулы Лихтенекера. Теплопроводность глиноземистой керамики 30 Вт/(м·К) .

17. Определите тепловое сопротивление пленки Al_2O_3 толщиной 1 мкм и площадью 50 см^2 . Теплопроводность Al_2O_3 30 Вт/(м·К) .

18. Определите перепад температуры по толщине, считая, что вся мощность отводится теплопроводностью, при удельной мощности 5 Вт/см^2 для пленки ситалла толщиной $0,5 \text{ мм}$ при теплопроводности ситалла $1,5 \text{ Вт/(м·К)}$.

19. Структуры КНС (кремний на сапфире) имеют обычно прогиб из-за разности ТКЛР. Нарисуйте прогнутую структуру, учитывая, что средний ТКЛР в диапазоне температур $0 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$ для Si равен $3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$, а для сапфира (монокристаллический Al_2O_3) – $9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$.

20. Какое количество влаги пройдет за 10000 часов сквозь полистирольную мембрану площадью 100 см^2 и толщиной $0,1 \text{ мм}$, если относительная влажность воздуха с одной стороны мембраны составляет 80% , а с другой 20% (температура воздуха с обеих сторон $+60 \text{ }^\circ\text{C}$, давление нормальное), коэффициент удельной влагопроницаемости полистирола $P=4,2 \cdot 10^{-15} \text{ }^\circ\text{C}$, давление насыщенных водяных паров при температуре $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет 20 кПа ?

21. Диэлектриком плоского конденсатора является гетинакс. Параметры этого материала: удельное объемное сопротивление поперек слоев 10^{11} Ом·м , диэлектрическая проницаемость 8 , тангенс угла диэлектрических потерь $0,1$. Толщина диэлектрика 1 мм , площадь обкладок $25 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$. Определите полные и удельные потери мощности для случая, когда к конденсатору приложено постоянное напряжение 1 кВ .

22. К конденсатору с гетинаксом в качестве диэлектрика приложено напряжение амплитудой 1 кВ , частотой 1 кГц . Определите полные и удельные потери. Параметры гетинакса и конденсатора такие же, как в задаче 21.

23. Определите полные диэлектрические потери на длине 100 м коаксиального кабеля 1 кВ , частота 1 МГц . Диаметр токопроводящей жилы 2 мм . Диэлектриком служит полиэтилен с $\epsilon_r = 2,3$, $\text{tg}\delta = 0,0005$.

24. Определите взаимные погонные емкости двух параллельных печатных проводников шириной по 5 мм каждый, расположенных на плате с зазором $0,5 \text{ мм}$, если материалом платы является стеклотекстолит ($\epsilon_r = 8$), а в качестве покрытия используются: а) полиуретановый лак УР-231 ($\epsilon_r = 2,2$); б) кремнийорганический лак КО-921 ($\epsilon_r = 3,5$).

25. Оцените взаимную емкость двух параллельных пленочных проводников шириной $0,1 \text{ мм}$, длиной 100 мм каждый, расположенных на подложке из поликора ($\epsilon_r = 10,5$). Защитным покрытием платы является полиамидный лак ($\epsilon_r = 3,5$).

26. Композиционный керамический материал на основе двух диэлектриков с $\epsilon_{r1}=40$ и $\epsilon_{r2}=80$ имеет $\text{TKE}_1 = \alpha_{\epsilon_{r1}} = 2 \cdot 10^{-40} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,
 $\text{TKE}_2 = \alpha_{\epsilon_{r2}} = 2 \cdot 10^{-30} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Чему равна диэлектрическая проницаемость материала; если $\alpha_{\epsilon_r}=0$.

Решение

Используем формулу Лихтенеккера

$$\ln \varepsilon_r = y_1 \ln \varepsilon_{r1} + y_2 \ln \varepsilon_{r2},$$

где объемные доли компонентов $y_1 + y_2 = 1$

$$\alpha_{\varepsilon_r} = y_1 \alpha_{\varepsilon_{r1}} + y_2 \alpha_{\varepsilon_{r2}}$$

Решаем систему уравнений.

$$\begin{cases} y_1 \alpha_{\varepsilon_{r1}} + y_2 \alpha_{\varepsilon_{r2}} = 0; \\ y_1 + y_2 = 1. \end{cases}$$

$$y_1 = 0,882; y_2 = 0,188; \varepsilon_r = 43,4.$$

27. Определить плотность пенополистирола с $\varepsilon_r = 1,5$ и объемную долю воздуха в нем, если диэлектрическая проницаемость полистирола равна 2,6, а плотность 1050 кг/м^3 .

28. Две противоположные грани куба с ребром $a = 10 \text{ мм}$ из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением $\rho_v = 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s = 10^{11} \text{ Ом}$ покрыты металлическими электродами (рис. 5.7). Определить ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении $U_0 = 2 \text{ кВ}$.

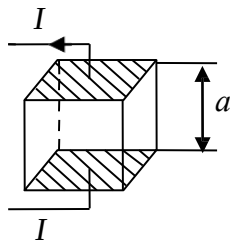


Рис. 5.7. Кубический диэлектрик

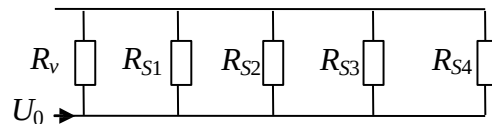


Рис. 5.8. Эквивалентная схема подключения

Решение

Электрический ток протекает как через объем куба, так и по поверхности четырех боковых граней (рис. 5.7). Поэтому сопротивление между электродами определяется параллельным соединением объемного сопротивления и поверхностных сопротивлений четырех граней, как показано на эквивалентной схеме куба с электродами (рис. 5.8). Тогда

$$R_v = \frac{\rho_v a}{a^2} = \frac{\rho_v}{a} = \frac{10^{10}}{10 \cdot 10^{-3}} = 10^{12} \text{ Ом};$$

$$R_{S1} = R_{S2} = R_{S3} = R_{S4} = \frac{\rho_s a}{a} = \rho_s = 10^{11} \text{ Ом};$$

$$R_{u3} = R_v / (R_{S1} + 4R_v) = 10^{12} \cdot 10^{11} / (10^{11} + 4 \cdot 10^{12}) = 2,44 \cdot 10^{10} \text{ Ом};$$

$$I = U_0 / R_{u3} = 2 \cdot 10^3 / 2,44 \cdot 10^{10} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ А}.$$

29. Сопротивление изоляции двухжильного кабеля длиной 2 м равно 300 МОм. Чему равно сопротивление изоляции такого же кабеля длиной 6 м?

30. Цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением $10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и удельным поверхностным сопротивлением 10^{14} Ом покрыт с торцов металлическими электродами. Чему равно сопротивление между электродами?

31. На поверхности диэлектрика имеются два параллельных проводника с расстоянием между ними 5 мм и длиной 15 мм. Найти ρ_s диэлектрика, если сопротивление между электродами 15 МОм.

32. При температуре 20°C радиофарфор имеет $\text{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$, при повышении температуры до 100°C $\text{tg} \delta$ возрастает до $8,5 \cdot 10^{-4}$. Определить $\text{tg} \delta$ при 200°C .

33. Записать комплексную диэлектрическую проницаемость полистирола, имеющего $\epsilon_r = 2,6$ и $\text{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-4}$.

34. Определить активную и реактивную мощность полиэтилена с $\epsilon_r = 2,3$ $\rho = 7 \cdot 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\text{tg} \delta = 25 \cdot 10^{-4}$. На частоте 1 МГц, если приложено напряжение 10 В и $h = 2 \text{ мм}$, $B = 10 \text{ мм}$, $l = 20 \text{ мм}$.

35. Определить параметры эквивалентной последовательной схемы конденсатора с емкостью 1200 пФ на частоте $f = 1 \text{ МГц}$ и $\text{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$.

5.4. Диэлектрические компоненты

Краткие теоретические сведения

Конденсатор – это элемент электрической цепи, состоящий из проводящих электродов (обкладок), разделенных диэлектриком и предназначенный для использования его емкости [8].

Система условных обозначений и маркировка конденсаторов

Условное обозначение конденсаторов может быть сокращенным и полным.

В соответствии с действующей системой сокращенное условное обозначение состоит из букв и цифр.

Первый элемент – буква или сочетание букв, обозначающие подкласс конденсатора:

К – постоянной емкости,
КТ – подстроечные,
КП – переменной емкости.

Второй элемент – обозначение группы конденсатора в зависимости от материала диэлектрика в соответствии с табл. 5.1.

Третий элемент – пишется через дефис и обозначает регистрационный номер конкретного типа конденсатора. В состав третьего элемента может входить также буквенное обозначение.

Пример: К10-17, КТ-25.

Приведенная система не распространяется на условные обозначения старых типов конденсаторов, в основу которых брались различные признаки: конструктивные разновидности, технологические особенности, эксплуатационные характеристики, области применения и т.п. Например:

КД – конденсаторы дисковые;
КТ – трубчатые;
КМ – керамические монолитные;
КЛС – керамические литые секционные;
КСО – конденсаторы слюдяные опрессованные;
СГМ – слюдяные герметизированные малогабаритные;
КБГИ – конденсаторы бумажные герметизированные изолированные;
МБГЧ – металлобумажные герметизированные частотные;
КЭГ – конденсаторы электролитические герметизированные;
ЭТО – электролитические танталовые объемно-пористые;
КПК – конденсаторы подстроечные керамические.

Таблица 5.1. Условное обозначение конденсаторов в зависимости от материала диэлектрика

Подкласс конденсатора	Группа конденсаторов	Обозначение группы
1	2	3
Конденсаторы постоянной емкости	Керамические на номинальное напряжение ниже 1600 В	10
	Керамические на номинальное напряжение 100 В и выше	15
	Стеклянные	21
	Стеклокерамические	22
	Тонкопленочные с неорганическим диэлектриком	26
	Слюдяные малой мощности	31
	Слюдяные большой мощности	32
	Бумажные на номинальное напряжение ниже 2 кВ, фольговые	40
	Бумажные на номинальное напряжение 2 кВ и выше, фольговые	41
	Бумажные металлизированные	42
	Оксидно-электролитические алюминиевые	50
	Оксидно-электролитические танталовые, ниобиевые и др.	51
	Объемно пористые	52

Окончание табл. 5.1

1	2	3
	Оксидно-полупроводниковые	53
	С воздушным диэлектриком	60
	Вакуумные	61
	Полистирольные	71(70)
	Фторопластовые	72
	Полиэтилентерефталатные	73(74)
	Комбинированные	75
	Лакопленочные	76
	Поликарбонатные	77
	Полипропиленовые	78
Подстроечные конденсаторы и переменные емкости	Вакуумные	1
	С воздушным диэлектриком	2
	С газообразным диэлектриком	3
	С твердым диэлектриком	4

Полное условное обозначение конденсатора состоит из сокращенного обозначения и величины основных параметров и характеристик, необходимых для заказа и записи в конструкторской документации, обозначения климатического исполнения и документа на поставку.

Параметры и характеристики, входящие в полное условное обозначение, указываются в следующей последовательности: обозначение конструктивного исполнения, номинальное напряжение, номинальная емкость, допускаемое отклонение емкости (допуск), группа и класс по температурной стабильности емкости, номинальная реактивная мощность, другие, необходимые дополнительные характеристики [4].

Пример.

1. Конденсатор керамический К10-7В, всеклиматического исполнения «В», группы ТКЕ М47, номинальной емкостью 27 пФ, с допуском $\pm 10\%$, поставляемый по ГОСТ 5.621-70, имеет полное условное обозначение

К10-7В-М47-27пФ $\pm 10\%$ ГОСТ 5.621-70.

2. Конденсатор полиэтилентерефталатный К74-5 номинальной мощностью 0,22 мкФ, с допуском $\pm 20\%$, поставляемый по ГОСТ 5.623-70, имеет полное условное обозначение

К74-5-0,22 мкФ $\pm 20\%$ ГОСТ 5.623-70.

3. Конденсатор оксидно-электролитический алюминиевый К50-7, конструктивного варианта «а», на номинальное напряжение 250 В, номинальной емкостью 100 мкФ, всеклиматического исполнения «В», поставляемый по ГОСТ 5.635-70, имеет полное условное обозначение

К50-7а-250 В-100 мкФ-В ГОСТ 5.635-70.

4. Конденсатор подстроечный с твердым керамическим диэлектриком, малогабаритный КПК-М, с пределами номинальной емкости от 2 до 7 пФ, поставляемый по ГОСТ 5.500-76, имеет полное условное обозначение КПК-М-2/7 ГОСТ 5.500-76.

Маркировка на конденсаторах (так же как и условное обозначение) буквенно-цифровая. Она содержит: сокращенное обозначение конденсатора, номинальное напряжение, номинальное значение емкости, допуск, обозначение климатического исполнения (буква «В» для конденсаторов все климатического исполнения) и дату изготовления.

В зависимости от размеров маркируемых конденсаторов и вида технической документации могут применяться полные или сокращенные (кодированные) обозначения номинальных емкостей и их допускаемых отклонений. Кодированные обозначения предназначены для маркировки малогабаритных конденсаторов и для записи на малоформатных многоэлементных принципиальных электрических схемах.

Полное обозначение номинальных емкостей состоит из трех или четырех знаков, включая две или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского алфавита (в скобках) обозначает множитель, составляющий значение емкости, и определяет положение запятой десятичного знака. Буквы П (*p*), Н (*n*), М (*μ*), И (*m*), Ф (*F*) обозначает множители 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-6} , 10^{-3} и 1 соответственно для значений емкости, выраженных в фарадах. Для приведенного примера следует писать: 1П5 (1*p*5), 10Н (10*n*), 10М (10*μ*), 1Ф0 (1*F*0).

Полное обозначение допускаемого отклонения состоит из цифр, а кодирование из буквы. В связи с тем, что буквенное обозначение допусков изменялось и на практике могут встречаться различные варианты, в табл. 5.2 приведены кодированные обозначения допусков по стандартам СССР, публикацией Международной электротехнической комиссии (МЭК) и стандарта СЭВ.

Таблица 5.2. Сравнительные данные по составу и обозначению допускаемых отклонений емкостей

ГОСТ 9661-73	ГОСТ 11076-69	Публикация 62 МЭК	Стандарт СЭВ
1	2	3	4
± 0,1	± 0,1 Ж	± 0,1 (В)	± 0,1 В (В)
± 0,25	± 0,2 У	± 0,25 (С)	± 0,25 (0,2) С (С)
± 0,5	± 0,5 Д	± 0,5 (D)	± 0,5 Д (D)
± 1	± 1 Р	± 1 (F)	± 1 Ф (F)
± 2	± 2 Л	± 2 (G)	± 2 Ж (G)
± 5	± 5 И	± 5 (I)	± 5 И (I)
± 10	± 10 С	± 10 (K)	± 10 К (K)
± 20	± 20 В	± 20 (M)	± 20 М (M)

Окончание табл. 5.2

1	2	3	4
± 30	$\pm 30 \Phi$	$\pm 30 (N)$	$\pm 30 H (N)$
0+50	-	-	0+50(0+80) A (A)
-	0+100 Я	-	-
-10+30	-	-10+30 (Q)	-10+30 Г (Q)
-10+50	-10+50 Э	-10+50 (T)	-10+50 Т (T)
-10+100	-10+100 Ю	-	-10+100 Ю (Y)
-20+50	-20+50 Б	-20+50 (S)	-20+50 Б (S)
-20+80	-20+80 А	-20+80 (Z)	-20+80(-20+100) Э (Z)
$\pm 0,1 \text{ пФ}$	-	$\pm 0,1 \text{ пФ (B)}$	$\pm 0,1 \text{ пФ В (B)}$
$\pm 0,25 \text{ пФ}$	-	$\pm 0,25 \text{ пФ (C)}$	$\pm 0,25 \text{ пФ С (C)}$
$\pm 0,5 \text{ пФ}$	$\pm 0,4 \text{ пФ X}$	$\pm 0,5 \text{ пФ (D)}$	$\pm 0,5 \text{ пФ Д (D)}$
$\pm 1 \text{ пФ}$	-	$\pm 1 \text{ пФ (F)}$	$\pm 1 \text{ пФ Ф (F)}$

Примечание. В скобках латинскими буквами приведено обозначение допусков, используемое в иностранных стандартах.

Цветовая маркировка конденсаторов приведена в [4].

Порядок выполнения

1. Получить от преподавателя или лаборанта набор конденсаторов.
2. Определить номинальные значения сопротивления, допуск по маркировке.
3. Описать конструкцию всех конденсаторов, указать их особенности.
4. Записать все конденсаторы согласно их записи в перечне элементов.
5. Оформить работу.

Контрольные вопросы

1. Какие радиоэлементы называются конденсаторами?
2. Дать классификацию конденсаторов.
3. Указать способы сокращенного и полного обозначения конденсаторов.
4. Указать основные параметры конденсаторов.
5. Какие существуют конструкции постоянных конденсаторов?
6. Какие существуют конструкции переменных конденсаторов?

ГЛАВА 6. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

6.1. Классификация веществ по магнитным свойствам

Магнитными называются материалы, которые применяются в технике с учетом их магнитных свойств и характеризуются способностью накапливать, хранить и трансформировать магнитную энергию [7].

Магнитные свойства веществ определяются их атомной структурой. Магнетизм атомов порождается следующими причинами:

- 1) наличием у электрона спинового магнитного момента, который связан с соответствующим механическим моментом электрона;
- 2) орбитальным движением электронов в атоме, создающим орбитальные магнитные моменты;
- 3) магнитным моментом атомного ядра. Он составляет $\leq 10^3$ спинового магнитного момента электрона, поэтому не является определяющим.

Орбитальные и спиновые магнитные моменты отдельных электронов складываются в результирующие магнитные моменты атомов. Единицей измерения магнитного момента атомов является магнетон Бора μ_B :

$$\mu_B = e\hbar/2m = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}, \quad (6.1)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\hbar = h/2\pi$; $h = 6,62 \cdot 10^{-24}$ Дж·с; $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Основные величины, характеризующие магнитные свойства материалов:

- **намагниченность** M , А/м

$$M = \chi \overline{H},$$

где χ – магнитная восприимчивость; $\overline{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м;

- **магнитная индукция** B , Тл:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi)H = \mu_0 \mu H = \mu_a H,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума.

Все вещества по магнитным свойствам делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики (рис. 6.1).

Диамагнетики состоят из атомов, в которых имеется полная взаимная компенсация орбитальных и спиновых магнитных моментов. Основные параметры диамагнетиков имеют следующие значения: $\chi < 0$,

$|\chi| \approx 10^{-5}$, $\mu = 0,9999$ и не зависит от $\overline{H}$. Физическая природа диамагнетизма связана с явлением прецессии. Если на электрон, вращающийся по своей орбите, действует внешнее магнитное поле H , то оно стремится развернуть орбиту электрона перпендикулярно H . Это создает дополнительный индуцированный магнитный момент, направленный противоположно полю. Диамагнетизм наблюдается в природе у всех веществ.



Рис. 6.1. Схематическое изображение расположения спинов в парамагнитных (а), ферромагнитных (б), антиферромагнитных (в) и ферримагнитных (г) веществах

Диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля. К диамагнетикам относятся: водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Hg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Парамагнетики имеют постоянные магнитные моменты, но взаимодействие между элементарными магнитными диполями мало, в результате чего при обычных температурах под действием теплового движения молекул они располагаются так, что результирующий магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля создается преимущественное направление расположения магнитных моментов атомов и тело оказывается намагниченным (рис. 6.2, а). Основные параметры парамагнетиков имеют следующие значения: $\chi > 0$; $\chi \approx 10^{-5} \dots 10^{-2}$; $\mu \approx 1,001$ и практически не зависит от $\overline{H}$. С повышением температуры возрастает разориентирующее действие теплового движения и намагниченность убывает.

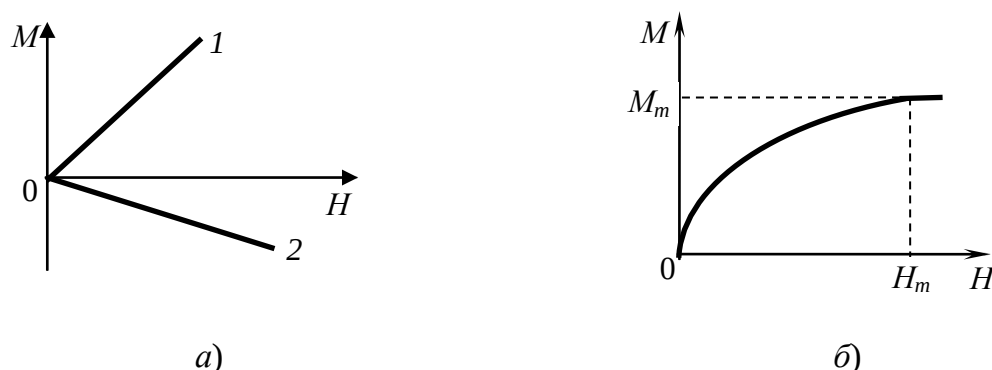


Рис.6.2. Зависимость намагниченности M от напряженности поля H : а — для диамагнетиков (1) и парамагнетиков (2); б — для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

Для парамагнитных газов и редкоземельных элементов выполняется закон Кюри $\chi = C/T$, где C – постоянная Кюри; T – температура, К; для переходных парамагнитных металлов – закон Кюри-Вейсса $\chi = C/(T - \Delta)$, где Δ – постоянная Вейсса (см. рис. 6.2).

Парамагнетики втягиваются в неоднородное магнитное поле. К ним относятся: кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pd и др.

Ферромагнетики – вещества, атомы которых имеют конечный магнитный момент. Магнитные моменты атомов взаимодействуют таким образом, что они выстраиваются параллельно друг другу в пределах определенных областей, называемых доменами. Ферромагнетики в большинстве случаев имеют кристаллическую структуру.

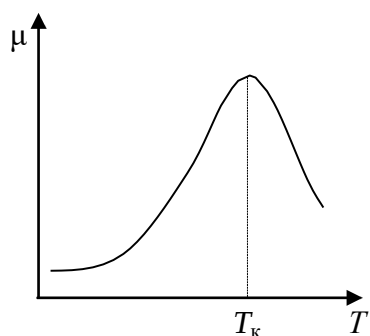


Рис. 6.3. Зависимость магнитной восприимчивости от температуры вещества

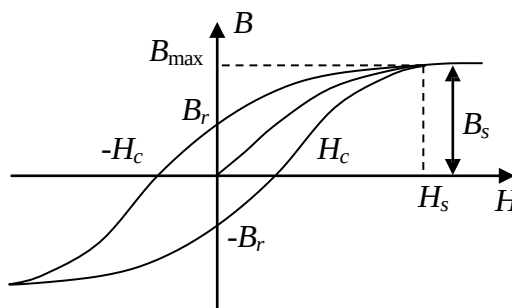


Рис. 6.4. Зависимость B от H для ферромагнетиков (гистерезис)

Магнитная восприимчивость ферромагнетиков $\chi > 0$, имеет значения до сотен тысяч и миллионов. Величина χ имеет сложную зависимость от T и H (см. рис. 6.3). При $T > T_K$ вещество становится парамагнитным (T_K – температура Кюри, равная 1043 К для чистого Fe, 631 К – для Ni, 1404 К – для Co).

Для ферромагнетиков характерно наличие гистерезиса, т.е. B зависит не только от H , но и от предшествующей истории образца (т.е. от величины и направления магнитного поля, действовавшего ранее) (рис. 6.4). Гистерезис обусловлен необратимостью процессов намагничивания. Параллельное расположение спинов соседних атомов называется атомным ферромагнитным порядком, который характеризуется спонтанным (самопроизвольным) намагничиванием до состояния технического насыщения, в пределах доменов. Направления магнитных моментов всех доменов равновероятны, и результирующий магнитный момент равен нулю. Линейные размеры доменов составляют от единиц до десятков микрометров. Атомный ферромагнитный порядок возникает благодаря электроста-

тической энергии взаимодействия между микрочастицами. Эта энергия зависит от взаимной ориентации спинов и называется **обменной энергией**. Обменная энергия в ферромагнетиках может быть определена из равенства

$$W_{\text{обм}} = -A(S_i S_j), \quad (6.2)$$

где A – обменный интеграл; $(S_i S_j)$ – скалярное произведение спинов соседних электронов.

Зависимость A как функция a от d представлена на рис. 6.5, где a – параметр решетки; d – диаметр незаполненных электронных оболочек, участвующих в образовании обменной связи. При $a/d > 1,5$, $A > 0$ возникает самопроизвольное намагничивание. При $A < 0$ выгодным становится антипараллельное расположение спинов у соседних атомов. Зависимость $A(a/d)$ позволяет объяснить возникновение ферромагнитных свойств сплавов из неферромагнитных компонентов, например марганца с висмутом, сурьмой и др.

Критерием ферромагнетизма являются: 1) наличие внутренних незаполненных оболочек в атомах; 2) $A > 0$.

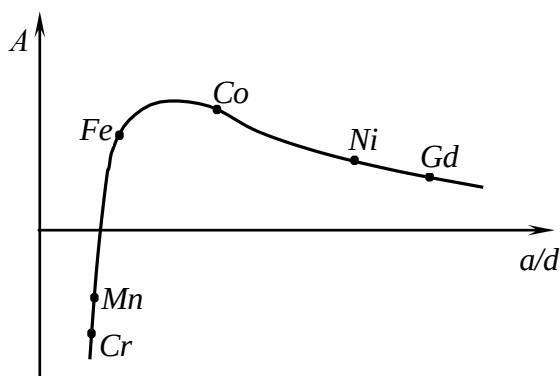


Рис. 6.5. Зависимость $A(a/d)$, объясняющая возникновение ферромагнитных свойств антиферромагнетиков из неферромагнитных компонентов

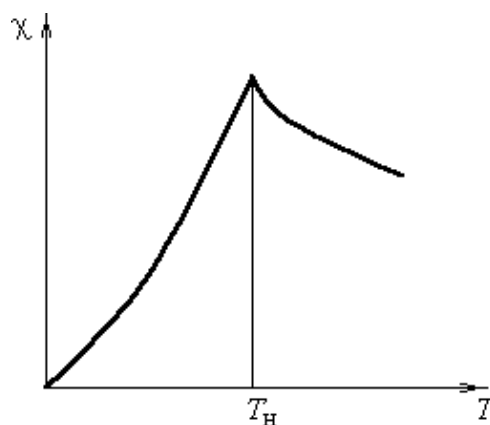


Рис. 6.6. Зависимость магнитной восприимчивости антиферромагнетиков от температуры

Антиферромагнетики имеют антипараллельное расположение атомов, $A < 0$ (теория антиферромагнетизма и ферромагнетизма называется теорией Невеля). Антиферромагнетики имеют сложную решетку, состоящую из двух подрешеток, намагниченных противоположно. При $T = 0$ магнитный момент вещества равен нулю. При повышении температуры антипараллельное расположение спинов постепенно нарушается и магнитная восприимчивость возрастает, достигая максимума при T_H – температуре Нееля (рис. 6.6). При $T > T_H$ вещество становится парамагнетиком.

У этих материалов $\chi \approx 10^{-5} \dots 10^{-3}$ и практически не зависит от H в слабых полях. В сильных полях имеется сложная зависимость.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы: Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn, многие окислы, хлориды, фториды, сульфиды, карбонаты переходных металлов, например, MnO , MnCl_2 , MnF_2 , MnS_2 и др.

Ферримагнетики (или некомпенсированные антиферромагнетики) - вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу.

Магнитные моменты подрешеток различны. К ферримагнетикам относятся ферриты - соединения, которые имеют различные кристаллические решетки: шпинели, граната, каменной соли, гексагональную и др. Ферриты со структурой шпинели представляют собой соединения окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов, структурная формула которых MeOFe_2O_3 , где Me - двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.).

Бывают однокомпонентные, двухкомпонентные и многокомпонентные ферриты. Магнитные параметры ферритов в постоянных и низкочастотных магнитных полях ниже, чем в металлических, поэтому ферриты используются на высоких частотах. Ферриты имеют высокое ρ_v , которое в $10^6 - 10^{11}$ раз больше удельного сопротивления металлических ферромагнетиков. Ферримагнетики имеют доменное строение, и многие их свойства аналогичны свойствам ферромагнетиков. Ферримагнетики имеют меньшую B_s , более сложную зависимость B от T (см. рис. 6.7).

