

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-Технический
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Кафедра Прикладной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Изучение методом Резерфордовского обратного рассеяния профилей кислорода, имплантированного в углеродные волокна

УДК 678.5.067:620.22-419.8:53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2A	Дорошенко Мария Андреевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. лаб№16 каф.ТФ	Сохорева В.В.	Нет		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Черепанова Н.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ	Вагнер А.Р.	к ф.-м. н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Общекультурные компетенции	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления.
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы; осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
Р7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Р8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Физико-технический

Направление подготовки (специальность): Ядерная физика и технологии

Кафедра: Прикладной физики

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0A2A	Дорошенко Марии Андреевне

Тема работы:

Изучение методом Резерфордского обратного рассеяния профилей кислорода,
имплантированного в углеродные волокна

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Проведенные в работе исследования необходимы для решения задачи упрочнения углеродных волокон, широко используемых для армирования композиционных, теплозащитных, хемостойких и других материалов.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Изучение физических основ метода Резерфордского обратного рассеяния, исследование параметров спектрометрического тракта, определение элементного состава эталонного образца и проведение эксперимента по определению профиля концентрации приповерхностного слоя углеродного волокна при облучении его ионами кислорода.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент каф.менеджмента, к.ф.н. Черепанова Н.В.
Социальная ответственность	Ассистент каф. ПФ, к. ф.-м. н. Гоголева Т.С.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	08.02.2016
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. лаб№16 каф.ТФ	Сохорева В.В.	Нет		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2A	Дорошенко Мария Андреевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А2А	Дорошенко Мария Андреевна

Институт	ФТ	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Радиационная безопасность человека и окружающей среды

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных факторов производственной среды: повышенный уровень электромагнитного излучения, отклонение показателей микроклимата от оптимальных, повышенный уровень шума, вибрации, ионизирующее излучение; – опасных факторов производственной среды: вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током.
2. <i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность; – радиационная безопасность; – пожарная безопасность; – требования охраны труда при работе с ПЭВМ и полупроводниковыми детекторами (ППД).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. <i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2А	Дорошенко Мария Андреевна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0A2A	Дорошенко Мария Андреевна

Институт		Кафедра	
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Радиационная безопасность окружающей среды

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> 	<p>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i> 2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i> 	<p>Оценочная карта конкурентных технических решений</p> <p>Иерархическая структура работ</p>
---	--

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i> 2. <i>Альтернативы проведения НИ</i> 3. <i>График проведения и бюджет НИ</i> 4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i>
--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Черепанова Н.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2A	Дорошенко Мария Андреевна		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Физико-технический

Направление подготовки: (специальность): Ядерная физика и технологии

Уровень образования: Бакалавриат

Кафедра: Прикладной физики

Период выполнения: Весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.02.16 г.	<i>Обзор и анализ литературы</i>	
15.03.16 г.	<i>Подготовка детекторов для проведения эксперимента</i>	
17.03.16 г.	<i>Измерение характеристик детекторов и выбор детектора для эксперимента</i>	
10.04.16 г.	<i>Проведение эксперимента по определению элементного состава эталонного образца</i>	
24.04.16 г.	<i>Проведение эксперимента по определению профиля концентрации приповерхностного слоя углеродного волокна при облучении его ионами кислорода</i>	
01.05.16 г.	<i>Компьютерное моделирование профиля концентрации кислорода в углеродном волокне</i>	
15.05.16 г.	<i>Анализ проделанной работы</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
С.н.с. лаб№16 каф.ТФ	Сохорева В.В.	Нет		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ПФ	Вагнер А.Р.	к. ф.-м. н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 69 страниц, 21 рисунок и 12 таблиц.

Ключевые слова: метод Резерфордовского обратного рассеяния, углеродные волокна, имплантированный кислород.

Объектом исследования данной дипломной работы являются углеродные волокна, имплантированные кислородом.

Целью выпускной квалификационной работы является исследование возможности применения метода Резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия для измерения профилей концентрации и распределения кислорода по глубине в углеродных волокнах при ионной имплантации кислорода.

В процессе работы проводилось изучение физических основ метода Резерфордовского обратного рассеяния, исследование параметров спектрометрического тракта, определение элементного состава эталонного образца и эксперимент по определению профиля концентрации приповерхностного слоя углеродного волокна при облучении его ионами кислорода.

В результате представлена информация, полученная методом Резерфордовского обратного рассеяния, о распределении имплантированного кислорода в образцах углеродных волокон, которые находят широкое применение в самолётостроении и автомобилестроении, в аэрокосмической, электротехнической, химической промышленности.

Оглавление

Введение.....	12
1. Теоретическая часть.....	14
1.1. Физические основы метода POP.....	14
1.2. Применение метода POP	18
1.3. Физические основы α -спектрометрии с ППД	19
2. Практическая часть	23
2.1. Схема измерения метода POP.....	23
2.2. Спектрометрический тракт с ППД.....	24
2.3. Получение энергетических спектров обратного рассеяния для эталонного образца и определение его элементного состава	29
2.4. Определение профиля концентрации кислорода в УВ методом POP ..	31
Заключение и вывод.....	37
Используемые источники.....	Ошибка! Закладка не определена.

Введение

Изделия, изготовленные из углеродных композиционных материалов, находят широкое применение в самолётостроении и автомобилестроении, в аэрокосмической, электротехнической, химической промышленности. Так углеродные волокна служат армирующим компонентом легких и сверхпрочных конструкционных углепластиков. Углерод служит также модельным материалом при изучении механизмов эрозии под действием атомарного кислорода, поскольку он составляет основу изделия, основную часть потери массы.

Углеродные и полимерные материалы подвержены разрушающему действию кислорода. Кислород, обладающий высокой химической активностью, является основной компонентой атмосферы Земли.

В результате воздействия кислорода могут значительно изменяться механические, оптические, электрофизические, теплофизические и другие эксплуатационные свойства углеродных волокон и композиционных материалов на их основе, приводящие к потере основных функциональных параметров. Кислород обладает способностью химически взаимодействовать с углеродом с образованием устойчивых летучих окислов, десорбирующихся с поверхности. Поэтому получение новых данных по влиянию воздействия потоков кислорода на природу изменений структуры и физико-механических свойств полимерных и углеродных материалов является актуальной задачей.

Развитие любой отрасли науки ведет к появлению новых методов исследования. Эксперименты Э. Резерфорда в области ядерной и атомной физики легли в основу современного метода исследования элементного состава твердых тел – Резерфордовского обратного рассеяния (РОР), одним из основных достоинств которого является возможность исследования образца без существенного нарушения его структуры.

Целью данной работы является исследование возможности применения метода Резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия для измерения профилей концентрации и распределения кислорода по глубине в углеродных волокнах при ионной имплантации кислорода. В рамках достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- изучить физические основы метода РОР;
- исследовать параметры спектрометрического тракта;
- определить элементный состав эталонного образца методом РОР;
- провести эксперимент по определению профиля концентрации приповерхностного слоя УВ при облучении его ионами кислорода методом РОР;
- сделать вывод по работе.

1. Теоретическая часть

1.1. Физические основы метода РОР

Основными методами, применяемыми в настоящее время для микроанализа поверхности, тонких плёнок и многослойных структур являются: Оже-спектроскопия, масс-спектрометрия вторичных ионов, электронный микронзонд, электронная микроскопия и обратное резерфордское рассеяние ионов.

Достоинство метода обратного рассеяния ионов состоит в том, что он является неразрушающим способом фазового анализа на глубину единицы микрон с разрешением $100\text{-}200 \text{ \AA}$.

Сущность метода обратного рассеяния заключается в следующем. Исследуемый объект облучается моноэнергетическим пучком ионов. После упругого взаимодействия с ядрами атомов мишени частицы рассеиваются и детектируются. Последующий анализ спектров обратно рассеянных частиц дает сведения о массе рассеивающего атома и глубине его залегания.

