

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА

ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания к лабораторным работам
по дисциплинам «Избранные главы физики твердого тела» и «Основы
кристаллографии» для студентов направления «211000
Конструирование и технология электронных средств»

2012

Кистенева М.Г.

Избранные главы физики твердого тела = Избранные главы физики твердого тела: Методические указания к лабораторным работам по дисциплинам «Избранные главы физики твердого тела» и «Основы кристаллографии» для студентов направления «211000 – Конструирование и технология электронных средств» /М.Г. Кистенева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА. - Томск: ТУСУР, 2012. – 35 с.

В методических указаниях приведено описание четырех лабораторных работ, охватывающих материал по изучению основ физики твердого тела и кристаллографии.

Целью 1-ой лабораторной работы является ознакомление со свойствами кристаллов и способами их выращивания; целью 2-ой лабораторной работы является ознакомление с дефектами кристаллического строения и приобретение навыков определения дефектов строения кристаллов с помощью оптического микроскопа; в 3-ей работе проводится исследование и градуировка термопар; в 4-ой работе – исследование температурной зависимости электропроводности твердых диэлектриков.

В ходе выполнения работ у студентов формируются следующие компетенции:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ОК-10);

- способность владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных данных (ПК-5);

- готовностью проводить эксперименты по заданной методике, анализировать результаты, составлять обзоры, отчеты (ПК-20).

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «211000 – Конструирование и технология электронных средств» по дисциплинам «Избранные главы физики твердого тела» и «Основы кристаллографии».

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой КУДР
_____ С.Г. Еханин
«__» _____ 2012 г.

ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания к лабораторным работам
по дисциплинам «Избранные главы физики твердого тела» и «Основы
кристаллографии» для студентов направления 211000.62
«Конструирование и технология электронных средств»

Разработчик

_____ М.Г. Кистенева
«__» _____ 2012 г

Содержание

1 Введение	3
Лабораторная работа №1. Выращивание кристаллов	4
1.1 Введение	4
1.2 Теоретическая часть	4
1.2.1 Строение кристаллической решетки	4
1.2.2 Типы кристаллических решеток	4
1.2.3 Кристаллизация и строение кристаллов	6
1.3 Экспериментальная часть	6
1.3.1 Выращивание кристаллов медного купороса и поваренной соли	6
1.3.2 Выращивание кристаллов металлической меди	8
1.3.3 Химические водоросли (коллоидный сад). Режим реального времени	9
1.3.4 Порядок выполнения работы	9
1.3.5 Содержание отчета	9
1.4 Контрольные вопросы	10
Рекомендуемая литература	10
Лабораторная работа №2. Исследование дефектов в кристаллах	11
2.1 Введение	11
2.2 Теоретическая часть	11
2.2.1 Строение кристаллической решетки	11
2.2.3 Реальное строение кристаллов	13
2.3 Экспериментальная часть	17
2.3.1 Металлографическое исследование кристаллов	17
2.3.2 Порядок выполнения работы	18
2.4 Контрольные вопросы	18
Рекомендуемая литература	18
3.1 Введение	19
3.2 Теоретическая часть	19
3.2.1 Контактная разность потенциалов	19
3.2.2 Принцип действия термопары. Эффект Зеебека	20
3.2.3 Материалы для термопар	22
3.3 Экспериментальная часть	23

3.3.1 Схема экспериментальной установки	23
3.4 Задание.....	24
3.5 Содержание отчета.....	24
3.6 Контрольные вопросы.....	24
Рекомендуемая литература	24
Лабораторная работа №4. Исследование температурной зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков.....	28
4.1 Введение	28
4.2 Теоретическая часть	28
4.2.1 Механизм ионной проводимости твердых диэлектриков.....	28
4.3 Экспериментальная часть	32
4.4 Задание.....	32
4.5 Содержание отчета.....	33
4.6 Контрольные вопросы.....	33
Рекомендуемая литература	34

1 Введение

Физика твердого тела – это наука о строении и свойствах твердых тел и происходящих в них физических явлениях. Изучение свойств твердых тел, в частности кристаллических, имеет важное значение, как для фундаментальной науки, так и для решения задач поиска и синтеза новых материалов, исследования и научной разработки путей целенаправленного изменения их свойств и прогнозирования новых веществ. Без знания основ физики твердого тела и кристаллографии невозможно было бы развитие микро- и нанoeлектроники, конструирования, технологии полупроводниковых приборов и ряда других важных направлений.

В пособии содержится краткий обзор необходимых теоретических сведений, порядок и условия проведения лабораторных работ и контрольные вопросы для самопроверки.

В ходе выполнения работ у студентов формируются:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ОК-10);

- способность владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных данных (ПК-5);

- готовностью проводить эксперименты по заданной методике, анализировать результаты, составлять обзоры, отчеты (ПК-20).

В итоге выполнения лабораторных работ студент должен:

- *знать*: физико-химические свойства твердых тел;

- *уметь*: рассчитывать основные электрофизические параметры твердых тел;

- *владеть*: навыками работы со справочной литературой и навыками измерения электрических параметров твердых тел.

Лабораторная работа №1. Выращивание кристаллов

1.1 Введение

В твердом состоянии большинство веществ имеет кристаллическое строение. Важнейшей особенностью кристаллического состояния является упорядоченное расположение частиц вещества. Каждое вещество обычно образует кристаллы совершенно определенной формы.

Цель лабораторной работы – доказать, что форма и размер кристалла зависят от растворенного вещества.

Задачи исследования:

1. Вырастить кристаллы различных веществ.
2. Выявить свойства кристаллов.

1.2 Теоретическая часть

1.2.1 Структура кристаллической решетки

Мы живем в мире, в котором большая часть веществ находится в твердом состоянии. В природе часто встречаются твердые тела, имеющие форму правильных многогранников. Такие тела называли кристаллами. Наверное, все видели кристаллы воды – лёд. Вы часто рассматривали узоры на окнах зимой, а это ведь тоже кристаллы воды. Множество разных веществ образуют кристаллы. Например, металлы, драгоценные камни, и даже такие обыкновенные вещества, как соль и сахар.

Что такое кристаллы? Кристаллы (от греч. *krystallos*, что первоначально означало «лёд») – вещества, атомы или молекулы которых образуют кристаллическую решётку, то есть расположены в правильном повторяющемся порядке.

Строение кристаллической решетки описывается элементарной ячейкой. Элементарная ячейка – это наименьший объем кристалла, дающий представление о строении всего кристалла. Характеристики ячейки – ребра a , b , c и углы между ними α , β , γ , отрезки a , b , c называются периодами решетки (рис. 1.1).

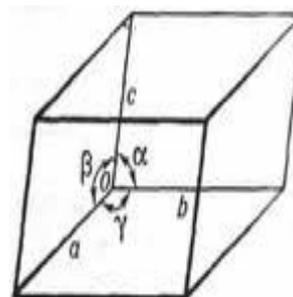
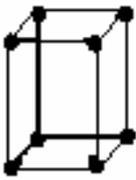
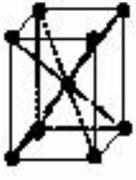


Рис.1.1. Элементарная ячейка.

1.2.2 Типы кристаллических решеток

Число возможных видов симметрии ограничено. Французский кристаллограф О. Браве в 1848 г. положил начало геометрической теории структуры кристаллов и показал, что в зависимости от соотношения величин и взаимной ориентации ребер элементарной кристаллической ячейки может существовать 14 типов кристаллических решеток, которые получили название решеток Браве.

Различают примитивные (простые), базоцентрированные, объемноцентрированные и гранецентрированные решетки Браве.

Решетки Браве			
примитивная	Базоцентрированная	Объемноцентрированная	Гранецентрированная
			

Классификация решёток по симметрии

Сингонии:

триклинная сингония — наименьшая симметрия, нет одинаковых углов, нет осей одинаковой длины;

моноклинная сингония — два прямых угла, нет осей одинаковой длины;

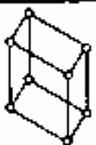
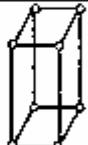
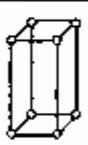
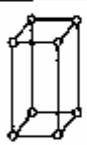
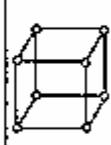
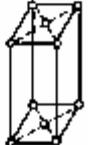
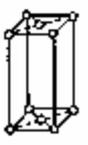
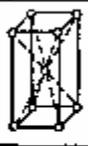
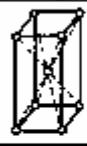
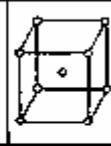
ромбическая сингония — три прямых угла (поэтому ортогонально), нет осей одинаковой длины;

гексагональная сингония — две оси одинаковой длины в одной плоскости под углом 120° , третья ось под прямым углом;

тетрагональная сингония — две оси одинаковой длины, три прямых угла;

тригональная сингония — три оси одинаковой длины и три равных угла, не равных 90° ;

кубическая сингония — высшая степень симметрии, три оси одинаковой длины под прямым углом.

Сингония Тип решетки	Три- клинная	Моно- клинная	Ромби- ческая	Тетраго- нальная	Триго- нальная (ромбозд- рическая)	Гексаго- нальная	Куби- ческая
Примитивный							
Базоцентри- рованный							
Объемноцен- трированный							
Гранецентри- рованный							

1.2.3 Кристаллизация и строение кристаллов

Кристаллизация – процесс образования кристаллов из паров, растворов, расплавов. Кристаллизация начинается при достижении некоторого предельного условия, например, переохлаждения жидкостей, пересыщения пара, когда практически мгновенно возникает множество мелких кристалликов – центров кристаллизации. Кристаллики растут, присоединяя атомы или молекулы из жидкости или пара. Кристаллы можно вырастить из растворов разных веществ. Поэтому у нас есть гипотеза, что форма и размер кристалла зависят от растворенного вещества.

