

12

Исследование прохождения электронов с энергией 10 keV через керамический макроканал

© К.А. Вохмянина¹, Л.В. Мышеловка¹, В.С. Сотникова^{1,2}, А.А. Кубанкина¹, А.Д. Пятигор¹,
А.С. Кубанкин^{1,3}, Ю.В. Григорьев⁴

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 Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Москва, Россия

E-mail: kristinav2005@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 30 апреля 2021 г.

Принято к публикации 13 мая 2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований прохождения электронов через керамический макрокапилляр с энергией 10 keV в положении, когда ось канала параллельна оси падающего пучка. Проведены измерения тока и энергетического спектра электронов, прошедших через канал, в зависимости от величины тока пучка, падающего в него, и времени облучения канала. Продемонстрировано изменение пропускания электронов через образец в зависимости от времени после образования углеродного проводящего налета на внутренней поверхности обоих торцов канала.

Ключевые слова: пучок электронов, диэлектрический канал, характеристическое излучение, временная зависимость, гайдинг.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.16.51331.18806

Возможность управления пучками заряженных частиц с помощью диэлектрических каналов (гайдинг) является актуальной задачей ввиду потенциальной возможности создания недорогих автономных управляющих и фокусирующих устройств. В настоящее время эксперименты с использованием ионов с энергией порядка MeV нацелены на применение микроразмерного излучения для анализа материалов, модификации поверхности, клеточной хирургии и т.п. [1]. Для электронных пучков данная возможность еще изучается.

Результаты первых исследований возможности управления нерелятивистскими электронами с энергиями 200–1000 eV с помощью диэлектрических каналов были представлены в 2007 г. в работах [2,3]. Пучки электронов пропускались через наноразмерные каналы мембран, изготовленных из оксида алюминия [2] и полиэтилентерефталата [3]. Управление электронами удалось наблюдать при наклоне каналов вплоть до 10–12° относительно оси падающего пучка электронов. В последующей далее серии экспериментальных работ исследовалось управление электронами с помощью каналов различных размеров и конфигураций [4–8]. Полученные на данный момент результаты не позволяют делать однозначные выводы о механизме процесса. В частности, исследования временной зависимости пропускания электронов через диэлектрические каналы показали, что в ряде экспериментов пропускание электронов каналом при различных углах наклона относительно оси падающего пучка начинается мгновенно [2,6,7], т.е. механизмом гайдинга может служить рассеяние электронов на атомах поверхности. Однако авторы других работ

продемонстрировали наличие временной задержки, требуемой для подзарядки стенок диэлектриков, прежде, чем каналы начинали пропускать ток [3–5], в этом случае механизмом гайдинга может являться образование самосогласованного зарядового распределения на внутренней стенке канала.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные по изучению временной зависимости прохождения электронов с энергией 10 keV через керамический (ZrO₂) макрокапилляр. Выбор материала обусловлен его высокой радиационной стойкостью, высоким сопротивлением ($> 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$), механической прочностью и относительной простотой воспроизведения образца. Внутренний диаметр канала составляет 1.5 mm, а длина — 20 mm.

Описание схемы эксперимента приведено на рис. 1. С более подробным 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 mm. Сформированный пучок 4 попадает на вход исследуемого канала 6, закрепленного в держателе 5. Вход канала закрыт металлической заземленной маской с миллиметровым отверстием перед образцом. Маска экранирует торец канала, предотвращая запираение канала нормально падающими на торец электронами пучка. Для измерения тока первичного пучка, падающего в канал, в маске предусмотрено дополнительное сквозное отверстие диаметром 1 mm.

