

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

**Экспериментальное исследование прохождения 10кэВ электронов через
нанокапилляры в РЕТ**

Выпускная квалификационная работа
обучающегося по направлению подготовки 03.03.02 Физика
очной формы обучения, группы 12001515
Комаристой Викторией Павловны

Научный руководитель
к. ф.-м. н. Вохмянина К.А.

БЕЛГОРОД 2019

Оглавление:

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Обзор литературы.....	6
§1.1. Формирование капилляров в плёнках ПЭТ.....	6
§1.2. Управление электронами с помощью нанокapилляров	10
Глава 2. Основная часть	17
§ 2.1 Постановка задачи.....	17
§ 2.2 Результаты эксперимента.....	22
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	25
Список литературы	27

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие, в рамках исследований гайдинг-эффекта, активно проводится работа по изучению процессов, возникающих при взаимодействии электронов с диэлектрическими поверхностями. Гайдингом (Guiding) называют способность управления пучками ионов или электронов с помощью диэлектрических каналов. В 2002 N. Stolterfoht и др. впервые наблюдали процесс прохождения положительных ионов Ne^{7+} без непосредственного взаимодействия со стенками капилляра [1]. В указанной работе ионы с энергией 3 кэВ пропускали через наноканалы диаметром 100 нм и длиной 10 мкм, полученные путем травления треков ионов в полимерных пленках ПЭТ (полиэтилентерефталат, англ. PET). Чтобы избежать зарядки поверхности на входе в каналы и обеспечить стекание излишков заряда, на пленку с капиллярами напылялся слой золота толщиной около 30 нм.

В ходе эксперимента пленку (а, следовательно, оси наноканалов) поворачивали на углы до $\pm 25^\circ$ по отношению к направлению оси падающего пучка. Результат эксперимента показал, что значительная доля ионов, сохраняет свое начальное зарядовое и энергетическое состояние даже при крайних углах поворота. Данный эффект авторы работ объяснили формированием заряженных областей на диэлектрических стенках капилляров. Электрические поля этих областей удерживают основную часть пучка электронов от непосредственного контакта со стенками.

Результаты работы [1] положили начало серии экспериментов с проведением различных положительных ионов через диэлектрические каналы, а также дали толчок к проведению подобных работ с пучками электронов низких энергий [2,3,4]. Эксперименты по управлению пучками электронов с помощью наноканалов в ПЭТ проводились с

использованием электронных источников, обеспечивающих энергии электронов от 0.5 кэВ до 1.5. Нанокapилляры в ПЭТ-фольгах, использованные в экспериментах, имеют следующие типичные размеры: диаметр порядка 100 нм, длина 12 мкм. В спектрах пучков электронов, прошедших через каналы, в основной массе работ наблюдались значительные потери энергии. Такие результаты сильно отличаются от результатов для медленных положительных ионов, для которых практически не наблюдалось потерь энергии. Наблюдение неупругих потерь энергии электронов позволило предположить, что значительная часть электронов «погружается» в поверхность или объем диэлектрической стенки капилляра. Прошедшие электроны претерпевают значительные потери энергии, которые преобладают в энергетических спектрах, причем потери увеличиваются с углом наклона капилляра, что не наблюдается для медленных положительных ионов или для электронов с более низкой энергией.

Кроме предположения об образовании заряженных областей на поверхности диэлектрика еще одним предположением, объясняющим наличие упругой составляющей в спектре прошедших через канал электронов, является идея, что прохождение электронов происходит в основном за счет малоуглового рассеяния на атомах, расположенных внутри поверхностного слоя. Этот механизм предполагает немедленное начало передачи электронов после введения пучка. Однако последующие измерения показали, что передача электронов происходила с задержкой по времени, что свидетельствовало о том, что участок отрицательного заряда играет определенную роль в управлении электронами. Начало прохождения электронов происходило после введения значительного заряда в капилляр, и оно росло намного быстрее, чем наблюдалось для ионов. [3]

Все упомянутые модели и предположения строились для электронов с энергией не больше 1.5 кэВ. Однако неисследованной областью остается

область более высоких энергий, т.е. изучение прохождения пучка электронов с энергией порядка 10 кэВ через нанокapилляры в пленке ПЭТ, чем и определяется актуальность данной работы.

Цель работы: проведение экспериментального исследования возможности управления пучком электронов с энергией 10 кэВ с помощью нанокapилляров в пленке ПЭТ.

Глава 1. Обзор литературы

§1.1. Формирование капилляров в плёнках ПЭТ

В разных лабораториях использовались пленки с нанокапиллярами, изготовленными различными методами. Первые исследования [1] были проведены с использованием полиэтилентерефталатной (ПЭТ) фольги толщиной 10 мкм, которую предварительно облучали ионами Хе 100 МэВ в Институте им. Флерова в Дубне. После облучения мембраны травили в титрованном растворе гидроксида натрия, превращая каждый ионный трек в цилиндрический канал. Таким образом, диаметр капилляра составлял 100 нм, как показано в таблице 1, с использованием метки РЕТ0.

Для получения более достоверных результатов в экспериментах по исследованию эффекта гайдинга было необходимо применять капилляры, которые более параллельны. С 2005 года добились значительного улучшения более высокой степени параллельности каналов в ПЭТ, создав треки с помощью ионов, обладающих гораздо более высокими энергиями [5, 6].

Капилляры с разбросом лучше, чем 0.2° FWHM могут быть получены с помощью ионов Кг 250 МэВ в Институте им. Флерова в Дубне. На рис. 1 представлены изображения, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), на которых показаны отверстия капилляров и их поверхностная плотность δ_c . Спецификации капилляров приведены в Таблице 1 с использованием меток РЕТ1 и РЕТ2.

Таблица 1. – Поверхностная плотность δ_c (см⁻²), пористость P_c , диаметр d (нм), длина L (мкм) и ширина $\Delta\gamma$ распределения осей для капилляров, используемых в разных лабораториях. Некоторые значения округлены в пределах ошибок. Таблица приведена из работы [7].

Sample	δ_c (см ⁻²)	P_c	d (nm)	L (μm)	$\Delta\gamma$
PET0 [11]	5×10^8	4%	100	10	1.5°
PET1 [27]	4×10^6	0.15%	200	12	$\leq 0.2^\circ$
PET2 [29]	1×10^8	3%	200	12	$\leq 0.2^\circ$
SiO ₂ [147]	1×10^8	2%	200	30	$\leq 0.2^\circ$
Al ₂ O ₃ [42]	6×10^8	35%	280	15	2°
PC [98,55]	4×10^8	9%	170	30	$\sim 1^\circ$

На рисунке 1 показаны типичные фотографии поверхностей пленок ПЭТ с отверстиями (входные торцы каналов).