Какие бывают кристаллы? Кристаллы бывают разной формы. Иногда образуются дендриты – это кристаллы, похожие на веточки дерева. Они очень хрупкие, но очень красивые. Это дендриты серебра и золота (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Дендриты серебра и золота

1.3 Экспериментальная часть

1.3.1 Выращивание кристаллов медного купороса и поваренной соли

Для этого нужно растворить медный купорос в горячей воде, охладить раствор, опустить в него нитку с затравкой (или просто нитку) и подождать несколько часов. На нитке вырастут кристаллы медного купороса размером до сантиметра, которые будут образовывать большие сrostки.

Если вы хотите вырастить большой кристалл, придется поступить совсем по-другому. Сначала нужно приготовить насыщенный раствор соли, в нашем случае - медного купороса. Насыщенным называется раствор, который находится в равновесии с нерастворенным веществом (твердым, жидким или газообразным). Следовательно, насыщенный раствор содержит максимальное количество вещества, которое может

раствориться при данной температуре. Чтобы приготовить насыщенный раствор медного купороса, сначала рассчитаем, сколько нужно взять соли.

Растворимость медного купороса при 20°C составляет 35.6 г в 100 г воды. Например, если вы взяли 200 мл воды, значит необходимо $35.6 \cdot 200 / 100 = 71.2$ г $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. А как быть при других температурах? С ростом температуры растворимость сульфата меди сначала увеличивается, потом почти перестает зависеть от температуры. Поэтому, чтобы исключить влияние колебаний температуры в лаборатории, точности взвешивания и других факторов возьмите количество медного купороса, раза в полтора большее расчетного. Например, в нашем случае это $71.2 \cdot 1.5 = 107$ г. Залейте соль водой и оставьте примерно на сутки, время от времени перемешивая. Когда растворение медного купороса прекратится, и наступит равновесие, профильтруйте раствор через неплотную фильтровальную бумагу или вату. Избыток соли останется на фильтре - его можно снова высушить и использовать повторно. Налейте полученный раствор в стакан или банку. Теперь выберите крупный и хорошо сформированный кристаллик и привяжите его к нитке. Кристаллик послужит затравкой. Привяжите второй конец нитки к карандашу или стеклянной палочке и опустите затравку в раствор. Накройте стакан марлей - для защиты от пыли. Все, что остается - ждать. Через несколько дней рост кристалла будет виден визуально, за неделю может вырасти кристалл длиной в 1 см, за три-пять недель - 5 см. Если в стакане образуется осадок мелких кристалликов - перелейте раствор в чистый стакан и перенесите в него наш кристалл. В ходе нашего эксперимента такую процедуру пришлось проделать несколько раз. Со временем на нитке тоже образуются мелкие кристаллики, которые начинают расти. Избежать этого сложно, можно разве что поднять кристалл повыше, чтобы меньший отрезок нитки контактировал с раствором. Во время эксперимента возникла идея использовать вместо хлопчатобумажной нитки тонкую медную проволочку или капроновую нитку, однако на них затравка росла значительно хуже. Эксперимент длится от нескольких недель до одного-двух месяцев.

К сожалению, на воздухе кристаллы медного купороса теряют часть своей воды, при этом происходит их выветривание (разрушение). Чтобы кристаллы медного купороса сохранились дольше, поместите их в плотно закрытую банку и храните в прохладном помещении.

Если в начальной стадии эксперимента у вас растворилась затравка, значит, раствор не был насыщенным. Причин может быть несколько. Во-первых, исходный раствор мог недостаточно долго контактировать с кристаллами и не успел стать насыщенным. Во-вторых, растворимость медного купороса растет с температурой. Если вы приготовите насыщенный раствор и опустите в него кристаллик, а потом в комнате потеплеет, растворимость возрастет, и затравка может раствориться. В любом случае, добавьте в раствор еще несколько ложек купороса, перемешайте его, и дайте постоять (а потом снова профильтруйте).

Чтобы вырастить кристаллы поваренной соли, нужно налить в стакан не очень горячей воды и положить в воду соль, пока она не перестанет растворяться. Потом подвесить нитку с привязанной веточкой так, чтобы конец веточки окунался в воду. Через несколько дней появятся первые кристаллы: А через несколько недель вырастет много маленьких кристаллов: Ещё можно вырастить кристалл сахара. Чтобы его вырастить, надо налить в стакан тёплой воды и положить в неё сахар, пока он не перестанет растворяться. Потом подвесить ниточку с бисеринкой. И вырастет кристалл. Маленький кристалл сахара растёт очень медленно – целых два месяца. А большой кристалл медного купороса можно вырастить за несколько дней.

Также можно вырастить кристалл железного купороса. и другие кристаллы.

1.3.2 Выращивание кристаллов металлической меди

Если в раствор медного купороса опустить железо, цинк или другой активный металл, на его поверхности будет образовываться металлическая медь. Как правило, медь оседает в виде темно-красной губки или тонкого непрочного покрытия. В любом случае, осадок меди состоит из очень маленьких кристалликов, невидимых невооруженным глазом. А можно ли сделать эти кристаллы крупнее? Да, но для этого необходимо уменьшить скорость их роста. Существует несколько способов.

Самый простой способ вырастить кристаллы меди следующий. На дно стакана, колбы или небольшой банки насыпьте слой медного купороса высотой 1-2 см. Выше насыпьте 3-5 см поваренной соли. Накройте слой соли кружком из фильтровальной бумаги, на который положите железные предметы или гранулы цинка. Железо или цинк старайтесь разместить возле стенок сосуда. Осторожно налейте в сосуд насыщенный раствор поваренной соли (в крайнем случае - воду), так, чтобы он на 1-2 см покрывал соль. Необходимо следить, чтобы фильтровальная бумага не перевернулась. Накройте сосуд крышкой и поставьте его в укромное место. Все, что остается - ждать и наблюдать. Через несколько десятков минут содержимое стакана станет зеленым - это двухвалентная медь образует комплекс с хлорид-ионом:



Образование кристаллов меди станет заметно через несколько дней. Постепенно в сосуде вырастут ветвистые красные кристаллики меди, которые называются дендритами. Опыт может продолжаться несколько недель и даже несколько месяцев.

1.3.3 Химические водоросли (коллоидный сад). Режим реального времени

Один из интересных опытов является взаимодействие кристаллогидрата хлорида железа (III) с раствором силикатов натрия и калия. В цилиндр (колбу, банку) налейте жидкое стекло, разбавленное водой в 2-3 раза. Поместите в жидкость несколько кусочков (сросшихся кристалликов) хлорида железа величиной с горошину. Если кристаллы будут покрыты влагой (FeCl_3 очень гигроскопичен) удалите ее с помощью фильтровальной бумаги. Можно внести в раствор по щепотке солей разных металлов - меди, кобальта, никеля, железа, цинка, алюминия, магния и др. Для этих целей можно использовать любые растворимые соли - сульфаты, хлориды, нитраты, ацетаты и другие соли.

Со временем в стакане можно будет наблюдать рост "химических водорослей", которые состоят из нерастворимых силикатов металлов и напоминают настоящие нитчатые водоросли. Цвет водорослей зависит от металла. Соли меди дают голубые водоросли, кобальта - синие, магния, алюминия и цинка - белые, никеля - светло-зеленые, железа (III) - коричневые, хрома - зеленые, "марганцевые" водоросли сначала вырастают белыми, но со временем буреют, соли железа (II) дают темно-зеленые водоросли, которые потом также становятся бурыми (в обоих случаях изменение цвета происходит в результате окисления).

1.3.4 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению данной лабораторной работы, получить допуск у преподавателя к её выполнению.
2. Подготовить раствор для выращивания кристаллов. Помните: чем меньше выбранная вами затравка, чем она правильнее, тем легче раствору (системе) подстроиться под неё (как перламутру к песчинке, попавшей в мантию моллюска). Помните: чтобы не было наростов на нити, нить должна быть тонкой без волосков, и должна быть опущена с затравкой в раствор на 5-7 °С теплее комнатной температуры. Такая нить успевает пропитаться раствором и «сливается» с системой в единое целое.
3. Исследовать выращенные кристаллы: описать форму, цвет кристаллов, исследовать их растворимость в воде разной температуры
4. Написать отчет.

1.3.5 Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Введение.
3. Описание способа выращивания кристалла.
4. Описание и объяснение свойств выращенного кристалла:
 - а) тип кристаллической решетки (из литературных данных);

- б) форма и размер выращенного кристалла, одинаково ли растет кристалл по разным направлениям;
- в) цвет, прозрачность, форма граней, углы между гранями и т.д.
- г) исследовать их растворимость в воде разной температуры.

1.4 Контрольные вопросы

1. Что такое элементарная ячейка кристалла?
2. Какими параметрами характеризуется элементарная ячейка?
3. Виды решеток Браве.
4. Основные типы кристаллических решеток.
5. Параметры кристаллической решетки.
6. Что такое процесс кристаллизации?

Рекомендуемая литература

1. Елифанов Г.И. Физика твердого тела: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 288 с. – ISBN: 978-5-8114-1001-9. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2023.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : учебное пособие для втузов: В 3 т. / И. В. Савельев. - 7-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2007 - . - (Лучшие классические учебники) (Классическая учебная литература по физике) (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0629-6. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - СПб.: Лань, 2007. - 317[3] с. - ISBN 978-5-8114-0632-6.
3. Современная кристаллография, Т.4. Физические свойства кристаллов. Шувалов П.А. и др. – М.: Наука, 1981.
4. Смирнов С. В. Физика твердого тела : учебное пособие / С. В. Смирнов; Министерство образования Российской Федерации, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томский межвузовский центр дистанционного образования. - Томск: Издательство научно-технической литературы, 2003. - 273, [3] с. - ISBN 5-89503-200-1.

