

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет»

В. В. ПОПЛАВСКИЙ

ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРАКТИКУМ

*Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов специальности
«Физико-химические методы и приборы контроля
качества продукции» учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования*

Минск 2006

УДК 621:53.08+535.33(076.5)

ББК 30.10я73

П 57

Рецензенты: кафедра физической электроники Белорусского государственного университета (заведующий кафедрой член-корреспондент НАН Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор *Ф. Ф. Комаров*);

А. В. Гусинский, кандидат технических наук, доцент кафедры метрологии и стандартизации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Поплавский, В. В.

П 57 Основы измерений физических величин. Практикум : учеб. пособие для студентов специальности «Физико-химические методы и приборы контроля качества продукции» / В. В. Поплавский. – Мн. : БГТУ, 2006. – 173 с.

ISBN 985-434-610-2

Практикум представляет собой дополнение к ранее изданному учебному пособию. Приведена программа учебной дисциплины. В виде конкретных примеров изложена методика построения физико-математических моделей и определения характеристик средств измерений, а также методика обработки экспериментальных данных, получаемых при измерении состава веществ современными спектроскопическими методами. Предложены оригинальные контрольные задания по основным разделам дисциплины, выполнение которых призвано обеспечить практическое закрепление и более глубокое понимание теоретического материала.

УДК 621:53.08+535.33(076.5)
ББК 30.10я73

ISBN 985-434-610-2

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2006

© Поплавский В. В., 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие подготовлено применительно к программе дисциплины «Физические основы измерений» для студентов специальности «Физико-химические методы и приборы контроля качества продукции», обучающихся как по дневной, так и по заочной форме, и представляет собой практикум, включающий задания по основным разделам дисциплины. Теоретический материал изложен в учебном пособии: Поплавский В.В. Основы измерений физических величин. – Мн.: БГТУ, 2005 [1].

При подготовке как пособия [1], так и практикума учитывалось, что целью изучения дисциплины является создание теоретической основы для освоения студентами методов измерений и принципов действия измерительной техники и что содержание дисциплины составляют принципы и наиболее общие методы измерений физических величин, применяемые в различных отраслях измерительной техники. Кроме того, подготовка специалистов в области применения аналитических методов и соответствующего оборудования для контроля качества продукции требует формирования знаний не только об общих закономерностях процесса измерений, но и о конкретных методах анализа состава веществ и их свойств.

В практикум включены программа учебной дисциплины, методика выполнения заданий и многовариантные контрольные задания, выполнение которых призвано обеспечить более глубокое понимание теоретического материала и приобретение навыков его практического применения. При изложении методики построения физико-математических моделей и определения характеристик средств измерений использован подход, содержащийся в пособиях: Харт Х. Введение в измерительную технику. – М.: Мир, 1999 [2]; Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001 [3]. Методика определения характеристик спектральных приборов и измерений состава веществ спектроскопическими методами представлена оригинальными примерами. Также оригинальными являются предлагаемые к выполнению контрольные задания. Большой набор заданий по всем разделам позволяет обеспечить их индивидуальное выполнение каждым студентом учебной группы. Перед выполнением заданий необходимо, руководствуясь программой дисциплины, изучить соответствующий материал по учебному пособию [1], а также проработать и усвоить методику выполнения заданий, изложенную в практикуме.

1. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Основы процесса измерений физических величин

1.1.1. Предмет и базовые понятия дисциплины

Предмет дисциплины, цели и задачи ее изучения. Базовые понятия: измерение, физическая величина, значение физической величины, истинное, действительное и измеренное значения физической величины. Классификация физических величин. Основное уравнение измерений. Единица физической величины. Основные, дополнительные и производные единицы измерения физических величин. Размерность физической величины.

Метод измерений. Принцип измерения. Классификация методов измерений. Методы непосредственного преобразования и методы сравнения при прямых измерениях. Разновидности методов сравнения: нулевой метод, дифференциальный метод, метод замещения. Компенсационный и мостовой методы измерений как разновидности нулевого метода.

Средства измерений. Общая характеристика средств измерений. Меры, измерительные приборы, измерительные системы. Аналоговые и цифровые измерительные приборы. Измерительные приборы прямого преобразования и сравнения. Интегрирующие и суммирующие измерительные приборы.

1.1.2. Измерение как процесс преобразования сигналов измерительной информации

Сигналы измерительной информации. Информативные параметры сигнала измерительной информации. Классификация сигналов.

Измерительные преобразователи. Измерительная цепь. Входная и выходная величины. Измерительное преобразование. Функция преобразования. Передаточная характеристика. Статический и динамический режимы измерения.

Статические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений. Передаточный коэффициент. Чувствительность измерительного преобразователя. Порог чувствительности. Чувствительность измерительного прибора. Разрешающая способность средства измерений. Построение физико-математических моделей и расчет статических характеристик измерительных преобразователей.

Блок-схемы преобразования сигналов в средствах измерений. Основные элементы передачи и преобразования сигналов измерительной информации и их графические обозначения. Последовательность разработки и правила построения блок-схем сигналов. Построение физико-математических моделей и блок-схем сигналов измерительных

устройств. Преобразования блок-схем сигналов. Передаточные коэффициенты последовательных и параллельных соединений. Обратная связь. Положительная и отрицательная обратная связь. Передаточные коэффициенты соединений с обратной связью.

Расчет статических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов. Понятия пути и контура блок-схемы сигналов. Контур первого, второго и более высоких порядков. Значения путей и контуров. Алгоритм расчета передаточного коэффициента средства измерений на основе анализа блок-схемы сигналов.

Динамические измерения физических величин. Динамические характеристики средств измерений. Классификация динамических характеристик. Полные и частные динамические характеристики. Частные динамические характеристики измерительных преобразователей: порядок задержки, время задержки, время установления, время успокоения, постоянная времени и др. Полные временные динамические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений. Переходная и импульсная переходная динамические характеристики измерительного преобразователя с задержкой сигнала первого порядка. Переходная динамическая характеристика измерительного преобразователя с задержкой сигнала второго порядка. Определение временных динамических характеристик с использованием детерминированных непериодических тестовых сигналов. Частотные динамические характеристики измерительных преобразователей и средств измерений. Определение частотных динамических характеристик с использованием периодических тестовых сигналов. Амплитудно-частотная и фазово-частотная полные динамические характеристики измерительных преобразователей. Передаточная функция, комплексный коэффициент передачи, интервал рабочих частот, собственная (резонансная) частота, добротность измерительных преобразователей. Соотношение между временными и частотными динамическими характеристиками. Расчет динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов. Особенности расчета динамических характеристик измерительных преобразователей на основе электрических цепей. Передаточные функции последовательных и параллельных измерительных систем, систем с обратной связью. Зависимость между верхней граничной частотой изменения измеряемой величины и временем установления средства измерений.

1.1.3. Измерительные системы и их основные элементы

Измерительная система. Измерительные системы последовательного действия, параллельной и последовательно-параллельной структуры. Информационно-измерительные и компьютерно-измерительные

системы. Обобщенная функциональная схема измерительной системы. Преобразование видов энергии в измерительных системах.

Первичные и вторичные измерительные преобразователи. Генераторные и параметрические преобразователи. Эффективность преобразования входной мощности в выходную. Зависимость характеристик измерительного прибора от чувствительностей и эффективностей преобразования отдельных измерительных звеньев. Входной и выходной импеданс преобразователя. Согласование измерительных преобразователей электрических сигналов. Согласование последовательных измерительных звеньев по импедансу при наличии генераторных преобразователей с целью достижения максимальной эффективности преобразования. Зависимость эффективности преобразования генераторных измерительных преобразователей от значения и характера сопротивления нагрузки. Согласование последовательных измерительных звеньев по импедансу при наличии параметрических преобразователей.

Усилители сигналов измерительной информации. Принцип действия электронных усилителей электрических сигналов на основе вакуумного триода и транзистора. Усилители сигналов с отрицательной обратной связью, их основные характеристики. Операционные усилители. Эквивалентная схема и основные характеристики операционного усилителя. Применение операционных усилителей для аналогового преобразования сигналов измерительной информации. Инвертирующий и неинвертирующий операционные усилители. Сумматор, интегратор и дифференциатор на основе операционных усилителей. Преобразователь «ток – напряжение» и измерительный усилитель тока на основе операционных усилителей.

1.2. Основы измерений состава веществ. Физические основы измерений с применением излучений

Состав вещества как физическая величина, измеряемая количественно. Классификация состава веществ и методов анализа состава. Функциональная схема измерения состава вещества с применением излучений. Электромагнитное, корпускулярное и акустическое излучения. Измерения с применением электромагнитного и корпускулярного излучений. Необходимость вакуумных условий при реализации измерений с применением корпускулярного излучения. Степени вакуума.

1.2.1. Принципы преобразований электромагнитного излучения

Природа и основные характеристики электромагнитного излучения. Шкала электромагнитных волн.

Получение и формирование потоков электромагнитного излучения. Источники сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения. Принцип действия лампового генератора. Генераторные лампы. Особенности работы генераторных ламп СВЧ-диапазона. Конструкция и принцип действия металлокерамического генераторного триода. Магнетронные генераторы СВЧ-излучения. Схема и принцип действия многорезонаторного магнетронного генератора. Принцип действия объемного резонатора. Принцип действия лампы обратной волны магнетронного типа. Условие синхронизма электронов и волн. Замедляющая система. Задание частоты, отбор, вывод и передача генерируемого СВЧ-излучения. Волноводы. Механизм распространения СВЧ-излучения в волноводе. Основные характеристики волноводов.

Электромагнитное излучение оптического диапазона. Источники излучения. Газоразрядные источники света. Излучающие полупроводниковые приборы. Оптические квантовые генераторы (лазеры). Принцип действия лазеров. Инверсия населенностей. Вынужденное излучение электромагнитной энергии. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Основные характеристики источников света и потоков оптического электромагнитного излучения. Энергетические и световые фотометрические величины. Монохроматизация излучения оптического диапазона. Формирование потоков оптического излучения. Световоды. Принцип действия волоконного световода. Волоконно-оптические линии.

Источники рентгеновского излучения. Принцип действия рентгеновской трубки. Монохроматизация рентгеновского излучения. Источники γ -излучения.

Регистрация и спектрометрия электромагнитного излучения. Приемо-усилительные системы СВЧ-излучения. Принцип действия лампы бегущей волны. Приемники оптического излучения тепловые, фотоэлектрические, электронно-оптические, фотохимические. Принципы действия фотоэлектронного умножителя и фотодиода. Основные характеристики приемников оптического излучения. Спектрометрия оптического излучения. Принципы действия спектральных приборов: дисперсионных призм и дифракционных решеток. Угловая дисперсия и разрешающая способность спектральных приборов. Регистрация рентгеновского и γ -излучений. Детекторы излучений. Спектрометрия рентгеновского излучения путем дифракции на кристалле-анализаторе. Измерение энергии γ -излучения с применением черенковских счетчиков полного поглощения и счетчиков, действие которых основано на переходном излучении, с использованием полупроводниковых детекторов.

1.2.2. Принципы преобразований корпускулярного излучения

Природа и основные характеристики корпускулярного излучения. Характеристики корпускулярного излучения как потока частиц: эмиттанс, первеанс. Акцептанс.

Получение корпускулярного излучения. Способы введения заряженных частиц в вакуум. Электронная эмиссия. Электронная пушка. Ионизация молекул газов. Газовые разряды. Ионные источники. Формирование потоков и монохроматизация корпускулярного излучения. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Электронная и ионная оптика. Фокусировка корпускулярного излучения. Электростатические и магнитные линзы.

Регистрация и спектрометрия корпускулярного излучения. Цилиндр Фарадея. Детекторы и счетчики корпускулярного излучения. Спектральный анализ корпускулярного излучения. Масс-спектрометры. Электростатические бездисперсионные и дисперсионные энергоанализаторы. Полупроводниковые детекторы-энергоанализаторы.

1.2.3. Измерения состава веществ, основанные на исследовании электронной структуры атомов

Строение атомов вещества. Временное уравнение Шрёдингера. Волновая функция. Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний квантовой системы. Особенности решения стационарного уравнения Шрёдингера для атома водорода. Строение атома водорода. Собственные значения энергии атома. Схема энергетических уровней и излучательных переходов атома водорода. Собственные волновые функции атома. Атомные электронные орбитали. Квантовые числа. Спин и собственный магнитный момент электрона. Принцип Паули. Последовательность заполнения электронных оболочек в многоэлектронных атомах. Спин-орбитальное взаимодействие. Полный момент электрона в атоме.

Излучение электромагнитной энергии атомами. Спектроскопический анализ веществ. Физические основы оптической спектроскопии. Эмиссионный и атомно-абсорбционный спектральный анализ. Лазерная спектроскопия. Ширина атомных энергетических уровней и естественная ширина спектральных линий.

Многоэлектронные атомы. Спектры щелочных металлов. Схема энергетических уровней и излучательных переходов атома лития. Правила отбора. Дублетная структура спектров щелочных металлов. Спин-орбитальное взаимодействие. Мультиплетность энергетических

уровней атомов и атомных спектров. Тонкая структура спектральных линий. Правило мультиплетностей.

Взаимодействие атомов с электромагнитным полем. Расщепление энергетических уровней атомов в магнитном поле. Эффект Зеемана. Эффект Пашена – Бака. Магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс. Принцип действия радиоспектрометра. Эффект Штарка. Вырождение энергетических уровней атомов. Кратность вырождения. Снятие вырождения.

Природа характеристического рентгеновского электромагнитного излучения. Спектральные серии рентгеновского излучения атомов. Физические основы рентгеновского спектрального микроанализа. Взаимодействие электрона, возбуждающего атом, и электрона, входящего в состав атома. Прицельный параметр. Эффективное сечение взаимодействия. Электронный микроанализ. Спектроскопия характеристического рентгеновского излучения с дисперсией по энергиям и по длинам волн. Качественный и количественный анализ состава веществ методом рентгеновского спектрального микроанализа.

Физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Закон сохранения энергии при фотоэмиссии основных электронов атомов. Принцип действия фотоэлектронного спектрометра. Источники рентгеновского излучения, возбуждающего фотоэлектронную эмиссию. Фотоэлектронные спектры. Обработка спектров. Сечение фотоионизации. Качественный и количественный анализ состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Химический сдвиг энергии связи электронов.

Физические основы оже-электронной спектроскопии. Оже-эффект. Оже-электронные переходы в атомах. Кинетическая энергия оже-электронов. Эффект Костера – Кронига. Качественный и количественный анализ состава веществ методом оже-электронной спектроскопии.

1.2.4. Ядерно-физические измерения состава веществ

Типы ядерных взаимодействий и соответствующие ядерно-физические методы измерения состава веществ.

Физические основы спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния. Схема упругого резерфордовского рассеяния быстрых ионов гелия на ядре атома исследуемого вещества. Законы сохранения энергии и импульса при резерфордовском рассеянии. Кинематический фактор рассеяния. Слагаемые потерь энергии иона, рассеивающегося на ядре атома, расположенного на определенной глубине анализируемого образца. Тормозная способность, сечение торможения, фактор тормозного сечения. Дифференциальное сечение рассеяния. Измерение состава веществ методом резерфордовского обратного рассеяния.

Спектры Резерфордского обратного рассеяния. Обработка спектров. Калибровка энергетической шкалы анализатора. Построение шкалы глубин. Определение интегрального количества и относительной концентрации атомов элементов, расчет профилей распределения атомов в приповерхностном слое вещества.

Основы ядерного активационного микроанализа. Мгновеннорадиационный и активационный радиационный анализ. Реакции с образованием составного ядра. Характеристики, позволяющие идентифицировать продукты ядерных реакций. Качественный и количественный анализ состава веществ.

1.2.5. Основы акустических измерений

Природа и основные характеристики акустического излучения. Принципы преобразований акустического излучения. Источники и приемники акустического излучения. Электроакустические преобразователи и их характеристики. Формирование акустических полей и потоков акустического излучения. Акустические линзы, зеркала, волноводы и концентраторы. Акустическое волновое сопротивление среды. Принципы измерений с применением акустического излучения. Акустический микроскоп.

2. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ

2.1. Построение физико-математических моделей и определение статических характеристик измерительных преобразователей

К статическим характеристикам измерительных преобразователей относят: функцию преобразования, передаточный коэффициент, передаточную характеристику, а также чувствительность и порог чувствительности.

Функцией преобразования измерительного преобразователя называют функциональную зависимость выходной величины от входной, описываемую аналитическим выражением

$$x_a = f(x_e) \quad (1)$$

или графиком. График функции преобразования $f(x_e)$, отображающий зависимость выходной величины от входной, называется передаточной характеристикой. Если связь между входной и выходной величинами при преобразовании является линейной, то передаточная характеристика измерительного преобразователя представляет собой прямую. Преобразование при этом описывается уравнением

$$x_a = K_p x_e, \quad (2)$$

где K_p – передаточный коэффициент измерительного преобразователя.

Чувствительность преобразователя – это величина, показывающая, на сколько изменяется приращение выходной величины x_a при определенном приращении входной величины x_e :

$$S = \Delta x_a / \Delta x_e. \quad (3)$$

Порог чувствительности представляет собой наименьшее значение измеряемой величины, которое вызывает заметное для восприятия изменение выходного сигнала средства измерения. Единица измерения порога чувствительности совпадает с единицей соответствующей измеряемой величины. По заметному для восприятия изменению выходного сигнала $x_{e \text{ пор}}$ и чувствительности S средства измерения можно рассчитать порог чувствительности $x_{e \text{ пор}}$:

$$x_{e \text{ пор}} = S^{-1} \cdot \Delta x_{a \text{ пор}}. \quad (4)$$

Для нахождения характеристик конкретного измерительного преобразователя необходимо сформулировать (построить) физико-математическую модель данного устройства, т. е. описать анали-

тически (математическими формулами) физические законы, на основе которых оно действует, с учетом условий измерения.

Рассмотрим несколько простых примеров, иллюстрирующих подходы в определении статических характеристик измерительных преобразователей.

Пример 1. Определение статических характеристик жидкостного термометра

При рассмотрении принципа измерения температуры жидкостным термометром (рис. 1) предположим для упрощения, что: при исходной температуре T_0 капиллярная трубка термометра не заполнена рабочей жидкостью (пуста), а его баллончик заполнен жидкостью полностью; объем баллончика V_0 и площадь A сечения капиллярной трубки не изменяются при изменении температуры от исходного значения T_0 до измеряемого T в процессе измерения; силы поверхностного натяжения пренебрежимо малы.

Построим физико-математическую модель измерительного преобразователя. Принцип измерения температуры жидкостным термометром основан на явлении теплового расширения жидкости. Входным сигналом такого преобразователя является измеряемая температура T , выходным – высота h столбика жидкости в капиллярной трубке ($x_e = T$, $x_a = h$). При увеличении температуры на $\Delta T = T - T_0$ объем жидкости в термометре увеличивается вследствие теплового расширения на $\Delta V = V_T - V_0$, т. е.

$$V_T = V_0 + \Delta V. \quad (5)$$

С другой стороны, зависимость объема жидкости от температуры

$$V_T = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta T) = V_0 + V_0 \gamma \cdot \Delta T, \quad (6)$$

где γ – температурный коэффициент объемного расширения жидкости (для ртути $\gamma = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$).

Из (5) и (6) следует, что объем жидкости в капиллярной трубке изменяется на величину

$$\Delta V = V_0 \gamma \cdot \Delta T. \quad (7)$$

С другой стороны,

$$\Delta V = \Delta h \cdot A, \quad (8)$$

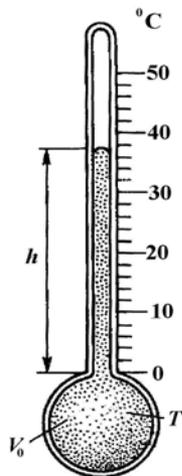


Рис. 1. Схематическое изображение жидкостного термометра

где Δh – изменение высоты столбика жидкости в трубке. Поскольку изменение объема жидкости в термометре пропорционально изменению температуры ($\Delta V = \Delta h \cdot A \sim \Delta T$) и, соответственно, при постоянном сечении трубки $h \sim T$, то термометр является линейным измерительным преобразователем и его передаточная характеристика линейна.

Из выражений (7) и (8) получим

$$\Delta h = \Delta V / A = V_0 \gamma \Delta T / A.$$

Тогда в соответствии с (3) чувствительность термометра

$$S = \Delta x_a / \Delta x_e = \Delta h / \Delta T = V_0 \gamma / A. \quad (9)$$

Единица измерения $[S] = \text{мм/К}$.

Чувствительность возрастает с увеличением объема V_0 жидкости в баллончике и с уменьшением площади A сечения цилиндрической капиллярной трубки, а также зависит от природы (температурного коэффициента объемного расширения γ) жидкости.

Однако сильно увеличить чувствительность термометра за счет увеличения объема жидкости или за счет уменьшения сечения капиллярной трубки нельзя, т. к. при этом сам прибор будет влиять на измеряемую величину вследствие увеличения его теплоемкости и преобладания капиллярного эффекта.

Пример 2. Определение статических характеристик U-образного жидкостного манометра

В основе принципа измерений давления жидкостным манометром лежит уравновешивание измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости. В левом колене манометра (рис. 2) на нулевом уровне ($h = 0$) на жидкость действует сила измеряемого давления $F_p = p \cdot A$, где A – сечение манометрической трубки. Это давление p уравновешивается давлением $p_{\text{ж}}$ столбика жидкости высотой h в правом колене: $p = p_{\text{ж}}$.

Входной величиной такого измерительного преобразователя является измеряемое давление p , выходной – высота h столбика ртути в правом колене ($x_e = p$, $x_a = h$).

Поскольку гидростатическое давление $p_{\text{ж}} = \rho g h$, то при нарушении равновесия $\Delta p = p - p_{\text{ж}} = \rho g \Delta h$. Высота столба жидкости в правом колене манометра прямо пропорциональна величине измеряемого давления: манометр является линейным преобразователем.

Чувствительность манометра

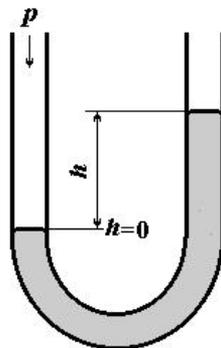


Рис. 2. Схема U-образного жидкостного манометра

$$S = \Delta h / \Delta p = 1 / \rho g \quad (10)$$

обратно пропорциональна плотности жидкости ($S \sim 1 / \rho$), т. е. зависит от рода жидкости. $[S] = \text{мм/Па}$.

Пример 3. Определение статических характеристик емкостного измерительного преобразователя

Емкостный (конденсаторный) измерительный преобразователь, предназначенный для измерения малых перемещений, состоит из двух пластин площадью A каждая, образующих конденсатор; одна из пластин подвижна (рис. 3). Входной величиной является расстояние d между пластинами, которое изменяется при перемещении подвижной пластины ($x_e = d$). Выходной величиной является электрическая емкость конденсатора C ($x_a = C$).

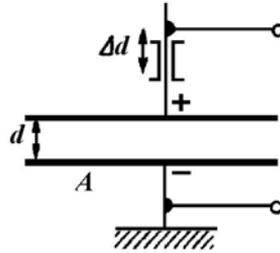


Рис. 3. Схема емкостного измерительного преобразователя

Статическая характеристика преобразователя определяется выражением для электроемкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды между пластинами (для воздуха $\varepsilon \approx 1$).

Эта характеристика нелинейна (см. рис. 4), и поэтому значение чувствительности преобразователя будет зависеть от значения входного сигнала.

Вначале определим чувствительность преобразователя по аналогии с предыдущими примерами как отношение приращений входной и выходной величин, или разностным методом. Емкость конденсатора в исходном состоянии, когда расстояние между его обкладками $d = d_1$,

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1}.$$

При увеличении расстояния между пластинами от d_1 до d_2 на $\Delta d = d_2 - d_1$ емкость уменьшается до $C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1 + \Delta d}$.

Изменение емкости конденсатора

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1 + \Delta d} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \varepsilon_0 \varepsilon A \left(\frac{1}{d_1 + \Delta d} - \frac{1}{d_1} \right) = \varepsilon_0 \varepsilon A \left(\frac{d_1 - (d_1 + \Delta d)}{(d_1 + \Delta d) d_1} \right) = \\
 &= -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_1} \cdot \frac{\Delta d}{d_1 + \Delta d} = -C_1 \frac{\Delta d}{d_1 + \Delta d}.
 \end{aligned}$$

Чувствительность преобразователя

$$S_1 = \Delta x_a / \Delta x_e = \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{C_1}{d_1 + \Delta d} = -\frac{C_1}{d_2}. \quad (12)$$

Знак «минус» в выражении для определения чувствительности означает, что выходной сигнал уменьшается по мере увеличения входного сигнала.

Вследствие нелинейности передаточной характеристики преобразователя его чувствительность зависит от значения входной величины. Поэтому более корректным является определение чувствительности такого преобразователя методом дифференцирования его передаточной характеристики. Дифференцируя выражение (11) емкости плоского конденсатора по переменной d , получим

$$\frac{\partial C}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d} \right) = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d^2}.$$

Для конечных приращений расстояния d и емкости C имеем

$$\Delta C = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d^2} \Delta d.$$

Откуда получим следующее выражение для определения чувствительности преобразователя:

$$S = \Delta x_a / \Delta x_e = \frac{\Delta C}{\Delta d} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d^2}. \quad (13)$$

Можно проанализировать зависимость чувствительности преобразователя от значения входного сигнала. В точке передаточной характеристики, соответствующей исходному состоянию конденсатора, т. е. при $d = d_1$, $S_2 = -\frac{C_1}{d_1}$, а в точке характеристики, соответствующей

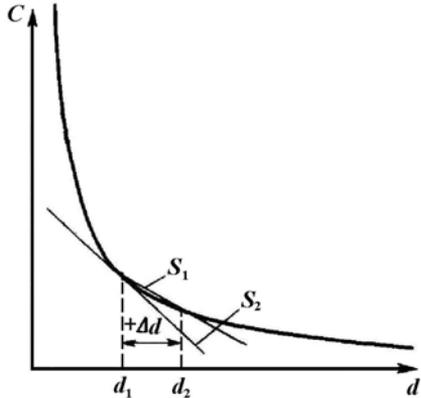


Рис. 4. Передаточная характеристика емкостного преобразователя

расстоянию между пластинами конденсатора $d = d_2$, $S_3 = -C_1 \frac{d_1}{d_2^2}$. Эти

выражения отличаются от выражения (12), полученного разностным методом. Однако поскольку при малых перемещениях Δd мало и $d_1 \approx d_2$, то при вычислении значений чувствительности преобразователя по формулам, полученным различными методами, результаты окажутся близкими. Наклонные отрезки на рис. 4 иллюстрируют различия в определении значений чувствительности S_1 и S_2 .

Пример 4. Определение статических характеристик ареометра

Определим передаточную характеристику, чувствительность и порог чувствительности ареометра, предназначенного для измерения плотности ρ жидкости (рис. 5). Пусть масса ареометра равна m . В нижней части ампулы, которая имеет площадь поперечного сечения A , находится груз, а удлиненная верхняя часть ампулы проградуирована в единицах плотности. Высота ареометра H . Выходным сигналом является длина h верхней части ампулы, выступающей над поверхностью жидкости. Чувствительность ареометра определяется соотношением $S = \Delta h / \Delta \rho$.

Сила тяжести ареометра уравновешивается выталкивающей силой:

$$mg = \rho A(H - h)g.$$

Отсюда $m = \rho A(H - h)$, и

$$(H - h) = m / \rho A. \quad (14)$$

Поскольку $(H - h) \sim 1/\rho$, то передаточная характеристика является нелинейной (может быть представлена в виде гиперболы). Поэтому чувствительность ареометра необходимо определять методом дифференцирования передаточной характеристики.

Дифференцируя выражение (14), получим

$$-dh = \frac{m}{A} \left(-\frac{d\rho}{\rho^2} \right).$$

Для конечного изменения высоты h можно записать

$$\Delta h = \frac{m}{A\rho^2} \Delta \rho.$$

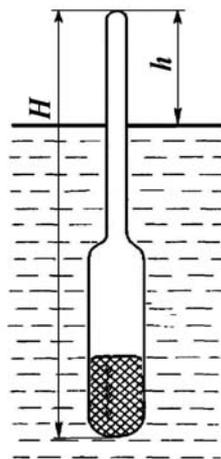


Рис. 5. Схематическое изображение ареометра

Отсюда чувствительность ареометра

$$S = \Delta h / \Delta \rho = m / \rho^2 A. \quad (15)$$

Чувствительность прямо пропорциональна массе ареометра ($S \sim m$) и обратно пропорциональна площади поперечного сечения ампулы ($S \sim 1/A$). Однако достичь повышения чувствительности путем значительного увеличения массы и уменьшения площади сечения невозможно.

Оценим значение чувствительности ареометра. Если $m = 100$ г, $A = 1$ см², то чувствительность при измерении плотности водных растворов (плотность воды $\rho = 1$ г/см³) составит

$$S = (100 \text{ г}) / [(1 \text{ г/см}^3)^2 \cdot 1 \text{ см}^2] = 100 \text{ см/(г/см}^3).$$

Если предположить, что еще различимое человеком изменение глубины погружения ареометра в воду составляет 0,5 мм, то порог чувствительности ареометра в воде

$$\rho_{\text{пор}} = \Delta h_{\text{пор}} / S;$$
$$\rho_{\text{пор}} = (0,05 \text{ см}) / [100 \text{ см/(г/см}^3)] = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3.$$

Относительный порог чувствительности $x_e^*_{\text{пор}} = (x_{e\text{пор}}) / x_e$. Для ареометра $\rho^*_{\text{пор}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3 / 1 \text{ г/см}^3 = 5 \cdot 10^{-4}$.

Пример 5. Определение статических характеристик прибора для измерения рН растворов (рН-метра)

Первичный измерительный преобразователь рН-метра гальванического принципа действия состоит из стеклянного электрода 2, заполненного образцовым раствором с известным значением рН, и электрода сравнения 4 (рис. 6).

При погружении электродов в исследуемый раствор вследствие электрохимических реакций возникает ЭДС гальванической цепи и между электродами появляется соответствующая разность потенциалов, зависящая от активности ионов водорода в исследуемом растворе. Напряжение $U_{\text{рН}}$, пропорциональное значению водородного показателя, усиливается с помощью усилителя 5 и измеряется вольтметром 6. Входной величиной первичного преобразователя является значение водородного показателя рН, выходной величиной – напряжение $U_{\text{рН}}$. Усилитель 5 и вольтметр 6 являются вторичными измерительными преобразователями рН-метра (прибора).

Определим чувствительность первичного гальванического преобразователя. Воспользуемся зависимостью гальванического напряжения $U_{\text{рН}}$ от концентрации ионов водорода в водном растворе c_{H} , или от значения рН:

$$\text{рН} = -\lg c_{\text{H}}. \quad (16)$$

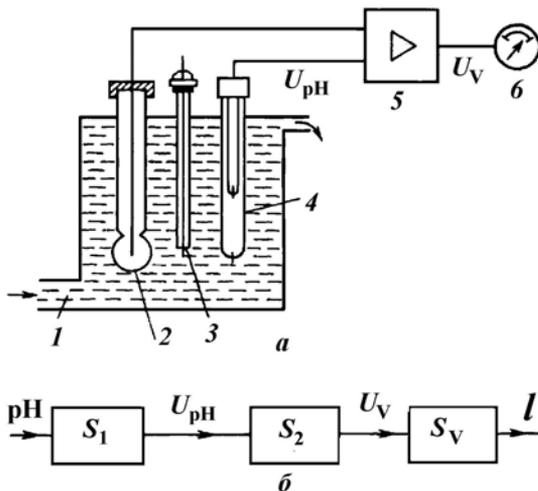


Рис. 6. Схематическое изображение pH-метра (а) и соответствующая схема передачи сигналов (б): 1 – кювета с исследуемым раствором; 2 – стеклянный электрод; 3 – термометр; 4 – электрод сравнения; 5 – усилитель; 6 – вольтметр

В соответствии с уравнением Нернста гальваническое напряжение, возникающее в результате электродной реакции в растворе (электродный потенциал), определяется следующим образом:

$$U = U_0 + \frac{RT}{nF} \ln(f c), \quad (17)$$

где $R = 8,313$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура раствора; n – валентность ионов; $F = 96\,552$ Кл/моль – постоянная Фарадея; f – коэффициент активности раствора; c – концентрация ионов.

Для ионов водорода ($n = 1$) в сильно разбавленном ($f = 1$) растворе

$$U_{\text{pH}} = U_0 + \frac{RT}{F} \ln c_{\text{H}},$$

или, после подстановки значений констант,

$$U_{\text{pH}} = U_0 + 8,61 \cdot 10^{-5} T \cdot \ln c_{\text{H}}.$$

С учетом, что $\ln x = 2,3026 \lg x$, и соотношения (16):

$$U_{\text{pH}} = U_0 - 1,983 \cdot 10^{-4} T \cdot (\text{pH}). \quad (18)$$

Из (18) следует, что первичный преобразователь pH-метра является линейным. Изменению водородного показателя на $\Delta(\text{pH})$ соответствует изменение напряжения

$$\Delta U_{\text{pH}} = 1,983 \cdot 10^{-4} T \cdot \Delta(\text{pH}). \quad (19)$$

Чувствительность первичного преобразователя

$$S_1 = \Delta U_{\text{pH}} / \Delta(\text{pH}); \quad S_1 = 1,983 \cdot 10^{-4} T \text{ В}/\Delta(\text{pH}). \quad (20)$$

При температуре раствора $T = 293 \text{ К}$ $S_1 = 0,058 \text{ В}/\Delta(\text{pH}) = 58 \text{ мВ}/\Delta(\text{pH})$ (милливольт на единицу изменения рН).

Определим характеристики вторичных измерительных преобразователей рН-метра: усилителя и вольтметра.

Пусть диапазон измерений стрелочного вольтметра рН-метра составляет от 0 до 50 В, а длина его шкалы $l = 150 \text{ мм}$. Налагаемое условие к показаниям рН-метра: изменение значения рН на единицу (например, от $\text{pH}_1 = 5$ до $\text{pH}_2 = 6$) должно вызывать отклонение стрелки вольтметра на всю шкалу до ее предела. Т. е. общая чувствительность рН-метра должна быть $S_{\text{pH}} = 150 \text{ мм}/\Delta(\text{pH})$.

Чувствительность вольтметра $S_V = 150 \text{ мм} / 50 \text{ В} = 3 \text{ мм}/\text{В}$.

Определим необходимую чувствительность усилителя S_2 . Поскольку общая чувствительность прибора равна произведению чувствительностей последовательно составляющих его звеньев ($S_{\text{pH}} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_V$), то чувствительность усилителя $S_2 = S_{\text{pH}} / (S_1 \cdot S_V)$. $S_2 = 150 / (58 \cdot 3) = 0,86 \text{ В}/\text{мВ}$. Коэффициент усиления K_y усилителя должен быть равен значению

$$K_y = 0,86 \text{ В}/\text{мВ} = 860 \text{ мВ}/\text{мВ} = 860.$$

2.2. Построение блок-схем преобразования сигналов в средствах измерений

Процесс преобразования и передачи сигналов в средствах измерений изображается графически в виде блок-схем. Основные элементы передачи и преобразования сигналов обозначаются на блок-схемах специальными графическими символами (см. [1], табл. 1.1). Применение блок-схем преобразования сигналов является одним из методов описания принципа действия и инструментом исследования средств измерений. Принципы построения блок-схем и расчета передаточных характеристик средств измерений на основе блок-схем подробно изложены в учебных пособиях (см. [1], с. 19–27, 43–47; [2], с. 61–72, 158–159).

Рассмотрим несколько примеров составления блок-схем преобразования сигналов в измерительных устройствах.

Пример 6. Построение блок-схемы преобразования сигналов в пружинных весах

Входной величиной измерительного устройства является масса взвешиваемого груза ($x_c = m$), выходной величиной – смещение s стрелочного указателя вследствие деформации пружины ($x_d = s$). В пределах упругости выполняется закон Гука: $F_{\text{упр}} = k s$, где $F_{\text{упр}}$ – сила упру-

гости пружины, k – коэффициент упругости пружины. На взвешиваемый груз массой m действует сила тяжести $F = mg$, где g – ускорение свободного падения. Пружина весов растягивается до тех пор, пока сила тяжести груза не уравновешивается силой упругости пружины. Физико-математическая модель принципа измерений массы пружинными весами в статическом режиме может быть представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} F = mg; \\ F_{\text{упр}} = ks; \\ F = F_{\text{упр}}. \end{cases}$$

Сила тяжести F является выходным сигналом первого передаточного звена с постоянным коэффициентом передачи g . Она вызывает удлинение пружины до тех пор, пока не уравновесится противоположно направленной силой упругости пружины $F_{\text{упр}}$, т. е. пока их разность ΔF не станет равной нулю. При этом масса оказывается пропорциональной смещению указателя весов. Соответствующая блок-схема преобразования и передачи сигналов приведена на рис. 7, где K_x – общий передаточный коэффициент весов как измерительного устройства.

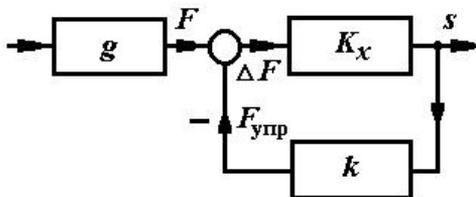


Рис. 7. Блок-схема преобразования сигналов при определении массы пружинными весами

Пример 7. Построение блок-схем преобразования сигналов в U-образном ртутном манометре

Измеряемое манометром избыточное (сверх атмосферного) давление p уравновешивается давлением силы тяжести F столба ртути высотой h (гидростатическим давлением $p_{\text{Hg}} = \rho gh$). Столбик ртути поднимается на высоту h до тех пор, пока сила тяжести $F = mg$ не уравновесит силу F_p , создаваемую измеряемым давлением. В свою очередь сила тяжести $F = mg = \rho Vg = \rho Ahg$, где $m = \rho V$ – масса столбика ртути высотой h ; ρ – плотность ртути; $V = Ah$ – объем столбика ртути; A – площадь сечения манометрической трубки; g – ускорение свободного падения.

Преобразование сигнала h в сигнал F может осуществляться (см. рис. 8) и в соответствии с блок-схемой a , и общим передаточным

звеном (блок-схема *б*). Работу манометра можно представить и как уравнивание измеряемого давления p гидростатическим давлением столбика ртути p_{Hg} (блок-схема *в*).

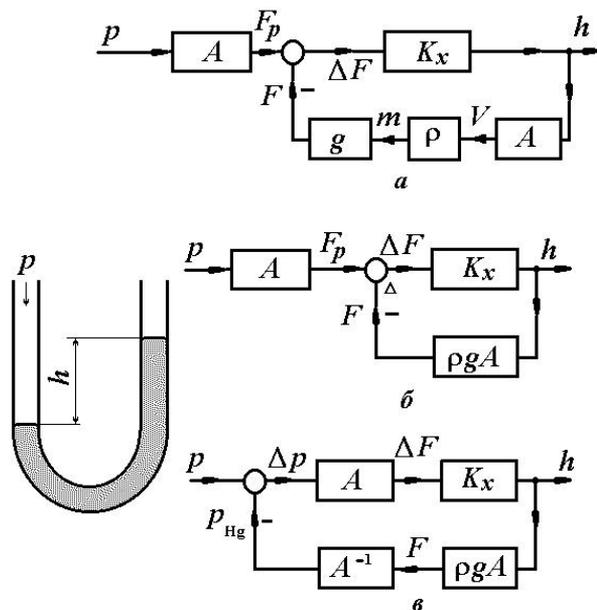


Рис. 8. U-образный манометр и возможные блок-схемы сигналов, отображающих его действие

Пример 8. Построение блок-схем преобразования сигналов в электрической цепи

На рис. 9 приведена схема электрической цепи (*а*), состоящей из четырех резисторов, которую можно рассматривать как преобразователь электрического напряжения, а также два варианта (*б* и *в*) блок-схемы сигналов этой цепи. Входной величиной является напряжение U_e , а выходной – падение напряжения на резисторе R_4 , т. е. $U_a = U_4$. Цепь представляет собой преобразователь постоянного напряжения U_e в напряжение U_a .

Напряжение U_e , подаваемое на вход, создает в цепи ток силой I_1 , который протекает через резистор с сопротивлением R_1 , а затем разветвляется на токи I_2 и I_3 . Входное напряжение перераспределяется между резистором R_1 и остальным участком цепи: $U_e = U_1 + U_2$; в свою очередь, падение напряжения на резисторе R_2 равно сумме паде-

ний напряжения на последовательно соединенных резисторах R_3 и R_4 : $U_2 = U_3 + U_4$. Соотношения между токами и напряжениями на различных участках цепи можно представить системой уравнений

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3; \\ U_e = U_1 + U_2; \\ U_2 = U_3 + U_4; \\ U_4 = U_a; \\ U_i = I_i R_i, \end{cases} \quad (21)$$

которые отображают физико-математическую модель преобразователя.

Падение напряжения U_1 на резисторе R_1 $U_1 = U_e - U_2$, что отражено на блок схеме *б* соответствующим узлом суммирования. При этом ток

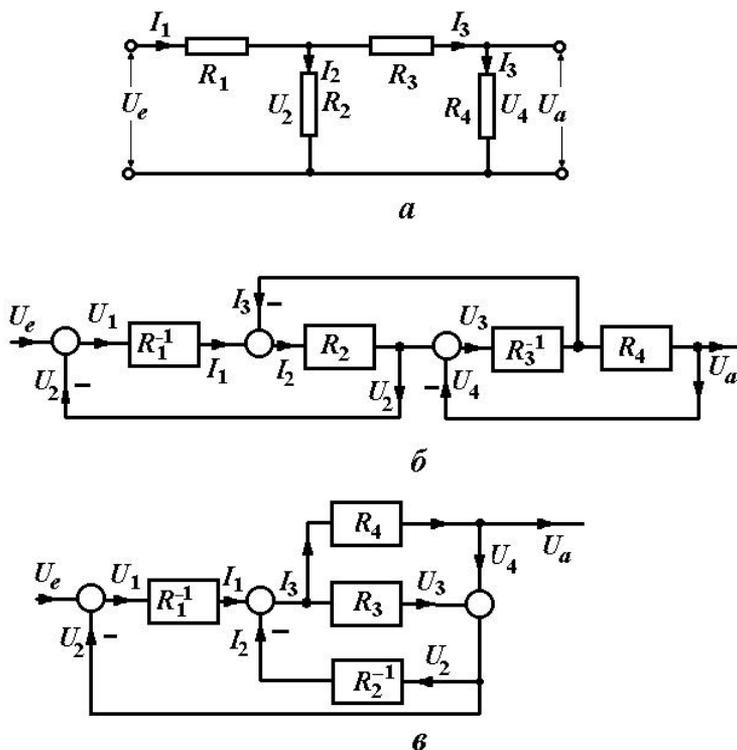


Рис. 9. Электрическая цепь (а) и соответствующие блок-схемы (б), (в) преобразования сигналов

I равен $U_1 R_1^{-1}$, а R_1^{-1} является передаточным коэффициентом первого из звеньев. По току I можно определить силу тока I_2 (второй узел суммирования) и падение напряжения U_2 (звено с передаточным коэффициентом R_2). При переходе от одного звена к другому сигнал тока преобразуется в сигнал напряжения и наоборот.

Если во втором (среднем) узле суммирования поменять местами токи I_2 и I_3 , то блок-схема b преобразуется в блок-схему v . Обе эти блок-схемы они воспроизводят одни и те же зависимости токов и напряжений: $I = I_2 + I_3$, $U_e = U_1 + U_2$ и $U_2 = U_3 + U_4$, а также закон Ома для участков цепи постоянного тока. В каждую из блок-схем входят по три узла суммирования и по четыре передаточных звена.

2.3. Определение статических и динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов

По блок-схемам выясняются взаимосвязи между сигналами измерительной информации на различных этапах преобразования входной величины в выходную, что позволяет проанализировать процесс измерений. Кроме того, на основе блок-схем выводятся аналитические выражения для определения функций преобразования средств измерений, работающих как в статическом, так и в динамическом режимах. При статических измерениях определяется передаточный коэффициент K (см. [1], формула (1.18)), в случае динамических измерений – передаточная функция $G(p)$ (см. [1], формула (1.55)). Алгоритм для вычисления любой из этих характеристик через значения путей и контуров имеет вид (см. [1], формула (1.18))

$$K = \frac{\sum_{k=1}^n P_k (1 - \sum_{i=1}^r S_i + \sum_{(i,j)=1}^s S_{(i,j)} - \dots)}{1 - \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{(i,j)=1}^p S_{(i,j)} - \dots}, \quad (22)$$

где n – количество путей блок-схемы; m – количество контуров; p – число контуров второго порядка; r – число контуров, не относящихся к соответствующему пути; s – число контуров второго порядка, не относящихся к данному пути; * – суммы контуров, не связанных на данном пути.

В дополнение к примеру, рассмотренному в учебном пособии [1] (с. 25–27), получим выражения для расчета передаточного коэффициента преобразователя постоянного электрического напряжения, электрическая схема которого приведена на рис. 9, а.

