

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына

На правах рукописи

Вохмянина Кристина Анатольевна

**УПРАВЛЕНИЕ ПУЧКАМИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ С
ПОМОЩЬЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена на кафедре общей ядерной физики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова и в отделе физики атомного ядра (ОФАЯ) Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Похил Григорий Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Курнаев Валерий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор
Варламов Владимир Васильевич

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет

Защита состоится 01 ноября 2007 г., 14:00 на заседании диссертационного совета К 501.001.06 в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ
Автореферат разослан « 29 » сентября 2007 года

Ученый секретарь
диссертационного совета К 501.001.06
кандидат физико-математических наук

О.В. Чуманова

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1 Актуальность работы.

Пучки заряженных частиц в настоящее время находят широкое применение в различных областях науки. Они используются в фундаментальных исследованиях (создание материалов с заданными свойствами, изучение свойств материалов и т. д.), в технике (ионная имплантация, электронно-лучевая сварка и т. п.), в медицине (лечение онкологических заболеваний). Важной задачей является транспортировка пучка к объекту исследования или обработки, поэтому проблемы, решаемые в диссертации актуальны.

Проблема взаимодействия пучков с диэлектриками до настоящего времени рассматривалась в основном в связи с необходимостью нейтрализации заряда, накапливаемого диэлектриком при его облучении заряженными частицами. Влияние же заряженного диэлектрика на пучок изучено относительно слабо. Но в последние годы проводится ряд экспериментов, указывающих на возможность транспортировки пучков ускоренных заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов без потери энергии и без потери начального зарядового состояния. Перенос положительных ионов через диэлектрический канал без соударения со стенками впервые наблюдался недавно, в 2002 году. В экспериментах в основном используются цилиндрические и конусные капилляры, поскольку их использование уже сейчас представляет большой практический интерес.

Однако чтобы понять физическую основу процессов, возникающих при взаимодействии ионов с поверхностью диэлектрика, необходимы численные и теоретические модели. Такие модели проще построить для т. н. плоских капилляров, которые состоят из двух диэлектрических пластин, расстояние между которыми много меньше их длины. Данная работа посвящена исследованию транспортировки заряженных частиц с помощью плоских

стеклянных капилляров. Основные модельные предположения и выводы, сделанные в работе, могут быть использованы для изучения прохождения ионов через диэлектрические капилляры любой формы. Кроме того, в ходе работы с плоскими каналами был получен новый эффект двойного управления пучками ионов, теоретическая модель которого также построена в диссертации.

1.2 Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое исследование прохождения пучков положительных ионов через плоские диэлектрические каналы и анализ свойств поверхностной проводимости диэлектриков при воздействии на них скользящих пучков ионов.

1.3 Научная новизна работы

Впервые проведены экспериментальное и теоретическое исследования прохождения пучков положительных ионов через плоские диэлектрические каналы. Впервые экспериментально обнаружен и объяснен эффект двойного управления пучками положительных ионов с помощью плоских диэлектрических капилляров. Впервые показано, что поверхностная проводимость диэлектрика скачкообразно зависит от величины заряда, накопленного на нем, при воздействии на эту поверхность скользящих пучков ионов.

1.4 Практическая и научная ценность работы

Работы по взаимодействию скользящих пучков с диэлектриками ранее не проводились. Эта проблема возникла в связи с обнаружением эффекта бесконтактного прохождения ионов через цилиндрические диэлектрические капилляры. Исследования прохождения ионов через плоские капилляры позволяет глубже понять изменение свойств поверхности диэлектрика,

подвергающегося облучению ионами, что важно для практического применения эффекта управления пучками с помощью капилляров. Проведенные исследования позволяют подойти к проблеме изучения поверхностной проводимости диэлектриков при воздействии на них ионизирующего излучения. Диэлектрические капилляры имеют широкие перспективы практического применения, в частности, в медицине и биологических исследованиях, и уже в настоящее время ведутся эксперименты по прицельной бомбардировке ядра биологической клетки единичными ионами.

1.5 Основные положения, выносимые на защиту

1. Теоретическое доказательство того, что прохождение пучка через капилляр в области транспортировки обеспечивают два механизма воздействия заряда, возникающего на стенке канала, на движущиеся ионы. Первый механизм обусловлен действием краевых сил, за которые ответственна конечная длина канала. Эти силы обеспечивают движение частиц при условии, что аспектное отношение канала не слишком велико. При большом аспектном отношении в средней части капилляра транспортировку ионов обеспечивает однонаправленная градиентная сила Миллера-Гапонова.

