

На правах рукописи



Вохмянина Кристина Анатольевна

ОСОБЕННОСТИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ
С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

01.04.07 — Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Белгород 2021

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

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
Кубанкин Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

Астапенко Валерий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», главный научный сотрудник, лаборатория мультимедийных систем и технологий.

Ладыгин Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, сектор Лаборатории физики высоких энергий, начальник.

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.

Защита диссертации состоится 13.01.2022 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, к.17, ауд. 3-33.

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 «10» ноября 2021 г.

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



М.С. Тихонова

Актуальность темы исследования

Активные исследования в области скользящего взаимодействия пучков ускоренных заряженных частиц с диэлектрическими поверхностями начались с начала 2000-х после обнаружения эффекта управления (гайдинг-эффекта) положительными многозарядными ионами с помощью диэлектрических нанокапилляров [1,2]. Авторами этого исследования было показано, что пучок ионов Ne^{7+} проходит через каналы, сформированные в пленках майлара и полиэтилентерефталата путем травления ионных треков, без существенных потерь интенсивности первоначального пучка, зарядового и энергетического состояния ионов. При этом частично тенденция сохранялась даже при повороте мембран относительно оси падающего пучка на углы вплоть до $\pm 20^\circ$. Именно авторами указанных исследований для описания полученного эффекта был введен термин гайдинг-эффекта (guiding). Вслед за исследованием эффекта управления ионами с 2007 года начали проводиться эксперименты по управлению электронами [3,4].

В последнее десятилетие исследования процессов взаимодействия заряженных частиц с диэлектрическими поверхностями проводятся практически одновременно несколькими группами исследователей из Индии, Бельгии, Сербии, Китая, Японии, США и Германии. Основное внимание направлено на возможность управлять пространственными характеристиками пучков заряженных частиц с помощью устройств, созданных на основе диэлектрических каналов простых геометрических форм. Например, авторам работы [5] удалось увеличить плотность тока ионов гелия на четыре порядка с помощью одиночного стеклянного конусного канала. А в 2016 году удалось добиться стабилизации тока ионов [6], проходящих через конусный канал, что сделало возможным использование таких капилляров для биологических и медицинских исследований: в Японии запатентован и используется способ облучения живой клетки отдельными ионами с помощью закрытого конусного канала [7]. Уже сейчас эксперименты с использованием ионов с энергией МэВ нацелены на применение микронных пучков для анализа материалов, модификации поверхности, клеточной хирургии и т.д. [8].

При этом следует отметить, что работы в данной области остаются актуальными, и на сегодняшний день продолжают активные исследования управления параметрами пучков заряженных частиц с помощью

диэлектрических каналов различными международными научными группами.

Проведение комплексного исследования эффектов, возникающих при движении ускоренных электронов вблизи диэлектрических поверхностей, свойства которых модифицируются под воздействием пучков частиц, и определение оптимальных условий для управления пучками электронов диэлектрическими каналами является актуальной задачей в связи с принципиально новыми областями их применения в науке и технике.

Степень разработанности темы исследования

К моменту начала диссертационного исследования в областях управления пучками ускоренных электронов диэлектрическими поверхностями, свойства которых модифицируются под воздействием пучков частиц, стабильного успеха добиться не удалось. Получаемые экспериментальные данные носили противоречивый характер, возможно, ввиду отсутствия отработанной методики измерений токов прошедших через каналы электронов и их энергетического состояния. Кроме того, следует учесть принципиальную техническую трудность работы с электронами низких энергий. Авторы работ, выполнявшие исследования эффекта управления электронами с энергиями до 1 кэВ с помощью нанокapилляров и конусных макроразмерных каналов, сделали заключение, что повышение энергии электронов ведет к уменьшению эффекта управления вплоть до его полного исчезновения. Построение качественной модели эффекта управления также вызвало немало трудностей. Часть экспериментов указывала на то, что гайдинг обеспечивается рассеянием электронов пучка на атомах внутренней поверхности каналов, в то же время другие группы исследователей получали данные, приводившие к выводу о формировании на поверхности диэлектрика самосогласованного зарядового распределения, обеспечивающего отклонение пучка электронов.

Таким образом, к началу проведения диссертационных исследований отсутствовало комплексное экспериментальное исследование эффекта управления пучками электронов с энергией порядка 10 кэВ с помощью диэлектрических каналов. Кроме того не было теоретического обоснования и соответствующих численных моделей, позволяющих объяснить получаемые результаты. С учётом полученных, частично противоречивых данных других

авторов, в настоящей работе уделяется особое внимание не только изучению свойств пучков электронов, провзаимодействовавших с диэлектрическими образцами, но также анализируются процессы, протекающие на поверхности диэлектриков для более глубокого понимания изучаемых явлений в целом.

Цель и задачи

Целью диссертационной работы является выявление закономерностей и описание процессов скользящего взаимодействия ускоренных электронов с диэлектрическими поверхностями с учётом изменения свойств поверхностей под действием пучка.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- обнаружено отклонение пучков ускоренных электронов с помощью диэлектрических каналов различных конфигураций;
- разработана методика определения пространственных и спектральных характеристик пучка заряженных частиц;
- выполнено комплексное экспериментальное исследование управления пучком ускоренных электронов с помощью диэлектрических каналов различных конфигураций и материалов: плоские и цилиндрические каналы, изготовленные из стекла, керамики, лавсана; нанокapилляры, сформированные в пленке ПЭТ; массивы микроразмерных полисульфоновых волокон; сужающиеся стеклянные каналы;
- разработана феноменологическая модель скользящего взаимодействия ускоренных электронов с диэлектрической поверхностью. В основе модели лежит механизм образования динамического самосогласованного зарядового распределения. Модель учитывает процессы захвата электронов дефектами поверхности, вторичную электронную эмиссию, стекание заряда по поверхности;
- определено влияние пучка электронов с энергией 10 кэВ на модификацию поверхности диэлектриков при длительном облучении.

Научная новизна

В настоящей работе впервые убедительно продемонстрировано управление ускоренными электронами с помощью диэлектрических

поверхностей и каналов различных конфигураций из различных материалов: одиночных пластин, плоских и цилиндрических каналов, сужающихся капилляров.

Показана возможность контролируемого отклонения и фокусировки пучка электронов диэлектрическими поверхностями.

Разработан и апробирован новый метод оценки энергетических потерь электронов пучка после их взаимодействия с диэлектрической поверхностью.

Обнаружено влияние модификации поверхности диэлектрика на пропускную способность канала.

Предложена и апробирована модель формирования на поверхности диэлектрика самосогласованного зарядового распределения. Результаты расчета в рамках разработанной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе впервые в мире проведено комплексное экспериментальное и численное исследование возможности управления пучком ускоренных электронов с помощью диэлектрических каналов различных конфигураций. В экспериментах использовались капилляры, изготовленные из радиационно-стойких материалов, таких как стекло и керамика. Устройства на основе таких материалов могут подвергаться длительному воздействию пучка электронов, обеспечивая стабильный контроль пространственно-угловых параметров пучка. Капилляры, изготовленные из полимеров и полисульфоновых волокон, являющихся биосовместимым материалом, могут быть использованы в медицинских и биологических исследованиях.

Создание рабочей модели скользящего взаимодействия пучка электронов с диэлектрической поверхностью позволит осуществлять поиск наиболее оптимальных условий для эффективного использования управляющих свойств каналов, изготовленных из различных материалов. В частности, показана возможность контролируемого отклонения и фокусировки пучка электронов диэлектрическими поверхностями.

Таким образом, в работе решён ряд задач, в совокупности позволяющих сформировать новую область исследований, связанную с изучением механизмов скользящего взаимодействия пучков ускоренных электронов с диэлектрическими поверхностями. Главной особенностью изучаемых

процессов, отделяющих полученные результаты в отдельную область, является наличие изменения физических свойств диэлектрических поверхностей под воздействием пучков электронов, что формирует нетривиальную обратную связь между пучком и поверхностью. На основе проведённых исследований фундаментального характера впервые удалось зафиксировать управляемое отклонение и фокусировку пучков ускоренных электронов, что весьма ценно для прикладного использования, особенно для разработки энергоэффективных и миниатюрных элементов электронной оптики.

Методология и методы исследования

Поставленные в работе задачи экспериментальных исследований физики конденсированного состояния решались с применением методов ядерной физики и оптики пучков заряженных частиц.

Часть работ выполнялась с использованием научного оборудования ЦКП НИУ «БелГУ» и ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Для анализа энергетического состояния электронов пучка, взаимодействовавших с диэлектрической поверхностью, помимо стандартных методов (плоский и поворотный электростатический анализатор) использовался новый метод, разработанный в ходе диссертационных исследований. Метод основан на сравнении рентгеновских спектров исходного и прошедшего через канал пучка и позволяет оценить долю электронов, прошедших через канал с энергетическими потерями не более 10 %. Спектр генерируется в металлической пластине, материал которой выбран исходя из значения энергии характеристических пиков, близких к первоначальной энергии пучка электронов.