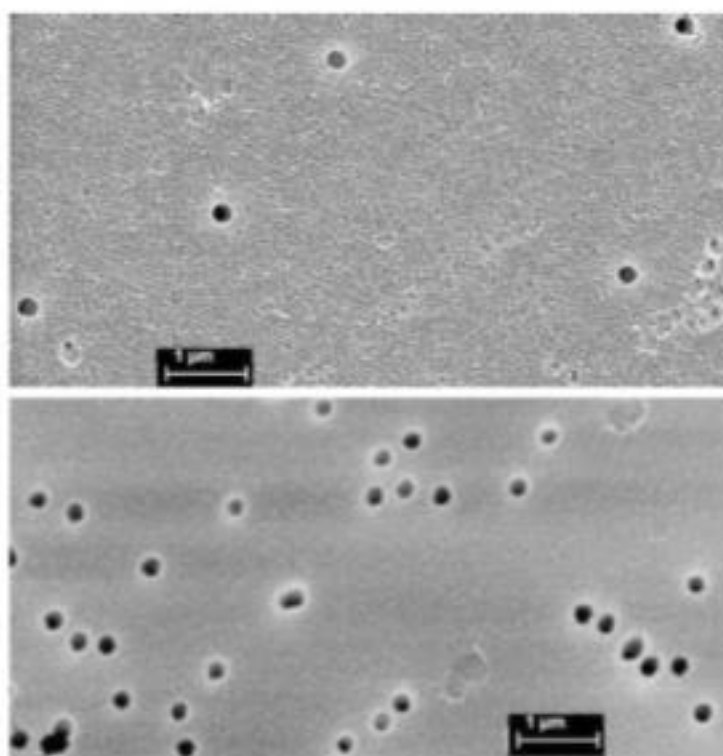


Рис. 1. Фотографии пленок ПЭТ с капиллярами диаметром ~ 200 нм и плотностями 4×10^6 см⁻² (сверху) и 10^8 см⁻² (снизу). Фотографии были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии. [2,3]

Совершенно другой метод был использован для получения нанокапилляров в SiO_2 , показанном на рисунке 2. Капилляры были сформированы на основе прямоугольного массива пор, электрохимически вытравленных в кремнии n-типа (удельное сопротивление $\sim 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Первоначальный рисунок массива был сделан путем формирования ям с острыми точками на поверхности кремния и использованием гидроксида калия для травления. Затем, внутренняя поверхность капилляров была покрыта слоем SiO_2 толщиной 100 нм с использованием термического окисления и микрообработки кремния. Таким образом, внутренние поверхности капилляров были покрыты высоко изолирующим материалом. Напомним, что изолирующий SiO_2 необходим для обеспечения ионного направления. Как показано в таблице 1, капилляры SiO_2 относительно длинные, что соответствует аспектному соотношению $L / d = 150$, то есть отношению длины L к диаметру d [8].

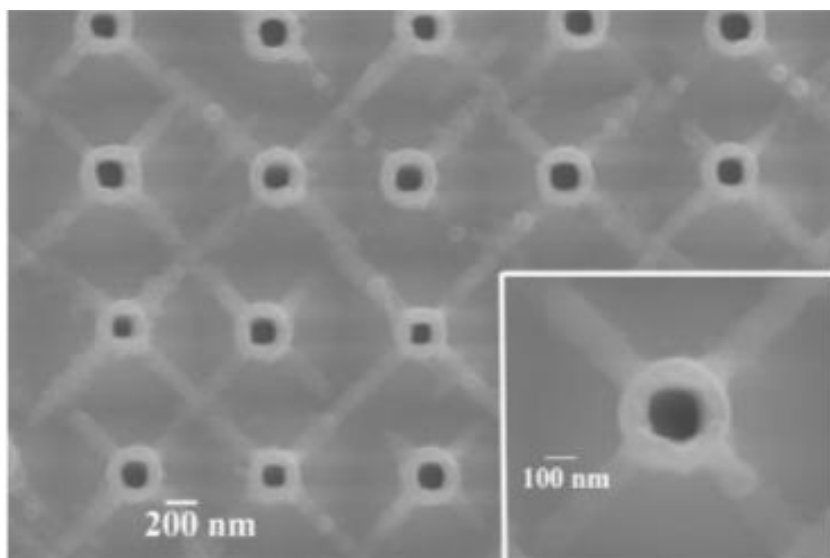


Рис. 2. Фотография поверхности пленки с SiO_2 нанокапиллярами. Диаметр одного капилляра составляет около 200 нм с шагом 1 мкм, а толщина оксида составляет около 100 нм. Врезка показывает увеличенный вид входного отверстия капилляра.

Параллельность капилляров SiO_2 сравнима с параллельностью капилляров ПЭТ (таблица 1). Уникальным свойством капилляров SiO_2 является тонкий оксидный слой (100 нм), который отделяет стенку капилляра от проводящего кремния, который находится при потенциале земли. Следовательно, потеря зарядов, скапливающихся на внутренней стенке капилляра при миграции в объем, как ожидается, будет относительно большой.

Ещё один вид диэлектрических нанокапилляров Al_2O_3 показан на рисунке 3.

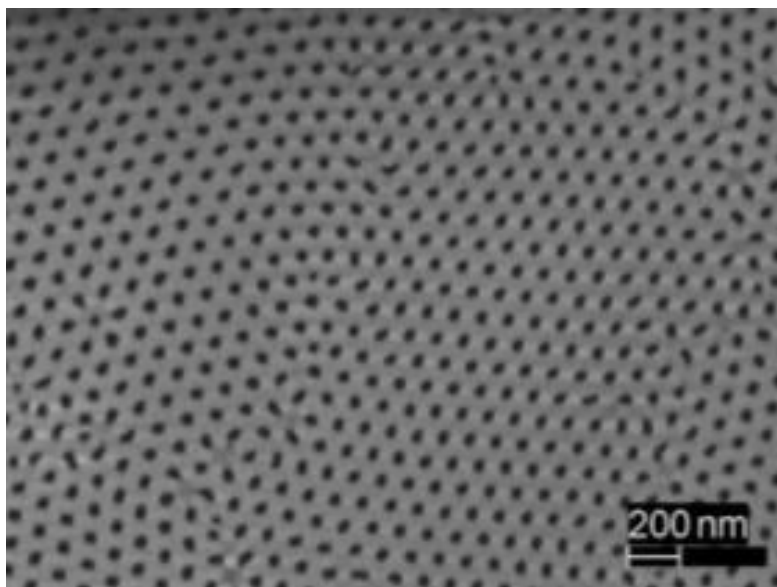


Рис.3. SEM-микрофотография Al_2O_3 -капиллярной мембраны, показывающая, в пределах областей, регулярно распределенные нанокапилляры.