2. Экспериментальное исследование и модель захвата пучка в режим управляемого движения при входе пучка в наклоненный капилляр.

3. Метод исследования поверхностной проводимости изолятора при наличии заряда на его поверхности и одновременном воздействии скользящего пучка ионов.

4. Экспериментальное обнаружение и теоретическая модель нового явления – двойного управления пучком ионов с помощью плоского диэлектрического капилляра. Явление заключается в том, что плоский капилляр управляет пучком ионов не только при наклоне капилляра, но и при

повороте капилляра вокруг оси, перпендикулярной его плоскости, т. е. без нарушения симметрии относительного положения пучка и капилляра.

1.6 Достоверность научных результатов и выводов подтверждается использованием стандартных методов работы с пучками положительных ионов, применением надежных методов моделирования изучаемых процессов и согласием ряда результатов с результатами других авторов для цилиндрических капилляров.

1.7 Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, получены при непосредственном участии автора в экспериментах по транспортировке пучка ионов через плоские капилляры, в обработке экспериментальных данных и в моделировании изучаемых процессов.

1.8 Апробация работы

Материалы диссертации апробированы на семинарах по взаимодействию излучения с веществом ЛВИВ НИИЯФ МГУ и на семинарах лаборатории атомной физики научно-исследовательского центра RIKEN (Япония).

Результаты диссертации докладывались и обсуждались:

1. На 17-ой Международной конференции ВИП – 2005, Звенигород, 2005 г.
2. На 35, 36 и 37-ой Международных конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 2005, 2006 и 2007 г.
3. На Международной конференции SCCS (Strongly Coupled Coulomb Systems), Москва, июнь 2005 г.
4. На конференции «Ломоносов-2005», Москва, апрель 2005 г.
5. На 21-ой Международной конференции по уравнениям состояния вещества, Эльбрус, март 2006 г.

6. На 16-ой Международной конференции по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям ESACCEL, Обнинск, июнь, 2006 г.

7. На 3-й Международной конференции SPARC, Париж, Франция, февраль, 2007 г.

1.9 Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях и 9 тезисах докладов, представленных на указанных в разделе 1.8 конференциях. Полный список публикаций приведен в конце автореферата.

1.10 Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя 49 рисунков, введение, три главы, заключение и список литературы (29 работ). Общий объем диссертации - 104 страницы.

2. СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулированы цели и задачи диссертации, новизна и практическая значимость полученных экспериментальных и теоретических результатов. Дан краткий обзор основных работ, посвященных проблеме транспортировки положительных ионов через цилиндрические и конусные капилляры.

В главе 1 проведен анализ области транспортировки ионов в диэлектрическом канале, т. е. анализ возможных механизмов бесконтактного прохождения ионов через капилляр. Во введении изложены принятые представления о том, что на поверхности капилляра формируется определенное распределение заряда, создающее поле, под воздействием которого частицы пучка перестают сталкиваться со стенками, и большая доля их проходит через капилляр без потерь энергии и без перезарядки. Сначала на основе этих представлений было проведено компьютерное моделирование процессов движения ионов в цилиндрических капиллярах. Было показано, что заряд, образующийся на поверхности диэлектрика, не формирует в цилиндрических каналах макроструктур, которые могли бы представлять собой либо линзы Энзеля, либо квадрупольные линзы. Распределение заряда оказывается практически однородным по длине и аксиально-симметричным.

Для построения более светосильных теоретических моделей распределения заряда на стенках капилляра было решено перейти к исследованию плоских каналов. Оказалось, что механизм бесконтактного прохождения ионов через диэлектрические каналы может быть объяснен двумя причинами.

При бесконечной длине капилляра поле внутри него отсутствует. Поэтому естественно ожидать, что за появление поперечных сил, обеспечивающих бесконтактную транспортировку ионов, в первую очередь

ответственны краевые эффекты (п.1). Краевые силы вычисляются аналитически. Поперечная составляющая силы поля, возникающего в плоском канале длиной L при расстоянии между плоскостями d , дается выражением, которое приближенно можно записать в виде:

$$F_{\perp}(x, z) = 4\sigma \cdot e \frac{x}{L} \begin{cases} \frac{1}{L \left(1 - \frac{z}{L}\right)}, & \text{при } z \gg d \\ 1 + \frac{zL}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - x^2}, & \text{при } z \sim d \quad L \gg d \end{cases}$$

