

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Балакшин Юрий Викторович

**Дефектообразование в объемных материалах и графене при ионном
облучении**

Специальность 01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Отделе физики атомного ядра Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

- | | |
|-----------------------|---|
| Научные руководители | – Черныш Владимир Савельевич,
доктор физико-математических наук, профессор |
| | – Шемухин Андрей Александрович,
кандидат физико-математических наук |
| Официальные оппоненты | – Бачурин Владимир Иванович –
доктор физико-математических наук, доцент;
Ярославский Филиал ФГБУН «Физико-
технологический институт имени К.А. Валиева»
РАН, старший научный сотрудник |
| | Борисов Анатолий Михайлович –
доктор физико-математических наук, профессор;
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт»,
профессор |
| | Шведун В.В. Василий Иванович –
доктор физико-математических наук, профессор;
НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына МГУ имени
М.В. Ломоносова, Отдел электромагнитных
процессов и взаимодействия атомных ядер,
главный научный сотрудник |

Защита диссертации состоится 26 ноября 2021 года в 17-00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы 1, строение 5 (19 корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться, перейдя на страницу диссертационного совета по ссылкам: <https://istina.msu.ru/dissertations/401010038/>

<https://www.msu.ru/science/dis-sov-msu.html>

Автореферат разослан "___" 2021 г.

Телефон совета для справок: +7 916 8717750

E-mail: galan_lidiya@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

Начиная со второй половины 20-го века наблюдается резкий скачек развития ускорительной техники и ее применения в фундаментальных и прикладных исследованиях. Разработка оборудования для получения высокого вакуума, появление новых типов источников заряженных частиц, совершенствование и появление новых методов ускорения частиц и методов регистрации способствовали росту числа экспериментальных и теоретических работ посвященных ускорительной тематике. Важную роль сыграло бурное развитие полупроводниковой технологии, где требовалась прецизионная точность легирования по концентрации и глубине, недоступная при применении термодиффузионных методик. Методы, основанные на рассеянии ускоренных частиц на атомах мишени, распылении мишени под действием облучения нашли широкое применение в области анализа состава, толщин и структуры изучаемых объектов. Сглаживание шероховатости, как и формирование рельефа поверхности, изменение спектров поглощения света, создание заглубленных кластеров способных излучать на определенной длине волны, изменение механических свойств материалов, ионно-ассистированное осаждение тонких пленок, как и множество других прикладных направлений активно развивались по мере развития ускорительной тематики. Развитие технологий и миниатюризация объектов микро- и нанoeлектроники тесно связаны с развитием методов ионной имплантации, распыления и формирования рельефа поверхности, ионно-пучковых методов анализа, которые основаны на теоретических и экспериментальных исследованиях взаимодействия ускоренных частиц с веществом [1,2]. Важным аспектом создания и модификации материалов под действием облучения является процесс дефектообразования. Исторически сложилось так, что образование дефектов при облучении рассматривалось в негативном ключе, что было связано с решаемыми задачами по легированию кристаллических полупроводниковых материалов. В случае ядерной энергетики, до сих пор изучается вопрос разрушения конструкционных материалов стенок реакторов под действием потока нейтронов и других продуктов распада. Ведутся исследования в области создания радиационноустойчивых приборов, применяемых в условиях космических излучений. Отдельное внимание уделяется влиянию облучения различными видами излучений на живые организмы, приводящее к разрушению химических связей молекул [3,4]. Современные теоретические модели дефектообразования в твердом теле берут начало в работах Кинчина-Пиза [5], развитие этих идей позволило описать процесс накопления дефектов в объемных материалах на основе применения функции дефектообразования, описывающей вероятность создания простейшего дефекта и его рекомбинации [6]. С развитием вычислительных мощностей широкое применение получили методы компьютерного моделирования процессов взаимодействия ускоренных частиц с веществом. На сегодняшний день наиболее распространены аналитические подходы, основанные на статистическом методе Монте-Карло для бинарных соударений [7], методах молекулярной динамики, теории функционала плотности [8]. Открытие и техническая возможность производства наноструктур на основе углерода, таких как графен, углеродные нанотрубки и фуллерены обозначило новый этап развития нанoeлектроники, сенсорики, технологий биомедицины, методов создания композитов и покрытий. Высокий технологический потенциал наноструктур на основе углерода обуславливает интерес к этим объектам с точки зрения возможности модификации их свойств [9]. Ионное облучение в данном случае является хорошо контролируемым инструментом для модификации свойств облучаемых наноструктур за счет образования дефектов упаковки атомов. Однако, в сравнении с объемными материалами, область взаимодействия ускоренных заряженных частиц с наноструктурированными материалами изучена недостаточно подробно. Структура мишеней, анизотропия их свойств, неприменимость некоторых методов анализа

усложняют задачу интерпретации экспериментальных результатов. При этом применяемые методы компьютерного моделирования, в частности расчеты методами молекулярной динамики, требуют серьезных временных и мощностных ресурсов даже для расчета малых областей облучаемой мишени при малых количествах падающих частиц [10].

Задача описания процессов дефектообразования под действием ионного облучения в углеродных наноструктурах, в частности в графене актуальна на сегодняшний день. Имеется значительное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных взаимодействию различных типов излучений с наноструктурированными материалами в широком диапазоне энергий, однако эти работы не предоставляют универсального метода оценки разрушения структуры наноматериалов для различных параметров облучения. По аналогии с моделью дефектообразования в объемных материалах, применительно к наноструктурам необходимо разработать универсальную модель, позволяющую описывать этапы разрушения под действием ионного пучка и учитывающую разные типы ионов, энергию облучения и флюенс.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное, в сочетании с компьютерным моделированием, изучение механизмов дефектообразования в наноструктурированных мишенях, в частности в графене, и описание разрушения структуры графена на основе методов, применяемых для массивных кристаллических мишеней для повышения эффективности применяемых процессов обработки наноструктурированных материалов ионными пучками для управляемой модификации их свойств.

В работе были решены следующие задачи:

- Спроектирован и введен в эксплуатацию экспериментальный тракт, позволяющий проводить ионное облучение и исследование состава и структуры мишеней ионно-пучковыми методами без нарушения условий вакуума.
- Исследована разрешающая способность спектрометрического тракта с применением каналов альфа-распада Pu^{239} в сочетании с обратным рассеянием налетающих ионов.
- Разработана система мониторинга флюенса анализирующего ионного пучка при исследовании состава и структуры различных мишеней методами резерфордовского обратного рассеяния.
- Механизму дефектообразования под действием ионного облучения в объемной кристаллической кремниевой мишени сопоставлены экспериментальные данные по резерфордовскому обратному рассеянию и комбинационному рассеянию света.
- На основании спектров комбинационного рассеяния света был продемонстрирован механизм дефектообразования под действием ионного облучения в графене.
- Механизм дефектообразования в графене был описан с применением методов, разработанных для массивных мишеней.

Объект и предмет исследования

В представленной работе объектом исследования является влияние ионного облучения на разрушение упорядоченной структуры мишени, а в качестве предмета исследования рассматривались механизмы дефектообразования в графене под действием облучения ускоренными ионами гелия и аргона при разных энергиях и флюенсах.

Методология исследования

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены в рамках экспериментальных исследований в сочетании с моделированием методами бинарных атомных столкновений.

Ионное облучение проводилось на введенном в эксплуатацию экспериментальном тракте ускорительного комплекса HVEE-500. Анализ состава и структуры кремниевых мишеней до и после облучения проводился методами резерфордовского обратного рассеяния в сочетании с каналированием. Разрешающая способность измерительной аппаратуры в основе которой лежит кремниевый детектор барьерного типа изучалась с помощью каналов альфа-распада Pu^{239} в сочетании с моделированием экспериментальных спектров обратнорассеянных ионов в программном пакете SIMNRA (computer simulation of RBS, ERDA, NRA, MEIS and PIGE). Также динамика разрушения структуры образцов изучалась методами комбинационного рассеяния света. Моделирование пробегов внедренных ионов проводилось в программном пакете SRIM 2013 (The Stopping and Range of Ions in Matter) с применением кулоновского ион-атомного потенциала взаимодействия Циглера-Биршака-Литтмарка, а также с применением программы MARLOWE с применением кулоновского ион-атомного потенциала Мольера. В обоих случаях расчет проводился в приближении парных соударений статистическим методом Монте-Карло. Расчет количества образованных в процессе облучения графена дефектов проводился с применением программного пакета SRIM 2013, в качестве модели дефектообразования был принят механизм Норкетта-Робинсона-Торренса в основе которого лежат работы Кинчина-Пиза.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы состоит в систематическом экспериментальном исследовании влияния различных параметров ионного облучения (масса ионов, энергия и флюенс) на процесс образования дефектов в графене, которое сопровождалось компьютерным моделированием процессов дефектообразования. Для описания дефектообразования в графене был применен метод оценки количества образуемых под действием ионного облучения дефектов на основе модели Норкетта-Робинсона-Торренса с моделированием бинарных столкновений методом Монте-Карло. В диссертационной работе был предложен механизм разрушения структуры графена на основе понятия «смещение на атом» универсального для различных типов ионов, энергий ионов и флюенса облучения.