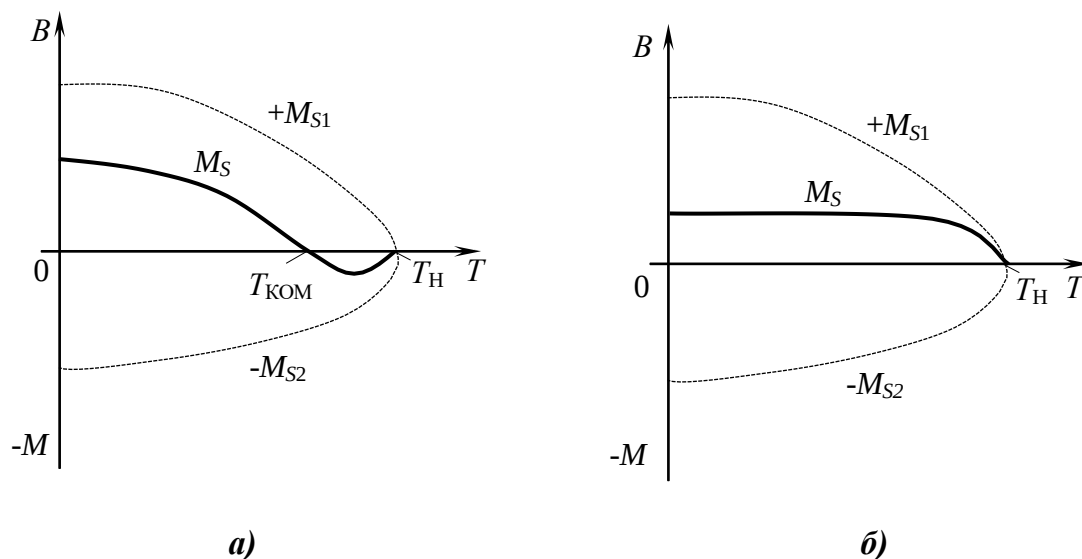


Рис. 6.7. Примеры построения результирующих температурных зависимостей магнитной индукции: а – для ферромагнетика, имеющего точку компенсации $T_{\text{КОМ}}$; б – ферромагнетика, не имеющего такой точки

Для ферримагнетика с двумя подрешетками результирующая величина намагниченности насыщения M_S может быть получена путем сложения величин намагниченности насыщения первой и второй подрешеток M_{S1} и M_{S2} . При этом в зависимости от соотношения между M_{S1} и M_{S2} при температуре $T > T_H$ может получиться компенсация и результирующая намагниченность насыщения образца станет равной нулю (см. рис. 6.7, а). Эту температуру называют точкой компенсации ферримагнетика. За этой точкой спонтанная намагниченность в образце ферримагнетика меняет знак, а затем в точке Нееля исчезает. В зависимости от вида ферримагнетика точка компенсации может быть, а может и отсутствовать, как видно из рис. 6.7, б.

6.2. Основные свойства и параметры магнитных материалов

Кривая намагничивания – зависимость магнитной индукции B (или намагниченности M) от напряженности магнитного поля H – приведена на рис. 6.8. Основная кривая намагничивания – геометрическое место вершины симметричных петель – перемагничивания – отвечает требованиям хорошей воспроизводимости и широко используется для определения параметров магнитных материалов. По основной кривой намагничивания определяется магнитная проницаемость, например, для точки A :

$$\mu = (1/\mu_0)(B_A/H_A).$$

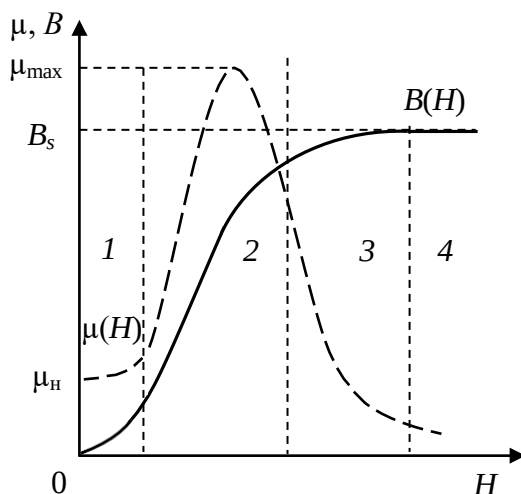


Рис. 6.8. Основная кривая намагничивания $B(H)$ и кривая магнитной проницаемости $\mu(H)$ ферромагнитного материала: 1 – область самых слабых полей; 2 – область слабых полей; 3 – область средних полей; 4 – область сильных полей

Основная кривая намагничивания и зависимость μ от H могут быть разделены на четыре области в соответствии с возможным различием процессов намагничивания при увеличении напряженности намагничивающего поля [7, 13].

Первая область (см. рис. 6.8) – область слабых полей – характеризуется обратимым смещением границ доменов. Магнитная проницаемость в этой области называется начальной и имеет постоянное значение, практически определяется при $H \approx 0,1$ А/м. При этом происходит рост доменов, вектор намагниченности которых составляет с направлением поля наименьший угол (рис. 6.9, б).

Вторая область – область необратимого смещения границ доменов. Магнитная проницаемость в этом случае проходит через максимум (рис. 6.9, в).

Третья область – область вращения вектора намагниченности. Магнитная проницаемость уменьшается, приближаясь к единице (рис. 6.9, г).

Четвертая область – область насыщения (парапроцессы).

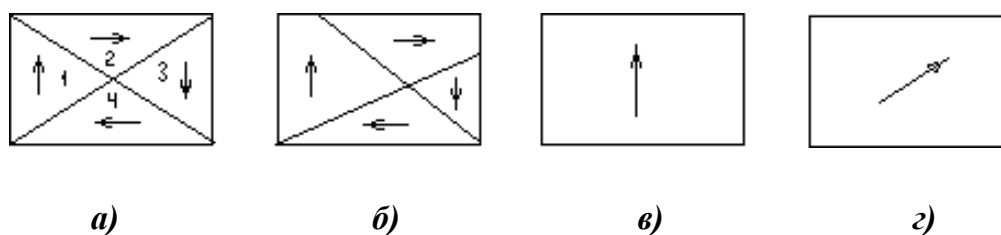


Рис. 6.9. Схема процессов, протекающих при намагничивании: а - исходное состояние при $H = 0$, когда монокристалл или четыре домена с различными направленными векторами спонтанной намагниченности доменов (указаны стрелками); б - смещение границ доменов при воздействии внешнего магнитного поля (рост объема домена 1); в - образование однодоменной структуры; г - вращение вектора намагниченности

Магнитный гистерезис, свойственный ферромагнетикам, - отставание намагниченности ферромагнитного материала от внешнего магнитного поля (см. рис. 6.4), вследствие этого неоднозначна зависимость B от H . Магнитный гистерезис обусловлен необратимыми изменениями магнитных свойств ферромагнетика под влиянием тех магнитных процессов, которым он ранее подвергался. Необратимость связана: 1) с задержками в смещении границ доменов, вызываемыми различного рода искажениями кристаллической решетки; 2) с процессами зарождения обратных доменов (зародышами перемангничивания). Эти зародыши образуются около границ между кристаллитами или у наружной поверхности вещества [5].

Для материалов, состоящих из однодоменных частиц, перемагничивание идет за счет вращения вектора намагничивания и причиной гистерезиса является магнитная анизотропия.

Форма петли гистерезиса зависит от исходного состояния материала, скорости перемагничивания и максимальных значений напряженности магнитного поля. Для слабых полей петля гистерезиса имеет вид эллипса. С увеличением H возрастает ширина петли и изменяется ее форма. Петля гистерезиса, полученная при условии насыщения, называется **предельной**. Петля, полученная при медленном изменении поля, называется **статической**.

По петле магнитного гистерезиса определяются следующие основные параметры магнитных материалов: индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c . Удельные магнитные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания определяются на площади петли гистерезиса:

$$P_{\Gamma} = \oint H \cdot dB \text{ (Дж/м}^3\text{)}. \quad (6.3)$$

Удельные магнитные потери зависят от ряда факторов: состава и примесей, технологии изготовления материала, температуры и механических напряжений. Участок петли гистерезиса, лежащий во втором квадрате, называется **кривой размагничивания**. Размагничивать можно, пропуская через катушку ток встречного направления.

Удельная магнитная энергия $W = BH/2$. При $B = B_r$ $H = 0$, поэтому $W=0$. Это состояние соответствует замкнутой магнитной цепи, т.е. отсутствию воздушного зазора. При $H = H_D$ $W = 0$, $W_D = W_{\max}$, где $\gamma = (BH)_{\max} / B_r H_c$ – коэффициент выпуклости кривой размагничивания, $0,25 < \gamma < 1$ (см. рис. 6.10). С ростом частоты циклического изменения поля вид петли гистерезиса, основной кривой намагничивания и зависимость $\mu(H)$ изменяются. Петля гистерезиса, соответствующая высокой частоте перемагничивания, называется **динамической**. Динамическая кривая шире статической. Площадь динамической петли пропорциональна мощности полных магнитных потерь, которые определяются равенством

$$P = P_{\Gamma} + P_{\text{в}} + P_{\text{д}}, \quad (6.4)$$

где P_{Γ} – потери на гистерезис; $P_{\text{в}}$ – потери на вихревые токи; $P_{\text{д}}$ – потери на последствие, так же называемое магнитной вязкостью (отставание во времени изменения магнитных характеристик ферромагнетиков, а именно намагниченности, проницаемости и т.д., от изменений напряженности внешнего магнитного поля).

Потери на гистерезис:

$$P_r = \eta f B_{\max}^n V, \quad (6.5)$$

где η – коэффициент, зависящий от материала; f – частота поля; $B_{\max}$ – максимальная индукция; n – показатель степени в пределах 1,6...3,5; V – объем материала.

Потери на вихревые токи определяются из равенства

$$P_v = \xi f^2 B_{\max}^2 V, \quad (6.6)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от материала.

Дополнительные потери P_d , связанные с магнитной вязкостью:

$$P_d = P - (P_r + P_v). \quad (6.7)$$

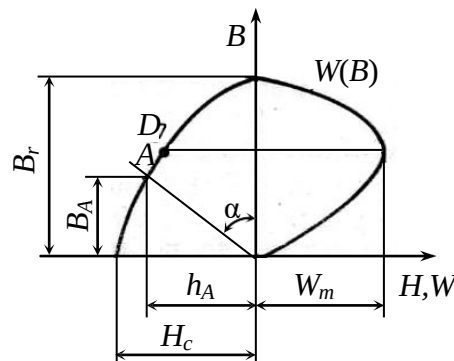


Рис. 6.10. Характер изменения удельной магнитной энергии от напряженности магнитного поля

Зависимость μ от f называется **дисперсией магнитной проницаемости**. Она имеет релаксационный или резонансный характер. Магнитная релаксация происходит в два этапа: а) быстрая релаксация – за счет сравнительно сильных обменных взаимодействий устанавливается абсолютное значение магнитной проницаемости; б) медленная релаксация спин-орбитального взаимодействия устанавливает магнитные моменты вдоль оси легкого намагничивания. Процесс магнитной релаксации необратим и связан с потерей энергии.

Резонансные явления связаны с избирательным поглощением энергии электромагнитного поля при частотах, совпадающих с собственными частотами колебаний границ доменов или частотами прецессии магнитных моментов электронной системы.

Магнитная анизотропия – неодинаковость магнитных свойств материала по различным направлениям. Энергия магнитной анизотропии складывается из энергии кристаллографической магнитной анизотропии и энергии магнитострикционной деформации (рис. 6.11).

Энергия, которая требуется для намагничивания единицы объема материала, определяется площадью S . Наибольшей энергией обладает кристалл, намагниченный вдоль оси трудного намагничивания, а наименьшей – кристалл, намагниченный по оси легкого намагничивания. Разность этих энергий соответствует энергии магнитной кристаллографической анизотропии. С ростом температуры энергия уменьшается.

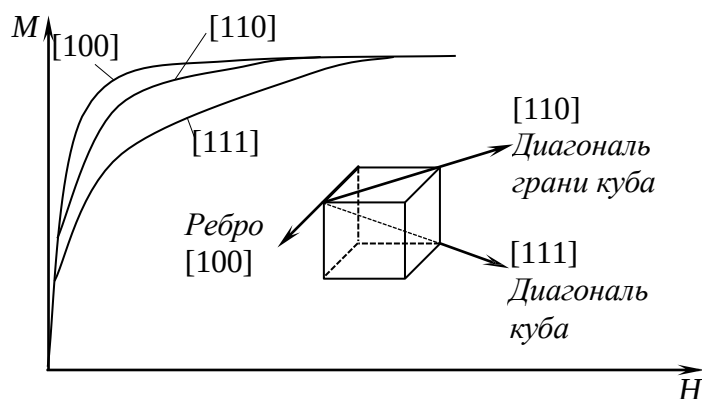


Рис. 6.11. Магнитная анизотропия по различным направлениям кристалла магнита

При намагничивании имеют место изменения формы и размеров тела. Это явление называется **магнитострикцией**. Параметр, характеризующий магнитострикцию, обозначается λ_s : $\lambda_s = \Delta l / l$ – относительное удлинение в направлении поля $\lambda_s = 10^{-5} \dots 10^{-3}$.

Ход кривой зависимости магнитострикции от H и намагниченности зависит от структурных особенностей образца (рис. 6.12), связанных с наличием примесей, и режимов термической обработки.

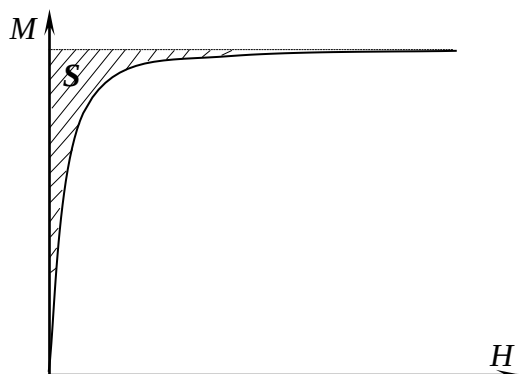


Рис. 6.12. Зависимость магнитострикции от напряженности магнитного поля никеля

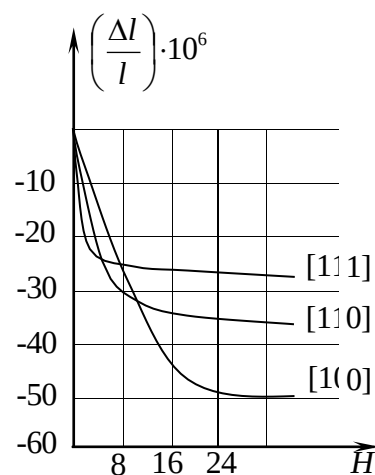


Рис. 6.13. Кривые магнитострикционной деформации монокристалла никеля

На рис. 6.13 приведены кривые магнитострикционной деформации монокристалла никеля для различных направлений и напряженности (кА/м).

Магнитоупругая энергия – это энергия, возникающая под действием внешних механических напряжений. **Магнитостатическая энергия** – это энергия, связанная с размагничивающим полем свободных полюсов. **Магнитная энергия** – это энергия, обусловленная взаимодействием намагниченности материала с внешним полем. Полная энергия - сумма всех энергий. Форма доменов и их расположение соответствуют минимуму результирующей энергии.

6.3. Виды магнитных материалов

Магнитные материалы делятся: а) на магнитомягкие; б) магнитотвердые; в) материалы специального назначения. **Магнитомягкие материалы** характеризуются способностью намагничиваться до насыщения в слабых полях, имеют узкую петлю гистерезиса, малое значение H_c , большое μ , большое B_s , малые магнитные потери. **Магнитотвердые материалы** характеризуются удельной магнитной энергией. Они должны иметь большую W_m , а значит, большие H_c , B_r , γ . Граница значений соответствует: $H_c = 4$ кА/м. $H_c < 4$ кА/м - магнитомягкие, $H_c > 4$ кА/м – магнитотвердые материалы.

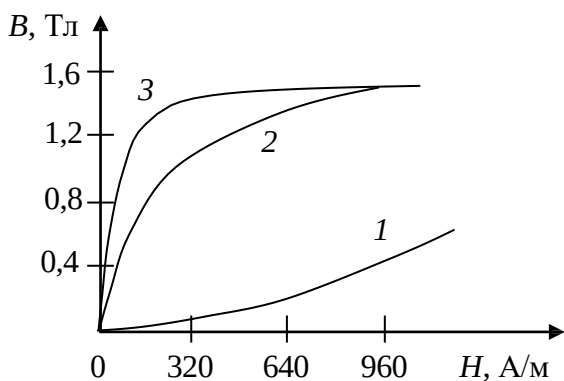


Рис. 6.14. Влияние механической и термической обработки на кривую намагничивания пермаллоя (70% Ni, 30% Fe): 1-холодная перекалка; 2-отжиг с медленным охлаждением; 3-отжиг с быстрым охлаждением

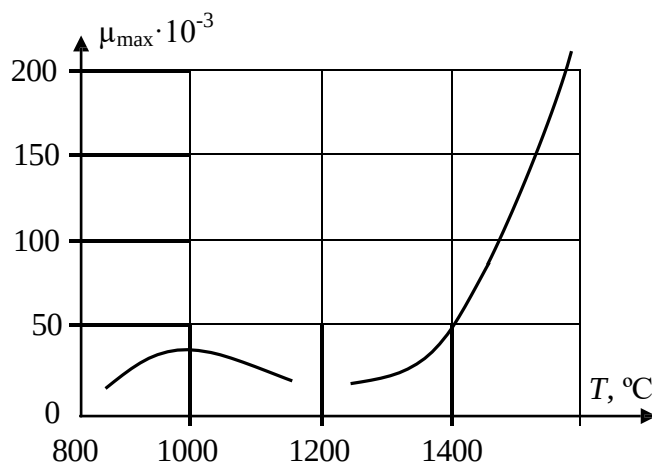


Рис. 6.15. Зависимость $\mu_{\max}$ железа от температуры отжига

Свойства магнитных материалов зависят от химического состава, способа изготовления, механической и термической обработки (см.

рис. 6.14). К структурно-нечувствительным свойствам, которые определяются основным химическим составом, относят намагниченность насыщения, точку Кюри, λ_S .

К структурно-чувствительным свойствам относят μ , H_c , потери на гистерезис. Они сильно изменяются от наличия примесей. Структурно-чувствительные свойства зависят от способа изготовления и термической обработки материала.

Под действием механических напряжений магнитные свойства ферромагнетиков изменяются настолько сильно, что механические воздействия можно считать одним из факторов, влияющих на магнитные свойства (см. рис. 6.15). Для восстановления магнитных свойств после механической обработки магнитомягкие материалы подвергают термической обработке – отжигу [13].

6.4. Вопросы и задачи

1. Чем объясняются магнитные свойства различных материалов?
2. Классифицируйте материалы по их магнитным свойствам.
3. Какие материалы являются диамагнетиками и каковы их магнитные свойства?
4. Какие материалы являются парамагнетиками и каковы их магнитные свойства?
5. Какие материалы являются ферромагнетиками и каковы их магнитные свойства?
6. Каковы магнитные свойства ферримагнетиков?
7. Какие материалы используются в электротехнике в качестве магнитных материалов? Как они классифицируются с точки зрения применения в электротехнике?
8. Назовите основные свойства магнитных материалов.
9. От каких факторов зависит магнитная проницаемость магнитных материалов?
10. Как и почему в магнитных материалах проявляются гистерезисные явления?
11. Как проявляется анизотропия свойств магнитных материалов?
12. В чем заключается явление магнитострикции? В каких материалах оно более всего проявляется и для каких целей используется?
13. Как влияет на свойства магнитных материалов их механическая и термическая обработка?
14. Можно ли из магнитных материалов изготовить тонкие пленки? Для каких целей они используются?

15. Какие свойства имеют магнитомягкие материалы? Как они классифицируются?
16. Каковы свойства технически чистого железа и его использование?
17. Что такое листовые электротехнические стали?
18. Какие магнитомягкие материалы имеют высокое значение магнитной проницаемости в слабых магнитных полях?
19. Какой магнитный материал имеет наибольшую индукцию насыщения?
20. Как используются материалы с сильной зависимостью магнитной проницаемости от температуры?
21. Какие магнитомягкие ферриты являются важнейшими?
22. Каковы достоинства и недостатки ферритов по сравнению с классическими материалами?
23. Как влияет на свойства ферритов температура?
24. Какие магнитные материалы имеют прямоугольную петлю гистерезиса?
25. В сердечнике трансформатора суммарные удельные магнитные потери на гистерезис и на вихревые токи при частотах 1 и 2 кГц составляют соответственно 2 и 6 Вт/кг (при неизвестной максимальной индукции в сердечнике). Рассчитать магнитные потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 2 кГц.
26. В сердечнике трансформатора на частоте 50 Гц потери на гистерезис при индукции магнитного поля 0,1 и 1,97 Вт/кг соответственно. Определить потери на гистерезис на частоте 200 Гц при индукции магнитного поля 0,6 Тл.
27. На частоте 50 Гц удельные потери на вихревые токи в сердечнике из электротехнической стали при индукции магнитного поля $B = 1,2$ Тл составляют 6,5 Вт/кг. Определить потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 400 Гц при магнитной индукции 0,5 Тл, если масса сердечника $m = 0,5$ кг.
28. Определить коэрцитивную силу кольцевого ферромагнитного сердечника, если для его размагничивания через обмотку, содержащую 100 витков, требуется пропустить ток 63 мА. Средний диаметр кольца 20 мм.
29. Кольцевой магнитопровод имеет площадь поперечного сечения $S = 100$ мм² и среднюю длину магнитного контура $l_{cp} = 0,1$ м. На сердечник намотана обмотка с числом витков $n = 100$. Определить магнитный поток через сердечник при токе в обмотке $I = 1$ А, если магнитная проницаемость материала сердечника равна 2000.

30. Определить индуктивность катушки с кольцевым магнитным сердечником размерами $R \times r \times h = 30 \times 20 \times 10$ мм и обмоткой, состоящей из 200 витков. Сердечник изготовлен из высоконикелевого пермаллоя с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 50000$ (при рабочей напряженности магнитного поля).

31. Катушка с ферритовым тороидальным сердечником диаметром 10 мм имеет индуктивность 0,12 Гн и содержит 1000 витков. Определить ток в катушке, при котором магнитная индукция в сердечнике равна 0,1 Тл.

32. Найти индуктивность соленоида, имеющего 200 витков, намотанных на диэлектрическое основание, длиной $l=50$ м. Площадь поперечного сечения основания $S=50$ мм². Как изменится индуктивность катушки, если в нее введен цилиндрический ферритовый сердечник, имеющий магнитную проницаемость $\mu=400$, определенную с учетом размагничивающего действия воздушного зазора?

33. Соленоид с числом витков $n=100$ имеет ферритовый сердечник длиной 30 мм с площадью поперечного сечения 25 мм². Найти индуктивность соленоида, если по его обмотке проходит ток: а) 60 мА; б) 300 мА; в) определить значение тока, при котором индуктивность сердечника считать равной 500.

34. Определить, сколько витков необходимо намотать на магнитный сердечник длиной 100 мм и диаметром 8 мм, чтобы получить индуктивность катушки $L = 10$ мГн. Магнитную проницаемость сердечника считать равной 500.

35. Тороидальный сердечник из пермаллоя с внутренним диаметром 30 мм и наружным диаметром 40 мм имеет обмотку из 200 витков. При пропускании через обмотку тока 0,5 А в сердечнике создается магнитное поле индукцией 1,5 Тл. Определить магнитную проницаемость сердечника.

36. Найти намагниченность M парамагнетика, находящегося внутри соленоида длиной $l = 30$ см с сечением $S = 2$ см² и числом витков $n = 300$, когда по обмотке проходит ток $I = 1,5$ А. Индуктивность соленоида $L = 7,55 \cdot 10^{-5}$ Гн.

37. Определить магнитную индукцию ферромагнитного сердечника, помещенного внутрь соленоида длиной $l = 20$ см с числом витков $n = 800$, если по обмотке проходит ток 0,2 А, а эффективная магнитная проницаемость сердечника $\mu = 200$.

38. Кольцевой ферритовый сердечник со средним диаметром $d_{\text{ср}}=25$ мм имеет воздушный зазор длиной 1 мм. При пропускании тока 0,17 А через обмотку сердечника, состоящую из 500 витков, в зазоре создается магнитная индукция $B_0=0,1$ Тл. Определить магнитную проницаемость феррита.

39. Кольцевой магнитный сердечник со средним диаметром 40 мм изготовлен из магнитомягкого феррита. В сердечнике имеется воздушный зазор $l_0=1$ мм. Число витков обмотки сердечника $n=500$. Найти напряженность магнитного поля в воздушном зазоре при токе в катушке $I=0,3$ А. Как изменится напряженность поля в зазоре, если при прочих неизменных условиях он будет увеличен вдвое?

ГЛАВА 7. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

7.1 Общие правила выполнения схем

Схема – это графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

Схемы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки, эксплуатации изделий.

Правила выполнения и оформления схем регламентируют стандарты седьмой классификационной группы ЕСКД.

На схемах, как правило, используют стандартные графические условные обозначения. Если необходимо использовать не стандартизированные обозначения некоторых элементов, то на схеме делают соответствующие пояснения [9].

Следует добиваться наименьшего числа изломов и пересечений линий связи, сохраняя между параллельными линиями расстояние не менее 3мм.

На схемах допускается помещать различные технические данные, характеризующие схему в целом и отдельные ее элементы. Эти сведения помещают либо около графических обозначений, либо на свободном поле схемы, как правило, над основной надписью.

Элемент схемы – составная часть схемы, которая выполняет определенную функцию в изделии и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное назначение (резистор, конденсатор, интегральная микросхема, трансформатор, насос и т.п.).

Устройство – совокупность элементов, представляющая единую конструкцию (блок, плата). Может не иметь в изделии определенного функционального назначения.

По основному назначению схем их подразделяют на типы, обозначаемые цифрами (в скобках приведены соответствующие коды по СТ СЭВ 527-77): структурные – 1(101), функциональные – 2(102), принципиальные (полные) – 3(201), соединений (монтажные) – 4(301), подключения – 5(303), общие – 6(302), расположения – 7(401), объединенные – 0.

Наименование схемы определяется ее видом и типом, например: схема электрическая функциональная, схема деления структурная, схема гидравлическая соединений.

Код схемы состоит из буквы, определяющей вид схемы, и цифры, обозначающей тип схемы, например, ЭЗ – схема электрическая принципи-

альная, Э4 – схема электрическая соединений, Г1 – схема гидравлическая структурная.

Структурная схема определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязи.

Структурные схемы разрабатывают при проектировании изделий на стадиях, предшествующих разработке схем других типов. Схемами пользуются для общего ознакомления с изделием.

Функциональная схема служит для разъяснения процессов, протекающих в отдельных функциональных цепях изделия или в изделии в целом.

Схемами пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте в процессе эксплуатации.

Принципиальная (полная) схема определяет полный состав элементов и связей между ними и дает детальное представление о принципах работы изделия.

Принципиальными пользуются для изучения принципов работы изделий, а также при их наладке, контроле и ремонте. Схемы служат основанием для разработки других конструкторских документов, например, схем соединений (монтажных) и чертежей.

7.2. Структурная схема (Э1)

Структурная схема отображает принцип работы изделия в самом общем виде. На схеме изображают все основные функциональные части изделия (элементы, устройства, функциональные группы), а также основные взаимосвязи между ними. Действительное расположение составных частей изделия не учитывают и способ связи (проводная, индуктивная, количество проводов и т.п.) не раскрывают. Построение схемы должно давать наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей в изделии (рис. 7.1). Направление хода процессов, происходящих в изделии, обозначают стрелками на линиях взаимосвязи.