Для создания численной модели исследуемого процесса использовались методы компьютерного моделирования и численные методы обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. При взаимодействии пучка электронов с внутренней поверхностью диэлектрического канала наблюдается прохождение пучка через канал, ось

которого отклонена от оси падающего пучка электронов на угол, превышающий угол геометрического пропускания канала.

2. При взаимодействии пучка электронов с диэлектрическими каналами в режиме отклонения пучка каналом часть электронов пучка отклоняется без потерь энергии.

3. Диэлектрические сужающиеся капилляры позволяют увеличивать пространственную плотность пучка ускоренных электронов более чем на порядок.

4. При прохождении пучка ускоренных электронов через диэлектрические наноканалы наблюдается процесс вовлечения части электронов в режим упругого взаимодействия с внутренней поверхностью каналов даже при наклоне осей каналов относительно оси первичного пучка.

5. При скользящем падении пучка ускоренных электронов на плоскую диэлектрическую поверхность происходит модификация свойств поверхности, обеспечивающая контролируемое отклонение пучка поверхностью.

6. При увеличении тока пучка электронов, взаимодействующих с плоской диэлектрической поверхностью в режиме отклонения пучка поверхностью, угол отклонения пучка не меняется.

7. При описании процесса взаимодействия пучка ускоренных электронов с диэлектрическими поверхностями следует учитывать не только динамический характер зарядки поверхности первичными и вторичными электронами, но и изменение проводимости материала диэлектрика под действием пучка электронов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается откалиброванным оборудованием и воспроизводимостью результатов. Верификация модельных расчетов осуществлялась путем сравнения результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных.

Результаты работы были представлены более чем в 50 публикациях, в том числе:

- не менее 30 тезисов международных конференций и совещаний;
- не менее 20 публикаций в рецензируемых изданиях, из них не менее 15, индексируемых Scopus и/или Web of Science;
- один патент на полезную модель.

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях:

1. 37, 42, 43, 45-50 Международные конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, Россия
2. RREPS-2013, 23-28 сентября, Армения
3. RREPS-2017, 18-22 сентября, Гамбург, Германия
4. RREPS-2019, 16-20 сентября, Россия
5. 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO), 30 Jun - 04 Jul 2014, Россия
6. Channeling 2014, October 5-10, 2014 Capri (Naples) Italy
7. Зимняя школа ФКС-2016, Санкт-Петербург, 14-19 марта 2016 г.
8. Channeling 2016, 25-30 September, Sirmione-Desenzano del Garda, Italy
9. RUPAC 2016, 21 – 25 Nov. 2016, Россия
10. The 2nd international conference on particle physics and astrophysics, 10 October 2016 - 14 October 2016
11. 51-я Школа ПИЯФ по Физике Конденсированного Состояния 11-16 марта 2017, Санкт-Петербург, Россия
12. International Conference On Electron, Positron, Neutron and X -ray Scattering under External Influences October 2017, 2019 Yerevan – Meghri – Armenia

Содержание работы

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – 192 страницы, включая 99 рисунков и 4 таблицы.

Во **введении** дано краткое описание области исследования, методология и методы исследования, обоснована актуальность и практическая значимость проводимой работы, приведены положения, выносимые на защиту, и изложены основные результаты с обоснованием степени достоверности.

Основная часть диссертации состоит из шести глав.

В **первой главе** приведен краткий обзор экспериментальных работ по исследованию эффекта гайдинга (guiding), т.е. эффекта управления пучками ионов и электронов с помощью диэлектрических каналов без непосредственного контакта заряженных частиц с внутренними стенками.

При скользящем падении пучков заряженных частиц на диэлектрическую поверхность, на ней может образоваться одноименно заряженный слой, способный предотвращать взаимодействие основной части пучка с поверхностью. Образующееся зарядовое распределение, таким образом, может отклонять пучки заряженных частиц от их первоначального направления распространения. Данный эффект для положительных ионов, проходящих через наноразмерные каналы, сформированные в пленке майлара, впервые был доложен на конференции в 2000 г. [1] и детально описан в работе [2]. Результаты экспериментального исследования эффекта управления пучком многозарядных ионов Ne^{7+} с помощью мембраны ПЭТ с наноканалами длиной 10 мкм и внутренним диаметром 100 нм [2] приведены на рисунке 1.

Далее последовал ряд исследований прохождения положительно заряженных ионов через диэлектрические каналы различных конфигураций. Впечатляющий результат был получен при исследовании возможности фокусировки ионов гелия с помощью конусных стеклянных капилляров – плотность прошедшего через канал тока увеличилась на четыре порядка [5]. В 2016 году удалось добиться стабилизации тока ионов, проходящих через конусный канал [6], что сделало возможным использование таких капилляров для биологических и медицинских исследований: в Японии

запатентован и используется способ облучения живой клетки отдельными ионами с помощью закрытого конусного канала [7,8].

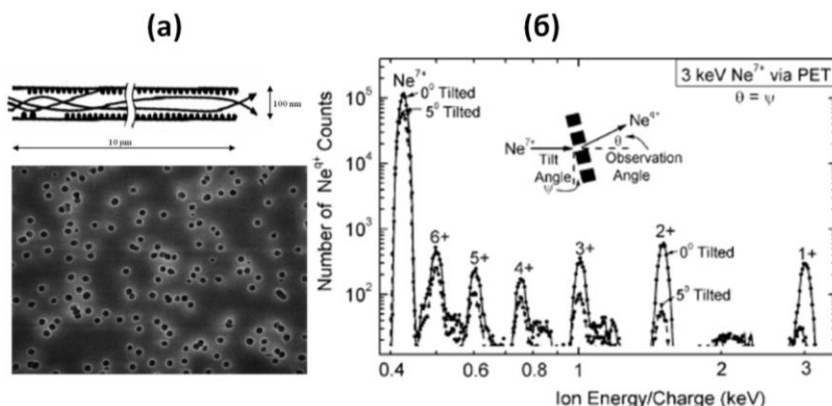


Рисунок 1 – Гайдинг ионов Ne^{7+} с энергией 3 кэВ, прошедших через мембрану ПЭТ толщиной 10 мкм и диаметрами каналов 100 нм. (а) – изображение фронтальной поверхности мембраны и схема канала с размерами; (б) – зависимость числа прошедших через каналы ионов от их энергетического и зарядового состояния для двух углов наклона мембраны относительно оси падающего пучка (0° и 5°) [2]

В отношении пучков электронов активные исследования в данной области ведутся с 2007 года. При прохождении заряженных частиц через нанокapилляры (пленки ПЭТ) с аспектным отношением около 30-50 (отношение длины канала к его внутреннему диаметру) были получены результаты, свидетельствующие о том, что часть пучка оседает на стенках канала, образуя самосогласованное зарядовое распределение, препятствующее взаимодействию остальной части пучка электронов с поверхностью канала. В результате, через канал без энергетических потерь проходит большая часть пучка при условии параллельности осей канала и пучка. При ориентации канала относительно оси пучка на углы от -10 до $+10$ градусов, электроны с энергией менее 1 кэВ следуют за каналом, как и ионы в аналогичных экспериментах. Однако с увеличением угла поворота канала величина тока пучка прошедших электронов довольно быстро спадает. В результате серии выполненных затем экспериментов был сделан вывод о том,

что при возрастании энергии электронов первичного пучка эффект управления электронами с помощью диэлектрических каналов уменьшается. Однако результаты пробного эксперимента, проведенного в начале диссертационного исследования, продемонстрировали наличие эффекта гайдинга для электронов с энергией 10 кэВ для макроразмерных каналов, а также для одиночных диэлектрических пластин [9].

Во **второй главе** приводится описание разработанной и созданной опытно-экспериментальной установки для проведения исследований процессов взаимодействия пучков ускоренных электронов с веществом.

Схема установки приведена на рисунке 2.

Разработанная экспериментальная установка допускает проведение работ по модернизации катодного узла, системы формирования и транспортировки пучка, доработке гониометра для проведения исследований поверхностных свойств материалов и спектрально-угловых свойств пучков электронов в широком диапазоне энергий и токов.

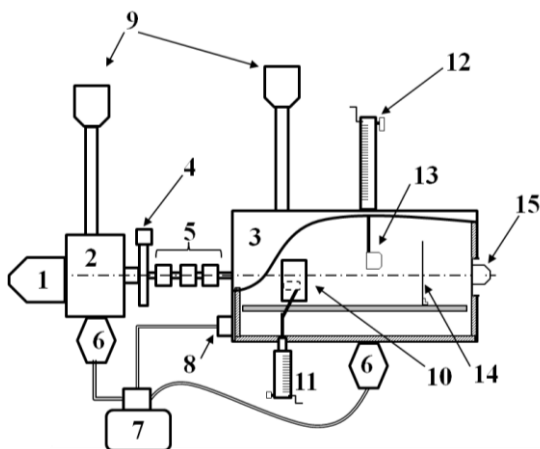


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: 1 – электронная пушка, 2 – вакуумная камера, 3 – вакуумная камера размещения мишеней, 4 – высоковакуумный шибер, 5 – электромагнитная система формирования пучка, 6 – турбомолекулярные насосы, 7 – форвакуумный насос, 8 – затвор, 9 – вакуумметры, 10 – гониометр, 11 и 12 – линейные трансляторы, 13 – цилиндр Фарадея, 14 – стеклянный экран, покрытый сцинтилляторным порошком, 15 – USB-камера

Важной частью секции расположения мишеней, кроме гониометра с тремя степенями свободы, является оборудование для диагностики пространственных характеристик и спектрометрии пучка. Набор элементов такого оборудования и их расположение в камере зависит от поставленной задачи.