(здесь x, z – поперечная и продольная координаты соответственно, σ – поверхностная плотность заряда)

Из формулы видно, что вдали от торцов (при $z > d$) сила линейно зависит от x . Т. е. во всем канале кроме его концов потенциал квадратично зависит от поперечной координаты x . Если длина канала не слишком велика, то краевые эффекты играют решающую роль в формировании поперечных сил и прекрасно объясняют бесконтактное прохождение ионов через канал. Но, как видно из формулы, эта сила в средней части канала становится очень малой при большом аспектном отношении, и фокусирующее действие канала уже нельзя объяснить краевыми силами. Это значит, что должен существовать другой механизм, который обеспечил бы бесконтактное прохождение пучка ионов через очень длинный канал.

Известно, что быстро осциллирующая сила, действующая на частицу, приводит к возникновению однонаправленной силы, т. н. градиентной силы (силы Миллера-Гапонова). Заряд, возникающий на поверхности диэлектрика, является дискретным. Благодаря кулоновскому отталкиванию система зарядов стремится образовать двумерный кристалл. Тепловое движение препятствует организации полностью упорядоченной структуры. Но должна образовываться структура типа “поликристалла”. Это приводит к появлению осциллирующей силы при быстром движении иона вдоль поверхности

заряженного изолятора. Поэтому в пространстве между двумя заряженными плоскостями образуется потенциальная яма (п.2, п.3). В последнем параграфе первой главы представлена модель, плотность поверхностного заряда в которой взята из экспериментальной работы *N. Stolterfoht, et al. // Phys.Rev.Lett. 2002. V.88, p.133201.*

Образующийся градиентный потенциал вполне достаточен, чтобы обеспечить “бесконтактное” прохождение ионов через капилляр. Для иона Ne^{7+} , движущегося вдоль капилляра под углом $\sim 0.15^\circ$ к его оси получаем:

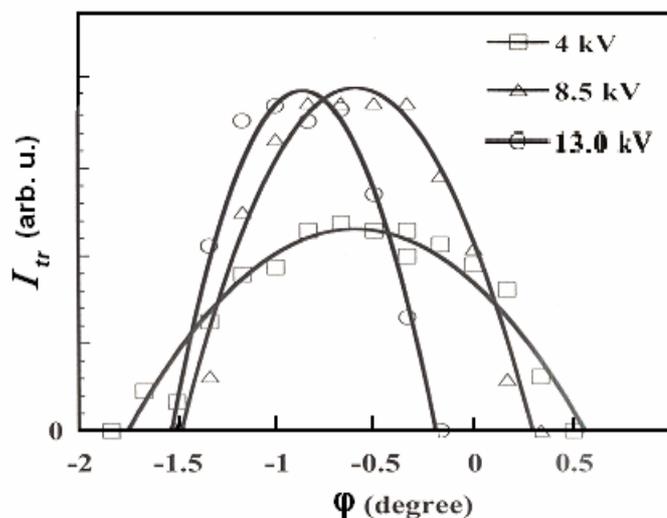
$$U_{grad} \approx 35 \exp\left(-\frac{2x}{(120/2\pi)\text{Å}}\right) \text{ Вольт}$$

Эта аналитическая оценка подтверждена компьютерным моделированием. Таким образом, показано, что два механизма: краевые силы и градиентные силы Миллера достаточны для обеспечения “бесконтактного” прохождения ионов через капилляр при произвольном аспектном отношении капилляра.

Глава 2 посвящена исследованию области рассеяния ионов при входе в диэлектрический канал.