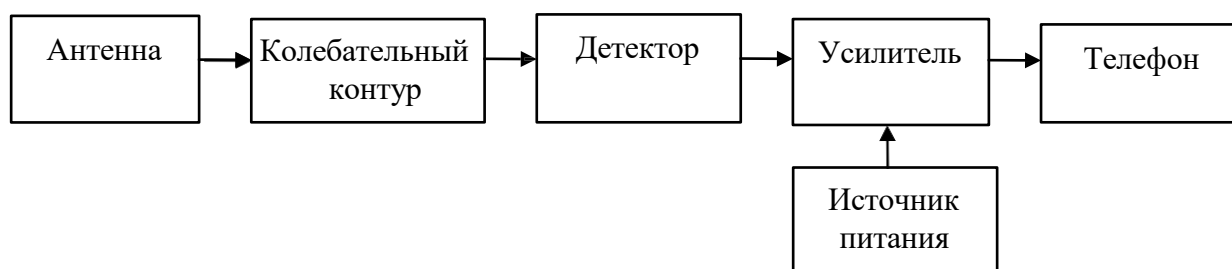


Рис. 7.1. Структурная схема

7.3. Функциональная схема (Э2)

Для сложного изделия разрабатывают несколько функциональных схем, поясняющих происходящие процессы при различных предусмотренных режимах работы. Количество функциональных схем, разрабатываемых на изделие, степень их детализации и объем помещаемых сведений определяется разработчиком с учетом особенностей изделия.

На схеме изображают функциональные части изделия (элементы, устройства и функциональные группы) и связи между ними. Графическое построение схемы должно наглядно отражать последовательность функциональных процессов, иллюстрируемых схемой. Действительное расположение в изделии элементов и устройств может не учитываться.

Функциональные части и связи между ними изображают в виде условных графических обозначений, установленных в стандартах ЕСКД. Отдельные функциональные части на схеме допускается изображать в виде прямоугольников. В этом случае части схемы с поэлементной детализацией изображают по правилам выполнения принципиальных схем, а при укрупненном изображении функциональных частей – по правилам структурных схем (рис. 7.2).

На функциональной схеме радиоприемного устройства (рис. 7.2) по сравнению с его структурной схемой раскрыто содержание детекторного каскада, остальные элементы схемы изображены в виде прямоугольников, как на структурной схеме.

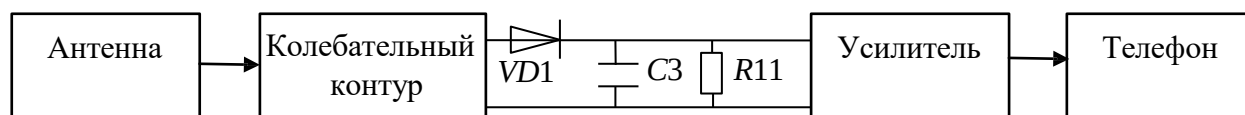


Рис. 7.2. Структурная схема

7.4. Принципиальная схема (Э3)

Принципиальная схема является наиболее полной электрической схемой изделия, на которой изображают все электрические элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все связи между ними, а также элементы подключения (разъемы, зажимы), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. На схеме могут быть изображены соединительные и монтажные элементы, устанавливаемые в изделии по конструктивным соображениям.

Электрические элементы на схеме изображают условными графическими обозначениями, начертание и размеры которых установлены в стандартах ЕСКД [9].

Позиционные обозначения элементов. Всем изображенным на схеме элементам и устройствам присваиваются условные буквенно-цифровые позиционные обозначения в соответствии с ГОСТ 2.710-81.

Позиционные обозначения элементам (устройствам) присваивают в пределах изделия. Порядковые номера элементам (устройствам) начиная с единицы, присваивают в пределах группы элементов (устройств) с одинаковым буквенным позиционным обозначением одной группы или одного типа в соответствии с последовательностью их расположения на схеме сверху вниз в направлении слева направо, например $R1, R2, \dots C1, C2$ (рис. 7.3). Буквы и цифры позиционного обозначения выполняют чертежным шрифтом одного размера.

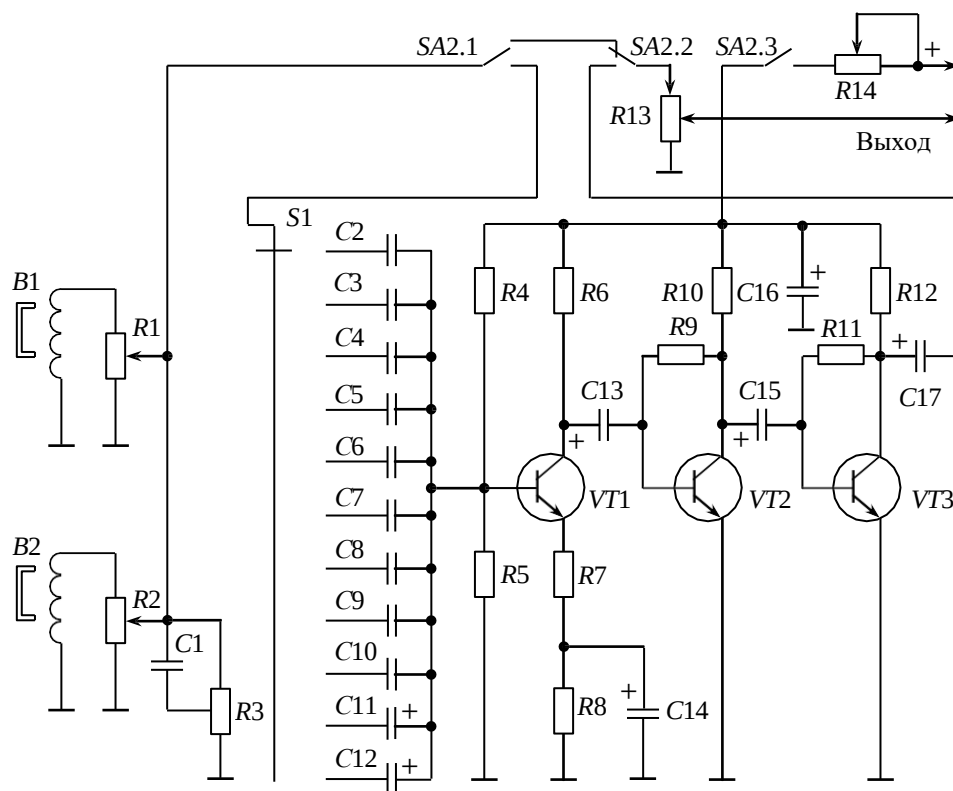


Рис. 7.3. Схема электрическая

Последовательность присвоения порядковых номеров может быть нарушена в зависимости от размещения элементов изделия, направления прохождения сигналов или функциональной последовательности процесса, а также при внесении в схему изменений.

Позиционные обозначения проставляют на схеме рядом с условными графическими обозначениями элементов и устройств с правой стороны или над ними.

7.5. Перечень элементов

Перечень элементов. Данные об элементах и устройствах, изображенных на схеме изделия, записывают в перечень элементов. Допускается все сведения об элементах помещать рядом с их изображением на свободном поле схемы. Связь между условными графическими обозначениями и перечнем элементов осуществляется через позиционные обозначения.

Перечень помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного документа на листе формата А4 с основной надписью для текстовых документов по форме 2 или 2а ГОСТ 2.104-68. Перечень элементов оформляют в виде таблицы (рис. 7.4) и заполняют сверху вниз. В графах перечня указывают следующие данные:

- в графе «Поз. обозначение» – позиционное обозначение элемента, устройства или функциональной группы;
- в графе «Наименование» – наименование элемента (устройства) в соответствии с документом, на основании которого он применен, и обозначение этого документа (основной конструкторский документ, государственный стандарт, технические условия); для функциональной группы – наименование;
- в графе «Кол» – количество одинаковых элементов;
- в графе «Примечание» – технические данные элемента (устройства), не содержащиеся в его наименовании.

Поз. обозначение	Наименование	Кол	Примечание

Dimensions: Header row height is 15. First data row height is 8. Column widths: 20, 110, 10. Total width is 185.

Рис. 7.4. Таблица для оформления перечня элементов

При размещении перечня элементов на первом листе схемы его располагают над основной надписью на расстоянии не менее 12 мм от нее. Продолжение перечня помещают слева от основной надписи, повторяя головку таблицы.

Если перечень элементов выпускают в виде самостоятельного документа, то ему присваивают код, который должен состоять из буквы «П» и кода схемы, например, ПЭЗ – код перечня элементов к электрической принципиальной схеме. При этом в основной надписи перечня под наименованием изделия, для которого составлен перечень, делают запись «Перечень элементов» шрифтом на один-два размера меньше того, каким записано наименование изделия, а в графе «Обозначение» основной надписи указывают код.

Перечень элементов записывают в спецификацию после схемы, к которой выпущен.

При разбивке поля схемы на зоны перечень элементов дополняют графой «Зона», указывая в ней обозначения зоны или номер строки (при строчном способе выполнения схем), в которой расположен элемент или устройство).

Допускается вводить в перечень дополнительные графы, если они не дублируют сведений в основных графах.

Порядок записи элементов в перечень следующий (рис. 7.5).

Поз.обозначение	Наименование	Кол	Примечание
L1	Катушка индуктивности АБВГ...	1	
	Резисторы		
R1	МЛТ-0,5-300 кОм +- 5% ГОСТ...	1	
R2	1СП-1-1-560 Ом +-20% А-В-С-3-12,5 ГОСТ...	1	
R3	ПЭВ-10-3 кОм +-5% ГОСТ...	1	
	МЛТ ГОСТ...	1	
	СП ГОСТ...		
R4	МЛТ-0,5-150 кОм +- 5% ГОСТ...	1	
R5	1СП-1-1-560 Ом +-20% А-В-С-3-12,5 ГОСТ...	1	
R6	МЛТ-0,5-150 кОм +- 10% ГОСТ...	1	
R7, R8	МЛТ-0,25-300 кОм +- 10% ГОСТ...	2	

Рис. 7.5. Порядок записи элементов в перечень

Элементы записывают по группам (видам) в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений, располагая по возрастанию порядковых номеров в пределах каждой группы, а при цифровых обозначениях – в порядке их возрастания. Между отдельными группами элементов или между элементами в большой группе рекомендуется оставлять несколько незаполненных строк для внесения изменений.

Для сокращения перечня допускается однотипные элементы с одинаковыми параметрами и последовательными порядковыми номерами за-

писывать в перечень одной строкой, указывая только позиционные обозначения с наименьшим и наибольшим порядковыми номерами, например, С1, С2, R4 ... R6. В графе «Кол» указывают общее количество таких элементов. При записи однотипных элементов допускается не повторять в каждой строке наименование элемента, а записывать его в виде общего наименования к соответствующей группе элементов [9].

В общем наименовании записывают наименование, тип и обозначение документа, на основании которого применены эти элементы.

ГЛАВА 8. ЭПИТАНСИАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

8. 1. История открытия лантанидов

Смесь лантанидов впервые была выделена в 1794 г. финским химиком Юханом Гадוליном из минерала иттербита, который в последствие получил название гадолинита. В 1797 г. открытие Гадолина было подтверждено Ан- дерсом-Густавом Экебергом (Швеция), который выделенные земли назвал иттриевыми землями. В 1803 г. Мартин-Генрих Клапрот (Германия), Виль- хельм Хисингер (Швеция) и Йёнс-Якоб Берцелиус (Швеция), анализируя минерал, названный церитом, выделили из него новые земли, названные це- риевыми (от образующего элемента – церия, получившего название в честь астероида Цереры, обнаруженного в 1801 г.).

В 1814 г. Берцелиус и Юхан-Готтлиб Ганн (Швеция) из иттриевых зе- мель выделили цериевые земли при помощи двойного сульфата калия. Ока- залось, что иттриевые земли являются смесью цериевых и иттриевых земель. В 1837 г. в результате исследования цериевых земель, полученных из церита, гадолинита и ортита, Карлу-Густаву Мосандеру (Швеция) удалось выделить лантан, а в 1842 г. – лантан, дидим и иттрий, который встречается в мине- ралах совместно с лантанидами.

В 1843 г. Мосандер разделил иттриевые земли с помощью дробного осаждения оксалатов (щавелевой кислотой) и гидроксидов из кислого рас- твора (аммиаком) на оксиды иттрия, эрбия и тербия. Методы разделения, применявшиеся Мосандером и его учителем Берцелиусом, легли в основу всех позднейших исследований, посвященных лантанидам. Последующий период, до 1878 г., был периодом детального изучения свойств и способов получения отдельных соединений, определения атомных весов и т. д.

В 1870 г. Д.И.Менделеев на основе периодического закона предсказал существование нескольких элементов, в том числе аналога бора («экабора»), свойства их простых и сложных соединений и приписал известным в то вре- мя оксидам лантанидов формулу Ln_2O_3 , а высшему оксиду церия – CeO_2 , что позднее подтвердилось. Менделееву принадлежит огромная заслуга в пра- вильном выборе валентности этих элементов.

В 1878 г. Жан-Шарль Мариньяк (Швейцария) выделил новую землю, названную иттербием. Фракции земель, полученные Мариньяком, были спектроскопически изучены Соре (Франция), который обнаружил по разде- лению в спектре неизвестный элемент.

В 1879 г. Поль-Эмиль Франсуа Лекок-де-Буабодран (Франция) выде- лил из

минерала самарскита (найденного на Урале горным инженером В.Е.Самарским-Быховцем) элемент самарий. Элемент, ранее обнаруженный Соре, Пер-Теодор Клеве (Швеция) назвал гольмием (от латинского названия Стокгольма – «Гольмия»). Клеве выделил гольмий вместе с тулием (от древ- него имени Скандинавии – «Туле») путем дробной кристаллизации из преж- него эрбия. В том же году Ларс-Фредрик Нильсон (Швеция) открыл скандий в процессе разделения эрбиевых земель, полученных из скандинавского га- долинита .

В 1885 г. Карл Ауэр фон Вельсбах (Австрия) разложил дидим методом дробной кристаллизации двойных нитратов на два новых элемента, которые он назвал неодим и празеодим (от греческих «неос» – новый, «прасинос» – светло-зеленый и «дидимос» – близнец).

В 1886 г. Мариньяк из минерала самарскита выделил элемент, позднее названный гадолинием (в честь Ю.Гадолина). В том же 1886 г. Лекок-де-Буабодран выделил из прежнего гольмия диспрозий (по-гречески «диспрозитос» – труднодоступный).

В 1892 г. Лекок-де-Буабодран, а в 1896 г. Эжен-Анатоль Демарсе (Франция) спектрально установили сложность прежнего самария, из которо- го Демарсе выделил европий (от Европы).

В 1905 г. французский ученый Жорж Юрбен, а несколько позднее независимо от него Ауэр фон Вельсбах выделили из прежнего иттербия со- единение еще одного нового элемента, который Юрбен назвал лютецием, а Вельсбах – кассиопеем. Согласно постановлению международной комиссии по атомным массам для элемента №71 в 1949 г. было принято название лю- теций (Лютеция – старинное название Парижа) и символ Lu.

Всего к 1907 г. кроме Sc, Y и La было открыто 13 редкоземельных элементов.

Окончательно вопрос о числе РЗЭ был решен в 1922 г., когда на осно- ве закона Мозли был определен естественный ряд элементов и установлено, что между La и Hf могут находиться только 14 элементов (лантанидов).

Оставался открытым вопрос о существовании в ряду РЗЭ еще одного, пока не обнаруженного элемента № 61, который в природе практически от-

сутствует. Впервые он был получен в 1947 г. Джейкобом Марински и Лорен- сом Гленденином (США) из продуктов деления урана и в 1950 г. он был назван прометием (в честь Прометея – по греческой мифологии – титана, похитившего у бога Зевса огонь для людей и за это наказанного Зевсом). В настоящее время известно несколько изотопов прометия.

Таким образом, непосредственно к лантану примыкают 14 родствен- ных друг другу элементов (от 58 до 71), объединяемых под названием «се- мейства лантанидов». Представителями которого являются:

2				
8	Pr	2		
8	Nd	2		
8	Pm	2		
8	Sm	2		
8				
20	21	22	23	24
18	18	18	18	18
8	8	8	8	8
2	2	2	2	2

2				
8	Gd	2		
9	Tb	2		
8	Dy	2		
8	Ho	2		
8				
25	25	27	28	29
18	18	18	18	18
8	8	8	8	8
2	2	2	2	2

Два внешних энергетических уровня в атомах почти всех лантанидов построены однотипно, а основное изменение претерпевает предшествующий им уровень, число электронов которого при переходе от La к Lu возрастает с

18 до 32. Так как химические свойства элементов связаны главным образом со структурой внешних энергетических уровней, то изменение числа электронов в третьем слое отражается на них довольно слабо. В связи с этим все лантаниды по свойствам похожи друг на друга и являются представителями «гомологического ряда» лантана. Однако существует и различие в химиче-

ских свойствах лантанидов, причины которых будут рассмотрены позднее.

ГЛАВА 9. ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ И ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

9. 1. История открытия

В 1801 г. мексиканский минеролог дель Рио, исследуя пробу свинцовой руды, выделил некоторые соли нового элемента, которые при действии на них кислот давали соединения красного цвета. Элемент был назван эритронием (от греческого «эритрос» - красный). Однако вскоре после работ других исследователей и собственной проверки дель Рио решил, что он имел

дело с соединениями хрома. В 1830 г. швед Н. Г. Зэфстрём открыл в железной руде из Таберга (Швеция) новый элемент, которому дал название «ванадий» по имени скандинавской богини красоты Ванадис из-за цветового многообразия соединений. В 1831 г. Ф. Вёлер (Германия), который был близок к самостоятельному открытию того же элемента, показал тождественность ванадия и эритрония. В 1867 г. Г. Роско (Англия) получил металлический ванадий (чистотой 96 %), восстановив VCl_2 водородом. В дальнейшем многие химики пытались получить более чистый ванадий, но безуспешно. Ванадий, в силу трудности его очистки от кислорода, азота, углерода и водорода, получался хрупким. Лишь в 1927 г. Мардену и Ричу удалось получить ковкий ванадий, восстановив V_2O_5 кальцием.

9. 2. Минералы, руды и месторождения

Ванадий широко распространен в природе – 0,02 % от веса земной коры, т. е. примерно столько же, сколько цинк и никель. Однако он более рассеян и присутствует в виде следов во многих рудах. Собственные руды ванадия очень редки. Небольшое его количество найдено в железных, свинцовых, свинцово-цинковых, свинцово-медных и алюминиевых рудах. Практически весь ванадий земной коры находится в её твердой оболочке – литосфере – в изверженных породах, где он вследствие близости ионных радиусов V^{3+} и Fe^{3+} изоморфно замещает катион железа (III).

Из собственных минералов ванадия наибольшее значение имеют: роскоэлит $\text{KV}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ (32,4 % V_2O_3), месторождения которого находятся в западной Австралии, США и России; патронит $\text{V}_2\text{S}_5 \cdot x\text{S}$ – редкий минерал, известно лишь одно крупное месторождение в Перуанских Андах; ванадинит $\text{Pb}_5[\text{VO}_4]_3\text{Cl}$ (до 19,4 % V_2O_5) встречается в зоне окисления свинцово-цинковых сульфидных месторождений, крупнейшие

месторождения – Юго-запад Африки (Тсумеб, Отави, Абенаб); карнотит $K_2(UO_2)_2[VO_4] \cdot 3H_2O$ (до 19,8 % V_2O_5), месторождения которого находятся в США (штаты Колорадо, Юта, Нью-Мексико).

Ванадий изоморфно замещает железо в магнетитах и титаномагнетитах (радиусы ионов V^{3+} и Fe^{3+} соответственно 0,65 и 0,67 Å). Крупные месторождения титаномагнетитов найдены в США (штаты Нью-Йорк, Вайоминг), Финляндии, КНР, Индии.

Ванадийсодержащие горючие полезные ископаемые – асфальтиты, битумы нефти, горючие сланцы. В колорадских асфальтитах (США) содержится 1,17 % V_2O_5 , а в продуктах их горения – до 25 % V_2O_5 . Асфальтиты некоторых месторождений России содержат 7-11 % V_2O_5 . В золе венесуэльской нефти – 5-35 % V_2O_5 , иранской – до 5 %. Основным источником ванадия в России – железные руды.

9.3. Физические и химические свойства

Электронная формула: $23V - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^3 4s^2$. Атом ванадия имеет

характерное для переходных элементов строение: его валентные электроны расположены в двух внешних слоях, в периферийном слое – два электрона. С предпоследнего слоя этот элемент отдает еще до трех электронов. Степень окисления ванадия в соединениях: +2, +3, +4, +5. Валентность +5 в обычных условиях наиболее стабильна.

Ванадий – тугоплавкий металл серого цвета, твердый, но легко подвергающийся механической обработке. Образует объемно-центрированную кристаллическую решетку ($a = 0,203$ нм). В компактном состоянии ванадий весьма устойчив к воздействию различных реагентов. Ванадий растворяется только в кислотах-окислителях (HNO_3 , «царская водка») и HF . Растворы щелочей на него не действуют, однако он постепенно растворяется в расплавленных щелочах. В виде порошка V энергично реагирует с кислородом, хлором и серой. Восстановление оксидов и соединений V до металла является довольно трудным. Восстановление же до низких степеней окисления у V идет легко, особенно в растворе. Ванадий способен поглощать значительное количество водорода.

Гидрат оксида ванадия (V) образует соли и с кислотами и с основаниями, но V_2O_5 правильнее считать кислотным, так как он образует соли преимущественно с оксидами основного характера. Способность соединений ванадия (V) к гидролизу высока.

Ванадий химически относительно активен. Чистый металл, не содержащий нитрида и карбида, пластичен. Его можно вытягивать в проволоку и прокатывать в листы и тонкую фольгу при обычной температуре. Металл, содержащий нитриды и карбиды, тверд и хрупок. В виде порошка при нагревании энергично соединяется с кислородом, хлором и серой.

Компактный металл при обычной температуре даже во влажном воздухе остается блестящим. При нагревании в воздухе и кислороде сначала темнеет, изменяя цвет, покрывается оксидами различной степени окисления и, наконец, сгорает с образованием V_2O_5 . При нагревании в атмосфере водорода поглощает его, а при нагревании в атмосфере азота образует нитриды. В избытке хлора сгорает до $VC1_4$.

9.4. Кислородсодержащие соединения

Оксиды. Получено четыре соединения ванадия с кислородом: VO (или V_2O_2) – устар. назв. – закись; V_2O_3 – устар. назв. – полутораокись; VO_2 (или V_2O_4) – двуокись; V_2O_5 – пятиокись. В литературе описывается ряд промежуточных оксидов со степенью окисления ванадия между +4 и +5.

VO – черный аморфный порошок. Получают нагреванием $VOCl$ при 600–700°C в токе H_2 или нагреванием стехиометрических количеств порошков V_2O_3 и V



Оксид ванадия (+2) долгие годы принимали за металлический ванадий из-за способности проводить электрический ток, высокой плотности и металличе-

ского блеска. Не растворяется в воде. В атмосфере хлора сгорает до $VOCl_3$. Имеет основной характер – в разбавленных кислотах растворяется, образуя соли ванадия (+2). Растворы этих солей в воде окрашены в фиолетовый цвет. Растворенные соли неустойчивы, т. к. легко окисляются.

Соли V (+2) напоминают соли Fe (+2) и Mn (+2). При действии на них щелочей выпадает буро-коричневый гидроксид $V(OH)_2$, быстро окисляющийся в $V(OH)_3$. Помимо простых солей, например $VSO_4 \cdot 7H_2O$, ванадий (+2) входит в состав различных двойных и комплексных солей. Так, соль $(NH_4)_2SO_4 \cdot VSO_4 \cdot 6H_2O$ аналогична соли Мора.

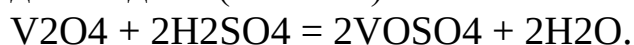
V_2O_3 – черный порошок. Получают нагреванием V_2O_5 или метаванадата аммония в атмосфере H_2 при 900°C. Температура плавления 1965°C. В отсутствие кислорода устойчив вплоть до белого каления, однако на воздухе постепенно окисляется, переходя в индигово-синие кристаллы

$$2V_2O_3 + O_2 = 4VO_2.$$

V_2O_3 образует с FeO , MnO , MgO , CaO соединения со структурой шпинели, например, $FeO \cdot V_2O_3$. При нагревании на воздухе, как и все низшие оксиды ванадия, окисляется до V_2O_5 . Проявляет характер основания. В воде, растворах щелочей и кислот (за исключением HF и HNO_3) не растворяется. Кислые растворы соединений V (+3) зеленого цвета. Раствор аммиака из кислых растворов солей V (+3) осаждает зеленый гидроксид $V(OH)_3$, который, по мере окисления, меняет цвет до коричневого. $V(OH)_3$ проявляет основной характер – в избытке щелочи не растворяется.

Соединения V (+3) более устойчивы, чем соединения V (+2). Примерами солей V (+3) могут служить двойные сульфаты: $K_2SO_4 \cdot V_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$, $Cs_2SO_4 \cdot V_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$.

V_2O_4 (или VO_2) получают при слабом нагревании V_2O_5 с углем, сплавлением V_2O_5 со щавелевой кислотой, медленным окислением на воздухе V_2O_3 . Цвет V_2O_4 зависит от способа получения и изменяется от голубого до практически черного. V_2O_4 амфотерен. Степень окисления ванадия в V_2O_4 по данным исследований +3 и +5, т. е. более точная формула $V_2O_3 \cdot V_2O_5$. При растворении V_2O_4 и его гидратов в кислотах-неокислителях образуются синие растворы солей ванадила (VO_2^+) и диванадила ($V_2O_4^{2+}$).



Растворы солей ванадила получают восстановлением растворов V_2O_5 в H_2SO_4 амальгамой Bi, азотистой кислотой, SO_2 и некоторыми органическими веществами. Выделенные из раствора гидратированные соли ванадила имеют синюю окраску, безводные соли – зеленые или бурые. Из растворов с избытком H_2SO_4 при упаривании кристаллизуются светло-синие гидраты кислого ванадилсульфата $2VOSO_4 \cdot H_2SO_4$, который называют диоксотрисульфатодиванадиевой (IV) кислотой $H_2[V_2O_2(SO_4)_3]$. Производные этого соединения, например $K_2SO_4 \cdot 2VOSO_4$, – светло-синие квадратные пластинки. Другой ряд двойных солей типа $Me_2SO_4 \cdot VOSO_4$ можно рассматривать как оксодисульфатованадаты (IV) $Me_2[VO(SO_4)_2]$. При действии оснований на растворы солей ванадила выпадает грязно-серый гидрат $V_2O_4 \cdot 7H_2O$. При растворении V_2O_4 в щелочах образуются растворы солей тетраванадистой кислоты $H_2V_4O_9$, называемых ванадистокислыми, ванадитами или гипованадатами. Ванадиты натрия и калия растворяются в воде. $H_2V_4O_9$ в свободном состоянии не получена.

V_2O_5 (или ванадиевый ангидрид) – наиболее важное из всех соединений ванадия, исходное вещество для получения большинства соединений ванадия. Получают нагреванием метаванадата аммония на воздухе $2NH_4VO_3 = V_2O_5 + NH_3 + H_2O$.

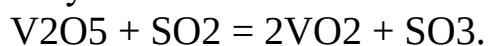
Реакцию проводят, перемешивая реакционную массу и обеспечивая хороший доступ воздуха для предотвращения восстановления V_2O_5 аммиаком до низших оксидов и нитрида. Также его получают гидролизом солей V (+5), например $VOCl_3$, с последующим обезвоживанием гидрата $V_2O_5 \cdot nH_2O$. Нагревание на воздухе или в кислороде порошкообразного ванадия, низших его оксидов и карбида тоже ведет к получению V_2O_5 , хотя реакция обычно не протекает полностью. Образование из простых веществ сопровождается большим выделением тепла $2V + 5/2O_2 = V_2O_5 + 1591 \text{ кДж}$.

Известно две модификации V_2O_5 – аморфная и кристаллическая.

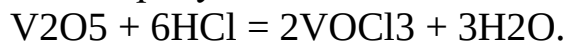
Аморфная – красный, оранжевый или желтый порошок, кристаллическая – красного цвета. Получающаяся при разложении NH_4VO_3 – аморфная модификация. В кристаллическую модификацию ее переводят, нагревая до плавления, затем охлаждая. Температура плавления V_2O_5 660°C , плотность $3,36 \text{ г/см}^3$. Плавление сопровождается выделением кислорода; наличие соединений щелочных металлов способствует разложению.

V_2O_5 негигроскопичен. Его растворимость невелика – $0,005\text{--}0,07 \%$ при 25°C по данным различных авторов. Водные растворы V_2O_5 имеют кислую реакцию. Реагируя со щелочами, дают соли. В зависимости от кислотности раствора выделяющийся в осадок гидратированный V_2O_5 имеет составы $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$, соответствующие орто-, пиро- и метаванадиевым кислотам. $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ легко образует коллоидные растворы.