Визуализация пространственного положения пучка в камере обеспечивается с помощью стеклянного экрана, покрытого полупрозрачным слоем серебра, предотвращающим зарядку экрана. На экран нанесена масштабная разметка и слой порошка сцинтиллятора. След пучка на экране фиксируется с помощью вебкамеры, расположенной на одном из фланцев с окном вне камеры мишеней. На рисунке 3 приведена схема эксперимента по визуализации гайдинг-эффекта для плоского канала. Канал наклоняется относительно оси падающего пучка, и на экране с помощью USB-камеры фиксируется положение следа пучка электронов, прошедших через канал. По величине сдвига прошедшего пучка относительно следа прямого пучка можно судить о наличии эффекта управления для исследуемого диэлектрического образца.

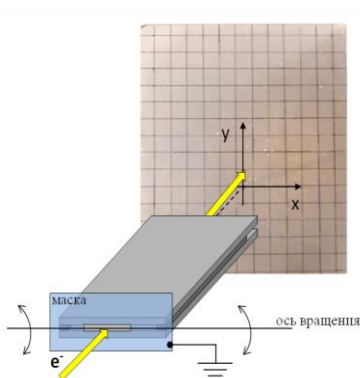


Рисунок 3 – Схема эксперимента с плоским каналом

Для измерения профиля и величины тока пучка может использоваться щелевой цилиндр Фарадея, устанавливаемый на линейном трансляторе. Конструкция системы транслятор - цилиндр Фарадея позволяет измерять профиль пучка электронов с пространственным разрешением не хуже 0.5 мм.

Для анализа энергетического состояния электронов падающего пучка и пучка, провзаимодействовавшего с диэлектрической поверхностью, использовались плоский и поворотный электростатический анализаторы. Помимо классических способов, был разработан и реализован метод оценки доли электронов пучка, энергетические потери которых не превышают 10 % от первоначальной энергии 10 кэВ. Основная идея метода заключается в сравнении спектров прямого пучка и пучка электронов, провзаимодействовавших с образцом. Спектры генерируются при попадании электронов на металлическую пластину и регистрируются полупроводниковым кремниевым детектором рентгеновского излучения Amptek XR100SDD fast с бериллиевым окном толщиной 12.5 мкм и эффективной площадью 17 мм², установленным на расстоянии 330 мм от центра металлической мишени. Для анализа электронов с энергией 10 кэВ была выбрана медная пластина. Спектр состоит из подложки тормозного излучения, имеющей плавную форму, и квазимонохроматических характеристических рентгеновских пиков, наиболее важными из которых являются линии с энергиями 8.04 кэВ (K α -линия меди) и 8.905 кэВ (K β -линия меди). Следует отметить, что обе K-линии меди могут генерироваться только электронами с энергией более 8.99 кэВ. Это свойство позволяет определить долю электронов, потери энергии которых не превышают 1.01 кэВ, от первоначальной энергии 10 кэВ.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований эффекта управления электронами с энергией 10 кэВ с помощью диэлектрических одиночных пластин и каналов различных конфигураций и материалов.

В рамках диссертационного исследования впервые были проведены комплексные эксперименты по отклонению пучков ускоренных электронов одиночными пластинами разных размеров, изготовленными из следующих материалов: стекло, оргстекло, керамика. Схема экспериментов и эскиз образца с заземленным входным торцом показаны на рисунке 4.

Эксперименты показали, что все указанные пластины отклоняют пучок электронов с энергией 10 кэВ, причем угол отклонения зависит от угла наклона поверхности пластины относительно оси падающего пучка. При этом было обнаружено, что угол отклонения пучка поверхностью пластины не зависит от величины тока падающего пучка. Один из результатов, полученных для стеклянной пластины, показан на рисунке 5.

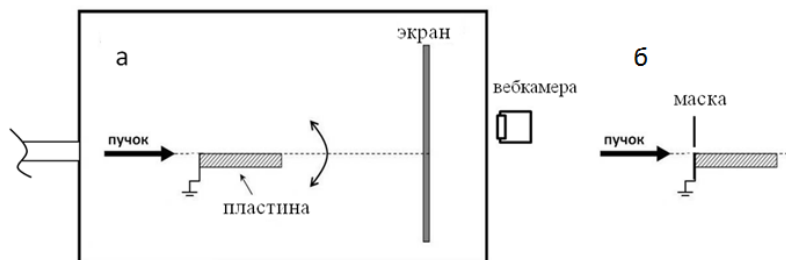


Рисунок 4 – а – общая схема экспериментов с диэлектрическими пластинами; б – пластина с маской перед входным торцом

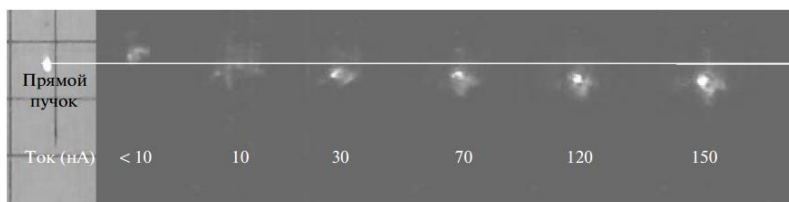


Рисунок 5 – Серия фотографий положения следа пучка на экране при разных токах пучка. Эксперимент выполнен для стеклянной пластины (длина 76 мм), поверхность которой параллельна оси падающего пучка

Данный результат легко объяснить, предположив образование на поверхности диэлектрика самосогласованного зарядового распределения, создающего поле, достаточное для отталкивания основной части пучка от поверхности. Причем поле будет зависеть только от поперечной составляющей энергии падающего пучка $E_0 \cos^2 \alpha$, где E_0 – полная кинетическая энергия падающего пучка, α – угол падения электронов пучка на поверхность пластины. В случае, если энергия электронов будет превышать величину образованного поля, электроны пучка будут продолжать подзаряжать поверхность пластины до достижения необходимого отталкивающего поля, после чего его рост прекращается. При этом следует учесть, что в начальный момент облучения пластины пучком электронов, пучок может рассеиваться и только спустя некоторое время на экране формируется его четкий след, положение которого более не меняется. Наблюдаемая закономерность объясняется возникновением наведенной

поверхностной проводимости, обеспечивающей стекание излишка заряда с поверхности. Причем, скорость стекания заряда, т.е. поверхностная проводимость диэлектрика, зависит от величины плотности тока падающего пучка.

Прямым подтверждением данного утверждения является визуализация модификации поверхности, которая была явно обнаружена на пластинах из оргстекла, эксперименты с которыми также продемонстрировали независимость положения следа пучка электронов на экране от величины тока падающего пучка. На рисунке 6 показана модификация поверхности пластин после их обработки этиловым спиртом.

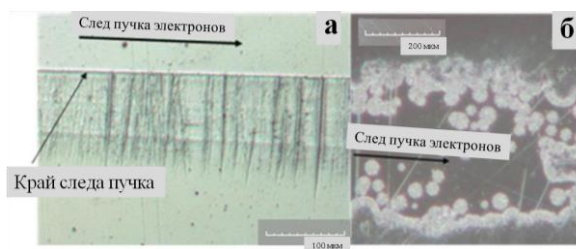


Рисунок 6 – Модификация материала поверхности пластины (ПММА) под действием пучка электронов с энергией 10 кэВ и током пучка 10 нА (а) и 100 нА (б)

В третьей главе также демонстрируются результаты экспериментов по отклонению пучка электронов от первоначального направления распространения с помощью плоских и цилиндрических диэлектрических каналов. На рисунке 7 показаны результаты визуализации поворота пучка с помощью цилиндрического и плоского каналов.

Еще одной важной конфигурацией диэлектрического канала является сужающийся конический канал. Помимо эффекта управления экспериментально была зафиксирована возможность фокусировки пучка электронов с энергией 10 кэВ. Фокусировка в данном контексте означает увеличение плотности тока пучка на выходе из канала по сравнению с плотностью тока входного пучка.

В экспериментах с конусными каналами было получено увеличение плотности тока пучка в среднем на два порядка.

