

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Ю.А. Брусенцов, В.А. Пручкин, И.С. Филатов

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области радиотехники, электроники,
биомедицинской техники и автоматизации
в качестве лабораторного практикума*

Издание второе, стереотипное



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2011

УДК 621.396.6
ББК з813я73-5
Б892

Р е ц е н з е н т ы :

Доктор физико-математических наук,
профессор ТГУ им. Г.Р. Державина
В.А. Федоров

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
А.М. Савельев

Брусенцов, Ю.А.

Б892 **Материалы электронной техники : лабораторный практикум /**
Ю.А. Брусенцов, В.А. Пручкин, И.С. Филатов. – 2-е изд., стерео-
тип. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 44 с. – 100 экз.

Содержит указания к выполнению лабораторных и практических работ по изучению структуры, механических, электрических и магнитных свойств металлов и сплавов. Позволит разобраться студентам в методах прогнозирования свойств металлических и неметаллических материалов с помощью равновесных диаграмм состояния, а также по изменению их структуры с помощью различных видов термообработки.

Лабораторный практикум предназначен для студентов 1 – 3 курсов специальностей 210201, 210303, 210200, 140106, 140211 дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.396.6
ББК з813я73-5

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2011

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие электроники связано с появлением новых разнообразных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, которые находят широкое применение в вычислительной технике, космонавтике, автоматике, радиотехнике, телевидении, в установках измерительной техники, медицине, биологии и др. В настоящее время число наименований материалов, применяемых в электронной технике для различных целей, составляет несколько тысяч.

При использовании материалов необходимо знание комплекса их свойств, позволяющих использовать их при различных условиях эксплуатации. Нередко перед конструкторами и технологами возникают и более сложные задачи по созданию материалов с заранее заданными свойствами.

В электронной промышленности для изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широко используются как традиционные полупроводники, металлы и сплавы, так и новые материалы, специально разработанные для полупроводниковой технологии.

Основной задачей настоящего лабораторного практикума является освоение методик измерения основных характеристик материалов электронной техники и умение определять их свойства и область применения.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: ознакомиться с методами микроанализа структуры металлов и сплавов. Изучить структуру чистых металлов и различных типов твердых сплавов.

Приборы и принадлежности: оптические микроскопы, металлографические шлифы.

Методические указания

Из 106 элементов периодической системы Д.И. Менделеева 82 – металла. Поэтому изучение их структуры и свойств так важно для практических целей в электронной технике.

Металлы обычно являются кристаллическими телами или кристаллами. Кристаллом называют бесконечное упорядоченное расположение атомов в пространстве. Все кристаллические материалы обладают анизотропией – зависимостью свойств материала от направления в нем. Это объясняется тем, что в каждом направлении в кристалле расстояние между атомами или молекулами строго определенное, а значит и силы взаимодействия между ними в каждом случае различные.

Реальные кристаллы содержат большое количество нарушений в упорядоченном расположении атомов. Поэтому чаще встречаются не моно-, а поликристаллы (рис. 1, а), которые состоят из большого количества зерен, в которых одна и та же кристаллическая решетка (показана штриховкой) ориентирована в пространстве по-разному.

Для проведения микроанализа образец разрезают (плоскость разреза А-А) и на одной из его половин шлифовкой и полировкой приготавливают шлиф (рис. 1, б). Его поверхность гладкая и чаще всего не показывает

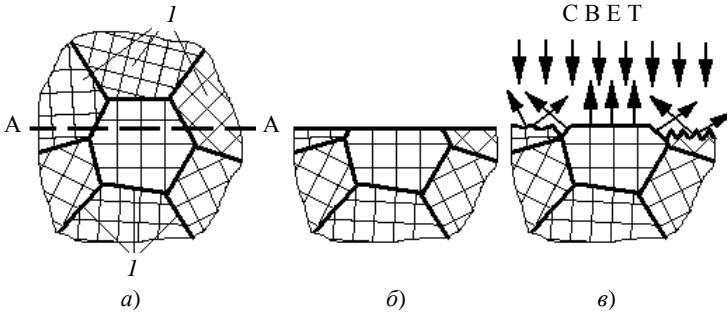


Рис. 1. Микроанализ поликристаллического материала:

а – схема поликристалла (1 – зерна или кристаллиты, 2 – границы зерен);

б – полированный шлиф; в – отражение света от травленного шлифа

структуры металла. Для выявления структуры шлиф подвергают действию специального реактива – травителя, состав которого зависит от изучаемого материала и цели металлографического исследования. Обычно травители – растворы кислот, щелочей или солей. В процессе травления скорость и характер растворения разных зерен шлифа будет разной из-за анизотропии, так как они выходят на поверхность шлифа разными направлениями.

Границы зерен – это дефект кристалла, где атомы более активны и легче растворяются. Поэтому на границах зерен в поликристалле шлиф будет растравливаться сильнее (рис. 1, в).

При освещении травленной поверхности лучи света будут по-разному отражаться от ее рельефа. Поэтому при наблюдении шлифа в отраженных лучах мы увидим светлые и темные зерна, отделенные друг от друга темными полосками границ (рис. 2).

Чаще всего размер зерен в современных металлах и сплавах не превышает 10...100 мкм (0,01...0,10 мм). Это гораздо меньше разрешающей способности человеческого глаза (0,3 мм). Поэтому металлографический анализ обычно проводят с помощью оптического микроскопа, схема которого представлена на рис. 3.

Свет от лампы 1 попадает в конденсор 2, формирующий яркий равномерный пучок, который затем отражается от полупрозрачного зеркала 3, проходит через объектив 4 и фокусируется на объекте 5. Полученное изображение поверхности (в отраженных лучах) увеличивается объективом, проходит через полупрозрачное зеркало и попадает в окуляр 6. Окуляр дополнительно увеличивает изображение и проецирует его в глаз оператора.

Увеличение микроскопа можно определить по формуле $M_m = M_{об} \times M_{ок}$, где $M_{об}$ и $M_{ок}$ – увеличение объектива и окуляра.

Для получения изображения необходимо установить изучаемый шлиф на предметный стол микроскопа полированной поверхностью в сторону объектива. Включить микроскоп тумблером на блоке питания. Посмотреть в окуляр микроскопа и, вращая ру-

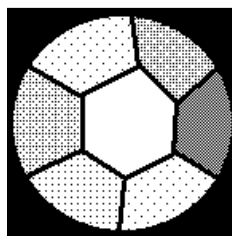


Рис. 2. Структура поликристалла однофазного сплава

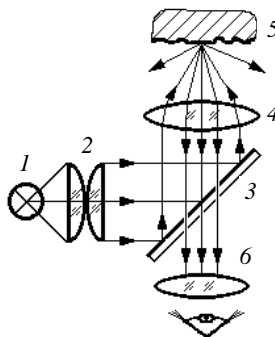


Рис. 3. Схема микроскопа на отражение:

- 1 – источник света;
- 2 – конденсор;
- 3 – полупрозрачное зеркало;
- 4 – объектив; 5 – объект;
- 6 – окуляр

коятку грубой настройки резкости микроскопа, приблизить объектив к шлифу до появления изображения. Получить резкое изображение с помощью рукоятки тонкой настройки. При изучении шлифа перемещать образец с помощью винтов предметного стола.

В технике применяют обычно не чистые металлы, а **сплавы**, в состав которых входят два и более **компонентов** (элементов). В зависимости от химического состава и условий производства сплавы могут состоять из одной или нескольких **фаз**.

Фаза – это однородная часть сплава, отделенная от других поверхностью раздела, при переходе через которую кристаллическая решетка, химический состав и свойства резко изменяются.

Фазовый состав сплава показывает:

- какие фазы в него входят;
- химический состав каждой фазы;
- количество каждой фазы.

Структура сплава показывает форму, размеры и взаимное расположение зерен каждой фазы в материале.

Только зная фазовый состав и структуру сплава, можно точно предсказать и объяснить его свойства!

Рассмотрим различные структуры, которые может иметь технически чистый металл на стадиях его металлургического передела (рис. 4).

После выплавки и заливки в форму начинается затвердевание металла. При кристаллизации также проявляется анизотропия – зародыши образуются не круглой равноосной формы, а в виде иголок в направлении, где его скорость роста максимальна. В кристаллах с кубической решеткой – это обычно направление ребра куба. Спустя некоторое время на образовавшихся иглах появляются «ветки» – отростки в направлении другого ребра куба. Такие кристаллы называют дендритами («dendros» – дерево). Полученная структура литого металла (рис. 4, *a*) имеет высокую неоднородность химического состава – все вредные примеси собираются между дендритами, резко охрупчивая металл.

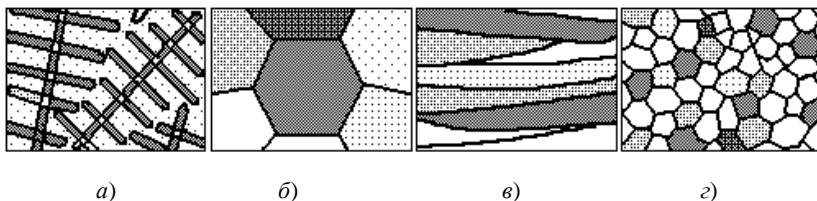


Рис. 4. Структуры передела металла:

a – литой; *б* – отожженный; *в* – деформированный; *з* – после рекристаллизации

Для улучшения качества слитки подвергают выравнивающему (гомогенизирующему) отжигу при температуре, близкой к температуре плавления, $t = (0,7 \dots 0,8) t_{пл}$. Такой нагрев активизирует диффузию атомов, и они располагаются равномерно по всему объему. Одновременно при этом образуется крупное равноосное зерно в структуре отожженного металла в виде правильных многогранников (рис. 4, б).

Для придания металлу необходимой формы (с поперечным сечением в виде круга, квадрата, прямоугольника, двутавра и др.) слиток подвергают пластической деформации. При этом меняется структура металла: при холодной пластической деформации зерна вытягиваются и утоняются, превращаясь в волокна (рис. 4, в).

Для улучшения комплекса механических и технологических свойств металл после пластической деформации подвергают повторному отжигу (рекристаллизационному) при более низкой температуре. При этом формируется мелкозернистая структура отожженного металла (рис. 4, г), которая обеспечивает хорошую обрабатываемость резанием.

