

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А. М. ГОРЬКОГО

**Физпрактикум
в рентгеновской лаборатории**

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ВЕЩЕСТВОМ**

**Методическое руководство
по выполнению лабораторных работ**



Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2004

Методическое руководство подготовлено
кафедрой физики конденсированного состояния

Утверждено
учебно-методической комиссией
физического факультета
22 октября 2003 г.

Составители: В. Г. Плещев,
В. М. Антропов,
И. В. Алексина

Руководство предназначено для студентов III курса физического факультета при выполнении лабораторных работ общего физического практикума в рентгеновской лаборатории и преследует следующие цели:

1. Изучение физических процессов взаимодействия электромагнитного излучения рентгеновского диапазона с атомами, входящими в состав конденсированного вещества.

2. Изучение влияния электронного строения атомов на процессы истинного поглощения рентгеновского излучения; определение энергетических характеристик электронной оболочки атомов.

3. Овладение практическими навыками проведения эксперимента и компьютерной обработки полученных результатов.

Методическое руководство включает в себя краткую теорию, условия проведения эксперимента и описание трех лабораторных работ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Физические процессы при прохождении рентгеновских лучей через вещество

Рентгеновские лучи поглощаются в той или иной степени всеми веществами, через которые они проходят. Доля энергии лучей, поглощенных веществом, зависит от толщины поглощающего слоя, природы вещества и длины волны рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи теряют при прохождении через вещество часть своей энергии вследствие нескольких процессов: превращения энергии фотонов в другие виды энергии, которое получило название истинного поглощения, и изменения направления их распространения, т. е. рассеяния. При просвечивании материалов коротковолновым рентгеновским излучением (с энергией $E \gg 1,022$ Мэв) наблюдается эффект образования пар (электрон + позитрон). Часть энергии передается кристаллической решетке, вследствие чего просвечиваемое тело при прохождении через него рентгеновских лучей нагревается.

Как показали исследования, все эффекты, наблюдаемые при прохождении рентгеновских лучей с энергией до 1,022 Мэв, обусловлены процессами истинного поглощения и рассеяния, которые приводят к уменьшению интенсивности проходящего через вещество излучения.

Коэффициент ослабления рентгеновских лучей

Закон ослабления интенсивности рентгеновских лучей в веществе может быть получен при предположении, что доля энергии рентгеновских лучей, поглощенной при их прохождении через достаточно тонкий слой вещества, пропорциональна толщине этого слоя. Коэффициентом пропорциональности при этом является так называемый *коэффициент ослабления*, зависящий от атомного номера вещества Z и длины волны излучения λ .

Для вывода закона ослабления представим, что пучок монохроматического излучения с длиной волны λ и интенсивностью I_0 проходит через пластинку толщиной d . Выделим внутри пластинки достаточно тонкий слой толщины dx , в котором ослабление можно было бы считать пропорциональным толщине этого слоя. Тогда относительное ослабление интенсивности лучей в выделенном слое определится уравнением

$$dI/I_0 = -\mu dx, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность лучей на границе выделенного слоя. Знак минус в правой части уравнения указывает на то, что интенсивность лучей, прошедших через слой вещества dx , убывает. Интегрируя уравнение (1), получаем

$$\ln I = -\mu x + C. \quad (2)$$

Определим постоянную интегрирования: при $x = 0$ $I = I_0$, отсюда $\ln I_0 = C$. Тогда $\ln I - \ln I_0 = -\mu x$. Итак, окончательно

$$I = I_0 \exp(-\mu x). \quad (3)$$

Коэффициент μ называют *линейным коэффициентом ослабления*. Его величина зависит от атомного номера поглощающего вещества и длины волны рентгеновского излучения. Из формулы (3) можно определить размерность линейного коэффициента ослабления $[\mu] = L^{-1}$. Из этой же формулы следует физический смысл μ : линейный коэффициент ослабления характеризует относительное уменьшение интенсивности луча при прохождении слоя поглотителя единичной толщины.