Пример 9. Определение передаточного коэффициента преобразователя постоянного

электрического напряжения

Блок-схема, представленная на рис. 9, б, включает один путь ($P_k = P_1$) и три контура ($S_i = S_1, S_2, S_3$), а также один контур второго порядка ($S_{(12)} = S_{(12)}$):

$$\begin{aligned}
 P_1: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow R_2 \rightarrow R_3^{-1} \rightarrow R_4 \rightarrow U_a; & \quad \left(R_1^{-1} \cdot R_2 \cdot R_3^{-1} \cdot R_4 = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right); \\
 S_1: R_1^{-1} \rightarrow R_2; & \quad \left(-R_1^{-1} \cdot R_2 = -\frac{R_2}{R_1} \right); \\
 S_2: R_3^{-1} \rightarrow R_4; & \quad \left(-R_3^{-1} \cdot R_4 = -\frac{R_4}{R_3} \right); \\
 S_3: R_2 \rightarrow R_3^{-1}; & \quad \left(-R_2 \cdot R_3^{-1} = -\frac{R_2}{R_3} \right); \\
 S_{(12)} = S_1 \cdot S_2; & \quad \left(\left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \left(-\frac{R_4}{R_3}\right) = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3} \right).
 \end{aligned}$$

В круглых скобках приведены значения соответствующих путей и контуров.

Схема на рис. 9, в включает один путь ($P_k = P_1$) и четыре контура ($S_i = S_1, S_2, S_3, S_4$):

$$\begin{aligned}
 P_1: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow R_4 \rightarrow U_a; & \quad \left(R_1^{-1} \cdot R_4 = \frac{R_4}{R_1} \right); \\
 S_1: R_1^{-1} \rightarrow R_3; & \quad \left(-R_1^{-1} \cdot R_3 = -\frac{R_3}{R_1} \right); \\
 S_2: R_1^{-1} \rightarrow R_4; & \quad \left(-R_1^{-1} \cdot R_4 = -\frac{R_4}{R_1} \right); \\
 S_3: R_3 \rightarrow R_2^{-1}; & \quad \left(-R_3 \cdot R_2^{-1} = -\frac{R_3}{R_2} \right); \\
 S_4: R_4 \rightarrow R_2^{-1}; & \quad \left(-R_4 \cdot R_2^{-1} = -\frac{R_4}{R_2} \right).
 \end{aligned}$$

Для блок-схемы, представленной на рис. 9, в, включающей пути и контуры только первого порядка, в соответствии с формулой (22) передаточный коэффициент

$$K = \frac{R_4/R_1}{1 + R_3/R_1 + R_4/R_1 + R_3/R_2 + R_4/R_2} =$$

$$= \frac{R_2 R_4}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_1 R_3 + R_1 R_4}.$$

Для блок-схемы, приведенной на рис. 9, б, в соответствии с формулой (23)

$$K = \frac{(R_2 R_4)/(R_1 R_3)}{1 + R_2/R_1 + R_4/R_3 + R_2/R_3 + [(-R_2/R_1)(-R_4/R_3)]} =$$

$$= \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_4 + R_1 R_2 + R_2 R_4}.$$

Поскольку различные блок-схемы, представленные на рис. 9, б и в, отображают действие одного и того же преобразователя, то выражения для расчета передаточного коэффициента K , полученные на основе этих блок-схем, совпадают. При заданных значениях сопротивлений R_i можно вычислить значение коэффициента K .

Пример 10. Определение передаточной функции преобразователя переменного электрического напряжения

Определение динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов можно осуществлять практически так же, как и статических. При этом строятся физико-математическая модель и блок-схема сигналов измерительного устройства. Нелинейные передаточные звенья с передаточными функциями дифференцирования и интегрирования можно в случае периодических сигналов заменить с использованием комплексного операторного представления линейными. Далее можно с применением понятий путей P , контуров S и их значений по формуле (23), аналогичной (22), рассчитать передаточную функцию $G(p)$:

$$G(p) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k (1 - \sum_{i=1}^r S_i + \sum_{(ij)=1}^s S_{(ij)} - \dots)}{1 - \sum_{i=1}^m S_i + \sum_{(ij)=1}^p S_{(ij)} - \dots}, \quad (23)$$

а затем с использованием замены $p = i\omega$ и комплексный коэффициент передачи $G(i\omega)$ измерительного устройства.

В тех случаях, когда в состав средств измерений входят преобразователи на основе электрических цепей переменного тока, содержащие реактивные элементы – конденсаторы, которые характеризуются электроемкостью, и катушки индуктивности,

необходимо учитывать комплексный характер реактивных сопротивлений конденсаторов и катушек. Использование оператора комплексной частоты $p = i\omega$ позволяет в случае синусоидального переменного тока перейти от нелинейных передаточных функций дифференцирования и интегрирования к линейным преобразованиям умножения и деления. Линейные коэффициенты преобразования синусоидального переменного тока в напряжение и напряжения в ток на катушке индуктивности имеют вид (см. [1], формула (1.57)):

$$G_{I \rightarrow U}^L = -pL \quad \text{и} \quad G_{U \rightarrow I}^L = -1/pL, \quad (24)$$

а на конденсаторе (см. [1], формула (1.59)) выглядят следующим образом:

$$G_{I \rightarrow U}^C = 1/pC \quad \text{и} \quad G_{U \rightarrow I}^C = pC. \quad (25)$$

Причем если в состав электрической цепи переменного тока входят активные элементы (резисторы R_i) и реактивные элементы одного типа (только индуктивности L_i), то коэффициенты преобразования $G_{I \rightarrow U}^L$ и $G_{U \rightarrow I}^L$ можно брать со знаком «+». Знак «-» обязателен в том случае, когда в цепи наряду с активными элементами имеются реактивные элементы разных типов (конденсаторы и катушки индуктивности), напряжения на которых изменяются в противофазе.

Рассмотрим в качестве примера преобразователь переменного

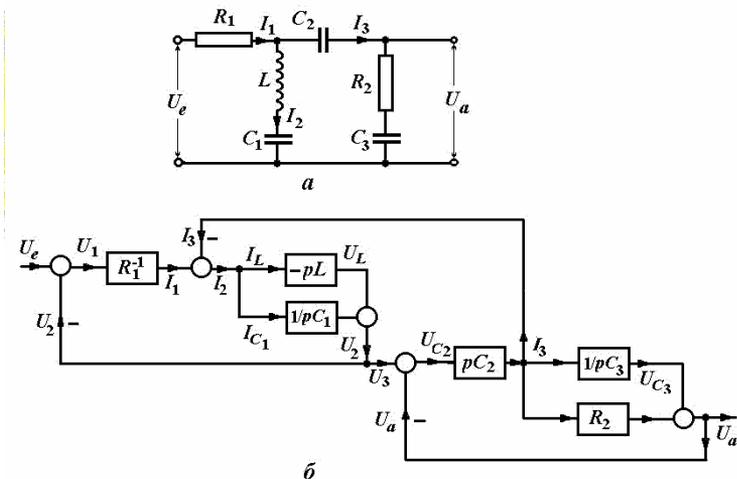


Рис. 10. Электрическая цепь (а) и соответствующая блок-схема (б) преобразования сигналов

электрического напряжения, электрическая схема которого приведена

на рис. 10, *a*. Входное напряжение U_e создает в цепи ток силой I_1 , который протекает через резистор с сопротивлением R_1 , а затем разветвляется на токи I_2 и I_3 . Переменный ток силой I_2 протекает через катушку индуктивности и конденсатор электроемкостью C_1 , а ток силой I_3 – через соединенные последовательно конденсатор C_2 , резистор R_2 и конденсатор C_3 . Входное напряжение перераспределяется между резистором R_1 и остальным участком цепи: $U_e = U_1 + U_2$; в свою очередь, падения напряжения на участках с токами I_2 и I_3 одинаковы ($U_3 = U_2$) и перераспределяются между элементами цепи, входящими в состав этих участков. Выходное напряжение U_a снимается с соединенных последовательно резистора R_2 и конденсатора C_3 .

Соотношения между токами и напряжениями на различных участках цепи можно представить системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = I_2 + I_3; \\ I_2 = I_L = I_{C_1}; \\ I_3 = I_{C_2} = I_{R_2} = I_{C_3}; \\ U_e = U_1 + U_2; \\ U_2 = U_L + U_{C_1}; \\ U_3 = U_2; \\ U_3 = U_{C_2} + U_a; \\ U_a = U_{R_2} + U_{C_3}; \\ U_i = I_i Z_i, \end{array} \right. \quad (26)$$

отображающих физико-математическую модель преобразователя.

На основании физико-математической модели построим соответствующую блок-схему преобразования сигналов (рис. 10, *б*), учитывая преобразования на каждом из элементов электрической цепи. Узлы суммирования блок-схемы отображают соответственно четвертое, первое, пятое, седьмое и восьмое уравнения системы (26). Узлы разветвления отображают равенства сил токов и напряжений, определяемые вторым, шестым и третьим уравнениями системы (26) соответственно.

Укажем передаточные коэффициенты каждого из элементов, входящих в состав преобразователя. При этом воспользуемся законом Ома для участка электрической цепи и соотношениями (24), (25).

Получим выражение для определения передаточной функции $G(p)$ преобразователя в соответствии с алгоритмом (23). Для этого определим пути и контуры блок-схемы (рис. 10, *б*) и их значения. Блок-схема

преобразования сигналов включает 4 пути, 6 контуров первого порядка и 4 контура второго порядка:

$$P_1: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow -pL \rightarrow pC_2 \rightarrow R_2 \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1} \cdot (-pL) \cdot pC_2 \cdot R_2 = -\frac{p^2 LC_2 R_2}{R_1} \right);$$

$$P_2: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow (pC_1)^{-1} \rightarrow pC_2 \rightarrow R_2 \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1} \cdot (pC_1)^{-1} \cdot pC_2 \cdot R_2 = \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} \right);$$

$$P_3: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow -pL \rightarrow pC_2 \rightarrow (pC_3)^{-1} \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1} \cdot (-pL) \cdot pC_2 \cdot (pC_3)^{-1} = -\frac{pLC_2}{R_1 C_3} \right);$$

$$P_4: U_e \rightarrow R_1^{-1} \rightarrow (pC_1)^{-1} \rightarrow pC_2 \rightarrow (pC_3)^{-1} \rightarrow U_a;$$

$$\left(R_1^{-1} \cdot (pC_1)^{-1} \cdot pC_2 \cdot (pC_3)^{-1} = \frac{C_2}{pR_1 C_1 C_3} \right);$$

$$S_1: R_1^{-1} \rightarrow (pC_1)^{-1};$$

$$\left(-\frac{1}{pC_1 R_1} \right);$$

$$S_2: R_1^{-1} \rightarrow (-pL);$$

$$\left(\frac{pL}{R_1} \right);$$

$$S_3: (-pL) \rightarrow pC_2;$$

$$(p^2 LC_2);$$

$$S_4: (pC_1)^{-1} \rightarrow pC_2;$$

$$\left(-\frac{C_2}{C_1} \right);$$

$$S_5: pC_2 \rightarrow R_2;$$

$$(-pC_2 \cdot R_2);$$

$$S_6: pC_2 \rightarrow \frac{1}{pC_3};$$

$$\left(-\frac{pC_2}{pC_3} = -\frac{C_2}{C_3} \right);$$

$$S_{15}:$$

$$\left[\left(-\frac{1}{pC_1 R_1} \right) (-pC_2 \cdot R_2) = \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} \right];$$

$$S_{16}:$$

$$\left[\left(-\frac{1}{pC_1 R_1} \right) \left(-\frac{C_2}{C_3} \right) = \frac{C_2}{pC_1 R_1 C_3} \right];$$

S_{25} :

$$\left[\left(\frac{pL}{R_1} \right) (-pC_2R_2) = -\frac{p^2LC_2R_2}{R_1} \right];$$

S_{26} :

$$\left[\left(\frac{pL}{R_1} \right) \left(-\frac{C_2}{C_3} \right) = -\frac{pLC_2}{R_1C_3} \right].$$

В скобках указаны значения путей и контуров.

Передаточная функция преобразователя

$$\begin{aligned}
 G(p) &= \frac{-\frac{p^2 LC_2 R_2}{R_1} + \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} - \frac{p LC_2}{R_1 C_3} + \frac{C_2}{p R_1 C_1 C_3}}{1 + \frac{1}{p C_1 R_1} - \frac{pL}{R_1} - p^2 LC_2 + \frac{C_2}{C_1} + p C_2 \cdot R_2 + \frac{C_2}{C_3} + \frac{C_2 R_2}{C_1 R_1} + \frac{C_2}{p C_1 R_1 C_3} - \frac{p^2 LC_2 R_2}{R_1} - \frac{p LC_2}{R_1 C_3}} \\
 &= \frac{-p^3 R_2 LC_1 C_2 C_3 + p R_2 C_2 C_3 - p^2 LC_1 C_2 + C_2}{p R_1 C_1 C_3} \\
 &= \frac{p R_1 C_1 C_3 + C_3 - p^2 LC_1 C_3 - p^3 R_1 LC_1 C_2 C_3 + p R_1 C_2 C_3 + p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 C_3 + p R_1 C_1 C_2 + p R_2 C_2 C_3 + C_2 - p^3 R_2 LC_1 C_2 C_3 - p^2 LC_1 C_2}{p R_1 C_1 C_3} \\
 &= \frac{-p^3 R_2 LC_1 C_2 C_3 + p R_2 C_2 C_3 - p^2 LC_1 C_2 + C_2}{p R_1 C_1 C_3 + C_3 - p^2 LC_1 C_3 - p^3 R_1 LC_1 C_2 C_3 + p R_1 C_2 C_3 + p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 C_3 + p R_1 C_1 C_2 + p R_2 C_2 C_3 + C_2 - p^3 R_2 LC_1 C_2 C_3 - p^2 LC_1 C_2} \\
 &= \frac{C_2(1 + p R_2 C_3) - p^2 LC_1 C_2(1 + p R_2 C_3)}{C_2 + C_3 + p R_1 C_1 C_3 + p R_1 C_2 C_3 + p R_1 C_1 C_2 + p R_2 C_2 C_3 + p^2 R_1 R_2 C_1 C_2 C_3 - p^2 LC_1 C_3 - p^2 LC_1 C_2 - p^3 R_1 LC_1 C_2 C_3 - p^3 R_2 LC_1 C_2 C_3} \\
 &= \frac{C_2(1 + p R_2 C_3)(1 - p^2 LC_1)}{C_2 + C_3 + p(R_1 C_1 C_3 + R_1 C_2 C_3 + R_1 C_1 C_2 + R_2 C_2 C_3) + p^2(R_1 R_2 C_1 C_2 C_3 - LC_1 C_3 - LC_1 C_2) - p^3(R_1 LC_1 C_2 C_3 + R_2 LC_1 C_2 C_3)}.
 \end{aligned}$$

Пример 11. Определение динамических характеристик пружинных весов

В качестве примера продолжим рассмотрение процесса измерения массы пружинными весами (см. рис. 11).

В общем случае процесс взвешивания осуществляется с временной задержкой, т. е. в динамическом режиме. Для того чтобы описать динамический режим измерения и временную задержку при взвешивании, необходимо записать уравнение динамики измерительного преобразователя. При этом помимо силы тяжести груза ($F = mg$) и силы упругости пружины ($F_{\text{упр}} = -ks$) нужно учесть силу трения (силу сопротивления среды). Сила сопротивления пропорциональна скорости v движения взвешиваемого груза

($F_{\text{сопр}} = -bv = -b \frac{ds}{dt}$), где b – коэффициент сопротивления среды.

Уравнение динамики движения взвешиваемого груза:

$$-b \frac{ds}{dt} - ks + (m + m_w)g = m_o \frac{d^2s}{dt^2}, \quad (27)$$

где s – удлинение пружины; k – коэффициент упругости пружины; $m_o = m + m_w$ – общая масса взвешиваемого груза (m) и самой измерительной системы (m_w); g – ускорение свободного падения.

Выражение (27) представляет собой дифференциальное уравнение, описывающее действие пружинных весов. Его можно переписать в виде

$$m_o \frac{d^2s}{dt^2} + b \frac{ds}{dt} + ks = (m + m_w)g. \quad (28)$$

Для построения блок-схемы сигналов выражение (28) можно с применением комплексной частоты $p = i\omega$ преобразовать к виду

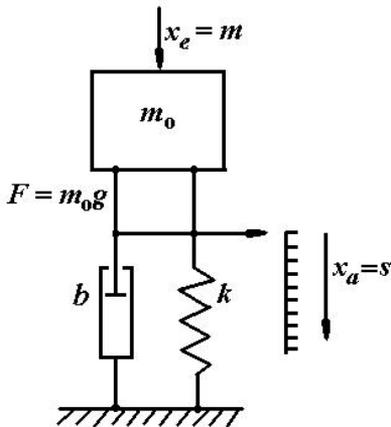


Рис. 11. Схематическое изображение измерения массы пружинными весами в динамическом режиме

$$m_0 p \frac{ds}{dt} + b \frac{ds}{dt} = F - F_{\text{упр}}; \quad (29)$$

$$(m_0 p + b) \frac{ds}{dt} = \Delta F, \quad (30)$$

что позволяет нелинейные преобразования заменить линейными. На рис. 12 представлена полная блок-схема сигналов пружинных весов с указанием коэффициентов передачи отдельных звеньев, где s_0 – удлинение пружины под действием общей массы m_0 . Все нелинейные преобразования, в т. ч. и преобразование, соответствующее нахождению второй производной от смещения s по времени: $\frac{d^2 s}{dt^2} = \ddot{s} = p^2 s$, заменены линейными.

В соответствии с блок-схемой определим передаточную функцию весов. Блок-схема (рис. 12) включает один путь и один контур:

$$P_1: \quad m \rightarrow g \rightarrow \frac{p}{pm_0 + b} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow s;$$

$$S_1: \quad \frac{p}{pm_0 + b} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow k.$$

В соответствии с (23) передаточная функция

$$G(p) = \frac{g \frac{p}{pm_0 + b} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{p}}{1 - (-k) \frac{p}{p^2 (pm_0 + b)}} = \frac{g}{k + p(b + m_0 p)}, \quad (31)$$

или

$$G(p) = \frac{g}{k + pb + p^2 m_0}. \quad (32)$$

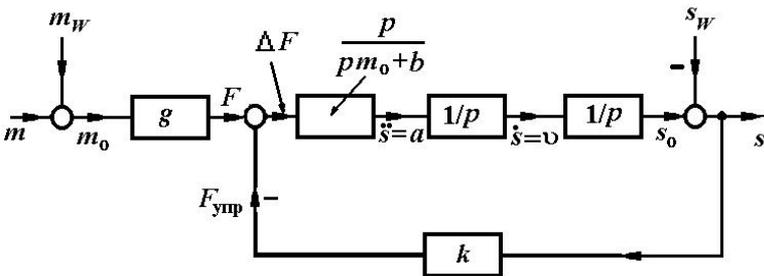


Рис. 12. Блок-схема сигналов при измерении массы пружинными весами в динамическом режиме

Передаточная функция весов в динамическом режиме измерений зависит от всех величин (k , m_0 и b), влияющих на инерционность средства измерения. При уравнивании и переходе в статическое состояние $p \rightarrow 0$ и $G(p) \rightarrow g/k = K_p$.

Итак, передаточная функция весов

$$G(p) = \frac{x_a}{x_e} = \frac{s}{m} = \frac{g}{k + bp + m_0 p^2}, \quad (33)$$

где $x_e = m$ – масса взвешиваемого груза; $x_a = s$ – перемещение стрелочного указателя, а их комплексный коэффициент передачи

$$G(i\omega) = \frac{g}{k + i\omega b - \omega^2 m_0}. \quad (34)$$

Сопоставляя выражения (33) и (34) с общими выражениями для комплексного коэффициента передачи (см. [1], формула (1.48))

$$G(i\omega) = \frac{K_p}{1 + i\omega \cdot 2T_1 - \omega^2 T_2^2} \quad (35)$$

и передаточной функции (см. [1], формула (1.50))

$$G(p) = \frac{K_p}{1 + 2T_1 p + T_2^2 p^2} \quad (36)$$

и учитывая, что собственная частота колебаний груза на пружине $\omega_0 = \sqrt{k/m_0}$, получим следующие соотношения:

$$K_p = g/k; \quad k = m_0 \omega_0^2; \quad b/k = 2T_1; \quad m_0/k = T_2^2; \quad T_2^2 = \frac{1}{\omega_0^2}. \quad (37)$$

Коэффициент затухания (демпфирования) колебаний (см. [1], формула (1.32))

$$D = T_1 / T_2^2 = \frac{b\omega_0^2}{2k}. \quad (38)$$

С учетом (37) и (38) выражение (32) для передаточной функции весов преобразуется к виду

$$G(p) = \frac{g/k}{1 + 2pD/\omega_0^2 + p^2/\omega_0^2}. \quad (39)$$

Отсюда получаем выражение для постоянной времени:

$$T_1 = D/\omega_0^2. \quad (40)$$

Комплексный коэффициент передачи весов

$$G(i\omega) = \frac{g/k}{(1 - \omega^2/\omega_0^2) + i \cdot 2D\omega/\omega_0^2} \quad (41)$$

объединяет в себе амплитудно-частотную и фазово-частотную динамические характеристики. Модуль комплексного коэффициента передачи, или амплитудно-частотная характеристика весов,

$$|G(i\omega)| = \frac{g/k}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4D^2\omega^2/\omega_0^4}}. \quad (42)$$

Фазово-частотная характеристика весов определяется соотношением

$$\delta\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2D\omega/\omega_0^2}{1 - \omega^2/\omega_0^2}. \quad (43)$$

Амплитудно-частотные характеристики пружинных весов при различных коэффициентах затухания D показаны на рис. 13. При малых значениях D амплитуда колебаний весов вблизи собственной частоты резко возрастает. При больших значениях коэффициента затухания переходный колебательный процесс установления весов переходит в процесс аperiodический.

С другой стороны, процесс измерения массы пружинными весами в динамическом режиме можно рассматривать с позиций временных динамических характеристик. При малых значениях коэффициента затухания измерения реализуются с запаздыванием и затухающим колебательным переходным процессом. Средство измерений характеризуется при этом переходной характеристикой с временной задержкой второго порядка (см. [1], формула (1.25) и рис. 1.7). При больших значениях D процесс установления весов является аperiodическим и весы можно охарактеризовать переходной характеристикой с временной задержкой первого порядка (см. [1], формула (1.24) и рис. 1.6).

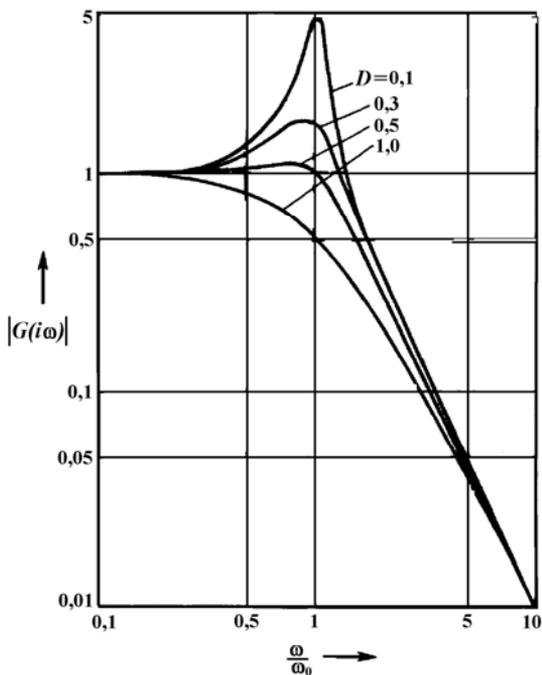


Рис. 13. Амплитудно-частотные характеристики пружинных весов при различных значениях коэффициента затухания D

2.4. Определение характеристик оптических спектральных приборов

Принцип действия оптических спектральных приборов основан чаще всего на пространственном разделении излучений, различаю-

щихся по длинам волн. Такое разделение возможно вследствие дисперсии или дифракции электромагнитных световых волн. Наиболее универсальные рабочие элементы оптических спектральных приборов – дисперсионные призмы и дифракционные решетки. Основными характеристиками способности призм и решеток к пространственному разделению спектральных линий с близкими значениями длин волн являются угловая дисперсия и разрешающая способность.

Угловая дисперсия характеризует угловую ширину спектра и определяется как угол между двумя соседними спектральными линиями, длины волн которых различаются на единицу:

$$D = \Delta\beta / \Delta\lambda . \quad (44)$$

Разрешающая способность спектрального прибора определяется отношением длины волны λ анализируемого излучения к наименьшему интервалу $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ длин волн, который еще может разрешить спектральный прибор:

$$R = \lambda / \Delta\lambda . \quad (45)$$

Угловая дисперсия спектральной призмы $\Delta\delta / \Delta\lambda$ зависит от материала призмы (показателя преломления n и дисперсии $dn/d\lambda \approx \Delta n / \Delta\lambda$), преломляющего угла γ призмы и угла падения i света на призму (а следовательно, от углов i_1 и i_2 преломления на каждой из граней призмы) (см. [1], формула (2.25) и рис. 2.18):

$$D = \frac{\Delta\delta}{\Delta\lambda} = \frac{\sin \gamma}{\sin i_1 \cdot \cos i_2} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} . \quad (46)$$

Разрешающая способность спектральной призмы определяется в соответствии с критерием Рэлея исходя из того, что угловое расстояние между максимумами двух соседних спектральных линий больше или равно угловому расстоянию от максимума до ближайшего минимума. Она оказывается равной произведению длины l основания призмы на дисперсию ее показателя преломления (см. [1], формула (2.28)):

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = l \frac{\Delta n}{\Delta\lambda} . \quad (47)$$

Соответствующие характеристики дифракционной решетки рассмотрим более подробно.

Пример 12. Определение спектральных характеристик дифракционной решетки

Пусть имеется прозрачная дифракционная решетка, ширина заштрихованной области которой $W = 2,5$ см. Период решетки $d = 5$ мкм, ширина ее прозрачных щелей $b = 1$ мкм. Определим максимально возможный порядок спектра m_{\max} , в котором с применением решетки можно наблюдать спектральную линию с длиной волны $\lambda = 500$ нм, а также

угловую дисперсию решетки и максимальное значение ее разрешающей способности для света с данной длиной волны.

При нормальном падении анализируемого излучения на дифракционную решетку условие получения главных дифракционных максимумов (см. [1], формула (2.23) и рис. 2.19) имеет вид

$$d \sin \beta = \pm m \lambda . \quad (48)$$

Максимально возможному значению порядка спектра m соответствует максимальное значение $\sin \beta = 1$ для угла отклонения $\beta = 90^\circ$. Поэтому

$$m_{\max} = d / \lambda . \quad (49)$$

Вычисления по формуле (49) дают значение $m_{\max} = 10$, которое в точности соответствует углу отклонения $\beta = 90^\circ$. Однако световые лучи, отклоненные дифракционной решеткой на угол $\beta = 90^\circ$, наблюдаться не могут. Поэтому в качестве m_{\max} следует взять значение на единицу меньше ($m_{\max} = 9$). Спектральная линия с заданной длиной волны в спектре девятого порядка должна наблюдаться при угле отклонения $\beta = \arcsin \left(9 \frac{\lambda}{d} \right)$. Согласно вычислениям, $\beta \approx 64,16^\circ$. В силу симметрии дифракционной картины, получаемой с применением решетки, должно наблюдаться 18 спектральных линий (по обе стороны от центрального максимума) с длиной волны λ .

Однако не все из этих линий будут иметь достаточную интенсивность. Наиболее интенсивными и, следовательно, доступными для наблюдения будут те из спектральных линий, которые расположены в пределах угловой ширины центрального дифракционного максимума, даваемого каждой из щелей решетки. Условие получения минимумов интенсивности при дифракции света на одной щели шириной b :

$$b \sin \beta = \pm m \lambda . \quad (50)$$

Половине угловой ширины центрального дифракционного максимума, даваемого каждой из щелей решетки и расположенного между двумя симметричными первыми ($m = 1$) минимумами, соответствует условие:

$$\sin \beta = \lambda / b . \quad (51)$$

Подставим выражение (51) в условие (48) получения главных дифракционных максимумов решетки:

$$d \frac{\lambda}{b} = m_{\max} \lambda . \quad (52)$$

Откуда

$$m_{\max} = d/b . \quad (53)$$

Вычисление по формуле (53) дает значение $m_{\max} = 5$. Следовательно, в дифракционном спектре будет наблюдаться пять порядков с интенсивными, доступными для наблюдения и анализа спектральными линиями. Общее количество интенсивных спектров равно десяти. Спектральная линия с длиной волны $\lambda = 500$ нм в спектре пятого порядка будет наблюдаться под углом $\beta = 30^\circ$.

Выведем выражение для угловой дисперсии дифракционной решетки. Дифференцируя выражение (48), получим

$$d \cos \beta \cdot \delta \beta = m \cdot \delta \lambda .$$

Откуда угловая дисперсия

$$D = \frac{\Delta \beta}{\Delta \lambda} = \frac{\delta \beta}{\delta \lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} . \quad (54)$$

Выражая $\cos \beta$ из (48), получим формулу для определения угловой дисперсии решетки через ее период и длину волны спектральной линии:

$$D = \frac{m}{\sqrt{d^2 - m^2 \lambda^2}} . \quad (55)$$

Вычислим значения угловой дисперсии решетки для длины волны $\lambda = 500$ нм в спектрах пятого и первого порядков:

$$D_5 = \frac{5}{\sqrt{5000^2 - 5^2 \cdot 500^2}} = 1,155 \cdot 10^{-3} \text{ нм}^{-1};$$

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{5000^2 - 1^2 \cdot 500^2}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ нм}^{-1} .$$

Полученный результат означает, что в спектре пятого порядка соседние спектральные линии, длины волн которых различаются на 1 нм, будут отклонены на углы β , значения которых различаются на $\Delta \beta = 1,155 \cdot 10^{-3}$ рад $= 6,62 \cdot 10^{-2} \circ = 3,97'$. Кроме того, значение D зависит от порядка спектра и периода решетки. В спектре первого порядка значение $\Delta \beta = 2 \cdot 10^{-4}$ рад $= 1,15 \cdot 10^{-2} \circ = 0,69' = 41,25''$.

Определим максимальное значение соответствующей критерию Рэля (см. [1], формула (2.26) и рис. 2.21) разрешающей способности решетки:

$$R_{\max} = m_{\max} N = m_{\max} \frac{W}{d} . \quad (56)$$

Вычисленное значение (для $m_{\max} = 5$) $R_{\max} = 25\,000$. Поскольку $R = \lambda/\Delta\lambda$, то полученный результат означает, что в спектре пятого порядка дифракционная решетка сможет разрешить соседние спектральные линии вблизи $\lambda = 500$ нм, длины волн которых различаются на $\Delta\lambda = 0,02$ нм.

2.5. Моделирование распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий

Регистрация и спектрометрия характеристического излучения, испускаемого атомами исследуемых веществ, лежат в основе рентгеновского спектрального анализа веществ. Вследствие расщепления энергетических уровней атомов, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием, рентгеновские спектры имеют дублетную структуру. Наиболее интенсивными являются спектральные линии K_{α} -серии рентгеновского излучения. Распределение интенсивности спектрального дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия по энергиям представлено в качестве примера на рис. 2.51 пособия [1]. Интенсивность $K_{\alpha 1}$ -линии всегда больше интенсивности $K_{\alpha 2}$ -линии. Профиль распределения интенсивности каждой из линий дублета можно моделировать нормальным распределением Гаусса. Ширина спектральной линии связана с временем жизни соответствующего возбужденного состояния атома, а также определяется разрешающей способностью спектрального прибора. Спектроскопия с дисперсией по длинам волн основана на дифракции рентгеновского излучения на кристаллическом анализаторе. В прил. 7 пособия [1] приведены приближенные значения энергии квантов K_{α} -излучения и достаточно точные значения длин волн $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ - рентгеновских спектральных линий атомов элементов. Построение распределения интенсивности спектральных линий позволяет сформировать представления о структуре спектров характеристического рентгеновского излучения, а также о структуре атомных спектров вообще.

При расчете распределений интенсивности спектральных линий характеристического рентгеновского излучения атомов распределение интенсивности каждой из линий спектрального K_{α} -дублета будем моделировать нормальным распределением Гаусса. В общем случае распределение Гаусса выражается функцией

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad (57)$$

где μ – значение аргумента x , соответствующее максимуму функции $y(x)$; σ – стандартное отклонение.

В нашем случае нормальное распределение для интенсивности спектральной линии можно представить соотношением

$$I(\lambda) = I_{\max} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_{\max}}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (58)$$

где $I(\lambda)$ – интенсивность спектральной линии в зависимости от длины волны λ ; I_{\max} – значение интенсивности спектральной линии в максимуме распределения; λ_{\max} – длина волны, соответствующая максимуму распределения интенсивности спектральной линии; σ – стандартное отклонение, определяющее ширину моделируемой спектральной линии. При заданных значениях I_{\max} , λ_{\max} и σ по формуле (58) можно рассчитать распределение интенсивности спектральной линии по длинам волн.

Используя подстановку

$$\frac{x - \mu}{\sigma} = u \quad (59)$$

и получая при $\mu = 0$ $\sigma = 1$, от выражения (57) можно перейти к нормированной функции гауссового распределения

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right). \quad (60)$$

Значения нормированной функции (60) нормального распределения в зависимости от параметра u приведены в табл. 1.

Пример 13. Построение распределения интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -серии алюминия по длинам волн

При построении распределения интенсивности спектральной линии по длинам волн параметр

$$u = \frac{\lambda - \lambda_{\max}}{\sigma}, \quad (61)$$

и функция распределения (58) будет иметь вид

$$I(\lambda) = I_{\max} \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right), \quad (62)$$

или с учетом формулы (60)

$$I(\lambda) = \sqrt{2\pi} I_{\max} y(u), \quad (63)$$

где $y(u)$ – значения нормированной функции распределения, взятые из табл. 1.

Таблица 1

Значения нормированной функции $y(u)$ нормального распределения Гаусса

u	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,398 94	0,398 92	0,398 86	0,398 76	0,398 62	0,398 44	0,398 22	0,397 97	0,397 67	0,397 33
0,1	0,396 95	0,396 54	0,396 08	0,395 59	0,395 05	0,394 48	0,393 87	0,393 22	0,392 53	0,391 81
0,2	0,391 04	0,390 24	0,389 40	0,388 53	0,387 62	0,386 67	0,385 68	0,384 66	0,383 61	0,382 51
0,3	0,381 39	0,380 23	0,379 03	0,377 80	0,376 54	0,375 24	0,373 91	0,372 55	0,371 15	0,369 53
0,4	0,368 27	0,366 78	0,365 26	0,363 71	0,362 13	0,360 53	0,358 89	0,357 23	0,355 53	0,353 81
0,5	0,352 07	0,350 29	0,348 49	0,346 67	0,344 82	0,342 94	0,341 05	0,339 12	0,337 18	0,335 21
0,6	0,333 22	0,331 21	0,329 18	0,327 13	0,325 06	0,322 97	0,320 86	0,318 74	0,316 59	0,314 43
0,7	0,312 25	0,310 06	0,307 85	0,305 63	0,303 39	0,301 14	0,298 87	0,296 59	0,294 31	0,292 00
0,8	0,289 69	0,287 37	0,285 04	0,282 69	0,280 34	0,277 87	0,275 62	0,273 24	0,270 86	0,268 48
0,9	0,266 09	0,263 69	0,261 29	0,258 88	0,256 47	0,254 06	0,251 64	0,249 23	0,246 81	0,244 39

Продолжение табл. 1

u	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,0	0,241 97	0,239 55	0,237 13	0,234 71	0,232 30	0,229 88	0,227 47	0,225 06	0,222 65	0,220 25
1,1	0,217 85	0,215 46	0,213 07	0,210 69	0,208 31	0,205 94	0,203 57	0,201 21	0,198 86	0,196 52
1,2	0,194 19	0,191 86	0,189 54	0,187 24	0,184 94	0,182 65	0,180 37	0,178 10	0,175 85	0,173 60
1,3	0,171 37	0,169 15	0,166 94	0,164 74	0,162 56	0,160 38	0,158 22	0,156 08	0,153 95	0,151 83
1,4	0,149 37	0,147 64	0,145 56	0,143 50	0,141 46	0,139 43	0,137 42	0,135 42	0,133 44	0,131 47
1,5	0,129 52	0,127 58	0,125 66	0,123 76	0,121 88	0,120 51	0,118 16	0,116 32	0,114 50	0,112 70
1,6	0,110 92	0,109 15	0,107 41	0,105 67	0,103 96	0,102 26	0,100 59	0,098 92	0,097 28	0,095 66
1,7	0,094 05	0,092 46	0,090 89	0,089 33	0,087 80	0,086 28	0,084 78	0,083 29	0,081 83	0,080 38
1,8	0,078 95	0,077 54	0,076 14	0,074 77	0,073 41	0,072 06	0,070 74	0,069 43	0,068 14	0,066 87
1,9	0,065 62	0,064 38	0,063 16	0,061 95	0,060 77	0,059 59	0,058 44	0,057 30	0,056 18	0,055 08
2,0	0,053 99	0,052 92	0,051 86	0,050 82	0,049 80	0,048 79	0,047 80	0,046 32	0,045 86	0,044 91

Окончание табл. 1

<i>u</i>	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
2,1	0,043 98	0,043 07	0,04217	0,041 28	0,040 41	0,039 55	0,038 71	0,037 88	0,037 06	0,036 26
2,2	0,035 47	0,034 70	0,033 94	0,033 19	0,032 46	0,031 74	0,031 03	0,030 34	0,029 65	0,028 98
2,3	0,028 33	0,027 68	0,027 05	0,026 43	0,025 82	0,025 22	0,024 63	0,024 06	0,023 49	0,022 94
2,4	0,022 39	0,021 86	0,021 34	0,020 83	0,020 33	0,019 84	0,019 36	0,018 89	0,018 42	0,017 97
2,5	0,017 53	0,017 09	0,016 67	0,016 25	0,015 85	0,015 45	0,015 06	0,014 68	0,014 31	0,013 94
2,6	0,013 58	0,013 23	0,012 89	0,012 56	0,012 33	0,011 91	0,011 60	0,011 30	0,011 00	0,010 71
2,7	0,010 42	0,010 14	0,009 87	0,009 61	0,009 35	0,009 09	0,008 85	0,008 61	0,008 37	0,008 14
2,8	0,007 92	0,007 70	0,007 48	0,007 27	0,007 07	0,006 87	0,006 68	0,006 49	0,006 31	0,006 13
2,9	0,005 95	0,005 78	0,005 62	0,005 45	0,005 30	0,005 14	0,004 99	0,004 85	0,004 71	0,004 57
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3,0	0,004 43	0,003 27	0,002 38	0,001 72	0,001 23	0,000 87	0,000 61	0,000 42	0,000 29	0,000 20

Значения длин волн K_{α} -излучения атомов элементов приведены в прил. 7 [1]. Для атомов алюминия длина волны $K_{\alpha 1}$ -излучения $\lambda_1 = \lambda_{1\max} = 8,339\ 34\ \text{Å}$, а длина волны $K_{\alpha 2}$ -излучения $\lambda_2 = \lambda_{2\max} = 8,341\ 73\ \text{Å}$. Этим значениям длин волн соответствуют максимумы интенсивности спектральных линий. Отношение максимальных значений интенсивности спектральных линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ примем равным $2 : 1$; максимальное значение интенсивности $K_{\alpha 1}$ -линии примем равным единице ($I_{1\max} = 1$ отн. ед.), тогда $I_{2\max} = 0,5$ отн. ед. Разность $\Delta\lambda = \lambda_{2\max} - \lambda_{1\max} = 0,002\ 39\ \text{Å}$; значение стандартного отклонения примем $\sigma = 0,0015\ \text{Å}$.

Результаты расчетов, проведенных с применением соотношений (61), (62) и данных табл. 1, представлены в табл. 2. При вычислениях для каждой из спектральных линий определен по формуле (61) модуль параметра u в интервале значений длин волн λ , в которых значения $u \leq 3$. Значения u определены также для длин волн $\lambda_{1\max}$ и $\lambda_{2\max}$. Затем с использованием данных табл. 1 по формуле (63) вычислены относительные значения интенсивности I каждой из $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ -спектральных линий. В последней колонке табл. 2 приведены значения суммарной интенсивности обеих спектральных линий K_{α} -серии в зависимости от длины волны.

По расчетным данным построены графические зависимости интенсивности спектральных линий от длины волны рентгеновского излучения. В результате получено распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия по длинам волн (рис. 14). Такое же распределение, только по энергии, приведено в учебном пособии [1] на рис. 2.51. В силу небольшой разности $\Delta\lambda = \lambda_{2\max} - \lambda_{1\max}$ суммарное K_{α} -излучение алюминия можно считать практически монохроматичным. Это позволяет использовать K_{α} -излучение алюминия, а также магния в качестве возбуждающего эмиссию фотоэлектронов в рентгеновских фотоэлектронных спектрометрах.

Таблица 2

**Результаты расчетов распределения интенсивности
спектральных линий K_{α} -излучения атомов алюминия**

$\lambda, \text{Å}$	$K_{\alpha 1} : \lambda_1 = 8,339\ 34 \text{ Å}$		$K_{\alpha 2} : \lambda_2 = 8,341\ 73 \text{ Å}$		K_{α}
	u	$I, \text{отн. ед.}$	u	$I, \text{отн. ед.}$	$I, \text{отн. ед.}$
8,3350	2,89	0,015			0,015
8,3355	2,56	0,038			0,038
8,3360	2,23	0,083			0,083
8,3365	1,89	0,168			0,168
8,3370	1,56	0,296			0,296
8,3375	1,23	0,469	2,82	0,009	0,478
8,3380	0,89	0,673	2,49	0,023	0,696
8,3385	0,56	0,855	2,15	0,050	0,905
8,3390	0,23	0,974	1,82	0,095	1,069
8,33934	0	1,000	1,59	0,141	1,141
8,3395	0,11	0,994	1,49	0,165	1,159
8,3400	0,44	0,908	1,15	0,258	1,166
8,3405	0,77	0,743	0,82	0,357	1,100
8,3410	1,11	0,540	0,49	0,443	0,983
8,3415	1,44	0,355	0,15	0,494	0,849
8,34173	1,59	0,282	0	0,500	0,782
8,3420	1,77	0,209	0,18	0,492	0,701
8,3425	2,11	0,108	0,51	0,439	0,547
8,3430	2,44	0,051	0,85	0,348	0,399
8,3435	2,77	0,022	1,18	0,249	0,271
8,3440			1,51	0,160	0,160
8,3445			1,85	0,090	0,090
8,3450			2,18	0,046	0,046
8,3455			2,51	0,021	0,021
8,3460			2,85	0,009	0,009

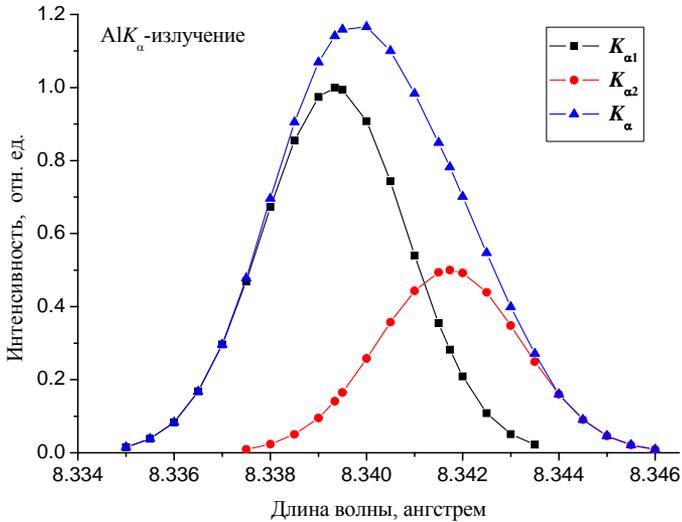


Рис. 14. Распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов алюминия по длинам волн

Пример 14. Построение распределения интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -серии платины по длинам волн

Для платины (см. [1], прил. 7) длины волн $K_{\alpha 1}$ - и $K_{\alpha 2}$ -излучения, которым соответствуют максимумы интенсивности спектральных линий, — $\lambda_1 = \lambda_{1\max} = 0,185\,511\text{ \AA}$ и $\lambda_2 = \lambda_{2\max} = 0,190\,381\text{ \AA}$. Разность $\lambda_{2\max} - \lambda_{1\max} = 0,004\,87\text{ \AA}$. Отношение максимальных значений интенсивностей спектральных линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ также примем равным 2 : 1; максимальное значение интенсивности $K_{\alpha 1}$ -линии примем равным единице ($I_{1\max} = 1$ отн. ед.), тогда $I_{2\max} = 0,5$ отн. ед.; значение стандартного отклонения $\sigma = 0,0015\text{ \AA}$.

Результаты расчетов, проведенных с применением соотношений (61), (62) и значений нормированной функции Гаусса (табл. 1), представлены в табл. 3, а график распределения интенсивности спектральных линий — на рис. 15.

Распределение интенсивности, приведенное на рис. 15, показывает, что спектральный дублет K_{α} -излучения платины практически полностью разрешается в соответствии с критерием Рэлея (см. [1], рис. 2.21).