Таким образом, в зависимости от состояния металла (стадии его передела) структура меняется, что вызывает изменение его свойств. Очень часто при микроанализе ставится вопрос – описать структуру сплава. При этом необходимо перечислить все структурные составляющие и указать фазы, из которых они состоят (обычно это пишут на рисунке структуры сплава на выносных линиях).

Пример: *Задание:* описать структуру технически чистого металла А, изображенную на рис. 2. *Ответ:* структура технически чистого металла состоит из равноосных зерен фазы А.

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство светового металлографического микроскопа. Научиться пользоваться рукоятками грубой и тонкой настройки резкости и микровинтами перемещения предметного стола.

2. Изучить и зарисовать структуру предложенных металлов и сплавов.

1. Результаты микроанализа

№ шлифа	Марка металла или сплава	Химический состав	Состояние металла	Тип сплава в твердом состоянии
1				
2				
3				
4				
5				

3. Определить их металлургическое состояние, сравнивая с образцами на рис. 4. Занести результаты микроанализа в табл. 1.

4. По результатам микроанализа и химическому составу образцов указать тип сплава в твердом состоянии для каждого шлифа в табл. 1.

В зависимости от того, какие компоненты входят в сплав, насколько они близки по свойствам, насколько сильно они взаимодействуют между собой, различают **три основных типа сплавов в твердом состоянии**:

- **Твердый раствор** – это:

- а) однофазный сплав, у которого одна кристаллическая решетка;

- б) его кристаллическая решетка похожа на один из компонентов сплава;

- в) его свойства похожи на один из компонентов сплава;

- г) он обозначается греческой буквой ($\alpha, \beta, \gamma, \dots$).

Структура отожженного твердого раствора показана на рис. 2.

В микроскопе трудно отличить чистый металл от твердого раствора.

- **Химическое соединение** – это:

- а) однофазный сплав, у которого одна кристаллическая решетка;

- б) его кристаллическая решетка новая и не похожа ни на один из компонентов сплава;

- в) его свойства не похожи ни на один из компонентов сплава.

- г) химический состав описывается формулой типа $A_n B_m$.

Структура химического соединения показана на рис. 2.

В микроскопе трудно отличить чистый металл от химического соединения.

- **Физико-механическая смесь** – это:

- а) многофазный сплав, у которого две или более кристаллических решеток (это – **смесь фаз**);

- б) свойства сплава зависят от количества и свойств каждой фазы, которая находится в смеси.

Структуры механических смесей показаны на рис. 5. Рассмотрим их на примере механической смеси из двух фаз – пластичного твердого раствора α и твердого хрупкого химического соединения $A_n B_m$. Все представленные сплавы (рис. 5) имеют примерно одинаковый фазовый состав. Однако за счет различной структуры свойства у них будут сильно отличаться.

Самую низкую твердость будет иметь сплав на рис. 5, а. Структура сплава состоит из зерен твердого раствора α и случайно расположенных первичных включений $A_n B_m$. Округлые включения $A_n B_m$ не будут сильно мешать пластической деформации зерен α -раствора.

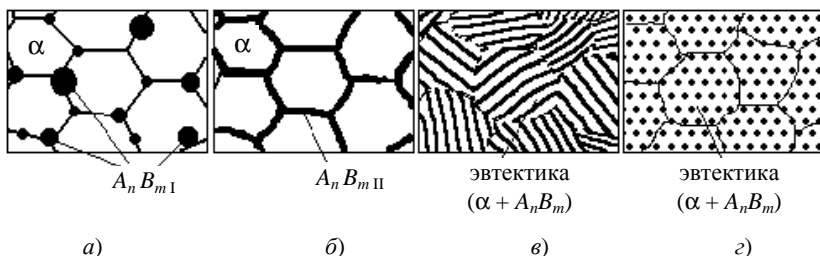


Рис. 5. Структуры физико-механических смесей

Самой хрупкой будет механическая смесь на рис. 5, б. Структура сплава состоит из зерен твердого раствора α и расположенной по их границам сетки вторичных выделений $A_n B_m II$. При малейшем нагружении этого сплава сразу образуются трещины на зернограницных выделениях $A_n B_m II$, и материал разрушится.

Сплав на рис. 5, в будет более прочным, чем первые два (рис. 5, а, б), но довольно хрупким. Структура сплава состоит из зерен пластинчатой эвтектики ($\alpha + A_n B_m$). При достаточно высоком нагружении трещины будут образовываться по плоской границе между пластинами фаз, входящих в эвтектику. Такие твердые пластины, как выделения фазы $A_n B_m$ в этом сплаве принято называть структурными надрезами.

Структура сплава на рис. 5, г состоит из кристаллитов зернистой эвтектики ($\alpha + A_n B_m$). Обычно округлые включения твердой фазы делают очень мелкими, тогда такой сплав будет и очень прочным и очень вязким (это наилучшая структура материала для любой конструкции).

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема светового металлографического микроскопа, его характеристика (увеличение объектива и окуляра).
3. Таблица результатов микроанализа структуры металлов и сплавов.

Контрольные вопросы

1. Принципы микроанализа структуры металлов и сплавов.
2. Что показывает структура металла? Описать структуру сплава.
3. Типы сплавов в твердом состоянии.
4. Типы твердых растворов.
5. Химические соединения, устойчивые и неустойчивые.
6. Физико-механические смеси, их структура и свойства.

Литература: [1, 2].

СВЯЗЬ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СО СВОЙСТВАМИ СПЛАВА

Цель работы: изучить влияние типа двойной диаграммы состояния на характер зависимости свойств сплавов от химического состава.

Приборы и принадлежности: мост постоянного тока Р3009, источник постоянного тока ЛИПС, образцы медно-никелевых сплавов и электротехнических сталей разного состава.

Методические указания

Диаграмма состояния показывает фазовый состав каждого сплава данной системы при любой температуре. Тип фазовой диаграммы и твердого сплава определяет его свойства в равновесном состоянии. Зная диаграмму состояния можно описать физические и технологические свойства любого сплава и прогнозировать область его применения. На рис. 1 показана зависимость удельного электрического сопротивления сплавов при $t = 20^\circ\text{C}$ от химического состава для различных типов диаграмм состояния.

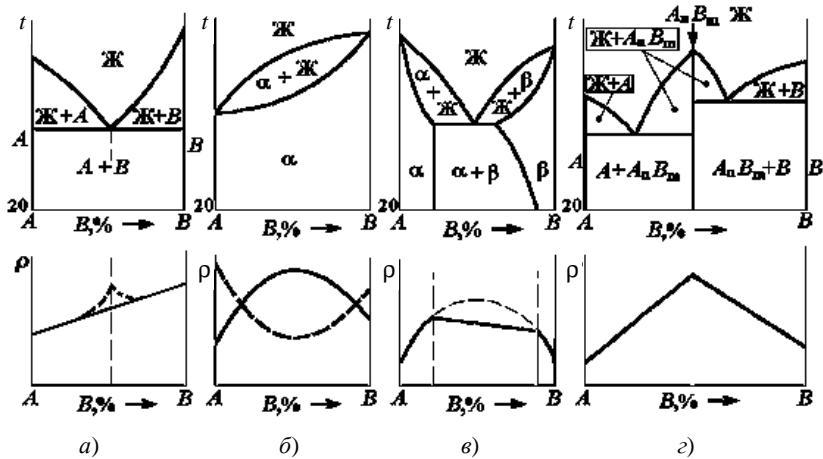


Рис. 1. Влияние типа диаграмм состояния на характер зависимости удельного электрического сопротивления от химического состава:

- a* – компоненты нерастворимы в твердом состоянии;
- б* – неограниченная растворимость в твердом состоянии (пунктир – неметаллы, сплошная линия – металлы);
- в* – ограниченная растворимость в твердом состоянии;
- з* – с химическим соединением

В случае, когда компоненты не растворимы друг в друге в твердом состоянии, двойные сплавы после затвердевания представляют **физико-механическую смесь** кристаллов чистых элементов. Изменение химического состава сплава приводит лишь к пропорциональному изменению количества каждой фазы, состав и свойства которых неизменны (по правилу отрезков). Поэтому удельное электрическое сопротивление механической смеси прямо пропорционально изменению химического состава (рис. 1, *a*). Так же будет меняться твердость сплава. На реальных кривых сопротивление – % легирующей добавки для механических смесей, получающихся в результате эвтектического превращения. Электрическое сопротивление сплава при приближении к эвтектическому составу возрастает, отклоняясь от линейного закона (пунктир на рис. 1, *a*). Это связано с тем, что в результате эвтектического превращения получается мелкозернистая структура. Измельчение зерна в любом металлическом сплаве увеличивает его электросопротивление и прочность. Физико-механические смеси имеют низкую пластичность, поэтому их можно подвергать только горячей обработке давлением. Однако они хорошо обрабатываются резанием, давая малую шероховатость поверхности. Двухфазные сплавы, содержащие эвтектику, обладают наилучшими литейными свойствами.

Диаграмма с неограниченной растворимостью характерна для компонентов, имеющих близкие по размерам и свойствам атомы и одинаковую кристаллическую решетку и образующих **твердый раствор** замещения. Для твердых растворов характерна нелинейная зависимость удельного электросопротивления от химического состава (рис. 1, *б*). Это определяется тем, что атомы замещения и внедрения искажают кристаллическую решетку. При этом ее структурно-чувствительные свойства меняются пропорционально произведению концентраций атомов легирующих добавок x и основы $(1 - x)$, образующих твердый раствор $\rho_x = \rho_x x (1 - x)$. Здесь ρ_x – коэффициент пропорциональности, отражающий природу элементов.

В случае если оба элемента – металлы, для которых характерна металлическая химическая связь, искажение кристаллической решетки растворенными атомами уменьшает скорость направленного движения электронного газа во внешнем электрическом поле, что ведет к росту сопротивления при легировании. Максимальное сопротивление будет иметь раствор, равноудаленный от чистых компонентов (как на рис. 1, *б*, сплошная линия).