Рассмотрим пучок рентгеновских лучей сечением 1 см^2 . Энергия такого пучка численно равна интенсивности I . Найдем ослабление пучка сечением в 1 см^2 при прохождении массы вещества в 1 г. Если ρ – плотность вещества, то на пути dx находится масса $dm = \rho dx$. Относительное изменение интенсивности пучка при прохождении пути dx , т. е. через массу dm , будет пропорционально этой массе:

$$dI/I = -\mu_m dm = -\mu_m \rho dx, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности μ_m называется *массовым коэффициентом ослабления*. Сравнивая это выражение с выраже-

нием (1) находим, что $\mu_m = \mu/\rho$. Размерность массового коэффициента ослабления в этом случае $[\mu_m] = \text{см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Массовый коэффициент ослабления характеризует уменьшение интенсивности рентгеновских лучей в единице массы вещества, а произведение ρdx представляет собой поверхностную плотность вещества. Использование величины поверхностной плотности при проведении эксперимента позволяет исключить существенную погрешность, возникающую при измерении толщины тонких поглотителей. В случае необходимости линейный коэффициент ослабления находится умножением μ_m на экспериментально найденную величину плотности вещества при температуре опыта.

Введение массовых коэффициентов оказывается удобным, так как характерной особенностью их является независимость от агрегатного состояния вещества. Так, например, μ_m имеет одинаковое значение для воды, водяного пара и льда. Кроме того, отпадает необходимость в определении коэффициентов ослабления для всего множества различных веществ. Это возможно потому, что поглощение и рассеяние осуществляется в основном внутренними электронами атомов, состояние которых не зависит от того, в состав какого вещества входит атом того или иного элемента. По этой причине в справочных таблицах обычно приводятся значения массовых коэффициентов ослабления μ_m для атомов различных элементов и для различных длин волн рентгеновских лучей.

Результат взаимодействия электромагнитного излучения с веществом может характеризоваться также *слоем половинного ослабления*, представляющим собой толщину слоя Δ , при прохождении которого интенсивность лучей ослабляется в два раза, т. е. $I = I_0/2$. Из уравнения (3) находим

$$\Delta = \ln 2 / \mu = 0,693 / \mu. \quad (5)$$

Толщина слоя половинного ослабления убывает с возрастанием длины волны излучения.

Рассмотрим теперь более подробно основные физические процессы, происходящие при прохождении рентгеновских лучей через вещество.

Рассеяние рентгеновских лучей

Исследование распределения интенсивности рентгеновских лучей вокруг просвечиваемого слоя материала показывает, что помимо ослабленного луча, совпадающего по направлению с падающим, из просвечиваемого объекта исходят лучи, не совпадающие по направлению с этим лучом. Такое излучение называют *рассеянным излучением*. При взаимодействии электронов внешних электронных оболочек с электромагнитной волной каждый из них становится источником вторичных волн, распространяющихся в разных направлениях. В случае когда энергия кванта рентгеновского излучения недостаточна, чтобы вырвать электрон из какой-либо оболочки, рентгеновские лучи меняют направление распространения без изменения энергии кванта, а следовательно, и длины волны излучения. Такой вид рассеяния называется *когерентным*. Если энергия кванта будет больше, чем энергия связи электрона на той или иной оболочке, электрон будет удален со своего уровня, а энергия кванта уменьшится, что соответствует увеличению длины излучения. Такое рассеяние называется *некогерентным*, или *комптоновским*, рассеянием. Получившие импульс электроны называются электронами отдачи. В этом случае в рассеянных лучах может наблюдаться вторичное характеристическое излучение, вызванное межуровневыми переходами в атомах просвечиваемого материала. Когерентное рассеяние преобладает обычно при больших длинах волн ($\lambda > 0,2 \text{ \AA}$). Оба типа рассеяния характеризуются соответственно *линейными* (σ_k и $\sigma_{нк}$) или *массовыми* (σ_k/ρ и $\sigma_{нк}/\rho$) *коэффициентами рассеяния*.

