

С.Л. Щербаков, В.А. Хоник

УЧЕБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ



**ВОРОНЕЖ
2024**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

**С.Л. Щербаков,
В.А. Хоник**

УЧЕБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

*Учебно-методическое пособие
для обучающихся бакалавриата по направлению
подготовки 44.03.05 Педагогическое образование
(с двумя профилями подготовки), профили «Физика»,
«Информационные технологии»;
«Естествознание», «Физика»; «Математика», «Физика»*

ВОРОНЕЖ
Воронежский государственный педагогический университет
2024

УДК 538.91
ББК Р22
Щ61

Печатается по решению
учебно-методического совета ВГПУ.
Протокол № 8 от 13 июня 2024 г.

Р е ц е н з е н т ы:

доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой
экспериментальной физики профессор *С.Н. Дрождин* (ВГУ);
кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и МПМ,
Е.А. Кубряков (ВГПУ)

Щербаков С.Л.

Щ61 Учебные эксперименты по изучению физики рентгеновских лучей:
учебно-методическое пособие для обучающихся бакалавриата по направле-
нию подготовки 44.03.05 Педагогическое образование (с двумя профилями
подготовки), профили «Физика» «Информационные технологии»; «Есте-
ствознание», «Физика»; Математика», «Физика» / С.Л. Щербаков, В.А. Хо-
ник. – Воронеж : Воронежский государственный педагогический универси-
тет, 2024. – 40 с.

В методических указаниях приводится описание порядка выполнения, теоретическое обоснование лаборатор-
ных работ. В учебно-методическом пособии также представлены задания и контрольные вопросы к лабораторным
работам.

Издание предназначено для студентов бакалавриата физико-математического факультета, обучающихся по
направлению 44.03.05 «Педагогическое образование», профили: «Физика / Информационные технологии», «Мате-
матика / Физика», «Естествознание / Физика». Материал пособия может быть использован преподавателями вузов в
процессе изучения дисциплины «Физика конденсированного состояния».

УДК 538.91
ББК Р22

Учебное издание

ЩЕРБАКОВ Сергей Леонидович, ХОНИК Виталий Александрович

УЧЕБНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

*Учебно-методическое пособие
для обучающихся бакалавриата по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое
образование (с двумя профилями подготовки), профили «Физика», «Информационные
технологии»; «Естествознание», «Физика»; «Математика», «Физика»*

В авторской редакции

Изготовление оригинала-макета: *Д.Н. Астахова*

Подписано в печать 04.09.2024. Формат 60х84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 2,5.

Уч.-изд. л. 2,32. Заказ 151. Тираж 22 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный педагогический университет».

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре ВГПУ.
394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 86. Тел. (473) 255-58-32, 255-61-83.

© Щербаков С.Л., Хоник В.А., 2024

© Воронежский государственный педагогический университет,
редакционно-издательская обработка, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Метод рентгеноструктурного анализа является наиболее используемым, информативным и надежным при исследовании структуры материалов. Ознакомившись с настоящими учебными экспериментами, обучающиеся будут иметь представления о рентгеновском излучении, дифракции рентгеновских лучей, уметь структурировать и анализировать результаты прямых измерений.

Для проведения рентгеноструктурного анализа используется аппаратура, которая включает в себя рентгеновские трубки, гониометры, детекторы и т.д. Это оборудование имеет также программное обеспечение для реализации управления устройством и анализа полученных данных. Рассматриваемые учебные эксперименты могут быть полностью реализованы на рентгеновской установке XR 4.0 X-ray.

Основной целью проведения учебных экспериментов на этой установке является изучение физики рентгеновских лучей. Для достижения этой цели реализуются следующие задачи:

1. Сборка, подготовка и настройка экспериментального оборудования.
2. Проведение пяти учебных экспериментов.
3. Обобщение и анализ полученных данных.
4. Расчет значений физических величин по полученным данным.
5. Обобщение полученных результатов в виде кратких ответов на основную цель и задачи экспериментальной работы.

При проведении данных учебных экспериментов необходимо учитывать все требования по технике безопасности и выполнять все измерения поочередно и в правильной последовательности.

К практическим рекомендациям можно отнести следующее:

1. Перед началом эксперимента ознакомьтесь со всем оборудованием, которое будете использовать. Прочитайте весь список оборудования.
2. Разберитесь с физикой процесса, который будете изучать в ходе эксперимента. Базовый теоретический минимум представлен в каждом учебном эксперименте. В большинстве случаев его будет достаточно, но для более продуктивного изучения темы ознакомьтесь со списком литературы и работами касающихся того или иного эксперимента.

3. Необходимо точно понимать какие этапы включает в себя учебный эксперимент и что является его конечной целью. Хаотичность выполнения заданий не приведет к верному ответу.

4. В каждом эксперименте происходят как одинаковые, так и различающиеся физические процессы. Необходимо понимать принципиальную разницу между ними и уметь сформулировать свои знания о физических процессах (словами, схемами, рисунками).

В каждом учебном эксперименте присутствует список контрольных вопросов. Понимание физических процессов и явлений, заключенных в контрольных вопросах, поможет вам успешно завершить каждый из этих экспериментов.

В конце данного пособия представлен список литературы. К каждой лабораторной работе можно выборочно использовать тот или иной источник. Важно учитывать различие в описываемых рентгеновских установках и программном обеспечении. Необходимо совмещать данные, полученные из разных источников с учетом того, каким способом получались те или иные измерения.

УСТАНОВКА RHYWE XR 4.0 X-RAY. ОПИСАНИЕ И ФУНКЦИИ

Рентгеновский аппарат RHYWE XR 4.0 X-Ray является демонстрационным, а также используется для проведения лабораторных занятий. Он был специально разработан для удовлетворения требований образования в школах и университетах. В дополнение к его использованию в обучении физике, он также может быть использован для обучения в медицинском секторе и смежных технических дисциплинах. Особенно примечательной отличительной особенностью этого компактного устройства с микропроцессорным управлением является функция быстрой замены рентгеновских трубок, которая позволяет проводить эксперименты с различными рентгеновскими трубками и, следовательно, с различными материалами анода. Доступны следующие рентгеновские трубки, которые встроены в специальные, готовые к использованию устройства:

Подключаемый блок с рентгеновской трубкой Cu.

Подключаемый блок с рентгеновской трубкой Mo.

Подключаемый блок с рентгеновской трубкой Fe.

Подключаемый блок с рентгеновской трубкой W.

Помимо простых рентгеноскопических экспериментов и экспериментов по дозиметрии, устройство позволяет проводить спектроскопические эксперименты по атомной физике и физике твердого тела. Рабочие и управляющие параметры задаются либо непосредственно на устройстве, либо с помощью компьютера через порт USB. Цветной TFT-дисплей на панели управления используется для непосредственного управления устройством (и для отображения всех рабочих и контрольных параметров, а также значений измерений). Клавиши вокруг дисплея на панели управления позволяют управлять устройством и его основными функциями.

Функциональные и управляющие элементы

Рентгеновский экспертный блок XR 4.0 включает в себя следующие основные компоненты (рис. 1; рис. 2).

1. Экспериментальная камера. Предназначена для проведения экспериментов и установки дополнительного оборудования, такого как гониометр, датчики излучения и направляющие рельсы и др.

2. Панель управления. Предназначена для установки рабочих значений параметров и контрольных величин, а также для отображения всех доступных значений измерений.

3. Лоток для принадлежностей. Предназначен для хранения дополнительных компонентов.

4. Вставной блок с рентгеновской трубкой.

