

УДК 537.533.9

## ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 10 КЭВ ЧЕРЕЗ НАБОР ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МАКРОКАНАЛОВ

Л. В. Мышеловка<sup>1</sup>, К. А. Вохмянина<sup>1</sup>, В. С. Сотникова<sup>1,2</sup>,  
А. А. Кубанкина<sup>1</sup>, А. Д. Пятигор<sup>1</sup>, И. А. Кищин<sup>1,4</sup>, Ю. В. Григорьев<sup>3</sup>

*В работе представлены результаты исследования прохождения пучка электронов с энергией 10 кэВ через цилиндрические диэлектрические макроканалы разной длины. Все каналы были изготовлены из полиэтилентерефталата, имели одинаковый внутренний диаметр 1.55 мм и длины – 20, 30, 35, 40, 45 и 50 мм. Измерена зависимость величины тока, прошедшего через каналы пучка, от угла наклона каналов относительно оси падающего пучка электронов. Сделана оценка доли пучка электронов, испытавших потери энергии не более 1 кэВ после прохождения диэлектрического канала. Также была исследована зависимость максимального прохождения электронов через каналы от длины каналов. Полученные данные показали, что интенсивность прошедшего тока слабо зависит от длин каналов в исследуемом диапазоне длин 20–50 мм. Результаты можно объяснить тем, что на стенках канала образуется такое динамическое зарядовое распределение, которое обеспечивает наилучшие условия прохождения электронов через диэлектрический канал.*

**Ключевые слова:** пучок электронов, рентгеновское излучение, диэлектрические макроканалы.

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015 Россия, Белгород, ул. Победы, 85.

<sup>2</sup> Белгородский Технологический Университет имени В.Г. Шухова, 308012 Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46.

<sup>3</sup> Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 59, стр. 1.

<sup>4</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: lareczn@gmail.com.

*Введение.* Возможность управления пучками заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов (гайдинг) является актуальной задачей ввиду потенциальной возможности создания недорогих автономных управляющих и фокусирующих устройств. Пучки заряженных ионов находят широкое применение в различных областях науки: 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, клеточная хирургия и т. п.). Эксперименты в данном направлении демонстрируют высокий потенциал использования диэлектрических систем для управления пучками ионов, тогда как для электронных пучков данная возможность еще изучается.

Впервые исследования по управлению пучками нерелятивистских электронов были выполнены в 2007 году с электронами с энергиями 500 и 1000 эВ. Электроны пропускались через наноканалы, сформированные в фольге полиэтилентерефталата. Измерения тока электронов, прошедших через каналы, проводились при различных углах наклона мембраны. При этом прохождение наблюдалось при углах наклона мембраны в диапазоне  $\pm 10^\circ$  [1].

Аналогичные исследования проводились в работах [2–7], но уже с макроканалами. Например, в работе [2], была изучена зависимость прохождения пучка электронов с энергиями 1100–1500 эВ через стеклянную изогнутую трубку в зависимости от энергии и тока, падающего в трубку пучка. Длина используемой стеклянной трубки 50 мм, внутренний диаметр 2.3 мм, изгиб трубки достигался путем нагревания и поворота выходного торца трубки на  $15^\circ$  относительно входного. Результаты данной работы показали, что интенсивность пучка прошедших электронов пропорциональна интенсивности падающего пучка, а угловая расходимость пучка прошедших электронов уменьшается при увеличении энергии первичных электронов.

В работе [3] электроны с энергией 10 кэВ пропускались через цилиндрический пластиковый канал с внутренним диаметром 1.63 мм и длиной 5 см. Канал наклоняли относительно оси пучка на некоторый угол и следили за движением следа прошедшего пучка на экране, покрытом сцинтиллятором. Результаты работы [3] продемонстрировали возможность управления пучком электронов в пределах от  $-4^\circ$  до  $+4^\circ$ .

В настоящей работе проведено исследование прохождения пучка электронов с энергией 10 кэВ через пластиковые макроканалы различной длины. Определена примерная доля прошедших электронов, испытавших потери энергии в каналах не более 10%.