Впервые было показано, что, применяя методы расчета дефектообразования в объемных материалах, возможно поэтапно описать механизм дефектообразования в наноструктурированных материалах, в частности в графене.

Положения, выносимые на защиту

1. При облучении кремния ионами Fe^+ и Xe^+ с энергией 2,3 кэВ/нуклон и выше средние проективные пробеги и профиль радиационных дефектов хорошо согласуются с теоретическими значениями и моделью Норкетта-Робинсона-Торренса. При уменьшении энергии ионов Fe^+ и Xe^+ до 1,6 кэВ/нуклон и менее, расхождение экспериментальных значений с теоретическими может превышать 50 процентов.
2. Зарядовое состояние ионов ксенона оказывает влияние на распределение внедряемой примеси по глубине. Для ионов в зарядовых состояниях 12+, 14+, 15+, 20+ с энергией 200-350 кэВ средний проективный пробег находится на 10-20 нм ближе к поверхности чем у однозарядных ионов. При этом для зарядовых состояний 12+, 14+, 15+, 20+ профиль распределения ксенона на половине высоты шире на 15-30 нм.
3. Значение величины DPA (число смещений на атом), соответствующее разрушению структуры, различается при переходе от массивных образцов к наноразмерным мишеням: для массивных образцов флюенс разупорядочения превышает 0.5 DPA, а для графена флюенс разупорядочения составляет 10^{-2} DPA.
4. Дефектообразование в графене проходит в 3 стадии: I – накопление точечных дефектов, II – объединение точечных дефектов в кластеры, III – разрушение структуры.

Теоретическая и практическая значимость

Введенная в эксплуатацию линия ионной имплантации и спектрометрии резерфордовского обратного рассеяния и ядер отдачи позволяет модифицировать ионными пучками мишени и проводить исследования состава и структуры мишеней без нарушения условий вакуума. Достижимая в экспериментальном тракте расходимость пучка, позволяет исследовать кристаллические структуры с применением эффекта каналирования с разрешением по углу 0.12 градуса.

Представленный механизм дефектообразования под действием ионного облучения в графене позволяет проводить оценку степени разрушения, а также демонстрирует этапы дефектообразования для различных параметров облучения. Понимание механизмов разрушения структуры графена под действием ионного облучения и последующее пассивирование оборванных углеродных связей позволит модифицировать электрические, оптические и механические свойства углеродных наноструктур.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов определяется тем, что в работе использовались современные методики анализа с высоким разрешением по глубине и элементному составу, молекулярному строению вещества. Полученные результаты диссертационной работы согласуются с опубликованными экспериментальными и теоретическими работами по тематике диссертации в тех случаях, когда такие данные имеются.

Личный вклад автора

Постановка задачи, проведение экспериментов по облучению мишеней, анализ и интерпретация результатов выполнены автором. При определяющем участии автора введена в эксплуатацию линия ионной имплантации и in-situ спектроскопии резерфордовского обратного рассеяния. Все эксперименты по облучению мишеней как при имплантации ионов, так и при исследованиях состава и структуры мишеней ионно-пучковыми методами проведены лично автором. Моделирование дефектообразования в облучаемых мишенях методами Монте-Карло в пределах модели Норкетта-Робинсона-Торренса проведены автором. Исследование мишеней методами комбинационного рассеяния света проведено при непосредственном участии автора. Подготовка публикаций и докладов выполнена лично автором, либо при его активном участии.

Апробация результатов

Основные результаты работы были представлены на различных российских и международных конференциях, включая 24th International Conference on Ion-Surface Interactions ISI (Москва, Россия, 2019), Международную конференцию по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, Россия, 2017, 2018, 2019), VII Всероссийскую конференцию и школу молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Нижний Новгород, Россия, 2018), Межвузовскую школу молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, Россия, 2016, 2018), 28th International Conference on Atomic Collisions in Solids» (Кан, Франция, 2018), 4th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2017» (Санкт-Петербург, Россия, 2017), XIV Курчатовскую междисциплинарную молодежную научную школу (Москва, Россия, 2016), 27th International Conference on Atomic Collisions in Solids» (Ланьчжоу, Китай, 2016), VIII Всероссийскую школу-семинар для студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» НАНОДИАГНОСТИКА-2015 (Рязань, Россия, 2015).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 8 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также зарегистрирован 1 патент РФ на полезную модель.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы. В первой главе представлен обзор литературы по теме диссертации, в частности рассматриваются вопросы взаимодействия налетающих ионов с атомами мишени, процессы дефектообразования и разрушения структуры мишеней. Во второй главе представлена информация о введенной в эксплуатацию экспериментальной линии и ее характеристики, описаны методы исследования, применяемые в диссертационной работе. В третьей главе представлены экспериментальные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

Общий объем диссертации 128 страниц, включая 56 рисунков, 5 таблиц и 44 формулы. Список литературы содержит 243 библиографических ссылки.

Содержание работы

Во **введении** представленной диссертационной работы описывается актуальность исследований по теме, описана степень разработанности выбранной темы. Также сформулированы цель работы и решенные в процессе ее выполнения задачи. Описаны предмет и объект исследования, методология проведения исследования. Описывается научная новизна работы и представляются положения, выносимые на защиту, практическая значимость и достоверность результатов работы, личный вклад автора, приведен список конференций, на которых проходило обсуждение основных результатов диссертационной работы.

В **первой главе** представлен литературный обзор, посвященный теме диссертационной работы. Рассматриваются потери энергии ускоренными частицами средних энергий (кэВ – МэВ) при прохождении через вещество, в частности потери энергии на электронное возбуждение и ионизацию, смещение атомов мишени из их равновесных положений. Рассматриваются результаты классических работ Н. Бора, квантовомеханический подход Бете и Блоха для получения выражений для потерь энергии при взаимодействии электронов налетающего иона и атомов мишени. В области энергий, наиболее часто применяемой при ионной имплантации основными механизмами потерь энергии налетающей частицей, являются неупругие соударения с электронами и упругие соударения с ядрами атомов. Неупругие соударения с ядрами и упругие столкновения с электронами не играют заметной роли. Идеи упругих ядерных и неупругих электронных потерь были развиты в работах Линдхарда, Шарфа и Шиотта [11]. Получившаяся теоретическая модель (LSS, ЛШШ) описывает взаимодействие ионов с ядрами и электронной системой мишени как два независимых аддитивных процесса. Предполагается, что электронное торможение обусловлено возбуждением или удалением электронов из атомов, передача импульса в данном процессе мала в силу малой массы электрона. Ядерные потери энергии объясняются упругими соударениями с ядрами атомов мишени с передачей как энергии, так и импульса. Ядерные столкновения отклоняют налетающую частицу от первоначального направления распространения, при этом атомы мишени так же могут быть смещены с образованием дефектов упаковки атомов.

Радиационные дефекты изменяют физические характеристики мишени, в частности, сильно влияют на электрические свойства. Радиационные дефекты влияют на подвижность носителей заряда в полупроводниках, их время жизни, концентрацию носителей. Распределение по глубине радиационных дефектов в общем случае отличается

от распределения внедренных ионов. Ион останавливается на большей глубине, чем область максимальной передачи энергии атомам мишени. Поэтому максимум распределения дефектов смещен ближе к поверхности мишени. Теоретические исследования распределения дефектов были проведены в ряде работ Брайса, Зигмунда, Павлова, Тетельбаума, где применялись либо расчеты потерь энергии на единицу пути в столкновениях иона с ядром, либо расчет распределения вакансий.

Общепринятым механизмом образования дефектов в твердом теле под действием облучения в области рассматриваемых энергий рассматривается каскадный механизм столкновений. В упругих столкновениях, ион движущийся в кристалле, передает часть своей энергии атому мишени. Если переданной энергии достаточно, возможно смещение атома мишени из равновесного положения. Атомы мишени, смещенные в результате столкновения с ионами называются первично выбитыми атомами (ПВА). Если первично выбитый атом мишени приобретает достаточную кинетическую энергию, он может сместить другие атомы мишени в процессе своего торможения, которые, в свою очередь, могут стать причиной последующих смещений атомов из узлов кристаллической решетки. В результате столкновения иона с атомом мишени образуется каскад атомных смещений в веществе. Когда энергия смещенных атомов мишени становится меньше энергии образования смещенного атома E_d (для кремния энергия смещения составляет 14 эВ), развитие каскада останавливается. В результате развития каскада образуются вакансии и междоузельные атомы (пары Френкеля) [12]. Размер образованного дефекта при пороговой энергии смещения составляет несколько межатомных расстояний, при этом весь процесс смещения протекает за $\sim 10^{-13}$ с. Каскады атомных столкновений приводят к образованию разупорядоченных областей в кристаллической решетке, в основе чего лежит пространственное разделение образующихся в процессе облучения вакансий и междоузельных атомов. Можно разделить развитие разупорядоченной области на 3 стадии: каскад смещения (10^{-13} с); термализация области выделения энергии со скоплением в центре вакансий и смещение к периферии выбитых из узлов решетки атомов мишени (10^{-11} с); миграция точечных дефектов и их рекомбинация, образование дефектных кластеров. Принято считать крайние две стадии ответственными за образование аморфной фазы внутри разупорядоченных областей.