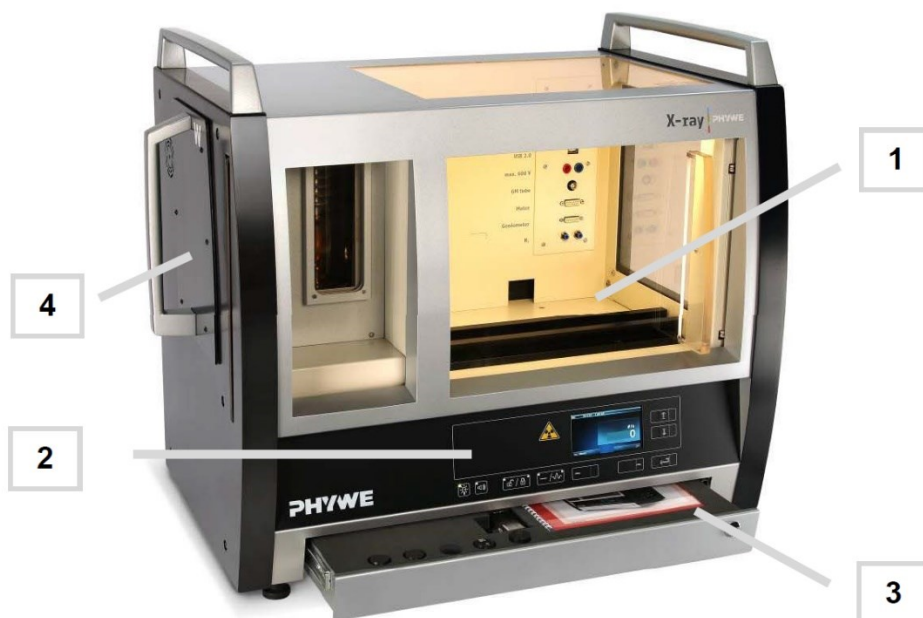


Рис. 1 – Рентгеновская установка XR 4.0

5. Панель разъемов в экспериментальной камере. Предназначена для подключения различных компонентов и подключения к другому периферийному оборудованию через панель разъемов снаружи с правой стороны устройства.

6. Панель внешних разъемов. Внешняя панель розеток на правой стороне устройства является аналогом панели розеток внутри экспериментальной камеры.



Рис. 2 – Рентгеновская установка XR 4.0, вид справа

Функциональные элементы панели управления

Для ручного управления рентгеновской установкой имеется специальная панель. Ниже представлены основные элементы управления и их внешний вид.

№	Название	Функция	Подсветка
I	Символ “Рентгеновские лучи”	Индикация состояния рентгеновского излучения	Ярко-желтого цвета
II	Подсветка	Для включения/выключения освещения в камере	Зеленый
III	Громкоговоритель	Акустическая индикация импульсов	Зеленый
IV	Состояние двери	Для запираения и отпираения двери	Белый, зеленый
V	Анодное напряжение	Для активации рентгеновского излучения	Белый, зеленый
VI	Кнопка управления	Выбор функции меню будет отображен на дисплее	Белый
VII	Кнопка управления	Выбор функции меню будет отображен на дисплее	Белый
VIII	Кнопка «вверх»	Для прокрутки меню	Белый

№	Название	Функция	Подсветка
IX	Кнопка «вниз»	Для прокрутки меню	Белый
X	Кнопка «Подтвердить»	Для подтверждения выбранного значения	Белый
XI	TFT-дисплей	Для отображения меню ручного управления устройством	Цветной

Таблица 1 – Элементы панели управления

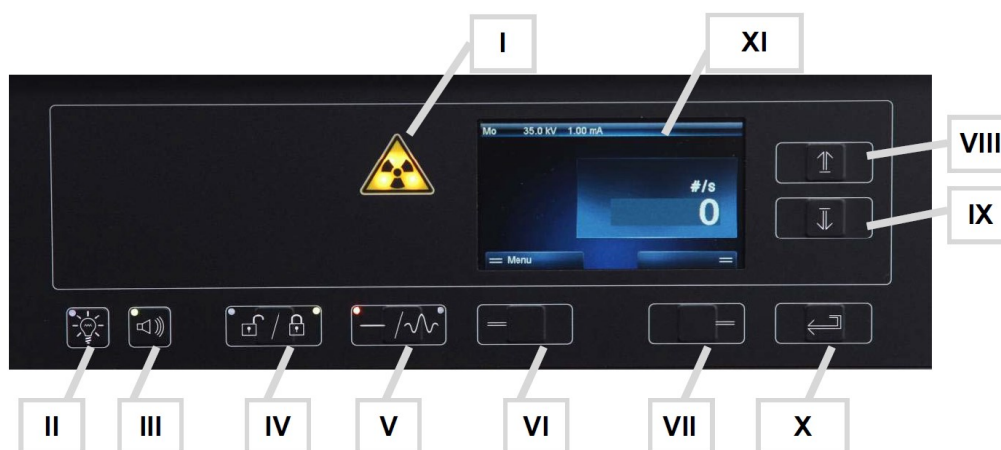


Рис. 3 – Внешний вид панели управления

Инструкции по технике безопасности

Перед запуском устройства внимательно прочтите инструкцию по эксплуатации. Это важно для вашей собственной защиты и во избежание повреждения устройства. Используйте устройство исключительно по назначению.

Перед подключением устройства к сетевому источнику питания убедитесь, что защитный провод блока питания правильно подсоединен к защитному проводу сети электропитания. Сетевой штекер можно подключать только к сетевой розетке, оснащенной защитным проводом.

При настройке устройства убедитесь, что сетевой выключатель и вилка устройства находятся в свободном доступе. Убедитесь также, что вентиляционные отверстия устройства не закрыты и не заблокированы.

Не подключайте к устройству какие-либо устройства кроме тех, которые предназначены для этой цели.

Рентгеновский датчик прямого цифрового изображения XR 4.0 II (XRIS II) 09057-41 и блок Z-вращения рентгеновской компьютерной томографии XR 4.0 09057-42 не должны подключаться к сети или отсоединяться от нее во время работы. Несмотря на защиту программного обеспечения, существует риск повреждения.

Не запускайте устройство, если поврежден сетевой кабель питания или само устройство.

Выключите устройство после его использования. Непрерывная работа недопустима. Максимальное время работы в день составляет 10 часов. Использование трубки через более длительные промежутки времени не представляет угрозы для безопасности, но это может сократить срок службы трубки.

УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ №1.

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕДИ

Цель эксперимента

Исследовать физику характеристического рентгеновского излучения меди.

Задачи учебного эксперимента:

1. Проанализировать спектр рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристаллов LiF и KBr.
2. Определить значения энергии характеристических рентгеновских лучей меди, и сравнить их с теоретическими значениями.

Экспериментальное оборудование:

- XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ;
- XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки;
- XR 4.0 X-ray Съёмная рентгеновская трубка Cu tube;
- XR 4.0 X-ray Устройства расширения из рентгеновского набора.

Теоретическая часть

Рентгеновская трубка с медным анодом генерирует рентгеновское излучение, которое выбирается с помощью монокристалла в зависимости от угла Брэгга. Трубка Гейгера-Мюллера измеряет интенсивность излучения. Затем углы скольжения характерных рентгеновских линий используются для определения значений энергий характеристических линий.

Когда электроны ударяются о металлический анод рентгеновской трубки, образуются рентгеновские лучи с непрерывным распределением по энергии. На спектр тормозного излучения накладываются дополнительные дискретные линии. Если атом материала анода ионизируется на К-оболочке после удара электрона, электрон из более высокой оболочки может занять свободное место, испуская квант рентгеновского излучения. Энергия этого кванта рентгеновского излучения соответствует разнице энергий двух оболочек, участвующих в этом процессе. Поскольку эта разность энергий зависит от атома, результирующее излучение также

называется характеристическим рентгеновским излучением. На рисунке 1.1 показана диаграмма энергетического уровня меди. Характерное рентгеновское излучение, которое образуется при переходе от оболочки L к оболочке K, называется K_{α} излучением, в то время как излучение, которое образуется при переходе от оболочки M к оболочке K, называется K_{β} излучением.

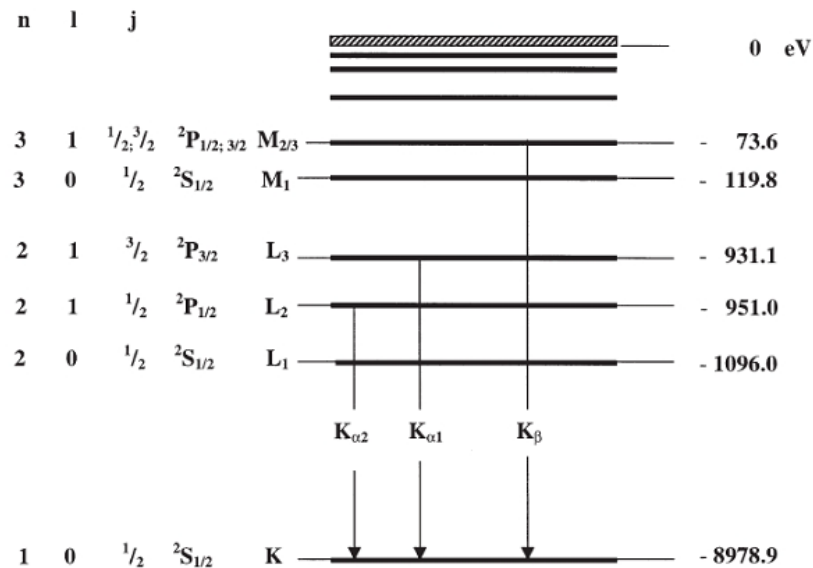


Рис. 1.1 – Энергетические уровни меди

Характерные рентгеновские линии меди имеют следующие энергетические уровни: $E_{K\alpha} = 8,038$ кэВ; $E_{K\beta} = 8,905$ кэВ.