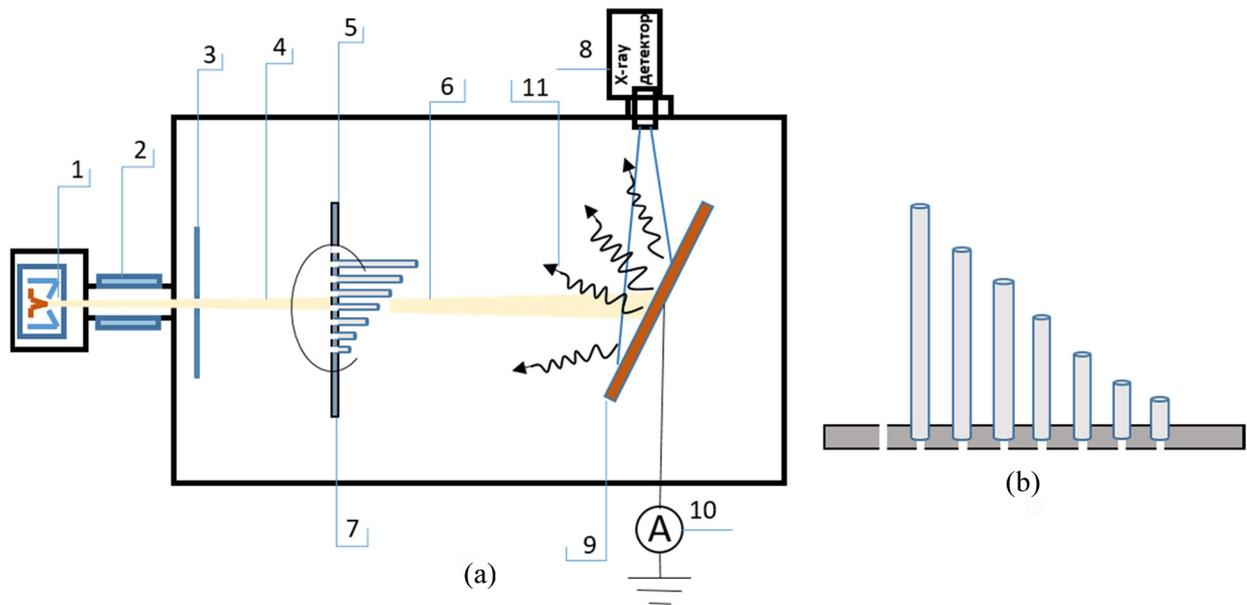


Рис. 1: Схема эксперимента (а): 1 – электронная пушка, 2 – система электромагнитных линз, 3 – коллиматор  $\varnothing 1$  мм, 4 – пучок ускоренных электронов, 5 – образцы с заземленной маской, 6 – пучок электронов, прошедших через образцы, 7 – ось наклона оси образца относительно оси падающего пучка, 8 – детектор рентгеновского излучения, 9 – медная пластина, 10 – амперметр, 11 – излучение, сгенерированное при попадании электронов на медную пластину; (b) схематичное изображение образцов, установленных в едином держателе.

*Материалы и методы.* В данной работе представлены экспериментальные данные по исследованию прохождения электронов с энергией 10 кэВ через цилиндрические каналы, изготовленные из полиэтилентерефталата, со следующими геометрическими параметрами: длины – 20, 30, 35, 40, 45 и 50 мм, внутренний диаметр 1.55 мм, толщина стенок 0.5 мм.

Схема экспериментальной установки и набор исследуемых образцов в едином держателе приведены на рис. 1. С более детальным описанием экспериментальной установки можно ознакомиться в работе [8].

Пучок электронов генерируется электронной пушкой (1), проходит через систему электромагнитных линз (2) и коллиматор (3) диаметром 1 мм. Сформированный пучок (4) попадает на вход исследуемого в данный момент канала, закрепленного в едином наборе из семи каналов (рис. 1(b)). Набор каналов (5) установлен в держателе гониометра, позволяющего линейное перемещение набора каналов для их последовательного облу-

чения, и наклон облучаемого канала относительно оси падающего пучка вокруг оси (7). Входы каналов закрыты единой металлической заземленной маской с миллиметровыми отверстиями перед каждым образцом, что позволяет экранировать торцы пластиковых каналов от облучения электронами пучка, и, как следствие, предотвращает запираание каналов. Образцы были установлены в единый держатель для соблюдения одинаковых условий эксперимента для каждого отдельного образца. Для измерения тока первичного пучка, падающего в каналы, в маске было предусмотрено дополнительное сквозное отверстие диаметром 1 мм. Электроны (6), прошедшие через облучаемый канал, попадают на медную пластину (9). Спектр генерируемого в пластине излучения измеряется полупроводниковым твердотельным детектором XR-100SDD (8). Одновременно проводится измерение тока прошедшего или прямого пучка с помощью пикоамперметра Keithley 6482 (10). Для подавления выхода вторичных электронов с медной пластины непосредственно перед ней установлена латунная сетка (на рисунке не показана), на которую подается напряжение 400 В. Эксперимент проводился при вакууме порядка  $10^{-6}$  торр.