Моделирование методами молекулярной динамики демонстрирует линейный рост количества радиационно-стимулированных дефектов в полупроводниковых мишенях с ростом энергии налетающих ионов [13]. Облучение легкими ионами и ионами средних масс ($Ml < 20$, $20 < Mm < 60$), в случае малых флюенсов, приводит к образованию простых точечных дефектов. По мере образования точечных дефектов образуются разупорядоченные области. Структура разупорядоченной области представляет собой аморфное ядро с кристаллической периферийной оболочкой. Аморфные области появляются при перекрытии соседних разупорядоченных областей, при этом накопление аморфной фазы происходит не по линейному закону. В случае облучения тяжелыми ионами, наблюдается линейная зависимость накопления аморфной фазы от флюенса до сплошного аморфного слоя.

Переход в аморфное состояние может происходить по-разному: путем формирования аморфных областей в отдельных разупорядоченных областях, перекрытием соседних разупорядоченных областей; движением и накоплением вакансий или атомов вдоль областей локальной напряженности в кристалле. По любому из предложенных механизмов для аморфизации требуется пространственное разделение вакансий и междоузельных атомов. Для полупроводников характерна критическая температура мишени, при которой аморфизация не наблюдается при любых флюенсах облучения [14]. Данное явление объясняется повышенной миграцией дефектов и их рекомбинацией при высоких температурах.

Первые аналитические модели по оценке радиационного разрушения материалов были представлены во второй половине 20го века. В частности, в 1955 году Кинчин и Пиз

опубликовали основополагающую работу по расчету смещений атомов мишени из соображений передачи кинетической энергии выше некоего порога, соответствующего облучаемому материалу. Позднее, модель Кинчина-Пиза (КП) была уточнена при помощи компьютерного моделирования бинарных столкновений иона с атомами мишени в работах Норкетта, Робинсона и Торренса (НРТ). Моделирование показало, что при случайной последовательности соударений около 20% вакансий, образованных при смещении атомов, рекомбинируют. Модель НРТ позволяет оценить количество смещенных атомов (N_d) в зависимости от энергии каскада. Энергия дефектообразования для иона или атома отдачи рассчитывается как полная энергия иона за исключением энергии потерянной на взаимодействие с электронной системой. Энергия смещения зависит от материала мишени и находится в диапазоне 10-100 эВ. Для количественного описания дефектообразования под действием облучения с различными параметрами (масса, энергия ионов) применяется величина «смещение на атом» (DPA), описывающая количество смещенных атомов мишени на один падающий ион. Алгоритм расчета величины DPA следующий. С помощью функции распределения по глубине выделенной энергии в мишени рассчитывается количество дефектов и их распределение по глубине. Далее количество дефектов нормируется на атомную плотность мишени и количество упавших ионов. Величина DPA позволяет количественно сравнивать разрушение различных материалов при облучении одним типом излучения или одного материала при различных параметрах облучения в пределах, когда дефектообразование обусловлено смещением атомов в каскадах столкновений.

Далее в главе рассматриваются методы исследования процессов дефектообразования под действием облучения в наноструктурированных мишенях, в частности графене. Образование дефектов в наноструктурированных материалах по причине ограниченных размеров системы в одном или нескольких измерениях, отличается от образования дефектов в объемных материалах, что связано с рассеиванием энергии, вносимой налетающей частицей.

Во **второй главе** описываются подходы и методы посредством которых проводилось исследование, описываются изучаемые образцы – монокристаллический кремний, графен на медной подложке.

В ходе выполнения диссертационной работы был введен в эксплуатацию экспериментальный тракт, позволяющий проводить ионное облучение и изучать состав и структуру мишеней ионно-пучковыми методами [A1,A9]. Общий вид ускорительного комплекса на базе имплантера HVEE-500 и экспериментального тракта представлены на рисунках 1 и 2. Тракт позволяет проводить ионную имплантацию однозарядными ионами с массой от 1 до 250 атомных единиц массы с энергией до 500 кэВ, а также исследовать состав, профиль распределения примесей по глубине и совершенство кристаллической структуры мишеней с помощью методики резерфордовского обратного рассеяния (ROR) ионами H^+ или He^+ с энергией до 500 кэВ, либо ионами He^{++} с энергией до 1 МэВ. Экспериментальная линия состоит из ионопровода, экспериментальной камеры и спектрометрического тракта. Подробное описание экспериментального тракта представлено в тексте диссертации.

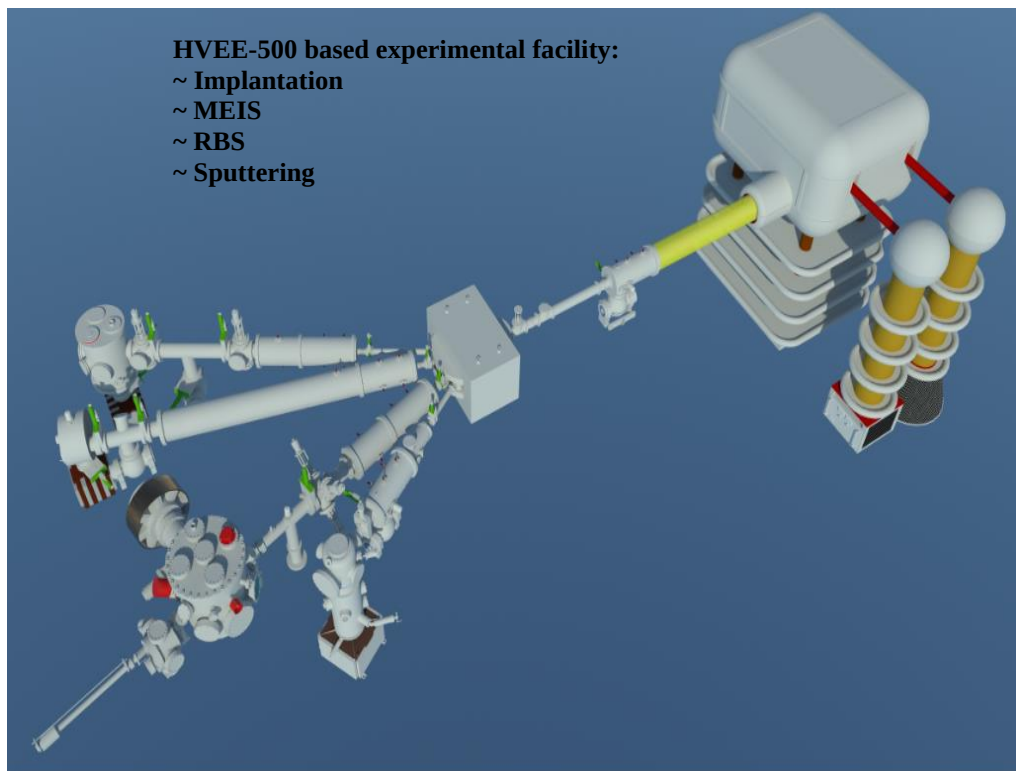


Рисунок 1. Общий вид ускорительного комплекса

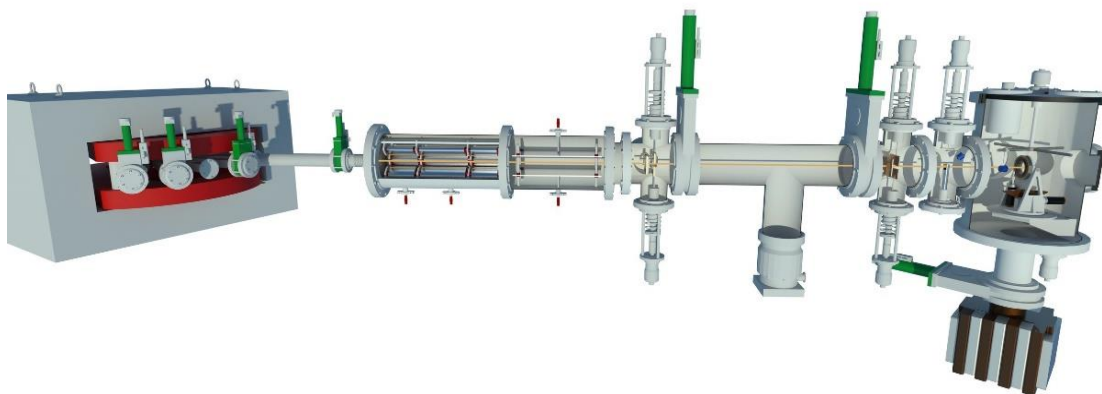


Рисунок 2. Экспериментальный тракт

Эксперименты по комбинационному рассеянию света (КРС) на изучаемых мишенях проводились на установке «Зондовая нанолaborатория ИНТЕГРА СПЕКТРА», позволяющей получать лазерный пучок с длиной волны 473 или 632 нм диаметром 1 мкм и мощностью до 7 мВт/см². Схема установки представлена на рисунке 3.