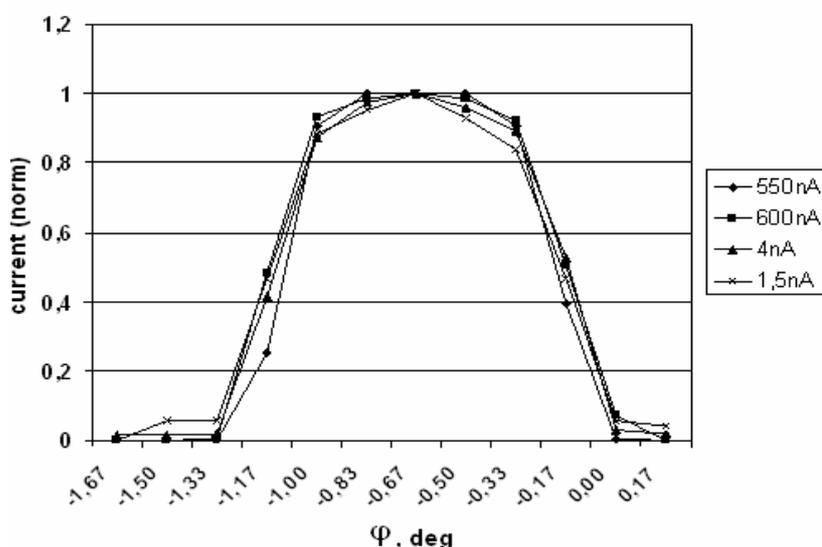
Эффект управления для плоского капилляра, т. е. отклонение пучка ионов при наклоне капилляра, исследовался для ионов Ar^{+8} . Эксперимент нами был проведен в научном центре RIKEN, Япония. Эксперимент показал, что зависимость проходящего тока от угла наклона капилляра меняется после пропускания через него большого тока (рис. 1). Это означает, что какое-то свойство поверхности, существенное для управления пучком, меняется при обработке ее большим током.

Затем была построена теоретическая модель, в которой, чтобы объяснить экспериментальные результаты, было введено предположение о скачкообразной зависимости поверхностной проводимости облучаемого изолятора от величины наведенного на ней заряда (рис.2).



a)

13kV/q Ar₈₊



б)

Рис. 1 Экспериментально измеренная зависимость проходящего тока от угла наклона капилляра: а – до работы с большим током; б – после модификации поверхности большим током (500 нА)

При достижении поверхностной плотности заряда некоторой критической величины σ_0 , проводимость резко возрастает на порядки. При таком предположении модель отклонения пучка можно сформулировать следующим образом.

При падении пучка ионов под углом φ (рис.3) к оси капилляра после завершения переходных процессов и установления стационарного состояния, некоторая часть пучка (β) поддерживает плотность заряда σ_0 на участке

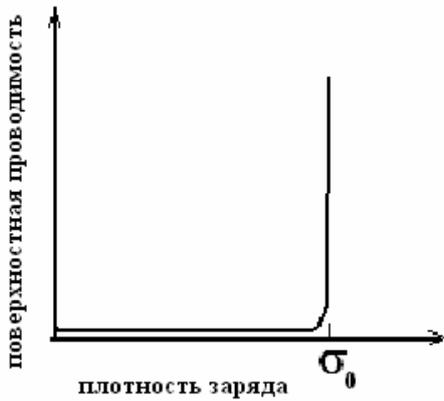


Рис.2 Зависимость поверхностной проводимости изолятора стенки от поверхностной плотности заряда плоского капилляра при воздействии пучка ионов

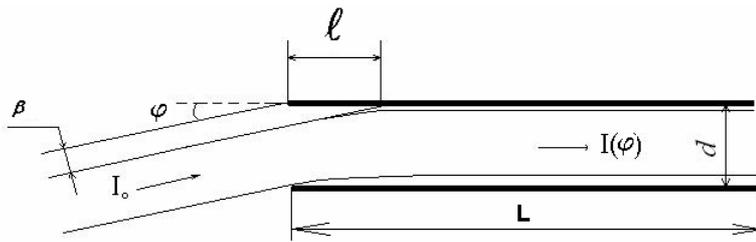


Рис.3 Схема движения ионов при отклонении пучка от оси капилляра

верхней пластины капилляра длиной l . Плотность заряда на всей длине l постоянна и равна σ_0 , т. к. при превышении этой величины благодаря ступенчатой зависимости проводимости (рис.2) излишек заряда мгновенно сбрасывается. Величина необходимой части пучка (β) определяется длиной l , а длина l определяется тем, какой путь необходимо пройти ионам в однородном поле $2\pi\sigma_0$, создаваемом поверхностным зарядом, чтобы отклониться на угол φ . На оставшемся участке капилляра ионы движутся так же, как при нулевом угле входа пучка в капилляр (область транспортировки).

