

12

Прохождение электронов с энергией 10 keV через массив диэлектрических каналов

© К.А. Вохмянина¹, Л.В. Мышеловка¹, Д.А. Колесников¹, В.С. Сотникова^{1,2}, А.А. Каплий¹,
А.С. Кубанкин^{1,3}, П.Н. Жукова⁴, В.Ю. Иониди⁵

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

² Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴ Белгородский юридический институт МВД России им. И.Д. Путилина, Белгород, Россия

⁵ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: vokhmyanina@bsu.edu.ru

Поступило в Редакцию 21 июля 2020 г.

В окончательной редакции 24 сентября 2020 г.

Принято к публикации 24 сентября 2020 г.

Исследовано прохождение пучка электронов с энергией 10 keV через массив, сформированный из полого полисульфонового волокна с внутренним диаметром каналов $160 \pm 60 \mu\text{m}$. Измерена зависимость доли прошедшего через каналы пучка электронов от угла наклона каналов относительно оси падающего пучка. Также выполнена оценка доли электронов, испытавших энергетические потери менее 10% после прохождения каналов.

Ключевые слова: пучок электронов, диэлектрические каналы, диэлектрическая поверхность, характеристическое излучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.01.50456.18474

Возможность управления пучком нерелятивистских заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов была впервые продемонстрирована в работе [1]. Пучок ионов Ne^{7+} с энергией 3 keV изменял свое направление движения вслед за наклоном диэлектрических наноканалов, сформированных в пленке полиэтилен-терефталата. При этом основная часть падающего пучка проходила через каналы, не теряя начального энергетического и зарядового состояния даже при значительных углах наклона каналов. Было предложено следующее объяснение эффекта [1]: часть ионов пучка, попадающая на стенки каналов, заряжает их до определенной величины. Образованное зарядовое распределение препятствует дальнейшей зарядке стенок и обеспечивает бесконтактное прохождение остальной части ионов вдоль осей каналов. Поверхностное зарядовое распределение находится в самосогласованном режиме, при котором стекание части заряда распределения мгновенно компенсируется ионами падающего пучка. Данная модель легла в основу понимания и объяснения последующих экспериментальных работ [2–4].

Аналогичные эксперименты с пучками электронов продемонстрировали существование эффекта управления, однако обнаруженные особенности исследуемого процесса [5–7] затрудняют поиск возможности его практического применения. На данный момент для электронных пучков нет единой модели, объясняющей наблюдаемые результаты [8,9].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования прохождения электронов с

энергией 10 keV через диэлектрические каналы, представляющие собой полые полисульфоновые волокна, собранные в единый массив. Массив каналов наклонялся относительно оси падающего пучка, и на выходе измерялся ток прошедшего пучка, а также оценивалась доля электронов, которые потеряли менее 10% своей первоначальной энергии. Данные показатели необходимы для определения возможности использования каналов из исследуемого диэлектрического материала в качестве элементов оптики пучка.

Общая схема эксперимента представлена на рис. 1.

Электроны 4, сгенерированные электронной пушкой 1, проходят через систему электромагнитных линз 2 и коллиматор 3 диаметром 1 mm и попадают на вход образца 5, закрепленного в гониометре. Были исследованы образцы длиной 10 и 4.75 mm. Каждый образец (рис. 1, b) — это массив, состоящий из 30 полых полисульфоновых волокон, диаметр каждого канала $160 \pm 60 \mu\text{m}$ с толщиной стенки $60 \mu\text{m}$. Волокна скреплены клеем, весь массив стянут термоусадкой. Входной торец образца покрывался тонким слоем серебра (до 100 nm) для предотвращения зарядки входов каналов. Прозрачность конечного массива составляла $\sim 20\%$, максимальные углы геометрического пропускания ± 1.26 и $\pm 2.65^\circ$ были рассчитаны для максимального диаметра канала $220 \mu\text{m}$ и для длин массивов 10 и 4.75 mm соответственно.