Лабораторная работа №2. Исследование дефектов в кристаллах

2.1 Введение

Знание природы и распределения дефектов в кристаллах необходимо, поскольку дефекты оказывают влияние на характеристики электронных приборов, воздействуют на пластичность и прочность кристаллов, на их электронную и ионную проводимость и диффузионные свойства, а также играют существенную роль в процессе роста кристаллов.

Дефекты в реальном кристалле можно разделить на химические примеси, нестехиометрию состава и собственно дефекты решетки. Дефектами решетки являются точечные дефекты (межузельные атомы, вакансии, атомы замещения), линейные дефекты (дислокации), поверхностные дефекты (поверхность кристалла, границы зерен, границы двойников, дефекты упаковки, границы доменов, гомо- и гетеропереходы, страты роста, границы зон роста и т. д.) и объемные дефекты (включения, кластеры точечных дефектов).

Цель работы: ознакомиться с дефектами кристаллического строения оптических материалов и приобрести навыки определения дефектов строения кристаллов с помощью оптического микроскопа.

2.2 Теоретическая часть

2.2.1 Структура кристаллической решетки

Строение кристаллической решетки описывается элементарной ячейкой. Элементарная ячейка – это наименьший объем кристалла, дающий представление о строении всего кристалла. Характеристики ячейки – ребра a , b , c и углы между ними α , β , γ , отрезки a , b , c называются периодами решетки (рис. 2.1).

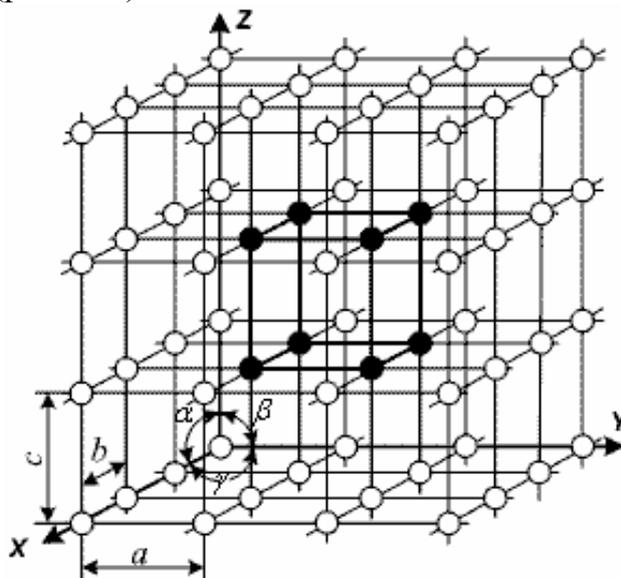


Рисунок 2.1 – Элементарная ячейка

2.2.2 Идеальное строение кристаллов

Однородность, закономерность и симметричность в расположении атомов определяет тип кристаллической решетки

Характеристики решетки: координационное число κ (число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома), период, плотность упаковки, коэффициент компактности η , число атомов на ячейку n .

Характеристики решеток представлены на рисунке 2.2.

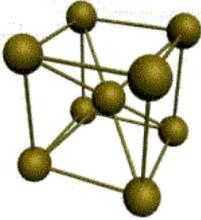
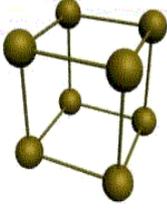
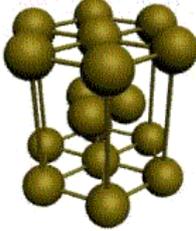
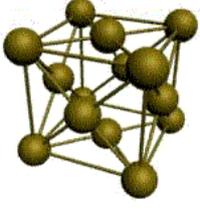
<u>Кубическая</u> <u>решетка</u> $a=b=c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Объемно- центрированная (ОЦК)	<u>Тетрагональная</u> <u>решетка</u> $a=b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<u>Гексагональная</u> <u>решетка</u> (плотноупакованная) ГПУ $a=b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	<u>Гранецентрированная</u> <u>решетка</u> (ГЦК) $a=b=c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
			
$n=2$, $\eta = 68\%$, $\kappa=8$	$n=1$, η и κ зависит от отношения a/c	$n=6$, $\eta = 74\%$, $\kappa = 12$	$n = 4$, $\eta = 74\%$, $\kappa = 12$

Рисунок 2.2 – Характеристики решеток

Кристаллографические направления и плоскости в кристаллической решетке представлены на рисунке 2.3.

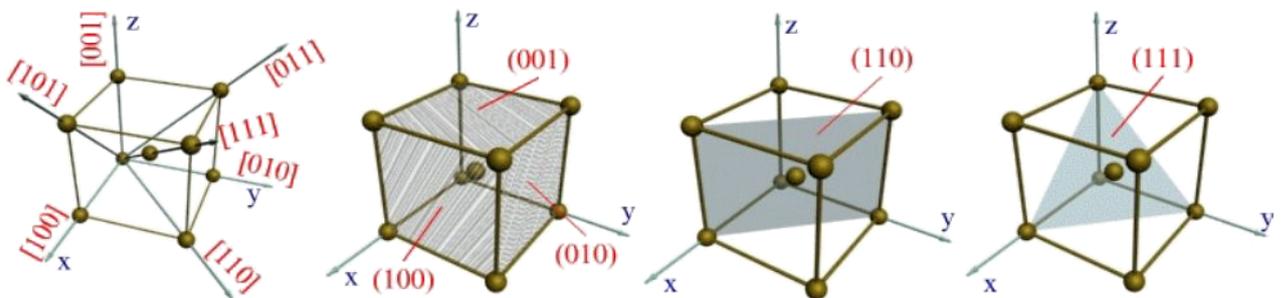


Рисунок 2.3 – Кристаллографические направления и плоскости в кристаллической решетке

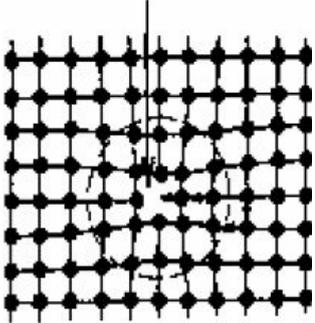
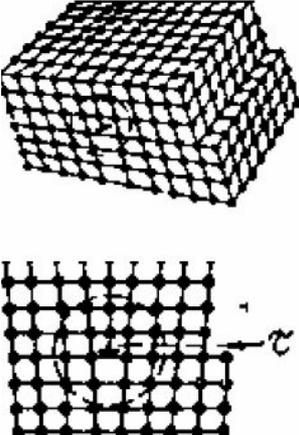
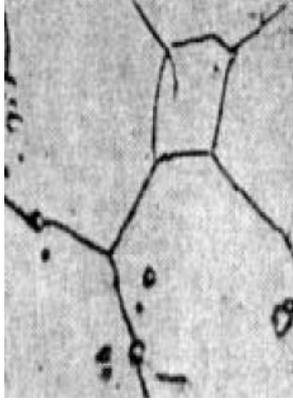
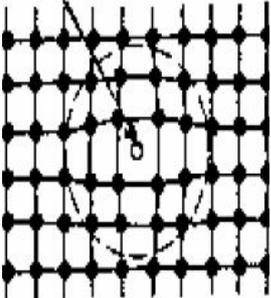
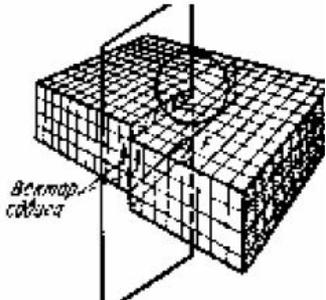
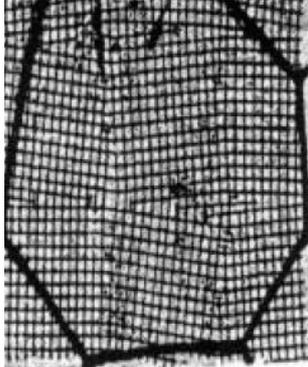
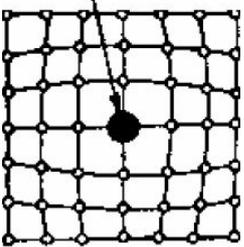
2.2.3 Реальное строение кристаллов

В решетке имеются нарушения строения – структурные несовершенства (дефекты).

Точечные дефекты – малы во всех направлениях.

Линейные дефекты – дислокации – малые размеры в двух измерениях и большая протяженность в третьем.

Поверхностные дефекты – малы в одном измерении.

Точечные дефекты	Линейные дефекты	Поверхностные дефекты
<p>1. Вакансии</p> 	<p>1. Краевая (линейная) дислокация</p> 	<p>1. Границы зерен, большие угловые границы</p> 
<p>2. Межузельные атомы (дефекты Френкеля)</p> 	<p>2. Винтовая дислокация линия вокруг которой атомные плоскости изогнуты по спирали</p> 	<p>2. Границы субзерен мало угловые границы</p> 
<p>3. Примесные атомы замещения</p> 		

Под структурными дефектами подразумеваются небольшие области в кристалле, где нарушена правильность (периодичность) в расположении атомов кристаллической решетки. Структурные дефекты могут возникать в результате наличия в кристаллической решетке смещенных или инородных атомов, нарушения в структуре плотно упакованных плоскостей кристаллов, отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки (вакансий), наличие двойников и, особенно, дислокаций.

Дислокация – наиболее распространенное структурное линейное несовершенство, образующее внутри кристалла границу зоны сдвига. Дислокации образуются в процессе роста кристаллов, при значительных напряжениях, или при наличии больших температурных градиентов. Во всех этих случаях происходит пластическая деформация кристаллов, которая на микроскопическом уровне означает скольжение кристаллических плоскостей друг относительно друга. Скольжение происходит вдоль определенных «плоскостей скольжения» и определенных «линий скольжения».

Два наиболее простейших типа дислокаций – краевая дислокация и винтовая дислокация. В первом случае это линия, являющаяся краем «лишней» полуплоскости. Направление скольжения перпендикулярно краевой дислокации. Винтовая дислокация – это ось спирали. Она направлена параллельно направлению скольжения. Реальные дислокации в кристаллах в большинстве случаев представляют собой комбинацию из краевой и винтовой дислокаций.