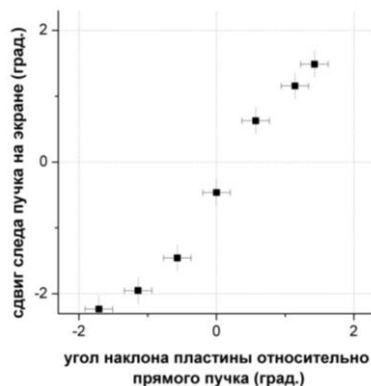
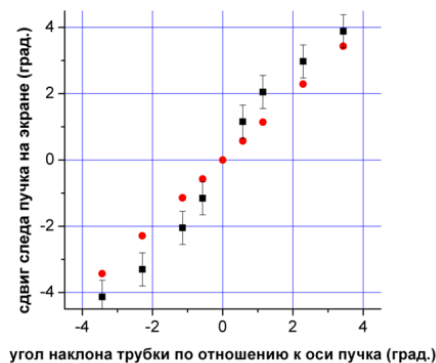


Рисунок 7 – Слева: управление пучком электронов с энергией 10 кэВ с помощью пластиковой трубки (лавсан) длиной 50 мм внутренним диаметром 1.6 мм, угол геометрического пропускания $\pm 1.83^\circ$; справа: управление пучком электронов с помощью плоского канала, составленного из стеклянных пластин длиной 50 мм, расстояние между пластинами 0.7 мм, угол геометрического пропускания – $\pm 0.8^\circ$

На рисунке 8 приведено схематическое изображение сужающегося стеклянного канала с фотографиями входного и выходного отверстий и временная зависимость прохождения электронов через такой канал.

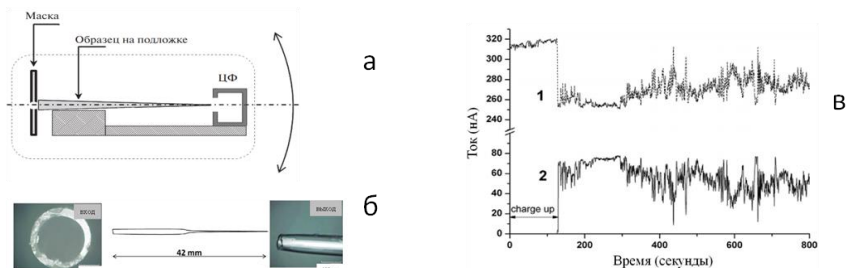


Рисунок 8 – а: схема эксперимента по исследованию эффекта управления с помощью конусного канала; б: эскиз капилляра и фотографии его входа и выхода (внутренние диаметры: вход 1.11 ± 0.02 мм, выход 57 ± 5 мкм); в: временная зависимость тока на маске (кривая 1) и тока электронов, прошедших через капилляр

Эффект фокусировки, т.е. увеличения плотности тока пучка непосредственно на выходе канала, был измерен также для электронов с энергиями 12 и 15 кэВ. Ниже приведена таблица с перечнем исследованных каналов и параметры режима проведения эксперимента.

Таблица 1 – Параметры исследованных капилляров, режимы и результаты проведенных экспериментов

Энергия электронов пучка				12 кэВ	
№ образца	Диаметр вх, ± 0.1 мм	Диаметр вых, мкм	Длина, мм	Падающий ток, ± 3 нА	Средний ток на выходе, нА
1	0.9	70	46	30	3.53 ± 0.66
2	0.76	30	48	30	2.68 ± 0.64
3	0.76	230	40	30	3.95 ± 0.5
4	0.76	10	46	30	3.37 ± 0.69
Энергия электронов пучка				15 кэВ	
1	0.9	70	46	30	5.52 ± 3.28
2	0.76	30	48	30	1.68 ± 1.04
3	0.76	230	40	30	0.78 ± 0.29
4	0.76	10	46	30	4.71 ± 2.99
Энергия электронов пучка				10 кэВ	
5	1	60	40	60	50
6	1	15	30	20	5.5
7	1	120	39	40	25
8	1	230	41	40	15

Следует отметить, что для энергии электронов 10 кэВ были взяты усредненные значения выходного тока после его стабилизации, полученные в работах [10,12]. Позднее были проведены дополнительные измерения для электронов с энергиями 12 и 15 кэВ, измерялись временные зависимости выходного тока пучка и ток на выходе капилляров, усредненный за все время стабильного пропускания канала.

Поскольку ток падающего пучка электронов и основные геометрические параметры исследованных капилляров близки, значительно отличаются только диаметры выходных отверстий, можно проследить зависимость

фокусирующей способности каналов (во сколько раз увеличивается плотность тока пучка на выходе из капилляра) от диаметра выходного отверстия для энергий 10, 12 и 15 кэВ. На рисунке 9 показаны получившиеся зависимости.

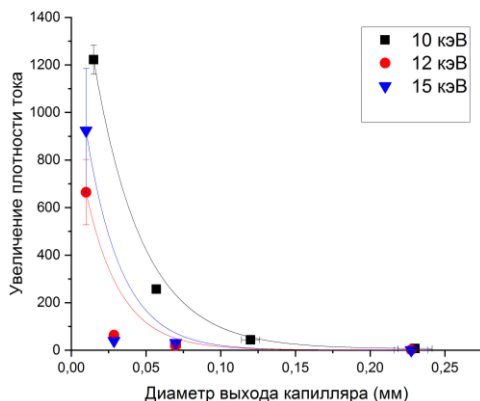


Рисунок 9 – Зависимости фокусирующей способности капилляров от диаметров выходных отверстий для разных энергий электронов (сплошными линиями обозначены экспоненциальные приближения полученных данных)

На основании данных, представленных на рисунке 9, нельзя однозначно судить о наличии зависимости фокусирующей способности капилляров от начальной энергии падающего в канал пучка, при этом для всех энергий электронов зависимость увеличения плотности тока пучка от диаметров выходных отверстий каналов близка к экспоненциальной. Можно сделать вывод о том, что фокусирующая способность сужающегося канала увеличивается с уменьшением диаметра выхода канала независимо от энергии электронов падающего пучка.

Эффективность процесса управления ускоренными электронами с помощью диэлектрических каналов оценивается не только долей частиц пучка, отклоненных капилляром от первоначального направления движения, но и энергетическим состоянием электронов после прохождения канала.

В **четвертой главе** приводятся экспериментальные данные по оценке энергетического состояния электронов, прошедших через диэлектрические каналы.

На рисунке 10 приведена схема эксперимента по исследованию эффективности эффекта управления с помощью конусного канала с использованием метода сравнения рентгеновских спектров. Электронная пушка генерировала электронный пучок с энергией 10 кэВ при токе 10–1500 нА. Диаметр пучка в эксперименте 1 мм (ширина на полувысоте), расходимость менее 0.25° . Электроны пучка проходили или через отверстие в маске без канала, либо через канал, взаимодействуя с его внутренней поверхностью, и попадали на медную мишень, в которой генерировалось рентгеновское излучение. Угол $\theta = 14^\circ$ между металлической мишенью и осью детектора был выбран экспериментально, исходя из оптимальных условий наблюдения исследуемого эффекта: достаточный угол обзора и, соответственно, оптимальный уровень рентгеновского излучения, измеряемый детектором.

Рисунок 10 – Схема эксперимента. Вставка - алюминиевая маска с двумя отверстиями: для исследования падающего пучка (слева, пустое отверстие) и пучка, прошедшего через капилляр (справа, с установленным сужающимся каналом)

По соотношению числа событий в характеристических пиках для прямого и прошедшего канал пучков делался вывод об энергетическом состоянии последнего.

На рисунке 11 приведены результаты эксперимента по исследованию эффекта управления для конусного канала, изготовленного из стекла Soda Lime Glass (SiO_2 — 71%, Al_2O_3 — 0–2%, Na_2O — 15%, $\text{CaO}+\text{MgO}$ — 13–16%), длина 43 мм, величины входного/выходного диаметров 1.15/0.193 мм, угол геометрического пропускания $\pm 0.73^\circ$.

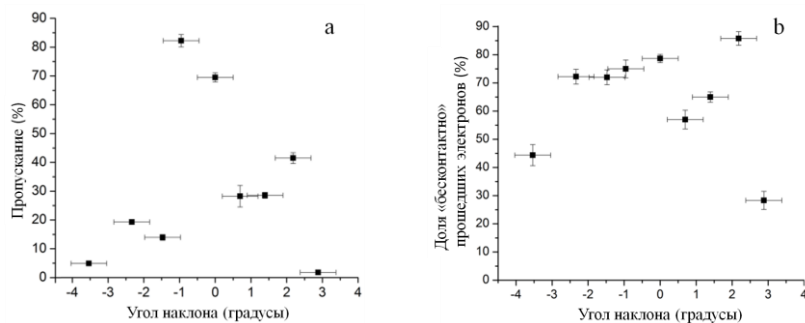


Рисунок 11 – Доля электронного пучка (пропускание), прошедшего через конический капилляр (а) и доля электронов прошедшего пучка, энергетические потери которых не превышали 10% (б), в зависимости от угла наклона канала

В данном случае плотность тока пучка на выходе из канала увеличилась в 15 раз. При этом сфокусированные электроны сохраняют большую часть своей энергии, т.е. проходят через сужающийся канал без непосредственного взаимодействия с его внутренней поверхностью.