Гониометр позволяет поворачивать образец относительно оси падающего пучка вокруг оси 10. Электроны, прошедшие через каналы, попадают на медную пластину

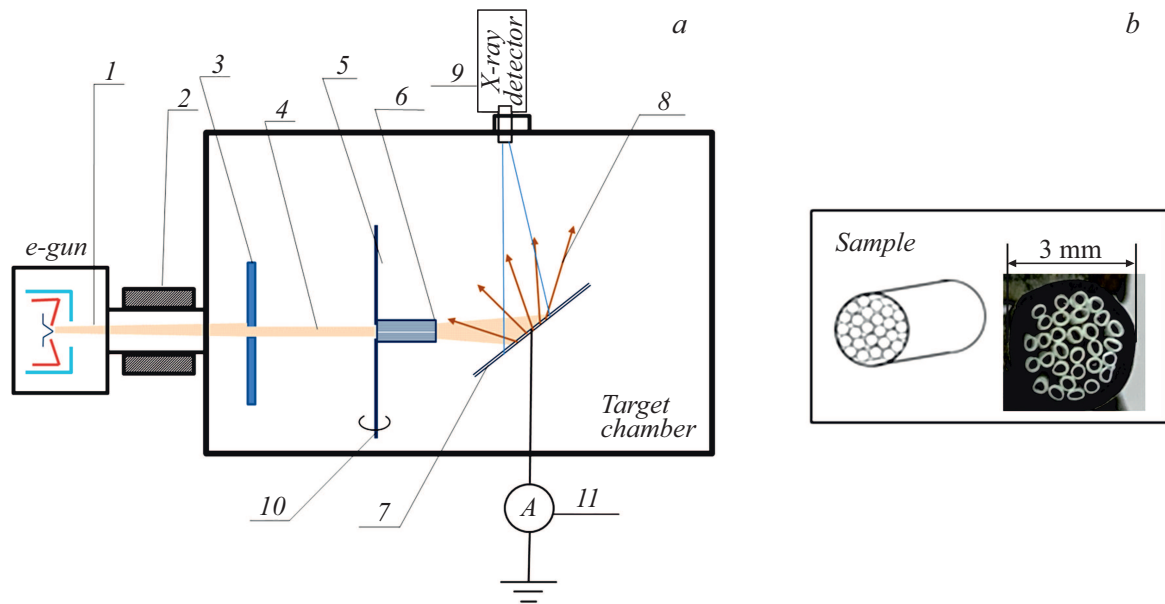


Рис. 1. *a* — схема эксперимента: 1 — электронная пушка, 2 — система электромагнитных линз, 3 — коллиматор диаметром 1 мм, 4 — пучок ускоренных электронов, 5 — образец с заземленной маской, 6 — пучок электронов, прошедших через образец, 7 — медная пластина, 8 — излучение, сгенерированное при попадании электронов на медную пластину, 9 — детектор рентгеновского излучения, 10 — ось наклона образца относительно оси падающего пучка, 11 — амперметр; *b* — схематическое изображение образца и фотография выходного (без напыления) торца.

