

На правах рукописи



Кубанкина Анна Андреевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКОВ
УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ГЛАДКИМИ И
СТРУКТУРИРОВАННЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Белгород – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: **Кубанкин Александр Сергеевич**,
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

– **Негодаев Михаил Александрович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Лаборатория экспериментальных методов ядерной физики Отделения ядерной физики и астрофизики, высококвалифицированный главный научный сотрудник;

– **Стучебров Сергей Геннадьевич**, кандидат физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, доцент.

Защита диссертации состоится «28» декабря 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета БелГУ.01.03 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85, корпус 11, ауд. 307.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, д.85 и на сайте <https://www.bsu.edu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета БелГУ.01.03
канд. физ.-мат. наук



М.С. Тихонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Пучки заряженных частиц находят все более широкое применение не только в области фундаментальной науки, но и в различных технологических процессах, медицине, а также при инспекционно-досмотровом контроле. Одной из основных проблем, связанных с пучковыми технологиями, является формирование, фокусировка и транспортировка пучков заряженных частиц к объекту обработки или исследования. В настоящее время данная проблема решается путем использования технически достаточно сложных и дорогостоящих устройств, требующих внешних источников питания. Одной из альтернатив таким устройствам является использование диэлектрических пластин и диэлектрических каналов, на поверхности которых при взаимодействии с пучком образуется динамическое самосогласованное зарядовое распределение, препятствующее непосредственному контакту диэлектрика с заряженными частицами пучка.

Идея управления пучками заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов без использования магнитооптических систем возникла в 80-х годах прошлого века. Результаты работ демонстрировали возможность отклонения электронов от их первоначального направления на малые углы без существенных потерь энергии и интенсивности пучка. В дальнейшем возможность управления пространственными характеристиками пучка заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов различной конфигурации без использования магнитооптических систем получила название гайдинг-эффекта (guiding) и была исследована различными группами ученых для разных заряженных частиц: ионов, протонов, мюонов, позитронов, электронов и др. Гайдинг-эффект заключается в контролируемом управлении пространственными характеристиками пучков заряженных частиц и реализуется за счет изменения физических свойств материала поверхности при воздействии на нее пучком частиц. Ценность

данного эффекта состоит в отсутствии необходимости использования дополнительных источников энергии для контролируемого отклонения и фокусировки пучков заряженных частиц, а также в миниатюрном размере управляющих данными характеристиками элементов, поэтому он нашёл прикладное применение в медицине для локального облучения клеток пучками ионов.

В связи с этим, исследование новых возможностей реализации гайдинг-эффекта, в частности, исследование взаимодействия пучков ускоренных электронов с металлизированными поверхностными периодическими структурами, позволит решить ряд задач при разработке энергоэффективных методов контроля пространственных характеристик пучков заряженных частиц и при исследовании модификации свойств веществ под воздействием пучков ионизирующих излучений.

Целью диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое исследование процессов скользящего взаимодействия пучков ускоренных электронов с энергией порядка 10 кэВ с гладкими и структурированными диэлектрическими поверхностями, а также прохождения пучков электронов через каналы, сформированные такими поверхностями.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Модернизировать экспериментальную установку для проведения исследований механизмов взаимодействия пучков электронов с энергией 10 кэВ с диэлектрическими гладкими и структурированными поверхностями и каналами.
2. Экспериментально исследовать прохождение пучка ускоренных электронов вблизи гладкой диэлектрической поверхности и через диэлектрический канал, сформированный из таких пластин.
3. Экспериментально исследовать прохождение пучка ускоренных электронов вблизи структурированной металлизированной

диэлектрической поверхности и через диэлектрический канал, сформированный из таких пластин.

4. Определить влияние структуры поверхности металлизированных диэлектриков на пространственно-угловые характеристики пучка ускоренных электронов.
5. Разработать физико-математическую модель, описывающую прохождение пучка заряженных частиц вблизи структурированной металлизированной поверхности.

Научная новизна полученных результатов

До настоящей работы гайдинг-эффект изучался только для случая взаимодействия пучков ускоренных ионов и электронов с гладкими диэлектрическими поверхностями. В настоящей работе впервые рассмотрено влияние металлизации поверхности диэлектриков и наличия поверхностной периодической структуры на данный эффект. Выполненные исследования впервые показали наличие гайдинг-эффекта при использовании металлизации поверхности диэлектрика. Данный подход выгодно отличается от стандартного гайдинг-эффекта на диэлектрических поверхностях более простой возможностью контроля исследуемого эффекта в виду наличия равномерного распределения электронной плотности по поверхности. Вторым наиболее важным результатом является обнаружение дополнительного вклада в исследуемый эффект периодической поверхностной структуры, что позволяет в разы увеличить эффективность использования гайдинг-эффекта для управления пространственными характеристиками пучков ускоренных заряженных частиц.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Научная значимость работы заключается в том, что в ходе выполнения исследования были получены новые знания в области

взаимодействия пучков заряженных частиц с веществом. Впервые рассмотрен и зафиксирован гайдинг-эффект при взаимодействии пучка ускоренных электронов с металлизированными поверхностями диэлектриков. Также показан вклад в проявление данного эффекта периодической поверхностной структуры.

Практическая значимость заключается в получении результатов, которые найдут применение в ускорительной технике при создании устройств, позволяющих управлять пространственными и угловыми параметрами пучков заряженных частиц, существенно уменьшив их габариты и увеличив энергоэффективность.