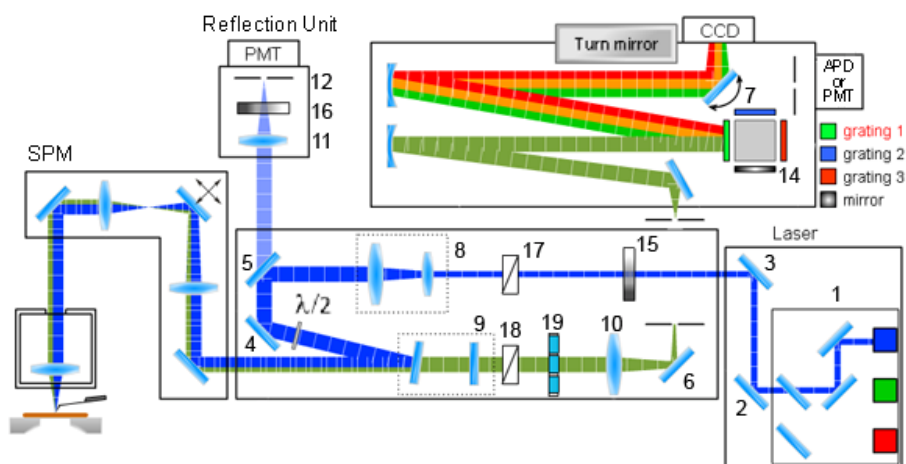


Рисунок 3. Схема установки КРС: 1 – блок ввода лазерного излучения; 2, 3, 4, 6, 7 – зеркала; 5 – 97%-е зеркало; 8 – расширитель пучка; 9 – три набора сменных целевых и режескторных фильтров; 10, 11 – объективы; 12, 13 – точечная диафрагма; 14 – дифракционные решетки

При облучении кремния различными типами ионов применялся монокристаллический кремний производства Virginia Semiconductor с ориентацией $\langle 110 \rangle \pm 0.9^\circ$ полученный методом Чохральского и легированный бором. Толщина пластин составляла 254 мкм. Также в работе использовались образцы графена, приготовленные на медной подложке методом химического газофазного осаждения. Фольга типа «M2» с содержанием меди 99.7% и толщиной 50 мкм предварительно подвергалась очистке поверхности путем промывания в дистиллированной воде, ультразвуковой очистке в ацетоне, изопропиловом спирте и последующей электрохимической полировке. Графен осаждался в CVD-реакторе GROW-2STECHLCC.

В третьей главе приводятся результаты, полученные в ходе экспериментальных работ и моделирования процессов облучения. В начале главы приведены результаты определения характеристик спектрометрического тракта [A2]. Для оценки энергетического разрешения измерительного тракта был использован радиоактивный препарат ^{239}Pu . Согласно теоретическим данным [15] в спектре ^{239}Pu должны быть различимы три пика: 5156.6 кэВ (вероятность 70.77%), 5144.3 кэВ (вероятность 17.11%), 5105.5 кэВ (вероятность 11.94%).

Препарат устанавливался в экспериментальную камеру на место образца и записывался спектр испускаемых им α -частиц, регистрируемых полупроводниковым детектором. На рисунке 4 представлен полученный спектр. Экспериментальный спектр от препарата был разложен на три пика в соответствии с их положением и амплитудой, что согласуется с теоретическими данными. Однако в данном случае метод позволил только грубо оценить разрешение методики. Итоговая оценка разрешения методики была сделана при моделировании в программе SIMNRA крутизны спада сигнала, полученного при рассеянии ионов гелия массивным монокристаллом кремния. Разрешение методики по энергии составило 15 кэВ. Для наглядности, область спектра по которой оценивалось разрешение при моделировании, указана на рисунке 5.

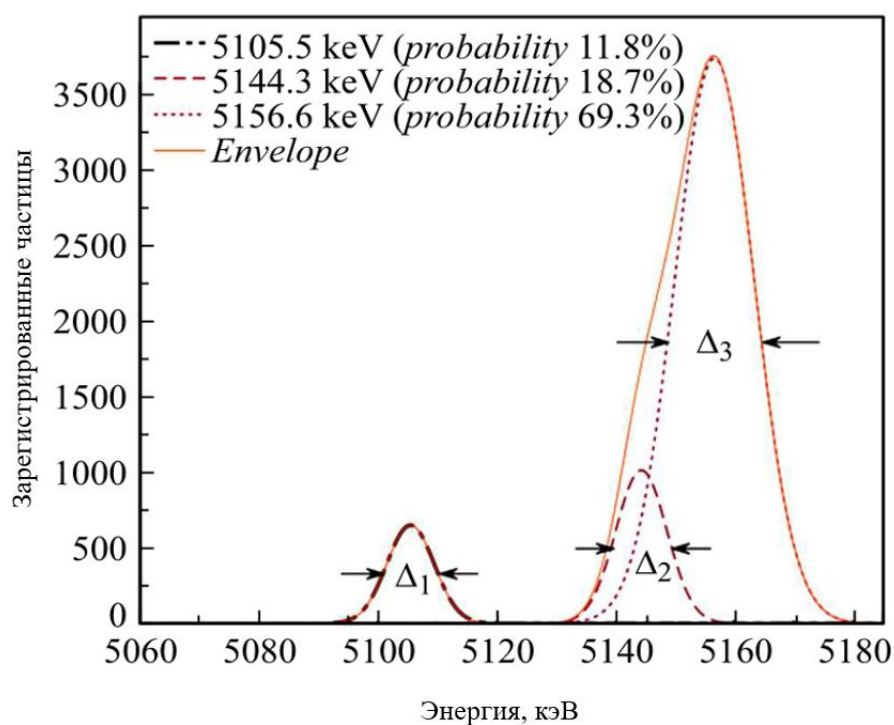


Рисунок 4. Спектр альфа-распада Pu^{239}

Было проведено облучение кремниевого монокристалла с ориентацией (110) ионами ксенона с энергией 100 кэВ и флюенсом 10^{14} ион/см². Облученный и необлученный образцы изучались методом РОР в сочетании с каналированием с применением в качестве анализирующих частиц ионов гелия He^+ с энергией 350 кэВ. Для разных точек облученной мишени спектры РОР регистрировались при разных флюенсах анализирующих частиц. На рисунке 6 представлены части спектра РОР соответствующие сигналу от примеси и атомов кремния. Согласно полученным результатам, экспериментальный тракт позволяет определять профиль распределения примеси по глубине с погрешностью на уровне нескольких процентов, при этом при флюенсе анализирующих частиц He^+ 10^{13} ион/см² вклад в разрушение структуры кристалла в процессе РОР анализа незначителен.

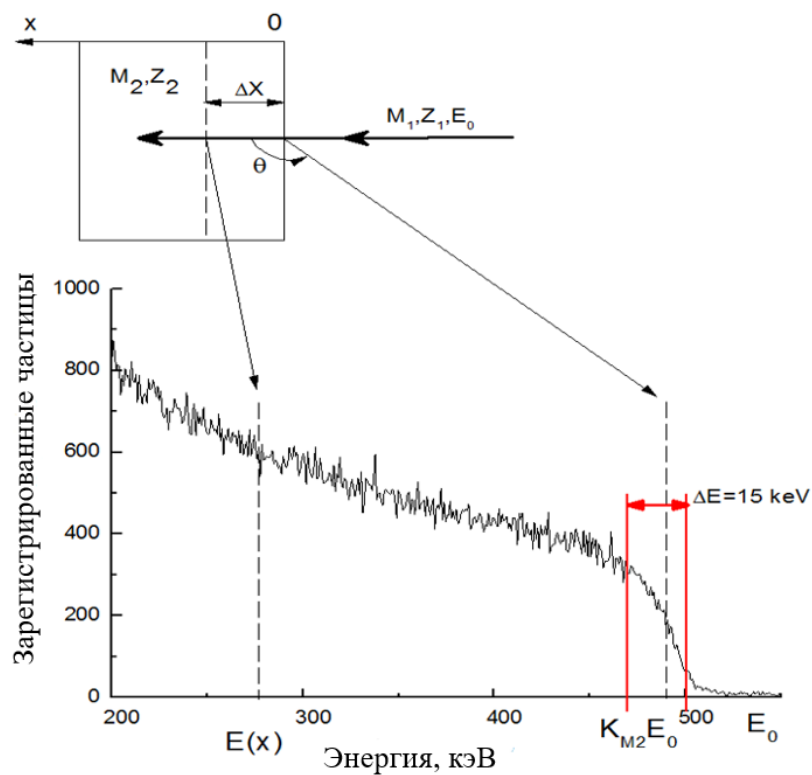


Рисунок 5. Спектр обратно рассеянных ионов He^{++} с начальной энергией 850 keV от кремниевой мишени