При химическом травлении выход дислокаций на исследуемую поверхность выявляется в виде дислокационной ямки травления, форма которой определяется ориентацией поверхности. На плоскости (111) дислокационные ямки в светлом поле микроскопа выявляются в виде темных равносторонних или равнобедренных треугольников (рис. 2.4).

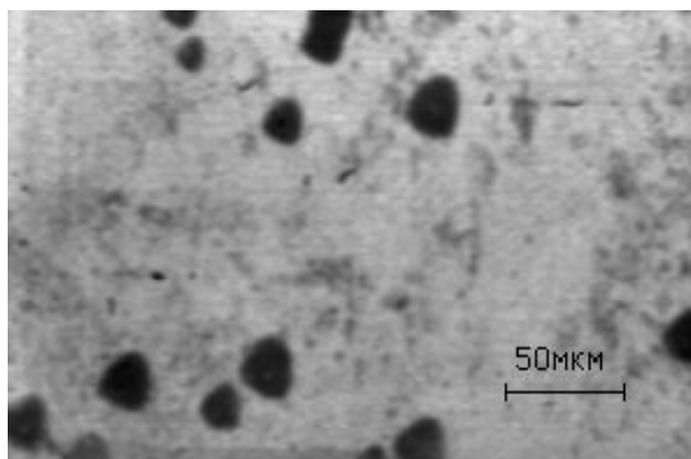


Рисунок 2.4 – Дислокационные ямки травления на поверхности германия, параллельной кристаллографической плоскости (111)

Для флюорита ориентации (111) наблюдаются в виде ярко выраженных треугольников (рис. 2.5).

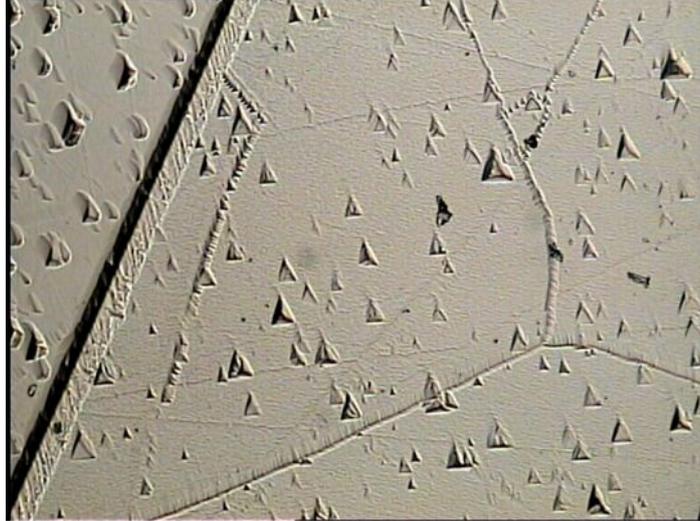


Рисунок 2.5 – Дислокационные ямки травления на поверхности флюорита, параллельной кристаллографической плоскости

Полоса скольжения – линия пересечения системы плоскостей, по которым произошло скольжение с исследуемой поверхностью кристалла. При избирательном химическом травлении полоса скольжения выявляется в виде прямолинейной цепочки дислокационных ямок травления, ориентированных вдоль $\langle 110 \rangle$ на плоскости шлифа (111) (Рис. 2.4).

Во флюорите пространственное расположение ансамбля краевых дислокаций ограничено системой скольжений $[110] (001)$.

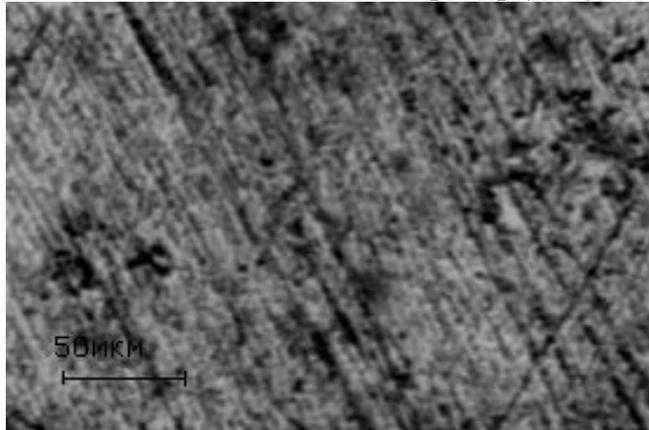


Рисунок 2.6 – Линии скольжения в германии, выращенном методом направленной кристаллизации

Малоугловая граница - переходная область между соседними частями кристалла, разориентированными друг относительно друга на угол от нескольких секунд до нескольких десятков минут, состоящая из одного или нескольких рядов дислокаций. При избирательном травлении германия малоугловая граница выявляется в виде цепочки дислокационных ямок травления, ориентированных вдоль $\langle 112 \rangle$ на плоскости шлифа (111).

Дислокации распределены в материале не равномерно. Характер этого распределения определяется условиями роста кристалла и взаимодействием дислокаций через упругие поля, создаваемые самими дислокациями.

Граница блоков с малым углом разориентации представлена на рис.2.7.

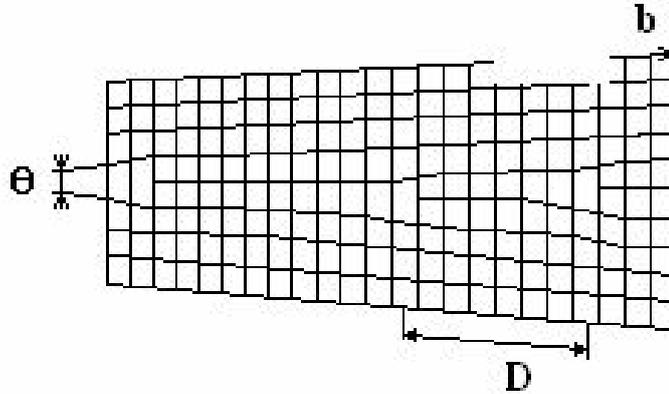


Рисунок 2.7 – Граница блоков с малым углом разориентации

В частности, согласно современным представлениям, один из основных механизмов происхождения кристаллических блоков состоит в изменении пространственного расположения дислокаций при отжиге кристаллов. Например, взаимодействие краевых дислокаций посредством упругих полей приводит к тому, что они «выстраиваются» одна над другой в «дислокационную стенку», которая перпендикулярна плоскости скольжения. Такой процесс носит название «полигонизации», при этом оказывается, что образующиеся дислокационные стенки служат границами между кристаллическими блоками.

Угол разориентации блоков определяется плотностью дислокаций в стенке согласно формуле:

$$\sin \theta = \frac{b}{D}, \quad (2.1)$$

где θ – угол разориентации между блоками, b – длина вектора Бюргерса, D – расстояние между соседними дислокациями.

Страты роста, границы зерен и дислокационные стенки

Страты роста (известные также как «полосы роста», «секторное разделение на зоны» или «зонная структура») являются общими дефектами, встречающимися в минералах и кристаллах, выращенных из расплава или раствора. Границы зерен роста и дислокационные стенки, как правило, встречаются в кристаллах, выращенных из раствора. Страты роста в кристаллах проявляются в виде непрерывных линий, идущих перпендикулярно направлению роста. Они образуются вследствие периодического накопления примесей или нестехиометрического материала, вызванного колебаниями микроскопической скорости роста

или толщины диффузионного слоя, что обусловлено неустойчивостью конвекции из-за флуктуаций температуры.

2.3 Экспериментальная часть

2.3.1 Металлографическое исследование кристаллов

Для большинства кристаллических материалов применяется металлографический метод исследования поверхности. Этот метод позволяет определять плотность дефектов в образце, а также определять кристаллографическую ориентацию образца. Метод заключается в травлении поверхности образца специально подобранным химическим травителем с последующим наблюдением фигур травления на металлографическом микроскопе.

При использовании селективных травителей процесс травления происходит с различными скоростями по разным кристаллографическим плоскостям.

Образующиеся при этом фигуры травления позволяют сделать заключение о кристаллографической ориентации плоскостей. В кристаллах с кубической элементарной ячейкой (германий, кремний, флюорит) для основных кристаллографических плоскостей (100), (110), (111) они будут иметь вид, изображенный на рис.1.8.

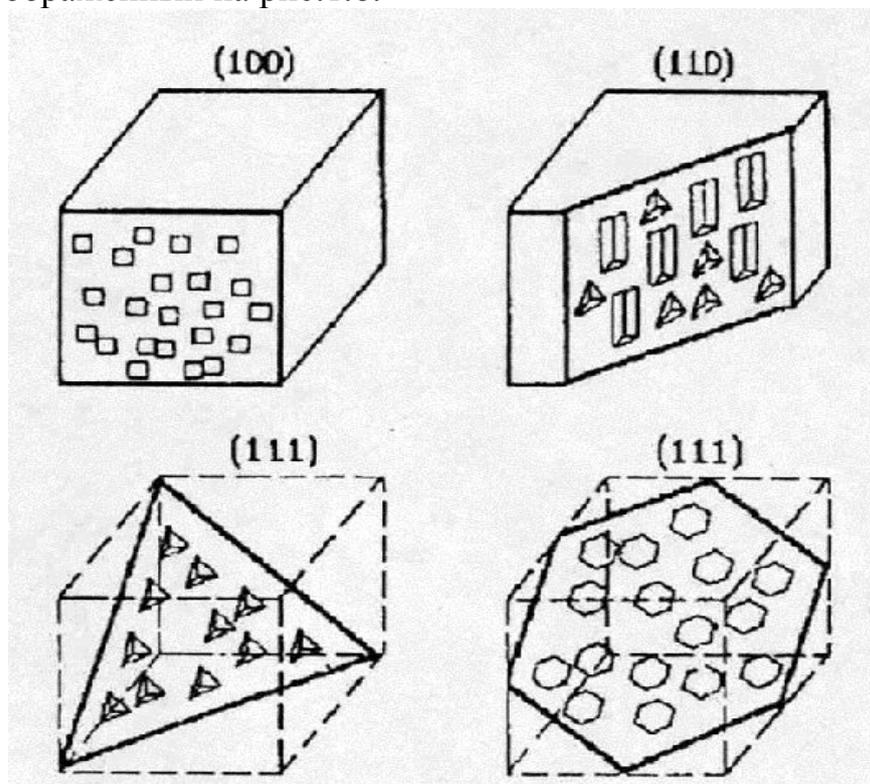


Рисунок 2.8 – Фигуры травления на основных кристаллографических плоскостях кубической решетки

Число ямок травления рассматривается как мера плотности дислокаций. Расчет средней плотности ямок травления N_D производится по формуле:

$$N_D = \frac{n_{cp}}{S}, \quad (2.2)$$

где n_{cp} – среднее количество дислокационных ямок в поле зрения микроскопа;

S – площадь поля зрения, см².