Методы исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на базе международной научно-образовательной лаборатории радиационной физики НИУ «БелГУ». В рамках настоящей работы была модернизирована ранее разработанная и апробированная установка, включающая современное оборудование. В рамках выполненных исследований использовались методы ядерной физики и физики конденсированного состояния вещества, в частности, методы контроля и диагностики спектрально-угловых характеристик пучков ускоренных заряженных частиц и электронной микроскопии. Автоматизация эксперимента была реализована на основе графического языка программирования LabVIEW, обработка полученных результатов проводилась на основе пакета прикладных программ OriginPro.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов представленных исследований подтверждается сертифицированным оборудованием, откалиброванным в условиях проведения экспериментов, малой величиной статистической

ошибки, повторяемостью результатов и соответствием полученных результатов расчётам, выполненным на основе апробированных методов физико-математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. При взаимодействии электронов с плоскостью диэлектрических образцов, имеющих поликристаллическую и кристаллическую структуру, реализуется эффект управления (гайдинг-эффект) пучком ускоренных электронов.
2. Металлизация диэлектрической поверхности позволяет реализовать гайдинг-эффект, возникающий в процессе скользящего взаимодействия пучка ускоренных электронов с поверхностями различных веществ.
3. При взаимодействии пучка ускоренных электронов с металлизированными одномерными структурированными поверхностями эффект управления более ярко выражен в случае, когда направление движения электронов перпендикулярно структуре.

Апробация работы

Материалы работы были представлены на следующих мероприятиях:

– Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Россия, г. Москва, 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г., 2021 г.;

– 6th International conference on «Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena – Channeling», Италия, г. Сирмионе Дезенцано-дель-Гарда, 2016 г.;

– 14-я Курчатовская молодежная научная школа, Россия, г. Москва, 2016 г.;

- XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2016», Россия г. Москва, 2016 г.;
- 5th International Conference on «Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences», Армения, Ереван, 2017 г.;
- International symposium radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-2017), Германия, г. Гамбург, 2017 г.;
- Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния, Россия, г. Санкт-Петербург, 2016 г., 2017 г., 2018 г.;
- International symposium radiation from relativistic electrons in periodic structures (RREPS-2019), Россия, г. Белгород, 2019 г.

Личный вклад автора

Соискатель внёс основной вклад во все этапы работы: постановка задач, обзор научной и технической литературы, аналитические расчёты и компьютерное моделирование, разработка экспериментальной установки, необходимой для решения поставленных задач, разработка и испытание методик проведения экспериментов, постановка и проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных. Оформление публикаций предшествовали коллективные обсуждения, тексты публикаций написаны в основном соискателем.

Связь работы с научными программами

В ходе работы над диссертацией автор участвовал в научном проекте государственного задания № FZWG–2020–0032 (2019–1569) «Исследование новых эффектов в процессах взаимодействия ускоренных заряженных частиц с веществом».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 112 страниц, включая 92 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель и задачи исследований; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; показана научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов; даны сведения о публикациях.

В первой главе диссертации приводится описание экспериментальных исследований в области изучения взаимодействия пучков ускоренных заряженных частиц с диэлектрическими поверхностями, в том числе структурированными. Представлено описание подходов к изучению механизма реализации процесса прохождения пучка электронов вблизи диэлектрической поверхности или через канал, изготовленный из диэлектрического материала.

Во второй главе описана экспериментальная установка, позволившая решить все поставленные задачи.

Установка, разработанная из немагнитных материалов, состоит из двух основных частей, каждая из которых снабжена независимой откачной вакуумной системой:

- источника ускоренных электронов, состоящего из вакуумной камеры с установленной в ней электронной пушкой;
- вакуумной камеры с установленной гониометрической системой, позволяющей размещать и контролировать положение нескольких мишеней.

Также стоит отметить, что установка была снабжена магнитооптическим каналом, включающим соленоидную фокусирующую

линзу, а также X и Y корректоры. Диагностика спектрально-угловых характеристик пучка электронов производилась с помощью цилиндра Фарадея и люминофорного экрана. Общая схема установки приведена на Рисунке 1.

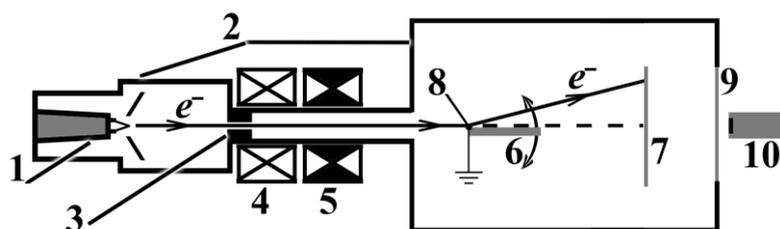


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – электронная пушка, 2 – вакуумная камера, 3 – коллиматор, 4 – линза, 5 – двухкоординатный корректор, 6 – мишень, 7 – люминесцентный экран, 8 – ось вращения гониометра, 9 – вакуумное смотровое окно, 10 – видеокамера.

Первичное формирование пучка электронов, генерируемого электронной пушкой 1 на выходе из вакуумной камеры 2, производится коллиматором 3, имеющим апертуру 2 мм. Далее пучок транспортируется в мишенную камеру через вакуумный канал формирования пучка, соединяющий вакуумные камеры электронной пушки и расположения мишени 2. Угловая расходимость и положение пучка электронов в месте расположения мишени 6 контролируются электромагнитной соленоидальной линзой 4 и корректором 5. Мишень устанавливается на подвижной платформе гониометра, который обеспечивает возможность линейного перемещения мишени в поперечном направлении относительно оси падающего пучка электронов. Данная возможность позволяет полностью извлекать мишень из-под падающего пучка для определения пространственных и спектральных характеристик первичного пучка, исключив влияние мишени. Гониометр также позволяет контролировать угол взаимодействия пучка электронов с плоскостью поверхности мишени с точностью $\pm 0.1^\circ$. Диагностика положения пучка электронов в пространстве производится на основе наблюдения видеокамерой 10 через вакуумное окно 9 люминесценции полупрозрачного экрана 7, покрытого сцинтилляционным

порошком, возбуждающейся пучком электронов. Расстояние от переднего (входного) края мишени 6 до экрана 7 – 240 мм. Измерения пространственного распределения рассеянных электронов также проводятся путем сканирования профиля пучка вводимым вместо экрана щелевым цилиндром Фарадея. Размер прорези 1×50 мм детектора и возможный диапазон его перемещения ±50 мм позволяют максимально охватить пространственную область рассеяния электронов после их взаимодействия с мишенью.