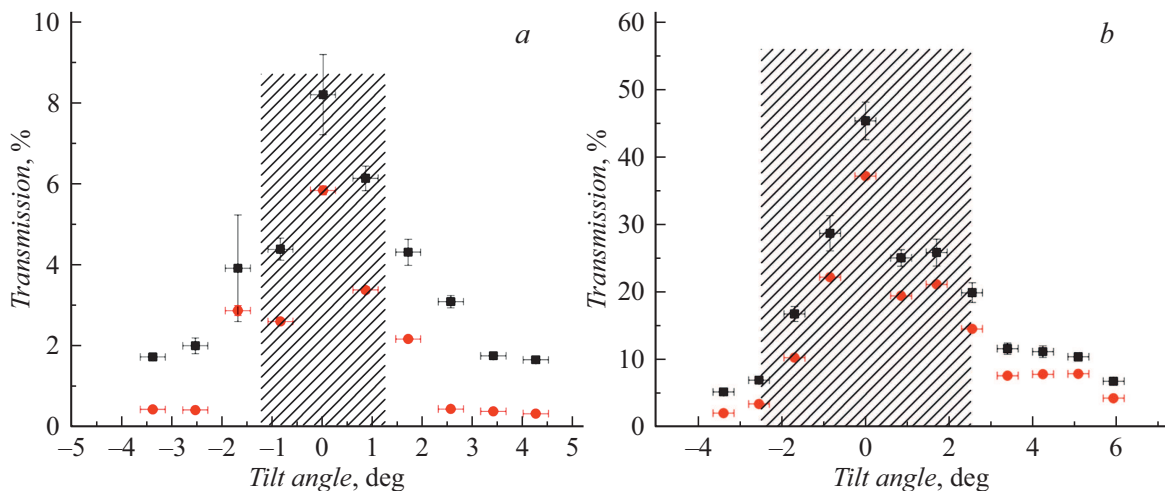


Рис. 2. Зависимости доли пучка прошедших через канал электронов (квадраты) и доли электронов, потери которых не превышают 1 keV (кружки), от угла наклона каналов относительно оси падающего пучка. Длина каналов составляет 10 (*a*) и 4.75 мм (*b*).

7, генерируя электромагнитное излучение 8, измеряемое детектором рентгеновского излучения (XR-100SDD) 9 с бериллиевым окном толщиной $12.5\ \mu\text{m}$ и эффективной площадью $17\ \text{mm}^2$. Набор спектров выполнялся в течение 20 min. Одновременно с набором спектров выполнялось измерение тока пучка прошедших электронов с помощью наноамперметра (Keithley 6482) 11. Первичный пучок имел следующие параметры: ток пучка 100 nA, диаметр пучка на входе в массив 2 mm, расходимость пучка составляла менее $\pm 0.3^\circ$. Давление в вакуумной камере менее 10^{-6} Torr.

На рис. 2 показаны данные по измерению тока пучка электронов, прошедших через диэлектрические массивы каналов, в зависимости от угла наклона массивов относительно оси падающего пучка. Также здесь приведена доля электронов падающего пучка, которые испытали потери энергии не более 1 keV. Оценка данной величины выполнялась методом, подробно описанным в работе [10]. Суть метода заключается в сравнении спектров падающего и прошедшего через каналы электромагнитного излучения, генерируемого при взаимодействии электронов с медной пластиной, причем сравнивается

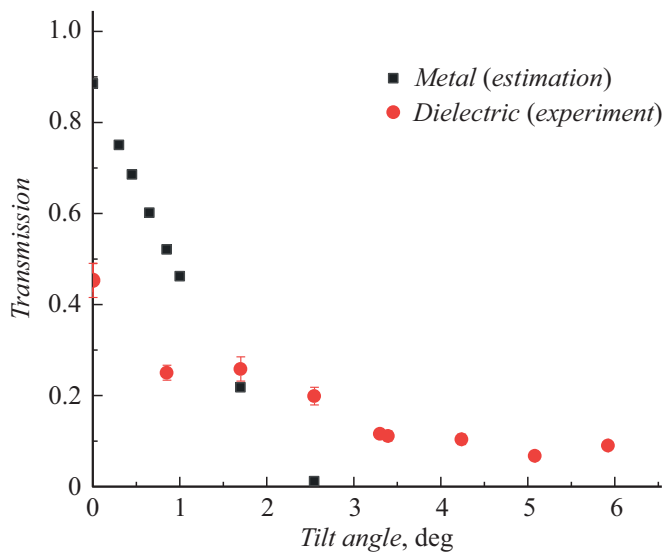


Рис. 3. Сравнение доли электронов падающего пучка, прошедших через диэлектрический (экспериментальные данные, кружки) и металлический (расчет, квадраты) каналы. Расчеты проводились для металлического канала со следующими геометрическими параметрами: внутренний диаметр 220 μm , длина 4.75 mm.

та часть спектра, которая связана с характеристической K_{α} -линией меди (энергия фотонов 8.048 keV), для образования которой энергия электронов должна быть не менее 8.993 keV (K_{edge} для меди). Метод является оценочным, поскольку предполагается, что число событий спектра линейно зависит от числа падающих на медную пластину электронов.

Заштрихованный прямоугольник — область геометрического пропускания каналов. Доля электронов рассчитывается по отношению к падающему в каналы току с учетом прозрачности массивов 20%.