V_2O_5 и ее растворы в кислой среде в ряде случаев являются окисляющими агентами. Изменение степени окисления V зависит от природы восстановителя, его концентрации и других условий. Так, SO_2 в отсутствие влаги восстанавливает V_2O_5 до VO_2



Нагревание значительно ускоряет реакцию. Эта реакция вместе со способностью VO_2 окисляться кислородом воздуха до V_2O_5 лежит в основе действия ванадиевых катализаторов в производстве H_2SO_4 . Сухой HCl в присутствии водоотнимающего вещества образует VOCl_3



В то же время концентрированная соляная кислота при нагревании растворяет V_2O_5 , давая хлор

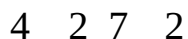
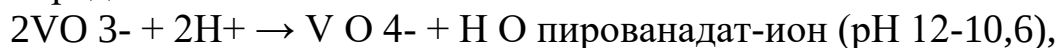


Реакция обратима. Для полного перехода V (+5) в V (+4) необходимо поддерживать высокую концентрацию HCl . В водных растворах, подкисленных серной кислотой, V (+5) легко восстанавливается амальгамой висмута до V (+4), магнием – до V (+3), цинковой амальгамой – до V (+2). Некоторые процессы восстановления, сопровождаемые последующим окислением титрованным раствором KMnO_4 , предложены для количественного определения V.

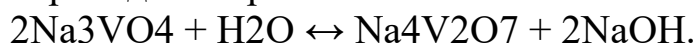
Ванадаты. Соли, в состав которых в химически связанном состоянии в качестве кислотной части входит V_2O_5 , носят название ванадатов. Обычны три типа ванадатов: орто- $3\text{Me}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ (Me_3VO_4), пиро- $2\text{Me}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ ($\text{Me}_4\text{V}_2\text{O}_7$), мета- $\text{Me}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$ (MeVO_3), где Me – ион одновалентного металла. Некоторые из ванадатов образуют кристаллогидраты.

Кроме указанных типов существуют так называемые поливанадаты. Пример – гексаванадаты – соли гексаванадиевой кислоты $\text{H}_4\text{V}_6\text{O}_{17}$ ($3\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). При обработке ортованадата натрия Na_3VO_4

возрастающим количеством соляной кислоты в конечном растворе находят ионы $[HV_6O_{17}]^{3-}$. Изменение состава ионов происходит в следующем порядке:



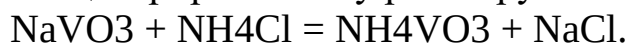
Наиболее устойчивы в растворах – метаванадаты, наименее – ортованадаты, которые разлагаются водой даже при низких температурах, переходя в пиросоли



При кипячении пиросоли переходят в метасоли $Na_4V_2O_7 + H_2O \leftrightarrow 2NaVO_3 + 2NaOH$.

Растворение V_2O_5 в растворах $NaOH$ ведет к образованию в системе V_2O_5 - $NaOH$ - H_2O твердых фаз V_2O_5 , $Na_4V_2O_7$, Na_3VO_4 , $Na_8V_2O_9 \cdot 12H_2O$ при $75^\circ C$ и V_2O_5 , $Na_2V_6O_{16} \cdot 20H_2O$, $Na_4V_2O_7 \cdot 18H_2O$, $Na_3VO_4 \cdot 10H_2O$, $Na_8V_2O_9 \cdot 30H_2O$ при $25^\circ C$.

Метаванадаты магния и щелочных металлов растворяются в воде. Метаванадат аммония NH_4VO_3 – наиболее известная ванадий содержащая соль. Применяется для получения V_2O_5 и других ванадийсодержащих солей. NH_4VO_3 получают, добавляя большой избыток NH_4Cl к концентрированному раствору $NaVO_3$



Кроме того, NH_4VO_3 можно получить, растворяя V_2O_5 в избытке раствора аммиака с последующим добавлением спирта (NH_4VO_3 не растворяется в спирте). В 100 мл воды при $12,5^\circ C$ растворяется 0,44 г NH_4VO_3 . Выделение ванадия из раствора в виде метаванадата аммония дает возможность отделить его от большинства примесей.

Метаванадат натрия $NaVO_3$ получают растворением V_2O_5 в избытке раствора Na_2CO_3 или $NaOH$. Соль содержит две молекулы воды. Безводный

$NaVO_3$ получают обжигом V_2O_5 (или другого продукта, содержащего V_2O_5) с $NaCl$ в присутствии воздуха. V_2O_5 интенсифицирует реакцию $NaCl$ с O_2 : $2NaCl + 1/2O_2 = Na_2O + Cl_2$.

При обжиге ванадийсодержащих материалов с $NaCl$ оба продукта – Na_2O и Cl_2 – способствуют вскрытию этих материалов. Метаванадат натрия получается в результате реакции $Na_2O + V_2O_5 = 2NaVO_3$.

Если исходный материал содержит Fe , Mn и т. д., то при водном выщелачивании они остаются в осадке в виде гидроксидов, т. к. раствор содержит значительное количество щелочи. Растворимость $NaVO_3$ в 100 мл воды – 21,1 г при $25^\circ C$.

Метаванадат кальция $\text{Ca}(\text{VO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ получают кипячением раствора, содержащего NH_4VO_3 и CaCl_2 . Соль лимонно-желтого цвета, растворимость в воде 0,0091 при 20°C и 0,125 моль/л при 70°C. Для нее характерно образование пересыщенных растворов, из которых она высаливается спиртом.

На практике ванадий осаждают в виде ортованадата кальция $3\text{CaO} \cdot \text{V}_2\text{O}_5$, добавляя избыток известкового молока или оксида кальция.

Метаванадат железа (II) $\text{Fe}(\text{VO}_3)_2$ получают действием соли Fe (II) на раствор KVO_3 . $\text{Fe}(\text{VO}_3)_2$ мало растворим в воде (1,8 г в 100 мл при 100°C) и растворах NaCl , но хорошо – в HCl .

Пероксованадаты. При действии H_2O_2 на растворы метаванадатов щелочных металлов образуются соли типа $\text{Me}_4\text{V}_2\text{O}_x$ ($x > 7$) – производные надванадиевой кислоты $\text{H}_4\text{V}_2\text{O}_x$, не выделенной в свободном состоянии. Желтые растворы пероксованадатов в сильноокислой среде приобретают красный цвет, что используется в аналитической химии. Пероксованадаты не растворяются в спирте, при воздействии H_2SO_4 на их растворы разрушаются, выделяя кислород.

Ортованадаты Na_3VO_4 , K_3VO_4 и др. можно получить, сплавляя V_2O_5 с карбонатом или гидроксидом металла. Хорошо растворимы только соли натрия и калия.

При сливании растворов солей Fe (III) и ванадата калия или натрия образуется желтый осадок ортованадата железа (III) $\text{FeVO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Безводный ортованадат железа можно получить, действуя на синий раствор сульфата диванадила $\text{V}_2\text{O}_2(\text{SO}_4)_2$ раствором железоаммонийных квасцов. После нейтрализации аммиаком выпадают осадки гидратного типа, имеющие различный состав и окраску. Вследствие окисления железом ванадия (IV) сначала выделяется желтый безводный FeVO_4 , потом – гидроксид ванадия (IV), гидроксид железа (II) и их смеси.

Растворимость FeVO_4 , прокаленного при 750°C, – 1,5 г в 100 мл воды при 100°C.

Гетерополисоединения ванадия. Ванадий образует ряд гетерополи- солей: ванадомолибдатов, ванадовольфраматов, ванадофосфатов, уранилванадатов и т. д. Гетерополисолям ванадия и молибдена соответствует формула: $m\text{Me}_2\text{O}(\text{MeO}) \cdot n\text{V}_2\text{O}_5 \cdot p\text{MoO}_3 \cdot q\text{H}_2\text{O}$ (Me – NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ba^{2+} и др.; $m = 2, 3$;

$n = 1, 3$; $p = 4, 5$; $q = 4-48$).

Ванадовольфраматам – $m\text{Me}_2\text{O}(\text{MeO}) \cdot n\text{V}_2\text{O}_5 \cdot p\text{WO}_3 \cdot q\text{H}_2\text{O}$ (Me – NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ag^+ , Ba^{2+} , Cu^{2+} , Sr^{2+} и др.; $m = 2, 3$; $n = 1, 3$; $p = 4, 6, 14$; $q = 6-24$).

Гетерополисоединения ванадия образуются только в кислых растворах. Для этих соединений характерен ряд общих свойств. Так, им соответ-

ствуют довольно сильные кислоты, они хорошо растворяются в воде и эфире. Они, как правило, хорошо кристаллизуются. Труднее других растворяются соли NH_4^+ , Cs^+ , Ag^+ , Hg^{2+} , а также сложных и органических катионов. Гетерополисоединения легко разрушаются щелочами. Устойчивость по отношению к кислотам различна. Окраска от желтой до красно-фиолетовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранова, А.В.** Материалы электронных средств: учеб. пособие / А.В. Баранова, Т.В. Калинина. – Н.Новгород: НГТУ, 2013. – 179 с.
2. **Баранова, А.В.** Электроника: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А.В. Баранова, Н.П. Ямпурин, В.И. Обухов. – М.: ИЦ «Академия», 2011. – 240 с.
3. **Казарновский, Д.М.** Радиотехнические материалы / Д.М. Казарновский, С.А. Яманов. – М.: Высшая школа, 1972.
4. **Масленников, М.Ю.** Справочник разработчика и конструктора РЭА. Элементная база: в 2-х книгах / М.Ю. Масленников, В.А. Соболев, Г.В. Соколов и др. – М.: ИТАР-ТАСС, 1993.
5. Материалы микроэлектронной техники: учеб. пособие / под ред. проф. В.М. Андреева. – М.: Радио и связь, 1989.
6. **Мозберг, Р.К.** Материаловедение. – М.: Высшая школа, 1991. – 447 с.
7. **Пасынков, В.В.** Материалы электронных средств. – М.: Высшая школа, 1980.
8. **Петров, К.С.** Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: учеб. пособие. – С.-Пб: «Питер», 2003.
9. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: справочник. / Под ред. к.т.н., доцента Э.Т. Романычева. – М.: Радио и связь, 1989.
10. **Рычина, Т.А.** Устройства функциональной радиоэлектроники и электродинамические элементы: учебник для вузов. / Т.А. Рычина, А.В. Зеленский. – М.: Радио и связь. 1989. – 352 с.
11. **Справочник по электротехническим материалам.** В 3 т. Т. 1 : согласовано с Государственной службой стандартизации справочных данных / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. - 3-е изд., перераб. – Москва : Энерго- атомиздат, 1986. - 368 с. : ил.
12. **Справочник по электротехническим материалам.** В 3 т. Т. 2 : согласовано с Государственной службой стандартизации справочных данных / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. - 3-е изд., перераб. – Москва : Энерго- атомиздат, 1987. - 464 с. : ил.
13. **Справочник по электротехническим материалам.** В 3 т. Т. 3 : согласовано с Государственной службой стандартизации справочных данных / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. - 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энерго- атомиздат, Ленинградское отделение, 1988. - 728 с. : ил.
14. **Ямпурин, Н.П.** Транзисторы (функционирование, схемы, применение): учебное пособие. / Н.П. Ямпурин, А.В. Баранова, А.Е. Вязовов. – Н.Новгород: НГТУ, 2001. – 114 с.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Материалы электронной техники
Методические указания по организации самостоятельных работ
Направление подготовки 04.04.01 Химия
Химия современных материалов и технологий

Ставрополь
2026

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В курсе материаловедения электронной техники понимание диаграмм состояния двухкомпонентных систем является одним из основных и важнейших. Современная интегральная схема состоит из многих различных материалов, находящихся в контакте друг с другом. Поэтому разработка интегральных схем и технологии их производства требует знания диаграмм состояния для оценки совместимости материалов схемы в условиях их изготовления и эксплуатации. Знание диаграмм фазовых равновесий используется в изучении технологии полупроводниковых материалов и физико-химических основ легирования полупроводников.

При рассмотрении равновесия фаз в гетерогенных системах целью анализа является установление взаимосвязей между параметрами, характеризующими состояние системы. Основными параметрами гетерогенного равновесия являются температура, давление и концентрация в различных фазах. В системах, образованных конденсированными фазами, роль давления сравнительно невелика, поэтому основными параметрами будут температура и концентрация одного из компонентов.

Свойства сплава определяются состоянием сплава и его микроструктурой. Состояние сплава определяется:

- фазами, присутствующими в сплаве;
- составом каждой фазы;
- весовой (массовой) долей каждой фазы (в %).

Микроструктура определяется характерным размером (порядка нанометров, микрометров, миллиметров) и морфологией фаз. Под морфологией понимают форму твердых фаз в материале (например, глобулы, диски, столбики) - рис. 1. Самый простой и распространенный метод изучения микроструктуры – оптическая металлография.



Рис. 1. Морфология фаз в материале

1. Основные фазы в сплавах

Рассмотрим двойную металлическую систему А–В. В жидком состоянии обычно существует полная взаимная растворимость компонентов друг в друге. При затвердевании возможны следующие три

варианта взаимодействия компонентов А и В:

- атомы А и В сильно отталкивают друг друга; в результате формируется механическая смесь зерен двух чистых компонентов, кристаллизующихся порознь, т. е. $A + B$;

- силы взаимодействия (отталкивания и притяжения) между атомами А и В малы; в результате атомы компонента В частично или полностью растворяются в решетке А и наоборот. В этом случае образуются ограниченные или неограниченные твердые растворы, причем в первом случае образуются также механические смеси ограниченных твердых растворов;

- атомы А и В испытывают сильное взаимное притяжение; в этом случае могут формироваться химические соединения, в том числе интерметаллиды (в системах металл–металл).

Таким образом, в сплавах могут образовываться следующие основные фазы: жидкие растворы, твердые растворы, химические соединения. Сплав может быть однофазным (гомогенным) или многофазным (гетерогенным).

1.1. Твердые растворы

В жидком состоянии большинство сплавов, применяемых в технике, представляют собой химически однородные жидкости, т. е. жидкие растворы. При затвердевании в ряде таких сплавов однородность сохраняется, следовательно, сохраняется растворимость компонентов в твердом состоянии.

Твердые растворы – это кристаллические фазы, имеющие решетку основного компонента А (растворителя), в которой размещены атомы другого (или других) компонентов (В и т. д.).

Твердые растворы обозначают греческими буквами, например: $\alpha = A(B)$, где А – растворитель, В – растворяемый компонент. Схематически микроструктура твердого раствора (однофазный сплав) показана на рис. 2.

Различают твердые растворы замещения и твердые растворы внедрения. При образовании твердого раствора замещения атомы растворенного компонента В статистически случайно занимают узлы решетки растворителя А. При этом решетка искажается, что приводит к изменению параметра решетки и возникновению напряжений.

Твердые растворы внедрения образуются в том случае, когда атомы растворенного компонента В внедряются в межузельные промежутки растворителя А. При этом атомы компонента В занимают не любые междоузлия, а только те, которые имеют достаточный свободный объем. В таких пустотах могут разместиться только атомы с очень малыми размерами.

Наименьшие размеры имеют атомы неметаллов (водород, азот, углерод, бор); именно они образуют с металлами твердые растворы внедрения. Но и у этих элементов размер атомов превышает размеры междоузлий в решетке металлов. Поэтому при образовании твердого раствора внедрения решетка металла искажается и возникают напряжения. При этом тип решетки не изменяется. Максимальная концентрация твердого раствора внедрения не может быть высокой: обычно она не превышает 1÷2 вес. %. Таким образом, твердые растворы внедрения являются ограниченными.

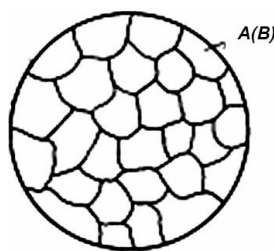


Рис. 2. Схема микроструктуры твердого раствора

Неограниченные твердые растворы образуются, если выполняются следующие условия:

- компоненты А и В имеют одинаковый тип решетки (изоморфизм);
- различие атомных радиусов (или периодов решеток) компонентов А и В не превышает 15 %;
- атомы компонентов А и В имеют одинаковую валентность;
- взаимодействие между компонентами А и В слабое, т. е. силы притяжения и отталкивания малы.

Период решетки твердого раствора **a** подчиняется закону *Вегарда*:

$$a = C_A a_A + C_B a_B ,$$

где **a_A** и **a_B** — периоды решеток компонентов А и В, **C_A** и **C_B** — их концентрации.

1.2. Химические соединения

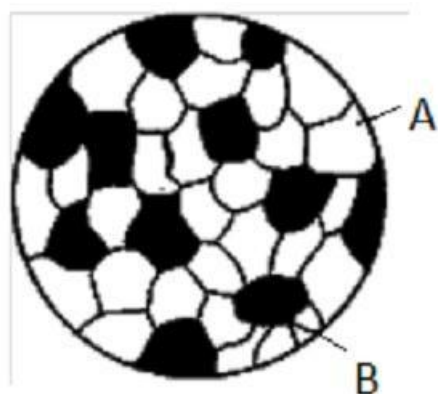
Химические соединения имеют следующие особенности, отличающие их от твердых растворов:

- соединение имеет строго определенное соотношение между числом атомов элементов А и В, соответствующее стехиометрическому составу, выраженному формулой A_mB_n ;
- соединение имеет специфическую решетку, отличную от решеток исходных компонентов;
- соединения имеют постоянную температуру плавления (диссоциации);
- свойства соединения существенно отличаются от свойств исходных компонентов; например, соединения Fe_3C имеют высокую твердость, но очень хрупкое, что связано с наличием ковалентной связи между атомами Fe и C.

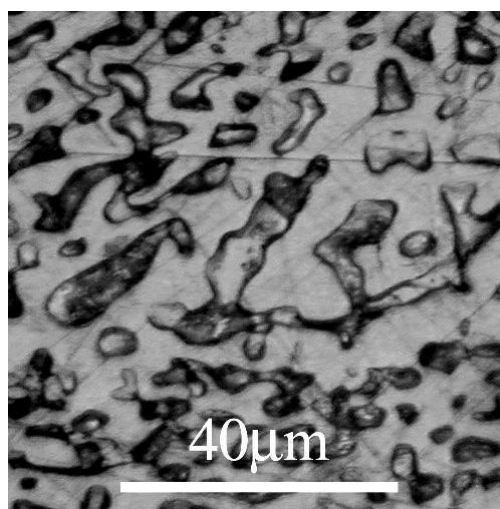
Если химическое соединение A_mB_n является устойчивым (конгруэнтно-плавящимся), т. е. не диссоциирует вплоть до температуры плавления, то его можно рассматривать как самостоятельный компонент С, способный образовывать твердые растворы с исходными компонентами А и В.

1.3. Механические смеси

Механическая смесь двух компонентов А и В образуется, если они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химические реакции друг с другом с образованием химического соединения. При таких условиях сплав будет состоять из кристаллов А и В (рис. 3 а), отчетливо выявляемой с помощью металлографии (рис. 3 б). В общем виде механические смеси обозначают: $A + B$.



а



б

Рис. 3. Микроструктура механической смеси (схема) - а; микроструктура сплава Вt-40 вес.

% Cd - 6

Образующими смесь фазами могут быть элементы и соединения, но чаще ими являются твердые растворы. Образование смесей происходит при выделении второй фазы из пересыщенных твердых растворов, вследствие эвтектических или эвтектоидных превращений.

2. Диаграммы состояния двойных сплавов

Диаграмма состояния сплава – это графическое изображение состояния сплава в зависимости от температуры и химического состава. В каждой точке диаграммы можно определить состояние сплава, а именно:

- фазовый состав сплава (тип и число фаз);
- химический состав каждой фазы;
- массовую долю каждой фазы (в двухфазных областях).

Диаграмма состояния показывает только устойчивые или равновесные состояния. Поэтому диаграммы состояния называют также диаграммами фазового равновесия. При равновесии состояние сплава данного состава при данной температуре и давлении термодинамически стабильно, т. е. отсутствует стремление к изменению этого состояния во времени.

Состояние системы (сплава) определяется тремя параметрами: температура, давление и концентрация компонентов.

2.1. Правило фаз Гиббса

Состояние сплава зависит от внешних (температура, давление) и внутренних (концентрация) параметров. Это состояние характеризуется числом образовавшихся фаз, их составом (концентрацией) и отношением масс (массовых долей фаз). Закономерности изменения числа фаз в гетерогенных системах (с числом фаз ≥ 2) определяются правилом фаз Гиббса.

Правило фаз устанавливает зависимость между числом степеней свободы, числом компонентов и числом фаз. Оно выражается уравнением

$$C = K - \Phi + 2, \quad (1)$$

где C – число степеней свободы (или вариантность); K – число компонентов, образующих систему; 2 – число внешних параметров (температура и давление); Φ – число фаз, находящихся в равновесии.

Под числом степеней свободы (вариантностью системы) понимают число независимых внутренних (концентрация) и внешних (температура, давление) параметров, значение которых можно изменять без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

Если число степеней свободы $C = 0$, то это означает, что для сохранения фазового равновесия ($\Phi = \text{const}$) необходимо, чтобы все

параметры оставались постоянными, т. е. концентрация $n = \text{const}$, температура $T = \text{const}$ и давление $P = \text{const}$.

Если же число степеней свободы $C = 1$, то это означает, что для сохранения фазового равновесия ($\Phi = \text{const}$) необходимо, чтобы только один из параметров изменялся в некоторых пределах, а два других оставались постоянными.

Если принять, что все фазовые превращения в металлах и сплавах происходят при постоянном давлении ($P = \text{const}$), то число внешних факторов будет равно 1 (температура), и правило фаз примет вид

$$C = K - \Phi + 1. \quad (2)$$

Правило фаз позволяет проверять правильность построения кривых охлаждения и диаграмм состояния на тех отрезках и в тех областях, где число фаз $\Phi \geq 2$.

2.2. Построение диаграмм состояния

Диаграмму состояния системы А–В строят с помощью термического анализа в ко- ординатах температура–концентрация.

Установка для построения диаграмм состояния термическим методом показана на

рис.
4.

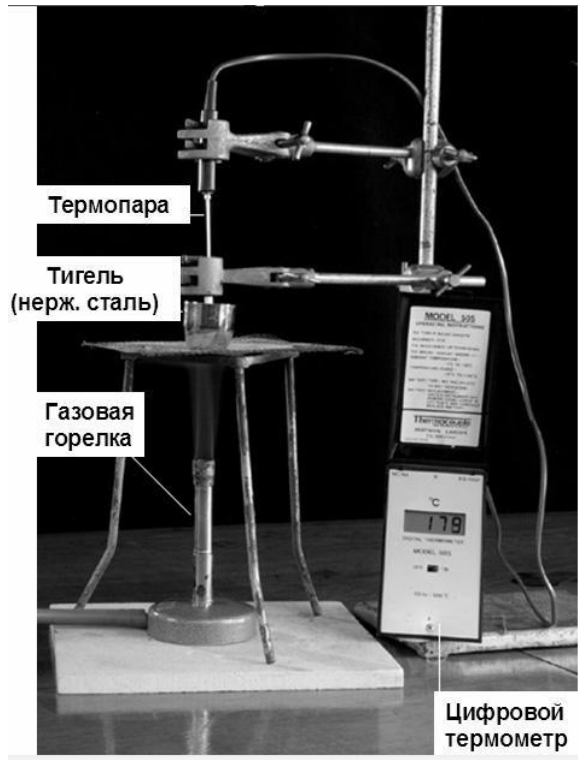


Рис. 4. Установка для изучения процесса кристаллизации с целью построения диаграмм состояния термическим методом

Температуру измеряют с помощью термопары. Термопара состоит из двух прово- лок из разных металлов, сваренных на одном конце (горячий спай). Два других конца подключены к цифровому милливольтметру, отградуированному в °С.

Рассмотрим метод построения диаграмм состояния на примере системы, образу- щей неограниченные твердые растворы. Суть метода сводится к следующему:

- готовят набор сплавов различного состава, включая чистые компоненты А и В;
- каждый состав помещают в огнеупорный тигель и нагревают в печи или с помощью газовой горелки до полного расплавления;
- после расплавления каждый состав медленно охлаждают, измеряя температуру в каждый момент времени. По этим данным строят кривые, описывающие процесс кристаллизации – кривые охлаждения (в координатах температура–время) (рис. 5 и 6 а);
- на каждой кривой находят точки остановки температуры или точки перегиба

(рис. 5 и 6а). Это так называемые критические точки, т. е. температуры, при которых происходят фазовые превращения. Причиной остановки температуры на кривой охлаждения чистого металла (рис. 5а) является выделение скрытой теплоты кристаллизации, компенсирующее отвод тепла при охлаждении. Этим же эффектом объясняется замедление падения температуры (перегиб на кривой охлаждения) при затвердевании сплава (рис. 5б);

- поскольку диаграмма состояния, по определению, описывает равновесные состояния (фазы), не зависящие от времени, то шкалу времени на кривых охлаждения можно отбросить ;

- критические точки для каждого состава наносят на диаграмму в координатах температура – концентрация (рис. 6б);
- линия, проведенная по точкам начала кристаллизации, называется линией ликвидус. Выше этой линии сплав находится в жидком состоянии. Линия, проведенная по точкам конца кристаллизации, называется линией солидус. Ниже линии солидус сплав находится в твердом (кристаллическом) состоянии (рис. 6 б). Между линиями ликвидус и солидус сплав находится в двухфазном состоянии: жидкость + кристалл. Полученная картина и является диаграммой состояния данной системы (рис. 6 в).

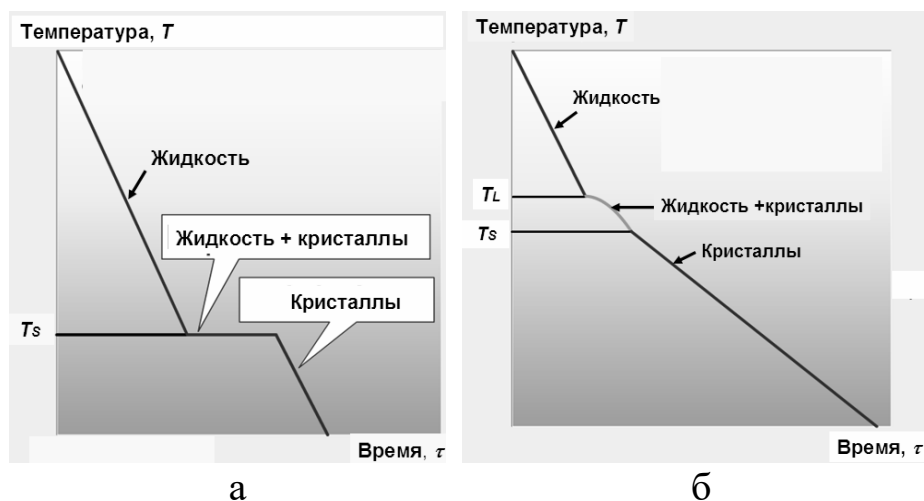


Рис. 5. Кривые охлаждения: а – для чистого металла; б – для сплава со структурой твердого раствора. T_L и T_S – температуры начала и конца кристаллизации, соответственно

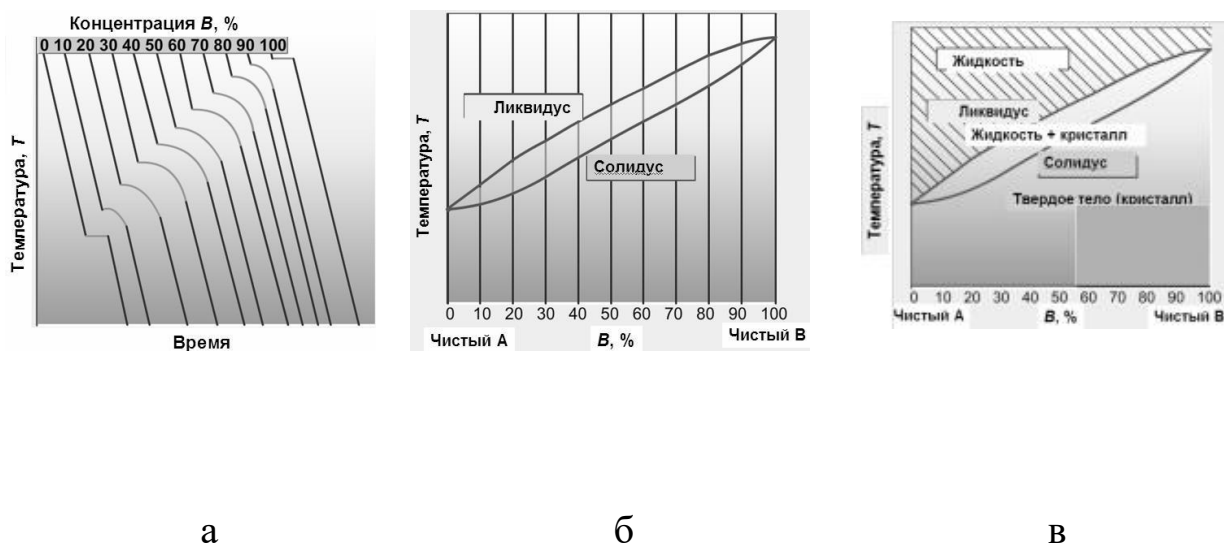


Рис. 6. Построение диаграммы состояния сплава (на примере сплава, образующего неограниченные твердые растворы)

2.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих

механические смеси чистых компонентов (1-го рода)

Исходные данные:

- компоненты: химические элементы А и В ($K=2$);
- оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений;
- фазы: жидкость L, кристаллы А и В; максимальное число фаз $\Phi_{\max} = 3$.