Если оба компонента раствора – неметаллы (ковалентная связь, электроны удерживаются атомами, свободных электронов мало), то искажение кристаллической решетки растворенными атомами приводит к появлению новых носителей электрического тока, и сопротивление уменьшается (пунктирная кривая на рис. 1, *б*).

Твердые растворы на основе металла обычно имеют высокую пластичность, но они плохо обрабатываются резанием, так как образуют витую стружку, которая наматывается на инструмент. Поэтому в изделиях из таких сплавов трудно получить высокое качество поверхности обработкой резанием. Кроме этого большинство растворов имеют неудовлетворительные литейные свойства из-за большого интервала температур кристаллизации.

В природе не бывает совершенно чистых элементарных веществ – всегда в них присутствуют растворенные примеси. Поэтому **диаграмма с ограниченной растворимостью в твердом состоянии** встречается чаще всего (рис. 1, в). На ней есть два типа твердых сплавов – физико-механические смеси и твердые растворы (замещения или внедрения). При построении изотермической кривой «свойство–химический состав» на диаграмме следует провести линию постоянной температуры (обычно при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), которая при пересечении с фазовыми линиями даст концентрации точек, где тип сплава резко изменяется. Проекция этих точек следует перенести на график «свойство–химический состав». Для того, чтобы качественно построить криволинейные участки, соответствующие свойствам ограниченных твердых растворов, следует пунктиром нанести параболу для неограниченных, а затем обвести ее участки до пределов растворимости. Полученные предельные значения (например, удельного сопротивления) будут определять свойства фаз, входящих в физико-механическую смесь.

В случае, если в процессе затвердевания компоненты вступают во взаимодействие, образуя **химическое соединение**, на двойной диаграмме (рис. 1, г) появляется однофазная область с постоянным химическим составом $A_n B_m$, которая разбивает ее на две диаграммы с эвтектикой. Наличие на диаграмме химического соединения приводит к появлению перелома (сингулярной точки) на линии свойства–содержание компонентов. Это связано с тем, что для него характерна новая кристаллическая решетка и не похожие на исходные компоненты свойства. Слева и справа от точки перелома будут прямые, описывающие свойства физико-механических смесей.

Следует отметить, что химический состав соединения не всегда имеет точный состав и строго описывается формулой. В этом случае изменение его свойств имеет более сложный характер. Различают химические соединения, состоящие из металла и неметалла и интерметаллиды (рис. 2).

Сопротивление химического соединения металл–неметалл выше, чем составляющих его элементов (рис. 2, а, где A – металл, Ne – неметалл). Это связано с тем, что в результате химического взаимодействия (образо-

вание ковалентных или ионных связей) уменьшается число свободных электронов – носителей тока в твердом теле. При отклонении химического состава от формулы соединения его решетка искажается, что приводит к образованию новых носителей тока (как в полупроводниках), и сопротивление падает.

В интерметаллидах (рис. 2, б, где A и Me – металлы) сохраняется металлическая связь, для которой характерна высокая концентрация электронов проводимости. Однако скорость их направленного движения в электрическом поле намного меньше, чем в металлах за счет более сильного взаимодействия с атомами. Поэтому удельное сопротивление такого «промежуточного соединения» больше, чем у компонентов. Минимальное значение его соответствует упорядоченному расположению атомов растворенного металла в решетке растворителя, а при отклонении от него электросопротивление растет.

В работе предлагается исследовать влияние концентрации легирующих добавок на удельное электросопротивление электротехнической стали и медно-никелевых сплавов. Для измерения электросопротивления используется метод двойного моста, позволяющий проводить измерения с высокой точностью.

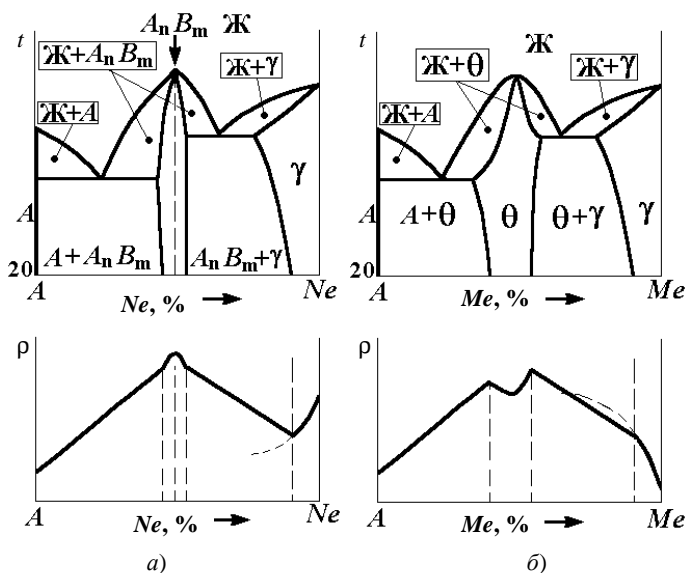


Рис. 2. Влияние типа химического соединения на электросопротивления от химического состава:

a – металл–неметалл; b – металл–металл

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой измерения электросопротивления методом двойного моста (рис. 3).

Перед началом измерения необходимо удостовериться, что ключ питания схемы разомкнут, гальванометр (нуль-прибор) отключен (нажата кнопка «шунт»), переключатель его чувствительности в положении *I*, измерительные декады в нулевом положении. При этом стрелка гальванометра должна стоять на нуле.

2. Закрепить образец в контактных захватах, включить блок питания схемы, установить ток 0,5 А. Отжать кнопку «шунт», нажать «измерение». Стрелка гальванометра отклонится от нуля, показывая разбаланс мостовой схемы. Уменьшить его поворотом рукояток декад моста (слева направо на панели прибора), последовательно увеличивая чувствительность прибора до положения 5.

Устранив разбаланс, определить значения *R* и *M*₁ по декадам прибора.

3. Перевести переключатель чувствительности в положение *I*, отжать кнопку «измерение», включить кнопку «шунт» и разомкнуть ключ питания. Измерить штангенциркулем расстояние между потенциальными контактами. Изменить положение потенциальных контактов. Повторить измерение согласно пункту 2. После трех измерений на одном образце с разной базой между потенциальными контактами, сменить образец и повторить измерения.

Размеры поперечного сечения каждого образца измерить штангенциркулем после его демонтажа из установки.

4. Сопротивление образца рассчитать по формуле

$$R_X = 10^{-3} R_N M_1 R, [\text{Ом}], \quad (1)$$

где $R_N = 10^{-3}$ Ом – образцовое сопротивление; *R* – показания декад; *M*₁ – постоянная величина плеча моста.

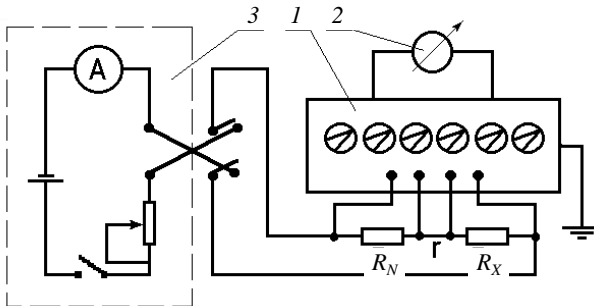


Рис. 3. Схема установки:

I – мост постоянного тока; 2 – нуль-прибор; 3 – источник постоянного тока

5. Рассчитать удельное сопротивление образцов:

$$\rho = \frac{R_X F}{l}, \quad (2)$$

где F – средняя площадь поперечного сечения образца по трем измерениям, м^2 ; l – расстояние между потенциальными зажимами, м.

Рассчитать средние арифметические значения удельного сопротивления образцов для трех расстояний между контактами и стандартное отклонение. Данные занести в табл. 1.

1. Результаты измерений электросопротивления сплавов

№ образца	Содержание легирующей добавки, % вес.	l_1 , м		l_2 , м		l_3 , м		ρ , Ом·м	S_X , Ом·м
		R_1	ρ_1	R_2	ρ_2	R_3	ρ_3		
1									
2									
3									
4									
5									

6. Построить графики зависимости удельного сопротивления от состава медно-никелевых сплавов и электротехнических сталей. По полученным зависимостям сделать вывод о типе изученных сплавов.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Описание приборов и образцов.
3. Методика измерения сопротивления, схема установки.
4. Таблица результатов измерений, графики изменения удельного электрического сопротивления $\rho = f(x)$.
5. Заключение о типе исследованных сплавов.

Контрольные вопросы

1. Основные типы твердых сплавов.
2. Правила заполнения диаграмм состояния фазами и структурными составляющими.
3. Фазовый состав сплава. Правило отрезков.
4. Основные закономерности формирования свойств различных типов твердых сплавов

Литература: [1].

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЮРАЛЮМИНИЯ

Цель работы: изучить принципы упрочнения сплавов методом дисперсионного твердения на примере алюминий-медных сплавов.

Приборы, приспособления и материалы: нагревательные печи, твердомер, закалочная ванна, закалочные клещи, образцы дюралюминия.

Методические указания

К дюралюминиям относятся пластически деформируемые алюминиевые сплавы, которые легируют медью, магнием, кремнием и марганцем для получения высокой прочности после термообработки. Они применяются для изготовления корпусных деталей и несущих конструкций РЭА средней и повышенной прочности, требующих долговечности при переменных нагрузках.

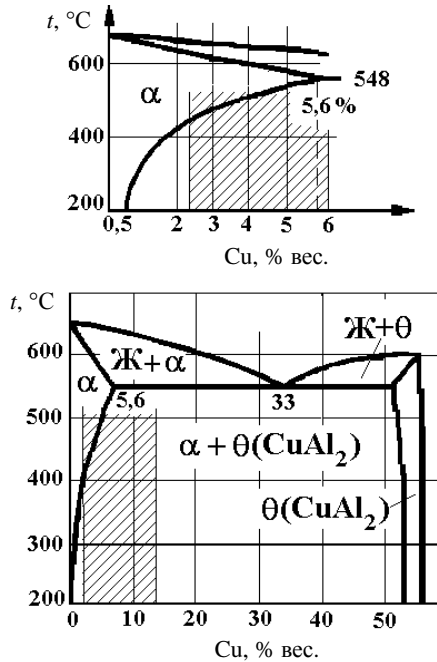


Рис. 1. Равновесная диаграмма состояния Al-Cu (заштрихованная область – термоупрочняемые сплавы)

1. Химический состав дюралюминов, вес. %

Марка	Cu	Mn	Mg	Si	Fe
Д1	3,8...4,8	0,4...0,8	0,4...0,8	менее 0,7	менее 0,7
Д16	3,8...4,5	0,3...0,9	1,2...1,8	менее 0,5	менее 0,5

Дюралюмины – многокомпонентные сплавы (табл. 1) и для правильного выбора их термической обработки следует использовать тройные или четверные равновесные диаграммы состояния. Однако, главным легирующим компонентом является медь, поэтому диаграмма алюминий–медь (рис. 1) позволяет достаточно точно спрогнозировать превращения при термообработке этих сплавов.