Al_2O_3 -капилляры изготавливаются на предприятиях кафедры химии материалов университета Уппсалы (Швеция). Производители нацелены на диаметры капилляров 60–100 нм и длину около 10 мкм. Кроме того, изготовленные нанокапилляры Al_2O_3 должны иметь $<1^\circ$ углового распределение осей капилляров. Для этого необходимо использовать очень хорошо отполированные алюминиевые подложки. Подложки подвергали электрополировке в электролите, затем выполняется анодирование в два

этапа, чтобы достичь достаточно хорошего упорядочения пор. После первого анодирования образовавшуюся пленку оксида алюминия травят в десорбирующем растворе. После снятия появляется узорчатая алюминиевая поверхность. Сформированная картина используется как шаблон для второго анодирования. После зачистки первого сформированного оксидного слоя инициализируется второе анодирование с использованием тех же параметров, что и на первом этапе. После второго анодирования необходимо открыть поры, поскольку диаметр пор обычно составляет <25 нм. Но трудно контролировать диаметр пор путем интенсивного контроля времени открытия пор. Вероятно, это связано с различной выдержкой образовавшегося оксида – процесс, который трудно контролировать полностью. Параметры, которые могут быть задействованы (оказывают влияние при производстве) – это влажность воздуха в лаборатории, а также температура и качество химических веществ.

§1.2. Управление электронами с помощью нанокапилляров

Первые эксперименты по пропусканию электронов через нанокапилляры были проведены с использованием нанокапилляров в пленках Al_2O_3 [9] и ПЭТ [10] в качестве исходных материалов. Экспериментальные методы изучения переноса электронов через капилляры очень похожи на те, что использовались для ионов. Обычно источник электронов с фокусирующими элементами и коллимирующими щелями использовался для создания коллимированного пучка моноэнергетических электронов. Ось пучка электронов первоначально сонаправлена с осями капилляров, которые затем поворачивались относительно оси падающего пучка, как это делалось в случае ионного облучения. Характеристики прошедших через каналы электронов измерялись электростатическим анализатором или чувствительным к пространственному положению детектором.

Эксперименты показали, что свойства прошедших электронов значительно отличаются от свойств положительных ионов. Было обнаружено, что электроны, как ионы, двигаются в каналах вдоль капиллярной оси. Тем не менее, способность капилляров управлять электронами, как правило, хуже, чем для ионов. Заряженные области, в конечном итоге производимые падающими электронами, относительно слабые, так что значительная часть падающих электронов попадает на поверхность, где они могут потерять энергию. Многие из электронов рассеиваются атомами стенок каналов, так что заметное количество электронов испытывает неупругие потери, что фиксируется на выходе из капилляров. Тем не менее, энергетические спектры также содержат упругую часть, свидетельствуя, что определенная доля электронов не теряет энергию при электронном гайдинге (рисунок 4). Упругая часть, возможно, является показателем отклонения электронов отрицательно заряженными областями. Однако часть этих электронов может быть связана с упругим рассеянием на атомах, расположенных вблизи поверхности капилляров.

На рисунке 4 показаны энергетические спектры электронов для разных углов наклона ψ . Спектры относятся к падающим электронам с энергией ~ 500 эВ, полученным под углами наблюдения. Авторы наблюдали значительные потери энергии для прошедших электронов. Этот результат сильно отличался от результатов для медленных положительных ионов, для которых не наблюдалось заметных потерь энергии. Спектры показывают, что неупругая доля увеличивается с углом наклона, так что она доминирует в спектрах, превышающих приблизительно 5 градусов. Наблюдая вклад в спектр неупругих потерь энергии электронов, авторы работы предположили, что часть электронов «погружается» в поверхность капилляра, где они испытывают потери энергии. Очевидно, что зарядовые пятна являются относительно слабыми, поэтому значительная часть электронов не может отклоняться на больших расстояниях от стенки капилляра.

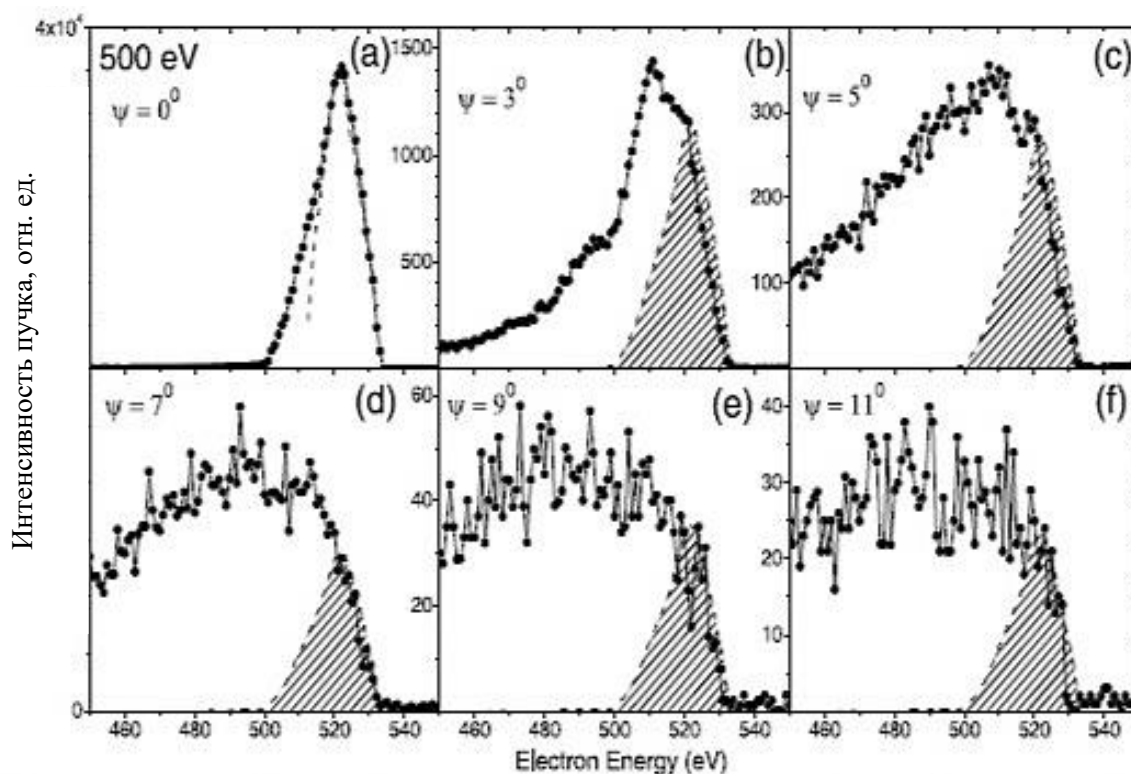


Рис. 4. Энергетические спектры электронов, показывающие растущую потерю энергии электронов, прошедших через наноканалы, с увеличением угла наклона ψ . Начальная энергия падающих на пленку с каналами электронов составляет 520 эВ. Заштрихованные области указывают приблизительную оценку упругого вклада. Источник: из [10]. Эксперимент был сделан для капилляров из ПЭТ-фольги толщиной 10 мкм, диаметр каналов был около 200 нм (аспектное отношение 50)