Эксперименты проводились с первичным пучком электронов с энергией 10 кэВ при токе эмиссии до 1 мА. Плотность тока пучка в поперечном сечении описывалась распределением Гаусса с шириной на полувысоте не более 1.9 мм при расходимости не более 0.25° в месте расположения мишени. Система получения вакуума обеспечивала значение давления остаточного газа на уровне 10^{-7} торр в секции электронной пушки и на уровне 10^{-6} торр в секции размещения мишеней.

Камера размещения мишеней представлена на Рисунке 2.

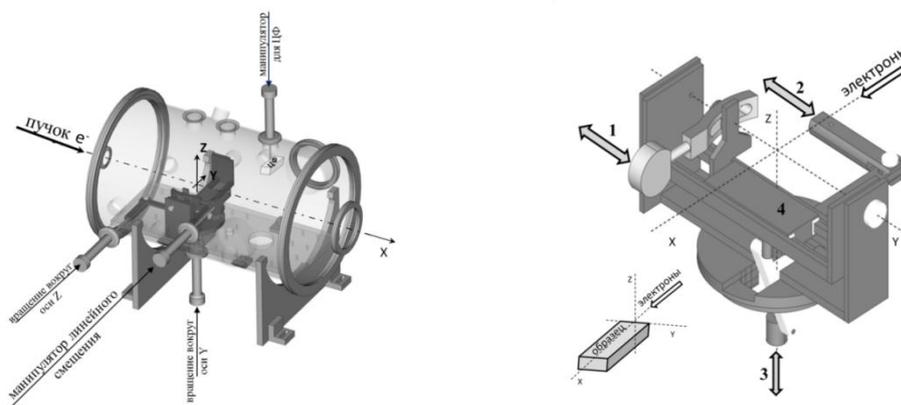


Рисунок 2. Трехмерная модель вакуумной камеры размещения мишени с гониометром.

Линейный транслятор 1 позволяет смещать платформу 4 с установленной на ней мишенью (образцом) вдоль оси Y в пределах 0..100 мм с точностью 0.1 мм. Длина платформы (10 см) достаточна для одновременного размещения нескольких образцов. Линейные трансляторы 2

и 3 обеспечивают вращение входного торца образца вокруг осей Z и Y соответственно. Все оси X, Y и Z пересекаются в одной точке. Трансляторы 2 и 3 снабжены метрическими шкалами, которые позволяют вращать образец с точностью 0.1° . Зная геометрические параметры системы, можно оценить соответствие между метрическими шкалами трансляторов и углами поворота образца. Транслятор 2 обеспечивает поворот образца в пределах $\pm 10^\circ$ и транслятор 3 позволяет изменять ориентацию образца в пределах углов $\pm 20^\circ$.

Мишени, исследуемые в рамках диссертационной работы, представляли собой одиночную диэлектрическую пластину (гладкую или структурированную) или канал, сформированный из таких пластин. Мишень устанавливалась на подвижную платформу гониометра в вакуумной камере. Схема измерения смещения следа пучка после прохождения вблизи диэлектрической поверхности (пластины) представлена на Рисунке 3, а схема измерения смещения следа пучка, прошедшего через канал, сформированный диэлектрическими поверхностями (пластинами) – на Рисунке 4.

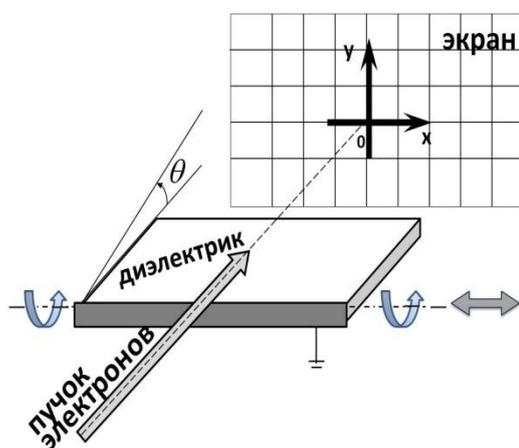


Рисунок 3. Схема измерения смещения следа пучка, после прохождения вблизи диэлектрической поверхности (пластины)

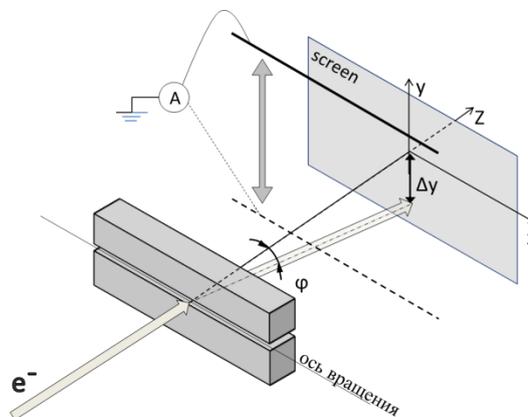


Рисунок 4. Схема измерения смещения следа пучка, прошедшего через канал, сформированный диэлектрическими поверхностями (пластинами)

В третьей главе приведены результаты проведенных экспериментов, указывающих на следующие особенности:

- каналы, сформированные из пластин, которые изготовлены из керамики и кристаллов, способны отклонять пучок электронов от его первоначального направления;

- усиление эффекта отклонения пучка электронов от структурированной поверхности наблюдается в случае, когда направление движения электронов перпендикулярно структуре;

- в случае, когда структурированная поверхность металлизирована, но не заземлена, также наблюдается отклонение пучка электронов от первоначального направления.