Анализ полихроматических рентгеновских лучей возможен благодаря использованию монокристалла. Когда рентгеновские лучи с определенной длиной волны падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения θ , лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, интерферируют друг с другом при условии, что разность их хода соответствует целому числу, кратному длине волны (рисунок 1.2). Закон Вульфа-Брэгга применим к конструктивной интерференции отраженных волн:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda. \quad (1.1)$$

Если известно межплоскостное расстояние d , то длину волны λ можно определить с помощью угла скольжения θ . Энергию излучения можно вычислить по формуле:

$$E = hc/\lambda, \quad (1.2)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны падающего рентгеновского пучка.

Объединяя (1.1) и (1.2), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} \quad (1.3)$$

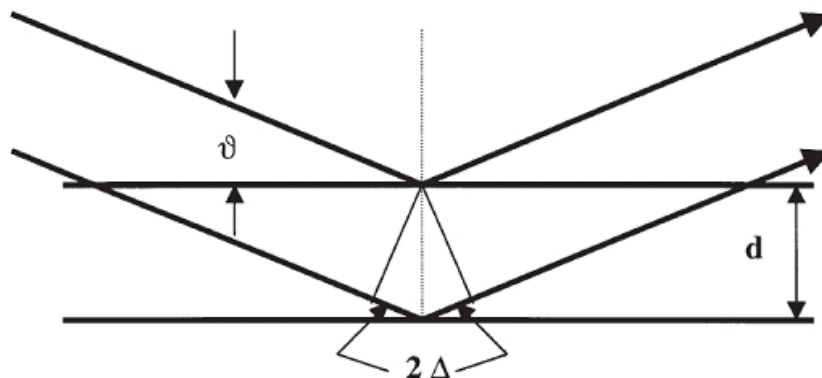


Рис. 1.2 – Отражение рентгеновских лучей от плоскостей кристалла

Скорость света $c = 2,9979 \times 10^8$ м/с. В рассматриваемой работе межплоскостное расстояние кристалла LiF (200) $d = 2,014 \times 10^{-10}$ м, межплоскостное расстояние кристалла KBr (200) $d = 3.290 \times 10^{-10}$ м. Вспоминаем, что $1 \text{ эВ} = 1,6021 \times 10^{-19}$ Дж.

Порядок выполнения работы

1. Подсоедините гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере (Рисунок 1.3). Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем положении с правой стороны. Прикрепите измерительную трубку Гейгера-Мюллера с ее держателем к заднему упору направляющих рельсов. Не забудьте установить мембрану перед ответной трубкой. Вставьте мембранную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока вставного устройства для трубки.

Для калибровки: убедитесь, что в параметрах гониометра указан правильный кристалл. Затем выберите «Меню», «Гониометр», «Автокалибровка». Теперь устройство определяет оптимальное расположение кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем положение пиков.



Рисунок 1.3 – Разъемы в экспериментальной камере

2. Подключите рентгеновский аппарат с помощью USB-кабеля к USB-порту вашего компьютера. Запустите программу “measure”. На экране появится виртуальный рентгеновский аппарат. Вы можете управлять рентгеновским аппаратом, щелкая по различным функциям на виртуальном рентгеновском аппарате и под ним. Кроме того, вы также можете изменить параметры в реальном рентгеновском аппарате. Программа автоматически примет настройки.

3. Щелкните по камере для эксперимента, чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите необходимые параметры для данной лабораторной работы, которые представлены ниже. (Рисунок 1.4) Если вы нажмете на рентгеновскую трубку, вы сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите необходимые параметры. Начните измерение, щелкнув по красному кругу.

Обзор настроек гониометра и рентгеновской установки:

- Режим сопряжения 1:2
- Время выхода 2 с; ширина углового шага 0,1°
- Диапазон сканирования 4°-55° (монокристалл LiF) и 3°-75° (монокристалл KBr)
- Анодное напряжение $U_A = 35$ кВ; анодный ток $I_A = 1$ мА

Рис. 1.4 – Параметры измерений эксперимента 1

4. После измерения появится следующее окно:

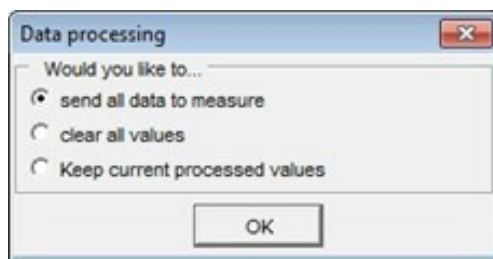


Рис. 1.5 – Окно завершения измерения

Выберите первый пункт и подтвердите, нажав кнопку ОК. Измеренные значения теперь будут передаваться непосредственно в программное обеспечение “measure” (рис. 1.5).

С помощью полученных спектров, выполните следующие задания:

1. Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристаллов LiF и KBr. Представьте полученные данные в виде графика с описанием происходящих процессов.

2. Определите энергетические значения характерных рентгеновских лучей меди и сравните их со значениями, которые были определены на основе соответствующей диаграммы энергетических уровней.

Примечание: с помощью программного обеспечения measure пики в спектре могут быть определены довольно легко. Нажмите кнопку «Маркировка» и выберите область для определения пика . Нажмите на кнопку «Анализ пика» . Появится окно «Анализ пиков». Затем нажмите «Рассчитать». Если вычислены не все желаемые пики (или их слишком много), скорректируйте допустимую погрешность соответствующим образом.

3. Заполните следующую таблицу для двух монокристаллов LiF и KBr:

Таблица 1.1 – Значения энергий характеристических линий меди

Кристалл	Углы скольжения и энергии характерист. линий	n = 1		n = 2		n = 3		n = 4	
		K α	K β	K α	K β	K α	K β	K α	K β
LiF	$\theta, ^\circ$					–	–	–	–
	E, кэВ					–	–	–	–
KBr	$\theta, ^\circ$								
	E, кэВ								

Контрольные вопросы

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое K α и K β переходы?
3. Как устроена рентгеновская трубка?
4. Какова минимальная энергия ионизация K оболочки?
5. Опишите условие Вульфа-Брэгга. Формула и схема.

УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ № 2.

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СИЛЫ ТОКА И АНОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель эксперимента:

Исследовать интенсивность характеристического рентгеновского излучения в зависимости от анодного тока и анодного напряжения.

Задачи учебного эксперимента:

1. Проанализировать интенсивность рентгеновского излучения молибдена в зависимости от угла Брэгга и с помощью монокристалла LiF.
2. Определить интенсивность характеристических рентгеновских линий в зависимости от анодного напряжения и тока.
3. Сравнить результаты эксперимента с результатами, которые можно ожидать теоретически.

Экспериментальное оборудование:

XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ;
XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки;
XR 4.0 X-ray Съёмная рентгеновская трубка Cu tube;
XR 4.0 X-ray Устройства расширения из рентгеновского набора

Теоретическая часть

Электроны, вылетающие с катода, ускоряются по направлению к аноду за счет ускоряющего напряжения U_A между катодом и анодом. Благодаря высокой кинетической энергии электроны способны выбрасывают электроны из внутренних оболочек атомов материала анода. Если это происходит на К-оболочке атомов, электрон с более высокой оболочки, например, L или M оболочки, может занять свободное место, испуская квант рентгеновского излучения. Энергия этого кванта рентгеновского излучения соответствует разнице энергий двух оболочек, участвующих в этом процессе. Поскольку эта разность энергий зависит от атома, результирующее излучение также называется характеристическим рентгеновским излучением. Рентгеновское излучение, которое образу-

ется при переходе от оболочки L к оболочке K, называется $K\alpha$ излучением, в то время как излучение, которое образуется при переходе от оболочки M к оболочке K, называется $K\beta$ излучением.

Интенсивность I_K излучения равна:

$$I_K = B \cdot I_A (U_A - U_K)^{1,5} \quad (2.1)$$

(I_A – анодный ток, U_A – анодное напряжение, $B = \text{const}$ и U_K – потенциал ионизации K – оболочки).