Общий вид диаграммы состояния приведен на рис. 7. Точки А и В – температуры плавления (кристаллизации) чистых компонентов А и В. Линия АСВ – линия ликвидус (начало кристаллизации). Выше этой линии все сплавы находятся в жидком состоянии. Линия DCE – линия солидус (конец кристаллизации). Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии. Между линиями ликвидус и солидус сплавы находятся в двухфазном состоянии: жидкость + кристаллы А или жидкость + кристаллы В.

На рис. 8 показаны кривые охлаждения сплавов I, II, III с различным содержанием компонента В, восстановленные по диаграмме состояния. Температуры начала кристаллизации у них различные (точки 1, 2 и 1, соответственно), но заканчивают кристаллизацию они при одной и той же температуре t_E (точка 2', линия DCE), а сплав II кристаллизуется только при t_E .

Сплав II является особым. Кривая охлаждения этого сплава аналогична кривым охлаждения чистых металлов. После отрезка 0–2 (охлаждение жидкого сплава) имеется только одна температурная остановка 2–2', т. е. кристаллизация происходит при постоянной температуре t_E , меньшей, чем у компонентов А и В. Это объясняется отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии: происходит длительное перераспределение хорошо перемешанных в расплаве атомов элементов до тех пор, пока в определенных участках (с энергетической флуктуацией) не будет достигнута их концентрация, необходимая для формирования зародыша размером выше критического ($r > r_{кр}$). Как только перераспределение элементов полностью закончится, произойдет их одновременная кристаллизация при постоянной температуре t_E ($C = 0$), причем в одном участке ведущей фазой является металл А, а в другом – металл В. Рост зародыша ведущей фазы способствует обогащению окружающей его жидкости атомами другого компонента, и в ней происходит образование его кристаллов. Так, попеременно жидкость то в одном месте, то в другом, пересыщаясь атомами А и В, кристаллизуется с образованием механической смеси их кристаллов.

Поскольку температура затвердевания данного сплава заметно ниже, чем исходных элементов, то диффузионное движение атомов затруднено. Поэтому формируется мелко-зернистая однородная механическая смесь чистых компонентов (зерен) А и В.

Механическая смесь двух или более компонентов, кристаллизующаяся одновременно из жидкого сплава определенного химического состава при постоянной и минимальной для данной системы температуре, называется *эвтектикой*. Химический состав эвтектической смеси определенных компонентов всегда одинаков, он

определяется точкой C . Эвтектику или эвтектическую структуру обозначают: $E = A + B$.

Она образуется по эвтектической реакции $L_C \leftrightarrow A + B$ при эвтектической концентрации (точка C) и эвтектической температуре t_E .

Сплав II называют эвтектическим («эвтектика» – от др. греч.: легкоплавкий). Сплавы I (левее точки C) и III (правее точки C)

называются доэвтектическими и за-

эвтектическими соответственно. Эти сплавы кристаллизуются в интервалах температур, соответствующих точкам перегиба 1 и 2 на кривых охлаждения (рис. 8). В точках 1 образуются кристаллы того элемента, которому легче сформировать устойчивый зародыш ($r > r_{кр}$). Это легче сделать тому металлу, концентрация которого выше эвтектической. В доэвтектических сплавах избыточным является металл A , в заэвтектических – металл B . Постепенная кристаллизация избыточного металла уменьшает его концентрацию в остатках жидкой фазы. При этом происходит диффузионное разделение атомов, нерастворимых друг в друге в твердом состоянии. При температуре t_E перераспределение заканчивается, остатки жидкой фазы достигнут эвтектической концентрации (точка C), и на отрезках 2–2' произойдет совместная кристаллизация компонентов по реакции $L_C \rightarrow A + B$. Таким образом, в твердом состоянии сплавы данной системы делятся на три вида:

(I) доэвтектические: концентрация B – в интервале от 0 % до точки C ; структура – зерна $A +$ эвтектика ($A+B$);

(II) эвтектический: концентрация B – точка C ; структура – эвтектика ($A+B$);

(III) заэвтектические: концентрация В – от точки С до 100%; структура – зерна В+эвтектика (А+В).

Последовательность формирования микроструктуры сплавов I и II показана на рис. 8. Схема финишных микроструктур показана на рис. 9.

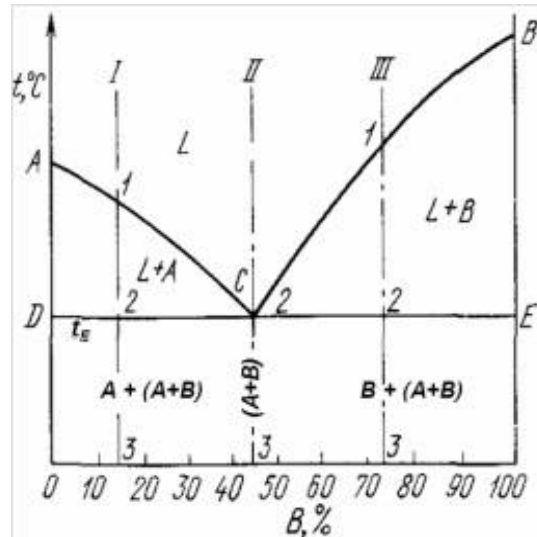


Рис. 7. Диаграмма состояния сплава, образующего механическую смесь чистых компонентов

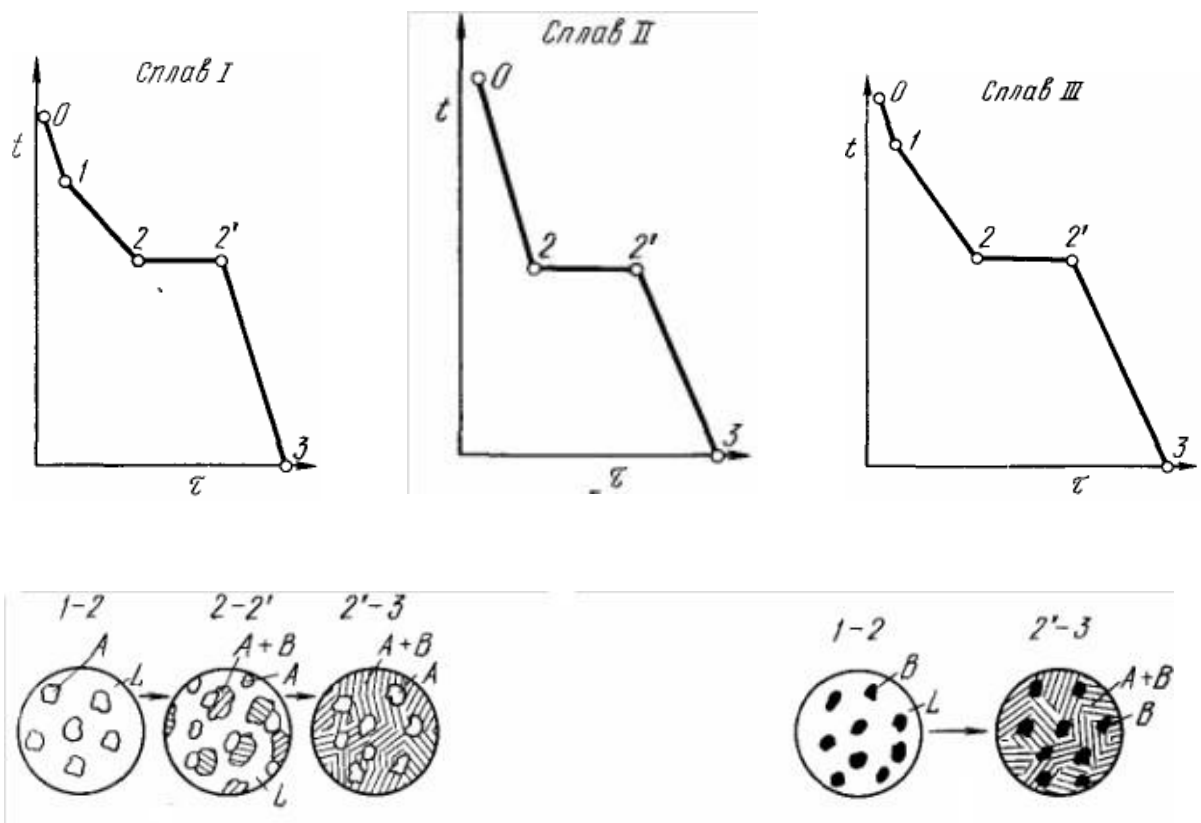


Рис. 8. Кривые охлаждения доэвтектического (I),
эвтектического (II) и заэвтектического (III) сплавов. Внизу
приведены схемы структур доэвтектического (слева) и
заэвтектического (справа) сплавов

Проверим правильность построения кривых охлаждения и диаграммы состояния с помощью правила фаз

$$C = K - \Phi + 1$$

на примере сплава I:

- отрезок 1–2: $C = 2 - 2 + 1 = 1$, следовательно, температура T изменяется;
- отрезок 2–2': $C = 2 - 3 + 1 = 0$, следовательно, температура $T = \text{const}$;
- отрезок 2'–3: $C = 2 - 2 + 1 = 1$, следовательно, температура T изменяется.

Таким образом, кривая охлаждения построена правильно.

Структурные составляющие сплава. Следует различать фазовый и структурный состав сплавов. Структурными составляющими называют отдельные структурно обособленные части сплава, имеющие характерное строение. Для данной системы твердыми фазами являются зерна А и В, а структурными составляющими – зерна А, зерна В и эвтектика (А+В).

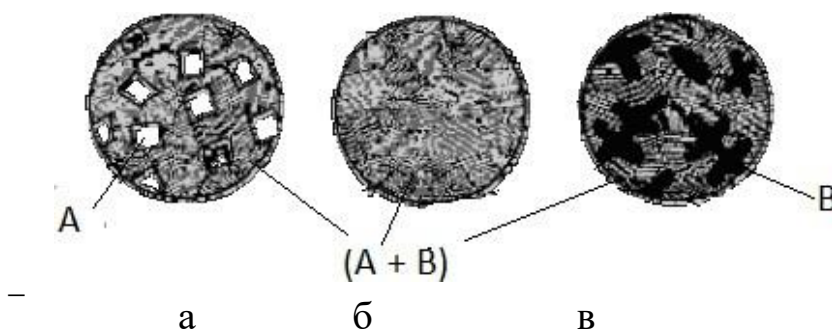


Рис. 9. Схема микроструктур сплавов, образующих механические смеси чистых компонентов: а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического

2.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы (2-го рода)

Напомним условия образования неограниченных твердых растворов:

- компоненты имеют одинаковый тип решетки (изоморфизм);
- размеры атомов компонентов отличаются не более, чем на 15 %;
- компоненты имеют одинаковую валентность.

Исходные данные:

- компоненты: А, В ($K = 2$);
- оба компонента неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химических соединений;
- фазы: жидкий сплав L, твердый раствор α .

Диаграмма состояния показана на рис. 10. Точки А и В –

температуры плавления (кристаллизации) чистых компонентов А и В. Линия AmB – линия ликвидус, линия AnB – линия солидус. В системах данного типа все сплавы кристаллизуются одноступенчато. Кривая охлаждения, описывающая процесс кристаллизации, показана на рис. 11. На отрезке 0–1 монотонно охлаждается жидкий сплав L. В точке 1 (на линии ликвидус) зарождаются первые кристаллы α , на отрезке 1–2 сплав находится в двухфазном состоянии L+ α , а при достижении линии солидус (точка 2) кристаллизация заканчивается. Поскольку растворимость компонентов в твердом состоянии неограниченна и их решетки одноступенчатны, то не имеет значения, на базе какого элемента образован твердый раствор. Поэтому между линиями ликвидус и солидус сплавы находятся в двухфазном (L+ α) состоянии.

Проверим правильность построения кривой охлаждения (рис. 11) с помощью правила фаз. На отрезке 1–2: $C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$. Следовательно, на данном отрезке температура Т изменяется, что и требовалось подтвердить.

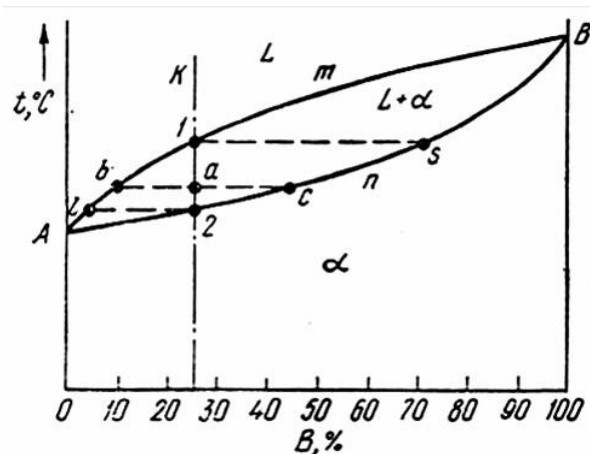


Рис. 10. Диаграмма состояния сплава, образующего неограниченные твердые растворы

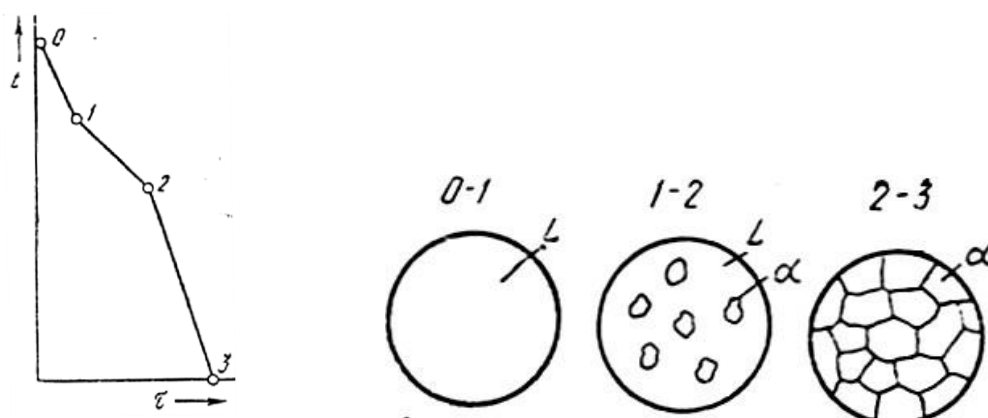


Рис. 11. Кривая охлаждения и схема формирования структур сплава, образующего неограниченные твердые растворы

2.5. Правило отрезков и правило рычага

Рассмотрим диаграмму состояния Cu-Ni с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (рис. 12). Выберем две рабочих точки на диаграмме состояния: А и В. Точка А расположена ниже линии солидус, и состояние сплава полностью определено: сплав на 100 % состоит из одной фазы (α – твердый раствор) и имеет состав 40 % Cu – 60 % Ni (вес. %). Полностью известно состояние сплава и в любой точке выше линии ликвидус (жидкость).

Теперь рассмотрим точку В. Из диаграммы состояния видно, что сплав состоит из двух фаз: L и α . Однако концентрация Ni в каждой фазе и их весовая (массовая) доля неизвестны. Эти величины находят с помощью правила отрезков (концентрация) и правила рычага (массовая доля).

Правило отрезков. Через выбранную рабочую точку В (см. рис. 13) проводят горизонтальную прямую (изотерму) до пересечения с линиями ликвидус и солидус. Эту линию называют *конодой*.

Правило отрезков:

- точка а на линии ликвидус дает концентрацию Ni в жидкости: $C_L = 32$ вес. % Ni;
- точка b на линии солидус дает концентрацию Ni в твердой фазе (в α – твердом растворе): $C_\alpha = 43$ вес. % Ni.

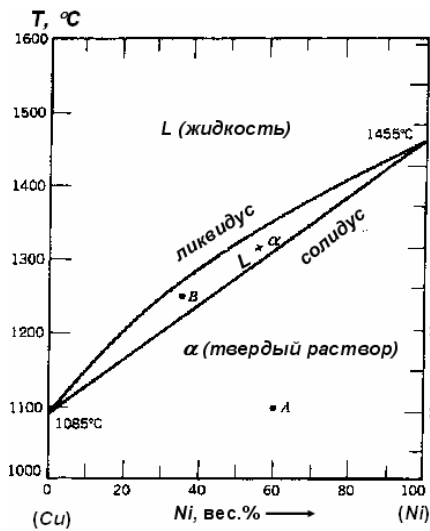


Рис. 12. Диаграмма состояния Cu-Ni

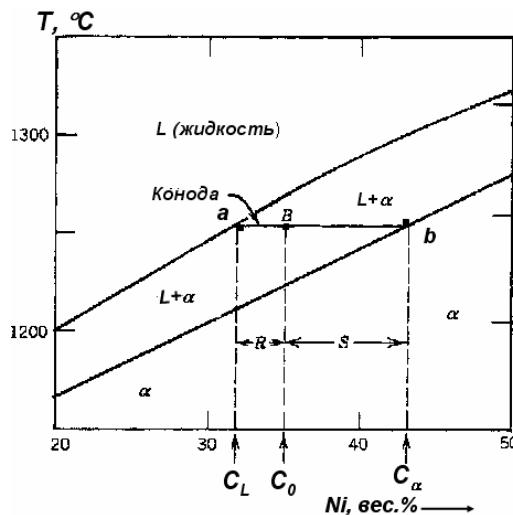


Рис. 13. Диаграмма состояния Cu-Ni (к правилу отрезков и правилу рычага)

Правило рычага. Используем то же построение, что и для правила отрезков (рис. 13). Пусть концентрация Ni рабочей точке В равна C_0 . Рабочая точка В (точка опоры) делит коноду ав (рычаг) на два плеча аВ и Вb.

Применим для коноды условие равновесия рычага (рис. 14): отношение масс обратно пропорционально отношению длин плеч рычага:

$$\frac{m_\alpha}{m_L} = \frac{\overline{Bb}}{\overline{aB}} = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_0}, \quad (3)$$

где m_α и m_L – массы α – твердого раствора и жидкости, соответственно. Массовая доля α – твердого раствора будет равна

$$W_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}}{m_{\alpha} + m_L} = \frac{aB}{C_{\alpha} - C_L} = \frac{C_0 - C_L}{C_{\alpha} - C_L} . \quad (4)$$

Массовая доля жидкости будет равна

$$W_L = \frac{m_L}{m_{\alpha} + m_L} = \frac{Bb}{ab} = \frac{C_{\alpha} - C_0}{C_{\alpha} - C_L} . \quad (5)$$

Правило отрезков и правило рычага справедливы для любой двухфазной области, независимо от типа диаграммы состояния.

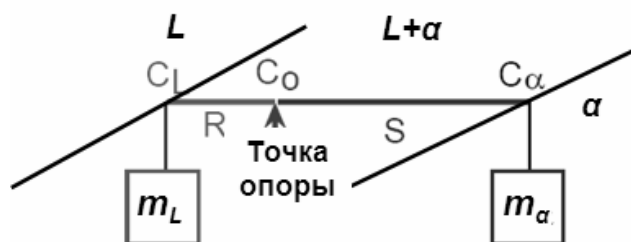


Рис. 14. Механическая аналогия, поясняющая правило рычага

Задача 1.

Определить массовые доли обеих фаз для точки В (рис. 13).

Решение. В точке В : $C_0 = 35\% \text{Ni}$; $C_\alpha = 43\% \text{Ni}$; $C_L = 32\% \text{Ni}$ (вес. %).

Подставляя эти данные в формулы (4) и (5) получим:

$$W_\alpha = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{35 - 32}{43 - 32} = 0,27 \text{ и } W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 0,73.$$

2.7. Диаграмма состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы и эвтектику (3-го рода)

Исходные данные:

- компоненты: А, В ($K = 2$);
- оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограничено – в твердом состоянии и не образуют химических соединений;
- фазы: жидкий сплав L , ограниченные твердые растворы $\alpha = A(B)$ и $\beta = B(A)$.

Диаграмма состояния (с эвтектикой) показана на рис. 15. Линии АЕВ и АДЕСВ – линии ликвидус и солидус, соответственно; линия DEC – эвтектическая. В сплавах данного типа существует некоторая взаимная растворимость компонентов А и В в твердом состоянии. Поэтому при кристаллизации из жидкости вместо зерен чистых компонентов А и В (см. п. 2.3, рис. 8) образуются зерна ограниченных твердых растворов на основе А и В, т. е. $\alpha = A(B)$ и $\beta = B(A)$.

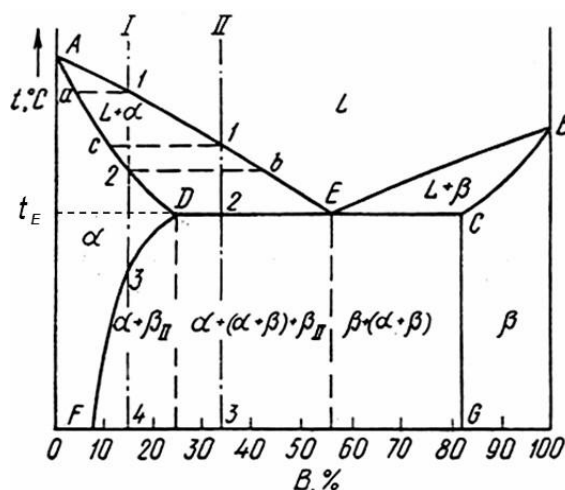


Рис. 15. Диаграмма состояния сплава с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

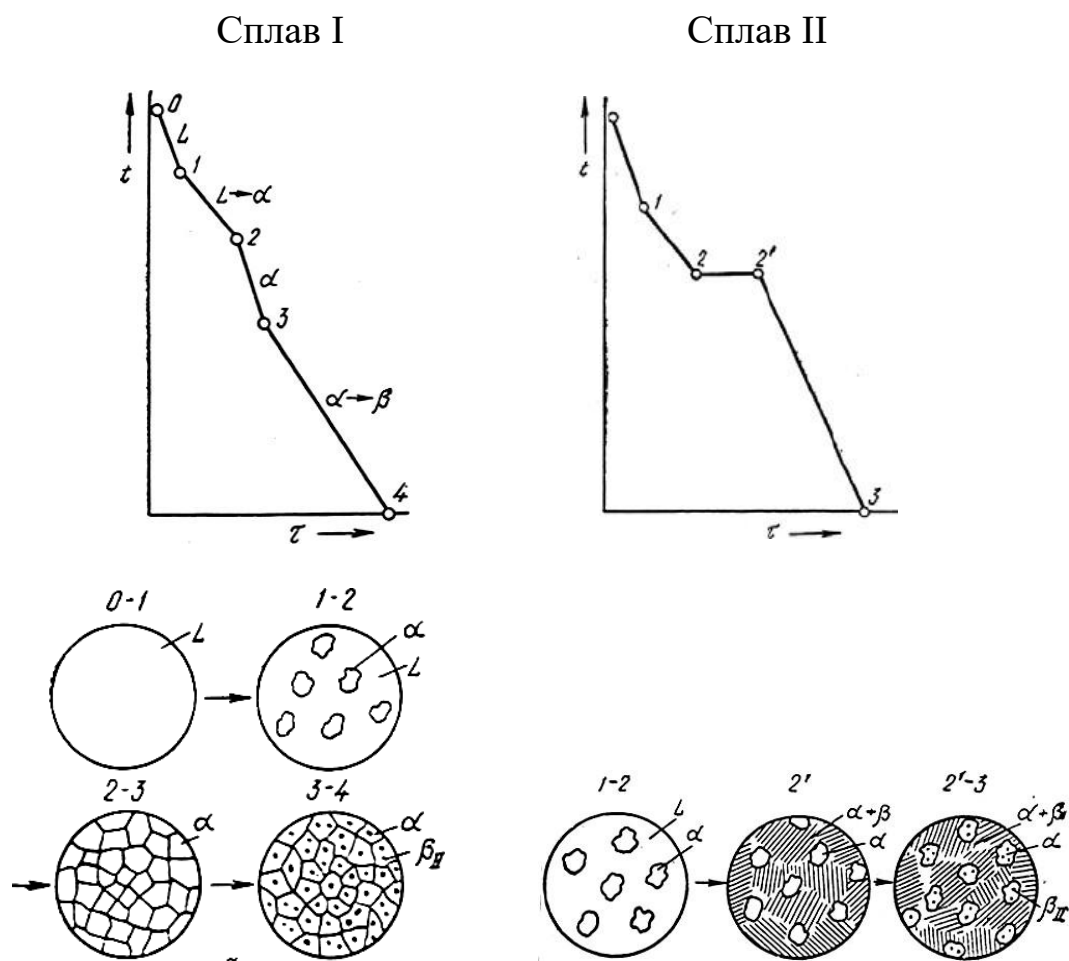


Рис. 16. Кривые охлаждения и схемы структур сплавов I и II

Области существования α - и β -твердых растворов расположены около вертикалей A и B, соответственно (рис. 15). Предельная растворимость B в A, т. е. максимальная концентрация B в α -твердом растворе, зависит от температуры и определяется линией DF, а предельная растворимость A в B, т. е. максимальная концентрация A в β -твердом растворе, определяется линией CG. Эти линии называются сольвус – линиями или кривыми растворимости. Точка D определяет максимальную концентрацию компонента B в α -твердом растворе (25 вес. % B). В свою очередь, т. С определяет максимальную концентрацию компонента A в β -твердом растворе (100 – 82 = 18 вес. % A).

Сплавы, находящиеся между линиями DF и CG, лежат за пределами растворимости и являются двухфазными, состоящими из механической смеси $\alpha + \beta$. Эти двухфазные сплавы принято делить на:

- внеэвтектические: слева от точки D (в том числе, сплав I) и справа от точки C;
- доэвтектические: концентрация B – от точки D до точки E (сплав II);
- эвтектический: концентрация точки E;
- заэвтектические: концентрация B – от точки E до точки C.

Рассмотрим процессы кристаллизации сплавов I и II.

Кристаллизация сплава I начинается в точке 1 (линия ликвидус) и заканчивается в точке 2 (линия солидус). Кривая охлаждения и схема структур этого сплава показана на рис. 16. На отрезке 1–2 из жидкого сплава L выделяются и растут кристаллы α –твердого раствора. Концентрация B в растущих зернах α – фазы растет по линии солидус (a–2), а в жидкости L – по линии ликвидус (1–b). В точке 2 кристаллизация заканчивается, и полученные кристаллы должны иметь (для равновесной кристаллизации) концентрацию ис-

ходной жидкости. На отрезке 2–3 превращения отсутствуют. Ниже точки 3 α –твердый раствор является пересыщенным и выделяет избыточные атомы В. В результате внутри зерен α –твердого раствора образуются кристаллы β – твердого раствора по реакции $\alpha \rightarrow \beta_{II}$. Эти кристаллы называют вторичными, поскольку они выделяются из твердого раствора, в отличие от первичных, выделяющихся из жидкости. Их обозначают символом β_{II} . Процесс выделения вторичных кристаллов называется *вторичной кристаллизацией*.

Сплав с концентрацией В левее точки F не будет иметь вторичных выделений β_{II} , т. е. будет иметь структуру α –твердого раствора.

На рис. 15 линия CG, в отличие от линии DF, изображена вертикальной, т. е. растворимость А в В не зависит от температуры. Поэтому вторичные выделения α –твердого раствора ниже линии ВС отсутствуют. Такие выделения возникли бы, если бы линия DF была наклонена вправо, т. е. растворимость А в В уменьшалась бы с понижением температуры.