**Результаты расчетов распределения интенсивности
спектральных линий K_{α} -излучения атомов платины**

$\lambda, \text{Å}$	$K_{\alpha 1} : \lambda_1 = 0,185\ 511 \text{ Å}$		$K_{\alpha 2} : \lambda_2 = 0,190\ 381 \text{ Å}$		K_{α}
	u	$I, \text{отн. ед.}$	u	$I, \text{отн. ед.}$	$I, \text{отн. ед.}$
0,1810	3,01	0,011			0,011
0,1815	2,67	0,028			0,028
0,1820	2,34	0,065			0,065
0,1825	2,01	0,133			0,133
0,1830	1,67	0,245			0,245
0,1835	1,34	0,407			0,407
0,1840	1,01	0,600			0,600
0,1845	0,67	0,799			0,799
0,1850	0,34	0,944			0,944
0,185511	0	1,000			1,000
0,1860	0,33	0,947	2,92	0,007	0,954
0,1865	0,66	0,804	2,59	0,017	0,821
0,1870	0,99	0,613	2,25	0,040	0,653
0,1875	1,33	0,413	1,92	0,079	0,492
0,1880	1,66	0,252	1,59	0,141	0,393
0,1885	1,99	0,138	1,25	0,229	0,367
0,1890	2,33	0,066	0,92	0,327	0,393
0,1895	2,66	0,029	0,59	0,420	0,449
0,1900	2,99	0,011	0,25	0,485	0,496
0,190381			0	0,500	0,500
0,1905			0,08	0,498	0,498
0,1910			0,41	0,460	0,460
0,1915			0,75	0,377	0,377
0,1920			1,08	0,279	0,279
0,1925			1,41	0,185	0,185

$\lambda, \text{Å}$	$K_{\alpha 1}: \lambda_1 = 0,185\ 511 \text{ Å}$		$K_{\alpha 2}: \lambda_2 = 0,190\ 381 \text{ Å}$		K_{α}
	u	$I, \text{отн. ед.}$	u	$I, \text{отн. ед.}$	$I, \text{отн. ед.}$
0,1930			1,75	0,108	0,108
0,1935			2,08	0,057	0,057
0,1940			2,41	0,027	0,027
0,1945			2,75	0,011	0,011

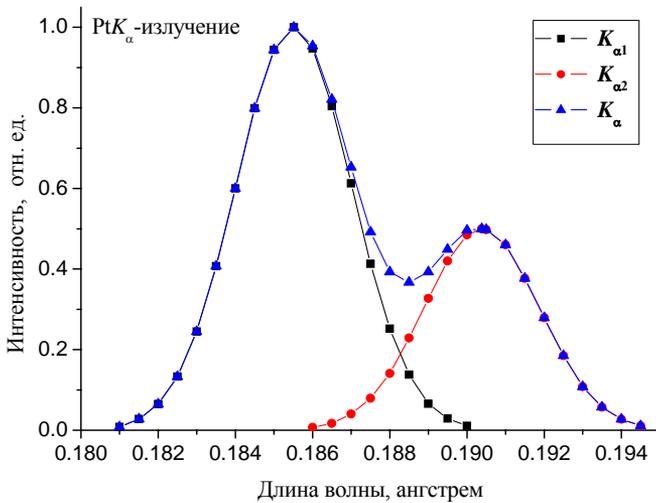


Рис. 15. Распределение интенсивности спектральных линий дублета K_{α} -серии излучения атомов платины по длинам волн

2.6. Определение состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии

Фотоэлектронный спектр представляет собой распределение по кинетическим энергиям фотоэлектронов, эмиттируемых из основных энергетических уровней атомов исследуемого вещества под действием рентгеновского излучения. Для удобства анализа в фотоэлектронных спектрах по оси энергий вместо кинетической энергии E_k фотоэлектронов откладываются значения энергий связи электронов $E_B(k)$

в атомах (см. [1], формула (2.107)). Элементный анализ проводится путем сравнения экспериментально полученных фотоэлектронных спектральных линий исследуемого образца с известными значениями энергий связи электронов в атомах элементов, представленными в соответствующих таблицах (см. [1], прил. 8).

Пример 15. Определение элементного состава образца по обзорному фотоэлектронному спектру

На рис. 16 представлен спектр фотоэлектронов, возбужденных рентгеновским MgK_{α} -излучением с поверхности покрытия, сформированного на стеклоуглероде осаждением иридия и свинца.

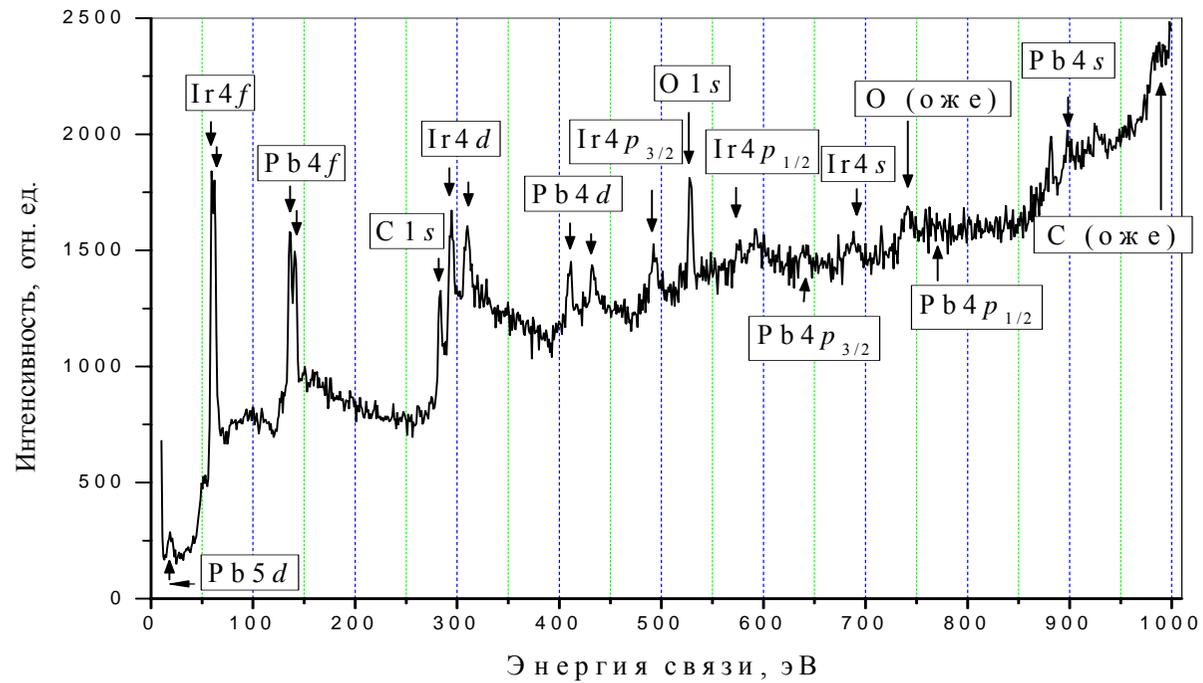


Рис. 16. Спектр фотоэлектронов, возбужденных рентгеновским MgK_{α} -излучением с поверхности покрытия, сформированного на стеклоглугероде осаждением иридия и свинца

Спектр снят в интервале кинетических энергий фотоэлектронов ~ 1000 эВ (соответствующие значения энергии связи лежат в интервале от 10 до 1000 эВ), т. е. является обзорным.

Экспериментальные значения энергий связи могут вследствие энергетических сдвигов отличаться от табличных в пределах нескольких электронвольт. Однако, несмотря на это, соответствующие фотоэлектронные линии идентифицируются достаточно надежно. Для идентификации элементов, атомы которых имеют более сложное электронное строение, анализируется несколько энергетических уровней. При этом в спектре берется наиболее интенсивная спектральная линия, входящая, как правило, в спектральный дублет, наличие которого обусловлено расщеплением энергетических уровней атомов на подуровни вследствие спин-орбитального взаимодействия. Измеренное значение энергии связи, соответствующее данной линии, сравнивается с табличными значениями, которые выделены в прил. 8 [1] жирным шрифтом. Результаты обработки спектра, приведенного на рис. 16, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты обработки фотоэлектронного спектра

Энергия связи, эВ		Атом элемента	Энергетический уровень	Сечение фото-ионизации, отн. ед.	Интенсивность линии, отн. ед.
эксп.	табл.				
19	20; 22	Pb	$5d_{5/2,3/2}$	0,212	–
59	60	Ir	$4f_{7/2}$	8,03	1350
62	63	Ir	$4f_{5/2}$	6,30	–
136	138	Pb	$4f_{7/2}$	12,80	810
141	143	Pb	$4f_{5/2}$	10,0	–
284	284	C	$1s_{1/2}$	1,00	470
294	295	Ir	$4d_{5/2}$	8,90	–
310	312	Ir	$4d_{3/2}$	6,05	–
411	413	Pb	$4d_{5/2}$	10,4	–
432	435	Pb	$4d_{3/2}$	6,94	–

Энергия связи, эВ		Атом элемента	Энергетический уровень	Сечение фото- ионизации, отн. ед.	Интенсивность линии, отн. ед.
эксп.	табл.				
492	495	Ir	$4p_{3/2}$	4,34	–
528	532	O	$1s_{1/2}$	2,85	495
577	577	Ir	$4p_{1/2}$	1,55	–
639	645	Pb	$4p_{3/2}$	4,86	–
688	690	Ir	$4s_{1/2}$	1,43	–
741	743	O	Ожé-линия	–	–
770	764	Pb	$4p_{1/2}$	1,47	–
898	894	Pb	$4s_{1/2}$	1,46	–
988	993	C	Ожé-линия	–	–

В нашем примере в качестве такой линии можно выбрать линию, которой соответствует измеренное значение энергии связи, равное 59 эВ. Подходящей линией является линия с табличным значением энергии связи 60 эВ, обусловленная эмиссией фотоэлектронов с $4f_{7/2}$ -уровней атомов иридия. Анализируя табличные данные прил. 8 [1], находим спектральные линии, соответствующие эмиссии электронов из других энергетических уровней атомов иридия, и вносим табличные значения энергии связи, а также обозначения энергетических уровней в табл. 4. При этом идентифицируется семь спектральных линий атомов иридия.

После этого часть спектральных линий остается все еще не идентифицированной. Из оставшихся линий выбираем наиболее интенсивную и принадлежащую спектральному дублету. Такой является линия с измеренным значением энергии связи, равным 136 эВ. Этой линии соответствуют эмиссия фотоэлектронов из $4f_{7/2}$ -уровней атомов свинца. Анализ табличных данных прил. 8 [1] позволяет идентифицировать набор из восьми спектральных линий, обусловленных эмиссией электронов из атомов свинца.

Еще две из оставшихся спектральных линий удастся идентифицировать как ожé-линии атомов углерода и кислорода.

Затем из прил. 9 [1] выпишем значения сечений фотоионизации атомов элементов, входящих в состав анализируемого слоя исследуемого образца. Сечение фотоионизации имеет тот же смысл, что и эффективное сечение взаимодействия (см. [1], с. 178), и в данном случае характеризует вероятность процесса эмиссии электрона из определенного энергетического состояния атома под воздействием рентгеновского фотона. Значение сечения фотоионизации зависит от природы атома и конкретного энергетического уровня. Наиболее интенсивным спектральным линиям одного и того же элемента соответствуют большие значения сечений фотоионизации. В прил. 9 [1] значения сечений фотоионизации σ энергетических уровней атомов элементов приведены по отношению к сечению фотоионизации $1s$ -уровня атомов углерода (значение σ для $1s$ -уровня принято равным единице), и по этой причине они безразмерны, или выражены в относительных единицах.

Определим также интенсивности наиболее характерных спектральных линий каждого из элементов. Интенсивность линии определяется как площадь под спектральным пиком за вычетом фона. Однако определение площади под пиком обзорного фотоэлектронного спектра затруднительно. Поэтому для оценочного расчета относительного содержания атомов можно интенсивность спектральных линий определять как их высоту над уровнем фона. Определенные таким образом значения интенсивности приведены в табл. 4.

По отношению интенсивностей спектральных линий оценим относительное содержание атомов элементов в анализируемом слое. При этом можно применить приближенное соотношение (2.111) [1]. Оценку относительного содержания атомов иридия, свинца и кислорода проведем по отношению к углероду. Тогда относительное содержание каждого из элементов будет равным

$$\frac{n_i}{n_c} \approx \frac{\sigma_c I_i}{\sigma_i I_c}, \quad (64)$$

где σ – значения сечений фотоионизации атомов i -го элемента и углерода из определенных энергетических состояний; I – интенсивности соответствующих спектральных линий.

Результаты вычислений с использованием соответствующих значений интенсивностей и сечений фотоионизации (табл. 4) приведены в табл. 5.

Значительное относительное содержание атомов углерода и кислорода может быть объяснено тем, что толщина анализируемого методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии слоя составляет всего несколько нанометров, т. е. анализу подвергается тонкий приповерхностный слой вещества, включающий небольшое число

молекулярных слоев. Атомы углерода и кислорода входят в состав адсорбированных на поверхности газов, а также в состав покрытия.

Таблица 5

Результаты оценочных расчетов относительного содержания атомов элементов в анализируемом слое покрытия

Элемент	Относительное содержание
Иридий	0,36
Свинец	0,14
Кислород	0,37
Углерод	1,00

Пример 16. Анализ особенностей электронной структуры атомов палладия в составе покрытия

При исследовании особенностей электронной структуры атомов элементов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии спектр снимается по участкам в пределах 10–20 эВ вблизи наиболее характерных спектральных линий атомов, входящих в состав анализируемого слоя.

На рис. 17 приведены спектры фотоэлектронов, возбужденных с $3d$ -уровня атомов палладия, входящих в состав покрытия, сформированного на стеклоуглероде (GC) осаждением палладия и вольфрама. Приведены спектры, снятые с самой поверхности покрытия (без травления поверхности) и после непродолжительного (в течение нескольких минут) травления анализируемой поверхности ускоренными ионами Ag^+ при плотности ионного тока в несколько $\mu A/cm^2$. Спектры сняты на участке в пределах энергий связи $\sim(334\text{--}349\text{ эВ})$ с интервалом значений кинетических энергий фотоэлектронов, составляющим 0,2 эВ. Этому участку соответствует эмиссия электронов с $3d_{5/2}$ - и $3d_{3/2}$ -подуровней атомов палладия; табличные значения энергии связи равны соответственно 335 и 340 эВ (см. прил. 8 [1]).

Спектры математически обработаны путем однократного сглаживания по пяти соседним точкам, вычитания фона и последующего разложения на составляющие спектральные пики по модели Гаусса. При разложении спектров обнаруживается, что исследуемый участок спектра представляет собой совокупность двух спектральных дублетов с соответствующими значениями энергий связи: вблизи 336 и 341 эВ; 338 и 343 эВ.

Первый из дублетов можно идентифицировать как обусловленный эмиссией электронов из атомов палладия в металлическом состоянии (Pd_{Me}); второй дублет с более высокими значениями энергий связи – эмиссией электронов из атомов, находящихся в определенной степени окисления (Pd_{Ox}).

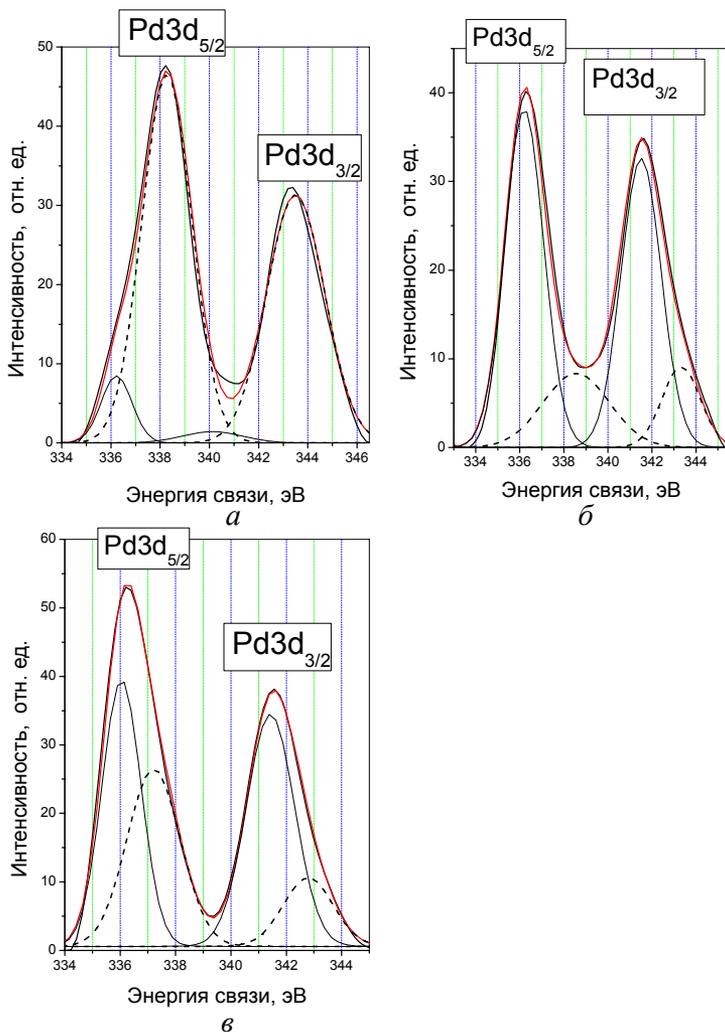


Рис. 17. Спектры фотоэлектронов, возбужденных с $3d$ -уровня атомов палладия, входящих в состав покрытий, сформированных на стеклогуглероде (GC) осаждением палладия и вольфрама: *a* – Pd-W/GC; *б* – Pd-W/GC после травления поверхности пучком ионов Ag^+ при плотности ионного тока 10 мкА/см^2 на протяжении 10 мин.; *в* – Pd-W/GC после травления поверхности пучком ионов Ag^+ при плотности ионного тока 10 мкА/см^2 на протяжении 30 мин.

Электронная структура атомов Pd в составе покрытия изменяется по мере ионного травления поверхности, т. е. с глубиной анализируемого слоя. На самой поверхности (спектр *a*) преобладает содержание атомов в высокой степени окисления. По мере ионного травления поверхности соотношение между концентрацией атомов Pd в различных степенях окисления изменяется, что свидетельствует о сложности состава исследуемых покрытий. В более глубоком слое (спектр *b*) преобладает содержание атомов Pd в металлическом состоянии. При дальнейшем увеличении глубины анализируемого покрытия (спектр *в*) вновь увеличивается содержание атомов Pd в более высокой степени окисления за счет их взаимодействия с атомами углеродной матрицы.

Оценим относительное содержание атомов палладия в металлическом и окисленном состояниях в зависимости от глубины анализируемого слоя (от времени травления поверхности). Результаты оценочных расчетов, проведенных по наиболее характерным спектральным линиям Pd3d_{5/2} или Pd3d_{3/2}, представлены в табл. 6. Интенсивность спектральных линий рассчитывалась при этом как площадь под спектральным пиком (рис. 17).

Таблица 6

Результаты оценочных расчетов относительного содержания атомов палладия в анализируемом покрытии

Спектр	Pd3d _{5/2} -, Pd3d _{3/2} -спектральные линии				Отношение интенсивностей линий Pd _{Me} /Pd _{Ox}
	Pd _{Me}		Pd _{Ox}		
	Энергия связи, эВ	Интенсивность	Энергия связи, эВ	Интенсивность	
1	336,1	13,3	338,2	118,4	0,11
2	341,5	74,6	343,5	19,8	3,77
3	336,0	111,2	337,2	40,5	2,75

2.7. Определение состава веществ методом спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния

Спектр резерфордовского обратного рассеяния представляет собой распределение по кинетическим энергиям анализирующих ионов (атомных ядер) ⁴He, претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, входящих в состав исследуемого вещества. В результате рассеяния изменяется направление движения иона ⁴He и часть энергии иона передается ядру, на котором происходит рассеяние; имеют место потери энергии ионов ⁴He при ядерном взаимодействии. Угол рассеяния θ зависит от значения прицельного параметра *b* (см. [1], рис. 2.58).

Регистрируется энергетический спектр ионов ${}^4\text{He}$, попадающих в поверхностно-барьерный кремниевый детектор-энергоанализатор, установленный под углом θ к направлению первичного ионного пучка. Энергия рассеянных ионов зависит от угла рассеяния θ , а также от массы M_2 ядра, с которым произошло взаимодействие. Эта зависимость учитывается кинематическим фактором рассеяния (см. [1], формула (2.118)) и обеспечивает возможность анализа элементного состава исследуемого вещества. Если же рассеяние происходит на ядрах атомов, расположенных на некоторой глубине, то имеют место дополнительные потери энергии ионов ${}^4\text{He}$ при их взаимодействии с электронами атомов при движении в глубь образца до взаимодействия с ядром и при движении к поверхности после резерфордского рассеяния на ядре. Эти потери учитываются фактором тормозного сечения $[\varepsilon]_j^i$ (см. [1], формула (2.129)); их наличие обеспечивает возможность анализа распределения атомов каждого из элементов, входящих в состав исследуемого вещества, по глубине образца.

Пример 17. Определение элементного состава стекла

Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$, снятый для стекла, состав которого нужно определить, приведен в числовой форме в табл. 7. В первом столбце таблицы указаны номера каналов спектрометра (через 10 каналов), а в остальных столбцах – выход обратного рассеяния, соответствующий каждому из каналов, в электрических импульсах, формируемых поверхностно-барьерным кремниевым детектором (см. [1], рис. 2.40). Начальная энергия анализирующих ионов ${}^4\text{He}$ составляла 2,0 МэВ; угол рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы, отсчитанные от нормали к поверхности исследуемого образца (см. [1], рис. 2.59), $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$.

Построим по данным табл. 7 спектр обратного рассеяния, откладывая по оси абсцисс номер канала многоканального анализатора, а по оси ординат – выход рассеяния (рис. 18).

Таблица 7

Распечатка спектра обратного рассеяния

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
50.	46621	45577	45116	44946	43479	43531	42895	42836	41348	41234
60.	40827	40887	39906	39651	39430	39157	38365	38128	37717	37898
70.	36827	36799	36257	36475	35791	35618	34903	35301	34288	34385
80.	34150	33897	33474	33294	32884	32706	32229	32413	32363	32040
90.	31676	31127	31325	31330	30963	30538	30182	30268	29884	29769
100.	29578	29352	28866	29117	28821	29063	28568	28370	28359	28189

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
110.	27845	27972	27411	27480	27273	27155	26921	27018	26949	26982
120.	26978	26930	26889	26940	26664	26485	26297	25854	25557	25601
130.	25288	25112	25501	25035	25032	24857	24669	24945	24486	24573
140.	24547	24537	23903	24275	24028	24030	23738	23750	23840	23611
150.	23421	23576	23426	23542	23323	23191	23103	23041	22756	22845
160.	23097	22741	22665	22622	22503	22881	22359	22549	22337	22190
170.	22258	22067	22127	21661	21584	20797	19581	19036	18252	18060
180.	17791	17436	17030	17338	17532	17289	17169	16807	17057	17117
190.	17115	16902	17016	17189	16811	16765	16924	17051	16546	16865
200.	16492	16655	16506	16616	16343	16531	16476	16311	16328	16391
210.	16036	16106	16340	16463	16061	16038	16071	16084	15818	15950
220.	16071	16118	16002	15911	15875	15896	15876	16008	15746	15454
230.	15666	15510	15570	15553	15332	15377	15435	15253	15097	15100
240.	15472	15201	15266	15195	14724	14442	14195	14344	14180	14000
250.	14152	14280	14162	14142	14029	14118	14319	14281	14053	14072
260.	13967	14152	13980	13906	13799	13986	13735	13966	13820	13953
270.	13715	13701	13666	13131	12720	12173	11131	10071	9479	9118
280.	8898	8840	8587	8626	8614	8580	8331	8370	8315	8343
290.	8334	8260	8205	8400	7997	8207	8308	8353	8067	8357
300.	8136	8195	8156	7999	8057	8143	7987	8130	8080	7876
310.	8124	8006	8083	8070	8074	7965	8044	8019	7911	7761
320.	7824	7868	7864	7784	7693	7618	7161	6878	6627	6191
330.	6117	6080	5980	5909	5835	5890	5984	5832	5812	5813
340.	5835	5809	5916	5679	5920	5755	5791	5690	6013	5659
350.	5853	5717	5876	5597	5758	5820	5713	5684	5652	5635
360.	5651	5694	5484	5724	5390	5726	5587	5538	5614	5533
370.	5644	5612	5484	5545	5439	5416	5447	5451	5387	5457
380.	5432	5429	5236	5579	5474	5446	5359	5411	5405	5365
390.	5483	5364	5462	5422	5338	5306	5369	5253	5347	5152
400.	5426	5357	5307	5388	5302	5319	5286	5352	5239	5410
410.	5416	5295	5157	5117	5246	5223	5021	5063	5124	5260
420.	5226	5240	5138	5221	5132	5175	5124	5067	5163	4919
430.	4985	4918	5031	4837	4526	4256	3572	2681	1563	759
440.	364	145	68	61	35	40	34	44	42	41
450.	34	42	44	51	48	41	27	30	20	17
460.	15	16	14	21	15	17	11	9	12	17

Каждому из каналов анализатора-спектрометра соответствует определенный интервал значений кинетической энергии регистрируемых ионов ^4He (энергетическая ширина канала). Для определения энергетической ширины канала и последующей калибровки шкалы спектрометра при снятии спектра определяются данные для калибровки (табл. 8). В табл. 8 приведены номера каналов анализатора, соответствующие энергиям ионов ^4He , претерпевших резерфордское рассеяние под углом θ на ядрах атомов указанных элементов, расположенных на поверхности исследуемого образца.

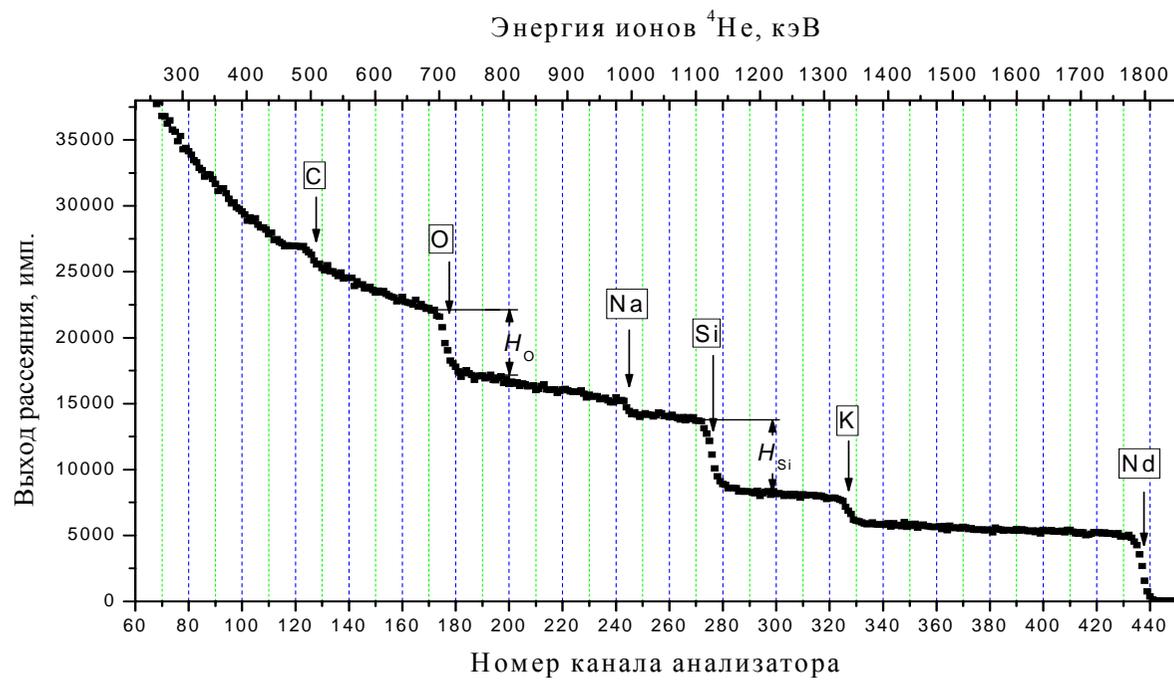


Рис. 18. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от поверхности исследуемого стекла

Используя попарно данные табл. 8, рассчитаем по формуле (2.133) [1] четыре значения энергетической ширины канала δE . Вначале определим значения энергий ионов ${}^4\text{He}$, имеющих начальную энергию $E_0 = 2,0 \text{ МэВ} = 2\,000 \text{ кэВ}$, после их рассеяния на ядрах атомов элементов, приведенных в табл. 8 (см. [1], формула (2.132)). Значения кинематического фактора рассеяния K возьмем из прил. 10 [1].

Таблица 8

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	Pb
Канал анализатора	127	177	276	450

Значения K и результаты вычислений внесем в табл. 9. При дальнейшей обработке спектра будем использовать полученное среднее значение $\delta E = 4,162 \text{ кэВ/канал}$.

Таблица 9

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E , кэВ	δE , кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,2526	505,2	Pb–C	4,171	4,162
O	0,3625	725,0	Pb–O	4,130	
Si	0,5657	1131,4	Pb–Si	4,144	
Pb	0,9262	1852,4	Si–C	4,203	

На спектре (рис. 18) определим номера каналов, соответствующих средней части каждой из «ступенек», и отметим их вертикальными стрелками. Вертикальные участки «ступенек» размыты вследствие ограничений по разрешающей способности спектрометра, а отмеченные каналы соответствуют энергии ионов ${}^4\text{He}$, претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, расположенных на поверхности образца.

При определении элементного состава исследуемого вещества необходимо идентифицировать каждый из таких сигналов. Как следует из данных табл. 8, отмеченные каналы с номерами 127, 177 и 276 соответствуют рассеянию анализирующих ионов на ядрах углерода, кислорода и кремния соответственно. Обозначим эти элементы на спектре. Остается идентифицировать сигналы, соответствующие другим, неизвестным элементам.

Для этого произведем калибровку энергетической шкалы спектрометра и переход к шкале энергий. В качестве привязки возьмем сигнал, соответствующий рассеянию на ядрах атомов углерода. Ближайшее к $E_C = 505,2$ кэВ округленное значение энергии ионов ${}^4\text{He}$ равно 500 кэВ. Разность этих значений составляет 5,2 кэВ, что соответствует $\Delta n = 5, 2/4,162 \approx 1,25$ канала. Следовательно, значению энергии ионов $E = 500$ кэВ соответствует примерно 126-й канал. Интервалу энергий в 100 кэВ соответствует количество каналов, равное $100/4,162 \approx 24$. Используя это значение и привязку к сигналу углерода, построим шкалу энергий (верхняя шкала на рис. 18).

Неизвестным элементам соответствуют сигналы, приходящиеся на каналы номер 244, 326 и 436. Рассчитаем энергии, соответствующие этим каналам, а также значения кинематического фактора рассеяния. Расчетные значения K -фактора сравним с табличными (прил. 10 [1]) и определим элементы, входящие в состав исследуемого стекла. Результаты анализа представлены в табл. 10, куда внесены и данные, содержащиеся в табл. 8 и 9.

Таблица 10

Результаты определения элементного состава исследуемого вещества

Номер канала	Энергия ионов, кэВ	Значения K -фактора		Элемент	Высота сигнала, имп.
		расчетное	табличное		
127	505,2	–	0,2526	C	–
177	725,0	–	0,3625	O	4790
244	992,2	0,4961	0,4974	Na	1280
276	1131,4	–	0,5657	Si	5335
326	1333,4	0,6667	0,6651	K	1950
436	1791,3	0,8956	0,8957	Nd	5160

Итак, в состав исследуемого стекла входят кремний, натрий, калий, кислород, неодим, а также углерод. Форма пика углерода на спектре (рис. 18) свидетельствует о том, что атомы этого элемента содержатся только в тонком приповерхностном слое стекла.

Оценим относительное содержание атомов элементов, входящих в состав стекла, по отношению к кремнию. Для этого воспользуемся соотношением (2.139) из пособия [1]. Отношение концентрации атомов j -го элемента к концентрации атомов кремния

$$\frac{N_j}{N_{Si}} = \left[\frac{\sigma_{Si} [\varepsilon]_j^{Si}}{\sigma_j [\varepsilon]_{Si}^{Si}} \right] \cdot \frac{H_j}{H_{Si}}, \quad (65)$$

где σ – дифференциальные сечения рассеяния ионов ^4He на ядрах соответствующих элементов (сечения взаимодействия (см. [1], с. 178)); $[\varepsilon]_j^i$ – факторы тормозного сечения ионов ^4He в основном материале, в качестве которого условно примем кремний; H – значения высоты сигнала от соответствующего элемента.

Значения высот H_j , определенные по спектру (рис. 18), также внесены в табл. 10; значения сечений рассеяния содержатся в прил. 12 [1].

Рассчитаем величину, учитывающую потери энергии ионов ^4He при их взаимодействии с электронами атомов при движении в глубь образца до взаимодействия с ядром и при движении к поверхности после резерфордского рассеяния на ядре, называемую фактором тормозного сечения. Выражение для определения фактора тормозного сечения (см. [1], формула (2.129)) имеет вид

$$[\varepsilon]_j^i = \left[\frac{K_j}{\cos \theta_1} \cdot \varepsilon_i(E_0) + \frac{1}{\cos \theta_2} \cdot \varepsilon_i(K_j \cdot E_0) \right], \quad (66)$$

где индекс i относится к тормозящей среде – основному материалу, а индекс j – к рассеивающему центру – ядру атома примеси; ε_i – сечение торможения ионов ^4He на атомах основного материала.

Рассчитаем значения фактора тормозного сечения для всех элементов, входящих в состав стекла, полагая основным элементом кремний. Значения сечений торможений в кремнии будем брать из прил. 11 [1]. Для кремния

$$\begin{aligned} [\varepsilon]_{Si}^{Si} &= \left[\frac{0,5657}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 63,80 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 92,65 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}. \end{aligned}$$

Значение сечения торможения $\varepsilon_{Si} = 63,80 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}$ при энергии ионов ^4He , равной 1131,4 кэВ и соответствующей рассеянию на ядрах Si, найдено путем интерполяции табличных данных прил. 11 [1].

Проведем аналогичные расчеты значений $[\varepsilon]_j^i$ для других элементов:

$$[\varepsilon]_{O}^{Si} = \left[\frac{0,3625}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 70,64 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 89,59 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)};$$

$$[\varepsilon]_{\text{Na}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,4974}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 66,38 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 91,91 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)};$$

$$[\varepsilon]_{\text{K}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,6651}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 59,97 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 93,66 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)};$$

$$[\varepsilon]_{\text{Nd}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,8957}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 52,05 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 96,98 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}.$$

По формуле (65) рассчитаем относительное содержание атомов элементов в составе исследуемого стекла. Значения величин, входящих в выражение (65), и результаты вычислений представим в табл. 11.

Таблица 11

Результаты расчета относительного содержания атомов элементов в составе исследуемого стекла

Элемент	$[\varepsilon]_j^i, 10^{-15}$ эВ/(атом/см ²)	Сечение рассеяния σ_j , 10^{-24} см ² /ср	Высота сигнала H_j , имп.	N_j/N_{Si}
O	89,59	0,297	4790	2,90
Na	91,91	0,599	1280	0,40
Si	92,65	0,991	5335	1,00
K	93,66	1,861	1950	0,19
Nd	96,98	18,92	5160	0,05

На основе проведенных измерений и литературных данных можно заключить, что в состав исследуемого стекла входит SiO₂, который является основным стеклообразующим компонентом, а также Na₂O и K₂O в качестве модификаторов. Кроме того, содержится добавка оксида неодима Nd₂O₃. Силикатное стекло, содержащее неодим, используется в качестве активной среды твердотельных лазеров. Ионы Nd³⁺ являются ионами-активаторами, обеспечивающими инверсию населенностей и лазерные переходы.

Пример 18. Анализ слоя силицида молибдена,
сформированного на поверхности кремния

Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He , снятый для исследуемого образца, приведен в табл. 12. Так же как и в примере 16, в первом столбце таблицы указаны номера каналов спектрометра (через 10 каналов), а в остальных столбцах – выход обратного рассеяния, соответствующий каждому из каналов, в импульсах, генерируемых поверхностно-барьерным кремниевым детектором. Начальная энергия анализирующих ионов ^4He составляла 1,5 МэВ; угол рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы, отсчитанные от нормали к поверхности исследуемого образца (см. [1], рис. 2.59), $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$. В табл. 13 приведены данные для калибровки шкалы спектрометра.

Таблица 12

Распечатка спектра обратного рассеяния

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
40.	15310	14910	14022	14069	13986	13745	13195	13075	13057	12682
50.	12555	12182	11933	11629	11392	11468	11307	11102	10837	10962
60.	10607	10641	10371	10378	10166	10192	9916	9886	9748	9974
70.	9500	9485	9491	9255	9386	9384	9146	8916	8976	8921
80.	8913	8802	8548	8680	8724	8726	8466	8402	8403	8484
90.	8262	8227	8289	8250	8070	8025	8009	7928	7960	7821
100.	7841	7895	7615	7898	7567	7708	7486	7475	7596	7565
110.	7523	7252	7345	7542	7205	7325	7465	7385	7423	6965
120.	7588	7458	7458	7622	7395	7306	7112	6961	7006	6891
130.	6864	6842	6904	6940	6798	6730	6770	6750	6801	6773
140.	6652	6682	6516	6641	6539	6587	6539	6467	6413	6429
150.	6296	6254	6363	6317	6346	6356	6497	6159	6160	6082
160.	5425	5034	4255	3525	2952	2512	2289	2054	2007	1922
170.	1888	1801	1749	1749	1761	1720	1789	1750	1662	1773
180.	1737	1814	1713	1703	1707	1709	1672	1706	1745	1643
190.	1652	1581	1465	1415	1072	781	471	310	240	206
200.	145	149	133	108	82	98	95	91	87	97
210.	93	77	84	78	110	82	81	102	87	97
220.	80	97	96	86	87	74	80	87	97	101
230.	99	96	106	119	104	125	120	110	125	102
240.	132	127	119	160	202	206	230	271	281	357
250.	466	674	1043	1690	2676	4358	6418	9135	11787	14466
260.	16885	18578	19285	19556	20413	20298	20072	20420	20314	20279
270.	20279	20076	20097	20051	20022	19941	19988	19947	19880	19495
280.	19641	19787	19703	19640	19586	19487	19430	18959	19200	18627
290.	18039	16899	15436	13450	11164	8596	6483	4215	2515	1369
300.	665	396	279	196	167	168	160	153	151	142
310.	143	135	164	157	145	148	134	123	104	103
320.	79	89								

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	In
Канал анализатора	89	126	198	308

По данным табл. 12 построим спектр обратного рассеяния, откладывая по оси абсцисс номер канала многоканального анализатора, а по оси ординат – выход рассеяния (рис. 19).

С применением формулы (2.133) [1] и значений кинематического фактора рассеяния K из прил. 10 [1] так же, как и в предыдущем примере, определим значение энергетической ширины канала спектрометра δE . Значения K и результаты вычислений внесем в табл. 14. При дальнейшей обработке спектра будем использовать полученное среднее значение $\delta E = 4,222$ кэВ/канал.

Таблица 14

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E , кэВ	δE , кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,2526	378,90	In–C	4,234	4,222
O	0,3625	543,75	In–O	4,188	
Si	0,5657	848,55	In–Si	4,159	
In	0,8707	1306,05	Si–C	4,309	
Mo	0,8473	1270,95	–	–	–

В исследуемом образце содержатся кремний и молибден. Поэтому нужно дополнительно рассчитать значение энергии ионов ^4He после их рассеяния на ядрах атомов молибдена. Это значение также внесено в табл. 14.

Отметим на спектре (рис. 19) заданные в табл. 13 каналы с номерами 89, 126 и 198, которые соответствуют значениям энергии ионов ^4He , претерпевших рассеяние на ядрах атомов соответственно углерода, кислорода и кремния, расположенных на поверхности образца. На спектре имеется сигнал, соответствующий кислороду, а канал, соответствующий углероду, можно использовать для привязки при переходе к шкале энергий.

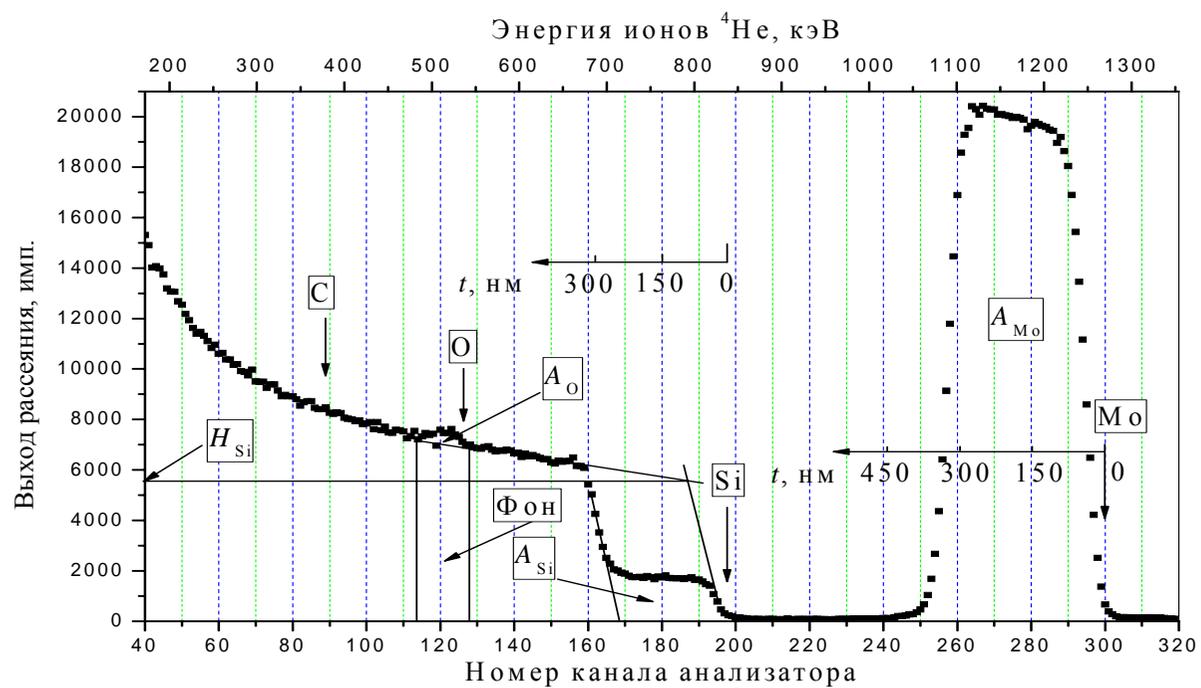


Рис. 19. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от слоя силицида молибдена на кремниевой подложке

Ближайшее к $E_C = 378,9$ кэВ значение энергии равно 400 кэВ. Разность этих значений равна 21,1 кэВ, и ей соответствует 5 каналов. Следовательно, значению энергии $E = 400$ кэВ соответствует 94-й канал. Интервалу энергий в 100 кэВ соответствует $100/4,222 = 23,7$ канала. С использованием этих данных осуществим переход от шкалы «Номер канала» к шкале «Энергия ионов» (верхняя шкала на рис. 19).

Определим также номер канала, соответствующий энергии ионов ${}^4\text{He}$ после их рассеяния на ядрах атомов молибдена, расположенных на поверхности, $E_{\text{Mo}} = 1270,95$ кэВ. Этой энергии соответствует примерно 300-й канал.

Построим шкалу глубин для кремния и молибдена, т. е. определим толщину слоя δt , соответствующую одному каналу анализатора. Вычисление значений δt осуществляется по формуле (2.135) [1]. Атомная плотность кремния $N = 5,00 \cdot 10^{22}$ атом/см³ (см. [1], прил. 10). Вначале рассчитаем по формуле (66) значения фактора тормозного сечения ионов ${}^4\text{He}$ в среде при рассеянии на ядрах кремния и молибдена, а затем вычислим значения δt для каждого из этих элементов.

Соответствующие вычисления:

$$\begin{aligned} [\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,5657}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 68,68 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 101,88 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\varepsilon]_{\text{Mo}}^{\text{Si}} &= \left[\frac{0,8473}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 61,12 \right] \cdot 10^{-15} = \\ &= 110,21 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}; \end{aligned}$$

$$\delta t_{\text{Si}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 8,29 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 8,29 \text{ нм/канал};$$

$$\delta t_{\text{Mo}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 110,22 \cdot 10^{-15}} = 7,66 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 7,66 \text{ нм/канал}.$$

Значения δt для кремния и молибдена несколько различаются. Нанесем полученную для каждого из элементов шкалу глубин на спектр (рис. 19).

По этим шкалам определим толщину слоя силицида. Рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов молибдена отвечает спектральный пик в интервале энергий, которому соответствуют каналы с 240-го по 310-й. Энергии ионов, претерпевших рассеяние на ядрах атомов Mo, расположенных на поверхности образца, соответствует 300-й канал. Оба

края (правый и левый) спектрального пика размываются вследствие ограничений по разрешающей способности спектрометра. Толщине слоя, содержащего атомы молибдена, соответствует интервал с 300-го по 257-й канал. Следовательно, толщина слоя силицида молибдена $t_{Mo} = (300 - 257) 7,66 = 329$ нм. Кремнию, входящему в состав силицида молибдена, соответствует сигнал, расположенный в интервале с 163-го по 198-й канал. Толщина слоя силицида, определенная по сигналу кремния, $t_{Si} = (198 - 163) 8,29 = 290$ нм. Среднее значение толщины исследуемого слоя равно примерно 310 нм. На остальном участке спектра, которому соответствуют номера каналов <163 , наблюдается сигнал от кремниевой подложки. На фоне сигнала от подложки имеется спектральный пик кислорода, атомы которого находятся на самой поверхности и вероятнее всего входят в состав поверхностных оксидов.

Рассчитаем слоевые содержания атомов молибдена и кремния в слое силицида, а также кислорода на его поверхности. Слоеое содержание вычисляется по формуле (2.141) [1]:

$$(Nt)_j = \frac{A_j \cdot \sigma_i \cdot \delta E}{H_i \cdot \sigma_j \cdot [\varepsilon]_i^2}, \quad (67)$$

где A_j – площадь под спектральным пиком соответствующего элемента с учетом вычета фона; H_i – высота сигнала от основного материала (матрицы).