Первые исследования в рамках настоящей работы были проведены с гладкими пластинами различной длины, изготовленными из полиметилметакрилата (ПММА) и стекла. Были измерены пространственные характеристики пучков электронов, рассеянных гладкими мишенями, при различной ориентации плоскости мишени относительно оси первичного пучка электронов. Мишени представляли собой гладкие пластины, изготовленные из полиметилметакрилата (ПММА), длиной 24 мм и 50 мм, а также из стекла, длиной 35 и 76 мм. Входной торец каждой мишени был экранирован заземленной алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм. В процессе эксперимента каждую из пластин последовательно отклоняли на углы от -1° до 2.8° относительно оси пучка. Фотографии следа пучка электронов на люминофорном экране представлены на Рисунке 5.

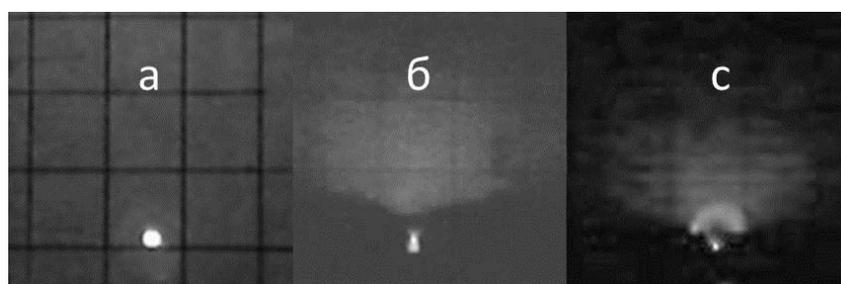


Рисунок 5. Фотографии следа пучка на экране: а – след прямого пучка, б – след после взаимодействия с пластиной из ПММА, с – след после взаимодействия с поверхностью стекла

На рисунке 6 (а) приведены результаты измерения положения пучка электронов с энергией 10 кэВ при различных углах отклонения пластины из ПММА, а на рисунке 6 (б) приведены результаты измерения положения пучка электронов с энергией 10 кэВ при различных углах отклонения пластины из стекла.

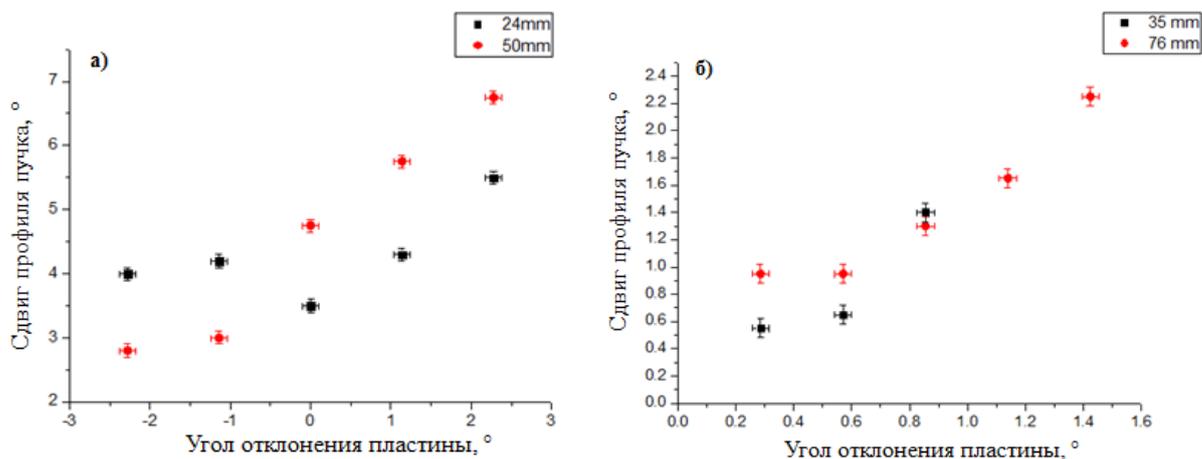


Рисунок 6. Результаты измерения положения пучка электронов с энергией 10 кэВ при различных углах отклонения пластины из ПММА (а) и стекла (б)

В результате выполненного исследования было установлено, что пластины из ПММА отклоняют пучок сильнее, чем стеклянные, что обусловлено различием поверхностных свойств диэлектрических пластин, в частности величиной удельного сопротивления материалов (ПММА $\sim 10^{15}$ Ом·м; стекло $\sim 10^{13}$ Ом·м). Кроме того, анализируя данные рисунка 6 (а) было установлено, что отклонение пучка осуществляется также при отклонении пластины на 0° , что объясняется угловой расходимостью и прицельным параметром пучка электронов.

В настоящей работе, с целью более широкого исследования взаимодействия пучка электронов с диэлектрическими материалами, исследовалось прохождение пучка ускоренных электронов через каналы, сформированные из пластин, которые изготовлены из керамики на основе диоксида циркония (ZrO_2), оксида алюминия (Al_2O_3) и кристаллов ниобата лития ($LiNbO_3$). Входной и выходной торцы канала не были экранированы. Вертикальный профиль пучка после взаимодействия с мишенью измерялся

сканированием пучка медной нитью толщиной 170 мкм, закрепленной в линейном манипуляторе. Ток с нити измерялся пикоамперметром Keithley 6482.

Угол геометрического пропускания для плоского канала с одинаковыми размерами входного и выходного отверстий определяется по формуле 1:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h}{L}\right), \quad (1)$$

где h – расстояние между пластинами канала, L – длина канала.

Измерения были проведены для диэлектрических каналов, характеристики которых приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых каналов.

Материал	Длина, мм	Расстояние между пластинами, мм	Угол геометрического пропускания (α), градусы
ZrO ₂	7.6	0.5	± 3.8
Al ₂ O ₃	40.0	0.1	± 0.14
LiNbO ₃	15.0	0.5	± 1.9

На Рисунке 7 представлены результаты измерения положения пучка электронов с энергией 10 кэВ при различных углах отклонения канала, изготовленного из диоксида циркония (керамика), оксида алюминия (керамика) и ниобата лития (кристалл).