Аналогичные измерения по определению эффективности гайдинга для 10 кэВ электронов были проведены с наноразмерными каналами, сформированными в пленке ПЭТ (длина каналов 10 мкм, диаметры – 800, 400 и 200 нм). Если рассматривать наноканалы как потенциальное устройство, отклоняющее электронный пучок на небольшой угол, важно оценить, какая часть электронов, попадающих в каналы, не испытывает значительных потерь энергии. В ходе исследования было обнаружено, что электроны проходят через наноканалы под углами наклона мембран, превышающими

углы геометрического пропускания. При этом для диэлектрических каналов диаметром 800 нм большая часть электронов, проходящих через каналы, испытывает потери энергии менее 10 %. Для каналов диаметром 400 и 200 нм пропускание в несколько раз ниже, несмотря на близкую прозрачность мембран. Но даже в этом случае около 30 % прошедших электронов испытывают потери энергии менее 1 кэВ в пределах геометрического угла пропускания.

Также в главе приводятся результаты экспериментов по изучению режимов управления пучком ускоренных электронов с помощью полисульфоновых полых волокон с внутренним диаметром около 200 мкм и длиной 10 и 4.75 мм и с пластиковыми и керамическими макроразмерными каналами.

Результаты экспериментов во всех случаях показали наличие возможности управления ускоренными электронами. При этом выяснилось, что при прохождении через каналы пучок электронов может модифицировать внутреннюю поверхность каналов (полисульфоновое волокно) или провоцировать образование нагара (керамический канал), способствующего улучшению свойств в отношении рассматриваемого эффекта – улучшаются временные характеристики и прозрачность каналов.

В пятой главе диссертации приведен обзор существующих на сегодняшний день модельных представлений в рассматриваемой области.

Во второй половине двадцатого века начали проводиться работы по исследованию возможности управления импульсными пучками электронов и протонов высоких энергий с помощью прямых и изогнутых стеклянных цилиндрических каналов и одиночных пластин. Результаты экспериментов подтвердили такую возможность. Объяснением полученного эффекта, т.е. отклонения пучков заряженных частиц диэлектрическими каналами, обосновывалось наличием большого пространственного заряда, приводящего к «рассыпанию» пучка. Часть пучка электронов, попадая на диэлектрическую поверхность, формировала на ней плазму, из которой основная часть электронов пучка вытягивала ионы, которые, в свою очередь, стягивали часть пучка электронов, фокусируя их в цилиндрическом канале. Несмотря на успешные результаты, полученные в данном направлении, работы по управлению сильноточными пучками заряженных частиц высоких энергий не получили дальнейшего развития. Диссертационные исследования проводились в области достаточно низких плотностей тока заряженных

частиц, когда пространственный заряд пучка играет пренебрежимо малую роль. Поэтому эффект управления в указанной области исследований в контексте предположений, изложенных выше, объяснить нельзя.

Здесь важно отметить, что наиболее обоснованная и верифицируемая модель была построена для пучков положительно заряженных ионов низких энергий и токов. Основная идея – часть падающего в канал пучка формирует на поверхности диэлектрика самосогласованное зарядовое распределение, препятствующее непосредственному контакту со стенками остальной части пучка. Для описания пропускания положительных ионов диэлектрическими наноканалами был предложен сценарий, показанный на рисунке 12 [2].

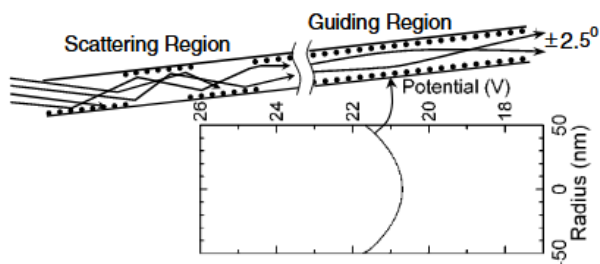


Рисунок 12 – Управление многозарядными ионами в капилляре ПЭТ. График показывает результаты расчета потенциала внутри капилляра. Влияние соседних капилляров увеличивает абсолютное значение потенциала почти в 10 раз, при этом глубина потенциала остается неизменной [2]

Авторы работы рассматривают два участка, называемых рассеивающей и направляющей областью. Причем процессы, происходящие в области рассеяния, не зависят от процессов в направляющей. В первой области ионы отклоняются от одной стороны капилляра к другой. Отклонение подразумевает угловое искажение (усиленное шероховатостью поверхности), и, следовательно, после нескольких событий рассеяния ионы теряют «память» о направлении падения (наклона каналов). Затем, во второй области, ионы направляются на выход капилляра. Данная модель, в особенности для области рассеяния, неоднократно модифицировалась, ее обобщение приведено в работе [13].

В случае скользящего взаимодействия с диэлектрической поверхностью пучков нерелятивистских электронов с энергиями до 100 кэВ, модель, созданная для ионов, в полной мере не работает.

Результаты экспериментов по исследованию эффекта управления пучками электронов с помощью диэлектрических поверхностей достаточно сильно отличаются от результатов подобных работ с пучками ионов, что свидетельствует о существенных отличиях в процессах скользящего воздействия пучков ионов и электронов на диэлектрик. Для объяснения эффекта управления пучками электронов с помощью диэлектрических каналов предлагались два подхода: образование самосогласованного динамического зарядового распределения на внутренней поверхности канала и рассеяние электронов на атомах приповерхностного слоя. Большая часть экспериментальных данных свидетельствует в пользу зарядки поверхности. В случае скользящего взаимодействия с диэлектрической поверхностью пучков электронов, модель, созданная для ионов, в полной мере не работает. В моделях для ионов не учитывается, например, образование положительно заряженных областей на поверхности вследствие вторичной электронной эмиссии. Кроме того, также возникли вопросы, связанные со временем зарядки каналов при их различной выдержке под пучком. Было предположено, что пучок может оказывать влияние на свойства материала, из которого изготовлены каналы. Данного эффекта для ионов также не наблюдалось.

Таким образом, исследования скользящего взаимодействия пучка электронов с диэлектрической поверхностью в теоретическом плане столкнулись с рядом трудностей. Модели, разработанные для ионов, не могли использоваться напрямую для электронов, поскольку не учитывали, например, вторичную электронную эмиссию или влияния тока пучка электронов на проводимость поверхности.

В **шестой главе** представлена и апробирована модель, позволяющая качественно описать процесс скользящего взаимодействия пучка электронов с диэлектрической поверхностью с учетом не только динамического характера зарядки поверхности первичными и вторичными электронами, но и изменения проводимости материала диэлектрика под действием пучка электронов. В первом параграфе главы представлены общие положения описания процесса образования самосогласованного распределения на поверхности диэлектрика под действием пучка электронов. В последующих

параграфах разработаны и численно реализованы варианты модели взаимодействия электронов с одиночной пластиной (одномерный и двумерный случай), в последнем параграфе главы приведен результат численного исследования прохождения электронов через конический канал с помощью пространственной модели скользящего взаимодействия электронов с внутренней стенкой канала. Компьютерное моделирование осуществлялось с применением «струйного» подхода, предложенного ранее для исследования управления ионными пучками [14]. Подход заключается в том, что вместо расчета траекторий отдельных электронов рассчитываются траектории конечного числа «струй», на которые делится пучок заряженных частиц (рисунок 13).

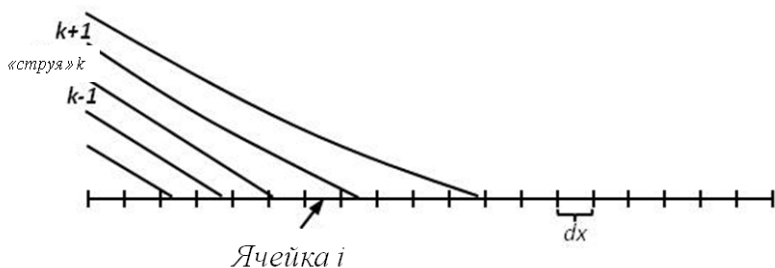


Рисунок 13 – Пояснение к методу «струй»

В случае с одиночной пластиной формирование заряда на поверхности диэлектрика обеспечивают два процесса: – захват электрона поверхностью в месте контакта (на поверхности образуется единичный отрицательный заряд) и вторичная электронная эмиссия (на поверхности может образоваться положительный заряд). Коэффициент вторичной электронной эмиссии определяется свойствами поверхности мишени, энергией первичного электрона и углом падения электрона на поверхность мишени. Для монохроматического пучка электронов из качественных соображений была выбрана функция следующего вида (в единицах заряда электрона):

$$W = -1 + \frac{G}{\exp(\theta/T)^2} \quad (1)$$

Здесь G – параметр, отвечающий за максимально возможное количество вторичных электронов при $\theta = 0$, T – параметр, связанный со свойствами материала диэлектрика, определяемый из сравнения с результатами экспериментов, θ – угол падения электрона на поверхность; второе слагаемое в формуле характеризует количество электронов, покинувших поверхность при падении на нее первичного электрона.