На рисунке – 1 представлено схематичное изображение примерного экспериментального энергетического спектра.

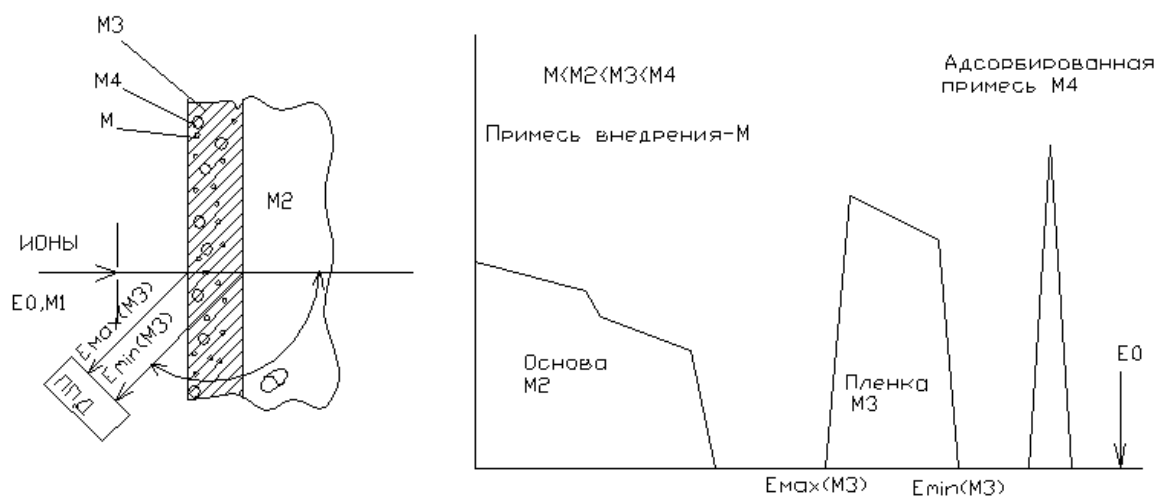


Рисунок 1 – Схема упругого рассеяния и энергетический спектр

Схема, иллюстрирующая обратное рассеяние ионов, представлена на рисунке - 1. Рядом показан энергетический спектр рассеянных ионов типичный для случая, когда пучок падает на многокомпонентную мишень.

Величина энергии обратно рассеянной частицы для данного пучка при постоянном угле рассеяния будет зависеть только от массы ядра рассеивающего атома. Однако, большинство частиц проходит достаточно далеко от ядер и не рассеивается на поверхности, а проникает в мишень и теряет энергию на возбуждение электрона. Поэтому, ионы, упруго рассеянные от атома под поверхностью, будут регистрироваться с меньшими энергиями, чем ионы, рассеянные аналогичными атомами на поверхности. Это обстоятельство позволяет наблюдать распределение атомов по глубине.

В результате упругого соударения ион теряет часть энергии. Исходя из законов сохранения энергии и импульса энергия после взаимодействия определяется выражением:

$$E_i = K_i E_0 = \left[\frac{M \cos\theta + (M_i^2 - M^2 \sin^2\theta)^{1/2}}{M + M_i} \right]^2 E_0, \quad (1)$$

где E_0 - энергия ионов до рассеяния, K_i - кинематический фактор i -ой компоненты, θ - угол рассеяния в лабораторной системе координат (ЛКС), M и M_i - массы налетающего иона и атома.

Основная физическая концепция возможностей метода базируется на трех количественных параметрах: кинематическом факторе K_M , выступающем в роли идентификатора масс; дифференциальных сечениях упругого рассеяния σ_R , обеспечивающих количественный анализ; тормозной способности заряженных частиц до и после рассеяния S_a . Энергетические потери в веществе ΔE обуславливают элементный анализ по глубине. Интегральный выход рассеяния Y_M на ядрах вещества в слое с атомной плотностью N пропорционален сечению упругого рассеяния:

$$Y_M = \Phi \Omega \sigma_R [\Delta x N], \quad (2)$$

где Φ – число частиц, падающих на образец за время анализа;

Ω – телесный угол детектора.

В благоприятных случаях предел обнаружения примесей тяжелых элементов в легкой матрице может достигать $\sim 10^{12} - 10^{13}$ атом*см⁻². Глубина анализа до-2х мкм, время сбора информации ~ 10 -60 мин. В зависимости от содержания и массового числа элемента. Точность относительных измерений может достигать 1-2%, абсолютная ошибка определения интегрального содержания ~ 5 -20%.

Рассмотрим упругое рассеяние ионов с массой M , зарядом Z_1e и энергией E_0 на ядрах атомов исследуемого образца, обладающих массой M_2 и зарядом Z_2e (рис. 2).

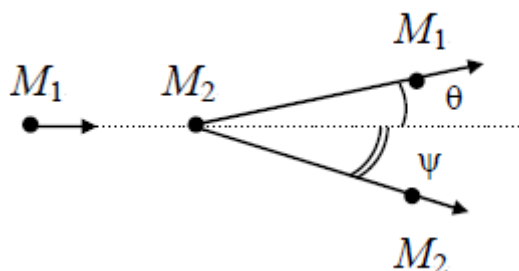


Рисунок 2 – Схема упругого рассеяния иона

В нерелятивистском случае законы сохранения энергии и импульса имеют вид:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_1 + E_2, \\ \sqrt{M_1 E_0} &= \sqrt{M_1 E_1} \cos \theta + \sqrt{M_2 E_2} \cos \psi, \\ 0 &= \sqrt{M_1 E_1} \sin \theta - \sqrt{M_2 E_2} \sin \psi, \end{aligned} \quad (3)$$

где E_1 и θ – энергия и угол вылета рассеянных ионов в лабораторной системе координат, E_2 и Ψ – энергия и угол вылета ядра отдачи; углы отсчитываются от направления пучка налетающих ионов. В результате решения системы уравнений (1) получаем выражение для энергии рассеянных ионов в типичном случае, когда $M_1 < M_2$:

$$\begin{aligned} E_1 &= k E_0, \\ k &= \left[\frac{\frac{M_1}{M_2} \cos \theta + \sqrt{1 - \left(\frac{M_1}{M_2} \sin \theta\right)^2}}{1 + \frac{M_1}{M_2}} \right]^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где k – кинематический фактор, определяемый как отношение значений энергии иона после и до рассеяния на ядре атома мишени. Отметим ряд существенных свойств кинематического фактора, следующих из выражения (4):

1. Величина k всегда меньше единицы, поскольку часть кинетической энергии налетающий ион передает ядру-рассеивателю.
2. При определенном угле рассеяния θ значения кинематического фактора различны для рассеивающих ядер с разными массами M_2 : чем меньше M_2 , тем меньше k . Это обстоятельство лежит в основе анализа массового состава ядер мишени.

Энергия ионов, рассеянных тонкой мишенью, определяется только кинематическим фактором и энергией налетающих ионов. Поэтому энергетический спектр ионов, рассеянных на данный угол, представляет собой

набор отдельных «линий», соответствующих разным массам ядер-рассеивателей.

Энергия регистрации определяется следующим образом: крайний канал пика на полувысоте соответствует E_1 .

$$E_1 = n * \delta E, \quad (5)$$

где n – номер канала.

По формуле (8) вычисляли E_1 , и зная E_0 и E_1 , вычисляли кинематический фактор k :

$$k = \frac{E_1}{E_0}, \quad (6)$$

где E_0 – энергия налетающих ионов;

E_1 – энергия регистрации рассеянных ионов.

1.2. Применение метода ROP

Метод резерфордского обратного рассеяния ионов (РОР) позволяет определять толщину и относительный состав тонких слоев, получать профиль распределения примесей и имплантированных атомов, изучать динамику взаимодиффузии, роста диэлектрических слоев и интерметаллидов, оценивать совершенство структуры, топографию поверхности, изучать состояние границ раздела, устанавливать положение примесных атомов и многое другое. Все эти сведения чрезвычайно важны для понимания процессов, происходящих в приповерхностных модифицированных слоях. Кроме того, метод может эффективно использоваться в качестве экспрессного контроля на атомном и ядерном уровнях на стадиях отработки новых технологий получения материалов и изделий из них.