2.3.2 Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению данной лабораторной работы, получить допуск у преподавателя к её выполнению.
2. Исследовать полученные у преподавателя образцы на предмет наличия малоугловых границ между кристаллическими блоками и на предмет существования в них структурных дефектов.
3. Полученные значения подтвердить у преподавателя.

2.4 Контрольные вопросы

1. Что называют дислокациями?
2. Что такое кристаллическая решетка?
3. Основные типы кристаллических решеток.
4. Параметры кристаллической решетки.
5. Что такое координационное число?
6. Кристаллографические плоскости и их индексификация.
7. Классификация дефектов кристаллического строения.

Рекомендуемая литература

1. Егоров-Тсменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия. М. 2005 – 589 с.
2. Оптическое материаловедение. Часть 1: Оптические свойства и дефекты кристаллов и стекол. Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума / Н.В. Никоноров, А.К. Пржеvusский, В.А. Асеев и др. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 73 с.
3. Розин К.М. Практическая кристаллография. Учебное пособие для вузов. – Издательство: МИСиС, 2005г. – 488 с.
4. Меланхолин Н.М. Методы исследования оптических свойств кристаллов. - М.: Наука, 1970.

Лабораторная работа №3. Исследование термопар

3.1 Введение

Термопары широко применяют для измерения температуры различных объектов, а также в автоматизированных системах управления и контроля. Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение из-за надежной конструкции датчика, возможности работать в широком диапазоне температур и дешевизны. Широкому применению термопары обязаны в первую очередь своей простоте, удобству монтажа, возможности измерения локальной температуры.

Цель работы: ознакомиться с принципом действия и назначением термопары. Научиться проводить градуировку термопары.

3.2 Теоретическая часть

3.2.1 Контактная разность потенциалов

Контактная разность потенциалов — это разность потенциалов, возникающая при соприкосновении двух различных проводников, находящихся при одинаковой температуре.

Для объяснения внутренней контактной разности потенциалов прибегают к модели свободных электронов. На рис. 3.1 изображены электронные энергетические диаграммы для двух незаряженных, изолированных друг от друга металлических тел с различными значениями работы выхода электронов. Допустим, что температура металла равна 0 К. Тогда все уровни вплоть до границы уровня Ферми будут заполнены электронами. Так как энергии Ферми разные, то разными будут и концентрации электронов проводимости. Таким образом, для приведенных в соприкосновение металлов начнется диффузия электронов. То есть, металл с большим уровнем Ферми будет заряжаться положительно а второй металл приобретет отрицательный заряд. На границе возникнет скачок потенциала, или, что то же самое – электрическое поле, препятствующее диффузии. При определенной разности потенциалов диффузия прекратится, это произойдет когда уровни Ферми обоих металлов сравняются. Данное объяснение остается верным и при ненулевой температуре. Внутренняя разность потенциалов равна разности уровней Ферми, отнесенных к заряду электрона.

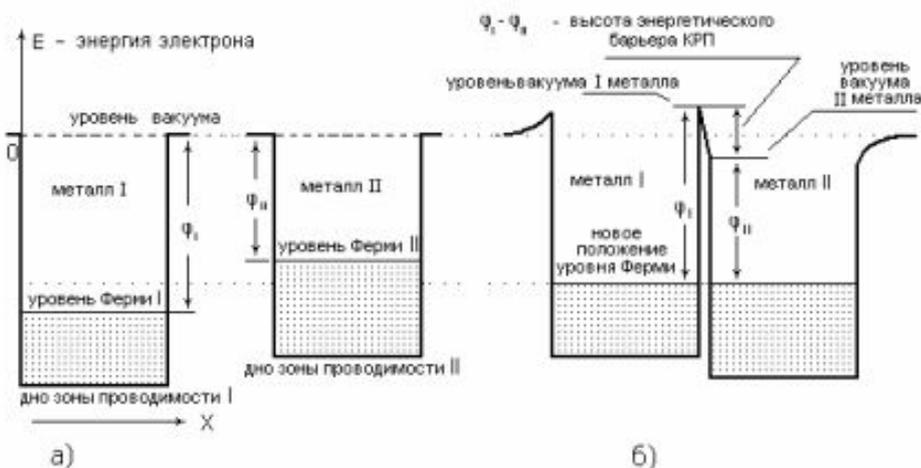


Рис. 3.1. Возникновение контактной разности потенциалов при электрическом контакте двух различных металлов: а) электронные энергетические диаграммы для двух незаряженных, изолированных друг от друга металлических тел с различными значениями работы выхода электронов; б) электронная энергетическая диаграмма двух металлических тел при электрическом контакте после установления равновесия

3.2.2 Принцип действия термопары. Эффект Зеебека

Термоэлемент, составленный из двух различных проводников, образующий замкнутую цепь, называется термопарой (рис. 3.2).

Принцип действия основан на эффекте Зеебека или, иначе, термоэлектрическом эффекте. Когда концы проводника находятся при разных температурах, между ними возникает разность потенциалов, пропорциональная разности температур. Коэффициент пропорциональности называют

коэффициентом термо-ЭДС. У разных металлов коэффициент термо-ЭДС разный и, соответственно, разность потенциалов, возникающая между концами разных проводников, будет различная. Помещая спай из металлов с отличными коэффициентами термо-ЭДС в среду с температурой T_1 , мы получим напряжение между противоположными контактами, находящимися при другой температуре T_2 , которое будет пропорционально разности температур T_1 и T_2 .

Под термоэлектрическим эффектом понимается генерирование термоэлектродвижущей силы (термоЭДС), возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов и сплавов.

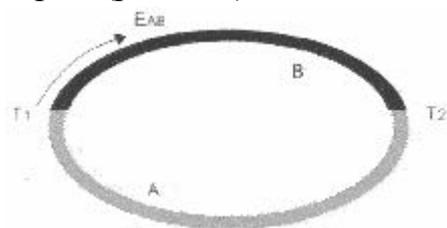


Рис. 3.2. Схема устройства термопары

$$E_T = \alpha_T (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

где $\alpha_T = (k/q) \cdot \ln(n_1/n_2)$ – коэффициент термоЭДС, величина, характеризующая свойства контакта двух металлов; k – постоянная Больцмана; q – заряд электрона; n_1, n_2 – концентрация электронов в соответствующих проводниках.

Значение α_T зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры. ТермоЭДС в контуре складывается из трех составляющих. Первая из них обусловлена температурной зависимостью контактной разности потенциалов. В металлах с увеличением температуры уровень Ферми смещается вниз по энергетической шкале. Поэтому на холодном конце проводника он располагается выше, чем на горячем. Следствием смещения уровня Ферми и является возникновение контактной составляющей термоЭДС.

Вторая составляющая термоЭДС обусловлена диффузией носителей заряда от горячих спаев к холодным. Средняя энергия электронов в металле изменяется с температурой. Электроны, сосредоточенные на горячем конце, обладают большей кинетической энергией и большей скоростью движения по сравнению с носителями холодного конца. Поэтому они диффундируют больше в направлении температурного градиента, чем в обратном. Диффузионный поток, унося отрицательный заряд из горячего конца в холодный, создает между ними разность потенциалов.

Третья составляющая термоЭДС возникает в контуре вследствие увлечения электронов квантами тепловой энергии (фотонами). Их поток также распространяется к холодному концу. Все составляющие термоЭДС определяются небольшой концентрацией электронов, расположенных на энергетических уровнях, близких к уровню Ферми, и отстающих от него на величину порядка kT . Поэтому коэффициент термоЭДС для металлов оказывается очень небольшой. Квантовая теория дает следующее выражение для коэффициента термоЭДС одновалентных металлов

$$\alpha_T \approx n^2 \frac{k}{q} \cdot \frac{kT}{W_F}, \quad (3.2)$$

где W_F – энергия Ферми.

При комнатной температуре отношение $\frac{kT}{W_F}$ имеет значение порядка 10^{-3} . Поэтому α_T должно составлять несколько мкВ/К.

Существенно большее значение α_T можно получить при использовании металлических сплавов, которые имеют сложную зонную структуру.

Можно показать, что в термопарном контуре относительный коэффициент термоЭДС α_T представляет собой разность абсолютных удельных термоЭДС составляющих проводников:

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B, \quad (3.3)$$

где α_T^A и α_T^B - абсолютные удельные термоЭДС контактирующих металлов A и B .

Из соотношения (3.3) следует, что если известно абсолютное значение удельной термоЭДС одного материала, принятого в качестве эталона, то для любого другого материала этот параметр легко получается с помощью измерений относительно этого эталона.

3.2.3 Материалы для термопар

Для изготовления термопар применяют чистые металлы – медь, железо, платина, но используются и сплавы.