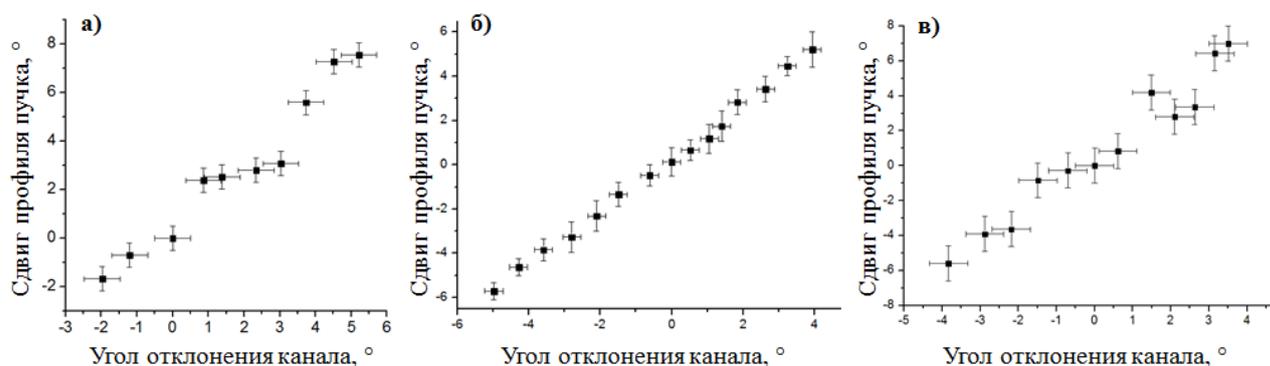


Рисунок 7. Результаты измерения положения пучка электронов с энергией 10 кэВ при различных углах отклонения канала, изготовленного из диоксида циркония (а), оксида алюминия (б) и ниобата лития (в).

Зарегистрированное отклонение электронов пучка осуществляется вследствие образования на диэлектрической поверхности канала зарядового распределения, обеспечивающего прохождение пучка через канал без существенной потери интенсивности даже при относительно больших углах отклонения продольной оси канала от оси падающего пучка. Полученные результаты указывают на возможность создания на основе ниобата лития, оксида алюминия и диоксида циркония устройств, отклоняющих пучки заряженных частиц. Сопоставляя полученные результаты исследования прохождения пучка электронов через каналы, сформированные из пластин, изготовленных из ZrO_2 , Al_2O_3 , $LiNbO_3$, можно сделать вывод, что наилучшими управляющими свойствами обладает канал, сформированный из керамических пластин Al_2O_3 .

Далее был проведён ряд экспериментов, где в качестве мишеней использовались структурированные диэлектрические пластины с металлизированной поверхностью, но не заземленной, в том числе каналы, сформированные из данных пластин.

При проведении первой серии экспериментов в качестве мишени использовалась дифракционная решетка, нанесенная на стеклянную подложку размером $(30 \times 30 \times 15)$ мм³. Рельефная поверхность была покрыта слоем алюминия толщиной порядка 10 мкм. Фотография и профиль исследуемой мишени представлены на Рисунке 8.

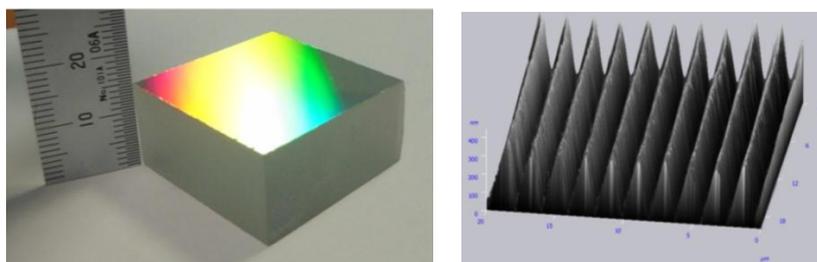


Рисунок 8. Фотография и профиль исследуемой мишени (дифракционная решетка, нанесенная на стеклянную подложку и покрытая слоем алюминия).

Рельеф мишени контролировался с помощью зондового микроскопа Integra Aura. Высота рельефа составляла 300 мкм, период 600 шт./мм.

Основная задача исследования состояла в определении влияния наличия периодической структуры на эффективность отклонения пучка от поверхности. Для этого в экспериментах пластины располагались так, чтобы штрихи решетки были перпендикулярны или параллельны оси падающего пучка электронов.

Результаты измерений, выполненных для тока пучка электронов 40 нА и 120 нА, в случае, когда экранирован только входной торец, представлены на Рисунке 9.

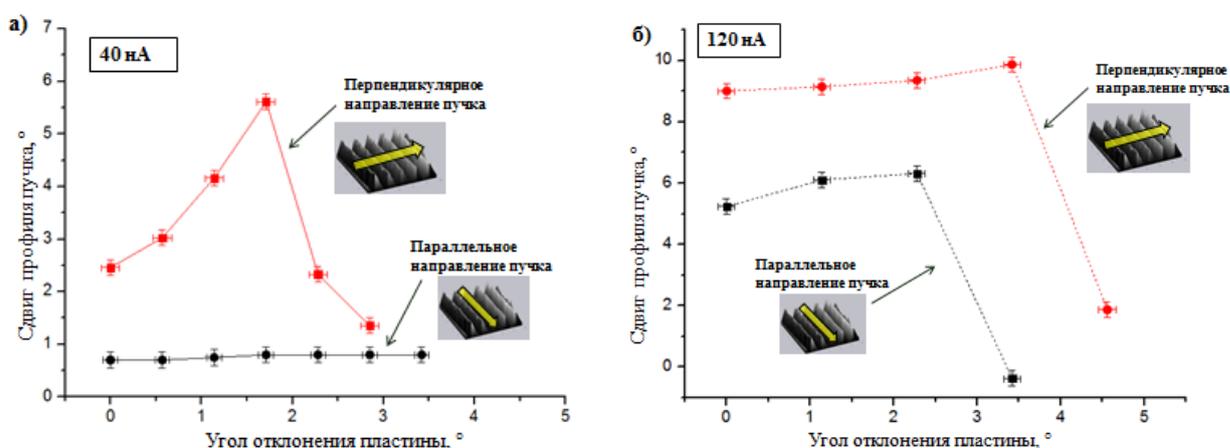


Рисунок 9. Смещение следа пучка на экране при наклоне двух одинаковых пластин при параллельном и перпендикулярном направлении движения пучка электронов относительно структуры поверхности (штрихов): ток первичного пучка 40 нА (а) и 120 нА (б)