Высота сигнала от кремниевой матрицы определяется по ординате точки пересечения касательных к участкам спектра, соответствующим рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов кремния, расположенных на поверхности матрицы (см. рис. 19). Полученное значение $H_i = H_{Si} = 5587$ имп. Спектральный пик молибдена фона не имеет, поэтому площадь под пиком можно определить по распечатке спектра (табл. 12) как сумму значений выхода в интервале с 240-го по 310-й канал. Результат суммирования $A_{Mo} = 745\,720$ имп.·канал. Слоеое содержание атомов молибдена в исследуемом слое

$$(Nt)_{Mo} = \frac{745\,720 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5587 \cdot 9,253 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 5,92 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Площадь под спектральным пиком кремния в составе силицида определим как сумму выходов в интервале со 163-го по 203-й канал (табл. 17) за вычетом фона. Результат вычислений $A_{Si} = 52\,970$ имп.·канал. Слоеое содержание атомов кремния в исследуемом слое

$$(Nt)_{\text{Si}} = \frac{52\,970 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5587 \cdot 0,991 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 3,93 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

По полученным данным можно оценить стехиометрический состав силицида. Отношение слоевых содержаний

$$\frac{(Nt)_{\text{Mo}}}{(Nt)_{\text{Si}}} \approx 1,5 = \frac{3}{2}.$$

Следовательно, стехиометрический состав слоя можно представить формулой Mo_3Si_2 .

Рассчитаем также слоевое содержание кислорода на поверхности исследуемого слоя. Спектральный пик кислорода на фоне сигнала кремниевой подложки расположен в интервале со 113-го по 128-й канал. Площадь под пиком кислорода за вычетом фонового сигнала $A_{\text{O}} = 8105$ имп.·канал. Слоеое содержание кислорода

$$(Nt)_{\text{O}} = \frac{8105 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5587 \cdot 0,297 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 2,00 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Пример 19. Анализ поверхности монокристаллического кремния, легированного мышьяком и индием методом ионной имплантации

Спектроскопия резерфордовского обратного рассеяния позволяет исследовать состав тонкого (примерно до 1 мкм) приповерхностного слоя вещества без его разрушения. Поэтому метод нашел широкое применение для анализа структур, формируемых методами поверхностного легирования, в т. ч. получаемых имплантацией ускоренных в вакууме ионов. Ионная имплантация применяется для введения электрически активных примесей (донорных или акцепторных) в полупроводниковую матрицу, что является одной из технологических операций в микроэлектронной промышленности.

Рассмотрим два спектра резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$, снятых для одного и того же образца монокристаллического кремния, легированного ускоренными ионами мышьяка и индия. Первый из спектров снят от неориентированного монокристалла, второй – от ориентированного по отношению к пучку анализирующих ионов таким образом, что ионы входят в кристалл в направлении межплоскостного канала (режим каналирования). Предварительно в монокристаллическую кремниевую пластину-подложку имплантированы ионы As^+ с энергией 60 кэВ и In^+ с энергией 40 кэВ.

Распечатка спектра, снятого от неориентированного монокристалла, приведена в табл. 15. Спектр снят в тех же условиях, что и в при-

мере 17. Начальная энергия анализирующих ионов ${}^4\text{He}$ составляла 1,5 МэВ; угол рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы, отсчитанные от нормали к поверхности исследуемого образца (см. [1], рис. 2.59), $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$. Данные для калибровки шкалы спектрометра не изменены по сравнению с предыдущим спектром и приведены в табл. 13.

Таблица 15

**Распечатка спектра обратного рассеяния
снятого от неориентированного монокристалла кремния**

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	8433	8531	8371	8346	8340	8042	8124	7965	8031	8220
80.	8433	8531	8371	8346	8340	8042	8124	7965	8031	8220
90.	7739	7836	7895	7561	7574	7681	7519	7438	7278	7362
100.	7289	7201	7268	7269	7064	7115	7030	6960	7034	6866
110.	6880	6871	6962	6768	6762	6902	6717	6791	6677	6701
120.	6667	6617	6595	6492	6587	6693	6782	6648	6635	6495
130.	6481	6376	6561	6334	6374	6329	6407	6176	6187	6240
140.	6157	6211	6060	6244	6311	6143	6190	6186	6094	6146
150.	5976	6084	5968	5994	6019	6020	6048	5968	5906	5787
160.	5973	5984	5819	5834	5849	5743	5767	5876	5607	5654
170.	5641	5774	5793	5757	5582	5531	5693	5726	5466	5589
180.	5383	5428	5421	5441	5304	5493	5315	5265	5166	5163
190.	5152	4934	4957	4980	4954	4809	4344	3712	2680	1727
200.	957	563	391	289	212	131	133	70	49	48
210.	39	34	34	35	37	23	21	26	31	27
220.	22	23	20	24	22	12	17	15	22	15
230.	15	19	23	8	11	14	14	12	18	17
240.	14	19	13	12	17	8	13	9	8	13
250.	7	19	11	6	9	10	7	8	7	15
260.	9	9	9	12	10	11	9	7	13	12
270.	18	23	23	32	48	70	87	104	135	122
280.	134	120	86	78	38	26	15	12	5	10
290.	11	11	15	19	28	61	82	128	168	220
300.	246	248	267	251	163	114	69	31	21	6
310.	4	12	4	2	5	3	3	2	8	2

По распечатке (табл. 15) построим спектр обратного рассеяния (рис. 20). Спектральные пики, соответствующие рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах имплантированных атомов мышьяка и индия, имеют малую интенсивность по сравнению с интенсивностью сигнала от кремниевой подложки. Поэтому эти пики можно для наглядности построить дополнительно в другом масштабе.

С использованием данных табл. 13 отметим на спектре (рис. 20) каналы, соответствующие энергиям ионов, претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, входящих в состав исследуемого слоя.

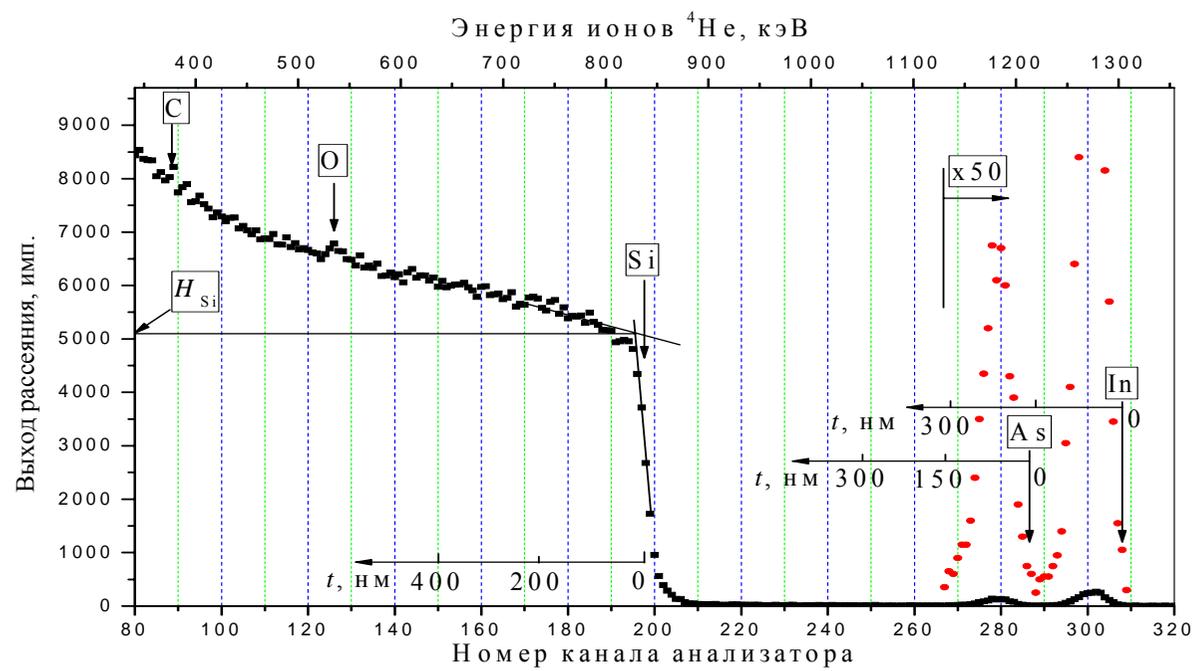


Рис. 20. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от неориентированного монокристалла кремния, легированного ионами As^+ и In^+

На самой поверхности образца обнаруживается некоторое количество кислорода. Остается определить номер канала, соответствующего рассеянию на ядрах атомов мышьяка. Поскольку условия получения спектра такие же, как и в примере 17, то значение энергетической ширины канала спектрометра $\delta E = 4,222$ кэВ/канал (см. табл. 14). Соответствующее значение энергии ионов ${}^4\text{He}$, претерпевающих резерфордское рассеяние на ядрах атомов As, расположенных на поверхности, $E_{\text{As}} = 0,8087 \cdot 1500 = 1213,05$ кэВ. Этой энергии соответствует примерно 287-й канал спектрометра.

Используя привязку к сигналу углерода и значение δE , так же как и в предыдущих примерах, осуществим калибровку шкалы спектрометра по энергиям (верхняя шкала на рис. 20).

Построим шкалу глубин для элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Сначала рассчитаем по формуле (66) значения фактора тормозного сечения ионов ${}^4\text{He}$ в среде при рассеянии на ядрах мышьяка и индия, а затем определим значения δt .

Значения этих параметров для кремния вычислены в предыдущем примере. Для торможения ионов ${}^4\text{He}$, рассеивающихся на ядрах атомов кремния, фактор тормозного сечения $[\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} = 101,88 \cdot 10^{-15}$ эВ/(атом/см²); соответствующее значение $\delta t_{\text{Si}} = 8,29$ нм/канал.

Вычислим значения фактора тормозного сечения ионов ${}^4\text{He}$ в кремнии при рассеянии на ядрах мышьяка и индия:

$$[\varepsilon]_{\text{As}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,8087}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 62,25 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 109,16 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}/(\text{атом}/\text{см}^2);$$

$$[\varepsilon]_{\text{In}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,8707}{\cos 0^\circ} \cdot 56,82 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 60,44 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 110,85 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}/(\text{атом}/\text{см}^2).$$

Определим значения толщины слоя δt , соответствующей одному каналу спектрометра:

$$\delta t_{\text{As}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 109,16 \cdot 10^{-15}} = 7,74 \cdot 10^{-7} \text{ см}/\text{канал} = 7,74 \text{ нм}/\text{канал};$$

$$\delta t_{\text{In}} = \frac{4222}{5 \cdot 10^{22} \cdot 110,85 \cdot 10^{-15}} = 7,62 \cdot 10^{-7} \text{ см}/\text{канал} = 7,62 \text{ нм}/\text{канал}.$$

Нанесем шкалу глубин для каждого элемента на спектр (рис. 20).

Рассчитаем по формуле (67) слоевые содержания имплантированных атомов мышьяка и индия. Высота сигнала от кремниевой матрицы определяется по ординате точки пересечения касательных к участкам спектра, соответствующим рассеянию ионов ${}^4\text{He}$ на ядрах атомов кремния, расположенных на поверхности матрицы (см. рис. 18). Полученное значение $H_i = H_{\text{Si}} = 5096$ имп. Спектральные пики мышьяка и индия практически не имеют фона, поэтому площадь под пиками можно определить по расщепке спектра (табл. 15) как сумму значений выхода в соответствующих интервалах каналов. Результат суммирования: $A_{\text{As}} = 1184$ имп.канал; $A_{\text{In}} = 2141$ имп.канал. Слоевые содержания ионно-имплантированных атомов донорных (As) и акцепторных (In) примесей в исследуемом слое:

$$(Nt)_{\text{As}} = \frac{1184 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5096 \cdot 5,700 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 1,67 \cdot 10^{15} \text{ атом/см}^2;$$

$$(Nt)_{\text{In}} = \frac{2141 \cdot 0,991 \cdot 4222}{5096 \cdot 12,608 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} = 1,37 \cdot 10^{15} \text{ атом/см}^2.$$

Ионно-имплантируемые атомы вследствие многократных столкновений с атомами кремния распределяются в приповерхностном слое случайным образом. В то же время глубина их проникновения зависит от энергии ускоренных в вакууме ионов. Проанализируем по спектру обратного рассеяния профили распределения внедренных атомов в кремниевой подложке по глубине.

Для этого по формуле (2.139) [1]

$$\frac{N_j}{N_i} = \left[\frac{\sigma_i \cdot [\varepsilon]_j^i}{\sigma_j \cdot [\varepsilon]_i^j} \right] \cdot \frac{H_j}{H_i} \quad (68)$$

рассчитаем отношение концентраций атомов элементов (мышьяка и индия по отношению к кремнию) пошагово на различных глубинах. Вычисление относительных концентраций по формуле (68) начнем от поверхности. В частности, расчет первых из значений отношений $N_{\text{As}}/N_{\text{Si}}$ и $N_{\text{In}}/N_{\text{Si}}$ выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{N_{\text{As}}}{N_{\text{Si}}} \right)_1 = \left[\frac{0,991 \cdot 109,16 \cdot 10^{-15}}{5,700 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} \right] \cdot \frac{12}{2680} = 0,1863 \cdot \frac{12}{2680} = 8,34 \cdot 10^{-4};$$

$$\left(\frac{N_{\text{In}}}{N_{\text{Si}}} \right)_1 = \left[\frac{0,991 \cdot 110,85 \cdot 10^{-15}}{12,608 \cdot 101,88 \cdot 10^{-15}} \right] \cdot \frac{21}{2680} = 0,0855 \cdot \frac{21}{2680} = 6,70 \cdot 10^{-4}.$$

Последующие значения вычисляются аналогичным образом с использованием значений высот сигналов «на канал глубже». Результаты расчетов представим в табл. 16. При определении глубины t в качестве шкалы глубин примем среднее значение δt для трех элементов: $\delta t = 7,88$ нм/канал.

Таблица 16

Результаты расчета распределений атомов As и In по глубине

Глубина, нм	$N_{As}/N_{Si}, \times 10^{-4}$	$N_{In}/N_{Si}, \times 10^{-4}$
0	8,34	6,70
7,88	7,53	7,14
15,76	11,15	13,58
23,64	14,72	20,27
31,52	29,33	28,14
39,40	32,17	43,10
47,28	45,10	46,06
55,16	50,60	42,99
63,04	44,12	40,84
70,92	48,71	36,44
78,80	37,51	27,81
86,68	30,78	20,79
94,56	24,54	13,19
102,44	16,28	9,50
110,32	11,24	4,51
118,20	7,88	2,99
126,08	7,90	2,37
133,96	6,18	1,73
141,84	4,15	1,75
149,72	4,33	1,53
157,60	2,39	0,78
165,48	2,93	

Глубина , нм	$N_{As}/N_{Si} , \times 10^{-4}$	$N_{In}/N_{Si} , \times 10^{-4}$
173,36	3,60	
181,24	3,37	
189,12	4,00	
197,00	2,91	
204,88	2,89	
212,76	2,90	
220,64	4,95	
228,52	2,31	
236,40	2,66	
244,28	2,22	
252,16	3,23	
260,04	2,92	
267,92	1,91	

По расчетным данным построим графики профилей распределения ионно-имплантированных атомов по глубине (рис. 21). Поскольку процесс торможения ионов в кристаллической подложке является вероятностным, то полученные данные можно аппроксимировать функцией нормального распределения Гаусса (кривые на рис. 21).

Основными параметрами распределения атомов ионно-имплантированных примесей по глубине являются: средний проекционный пробег \bar{R}_p ионов и среднеквадратичный разброс пробегов (страгглинг) $\Delta\bar{R}_p$, а также относительная концентрация в максимуме распределения. Значения этих параметров, полученные при анализе распределений (рис. 21) представлены в табл. 17.

При каналировании ионы ^4He рассеиваются на поверхностных атомах кристалла и атомах, смещенных из узлов кристаллической решетки. Поэтому участок спектра, обусловленный рассеянием анализирующих ионов на ядрах атомов кремния, характеризуется намного меньшей интенсивностью, чем в спектре 1 (рис. 22), снятом от неориентированного кристалла.

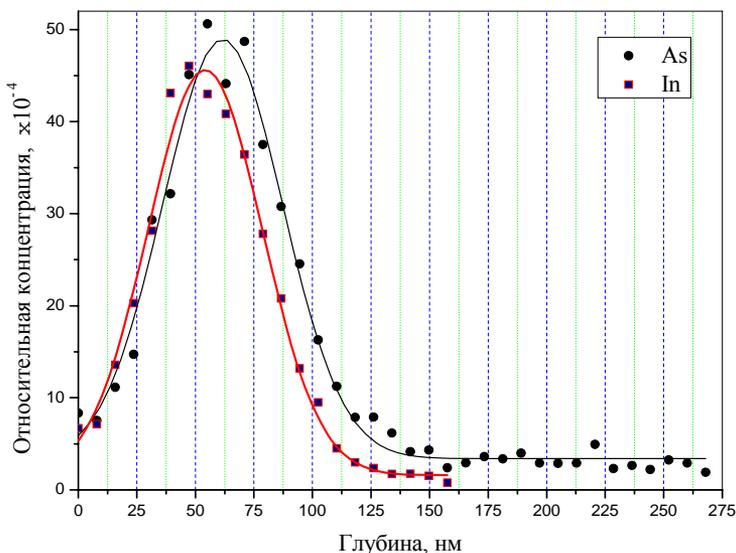


Рис. 21. Распределение атомов As и In, ионно-имплантированных в кремниевую подложку, по глубине

Таблица 17

**Параметры распределения по глубине
ионно-имплантированных атомов**

Атомы	\bar{R}_p , нм	$\Delta\bar{R}_p$, нм	$(N_i/N_{Si})_{\max}$
As	61,65	51,17	0,00488
In	54,17	48,83	0,00456

Распечатка спектра, снятого в тех же условиях, но уже от ориентированного монокристалла кремния, легированного ионами мышьяка и кремния, приведена в табл. 18. Спектр, построенный по этим данным, представлен на рис. 22 (спектр 2).

Наблюдаемый спектральный пик в интервале примерно со 180-го по 210-й канал обусловлен наличием приповерхностного разупорядоченного слоя. Разрушение кристаллической решетки происходит под воздействием имплантируемых ионов, многократно сталкивающихся с атомами кристалла при торможении. Интенсивность пика достигает

интенсивности спектра от неориентированного монокристалла, что свидетельствует о полной аморфизации приповерхностного слоя. По шкале глубин (рис. 22) оценим толщину аморфизованного слоя. Она составляет примерно 120 нм; это значение коррелирует с толщиной ионно-легированного слоя (см. рис. 21).

Таблица 18

Распечатка спектра обратного рассеяния, снятого от ориентированного монокристалла кремния

№ ка-нала	Выход рассеяния, имп.									
70.	4188	4035	3936	3952	3818	3864	3840	3761	3762	3696
80.	3765	3574	3579	3558	3550	3597	3545	3519	3477	3488
90.	3217	3300	3289	3292	3189	3033	3221	3126	3079	3023
100.	2958	2962	2970	2936	2798	2969	2920	3037	2819	2828
110.	2731	2780	2715	2721	2668	2578	2646	2582	2666	2668
120.	2560	2548	2633	2613	2593	2462	2595	2582	2517	2432
130.	2420	2367	2449	2314	2326	2393	2344	2382	2273	2325
140.	2299	2312	2248	2190	2209	2183	2124	2154	2132	2158
150.	2199	2107	2085	2011	1986	2106	2085	1981	2015	2061
160.	1918	1905	1937	1936	1855	1907	1960	1873	1854	1834
170.	1792	1855	1802	1788	1819	1743	1725	1696	1713	1862
180.	1784	1843	2002	2231	2792	3515	4284	4789	5068	5157
190.	5055	5078	5227	5264	5028	4927	4323	3422	2356	1313
200.	692	401	305	220	173	137	76	41	31	21
210.	14	14	9	17	6	7	4	13	7	9
220.	11	10	7	8	6	4	4	3	4	5
230.	7	5	2	7	6	6	5	2	3	8
240.	2	9	7	4	2	6	6	3	5	4
250.	3	1	9	1	3	1	2	1	1	3
260.	5	1	3	5	3	4	3	5	6	3
270.	17	16	19	36	47	72	91	125	142	148
280.	130	107	70	55	28	9	5	2	7	8
290.	8	8	11	15	32	64	83	144	196	244
300.	242	292	258	202	135	104	59	29	8	2
310.	2	3	3	0	1	3	0	0	0	2

Пример 20. Исследование углеродной пленки, осажденной на кремний

Спектр резерфордовского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ с начальной энергией $E_0 = 2,0$ МэВ от углеродной пленки, осажденной на кремниевую подложку, представлен в табл. 19. Угол рассеяния $\theta = 170^\circ$, углы $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$ Данные для калибровки энергетической шкалы спектрометра приведены в табл. 20.

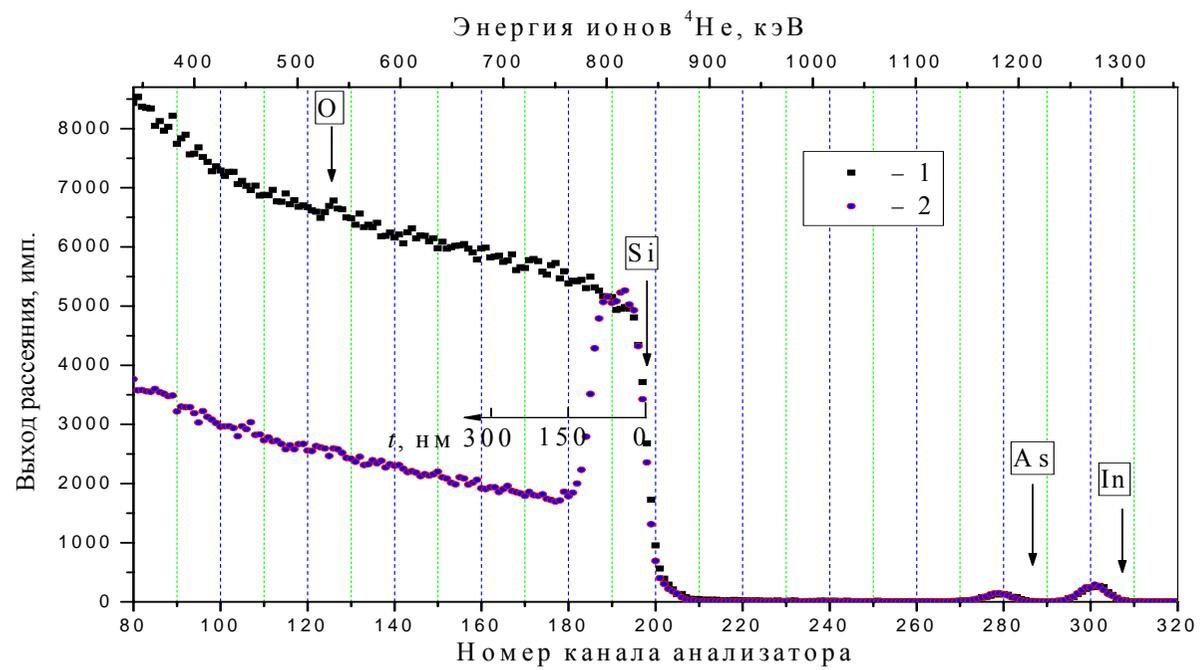


Рис. 22. Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ^4He от неориентированного (1) и ориентированного (2) монокристалла кремния, легированного ионами As^+ и In^+

Распечатка спектра обратного рассеяния

№ ка-нала	Выход рассеяния, имп.									
40.	6255	6242	6056	5905	5931	5702	5503	5509	5414	5388
50.	5285	5193	5145	4972	4866	5020	4851	4865	4659	4723
60.	4587	4645	4496	4338	4336	4430	4321	4364	4259	4158
70.	4137	4236	4128	4140	4047	4058	4008	4035	4218	4243
80.	4378	4430	4388	4434	4417	4301	4318	4301	4376	4334
90.	4196	4279	4203	4165	4258	4307	4096	4091	4193	3970
100.	4175	4005	3952	4024	4119	4038	3795	3773	3824	3856
110.	3906	3680	3710	3581	3517	3342	3243	3200	3106	3164
120.	3173	3107	3055	3158	3072	3002	3146	3051	2990	3067
130.	2994	2960	2962	2936	2902	3014	2943	2929	2902	2832
140.	2827	2976	2850	2836	2897	2833	2777	2815	2837	2903
150.	2840	2759	2771	2841	2801	2808	2709	2774	2661	2787
160.	2712	2620	2643	2697	2744	2697	2634	2613	2567	2744
170.	2563	2550	2586	2559	2689	2682	2613	2522	2560	2605
180.	2543	2570	2480	2559	2526	2520	2617	2510	2576	2595
190.	2514	2503	2482	2551	2458	2450	2498	2409	2390	2437
200.	2421	2454	2348	2503	2524	2477	2427	2458	2394	2374
210.	2355	2349	2294	2306	2287	2279	2259	2129	1967	1695
220.	1477	1086	784	583	368	285	180	155	128	114
230.	93	77	52	43	56	33	35	21	23	18
240.	19	21	16	25	22	23	21	13	17	11
250.	26	14	19	11	14	8	19	18	12	16
260.	16	9	11	15	13	16	13	7	12	9
270.	11	7	7	13	11	9	13	6	10	9
280.	8	6	6	10	11	6	10	9	6	8
290.	1	6	7	9	5	8	9	6	7	7

Таблица 20

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	Pt
Канал анализатора	116	166	265	438

Спектр обратного рассеяния, соответствующий табл. 19, представлен на рис. 23. По данным табл. 20 определим по методике, изложенной в примерах 16 и 17, энергетическую ширину δE канала спектрометра (табл. 21).

Отметим на спектре (рис. 23) каналы (по данным табл. 20), соответствующие энергиям ионов ^4He , претерпевших рассеяние на ядрах атомов углерода и кремния, расположенных на поверхности исследуемого образца. Отсутствие сигнала кремния в соответствующем

интервале энергий обусловлено тем, что кремниевая подложка расположена под сравнительно толстой пленкой осажденного углерода.

Таблица 21

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E, кэВ	δE, кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,2526	505,2	Pt–C	4,157	4,147
O	0,3625	725,0	Pt–O	4,112	
Si	0,5657	1131,4	Pt–Si	4,117	
Pt	0,9218	1843,6	Si–C	4,203	

Используя среднее значение энергетической ширины канала спектрометра $\delta E = 4,147$ кэВ/канал и привязку к каналу, соответствующему какому-то из элементов (например, углероду), произведем калибровку энергетической шкалы спектрометра (верхняя шкала на рис. 23). Методика калибровки также подробно изложена в примерах 16 и 17.

Построим шкалу глубин для обоих элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Сначала рассчитаем по формуле (66) значения фактора тормозного сечения ионов ^4He в среде при рассеянии на ядрах кремния и углерода, а затем определим соответствующие значения δt .

Фактор тормозного сечения при рассеянии на ядрах кремния

$$[\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,5657}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 70,06 \right] \cdot 10^{-15} = 99,01 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}/(\text{атом}/\text{см}^2),$$

а на ядрах углерода

$$[\varepsilon]_{\text{C}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,2526}{\cos 0^\circ} \cdot 49,26 + \frac{1}{\cos 10^\circ} \cdot 70,64 \right] \cdot 10^{-15} = 84,17 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}/(\text{атом}/\text{см}^2).$$

Значения глубин, соответствующих одному каналу спектрометра:

$$\delta t_{\text{Si}} = \frac{4147}{5 \cdot 10^{22} \cdot 99,01 \cdot 10^{-15}} = 8,38 \cdot 10^{-7} \text{ см}/\text{канал} = 8,38 \text{ нм}/\text{канал};$$

$$\delta t_{\text{C}} = \frac{4147}{5 \cdot 10^{22} \cdot 84,17 \cdot 10^{-15}} = 9,85 \cdot 10^{-7} \text{ см}/\text{канал} = 9,85 \text{ нм}/\text{канал}.$$

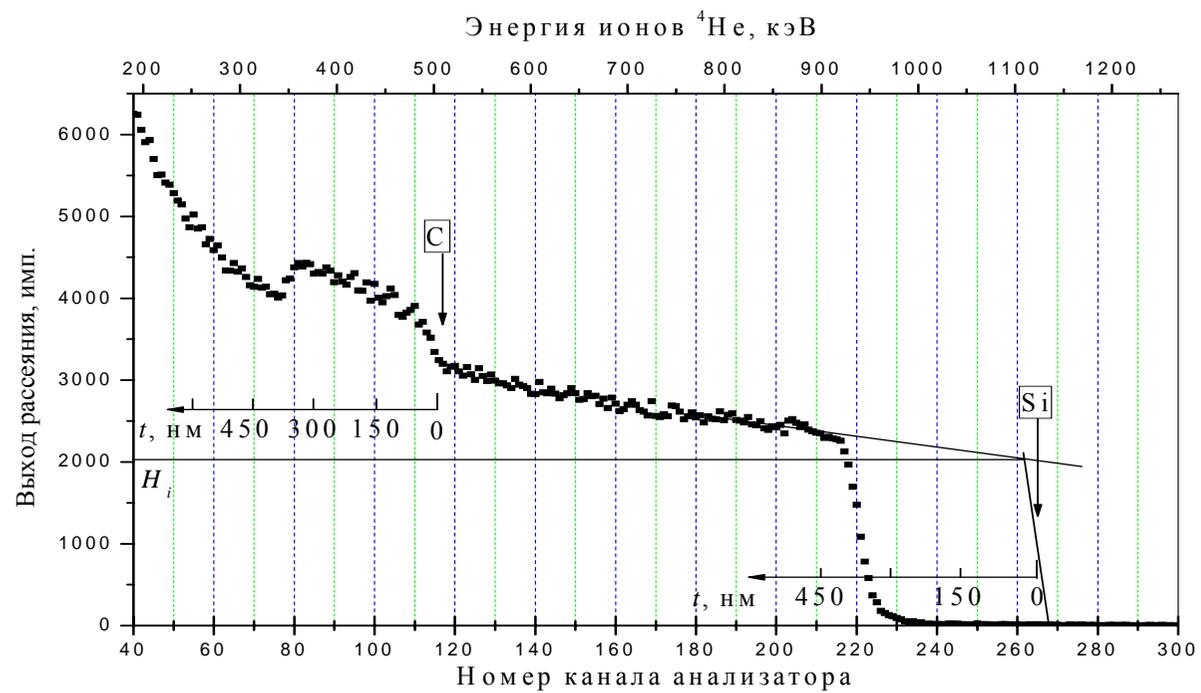


Рис. 23. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ⁴He от углеродной пленки на кремниевой подложке

Нанесем шкалы глубин на спектр (рис. 23). По шкалам определим толщину углеродной пленки. Слою, содержащему углерод, соответствует на спектре интервал с 76-го по 118-й канал. С учетом размытия правого и левого краев спектра вследствие ограничений по разрешающей способности спектрометра толщина t_c углеродной пленки, определенная по сигналу углерода, составляет $(116 - 78) 9,85 = 374,3$ нм. Толщина углеродной пленки, определенная по сигналу кремния, равна $(265 - 221) 8,38 = 368,7$ нм. Среднее значение толщины пленки – примерно 370 нм.

Оценим плотность осажденной на подложке углеродной пленки. Вначале рассчитаем по формуле (67) слоевое содержание углерода. Высота сигнала от кремниевой подложки, определенная по спектру (рис. 21), равна 2035 импульсов. Площадь пика, соответствующего рассеянию анализирующих ионов на ядрах атомов углерода, определенная по спектру за вычетом фона, составляет 23390 имп.канал. Слоевое содержание углерода

$$(Nt)_c = \frac{23\,390 \cdot 0,991 \cdot 4147}{2035 \cdot 0,150 \cdot 99,01 \cdot 10^{-15}} = 3,18 \cdot 10^{18} \text{ атом/см}^2.$$

Атомная плотность

$$N_c = \frac{(Nt)_c}{t_c} = \frac{3,18 \cdot 10^{18}}{370 \cdot 10^{-7}} = 8,59 \cdot 10^{22} \text{ атом/см}^3.$$

Полученное значение меньше атомной плотности графита, равной $1,76 \cdot 10^{23}$ атом/см³ (см. прил.10 [1]), что вполне объяснимо, поскольку при осаждении тонкопленочных покрытий образуются рыхлые менее плотные в сравнении с массивными материалами структуры.

Пример 21. Исследование поверхности кремния, подвергнутого анодному окислению

Спектр резерфордовского обратного рассеяния ионов ⁴He от поверхности кремния, подвергнутого электрохимическому анодному окислению, представлен в табл. 22 и на рис. 24. Начальная энергия анализирующих ионов $E_0 = 1,0$ МэВ; угол рассеяния $\theta = 104^\circ$; углы $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 76^\circ$. Данные для калибровки энергетической шкалы спектрометра приведены в табл. 23.

В табл. 23 содержатся номера каналов анализатора, соответствующих энергии анализирующих ионов после их рассеяния на ядрах атомов всех элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Отметим эти каналы на спектре (рис. 24).

Распечатка спектра обратного рассеяния

№ ка-нала	Выход рассеяния, имп.									
40.	3737	3632	3658	3450	3495	3408	3498	3443	3319	3253
50.	3237	3249	3152	3157	3180	3035	3106	2992	2893	3045
60.	2911	2984	2929	2866	2954	2920	2800	2820	2757	2746
70.	2869	2724	2717	2725	2565	2574	2637	2594	2545	2606
80.	2542	2523	2563	2593	2572	2513	2496	2534	2497	2425
90.	2448	2477	2430	2473	2380	2357	2398	2357	2360	2355
100.	2350	2370	2366	2345	2400	2374	2361	2359	2350	2318
110.	2352	2305	2292	2276	2312	2259	2281	2325	2332	2238
120.	2316	2311	2209	2269	2193	2296	2321	2218	2337	2268
130.	2198	2170	2194	2243	2301	2114	2230	2255	2310	2246
140.	2176	2247	2325	2322	2353	2318	2244	2362	2192	2261
150.	2262	2218	2171	2193	2222	2213	2210	2165	2157	2208
160.	2214	2243	2319	2296	2364	2394	2428	2551	2545	2614
170.	2649	2603	2759	2758	2654	2758	2655	2685	2615	2649
180.	2572	2389	2304	2254	2130	2168	2148	2199	2098	2158
190.	2145	2166	2271	2195	2108	2135	2151	2111	2150	2030
200.	2157	2107	2116	2079	2145	2124	2191	2072	2138	2076
210.	2099	2167	2113	2160	2067	2031	2109	2020	2006	1949
220.	1898	1775	1623	1540	1345	1348	1199	1069	957	939
230.	942	840	832	818	785	774	757	754	621	577
240.	435	263	178	118	90	60	56	44	42	46
250.	37	39	48	41	38	38	32	36	43	50
260.	45	38	43	48	41	47	35	40	42	40
270.	47	31	46	38	58	47	51	55	59	46
280.	54	51	53	58	60	55	46	48	53	34
290.	34	26	27	21	21	20	17	12	11	13
300.	11	7	9	6	2	0	4	3	1	8

Таблица 23

Данные для калибровки шкалы спектрометра

Элемент	C	O	Si	As
Канал анализатора	144	182	241	295

С использованием данных табл. 23, определим по методике, изложенной в примерах 16 и 17, энергетическую ширину δE канала спектрометра (табл. 24). При этом, в отличие от предыдущих примеров, значения кинематического фактора рассеяния необходимо брать из прил. 10 [1] при угле рассеяния $\theta = 104^\circ$. Среднее значение $\delta E = 2,996$ кэВ/канал.

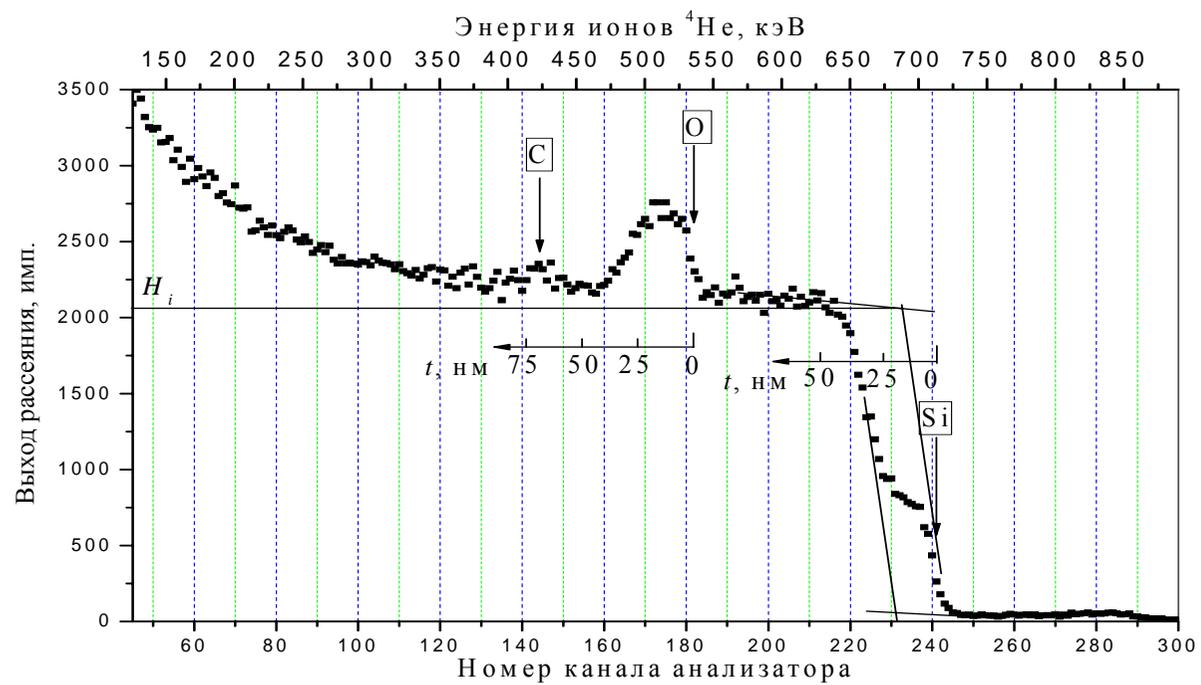


Рис. 24. Спектр резерфордского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ от поверхности кремния, подвергнутого анодному окислению

Результаты расчета энергетической ширины канала спектрометра

Элемент	K	E, кэВ	δE, кэВ/канал		
			Пара	Значение	Среднее
C	0,4309	430,9	As–C	2,953	2,996
O	0,5362	536,2	As–O	3,014	
Si	0,7036	703,6	As–Si	3,207	
As	0,8768	876,8	Si–C	2,811	

Используя это значение и привязку к каналу, соответствующему какому-то из элементов (например, кислороду), произведем по методике, изложенной в примерах 16 и 17, калибровку энергетической шкалы спектрометра (верхняя шкала на рис. 24).

Построим шкалу глубин для обоих элементов, входящих в состав анализируемого слоя. Сначала рассчитаем по формуле (66) значения фактора тормозного сечения ионов ${}^4\text{He}$ в среде при рассеянии на ядрах кремния и кислорода, а затем определим соответствующие значения δt .

Значения фактора тормозного сечения при рассеянии на ядрах кремния и кислорода:

$$[\varepsilon]_{\text{Si}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,7036}{\cos 0^\circ} \cdot 66,30 + \frac{1}{\cos 76^\circ} \cdot 70,24 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 336,99 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)},$$

$$[\varepsilon]_{\text{O}}^{\text{Si}} = \left[\frac{0,5362}{\cos 0^\circ} \cdot 66,30 + \frac{1}{\cos 76^\circ} \cdot 70,79 \right] \cdot 10^{-15} =$$

$$= 328,17 \cdot 10^{-15} \text{ эВ/(атом/см}^2\text{)}.$$

Значения глубин, соответствующих одному каналу спектрометра:

$$\delta t_{\text{Si}} = \frac{2996}{5 \cdot 10^{22} \cdot 336,99 \cdot 10^{-15}} = 1,78 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 1,78 \text{ нм/канал};$$

$$\delta t_{\text{O}} = \frac{2996}{5 \cdot 10^{22} \cdot 328,17 \cdot 10^{-15}} = 1,83 \cdot 10^{-7} \text{ см/канал} = 1,83 \text{ нм/канал}.$$

Сопоставляя полученные значения со значениями δt в предыдущих примерах, видим, что снятие спектра при угле рассеяния $\theta = 104^\circ$ при-

водит к существенному изменению шкалы глубин, что позволяет более детально исследовать тонкие приповерхностные слои.

Нанесем шкалы глубин на спектр (рис. 24). По шкалам определим толщину оксидной пленки. По сигналу кислорода

$$t_{\text{O}} = (182 - 166) 1,83 = 29,28 \text{ нм};$$

по сигналу кремния

$$t_{\text{Si}} = (241 - 224) 1,78 = 30,26 \text{ нм}.$$

Среднее значение толщины пленки $t = 29,8 \text{ нм}$.

Определим слоевое содержание кислорода и кремния в оксидной пленке (см. формулу (67)). Высота сигнала от кремниевой подложки, определенная по спектру (рис. 24), составляет 2060 имп. Площадь пика, соответствующего рассеянию анализирующих ионов на ядрах атомов кислорода, определенная по спектру за вычетом фона, равна 11 036 имп.·канал. Слоевое содержание кислорода

$$(Nt)_{\text{O}} = \frac{11\,036 \cdot 3,301 \cdot 2996}{2060 \cdot 1,050 \cdot 336,99 \cdot 10^{-15}} = 1,50 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Площадь сигнала в интервале с 224-го по 243-й канал, соответствующего рассеянию ионов ^4He на ядрах атомов кремния, входящих в состав оксида, определенная по спектру за вычетом фона, равна 14 930 имп.·канал. Слоевое содержание кремния в оксидном слое

$$(Nt)_{\text{Si}} = \frac{14\,930 \cdot 3,301 \cdot 2996}{2060 \cdot 3,301 \cdot 336,99 \cdot 10^{-15}} = 0,64 \cdot 10^{17} \text{ атом/см}^2.$$

Отношение слоевых содержаний

$$\frac{(Nt)_{\text{O}}}{(Nt)_{\text{Si}}} = \frac{1,50 \cdot 10^{17}}{0,64 \cdot 10^{17}} \approx 2,34.$$

Следовательно, в результате анодного окисления поверхности кремния образуется оксидный слой, обогащенный кислородом по сравнению со стехиометрическим оксидом кремния SiO_2 .

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Успешное усвоение учебного материала дисциплины может быть обеспечено систематической работой студентов, включающей изучение теоретического материала и выполнение индивидуальных контрольных заданий.

Выполнение заданий способствует практическому закреплению и более глубокому пониманию теоретического материала. Перед выполнением контрольных заданий необходимо, руководствуясь программой дисциплины (см. с. 4–10), изучить соответствующий материал по учебному пособию [1], а также проработать и усвоить методику выполнения заданий, изложенную в данном пособии-практикуме. Степень усвоения учебного материала следует проверять, выполняя задания и отвечая на вопросы для самоконтроля, содержащиеся в пособии [1].

Контрольные задания должны быть выполнены самостоятельно, с учетом требований, предъявляемых к каждому из заданий. Отчет о выполнении каждого задания включает его аккуратное оформление в рабочей тетради в письменном виде и последующее собеседование по теме задания с преподавателем. Расчеты должны сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. Результаты вычислений, как правило, необходимо представлять в виде таблиц (см. примеры, рассмотренные в данном пособии). Графические зависимости должны быть построены на миллиметровой бумаге либо с применением компьютера. Значения физических величин, полученные при вычислениях, необходимо записывать с указанием единиц их измерения.

Студенты, обучающиеся по заочной форме, выполняют задания контрольной работы по варианту, выбор которого осуществляется по табл. 25 в соответствии с первыми буквами фамилии, имени и отчества. Например, студент Степанов Валерий Евгеньевич в контрольной работе должен выполнить следующие задания: **A16, A43, A71** (что соответствует букве С), **B3, C17** (соответствие букве В), **D10, E6** (соответствие букве Е). Контрольная работа должна быть выполнена в отдельной тетради с полями для записи вопросов, замечаний и пометок преподавателя, рецензирующего работу. В конце работы следует сделать ссылку на литературу, использованную студентом при выполнении заданий. Контроль степени усвоения материала осуществляется путем проверки выполненных заданий и последующей их защиты.

Студенты, обучающиеся по дневной форме, выполняют на протяжении учебного семестра индивидуальные задания, включающие задачи, приведенные в разделе 3.2 под рубриками **B, C, D, E, F и G**.