Измерения проводились следующим образом. Сначала для прямого пучка, проходящего через сквозное отверстие, измерялся ток и спектр генерируемого в медной пластине излучения. Затем набор каналов линейно сдвигался таким образом, чтобы пучок электронов попадал в первый канал, заряжая его внутреннюю поверхность. В течение 2-х минут измерялся ток прошедших через канал электронов и спектр, генерируемый при взаимодействии этих электронов с медной пластиной. Затем держатель с образцами сдвигался для облучения следующего канала, и измерения повторялись. Таким образом, были проведены измерения для всего набора. Затем держатель с образцами наклонялся относительно оси падающего пучка на определенный угол, и снова воспроизводилась та же последовательность измерений. Следует отметить, что величина тока прошедших электронов стабилизировалась в течение примерно одной минуты. Однако в данной работе временная зависимость пропускания не приводится, поскольку требует отдельного исследования.

Угол геометрического пропускания для каждого образца приведен в табл. 1.

*Результаты и обсуждение.* На рис. 2 представлены данные по измерению зависимости доли пучка электронов, прошедших через диэлектрический канал, от угла наклона для каждого канала. Также для каждого канала показана доля электронов от падающего в канал пучка, которые прошли через него и потеряли не более 10% своей первоначальной энергии. Оценка данной величины выполнялась методом, который

более подробно описан в [9]. Суть метода заключается в сравнении спектров электромагнитного излучения, генерируемого при взаимодействии с медной пластиной пучка электронов, прошедших через сквозное отверстие и через каналы. При этом сравнивается та часть спектра, которая связана с характеристической  $K_\alpha$  линией меди (энергия фотонов 8.048 кэВ), для образования которой энергия электронов должна быть не менее 8.993 кэВ ( $K_{\text{edge}}$  для меди). Так как предполагается, что число событий спектра линейно зависит от числа падающих на медную пластину электронов, метод является оценочным.

Т а б л и ц а 1

## Углы геометрического пропускания каналов

Длина канала (мм)	Угол геометрического пропускания образца ( $\pm$ , в градусах)
20	3.6
30	2.4
35	2
40	1.8
45	1.6
50	1.4

Из рис. 2 видно, что для всех использованных длин каналов прохождение электронов происходит вблизи области соответствующих углов геометрического пропускания. Причем для каждого канала в конечном пучке присутствует существенная доля электронов, прошедших через канал с потерями энергии менее 10% даже при углах вблизи границ геометрического пропускания. Данные рис. 2 для каждой длины хорошо аппроксимируются кривой Гаусса. В результате такой обработки на рис. 3 показаны зависимость от длины канала максимальной интенсивности тока прошедшего через канал пучка электронов (рис. 3(a)), и соответствующей ширины на полувысоте (рис. 3(b)). Из полученных графиков видна очень слабая зависимость прохождения электронов через образцы от длины образцов.

Важно также отметить, что для всех каналов доля электронов, прошедших каналы без существенных потерь энергии, также остается практически постоянной в пределах 15–35%. Интересно, что ширина на полувысоте соответствующих зависимостей для общего числа прошедших электронов и для электронов, испытавших потери не более 10%, почти одинаковы, другими словами, доля электронов, бесконтактно прошедших через канал, слабо меняется с изменением угла наклона оси канала относительно