Из представленных результатов видно, что в обоих случаях при перпендикулярном расположении штрихов дифракционной решётки относительно оси пучка электронов, след пучка оказывается выше, чем при параллельном, что свидетельствует о наличии влияния структуры на движение электронов. Причем, при увеличении тока первичного пучка на поверхности диэлектрика формируется заряд большей величины, что приводит к отклонению пучка на большие углы, что объясняет отличие зависимостей, представленных на графиках, в частности при параллельном направлении движения пучка относительно структуры поверхности.

В ходе выполнения работы также была исследована мишень, представляющая собой дифракционную решетку, нанесенную на подложку

из ситалла, покрытую слоем золота толщиной порядка 12 мкм. Высота рельефа составляла 500 мкм, период 2400 шт./мм. Фотография исследуемой мишени представлена на Рисунке 10, а на рисунке 11 представлена серия фотографий следа пучка на экране при изменении угла наклона мишени. Результаты выполненного исследования также продемонстрировали, что отклонение пучка реализуется в случае, когда направление его движения перпендикулярно структуре.

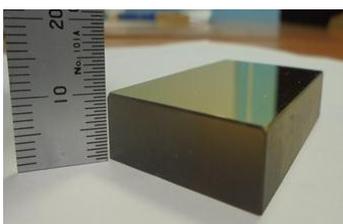


Рисунок 10. Фотография исследуемой мишени (дифракционная решетка, нанесенная на подложку из ситалла и покрытая слоем золота).

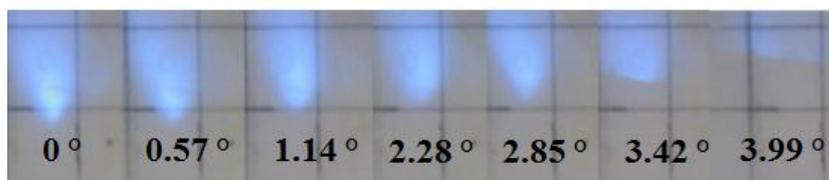


Рисунок 11. Серия фотографий следа пучка на экране при изменении угла наклона мишени (дифракционная решетка, нанесенная на подложку из ситалла и покрытая слоем золота).

Из дифракционных решеток были сформированы каналы и исследована возможность отклонения пучка электронов такими каналами при перпендикулярном движении пучка электронов относительно структуры поверхностей. Результаты исследования представлены на рисунке 12.

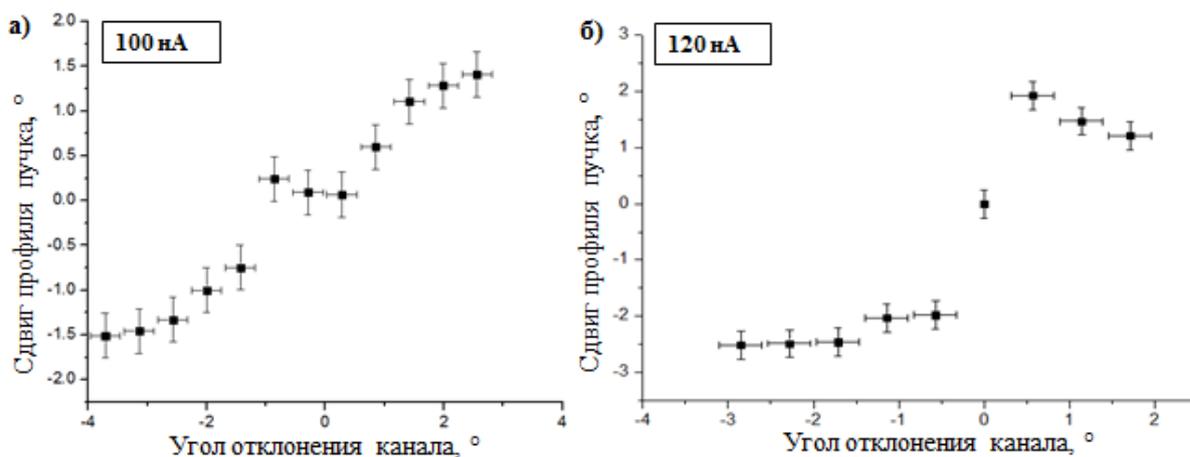


Рисунок 12. График зависимости положения следа пучка от угла наклона канала, сформированного из дифракционных решеток, нанесенных на подложки из стекла и покрытые слоем алюминия (а), а также на подложки из ситалла и покрытые слоем золота (б)

Исходя из полученных зависимостей положения следа пучка от угла наклона канала, можно сделать вывод, что каналы позволяют отклонять пучок электронов от первоначального направления. Причем, сравнение зависимостей тока, регистрируемого пикоамперметром на выходе из канала, от угла наклона канала относительно оси падающего пучка в случае, когда штрихи, нанесенные на поверхность каждой из пластин, перпендикулярны и параллельны направлению движения пучка (Рисунок 13) указывает на то, что эффект управления более ярко выражен в случае, когда направление движения электронов перпендикулярно структуре. Канал сформирован из дифракционных решеток, которые нанесены на подложки из ситалла и покрытые слоем золота.