Доля пучка падающих ионов, которая требуется для поддержания заряда на поверхности верхней пластины, необходимого для прохождения остальных ионов через капилляр:

$$\beta = \varphi^2 \frac{E}{ze^2 2\pi\sigma_0}$$

Если β становится равным поперечному размеру пучка d , то пучок перестает проходить через капилляр. Отсюда получаем критический угол прохождения пучка через капилляр:

$$\varphi_1 = \sqrt{\frac{2\pi ze^2 d}{E}} \cdot \sqrt{\sigma_0}$$

Второй критический угол, характеризующий угловую зависимость прохождения пучка, соответствует ситуации, при которой вся длина верхней пластины капилляра уже заряжена и больше увеличиваться не может. Отсюда, необходимая для отклонения на угол φ длина l :

$$l = \frac{\varphi E}{ze^2 \pi \sigma_0} < L$$

получаем:
$$\varphi_2 = \frac{\pi z e^2 L}{E} \sigma_0.$$

Такая ситуация возникает, если значения σ_0 или L не достаточно велики. Если $\varphi > \varphi_2$, то перекрытие пучка происходит чисто геометрически, и форма угловой зависимости становится близкой к трапецевидной. На рис.4 показано поведение критических углов φ_1 и φ_2 как функции σ_0 . Видно, что есть некоторая граничная величина $\bar{\sigma}$, слева от которой будет наблюдаться трапецевидная форма угловой зависимости, а справа – параболическая. Из уравнения $\varphi_1 = \varphi_2$ получим положение границы:

$$\bar{\sigma} = \frac{2Ed}{\pi z e^2 L^2}$$

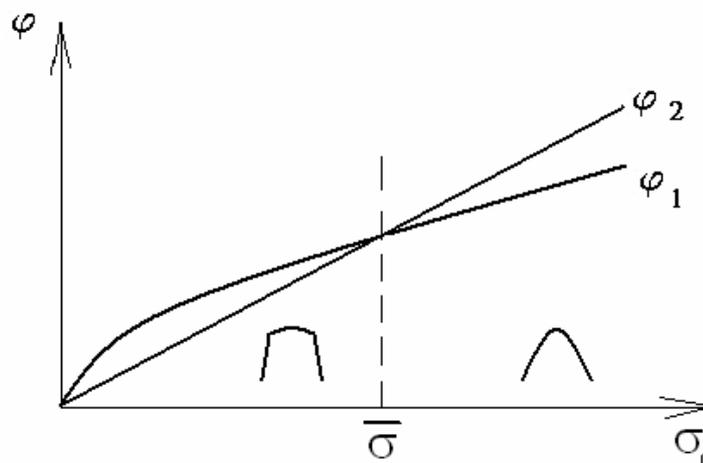


Рис. 4 Зависимость критических углов φ_1 и φ_2 от σ_0

В нашем эксперименте длина капилляра не менялась, следовательно, форма угловой зависимости изменилась из-за того, что после обработки стенок капилляра большим током поверхность модифицировалась так, что величина критической поверхностной плотности заряда σ_0 стала меньше.

Модель позволила удовлетворительно объяснить полученные эффекты, что говорит о справедливости сделанного предположения. Таким образом, можно утверждать, что обнаружено новое интересное свойство поверхностной проводимости изолятора, находящегося под воздействием ионного облучения.

В главе 3 приведены описания экспериментов, в которых впервые был получен эффект двойного управления ионами с помощью плоских диэлектрических капилляров. А также дано модельное описание полученного эффекта и показаны результаты расчетов, сделанных на основе изложенной модели.

Схема эффекта управления пучком ионов при повороте плоского диэлектрического капилляра вокруг вертикальной оси без нарушения положения плоскости капилляра показана на рисунке 5. Впервые эффект был экспериментально обнаружен в НИИЯФ МГУ, а затем повторно воспроизведен нами в Японии. На рисунке 6 приведен результат эксперимента по управлению пучком протонов с помощью плоского стеклянного капилляра, полученный в НИИЯФ в 2005 году. Пучок следует за капилляром в пределах 1 град. Затем возвращается к исходному направлению. Это наблюдение означает, что пучок, заряжая поверхность стенки, создает на ней какую-то структуру, которая сохраняется после поворота капилляра, поворачивается вместе с капилляром и заставляет пучок тоже поворачивать вслед за поворотом гониометра. Эффект был надежно подтвержден недавним экспериментом, проведенным нами в научном центре RIKEN (Япония). Благодаря новой методике измерения удалось получить количественное описание эффекта двойного управления. На рисунке 7 представлен график зависимости сдвига пятна на экране от угла поворота плоского капилляра

длиной 76 мм. Из графика видно, что пучок следует за поворотом капилляра в отношении один к одному в пределах градуса.