Алюминий с медью образует ограниченный твердый раствор замещения (рис. 1, верхний чертеж). Максимальная растворимость достигается при температуре 548 °С и составляет 5,6 вес. %. С уменьшением температуры до комнатной растворимость падает до 0,5 вес. %. В Al–Cu сплавах с содержанием меди больше 0,5 вес. %, но меньше 5,6 вес. % равновесная структура (рис. 2, а) будет состоять из зерен пластичного твердого раствора α и крупных включений твердой θ -фазы (CuAl_2). В реальных сплавах есть и другие соединения – CuMgAl_2 , CuMg_4Al_6 , Mg_2Al_3 и др.

Сплав, имеющий после отжига такую структуру, не обладает высокой пластичностью. Для обработки на максимальную пластичность дюралюминий следует нагреть до температуры 450...500 °С, при которой

θ -фаза растворится и останется только пластичный твердый раствор α (рис. 2, б).

При этих температурах обычно ведут горячую прокатку металлических заготовок (более высокий нагрев может вызвать сильное окисление сплава по границам зерен, его охрупчивание и даже оплавление).

Штамповку проще вести при комнатной температуре, поэтому для сохранения высокой пластичности делают закалку (обычно в воду).

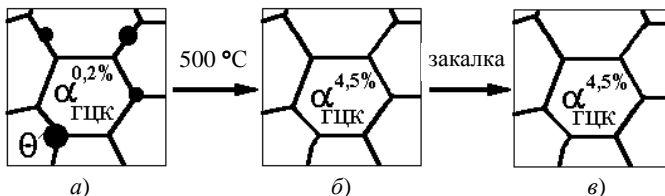


Рис. 2. Изменение структуры дюралюминия при закалке

2. Влияние термообработки на механические свойства дюралюминов

Марка	Режим термообработки	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_T , МПа	Относительное удлинение, δ , %
Д1	Отжиг	210	110	18
	Закалка	250	120	24
	Закалка + старение	490	320	14
Д16	Отжиг	220	110	18
	Закалка	260	130	23
	Закалка + старение	540	400	11

При быстром охлаждении не успевает произойти диффузионное движение атомов в сплаве (не выделяются кристаллы θ -фазы) – однофазная структура твердого раствора сохраняется (рис. 2, в). Такой раствор содержит 5,6 вес. % Cu вместо равновесных 0,5 вес. % Cu – он пересыщенный, но лишние атомы меди расположены случайно и слабо искажают кристаллическую решетку. Поэтому дюралюмин с такой структурой будет иметь более высокую прочность, чем отожженный (табл. 2), но одновременно **очень высокую технологическую пластичность**.

При комнатной температуре скорость диффузии мала, поэтому в течение 3...5 часов после закалки сплав будет хорошо обрабатываться давлением. При большем времени выдержки пластичность начинает ухудшаться, так как сплав стареет.

Различают естественное и искусственное старение, которые используют для повышения прочности заготовок после закалки и обработки давлением.

Естественное (низкотемпературное) старение происходит в закаленном дюралюминии при комнатной температуре. В таких сплавах при 20 °С скорость диффузии атомов очень мала (3 – 4 межатомных расстояния в сутки). Однако этого перемещения хватает, чтобы уменьшить свободную энергию сплава за счет группирования атомов меди. Вокруг каждого отдельного атома замещения (Cu) в ГЦК решетке α -раствора смещены из своего положения равновесия 12 атомов алюминия (рис. 3, а). Если же два атома Cu располагаются рядом, искажение решетки будет меньше. Поэтому в процессе выдержки при комнатной температуре атомы меди

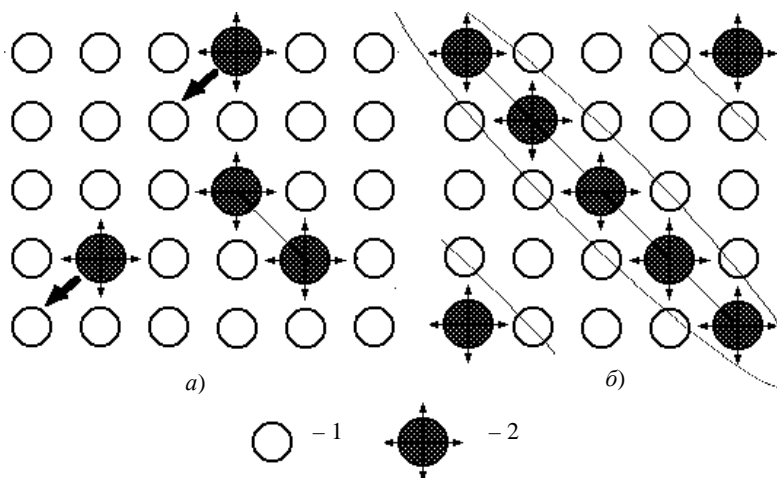


Рис. 3. Образование в твердом растворе (а) зон Гинье–Престона (б) при естественном старении

образуют огромное количество плоских скоплений (рис. 3, б) в виде дисков толщиной $(10...20) \cdot 10^{-10}$ м, которые были названы зонами Гинье–Престона по фамилиям первооткрывателей. ГП–зоны трудно увидеть даже в электронном микроскопе.

Эти зоны имеют решетку α -раствора, но отличаются расстоянием между атомами. Поэтому вокруг них в твердом растворе создаются мощные искажения кристаллической решетки, которые не дают двигаться дислокациям. Поэтому пластичность сплава падает, а прочность растет.

Закалка дюралюмина с последующим естественным (или зонным) старением обеспечивает **максимальную прочность сплава**.

Если естественно состаренный сплав кратковременно (5...10 мин) нагреть до 200°C , то активизация теплового движения атомов приводит к рассасыванию зон Гинье–Престона (атомы меди снова располагаются случайно в твердом растворе); закалка с 200°C возвращает сплаву высокую пластичность. Это явление получило название **возврат при естественном старении**.

Искусственное (высокотемпературное) старение – это процесс распада неравновесного пересыщенного твердого раствора при нагревании с выделением второй фазы (рис. 4, а). При нагревании увеличивается скорость диффузии атомов меди, и они уходят из пересыщенного раствора, образуя дисперсные частицы равновесной θ -фазы размером от 50 до 100 нм, равномерно распределенные внутри пластичной матрицы. Они мешают движению дислокаций в сплаве, уменьшая его пластичность.

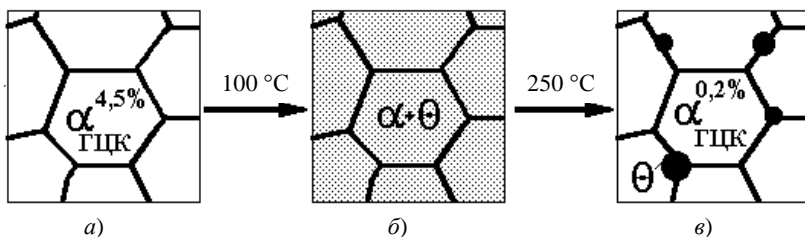


Рис. 4. Изменение структуры дюралюминия при фазовом (искусственном) старении

С ростом температуры и времени старения твердость дюралюминия растет. Обычно его старят при температуре 100 °С в течение 1 часа. Полученная структура (рис. 4, б) обеспечивает прочность на 20...30 % меньше, чем после естественного старения. Однако после фазового (искусственного) старения в материале сплав имеет низкий уровень остаточных напряжений, поэтому он имеет более **высокую коррозионную стойкость**.

В случае увеличения температуры старения выше 100 °С ускорение диффузии приводит к коагуляции (укрупнению) зерен θ -фазы. При этом облегчается движение дислокаций через редко расположенные твердые включения, пластичность сплава увеличивается, а прочность падает. Такое явление называют **перестариванием** дюралюминия (рис. 4, в – старение в течение 5 мин при 250 °С). Этот брак термообработки можно исправить только повторной закалкой с 500 °С (т.е. из α -раствора).

Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя образцы дюралюмина в отожженном состоянии и после естественного старения. Измерить их твердость. Результаты записать в табл. 3.

3. Изменение твердости дюралюминия при термической обработке

Режим термической обработки	Отжиг	Закалка	Зонное старение	Фазовое старение при 100 °С, мин			
				10	20	30	40
Твердость НВ, МПа							

2. Произвести закалку образцов дюралюмина с температуры 450...500 °С в воду.

3. Измерить твердость дюралюмина после закалки.

4. Провести искусственное старение образцов при температуре 100 °С в течение 10, 20, 30 и 40 мин. Для этого загрузить в печь, нагретую до 100 °С, все образцы и выдержать их в течение 1...2 мин для прогревания по всему сечению. После этого засечь начало времени выдержки по часам. По истечении каждой заданной выдержки вынимать из печи по одному образцу и охлаждать его в воде.

5. Измерить твердость образцов дюралюмина после различных режимов искусственного старения.

6. Построить график изменения твердости при искусственном старении сплава Д1. Сравнить эти значения с его свойствами после зонного старения.

7. Объяснить характер изменения механических свойств дюралюмина при старении.

Содержание отчета

1. Двойная диаграмма Al–Cu.

2. Краткое описание схемы термообработки дюралюмина. Виды старения после закалки этих сплавов и получаемые свойства.

3. График изменения твердости сплава в процессе искусственного старения.

Контрольные вопросы

1. Какие сплавы на диаграмме алюминий–медь можно упрочнить термообработкой?

2. Как термообработать дюралюминий на максимальную пластичность?

3. Как термообработать дюралюминий на максимальную прочность?