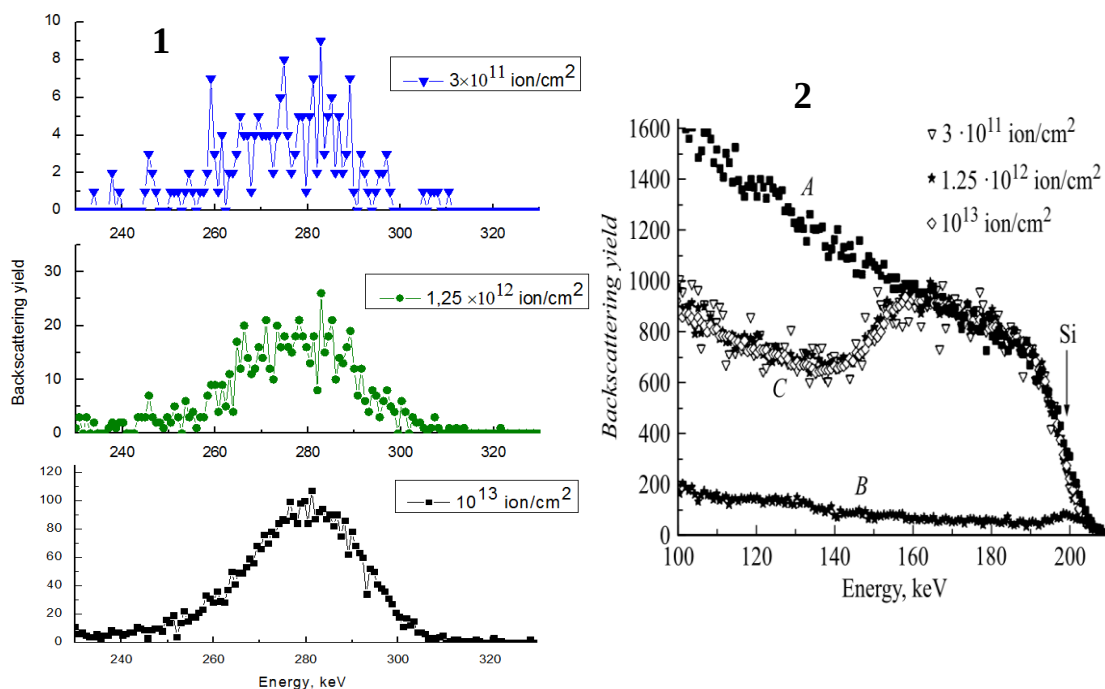


Рисунок 6. Сигнал POP от внедренных ионов ксенона - 1, кремниевой мишени - 2

Атомы кристаллической решетки вдоль основных кристаллографических направлений формируют каналы. Каждый из них ограничивается несколькими плотноупакованными атомными рядами. При совпадении направления распространения пучка с кристаллографическим направлением, ионы двигаются вдоль каналов испытывая малоугловое рассеяние и наблюдается эффект каналирования. Частица, которая попала в такой канал, может проникать значительно глубже, чем при движении в направлении, не содержащем открытых каналов. Это связано с тем, что такая частица при движении в канале испытывает только скользящие соударения с его стенками. Критический угол каналирования, то есть максимальный угол отклонения траектории частицы от кристаллографического направления в кристалле, при котором ещё возможно каналирование, определяется следующим образом:

$$\Psi_c = ((U(r_{\min}))/E)^{(1/2)},$$

где $U(r)$ – потенциал взаимодействия ускоренной частицы с цепочкой атомов, $r_{\min}$ – максимальное расстояние сближения налетающей частицы с атомом мишени при котором происходит упругое рассеяние, E – энергия пучка. Тогда характеристический угол каналирования можно рассчитать по формуле:

$$\Psi_c = (2 * Z_1 * Z_2 * e^2 / dE)^{(1/2)},$$

где d – расстояние между соседними атомами в цепочке, Z_1 и Z_2 атомные номера иона и атома мишени.

При облучении монокристалла кремния ионами гелия с энергией 350 кэВ теоретический критический угол каналирования Ψ_c для грани (110) с $d=3.84 \text{ \AA}$ составляет 1.4° . При исследовании образцов методом ROP, в направлении каналирования выход обратно рассеянных ионов резко уменьшается в результате того, что каналированные частицы не могут подойти достаточно близко к атомным ядрам и подвергнуться рассеянию на большой угол. Отношение величины этого выхода Y_1 к уровню сигнала, измеренному для углов больше критического Y_2 , т.е. в отсутствие каналирования, называют минимальным выходом $\chi_{\min}$. Чем меньше значение $\chi_{\min}$, тем выше упорядоченность в структуре образца. Зависимость выхода рассеянных частиц от угла является симметричной функцией с минимумом, ширина на половине высоты этого распределения соответствует величине $2\Psi_c$. Для экспериментального распределения на рисунке 7 эта величина составляет 2.7° , что находится в хорошем согласии с теоретическим значением.

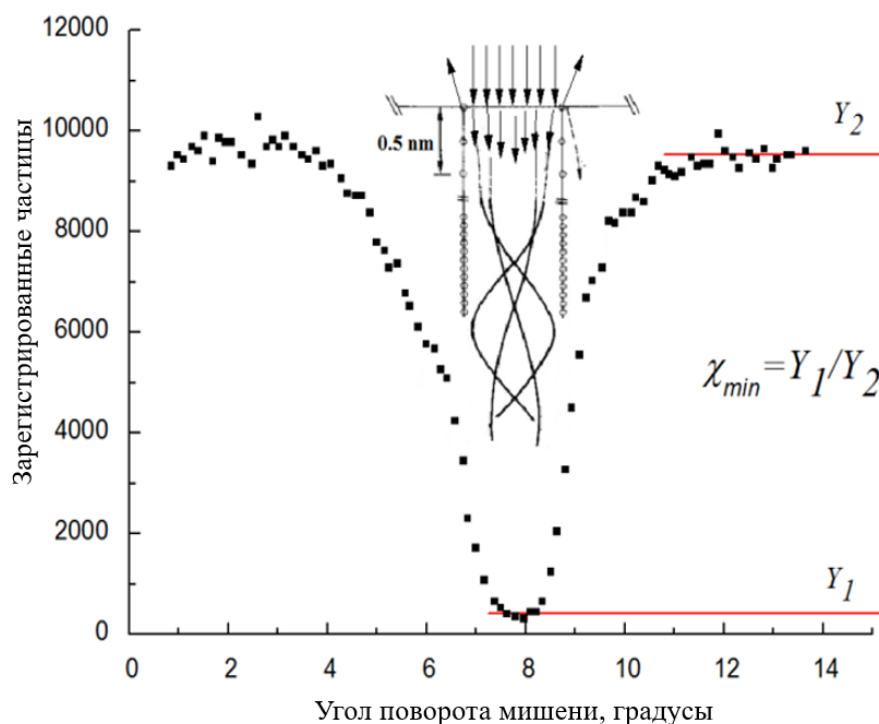


Рисунок 7. Зависимость интегрального выхода обратнорассеянных частиц от ориентации образца

Далее в главе приведены результаты исследования влияния параметров ионного облучения, в частности зарядового состояния ионов, на распределение по глубине внедренной примеси и радиационно-стимулированных дефектов [А3]. Для этого образцы монокристаллического кремния (110) были облучены ионами ксенона в зарядовых состояниях q от $1+$ до $20+$ с флюенсом $5 \cdot 10^{15}$ ион/см² в диапазоне энергий от 50 до 400 кэВ. Облучение проводилось в направлении, не совпадающем с кристаллографическими осями кристалла, во избежание эффекта каналирования в процессе имплантации. Облучение проводилось при комнатной температуре, мощность пучка поддерживалась на исключаяющем термический отжиг уровне. Облучение однозарядными ионами, как и исследование образцов методами РОР в сочетании с каналированием проводилось на введенном в эксплуатацию тракте ускорительного комплекса HVEE-500. Облучение многозарядными ионами Xe^{N+} проводилось на ускорительном комплексе FAMA Института ядерных наук «Винча», Белград, Сербия. Анализ образцов методом резерфордского обратного рассеяния проводился с применением ионов He^+ при энергии 350 кэВ, что позволяет получать приемлемый уровень сигнала от малых концентраций примесных атомов за счет большего сечения упругого рассеяния, характерного для выбранной энергии. При этом отклонение сечения рассеяния от резерфордского за счет экранирования ядра электронными оболочками для указанных параметров пучка и выбранных элементов незначительно. Диаметр пучка, падающего на исследуемый образец, составлял 1 мм, угловое геометрическое расхождение пучка составляло 0.12° . Спектры РОР были получены с применением кремниевого детектора поверхностно-барьерного типа диаметром 1 см, находящегося на удалении от мишени в 6 см, при угле рассеяния 160° .