Глубина проникновения ионизирующих электронов в материал анода, а также глубина выхода генерируемых рентгеновских лучей ограничены. Когда они оба достигают своего максимума, соотношение (2.1) теряет силу.

Условие Вульфа – Брэггов определяет направление максимумов дифракции упруго рассеянного на кристалле рентгеновского излучения:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda. \quad (2.2)$$

Если известно межплоскостное расстояние, то длину волны можно определить с помощью Брэгговского угла скольжения. Энергия излучения, получаемая в результате:

$$E = hc/\lambda \quad (2.3)$$

Объединяя (2.2) и (2.3), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} \quad (2.4)$$

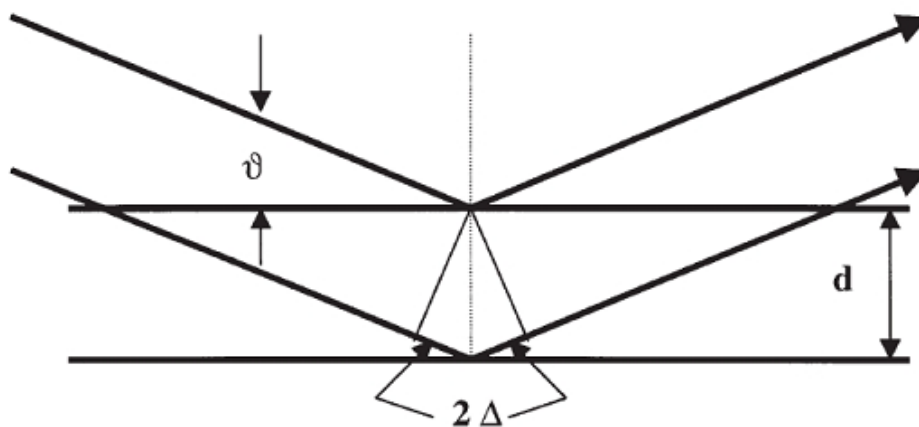


Рис. 2.1 – Схема условия Вульфа-Брэгга

Скорость света $c = 2,9979 \cdot 10^8$ м/с. Межплоскостное расстояние LiF (200) $d = 2,014 \cdot 10^{-10}$ м. Межплоскостное расстояние KBr (200) $d = 3.290 \cdot 10^{-10}$ м. Эквивалент 1 эВ = $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Порядок выполнения работы

Подсоедините гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере. Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем положении с правой стороны. Прикрепите измерительную трубку Гейгера-Мюллера с ее держателем к заднему упору направляющих рельсов. Не забудьте установить мембрану перед ответной трубкой. Вставьте мембранную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока вставного устройства для трубки.

Для калибровки: убедитесь, что в параметрах гониометра указан правильный кристалл. Затем выберите «Меню», «Гониометр», «Автокалибровка». Теперь устройство определяет оптимальное расположение кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем положение пиков.

Подключите рентгеновский аппарат с помощью USB-кабеля к USB-порту вашего компьютера. Запустите программу “measure”. На экране появится виртуальный рентгеновский аппарат. Вы можете управлять рентгеновским аппаратом, щелкая по различным функциям на виртуальном рентгеновском аппарате и под ним. Кроме того, вы также можете изменить параметры в реальном рентгеновском аппарате. Программа автоматически примет настройки.

Щелкните по камере для эксперимента, чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите необходимые параметры для данной лабораторной работы, которые представлены ниже (рис. 2.2). Если вы нажмете на рентгеновскую трубку, вы сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите необходимые параметры. Начните измерение, щелкнув по красному кругу.

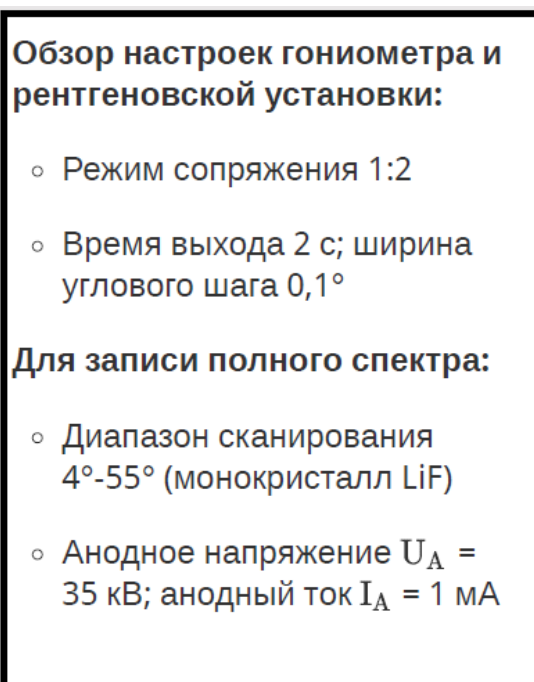


Рис. 2.2 – Параметры измерений эксперимента 2

После измерения появится следующее окно:

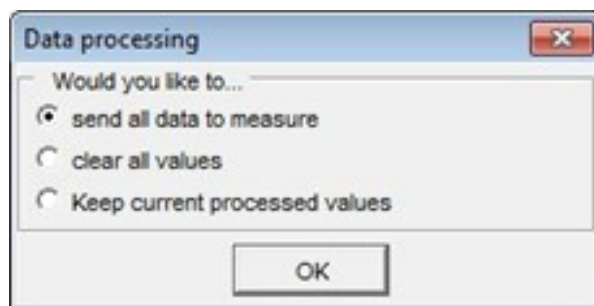


Рис. 2.3 – Окно завершения измерения

Выберите первый пункт и подтвердите, нажав кнопку ОК. Измеренные значения теперь будут передаваться непосредственно в программное обеспечение “measure” (рис. 2.3).

Определите интенсивность характерных рентгеновских линий меди в зависимости от анодного напряжения и тока. Щелкните по камере для эксперимента, чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите диапазон сканирования от 19° до 24°.

Если вы хотите определить зависимость интенсивности от анодного тока, запишите спектр с различными анодными токами. Настройки: $U_A = 35 \text{ кВ} = \text{const}$; $I_A = 11 \text{ кВ} \dots 35 \text{ кВ}$ с шагом 2–3 кВ.

Если вы хотите определить зависимость интенсивности от анодного напряжения, запишите спектр с различными анодными напряжениями. Настройки: $I_A = 1 \text{ мА} = \text{const}$; $U_A = 1 \text{ мА} \dots 0,1 \text{ мА}$ с шагом 0,1 мА.

С помощью полученных спектров, выполните следующие задания:

1. Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга и с помощью монокристалла LiF. На основании полученных данных заполните таблицу.

Таблица 2.1 – Длины волн характеристического рентгеновского излучения

	n = 1		n = 2	
	$\theta/^\circ$	λ/pm	$\theta/^\circ$	λ/pm
Cu (Z=29) $K\alpha$				
Cu (Z=29) $K\beta$				

2. Определите интенсивность характерных рентгеновских линий меди в зависимости от анодного напряжения и тока. Представьте полученные данные в виде графика с описанием происходящих процессов.

3. Сравните результаты эксперимента с результатами, которые можно ожидать теоретически.

Контрольные вопросы

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое K_α и K_β переходы?
3. Как интенсивность зависит от анодного напряжения и силы тока?
4. Какова длина волны у K_α и K_β переходов?
5. Опишите условие Вульфа-Брэгга. Формула и схема.

УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ № 3.

МОНОХРОМАТИЗАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ МЕДИ

Цель эксперимента

Исследовать монохроматическое характеристическое рентгеновское излучение меди.

Задачи учебного эксперимента

1. Проанализировать интенсивность рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристаллов LiF и KBr. Определить энергию характеристических рентгеновских линий.

2. Отфильтровать характеристические линии из полихроматического спектра с помощью монокристалла LiF.

3. Монохроматизировать рентгеновский спектр никелевым фильтром.

Экспериментальное оборудование:

XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ;

XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки;

XR 4.0 X-ray Съёмная рентгеновская трубка Cu tube;

XR 4.0 X-ray Устройства расширения из рентгеновского набора.

Теоретическая часть

Рентгеновские лучи, генерируемые рентгеновской трубкой, являются полихроматическими. Линии, энергия которых зависит не от напряжения на аноде, а от материала анода, накладываются на тормозной спектр. Поскольку эксперименты Дебая-Шеррера, касающиеся кристаллических структур требуют монохроматического рентгеновского излучения, это излучение генерируется путем фильтрации монокристаллами или с помощью металлической фольги.