Константан (от лат. constans, родительный падеж лат. constantis – постоянный, неизменный) – термостабильный сплав на основе меди (Cu) (около 59%) с добавкой никеля (Ni) (39–41%) и марганца (Mn) (1–2%). Сплав имеет высокое удельное электрическое сопротивление (около 0,5 мкОм·м), минимальное значение термического коэффициента электрического сопротивления, высокую термоэлектродвижущую силу в паре с медью, железом, хромелем

Хромель [от хром и (ник)ель], сплав никеля с хромом, обладающий благоприятным сочетанием термоэлектрических свойств и жаростойкости. Содержит около 10% Cr, около 1% Co, а также примеси (до 0,2% C и до 0,3% Fe). Характеризуется достаточно большим и почти прямолинейным изменением термоэдс (ТЭДС) в широком интервале температур.

Алюмель, сплав, применяемый в пирометрии в качестве отрицательного термоэлектрода термопары хромель-алюмель, а также в виде компенсационных проводов. Химический состав А. (в %): 1,8–2,5 алюминия; 0,85–2,0 кремния; 1,8–2,2 марганца; остальное – никель и кобальт, причём кобальт присутствует как примесь в никеле.

Копель, медно-никелевый сплав, содержащий ~43% Ni и ~0,5% Mn. По химическому составу, физическим и механическим свойствам К. близок к константану, температура плавления К. около 1290°C. Из всех медно-никелевых сплавов К. обладает максимальной термоэлектродвижущей силой в паре с хромелем (около 6,95 мВ при 100°C, 49,0 мВ при 600°C). Применяется главным образом в пирометрии в качестве отрицательного термоэлектрода термопар.

Манганин, сплав на основе меди с добавкой марганца (11,5 – 13,5 %) и никеля (2,5 – 3,5 %), характеризующийся чрезвычайно малым изменением электрического сопротивления в области комнатных температур.

Платинородий – это сплав (10 % родия и 90 % платины).

Типы термопар

Технические требования к термопарам определяются ГОСТ 6616-94. Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров (НСХ),

классы допуска и диапазоны измерений приведены в стандарте МЭК 60584-1,2 и в ГОСТ Р 8.585-2001.

платинородий-платиновые – ТПП13 – Тип R

платинородий-платиновые – ТПП10 – Тип S

платинородий-платинородиевые – ТПР – Тип В

железо-константановые (железо-медьникелевые) ТЖК – Тип J

медь-константановые (медь-медьникелевые) ТМКн – Тип T

нихросил-нисиловые (никельхромникель-никелькремниевые) ТНН – Тип N.

хромель-алюмелевые — ТХА — Тип K

хромель-константановые ТХКн — Тип E

хромель-копелевые — ТХК — Тип L

медь-копелевые — ТМК — Тип M

силх-силиновые — ТСС — Тип I

вольфрам и рений — вольфрамрениевые — ТВР — Тип A-1, A-2, A-3

Выбранная пара материалов должна обладать максимальными значениями термоЭДС, максимальной линейностью характеристики $E_T(\Delta T)$ и стабильностью свойств в данном диапазоне температур.

Для измерения высоких температур выше комнатных рекомендуются следующие термопары: платинородий–платина – до 1600°C; хромель–алюмель – до 900 – 1000 °C; железо–константан, железо–копель и хромель–копель – до 600 °C. Для измерения низких температур часто используется пара медь–константан (от –200 до 350 °C). Для криогенных температур можно использовать термопару железо–золото.

Наибольшую термоЭДС при данной разности температур можно получить от термопары хромель–копель. Ее чувствительность составляет в среднем 0,07–0,08 мВ/К.

3.3 Экспериментальная часть

3.3.1 Схема экспериментальной установки

При определении температуры часто измеряют не ток в цепи с двумя спаями, а непосредственно значение термоЭДС, помещая спай проводников в зону измерения, а свободные концы с подключенным к ним милливольтметром – в зону с известной (эталонной) температурой (рисунок 3.1, б).



Рисунок 3.3. Схема подключения термопары а) при измерении тока в цепи; б) при измерении напряжения в цепи

3.4 Задание

1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению данной лабораторной работы, получить допуск у преподавателя к её выполнению.
2. Исследовать зависимость термоЭДС от температуры для термопары, предложенной преподавателем.
3. Полученные результаты занести в таблицу. Укажите комнатную температуру.

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$E_T, \text{ мВ (} I_T, \text{ мкА)}$	Материал термопары	Примечание

4. Постройте график зависимости измеренной термоЭДС от температуры $E_T = f(T)$. На этой же координатной плоскости постройте взятую из справочной литературы (см. приложение) градуировочную зависимость $E_{T_{гр}} = f(T)$ для исследованной термопары. Сравните экспериментальную и градуировочную зависимости.
5. Рассчитайте коэффициент термоЭДС согласно своим экспериментам и согласно справочным данным.

3.5 Содержание отчета

1. Титульный лист
2. Введение
3. Описание схемы установки.
4. Результаты измерений.
5. Графики зависимости термоЭДС от температуры $E_T = f(T)$.
6. Рассчитанный коэффициент термоЭДС.
7. Выводы.

3.6 Контрольные вопросы

1. Что такое эффект Зеебека?
2. Что такое термоэлектрический эффект?
3. Что такое термопара?
4. Что такое коэффициент термоЭДС?
5. Какие материалы используются для термопар?

Рекомендуемая литература

1. Материалы электронной техники: Учебник для вузов / В. В. Пасынков, В.С. Сорокин. - 6-е изд., стереотип. - СПб.: Лань, 2004. – 366 с. – ISBN 5-8114-0409-3
2. Савельев И.В. Курс физики. В 3-х тт. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. - 320 с. - ISBN: 978-5-8114-0684-5

Приложение

Градуировка (градуировочные таблицы) термопары: хромель - копель (ТХК). Диапазон температур от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Зависимость термоЭДС термопары хромель - копель от температуры для условия, когда свободный конец(спай) термопары находится при нуле градусов Цельсия

t, $^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	ЭДС, мВ									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
-0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

**Градуировка (градуировочные таблицы) термопары: хромель -
алюмель (ТХА).**

Диапазон температур от -270 °С до 190 °С.

Зависимость термоЭДС от температуры для условия, когда свободный
конец(спай) термопары находится при нуле градусов Цельсия
термоЭДС, мВ

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-8.458										
-260	-8.411	-8.444	-8.446	-8.448	-8.450	-8.452	-8.453	-8.455	-8.456	-8.457	-8.458
-250	-8.404	-8.408	-8.413	-8.417	-8.421	-8.425	-8.429	-8.432	-8.435	-8.438	-8.441
-240	-8.344	-8.351	-8.358	-8.364	-8.370	-8.377	-8.382	-8.388	-8.393	-8.399	-8.404
-230	-8.262	-8.271	-8.280	-8.289	-8.297	-8.306	-8.314	-8.322	-8.329	-8.337	-8.344
-220	-8.158	-8.170	-8.181	-8.192	-8.202	-8.213	-8.223	-8.233	-8.243	-8.252	-8.262
-210	-8.035	-8.048	-8.061	-8.074	-8.087	-8.099	-8.111	-8.123	-8.135	-8.147	-8.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138

Градуировка (градуировочные таблицы) термопары: медь - константан (ТМК).

Диапазон температур от -270 °С до 400 °С

Зависимость термоЭДС от температуры для условия, когда свободный конец(спай) термопары находится при нуле градусов Цельсия