4. Что происходит при зонном старении дюралюминия?

5. Что происходит при искусственном старении дюралюминия?

6. Как термообработать дюралюминий на высокую прочность и коррозионную стойкость?

Л и т е р а т у р а : [1, 2].

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: освоить методику экспериментального определения удельных объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков и изучить влияние температуры на их электропроводность.

Приборы и принадлежности: установка для измерения электропроводности диэлектриков; набор диэлектриков.

Методические указания

Через диэлектрик, помещенный в постоянное электрическое поле, протекает электрический ток, который складывается из двух составляющих: тока поляризации и тока сквозной проводимости.

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема.

Различают поляризацию, возникающую под действием внешнего электрического поля, и спонтанную (самопроизвольную), существующую в отсутствие поля. В некоторых случаях поляризация диэлектриков появляется под действием механических напряжений.

Поляризационные процессы смещения любых зарядов в веществе, протекая во времени до момента установления и получения равновесного состояния, обуславливают появление поляризационных токов (токов смещения) в диэлектрике. У большинства диэлектриков эти токи настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. При замедленных видах поляризации, наблюдаемых у многих технических диэлектриков, токи смещения могут существовать в течение нескольких десятков секунд и более. Эти токи называют токами абсорбции $U_{аб}$.

Токи сквозной проводимости обусловлены наличием в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов – электронов, ионов.

Полная плотность тока в диэлектрике, называемого током утечки, представляет собой сумму плотностей токов абсорбционного и сквозного

$$J_{ут} = J_{аб} + J_{скв}.$$

После завершения процессов поляризации через диэлектрик проходит только сквозной ток. Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только сквозным током, но и активными составляющими поляризационных токов.

В соответствии с законом Ома, сопротивление диэлектрика, находящегося под действием постоянного электрического поля, определяется:

$$R_S = \frac{U}{J_{\text{СКВ}}},$$

где $J_{\text{СКВ}}$ – сквозной установившийся ток, А; U – приложенное напряжение, В.

За величину $J_{\text{СКВ}}$ принимают установившийся ток после завершения поляризации при постоянном напряжении.

У твердых изоляционных материалов различают объемное R_V и поверхностное R_S электросопротивления.

Полное электросопротивление диэлектрика определяется:

$$R_{\Pi} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}.$$

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной электропроводности разных диэлектрических материалов используют удельное объемное ρ_V удельное поверхностное ρ_S сопротивления.

Удельное объемное сопротивление ρ_V численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, если ток проходит через две противоположные грани этого куба.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывают по формуле:

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h},$$

где R_V – объемное сопротивление, Ом; S – площадь электрода, м²; h – толщина образца, м.

Если в приборе электроды круглые и разного диаметра, то за S принимается площадь меньшего электрода, диаметром d . Тогда формула определения удельного объемного электросопротивления:

$$\rho_V = R_V \frac{\pi d^2}{4h}.$$

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S численно равно сопротивлению квадрата материала со стороной в 1 м, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата (ρ_S выражают в Ом)

$$\rho_S = R_S \frac{a}{l},$$

где R_S – поверхностное сопротивление образца материала между параллельно поставленными электродами; a – длина электродов, м; l – расстояние между электродами, м.

В приборах обычно применяют два круглых и один кольцевой (охранный) электрода. В таком случае для расчета удельного поверхностного сопротивления пользуются формулой:

$$\rho_S = R_S \frac{\pi(d + D)}{d - D},$$

где D – диаметр внутреннего электрода, см; d – внутренний диаметр кольцевого («охранного») электрода, см.

Величина объемного и поверхностного удельного сопротивления зависит от многих факторов: от температуры, плотности, строения молекул диэлектрика величины и длительности приложенного напряжения. При длительной работе под напряжением сквозной ток через диэлектрик с течением времени может уменьшаться или увеличиваться.

Уменьшение сквозного тока со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца. Увеличение тока со временем свидетельствует об участии в нем зарядов, которые являются структурными элементами самого материала и о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения под напряжением, способном привести к разрушению – пробое диэлектрика.

Как правило, удельное объемное и поверхностное сопротивления неполярных диэлектриков гораздо больше, чем у полярных. С увеличением температуры и влажности они снижаются у неполярных диэлектриков незначительно, тогда как у полярных очень сильно. Величина приложенного напряжения для твердых и жидких диэлектриков имеет значение лишь при напряженностях поля превышающих $10^4 \dots 10^5$ В/см. При этом у них наблюдается отклонение от линейного закона (Ома) и переход к экспоненциальной зависимости. С увеличением времени приложения напряжения электросопротивление диэлектриков уменьшается в результате ускоренного процесса старения.

Поверхностное удельное электросопротивление зависит еще от чистоты обработки поверхности диэлектриков, так как чем чище обработка поверхности, тем меньше она адсорбирует влаги и токопроводящих примесей.

Измерение удельных объемного и поверхностного электросопротивлений проводится на установке (рис. 1).

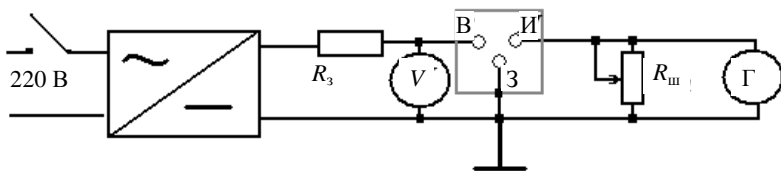


Рис. 1. Электрическая схема установки для измерения объемного и поверхностного сопротивлений:

Г – гальванометр; R_3 – защитное сопротивление; $R_{ш}$ – шунт гальванометра;
 R_X – клеммы для присоединения высоковольтного «В»;
 измерительного «И» и охранного (заземляющего) «З» электродов, образца

Для измерения электросопротивлений плоского образца применяется устройство, состоящее из трех электродов (рис. 2, а, б).

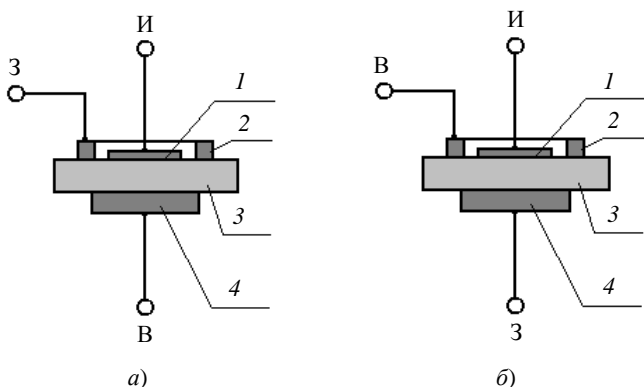


Рис. 2. Схема включения устройства для измерения:
 а – объемного электросопротивления;
 б – поверхностного электросопротивления

В схеме (рис. 2, а) «охранный» электрод позволяет отвести ток поверхностной утечки на землю и создать равномерное поле в образце. В схеме (рис. 2, б) «охранный» электрод отводит ток объемной проводимости на землю, минуя гальванометр.

Порядок выполнения работы

1. Поставить испытуемый диэлектрик между электродами. Подключить измерительную камеру согласно схеме рис. 2, а.

Чтобы не повредить гальванометр, поставить шунт в положение «О», чтобы ток через гальванометр не проходил.

2. Включить установку в присутствии преподавателя или лаборанта. Работу проводить в резиновых перчатках, стоя на изолирующем коврике.

3. Включить выпрямитель, увеличивая плавно напряжение до 500 или 1000 В (указывается преподавателем).

4. Изменяя положение шунта, добиться удобной для отчета величины показания гальванометра.

5. Произвести отсчет показания гальванометра через одну минуту после подачи на образец напряжения. После снятия отсчета шунт немедленно поставить в положение «О».

6. Подсчитать силу тока, протекающего через гальванометр по формуле:

$$J_V = \frac{\alpha C_d}{n},$$

где α – отклонение гальванометра, мм; C_d – динамическая постоянная гальванометра, А/мм; n – коэффициент шунтирования.

7. Подсчитать объемное электрическое сопротивление диэлектрика

$$R_V = \frac{U}{J_V} = \frac{Un}{\alpha C_d}.$$

8. Определить удельную объемную проводимость по формуле:

$$\gamma_V = \frac{1}{R_V} \frac{h}{F} = \frac{\alpha C_d h}{UnF},$$

где h – толщина диэлектрика, см; F – площадь измерительного электрода, см².

Произвести измерения для различных образцов диэлектриков. Данные занести в табл. 1.

Таблица 1

№	Наименование материала	U , В	α , мм	n	F , см ²	h , см	C_d , А/мм	γ_V , 1/Ом·см	ρ_V , Ом·см
1									
2									
3									

9. Для определения удельной поверхностной проводимости подключить измерительную камеру согласно схемы (рис. 2, б).

Порядок определения γ_S такой же как при определении γ_V . Поверхностное сопротивление R_S определяется по формуле:

$$R_S = \frac{U}{J_S}.$$

10. Подсчитать величину удельного поверхностного сопротивления

$$\rho_S = R_S \frac{S}{l}.$$

Для электродов 1 и 4 длина пути утечки тока по поверхности диэлектрика равна ширине зазора между электродами, т.е.

$$l = \frac{d - D}{2}.$$

Условное сечение S равно длине средней окружности диаметром $\frac{d + D}{2}$, тогда

$$\rho_S = R_S \pi \frac{d + D}{d - D}.$$

11. Подсчитать величину удельной поверхностной проводимости по формуле:

$$\gamma_S = \frac{\alpha C_d (d - D)}{\pi U n (d + D)}.$$

Данные измерений и геометрические размеры занести в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Наименование материала	U , В	α , мм	n	D , см	d , см	C_d , А/мм	γ_S , 1/Ом·см	ρ_S , Ом·см
1									
2									
3									

Содержание отчета

1. Название, цель работы, приборы и принадлежности.
2. Электрическая схема установки и схемы подключения электродов для измерения γ_V и γ_S .
3. Порядок выполнения работы и таблицы результатов измерений и вычислений.

Контрольные вопросы

1. Какие виды электропроводности наблюдаются в твердых диэлектриках?
2. Какие факторы влияют на объемную удельную проводимость?
3. Почему принято определять сопротивление на постоянном напряжении?