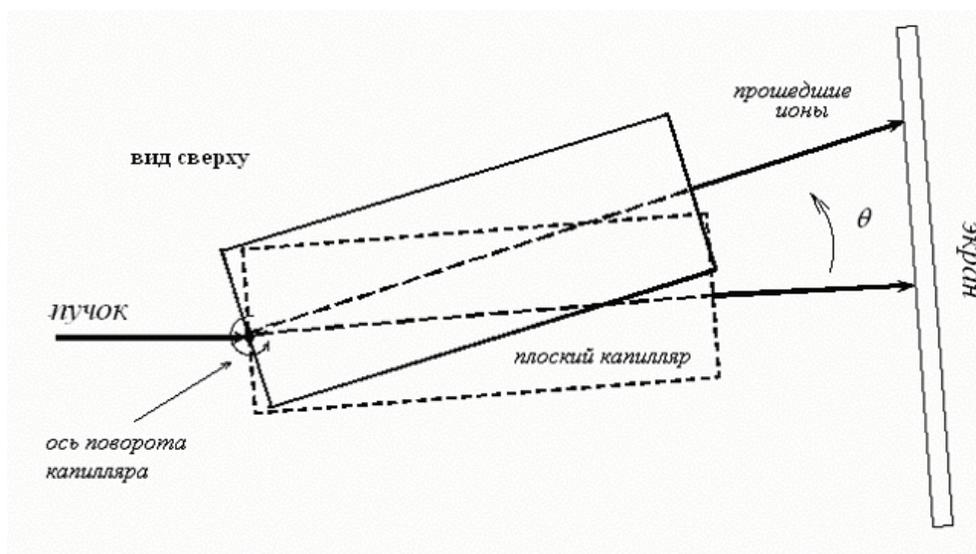


Рис.5 Схематичное изображение эффекта двойного управления пучком с помощью плоского диэлектрического капилляра при его повороте без нарушения положения плоскости на угол θ (вид сверху)

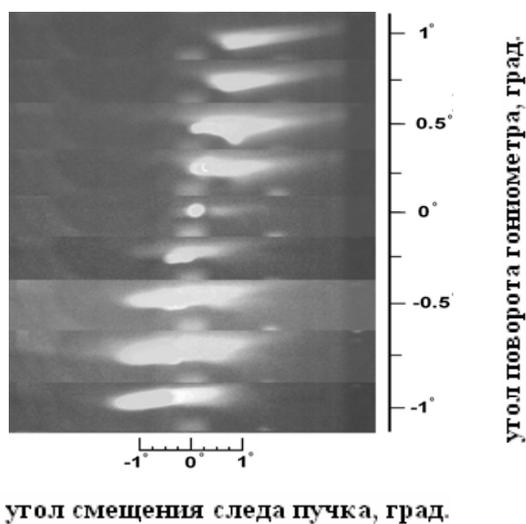


Рис.6 Смещение следа пучка на флюоресцирующем экране при повороте пластин

Для объяснения полученного эффекта была создана модель на основе предположения о том, что поверхностная проводимость изолятора под

действием пучка изменяется, она увеличивается в области непосредственно под пучком из-за возбуждения электронов в приповерхностном слое изолятора. В соседних частях поверхности, на которые не падают ионы пучка, проводимость существенно ниже. Поэтому положительный заряд, образующийся в области под пучком за счет кулоновского расталкивания, стекает к границе области хорошей проводимости. Поскольку на участках, где пучок непосредственно не взаимодействует с поверхностью, проводимость низкая, заряд накапливается. Таким образом, образуется распределение заряда, которое в направлении, поперечном движению ионов, имеет высокие брустверы вдоль границы области поверхности, подверженной воздействию частиц пучка. Эта модель была проверена с помощью компьютерного моделирования. Результаты расчетов удовлетворительно описывают эффект двойного управления.