	термоЭДС, мВ										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-270	-6.258										
-260	-6.232	-6.236	-6.239	-6.242	-6.245	-6.248	-6.251	-6.253	-6.255	-6.256	-6.258
-250	-6.180	-6.187	-6.193	-6.198	-6.204	-6.209	-6.214	-6.219	-6.223	-6.228	-6.232
-240	-6.105	-6.114	-6.122	-6.130	-6.138	-6.146	-6.153	-6.160	-6.167	-6.174	-6.180
-230	-6.007	-6.017	-6.028	-6.038	-6.049	-6.059	-6.068	-6.078	-6.087	-6.096	-6.105
-220	-5.888	-5.901	-5.914	-5.926	-5.938	-5.950	-5.962	-5.973	-5.985	-5.996	-6.007
-210	-5.753	-5.767	-5.782	-5.795	-5.809	-5.823	-5.836	-5.850	-5.863	-5.876	-5.888
-200	-5.603	-5.619	-5.634	-5.650	-5.665	-5.680	-5.695	-5.710	-5.724	-5.739	-5.753
-190	-5.439	-5.456	-5.473	-5.489	-5.506	-5.523	-5.539	-5.555	-5.571	-5.587	-5.603
-180	-5.261	-5.279	-5.297	-5.316	-5.334	-5.351	-5.369	-5.387	-5.404	-5.421	-5.439
-170	-5.070	-5.089	-5.109	-5.128	-5.148	-5.167	-5.186	-5.205	-5.224	-5.242	-5.261
-160	-4.865	-4.886	-4.907	-4.928	-4.949	-4.969	-4.989	-5.010	-5.030	-5.050	-5.070
-150	-4.648	-4.671	-4.693	-4.715	-4.737	-4.759	-4.780	-4.802	-4.823	-4.844	-4.865
-140	-4.419	-4.443	-4.466	-4.489	-4.512	-4.535	-4.558	-4.581	-4.604	-4.626	-4.648
-130	-4.177	-4.202	-4.226	-4.251	-4.275	-4.300	-4.324	-4.348	-4.372	-4.395	-4.419
-120	-3.923	-3.949	-3.975	-4.000	-4.026	-4.052	-4.077	-4.102	-4.127	-4.152	-4.177
-110	-3.657	-3.684	-3.711	-3.738	-3.765	-3.791	-3.818	-3.844	-3.871	-3.897	-3.923
-100	-3.379	-3.407	-3.435	-3.463	-3.491	-3.519	-3.547	-3.574	-3.602	-3.629	-3.657
-90	-3.089	-3.118	-3.148	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.322	-3.350	-3.379
-80	-2.788	-2.818	-2.849	-2.879	-2.910	-2.940	-2.970	-3.000	-3.030	-3.059	-3.089
-70	-2.476	-2.507	-2.539	-2.571	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788
-60	-2.153	-2.186	-2.218	-2.251	-2.283	-2.316	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.476
-50	-1.819	-1.853	-1.887	-1.920	-1.954	-1.987	-2.021	-2.054	-2.087	-2.120	-2.153
-40	-1.475	-1.510	-1.545	-1.579	-1.614	-1.648	-1.683	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.264	-1.299	-1.335	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475
-20	-0.757	-0.794	-0.830	-0.867	-0.904	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121
-10	-0.383	-0.421	-0.459	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.352	0.391
10	0.391	0.431	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.790
20	0.790	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.033	1.074	1.114	1.155	1.196
30	1.196	1.238	1.279	1.320	1.362	1.403	1.445	1.486	1.528	1.570	1.612
40	1.612	1.654	1.696	1.738	1.780	1.823	1.865	1.908	1.950	1.993	2.036
50	2.036	2.079	2.122	2.165	2.208	2.251	2.294	2.338	2.381	2.425	2.468
60	2.468	2.512	2.556	2.600	2.643	2.687	2.732	2.776	2.820	2.864	2.909
70	2.909	2.953	2.998	3.043	3.087	3.132	3.177	3.222	3.267	3.312	3.358
80	3.358	3.403	3.448	3.494	3.539	3.585	3.631	3.677	3.722	3.768	3.814
90	3.814	3.860	3.907	3.953	3.999	4.046	4.092	4.138	4.185	4.232	4.279
100	4.279	4.325	4.372	4.419	4.466	4.513	4.561	4.608	4.655	4.702	4.750
110	4.750	4.798	4.845	4.893	4.941	4.988	5.036	5.084	5.132	5.180	5.228
120	5.228	5.277	5.325	5.373	5.422	5.470	5.519	5.567	5.616	5.665	5.714
130	5.714	5.763	5.812	5.861	5.910	5.959	6.008	6.057	6.107	6.156	6.206
140	6.206	6.255	6.305	6.355	6.404	6.454	6.504	6.554	6.604	6.654	6.704
150	6.704	6.754	6.805	6.855	6.905	6.956	7.006	7.057	7.107	7.158	7.209
160	7.209	7.260	7.310	7.361	7.412	7.463	7.515	7.566	7.617	7.668	7.720
170	7.720	7.771	7.823	7.874	7.926	7.977	8.029	8.081	8.133	8.185	8.237
180	8.237	8.289	8.341	8.393	8.445	8.497	8.550	8.602	8.654	8.707	8.759
190	8.759	8.812	8.865	8.917	8.970	9.023	9.076	9.129	9.182	9.235	9.288

Лабораторная работа №4. Исследование температурной зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков

4.1 Введение

Цель работы - экспериментальное исследование зависимости электрической проводимости твердых диэлектриков от температуры и расчет некоторых характеристик диэлектриков и конденсаторов.

4.2 Теоретическая часть

Электрическая проводимость твердых диэлектриков зависит от их химического состава, структуры и условий, в которых проводятся измерения (температуры, напряженности электрического поля и др.). Электропроводность диэлектриков может быть обусловлена перемещением ионов и электронов. В некоторых диэлектриках, например, в титанате бария (BaTiO_3), преобладает электронный тип проводимости. Но у большинства используемых твердых диэлектриков в слабых электрических полях проводимость обусловлена движением ионов. Участие электронов в электропроводности этих диэлектриков наблюдается только в сильных электрических ПОЛЯХ.

Удельная электрическая проводимость γ диэлектрика

$$\gamma = qn\mu, \quad (4.1)$$

где q - заряд иона;

n - концентрация ионов, участвующих в электропроводности, приходящаяся на единицу объема диэлектрика;

μ - дрейфовая подвижность этих ионов.

Концентрация n и подвижность μ ионов зависят от температуры. Следовательно, удельная электрическая проводимость γ диэлектрика является функцией температуры.

4.2.1 Механизм ионной проводимости твердых диэлектриков

В твердом теле ион взаимодействует с окружающими его заряженными частицами. Энергия этого взаимодействия W зависит от положения иона (от его координаты x) относительно окружающих частиц от зарядов ионов, т.е. от химического состава и структуры вещества (рис. 4.1). Каждый ион стремится занять положение, которому соответствует минимум потенциальной энергии.

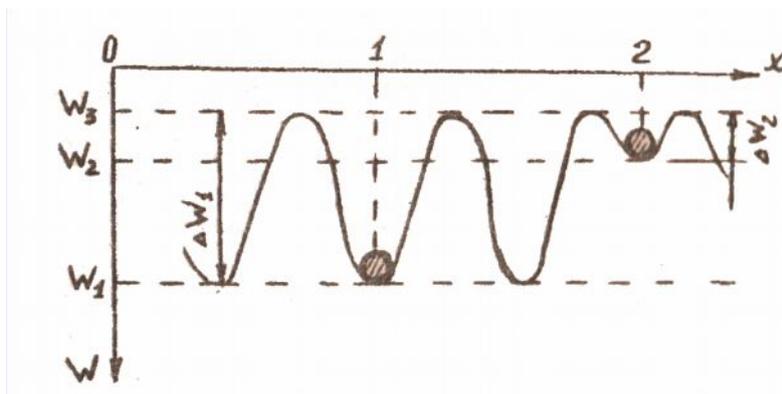


Рис. 4.1. Зависимость потенциальной энергии иона твердого диэлектрика от координаты в электрическом поле окружающих заряженных частиц

Положение 1 на рис. 4.1 соответствует иону, который находится в узле кристаллической решетки. Потенциальная энергия его минимальна и равна W_1 . Для выхода из потенциальной ямы ион должен преодолеть потенциальный барьер высотой $W_3 - W_1 = \Delta W_1$. Энергия ΔW_1 называется энергией активации собственных ионов диэлектрика.

В реальных диэлектриках практически всегда имеются ионы примеси. Они сравнительно слабо закреплены (положение 2 на рис.4.1). Для их выхода из потенциальной ямы необходима энергия активации ΔW_2 значительно меньшая, чем ΔW_1 (см.рис. 4.1). Аналогично ведут себя ионы основного вещества, располагающиеся вблизи дефектов кристаллической решетки и в междоузлиях.

Движение ионов в твердом теле рассматривают как их тепловое освобождение из потенциальной ямы W переход в другую потенциальную яму. В отсутствие внешнего электрического поля переходы ионов за счет тепловой энергии по всем направлениям равновероятны. Так, например, для перехода иона из положения 1 в направлениях $+x$ и $-x$ нужно преодолеть барьер одной и той же высоты ΔW_1 , а для переходе примесного иона – барьер ΔW_2 . Хаотичное движение ионов не приводит к появлению электрического тока.

При воздействии на диэлектрик внешнего электрического поля, каждый ион обладает потенциальной энергией в этом поле, равной $q \cdot \varphi$, где q - заряд иона, а φ - потенциал электрического поля в точке расположения иона. Если поле в диэлектрике равномерное, то потенциал изменяется с координатой по линейному закону и зависимость от координаты имеет вид, представленный на рис. 4.2

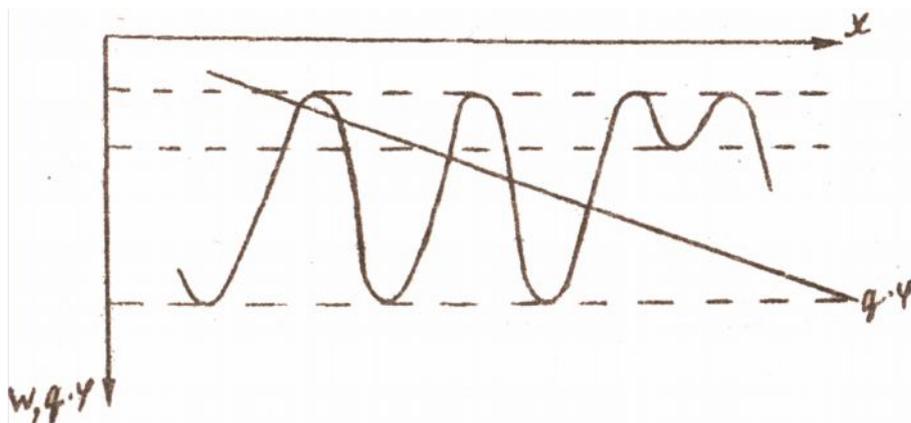


Рис. 4.2. Зависимость потенциальной энергии иона от координаты во внешнем поле $q \cdot \varphi$ и в электрическом поле окружающих заряженных частиц W_1

Просуммировав обе составляющие потенциальной энергии иона, получим для потенциальной энергии иона график, представленный на рис. 4.3

Высота потенциальных барьеров при перемещении ионов в направлениях $+x$ и $-x$ теперь не одинакова $\Delta W_2'' \neq \Delta W_2'$. Следовательно, возрастает вероятность перемещения положительных ионов в направлении вектора напряженности электрического поля E , а отрицательных ионов - в противоположном направлении, и в диэлектрике появляется электрический ток.