Механизм когерентного рассеяния, протекающего по законам классической электродинамики, состоит в том, что переменное электромагнитное поле излучения приводит в колебательное движение электроны атомов вещества. Эти электроны в свою очередь становятся источниками вторичных волн той же частоты, что и падающие, распространяющихся в разных направлениях. Коэффициент рассеяния одного электрона определяется как отношение интенсивности рассеянного им излучения к интенсивности падающих лучей и в соответствии с теорией рассеяния рентгеновских лучей равен

$$\sigma_e = (8\pi e^4) / (3m^2 c^4). \quad (6)$$

Так как каждый атом содержит Z электронов, то, предполагая, что рассеяние каждым электроном происходит независимо от остальных, можно считать, что интенсивность рассеяния, производимого атомом, равна сумме интенсивностей рассеяния всех его электронов. Тогда интенсивность лучей, рассеянных единичным атомом элемента с порядковым номером Z , будет равна

$$I_r = 8\pi e^4 Z I_0 / 3m^2 c^4 = 6,6 \cdot 10^{-25} Z I_0, \quad (7)$$

где e и m – заряд и масса электрона; c – скорость света в вакууме; I_0 – интенсивность падающих лучей.

Атомный коэффициент рассеяния равен

$$\sigma_a = Z(8\pi e^4)/(3m^2 c^4). \quad (8)$$

Если в 1 см^3 вещества содержится n атомов, то линейный коэффициент рассеяния будет равен

$$\sigma = Zn(8\pi e^4)/(3m^2 c^4). \quad (9)$$

Для массового коэффициента рассеяния получаем

$$\sigma_m = \sigma/\rho = \sigma_e Z(n/\rho). \quad (10)$$

Так как $n/\rho = N_A/A$, где N_A – число Авогадро, A – относительная атомная масса, то с учетом (6) и (10) получим:

$$\sigma_m = \sigma_e N_A (Z/A) = (8\pi/3)[N_A e^4/(m^2 c^4)](Z/A). \quad (11)$$

Учитывая, что для большинства элементов $Z \approx A/2$, получаем, что $\sigma_m \approx 0,2$. Этот расчет показывает, что один грамм любого вещества рассеивает примерно одну и ту же долю энергии рентгеновских лучей, падающих на вещество. Для химических соединений $\sigma_m = 0,402 (\Sigma Z/M)$, где ΣZ – сумма атомных номеров элементов, входящих в состав соединения, M – молярная масса соединения.

Истинное атомное поглощение

Помимо рассеяния интенсивность прошедших через поглотитель рентгеновских лучей уменьшается в большей степени вследствие поглощения их энергии в результате взаимодействия с внутренними электронными оболочками атомов. Этот процесс характери-

зуется также *линейным* (τ) или *массовым* (τ/ρ) *коэффициентами поглощения*.

Известно, что электроны занимают в атоме различные энергетические уровни K, L, M и т. д. Зависимость коэффициента истинного атомного поглощения от длины волны имеет немонотонный вид и характеризуется скачками поглощения при определенных длинах волн ($\lambda_{кр}$). По мере уменьшения длины волны сначала наблюдается постепенное уменьшение коэффициента поглощения, но при достижении определенной длины волны, например λ_M , возникает резкий скачок τ/ρ . Появление скачка обусловлено тем, что энергия квантов рентгеновского излучения становится достаточной для возбуждения электронов с определенного энергетического уровня (в данном случае M -уровня) на уровни с большей энергией. При этом, как уже указывалось в предыдущем разделе, возможно появление линий вторичного характеристического излучения, связанного с квантовыми переходами электронов в этих атомах на освободившийся внутренний M -уровень (*резонансная флюоресценция*). При дальнейшем уменьшении длины волны падающего излучения наблюдается еще несколько скачков τ/ρ , каждый из которых связан с ионизацией других, более глубоко лежащих атомных уровней. Так происходит вплоть до ионизации самого внутреннего, K -уровня. Как видно, процессы возбуждения характеристического спектра в рентгеновской трубке и поглощения рентгеновских лучей веществом подобны друг другу, только в первом случае электроны атомов анода взаимодействуют с электронами, бомбардируемыми анод, а во втором – с квантами излучения. В интервале между двумя соседними скачками при уменьшении длины волны коэффициент τ/ρ быстро снижается, примерно как $\tau/\rho \sim \lambda^3$. В то же время при определенной длине волны коэффициент истинного поглощения быстро возрастает при увеличении атомного номера поглощающего вещества. Так как при увеличении атомного номера элементов увеличивается и энергия связи электронов внутренних электронных оболочек, то скачки поглощения (K, L, M и т. д.), соответствующие различным электронным возбуждениям, смещаются в область более коротких длин волн.