Методы эффективны для аналитического контроля поверхностных слоев различных материалов на стадии создания новых технологий. Могут быть широко использованы при решении вопросов физики, радиационного материаловедения, экологии, медицины, археологии, метрологии, криминалистики.

1.3. Физические основы α -спектрометрии с ППД

Альфа-спектрометр - прибор для измерения энергии α -частиц, испускаемых радиоактивными ядрами.

Для регистрации ионов гелия в методе POP используется спектрометр с полупроводниковым поверхностно-барьерным кремниевым детектором.

Спектрометр включает вакуумную камеру, с линейкой исследуемых образцов, которая перемещается под пучок ионов с помощью штутцера, размещенного в вакуумном разъеме. В камере под углом θ (165° - 180°) расположен основной детектор. Попадая в ионопровод ускорителя, ионы гелия проходят через диафрагму, которая представляет собой диск с отверстиями по окружности диаметрами от 1 до 10 мм. Эта диафрагма позволяет выводить пучок ионов гелия определенного размера. Это важно, так как исследуемые образцы имеют разные размеры. На пути движения пучка в камере установлен прерыватель пучка, представляющий собой пластинку кремния с золотом на поверхности, обратное рассеяние ионов от которой регистрируется мониторным детектором. Сигналы с детектора поступают на предусилитель, усилитель и анализатор. Энергетические спектры от исследуемых образцов фиксируются на анализаторе в программе «Аспект». Обработка результатов эксперимента проводится при помощи компьютерной программы BS и SIMNRA.

Самой важной частью α -спектрометра является полупроводниковый детектор (ППД).

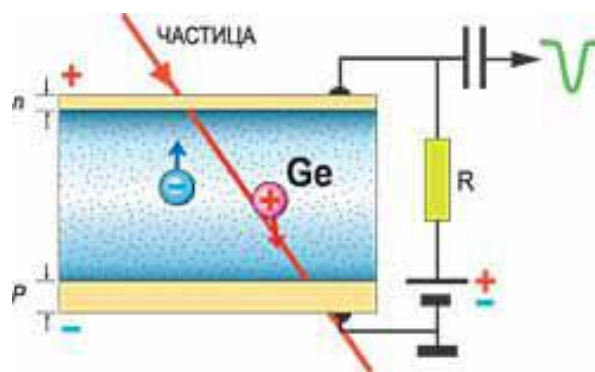


Рисунок 3 – Устройство полупроводникового детектора

Полупроводниковый детектор - прибор для регистрации ионизирующих излучений, основным элементом которого является кристалл полупроводника.

Заряженная частица, проникая в детектор, создаёт дополнительные (неравновесные) электронно-дырочные пары, которые под действием электрического поля «рассасываются», перемещаясь к электродам прибора. В результате во внешней цепи полупроводникового детектора возникает электрический импульс, который далее усиливается и регистрируется.

Полупроводниковый детектор работает подобно ионизационной камере с тем отличием, что ионизация происходит не в газовом промежутке, а в толще кристалла. Полупроводниковый детектор представляет собой полупроводниковый диод, на который подано обратное (запирающее) напряжение ($\sim 10^2$ В). Слой полупроводника вблизи границы р—n-перехода с объёмным зарядом «обеднён» носителями тока (электронами проводимости и дырками) и обладает высоким удельным электросопротивлением. К полупроводниковому кристаллу прикладывается напряжение до нескольких кэВ, что обеспечивает сбор всех зарядов, образованных частицей в объёме детектора.

К основным характеристикам ППД можно отнести: ВАХ детектора, толщину чувствительной зоны ППД, ёмкость перехода ППД и энергетическое разрешение ППД.

Чувствительная область детектора - область, в которой нет свободных носителей заряда. Попав в эту область, заряженная частица вызывает ионизацию, соответственно в зоне проводимости появляются электроны, а в валентной зоне - дырки. Под действием напряжения, приложенного к напылённым на поверхность чувствительной зоны электродам, возникает движение электронов и дырок, формируется импульс тока.

Толщина чувствительной зоны детектора определяется по формуле:

$$w \cong 5,3 * 10^{-5} \sqrt{\rho U_{\text{д}}} \quad , \quad (7)$$

где ρ — удельное сопротивление кремния, Ом · см; $U_{\text{д}}$ — напряжение смещения на детекторе, В.

Ёмкость перехода детектора определяется по формуле:

$$C_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_{\text{д}} S}{w} \quad , \quad (8)$$

где $\varepsilon_{\text{д}}$ — диэлектрическая проницаемость материала детектора, $\text{Ф} \times \text{м}^{-1}$; S — площадь перехода, м^2 ; w — толщина чувствительной области, м.

Наиболее важным параметром, характеризующим технический уровень спектрометра любого типа, является разрешающая способность, то есть способность обнаружить две группы моноэнергетического излучения одного вида. Разрешающую способность количественно оценивают по энергетическому разрешению, являющемуся величиной, обратно пропорциональной разрешающей способности. Под энергетическим разрешением ΔR понимается полная ширина ППП на половине его высоты. Обычно ΔR выражается в энергетических единицах (эВ, кэВ). Физический смысл этого параметра заключается в том, что он определяет, какая минимальная разница в энергиях ΔR должна быть у двух моноэнергетических групп заряженных частиц или фотонов одинаковой интенсивности, чтобы спектрометр смог их различить.

Энергетическое разрешение определяется по формуле:

$$\Delta R = n * \delta E, \quad (9)$$

где n – количество каналов на полувывоте энергетического пика, δE – ширина канала в энергетических единицах (кэВ/канал).

ВАХ детектора снимается по схеме включения, изображенной на рисунке – 4.

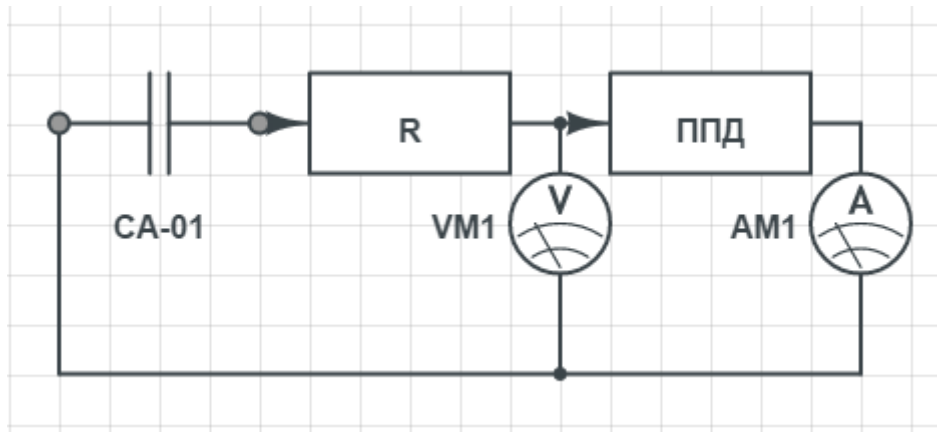


Рисунок 4 – Схема измерения ВАХ детекторов

2. Практическая часть

2.1. Схема измерения метода РОР

Основной установкой, применяемой для анализа, являлся ускоритель заряженных α -частиц ЭСГ – 2,5, изображенный на рисунке - 5. Электростатический генератор - устройство, в котором высокое постоянное напряжение (до нескольких МэВ) создается при помощи механического переноса электростатических зарядов.