Из спектров РОР были получены профили распределения примеси по глубине и рассчитаны средний проективный пробег R_p и ширина профиля на полувысоте FWHM, экспериментальные результаты сравнивались с результатами численного моделирования

в программах SRIM с применением потенциала Циглера-Биршака-Литтмарка и MARLOWE с применением потенциала Мольера (см. рис. 8).

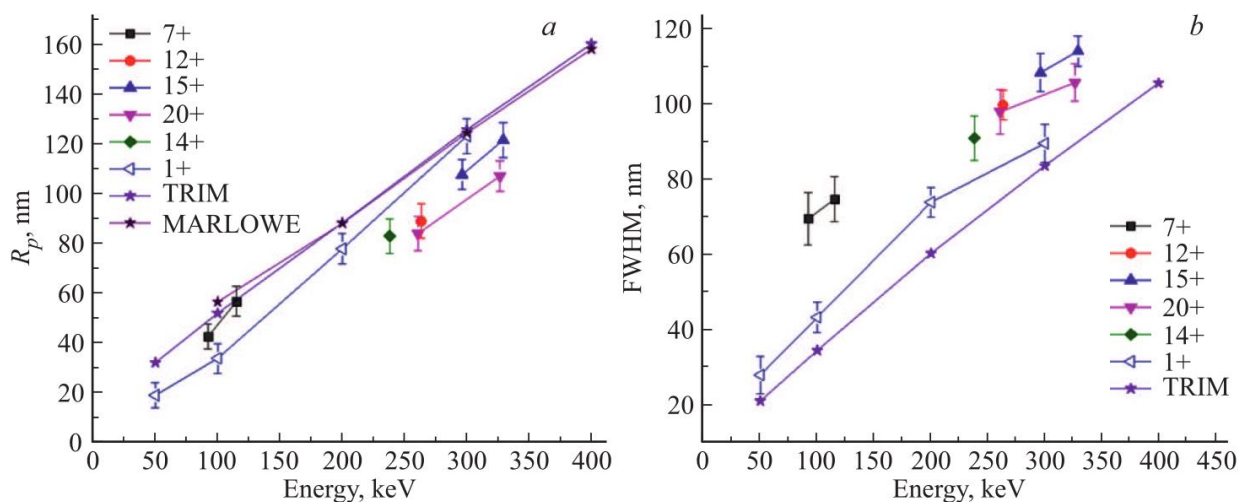


Рисунок 8. Зависимость величин R_p (a) и FWHM (b) ионов ксенона от энергии в различных зарядовых состояниях

Согласно экспериментальным результатам средний проективный пробег R_p однозарядных ионов ксенона в области энергий 50–200 кэВ имеет меньшие значения в сравнении с результатами компьютерного моделирования в программах SRIM и MARLOWE, однако различие уменьшается с увеличением энергии и при энергии 300 кэВ экспериментальные и рассчитанные величины совпадают. Подобная зависимость отличия среднего проективного пробега ионов от энергии облучения так же наблюдалась при имплантации ионов железа в кремний с энергиями 90 и 250 кэВ. Согласно полученным результатам, в работе делается вывод, что для энергии иона менее 2.3 кэВ/нуклон экспериментальные потери энергии превышают теоретические значения. Также для однозарядных ионов ксенона и железа наблюдалось отличие ширины экспериментального профиля дефектов от рассчитанной численными методами. Для профилей распределения многозарядных ионов можно выделить две области: низкоэнергетичную и низкозарядовую область 1 и область 2, где энергии более 220 кэВ и зарядовые состояния превышают 7+. В случае зарядового состояния 7+ и энергий вблизи 100 кэВ (область 1) наблюдается незначительное отличие экспериментальных средних проективных пробегов от результатов моделирования, при этом величина R_p превышает значения, полученные для однозарядных ионов. Для области 2 наблюдается меньшее значение среднего проективного пробега многозарядных ионов ксенона по сравнению с экспериментальными величинами для однозарядных ионов и результатами расчетов.

Известно, что профили распределения внедренной примеси определяются как упругими, так и неупругими потерями энергии. Возможно, уменьшение величины R_p может являться следствием увеличения общих потерь энергии и увеличения неупругой компоненты потерь в частности. В то же время увеличение неупругих потерь энергии должно приводить к уширению профиля распределения примеси по глубине, что наблюдается на рис. 8, b. Отметим, что, согласно рис. 8, b, в то время как величина FWHM профиля распределения для однозарядных ионов находится вблизи рассчитанных в SRIM значений, для многозарядных ионов наблюдается значительное отличие, при этом для зарядового состояния 7+ наблюдается наибольшее отклонение.

Измерения, проведенные с помощью атомно-силовой микроскопии для зарядовых состояний $12+$ и $7+$ показали, что разность высот на границе облученной и необлученной областей имеет величину соответствующую толщине распыленного слоя под действием облучения однозарядными ионами, поэтому различие в средних проективных пробегах многозарядных ионов нельзя объяснить более выраженным распылением поверхности.

Далее в главе показаны этапы дефектообразования в кремниевой мишени под действием ионного облучения методами РОР в сочетании с каналированием и КРС [А4-А7]. Представлены результаты экспериментов по облучению монокристалла кремния (110) ионами ксенона энергиями 100 и 200 кэВ и аргона с энергией 110 кэВ при разных флюенсах. Доза облучения подбиралась таким образом, чтобы величина «смещение на атом» (DPA) варьировалась от 0.1 до 1 для всех типов ионов и их энергии. Облученные образцы исследовались методами РОР и КРС. Для обоих методов рассчитывалась степень дефектности структуры кристалла в зависимости от величины DPA. По спектрам РОР эта величина рассчитывалась как отношение интегрального выхода обратнорассеянных частиц в режиме каналирования к «рэндом» режиму для области дефектообразования (см.рис.9а). По спектрам КРС эта величина рассчитывалась как отношение I_D и I_G пиков ответственных за сигнал от дефектной и кристаллической фаз кристалла соответственно (см.рис.9б).

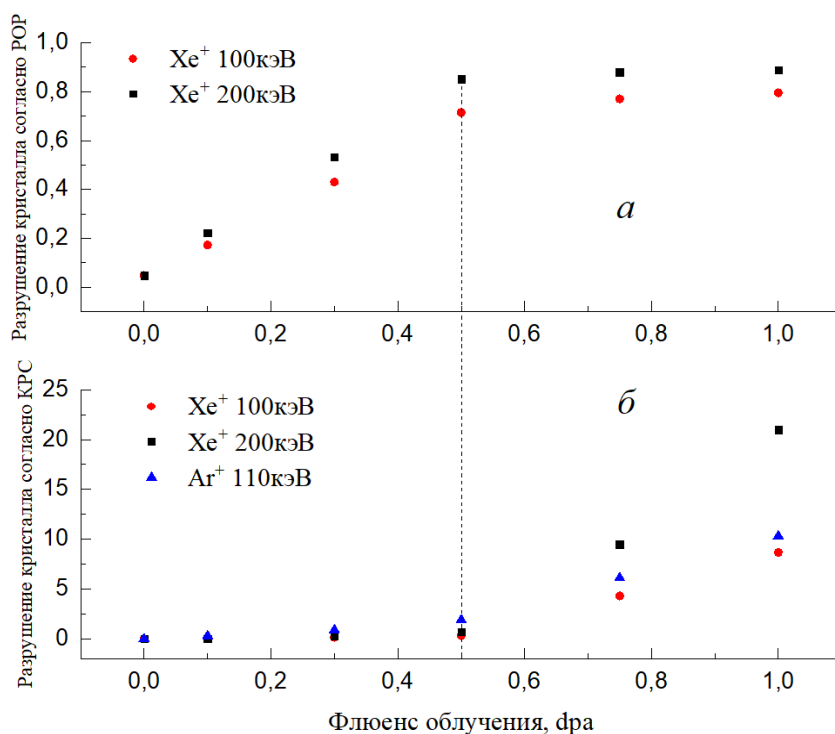


Рисунок 9. Сравнение степени дефектности кристалла по РОР (а) и КРС (б)

Согласно описанному выше механизму дефектообразования в объемной мишени, по мере увеличения флюенса облучения происходит накопление точечных дефектов, затем их концентрация достигает локального насыщения, и они начинают объединяться в кластеры и затем эти кластеры объединяются в аморфный слой. Полученные результаты (см.рис. 9ab) демонстрируют этапы дефектообразования в кремнии под действием облучения. По мере роста флюенса и величины DPA соответственно, происходит накопление простейших дефектов, что согласно РОР характеризуется линейным увеличением степени дефектности мишени, КРС также демонстрирует незначительно возрастающую линейную зависимость. Когда значение DPA достигает 0.5, происходит

насыщение области дефектообразования простейшими дефектами, и они начинают объединяться в кластеры и локальные аморфные области. Степень дефектности по РОР демонстрирует выход на насыщение с незначительным ростом, который будет продолжаться до значения 1 соответствующего полному разрушению структуры кристалла. Степень дефектности по КРС демонстрирует рост производной по параметру DPA, однако в силу особенностей метода нельзя численно сопоставить значение, соответствующее полному разрушению структуры.