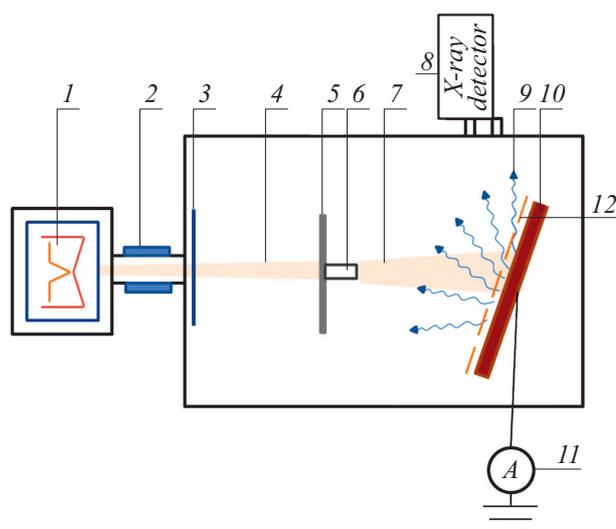


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 — электронная пушка, 2 — система электромагнитных линз, 3 — коллиматор ($\varnothing 1 \text{ mm}$), 4 — пучок ускоренных электронов, 5 — держатель с заземленной маской, 6 — исследуемый образец, 7 — пучок электронов, прошедших через образец, 8 — детектор рентгеновского излучения, 9 — излучение, сгенерированное при попадании электронов на медную пластину, 10 — медная пластина, 11 — амперметр, 12 — латунная сетка под напряжением 400 V.

Электроны 7, прошедшие через облучаемый канал, попадают на медную пластину 10. Спектр генерируемого в пластине излучения измеряется полупроводниковым твердотельным детектором XR-100SDD (8 на рис. 1). Измерение спектра выполнялось для оценки доли электронов пучка, испытавших потери менее 1 keV. Метод такой оценки подробно описан в [9]. Одновременно проводится измерение тока прошедшего или прямого пучка с помощью пикоамперметра Keithley 6482 (11 на рис. 1). Для подавления выхода вторичных электронов с медной пластины непосредственно перед ней установлена латунная сетка 12, на которую подается напряжение 400 V. Эксперимент проводился при вакууме порядка 10^{-6} Торр. Все измерения проводились в положении, когда ось канала параллельна оси падающего пучка.

Для измерения зависимости величины проходящего через канал тока от времени и величины падающего тока пучка выполнялись следующие действия. Сначала в течение 5 min измерялись величина тока пучка, проходящего через сквозное отверстие в маске, и спектр излучения, генерируемого в медной пластине при попадании на нее электронов пучка. Затем держатель с образцом линейно сдвигался таким образом, чтобы прямой пучок электронов попадал на вход в исследуемый канал. Проходящий через канал ток электронов и соответствующий спектр измерялись в течение 2 min с паузой между измерениями в 10 s последовательно 6–8 раз. Описанные выше измерения были проведены для тока падающего пучка в диапазоне $\sim 50\text{--}250 \text{ nA}$.

Следует отметить, что перед описанными измерениями канал предварительно был облучен в течение 5 h. Данный временной промежуток был выбран случайным образом.

После серии выполненных измерений на внутренней стенке канала вблизи входного торца образовался углеродный налет. Несмотря на достаточно высокий вакуум в камере мишеней, там всегда присутствуют остаточные углеводородные молекулы, например, из клеящих материалов (двусторонний скотч), которые используются для крепления образца, из неметаллических элементов гониометра, а также зачастую из возможных жировых или иных органических загрязнений на поверхности. Данные молекулы при облучении образца пучком электронов образуют на облучаемой поверхности неоднородный углеродный нагар, видимый невооруженным глазом. Методом электронной микроскопии было подтверждено наличие неоднородно распределенных на внутренней поверхности канала пятен и определено, что концентрация углерода в пятне более чем в 2 раза превышает концентрацию этого элемента в произвольной точке внутренней поверхности. Возникает вопрос: можно ли оказать существенное влияние на пропускание канала, создав аналогичный слой также на его выходном торце? Канал был развернут таким образом, чтобы выходной, необлученный торец оказался входным, а облученный торец (со следами углеродной пленки) оказался выходным. Канал разряжался почти в течение суток (19 h) вследствие проведения необходимых технических работ, затем, так же как и для первичного положения, облучался прямым пучком в течение 5 h. Далее были проведены аналогичные (как для прямого положения канала) измерения для нескольких значений тока.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов. Из данных рис. 2, *a* видно, что с увеличением тока пучка, падающего в канал, доля прошедших через канал частиц снижается. Аналогичная картина имеет место и при увеличении времени облучения образца. Для развернутого положения канала картина несколько иная (рис. 2, *b*). В целом максимальное пропускание канала сохраняется на уровне 40%, но в отличие от первоначального положения канала при токе падающего пучка $\sim 50 \text{ nA}$ пропускание со временем увеличивается. При более высоких токах для развернутого канала пропускание со временем также снижается, хотя остается достаточно высоким по сравнению с пропусканием в случае прямого положения канала.