Тем не менее, как видно из рисунка 4, заметные доли упругих электронов остаются даже при больших углах наклона. Это предположение представляется оправданным для энергетического спектра, полученного при $\psi = 0^\circ$, который имеет почти тот же профиль и ширину, что и спектр, измеренный для прямого пучка (штриховая линия), как показано на рисунке 4 (а). (Небольшой неупругий вклад на стороне низких энергий пика $\psi = 0^\circ$ можно объяснить расходимостью падающего пучка и непараллельностью капилляров, что приводит к потерям энергии на стенках капилляров). Однако

для ненулевых углов наклона, подходы, оценивающие упругую долю электронов, кажутся менее точными.

В работе [11] сообщается о временной эволюции электронов с энергией 500 эВ через изолирующую фольгу ПЭТ с нанокapиллярами при трех различных углах наклона относительно оси падающего электронного пучка. Здесь временная шкала представлена в виде эквивалентного заряда, попадающего в один капилляр при облучении первичным пучком электронов. Измерения основаны на изменении интенсивности прошедшего пучка электронов и среднего значения энергии прошедших электронов по отношению к числу электронов, попадающих в капилляры. Результаты ясно указывают на наличие эффекта зарядки. Видно, что прохождение начинается не мгновенно, как это было бы в случае упругого рассеяния электронов на атомах стенки каналов, а требуется некоторое время для подзарядки стенки.

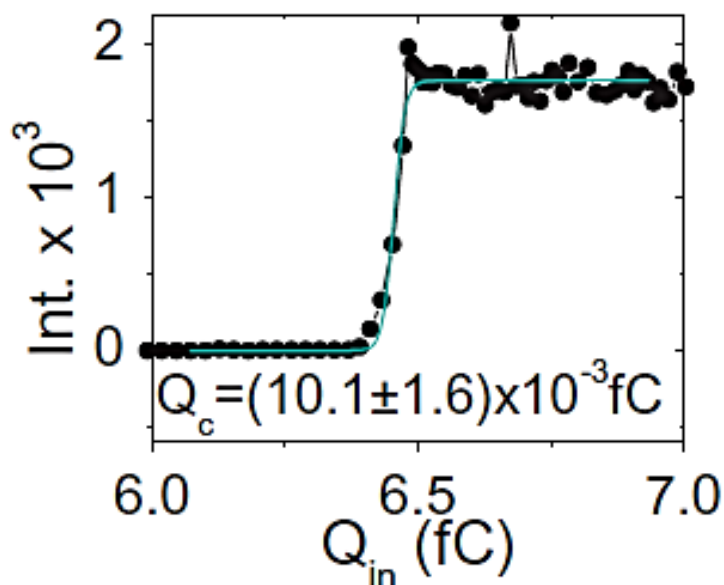


Рис.5 Временная эволюция интенсивности прошедшего пучка электронов в зависимости от количества электронов, падающих на пленку.

[11]

Результаты экспериментов различных научных групп указывают на то, что управление электронами осуществляется также за счет образования на

внутренних стенках каналов самосогласованного зарядового распределения. Однако процесс управления электронами значительно отличается от управления положительными ионами. Подобно ионам, электроны ориентируются вдоль оси капилляра. Тем не менее, способность капилляров управлять электронами, как правило, меньше, чем ионами. При ненулевых углах поворота капилляров спектры прошедших электронов демонстрируют, что часть электронов испытывает неупругие потери в каналах. Тем не менее, энергетические спектры также содержат упругую часть, которая показывает, что некоторая доля электронов не теряет энергию во время прохождения через капилляр. Упругая часть, предположительно, указывает на отклонение электронов отрицательно заряженными областями поверхности. Однако некоторая часть этих электронов может образовываться и из-за упругого рассеяния на атомах, расположенных вблизи поверхности капилляров. Следует также заметить, что ионы, ударяясь о стенку канала, формируют положительно заряженное распределение, тогда как электроны, благодаря существенной вторичной электронной эмиссии, могут образовывать как положительно, так и отрицательно заряженные области, что также может влиять на транспортировку электронов в канале.

Таким образом, можно подвести следующий итог: несколькими научными группами проводились исследования эффектов управления заряженными частицами с помощью диэлектрических нанокapилляров. В настоящее время обсуждаются результаты с акцентом на противоречивое сравнение параметров прошедших электронов и управляющих свойствах для ионов и электронов. [12].

Свидетельством бесконтактного прохождения ионов через каналы является практически полное исключение энергетических потерь ионов на выходе из капилляров. В экспериментах получали более узкий профиль прошедшего пучка для более высоких энергий. Было отмечено, что

управляющие эффекты усиливаются при более низких энергиях падающей заряженной частицы. [4]

В отличие от ионов для электронов наблюдались значительные потери энергий, которые увеличивались с увеличением угла наклона. А измерения [11,13] показали, что управление электронами с помощью наноканалов происходила с задержкой по времени, что свидетельствовало о том, что образующийся участок отрицательного заряда играет определенную роль в управлении электронами [14]. Начало передачи электронов происходило после введения значительного заряда в капилляр, и оно росло намного быстрее, чем наблюдалось для ионов.

До настоящего времени детальная интерпретация этих неопровержимых различий между электронами и ионами отсутствует, что позволяет предположить, что некоторые вопросы, касающиеся процессов передачи электронов, остаются нерешенными.

Ниже приведена сводная таблица параметров экспериментов для ионов и электронов. Видно, что большое количество проведенных экспериментов для ионов по сравнению с электронами сделаны с более высокими энергиями.

Таблица 2. – Сравнение основных результатов, полученных при проведении исследований по управлению пучками заряженных частиц с помощью наноканалов

	Типичная энергия	Энергетическое состояние прошедших через каналы частиц
Ионы	0.6-9.6 кэВ Ar ³⁺ [20] 1.6 кэВ H ⁺ [19]	Нет заметных потерь энергий на выходе из капилляра.

	3;9 кэВ Ne ⁷⁺ , Ar ⁹⁺ [1, 21] 12 кэВ Ar ⁸⁺ [16]	
электроны	0.5 кэВ [11] 0.8 кэВ [18] 1 кэВ [8]	Значительные потери энергии.