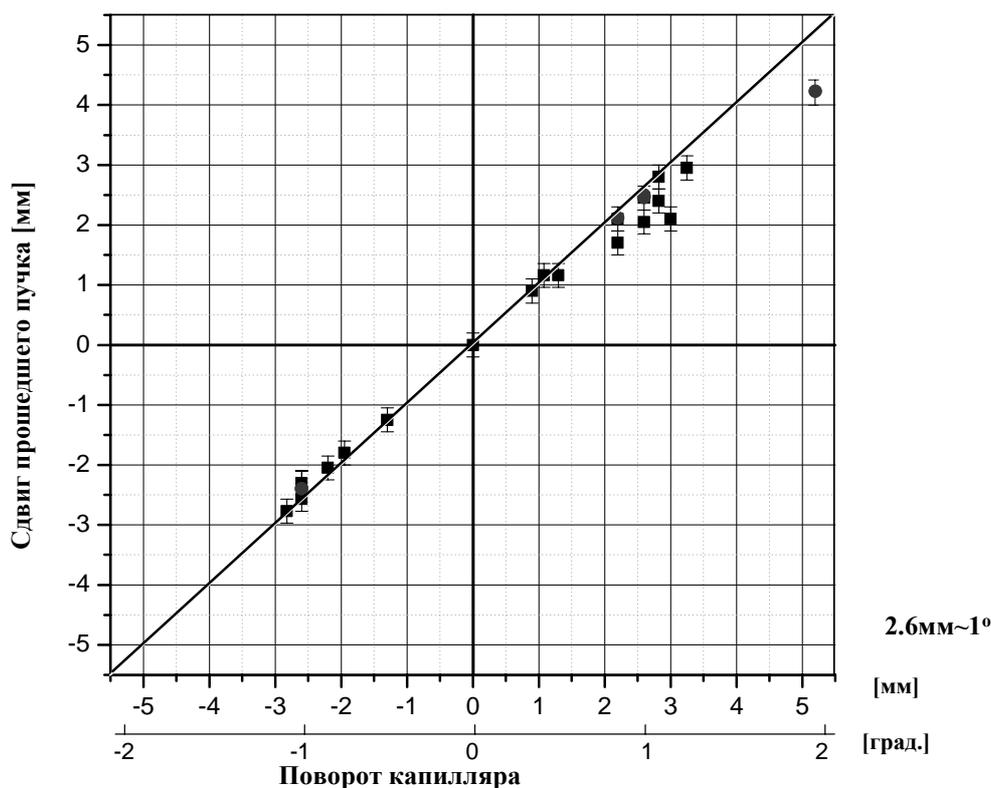


Рис.7 Зависимость сдвига пятна на экране от угла поворота плоского капилляра длиной 76 мм (сплошная линия соответствует следованию пучка повороту капилляра в соотношении один к одному)

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе впервые исследована транспортировка пучков положительных ионов через плоские диэлектрические капилляры. Обнаружен и исследован новый эффект – двойное управление пучком ионов с помощью таких каналов. Обычное управление пучком осуществляется поворотом капилляра таким образом, что пучок ионов изменяет направление движения благодаря взаимодействию с наклоненной стенкой диэлектрического канала. Эффект двойного управления заключается в том, что пучок изменяет направление движения не только при наклоне капилляра, но и при повороте плоского капилляра с сохранением ориентации его плоскости. Созданы физические модели для объяснения обнаруженных эффектов.

- показано, что транспортировка ионов в капилляре без контакта со стенками обеспечивается кулоновскими силами, связанными с краевым эффектом, и градиентными силами, возникающими благодаря дискретной структуре заряда стенки канала;
- впервые экспериментально исследована «прозрачность» плоских капилляров при различных углах падения пучка относительно оси капилляра;
- на основе теоретической модели, объясняющей движение ионов в области рассеяния, показано, что пучок ионов отклоняется лишь один раз, не испытывая перерассеяния на противоположной стенке канала. При этом обнаружено интересное свойство диэлектриков, заключающееся в том, что при воздействии скользящего пучка ионов на диэлектрик его поверхностная проводимость скачкообразно зависит от заряда, который накапливается на стенке канала;
- разработана конструкция плоских диэлектрических капилляров, позволившая впервые наблюдать и затем неоднократно

воспроизводить эффект двойного управления пучками положительных ионов,

- отработана методика проведения экспериментов по двойному управлению пучками протонов с энергией до 400 кэВ на ускорителе КГ-500 (НИИЯФ МГУ) и ионов Ar^{8+} с энергией до 100 кэВ на установке в исследовательском центре RIKEN (Япония),

- впервые экспериментально показано, что пучок ионов следует за капилляром при его повороте без нарушения ориентации его плоскости вокруг оси, перпендикулярной плоскости капилляра, причем происходит поворот один к одному;

- построена теоретическая модель, объясняющая управление пучком при повороте пластин капилляра без нарушения ориентации их плоскости.

3. СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. K.A. Vokhmyanina, L.A. Zhilyakov, V.S. Kulikauskas, V.P. Petukhov, G.P. Pokhil, Proton beam transportation via quarts tube // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, 2005. Vol.5943, p. 35-39.