Анализ полихроматических рентгеновских лучей стал возможен благодаря использованию монокристалла. Когда рентгеновские лучи с определенной длиной волны падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения θ , лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, интерферируют друг с другом при условии, что разность их хода соответствует целому числу,

кратному длине волны. В соответствии с рисунком 3.1 закон Брэгга применим к интерференции:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (3.1)$$

Если известно межплоскостное расстояние, то длину волны можно определить с помощью угла скольжения. Энергия излучения, получаемая в результате:

$$E = hc/\lambda \quad (3.2)$$

Объединяя (3.1) и (3.2), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} \quad (3.4)$$

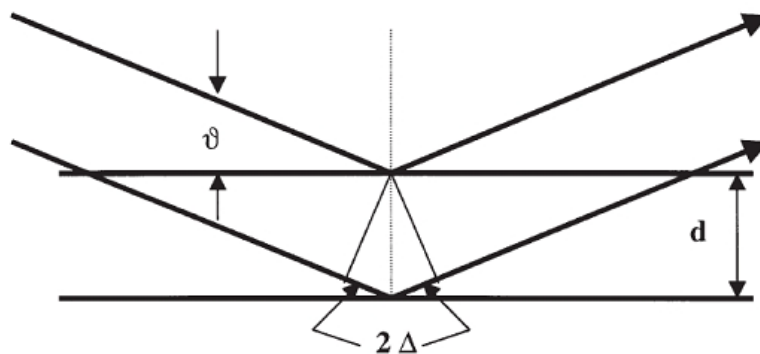


Рис. 3.1 – Схема условия Вульфа-Брэгга

Скорость света $c = 2,9979 \times 10^8$ м/с. Межплоскостное расстояние LiF (200) $d = 2,014 \times 10^{-10}$ м. Межплоскостное расстояние KBr (200) $d = 3.290 \times 10^{-10}$ м. Эквивалент $1 \text{ эВ} = 1,6021 \times 10^{-19}$ Дж.

Порядок выполнения работы

Подсоедините гониометр и измерительную трубку Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере. Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем положении с правой стороны. Прикрепите измерительную трубку Гейгера-Мюллера с ее держателем к заднему упору направляющих рельсов. Не забудьте установить мембрану перед ответной трубкой. Вставьте мембранную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока вставного устройства для трубки.

Для калибровки: убедитесь, что в параметрах гониометра указан правильный кристалл. Затем выберите «Меню», «Гониометр»,

«Автокалибровка». Теперь устройство определяет оптимальное расположение кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем положение пиков.

Подключите рентгеновский аппарат с помощью USB-кабеля к USB-порту вашего компьютера. Запустите программу “measure”. На экране появится виртуальный рентгеновский аппарат. Вы можете управлять рентгеновским аппаратом, щелкая по различным функциям на виртуальном рентгеновском аппарате и под ним. Кроме того, вы также можете изменить параметры в реальном рентгеновском аппарате. Программа автоматически примет настройки.

Щелкните по камере для эксперимента, чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите необходимые параметры для данной лабораторной работы, которые представлены ниже (рис. 3.2). Если вы нажмете на рентгеновскую трубку, то сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите необходимые параметры. Начните измерение.

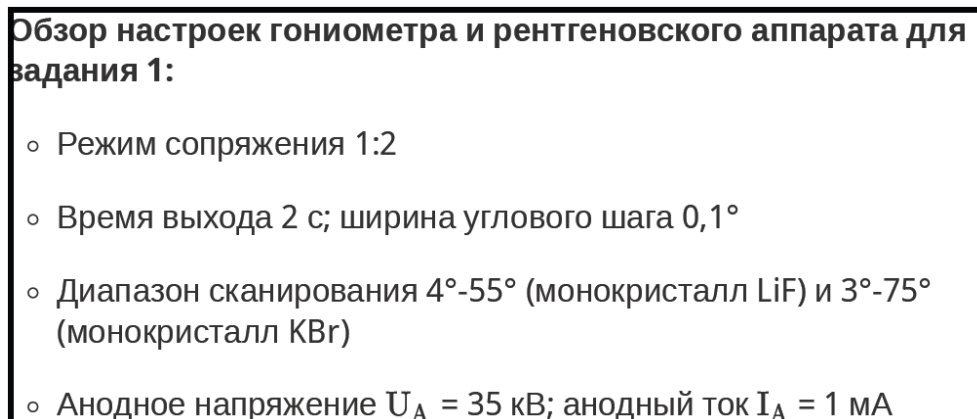


Рис. 3.2 – Параметры измерений эксперимента 3

Если требуется только узкий диапазон полихроматического спектра, настройки установки должны быть изменены следующим образом: Кристалл анализатора устанавливается в положение угла обзора $\theta = 22,6^\circ$ ($n = 1$) фиксированным образом. Детектор Гейгера-Мюллера поворачивается вокруг кристалла анализатора, например, в следующем диапазоне сканирования: начальный угол $20^\circ < 2\theta <$ конечный угол 70° .

Монохроматическое излучение можно получить и с помощью фильтров. Для этого замените трубку диафрагмы на никелевый фильтр и повторите сканирование с параметрами, представленными на рисунке 3.2. После измерения появится следующее окно:

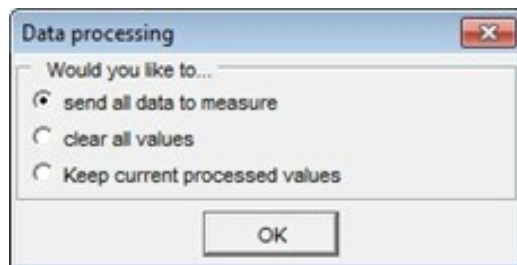


Рис. 3.3 – Окно завершения измерения

Выберите первый пункт и подтвердите, нажав кнопку ОК. Измеренные значения теперь будут передаваться непосредственно в программное обеспечение “measure”. (Рисунок 3.3)

С помощью полученных спектров, выполните следующие задания:

1. Проанализируйте интенсивность рентгеновского излучения меди в зависимости от угла Брэгга с помощью монокристаллов LiF и KBr. Определите энергию характеристических рентгеновских линий.

2. Проведите монохроматизацию $K\alpha$ линии с помощью кристалла LiF. Представьте полученные данные в виде графика с описанием происходящих процессов.

3. Проведите монохроматизацию рентгеновского спектра никелевым фильтром. Представьте полученные данные в виде графика с описанием происходящих процессов.

Контрольные вопросы

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое K_α и K_β переходы?
3. Чем монохроматическое излучение отличается от полихроматического излучения?
4. Почему для монохроматизации K_α линии использовали никель?
5. Опишите условие Вульфа-Брэгга. Формула и схема.

УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ № 4.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ NaCl С РАЗЛИЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ

Цель эксперимента

Проанализировать структуру кристаллов NaCl с различными ориентациями.

Основные задачи учебного эксперимента

1. Определить интенсивность рентгеновских лучей, отражаемых монокристаллами NaCl с ориентациями [100], [110] и [111], как функцию угла Брэгга.

2. Назначить отражения соответствующим плоскостям решетки, которые заданы в виде соответствующих индексов Миллера.

3. Определить постоянную решетки и вычислить межплоскостное расстояние.

Экспериментальное оборудование:

XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ;

XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки;

XR 4.0 X-ray Съёмная рентгеновская трубка Cu tube.

Теоретическая часть

Для описания кристаллографических плоскостей используются индексы Миллера. Для определения индексов Миллера необходимо выполнить ряд действий.

Когда рентгеновские лучи с определенной длиной волны падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения θ , лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, интерферируют друг с другом при условии, что разность их хода соответствует целому числу, кратному длине волны. В соответствии с рисунком 4.1, имеет место закон Брэгга:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (4.1)$$

При анализе кристаллической структуры n часто включается в расстояние между плоскостями решетки. Поэтому данную формулу можно преобразовать в следующую:

$$2d \sin(\theta) = \lambda \quad (4.2)$$

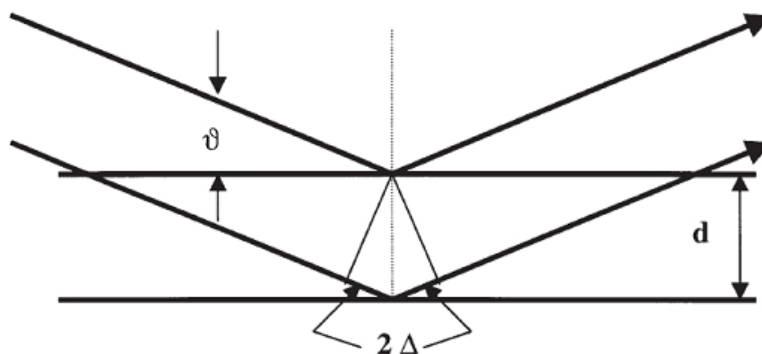


Рис. 4.1 – Схема условия Вульфа-Брэгга

В основном индексы Миллера указывают точки пересечения воображаемого сечения трехмерной элементарной ячейки кристалла. Симметричной фундаментальной единицей кристалла является элементарная ячейка. В кубической кристаллической решетке, как и в случае с кристаллом NaCl, все стороны этой ячейки имеют одинаковую длину. Длина стороны такой ячейки называется постоянной решетки a .