На рис. 3 показаны временные зависимости тока падающего пучка $\sim 50 \text{ nA}$ и доли электронов, энергетические потери которых не превышают 1 keV. Данные приведены как для прямого положения канала (*a*), так и для развернутого (*b*).

Видно, что в случае развернутого канала пропускание начинается не сразу и постепенно растет до некоторого уровня, тогда как в первичном положении образца он начинает пропускать сразу и затем постепенно „запирается“. Полученные зависимости прохождения электро-

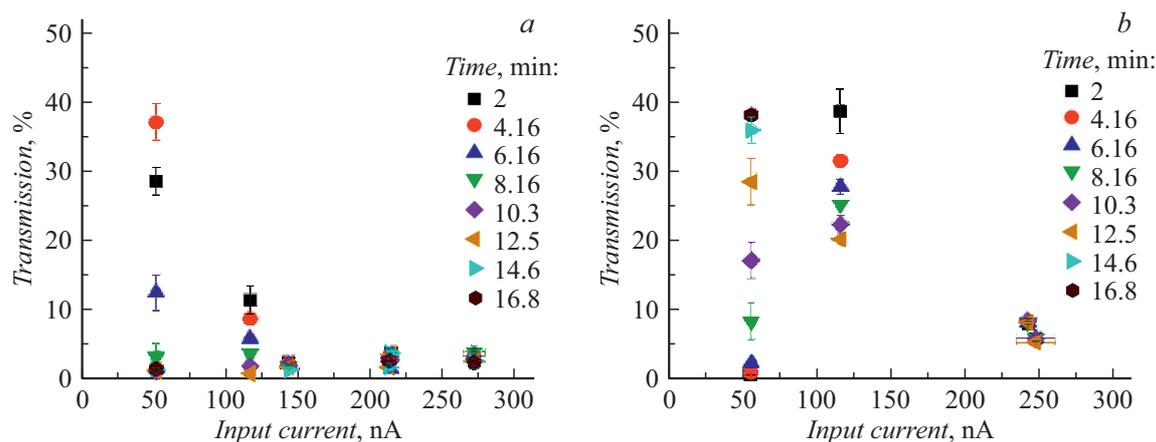


Рис. 2. Зависимости пропускания канала от тока прямого пучка для различного времени облучения канала. *a* — прямое положение канала, *b* — развернутое положение канала.