Важно, прохождение как положительно заряженных ионов, так и электронов через нанокапилляры начинается не мгновенно, что свидетельствует о необходимости формирования зарядового распределения на внутренних стенках каналов, обеспечивающего прохождение заряженных частиц через капилляры.

Глава 2. Основная часть

§ 2.1 Постановка задачи

Задача, поставленная в рамках данной дипломной работы, состоит в рассмотрении возможности управления пучком электронов с энергией 10 кэВ с помощью наноканалляров в пленке ПЭТ при повороте пленки на небольшие углы относительно оси падающего пучка.

Схема эксперимента изображена на рисунке 6.

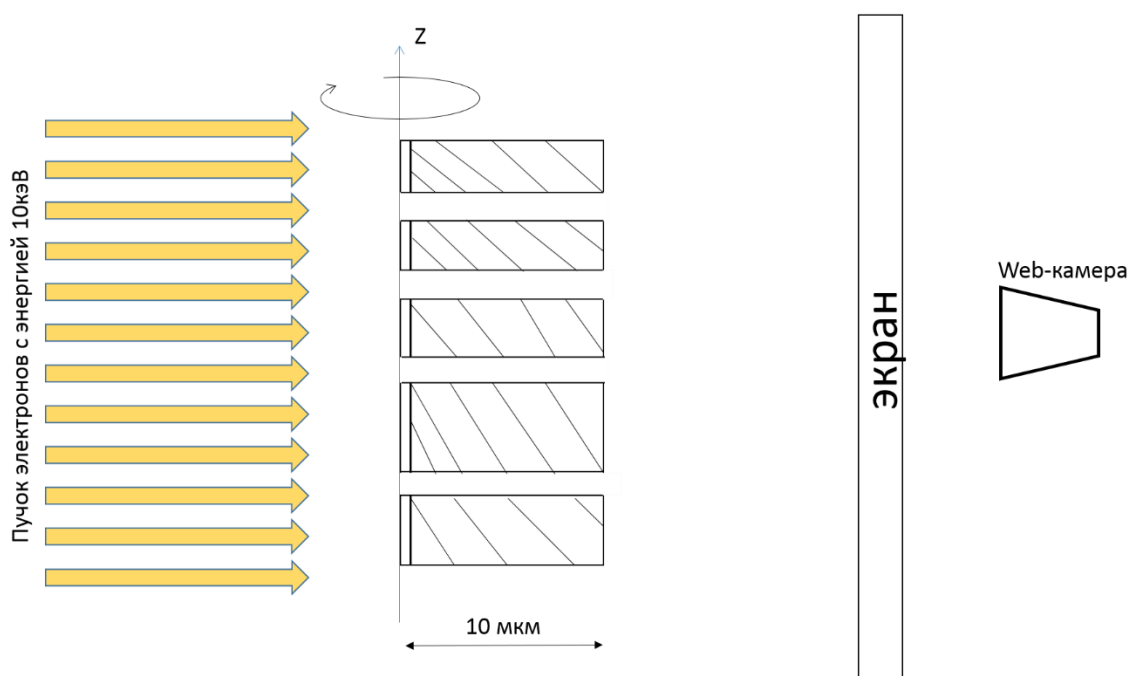


Рисунок 6. Постановка эксперимента: пучок электронов падает на пленку ПЭТ с сформированными в ней наноканалами. Фронтальная поверхность пленки покрыта тонким слоем золота. За пленкой установлен экран с сцинтилляционным порошком, положение пучка на экране фиксируется с помощью web-камеры.

Эксперимент проходит следующим образом. Пучок электронов падает нормально на поверхность пленки ПЭТ с наноканаллярами. После прохождения электронов через каналы они падают на установленный за

пленкой полупрозрачный стеклянный экран с разметкой 1x1 см. Экран покрыт слоем серебра для предотвращения его зарядки частицами пучка. На экран нанесен порошок (сульфид цинка), являющийся сцинтиллятором. Указанная система размещается в вакуумной камере, на торцевой части которой размещена камера для визуального контроля положения пучка на экране.

Эксперимент проводился на установке, созданной на базе лаборатории радиационной физики НИУ «БелГУ» [15]. Схема вакуумной установки для проведения эксперимента показана на рисунке 7.

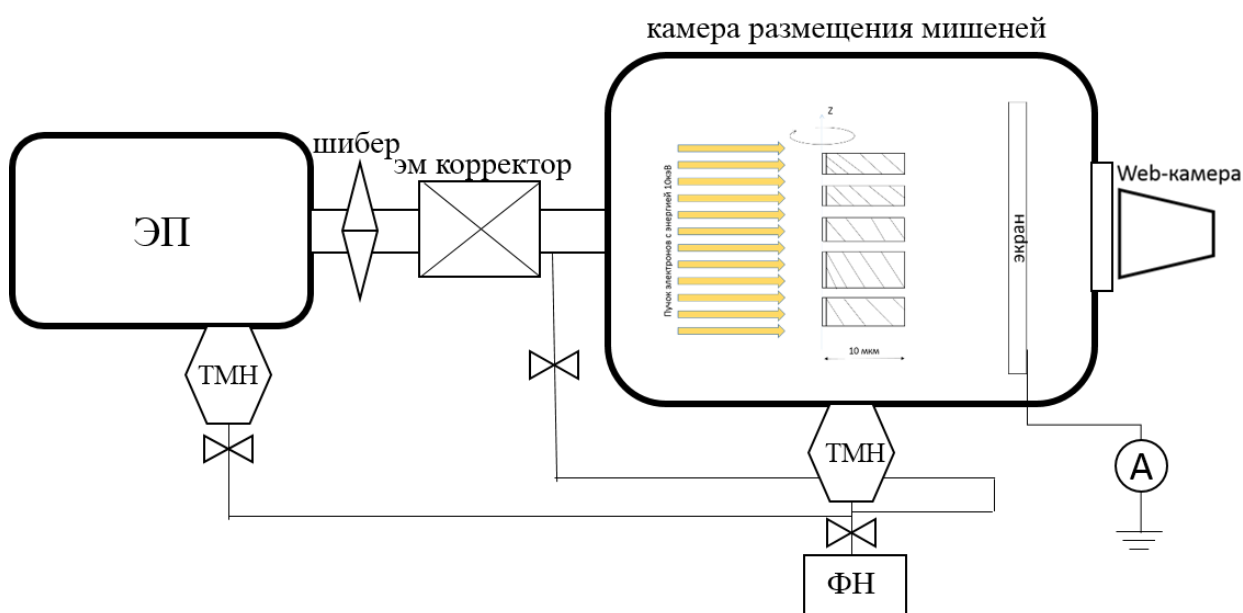


Рисунок 7. Схема экспериментальной установки

Установка включает в себя две независимо откачиваемые части: источник пучка электронов и часть, в которой размещаются мишени. Источник электронов представляет из себя электронную пушку (ЭП). Секция размещения мишени включает в себя вакуумную камеру, в которой установлены гониометр, позволяющий менять угол поворота каналов относительно оси падающего пучка электронов, проводящий стеклянный экран, покрытый сцинтилляторным порошком, web-камеру для визуализации положения следа пучка на стеклянном экране. Для измерения величины тока прямого пучка и