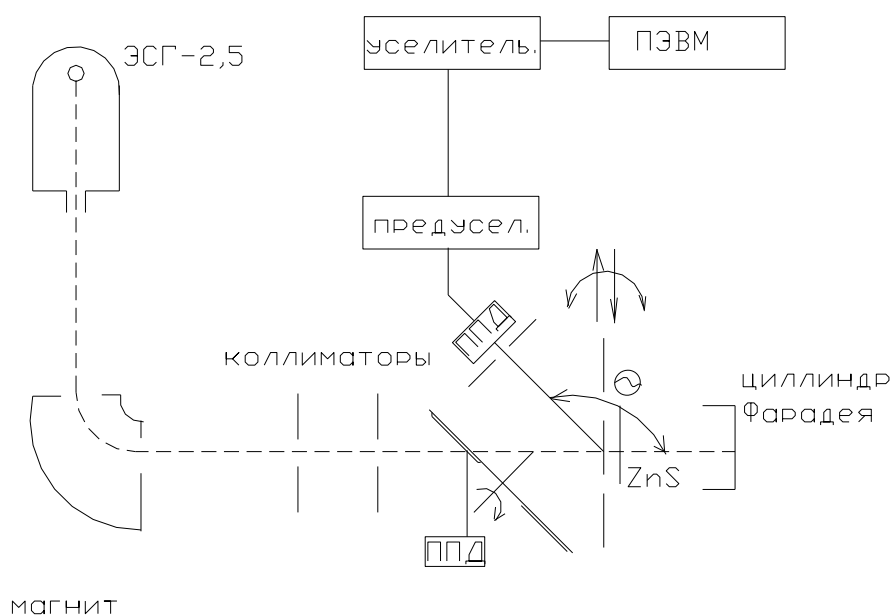


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки метода РОР

Эксперимент заключался в облучении образцов УВ ионами гелия с одновременной регистрацией упругорассеянных частиц энергетическим спектрометром. Энергия и интенсивность рассеянных частиц несут количественную информацию об элементном составе пленок и глубине залегания примесей.

На рисунке – 6 представлена блок-схема спектрометрического тракта с ППД.

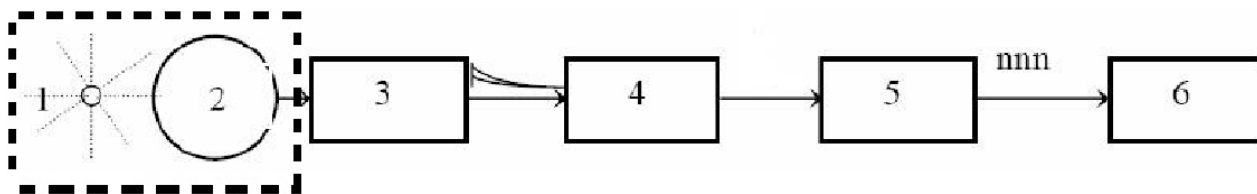


Рисунок 6 – Блок-схема спектрометрического тракта (штриховкой отмечена вакуумная камера)

где 1 – источник α -излучения, 2 – ППД, 3 - предварительный усилитель (предусилитель – для преобразования величины заряда в пропорциональную амплитуду напряжения), 4 - усилитель (для формирования сигналов по длительности и подавления шумов), 5 - амплитудно-цифровой преобразователь, 6 – компьютер.

2.2. Спектрометрический тракт с ППД

Главной составляющей спектрометрического тракта является полупроводниковый детектор (ППД). Для эксперимента важно подобрать ППД с хорошими характеристиками.

Исследовались характеристики (ВАХ детектора, толщину чувствительной зоны ППД, ёмкость перехода ППД и энергетическое разрешение ППД) трёх поверхностно-барьерных детекторов (№244, № 246, №242).

Для определения характеристик детектора была использована следующая установка: использовалась небольшая вакуумная камера, в гнезде которой располагался детектор, а α -источник находился на держателе, который свободно вертикально перемещался, и расстояние от источника до детектора можно было менять. В камере откачивался вакуум (10^{-1} мм рт.ст. = 13,33 Па), сигнал детектора через определенный кабель с разъёмом поступал на предварительный усилитель, затем с предварительного усилителя сигнал на

усилитель, и на АЦП и персональный компьютер. На рисунке – 7 представлена вакуумная камера с полупроводниковым детектором.

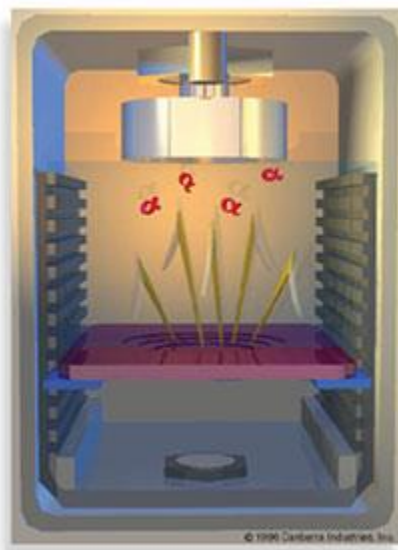


Рисунок 7 - Вакуумная камера α –спектрометра с полупроводниковым детектором

На детектор от специализированного источника напряжения СА-01 подавалось напряжение, которое контролировалось вольтметром, встроенным в прибор. Там же в панели прибора находился и амперметр для измерения тока детектора. На рисунке – 8 изображена измеренная ВАХ детекторов.

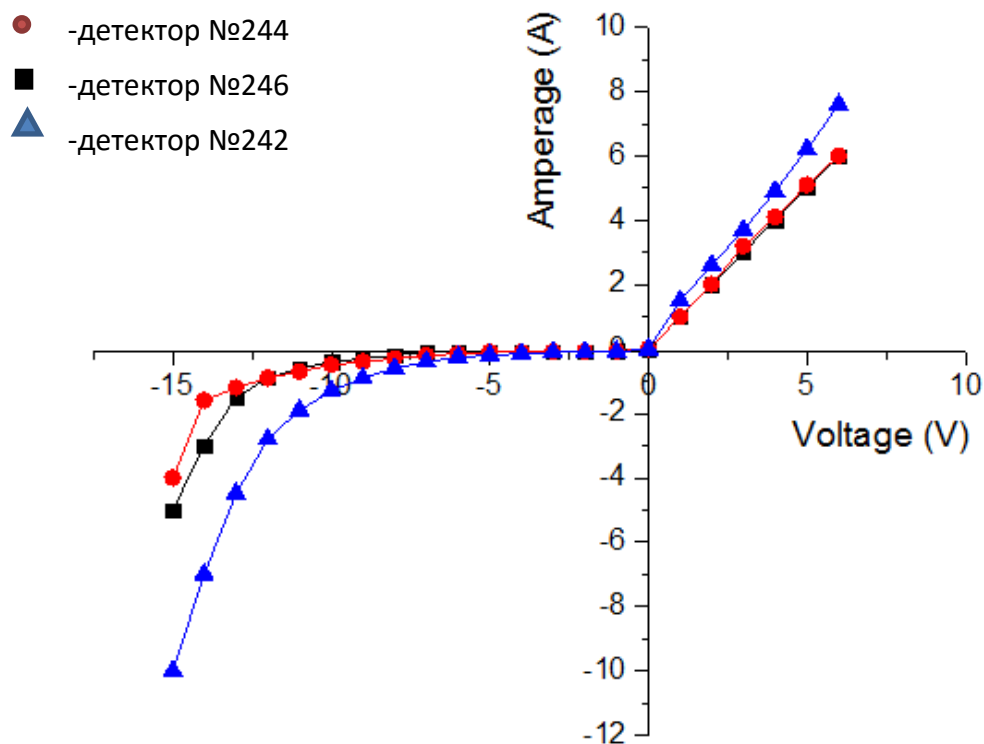


Рисунок 8 – ВАХ детекторов

Детектор для регистрации напряжения работает в схеме при обратном включении, т.е. обратная ветка ВАХ является основной. Из рисунка следует, что все исследуемые детекторы приблизительно имеют одинаковые токи, за исключением детектора №242, у которого при напряжении уже 10 В ток резко увеличивается. Для того, чтобы достоверно регистрировать энергетический спектр необходимо, чтобы ток детектора был минимален, так как при токе больше 0,5 мкА, уровень шума детектора может превысить уровень сигнала.