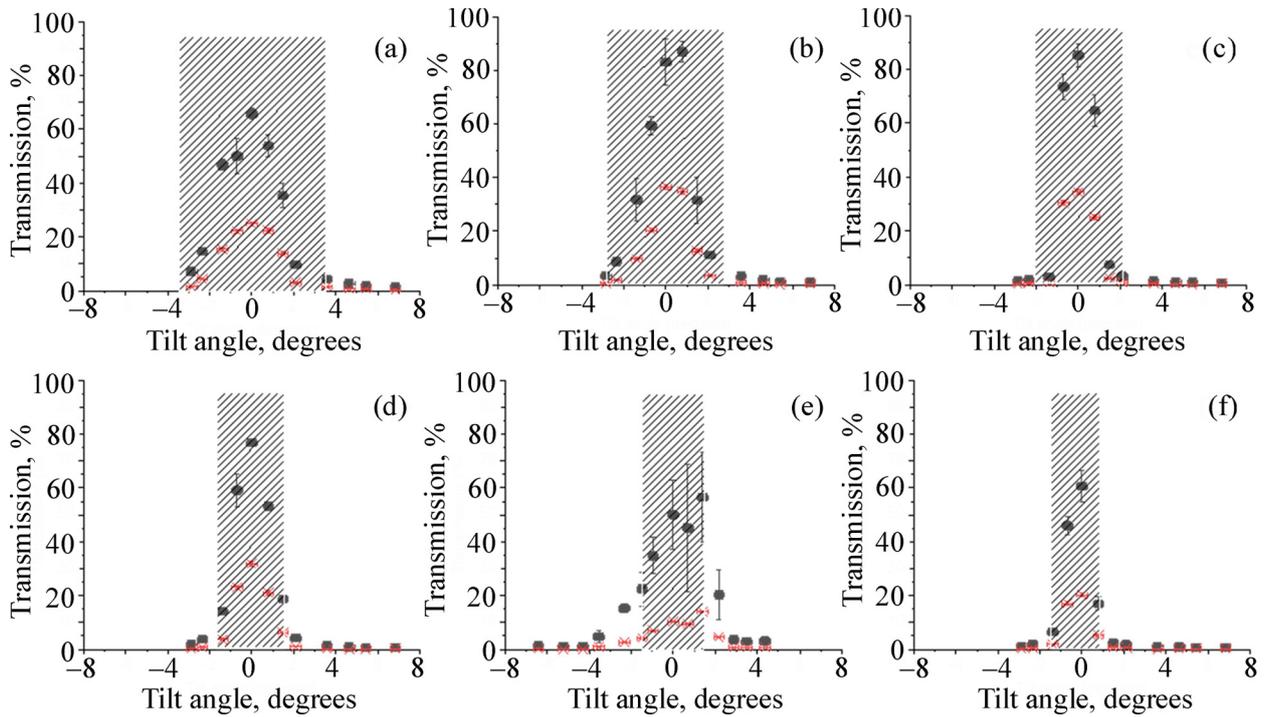


Рис. 2: Зависимости доли пучка прошедших через канал электронов (квадраты) и доли электронов, потери которых не превышают 1 кэВ (крестики), от угла наклона каналов относительно оси падающего пучка. Длина каналов – 20 мм (a), 30 мм (b), 35 мм (c), 40 мм (d), 45 мм (e), 50 мм (f). Заштрихованный прямоугольник – область геометрического пропускания каналов.

оси падающего пучка. Несмотря на то, что полученные данные демонстрируют слабую зависимость интенсивности прошедшего тока и энергетического состояния от длины, следует отметить, что в полученной зависимости (рис. 3(a)) наблюдается наличие максимума интенсивности при определенной длине канала (в данном случае, 30–35 мм). Это наблюдение, возможно, свидетельствует о существовании оптимального аспектного отношения, при котором на стенках канала образуется такое динамическое зарядовое распределение, которое обеспечивает наилучшие условия прохождения электронов через диэлектрический канал. При этом можно предположить, что с увеличением длины диэлектрического канала прохождение электронов будет уменьшаться в связи с увеличением доли электронов, необходимых для зарядки увеличенной площади поверхности канала. Однако данное предположение требует дополнительных исследований.

*Выводы.* В работе проведены исследования прохождения электронов с энергией 10 кэВ через набор пластиковых каналов разной длины. Все каналы изготовлены из