Для ионов ксенона с энергией 100 и 200 кэВ наблюдается различие в степени дефектности при одинаковых значениях параметра DPA (см.рис.9а). Это можно объяснить большей шириной профиля дефектов при большей энергии иона, а значит большему вкладу деканализированных частиц в спектры РОР. Согласно рисунку 9б, для разных ионов наблюдается значительное отличие степени дефектности при значениях параметра DPA превышающих 0.5. Различие для ионов ксенона с энергией 100 и 200 кэВ можно объяснить разной толщиной разрушаемого слоя кремния. Метод КРС регистрирует интегральный по глубине сигнал, поэтому вклад в сигнал КРС от незатронутого облучением заглубленного слоя больше для меньшей энергии. Различие результатов КРС для ионов ксенона и аргона можно объяснить отклонением реальных и теоретических потерь энергии для указанных типов ионов и их энергий (см.рис.8) показанных в диссертационной работе при облучении кремниевых мишеней ионами ксенона и железа.

Согласно полученным результатам, применяя параметр DPA можно сравнивать дефектообразование в облучаемой мишени для разных типов ионов и энергий. При этом сопоставление результатов РОР и КРС позволило экспериментально продемонстрировать этапы дефектообразования в объемной мишени. Далее таким же образом будет рассматриваться дефектообразование в графеновом покрытии.

В конце главы приведены результаты экспериментов по облучению графена на меди ионами гелия и аргона с энергией 100 кэВ с разными флюенсами [А8]. Облучение проводилось как при комнатной температуре, так и при температуре мишени 300⁰С и 400⁰С. После облучения структура образцов изучалась методом комбинационного рассеяния света (см. рис.10), по соотношению пиков I_D к I_G, отвечающих за дефектную и структурированную фазы соответственно, строилась зависимость степени дефектности структуры от флюенса облучения.

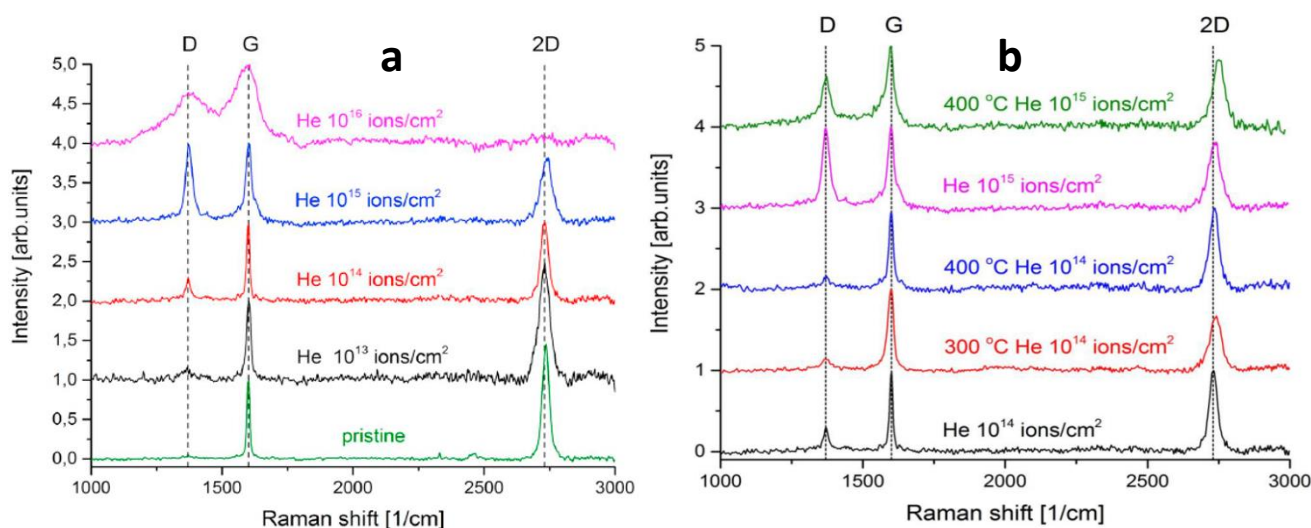


Рисунок 10 Спектры КРС для графена облученного ионами He^+ с энергией 100 кэВ при разных флюенсах при комнатной температуре (а) и при нагреве мишени (б)

Согласно спектрам КРС с ростом флюенса облучения (рис.10а) наблюдается увеличение интенсивности D пика, при этом происходит уменьшение интенсивности и уширение 2D пика. Отсутствие 2D пика говорит о полном разрушении структуры графена. При этом согласно рис.10b увеличение температуры мишени приводит к увеличению флюенса необходимого для разрушения структуры графена. Так как в случае с наноструктурированными материалами не корректно говорить о каскадном механизме дефектообразования, влияние температуры на дефектообразование можно объяснить увеличением интенсивности обратного захвата вакантными связями выбитых атомов углерода.

Используя программный пакет SRIM, в котором были заданы толщина углеродной мишени в несколько монослоев с энергией связи соответствующей графену, были сопоставлены флюенсы облучения с величиной смещение-на-атом (DPA). На рисунке 11 представлена зависимость степени разрушения графена от параметра DPA для проведенных облучений ионами гелия и аргона. Также на рисунок были нанесены экспериментальные точки, полученные другой группой для ионов гелия и аргона с такой же энергией [16].

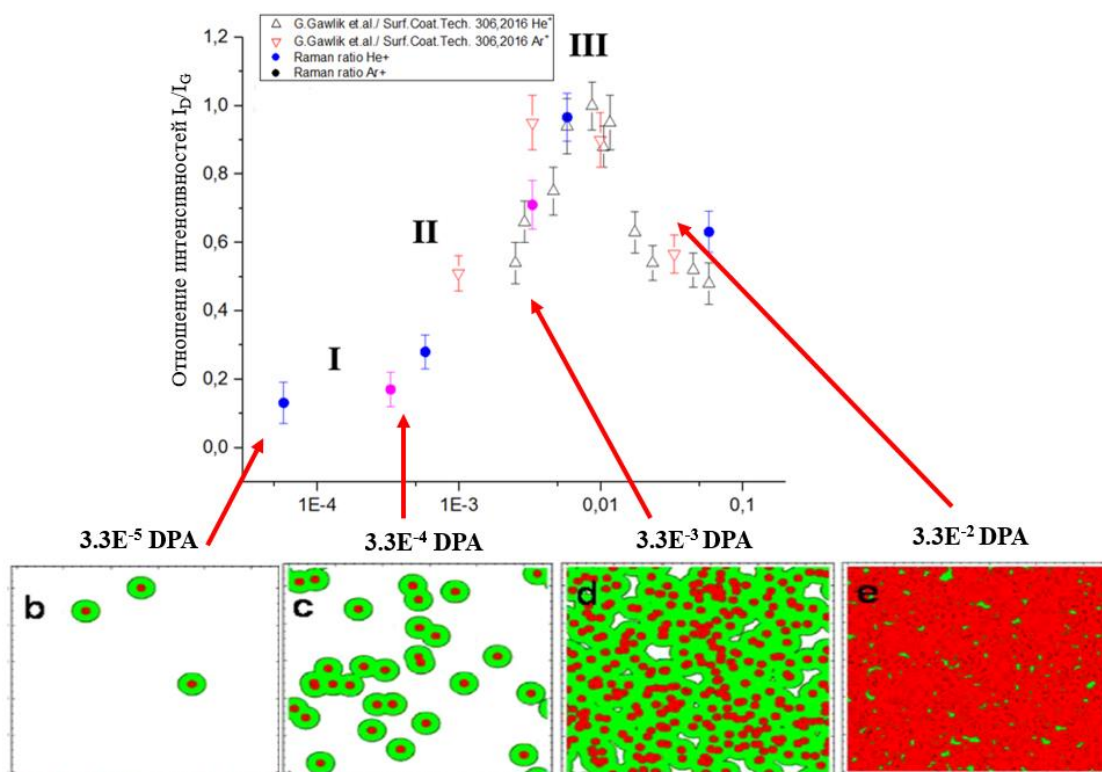


Рисунок 11 Зависимость степени дефектности графена от параметра DPA

Согласно данным представленным на рисунке 11, можно сказать, что применение параметра DPA позволяет оценивать дефектообразование в графене для различных типов ионов и энергий облучения. При этом экспериментальные данные полученные в диссертационной работе имеют хорошее соответствие с результатами, полученными в работах [16, 17]. Характер зависимости степени дефектности графена от параметра DPA позволяет по аналогии с объемной кремниевой мишенью выделить этапы дефектообразования. В области I происходит накопление простейших дефектов, характеризующееся линейной зависимостью с незначительным ростом значений. Затем происходит насыщение слоя точечными дефектами, и они начинают объединяться в

высокодефектные области (область II), что характеризуется скачкообразным ростом производной зависимости степени дефектности структуры от параметра DPA. По мере роста флюенса объединение высокодефектных областей приводит к полному разрушению структуры графена на исследуемой площади (область III) и переходу в состояние аморфного углерода. Данные выводы соответствуют результатам компьютерного моделирования, представленным в работе [17].