Для определения индексов Миллера обычно строится плоскость до пересечения с кристаллографическими осями координат и определяются отрезки, которые отсекает данная плоскость от осей координат (от начала $0,0,0$). Получаются числа, показывающие расстояние плоскости от осей координат. Далее берутся обратные к этим числам и приводятся к наименьшему целому числу, кратному этим числам. Полученные в итоге числа используются для обозначения плоскости.

Например, на рис. 4.2 плоскость слева отсекает линии a , $2b$ и $3c$ от осей кристаллографической системы координат. Полученные числа $(1,2,3)$ по-другому называют ориентацией данной плоскости. Обратными числами являются $(1, 1/2, 1/3)$. Преобразовав их в целое число, кратное данным числам, получаем индексы Миллера для данной плоскости: (632) . Аналогично, плоскость на рис. 4.2. справа, будет иметь индексы Миллера: (120) .

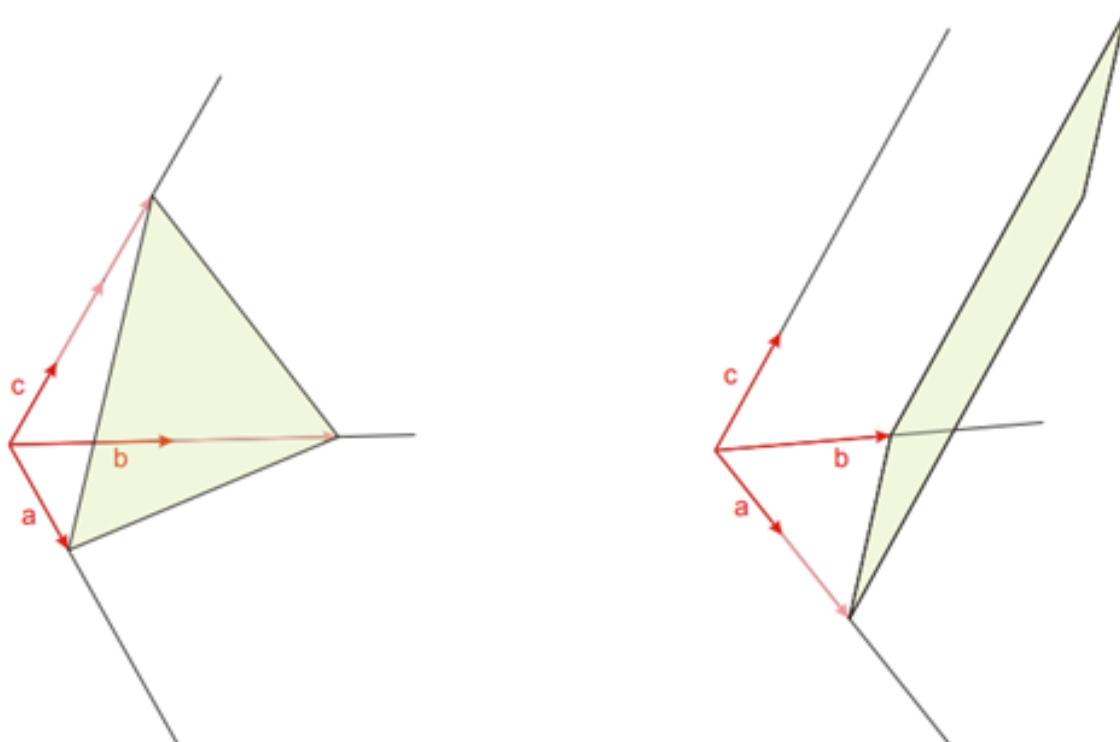


Рис. 4.2 – Схемы для определения индексов Миллера.
Слева: плоскость (632), справа: плоскость (120)

Как показано на рисунках ниже, монокристаллы NaCl имеют гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК).

В кристалле NaCl (100) мы можем взять три «параллельные» плоскости, которые будут необходимы для рассмотрения дифракции рентгеновских лучей (рис. 4.3).

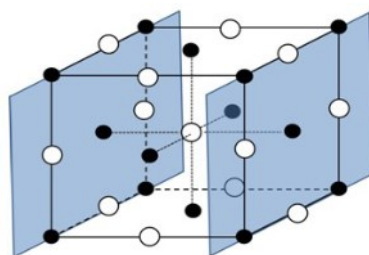


Рис. 4.3 – Плоскость и индексами (100)

В кристалле NaCl (110) будет достаточно взять две «параллельные» плоскости (рис. 4.4).

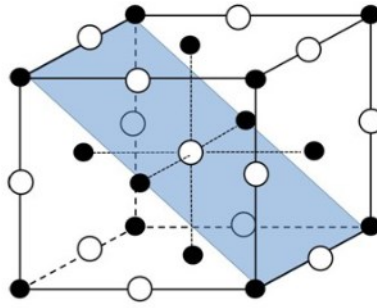


Рис. 4.4 – Плоскость и индексами (110)

Для кристалла NaCl (111) будет достаточно взять две «параллельные» плоскости (рис. 4.5).

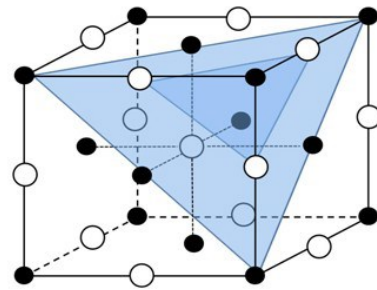


Рис. 4.5 – Плоскость и индексами (111)

Для кубического кристалла с постоянной решетки a плоскости решетки, характеризуемые индексами Миллера (h , k , l), характерны следующие межплоскостные расстояния d :

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (4.3)$$

Подставим 4.3 в 4.2. Получим выражение для нахождения постоянной решетки a :

$$\sin(\theta_{hkl}) = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \cdot \frac{n\lambda}{2a} \quad (4.4)$$

Относительная интенсивность отраженного излучения определяется рассеивающей способностью и положением отдельных атомов в элементарной ячейке кристалла. Она описывается так называемым структурным фактором $F(h,k,l)$:

$$F(h,k,l) = \sum_n f_n \cdot \exp[-2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)] \quad (4.5)$$

В этом уравнении, f_n = атомный форм-фактор (атомный фактор рассеяния), и u_n , v_n и w_n = координаты n -го атома в элементарной ячейке. Полная интенсивность обратно рассеянного луча I равна:

$$I = F \cdot F = |F(h, k, l)|^2 \quad (4.6)$$

В случае плоскостей (000); (011); (101) и (110) из формулы 4.5 следует, что $F = 0$ когда триплет h, k, l содержит четные и нечетные числа, и $F = 4f$, когда все индексы либо четные, либо нечетные. Кроме того, в гранецентрированных кубических кристаллических структурах и в случае плоскостей решетки (100) и (110) отражения плоскостей с нечетными значениями индексов Миллера h, k и l не наблюдаются.

Другими словами, для плоскостей решетки с ориентациями (100) и (110) возможны только четные или только нечетные значения для триплета h, k, l и при этом, для нечетных значений h, k и l на ориентациях (100) и (110) отражений фактически нет.

Порядок выполнения работы

Подсоедините гониометр и измерительную трубку Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере. Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем положении с правой стороны. Прикрепите измерительную трубку Гейгера-Мюллера с ее держателем к заднему упору направляющих рельсов. Не забудьте установить мембрану перед ответной трубкой. Вставьте мембранную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока вставного устройства для трубки.

Для калибровки: убедитесь, что в параметрах гониометра указан правильный кристалл. Затем выберите «Меню», «Гониометр», «Автокалибровка». Теперь устройство определяет оптимальное расположение кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем положение пиков.

Подключите рентгеновский аппарат с помощью USB-кабеля к USB-порту вашего компьютера. Запустите программу “measure”. На экране появится виртуальный рентгеновский аппарат. Вы можете управлять рентгеновским аппаратом, щелкая по различным функциям на виртуальном рентгеновском аппарате и под ним. Кроме того, вы также можете изменить параметры в реальном

рентгеновском аппарате. Программа автоматически примет настройки.