Литература: [3].

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучить влияние частоты на потери в магнитомягких материалах (электротехническая сталь), а также воздействие пластической деформации (изгиб и сжатие) на магнитные свойства пермаллоев.

Приборы и принадлежности: образцы электротехнической стали и пермаллоя различных марок, измерительные приборы, микрометр, мини-пресс.

Методические указания

Все магнитные материалы подразделяются на:

- 1) магнитомягкие,
- 2) магнитотвердые.

Магнитотвердые материалы характеризуются высокой коэрцитивной силой ($H_c \geq 4$ кА/м) и применяются для изготовления постоянных магнитов. В радиотехнике гораздо шире применяются *магнитомягкие материалы*. Они характеризуются высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой ($H_c < 4$ кА/м) и малыми потерями на гистерезис. Их можно разделить на 3 группы:

- 1) металлические магнитные материалы (железо и его сплавы) – применяются в основном в звуковом диапазоне частот. Наиболее высокочастотный металлический магнитный материал – пермаллой;
- 2) магнитодиэлектрики;
- 3) ферриты.

Все магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса (они обладают малым запасом магнитной энергии и легко перемагничиваются), магнитная проницаемость в слабых и сильных полях велика. Из магнитомягких материалов изготавливают сердечники дросселей и трансформаторов электронных узлов,

Электротехнические стали (сплав железа и кремния (до 4,8 %)) имеют петлю гистерезиса с большим значением индукции и высокую магнитную проницаемость (до 100 000 и более) на низких частотах. Стали выпускаются в виде тонкого листа и лент толщиной от 0,05 до 1 мм.

Потери в магнитомягких материалах зависят от частоты f , толщины d , удельного сопротивления ρ и могут быть выражены формулой вида:

$$P_3 \approx \frac{f^2 d^2}{\rho}. \quad (1)$$

Таким образом, на относительно высоких частотах (более 10 КГц) стали применять нельзя из-за резко возрастающих потерь на вихревые токи.

Увеличение удельного сопротивления достигается легированием стали кремнием, который снижает потери на гистерезис, увеличивает μ в слабых и средних полях, снижает магнитострикцию, т.е. изменение размеров сердечника под воздействием магнитного поля, увеличивает твердость, прочность на растяжение, однако придает стали хрупкость. У сталей $\mu = 6000 \dots 8000$ (может достигать 200 000). Электротехнические стали очень чувствительны к механическим воздействиям. Поэтому после механической обработки (резки, штамповки) их подвергают отжигу.

Железоникелевые сплавы (пермаллоу) обладают большой индукцией и высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, т.е. узкой и крутой петлей гистерезиса. Их используют в малогабаритных трансформаторах и импульсных устройствах, в сердечниках магнитных головок аппаратуры магнитной записи и т.д.

Пермаллоу подразделяют на: 1) высоконикелевый пермаллоу (никеля до 80 %) – он имеет большое значение μ и ρ , поэтому имеет малые потери на вихревые токи. Это – тонкий пермаллоу марок 79НМ и 80НХС; 2) низколегированный пермаллоу (никеля до 50 %) имеет меньше μ , но сопротивление еще выше. Марки такого пермаллоу – 45Н и 50Н, имеют большую максимальную индукцию $\mu_{\max} = 18\,000$ и применяется для изготовления магнитопроводов малогабаритных трансформаторов, дросселей. С предприятий пермаллоу выходят в виде полос, сматываемых в рулоны.

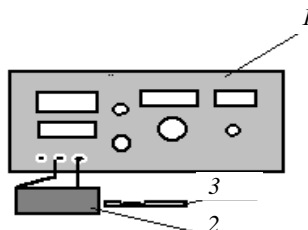
Все магнитомягкие материалы, и особенно пермаллоу, очень чувствительны к механическим воздействиям. При наклепе, возникающем в результате транспортировки и изготовления из пермаллоевых лент изделий, резко ухудшаются магнитные свойства. Изменение магнитных свойств можно определить при помощи измерительной установки.

Порядок выполнения работы

- 1) Собрать измерительную установку для определения коэрцитивной силы магнитомягких материалов (рис. 1).
- 2) Измерить микрометром начальную толщину пластины H_0 .
- 3) Установить образец на подающую пластину.

Рис. 1. Установка для определения коэрцитивной силы магнитомягких материалов:

1 – высокочастотный измеритель индуктивности; 2 – измерительная катушка; 3 – подающая пластина



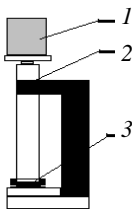


Рис. 2. Мини-пресс для нагружения

пермаллоевой пластины:

1 – нагрузка; 2 – мини-пресс;

3 – пермаллоевая пластина

4) Ввести пластину с образцом в катушку и добиться наибольшей частоты звукового сигнала путем перемещения пластины внутри катушки.

5) Сбалансировать измеритель индуктивности и записать полученное значение L_0 .

6) Поместить пластину под мини-пресс и дать нагрузку 20 кг (рис. 2).

7) Измерить толщину пластины после нагружения H_d , рассчитать степень деформации ϵ по формуле $\epsilon = (H_0 - H_d) / H_d$.

8) Измерить индуктивность катушки с внесенным деформированным образцом, записать значение индуктивности L . Опыт повторить три раза.

9) Поместить пластину под мини-пресс и дать нагрузку 30 кг, повторить действия согласно пунктам 7, 8.

10) Рассчитать среднее значение индуктивности каждого ϵ_i .

11) Определить значение магнитной проницаемости для каждого ϵ_i по формуле $\mu = AL$, где $A = 2,25 \cdot 10^6$, Гн^{-1} – постоянная измерительной установки.

12) Записать полученные результаты в табл. 1.

1. Изменение магнитной проницаемости при пластической деформации пермалловых образцов

№ п/п	H_0 , мм	H_d , мм	ϵ	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_3 , Гн	\bar{L} , Гн	μ
1								
2								
3								

13) Построить графическую зависимость магнитной проницаемости μ от степени пластической деформации ϵ пермаллоя.

Содержание отчета

1. Рисунок установки для определения характеристик пермаллоя.
2. Таблица результатов экспериментальных данных и измерений.
3. График зависимости изменения индуктивности от степени пластической деформации образцов.

Контрольные вопросы

1. Классификация магнитных материалов.
2. Применение магнитомягких материалов в радиоэлектронике.
3. Типы магнитомягких материалов.
4. Влияние пластической деформации на магнитные свойства магнитомягких материалов.

Л и т е р а т у р а : [4].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДА И ФОТОТРАНЗИСТОРА

Цель работы: исследовать световые характеристики полупроводникового светоизлучателя (светодиода) и характеристики полупроводникового сопротивления (фототранзистора).

Приборы и принадлежности: светоизлучающий диод АЛ 307 БМ, фототранзистор, фотоэкспонометр Фотон-1, омметр, источник постоянного тока.

Методические указания

Бинарные полупроводники используют не только в качестве основы для транзисторов и микросхем, но также и в несколько необычной роли – в качестве светоизлучающих элементов. Наиболее используемым является арсенид галлия, легированный различными компонентами, – алюминием, фосфором, индием и др.

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей заряда в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока. Носители заряда – электроны и дырки – проникают в активный слой из прилегающих пассивных слоев (p - и n -слоя) вследствие подачи напряжения на p - n -структуру и затем испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света. Длина волны излучения связана с шириной запрещенной зоны активного слоя законом сохранения энергии. Внешний вид наиболее распространенного светодиода представлен на рис. 1.

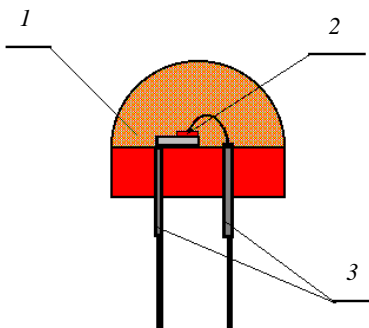


Рис. 1. Светодиод АЛ 307 БМ

В электронике светодиоды используются как правило в качестве индикаторов, но также они используются и в качестве излучателей для особых устройств – оптопар.

Основным элементом оптопары является *фотоприемник*, изготавливаемый обычно из полупроводникового материала. В основе работы фотоприемника лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется конструкция с *p-n*-переходом, которая называется фотодиодом. Из фотоприемников получили распространение лавинные фотодиоды, фототранзисторы.

Оптической средой может служить воздух, вакуум или оптоволоконные линии. При этом светоизлучатель может быть размещен как в непосредственной близости от фотоприемника (датчики перемещения, фотодатчики в видеомагнитофонах и компьютерах), так и удален на значительное расстояние (оптоволоконные линии передачи данных и связи).

Достоинства транзисторной оптопары в том, транзистор выполняет функции усилителя. Аналог оптопары в традиционной электронике – импульсный трансформатор.

В исследуемой оптопаре применен светодиод АЛ 307 Б. Оптической средой является воздух. В качестве фотоприемника используется транзистор МП-25 с открытым кристаллом. На светодиод подается напряжение питания $U_{\text{пит}}$, с фототранзистора снимается напряжение коммутации $U_{\text{ком}}$, зависящее от свойств оптической среды и от яркости свечения светодиода.

Сопротивление фототранзистора и режим его работы зависят от освещенности его кристалла. Если база не освещена, то фототранзистор работает в режиме усилителя. При освещении базовой области попадающие на нее фотоны выбивают электроны, переход становится проводящим и в коллекторной цепи протекает ток (так называемый **фототок**). Величина фототока зависит от освещенности базы.

Порядок выполнения работы

1. Собрать установку для определения яркости свечения светодиода (рис. 2).