величины тока пучка электронов после прохождения через наноканалы использовался пикоамперметр Keithley 6482. Для откачки системы используются турбомолекулярные насосы (ТМН) и сухой форвакуумный насос (ФН). Первоначальное формирование пучка электронов и транспортировка его в камеру мишени проводится с помощью диафрагмы диаметром 0.5 мм на выходе вакуумной камеры и электромагнитной системы корректоров, установленной на трубопроводе между камерами с электронной пушкой и мишенями. Электромагнитная система состоит из фокусирующего соленоида и корректора положения пучка в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Вакуумная камера с электронной пушкой и камера с мишенями отделяются с помощью вакуумного шибера, расположенного между ними на трубопроводе. Разделение частей установки позволяет сохранять вакуум в камере электронной пушки, когда требуется изменить условия эксперимента в камере размещения мишени при атмосферном давлении. Форвакуумный насос является общим для всей установки. Вакуумная система обеспечивает уровень вакуума лучше 10^{-7} торр в камере ЭП и лучше 10^{-6} торр в камере размещения мишеней. Электронная пушка способна генерировать пучок электронов с энергиями до 60 кэВ и током до нескольких десятков миллиампер. Пучок в области мишени имеет нормальное распределение плотности тока с шириной на полувысоте распределения (FWHM) 2 мм в точке расположения мишени.

Для проведения эксперимента была использована пленка полиэтилентерефталата толщиной 100 мкм. Пленка была предоставлена университетом Ланьчжоу. Размеры наноканалов в имеющемся образце – длина 100 мкм, диаметр 200 нм. На пленку предварительно напылили тонкий слой золота, для того чтобы предотвратить зарядку поверхности в течение всего эксперимента. На рисунках 8 и 9 представлены изображения образца до и после напыления золотом. Напыление проводилось под углом $\sim 60^\circ$ в течение 30 секунд.

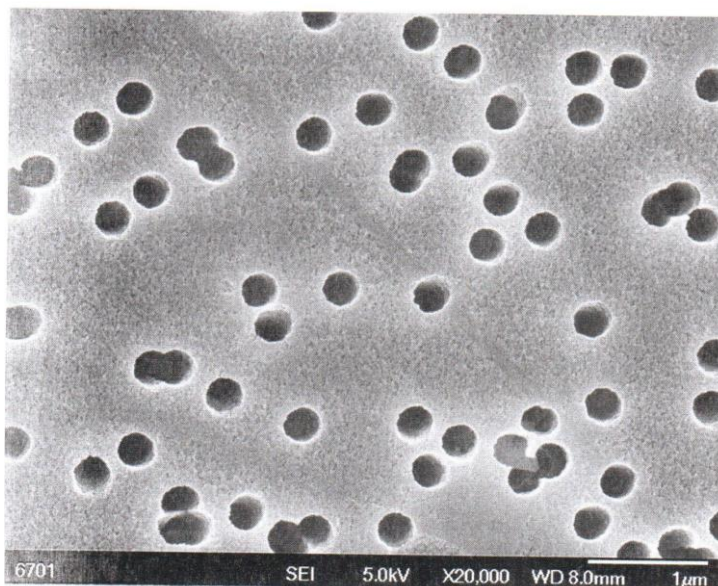


Рисунок 8. Изображение образца пленки ПЭТ с нанокapиллярами до покрытия золотом

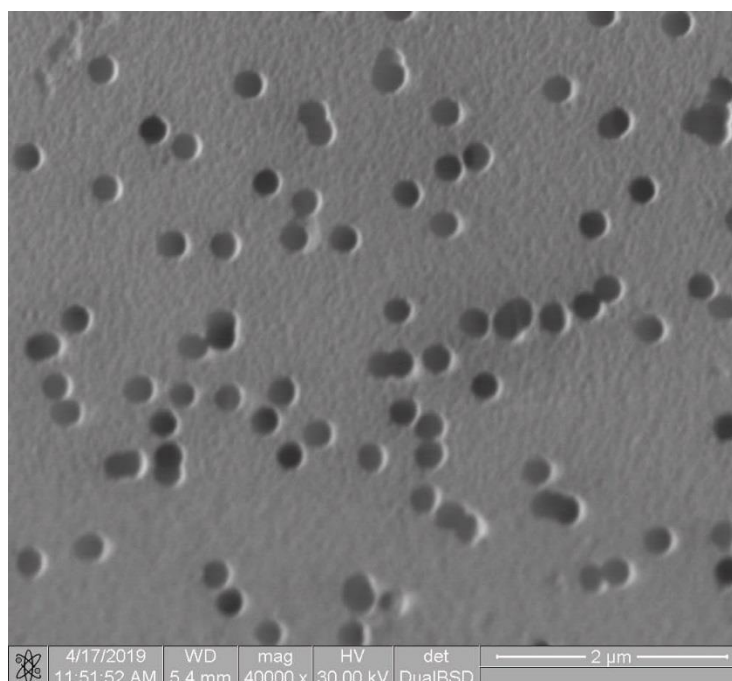


Рисунок 9. Изображение образца ПЭТ после напыления золотом

Следует отметить, что степень «прозрачности» образца не превышает 10%, причем «прямыми» каналами являются самые темные пятна на снимке, более светлые пятна означают, что канал либо не является сквозным, либо сильно отклоняется от нормального к поверхности пленки направления. Образец крепился в специально разработанный и изготовленный для данного

эксперимента металлический держатель, который устанавливался на заземленную подложку гониометра (рисунок 10). Металлизированная поверхность пленки соприкасалась с заземленной прижимающей частью держателя, что обеспечивало заземление фронтальной части пленки и предотвращало зарядку вблизи входов в каналы.



Рисунок 10. Образец ПЭТ, закрепленный в держателе

§ 2.2 Результаты эксперимента

Эксперимент проводился на пучке электронов 10 кэВ, величина тока пучка варьировалась от 6 нА до 45 нА. На начальном этапе мишень была сдвинута от оси прямого пучка, чтобы не допустить неконтролируемой зарядки пленки. Сначала был сделан снимок сетки экрана, что дает возможность масштабировать получаемые снимки без дополнительной подсветки в камере размещения мишеней (рисунок 11).