Стекание заряда за некоторый малый интервал времени dt определяется поверхностной проводимостью (подвижностью зарядов и поверхностным полем) диэлектрика и стеканием заряда через объем. Принимая во внимание, что поверхностная проводимость диэлектрика может на несколько порядков превышать объемную проводимость, разработанная модель учитывает движение заряда только по поверхности, причем оно происходит в обоих направлениях: параллельно оси электронного пучка и перпендикулярно ей. Вблизи заземленного края в направлении, перпендикулярном оси пучка, заряд стекает быстрее (из-за кулоновского отталкивания) и тем самым увеличивает утечку. Таким образом, чтобы учесть этот механизм для одномерной модели, в формулу был включен коэффициент, зависящий от расстояния d между рассматриваемой точкой поверхности и заземленным торцом:

$$\Delta q = q \cdot \alpha \cdot dt \cdot (1 + A \cdot \exp(-\sqrt{d/l})) \quad (2)$$

где Δq – доля стекающего заряда на рассматриваемом участке, A и l – параметры, связанные со скоростью стекания заряда в зависимости от удаленности от заземленного торца, q – заряд, накопившийся в той же области поверхности к моменту времени t , параметр α характеризует проводимость диэлектрика.

В процессе моделирования отклонения пучка электронов диэлектрической поверхностью для разных токов пучка неизменность угла отклонения электронов, полученная экспериментально в работе [15], достигалась при изменении параметра модели α , отвечающего за скорость стекания заряда.

На рисунке 14 показана зависимость значений параметра от величины тока падающего пучка.

Данный результат, опубликованный в [16], явно свидетельствует о зависимости поверхностной проводимости от величины плотности тока падающего пучка электронов. Причем в данном случае нельзя судить о природе данной зависимости – это изменение элементного состава диэлектрика или иная модификация структуры поверхности пучком электронов. Созданная модель дает хорошее согласие с экспериментами и позволяет проследивать динамику образования заряда на поверхности и отслеживать возможные осциллирующие сдвиги следа пучка на экране. Недостатком модели является большое количество свободных параметров.

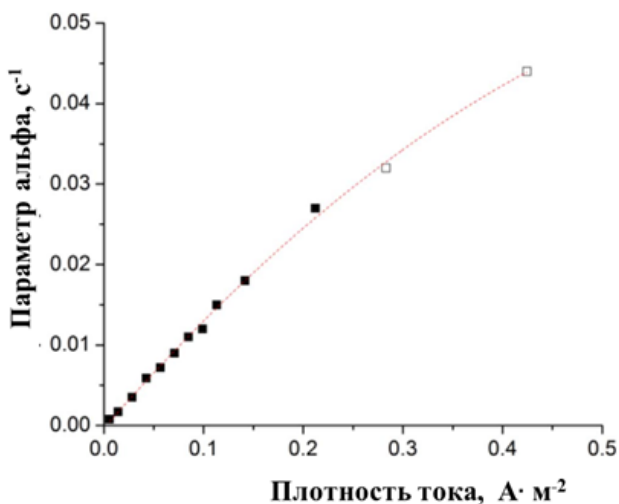


Рисунок 14 – Зависимость параметра α от плотности тока падающего пучка электронов. Пунктирная линия – результат экстраполяции данных нелинейной функцией, белые квадраты – параметры, рассчитанные для больших значений плотности тока в предположении независимости угла отклонения от плотности тока пучка [16]

Используя в качестве основы предыдущую модель, была построена двумерная модель взаимодействия электронов с диэлектрической поверхностью. В диссертационной работе приводится подробный алгоритм реализации такой модели. Зарядка поверхности падающим электроном

учитывалась с помощью выражения (1) одномерной модели. Формирование зарядового распределения на поверхности пластины также должно учитывать движение заряда по поверхности под действием поверхностного поля и утечку заряда через заземленный край. Стеkanie заряда в общем случае определяется поверхностной проводимостью (подвижностью зарядов и поверхностным электрическим полем) диэлектрика и стеканием заряда через объем. Принимая во внимание тот факт, что поверхностная проводимость диэлектрической пластины много выше проводимости объемной, в рассматриваемой модели также учитывалась утечка заряда только по поверхности. Движение зарядов по поверхности происходит за счет электрических полей, создаваемых уже сформированными поверхностными заряженными областями. Под действием электрического поля, носители заряда, согласно дрейфовой модели, движутся по поверхности пластины со скоростями, пропорциональными значениям соответствующих компонент напряженности поля. В рамках модели был создан алгоритм для расчета дрейфового механизма стекания заряда. На рисунке 15 показаны результаты моделирования поверхностного зарядового распределения на пластине длиной 35 мм, сформированного за 1 мс. Использовались следующие параметры моделирования: $G = 4$, $T = 0.3^\circ$, расходимость пучка 0.7° , $\mu = 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Что такое μ и что по осям

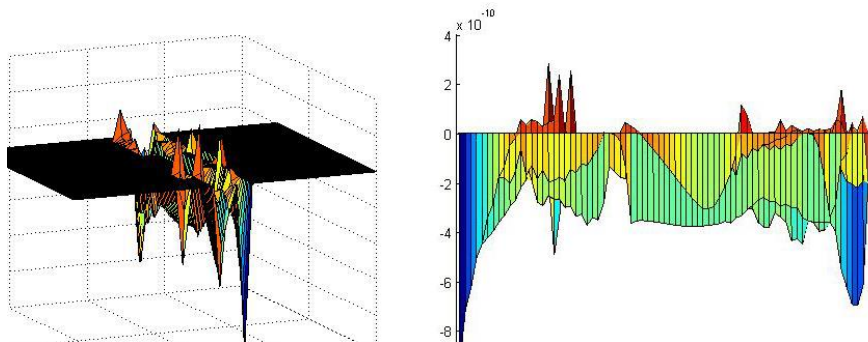


Рисунок 15 – Результат моделирования поверхностного распределения заряда на пластине длиной 35 мм

Результаты моделирования смещения следа пучка на экране в зависимости от угла наклона пластины приведены на рисунке 16. Данные на

графике (рисунок 16 слева) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в работе [9].

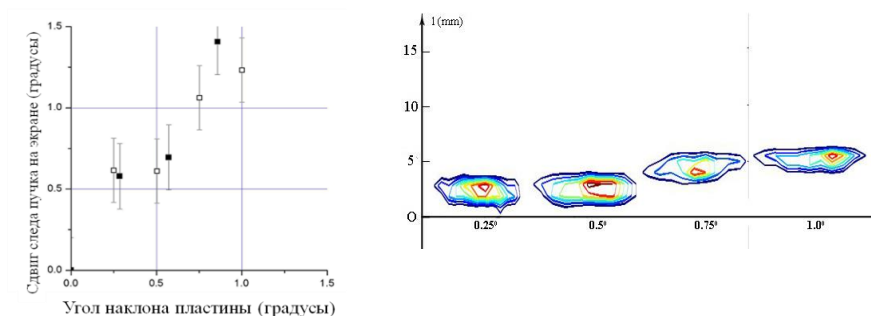


Рисунок 16 – Смещение следа пучка на экране в зависимости от угла наклона пластины длиной 35 мм относительно оси падающего пучка (слева: сравнение экспериментальных данных с расчетом, справа: моделирование смещения и структуры следа)

Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными, поэтому можно сделать вывод о потенциальной возможности использования модели для объяснения механизма скользящего взаимодействия электронов с диэлектриком.

В последнем параграфе главы приведено описание модели движения электронов с энергией 10 кэВ через конический диэлектрический канал.

Общие положения модели:

- При построении пространственной модели прохождения электронов через конический канал выходом вторичных электронов пренебрегалось.

- При описании стекания заряда, которое проходит по поверхности (в тонком приповерхностном слое) учитывались величина поверхностного поля, подвижность зарядов (как параметр), а также зависимость стекания в каждой локальной точке поверхности от величины тока падающего на нее пучка, т.е. от величины заряда. Ток утечки заряда через сечение площадью S в произвольной точке поверхности с зарядом q_e , выражается зависимостью (3):

$$I = nq_e\mu ES \cdot Ke^{(q/q_0)^Y} \quad (3)$$

Здесь n – концентрация электронов в приповерхностном слое, μ – поверхностная подвижность электрона в диэлектрике, E – величина поверхностного поля, q_0 , γ и K – параметры, подбираемые из сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

При построении модели использовался «струйный» подход.

На рисунке 17 показана реализация численной модели для конического канала со следующими параметрами: длина 20 мм, диаметр входного/выходного отверстия – 0.7 и 0.3 мм соответственно.

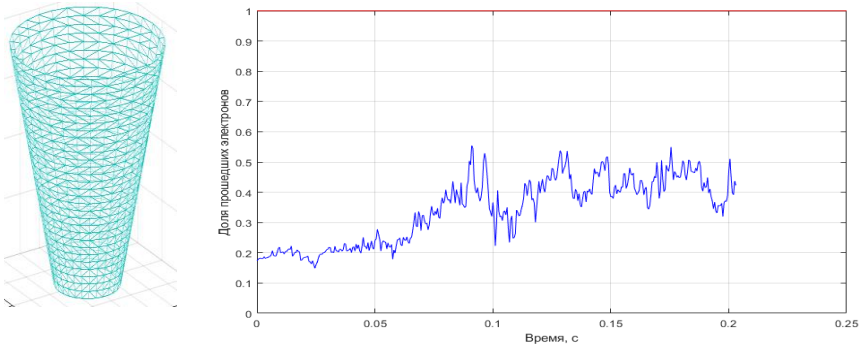


Рисунок 17 – Изображение триангулированной сетки конуса и результат моделирования временной зависимости пропускания 10 кэВ электронов через конусный канал (справа). Результаты получены при следующих параметрах: $q_0 = -5 \cdot 10^{-13}$, $\gamma = 0.5$ и $K = 10^{10}$

Для данных параметров плотность пучка на выходе из канала превысила плотность тока на входе в 2.3 раза.