Рассмотрим в качестве примера особенности поглощения излучения K -серии веществами, различающимися порядковым но-

мером атомов. Если порядковый номер атомов в поглотителе ($Z_{\text{обр}}$) немного превышает или равен порядковому номеру вещества анода трубки (Z_a), то коэффициенты поглощения линий K_α и K_β мало отличаются друг от друга и сравнительно невелики (рис. 1, а). Если $Z_{\text{обр}}$ становится меньше Z_a , то край поглощения сдвигается в сторону больших длин волн и резкое увеличение коэффициента поглощения сначала будет испытывать K_β -линия, если $Z_{\text{обр}} = Z_a - 1$, (рис. 1, б), а затем и обе линии окажутся в области сильного поглощения, сопровождаемого интенсивной флюоресценцией (рис. 1, в). Последнее обстоятельство может существенно повлиять на результаты экспериментов, проводимых в области скачков поглощения, вследствие дополнительной регистрации вторичного характеристического излучения.

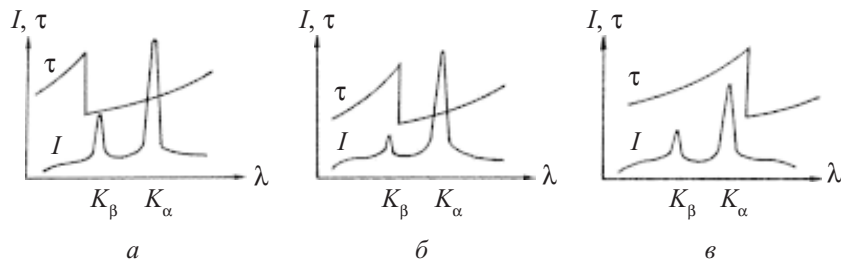


Рис. 1. Изменение положения K -края поглощения при изменении атомного номера поглощающего вещества

При $\lambda < \lambda_K$ полное значение коэффициента поглощения можно представить в виде суммы коэффициентов поглощения, отвечающих различным скачкам:

$$\tau/\rho = (\tau/\rho)_K + (\tau/\rho)_{L_I} + (\tau/\rho)_{L_{II}} + (\tau/\rho)_M + \dots \quad (12)$$

Таким образом, суть истинного поглощения состоит в том, что часть энергии излучения расходуется на ионизацию и возбуждение атомов, в результате чего интенсивность прошедшего через поглотитель излучения уменьшается. Рентгеновские спектры поглощения, в отличие от оптических, не являются линейчатыми: они имеют вид широких полос с резкими краями, отвечающими скачкам поглощения. Процесс поглощения в первом приближении,

как уже отмечалось выше, не зависит от способа соединения атомов, т. е. от того, в каком химическом соединении они находятся, а определяется их индивидуальными свойствами. Поэтому массовый коэффициент поглощения сложного вещества определяется суммой вкладов всех элементов, образующих это вещество:

$$\tau/\rho = \Sigma(\tau/\rho)_i x_i, \quad (13)$$

x_i – массовая доля i -го элемента в облучаемом веществе.