Таблица выбора варианта задания контрольной работы

Первые буквы ФИО	Фамилия			Имя		Отчество	
А	A5	A36	A73	B1	C15	D5	E1
Б	A8	A42	A82	B27	C2	D6	E2
В	A18	A31	A69	B3	C17	D7	E3
Г	A6	A34	A84	B28	C4	D8	E4
Д	A2	A52	A61	B5	C19	D9	E5
Е	A11	A51	A74	B30	C6	D10	E6
Ж	A3	A38	A68	B7	C21	D1	E7
З	A7	A48	A83	B26	C8	D2	E8
И	A13	A39	A80	B9	C23	D3	E9
К	A14	A32	A79	B24	C10	D4	E10
Л	A22	A54	A66	B11	C25	D13	E11
М	A20	A41	A58	B19	C12	D17	E12
Н	A15	A33	A70	B13	C27	D14	E13
О	A21	A44	A59	B17	C14	D16	E14
П	A24	A45	A64	B15	C28	D18	E15
Р	A10	A46	A60	B22	C30	D15	E31
С	A16	A43	A71	B16	C13	D11	E32
Т	A9	A35	A57	B14	C29	D12	E33
У	A12	A37	A49	B18	C11	D3	E34
Ф	A17	A57	A62	B12	C26	D24	E35
Х	A25	A55	A72	B20	C9	D23	E36
Ц	A19	A50	A75	B10	C24	D20	E37
Ч	A26	A63	A78	B21	C7	D22	E38
Ш	A29	A53	A81	B8	C22	D8	E39
Щ	A23	A40	A67	B23	C5	D9	E40
Э	A27	A47	A77	B6	C20	D19	E41
Ю	A30	A56	A65	B25	C3	D25	E42
Я	A28	A66	A76	B4	C18	D2	E43

3.1. Вопросы контрольных заданий

Изложите материал, дающий ответы на следующие вопросы программы:

A1. Предмет и базовые понятия дисциплины. Физическая величина и ее значения. Классификация физических величин. Основное

- уравнение измерений. Единицы измерения физических величин.
- A2.** Принципы и методы измерений. Классификация методов измерений. Компенсационный и мостовой методы измерений.
 - A3.** Общая характеристика средств измерений. Меры. Измерительные приборы. Измерительные системы.
 - A4.** Сигналы измерительной информации. Информативные параметры сигнала измерительной информации. Классификация сигналов.
 - A5.** Измерительный преобразователь. Измерительное преобразование. Функция преобразования. Передаточная характеристика.
 - A6.** Статические характеристики измерительных преобразователей: передаточный коэффициент, чувствительность преобразователя, порог чувствительности.
 - A7.** Построение физико-математических моделей и расчет статических характеристик измерительных преобразователей.
 - A8.** Блок-схемы преобразования сигналов в средствах измерений. Правила построения блок-схем. Основные элементы передачи и преобразования сигналов.
 - A9.** Преобразования блок-схем сигналов. Передаточные коэффициенты последовательных и параллельных соединений, соединений с положительной и отрицательной обратной связью.
 - A10.** Построение физико-математических моделей и блок-схем сигналов измерительных устройств.
 - A11.** Расчет передаточных коэффициентов средств измерений на основе блок-схем сигналов. Алгоритм расчета передаточных коэффициентов.
 - A12.** Динамические измерения физических величин. Динамические характеристики средств измерений. Классификация динамических характеристик.
 - A13.** Частные динамические характеристики измерительных преобразователей: порядок задержки, время задержки, время установления, время успокоения, постоянная времени.
 - A14.** Переходная и импульсная переходная динамические характеристики измерительного преобразователя с задержкой сигнала первого порядка.
 - A15.** Переходная динамическая характеристика измерительного преобразователя с задержкой сигнала второго порядка.
 - A16.** Определение временных динамических характеристик средств измерений с использованием детерминированных непериодических тестовых сигналов.
 - A17.** Амплитудно-частотная и фазово-частотная полные динамические характеристики измерительных преобразователей.

- A18.** Динамические характеристики измерительных преобразователей: передаточная функция, комплексный коэффициент передачи, собственная частота, добротность.
- A19.** Определение частотных динамических характеристик средств измерений с использованием периодических тестовых сигналов.
- A20.** Передаточные функции последовательных и параллельных измерительных систем, систем с обратной связью.
- A21.** Обобщенная функциональная схема измерительной системы. Преобразование видов энергии в измерительных системах.
- A22.** Первичные и вторичные измерительные преобразователи. Генераторные и параметрические преобразователи. Эффективность преобразования входной мощности в выходную.
- A23.** Зависимость характеристик измерительного прибора от чувствительностей и эффективностей преобразования отдельных измерительных звеньев. Входной и выходной импеданс преобразователя.
- A24.** Согласование последовательных измерительных звеньев по импедансу при наличии генераторных преобразователей.
- A25.** Зависимость эффективности преобразования генераторных измерительных преобразователей от значения и характера сопротивления нагрузки.
- A26.** Согласование последовательных измерительных звеньев по импедансу при наличии параметрических преобразователей.
- A27.** Принцип действия электронных усилителей электрических сигналов на основе вакуумного триода и транзистора.
- A28.** Усилители сигналов измерительной информации с отрицательной обратной связью, их основные характеристики.
- A29.** Операционные усилители. Эквивалентная схема и основные характеристики операционного усилителя.
- A30.** Применение операционных усилителей для аналогового преобразования сигналов измерительной информации.
- A31.** Функциональная схема измерения состава вещества с применением излучений. Электромагнитное, корпускулярное и акустическое излучения.
- A32.** Необходимость вакуумных условий при реализации измерений с применением корпускулярного излучения. Степени вакуума.
- A33.** Природа и основные характеристики электромагнитного излучения. Шкала электромагнитных волн.
- A34.** Источники СВЧ электромагнитного излучения. Принцип действия лампового генератора. Генераторные лампы.
- A35.** Особенности работы генераторных ламп СВЧ-диапазона. Конструкция и принцип действия металлокерамического генератор-

ного триода.

- A36.** Магнетронные генераторы СВЧ-излучения. Схема и принцип действия многорезонаторного магнетронного генератора.
- A37.** Принцип действия объемного СВЧ-резонатора.
- A38.** Принцип действия лампы обратной волны магнетронного типа. Условие синхронизма электронов и волн. Замедляющая система.
- A39.** Задание частоты, отбор, вывод и передача генерируемого СВЧ-излучения. Волноводы.
- A40.** Волноводы. Механизм распространения СВЧ-излучения в волноводе. Основные характеристики волноводов.
- A41.** Источники электромагнитного излучения оптического диапазона. Основные характеристики источников света и потоков оптического электромагнитного излучения. Энергетические и световые фотометрические величины.
- A42.** Принцип действия лазеров. Инверсия населенностей. Вынужденное излучение электромагнитной энергии. Полупроводниковые инжекционные лазеры.
- A43.** Формирование потоков оптического излучения. Световоды. Принцип действия волоконного световода. Волоконно-оптические линии.
- A44.** Источники рентгеновского излучения. Принцип действия рентгеновской трубки. Монохроматизация рентгеновского излучения. Источники γ -излучения.
- A45.** Приемно-усилительные системы СВЧ-излучения. Принцип действия лампы бегущей волны.
- A46.** Приемники оптического излучения. Принципы действия фотоэлектронного умножителя, электронно-оптического преобразователя и фотодиода. Основные характеристики приемников оптического излучения.
- A47.** Спектрометрия оптического излучения. Принципы действия спектральных приборов: дисперсионных призм и дифракционных решеток. Основные характеристики оптических спектральных приборов.
- A48.** Регистрация рентгеновского и γ -излучений. Детекторы излучений. Спектрометрия рентгеновского излучения.
- A49.** Измерение энергии γ -излучения с применением черенковских счетчиков полного поглощения, счетчиков, действие которых основано на переходном излучении.
- A50.** Природа и основные характеристики корпускулярного излучения. Характеристики корпускулярного излучения как потока частиц: эмиттанс, первеанс. Акцептанс.
- A51.** Принцип действия электронных источников. Электронная эмис-

- сия. Электронная пушка.
- A52.** Принцип действия ионных источников. Ионизация молекул газов. Газовые разряды. Схема высокочастотного ионного источника.
 - A53.** Формирование потоков и монохроматизация корпускулярного излучения.
 - A54.** Фокусировка корпускулярного излучения. Электростатические и магнитные линзы.
 - A55.** Регистрация корпускулярного излучения. Детекторы и счетчики корпускулярного излучения.
 - A56.** Спектральный анализ корпускулярного излучения. Масс-спектрометры.
 - A57.** Спектральный анализ корпускулярного излучения. Электростатические бездисперсионные и дисперсионные энергоанализаторы.
 - A58.** Спектральный анализ корпускулярного излучения. Полупроводниковые детекторы-энергоанализаторы.
 - A59.** Временное уравнение Шрёдингера. Уравнение Шрёдингера для стационарных состояний квантовой системы.
 - A60.** Особенности решения уравнения Шрёдингера для атома водорода. Собственные значения энергии атома. Схема энергетических уровней и излучательных переходов атома водорода.
 - A61.** Собственные волновые функции атома. Атомные электронные орбитали. Квантовые числа.
 - A62.** Квантовые числа. Спин и собственный магнитный момент электрона. Принцип Паули. Последовательность заполнения электронных оболочек в многоэлектронных атомах.
 - A63.** Спин и собственный магнитный момент электрона. Спин-орбитальное взаимодействие. Полный момент электрона в атоме.
 - A64.** Физические основы оптической спектроскопии. Эмиссионный и атомно-абсорбционный спектральный анализ.
 - A65.** Ширина атомных энергетических уровней и естественная ширина спектральных линий.
 - A66.** Спектры щелочных металлов. Схема энергетических уровней и излучательных переходов атома лития. Правила отбора.
 - A67.** Дублетная структура спектров щелочных металлов. Спин-орбитальное взаимодействие.
 - A68.** Спин-орбитальное взаимодействие. Мультиплетность энергетических уровней атомов и атомных спектров.
 - A69.** Расщепление энергетических уровней атомов в магнитном поле. Эффект Зеемана. Эффект Пашена – Бака.
 - A70.** Магнитный резонанс. Электронный парамагнитный резонанс. Принцип действия радиоспектрометра.
 - A71.** Эффект Штарка. Вырождение энергетических уровней атомов.

- Кратность вырождения. Снятие вырождения.
- A72. Природа характеристического рентгеновского электромагнитного излучения. Спектральные серии рентгеновского излучения атомов.
 - A73. Физические основы рентгеновского спектрального микроанализа. Прицельный параметр. Эффективное сечение взаимодействия.
 - A74. Физические основы рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Принцип действия фотоэлектронного спектрометра.
 - A75. Фотоэлектронные спектры. Обработка спектров. Качественный и количественный анализ состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии.
 - A76. Ожé-эффект. Физические основы ожé-электронной спектроскопии.
 - A77. Типы ядерных взаимодействий и соответствующие ядерно-физические методы измерения состава веществ.
 - A78. Физические основы спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния.
 - A79. Измерение состава веществ методом резерфордовского обратного рассеяния. Спектры резерфордовского обратного рассеяния. Обработка спектров.
 - A80. Основы ядерного активационного микроанализа.
 - A81. Природа и основные характеристики акустического излучения.
 - A82. Источники и приемники акустического излучения. Электроакустические преобразователи и их характеристики.
 - A83. Формирование акустических полей и потоков акустического излучения. Акустические линзы, зеркала, волноводы и концентраторы.
 - A84. Акустическое волновое сопротивление среды. Принципы измерений с применением акустического излучения.

3.2. Задачи контрольных заданий

3.2.1. Построение физико-математических моделей и блок-схем преобразования сигналов; расчет характеристик измерительных преобразователей на основе блок-схем

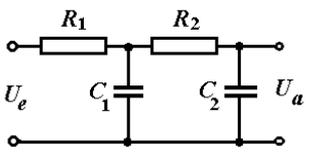
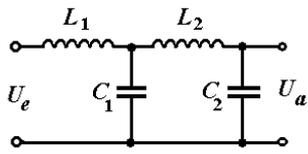
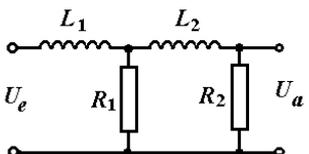
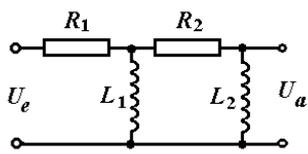
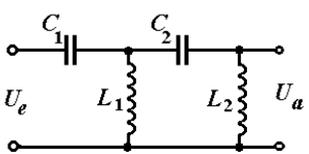
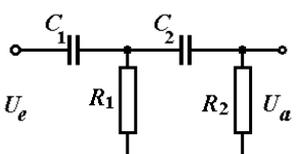
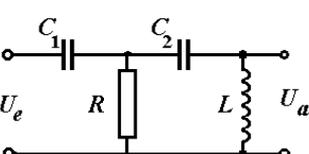
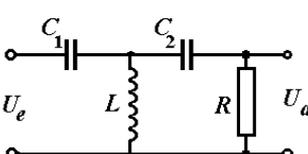
Постройте физико-математические модели и блок-схемы преобразования сигналов в измерительных преобразователях напряжения на основе цепей переменного тока, электрические схемы которых приведены в табл. 26 и 27 (соответственно задания **В** и **С**). На вход преобразователей подается входное напряжение U_e , которое преобразуется в выходное напряжение U_a . При построении блок-схем сигналов изобразите измерительные преобразования на каждом из элементов электрической цепи. На основе блок-схем получите матема-

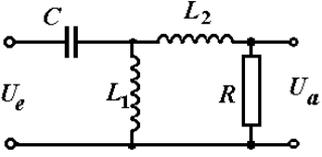
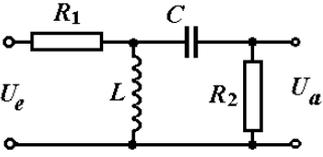
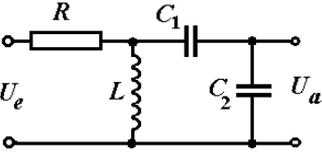
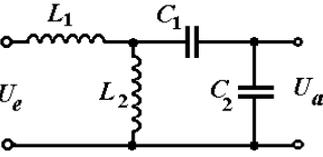
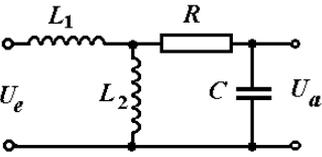
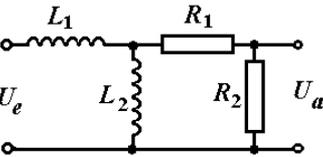
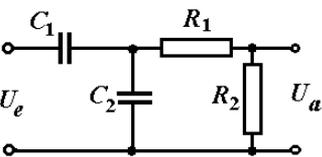
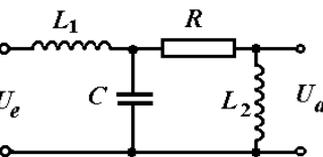
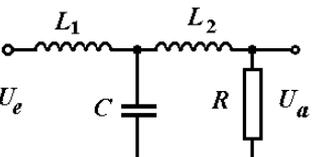
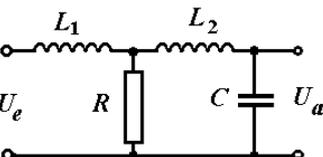
тические выражения для расчета передаточных функций $G(p)$ и комплексных коэффициентов передачи $G(i\omega)$ преобразователей.

При выполнении заданий **В** и **С** следует использовать методика, изложенную на с. 24–27 настоящего пособия. Выражения для определения передаточных функций $G(p)$ выводятся в соответствии с формулой (24). Формулы для вычисления значений комплексных коэффициентов передачи $G(i\omega)$ преобразователей получаются из выражений $G(p)$ заменой $p = i\omega$.

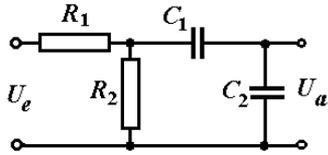
Таблица 26

Электрические схемы преобразователей напряжения на основе цепей переменного тока

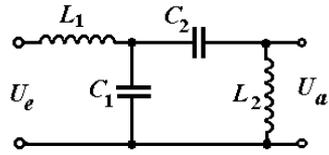
<p>B1</p> 	<p>B2</p> 
<p>B3</p> 	<p>B4</p> 
<p>B5</p> 	<p>B6</p> 
<p>B7</p> 	<p>B8</p> 

<p>B9</p> 	<p>B10</p> 
<p>B11</p> 	<p>B12</p> 
<p>B13</p> 	<p>B14</p> 
<p>B15</p> 	<p>B16</p> 
<p>B17</p> 	<p>B18</p> 

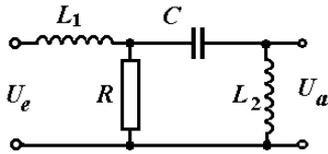
B19



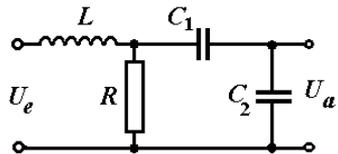
B20



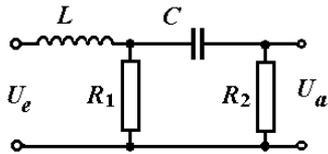
B21



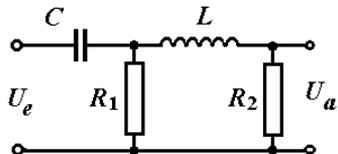
B22



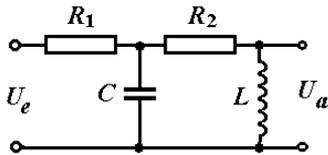
B23



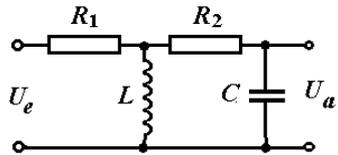
B24



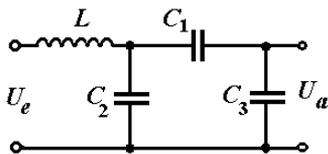
B25



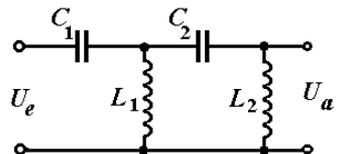
B26

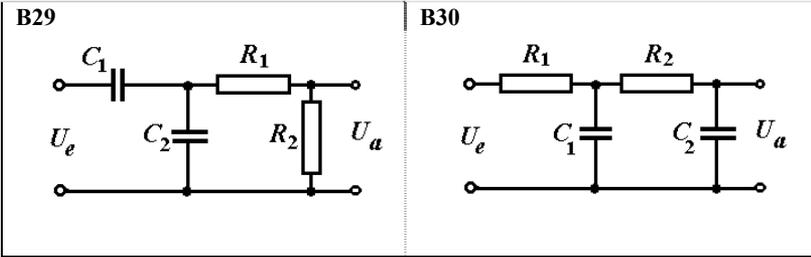


B27



B28

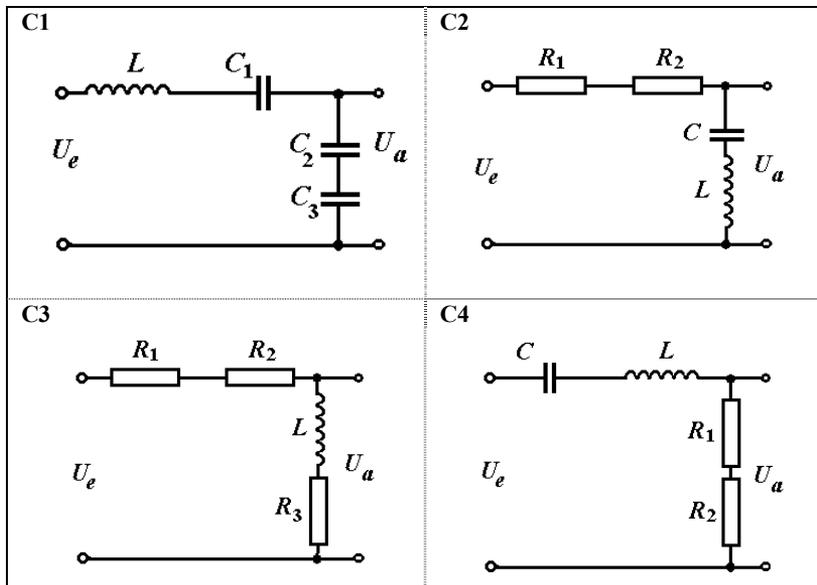


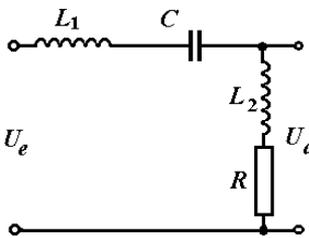
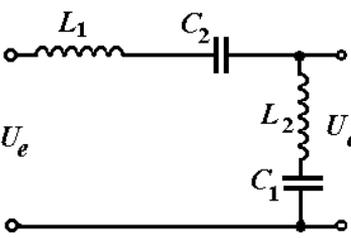
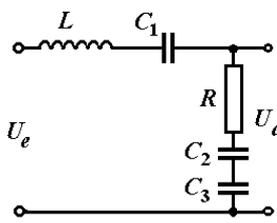
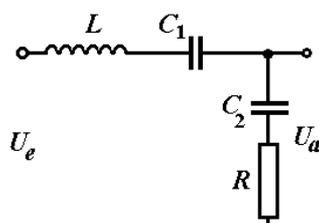
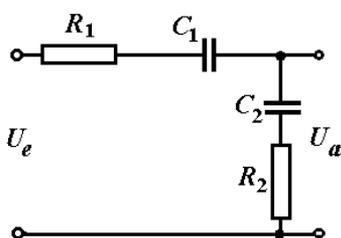
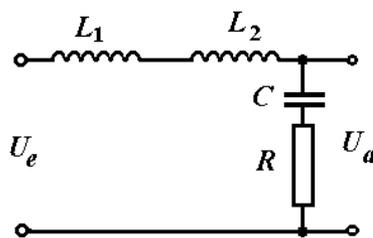
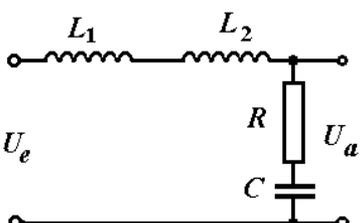
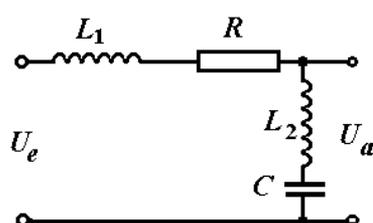


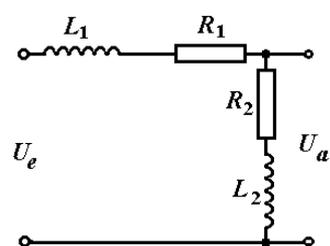
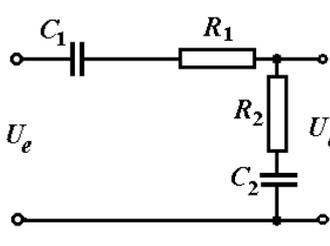
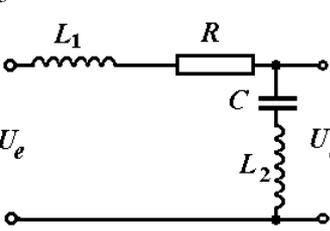
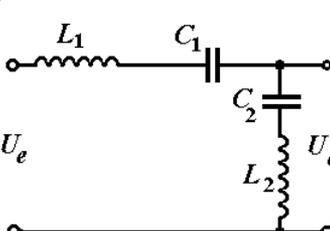
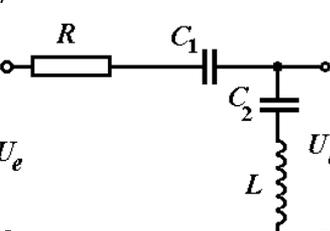
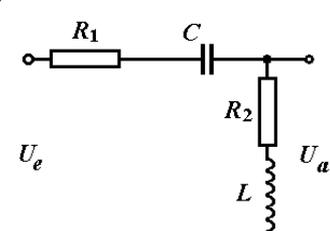
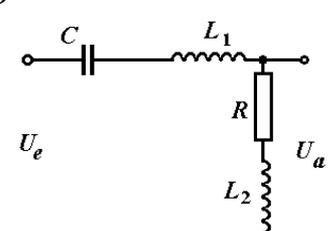
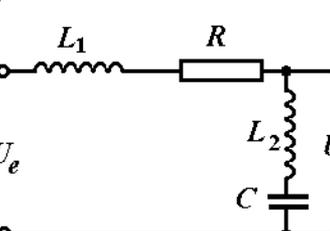
При построении физико-математических моделей преобразователей, электрические схемы которых приведены в табл. 27, (задания С) необходимо принять во внимание, что все элементы электрической цепи соединены последовательно. Входное напряжение U_e приложено ко всем элементам цепи; разветвлений электрического тока в цепи нет. При построении блок-схем преобразования сигналов требуется изобразить измерительные преобразования на каждом из элементов электрической цепи без предварительного преобразования цепи и замены ее на эквивалентную.

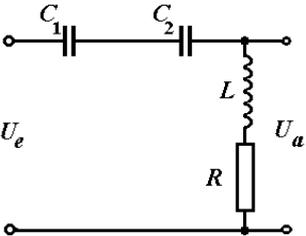
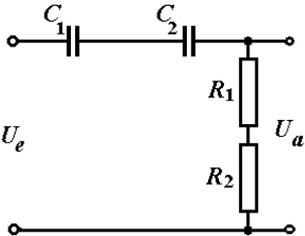
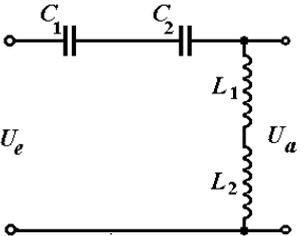
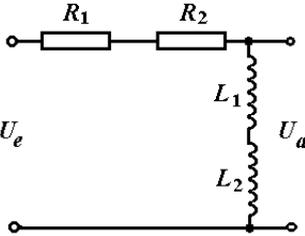
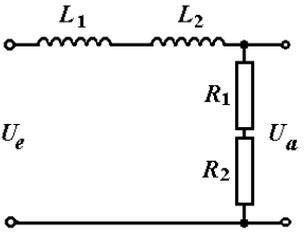
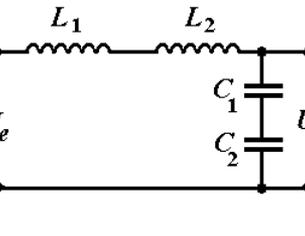
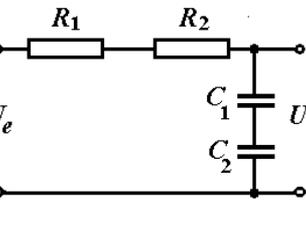
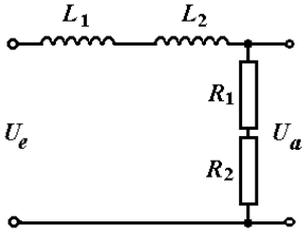
Таблица 27

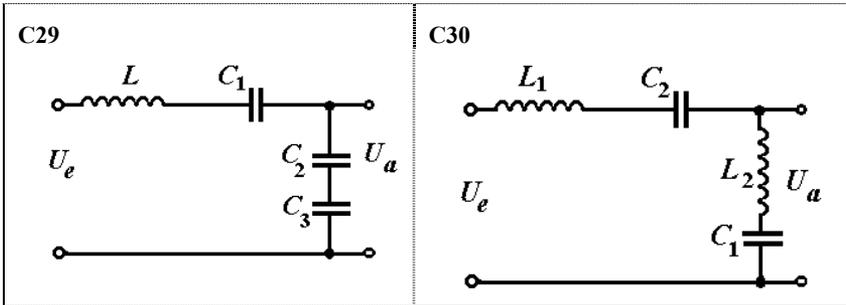
**Электрические схемы преобразователей напряжения
на основе цепей переменного тока**



<p>C5</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>	<p>C6</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>
<p>C7</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>	<p>C8</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>
<p>C9</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>	<p>C10</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>
<p>C11</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>	<p>C12</p>  <p>U_e</p> <p>U_a</p>

<p>C13</p>  <p>Diagram C13: A series circuit with an inductor L_1 and a resistor R_1. A parallel branch contains a resistor R_2 and an inductor L_2. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>	<p>C14</p>  <p>Diagram C14: A series circuit with a capacitor C_1 and a resistor R_1. A parallel branch contains a resistor R_2 and a capacitor C_2. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>
<p>C15</p>  <p>Diagram C15: A series circuit with an inductor L_1 and a resistor R. A parallel branch contains a capacitor C and an inductor L_2. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>	<p>C16</p>  <p>Diagram C16: A series circuit with an inductor L_1 and a capacitor C_1. A parallel branch contains a capacitor C_2 and an inductor L_2. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>
<p>C17</p>  <p>Diagram C17: A series circuit with a resistor R and a capacitor C_1. A parallel branch contains a capacitor C_2 and an inductor L. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>	<p>C18</p>  <p>Diagram C18: A series circuit with a resistor R_1 and a capacitor C. A parallel branch contains a resistor R_2 and an inductor L. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>
<p>C19</p>  <p>Diagram C19: A series circuit with a capacitor C and an inductor L_1. A parallel branch contains a resistor R and an inductor L_2. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>	<p>C20</p>  <p>Diagram C20: A series circuit with an inductor L_1 and a resistor R. A parallel branch contains an inductor L_2 and a capacitor C. The input voltage is U_e and the output voltage is U_a.</p>

<p>C21</p> 	<p>C22</p> 
<p>C23</p> 	<p>C24</p> 
<p>C25</p> 	<p>C26</p> 
<p>C27</p> 	<p>C28</p> 



3.2.2. Определение характеристик оптических спектральных приборов

Основными характеристиками способности дисперсионных призм и дифракционных решеток к пространственному разделению спектральных линий с близкими значениями длин волн в оптических спектрах являются угловая дисперсия и разрешающая способность (см. п. 2.4; пример 12). При выполнении данного задания необходимо решить задачу, общее условие которой приведено ниже, и определить ряд параметров, характеризующих дифракционную решетку при ее использовании в качестве оптического спектрального прибора.

Задача

Имеется прозрачная дифракционная решетка, ширина заштрихованной области которой W . Период решетки d , ширина каждой из ее прозрачных щелей b . m – порядок спектра. Максимально возможный порядок спектра, в котором с применением решетки можно наблюдать достаточно интенсивную спектральную линию с длиной волны λ , равен m_{\max} . β – угол отклонения света, под которым наблюдается спектральная линия с длиной волны λ в спектре максимального порядка. D – угловая дисперсия решетки в спектре m -го порядка; R – ее разрешающая способность; R_{\max} – максимальное значение разрешающей способности решетки для света с заданной длиной волны λ ; $\Delta\lambda$ – минимальная разность длин волн соседних спектральных линий с длиной волны, близкой к значению λ , которые могут быть разрешены дифракционной решеткой.

В соответствии с вариантом задания **D** определите значения неизвестных величин (табл. 28).

Таблица 28

Варианты задания по определению характеристик дифракционной решетки

Вариант	W , см	d , мкм	b , мкм	λ , нм	m	D , нм ⁻¹	m_{\max}	β , град.	R_{\max}	$\Delta\lambda$, нм
D1	2,70	4,5	1,2	540	3	?	?	?	?	?
D2	2,50	?	1,5	500	2	$4,08 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D3	2,34	3,6	1,1	680	2	?	?	?	?	?
D4	2,00	4,0	1,2	?	3	$8,59 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D5	2,73	?	1,0	440	3	$7,52 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D6	2,64	4,8	1,1	620	3	?	?	?	?	?
D7	2,75	5,5	1,5	?	2	$3,75 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D8	2,86	?	1,2	480	4	$8,28 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D9	2,66	3,8	1,2	520	2	?	?	?	?	?
D10	2,97	5,4	1,3	?	3	$5,89 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?

Продолжение табл. 28

Вариант	W , см	d , мкм	b , мкм	λ , нм	m	D , нм ⁻¹	m_{\max}	β , град.	R_{\max}	$\Delta\lambda$, нм
D11	2,40	3,7	1,1	?	3	$8,62 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D12	3,00	5,3	1,3	690	4	?	?	?	?	?
D13	2,56	4,1	1,5	?	2	$5,01 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D14	2,74	4,9	1,4	660	3	?	?	?	?	?
D15	1,88	3,5	1,5	430	2	?	?	?	?	?
D16	3,20	5,4	1,2	?	4	$8,49 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D17	2,65	?	1,1	450	3	$8,20 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D18	2,90	5,1	1,6	640	3	?	?	?	?	?
D19	2,85	?	1,4	475	2	$4,66 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D20	3,25	6,0	1,2	?	4	$7,54 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?

Окончание табл. 28

Вариант	W , см	d , мкм	b , мкм	λ , нм	m	D , нм ⁻¹	m_{\max}	β , град.	R_{\max}	$\Delta\lambda$, нм
D21	2,40	?	1,2	460	3	$8,47 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D22	3,00	5,8	1,1	625	4	?	?	?	?	?
D23	2,56	3,2	0,9	?	2	$6,59 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D24	2,74	?	1,3	580	3	$5,64 \cdot 10^{-4}$?	?	?	?
D25	2,88	4,6	1,1	575	3	?	?	?	?	?

3.2.3. Моделирование распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий

Постройте распределение по длинам волн интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -излучения атомов элемента, соответствующего номеру задания (табл. 29). Максимальное значение интенсивности $K_{\alpha 1}$ -линии примите равным единице ($I_{\max} = 1$ отн. ед.); значение стандартного отклонения $\sigma = 0,0015 \text{ \AA}$. Отношение максимальных значений интенсивностей спектральных линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ примите равным 2 : 1.

Таблица 29

Варианты задания по моделированию распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий K_{α} -излучения атомов элементов

Задание	Элемент	Задание	Элемент	Задание	Элемент
E1	Si	E16	Rb	E31	Ce
E2	K	E17	Sr	E32	Nd
E3	Ca	E18	Y	E33	Gd
E4	Sc	E19	Zr	E34	Tb
E5	Ti	E20	Nb	E35	Dy
E6	V	E21	Mo	E36	Ho
E7	Cr	E22	Ru	E37	Er
E8	Mn	E23	Rh	E38	Yb
E9	Fe	E24	Pd	E39	Hf
E10	Co	E25	Ag	E40	W
E11	Ni	E26	Cd	E41	Os
E12	Cu	E27	In	E42	Ir
E13	Zn	E28	Sn	E43	Au
E14	Ga	E29	Ba	E44	Pb
E15	Ge	E30	La	E45	Bi

3.2.4. Определение элементного состава поверхности образцов по фотоэлектронным спектрам

На рис. 25–54 приведены обзорные фотоэлектронные спектры, снятые при исследовании различных веществ. При выполнении каждого из заданий **F** требуется определить элементный состав анализируемого слоя исследуемого вещества, а также оценить относительное содержание атомов элементов в этом слое.

Методика обработки обзорных фотоэлектронных спектров изложена в примере 15. Необходимо идентифицировать элементы, входящие в состав приповерхностного слоя исследуемого образца, и соответствующие спектральным линиям энергетические уровни атомов. Идентификация осуществляется сравнением экспериментальных значений энергий связи с табличными (см. [1], прил. 8). Как и в примере 15, в состав всех анализируемых слоев входят атомы углерода и кислорода, которым соответствуют спектральные линии со значениями энергий связи, близкими к значениям 284 и 532 эВ соответственно.

При идентификации спектральных линий следует иметь в виду, что в некоторых спектрах из-за недостаточной разрешающей способности энергоанализатора спектральные дублеты, обусловленные расщеплением энергетических уровней атомов на подуровни вследствие спин-орбитального взаимодействия, не разрешены.

Обратите внимание на наличие дополнительных спектральных линий, обусловленных химическими сдвигами, а также на линии значительной ширины. Широкая спектральная линия, скорее всего, представляет собой набор не разрешаемых спектрометром нескольких близких по энергиям линий, наблюдаемых при наличии в анализируемом слое атомов одного и того же элемента в различных валентных состояниях.

Кроме того, следует выписать из прил. 9 [1] значения сечений фотоионизации всех идентифицированных энергетических уровней атомов, а также определить интенсивности наиболее интенсивных спектральных линий, характерных для каждого из элементов.

По формуле (64) рассчитайте оценочные значения относительного содержания атомов каждого из элементов, входящих в состав анализируемого слоя, по отношению к углероду.

Ход обработки спектров должен сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. Результаты обработки нужно представить по форме табл. 4, 5. В заключение следует сделать вывод об элементном составе анализируемого поверхностного слоя исследуемого вещества и самого вещества.