Далее путём расчета по формулам (7) и (8) были определены толщины чувствительной области и ёмкость перехода детекторов (№244, №246, №242). Результаты представлены в таблице – 1.

Таблица 1 – Расчетные толщины чувствительных областей и ёмкости перехода детекторов.

Напряже- -ние, В	w_1 , см	w_2 , см	w_3 , см	$C_{П1}$, ф	$C_{П2}$, ф	$C_{П3}$, ф

1	0,00118 5	0,00075	0,00129823	0,19871 5	0,31419 6	0,18140 1
2	0,00167 6	0,00106	0,00183597 4	0,14051 3	0,22217	0,12827
5	0,00265	0,00167 6	0,00290293	0,08886 8	0,14051 3	0,08112 5
10	0,00374 8	0,00237	0,00410536 2	0,06283 9	0,09935 7	0,05736 4
15	0,00459	0,00290 3	0,00502802 1	0,05130 8	0,08112 5	0,04683 8

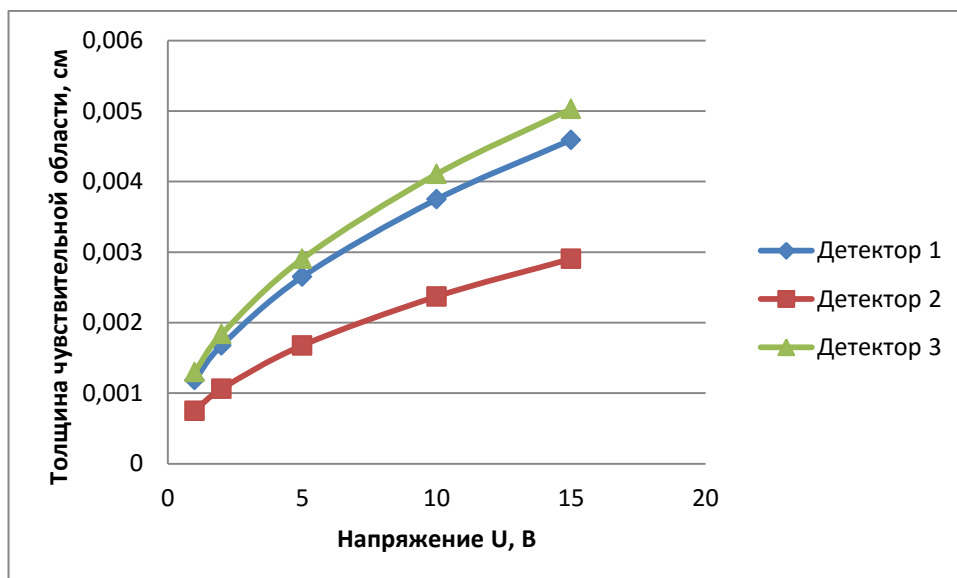


Рисунок 9 – Зависимость чувствительной области детектора от напряжения смещения

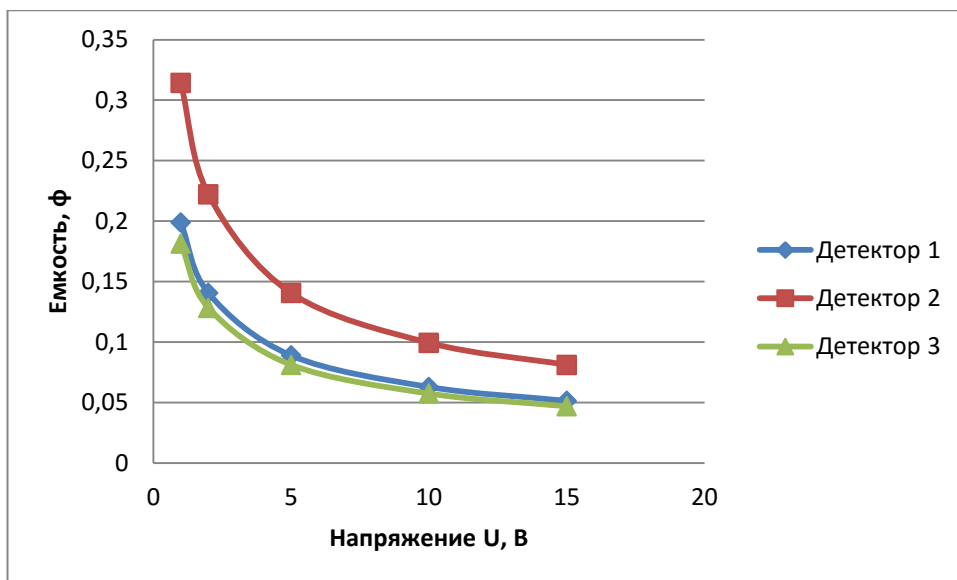


Рисунок 10 – Зависимость ёмкости перехода детектора от напряжения смещения

По результатам измерений характеристик заметно, что при увеличении напряжения смещения такие характеристики детектора, как толщина чувствительной области детектора и ёмкость перехода детектора улучшаются.

Также с помощью спектрометра был получен энергетический спектр детектора №4 (α -источник – ^{226}Ra), представленный на рисунке - 11.

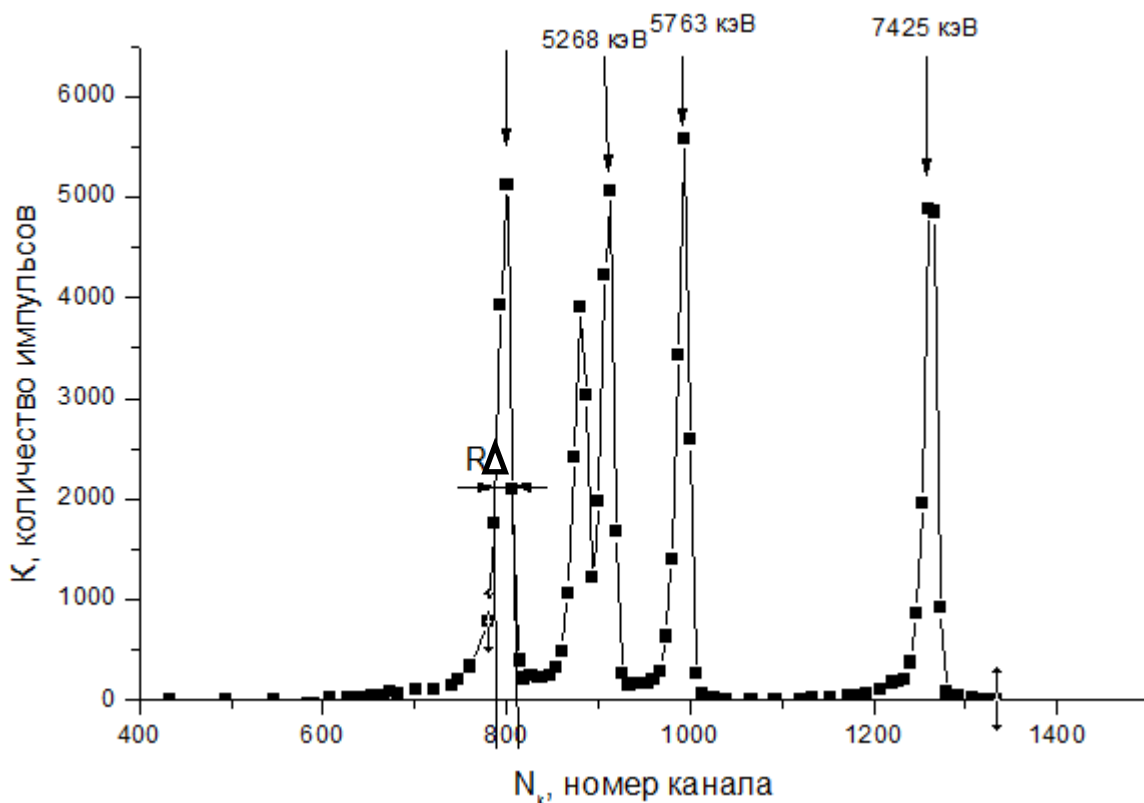


Рисунок 11 – Энергетический спектр для детектора №4

Энергетическое разрешение определялось из спектра альфа-частиц. Таким образом, проводилась энергетическая калибровка шкалы анализатора. Зная энергию пиков α -источника и зная номера каналов между пиками проводился расчет δE (ширина канала в энергетических единицах). Следуя из функции отклика детектора, энергетическое разрешение ППД соответствует ширине на полувысоте энергетического пика,

Разрешение детектора составило 18 кэВ при напряжении смещения 50 В.