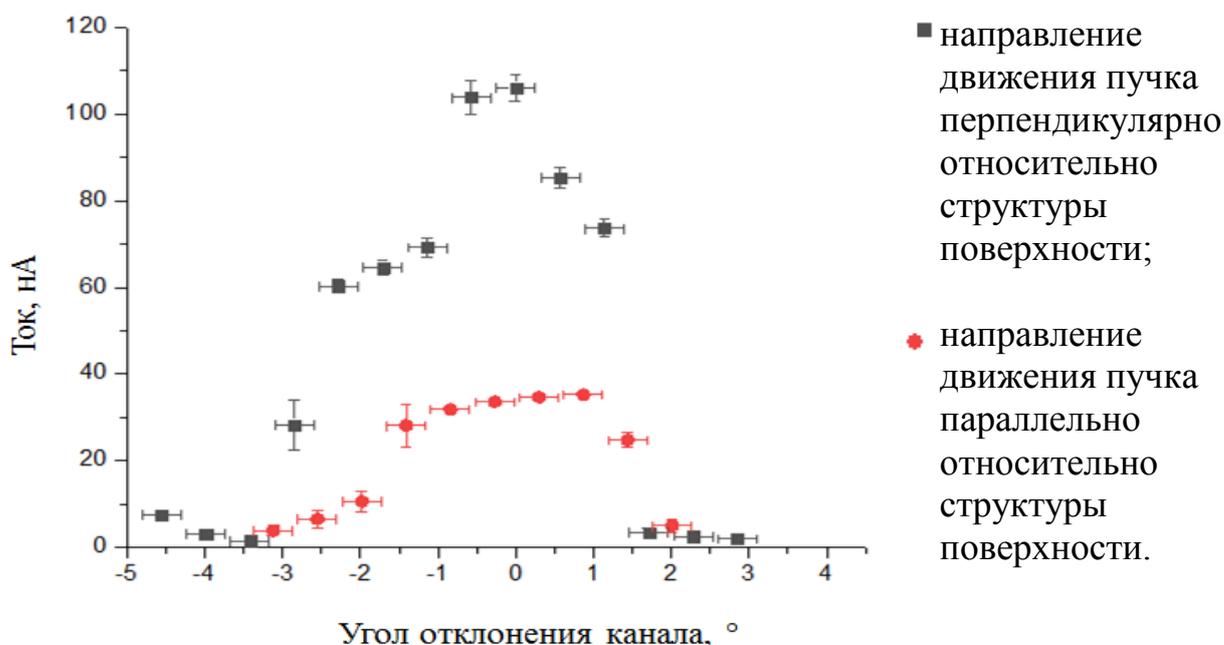


Рисунок 13. График зависимости прошедшего через канал тока, от угла наклона канала относительно оси падающего пучка в случае, когда штрихи, нанесенные на поверхность каждой из пластин, перпендикулярны и параллельны направлению движения пучка. Ток первичного пучка 120 нА.

В четвёртой главе представлена модель, позволяющая описать процесс взаимодействия электронов с энергией 10 кэВ со структурированной диэлектрической поверхностью. Для упрощения построения модели рассмотрено движение электронов вблизи периодически расположенных бесконечных равномерно заряженных струн. Период расположения струн

совпадает с периодом дифракционной решетки. Полагаем, что электрон движется строго перпендикулярно струнам. Проекции сил, действующих со стороны бесконечной равномерно заряженных струн на электрон, вычисляются по формулам (2):

$$F_x = \sum_{n=1}^N e \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r_n} \cos(\alpha_n),$$

$$F_y = \sum_{n=1}^N e \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r_n} \sin(\alpha_n), \quad (2)$$

где e – заряд электрона, λ – линейная плотность заряда струны, ϵ_0 – электрическая постоянная, r – расстояние между электроном и рассматриваемой струной, угол α для струны с номером n показан на Рисунке 14.

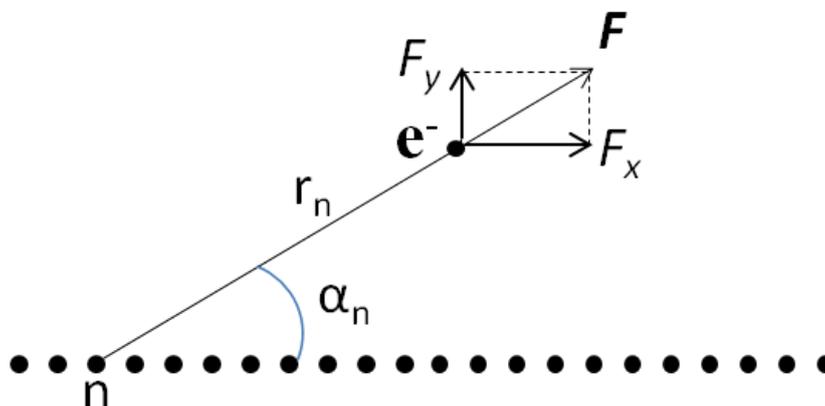


Рисунок 14. Геометрия движения электрона относительно струн.

На Рисунке 15 представлен результат сравнения моделирования траекторий движения электронов, движущихся вблизи структурированной и плоской металлизированной поверхностей. Расчёты соответствуют значениям: период – 600 штрихов/мм; длина пластины – 30 мм; ширина пластины – 2 мм; расходимость пучка – 0.25 градусов; прицельный параметр – 300 мкм, при условии, что ось пучка параллельна плоскости поверхности.