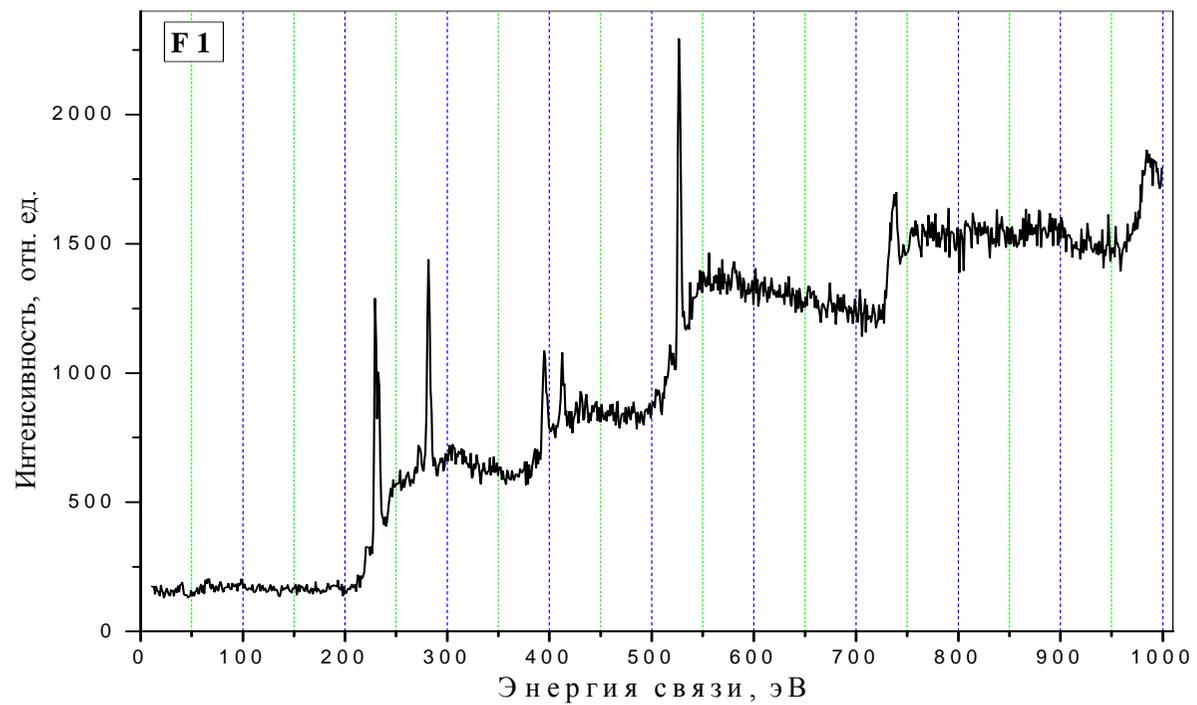


Рис. 25. Фотоэлектронный спектр к заданию F1

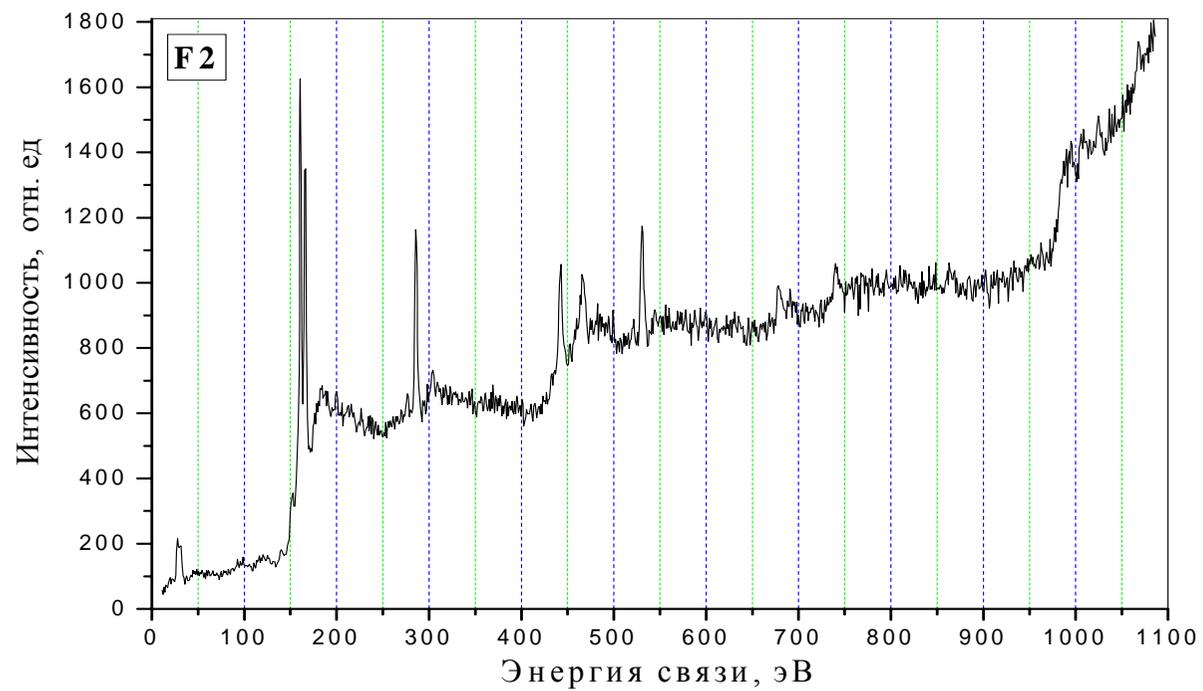


Рис. 26. Фотоэлектронный спектр к заданию F2

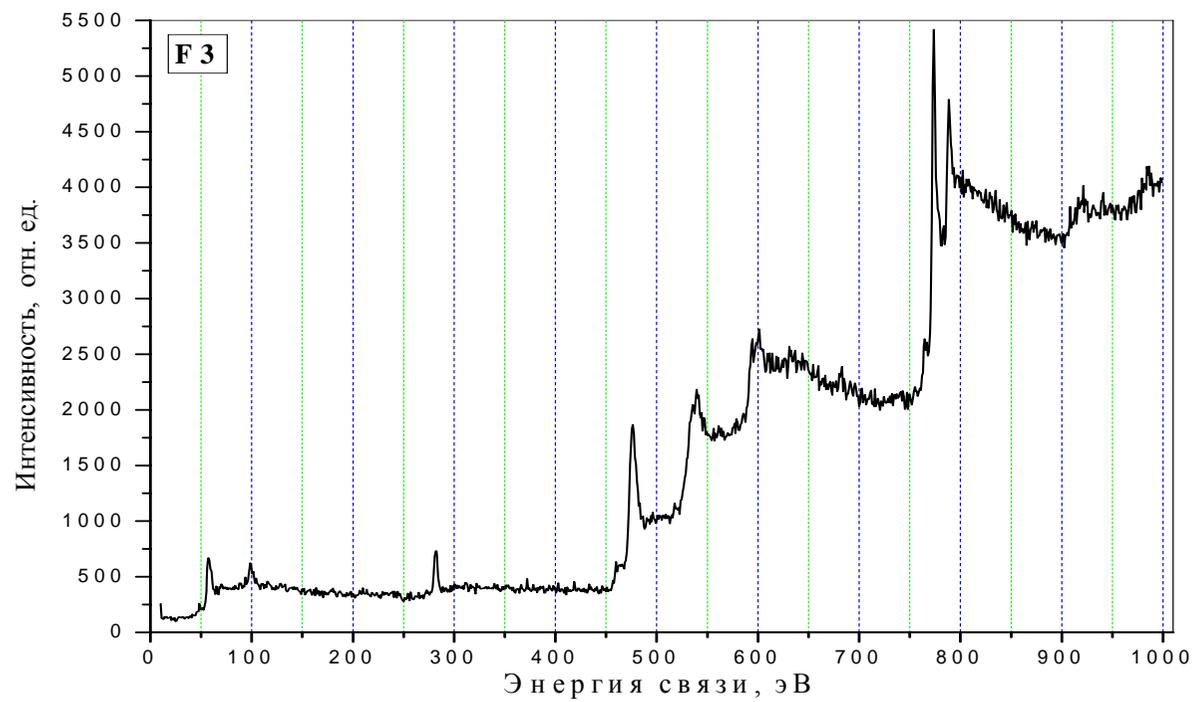


Рис. 27. Фотоэлектронный спектр к заданию F3

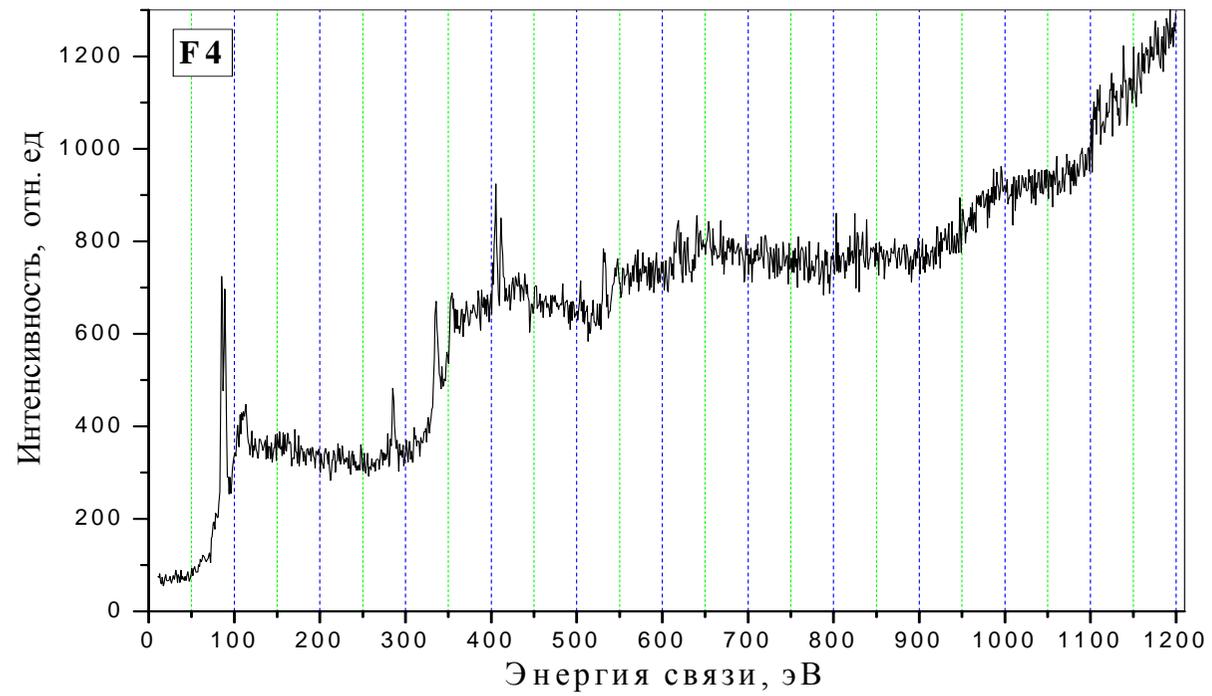


Рис. 28. Фотоэлектронный спектр к заданию F4

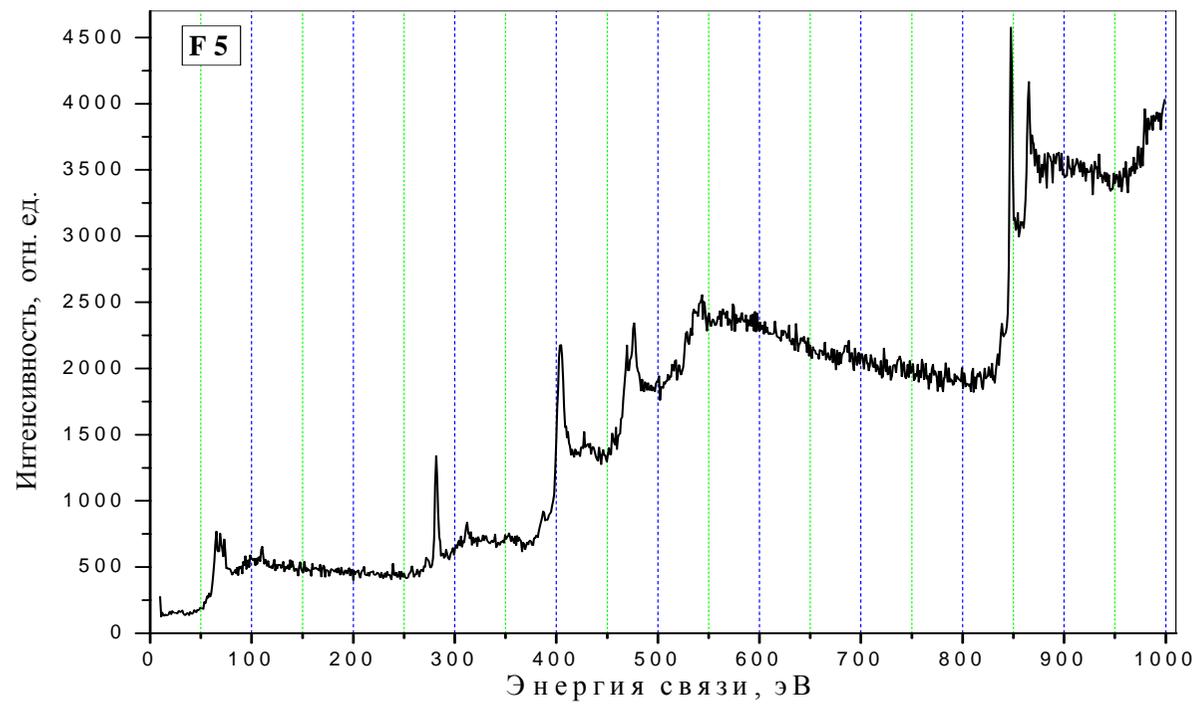


Рис. 29. Фотоэлектронный спектр к заданию F5

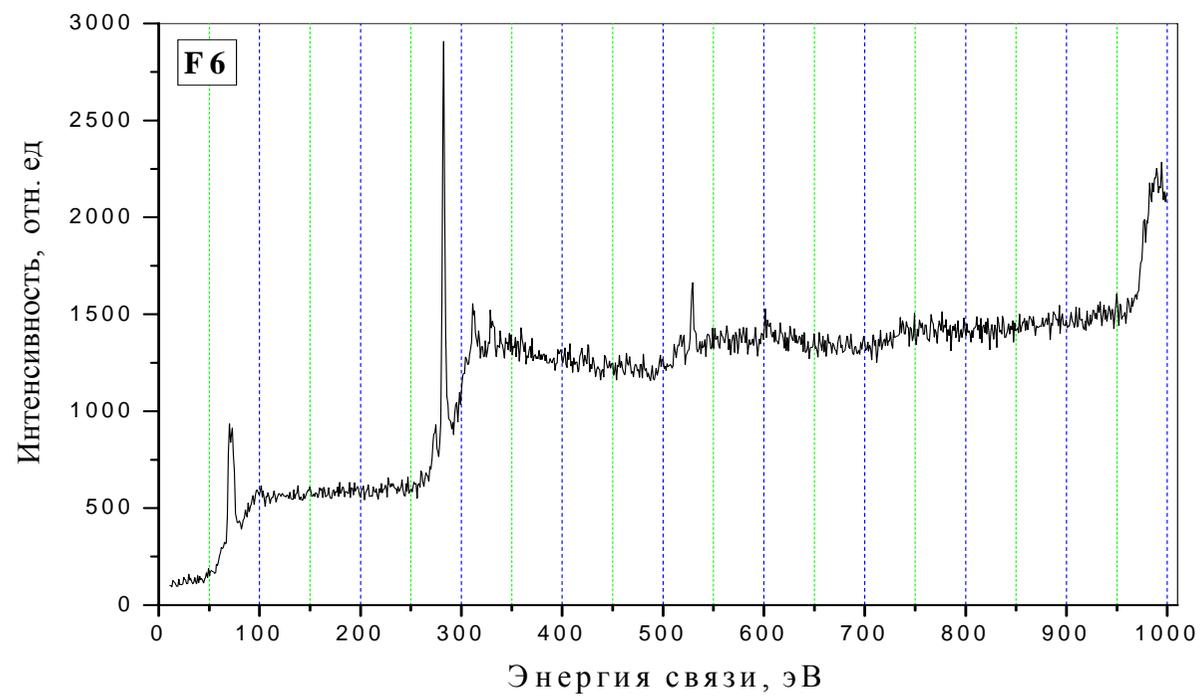


Рис. 30. Фотоэлектронный спектр к заданию **F6**

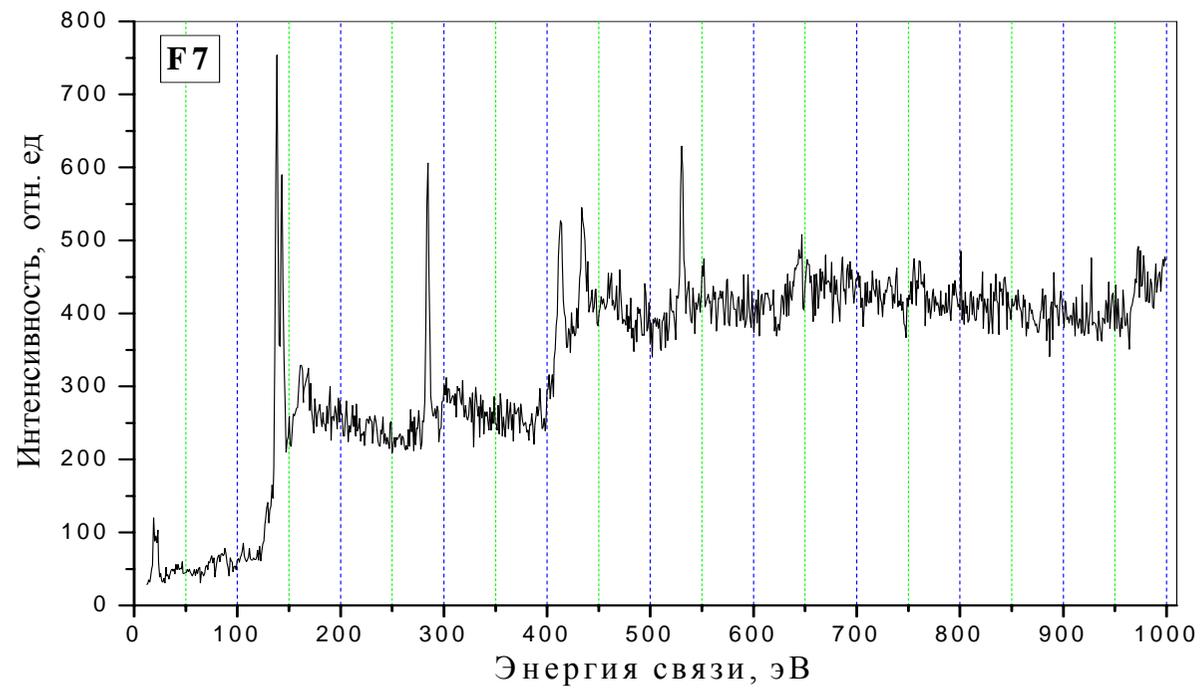


Рис. 31. Фотоэлектронный спектр к заданию F7

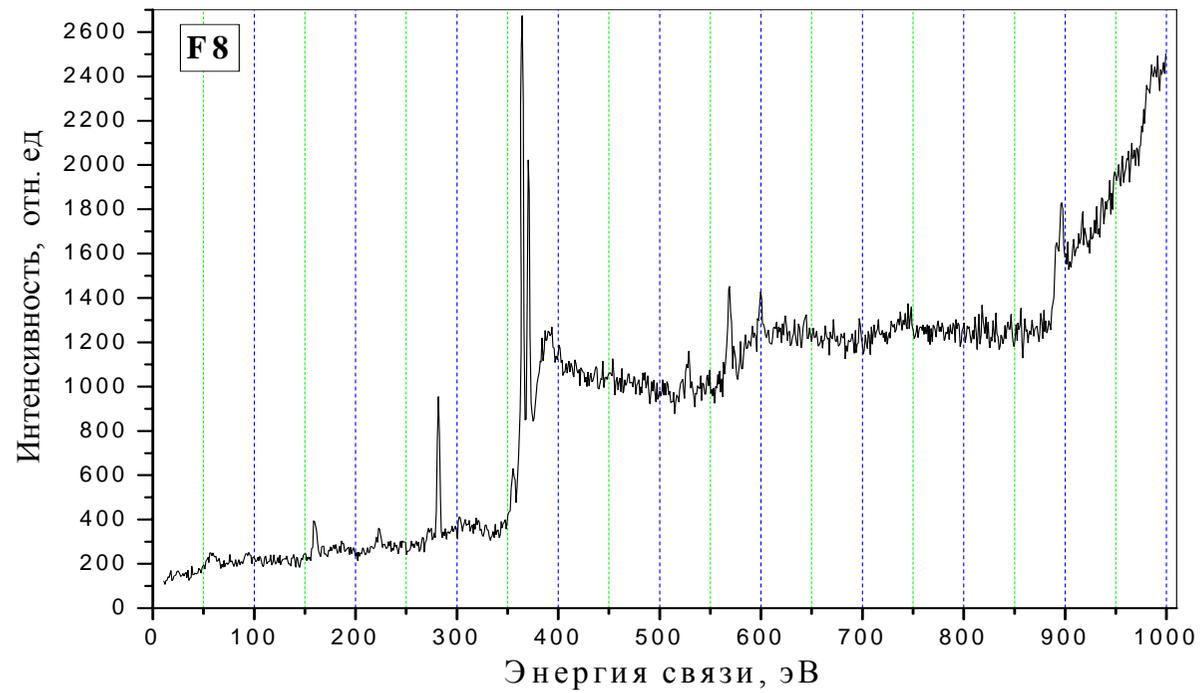


Рис. 32. Фотоэлектронный спектр к заданию **F8**

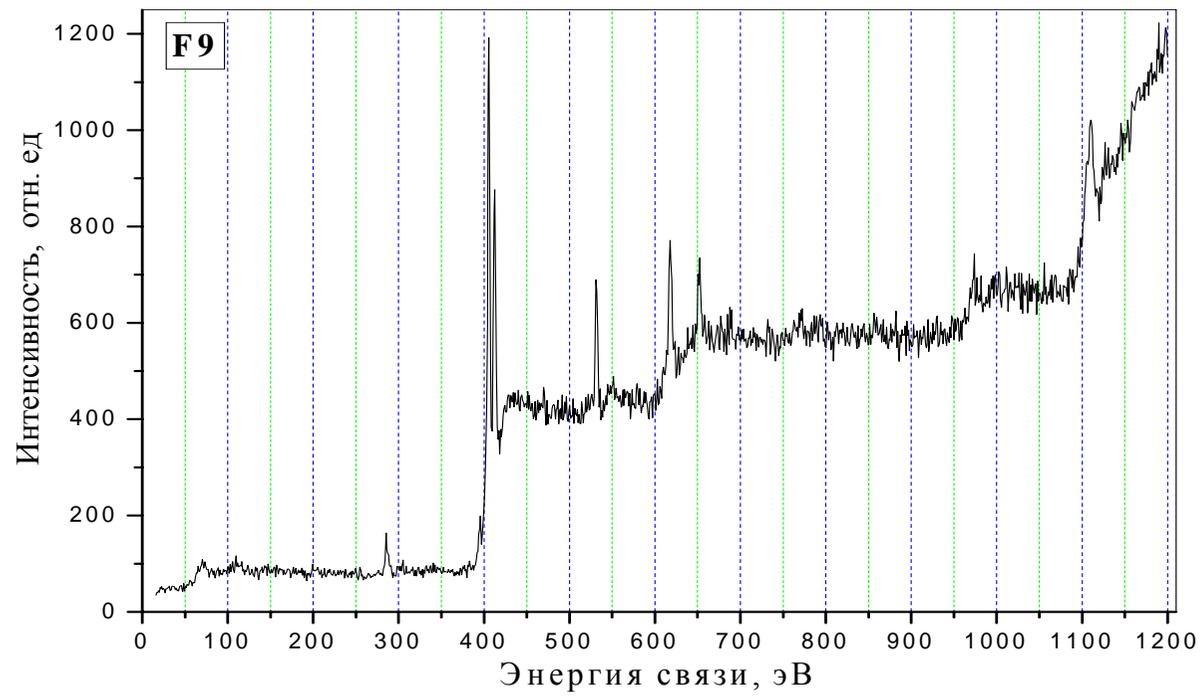


Рис. 33. Фотоэлектронный спектр к заданию **F9**

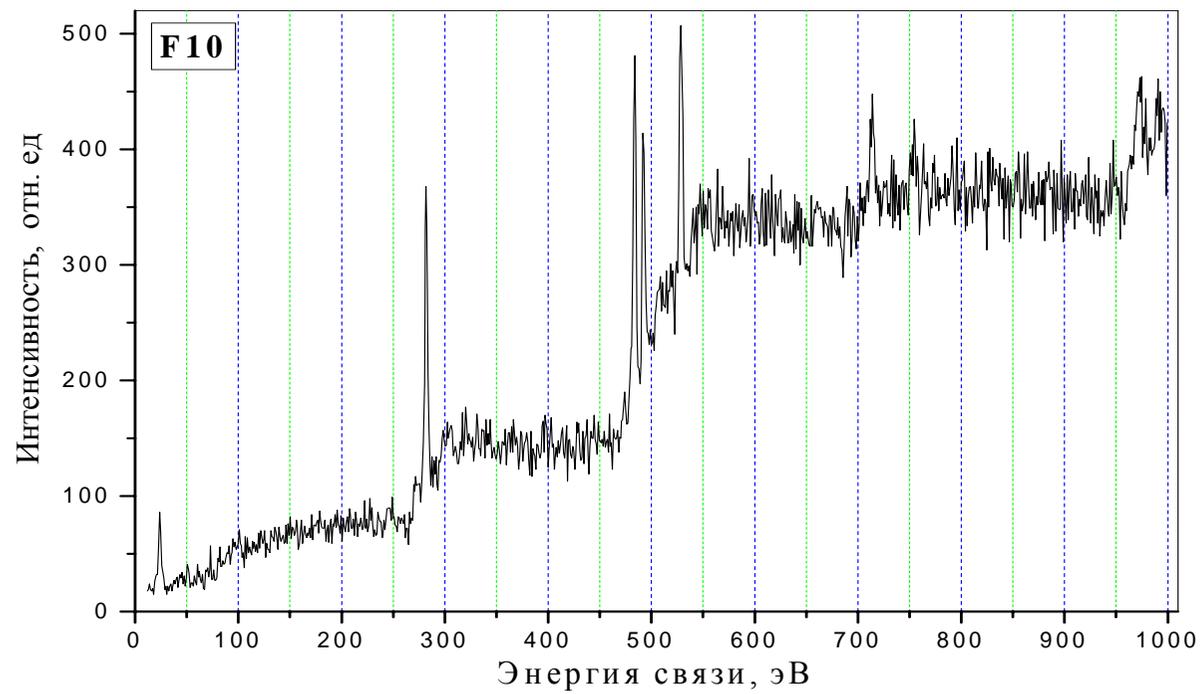


Рис. 34. Фотоэлектронный спектр к заданию F10

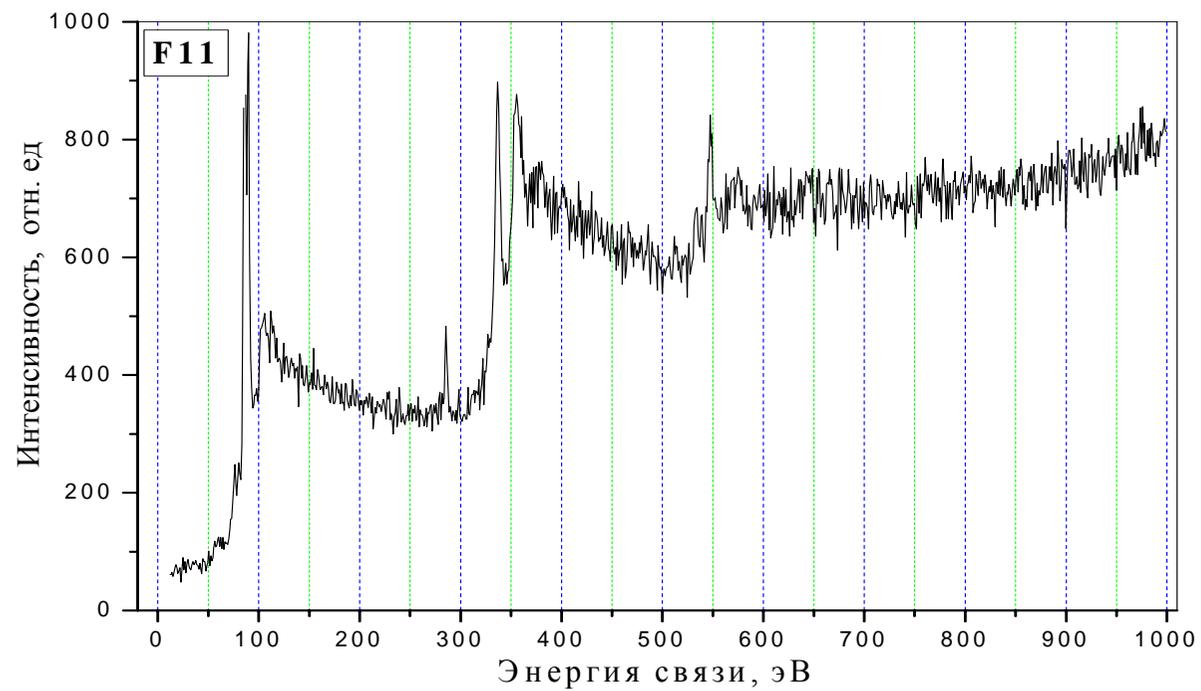


Рис. 35. Фотоэлектронный спектр к заданию F11

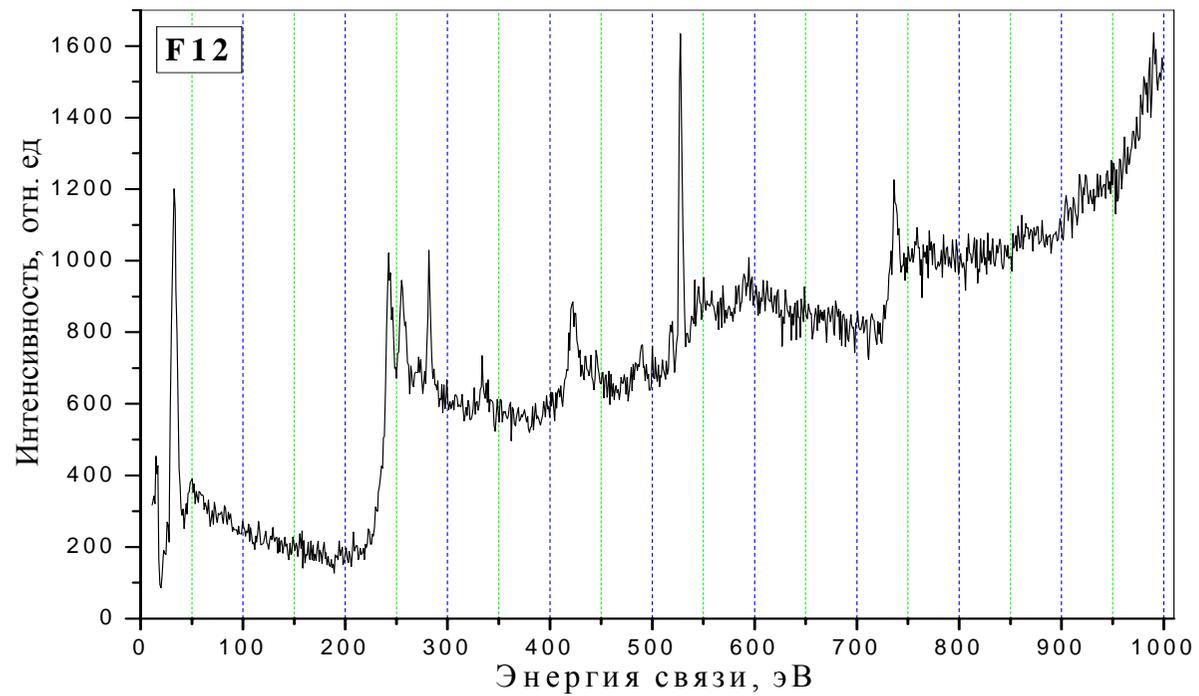


Рис. 36. Фотоэлектронный спектр к заданию F12

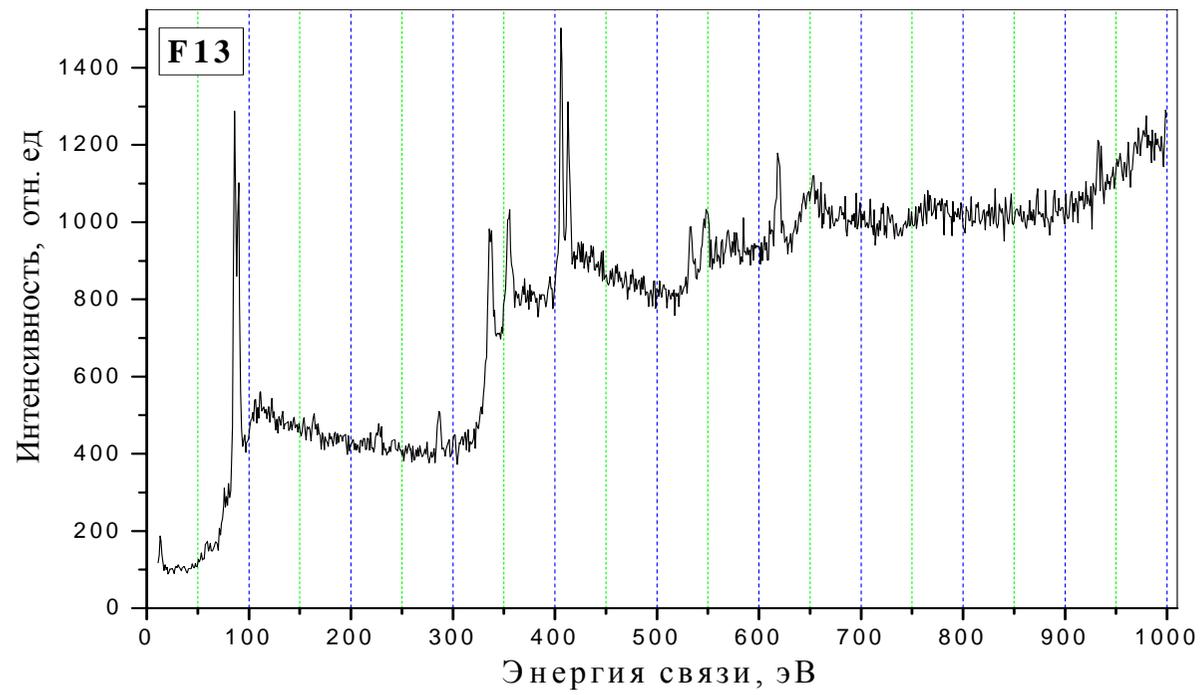


Рис. 37. Фотоэлектронный спектр к заданию F13

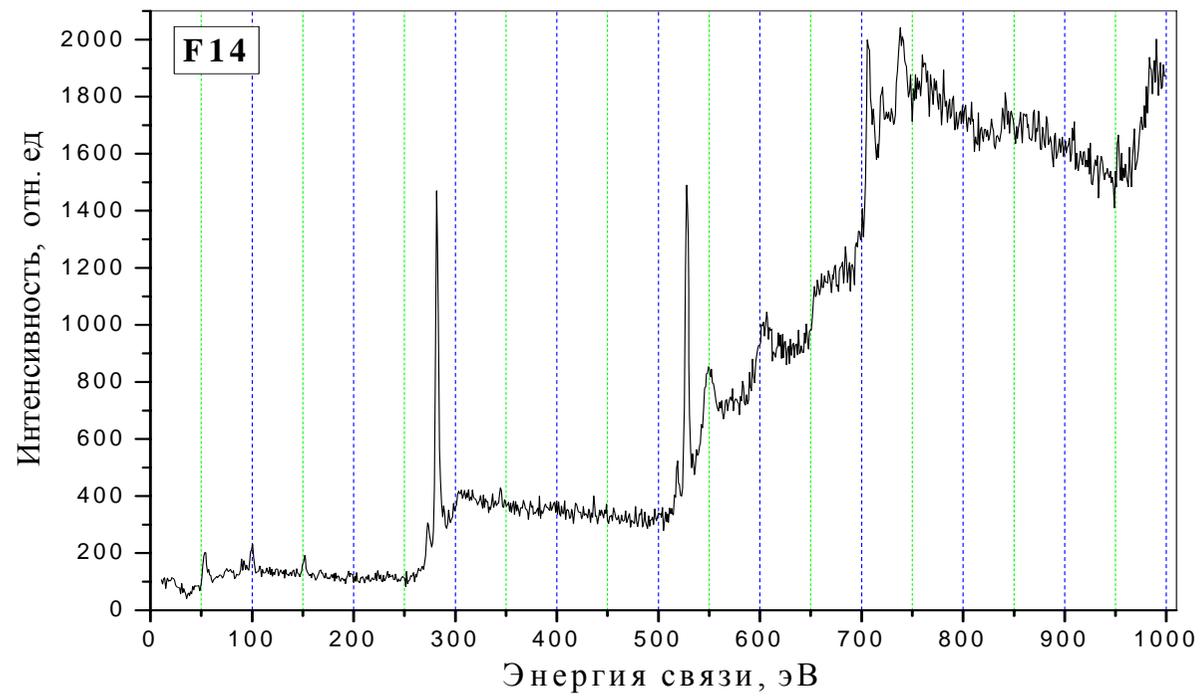


Рис. 38. Фотоэлектронный спектр к заданию F14

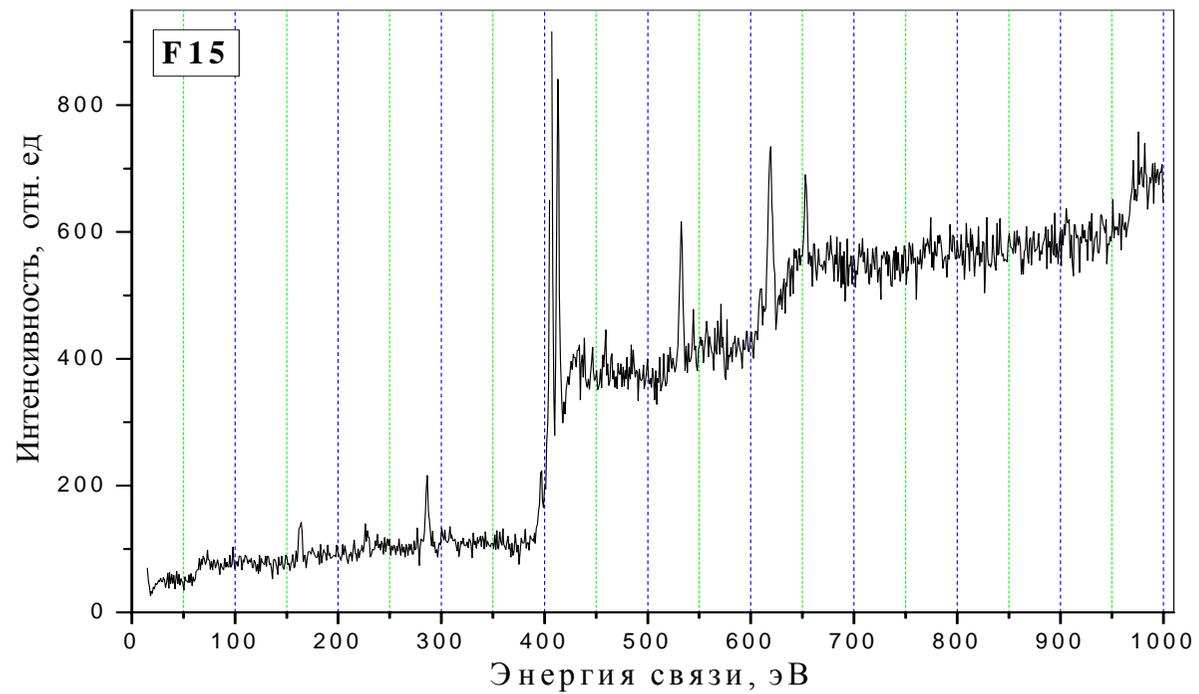


Рис. 39. Фотоэлектронный спектр к заданию F15

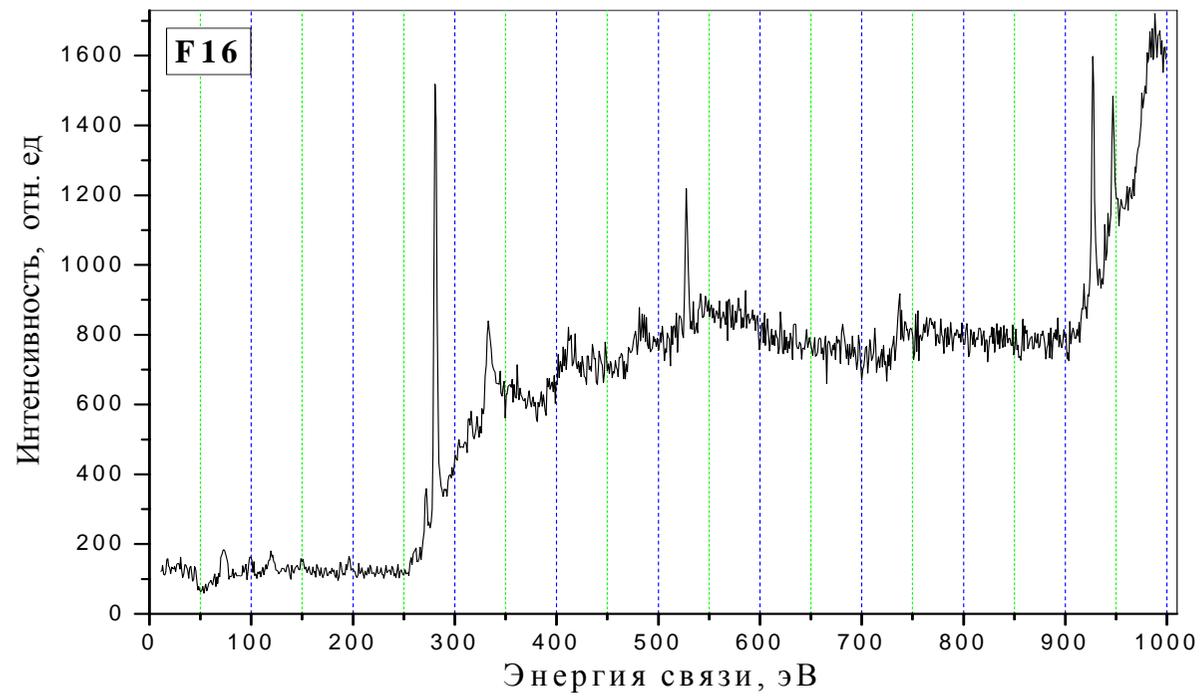


Рис. 40. Фотоэлектронный спектр к заданию F16

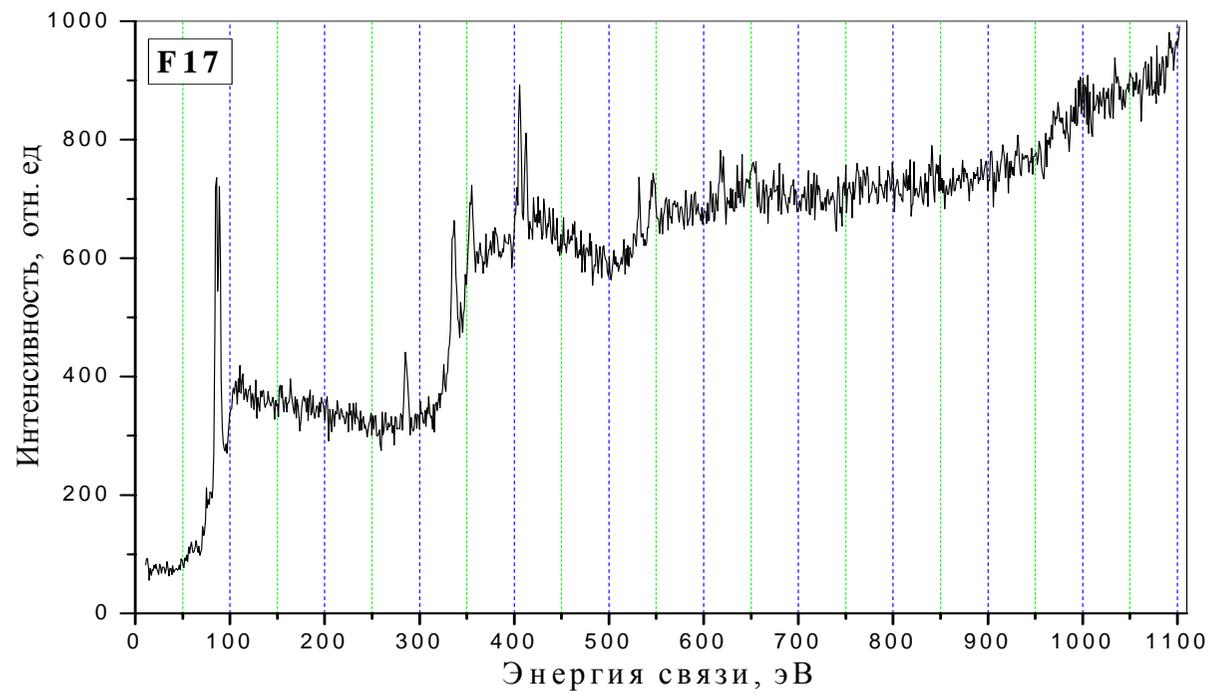


Рис. 41. Фотоэлектронный спектр к заданию F17

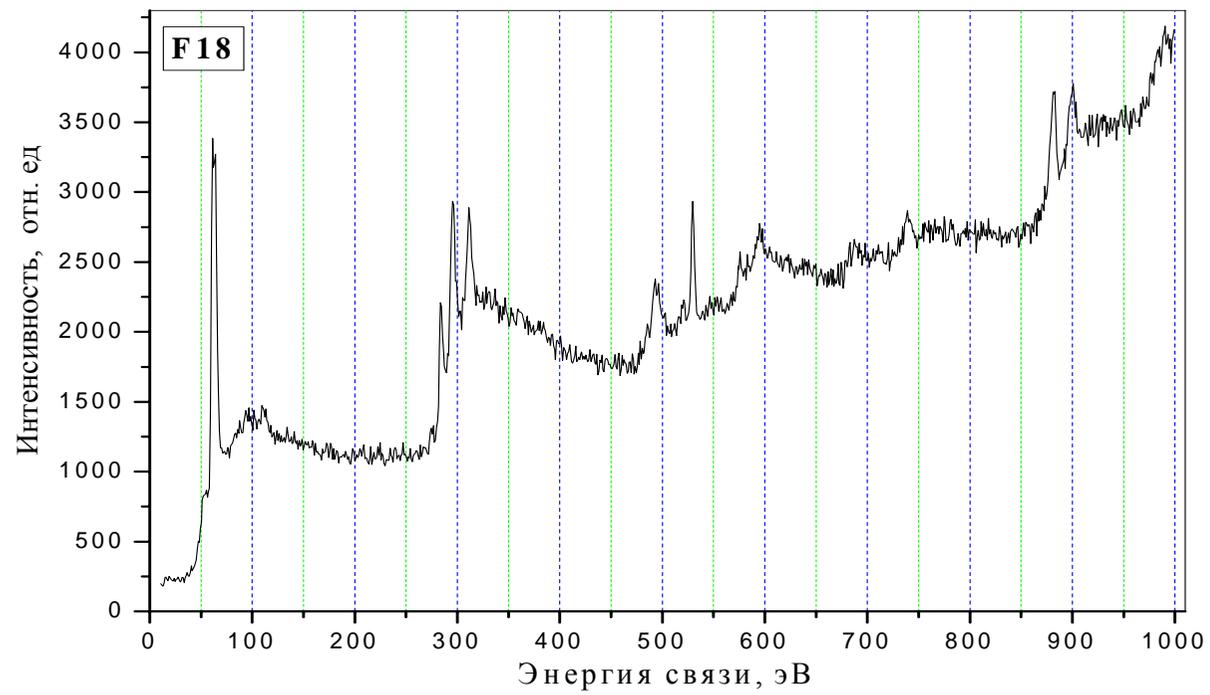


Рис. 42. Фотоэлектронный спектр к заданию F18

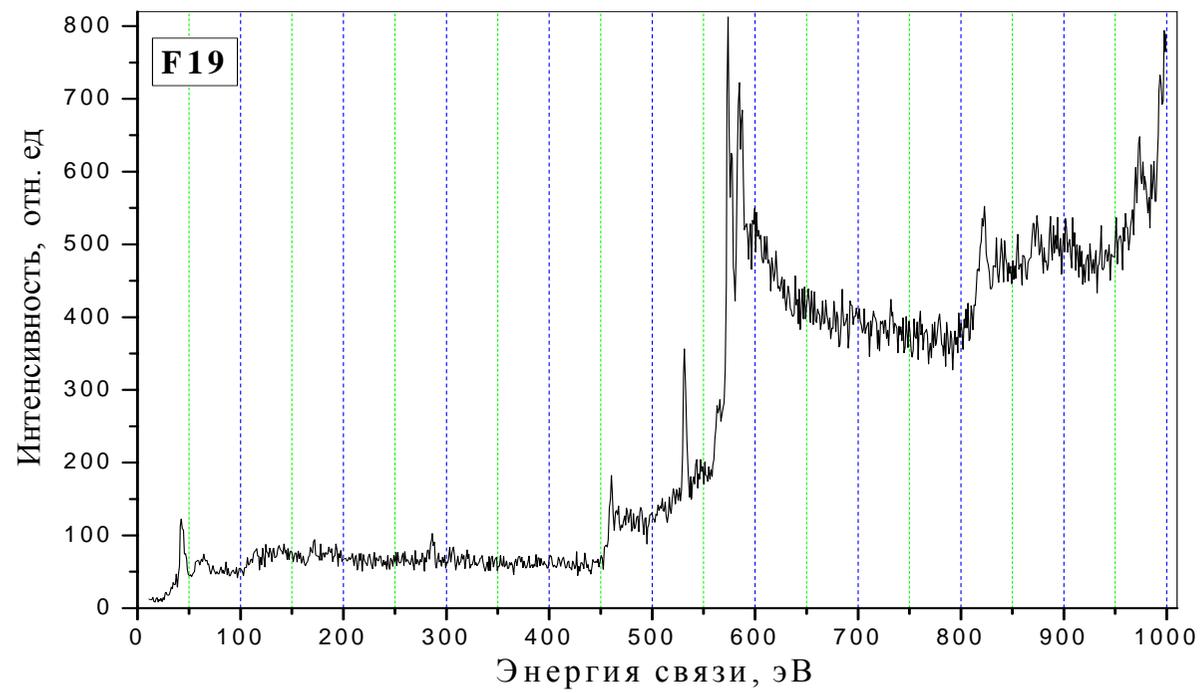


Рис. 43. Фотоэлектронный спектр к заданию F19

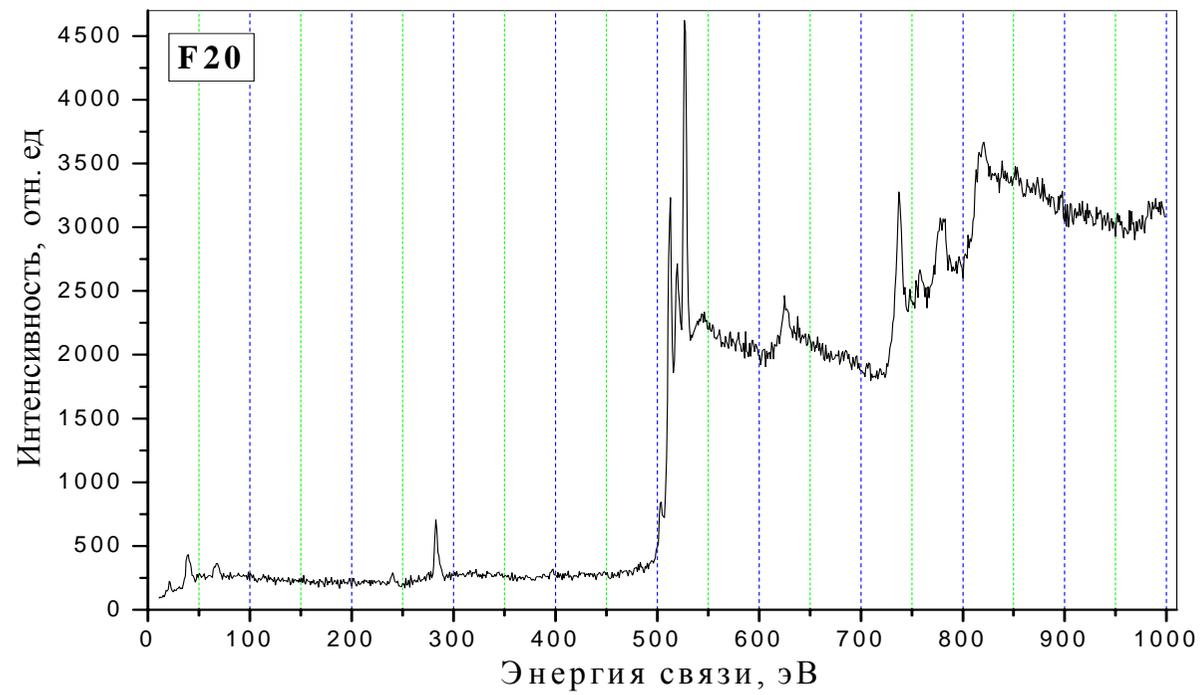


Рис. 44. Фотоэлектронный спектр к заданию F20

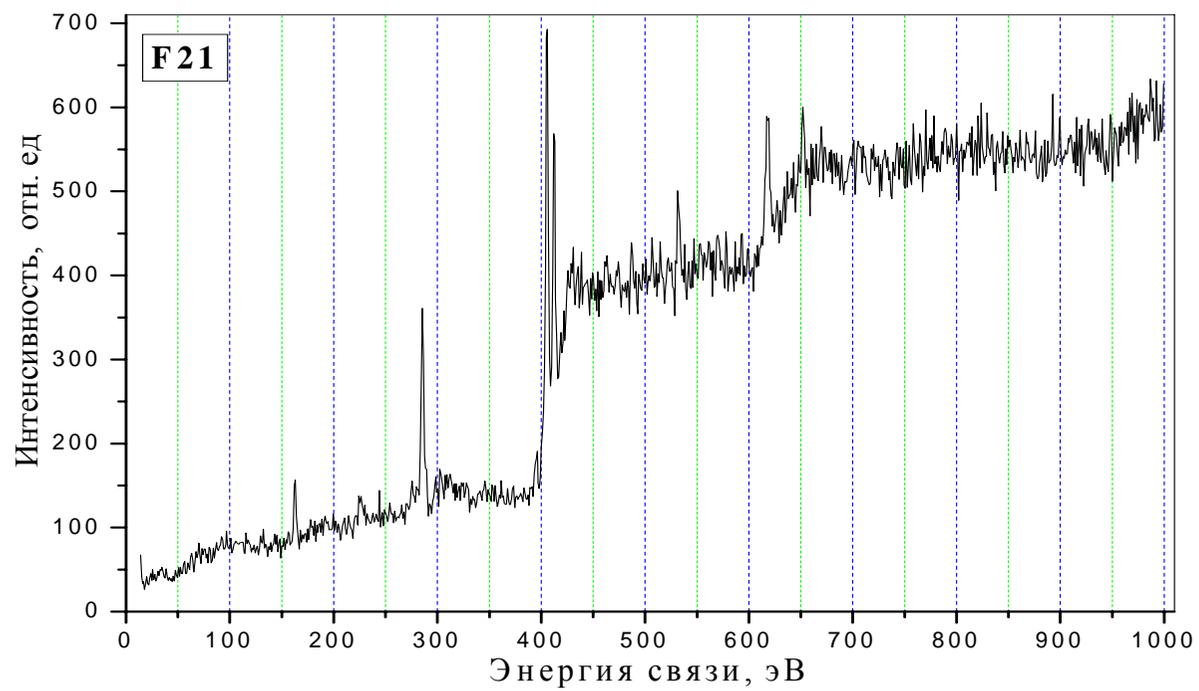


Рис. 45. Фотоэлектронный спектр к заданию **F21**

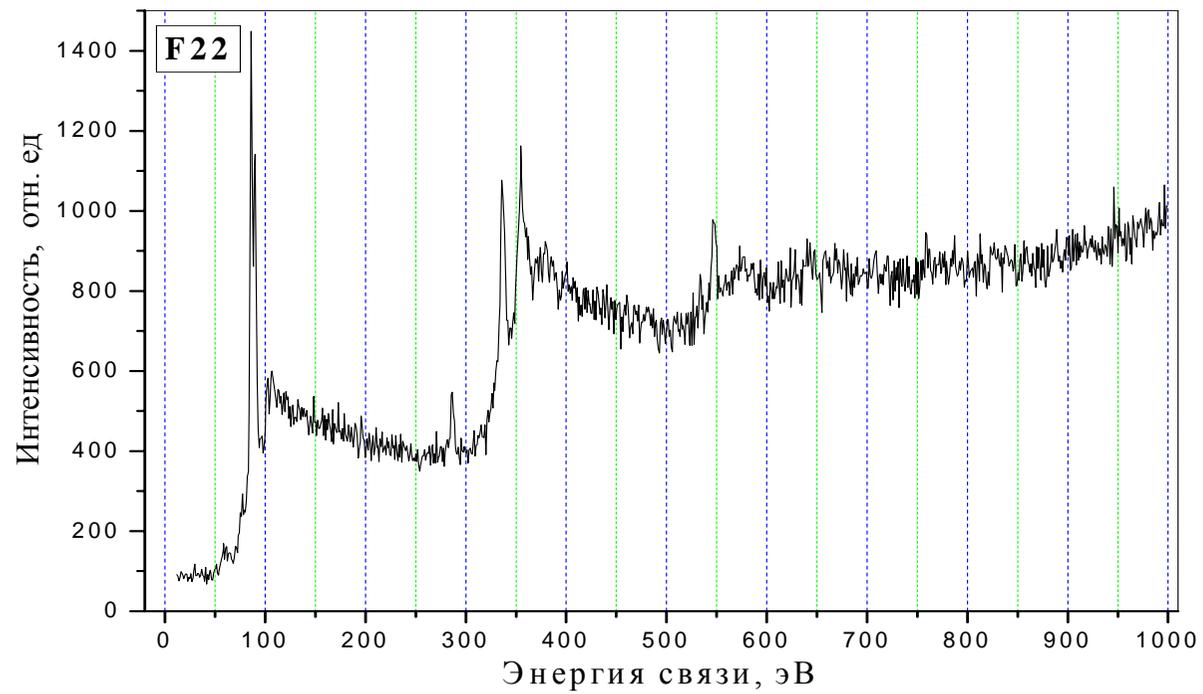


Рис. 46. Фотоэлектронный спектр к заданию F22



Рис. 47. Фотоэлектронный спектр к заданию F23

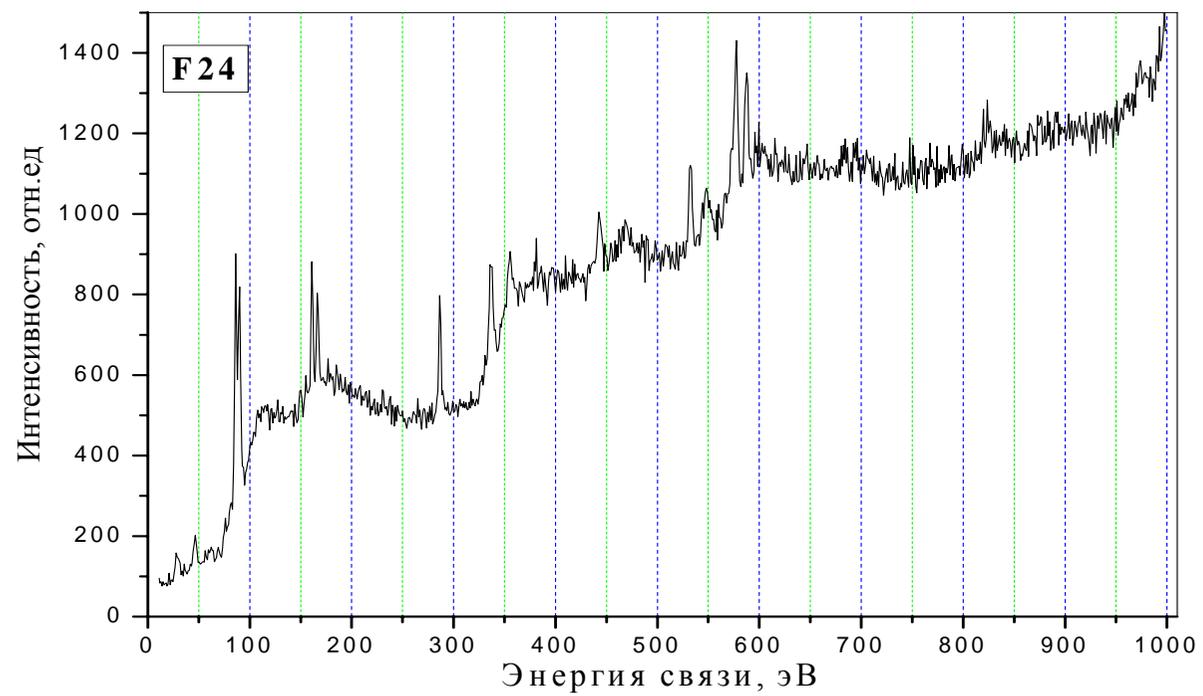


Рис. 48. Фотоэлектронный спектр к заданию F24

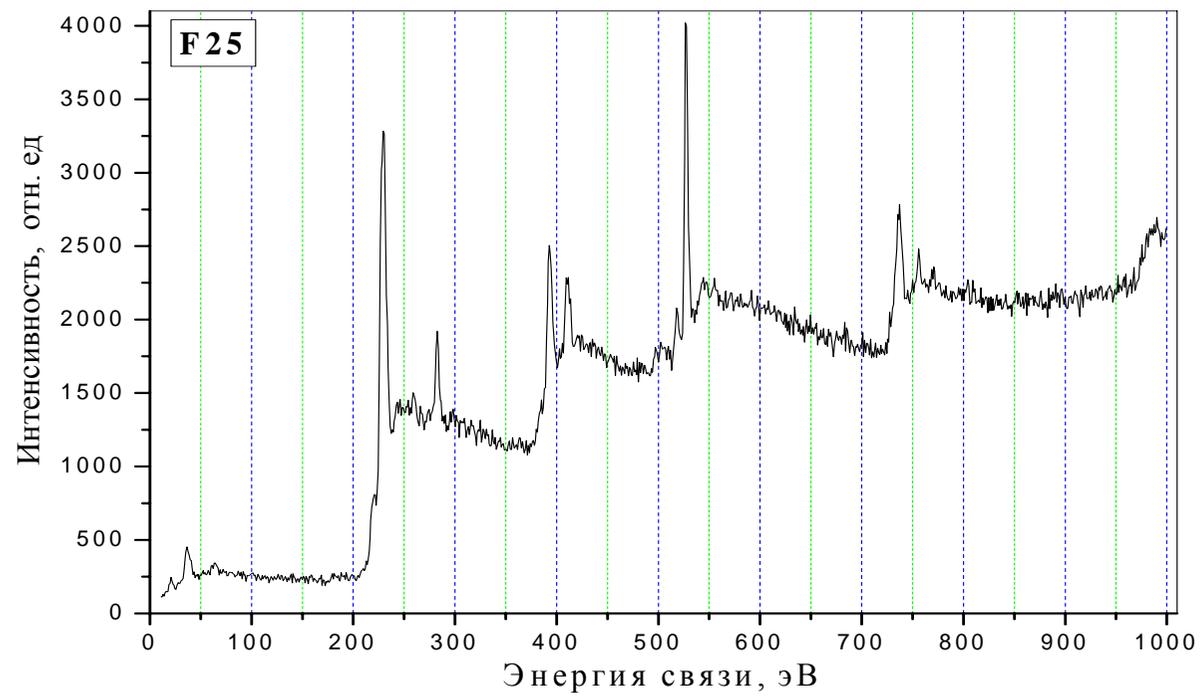


Рис. 49. Фотоэлектронный спектр к заданию F25

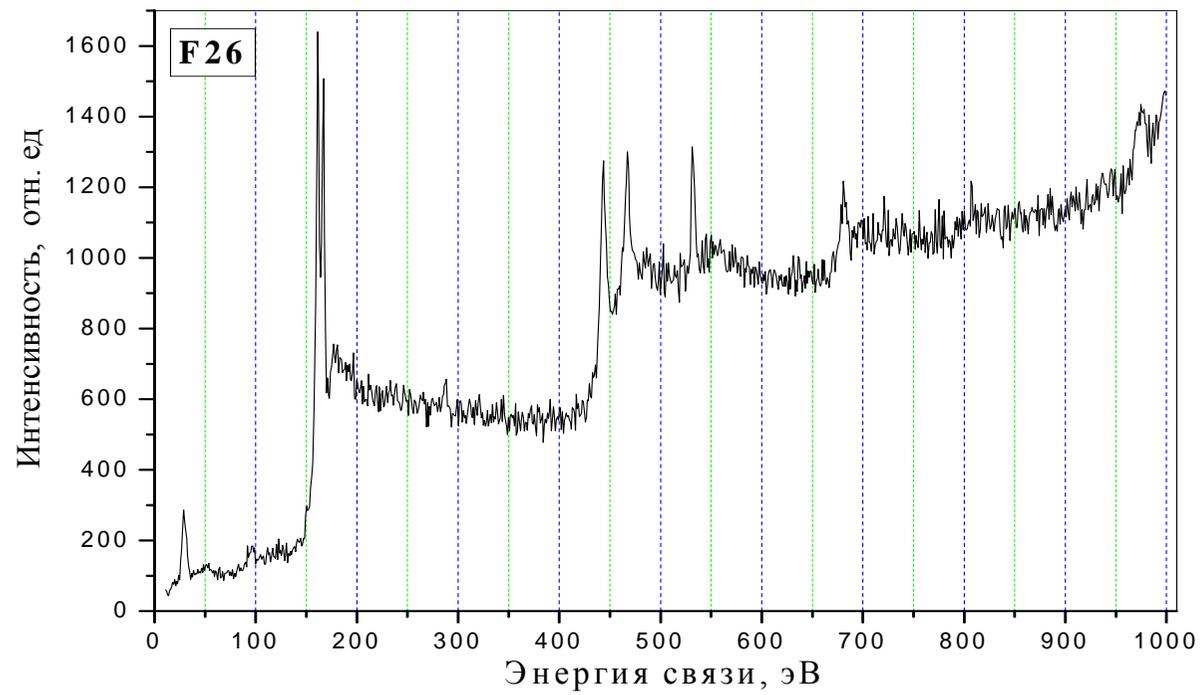


Рис. 50. Фотоэлектронный спектр к заданию F26

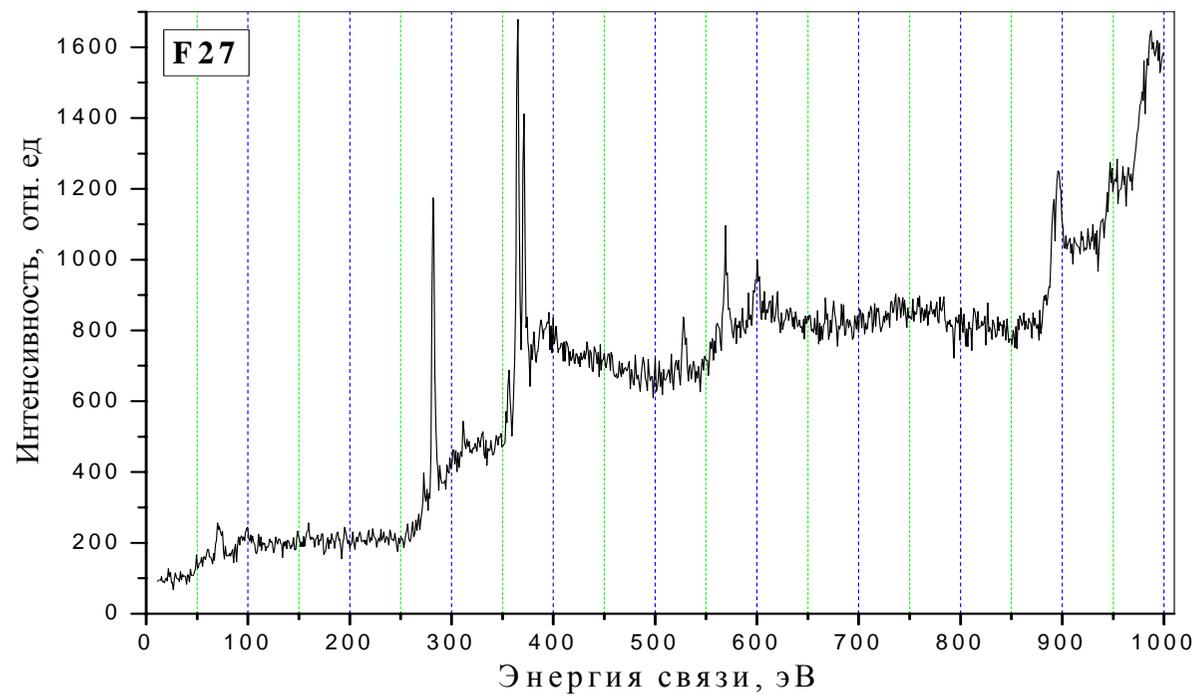


Рис. 51. Фотоэлектронный спектр к заданию F27

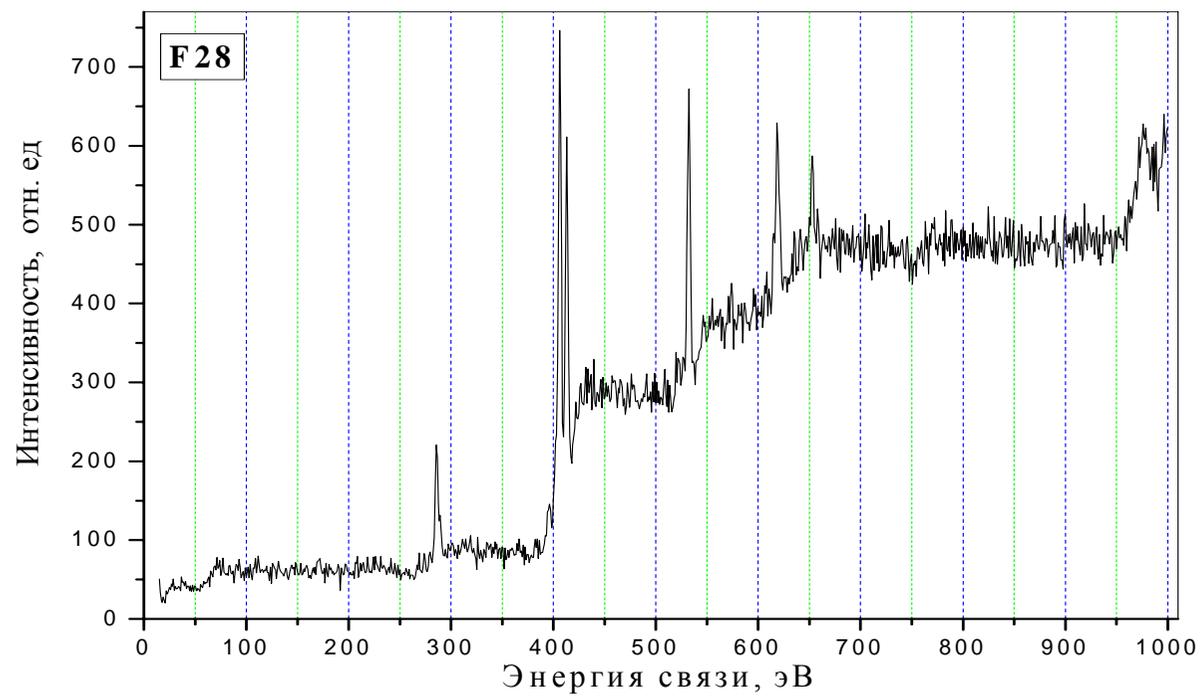


Рис. 52. Фотоэлектронный спектр к заданию F28

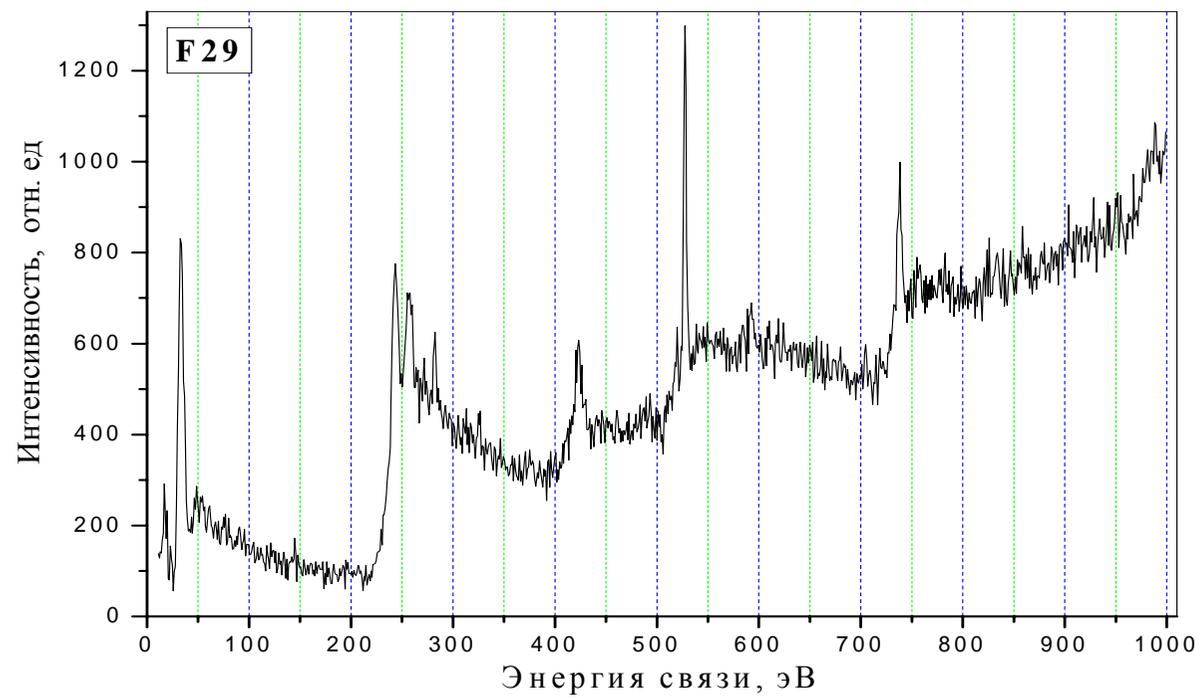


Рис. 53. Фотоэлектронный спектр к заданию F29

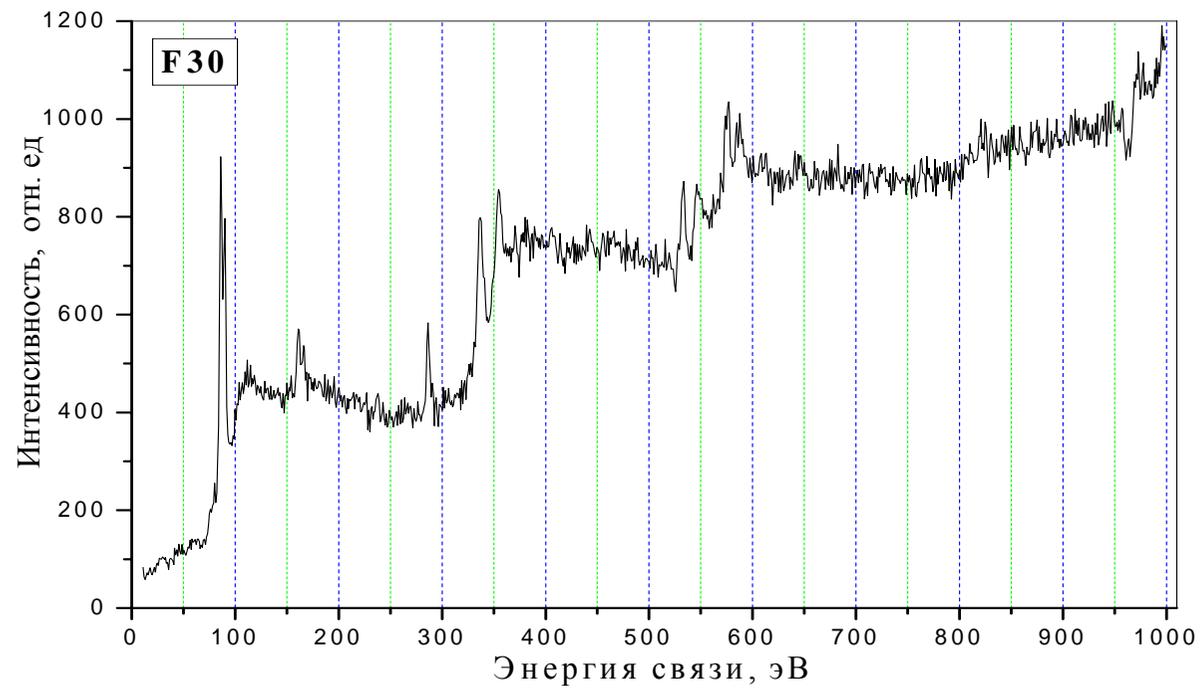


Рис. 54. Фотоэлектронный спектр к заданию F30

3.2.5. Определение состава поверхности образцов по спектрам резерфордского обратного рассеяния

Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов ${}^4\text{He}$ от поверхности исследуемых веществ представлены в заданиях **G** данного подраздела в виде распечаток. Все спектры сняты при угле рассеяния $\theta = 170^\circ$; углы между направлением анализирующего ионного пучка и нормалью к поверхности образцов $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 10^\circ$.

Перед выполнением заданий **G** требуется изучить п. 2.5.1 учебного пособия [1], а также проработать примеры 17–21, приведенные в настоящем пособии. Обработку спектров резерфордского обратного рассеяния следует проводить по схеме, использованной в примерах 17–21, представляя результаты расчетов в виде аналогичных таблиц и графических зависимостей.

При выполнении задания вначале необходимо построить спектр обратного рассеяния, откладывая по оси абсцисс номер канала многоканального анализатора, а по оси ординат – выход рассеяния. Затем с использованием данных для калибровки энергетической шкалы спектрометра, значений энергии E_0 ионов ${}^4\text{He}$ и кинематического фактора рассеяния определяется энергетическая ширина канала δE и идентифицируются сигналы, соответствующие каждому из элементов, входящих в состав исследуемого образца. Далее по значению δE с использованием привязки к сигналу одного из элементов осуществляется калибровка шкалы спектрометра по энергиям. По формуле (66) рассчитываются значения фактора тормозного сечения ионов ${}^4\text{He}$ в тормозящей среде при их рассеянии на ядрах атомов элементов, входящих в состав образца, а затем определяются значения δt и строятся шкалы глубин для каждого из элементов, входящих в состав анализируемого слоя.

В каждом задании приведен перечень элементов, входящих в состав исследуемого образца, а также указан основной материал, являющийся средой, тормозящей анализирующее корпускулярное излучение (ионы ${}^4\text{He}$) на пути в глубь образца и обратно к поверхности.

Кроме того, содержатся конкретные требования, которые необходимо выполнить. В заключение следует обобщить информацию, полученную при обработке спектра, и сделать выводы о составе анализируемого вещества.

Задание **G1**

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, кремний, титан.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	85	123	192	326

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	60.	70.	80.	90.	100.	110.	120.	130.	140.	150.
60.	6290	6347	6031	6128	6077	5865	5990	5915	5793	5720
70.	5828	5768	5635	5669	5726	5496	5601	5514	5508	5473
80.	5270	5321	5367	5266	5261	5308	5153	5036	5116	5095
90.	5169	5048	5005	4909	5018	4892	4939	5013	4769	4878
100.	4805	4798	4707	4830	4756	4760	4802	4718	4677	4719
110.	4568	4729	4752	4664	4845	4819	4635	4629	4503	4601
120.	4656	4691	4658	4540	4716	4514	4461	4368	4353	4407
130.	4410	4288	4304	4300	4394	4422	4377	4402	4227	4211
140.	4217	4210	4213	4180	4236	4142	4198	4276	4184	4113
150.	4100	4131	4047	4087	3966	4044	4054	3923	3999	4185
160.	4073	4044	3896	3937	3949	4068	3913	3967	3861	3814
170.	3859	3943	3931	3922	3783	3841	3778	3660	3750	3770
180.	3659	3684	3607	3613	3236	3120	2425	1887	1282	854
190.	479	348	260	185	98	95	57	35	27	23
200.	19	16	15	21	20	7	13	9	13	13
210.	14	10	17	6	18	13	14	17	13	12
220.	25	14	14	17	25	30	29	18	35	35
230.	43	33	51	76	106	131	197	331	566	793
240.	1273	2050	2789	3422	4233	4696	4754	5044	4703	4163
250.	3357	2561	1685	1057	570	268	174	82	50	34
260.	28	16	17	17	8	4	5	9	4	4
270.	2	3	6	5	7	3	5	4	4	6
280.	2	3	2	2	1	4	4	3	1	

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для титана и кремния. Определите толщину слоя, содержащего титан. Рассчитайте слоевые содержания титана и кислорода в титаносодержащем слое и оцените его стехиометрический состав.

Задание G2

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, кремний, тантал.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	87	126	194	329

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
50.	7601	7614	7426	7420	7195	7050	7142	6961	6941	6761
60.	6762	6788	6667	6735	6512	6397	6417	6306	6378	6295
70.	6101	6129	6116	6065	6014	5979	5961	5960	5898	5789
80.	5681	5678	5488	5506	5692	5502	5570	5453	5612	5556
90.	5369	5437	5410	5460	5278	5289	5286	5250	5247	5262
100.	5228	5276	5233	5072	5155	5219	5056	5142	5066	5057
110.	4903	5156	4936	4997	4963	4970	4979	4847	5064	5044
120.	5173	5177	4972	5136	4977	4976	4818	4742	4743	4854
130.	4866	4708	4769	4764	4720	4748	4751	4641	4550	4704
140.	4573	4668	4664	4761	4762	4687	4640	4584	4469	4568
150.	4587	4625	4471	4489	4544	4548	4511	4575	4402	4442
160.	4530	4644	4324	4515	4527	4475	4470	4440	4447	4495
170.	4115	4265	4341	4262	4331	4212	4362	4238	4247	4297
180.	4217	4319	4164	4121	4135	4065	3955	3899	3592	3365
190.	2677	1933	1320	852	472	305	229	162	126	86
200.	63	42	24	26	21	27	33	21	18	27
210.	28	23	28	20	21	19	21	26	16	19
220.	22	17	17	23	23	27	25	47	46	77
230.	82	108	122	108	103	70	53	35	27	22
240.	16	29	17	13	16	11	14	16	24	17
250.	17	17	18	25	18	23	18	30	43	59
260.	62	72	86	77	63	62	43	26	30	27
270.	16	17	17	17	17	12	15	26	21	21
280.	14	15	25	29	26	23	20	31	25	26
290.	28	35	48	40	47	46	55	58	64	62
300.	48	75	96	127	145	184	191	262	344	466
310.	561	753	1129	1769	3042	5444	9528	15198	21599	26663
320.	30197	31232	29710	26256	20745	13965	7702	3757	1626	697
330.	385	201	145	86	58	57	39	27	22	13
340.	13	7	13	15	10	10	7	6	9	4

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для тантала и кремния. Определите толщину слоя, содержащего тантал. Рассчитайте слоевые содержания тантала и кислорода в танталосодержащем слое и оцените его стехиометрический состав.

Задание G3

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кремний, мышьяк.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Si	In
1,5	Канал анализатора	91	129	201	310

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	8993	8787	8669	8538	8436	8308	8199	8039	7895	7767
60.	7870	7635	7515	7545	7380	7370	7327	7171	7216	7045
80.	7039	6796	6774	6747	6701	6549	6490	6422	6352	6398
90.	6183	6262	6276	6282	6167	6115	6210	6012	6072	5938
100.	5987	5818	6035	5792	5994	5700	5806	5765	5687	5794
110.	5560	5609	5551	5691	5456	5500	5304	5573	5479	5409
120.	5312	5367	5395	5220	5325	5207	5372	5100	5407	5202
130.	5029	5160	5185	5170	5042	5168	5037	5090	5076	4852
140.	5030	4936	5077	4882	4855	4964	4903	4896	4883	4911
150.	4775	4864	4793	4819	4820	4821	4795	4740	4685	4670
160.	4627	4747	4766	4539	4684	4599	4369	4450	4573	4546
170.	4406	4478	4529	4322	4475	4470	4436	4375	4385	4404
180.	4365	4383	4319	4225	4416	4258	4255	4248	4132	4245
190.	4100	4013	4116	4152	4002	4072	4131	4104	3929	3797
200.	3182	2257	1137	591	308	258	198	151	100	86
210.	46	35	20	18	8	19	17	9	9	19
220.	11	9	7	6	8	8	9	12	11	9
230.	15	6	7	3	2	4	9	5	3	6
240.	11	6	4	4	7	2	3	4	3	3
250.	2	3	2	2	3	3	10	6	3	3
260.	4	4	3	7	9	4	3	6	14	20
270.	22	40	37	72	74	104	119	154	166	190
280.	190	181	173	146	79	53	48	19	11	6
290.	9	3	2	4	4	3	2	2		

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для мышьяка и кремния. Рассчитайте слоевое содержание примеси мышьяка в кремнии. Постройте профиль распределения атомов мышьяка в кремнии по глубине.

Задание G4

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, медь.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
40.	4656	4527	4363	4363	4386	4161	4192	4110	3855	3876
50.	3811	3729	3627	3607	3451	3414	3353	3331	3342	3324
60.	3263	3147	3057	2975	2971	2945	2884	2818	2811	2719
70.	2645	2565	2570	2424	2491	2382	2167	2123	1957	1604
80.	1341	980	746	678	558	549	483	435	363	400
90.	371	370	386	360	366	364	374	396	384	399
100.	378	346	353	395	388	392	391	436	410	478
110.	441	466	437	503	557	611	676	725	916	1051
120.	1203	1275	1174	1022	771	518	361	221	178	156
130.	156	150	149	134	150	150	175	153	166	165
140.	157	150	157	177	144	177	159	166	133	174
150.	157	154	142	150	137	140	149	176	168	138
160.	161	160	147	148	179	156	149	160	164	174
170.	178	156	179	156	157	188	190	218	208	177
180.	224	203	230	220	211	206	254	252	260	279
190.	306	317	321	302	269	222	229	238	242	215
200.	231	231	204	223	241	200	188	181	228	242
210.	209	255	226	259	258	276	266	281	266	307
220.	319	329	373	330	332	321	352	316	269	212
230.	167	210	209	178	171	195	220	216	224	267
240.	255	298	313	354	399	477	577	791	1139	1851
250.	2998	4394	5740	6974	7391	7402	6293	4749	2980	1687
260.	1015	799	894	1301	1836	2461	2953	3024	2630	2140
270.	1285	758	394	185	101	53	40	19	17	15
280.	13	8	5	4	7	10	7	14	8	12
290.	10	17	25	18	21	22	23	17	22	20
300.	21	22	18	21	26	24	25	30	29	30