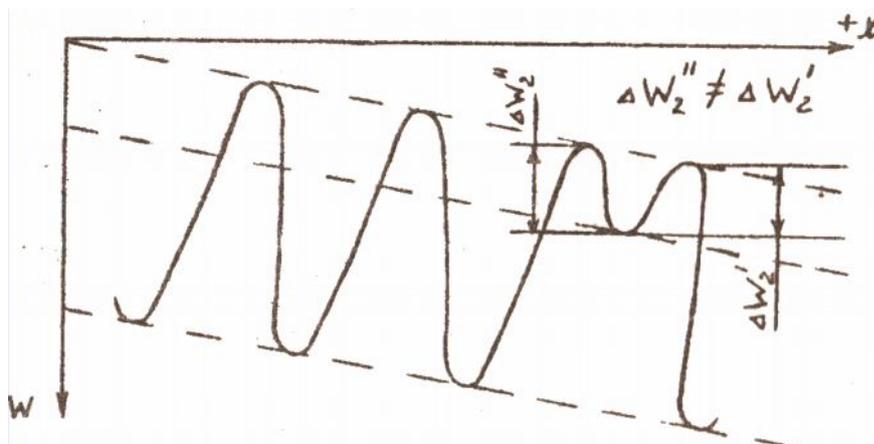


Рис. 4.3. Зависимость потенциальной энергии иона от координаты в твердом теле при воздействии равномерного электрического поля

4.2.2 Температурная зависимость электрической проводимости

С повышением температуры растет вероятность освобождения иона из потенциальной ямы и его перемещения в твердом диэлектрике. Вследствие этого, с повышением температуры увеличивается электропроводность диэлектриков.

Если в электрической проводимости принимают участие ионы одного вида, то математически зависимость удельной электрической проводимости диэлектрика от температуры описывается выражением

$$\gamma = A \exp\left(-\frac{\Delta W_1}{kT}\right), \quad (4.2)$$

где A – коэффициент, не зависящий от температуры;
 ΔW_1 – энергия активации ионов;
 k – постоянная Больцмана;
 T – абсолютная температура.

График зависимости удельной электрической проводимости от температуры представлен на рис. 4.4. Практически удобнее пользоваться графиком, построенном в полулогарифмической системе координат (рис. 4.5).

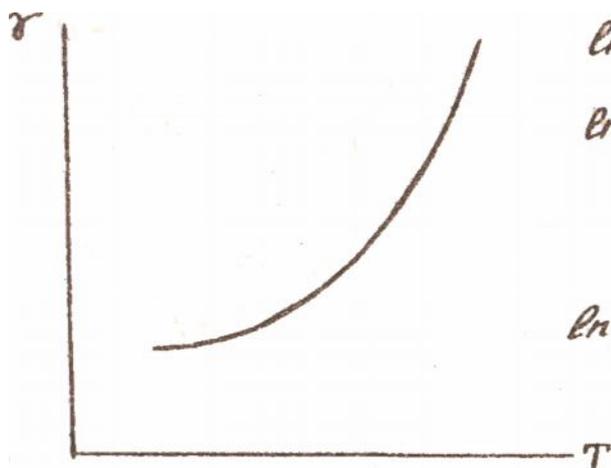


Рис. 4.4. Зависимость электрической проводимости γ от температуры T

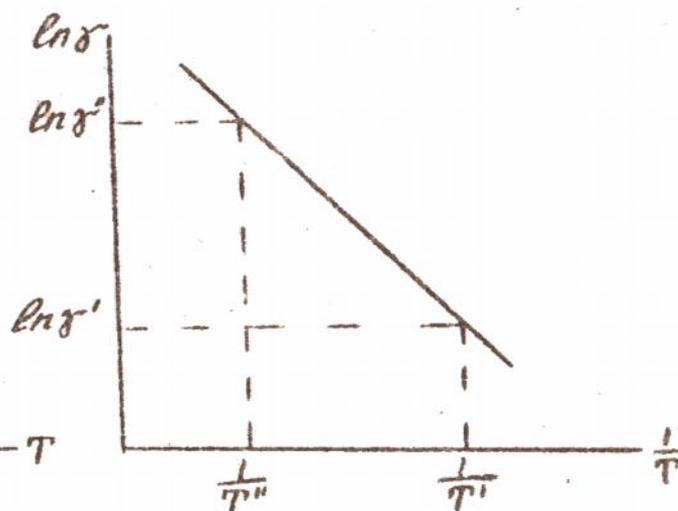


Рис. 4.5. Зависимость электрической проводимости γ от температуры T в полулогарифмической системе координат

Прологарифмируем формулу (4.2)

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta W}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4.3)$$

В системе координат $\ln \gamma = f(1/T)$ график представляет собой прямую линию (см. рис. 4.5). Тангенс угла наклона прямой относительно оси X равен $\Delta W/k$. Следовательно, с помощью этого графика нетрудно рассчитать энергию активации ионов, участвующих в электропроводности:

$$\Delta W = k \frac{\ln \gamma'' - \ln \gamma'}{\frac{1}{T'} - \frac{1}{T''}}, \quad (4.4)$$

где $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/град - постоянная Больцмана;

ΔW - энергия активации ионов, эВ;

γ' и γ'' - удельные электрические проводимости при температурах T' и T'' , соответственно;

T' и T'' - абсолютная температура.

Если в исследуемом интервале температур в электропроводности участвуют ионы двух видов, то зависимость удельной электрической проводимости от температуры математически описывается формулой вида:

$$\gamma = A_1 \exp\left(-\frac{\Delta W_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{\Delta W_2}{kT}\right), \quad (4.5)$$

где A_1 , и A_2 - коэффициенты, относящиеся к ионам первого и второго вида соответственно;

ΔW_1 и ΔW_2 -энергии активации этих ионов.

Если $\Delta W_1 \neq \Delta W_2$, то в системе координат $\ln \gamma = f(1/T)$ график представляет собой ломаную линию. С его помощью можно рассчитать энергию активации ионов первого и второго вида.

4.3 Экспериментальная часть

Схема установки приведена на рис 4.6. Образец O помещается в муфельную печь. Скорость нагревания образца регулируется реостатом R . Температура образца измеряется с помощью термопары B и милливольтметра PV , а сопротивление - тераомметром PR (рис. 4.6).

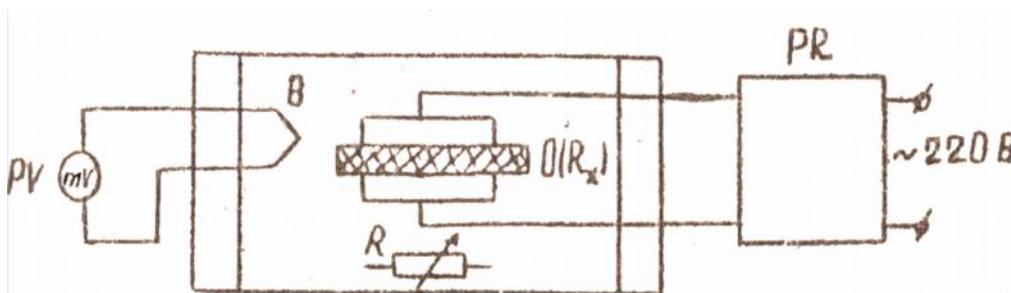


Рис. 4.6. Схема установки

4.4 Задание

1. Ознакомиться с измерительной установкой.
2. Включить тераомметр в сеть и дать прогреться в течение 30 минут.
3. Откалибровать тераомметр. Поставить переключатель в положение "Ω" • (Положение КАЛ служит для калибровки на пределы ТОм x I и ТОм x 10, которые при выполнении лабораторной работы не используются).
4. Ручкой УСТАНОВКА ∞ установить стрелку прибора на риску ∞. Соединить проводником клеммы R_x накоротко и ручкой УСТАНОВКА 0,I поставить стрелку прибора на риску 0,I.
5. Произвести измерения сопротивления. Снять закоротку и подключить образец к клеммам R_x . Переключатель пределов поставить в положение, при котором отклонение стрелки находится в пределах

шкалы. Величина сопротивления определится как показание стрелочного прибора, умноженное на множитель показателя пределов.

- Примечания: 1. Первые измерения производить при положении переключателя $100 \times \text{ГОм}$.
2. При проведении измерений необходимо учесть, что схема прибора позволяет заземлить любой, но одновременно только один из зажимов "К" или "Э". Зажимы "Ω" и "Э" относительно зажима "К" находятся под потенциалом 105 В.
6. Включить нагреватель печи и произвести измерения в процессе нагрева.
7. Снять температурную зависимость электрической проводимости керамического диэлектрика $\gamma = f(T)$, изменяя температуру от 20 до 230 °С. Измерения сопротивления проводить через 10-15 °С. Построить график $\gamma = f(T)$ в полулогарифмической системе координат.
8. Рассчитать энергию активации для всех видов ионов.
9. Данные измерений сводятся в таблицу.

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$1/T, 1/\text{K}^{-1}$	$R, \text{Ом}$	$\gamma=1/R$	$\ln \gamma$	Примечание
						Материал образца

При расчете энергии активации рекомендуется для уменьшения погрешности использовать значения $\ln \gamma$ наиболее удаленные по температурной шкале друг от друга, но лежащие на одном отрезке прямой.

4.5 Содержание отчета

1. Титульный лист
2. Введение
3. Описание схемы установки.
4. Результаты измерений.
5. Графики температурной зависимости γ в полулогарифмической системе координат.
6. Рассчитать энергию активации.
7. Выводы.

4.6 Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена электропроводность твёрдых диэлектриков? Объясните механизм электропроводности.
2. Какова температурная зависимость электропроводности твердых диэлектриков?
3. Что такое энергия активации?

4. В каком соотношении находятся энергия активации собственных и примесных ионов?

5. Докажите, что при низких температурах проводимость примесная, а не собственная.

6. Расскажите принцип действия тераомметра.

Рекомендуемая литература

1. Материалы электронной техники: Учебник для вузов / Владимир Васильевич Пасынков, Валерий Сергеевич Сорокин. - 4-е изд., стереотип. - М.: ДМК, 2002 ; СПб. : Лань, 2002. - 368 с.
2. Трубицын А.М. Электрорадиоматериалы. Диэлектрики. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТАСУР, 1995. – 76 с.

Учебное пособие

Кистенева М.Г.

Избранные главы физики твердого тела (Основы кристаллографии)

Методические указания к лабораторным работам
по дисциплине «Избранные главы физики твердого тела (Основы
кристаллографии)»

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40