Из рис. 2 видно, что уменьшение длины каналов примерно в 2 раза обеспечило увеличение доли проходящего тока в 5 раз. При этом в обоих случаях уменьшение пропускания с увеличением угла наклона каналов имеет схожий характер: интенсивность прошедшего пучка постепенно снижается при углах, превышающих геометрический угол пропускания. Если сравнить угловую зависимость для рассматриваемых диэлектрических каналов с пропусканием металлического заземленного канала (стенки канала не заряжаются) с теми же геометрическими параметрами, то в случае металлического канала пропускание уменьшается быстрее, чем в случае диэлектрического (рис. 3).

Данные для металлического канала были рассчитаны по формуле (65) из работы [11] с учетом характеристик реального пучка. Этот результат однозначно указывает на влияние диэлектрической стенки, а именно поверхностного зарядового распределения, на движение электронов, т.е. небольшая часть электронов не перекрывается стенкой, как в случае металлического

канала, а продолжает двигаться вдоль оси канала без существенных потерь энергии даже при существенных углах наклона. Асимметрия полученных на рис. 2, b зависимостей может быть объяснена несимметричной зарядкой внутренних стенок канала, поскольку при проведении эксперимента канал поворачивали в одном направлении от максимального угла наклона. Однако для более точного описания наблюдаемой зависимости необходимо отдельное исследование.

Результаты экспериментов продемонстрировали существование влияния поверхностного заряда на стенках канала на проходящий пучок электронов, а следовательно, возможность управления электронами с энергией 10 keV с помощью подобных структур. Также явно продемонстрировано наличие зависимости доли проходящего тока от длины каналов в массиве. С уменьшением длины каналов приблизительно в 2 раза доля прошедшего пучка увеличилась примерно в 5 раз. Доля бесконтактно прошедших электронов при угле наклона, равном углу геометрического открытия, уменьшилась в среднем в 2.5 раза по сравнению с таковой при нулевым угле наклона для обоих каналов. Таким образом, можно утверждать существование эффекта управления пучком электронов с энергией 10 keV с помощью каналов, созданных из полисульфонового волокна, в небольшом угловом диапазоне.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Stolterfoht, J.H. Bremer, V. Hoffmann, D. Fink, R. Hellhammer, A. Petrov, B. Sulik, Phys. Rev. Lett., **88**, 133201 (2002).
- [2] T. Nebiki, T. Yamamoto, T. Narusawa, M.B.H. Breese, E.J. Teo, F. Watt, J. Vac. Sci. Technol. A, **21**, 1671 (2003).
- [3] V. Mäckel, W. Meissl, T. Ikeda, M. Clever, E. Meissl, T. Kobayashi, T.M. Kojima, N. Imamoto, K. Ogiwara, Y. Yamazaki, Rev. Sci. Instrum., **85**, 014302 (2014).
- [4] P. Skog, H.Q. Zhang, R. Schuch, Phys. Rev. Lett., **101**, 223202 (2008).
- [5] S. Das, B.S. Dassanayake, M. Winkworth, J.L. Baran, N. Stolterfoht, J.A. Tanis, Phys. Rev. A, **76**, 042716 (2007).
- [6] Y. Xue, D. Yu, J. Liu, M. Zhang, B. Yang, Y. Zhang, X. Cai, Appl. Phys. Lett., **107**, 254102 (2015).
- [7] S.J. Wickramarachchi, T. Ikeda, D. Keerthisinghe, B.S. Dassanayake, J.A. Tanis, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **317**, 101 (2013).

- [8] K. Schiessl, K. Tokési, B. Solleder, C. Lemell, J. Burgdörfer, Phys. Rev. Lett., **102**, 163201 (2009).
- [9] A.R. Milosavljević, J. Jureta, G. Viktor, Z.D. Pešić, D. Šević, M. Mátéfi-Tempfli, S. Mátéfi-Tempfli, B.P. Marinković, Europhys. Lett., **86**, 23001 (2009).
- [10] K.A. Vokhmyanina, A.S. Kubankin, L.V. Myshelovka, H. Zhang, A.A. Kaplii, V.S. Sotnikova, M.A. Zhukova, JINST, **15**, C04003 (2020).
- [11] V.N. Stolterfoht, Y. Yamazaki, Phys. Rep., **629**, 1 (2016).