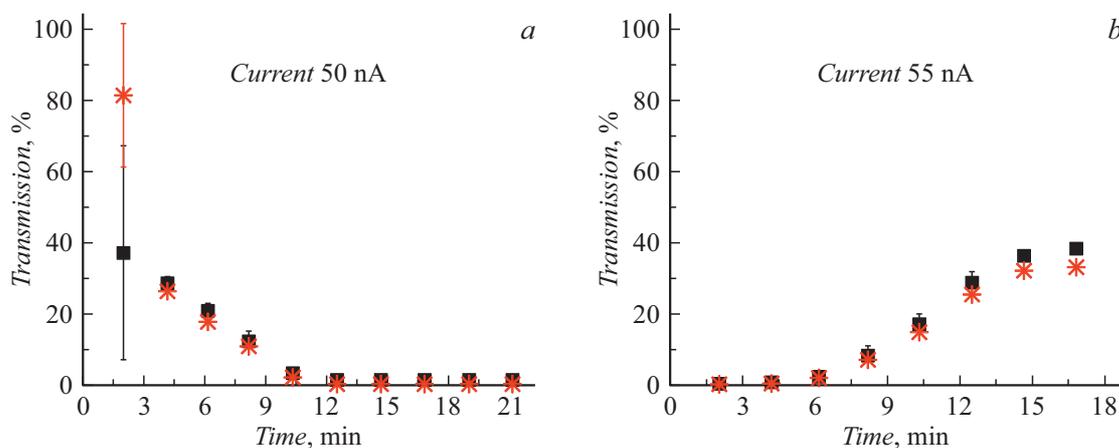


Рис. 3. Временные зависимости пропускания каналов (квадраты) и доли электронов, потери энергии которых не превышают 1 keV (звездочки), для тока прямого пучка ~ 50 nA. *a* — прямое положение канала, *b* — развернутое положение канала.

нов через канал от времени свидетельствуют в пользу модели образования самосогласованного распределения заряда на внутренней поверхности канала, учитывающего как зарядку поверхности, так и одновременное стекание части заряда, в случае стабильного пропускания канала. Однако обнаруженные углеродные фракции внутри канала должны быть приняты в расчет при дальнейшем развитии модели процесса ввиду их влияния на поверхностную проводимость диэлектрика.

Финансирование работы

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).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Ikeda, M. Ikekame, Y. Hikima, M. Mori, S. Kawamura, T. Minowa, W.-G. Jin, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **470**, 42 (2020). DOI: 10.1016/j.nimb.2020.03.004
- [2] A. Milosavljevic, G. Viktor, Z. Pesic, P. Kolarz, D. Sevic, B. Marinkovic, S. Matefi-Tempfli, M. Matefi-Tempfli, L. Piroux, Phys. Rev. A, **75**, 030901 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevA.75.030901
- [3] S. Das, B.S. Dassanayake, M. Winkworth, J.L. Baran, N. Stolterfoht, J.A. Tanis, Phys. Rev. A, **76**, 042716 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevA.76.042716
- [4] K.A. Vokhmyanina, G.P. Pokhil, P.N. Zhukova, E. Irribarra, A.S. Kubankin, V.S. Levina, R.M. Nazhmudinov, A.N. Oleinik, I.A. Kishin, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **355**, 307 (2015). DOI: 10.1016/j.nimb.2015.02.068

- [5] B.S. Dassanayake, R.J. Berezcky, S. Das, A. Ayyad, K. Tokesi, J.A. Tanis, *Phys. Rev. A*, **83**, 012707 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.83.012707
- [6] C. Lemell, J. Burgdörfer, F. Aumayr, *Prog. Surf. Sci.*, **88**, 237 (2013). DOI: 10.1016/j.progsurf.2013.06.001
- [7] S.J. Wickramarachchi, B.S. Dassanayake, D. Keerthisinghe, T. Ikeda, J.A. Tanis, *Phys. Scripta*, **2013**, 014057 (2013). DOI: 10.1088/0031-8949/2013/T156/014057/meta
- [8] K.A. Vokhmyanina, A.S. Kubankin, I.A. Kishin, R.M. Nazhmudinov, Yu.S. Kubankin, A.V. Sotnikov, V.S. Sotnikova, D.A. Kolesnikov, *J. Nano-Electron. Phys.*, **10**, 06036 (2018). DOI: 10.21272/jnep.10(6).06036
- [9] K.A. Vokhmyanina, A.S. Kubankin, L.V. Myshelovka, H. Zhang, A.A. Kaplii, V.S. Sotnikova, M.A. Zhukova, *JINST*, **15**, C04003 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/04/C04003/pdf