Рисунок 11. Фотография сетки для масштабирования дальнейших снимков (слева) и фотография следа пучка электронов на экране (справа). Величина тока 8 нА.

Затем включался пучок, и с помощью электромагнитной системы положение пучка выставлялось таким образом, чтобы при сдвиге мишени под пучок облучению подвергалась центральная часть пленки. Снимок положения на экране прямого пучка для величины тока 8 нА показан на рисунке 11 (справа).

Далее мишень вводилась по пучок и облучалась в течение двух часов. Были сделаны следующие наблюдения. Пятна от пучка электронов не наблюдалось, кроме того так, регистрируемый пикоамперметром, был

положительным, а именно 340 пА, причем ток снижался в течение двух часов до величины шума. При выводе мишени из-под пучка величина тока первичного пучка оставалась на уровне 8 нА, а, следовательно, уменьшение положительного тока при облучении мишени, вероятно, не являлось следствием нестабильности первичного пучка.

Далее эксперимент повторили, увеличив ток первичного пучка до 45 нА. Результат эксперимента не изменился – пятна на экране не наблюдалось, при этом фиксировался положительный ток в несколько сотен пикоампер.

Таким образом, явно не было зафиксировано прохождения электронов с энергией 10 кэВ через наноканалы предоставленного образца.

После проведения эксперимента образец был извлечен из камеры. На пленке был зафиксирован след, свидетельствующий об облучении (потемневшее пятно), а также была отмечена деформация пленки, которая возникла, вероятно, под действием нагрева при облучении.

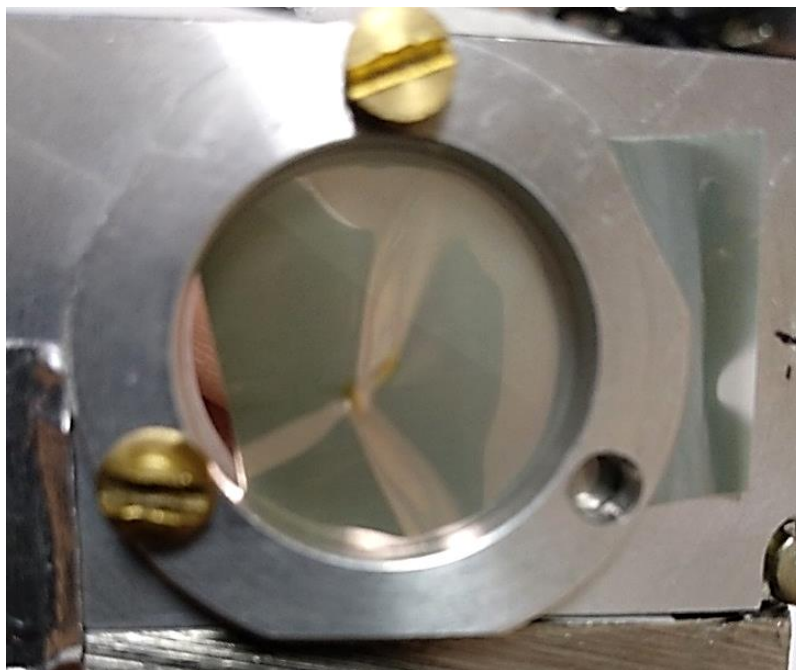


Рисунок 8. Пленка ПЭТ после проведенного эксперимента

Снимки пленки после облучения, полученные на электронном микроскопе, не выявили каких-либо явных изменений и повреждений в образце. Таким образом, экспериментальное исследование возможности управления 10 кэВ электронами с помощью наноканалов, сформированных в предоставленном образце, показало отсутствие гайдинг-эффекта. Однако, как было сказано в параграфе 2.1, степень прозрачности предоставленного образца довольно низкая и при этом образец отличается высокой степенью разупорядоченности осей наноканалов, что могло привести к высокой расходимости первичного пучка, прошедшего через каналы, а, следовательно, к существенному уменьшению интенсивности тока пучка и потере энергии электронами первичного пучка.

Положительный измеряемый ток может свидетельствовать о наличии существенной вторичной электронной эмиссии из металлизированного покрытия экрана. Эксперименты показывают, что максимальный коэффициент вторичной электронной эмиссии из серебра (слоем которого покрыт экран) приходится на энергию электронов падающего пучка в интервале 300-800 эВ [22]. Отсюда можно предположить, что положительный ток, снимаемый с экрана, может быть результатом попадания на экран части электронов первичного пучка, прошедшего через наноканал и потеряв основную часть энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью дипломной работы было проведение экспериментального исследования возможности управления пучком электронов с энергией 10 кэВ с помощью нанокапилляров в пленке ПЭТ.

Для выяснения данной возможности был предоставлен образец пленки (университет Ланьчжоу) с нанокапиллярами, имеющими следующие параметры: длина – 100 мкм, диаметр 200 нм. Пленка была покрыта тонким слоем золота для предотвращения зарядки области входных отверстий нанокапилляров электронами падающего пучка.

Перед выполнением поставленной задачи были проанализированы научные публикации по теме исследования. Анализ показал, что результаты экспериментов различных научных групп указывают на то, что управление электронами осуществляется за счет образования на внутренних стенках каналов самосогласованного зарядового распределения. Подобно ионам, электроны движутся вдоль оси капилляров. Тем не менее, способность капилляров управлять электронами, как правило, меньше, чем подобная способность по отношению к положительно заряженным ионам. При ненулевых углах поворота капилляров относительно оси первичного пучка спектры прошедших электронов демонстрируют, что часть электронов испытывает неупругие потери в каналах. Тем не менее, энергетические спектры также содержат упругую часть, которая показывает, что некоторая доля электронов не теряет энергию во время прохождения через капилляр. «Упругая» часть в спектре, предположительно, указывает на отклонение электронов отрицательно заряженными областями поверхности. Данное предположение может быть подтверждено тем фактом, что прохождение электронов начинается не мгновенно, как это было бы в случае упругого рассеяния электронов на атомах стенки каналов, а постепенно увеличивается с течением времени. Однако некоторая часть этих

электронов все же может образовываться и из-за упругого рассеяния на атомах, расположенных вблизи поверхности капилляров.

Результаты ранее проведенных исследований, описанных в литературном обзоре, ясно указывают на наличие эффекта зарядки и существование эффекта гайдинга для электронов. Важно отметить, что на настоящий момент все результаты были получены для пучков электронов с энергиями, не превышающими 1.5 кэВ.

В рамках выполнения дипломного проекта было выполнено исследование эффекта гайдинга для электронов с энергией 10 кэВ. Согласно существующим экспериментальным данным было предположено, что с увеличением энергии первичного пучка прошедшие через наноканалы электроны должны сохранить свое первоначальное энергетическое состояние при нормальном падении на пленку. Однако при повороте осей наноканалов относительно оси падающего пучка интенсивность прошедшего пучка должна падать довольно быстро, и основная часть пучка должна испытать существенные энергетические потери.