2. К.А. Вохмянина, Л.А. Жиляков, А.В. Костановский, В.С. Куликаускас, Г.П. Похил, В.П. Петухов, А.Ф. Тулинов, Транспортировка пучка протонов через кварцевую трубку// Поверхность 2005. №3, с. 55-58.

3. Г.П. Похил, В.П. Петухов, К.А. Вохмянина, Л.А. Жиляков, А.Ф. Тулинов, Транспортировка и фокусировка пучков заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов // Труды 17 Межд. конф. ВИП - 2005. Звенигород, 25 – 29 августа 2005, с. 194 - 199 (расширенные тезисы).

4. Г.П. Похил, К.А. Вохмянина, Транспортировка и фокусировка пучков заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов // Тез. докл. XXXV Межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 31 мая – 2 июня 2005, с. 22.

5. K.A. Vokhmyanina, L.A. Zhilyakov, A.V. Kostanovsky, V.S. Kulikauskas, V.P. Petukhov, G.P. Pokhil, Transportation and focusing of accelerated protons beams by means of dielectric channels, SCCS 2005, poster 2005, 20-25 June, Moscow, Russia.

6. К.А. Вохмянина, Г.П. Похил, Транспортировка и фокусировка пучков заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов // Тез. докл. конференции «Ломоносов-2005», апрель 2005. Т. 1, с. 32.

7. К.А. Вохмянина, Л.А. Жиляков, Г.П. Похил, В.Б. Фридман, А.Ф. Тулинов, Модель транспортировки пучков заряженных частиц в диэлектрических каналах // Поверхность 2006. №4, с. 94-100.

8. Г.П. Похил, К.А. Вохмянина, В.Б. Фридман, Л.А. Жиляков, Т. Ikeda, Y. Iwai, Т. Kojima, Y. Kanai, Y. Yamazaki, Двойной эффект управления

пучком ионов с помощью плоского капилляра // Тез. докл. XXXVI Межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 30 мая – 1 июня 2006, с. 20.

9. Л.А. Жилияков, К.А. Вохмянина, А.В. Костановский, Г.П. Похил, В.В. Фридман, А.Ф. Тулинов, Механизм самоизоляции пучков ускоренных заряженных частиц при их скользящем взаимодействии с диэлектрической поверхностью // Тез. докл. XXI Межд. конф. по уравнениям состояния вещества, Эльбрус, Россия, 1-6 марта, 2006, с. 121.

10. К.А. Вохмянина, Л.А. Жилияков, В.С. Куликаускас, Г.П. Похил, В.П. Петухов, В.Б. Фридман, Эффект управления пучками ионов с помощью диэлектрических капилляров // Тез. докл. XVI Межд. конф. по электростатическим ускорителям и пучковым технологиям ESACCEL, Обнинск, Россия, 6-8 июня, 2006.

11. К.А. Vokhmyanina, L.A. Zhilyakov, A.V. Kostanovsky, V.S. Kulikauskas, V.P. Petukhov, G.P. Pokhil, Transportation and focusing of accelerated proton beams by means of dielectric channels // Phys. A: Math. Gen. **39** (2006) 4775–4779(<http://www.iop.org/EJ/abstract/-search=29664073.1/0305-4470/39/17/S73>)

12. Г.П. Похил, В.П. Петухов, К.А. Вохмянина, Л.А. Жилияков, В.Б. Фридман, А.Ф. Тулинов, Транспортировка и фокусировка пучков заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов // Изв. РАН, серия Физическая, 2006. Том 70, №6, с. 828-833.

13. Г.П. Похил, К.А. Вохмянина, Л.А. Жилияков, Y. Yamazaki, T. Ikeda, Y. Kanai, T. Kojima, Y. Iwai, Особенности прохождения ионов через плоский капилляр // Тез. докл. XXXVII Межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 29 мая – 31 мая 2007, с. 19.

14. Г.П. Похил, К.А. Вохмянина, Дрейфовая модель guiding эффекта // Тез. докл. XXXVII Межд. конф. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 29 мая – 31 мая 2007, с. 29.

Подписано в печать 25.09.2007.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура "Таймс". Печать цифровая.
Печ.л.2,09.Тираж 100 экз. Заказ № Т-474

Отпечатано в типографии "КДУ"
Тел./факс:(495)939-40-36
E-mail:press@kdu.ru