2.3. Получение энергетических спектров обратного рассеяния для эталонного образца и определение его элементного состава

Экспериментальные исследования проведены с использованием ионов ${}^4\text{He}$ с энергией 1,6 МэВ, ускоренных электростатическим генератором ЭСГ-2,5.

Исследуемые образцы помещались в камеру рассеяния с вакуумом, в которую выводился исследуемый пучок ионов гелия. Энергетическое разрешение спектрометрического тракта с полупроводниковым детектором составляло ≈ 20 КэВ. Энергетический спектр ионов гелия, рассеянных от исследуемого образца регистрировался с помощью анализатора импульсов, схема которого представлена на рисунке-1.

Информация о распределении элементов в образце извлекалась из аппаратурных спектров, представляющих собой энергетические спектры обратно рассеянных ионов гелия –4, накопленных за определенное время.

Экспериментальным путем был получен энергетический спектр от образца эталонной мишени, представленный на рисунке - 12.

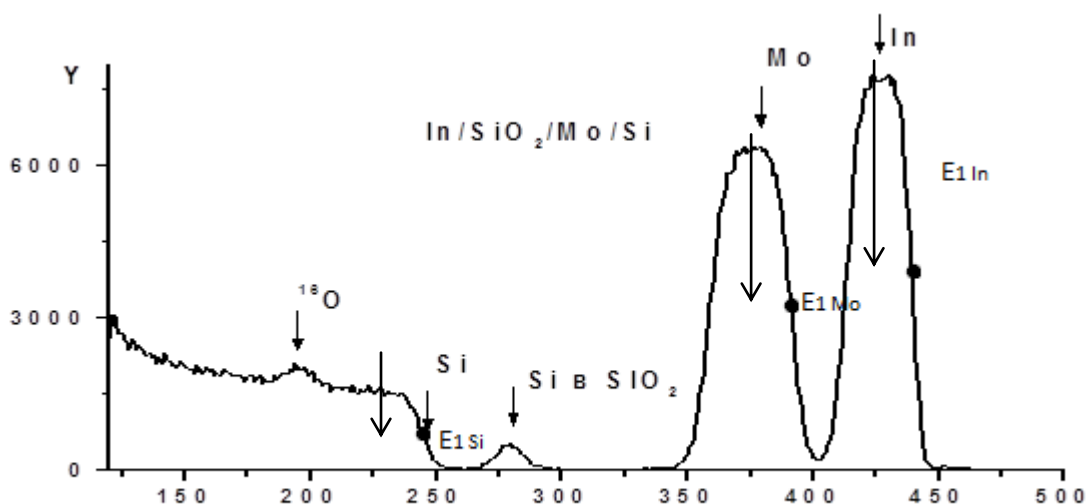


Рисунок 12 - Энергетический спектр от эталонной мишени

Так как шкала анализатора была откалибрована с помощью альфа-источника и было определено значение энергии, приходящейся на канал шкалы анализатора δE (кэВ/канал), из энергетического спектра мы определили элементный состав данного образца. Для этого определялась E_1 (энергия регистрации).

По формуле (5) вычисляли E_1 , и зная E_0 и E_1 , вычисляли кинематический фактор k по формуле (6). Результаты вычислений представлены в таблице – 2.

Таблица 2 – Кинематические факторы.

Элемент	O	Si	Mo	In
k	0,36589	0,56875	0,84862	0,87185

Предположительно, эталонная мишень имеет следующий состав: O, Si, Mo и In.

Рассчитали кинематический фактор для данных элементов по формуле (9) и он совпал с кинематическими факторами, найденным по энергетическому спектру. Кинематические факторы элементов эталонной мишени, представлены в таблице – 2. Кинематические факторы сравнились с табличными значениями, опубликованными в справочнике.

2.4. Определение профиля концентрации кислорода в УВ методом ROP

Для проведения эксперимента были тщательно подобраны условия его проведения. Так как УВ (углеродные волокна) с имплантированным кислородом очень тонкие (порядка 100 мкм), попасть пучком ионов гелия достаточно сложно. Для этого углеродные волокна собрали в небольшой пучок, для того чтобы площадь исследуемой поверхности углерода была приблизительно 1 мм. Так как этот пучок углеродных волокон было необходимо закрепить на линейке из Al, которая в процессе эксперимента была подведена к пучку, выведенному в камеру рассеяния, в энергетическом спектре был бы виден энергетический пик от Al. Поскольку углерод значительно легче алюминия, то в энергетическом спектре (рисунок - 13) пик углерода определить было бы трудно.

Поэтому подложка, на которую крепились УВ должна быть легче по массе, чем углерод. С помощью программы SIMNRA было проведено моделирование рассеяния ионов гелия с $E_0=1,6$ МэВ от УВ с имплантированным кислородом, закрепленных на разных подложках.

Симулированные энергетические спектры представлены ниже.

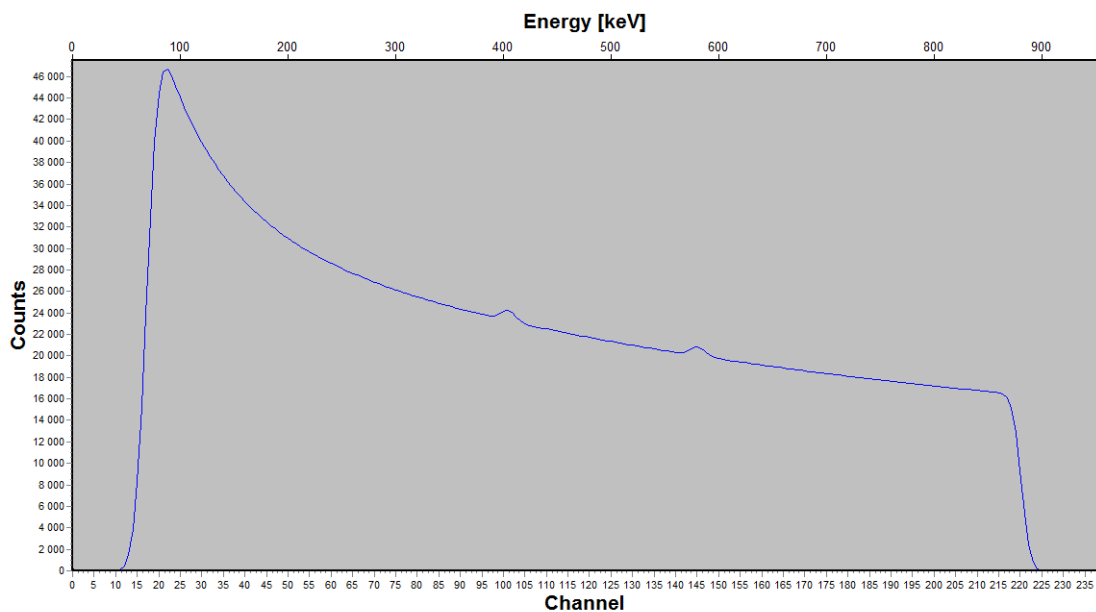


Рисунок 13 – Модельный энергетический спектр (C-O/Al).