Изложенный выше материал показывает, что в общем случае массовый коэффициент ослабления может быть представлен суммой следующих вкладов:

$$\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_k/\rho + \sigma_{\text{нк}}/\rho. \quad (14)$$

Относительная роль рассеяния и поглощения в ослаблении рентгеновских лучей различна при различных длинах волн. При длинах волн $\lambda \geq 1 \text{ \AA}$ коэффициент рассеяния для большей части элементов практически одинаков (см. с. 8), в то время как коэффициент поглощения сильно зависит от химического состава и длины волны излучения. Поэтому для указанных условий можно считать, что все ослабление рентгеновских лучей вызвано истинным поглощением. В настоящей работе при использовании достаточно больших длин волн рассеянием рентгеновских лучей можно пренебречь и экспериментальные данные следует относить лишь к особенностям истинного поглощения.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Выполнение экспериментальной части работ проводится с использованием рентгеновского дифрактометра ДРФ-2.0, который служит источником высокого напряжения до 30 кВ и обеспечивает анодный ток рентгеновской трубки до 20 мА.

На рис. 2 показана принципиальная схема проведения эксперимента.

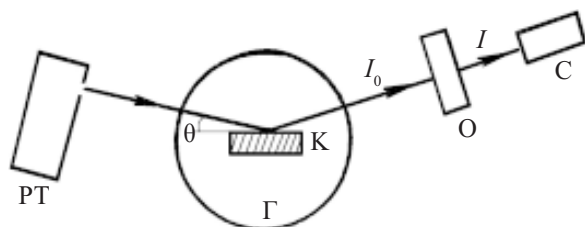


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения коэффициентов ослабления рентгеновских лучей

Источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка (РТ) с медным анодом. Спектральный состав излучения соответствует K -серии характеристического спектра анода ($\lambda_{K\alpha} = 1,5418 \text{ \AA}$, $\lambda_{K\beta} = 1,3922 \text{ \AA}$). Излучение трубки направляется на поверхность кристалла-монохроматора (К), установленного в центре гониометра (Г), который может поворачиваться вокруг своей оси. Отраженный от монохроматора луч попадает на образец (О) исследуемого вещества. После прохождения через образец, рентгеновский луч попадает в счетчик (С), служащий для измерения интенсивности излучения.

Обеспечение монохроматизации излучения

Рентгеновское излучение, испускаемое рентгеновской трубкой, имеет сложный состав, включающий сплошной и характеристический спектр с разными длинами волн.

Для выполнения данной работы, чтобы исключить неопределенность, связанную с зависимостью коэффициентов поглощения от длины волны, необходимо использовать монохроматическое излучение. Монохроматизация излучения достигается использованием кристалла-монохроматора, настроенного на отражение определенной длины волны λ в спектре испускания рентгеновской трубки. Зная межплоскостное расстояние (d) используемого для отражения семейства плоскостей, по формуле

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (15)$$

можно определить необходимый угол θ падения рентгеновских лучей на кристалл-монохроматор. Однако и в этом случае излучение может не быть монохроматическим. Действительно, если условие Вульфа – Брегга выполняется для длины волны λ при $n = 1$, то оно будет выполняться и для более коротких длин волн ($\lambda/2$ при $n = 2$, $\lambda/3$ при $n = 3$ и т. д.), которые могут содержаться в непрерывном спектре излучения рентгеновской трубки. Чтобы исключить появление более коротких, чем основная, длин волн, выбирают такое напряжение на трубке, при котором коротковолновая граница спектра будет больше, чем $\lambda/2$. Из физики рентгеновских лучей известно, что минимальная длина волны непрерывного спектра зависит только от значения ускоряющего напряжения и определяется выражением

$$\lambda_{\min} = hc/eU = 12,4/U, \text{ \AA}, \quad (16)$$

где U – напряжение на рентгеновской трубке, выраженное в киловольтах.