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации:

В ходе диссертационной работы была введена в эксплуатацию экспериментальная линия, позволяющая проводить ионное облучение и исследование состава и структуры образцов методом резерфордовского обратного рассеяния без нарушения условий вакуума.

Были проведены эксперименты по облучению кремниевых монокристаллических образцов различными типами ионов с разными энергиями и флюенсами и изучены параметры распределений по глубине примеси и образованных дефектов. Экспериментальные результаты сравнивались с результатами моделирования бинарных парных соударений согласно модели Норкетта-Робинсона-Торренса. Из результатов следует, что уменьшение энергии, приходящейся на нуклон, приводит к увеличению отличия экспериментальных и рассчитанных результатов. Отметим, что облучение ионами железа проводилось со значительно большими флюенсами в сравнении с ионами ксенона, что должно проявиться на ширине профиля дефектов, в частности привести к его уширению и, соответственно, уменьшению различия между экспериментальными и рассчитанными результатами. В случае ионов ксенона при энергии 0.38 кэВ/нуклон наблюдается наибольшее отклонение экспериментальных средних проективных пробегов на уровне 50% от результатов моделирования. При энергии 2,3 кэВ/нуклон экспериментальные и рассчитанные средние проективные пробеги сравниваются по значению. Отклонение средних проективных пробегов ионов железа при энергии 1,6 кэВ/нуклон составляет 54%. При энергии ионов железа 4,46 кэВ/нуклон, экспериментальные и рассчитанные средние проективные пробеги совпадают. Для профилей радиационно-стимулированных дефектов упаковки атомов кремниевого монокристалла наблюдается аналогичная тенденция. В случае ионов железа с энергией 1.6 кэВ/нуклон различие экспериментальной и смоделированной ширины дефектного слоя составляет 41%, для ионов ксенона с энергией 1.54 кэВ/нуклон соответствующее различие составляет 60%.

Методами резерфордовского обратного рассеяния и комбинационного рассеяния света было показано влияние флюенса облучения на процесс дефектообразования. На основе спектров РОР и КРС было показано, что для ионов различных масс в кремнии наблюдается линейная зависимость количества дефектов от параметра DPA, связанная с ростом количества дефектов в диапазоне значений DPA от 0 до 0.5. При величине параметра DPA превышающей 0.5 наблюдается замедление роста количества дефектов с ростом флюенса, что может быть связано с процессом объединения локальных высокодефектных областей с последующим формированием аморфного слоя.

Методами КРС было показано влияние параметров ионного облучения на этапы дефектообразования в графеновом покрытии осажденном на медную фольгу. Применяя методы компьютерного моделирования для расчета количества образовавшихся дефектов под действием ионного облучения основанные на статистическом моделировании бинарных столкновений, были продемонстрированы этапы дефектообразования в графене при облучении ионами гелия и аргона с энергией 100 кэВ при различных флюенсах. Было показано, что происходит накопление точечных дефектов до значений параметра DPA $5 \cdot 10^{-4}$, после чего начинается процесс объединения активных областей дефектов в высокодефектные области, и при значениях параметра DPA 10^{-2} происходит разрушение порядка в расположении атомов углерода с переходом в фазу аморфного углерода.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, SCOPUS и РИНЦ:

- A1. Шемухин А.А., Черных П.Н., Черныш В.С., Балакшин Ю.В., Назаров А.В., Ионно-пучковые методики ускорительного комплекса HVEE-500 НИИЯФ МГУ // Прикладная физика. – 2013. – №5. (IF РИНЦ 0.391) [110]
- A2. Балакшин Ю.В., Шемухин А.А., Назаров А.В., Кожемяко А.В., Черныш В.С., In-situ модификация и анализ состава и кристаллической структуры кремниевой мишени с помощью ионно-пучковых методик // Журнал технической физики – 2018. – т.88. – №12. (IF РИНЦ 1.002) [109]
- A3. Балакшин Ю.В., Кожемяко А.В., Petrovic S., Erich M., Шемухин А.А., Черныш В.С., Влияние зарядового состояния ионов ксенона на профиль распределения по глубине при имплантации в кремний // Физика и техника полупроводников.– 2019. – т.53. – №8. (IF РИНЦ 0.817) [215]
- A4. Балакшин Ю.В., Кожемяко А.В., Евсеев А.П., Миннебаев Д.К., Elsehly E.M., Влияние параметров облучения ионами ксенона и аргона на дефектообразование в кремнии // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.– 2020. – №3. (IF РИНЦ 0.972) [240]
- A5. Кожемяко А.В., Евсеев А.П., Балакшин Ю.В., Шемухин А.А., Особенности дефектообразования в наноструктурированном кремнии при ионном облучении // Физика и техника полупроводников – 2019. – т.53. – №6. (IF РИНЦ 0.817) [203]
- A6. Shemukhin A.A., Kozhemiako A.V., Balakshin Yu.V., Chernysh V.S., Iron ions distribution profile obtained by irradiating the silicon single-crystal // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol.917. (IF 0.599) [77]
- A7. Кожемяко А.В., Балакшин Ю.В., Шемухин А.А., Черныш В.С., Изучение профиля распределения железа, имплантированного в кремний // Физика и техника полупроводников – 2017. – т.51. – №6. (IF РИНЦ 0.817) [179]
- A8. Minnebaev D.K., Balakshin Yu.V., Nazarov A.V., Kharitonov I.D., Zaitsev E.V., Zabolotskiy A.D., Chernysh V.S., Shemukhin A.A., Irradiation-induced defects in graphene on copper // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2019. – Vol.460. (IF 1.27) [222]

Патент на полезную модель:

- A9. Зарубин И.М., Миронов В.П., Егоркин В.И., Шемухин А.А., Черныш В.С., Балакшин Ю.В., Назаров А.В., Воробьева Е.А., Устройство мониторинга ионного пучка, патент на полезную модель RU 187686 U1, 2019 [111]

Список литературы

1. Sigmund P. Six decades of atomic collisions in solids // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2017. – Vol.406. – P. 391 – 412
2. Vantomme A. 50 years of ion channeling in materials science // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. – 2016. – Vol.371. – P. 12 – 26
3. Was G.S., Averback R.S. Radiation Damage Using Ion Beams, Elsevier LTD, 2012
4. Russel K.C. Phase stability under irradiation // Progr. In Mat. Sci. – 1984. – Vol.28. – P. 229 – 434
5. Kinchin G.W., Pease R.S. Displacement of Atoms in Solid by Radiation,” Reports on Progress in Physics // Rep. Prog. Phys. – 1955. – Vol.18 – P. 590 – 615
6. Norgett M.J., Robinson M.T., Torrens I.M. Vacancy Cluster and Plate Vacancy Collection Energy in Metals // Nucl. Eng. Des. – 1975. – Vol.33. – Issue 1. – P. 50 – 54
7. Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B – 2010. – Vol.11 – 12. – P. 1818 – 1823
8. Nordlund K. et.al. Primary radiation damage: A review of current understanding and models // J. Nucl. Mat. – 2018. – Vol.512. – P. 450 – 479
9. Mamalis A.G. et.al. Nanotechnology and nanostructured materials: Trends in carbon nanotubes // Precision Eng. – 2004. – Vol.28. – P. 16 – 30
10. Krashennnikov A.V., Nordlund K. Ion and electron irradiation-induced effects in nanostructured materials // J. Appl. Phys. – 2010. – Vol.107. – P. 071301 – 071370
11. Lindhard J., Scharff M., Schiot H.E., Kgl. Range concepts and heavy ion ranges // Danske Videnskab. Selskab., Mat-Fys. Medd. – 1963. – Vol.33. – Issue 14. – P. 1 – 42
12. Ehrhart P. Properties and Interactions of Atomic Defects in Metals and Alloys. – 1991. – Springer
13. Nordlund K., Ghaly M., Averback R.S., Caturla M. T., Diaz de la Rubia, Tarus J. Mechanisms of ion beam mixing in metals and semiconductors // Phys. Rev. B. – 1998 – Vol.57 (13)
14. Pelaz L., Marques L.A., Barbolla J. Ion-beam-induced amorphization and recrystallization in silicon // J. Appl. Phys. – 2004. - Vol.96 (11)
15. National Nuclear Data Center, Brookhaven, USA
<http://www.nndc.bnl.gov/chart/decaysearchdirect.jsp?nuc=239PU&unc=nds>
16. Gawlik G. et.al. Ion beam induced defects in CVD graphene on glass // Surf. Coat. Tech. – 2016. – Vol.306. – P. 119 – 122
17. Lucchese M. et.al. // Carbon. – 2010. – Vol.48. – Issue 5. – P. 1592 – 1597