310.	35	35	46	31	37	27	43	31	33	23
320.	21	27	10	11	2	2	0	1		

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, меди и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, меди и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и ванадия.

Задание G5

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	40.	4296	4067	3866	3844	3644	3795	3625	3677	3487
50.	3383	3331	3387	3202	3265	3152	3128	3075	2970	2999
60.	2995	2814	2786	2853	2859	2934	2721	2785	2688	2589
70.	2600	2567	2557	2533	2499	2274	2213	2114	1865	1618
80.	1275	1013	905	807	784	723	717	689	655	654
90.	646	592	625	561	629	538	576	583	594	570
100.	559	547	520	483	522	531	554	534	516	530
110.	516	529	525	604	670	754	879	1083	1202	1215
120.	1233	1174	1080	910	754	553	326	261	195	157
130.	147	155	142	140	143	149	140	130	140	149
140.	120	156	115	140	128	125	108	115	117	105
150.	123	121	123	121	132	103	118	102	92	126
160.	134	108	113	116	115	96	110	121	129	104
170.	116	101	114	112	93	127	108	115	103	110
180.	116	106	115	107	122	104	130	119	132	137
190.	139	152	159	176	136	140	121	111	137	139
200.	111	104	98	115	97	112	89	95	107	86
210.	98	115	114	114	133	113	111	90	93	70
220.	62	62	62	50	49	47	52	55	40	44
230.	51	36	41	36	27	42	42	42	45	53
240.	57	65	85	92	145	222	318	569	921	1465
250.	1925	2334	2494	2193	1573	1029	590	261	146	102
260.	70	49	50	54	34	37	34	39	47	66
270.	65	72	93	89	75	58	53	64	54	52
280.	69	100	108	135	162	210	280	437	649	1067
290.	1770	2965	4899	7300	9840	12033	12718	12341	10043	7251
300.	4561	2412	1191	474	237	123	88	49	41	36
310.	32	18	18	9	17	9	19	16	27	34
320.	42	48	41	32	28	14	11	7	1	2
330.	4	3	1	2	0	1	0	2	0	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ванадия и ниобия.

Задание G6

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, цирконий, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	40.	4440	4575	4302	4346	4328	4137	3842	4040	3886
50.	3683	3842	3658	3565	3459	3536	3529	3327	3358	3203
60.	3299	3168	3236	3136	3027	3098	2977	2995	2988	2917
70.	2867	2825	2845	2709	2602	2312	2102	1781	1291	945
80.	768	600	557	506	501	471	511	449	402	408
90.	391	413	387	368	384	352	389	383	391	349
100.	335	369	343	346	350	344	366	366	407	381
110.	412	449	533	613	832	1075	1298	1494	1647	1650
120.	1710	1663	1581	1321	1123	832	572	450	396	351
130.	362	328	309	317	332	309	304	311	267	338
140.	304	321	301	295	322	300	303	330	344	296
150.	289	335	316	334	289	307	286	302	284	283
160.	326	342	298	314	357	339	339	306	324	290
170.	309	284	322	330	299	308	278	325	292	302
180.	307	324	327	346	340	342	365	339	367	357
190.	360	327	365	386	352	345	370	373	362	338
200.	317	333	325	322	289	324	345	352	348	383
210.	357	298	344	351	337	333	332	332	354	340
220.	338	338	317	359	352	329	332	322	329	321
230.	334	299	329	329	339	354	301	359	345	313
240.	359	320	318	363	344	374	349	350	351	358
250.	349	349	351	335	369	363	403	356	361	396
260.	407	393	408	451	435	436	461	458	500	507
270.	487	541	515	569	583	581	599	628	589	781
280.	1020	1268	1959	3107	4600	6679	8922	11208	12965	14095
290.	14547	14354	13612	11996	9900	7387	5276	3206	1915	953
300.	523	311	172	116	105	83	96	106	124	160
№ канала	Выход рассеяния, имп.									

310.	173	225	303	353	497	729	1108	1727	2904	4908
320.	8006	12188	16206	18718	18688	15258	10527	6338	3030	1381
330.	608	281	132	93	53	34	30	19	18	12
340.	13	5	2	4	2	3	1	5	1	2

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, циркония, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания циркония, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония и тантала.

Задание G7

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	40.	4765	4712	4409	4344	4266	4179	4132	4097	3875
50.	3755	3725	3547	3650	3468	3388	3485	3350	3386	3318
60.	3276	3143	3033	3073	2980	2918	2858	2864	2787	2723
70.	2640	2727	2600	2534	2420	2300	2133	1850	1471	1121
80.	850	597	498	480	471	482	424	334	326	270
90.	248	268	257	255	229	238	246	212	229	229
100.	239	233	224	221	230	251	262	277	255	338
110.	399	439	472	571	719	863	1072	1299	1448	1461
120.	1369	1285	1116	933	748	465	286	172	115	104
130.	87	83	70	82	86	86	67	75	68	70
140.	66	72	68	69	68	90	76	64	73	73
150.	59	60	93	69	73	81	63	63	63	86
160.	81	86	97	78	90	72	61	66	58	57
170.	56	60	45	59	54	61	48	49	51	70
180.	50	57	48	49	74	54	58	90	106	131
190.	126	148	115	136	110	98	85	78	81	86
200.	65	58	66	53	50	48	56	44	47	47

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	210.	41	62	51	60	46	50	50	44	51
220.	57	59	51	67	74	67	54	72	72	61
230.	58	77	72	70	109	124	169	225	392	576
240.	910	1419	1970	2651	3191	3649	3368	2969	2167	1510
250.	835	441	247	135	109	79	57	73	82	71
260.	73	65	42	62	72	65	64	89	103	113
270.	113	102	99	84	60	67	52	42	71	67
280.	101	124	148	173	221	321	396	546	842	1398
290.	2455	4226	6865	10235	12806	14370	14042	11681	7900	4710
300.	2291	992	428	222	134	98	57	40	41	12
310.	21	16	18	23	15	28	31	47	64	56
320.	56	61	35	23	15	18	4	12	1	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и ниобия.

Задание G8

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, медь, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	40.	3981	3864	3832	3739	3668	3635	3493	3426	3342
50.	3290	3331	3193	3103	3026	3128	2966	2942	2917	2990
60.	2882	2797	2847	2738	2749	2734	2679	2564	2609	2595
70.	2596	2516	2498	2448	2360	2370	2159	2262	2045	1857
80.	1548	1199	876	601	440	350	313	260	210	181
90.	184	148	153	124	115	121	99	105	109	87
100.	113	101	113	111	104	108	106	97	92	96
110.	113	97	110	120	129	151	182	271	372	483

№ канала	Выход рассеяния, имп.										
	616	847	874	886	738	557	355	244	157	108	
120.	65	76	92	102	93	74	97	75	94	84	
140.	84	94	95	101	83	90	72	74	76	73	
150.	58	61	77	62	83	78	62	80	65	50	
160.	65	76	80	78	67	81	82	63	87	80	
170.	66	71	60	69	82	72	76	82	56	56	
180.	65	81	50	69	78	82	54	76	88	89	
190.	112	152	169	157	140	162	111	96	85	91	
200.	72	75	83	76	83	77	74	79	85	71	
210.	79	77	77	81	83	85	88	83	70	79	
220.	74	78	80	67	96	75	85	81	86	92	
230.	84	96	70	83	81	97	82	88	82	77	
240.	75	79	81	89	108	100	124	114	110	107	
250.	123	142	127	133	165	174	159	193	160	204	
260.	259	271	288	374	543	782	1166	1784	2287	2522	
270.	2374	1865	1377	803	483	249	155	112	98	105	
280.	123	122	134	173	229	236	314	409	573	893	
290.	1472	2491	4173	6828	9625	12647	14162	14622	13122	10174	
300.	6789	3514	1707	779	350	207	123	101	72	50	
310.	25	27	19	22	8	4	13	24	26	33	
320.	45	53	51	52	39	25	13	9	6	2	

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, меди, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания меди, ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и ниобия.

Задание G9

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.										
	4446	4359	4251	4055	4081	3891	3860	3852	3800	3782	
40.											

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
50.	3663	3578	3582	3435	3446	3390	3325	3314	3166	3211
60.	3027	3095	3061	2922	2921	2977	2839	2830	2778	2759
70.	2740	2698	2675	2639	2620	2505	2510	2350	2253	2000
80.	1715	1482	1137	865	578	527	476	391	317	292
90.	278	291	305	283	265	265	266	270	252	260
100.	210	283	241	247	247	237	231	248	236	236
110.	236	259	262	278	274	354	440	444	638	794
120.	1015	1126	1106	979	885	640	473	270	186	160
130.	132	116	122	120	114	126	115	117	146	136
140.	112	121	145	109	121	103	120	114	109	119
150.	101	107	108	118	110	96	132	114	135	99
160.	108	134	118	119	111	112	93	115	100	125
170.	127	113	113	112	127	135	123	113	115	123
180.	152	99	119	141	131	141	143	177	161	169
190.	197	177	191	196	187	166	159	147	132	133
200.	139	103	104	104	104	102	99	96	79	108
210.	94	102	76	80	77	104	91	80	88	72
220.	57	60	34	51	57	60	55	77	73	74
230.	91	87	76	65	39	48	25	38	33	35
240.	37	36	24	25	27	36	45	44	42	47
250.	33	26	42	42	47	35	53	53	67	71
260.	72	70	61	58	64	70	72	86	120	115
270.	129	118	138	115	99	85	76	79	60	81
280.	106	129	170	208	203	316	363	533	832	1337
290.	2150	3653	5881	8806	11759	14088	14948	14014	11546	8116
300.	4963	2536	1169	563	280	165	101	78	69	41
310.	43	49	39	46	32	42	37	47	63	83
320.	92	112	97	85	93	68	27	15	6	4
330.	2	2	2	2	0	1	3	0	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ниобия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ниобия и кислорода.

Задание G10

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, хром.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	4320	4286	3935	3993	3939	3698	3584	3667	3659	3542
40.	3383	3412	3303	3366	3177	3242	3171	3073	3008	2914
60.	2951	2876	2863	2897	2780	2822	2656	2711	2613	2540
70.	2491	2487	2378	2219	2107	1836	1553	1278	876	649
80.	480	418	341	337	345	340	318	268	263	247
90.	208	210	218	229	222	216	194	211	224	174
100.	211	191	201	213	228	224	255	317	306	408
110.	420	442	602	681	825	1044	1227	1395	1456	1511
120.	1378	1333	1284	1118	855	573	376	229	186	126
130.	89	89	78	90	91	90	79	58	76	83
140.	79	82	89	98	65	84	75	92	80	80
150.	75	96	88	70	97	79	89	87	93	93
160.	101	106	77	76	72	57	82	75□	61	73
170.	64	79	67	68	59	73	66	57	63	64
180.	68	71	81	76	86	92	128	129	144	128
190.	121	116	98	100	115	101	96	85	79	87
200.	87	78	74	87	75	82	82	83	91	95
210.	73	78	96	95	96	90	87	96	81	98
220.	97	105	105	99	115	107	112	106	112	128
230.	117	142	165	201	273	336	471	692	1031	1370
240.	1981	2668	3054	3316	3291	2953	2412	1815	1576	1590
250.	1848	2649	3766	5003	6154	6796	7076	6984	6247	5292
260.	3944	2693	1519	839	456	244	154	114	78	50
270.	39	20	18	15	8	3	5	6	3	5
280.	4	3	6	4	4	2	1	2	2	5

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, хрома и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана и хрома. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и хрома.

Задание G11

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, цирконий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	4051	4095	3957	3651	3710	3691	3484	3508	3438	3507
40.	3233	3179	3218	3242	3092	3098	3046	2875	2956	2909
50.	2944	2809	2754	2712	2701	2667	2615	2591	2639	2610
60.	2545	2516	2394	2446	2420	2406	2236	2274	2038	1793
70.	1520	1209	854	657	530	499	441	426	339	309
80.	341	317	304	284	298	322	304	308	321	309
90.	301	317	284	280	303	278	233	287	263	301
100.	309	341	275	319	329	413	501	626	763	1011
110.	1257	1391	1374	1283	1040	812	525	340	250	204
120.	191	162	184	166	177	176	195	194	172	151
130.	180	162	160	191	181	153	176	165	190	168
140.	160	166	183	185	179	159	166	194	173	179
150.	193	174	187	209	177	214	188	169	211	201
160.	196	214	190	181	196	179	197	183	174	216
170.	183	197	196	229	222	203	205	223	230	218
180.	262	275	275	285	272	272	227	228	224	202
190.	204	224	161	206	192	190	189	195	186	161
200.	204	188	175	186	189	195	158	147	172	160
210.	146	192	152	174	138	163	162	155	138	151
220.	139	100	103	97	98	102	92	81	108	86
230.	98	88	109	83	97	94	90	114	87	103
240.	101	98	112	110	96	109	129	124	121	122
250.	133	116	131	111	110	129	112	109	130	147
260.	144	153	159	150	171	162	152	176	170	176
270.	198	219	284	311	464	581	826	1248	2039	3399
280.	5168	7407	9799	11981	13206	13697	12731	11060	8399	5698
290.	3290	1774	879	398	185	107	67	39	36	38
300.	30	24	23	22	33	24	25	32	36	30
310.	34	38	35	25	28	18	7	4	3	3
320.										

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, циркония и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания циркония и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония и кислорода.