Регистрация интенсивности рентгеновского излучения

Для определения коэффициентов поглощения исследуемого вещества необходимо предварительно произвести измерение интенсивности первичного пучка после отражения от кристалла-монохроматора, а затем измерить интенсивность после прохождения лучей через слой исследуемого вещества. Измерение интенсивности производится с помощью сцинтилляционного счетчика,

действие которого основано на том, что при попадании квантов рентгеновского излучения на чувствительный элемент (кристалл NaI + Tl) в нем возникают вспышки (сцинтилляции), количество и интенсивность которых определяются величиной потока квантов и их энергией. Далее эти вспышки с помощью фотоумножителя преобразуются в электрический сигнал и после усиления регистрируются специальными устройствами. Таким образом, мерой интенсивности рентгеновского излучения может служить скорость счета N , получаемая как отношение n/t , где t – время измерения, n – общее число импульсов, зарегистрированных за промежуток времени t .

Однако время, в течение которого счетчик находится в рабочем состоянии, не соответствует времени измерений. После регистрации очередного кванта счетчик еще некоторое время остается в возбужденном состоянии и не способен регистрировать последующий квант. Это время называется «мертвым временем» счетчика τ , которое в данном случае составляет 10^{-5} с. При скорости счета N незарегистрированными остается τN импульсов. Тогда истинная скорость счета будет равна

$$N_{\text{ист}} = (n + \tau N)/t. \quad (17)$$

При оценке погрешностей измерения интенсивностей следует иметь в виду, что каждый акт поглощения кванта является случайным событием, поэтому измеренное количество импульсов также является числом случайным, распределенным по некоторому закону вблизи среднего значения. Из теории погрешностей для измерения статистической величины следует

$$\langle (n - n_{\text{cp}})^2 \rangle = \sqrt{n}, \quad (18)$$

а отличие результата отдельного измерения от среднего наиболее вероятного значения по абсолютной величине не будет превышать удвоенного среднеквадратичного отклонения, т. е. $n = n_{\text{cp}} \pm 2\sqrt{n}$. При этом относительная погрешность будет составлять $\delta = 2/\sqrt{n}$. Из этого анализа следует, что относительная погрешность измерения интенсивности будет уменьшаться с увеличением числа накопленных импульсов.

Основные требования техники безопасности

Опасными факторами при работе на рентгеновских установках являются:

- электрическое напряжение промышленной частоты;
- высокое постоянное напряжение, подаваемое на рентгеновскую трубку;
- ионизирующее действие рентгеновского излучения;
- озон и окислы азота, образующиеся в воздухе при работе рентгеновских установок.

Для безопасной работы на рентгеновской установке **необходимо:**

- перед началом работы пройти инструктаж по правилам безопасной работы на рентгеновских установках и изучить настоящее руководство;
- включать и выключать установку только в присутствии преподавателя;
- перед включением установки проверить исправность защитного заземления корпуса установки;
- смену образцов при выполнении работ производить только при закрытом окне рентгеновской трубки.

Запрещается:

- включать установку без подачи охлаждающей воды;
- оставлять работающую установку без присмотра;
- находиться во время производства измерений на пути первичного пучка;
- курить и принимать пищу в лаборатории;
- без участия преподавателя производить регулировку режимов работы аппарата и регистрирующей аппаратуры;
- нарушать целостность защитных устройств.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа 5

Цель работы: изучение зависимости коэффициента поглощения рентгеновских лучей от порядкового номера элемента.

Задачей работы является определение массовых коэффициентов истинного атомного поглощения рентгеновских лучей различными химическими элементами.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы рассчитать значение угла падения рентгеновских лучей на кристалл-монокроматор для выделения необходимой длины волны (Cu-K_α).

2. Рассчитать значение напряжения на рентгеновской трубке с целью исключения отражений высших порядков с меньшими длинами волн.