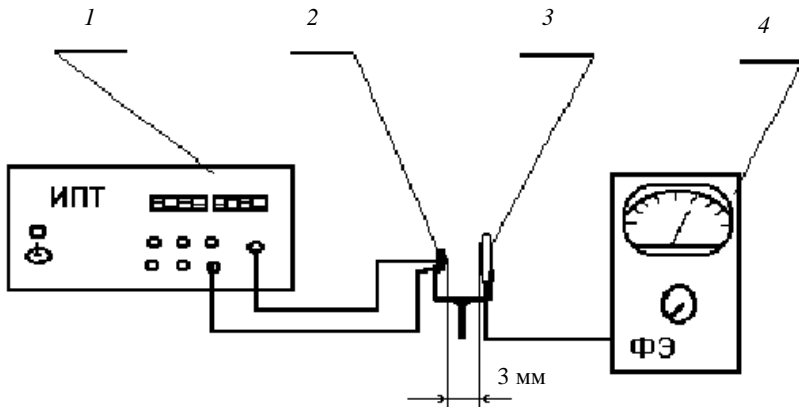


Рис. 2. Установка для определения характеристики свечения светодиода:
 1 – источник постоянного тока; 2 – светодиод; 3 – фотоэлемент;
 4 – экспонометр

2. Включить источник постоянного тока и, изменяя напряжение от 1,4 до 2,1 В, по экспонометру получить значения яркости свечения. Результаты занести в табл. 1.

1. Зависимость яркости свечения светодиода от напряжения питания

$U_{\text{пит}}, \text{В}$								
$E, \text{лк}$								

3. Построить график зависимости яркости свечения от напряжения питания.

4. Собрать установку для определения свойств транзисторной оптопары (рис. 3).

5. Включить источник постоянного тока и, изменяя напряжение от 1,4 до 2,1 В, по омметру получить значения сопротивления фототранзистора. Полученные данные заносятся в табл. 2.

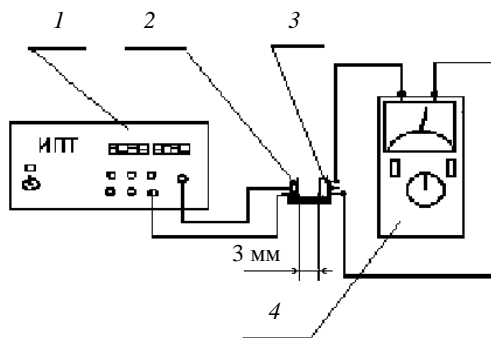


Рис. 3. Установка для определения сопротивления фототранзистора:
 1 – источник постоянного тока; 2 – светодиод; 3 – фототранзистор; 4 – омметр

2. Зависимость сопротивления фототранзистора от напряжения питания светодиода

$U_{\text{пит}}, \text{В}$							
$R, \text{кОм}$							

6. Построить график зависимости сопротивления фототранзистора от его освещенности.

Содержание отчета

1. Описание и схемы установок для определения свойств светоизлучателя и фотоприемника.
2. Таблица и график зависимости яркости свечения светодиода от напряжения питания светодиода.
3. Таблица и график зависимости сопротивления фототранзистора от напряжения питания светодиода.
4. График зависимости сопротивления фототранзистора от яркости свечения светодиода.

Контрольные вопросы

1. Применение оптопар, их достоинства и недостатки.
2. Источники света в оптоэлектронных устройствах.
3. Фотоприемники, их свойства и особенности.
4. Способы управления фототоком транзистора оптопары.

Литература: [5].

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: определить характеристики активного пьезоэлектрика – кварца.

Приборы и принадлежности: двухлучевой осциллограф, низкочастотные кварцевые резонаторы, генератор низкой частоты.

Методические указания

Активными диэлектриками, или управляемыми диэлектриками, принято называть такие диэлектрики, свойства которых существенно зависят от внешних условий – температуры, давления, напряженности поля и так далее. Такие диэлектрики могут служить рабочими телами в разнообразных датчиках, преобразователях, генераторах, модуляторах и других активных элементах.

К активным диэлектрикам относят сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, суперионные проводники и др. Строгая классификация активных диэлектриков невозможна, поскольку один и тот же материал может проявлять признаки различных активных диэлектриков. Так, сегнетоэлектрики часто сочетают свойства пьезоэлектриков. Кроме того, нет резкой границы между активными и пассивными диэлектриками. Один и тот же материал в зависимости от условий эксплуатации может выполнять либо функции пассивного изолятора, либо активные функции преобразующего или управляющего элемента.

Пьезоэлектрики – это вещества с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом. Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика под действием приложенного электрического поля. В различных пьезопреобразователях используют кристаллы кварца, сульфата лития, сегнетовой соли, ниобата и танталата лития. Широко применяется керамика на основе твердых растворов цирконата – титаната свинца (сокращенно ЦТС).

Кварцевые резонаторы являются устройствами, использующими пьезоэлектрический эффект для возбуждения механических колебаний упругой пьезопластины. При совпадении частоты приложенного электрического напряжения с собственной частотой пластины амплитуда ее колебаний резко возрастает. Это позволяет получить резонаторы очень высокой добротности ($Q \sim 10^5 \dots 10^7$, для LC-фильтра добротность не превышает 10^2 , у пьезокерамического фильтра – не более 10^3).

Кварц является ярко выраженным пьезоэлектриком из-за того, что у кристалла отсутствуют плоскости и центр симметрии. Кристаллическая структура кварца представляет собой каркас из кремнеземных тетраэдров.

Эти тетраэдры расположены винтообразно с правым или левым ходом по отношению к главной оси кристалла, поэтому различают правые и левые структурно-морфологические формы кристаллов, которые различаются внешне по симметрии расположения некоторых граней.

Обладая высокой температурной стабильностью и низкой долговременной нестабильностью частоты ($10^{-6} \dots 10^{-7}$), кварцевые резонаторы применяются в генераторах опорных частот, в управляемых по частоте генераторах, а также в селективных устройствах: фильтрах, частотных дискриминаторах и т.д.

Резонаторы для низкочастотной аппаратуры имеют вид, представленный на рис. 1. Кварцевая пластина 1 закреплена в стеклянном корпусе 2. Сигнал подводится по проводникам 3.

На основание пластины 3 (рис. 2) нанесены контактные площадки 1, к которым припаяны проводники 2. Электрический сигнал подводится к паре контактов, которые расположены на одной стороне пластины (первая пара контактов). Из-за пьезоэлектрических свойств кварца пластина колеблется, и это, в свою очередь, приводит к возникновению разности потенциалов на пластинах, расположенных на обратной стороне пластины (вторая пара контактов).

На определенной частоте, которая определяется геометрическими параметрами пластины, возникает механический резонанс, и амплитуда сигнала, снимаемого со второй пары контактов, резко возрастает. Данная частота называется **частотой резонанса**. Данное свойство кварцевых пластин используется в частности для стабилизации частоты в генераторах радиостанций, работающих в диапазоне длинных и средних волн.

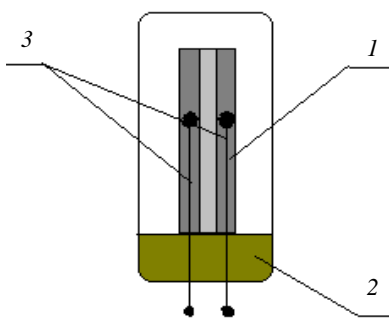


Рис. 1. Кварцевый резонатор для низкочастотной аппаратуры:

1 – пластина с нанесенными контактами; 2 – стеклянный корпус; 3 – электрические проводники

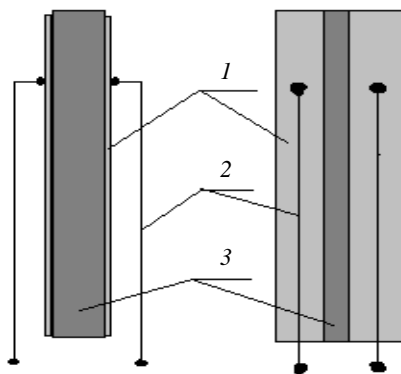


Рис. 2. Пластина низкочастотного кварцевого резонатора:

1 – контакты; 2 – выводы; 3 – кварцевая пластина

Порядок выполнения работы

1. Собрать лабораторную установку для изучения характеристик кристалла кварца (рис. 3).

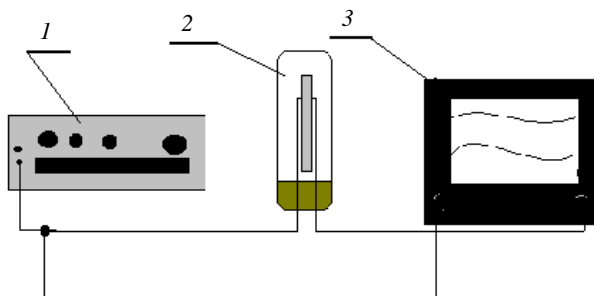


Рис. 3. Установка для снятия АЧХ резонатора:
1 – генератор; 2 – резонатор; 3 – двухлучевой осциллограф

С выхода генератора 1 сигнал подается на вход «1» двухлучевого осциллографа 3. На вход «2» осциллографа подается сигнал, прошедший через кварцевый резонатор 2. При неизменной амплитуде сигнала (на входе «1») с изменением частоты изменяется амплитуда сигнала на входе «2». Это фиксируется на экране осциллографа. На частоте резонанса амплитуда сигнала на входе «2» значительно превышает первоначальную. Дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению амплитуды.

2. Включить осциллограф и генератор и прогреть их в течение 2...3 минут.

3. Изменяя частоту сигнала, подаваемого на вход резонатора, определить его резонансную частоту. Результаты измерений занести в табл. 1.

4. Построить график зависимости амплитуды колебаний на выходе резонатора от частоты.

5. По разности сигналов на входе и выходе определить ослабление сигнала в пластине кварца на различных частотах.

1. Зависимость амплитуды сигнала от частоты

Частота F , КГц								
Амплитуда U , В								

6. Определить время задержки сигнала по смещению h полуволн сигнала на экране осциллографа: $\tau = hn$, где n – коэффициент развертки, ms/дел.

7. Рассчитать скорости движения акустических волн в пластине кварца: $V = \frac{l}{\tau}$, где l – расстояние между электродами входного и выходного преобразователей.

Содержание отчета

1. Рисунок лабораторной установки с пояснениями к принципу ее работы.
2. Заполненная таблица зависимости амплитуды от частоты с отмеченной резонансной частотой.
3. График зависимости амплитуды от частоты.
4. Расчетные данные ослабления сигнала и скорости распространения акустических колебаний в пластине кварца.