Кристаллизация сплава II. Сплавы типа II называются доэвтектическими. Кривая охлаждения и схемы структур такого сплава показаны на рис. 16, справа. На отрезке 1–2 из жидкости выделяются и растут кристаллы α –твердого раствора. Концентрация В в α изменяется по линии солидус (растет от точки с до точки D). За счет образования α –зерен оставшаяся жидкость обогащается компонентом В по линии ликвидус (от точки 1 до точки E). В точке 2 оставшаяся жидкость достигает горизонтальной линии DCE (эвтектическая температура t_E), и концентрация В в жидкости соответствует эвтектической (точка E). В этих условиях на участке 2–2' оставшаяся жидкость кристаллизуется по эвтектической реакции:



где α_D – α –твердый раствор состава точки D, β_C – β –твердый раствор состава точки C. В общем виде эвтектическую реакцию записывают так:



В точке 2' (конец кристаллизации жидкости) формируется структура, состоящая из кристаллов α_D и эвтектики $E = \alpha + \beta$. При дальнейшем охлаждении сплава (отрезок 2'–3) растворимость В в α –твердом растворе уменьшается по кривой DF (как в сплаве I). Поэтому из

кристаллов α выделяются вторичные кристаллы β_{II} по реакции $\alpha \rightarrow \beta_{II}$ (как в сплаве I). Таким образом, конечная (при нормальной температуре) структура доэвтектического сплава II: $\alpha_F + \text{эвтектика } (\alpha_F + \beta_G) + \beta_{II}$.

Сплавы с концентрацией В в интервале от точки Е до точки С называются заэвтек- тическими. Они кристаллизуются аналогично доэвтектическим. Различие состоит в том, что на первом этапе (между линиями ликвидус и солидус) из жидкой фазы выделяют- ся первичные кристаллы β . За счет этого концентрация В в оставшейся жидкости умень- шается по линии ВЕ. На втором этапе при эвтектической температуре (линия DEC) оста- ток жидкости кристаллизуется по эвтектической реакции: $L \rightarrow \alpha + \beta$. Конечная структура заэвтектического сплава: $\beta + \text{эвтектика } (\alpha + \beta)$.

Несмотря на многообразие структурных составляющих [первичные кристаллы α - и β – твердых растворов, вторичные кристаллы β – твердого раствора, эвтектика $(\alpha + \beta)$], окончательно охлажденный сплав содержит только две фазы (α и β), в которых концен- трация компонента В определяется точками F и G, соответственно.

Проверим правильность построения кривых охлаждения и диаграммы состояния (рис. 16 и 15) с помощью правила фаз ($C = K - \Phi + 1$) на примере сплава II:

- отрезок 1–2: $C = 2 - 2 + 1 = 1$, следовательно, температура Т изменяется;
- отрезок 2–2' : $C = 2 - 3 + 1 = 0$, следовательно, температура $T = \text{const}$;

- отрезок 2'–3: $C = 2 - 2 + 1 = 1$, следовательно, температура T изменяется.

Таким образом, кривая охлаждения построена правильно.

В качестве примера на рис. 17 приведена диаграмма состояния системы Pb–Sn. Здесь же показана микроструктура доэвтектического, эвтектического и заэвтектического сплавов данной системы. Видно, что эвтектический сплав имеет структуру пластинчатой эвтектики $E = \alpha + \beta$, где α и β – ограниченные твердые растворы: $\alpha = \text{Pb}(\text{Sn})$; $\beta = \text{Sn}(\text{Pb})$. Доэвтектический сплав содержит темные зерна первичного α –твердого раствора, окруженные колониями эвтектики. Внутри α –зерен видны выделения вторичной β –фазы (β_{II}). Заэвтектический сплав состоит из зерен первичного β –твердого раствора, окруженных колониями эвтектики. Внутри светлых зерен β –фазы видны выделения вторичной α –фазы (α_{II}).

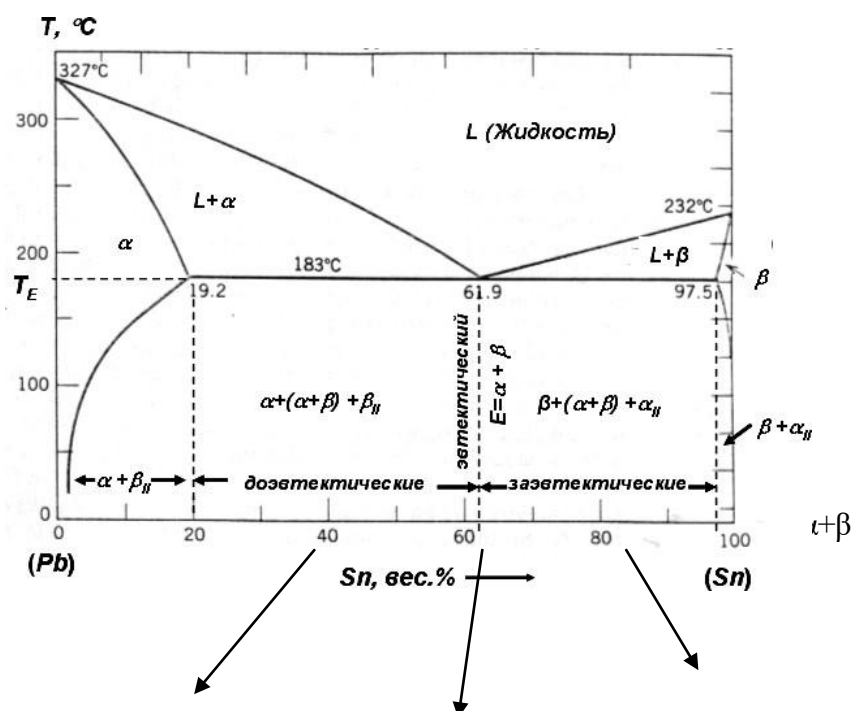




Рис. 17. Диаграмма состояния и микроструктура сплавов системы Pb–Sn

Задача 2. Для сплава 60 %Pb – 40 %Sn (вес. %) (см. рис. 18) определить при $T = 150^{\circ}\text{C}$:

- 1) фазовый состав;
- 2) химический состав каждой фазы;
- 3) массовую долю каждой фазы.

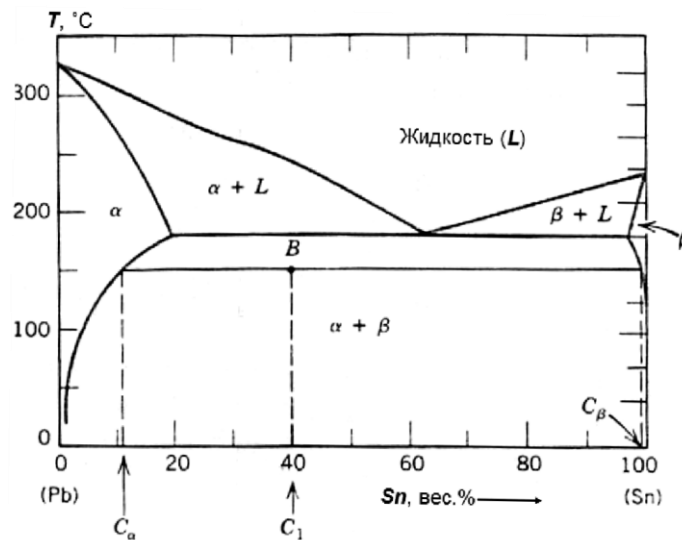


Рис. 18. Диаграмма состояния системы Pb–Sn

Решение.

1) Находим на диаграмме состояния Pb–Sn (рис. 18) рабочую точку В, соответствующую условиям задачи. Так как точка В находится внутри $(\alpha + \beta)$ – области, то в данной точке присутствуют две фазы: α и β .

2) В точке В присутствуют две фазы. Через эту точку проводим горизонтальную линию (коноду), как показано на рис. 18. Состав α -фазы соответствует точке пересечения коноды с линией предельной растворимости А в В, т. е. с границей раздела областей $\alpha/\alpha+\beta$. Итак, состав α -фазы C_α : 89 % Pb – 11 % Sn. По аналогии находим состав β -фазы C_β : 1 % Pb – 99 % Sn.

3) Поскольку сплав состоит из двух фаз, то для нахождения массовой доли каждой фазы необходимо использовать правило рычага [(см. п. 2.5, формулы (4) и (5)]. Обозначая общий состав сплава C_1 (точка В), получим:

$$W_\alpha = \frac{C_\beta - C_1}{C_\beta - C_\alpha} = \frac{99 - 40}{99 - 11} = 0,67 \text{ и } W_\beta = \frac{C_1 - C_\alpha}{C_\beta - C_\alpha} = \frac{40 - 11}{99 - 11} = 0,33 .$$

2.8. Диаграмма состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы и перитектику

Большинство двойных сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии, образуют эвтектику, т. е. жидкость кристаллизуется с образованием двух ограниченных твердых растворов: $L \leftrightarrow \alpha + \beta$ (см. диаграмму состояния на рис. 15). Часть сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии образуют перитектику.

Диаграмма состояния с перитектикой показана на рис. 19. Здесь, как и ранее: А и В – компоненты, L, α и β – фазы. Линии ADB и ACFB – линии ликвидус и солидус, соответственно. Кристаллизация сплавов

левее точки D и правее точки F происходит без особенностей с образованием α -и β -твердых растворов, соответственно (сравните с диаграммой состояния, показанной на рис. 15).

Иначе происходит кристаллизация сплавов, состав которых лежит между точками D и F.

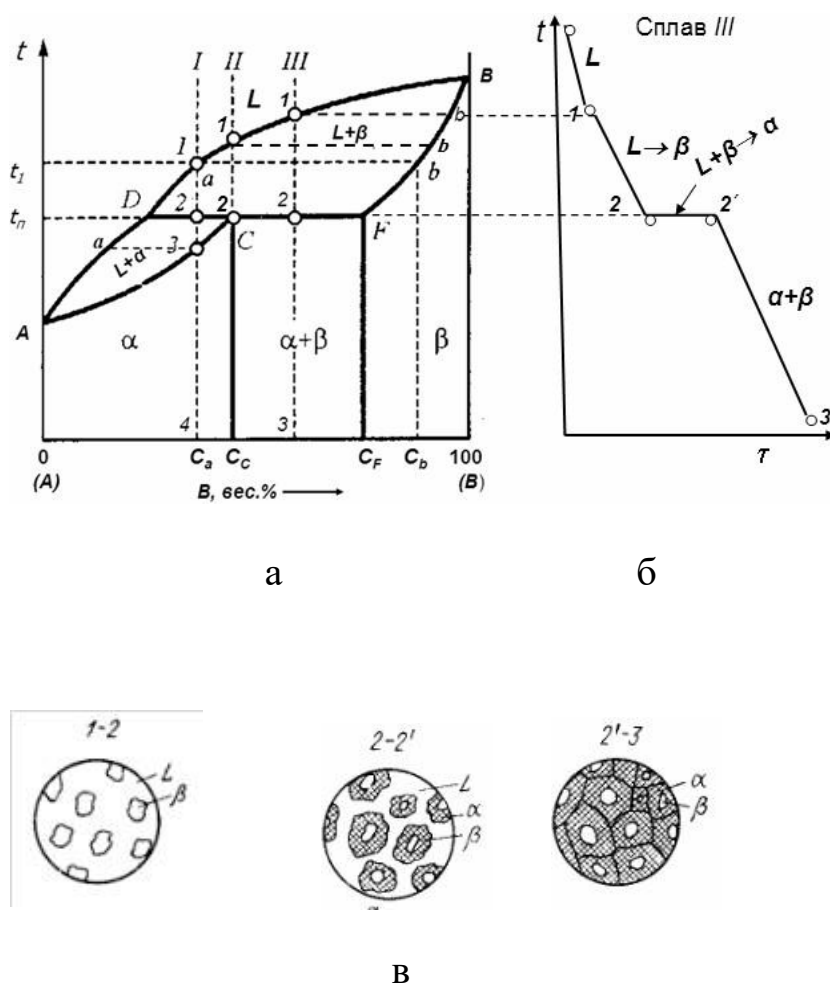


Рис. 19. Диаграмма состояния сплава с перитектикой (а); кривая охлаждения (б) и схемы структур (в) заперитектического сплава III (б)

Сплав II состава точки С называют перитектическим. В промежутке между точками 1 и 2 из жидкости выпадают и растут кристаллы β –твёрдого раствора. В точке С при температуре t_p сплав испытывает перитектическое превращение. Жидкость состава точки D взаимодействуют с ранее выпавшими кристаллами β –твёрдого раствора состава точки F, в результате чего на межфазной границе L/α образуется новая фаза – твёрдый раствор α_C по реакции:



При этом, согласно правилу фаз, $C = 2 - 3 + 1 = 0$, т. е. реакция идет при постоянной температуре t_p . Соотношение масс фаз L_D и β_F , необходимое для образования новой фазы α_C , определяется с помощью правила рычага: $m_L/m_\beta = CF/DC$.

В доперитектических сплавах I, расположенных между точками D и C, в точке 2 также происходит перитектическое превращение. При этом, согласно правилу рычага, доля выделившейся α –фазы невелика, и

имеется избыток жидкой фазы. В связи с этим перитектическая реакция заканчивается образованием новой фазы α_C , но остается избыток жидкой фазы L_D :



На отрезке 2–3 на зерна α -фазы, образовавшиеся при перитектической реакции, наслаивается α -фаза, выделяющаяся из остаточной жидкости. Затвердевший сплав имеет однофазную структуру, состоящую из зерен α -твердого раствора состава C_a . Сплавы III, распо-

женные между точками С и F, называются заперитектическими. Кривая охлаждения и схемы микроструктур показаны на рис. 19 б, в. Как и в сплавах I и II, на отрезке 2 – 2' протекает перитектическая реакция. При этом, в отличие от сплавов I, доля жидкости сравнительно мала, и поэтому она вся уходит на образование новой α -фазы. Избыточной фазой является предварительно выделившийся β -твердый раствор. Перитектическая реакция заканчивается образованием новой фазы α_C и избыточной β -фазы (β_F):



После окончания кристаллизации (точка 2') сплав III имеет двухфазную структуру $\alpha_C + \beta_F$. Эта структура имеет некоторое сходство с эвтектикой $E = \alpha + \beta$, состоящей из чередующихся между собой пластин или зерен α - и β -фаз. Особенность перитектической структуры состоит в том, что зерна β -фазы (сердцевина) окружены оболочкой из α -фазы (рис. 19 в). [перитектос (греч.) – структура окружения)]. Скорость протекания перитектической реакции, в отличие от эвтектической реакции, весьма мала. Причина состоит в том, что новая твердая фаза, формируемая на межфазной границе жидкость/кристалл, создает диффузионный барьер, подавляющий дальнейший рост новой фазы. Перитектические реакции встречаются реже, чем эвтектические и эвтектоидные.

2.9. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения (4-го рода)

Исходные данные:

- компоненты: А, В ($K = 2$);
- оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, а в твердом состоянии растворимость отсутствует (нет твердых растворов);
- твердые фазы: А, В и A_nB_m ;
- A_nB_m – химическое соединение в котором на $n+m$ атомов соединения приходится n атомов А и m атомов В;
- химическое соединение A_nB_m образует механические смеси с компонентами А и В.

По соотношению составов химического соединения и жидкой фазы, образующейся при плавлении этого соединения, соединения можно разделить на стойкие и нестойкие. Соединения, для которых эти составы совпадают, называются *конгруэнтно-плавящимися*, или стойкими. Если указанные составы не совпадают, соединения называются *инконгруэнтно-плавящимися*, или нестойкими.

Химическое соединение A_nB_m называется устойчивым (конгруэнтно-плавящимся), если оно не диссоциирует при нагреве до

температуры плавления. Следовательно, это соединение можно рассматривать как третий компонент сплава. Диаграмма состояния сплавов, образующих устойчивое химическое соединение, показана на рис. 20. На этой диаграмме химическое соединение отображается вертикальной линией, проходящей через точку на оси концентрации, соответствующую соотношению компонентов в химическом соединении A_nB_m . Точка С соответствует температуре плавления химического соединения, она находится на ликвидусе, а ликвидус имеет максимум, соответствующий составу соединения A_nB_m .

Данную диаграмму следует рассматривать как две диаграммы состояния для сплавов, образующих механические смеси чистых компонентов (1-го рода) (см. п. 2.3, рис. 7): первая – для системы $A - A_nB_m$ и вторая – для системы $B - A_nB_m$. На диаграмме имеются две эвтектические точки E_1 и E_2 . В этих точках из жидкости при температурах T_{E1} и T_{E2} образуется две эвтектические смеси, соответственно

$$E_1 = A + A_nB_m, E_2 = B + A_nB_m.$$

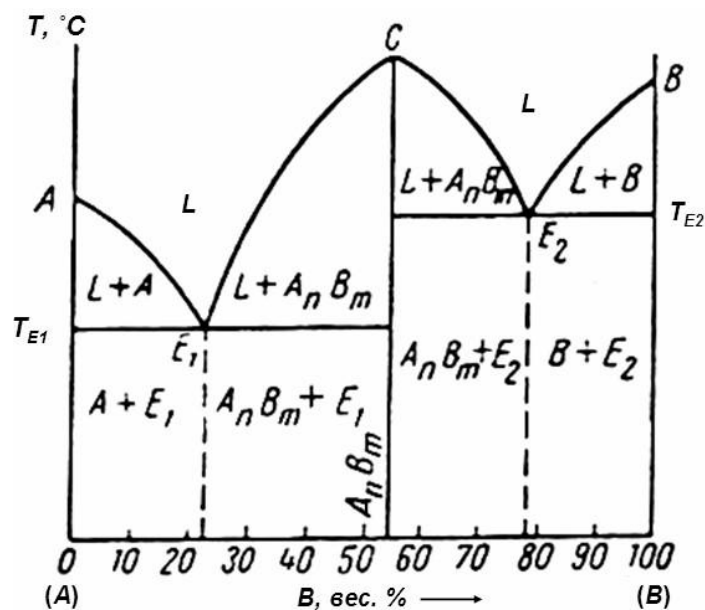


Рис. 20. Диаграмма состояния сплавов, образующих устойчивое химическое соединение В результате после окончания

затвердевания в структуру сплавов кроме чистых компонентов будут входить две эвтектики E_1 и E_2 . Качественный и количественный анализ сплавов проводится как обычно. Если компоненты А и В образуют между собой не одно, а два или более химических соединений, то диаграмма состояния будет состоять не из двух, а из $(N + 1)$ простых диаграмм для механических смесей, где N – число химических соединений в данной системе. На рис. 21 приведена диаграмма состояния серебро-стронций. Данная система имеет четыре интерметаллидных соединений. Она состоит из пяти простых диаграмм состояния для систем, образующих механические смеси чистых компонентов (1-го рода). Каждая диаграмма имеет свою эвтектику. Все диаграммы соединены между собой последовательно, образуя набор диаграмм для систем $Ag - SrAg_5$, $SrAg_5 - Sr_3Ag_5$ и т. д.

В некоторых системах компоненты А и В образуют ограниченные твердые растворы $\alpha = A(B)$ и $\beta = B(A)$ на основе чистых компонентов, а также твердые растворы на основе химического соединения. Диаграмма состояния такой системы представлена на рис. 22. Она представляет собой сдвоенную диаграмму состояния для сплавов, образующих ограниченные твердые растворы (3-го рода). На границе, соответствующей стехиометрическому составу химического соединения, появляется однофазная область существования твердого

раствора на основе данного соединения (γ -фаза, которая называется областью *гомогенности*).

Диаграмма состояния с образованием инконгруэнтно-плавящегося химического соединения изображена на рис. 23. Плавление таких соединений идет как превращение перитектического типа при нагреве, т. е. твердая фаза исчезает при плавлении, распадаясь на две новые фазы: жидкую и твердую, составы которых лежат по обе стороны состава исходного соединения.

Температура плавления инконгруэнтно-плавящегося химического соединения лежит ниже линии ликвидуса, в результате чего ликвидус не имеет максимума, связанного с составом соединения. Разбивать диаграмму состояния с нестойким соединением на частные диаграммы, принимая это соединение за компонент системы, нельзя.

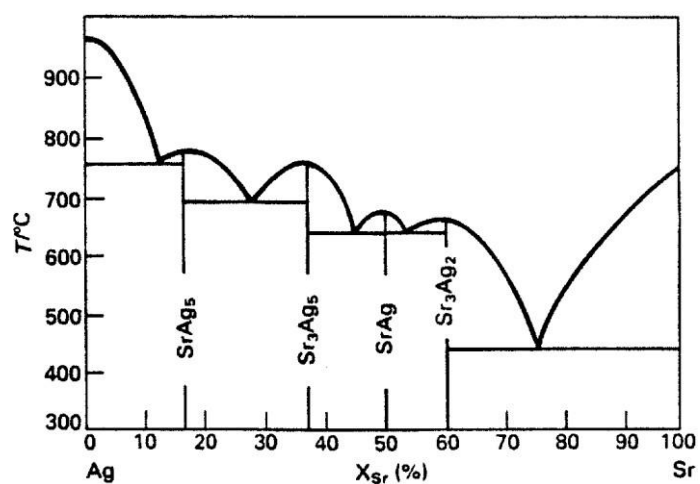


Рис. 21. Диаграмма состояния системы серебро–стронций, в которой образуется 4 интерметаллидных соединения.

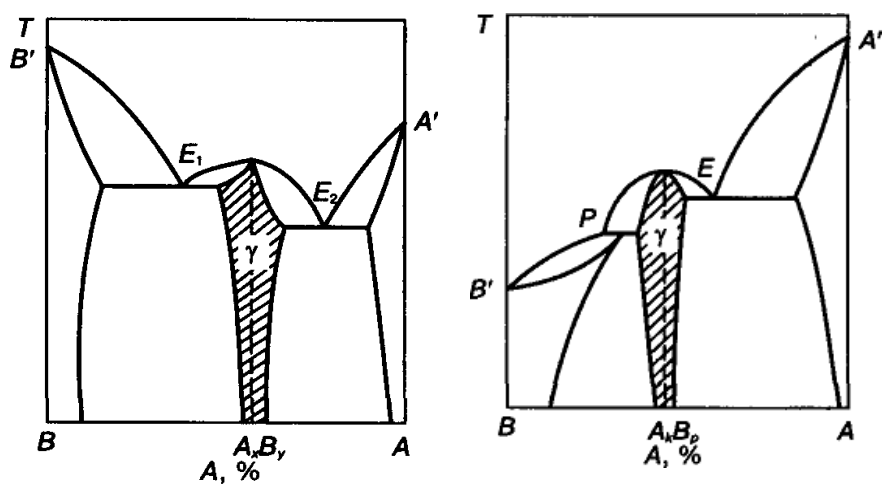


Рис. 22. Диаграммы состояния с твердым раствором на основе конгруэнтно-плавящегося химического соединения

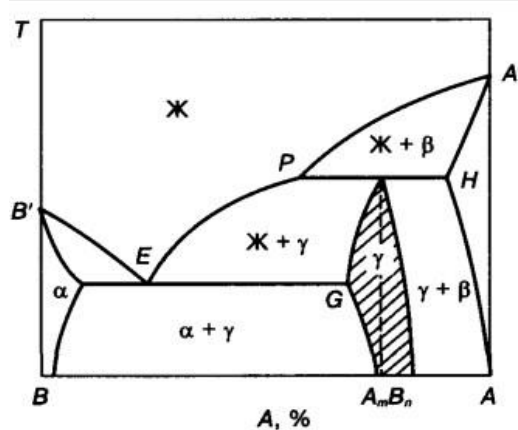


Рис. 23. Диаграмма состояния с инконгруэнтно-плавящимся

химическим соединением

Соединения с широкой областью гомогенности широко распространены в полу- проводниковых и металлических системах. Они разделяются на две группы: дальтони́ды и бертолли́ды.

Дальтони́ды – соединения с широкой областью гомогенности - характеризуются тем, что соединение формульного состава находится внутри области гомогенности (рис. 22 и 23); общим для диаграмм с дальтонидными фазами является присутствие син- гулярной точки на кривых ликвидуса и солидуса, состав в которой отвечает дальтони́ду и простым стехиометрическим соотношениям компонентов. На диаграмме состав – свойст- во формульному составу соединения соответствует экстремальное значение свойств.

Бертолли́ды характеризуются тем, что соединение формульного состава лежит вне области гомогенности (рис. 24). Это означает, что соединения бертолли́дного типа фор- мульного состава не существует. На диаграмме состав – свойство в пределах составов, от- вечаяющих области гомогенности, свойства изменяются монотонно.

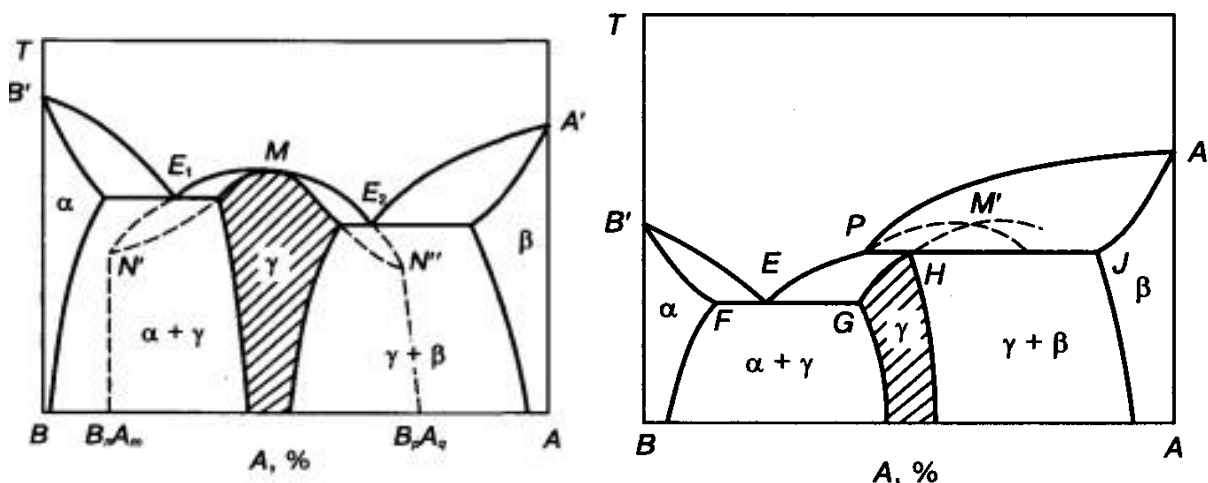


Рис. 24. Диаграммы состояния с образованием бертоллидов

2.10. Диаграмма состояния сплавов с полиморфными превращениями

Если один или оба компонента сплава обладают полиморфизмом (способностью изменять тип решетки при изменении температуры), то при охлаждении жидкого сплава сначала будут выделяться кристаллы первичных фаз (первичная кристаллизация), а при достижении температур полиморфного превращения будут формироваться

вторичные фазы (вторичная кристаллизация). В результате диаграмма состояния будет состоять из двух частей: верхней, соответствующей первичной кристаллизации, и нижней – вторичной.

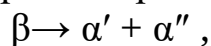
Рассмотрим два типа диаграмм состояния сплавов, компоненты которых испытывают полиморфные превращения.

1. Если компоненты А и В имеют по две модификации, причем A_α и B_α , так же как и A_β и B_β , изоморфны (одинаковый тип решеток) и образуют непрерывный ряд твердых растворов, то диаграмма состояния имеет вид, показанный на рис. 25а. Видно, что она является «двухэтажной» и построена из двух диаграмм состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы (см. п. 2.4). Верхняя часть диаграммы соответствует образованию высокотемпературного твердого раствора $\beta = A_\beta(B_\beta)$, и нижняя – образованию низкотемпературного твердого раствора $\alpha = A_\alpha(B_\alpha)$.