Задание G12

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, медь, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	4746	4767	4562	4545	4495	4196	4105	4060	4133	3864
40.	4746	4767	4562	4545	4495	4196	4105	4060	4133	3864
50.	3845	3757	3732	3694	3568	3576	3560	3428	3340	3325
60.	3363	3288	3171	3171	3125	3025	3045	2959	2926	2859
70.	2934	2865	2803	2760	2748	2679	2656	2548	2424	2353
80.	2139	1965	1567	1212	898	753	553	522	414	377
90.	362	332	310	344	274	311	297	315	332	278
100.	297	290	286	296	279	282	277	288	291	288
110.	261	286	288	301	269	301	325	382	436	613
120.	723	928	1021	1053	942	612	401	267	183	171
130.	121	138	114	138	130	89	113	129	125	129
140.	116	118	113	115	109	114	103	117	114	111
150.	118	124	101	127	116	120	100	109	102	132
160.	130	110	121	111	104	116	127	125	118	120
170.	121	128	103	107	112	119	118	121	128	89
180.	119	122	131	139	125	125	144	128	143	149
190.	176	180	188	226	220	231	216	174	162	140
200.	128	108	116	116	123	99	124	139	115	127
210.	130	108	94	104	117	119	121	126	136	109
220.	114	110	94	121	104	103	82	119	99	99
230.	89	75	86	58	66	54	42	57	42	52
240.	63	66	69	44	52	51	78	68	59	68
250.	83	69	100	108	100	79	107	118	137	141
260.	146	183	214	248	297	397	558	949	1301	1943
270.	2467	2427	2164	1843	1206	767	428	238	131	101
280.	68	45	19	18	30	23	28	23	31	23
290.	21	36	44	36	61	56	65	52	61	47
300.	52	65	60	69	78	78	113	145	164	200
310.	291	335	416	579	767	1062	1637	2678	4501	7655
320.	12190	18078	22761	24543	22198	16323	9729	4986	2230	908
330.	435	216	154	72	44	31	29	20	19	12
340.	10	5	5	5	1	1	2	1	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, меди, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания меди, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и тантала.

Задание G13

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	40.	4094	3953	3772	3703	3841	3623	3687	3678	3473
50.	3334	3337	3186	3278	3233	3171	3031	2993	2936	3098
60.	2926	2854	2827	2884	2741	2702	2731	2658	2663	2505
70.	2604	2526	2398	2466	2398	2308	2213	2129	1947	1637
80.	1285	962	716	504	382	312	331	254	211	191
90.	173	153	172	158	136	125	128	137	159	166
100.	156	175	155	174	136	158	148	138	156	194
110.	168	158	169	197	236	276	377	485	719	906
120.	1070	1301	1287	1209	995	710	436	238	142	118
130.	85	83	84	98	91	75	78	90	89	88
140.	72	81	70	79	79	96	92	85	78	72
150.	78	69	62	71	89	78	80	99	102	96
160.	99	106	104	111	107	99	102	113	90	77
170.	86	82	98	86	99	82	74	80	70	69
180.	92	84	83	85	88	112	89	123	100	137
190.	121	131	156	180	158	139	142	143	116	134
200.	120	114	148	139	118	125	118	125	115	134
210.	125	131	139	119	131	137	142	121	122	105
220.	110	131	112	132	115	123	115	112	132	133
230.	120	101	110	105	115	120	140	138	182	245
240.	291	393	546	790	1227	1697	2358	2958	3401	3410
250.	3181	2633	1868	1207	690	408	250	186	147	112
260.	104	123	115	116	140	168	171	159	185	148
270.	149	168	153	160	141	126	167	116	101	75
280.	57	33	25	18	22	21	14	25	24	16
290.	25	39	40	39	50	44	59	68	47	64

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	69	61	65	56	88	74	87	104	147	130
300.	69	61	65	56	88	74	87	104	147	130
310.	174	235	236	349	421	600	740	1147	1765	2986
320.	5095	8364	12819	17805	20987	20732	16906	11219	6059	2810
330.	1110	496	237	134	88	53	43	17	22	18
340.	13	7	5	0	0	1	2	2	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и тантала.

Задание G14

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, хром.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	4806	4854	4511	4636	4447	4476	4291	4170	4142	4027
40.	4806	4854	4511	4636	4447	4476	4291	4170	4142	4027
50.	3992	3827	3909	3890	3729	3667	3813	3583	3512	3532
60.	3549	3515	3435	3433	3329	3336	3354	3214	3238	3207
70.	3185	3131	3080	2915	2845	2695	2565	2241	1927	1435
80.	1030	724	446	432	434	396	391	317	264	277
90.	243	217	233	201	186	200	211	209	182	204
100.	167	218	165	168	181	191	201	199	191	246
110.	280	327	337	455	549	666	877	1150	1325	1481
120.	1517	1459	1291	999	682	388	226	124	103	83
130.	78	65	78	76	76	66	66	69	64	71
140.	76	74	64	74	74	61	60	62	68	74
150.	55	61	65	62	60	53	87	68	67	84
160.	92	90	81	65	66	71	65	62	59	58
170.	44	55	45	48	55	47	52	60	50	62
180.	53	53	61	87	63	67	65	74	79	70
190.	102	89	64	78	92	63	72	57	52	62

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	61	64	59	59	59	62	64	72	59	83
200.	61	64	59	59	59	62	64	72	59	83
210.	97	85	95	87	95	102	74	102	81	86
220.	92	76	89	68	71	100	82	77	68	87
230.	61	73	91	86	90	95	126	143	130	158
240.	203	222	279	330	498	608	1003	1634	2649	4057
250.	5664	7135	8493	8979	9055	8653	7692	6196	4325	2707
260.	1423	718	344	211	154	115	100	87	66	60
270.	50	36	28	22	21	24	11	22	17	19
280.	16	18	19	23	25	12	19	24	20	17
290.	25	25	26	20	28	18	21	19	15	9
300.	17	14	10	17	10	4	10	8	10	3
310.	7	6	7	13	10	17	18	24	21	8
320.	14	7	7	3	2	2	1	0		

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, хрома и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания хрома и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов хрома и кислорода.

Задание G15

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, хром.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	4794	4609	4484	4380	4402	4238	4111	3983	3968	3866
40.	4794	4609	4484	4380	4402	4238	4111	3983	3968	3866
50.	3897	3789	3864	3724	3490	3561	3459	3535	3318	3237
60.	3268	3172	3228	3090	3025	3061	3017	2853	2746	2741
70.	2772	2675	2638	2420	2275	2063	1675	1171	883	666
80.	539	466	450	468	435	427	415	340	327	294
90.	269	257	272	296	264	276	272	285	293	258
100.	263	268	277	278	286	336	336	389	383	429
110.	479	558	692	826	1032	1237	1337	1453	1484	1455

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	1411	1302	1237	990	787	567	393	182	120	79
120.	1411	1302	1237	990	787	567	393	182	120	79
130.	91	71	80	67	86	71	78	81	79	76
140.	67	74	59	75	85	85	56	76	68	74
150.	87	66	70	57	78	64	69	86	88	80
160.	72	61	66	62	53	52	53	57	46	42
170.	56	49	66	49	52	63	58	49	39	55
180.	70	61	61	62	69	92	104	93	100	103
190.	81	104	125	116	85	107	92	103	101	98
200.	101	83	84	75	78	64	72	73	64	65
210.	64	78	69	72	72	77	71	87	75	92
220.	80	93	100	94	88	84	88	83	77	88
230.	120	89	119	139	150	159	170	209	259	358
240.	381	520	686	919	1463	2197	3318	4704	6127	7607
250.	8474	9529	10352	11042	11248	10436	9022	6820	4557	2616
260.	1348	599	280	177	112	79	58	28	29	28
270.	26	15	31	24	29	19	13	10	20	18
280.	9	12	19	19	18	14	15	15	13	27
290.	25	25	25	32	34	33	36	27	29	26
300.	17	22	22	15	18	20	16	35	30	46
310.	47	71	86	109	105	112	78	68	35	20
320.	18	17	15	6	9	3	1	0	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, хрома и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, хрома и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ванадия и хрома.

Задание G16

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, медь.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
40.	4696	4659	4437	4471	4276	4240	4203	4130	4035	4049
50.	3898	3805	3738	3619	3511	3593	3319	3313	3330	3240
60.	3282	3242	3061	3113	3065	2953	3026	2939	2981	2925
70.	2792	2739	2784	2748	2659	2666	2561	2564	2441	2430
80.	2366	2208	2045	1861	1557	1236	805	584	435	350
90.	379	295	284	313	277	309	305	292	259	300
100.	275	274	285	260	295	304	281	255	275	271
110.	277	251	263	250	287	277	303	302	336	361
120.	356	382	391	337	301	222	181	166	162	149
130.	152	143	143	150	143	138	134	149	147	144
140.	128	128	138	134	136	143	158	114	157	151
150.	153	113	137	136	124	140	143	136	145	153
160.	115	144	144	121	136	160	149	153	138	160
170.	127	125	145	140	107	143	130	148	130	131
180.	113	119	135	147	127	143	144	136	136	129
190.	166	133	183	168	188	201	179	181	195	171
200.	159	148	174	168	178	171	169	145	151	139
210.	116	109	132	101	117	90	122	117	132	126
220.	129	133	126	138	133	157	157	186	163	180
230.	178	156	164	118	109	85	63	55	76	59
240.	82	71	83	81	85	89	107	74	98	101
250.	95	89	123	111	95	118	121	144	160	149
260.	177	185	196	209	242	296	361	541	786	1173
270.	1817	2323	2623	2317	1838	1277	710	366	142	63
280.	44	24	15	15	15	15	17	9	8	13
290.	15	13	8	17	18	19	9	22	22	12
300.	14	19	27	28	23	17	25	30	18	22
310.	25	31	16	32	26	37	30	38	33	51
320.	51	58	50	49	42	24	20	13	6	2

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, меди и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания меди и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов меди и кислорода.

Задание G17

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, ванадий, тантал.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
40.	4480	4577	4248	4178	4144	4131	3914	3907	3797	3850
50.	3661	3550	3585	3531	3489	3463	3389	3335	3224	3266
60.	3197	3228	3117	3164	3009	3084	2953	2932	2851	2818
70.	2791	2757	2745	2786	2644	2750	2567	2535	2408	2249
80.	2022	1703	1323	897	671	468	327	244	200	181
90.	168	137	143	125	123	131	101	107	102	85
100.	102	96	93	99	108	89	88	83	85	87
110.	72	84	77	97	103	115	119	174	248	414
120.	615	722	935	965	792	520	318	200	111	72
130.	69	61	67	56	47	72	58	58	58	50
140.	50	44	55	55	54	54	46	48	60	44
150.	57	74	53	51	42	49	41	49	53	66
160.	59	40	36	50	64	57	63	60	55	53
170.	45	44	49	49	47	49	54	59	46	48
180.	48	49	52	62	38	54	58	56	47	58
190.	64	81	63	79	102	88	80	80	71	47
200.	60	65	52	59	53	41	57	45	45	61
210.	51	41	41	55	43	57	59	59	50	51
220.	51	62	48	58	59	57	58	43	59	59
230.	71	59	52	54	45	65	54	52	76	58
240.	81	77	93	95	112	121	153	181	275	393
250.	626	1149	1972	2882	3614	3735	3243	2181	1258	606
260.	297	148	70	85	85	62	53	36	38	44
270.	32	60	97	101	133	165	162	133	113	64
280.	55	31	23	12	18	16	12	9	15	11
290.	14	19	15	28	21	33	34	27	26	18
300.	26	28	27	24	29	44	47	68	89	120
310.	126	186	211	278	342	494	782	1184	1872	3161
320.	5445	8923	12738	16166	16729	14237	9622	5373	2374	1009
330.	470	187	123	71	57	33	27	20	14	10
340.	5	4	3	5	1	2	1	1	1	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, ванадия, тантала и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания ванадия, тантала и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов ванадия и тантала.

Задание G18

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, титан, цирконий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	40.	4655	4651	4574	4324	4317	4219	4099	4026	3880
50.	3792	3712	3682	3600	3573	3431	3436	3445	3356	3279
60.	3265	3137	3176	3102	3058	3090	3053	2912	2909	2823
70.	2796	2631	2542	2311	2037	1747	1447	1203	1033	915
80.	904	818	765	727	783	790	800	703	671	584
90.	656	698	635	667	699	665	716	678	677	674
100.	659	665	716	692	722	718	789	799	790	895
110.	945	1183	1301	1549	1748	1890	1935	1916	1910	1977
120.	1862	1876	1778	1473	1211	915	691	565	476	473
130.	486	485	477	462	481	473	504	515	477	495
140.	478	521	482	521	518	469	474	442	515	465
150.	488	487	500	564	506	503	525	563	527	543
160.	517	478	533	487	462	499	461	546	465	482
170.	504	522	481	523	500	506	533	546	558	497
180.	583	581	531	576	575	595	578	631	645	641
190.	582	621	593	584	527	534	561	563	545	593
200.	557	563	533	496	536	548	539	552	489	545
210.	492	521	527	511	556	578	542	585	530	529
220.	516	539	528	478	476	449	489	493	476	526
230.	542	576	650	814	1033	1260	1708	2226	2916	3470
240.	3798	3810	3218	2675	1907	1349	988	702	627	589
250.	522	515	514	465	496	473	536	518	530	555
260.	556	559	519	541	486	507	500	528	540	552
270.	614	626	606	598	581	594	540	673	623	706
280.	804	980	1208	1735	2490	3943	5713	7989	10573	12687
290.	14449	15264	15868	15931	14964	13505	11133	8233	5293	3068
300.	1618	825	399	218	166	111	95	80	73	86
310.	83	71	84	67	51	32	33	21	28	19
320.	26	23	24	16	10	9	8	5	2	2
330.	2	0	2	1	0	1	0	0	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, титана, циркония и кислорода. Рассчитайте слоевые содер-

жания титана, циркония и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов титана и циркония.

Задание G19

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, цирконий, ниобий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	4297	4030	4058	3984	3900	3807	3655	3751	3661	3617
40.	4297	4030	4058	3984	3900	3807	3655	3751	3661	3617
50.	3473	3484	3446	3340	3281	3317	3242	3089	3168	3101
60.	2905	2990	2922	3029	2798	2836	2770	2774	2679	2640
70.	2673	2535	2515	2434	2193	2150	1832	1432	1123	835
80.	584	469	462	425	477	428	413	372	337	320
90.	315	290	290	286	282	317	299	280	280	290
100.	302	280	281	318	315	292	320	362	399	423
110.	473	564	630	824	965	1202	1309	1498	1562	1527
120.	1351	1237	1210	1072	843	598	401	306	201	178
130.	171	151	160	160	153	153	158	148	121	144
140.	158	141	152	163	141	160	141	161	155	155
150.	153	155	152	173	165	162	160	160	142	190
160.	179	153	190	154	160	122	129	118	150	128
170.	116	137	132	130	131	136	134	143	134	150
180.	143	171	168	140	164	170	204	177	215	188
190.	184	204	190	189	231	201	224	200	196	176
200.	182	155	145	174	145	147	169	140	164	172
210.	174	168	139	157	137	148	134	156	157	188
220.	169	188	175	209	185	158	177	164	148	154
230.	123	146	161	130	125	123	127	140	147	114
240.	154	122	130	142	154	154	138	120	135	146
250.	133	170	162	150	160	175	155	183	141	209
260.	221	199	181	241	208	213	221	262	274	283
270.	282	299	302	311	291	296	342	388	481	578
280.	817	1134	1791	2847	4586	6652	8877	11221	13019	13834
290.	13908	14308	14543	15613	16130	16565	16346	14512	11369	7889

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	300.	4524	2337	1105	493	264	146	100	68	48
310.	22	29	31	32	39	47	53	52	49	59
320.	53	53	56	29	20	24	12	11	2	2
330.	3	1	1	1	2	2	2	2	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, циркония, ниобия и кислорода. Рассчитайте слоевое содержание кислорода, а также общее слоевое содержание атомов циркония и ниобия, принимая в качестве σ_j среднее значение сечений резерфордовского рассеяния на ядрах атомов этих элементов. Постройте профили распределения по глубине совместно атомов циркония и ниобия.

Задание G20

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, никель, иридий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	195	330

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	20.	2962	3252	2962	2782	2635	2333	2382	2254	2190
30.	2052	1959	1998	1864	1965	1874	1888	1794	1868	1730
40.	1716	1775	1715	1667	1682	1618	1544	1542	1560	1522
50.	1502	1474	1467	1501	1380	1407	1372	1347	1325	1400
60.	1323	1284	1293	1244	1268	1203	1219	1222	1202	1180
70.	1118	1132	1137	1053	1069	918	817	680	588	452
80.	379	349	278	211	177	146	127	103	113	104
90.	102	85	97	101	99	106	118	86	109	93
100.	108	93	103	106	92	95	91	137	103	149
110.	159	178	231	271	322	327	304	328	281	248
120.	188	146	112	89	50	45	38	61	51	44
130.	50	34	34	49	42	37	44	38	41	43

№ ка-нала	Выход рассеяния, имп.									
	140.	40	46	39	39	47	54	45	45	42
150.	41	51	37	57	39	48	45	52	53	44
160.	60	60	57	69	63	48	29	34	29	49
170.	30	36	46	35	47	41	33	32	40	43
180.	47	55	51	48	71	58	71	84	89	55
190.	81	67	79	71	57	57	50	69	52	47
200.	39	37	41	48	44	40	40	42	28	49
210.	35	45	53	38	45	54	56	56	52	44
220.	58	49	61	66	48	36	37	46	42	48
230.	28□	45	45	40	43	41	54	42	50□	48
240.	56	69	54	69	96	116	126	129	166	227
250.	283	433	690	1035	1469	1803	1990	2059	1932	1585
260.	1177	893	606	403	282	202	145	117	103	75
270.	56	39	39	24	17	19	22	14	26	26
280.	25	26	25	25	32	33	44	50	45	53
290.	53	63	71	79	74	90	96	93	119	138
300.	186	262	373	600	820	1142	1333	1528	1519	1565
310.	1947	2697	4120	6243	8459	10311	11059	10385	8460	6054
320.	3797	2156	1182	726	479	277	195	116	58	28
330.	21	16	11	11	5	3	6	5	3	3
340.	1	3	1	3	5	1	1	3	0	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для углерода, никеля, иридия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания никеля, иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов никеля и иридия.

Задание G21

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, алюминий, иридий.

Тормозящая среда: алюминий.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	30.		9262	9069	8955	8648	8485	8400	7772	8001
40.	7826	7506	7446	7295	7430	7136	6866	6810	6697	6639

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
50.	6660	6611	6524	6223	6102	6123	6118	5988	6055	5815
60.	5887	5734	5784	5612	5683	5665	5392	5558	5383	5427
70.	5339	5311	5376	5222	5182	5138	5161	5178	5058	5101
80.	5060	4857	4916	4870	4949	4891	4796	4850	4772	4719
90.	4693	4642	4550	4671	4657	4649	4560	4591	4565	4624
100.	4593	4673	4538	4429	4481	4640	4489	4484	4467	4561
110.	4397	4376	4355	4366	4389	4366	4376	4453	4284	4390
120.	4276	4410	4269	4240	4232	4097	4123	4129	4254	4190
130.	4072	4061	4015	4253	4107	4141	4122	4110	4051	4048
140.	4113	4006	3909	3912	3996	4084	3920	4058	4038	3976
150.	3929	3978	3962	3956	3802	3902	3956	3888	3930	3988
160.	3957	4127	4059	4289	4250	4355	4440	4164	4014	3926
170.	3839	3703	3800	3775	3790	3700	3738	3735	3712	3571
180.	3756	3644	3656	3723	3666	3650	3764	3580	3605	3760
190.	3497	3516	3599	3733	3535	3650	3525	3525	3566	3461
200.	3505	3570	3538	3491	3556	3557	3519	3518	3469	3535
210.	3428	3505	3458	3453	3394	3457	3500	3492	3420	3325
220.	3412	3331	3280	3433	3334	3462	3279	3256	3356	3340
230.	3231	3395	3340	3462	3289	3282	3360	3291	3255	3203
240.	3143	3160	3182	3221	3145	3122	3087	3107	3088	3081
250.	2876	2686	2673	2402	2013	1603	1126	897	599	445
260.	303	234	133	111	75	65	59	73	59	68
270.	48	52	59	58	46	62	63	52	64	67
280.	62	71	62	65	61	57	61	51	54	55
290.	66	57	71	74	58	67	74	71	58	70
300.	72	68	56	60	69	57	60	79	58	73
310.	57	79	60	86	70	81	66	58	49	55
320.	70	59	53	61	63	67	62	57	77	58
330.	61	57	75	71	58	54	70	70	72	73
340.	73	72	75	78	78	69	67	83	86	86
350.	99	93	106	104	123	95	95	88	78	76
360.	81	59	65	71	79	83	72	69	79	71
370.	78	63	96	71	81	92	82	80	90	95
380.	86	95	107	99	98	106	101	107	135	116
390.	141	122	129	116	133	134	153	159	151	140
400.	175	159	163	184	201	215	233	210	249	278
410.	276	309	355	401	425	493	670	984	1553	2658
420.	4199	5965	7422	8451	8207	6742	4579	2628	1032	412
430.	139	50	35	28	25	29	27	27	17	15
440.	9	8	8	4	3	4	1	2	2	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия и иридия. Рассчитайте слоевые содержания иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов иридия в алюминии.

Задание G22

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, алюминий, платина.

Тормозящая среда: алюминий.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
		7476	7468	7407	7092	7109	6796	6694	6745	6710
50.										
60.	6582	6573	6314	6375	6295	6064	6042	5990	5944	5887
70.	5719	5830	5586	5670	5471	5519	5673	5414	5388	5287
80.	5314	5220	5186	5153	5110	4979	5087	4993	4930	4993
90.	4956	4882	4761	4760	4746	4688	4732	4719	4717	4661
100.	4621	4434	4718	4623	4510	4571	4503	4503	4602	4416
110.	4468	4404	4442	4360	4288	4360	4273	4242	4222	4320
120.	4306	4245	4092	4189	4127	4170	4197	4253	4152	4165
130.	4163	4126	4144	4054	4034	3991	4116	4073	3910	3823
140.	3967	3906	3879	3904	3960	3929	3998	3855	3817	3855
150.	3800	3909	3894	3940	3715	3835	3878	3821	3770	3953
160.	3853	3811	3868	3911	3939	3946	4050	3813	3836	3697
170.	3749	3628	3572	3621	3636	3633	3661	3599	3456	3515
180.	3593	3637	3602	3436	3449	3470	3553	3430	3606	3454
190.	3433	3495	3377	3530	3376	3315	3447	3477	3487	3391
200.	3474	3430	3287	3417	3362	3350	3344	3305	3414	3319
210.	3283	3441	3288	3286	3257	3399	3284	3293	3259	3221
220.	3205	3264	3214	3153	3245	3243	3225	3131	3272	3217
230.	3227	3198	3173	3213	3195	3125	3090	3167	3200	3224
240.	3202	3112	3110	3027	3036	3107	2970	2966	2993	2939
250.	2945	2974	2762	2670	2451	2141	1718	1270	815	516
260.	388	241	272	261	211	202	204	236	207	208
270.	225	213	213	222	213	188	210	220	206	196
280.	227	235	218	222	218	201	215	220	185	220
290.	215	203	183	223	175	221	197	217	219	187
300.	208	213	200	211	171	216	202	185	184	185
310.	192	183	204	191	207	220	207	210	195	191
320.	201	202	163	188	205	206	180	196	207	183
330.	197	209	198	198	189	203	208	176	184	187
340.	198	178	171	176	190	174	177	193	206	181
350.	181	149	164	174	161	162	158	164	157	173
360.	168	157	172	170	159	150	159	167	191	170
370.	153	183	155	154	132	150	157	147	154	167
380.	158	157	144	162	185	149	162	180	163	156

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
390.	164	17	161	159	156	183	170	163	198	186
400.	178	193	157	178	198	184	202	203	181	180
410.	198	223	217	215	200	197	207	214	204	201
420.	199	212	225	265	232	289	319	343	412	527
430.	760	1400	2669	4540	7214	9305	9692	7728	4612	2038
440.	654	190	52	25	10	8	7	5	9	3
450.	0	4	2	3	3	3	3	0	0	6

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия и платины. Рассчитайте слоевые содержания платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов платины в алюминии.

Задание G23

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, алюминий, цирконий.

Тормозящая среда: алюминий.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
70.	5386	5438	5293	5377	5177	5112	5203	5005	5012	5024
80.	5067	4855	4868	4940	4915	4867	4857	4824	4915	4852
90.	4744	4748	4669	4656	4628	4690	4691	4578	4625	4655
100.	4662	4473	4498	4631	4473	4522	4522	4436	4453	4461
110.	4392	4360	4376	4505	4462	4348	4437	4368	4311	4341
120.	4154	4346	4198	4218	4256	4160	4136	4171	4184	4224
130.	4203	4272	4056	4259	3936	4151	4130	4062	4033	4021
140.	3945	3952	4163	4018	3957	4047	3952	3991	4047	3960
150.	3912	3961	4016	3879	4115	3970	4008	4021	3960	3896
160.	3936	4023	4106	4076	4260	4369	4433	4266	4110	3917
170.	3874	3748	3800	3861	3723	3613	3833	3876	3805	3732
180.	3592	3735	3700	3813	3680	3686	3730	3754	3586	3726
190.	3742	3700	3617	3735	3607	3618	3646	3682	3616	3687
200.	3624	3554	3586	3590	3555	3561	3544	3523	3472	3573
210.	3492	3420	3417	3565	3532	3498	3521	3478	3405	3411
220.	3438	3462	3375	3417	3391	3390	3441	3383	3425	3438

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	230.	3432	3355	3428	3413	3263	3372	3470	3365	3204
240.	3275	3247	3272	3263	3329	3314	3124	3247	3179	3100
250.	3093	2922	2838	2804	2379	1882	1384	910	521	300
260.	173	136	121	128	114	112	95	119	96	115
270.	101	110	114	125	95	104	100	109	108	131
280.	116	126	116	104	119	103	107	115	107	120
290.	95	95	120	123	125	109	114	113	93	101
300.	98	111	121	113	123	115	137	126	121	120
310.	119	135	138	124	116	123	112	112	128	118
320.	108	107	111	108	113	112	127	123	99	136
330.	117	133	121	119	105	108	128	114	125	116
340.	104	101	129	121	118	122	141	124	119	116
350.	131	116	108	142	121	120	100	118	106	133
360.	115	111	111	98	121	109	117	122	105	109
370.	124	113	120	95	106	84	112	122	115	113
380.	102	118	115	121	116	127	136	133	152	164
390.	227	325	516	981	1687	2699	3366	3723	3242	2585
400.	1615	918	423	208	84	25	8	6	14	6
410.	9	18	16	10	8	8	11	8	9	11
420.	2	9	3	10	11	6	10	10	14	7
430.	11	22	31	32	39	45	36	31	18	13
440.	3	3	0	0	0	2	1	1	3	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для алюминия и циркония. Рассчитайте слоевые содержания циркония и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов циркония в алюминии.

Задание G24

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, медь, платина.

Тормозящая среда: медь.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pt
2,0	Канал анализатора	114	168	258	437

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	50.	15074	14583	14564	14157	14110	13754	13607	13502	13154
60.	13010	12794	12627	12345	12243	12227	11807	11801	11601	11278

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
70.	11248	11227	11141	10936	10953	10480	10553	10468	10361	10275
80.	10028	10236	9671	9929	9698	9877	9486	9461	9235	9279
90.	9170	9314	9187	9137	8870	8960	8706	8685	8719	8725
100.	8497	8714	8488	8428	8373	8438	8187	8208	8159	8048
110.	7894	8088	8003	7877	7761	7796	7741	7857	7708	7634
120.	7458	7402	7382	7272	7345	7273	7229	7075	7222	7132
130.	7190	7000	7151	6830	6883	6929	6779	6789	6721	6548
140.	6500	6574	6497	6765	6698	6629	6446	6590	6378	6365
150.	6181	6341	6185	6212	6350	6333	6249	6232	6273	6223
160.	6169	6054	6001	5870	5967	5957	5883	5996	5945	5890
170.	5789	5769	5778	5657	5746	5853	5811	5689	5835	5774
180.	5681	5664	5561	5609	5369	5515	5583	5585	5408	5641
190.	5413	5397	5216	5306	5332	5306	5282	5425	5158	5322
200.	5285	5333	5180	5156	5290	5207	5088	5124	4991	5062
210.	5037	5181	5049	5149	5039	4934	4987	5061	4833	4921
220.	4928	4887	4924	4881	4821	4782	4893	4809	4836	4812
230.	4795	4796	4768	4639	4670	4672	4772	4529	4518	4567
240.	4767	4635	4651	4637	4609	4604	4548	4511	4527	4401
250.	4482	4440	4431	4557	4516	4376	4411	4445	4428	4375
260.	4313	4441	4391	4454	4298	4312	4334	4389	4241	4213
270.	4295	4329	4187	4311	4196	4279	4226	4305	4179	4269
280.	4167	4078	4188	4129	4098	4035	4129	4044	4241	3983
290.	3976	4139	3973	4079	3998	4080	4113	4003	3893	3995
300.	3991	3865	3944	4050	3855	3853	3827	3869	3932	3931
310.	3835	3847	3870	3858	3898	3760	3807	3888	3693	3759
320.	3947	3769	3680	3685	3810	3743	3707	3688	3590	3666
330.	3726	3664	3726	3698	3607	3650	3616	3637	3556	3633
340.	3582	3563	3595	3521	3649	3455	3380	3582	3506	3520
350.	3449	3514	3474	3501	3412	3295	3309	3284	3242	3285
360.	3320	3264	3062	2817	2679	2412	1937	1543	1205	843
370.	544	332	221	160	105	85	90	72	65	63
380.	67	73	68	86	65	68	54	70	64	65
390.	59	74	55	59	69	57	71	57	71	58
400.	62	55	62	79	69	70	73	86	78	83
410.	58	79	75	72	79	69	84	95	91	100
420.	71	99	115	117	121	149	160	188	199	229
430.	296	381	607	788	1246	1836	2218	2275	2098	1485
440.	936	506	230	121	58	27	25	21	12	27
450.	13	8	14	13	14	13	8	7	13	6

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для меди и платины. Рассчитайте слоевые содержания платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов платины и кислорода.

Задание G25

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

кислород, кремний, титан, железо.

Тормозящая среда: кремний.

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	6169	6241	6204	6079	5976	5904	5858	5866	5692	5815
60.	6169	6241	6204	6079	5976	5904	5858	5866	5692	5815
70.	5721	5747	5557	5604	5614	5538	5498	5431	5415	5258
80.	5349	5172	5336	5360	5338	5244	5052	5073	4855	5133
90.	4957	5098	5032	5013	4962	4976	4815	4860	4819	4801
100.	5007	4895	4893	4850	4838	4630	4795	4919	4836	4749
110.	4728	4722	4691	4842	4679	4903	4908	5047	4955	4992
120.	5013	5178	5074	4671	4760	4715	4437	4477	4452	4429
130.	4352	4445	4227	4328	4459	4311	4320	4156	4343	4247
140.	4254	4164	4149	4239	4256	4141	4202	4165	4167	4130
150.	4121	4200	4008	4087	4079	4146	4082	4099	3872	4011
160.	3969	3964	3851	3889	3908	3799	3852	3890	3863	3766
170.	3689	3761	3808	3677	3548	3461	3221	2863	2208	1674
180.	1146	827	575	430	370	286	256	237	252	218
190.	214	237	208	217	249	199	214	204	205	216
200.	205	214	162	219	209	190	209	187	223	228
210.	236	252	236	233	260	271	286	244	298	266
220.	323	282	314	330	307	355	405	508	651	856
230.	1111	1610	2253	2930	3700	4270	4667	4940	4883	4904
240.	4286	3820	3054	2324	1740	1245	889	769	639	656
250.	661	887	1079	1441	2078	2749	3452	3969	4332	4634
260.	4666	4569	4011	3322	2287	1462	764	386	206	105
270.	63	48	31	31	21	20	12	14	14	13
280.	18	12	10	11	13	21	17	23	21	25
290.	27	28	23	19	12	10	5	10	8	6
300.	6	4	12	5	5	2	7	10	5	3
310.	3	5	1	3	2	4	9	10	7	5

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для кремния, титана, железа и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания титана, железа и кислорода. Определите толщину слоев, содержащих титан, железо и кислород.

Задание G26

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, кобальт, платина.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
20.			5053	4431	3747	3381	2960	2753	2555	2438
30.	2419	2218	2206	2269	2175	2055	2071	2049	1932	1932
40.	1951	1790	1834	1858	1746	1775	1754	1691	1665	1702
50.	1552	1543	1498	1589	1465	1561	1469	1460	1472	1430
60.	1407	1448	1382	1326	1364	1354	1289	1324	1311	1344
70.	1272	1258	1252	1195	1142	989	904	805	704	630
80.	533	471	350	294	300	242	263	220	190	199
90.	218	207	206	201	194	201	212	179	187	176
100.	182	173	194	183	182	192	192	198	205	206
110.	208	240	263	271	289	299	326	266	291	268
120.	287	253	239	224	221	160	167	160	164	158
130.	163	177	193	182	166	177	156	150	178	166
140.	131	187	164	182	204	169	179	154	170	160
150.	157	180	172	192	169	196	180	208	193	184
160.	148	201	206	202	210	173	184	178	208	188
170.	171	197	181	187	200	194	180	214	180	216
180.	225	200	232	234	243	241	254	251	230	257
190.	239	220	194	223	243	240	237	227	272	233
200.	246	233	241	223	216	229	287	259	266	256
210.	280	250	262	242	249	278	269	293	285	304
220.	312	315	298	306	301	328	317	303	332	325
230.	300	337	324	350	336	342	370	411	350	366
240.	391	422	399	384	403	466	509	468	526	575
250.	606	666	728	875	1190	1688	2465	3507	4537	5318
260.	5852	5264	4443	3184	2080	1224	666	405	250	205
270.	173	142	150	131	139	126	117	133	132	120
280.	117	134	131	142	131	145	136	146	168	147
290.	158	166	177	192	178	220	226	227	258	341
300.	360	415	579	800	1222	1702	2456	3336	4489	5536
310.	6227	6281	5606	4692	3246	2030	1177	651	326	224
320.	124	69	42	23	22	7	1	2	1	2
330.	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для кобальта, платины и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания кобальта, платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов кобальта и платины.

Задание G27

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, кобальт, иридий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	2142	2042	2024	1915	1944	1883	1828	1754	1750	1782
30.	2142	2042	2024	1915	1944	1883	1828	1754	1750	1782
40.	1728	1783	1665	1581	1623	1602	1620	1535	1464	1473
50.	1464	1401	1411	1389	1378	1407	1350	1296	1333	1339
60.	1235	1315	1272	1220	1250	1239	1157	1238	1225	1158
70.	1155	1050	1099	1014	1021	867	722	677	521	437
80.	366	326	348	319	297	277	214	212	223	226
90.	185	171	168	186	184	177	177	153	163	182
100.	170	184	177	183	185	172	201	216	205	228
110.	269	296	330	387	430	379	405	342	289	228
120.	240	214	192	172	136	82	71	55	57	49
130.	49	51	39	33	53	45	58	45	74	57
140.	54	46	67	55	47	55	59	58	40	67
150.	57	55	46	56	58	59	58	53	82	62
160.	79	60	57	71	66	58	52	49	66	55
170.	44	43	57	55	63	55	57	54	61	67
180.	50	53	69	52	63	77	64	73	63	56
190.	83	73	84	86	94	75	74	73	74	71
200.	76	55	72	56	68	65	64	67	62	73
210.	60	80	75	68	78	86	87	97	93	118
220.	110	111	97	93	93	88	82	91	113	105
230.	81	95	105	118	95	121	104	115	131	125
240.	140	153	145	138	165	175	200	226	233	270
250.	333	450	602	840	1300	2075	2845	3764	4256	4750
260.	4806	4143	3092	2159	1302	691	330	165	90	58
270.	60	51	36	49	26	26	24	21	18	21
280.	24	11	19	19	16	27	28	21	28	41

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
	51	45	52	61	60	85	69	86	89	72
290.	51	45	52	61	60	85	69	86	89	72
300.	83	87	128	141	189	323	450	677	932	1071
310.	1249	1248	1314	1577	2330	3732	5806	8264	10343	11027
320.	10464	8496	5798	3466	1709	717	261	77	21	6
330.	2	1	1	2	0	0	1	1	0	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для кобальта, иридия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания кобальта, иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов кобальта и иридия.

Задание G28

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, никель, платина.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
			2662	2618	2432	2421	2277	2358	2191	2211
20.			2662	2618	2432	2421	2277	2358	2191	2211
30.	2127	2119	2044	1903	1904	1879	1829	1800	1756	1751
40.	1747	1618	1638	1512	1658	1535	1565	1494	1490	1510
50.	1450	1435	1404	1435	1340	1362	1359	1291	1280	1265
60.	1335	1213	1248	1275	1234	1218	1216	1183	1183	1174
70.	1148	1148	1183	1110	1061	971	967	834	777	641
80.	631	543	482	389	340	270	216	225	203	166
90.	184	173	179	159	157	176	158	155	164	180
100.	167	162	153	156	159	153	162	153	151	144
110.	161	180	209	230	229	255	253	222	231	216
120.	209	205	194	140	148	127	149	123	141	120
130.	127	143	136	129	108	132	131	142	112	138
140.	127	128	136	100	136	120	124	108	135	114
150.	123	132	140	140	124	130	129	126	125	117
160.	127	128	117	118	134	124	132	144	129	131
170.	129	129	113	119	138	127	118	142	139	141
180.	133	132	142	168	164	179	191	170	187	171

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
190.	194	162	195	169	163	157	162	154	146	151
200.	152	154	163	161	156	156	145	125	142	136
210.	147	167	167	158	182	160	172	165	161	155
220.	166	166	176	183	168	195	154	171	173	194
230.	146	176	178	163	181	210	173	189	199	201
240.	204	213	216	214	216	241	208	230	231	215
250.	242	269	301	327	332	420	574	909	1284	1856
260.	2494	3047	3254	3101	2515	2042	1439	962	604	395
270.	283	222	151	164	140	114	128	131	125	141
280.	138	136	145	154	135	143	153	142	136	142
290.	139	128	180	142	171	157	163	196	190	203
300.	189	231	271	292	368	490	691	1085	1607	2256
310.	3316	4474	5705	6514	7080	7166	6421	5184	3752	2366
320.	1351	669	257	108	40	21	4	2	1	0
330.	2	0	0	0	0	1	2	3	0	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для никеля, платины и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания никеля, платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов никеля и платины.

Задание G29

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, серебро, иридий.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
20.				3273	2906	2658	2553	2481	2424	2271
30.	2265	2250	2183	2116	2138	1957	1999	1965	1882	1903
40.	1828	1862	1777	1754	1698	1672	1658	1681	1648	1602
50.	1600	1626	1537	1478	1496	1404	1402	1453	1417	1387
60.	1290	1323	1370	1411	1269	1315	1326	1204	1291	1207
70.	1200	1239	1194	1172	1106	1110	1048	936	819	640
80.	559	443	394	302	247	209	150	154	140	130

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
90.	141	110	142	97	113	114	120	100	102	134
100.	110	130	112	126	101	107	119	117	123	138
110.	124	147	166	192	200	255	303	306	305	267
120.	223	152	166	109	83	70	67	72	71	65
130.	58	63	55	64	61	69	61	55	51	75
140.	69	66	57	54	58	46	63	65	75	58
150.	57	49	50	60	57	60	52	59	58	86
160.	80	70	86	87	92	85	77	84	61	59
170.	65	66	56	60	53	56	50	59	46	63
180.	57	67	58	67	69	57	56	90	92	97
190.	92	89	65	75	74	66	61	42	66	61
200.	64	74	57	73	62	54	61	55	47	54
210.	61	55	86	85	101	118	120	143	99	85
220.	77	95	94	75	86	79	74	49	64	48
230.	43	60	43	34	40	36	46	41	34	39
240.	53	45	56	44	50	48	40	59	50	37
250.	55	56	66	58	58	58	71	88	60	76
260.	72	57	75	70	95	100	97	75	95	73
270.	67	55	61	63	53	61	55	71	59	71
280.	67	80	83	110	127	134	181	221	254	280
290.	415	548	870	1413	1943	2612	3055	3073	2676	2069
300.	1554	1186	1055	1106	1262	1403	1453	1442	1619	1954
310.	2911	4283	6390	8654	10355	10689	10046	7827	5449	3364
320.	1958	995	657	382	281	174	98	68	22	8
330.	3	5	1	0	0	0	1	1	2	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для серебра, иридия и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания серебра, иридия и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов серебра и иридия.

Задание G30

Элементы, входящие в состав анализируемого образца:

углерод, кислород, серебро, платина.

Тормозящая среда:

углерод (атомная плотность $N = 7,52 \cdot 10^{22}$ атом/см³).

Данные для калибровки шкалы спектрометра:

E_0 , МэВ	Элемент	C	O	Al	Pb
1,5	Канал анализатора	86	123	193	324

Распечатка спектра обратного рассеяния:

№ канала	Выход рассеяния, имп.									
20.			3268	3206	2911	2766	2560	2519	2431	2328
30.	2229	2191	2125	2098	2031	2016	1976	1946	1895	1884
40.	1844	1752	1782	1699	1688	1690	1665	1668	1609	1579
50.	1564	1525	1449	1480	1454	1531	1449	1397	1369	1366
60.	1341	1384	1285	1253	1259	1297	1283	1252	1280	1246
70.	1207	1177	1163	1157	1125	1076	1075	994	934	825
80.	815	629	534	415	324	217	172	133	133	137
90.	116	98	102	104	112	114	100	115	107	109
100.	112	98	113	91	90	90	105	85	85	99
110.	102	116	145	143	186	205	219	206	210	174
120.	172	125	113	90	72	57	52	41	52	39
130.	38	39	37	47	38	49	41	45	41	46
140.	42	55	43	54	53	32	48	44	43	48
150.	57	38	50	36	49	52	40	38	46	45
160.	38	53	45	53	62	62	55	66	40	62
170.	40	59	37	44	53	39	50	48	47	35
180.	46	59	48	67	68	70	76	86	95	94
190.	93	89	77	80	60	54	60	58	54	55
200.	68	65	60	61	73	73	85	75	74	64
210.	72	61	86	97	110	133	132	147	115	107
220.	94	74	89	65	53	52	48	42	27	25
230.	22	19	16	14	23	20	14	11	17	13
240.	14	16	21	14	19	20	16	13	12	17
250.	25	19	18	20	24	21	17	24	26	24
260.	18	23	19	23	10	15	15	22	19	19
270.	18	34	22	25	16	27	36	42	38	45
280.	44	41	62	56	87	92	109	157	206	293
290.	346	534	812	1148	1721	2469	3136	3549	3699	3276
300.	2524	1676	1031	582	397	271	282	332	411	558
310.	674	952	1360	1710	2091	2444	2571	2435	2131	1492
320.	1115	654	393	219	123	75	49	29	19	8
330.	15	7	2	3	5	3	1	1	1	3
340.	0	0	1	3	0	2	1	2	0	0

Постройте спектр обратного рассеяния. Произведите калибровку энергетической шкалы спектрометра. Постройте шкалы глубин для серебра, платины и кислорода. Рассчитайте слоевые содержания серебра, платины и кислорода. Постройте профили распределения по глубине атомов серебра и платины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поплавский В.В. Основы измерений физических величин. – Мн.: БГТУ, 2005.
2. Харт Х. Введение в измерительную технику. – М.: Мир, 1999.
3. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
4. Отто М. Современные методы исследований в аналитической химии: В 2 т. – М.: Техносфера, 2003.
5. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. – М.: Мир, 1989.
6. Поплавский В.В., Бойко Е.Б. Анализ поверхности твердых тел методом резерфордского обратного рассеяния быстрых ионов. – Мн.: БГТУ, 1993.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Программа дисциплины	4
1.1. Основы процесса измерений физических величин	4
1.1.1. Предмет и базовые понятия дисциплины	4
1.1.2. Измерение как процесс преобразования сигналов измерительной информации	4
1.1.3. Измерительные системы и их основные элементы ..	5
1.2. Основы измерений состава веществ. Физические основы измерений с применением излучений	6
1.2.1. Принципы преобразований электромагнитного излучения	6
1.2.2. Принципы преобразований корпускулярного излучения	8
1.2.3. Измерения состава веществ, основанные на исследовании электронной структуры атомов	8
1.2.4. Ядерно-физические измерения состава веществ	9
1.2.5. Основы акустических измерений	10
2. Методика выполнения заданий	11
2.1. Построение физико-математических моделей и определение статических характеристик измерительных преобразователей	11
2.2. Построение блок-схем преобразования сигналов в средствах измерений	19
2.3. Определение статических и динамических характеристик средств измерений на основе блок-схем сигналов	23
2.4. Определение характеристик оптических спектральных приборов	33
2.5. Моделирование распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий	37
2.6. Определение состава веществ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии	46
2.7. Определение состава веществ методом спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния	53
3. Контрольные задания	84
3.1. Вопросы контрольных заданий	85

3.2. Задачи контрольных заданий	90
3.2.1. Построение физико-математических моделей и блок-схем преобразования сигналов; расчет характеристик измерительных преобразователей на основе блок-схем	90
3.2.2. Определение характеристик оптических спектральных приборов	98
3.2.3. Моделирование распределений интенсивности рентгеновских спектральных линий	102
3.2.4. Определение элементного состава поверхности образцов по фотоэлектронным спектрам	103
3.2.5. Определение состава поверхности образцов по спектрам резерфордовского обратного рассеяния	134
Литература	170

Учебное издание

Поплавский Василий Владимирович

**ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

Редактор И. О. Гордейчик

Подписано в печать2006. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 10,0. Уч.-изд. л. 10,3.

Тираж 200 экз. Заказ

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220050. Минск, Свердлова, 13а.

ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220050. Минск, Свердлова, 13.

ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.