3. Без установки образцов-поглотителей измерить интенсивность первичного луча I_0 (количество импульсов, регистрируемых счетчиком за определенное время t).

4. Устанавливая перед счетчиком различные поглотители подобным же образом измерить интенсивность прошедшего излучения. (В качестве поглотителей используются элементы Be, C, O, Al, Si и др.)

5. Определить массовый коэффициент поглощения для предлагаемых элементов. Вследствие трудности получения тонких и прочных пластин углерода определение коэффициента поглощения для него производится косвенным образом при использовании углеводородных материалов (например, полиэтилена $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$). Поскольку водород поглощает рентгеновские лучи примерно в 200 раз слабее углерода и входит в полиэтилен в меньшей массовой доле, вкладом водорода в коэффициент поглощения полиэтилена можно пренебречь и считать полученные значения τ/ρ относящимися только к углероду.

6. Подобным же образом измерить массовый коэффициент поглощения кислорода, помещая на пути рентгеновского луча кювету, наполненную дистиллированной водой.

7. Зная поверхностную плотность исследуемых образцов различных элементов, рассчитать для них массовые коэффициенты поглощения. Значения поверхностной плотности приведены в отдельном справочном руководстве.

8. Пользуясь полученными данными для всех элементов, построить график зависимости массового коэффициента поглощения от порядкового номера поглощающего элемента и определить характер степенной зависимости $\tau/\rho(Z)$.

9. Подготовить отчет по выполненной работе, который должен содержать:

- краткую теорию о природе истинного атомного поглощения;
- расчет угла установки кристалла-монокроматора;
- расчет напряжения, необходимого для выполнения условия монокроматизации излучения;
- таблицы с экспериментальными данными и рассчитанными значениями коэффициентов поглощения;
- график зависимости $\tau/\rho(Z)$ и его интерполяцию для определения показателя степенной функции;
- оценку погрешностей;
- анализ полученных результатов и выводы.

Лабораторная работа 6

Цель работы: исследование зависимости коэффициентов поглощения от порядкового номера элемента вблизи K -края поглощения.

Задачей работы является определение положения K -края поглощения и определение энергии связи K -электронов в никеле.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы рассчитать значение угла падения рентгеновских лучей на кристалл-монокроматор для выделения необходимой длины волны (Cu-K_α и Cu-K_β).

2. Рассчитать для этих длин волн значения напряжения на рентгеновской трубке с целью исключения отражений высших порядков с меньшими длинами волн.

Лабораторная работа 7

Цель работы: определение коэффициентов поглощения рентгеновских лучей веществами сложного химического состава.

Задачей работы является проверка правила аддитивности массовых коэффициентов поглощения отдельных элементов для многокомпонентных веществ.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы рассчитать значение угла падения рентгеновских лучей на кристалл-монокристалл для выделения необходимой длины волны (Cu-K_α).

2. Рассчитать значение напряжения на рентгеновской трубке с целью исключения отражений с меньшими длинами волн.

3. Выбор многокомпонентных материалов для выполнения работы определяется наличием индивидуальных веществ, входящих в их состав. Такими материалами могут служить, например, силикатное стекло (SiO_2), слюда ($\text{KAl}_2[\text{OH}]_2 \{\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\}$) или другие химические соединения.

4. Произвести измерения интенсивности первичного пучка (I_0) и интенсивностей после прохождения через слой различных индивидуальных веществ (I), входящих в состав химического соединения. Измерение интенсивности производится так же, как указано в лабораторной работе 5.

5. Рассчитать по полученным данным массовые коэффициенты поглощения таким же образом, как указано в лабораторной работе 5. В случае отсутствия каких-либо индивидуальных веществ входящих в состав химического соединения, коэффициент поглощения для них можно установить пользуясь графиком или аналитической зависимостью $\tau/\rho(Z)$.