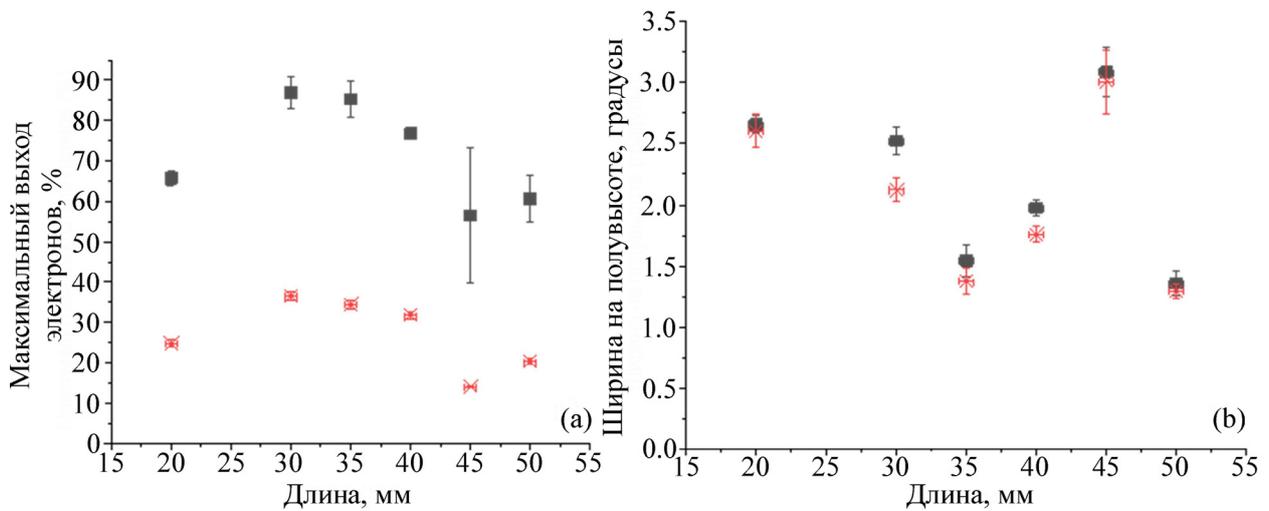


Рис. 3: (а) Зависимость максимального выхода электронов при условии, что канал параллелен пучку от длины каналов; (б) зависимость  $FWHM$  от длины каналов.

одного материала, имеют одинаковый внутренний диаметр 1.55 мм и толщину стенки – 0.5 мм. Все каналы были установлены в один держатель с маской, отверстия в которой на входе каждого канала обеспечивали одинаковый входной ток падающего пучка. Таким образом, удалось сделать измерения тока и энергетического состояния электронов, прошедших через каналы, в зависимости от длин этих каналов и углов наклона каналов относительно оси падающего пучка. Показано, что интенсивность тока пучка электронов, прошедших через диэлектрический цилиндрический канал, когда ось канала параллельна оси падающего пучка, слабо зависит от длины канала в диапазоне 20–50 мм. Причем доля электронов, прошедших через каналы без энергетических потерь, слабо меняется с увеличением угла наклона каналов относительно оси падающего пучка, что свидетельствует о наличии эффекта управления [1]. Следует отметить, что полученные результаты экспериментов являются лишь первым шагом в исследованиях управления заряженными электронами с помощью макроканалов из полиэтилентерефталата. Данная работа требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019–1569) с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” при поддержке Минобрнауки РФ (проект RFMEFI62119X0035).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. Das, B. S. Dassanayake, M. Winkworth, et al., *Physical Review A* **76**, 042716 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevA.76.042716.
- [2] Wei Wang, Dejun Qi, Deyang Yu, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **163**, (2009). DOI: 10.1088/1742-6596/163/1/012093.
- [3] K. A. Vokhmyanina, P. N. Zhukova, E. F. Iribara, et al., *Journal of Surface Investigation, X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques* **7**, 271 (2013). DOI: 10.1134/S1027451013020249.
- [4] S. J. Wickramarachchi, B. S. Dassanayake, D. Keerthisinghe, et al., *Phys. Scr.* **T156**, (2013). DOI: 10.1088/0031-8949/2013/T156/014057.
- [5] Christoph Lemell, Joachim Burgdörfer, Friedrich Aumayr, *Progress in Surface Science* **88**, 237 (2013). DOI: 10.1016/j.progsurf.2013.06.001.
- [6] B. S. Dassanayake, R. J. Berezky, S. Das, et al., *Phys. Rev. A* **83**, 012707 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.83.012707.
- [7] B. S. Dassanayake, S. Das, R. J. Berezky, et al., *Phys. Rev. A* **81**, 020701 (2010). <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.020701>.
- [8] K. A. Vokhmyanina, A. S. Kubankin, I. A. Kishin, et al., *Journal of Nano- and Electronic Physics Nano-* **10**(6), 06036 (2018). [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(6\).06036](https://doi.org/10.21272/jnep.10(6).06036).
- [9] K. A. Vokhmyanina, A. S. Kubankin, L. V. Myshelovka, et al., *JINST* **021**(3), 1119 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/04/C04003.

Поступила в редакцию 10 января 2022 г.

После доработки 31 января 2022 г.

Принята к публикации 1 февраля 2022 г.