При моделировании был использован метод численного интегрирования уравнений движения – метод Верле. Уравнения движения были записаны в следующей форме:

$$\begin{aligned}\vec{X}(t + \Delta t) &= \vec{X}(t) + \vec{v}(t)\Delta t + \frac{1}{2} \vec{a}(t)\Delta t^2 \\ \vec{v}(t + \Delta t) &= \vec{v}(t) + \frac{\vec{a}(t) + \vec{a}(t + \Delta t)}{2} \Delta t\end{aligned}\tag{4}$$

Динамика изменения распределения заряда на внутренней поверхности канала изображена на рисунке 18. На рисунке 18 (а) показано распределение заряда в момент времени 0.04 секунды. Заряд распределен неравномерно. Отчетливо видны области с большой концентрацией заряда (синим). Попадая в капилляр, пучок электронов облучает небольшую его область, а затем отталкивается от нее. Так, проходя все дальше по каналу, пучок (красные линии) совершает несколько осцилляций и оставляет несколько сильно заряженных пятен на стенках капилляра. На рисунке 18 (б) изображен тот же канал в момент времени 0.2 секунды. Зарядовое распределение в капилляре претерпело сильные изменения. Под действием поверхностного электрического поля заряд более равномерно распределился по капилляру. Выходной торец капилляра характеризуется наибольшей плотностью заряда. Пучок электронов сфокусирован и выходит из капилляра преимущественно вдоль его оси, т.е. наблюдается гайдинг-эффект.

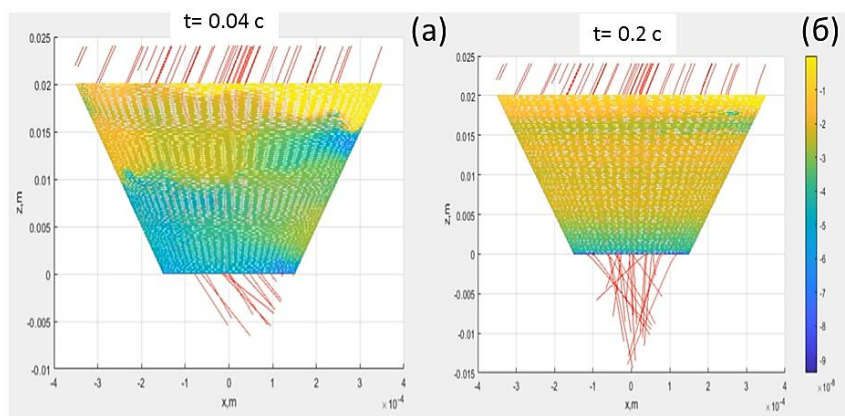


Рисунок 18 – Распределение заряда на стенках капилляра. (а) – $t = 0.04 \text{ c}$, (б) – 0.2 c . Цветовая шкала справа показывает величину заряда в условных единицах от желтого цвета (минимальный заряд) до темно-синего цвета – максимальный заряд

Численное моделирование движения электронов через конусный диэлектрический канал показало хорошее согласие с данными экспериментов. Совершенствование численной реализации разработанной

модели в дальнейшем позволит делать предварительные оценки пропускной, фокусирующей и управляющей способности конусных каналов.

В заключении работы приведены основные результаты диссертационного исследования, а также описаны перспективы дальнейшей разработки темы.

Основные результаты

– Выполнен комплекс экспериментальных работ и проведен анализ процессов, возникающих при скользящем взаимодействии пучков ускоренных электронов с диэлектрическими поверхностями. Данный вид взаимодействия заряженных частиц с веществом является определяющим при изучении возможности управления пучками ионов и электронов с помощью диэлектрических каналов, изменяющих свои свойства под воздействием пучков.

– Достоверно показано, что при взаимодействии пучка электронов с внутренней поверхностью диэлектрического канала наблюдается прохождение пучка через канал, ось которого отклонена от оси падающего пучка электронов на угол, превышающий угол геометрического пропускания канала. Данный эффект продемонстрирован для плоских, цилиндрических и конических капилляров, изготовленных из следующих диэлектрических материалов: стекло, ПЭТ, керамика и такой биосовместимый материал, как полисульфоновое волокно. При скользящем взаимодействии пучка электронов с диэлектрической поверхностью возможна модификация свойств материала диэлектрика, приводящая к изменению поверхностной проводимости, что в случае исследованных каналов ведет к улучшению характеристик эффекта управления.

– Анализ энергетического состояния прошедших через диэлектрические капилляры электронов показал, что при взаимодействии пучка электронов с внутренней поверхностью канала в режиме отклонения пучка каналом часть электронов пучка отклоняется без существенных потерь энергии. Проведение такого анализа стало возможным благодаря новому, разработанному в рамках диссертационных исследований, методу оценки доли пучка электронов, энергетические потери которых не превышают 10 % от первоначальной энергии падающих в канал электронов. Метод позволяет

анализировать пучки прошедших через канал электронов даже при их значительной угловой расходимости.

– Важнейшим результатом исследования является доказательство того, что диэлектрические сужающиеся конусные капилляры позволяют увеличивать пространственную плотность пучка ускоренных электронов более чем на порядок.

– Впервые проведено экспериментальное исследование возможности управления ускоренными электронами с помощью диэлектрической полимерной мембраны. Результаты экспериментов показали, что при прохождении пучка электронов через диэлектрические наноканалы наблюдается процесс вовлечения части электронов в режим упругого взаимодействия с внутренней поверхностью каналов даже при наклоне осей каналов относительно оси первичного пучка.

– Обнаружен эффект управления пучком электронов с помощью диэлектрической пластины, т.е. при скользящем взаимодействии пучка ускоренных электронов с плоской диэлектрической поверхностью возможна реализация условий, при которых происходит контролируемое отклонение пучка поверхностью. Причем, в процессе управления электронами с помощью плоской поверхности, изготовленной из оргстекла, в явном виде наблюдается модификация области взаимодействия электронов с поверхностью. Данная модификация не отражается на управляющих свойствах поверхности. Кроме того, при увеличении тока пучка электронов, взаимодействующих с плоской диэлектрической поверхностью в режиме отклонения пучка поверхностью, угол отклонения пучка не меняется, что говорит о зависимости поверхностной проводимости диэлектрика от плотности тока падающего пучка электронов.

– Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показал, что основным процессом, объясняющим эффект управления пучком ускоренных электронов с помощью диэлектрической поверхности или канала, является образование поверхностного самосогласованного зарядового распределения. При этом поверхностное распределение заряда образуется под действием части проходящего вдоль поверхности пучка электронов и определяется динамическим равновесием процессов зарядки поверхности и стекания излишков заряда. Для описания полученных результатов создана модель процесса взаимодействия пучка ускоренных электронов с диэлектрическими поверхностями, которая учитывает не только

динамический характер зарядки поверхности первичными и вторичными электронами, а также изменение проводимости материала диэлектрика под действием пучка электронов.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Несмотря на достаточно обширный круг экспериментальных работ, выполненных в рамках диссертационных исследований, остается ряд задач, требующих дальнейшей более глубокой проработки.

Возможность отклонения пучка электронов от первоначального направления распространения определяется процессом скользящего взаимодействия электронов с поверхностями диэлектриков. Данный процесс определяется динамическим равновесием нескольких конкурирующих эффектов – зарядкой диэлектрической поверхности и стеканием части накопленного заряда. Причем стекание заряда обеспечивается поверхностной проводимостью диэлектрика, зависящей от плотности тока падающего пучка и величины сформировавшегося на поверхности диэлектрика заряда. Таким образом, управление пучками ускоренных электронов диэлектрическими каналами возможно благодаря модификации внутренней поверхности каналов вследствие ее облучения. Одним из направлений разработки данной темы является определение природы модификации поверхности – это могут быть дефекты поверхности, связанные с образованием углеродного налета, или увеличение проводимости облучаемой области диэлектрика вследствие длительного воздействия на нее пучка электронов.

Еще одним перспективным направлением исследований в данной области является поиск условий стабильного пропускания и фокусировки пучков электронов с помощью конусных диэлектрических каналов. Данная тема актуальна ввиду ее большой практической значимости, например, для формирования микроразмерных интенсивных пучков электронов для электронной литографии или создания микронных источников рентгеновского излучения для локального воздействия на живые биологические объекты.