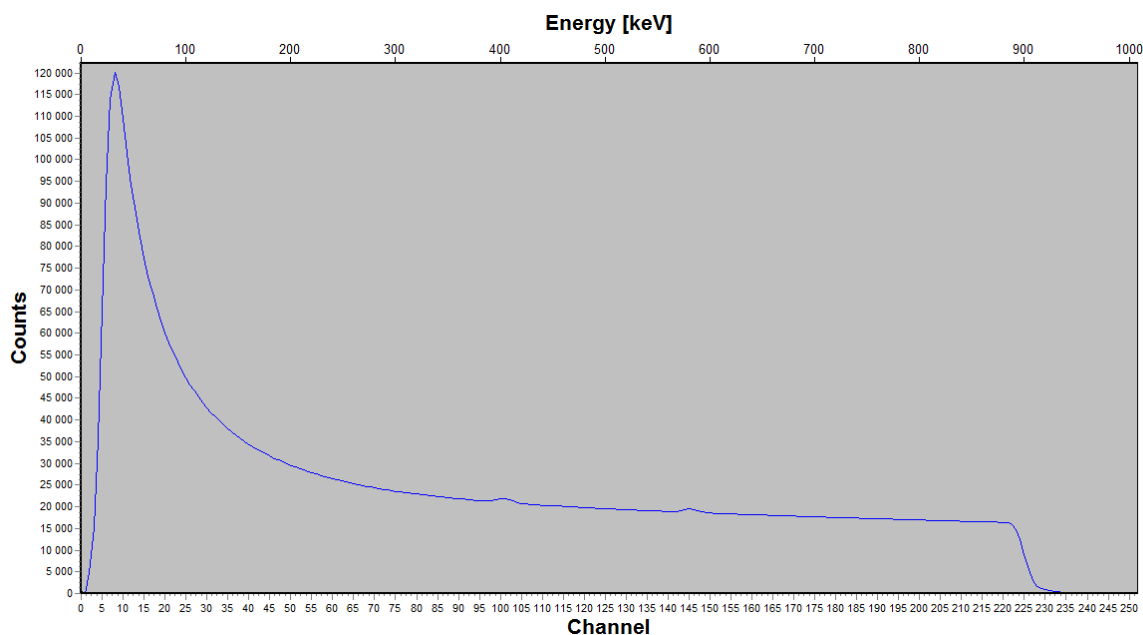


Рисунок 14 – Модельный энергетический спектр (C-O/Si)

Как видно из модельных энергетических спектров, пики кислорода на подложках из Al и Si трудно будет идентифицировать, так как выход рассеяния от подложки большой, и на его фоне пик кислорода невозможно с достоверностью определить. Существует условие, что выход рассеяния N не должен превышать $3\sqrt{N_{\Phi}}$, где N_{Φ} – уровень фона на энергетическом спектре. Следовательно, нам нужно выбрать такую подложку, энергетический спектр от которой будет расположен левее на энергетической шкале, чем пик

кислорода и углерода. Наиболее подходящим элементом для подложки, исходя из наших модельных расчетов, является Ве. Модельный энергетический спектр для УВ на подложке из Ве представлен на рисунке - 15.

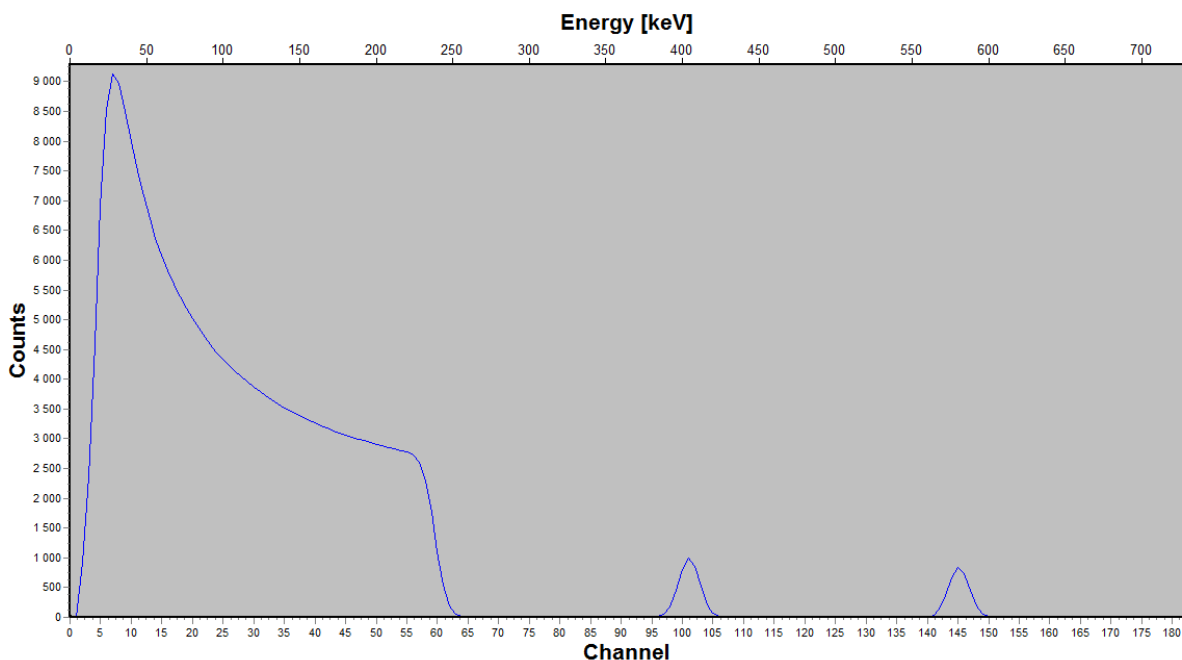


Рисунок 15 – Модельный энергетический спектр (C-O/Ве)

Из рисунка видно, что все пики на энергетической шкале четко разделяются и, следовательно, при экспериментальном исследовании можно будет определить не только элементный состав, но и количественное значение имплантируемой примеси.

Методом POP определяли профили концентрации кислорода в углеродных волокнах.

На рисунке – 15 представлен энергетический спектр альфа-частиц, рассеянных от Ве. Необходимо было выбрать бериллий, у которого собственных примесей очень мало. Оказалось, что эта задача не совсем простая, поскольку чистого бериллия практически нет, а в Ве-пленках, как

правило, присутствуют легкие примеси: углерод, кислород. Однако, в результате исследований удалось подобрать нужную подложку.

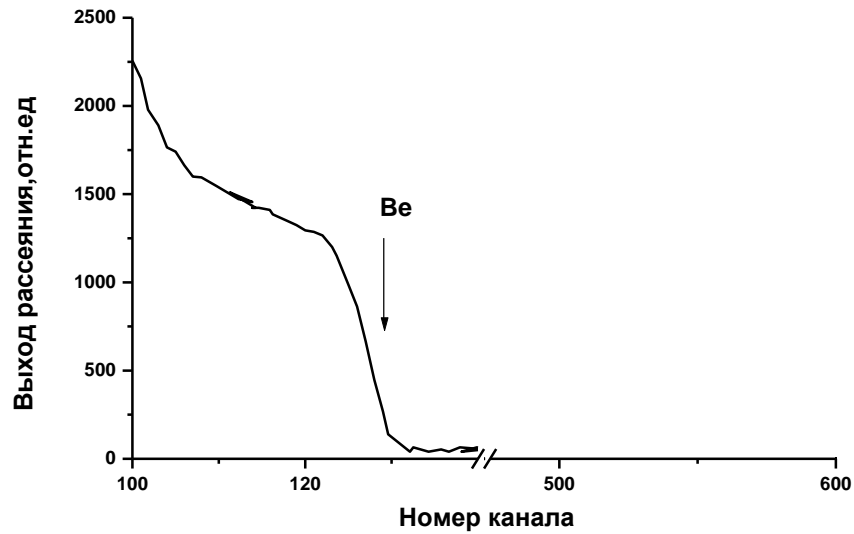


Рисунок 16 - Энергетический спектр альфа-частиц, рассеянных от Ве-подложки.