Контрольные вопросы

1. Структура кристаллов кварца и их электромеханические свойства.
2. Принцип работы кварцевого резонатора.
3. Применение кварцевых резонаторов.
4. От каких параметров зависит резонансная частота?
5. Принцип работы установки для определения АЧХ.

Л и т е р а т у р а : [6].

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Цель работы: изучить структуру оксидных терморезисторов и зависимость их электропроводности от температуры.

Приборы и принадлежности: мост постоянного тока Ш-34, печь нагревательная, потенциометр КВП, термопара, терморезисторы ММТ-1, СТ 4-15, КМТ-1.

Методические указания

Понятие «термистор» относится к материалам, проводимость которых при нагреве сильно изменяется. Различают материалы, в которых с ростом температуры сопротивление падает – терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), и позисторы, в которых до определенной температуры оно растет.

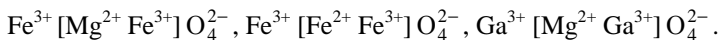
Удельное электрическое сопротивление терморезисторов уменьшается с ростом температуры как в классических полупроводниках, что опи-

сывается уравнением $\rho(T) = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$, где $B < 0$ – коэффициент температурной чувствительности, определяющийся энергией активации процесса электропроводности; A – коэффициент, зависящий от технологии их изготовления.

Наряду с легированным германием, кремнием, полупроводниковыми стеклами, подавляющее число терморезисторов изготавливается во всех странах на основе оксидов переходных металлов, состав которых описывается формулой XY_2Z_4 , где X – чаще всего ион двухвалентного металла (Zn^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+}), Y – трехвалентный металл (Al^{3+} , Mn^{3+} , Cr^{3+}), а Z – анион O^{2-} .

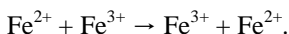
Элементарная ячейка шпинели состоит из 8-ми формульных единиц, то есть $X_8 Y_{16} O^{32}$. В состав ячейки входят 32 кислородных иона, образующих ГЦК-подрешетку, в порах которой располагаются катионы. В ГЦК решетке существует два вида пустот – октаэдрические (32 в элементарной ячейке шпинели) и тетраэдрические (64 поры). В прямых шпинелях в тетра-порах располагаются двухвалентные катионы X (занято 8 из 64 позиций), а 16 из 32 окто-пор занимают трехвалентные катионы Y . Формула прямой шпинели – $X Y_2 O_4$ (или $X [Y_2] O_4$), где скобки [] показывают окто-пору. Например: $Zn^{2+} [Al^{3+} Al^{3+}] O_4^{2-}$, $Co^{2+} [Al_2^{3+}] O_4^{2-}$, $Mn^{2+} [Al_2^{3+}] O_4^{2-}$.

В шпинелях другого типа в окта-порах часть позиций занята двухвалентным металлом. Такие шпинели называют обратными и записывают в виде $Y[XY]O_4$. Примером обратных шпинелей являются:

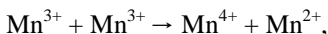
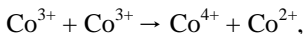


Электропроводность оксидных полупроводников нельзя объяснить с точки зрения зонной теории, используемой для классических полупроводников (германий, кремний и др.) В оксидных материалах действует ионная связь, в которой электроны локализованы на отдельных атомах (ионах). Процесс электропроводности состоит в перескакивании электронов от одного катиона к другому (прыжковый механизм).

Несмотря на то, что такие металлы как Fe, Mn, Co, Ni расположены в периодической системе рядом, электропроводность их оксидов σ сильно отличается. Так, для Fe_3O_4 при 20 °C значения σ составляет $200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $Co_3O_4 - 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $Mn_3O_4 - 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, а для стехиометрической закиси никеля NiO достигает $10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Разница в проводимости Fe_3O_4 и Mn_3O_4 связывается с характером распределения катионов по окта- и тетра-кристаллографическим позициям. В окиси железа $Fe^{+3} [Fe^{2+} Fe^{3+}] O_4^{2-}$ в октаэдрических позициях располагаются разновалентные катионы железа, электронный обмен между которыми облегчен и протекает с незначительной энергией активации ($\Delta E = 0,05 \text{ эВ}$):



В оксидах типа $Co^{2+} [Co_2^{3+}] O_4^{2-}$ и $Mn^{2+} [Mn_2^{3+}] O_4^{2-}$ между одноименными катионами окта-пор электронный обмен затруднен и сопровождается значительно большей энергией активации:



поэтому для них характерно большое сопротивление и малое значение ТКС.

Свойства терморезисторов можно описать рядом характеристик:

а) номинальное сопротивление R_N при номинальной рабочей температуре T_N ;

б) температурная характеристика;

в) вольтамперная характеристика;

г) термическая постоянная времени;

д) переходный процесс нагрева термистора;

е) технологический разброс характеристик сопротивления, временная стабильность.

Описываемая уравнением $R(T) = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$ температурная характеристика согласуется с измерениями тем точнее, чем меньше их диапазон, что связано с температурной зависимостью коэффициента A . Для более широких диапазонов температуры T часто необходимо более точное аналитическое выражение. При этом целесообразно принять для коэффициента B линейную или квадратичную зависимость:

$$B(T) = B_a [1 + b (T - T_a)]$$

$$B(T) = B_a [1 - b (T - T_a) + c (T - T_a)^2]. \quad (2)$$

Здесь B_a – значение коэффициента B для рабочей температуры T_a ; b и c – коэффициенты.

В заводской практике удобно выразить эту величину в виде:

$$B_a = B_N [1 + b (T_a - T_N)] = \frac{T_a T_N}{T_a - T_N} \ln \frac{R_a}{R_N},$$

где B_N соответствует номинальной рабочей точке. Из уравнения $R(T) =$

$= R_N \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)\right]$ можно определить наклон $R(T)$ -характеристики: $dR(T)/dT = -BR(T)/T^2$. Откуда с учетом выражения для температурного коэффициента сопротивления: $\alpha(T) = \frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT}$ получаем $\alpha = -B/T^2$.

Температурный коэффициент также зависит от температуры и определяется конкретным значением коэффициента температурной чувствительности B , соответствующего выбранному материалу.

Порядок выполнения работы

1. Выданные преподавателем терморезисторы (один – системы NiMn_2O_4 , другой – CuMn_2O) установить в зажимы электроконтактного устройства для измерения электросопротивления и поместить их в масляную ванну-термостат нагревательной печи (рис. 1).

2. Включить потенциометр КВП и измерить начальную температуру образцов после одной минуты выдержки в термостате.

3. Включить мост Щ-34 и измерить начальное сопротивление обоих терморезисторов, переключая цепь измерения с помощью ключа 5.

4. Включить питание электропечи 3.

5. Снять зависимость сопротивления терморезисторов от температуры в диапазоне 20...100 °С с шагом температуры 10 °С.

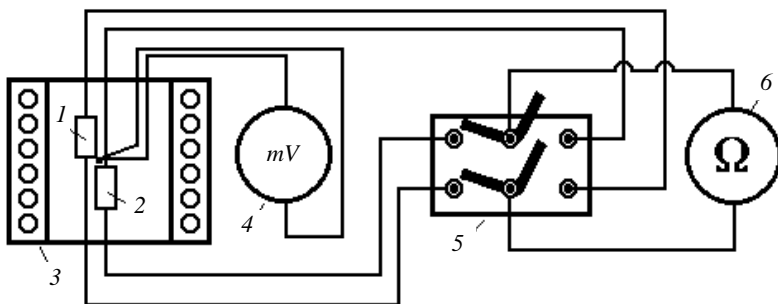


Рис. 1. Схема установки для изучения электропроводности терморезисторов:
 1, 2 – образцы; 3 – печь; 4 – потенциометр; 5 – ключ; 6 – омметр

6. Определить номинальное электросопротивление R_N , коэффициент температурной чувствительности B , температурный коэффициент сопротивления α и энергию активации процесса электропроводности $\Delta E = Bk$, где k – постоянная Больцмана ($k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эв/град).

Содержание отчета

1. График температурной характеристики терморезисторов $R = f(T)$, расчет значений α , R_N , B , ΔE .
2. Сравнить значения ΔE с литературными и сделать вывод о механизме электропроводности в каждом терморезисторе.

Контрольные вопросы

1. Структура и механизм электропроводности оксидных терморезисторов.
2. Рабочие характеристики оксидных терморезисторов.
3. Требования, предъявляемые к электрофизическим и физико-химическим свойствам терморезисторов.
4. Рабочие параметры температурной характеристики терморезистора, их физический смысл.

Литература: [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Metallurgy, 1987. – 544 с.
2. Геллер, Ю.А. Материаловедение / Ю.А. Геллер, Г.А. Рахштадт. – М. : Metallurgy, 1983. – 384 с.
3. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – СПб. : Лань, 2001. – 368 с.
4. Электротехнические и конструкционные материалы / под ред. В.А. Филикова. – М. : Высш. шк., 2000. – 280 с.
5. Щука, А.А. Функциональная электроника : учебник для вузов. – М. : МИРЭА, 1998.
6. Кравченко, А.Ф. Физические основы функциональной электроники : учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 2000.
7. Шефтель, И.Т. Терморезисторы / И.Т. Шефтель. – М. : Наука, 1973. – 415 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа 1. Микроскопический анализ металлов и сплавов	4
Лабораторная работа 2. Связь диаграммы состояния со свойствами сплава	10
Лабораторная работа 3. Термическая обработка дюралюминия	16
Лабораторная работа 4. Исследование электропроводности твердых диэлектриков	22
Лабораторная работа 5. Влияние пластической деформации на магнитные свойства магнитомягких материалов	28
Лабораторная работа 6. Определение световых и электрических характеристик светодиода и фототранзистора	31
Лабораторная работа 7. Изучение свойств активных пьезоэлектриков	35
Лабораторная работа 8. Строение и свойства оксидных терморезисторов	39
Список литературы	42

Учебное издание

БРУСЕНЦОВ Юрий Анатольевич,
ПРУЧКИН Владимир Аркадьевич,
ФИЛАТОВ Иван Сергеевич

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Лабораторный практикум

Издание второе, стереотипное

Редактор Е.С. Мордасова
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано в печать 29.06.2011.
Формат 60 × 84/16. 2,56 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 305

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14