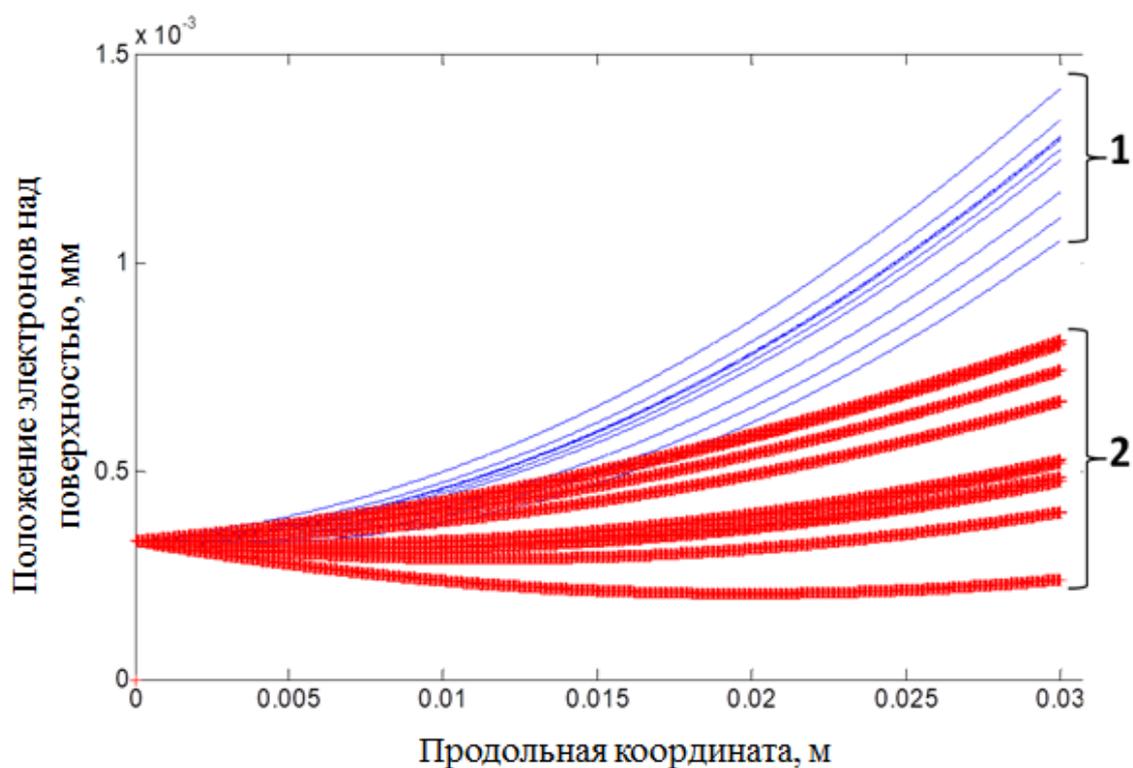


Рисунок 15. Траектории электронов, движущихся над металлизированной поверхностью диэлектрической пластины: 1- поверхность структурирована, 2 – гладкая поверхность. Полный заряд металлизированного слоя одинаков.

Из Рисунка 15 видно, что пучок электронов эффективнее отклоняется структурированной поверхностью, что подтверждает результаты выполненного экспериментального исследования.

В заключении изложены ключевые результаты выполненного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках выполненного исследования взаимодействия быстрых электронов с одиночными пластинами (гладкими или структурированными) или каналом, сформированным из таких пластин, можно выделить следующие основные результаты:

- Экспериментально показана возможность управления пучком ускоренных электронов с энергией 10 кэВ одиночными гладкими пластинами и каналами, изготовленными из керамик оксида алюминия и диоксида циркония, имеющих поликристаллическую структуру, а также из монокристалла ниобата лития. Показано, что каналы, сформированные из двух диэлектрических пластин, отклоняют пучок электронов эффективнее, чем отдельные пластины. Ценность результатов обосновывается распространением эффектов, связанных с управлением пучками заряженных частиц, на более широкий класс материалов с поликристаллической и кристаллической структурой.
- Показана реализация эффекта управления пучком ускоренных электронов, взаимодействующих со структурированными пластинами и каналами, поверхность которых металлизирована. Преимущество металлизации обосновывается более простым контролем распределения заряда по поверхности образца и, соответственно, получением более выраженных эффектов при наличии поверхностного рельефа.
- Экспериментально установлено, что управление пучком ускоренных электронов осуществляется более эффективно в случае, когда пучок электронов ориентирован перпендикулярно периодической структуре. На основе разработанной физико-математической модели дано обоснование наблюдаемого эффекта, состоящее в возникновении дополнительной отталкивающей силы со стороны периодической структуры за счёт формирования периодического распределения заряда.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи:

1. Вохмянина К. А., **Каплий А. А.**, Кубанкин А.С., Сотникова В.С., Никуличева Т.Б., Чепурнов А.С. Особенности скользящего взаимодействия быстрых электронов с диэлектрическими поверхностями / Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2017. – № 1. – С. 42-47.

2. Vokhmyanina K. A., Sotnikova V. S., **Kaplii A. A.**, Kubankin A. S., Ivashuk O. O., Kishin I. A., Nazhmudinov R. M., Sotnikov A. V. Possibility of using dielectric channels as deflecting systems for controlling accelerated electron beams / Glass and Ceramics. – 2018. – Vol. 74, № 9-10. – P. 355-357.

3. Vokhmyanina K. A., Sotnikova V. S., Sotnikov A. V., **Kaplii A. A.**, Nikulicheva T. B., Kubankin A. S., Kishin I. A. Modeling the process of interaction of 10 keV electrons with a plane dielectric surface / Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2018. – Vol. 422. – P.91–93.

Результаты интеллектуальной деятельности:

1. Патент № 168791 на полезную модель «Диэлектрический рельефный дефлектор пучка электронов», 2017 г.;

2. Свидетельство № 2017615350 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Моделирование и оптимизация параметров катодного узла электронной пушки», 2017 г.;

3. Свидетельство № 2018618728 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Моделирование электрического поля, создаваемого двумя пьезоэлектрическими кристаллами», 2018 г.