Углеродное волокно крепилось на подложке из Ве и помещалась в камеру рассеяния для исследования. На рисунке-17 представлен энергетический спектр альфа – частиц, рассеянных от исходного УВ, необлученного ионами.

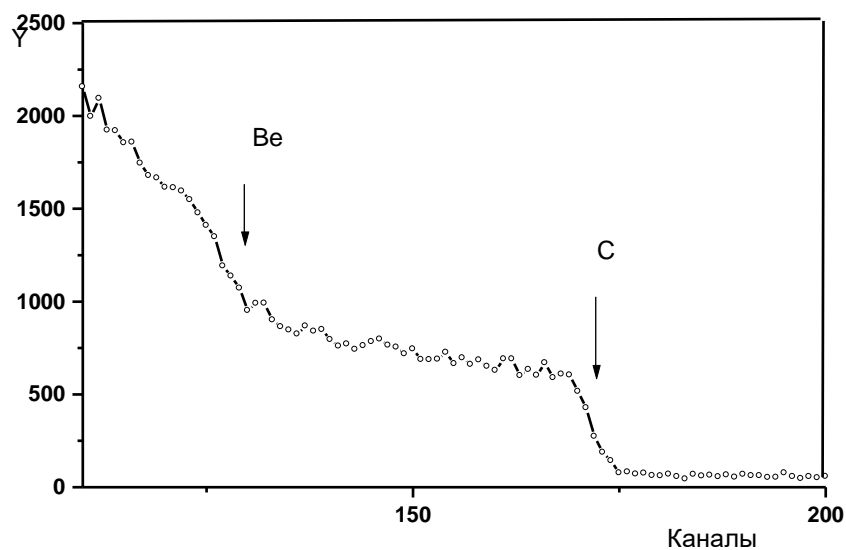


Рисунок 17 - Энергетический спектр от исходного УВ

На рисунке – 18 представлен энергетический спектр альфа – частиц, рассеянных от УВ, необлученного ионами кислорода.

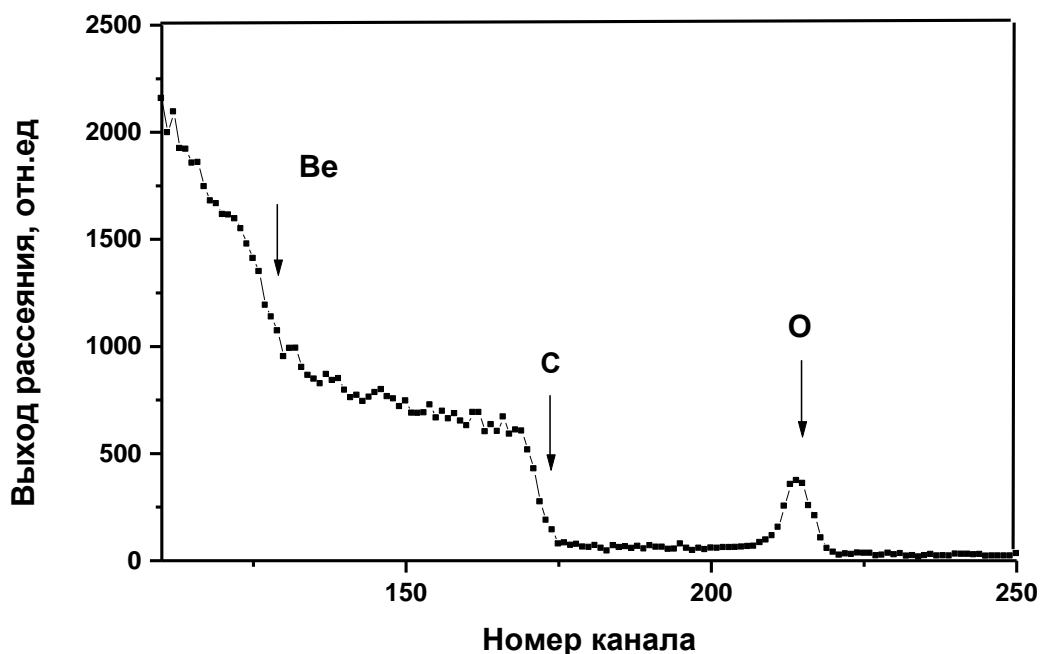


Рисунок 18 - Энергетический спектр ионов гелия-4, рассеянных от углеродного волокна, облученного ионами кислорода ^{16}O на подложке из Be.

Профиль концентрации кислорода в УВ извлекался из энергетического спектра. Метод, используемый для построения концентрационных профилей по спектрам РОР, - метод компьютерного моделирования. Для расчета применяли следующий подход. Образец условно разбивался на достаточно тонкие слои, в которых распределение элементов считалось однородным. По определенной математической модели рассчитывали спектр образца с заданной концентрацией элементов по слоям. Затем его сравнивали с экспериментальным. Концентрация элементов в слоях подбиралась до тех пор, пока не был подобран состав образца, теоретический спектр которого соответствовал экспериментальному.

Профиль концентрации кислорода в УВ представлен на рисунке – 19.

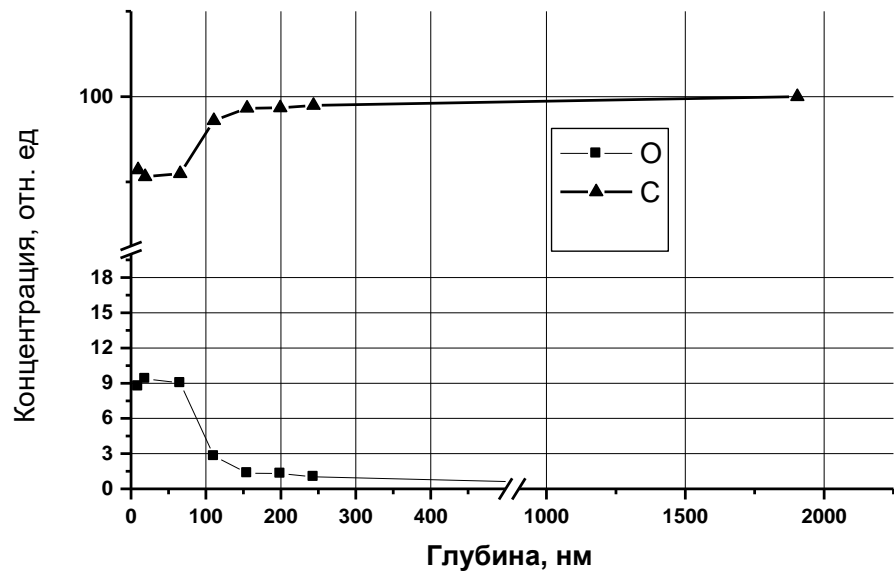


Рисунок 19 - Профиль концентрации приповерхностного слоя УВ при облучении его ионами кислорода

Из рисунка видно, что облучение углерода кислородом приводит к изменению стехиометрического состава приповерхностного слоя УВ. Поскольку углерод (УВ) - очень легкая подложка, энергетические спектры от других элементов, расположенных правее углерода на энергетической шкале, могут быть определены с высокой точностью. Таким образом, для элементного анализа УВ метод РОР подходит идеально.

Заключение и вывод

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы была исследована возможность применения метода Резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия для измерения профилей концентрации и распределения кислорода по глубине в углеродных волокнах при ионной имплантации кислорода. Эксперимент показал, что метод РОР приемлем для определения кислорода в углеродных волокнах.

В соответствии с целями данной работы были изучены физические основы метода РОР, исследованы параметры спектрометрического тракта.

Методом РОР был определен элементный состав эталонного образца и проведен эксперимент по определению профиля концентрации приповерхностного слоя УВ при облучении его ионами кислорода.