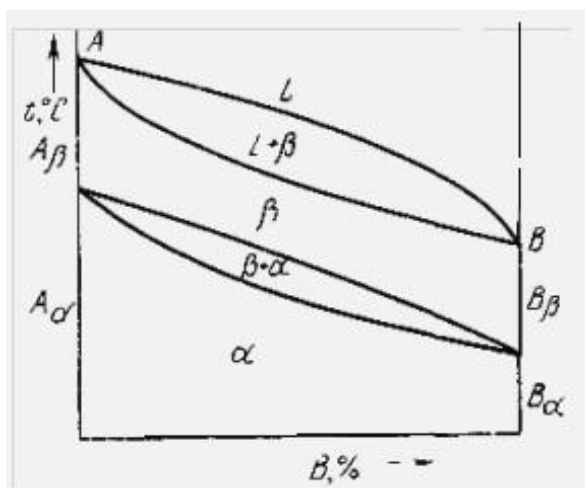
2. Если высокотемпературные модификации неограниченно взаимно растворимы друг в друге, а низкотемпературные модификации ограниченно растворимы друг в друге, то

диаграмма состояния будет иметь вид, показанный на рис. 25б. Она представляет собой сочетание диаграмм состояния 2-го и 3-го рода (см. рис. 10 и рис. 15).

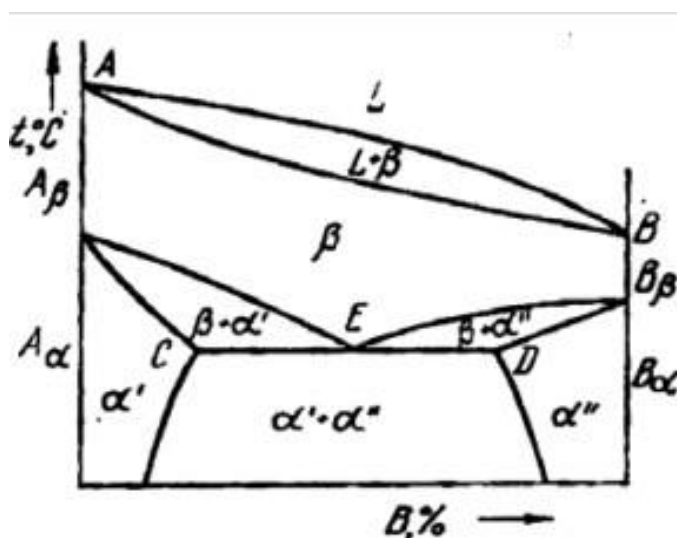
При температуре, соответствующей линии CED (рис. 25б) происходит распад высокотемпературного β -твердого раствора с одновременным выделением α' и α'' – твердых растворов:



где $\alpha' = A_\alpha(B_\alpha)$, $\alpha'' = B_\alpha(A_\alpha)$. Превращение протекает аналогично кристаллизации эвтектики, но исходной фазой является не жидкость, а твердый раствор. В отличие от кристаллизации эвтектики из жидкости, данное превращение называют не эвтектическим, а *эвтектоидным*, а смесь полученных кристаллов называют *эвтектоидом*.



а



б

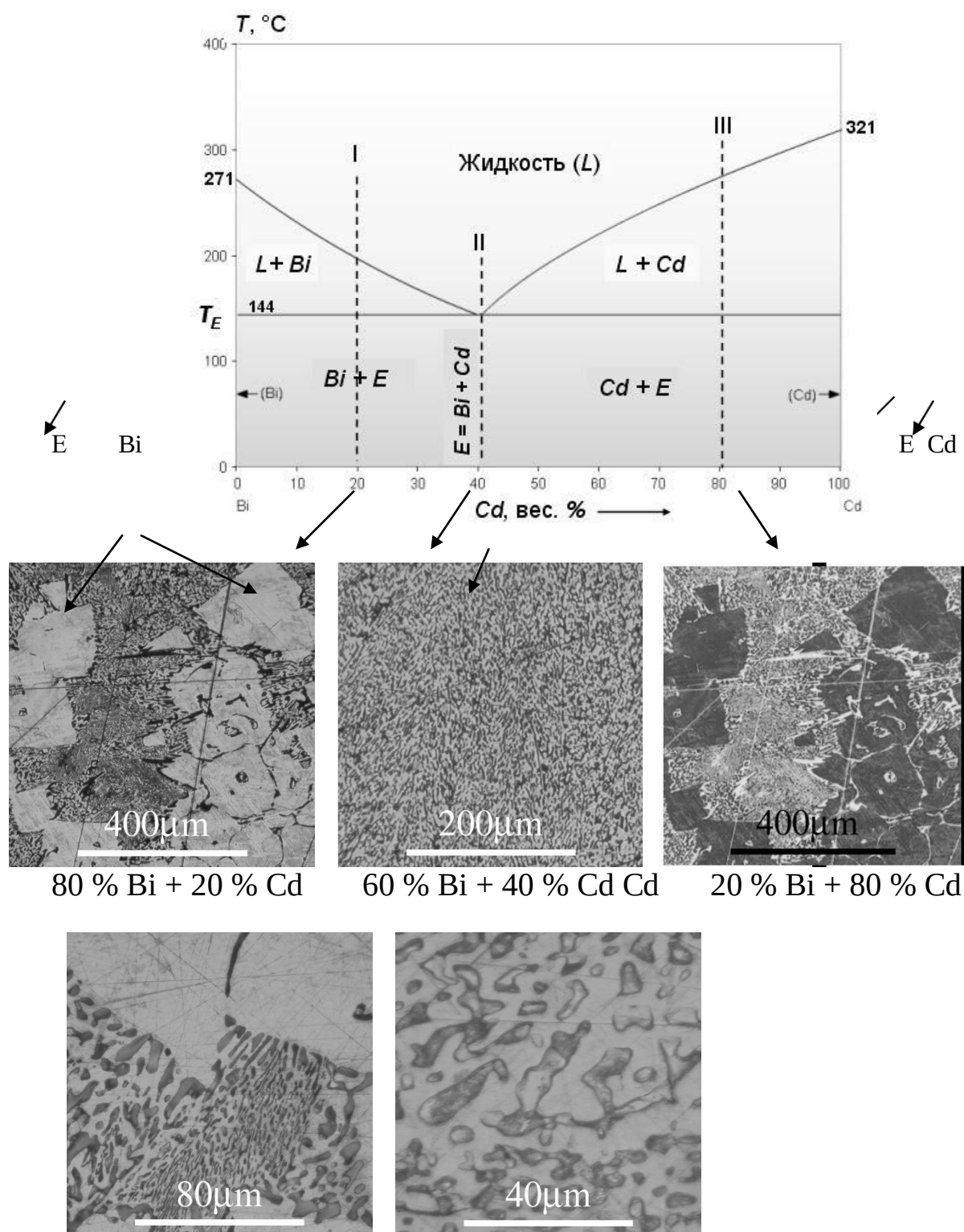
Рис. 25. Диаграмма состояния сплавов с полиморфными

превращениями Превращение, аналогичное перитектическому, но с участием только твердых фаз, называется *перитектоидным*.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Задание 1. Анализ диаграммы состояния висмут–кадмий

Цель работы – 1) ознакомиться с диаграммой состояния сплавов Bi–Cd - рис. 26;



80 % Bi + 20 % Cd 60 % Bi + 40 % Cd

Рис. 26. Диаграмма состояния и микроструктура сплавов Bi-Cd

2) ознакомиться с микроструктурой доэвтектического, эвтектического и заэвтектического сплавов Bi-Cd;

3) используя правило отрезков и правило рычага, определить концентрацию Cd в жидкой и твердой фазах в двухфазных областях, а также массовую долю этих фаз.

1. Укажите, какие линии присутствуют на диаграмме.
2. Укажите фазы данной системы.
3. К какому типу диаграмм относится данная диаграмма состояния?
4. Объясните, как формируются в процессе охлаждения структуры эвтектического, доэвтектического и заэвтектического сплавов.
5. Что такое эвтектика, эвтектическая концентрация, эвтектическая температура?
6. Запишите эвтектическую реакцию.
7. Что называется структурными составляющими сплава?
8. Используя микрофотографии сплавов Bi-Cd (Рис. 26):
 - зарисовать схемы микроструктур сплавов I, II и III (20 %; 40 %; 80 % Cd);
 - указать структурные составляющие каждого сплава;
 - в сплавах I и II определить характерный размер зерен первичных кристаллов Bi и глобул Bi и Cd в эвтектике.
9. Используя правило отрезков (п. 2.5) определить концентрацию Cd в жидкой и твердой фазах при температуре T для сплава состава X, указанных в таблице 1 в соответствии с вариантом:

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
T, °C	200							
X, % Cd	5	10	60	70	75	80	90	95

№ варианта	9	10	11	12	13	14	15	16
T, °C	150							
X, % Cd	10	20	30	50	60	70	80	90

10. Для этих же сплавов, используя правило рычага (п. 2.5), определить массовую долю твердой и жидкой фаз и отношение масс этих фаз.

Задание № 2. Анализ диаграммы MgO – NiO

Цель работы – 1) ознакомиться с диаграммой состояния сплавов MgO – NiO - рис. 27;

2) используя правило рычага, определить долю жидкой фазы в зависимости от содержания NiO в керамике.

1. Укажите, какие линии присутствуют на диаграмме.
2. Укажите фазы данной системы.
3. К какому типу диаграмм относится данная диаграмма состояния?
4. Постройте график зависимости молярной доли жидкой фазы от содержания NiO в керамике MgO – NiO при температуре T, указанной в варианте табл. 2. График следует начертить под диаграммой состояния, чтобы оси концентраций графика и диаграммы совпадали.

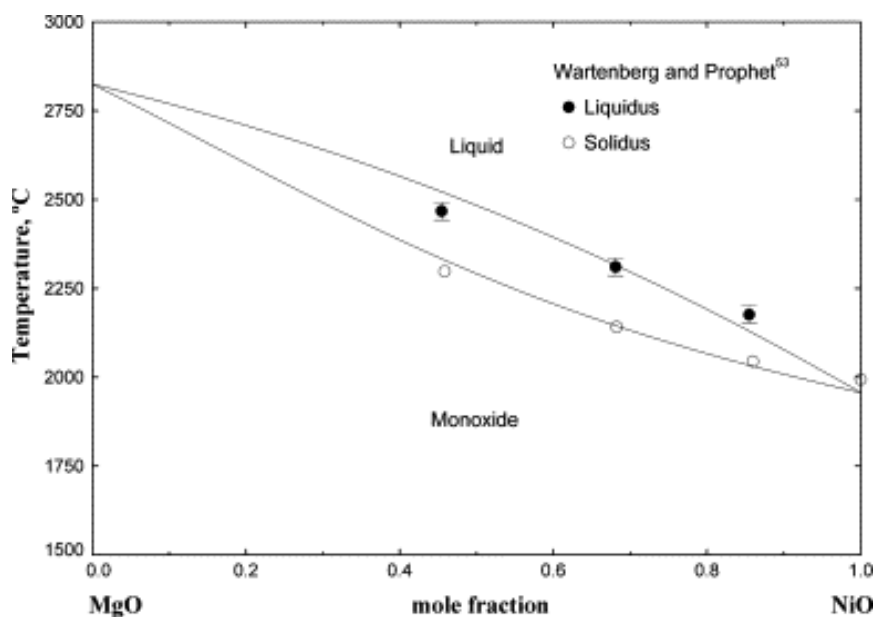


Рис. 27. Диаграмма состояния
MgO – NiO

Таблица 2

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
T, °C	2750	2200	2250	2300	2400	2500	2600	2700

Задание 3. Построение диаграмм фазовых равновесий

Цель работы - получить навыки построения диаграмм состояний.

Для построения диаграммы состояния вы выполнили следующие операции: подготовили набор сплавов различного состава, включая чистые компоненты А и В; поместили в тигель каждый состав, расплавили его и медленно охладили, построили кривую охлаждения и изучили микроструктуру затвердевшего сплава под микроскопом.

Эксперимент дал следующие результаты:

Вариант №1

- чистый металл А: структура ГЦК, атомный радиус 0,128 нм, температура плавления 1083 °C;
- чистый металл В: структура ГЦК, атомный радиус 0,125 нм, температура плавления 1453 °C;
- полная взаимная растворимость обоих металлов в жидком и твердом состояниях; при охлаждении жидкого сплава с

содержанием 50 ат. % В первая твердая фаза появляется при 1305 °С. Эта фаза содержит 64 ат. % В;

- при дальнейшем охлаждении остающаяся жидкая фаза существует до 1240 °С. В этот момент она содержит 34 ат. % В.

Используя результаты эксперимента необходимо:

- построить диаграмму состояния системы А–В в удобном для анализа масштабе (по осям концентрации и температуры) и указать на диаграмме известные составы и температуры;

- на данной диаграмме состояния указать фазы и структурные составляющие, присутствующие в каждой области;
- нарисовать схему микроструктуры образца, содержащего 10, 20, 30, 50, 60 и 80 ат. % В;
- оценить размер элементарной ячейки твердого раствора, содержащего 10, 30, 50, 60, 75 и 90 ат. % В.

Вариант № 2

- чистый компонент А затвердевает при 1000 °С; чистый компонент В затвердевает при 1250 °С;
 - сплав, содержащий 40 вес. % В, кристаллизуется при постоянной температуре 750 °С;
 - при 750° С и концентрациях В менее 15 вес. % сплав является однофазным (α - фаза);
 - при 750 °С и концентрациях В более 70 вес. % сплав является однофазным (β - фаза);
 - α - и β -фазы – твердые растворы; других твердых фаз в данной системе нет при любых температурах и концентрациях;
 - максимальная растворимость В в α -фазе при комнатной температуре – 3 вес. % В; максимальная растворимость А в β -фазе при комнатной температуре – 28 вес. % А (72 вес. % В).
- Используя результаты эксперимента необходимо:
- построить диаграмму состояния системы А–В в удобном для анализа масштабе (по осям отложив концентрации и температуры), указать на диаграмме известные составы и температуры;
 - на данной диаграмме состояния указать фазы и структурные составляющие, присутствующие в каждой области;
 - нарисовать схему микроструктуры образца, содержащего 10, 20, 40, 50, 75 и 90 вес. % В; образец медленно охлаждался от 1300°С до комнатной температуры (20°С).

Вариант № 3

- чистый компонент А: температура плавления 470 °С; чистый компонент В: температура плавления 803 °С;
- конгруэнтно-плавящееся химическое соединение A_2B : температура плавления 1210 °С;
- максимальная растворимость компонента В в соединении A_2B соответствует температуре 520 °С и составляет 10 ат. % В. При комнатной температуре (20 °С) растворимость снижается до 5 ат. % В;

- других твердых растворов и химических соединений в системе А-В не образуются;
- жидкий раствор, содержащий 75 ат.% В, кристаллизуется при постоянной температуре 520 °С;
- жидкий раствор, содержащий 15 ат.% В, кристаллизуется при постоянной температуре 300 °С.

Используя результаты эксперимента необходимо:

- построить диаграмму состояния системы А–В в удобном для анализа масштабе (по осям отложив концентрации и температуры), указать на диаграмме известные составы и температуры;
- на данной диаграмме состояния указать фазы и структурные составляющие, присутствующие в каждой области;
- нарисовать схему микроструктуры образца, содержащего 10, 15, 33, 50, 75 и 90 ат. %В; образец медленно охлаждался от 1300°С до комнатной температуры (20°С).

Задание № 4. Расчет диаграмм фазовых равновесий

Цель работы - изучение основных закономерностей, используемых при анализе диаграмм двухкомпонентных систем.

Материалы: диаграммы состояния InSb-InAs, ZnTe-HgTe, Bi-Sb, InSb-AlSb, In-As-GaAs, InAs-AlAs, GaSb-AlSb, GaAs-AlAs, AlAs-AlP, GaP-AlP, InP-GaP, HgTe-CdTe, InSb-GaSb, PbTe-SnTe, Al-Si, In-Si, Sn-Bi, Ag-Cu, Si-Sn, Au-W, Ga-As, In-Sb, Sn-Te, Ga-Sb, Mg-Ca, Au-Sb, Au-Te, In-As, Pb-Te.

Для трех диаграмм, указанных в табл. 3 в соответствии с вариантом, провести расчеты, указанные в порядке выполнения работы.

Таблица
3

№ варианта	№ диаграммы	Тип диаграммы	Состав X, %	Температура T ₀ , °С
1	1	InSb-InAs	40 % InAs	700
	2	Al-Si	50 % Si	700
	3	Ga-As	20 % As	1200
2	1	ZnTe-HgTe	40 % HgTe	1000
	2	In-Si	60 % Si	1000
	3	In-Sb	20 % Sb	155
3	1	Bi-Sb	60 % Sb	400
	2	Sn-Bi	30 % Bi	100
	3	Sn-Te	50 % Te	700
4	1	InSb-AlSb	60 % AlSb	700
	2	Ag-Cu	50 % Cu	600
	3	Ga-Sb	40 % Sb	500
5	1	InAs-GaAs	40 % GaAs	1000
	2	Si-Sn	50 % Sn	1000
	3	Mg-Ca	30 % Ca	600
6	1	InAs-AlAs	60 % AlAs	1400
	2	Au-W	30 % W	2400
	3	Au-Sb	50 % Sb	400
	1	GaSb-AlSb	40 % AlSb	800
	2	Al-Si	10 % Si	500

7	3	In-As	20 % As	400
8	1	GaAs-AlAs	60 % AlAs	1600
	2	Sn-Bi	10 % Bi	50
	3	Au-Te	20 % Te	600
9	1	AlAs- AlP	60 % AlP	2000
	2	Ag-Cu	20 % Cu	800
	3	Pb-Te	20 % Te	600
10	1	GaP- AlP	60 % AlP	2000
	2	Al-Si	70 % Si	577
	3	Ga-As	70 % As	1200
11	1	InP-GaP	60 % GaP	1200
	2	Sn-Bi	70 % Bi	150
	3	In-Sb	90 % Sb	520
12	1	HgTe-CdTe	70 % CdTe	900
	2	Ag-Cu	70 % Cu	900
	3	Sn-Te	60 % Te	600
13	1	InSb-GaSb	60 % GaSb	600
	2	Al-Si	5 % Si	577
	3	Ga-Sb	60 % Sb	500
14	1	PbTe-SnTe	60 % SnTe	850
	2	Sn-Bi	43 % Bi	100
	3	Mg-Ca	60 % Ca	480
15	1	InSb-InAs	80 % InAs	800
	2	Ag-Cu	95 % Cu	500
	3	Au-Sb	80 % Sb	460
16	1	ZnTe-HgTe	60 % HgTe	800
	2	Al-Si	80 % Si	500
	3	In-As	80 % As	400
17	1	Bi-Sb	30 % Sb	350
	2	Sn-Bi	90 % Bi	139
	3	Au-Te	70 % Te	430
18	1	InSb-AlSb	40 % AlSb	650
	2	Ag-Cu	40 % Cu	779
	3	Pb-Te	70 % Te	350

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Определить тип диаграммы. Обозначить все фазовые области.
2. Установить порядок фазовых превращений при охлаждении сплава заданного состава X.
3. Нарисовать соответствующую кривую охлаждения.
4. Установить фазовый состав сплава и количественное соотношение фаз для сплава заданного состава при заданной температуре T_0 . Определить вариантность системы.
5. Определить структурные составляющие этого сплава при комнатной температуре.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. В отчете следует привести диаграммы состояния с указанием заданных составов X и заданных температур T_0 .
2. Справа от диаграммы состояния изобразить кривую охлаждения, чтобы диаграмма состояния и кривая охлаждения имели общую ось температуры.
3. В отчете должны содержаться развернутые ответы на вопросы. При необходимости приводятся реакции, соответствующие фазовым превращениям.

Задание № 5. Диаграммы состояния с химическими соединениями, эвтектическими и перитектическими превращениями

Цель работы – формирование навыков анализа и расчета сложных диаграмм фазовых равновесий.

Задача № 3. Сплав свинца с висмутом, состав которого указан табл. 4 в соответствии с вариантом, охлаждается в равновесных условиях из жидкого состояния до 20 °С.

Указать последовательность равновесных фаз и соответствующие значения температур равновесия – рис. 28.

Таблица
4

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% висмута	13	15	20	23	27	30	32	35	38	45
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% висмута	50	56	60	65	70	75	80	85	90	95

Методические указания. Определить и обозначить на диаграмме все фазы и фазовые области.

Решение задачи представить в виде табл. 5, в которой указать температуры или интервалы температур, фазы, находящиеся в равновесии, и их состав.

Таблица
5

Температура, °С	Фазы	Состав фаз

Задача № 4. На диаграмме (рис. 28) провести изотерму в соответствии с вариантом, приведенным в табл. 6. Определить последовательность изменения числа фаз и их состава при изменении состава от 100 % свинца до 100 % висмута.

Таблица
6

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура, °С	180	170	160	150	140	130	250	200	130	120
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Температура, °C	110	100	90	80	70	60	50	300	270	230
-----------------	-----	-----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

Методические указания. Решение задачи представить в виде табл. 7, в которой указать диапазон изменения содержания висмута, фазы, находящиеся в равновесии, и их состав.

Таблица 7

Содержание висмута, %	Фазы	Состав фаз

Задача №5. Определить количественное соотношение фаз для состава, указанного в задаче № 3, при температуре Т, значения которой приведены в табл. 8 в соответствии с вариантом.

Таблица 8

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура, °C	280	270	20	100	200	190	190	180	170	130
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Температура, °C	100	50	130	100	150	30	150	100	220	50

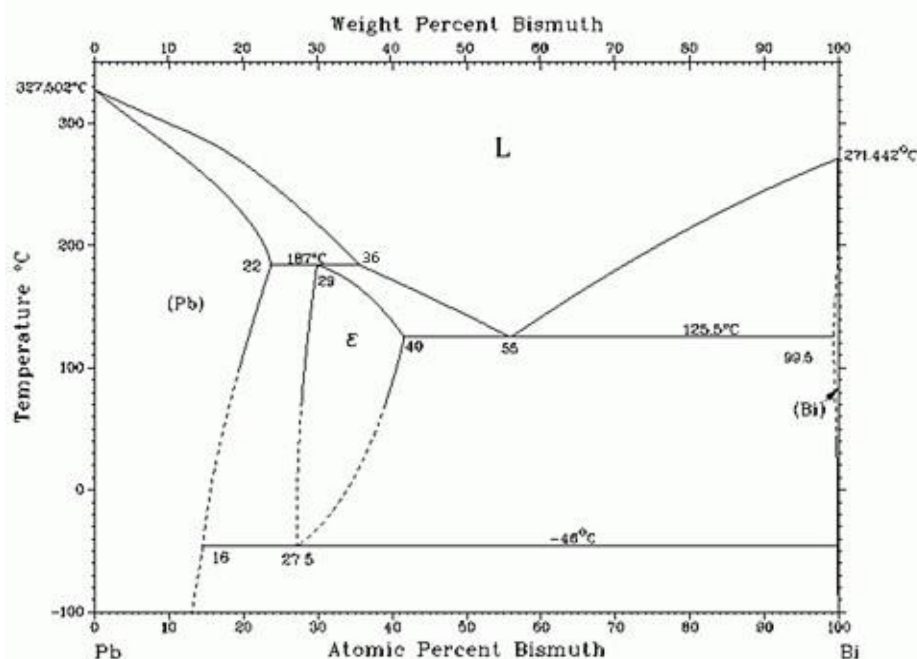


Рис. 28. Диаграмма состояния свинец-висмут

Задача №6. Решить задачу № 3 для диаграммы алюминий – никель, приведенной на рис. 29, для состава, указанного в табл. 9 в соответствии с вариантом.

Таблица 9

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% никеля	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	20	30
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% никеля	40	60	70	80	95	4	50	45	55	75

Для вариантов №№ 1 – 8 составы соответствуют точкам 2 -9 на рис. 29.

Задача № 7. Решить задачу № 4 для диаграммы алюминий – никель, приведенной на рис. 29, для температуры, указанной в табл. 10

в соответствии с вариантом.

Таблица 10

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура, °C	1400	910	963	1000	1100	1298	1410	900	1500	1673
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Температура, °C	1703	1733	1753	1783	1853	1910	1600	1724	1100	1900

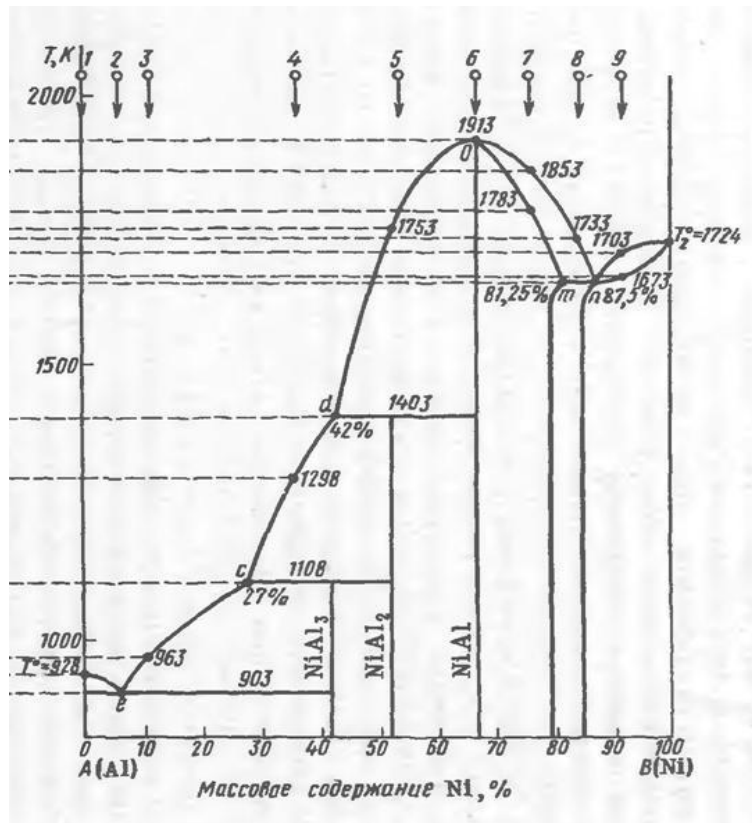


Рис. 29. Диаграмма состояния алюминий - никель

Задача № 8. Определить фазовые области на диаграмме титан – никель (рис. 30)