Щелкните по камере для эксперимента, чтобы изменить параметры эксперимента. Выберите необходимые параметры для данной лабораторной работы, которые представлены ниже (рис. 4.6). Если вы нажмете на рентгеновскую трубку, вы сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите необходимые параметры. Начните измерение, щелкнув по красному кругу.

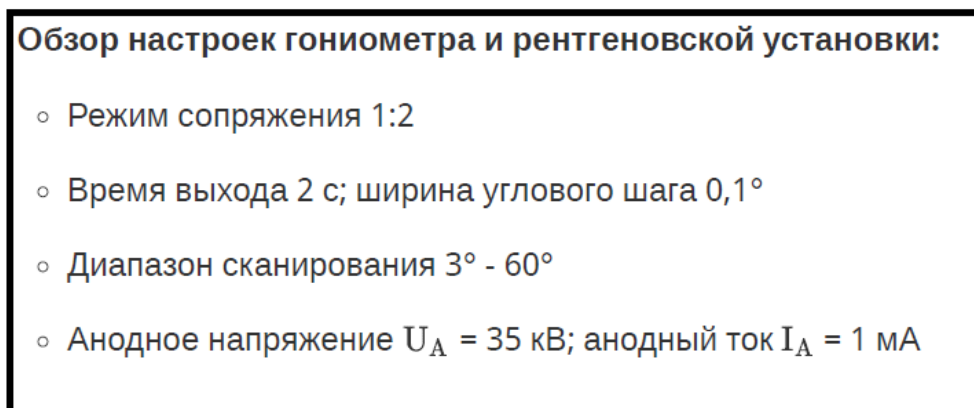


Рис. 4.6 – Параметры измерений эксперимента 4

После измерения появится следующее окно:

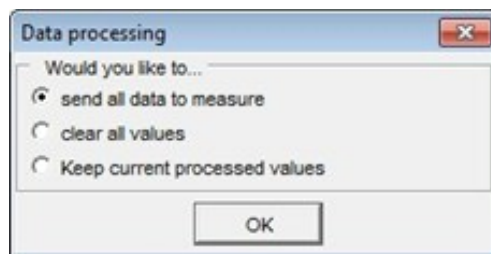


Рис. 4.7 – Окно завершения измерения

Выберите первый пункт и подтвердите, нажав кнопку ОК. Измеренные значения теперь будут передаваться непосредственно в программное обеспечение “measure” (рис. 4.7).

С помощью полученных спектров, выполните следующие задания:

1. Присвойте отражения соответствующим плоскостям решетки, которые задаются через соответствующие индексы Миллера.

2. На основании ваших расчетов заполните таблицы 4.1–4.3.

3. Определите постоянную решетки и вычислите межплоскостное расстояние. На основании полученных данных заполните таблицу 4.4 и сравните полученные данные с табличными значениями. Табличное значение $a = 564$ пм. Табличные значения: $d(200) = 282.0$ пм, $d(220) = 199.4$ пм, и $d(111) = 325.6$ пм.

Таблица 4.1 – Индексы Миллера для плоскости (100)

	Плоскость 1	Плоскость 2	Плоскость 3
Расстояния от осей координат (координаты)	ох: оу: оз:	ох: оу: оз:	ох: оу: оз:
Обратные значения			
Индексы Миллера			

Таблица 4.2 – Индексы Миллера для плоскости (110)

	Плоскость 1	Плоскость 2
Расстояния от осей координат	ох: оу: оз:	ох: оу: оз:
Обратные значения		
Индексы Миллера		

Таблица 4.3 – Индексы Миллера для плоскости (111)

	Плоскость 1	Плоскость 2
Расстояния от осей координат	ох: оу: оз:	ох: оу: оз:
Обратные значения		
Индексы Миллера		

Таблица 4.4 – Таблица значений полученных
в результате измерений

n	$\theta(K\alpha)$	$\theta(K\beta)$	(h, k, l)	$h^2 + k^2 + l^2$	a, пм (K α)	a, пм (K β)	a _{ср} , пм	d, пм
	Кристалл (100)							
1								
2								
3								
	Кристалл (110)							
1								
2								
	Кристалл (111)							
1								
2								
$\lambda_{K\alpha} = 154,4$ пм; $\lambda_{K\beta} = 139,2$ пм; Табличное a = 564 пм								

Контрольные вопросы

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое индексы Миллера?
3. Что означает термин ГЦК?
4. Почему на некоторых плоскостях не наблюдается отражение рентгеновских лучей?
5. Опишите условие Вульфа-Брэгга. Формула и схема.

УЧЕБНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ № 5. ЗАКОН СМЕЩЕНИЯ ДУЭЙНА-ХАНТА И КВАНТ ДЕЙСТВИЯ ПЛАНКА

Цель эксперимента

Пронаблюдать закон смещения Дуэйна-Ханта и определить коротковолновую границу тормозного спектра медного анода.

Задачи учебного эксперимента

1. Определить коротковолновую границу тормозного спектра рентгеновского излучения.

2. Используя полученные результаты, проверить закон смещения Дуэйна-Ханта и определить «квант действия» Планка.

Экспериментальное оборудование:

XR 4.0 X-ray Базовая рентгеновская установка, 35 кВ;

XR 4.0 X-ray Гониометр для рентгеновской установки;

XR 4.0 X-ray Съёмная рентгеновская трубка Cu tube;

Теоретическая часть

Благодаря напряжению U_A между электродом и катодом электроны ускоряются от катода к аноду. На катоде электроны обладают энергией:

$$E_{kin} = eU_A \quad (5.1)$$

Из-за взаимодействий с атомами материала анода электроны постепенно теряют свою кинетическую энергию, которая преобразуется в непрерывный рентгеновский спектр (тормозной спектр). Если кинетическая энергия теряется на одном этапе, генерируются рентгеновские лучи с максимальной энергией (минимальной длиной волны). В 1915 году американские физики Дуэйн и Хант обнаружили, что произведение ускоряющего напряжения и минимальной длины волны является постоянным:

$$U_A \lambda_{min} = 1,25 * 10^{-6} \text{ В} \times \text{м} \quad (5.2)$$

Уравнение для кинетической энергии:

$$E_{kin} = eU_A = hf_{max} = h \frac{c}{\lambda_{min}} \quad (5.3)$$

Уравнения (5.2) и (5.3) приводят к формуле для минимальной длины волны рентгеновского излучения:

$$\lambda_{min} = 1,2398 * 10^{-6} \frac{1}{U_A} \quad (5.4)$$

Когда рентгеновские лучи с определенной длиной волны падают на плоскости решетки монокристалла под углом скольжения θ , лучи, которые отражаются от плоскостей решетки, интерферируют друг с другом при условии, что разность их хода соответствует целому числу, кратному длине волны. В соответствии с рисунком 5.1, имеет место закон:

$$2d \sin(\theta) = n\lambda \quad (5.5)$$

Если известно межплоскостное расстояние, то длину волны можно определить с помощью угла скольжения. Энергия излучения, получаемая в результате:

$$E = hc/\lambda_{min} \quad (5.6)$$

Объединяя (5.5) и (5.6), получаем:

$$E = \frac{n \cdot h \cdot c}{2d \cdot \sin(\theta)} \quad (5.7)$$

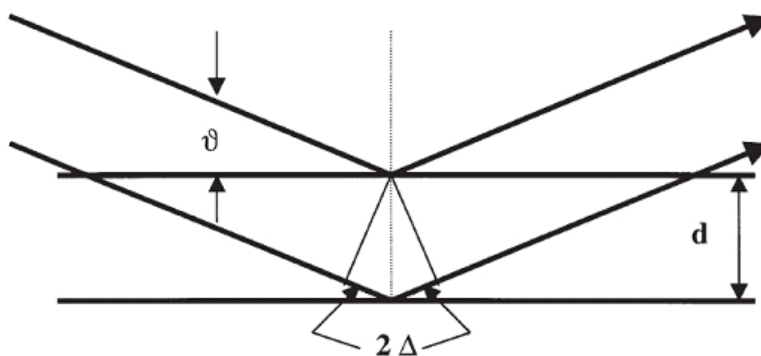


Рис. 5.1 – Схема условия Вульфа-Брэгга

Скорость света $c = 2,9979 \times 10^8$ м/с. Межплоскостное расстояние LiF (200) $d = 2,014 \times 10^{-10}$ м. Межплоскостное расстояние KBr (200) $d = 3.290 \times 10^{-10}$ м. Вспоминаем, что $1 \text{ эВ} = 1,6021 \times 10^{-19}$ Дж. Постоянная Планка $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ Дж $\times$ с. Скорость света: $c = 2,9979 \times 10^8$ м/с.