При выполнении экспериментального исследования с предоставленным образцом не было явно зафиксировано прохождения электронов с энергией 10 кэВ через наноканалы. Предположительные причины такого результата заключаются в следующем:

1. низкая «прозрачность» предоставленного образца, порядка 7% для открытых каналов;
2. высокая степень непараллельности осей нанокпилляров, а, следовательно, сильная расходимость и высокий уровень энергетических потерь электронов, прошедших через нанокпилляры.

Таким образом можно заключить, что гайдинг-эффект для 10 кэВ электронов требует дальнейших исследований с новыми, более совершенными образцами.

Список литературы

1. «Transmission of 3 keV Ne⁷⁺ ions through nanocapillaries etched in polymer foils: evidence for capillary guiding» Stolterfoht N., Bremer J.H, Hoffmann V. et al. // Phys.Rev.Lett. Vol.88. P.13-201. (2002)
2. «Guiding of slow Ne⁷⁺ ions through nanocapillaries in insulating polyethylene terephthalate: Incident current dependence» N. Stolterfoht, R. Hellhammer, J. Bundesmann, D. Fink, Y. Kanai, M. Hoshino, T. Kambara, T. Ikeda, and Y. Yamazaki //Physical Review A 76(2):022712-022712 · August (2007)
- 3 «Scaling laws for guiding of highly charged ions through nanocapillaries in an insulating polymer» N. Stolterfoht, R. Hellhammer, J. Bundesmann, D. Fink. //Phys. Rev. A 77 032905. (2008)
- 4 «Guided transmission of highly charged ions through nanocapillaries in PET: Study of the energy dependence» R. Hellhammer, Z.D. Pesic, P. Sobocinski, D. Fink, J. Bundesmann, N. Stolterfoht // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms 233(1):213-217 · (May 2005)
5. «Transmission hochgeladener Ionen durch Nanokapillaren in Polyethylenterephthalat» R. Hellhammer// Die. (Ph.D. thesis), Technische Universität Berlin (2006)
6. «Scaling laws for ion guiding through nanocapillaries in insulating PET» R. Hellhammer, D. Fink, N. Stolterfoht. F. Aumayr, C. Lemell (Eds.)// Book of Abstracts, 16th International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions, Hernstein, Austria, p. 53. (2006)
7. «Guiding of charged particles through capillaries in insulating materials» Nikolaus Stolterfoht, Yasunori Yamazaki // Physics Reports 629 ·(2016)
8. «Fabrication of silicon dioxide nanocapillary arrays for guiding highly charged ions Nanotechnology» R.T. Rajendra-Kumar, X. Badel, G. Viktor, J. Linnros, R. Schuch// Nanotechnology, Volume 16, Number 9 1697–1700 (2005)
9. «Guiding of low-energy electrons by highly ordered Al₂O₃ nanocapillaries» A.R. Milosavljević, G. Viktor, Z.D. Pešić, P. Kolarž, D. Šević, B.P. Marinković,

- S. Mбтйfi-Tempfli, M. Mбтйfi-Tempfli, L Piraux// Phys. Rev. A 75 030901(R). (2007)
10. «Inelastic guiding of electrons in polymer nanocapillaries».S. Das, B. S. Dassanayake, M. Winkworth, J. L. Baran, N. Stolterfoht, and J. A. Tanis// Phys. Rev. A 76, 042716 (2007)
- 11.«Temporal evolution of electron transmission through insulating PET nanocapillaries» B.S. Dassanayake, D. Keerthisinghe, S. Wickramarachchi , A. Ayyad , S. Das,N. Stolterfoht , J.A. Tanis// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms 298:1–4 (2013)
- 12.«Electrons transmitted through a plate capillary» Yingli Xue Deyang Yu, Junliang Liu, Mingwu Zhang, Bian Yang, Yuezhao Zhang and Xiaohong Cai// Journal of Physics: Conference Series 635 (2015)
- 13.«Charge deposition dependence and energy loss of electrons transmitted through insulating PET nanocapillaries» D. Keerthisinghe, B. Dassanayake, S. Wickramarachchi, N. Stolterfoht, J. Tanis// Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 317 105 (2013)
14. «Significant differences in ion and electron guiding through highly insulating capillaries» N. Stolterfoht, J. Tanis, Helmholtz-Zentrum // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms: Beam Interactions with Materials and Atoms (2018)
15. «Experimental setup for studying the processes occurring during interaction of fast electrons with matter» K.A. Vokhmyanina, A.S. Kubankin, I.A. Kishin, R.M. Nazhmudinov, Yu.S. Kubankin, A.V. Sotnikov, V.S. Sotnikova, D.A. Kolesnikov// Journal of nano- and electronic physics Vol. 10 No 6, 06036(3pp) (2018)
16. «Charging and discharging of nanocapillaries during ion guiding of multiply charged projectiles».M Fursatz, W Meissl, S Pleschko, I C Gebeshuber, N Stolterfoht, HP Winter and F Aumayr// Journal of Physics Conference Series 58(1):319-322 (2007)

17. «Исследование процессов скользящего взаимодействия быстрых электронов с диэлектрическими поверхностями» Сотникова Валентина Сергеевна // кандидатская диссертация Белгород (2016)
18. «Transmission and Guiding of Fast Electrons through Insulating PET Nanocapillaries» D. Keerthisinghe, B. S. Dassanayake, S. Wickramarachchi, A. Ayyad, N. Stolterfoht and J.A. Tanis // AIP Conf. Proc. 1525, 36 (2013)
19. «Time evolution of ion guiding through nanocapillaries in a PET polymer» N. Stolterfoht, R. Hellhammer, Z.D. Pešić, V. Hoffmann, J. Bundesmann, A. Petrov, D. Fink, B. Sulik, M. Shah, K. Dunn, J. Pedregosa, R. W. McCullough // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms (2004)
20. «Guiding of Argon ions through PET nano capillary foils» M Kreller¹, G Zschornack¹ and U Kentsch // Journal of Physics: Conference Series, Volume 163, Number 1 (2009)
21. «Guiding of highly charged ions through nanocapillaries in PET: Dependence on the projectile energy and charge» R. Hellhammer, D. Fink, N. Stolterfoht // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Pages 149-152 (2007)
22. T. Gineste, M. Belhaj, G. Teyssedre, J. Puech, N. Balcon. Investigation of the electron emission properties of Silver: from technical Ag surface to ion- cleaned Ag surface. International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation (MULCOPIM'14), Sep 2014, VALENCE, Spain. hal-01082920