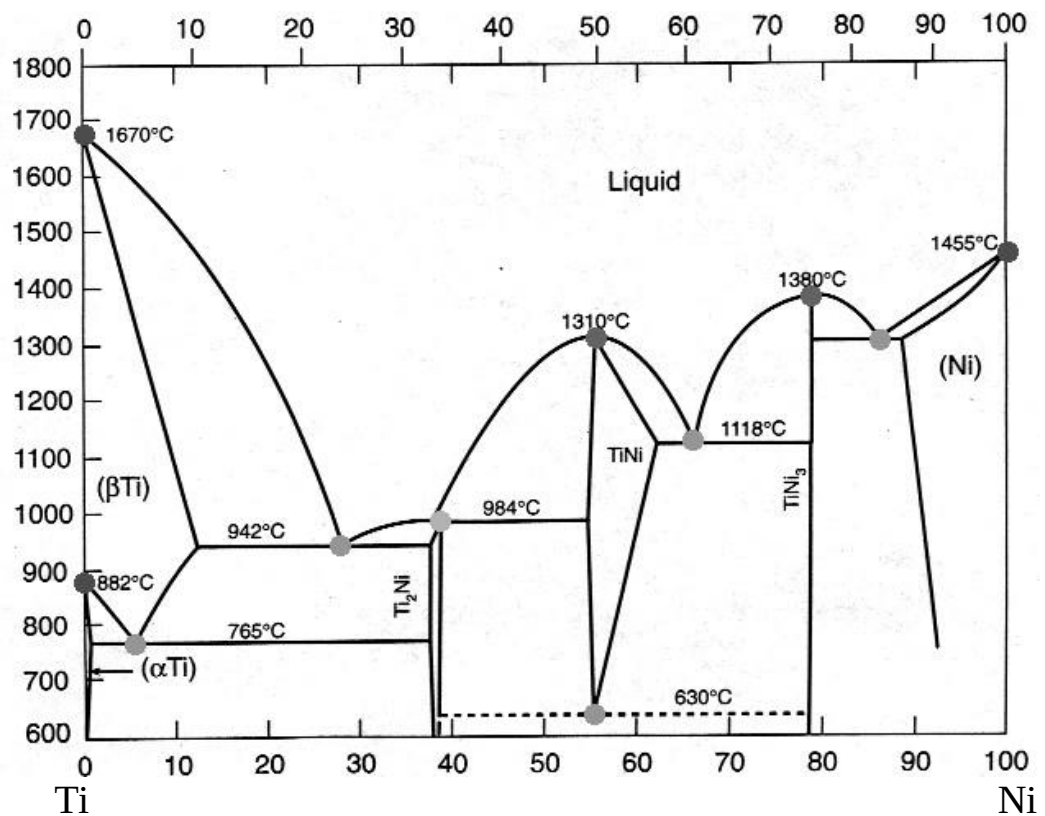


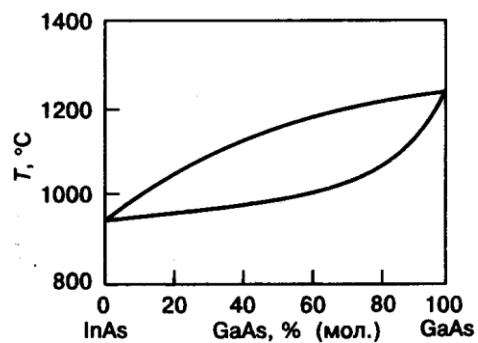
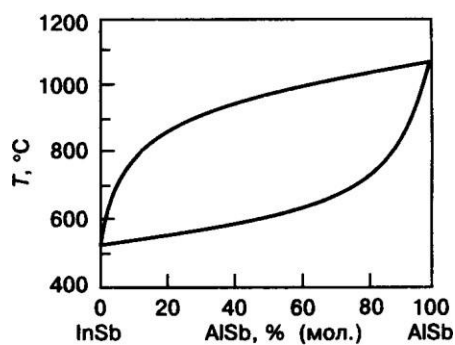
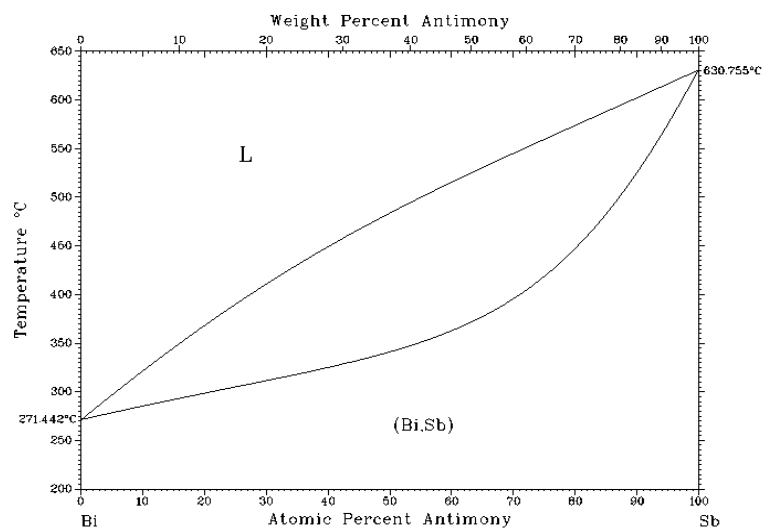
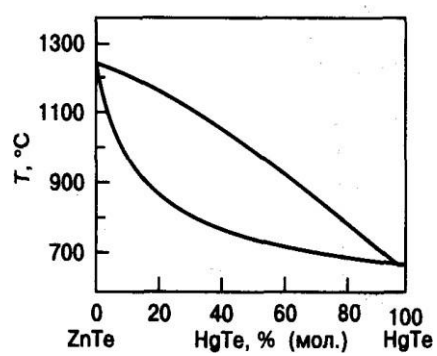
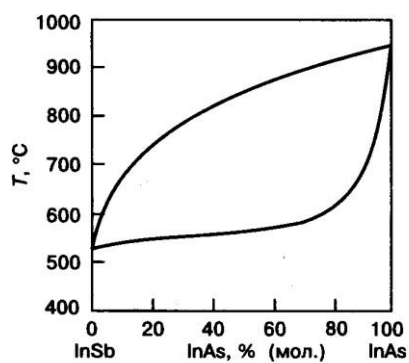
Рис. 30. Диаграмма состояния титан – никель

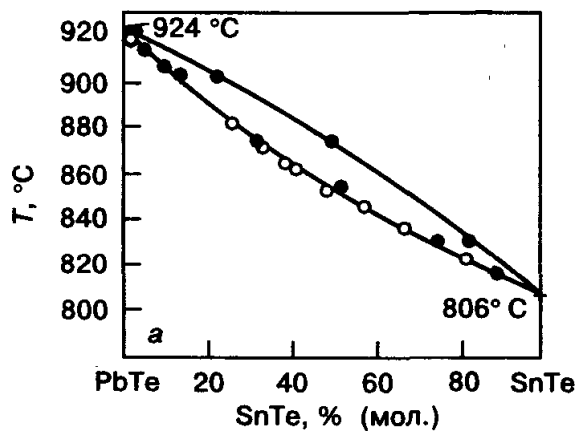
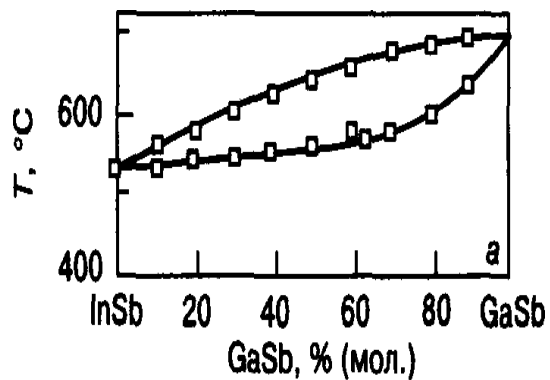
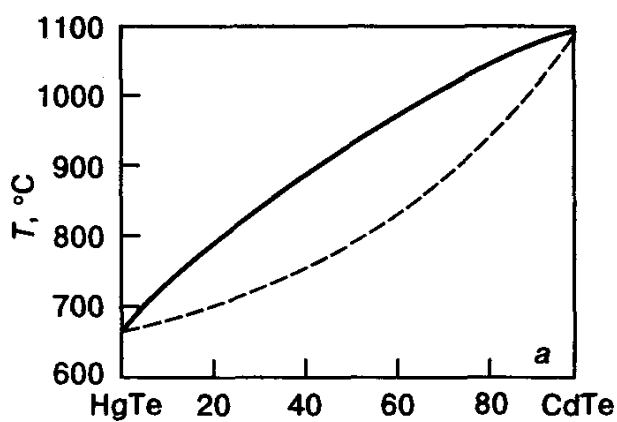
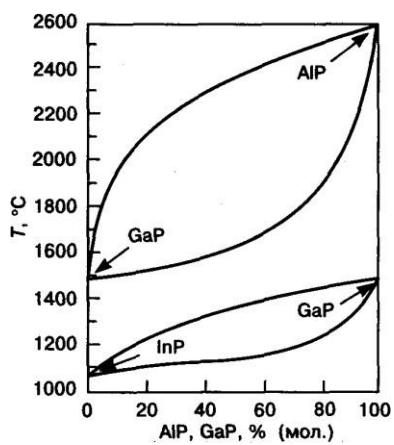
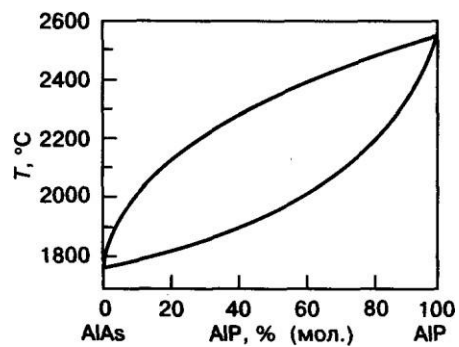
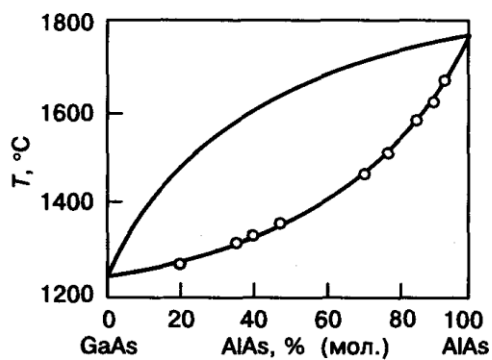
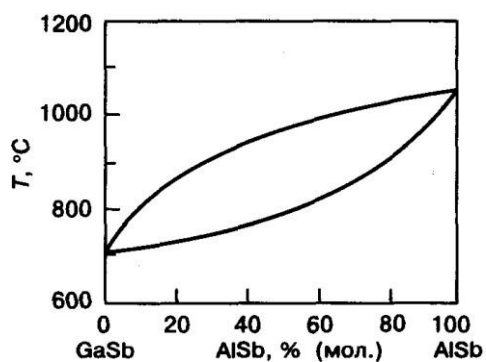
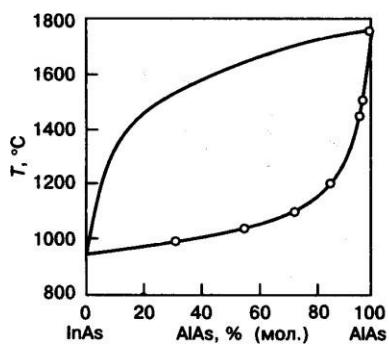
Контрольные вопросы

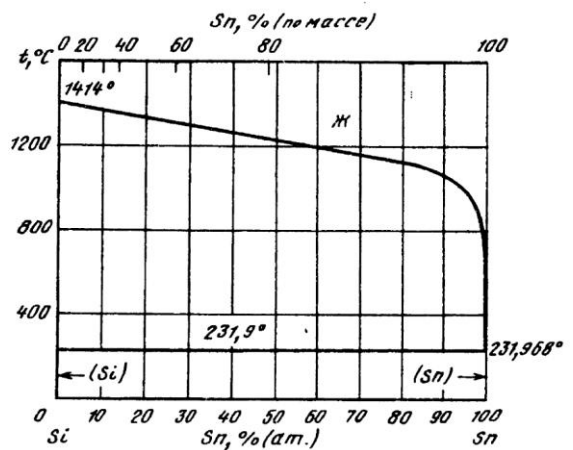
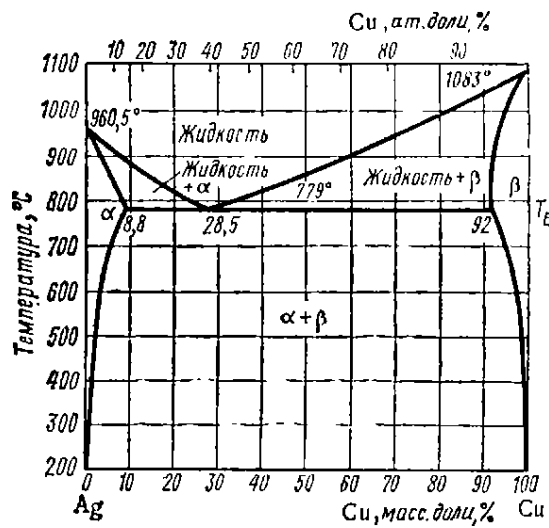
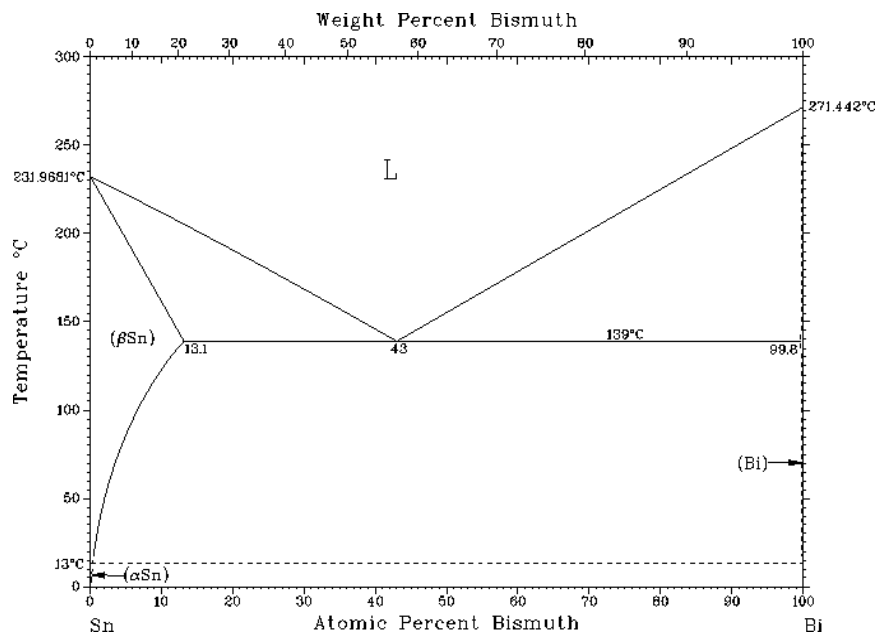
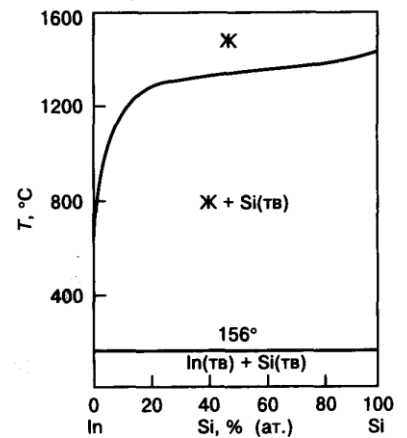
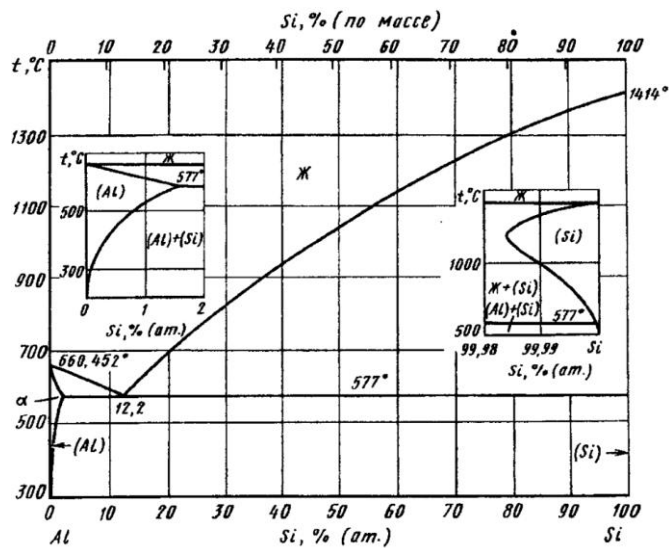
1. Назовите и охарактеризуйте основные типы твердых фаз. Укажите фазы постоянного и переменного составов.
2. Объясните принцип построения диаграмм состояния.
3. Запишите правило фаз Гиббса, объясните физический смысл входящих в него параметров и приведите пример использования этого правила для проверки правильности построения диаграммы состояния.
4. Начертите и охарактеризуйте диаграмму состояния сплавов, образующих механические смеси.
5. Что такое эвтектика, эвтектическая концентрация, эвтектическая температура, эвтектическое превращение?
6. Объясните смысл терминов эвтектические, заэвтектические и доэвтектические сплавы.
7. Объясните, как в процессе охлаждения формируются структуры эвтектического, доэвтектического и заэвтектического сплавов.
8. Начертите и охарактеризуйте диаграмму состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы.
9. Сформулируйте условия полной взаимной растворимости компонентов в твердой фазе.
10. Назовите и охарактеризуйте типы твердых растворов.
11. Что называется конодой? Что можно определить с ее помощью?
12. Сформулируйте правило рычага.
13. Начертите и охарактеризуйте диаграмму состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы.
14. Что называется структурными составляющими сплава? Приведите примеры структурных составляющих.
15. Начертите и охарактеризуйте диаграмму состояния сплавов, образующих химические соединения.
16. Какие соединения называются конгруэнтно-плавящимися? В чем особенности диаграмм состояния с такими соединениями?
17. Какие соединения называются инконгруэнтно-плавящимися? В чем особенности диаграмм состояния с такими соединениями, в чем их отличие от диаграмм с конгруэнтно-плавящимися соединениями?
18. Что такое дальтонид?
19. Какие фазы относятся бертоллидным?
20. Запишите эвтектическую реакцию.
21. Запишите перитектическую реакцию.
22. Запишите реакцию, сопровождающую плавление инконгруэнтно-плавящегося химического соединения. Почему считается, что она идет по перитектическому типу?
23. Сформулируйте закон Вегарда.
24. Дайте понятие коэффициента распределения примеси. Для каких технологических процессов необходимо знание его величины?

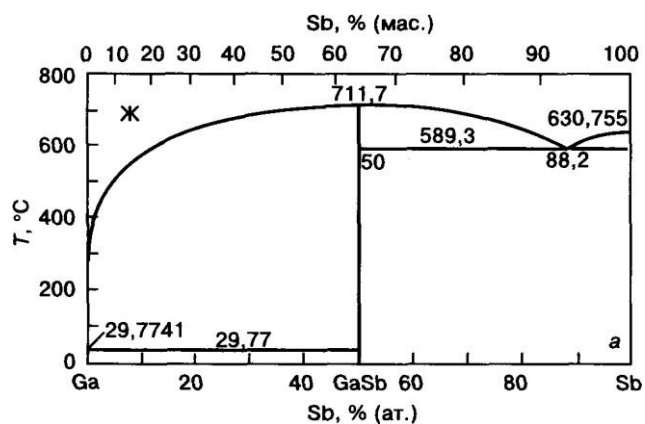
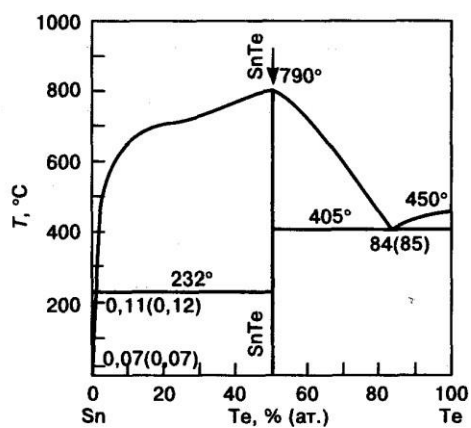
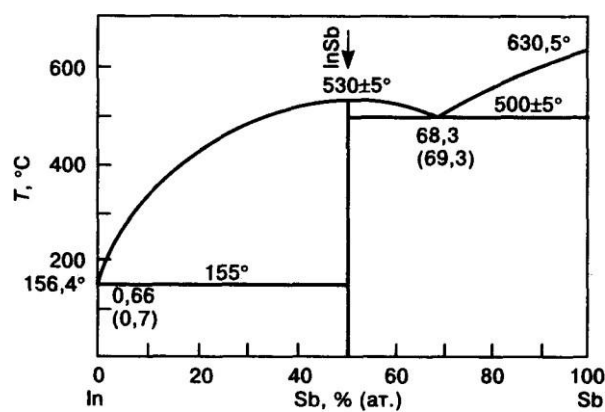
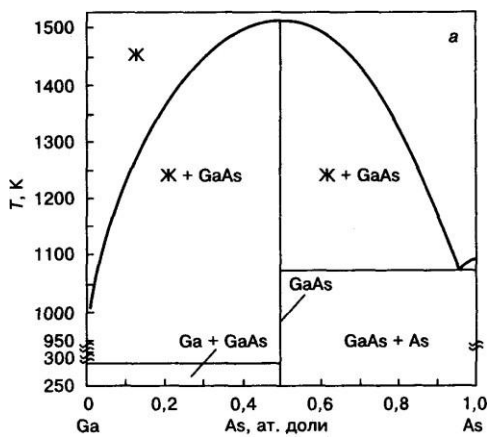
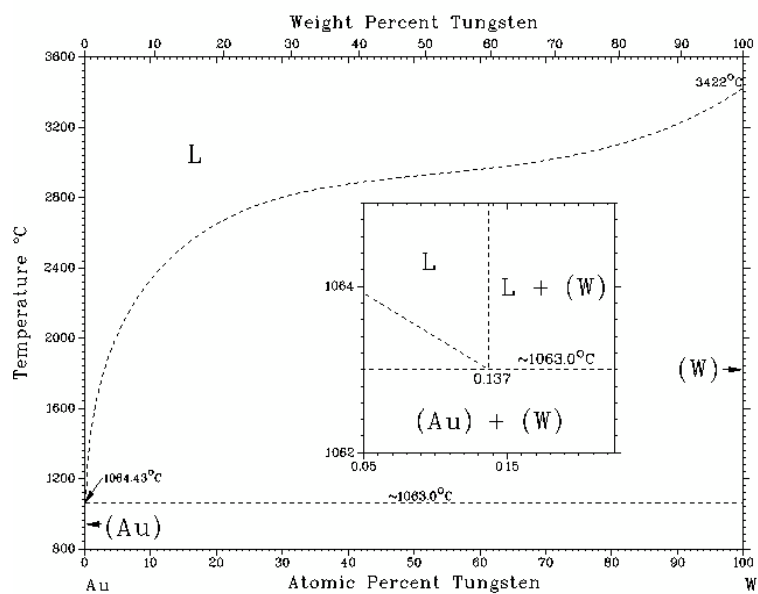
ПРИЛОЖЕНИЕ

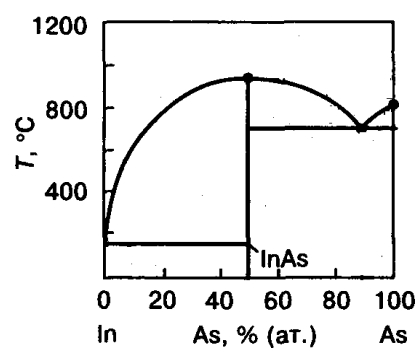
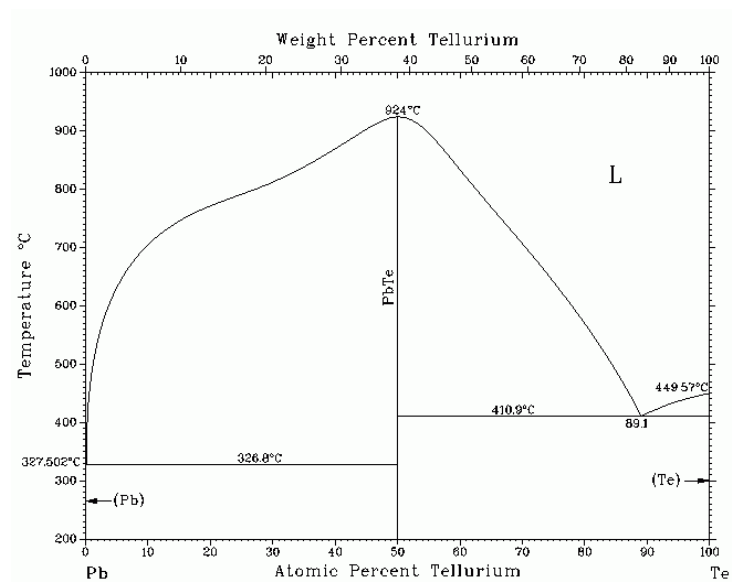
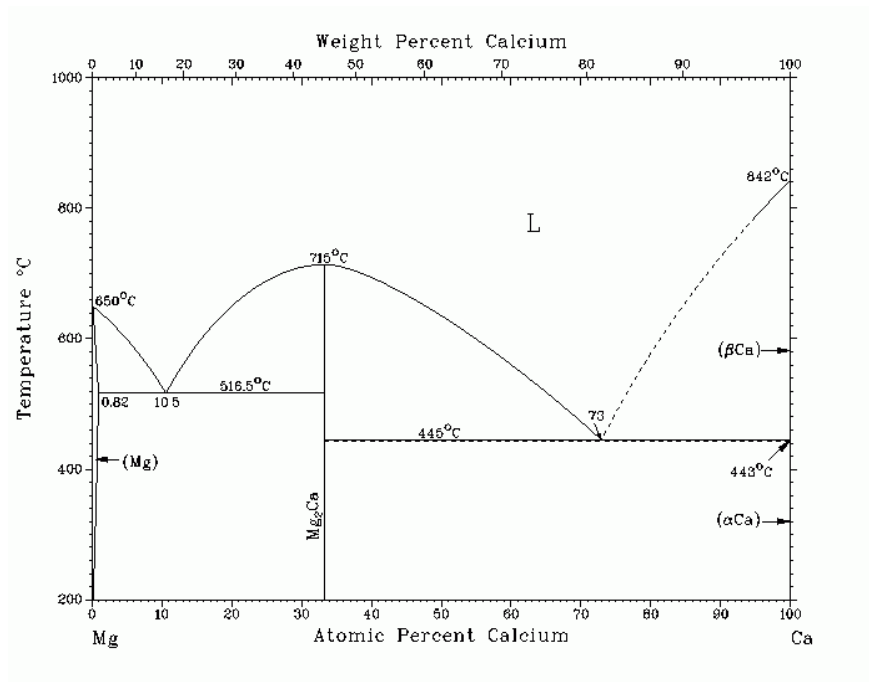
Диаграммы фазовых равновесий двухкомпонентных систем

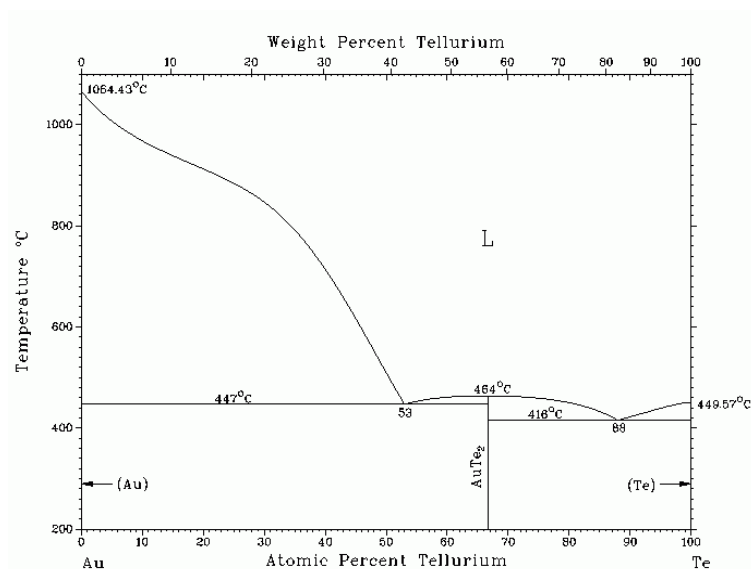
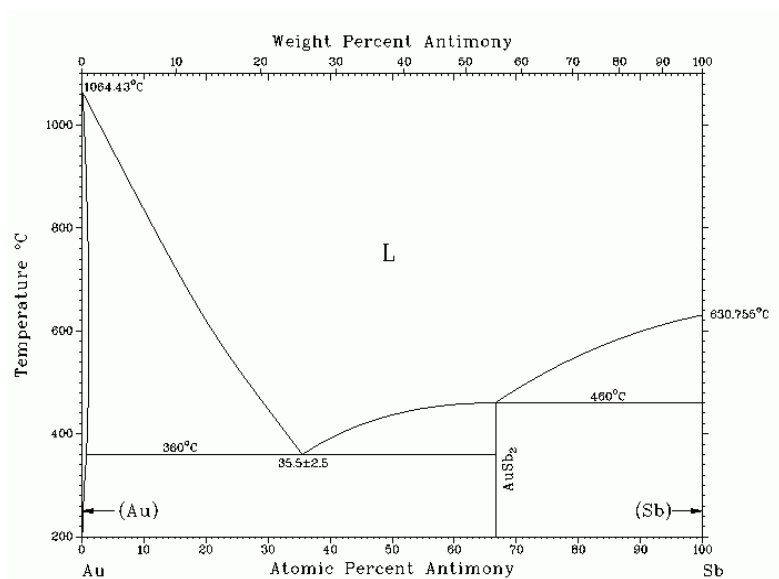












БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горелик, С.С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков [Текст] / С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. - М.: МИСИС, 2003.
2. Новокрещенова, Е.П. Материалы и элементы электронной техники [Текст]: учеб. пособие / Е.П. Новокрещенова, Т. В. Свистова. - Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2010. - Ч.1.
3. Ормонт, Б.Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников [Текст] / Б.Ф. Ормонт. - М.: Высш. шк., 1982.
4. Ротштейн, В. П. Диаграммы состояния двойных металлических сплавов : методические указания для студентов ФТП [Текст] / В. П. Ротштейн ; – Томск : Изд-во ТГПУ, 2009.
5. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники [Текст] / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. - СПб.: Лань, 2003.
6. Раскин, А.А. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники [Текст]: учеб. пособие / А.А. Раскин, В.К. Прокофьева. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. - Ч.1.