Порядок проведения работы

Подсоедините гониометр и счетчик Гейгера-Мюллера к соответствующим гнездам в экспериментальной камере. Блок гониометра с кристаллом анализатора должен располагаться в крайнем

положении с правой стороны. Прикрепите счетчик Гейгера-Мюллера с его держателем к заднему упору направляющих рельсов. Не забудьте установить мембрану перед ответной трубкой. Вставьте мембранную трубку диаметром 2 мм в выходное отверстие блока вставного устройства для трубки.

Для калибровки: убедитесь, что в параметрах гониометра указан правильный кристалл. Затем выберите «Меню», «Гониометр», «Автокалибровка». Теперь устройство определяет оптимальное расположение кристалла и гониометра относительно друг друга, а затем положение пиков.

Подключите рентгеновский аппарат с помощью USB-кабеля к USB-порту вашего компьютера и запустите программу “measure”. Щелкните по камере для эксперимента, чтобы изменить параметры эксперимента. Сперва запишите полный спектр рентгеновского излучения. Затем выберите необходимые параметры для данной лабораторной работы, которые представлены ниже (рис. 5.2). Если вы нажмете на рентгеновскую трубку, вы сможете изменить напряжение и ток рентгеновской трубки. Выберите необходимые параметры. Начните измерение, щелкнув по красному кругу.

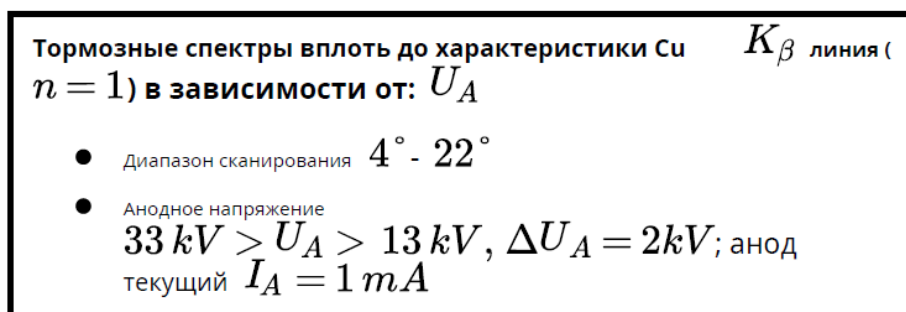


Рис. 5.2 – Параметры измерений в эксперименте

После измерения появится следующее окно:

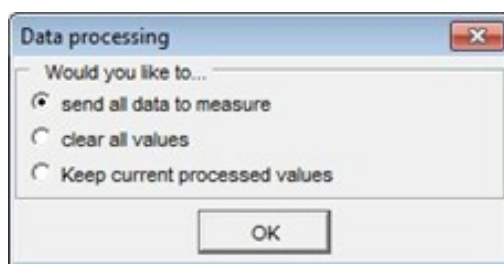


Рис. 5.3 – Окно завершения измерения

Выберите третий пункт и подтвердите, нажав кнопку ОК. Затем измените анодное напряжение и запишите все спектры. При записи последнего спектра выберете первый пункт. Измеренные значения теперь будут передаваться непосредственно в программное обеспечение “measure” (рис. 5.3).

С помощью полученных спектров, выполните следующие задания:

1. Запишите спектр рентгеновского излучения, испускаемого медным анодом при различных напряжениях на аноде, в зависимости от угла Брэгга и с помощью монокристалла LiF в качестве анализатора. Заполните таблицу.

Таблица 5.1 – Таблица значений $\lambda_{\min}$, полученных в результате измерений

U_a , кВ	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33
$\lambda_{\min}$, пм											

2. Определите коротковолновую границу ($\lambda_{\min}$) тормозного спектра.

3. Постройте график функций $\lambda_{\min} = f(1/U_A)$ и $\sin\theta_{\min} = f(1/U_A)$. Вычислите планковский квант действия. С помощью программы вычислите величину градиента «m». Данная величина равна отношению $(\lambda_{\min})/(1/U_A)$ или же $(\sin\theta_{\min})/(1/U_A)$. Зная значение данной величины, можно найти квант действия Планка. Воспользуйтесь формулами 5.3 и 5.5.

Контрольные вопросы

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое постоянная Планка?
3. Что означает коротковолновая граница рентгеновского излучения?
4. Какова зависимость между интенсивностью и анодным напряжением?
5. Опишите условие Вульфа-Брэгга. Формула и схема.

ОБОБЩЕННЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое рентгеновское излучение?
2. Что такое $K\alpha$ и $K\beta$ переходы?
3. Как устроена рентгеновская трубка?
4. Какова минимальная энергия ионизация K оболочки?
5. Опишите условие Вульфа-Брэгга. Формула и схема.
6. Как интенсивность характеристических линий зависит от анодного напряжения и силы тока?
7. Какова длина волны у $K\alpha$ и $K\beta$ переходов?
8. Чем монохроматическое излучение отличается от полихроматического излучения?
9. Почему для монохроматизации $K\alpha$ линии нужно использовать никель?
10. Что такое индексы Миллера?
11. Что означает термин ГЦК?
12. Почему на некоторых плоскостях не наблюдается отражение рентгеновских лучей?
13. Что такое постоянная Планка?
14. Что означает коротковолновая граница рентгеновского излучения?
15. Какова зависимость между интенсивностью и анодным напряжением?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батулин Р.Г. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ. (Методическое пособие к лабораторному практикуму «Специальный физический практикум» для студентов на дистанционном обучении) / Р.Г. Батулин, А.Г. Киямов, О.В. Недопекин, И.В. Романова, Ф.М. Сираев. – Казань: К(П)ФУ, – 2021. – 185 с.

2. Богдан Т.В. Основы рентгеновской дифрактометрии: учебно-методическое пособие к общему курсу «Кристаллохимия» / Т.В. Богдан. – Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Хим. фак., 2012. – 64 с.

3. Глазков В.Н. Структура и колебания кристаллических решёток: заметки к лекциям по общей физике: лекция 1 / В.Н. Глазков. – Москва, 2018. – 36 с.

4. Глушкова Т.М. Дифракция рентгеновских лучей на монокристаллах / Т.М. Глушкова. – М.: ООП Физ. факультета МГУ, 2005. – 22 с.

5. Петрушанский М.Г. Основы физики ионизирующих излучений: учебное пособие / М.Г. Петрушанский. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. – 129 с.

6. Романова И.В., Русанова И.А., Семакин А.С., Храмов А.С. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом. Рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ. Учебно-методическое пособие для студентов Института физики / И.В. Романова, И.А. Русанова, А.С. Семакин, А.С. Храмов. – Казань: К(П)ФУ, 2019. – 149 с.

7. Суворов Э.В. Методы исследования реальной структуры и состава материалов: Учебно-методический комплекс дисциплины / Э.В. Суворов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 163 с.

8. Трушин В.Н. Рентгеновский фазовый анализ поликристаллических материалов: электронное учебно-методическое пособие / В.Н. Трушин, П.В. Андреев, М.А. Фаддеев – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 89 с.

9. Фаддеев М.А. Методы атомной физики в исследовании твердотельных структур Учебно-методические материалы по программе повышения квалификации «Современные методы исследования новых материалов электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем» / М.А. Фаддеев, Е.В. Чупрунов. – Нижний Новгород: ННГУ, 2006. – 219 с.

10. Чижов П. Приборы и методы рентгеновской и электронной дифракции [Текст] / П. Чижов, Э. Левин, А. Митяев, А. Тимофеев. – Москва: Московский физико-технический институт, 2011. – 152 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Установка RHYWE XR 4.0 X-Ray. Описание и функции.....	5
Учебный эксперимент № 1. «Характеристическое рентгеновское излучение меди»	10
Учебный эксперимент № 2. «Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от силы тока и анодного напряжения»	16
Учебный эксперимент № 3. «Монохроматизация рентгеновских лучей меди»	21
Учебный эксперимент № 4. «Изучение структуры монокристаллов NaCl с различной ориентацией»	25
Учебный эксперимент № 5. «Закон смещения Дуэйна-Ханта и квант действия Планка»	33
Обобщенные контрольные вопросы	37
Список литературы	38