Список используемой литературы

1. Stolterfoht N., Bremer J. H, Hoffmann V. et al. Transmission of 3-keV Ne7+ through 80 nm sized ion tracks etched in thin Mylar foils // Proceedings of the 10th International Conference on the Physics of Highly Charged Ions, Book of Abstracts, Berkeley, Ca, Monday posters, 2000.
2. N.Stolterfoht [et al.] Transmission of 3 keV Ne7+ ions through nanocapillaries etched in polymer foils: evidence for capillary guiding // Phys.Rev.Lett. – 2002. – V.88. – P. 133-201
3. S. Das [et al.] Inelastic guiding of electrons in polymer nanocapillaries // Physical review. – 2007. – Vol.76.
4. A. Milosavljević [et al.] Guiding of low-energy electrons by highly ordered Al₂O₃ nanocapillaries // Physical review. – 2007. – Vol.75.
5. T. Nebiki [et al.] Focusing of Me beams by means of tapered glass capillary optics /// J. Vac. Sci. Tech. – 2003. – Vol.21. №5.
6. T. Ikeda [et al.] Stable transmission of slow highly charged ions through tapered glass capillary with active discharging method for sub-micron sized beams // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol.109. №13.
7. T. Ikeda, Japan patent no. 2011-161568. – 2011.
8. Ikeda, T. Applications of Microbeams Produced by Tapered Glass Capillary Optics // Quantum Beam Sci. 2020. – Vol.4, № 2. – P.22
9. K.A. Vokhmyanina [et al.] Investigation of Contactless Electron Transmission through Dielectric Channels //Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2013. – Vol.7, №2.
10. Vokhmyanina K.A., Pokhil G.P., Zhukova P.N., Irribarra E., Kubankin A.S., Levina V.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N. and Kishin I.A. Guiding of a beam of 10 keV electrons by micro size tapered glass capillary // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2015. – Vol.355. – P.307-310.
11. Vokhmyanina K.A., Sotnikova V.S., Kishchin I.A., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Sotnikov A.V., Kaplii A.A., Pleskanov A.A., Pokhil G.P, Propagation of 10 keV electrons through tapered glass macrocapillaries // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2016. – Vol.10, № 2. – P.429-432.
12. Vokhmyanina K.A., Sotnikova V.S., Kaplii A.A., Sotnikov A.V., Kubankin A.S., About a contactless transmission of 10 keV electrons through

tapering microchannels // Journal of Instrumentation. – 2018. – Vol.13, №2. – P.02048

13. V.N. Stolterfoht, Y. Yamazaki, Guiding of charged particles through capillaries in insulating materials// Phys. Rep. – 2016. – Vol.629. – P.1-107.

14. Похил, Г. П. Модель динамики прохождения ионов через диэлектрические капилляры / Г. П. Похил, В. В. Чердынцев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013, № 4. – С. 1–6.

15. K. A. Vokhmyanina [et al., Studying the Interaction of 10 keV Electrons with a Dielectric Surface // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – Vol.8, № 2. – P.356–359.

16. K. Vokhmyanina [et al.] 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.

Основные публикации по результатам диссертационной работы

1. **Vokhmyanina K.A.**, Petukhov V.P., Pokhil G.P., Fridman V.B., Tulinov A.F., Zhilyakov L.A., Kulikauskas V.S., Transport and Focusing of Ion Beams by Insulating Channels // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2006. – Vol.70, №6. – С. 945-951.

2. Pokhil G.P., **Vokhmyanina K.A.**, Drift model of ion beam guiding using capillaries // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2008. – Vol. 2. –№ 2. – P.237–240.

3. Pokhil G.P., **Vokhmyanina K.A.**, and Mironchik A.I., Model of ion beam guiding using a flat capillary // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2009. – Vol. 3, №2. – P.326–330.

4. **Vokhmyanina K.A.**, Zhukova P.N., Nasonov N.N., Pokhil G.P., Concerning contactless ion transmission in dielectric channels // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2012. – Vol. 6, № 2. – P.266–270.

5. **Vokhmyanina K.A.**, Zhukova P.N., Irribarra E.F., Kubankin A.S., Hoai L.T., Nazhmudinov R.M., Nasonov N.N., Pokil G.P., Investigation of Contactless Electron Transmission through Dielectric Channel //Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2013. – Vol.7. №2. – P. 271-275.

6. **Вохмянина К.А.**, Жукова П.Н., Иррибарра Э.Ф., Кубанкин А.С., Ле Тхи Хоай, Нажмуудинов Р.М., Насонов Н.Н., Олейник А.Н., Похил Г.П., Исследование прохождения электронов через диэлектрические каналы // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 6. – С. 48-49.

7. **Vokhmyanina K.A.**, Zhukova P.N., Kubankin A.S., Hoai L.T., Nazhmudinov R.M., Pleskanov A.A., Oleinik A.N., Nasonov N.N., Pokhil G.P.,

Studying the Interaction of 10 keV Electrons with a Dielectric Surface // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2014. – Vol. 8, № 2. – P.356–359.

8. **Vokhmyanina K.A.**, Zhukova P.N., Irribarra E.P., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Kishin I.A., Klyev A.S., Pokhil G.P., Modeling of guiding of 10 kev electron beam by planar dielectric surface // В книге: 20th International Workshop on Beam Dynamics and Optimization (BDO). IVESC-ICEE-ICCTPEA-BDO-2014. Edited by: D. A. Ovsyannikov. – 2014. – С.189

9. **Vokhmyanina K. A.**, Zhukova P.N., Kubankin A.S., Hoai L.T., Nazhmudinov, R. M., Oleinik, A. N., & Pokhil, G. P., The study of the guiding process for 10 keV electrons by planar Plexiglass surfaces // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol.517.

10. **Vokhmyanina K.A.**, Zhukova P.N., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Kishin I.A., Klyuev A.S., Pokhil G.P., Investigation of the Guiding Effect of 10keV Electrons Using Planar Dielectric Surfaces // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2015. – Vol. 9, №2. – P.286–289

11. **Vokhmyanina K.A.**, Levina V.S., Nikulin I.S., Pleskanev A.A., Kubankin A.S., Pokhil G.P., The orientation effects during the grazing interaction of fast electrons with structured surfaces // Indian Journal of Science and Technology. – 2015. –Vol.8, № 36. – P.90559.

12. **Vokhmyanina K.A.**, Pokhil G.P., Zhukova P.N., Irribarra E., Kubankin A.S., Levina V.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N. and Kishin I.A., Guiding of a beam of 10 keV electrons by micro size tapered glass capillary // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2015. – Vol.355. – P.307-310.

13. **Vokhmyanina K.A.**, Pokhil G.P., Zhukova P.N., Kubankin A.S., Irribarra E.F., Levina V.S., Kishin I.A., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Sotnikov A.V.,

The dynamics of the interaction of fast electrons with dielectric surfaces at grazing incidence // *Physics Letters A*. – 2015. – Vol.379. – P.431–434.

14. **Vokhmyanina K.A.**, Sotnikova V.S., Kishchyn I.A., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Sotnikov A.V., Kaplii A.A., Pleskanov A.A., Pokhil G.P., Propagation of 10 keV electrons through tapered glass macrocapillaries // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2016. – Vol.10, № 2. – P.429–432.

15. **Vokhmyanina K.A.**, Kaplii A.A., Sotnikova V.S., Kishin I.A., Kubankin A.S., Nazhmudinov R. M., Oleinik A.N., Sotnikov A.V., Propagation of 10-keV electrons through glass macrocapillaries // *Journal of Surface Investigation*. – 2017. – Vol.11, №4. – 844–847.

16. **Vokhmyanina K.A.**, Kubankin A.S., Kishin I.A., Nazhmudinov R.M., Kubankin Yu.S., Sotnikov A.V., Sotnikova V.S., Kolesnikov D.A., Experimental setup for studying the processes occurring during interaction of fast electrons with matter // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. – 2018. – Vol.10. – №6. – P.06036.

17. **Vokhmyanina K.A.**, Sotnikova V.S., Kaplii A.A., Sotnikov A.V., Kubankin A.S., About a contactless transmission of 10 keV electrons through tapering microchannels // *Journal of Instrumentation*. – 2018. – Vol.13, №2. – P.02048

18. **Vokhmyanina K.A.**, Kubankin A.S., Myshelovka L.V., Zhang H., Kaplii A.A., Sotnikova V.S., Zhukova M.A., Transport of accelerated electrons through dielectric nanochannels in PET films // *Journal of Instrumentation*. – 2020. – Vol. 15, №4

19. **Vokhmyanina K.A.**, Myshelovka L.V., Kolesnikov D.A., Zhukova P.N., Ionidi V.Y., Passage of 10-keV Electrons through a Bundle of Dielectric Channels // *Technical Physics Letters*. – 2021. – Vol.47, №1. – P.31–34.

20. **К.А. Вохмянина**, Л.В. Мышеловка, В.С. Сотникова, А.А. Кубанкина, А.Д. Пятигор, А.С. Кубанкин, Ю.В. Григорьев, Исследование прохождения электронов с энергией 10 keV через керамический макроканал// Письма в ЖТФ.– 2021.– том 47.– вып. 16. – С.51-54.

21. *Патент* на полезную модель № 168754 от 17.02.2017 «Устройство для компрессии пространства взаимодействия пучков заряженных частиц и электромагнитного излучения»