6. По полученным экспериментальным данным для индивидуальных веществ рассчитать коэффициент поглощения для предложенного химического соединения по формуле

$$\tau/\rho = \sum(\tau/\rho)_i x_i,$$

где x_i – массовая доля i -го элемента в облучаемом веществе.

3. Рассчитать разность энергий внутренних атомных уровней в кристалле меди, отвечающих спектральным линиям Cu-K_α и Cu-K_β .

4. Произвести измерения интенсивности первичного пучка (I_0) и интенсивностей после прохождения через слой различных поглотителей (I) сначала в излучении Cu-K_α , а затем в излучении Cu-K_β . В качестве поглотителей в данной работе используются Mn, Fe, Co, Ni, Cu. Измерение интенсивности производится так же, как указано в лабораторной работе 5 (образец Co приготовлен в виде пленки, напыленной на подложку из стекла, поглощение которой учитывать при расчетах).

5. Рассчитать по полученным данным массовые коэффициенты поглощения таким же образом, как указано в лабораторной работе 5.

6. Определить положение K -края поглощения и энергию связи электронов в K -оболочке атомов никеля.

7. Подготовить отчет по выполненной работе, который должен содержать:

- краткую теорию о природе зависимости коэффициентов поглощения от длины волны электромагнитного излучения в области K -края поглощения;

- расчет углов установки кристалла-монокристалла для выделения различных длин волн;

- расчет напряжений, необходимых для выполнения условия монохроматизации излучения;

- таблицы с экспериментальными данными и рассчитанными значениями коэффициентов поглощения;

- графики зависимости коэффициентов поглощения для марганца, железа, кобальта, никеля, меди для двух длин волн рентгеновского излучения;

- значения энергий связи электронов в K -оболочке атомов никеля;

- оценку погрешностей;

- анализ полученных результатов и выводы.

7. Произвести непосредственное измерение коэффициента поглощения для многокомпонентного вещества и сравнить полученный результат с расчетной величиной.

8. Подготовить отчет по выполненной работе, который должен содержать:

– расчет углов установки кристалла-монокроматора для выделения необходимой длины волны;

– расчет напряжений, необходимых для выполнения условия монохроматизации излучения;

– таблицы с экспериментальными данными и рассчитанными значениями коэффициентов поглощения для отдельных элементов;

– результаты расчета массовых долей элементов в химическом соединении;

– экспериментальные данные по определению коэффициента поглощения химического соединения;

– оценку погрешностей;

– анализ полученных результатов и выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные процессы, сопровождающие распространение рентгеновских лучей в веществе.

2. Линейные и массовые коэффициенты ослабления.

3. Зависимость интенсивности прошедшего излучения от толщины поглотителя.

4. Природа когерентного и некогерентного рассеяния.

5. Природа истинного атомного поглощения.

6. Зависимость атомного поглощения от порядкового номера элемента и длины волны излучения.

7. Скачки поглощения и их природа.

8. Способы монохроматизации излучения.

9. Природа вторичного характеристического излучения.

10. Погрешности при измерениях интенсивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Уманский Я. С. Рентгенография металлов. М., 1960.

Русаков А. А. Рентгенография металлов. М., 1977.

Надольский А. Л., Горбунов В. А., Плещев В. Г. и др. Рентгеновский фазовый анализ поликристаллических материалов. Екатеринбург, 2003.

Учебное издание

Физпрактикум в рентгеновской лаборатории

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Методическое руководство
по выполнению лабораторных работ

Составители

Плещев Валерий Георгиевич,
Антропов Виктор Михайлович,
Алексина Ирина Валерьевна

Редактор и корректор М. А. Овечкина
Компьютерная верстка Н. В. Комардина

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе УрГУ

Лицензия ИД № 05974 от 03.10.2001. Темплан 2004 г., поз. 18.
Подписано в печать 28.05.2004. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 1,1. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 150 экз. Заказ

Издательство Уральского университета. 620083, Екатеринбург, пр. Ленина, 51.

Отпечатано в ИПЦ «Издательство УрГУ». 620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.