

УДК 537.8

ЭФФЕКТ УПРАВЛЕНИЯ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ КЕРАМИЧЕСКОГО КАНАЛА

© 2022 г. К. А. Вохмянина^{a, *}, Л. В. Мышеловка^a, А. Д. Пятигор^a,
В. С. Сотникова^{a, b}, В. Ю. Новиков^a, Ю. В. Григорьев^c

^aБелгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, 308015 Россия

^bБелгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, 308012 Россия

^cИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН,
Москва, 119333 Россия

*e-mail: vokhmyanina@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

После доработки 24.08.2021 г.

Принята к публикации 29.08.2021 г.

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 МэВ нацелены на применение излучения с размером пятна порядка микрометра для анализа материалов, модификации поверхности, клеточной хирургии. В случае использования электронных пучков такая возможность еще изучается. В работе продемонстрирована возможность управления пучком ускоренных электронов с помощью керамического канала при его наклоне как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Данные об управлении получены для канала после облучения обоих его торцов в течение не менее 5 ч. После такого воздействия на внутренней поверхности канала вблизи торцов образуется неравномерный слой нагара, содержащий углерод. Показано, что образовавшийся налет не влияет на управляющие свойства канала.

Ключевые слова: пучок электронов, диэлектрический канал, характеристическое излучение, временная зависимость, эффект управления, углеродсодержащий слой, рентгеновское излучение, отклонение пучка, быстрые электроны, угол геометрического пропускания, визуализация пучка электронов, сцинтиллятор, керамика.

DOI: 10.31857/S1028096022030220

ВВЕДЕНИЕ

Эффект управления пучками электронов с энергией до 10 кэВ с помощью диэлектрических каналов активно исследуют, начиная с 2007 г. [1, 2]. В настоящее время существует большое количество экспериментальных данных об исследовании скользящего взаимодействия электронов с энергией до 20 кэВ с диэлектрическими поверхностями [3–10]. Однако до сих пор нет однозначного ответа на вопрос о механизме такого взаимодействия: является ли эффект управления следствием рассеяния электронов на атомах поверхности или определяющим фактором выступает динамическое самосогласованное зарядовое распределение на поверхности диэлектрического образца, как в случае с ионами [11–13]. Очевидно, что для формирования поверхностного распределения на внутренних стенках канала при попадании в него пучка электронов необходимо некото-

рое время. Сформированное самосогласованное распределение способно обеспечить бесконтактное прохождение части электронов пучка через канал, о чем свидетельствуют, например, результаты [1, 3, 6] измерения временных зависимостей пропускания изучаемых каналов. В то же время в [2, 4, 5] было показано, что пропускание исследуемых каналов начиналось мгновенно, что приводило авторов к выводу о рассеянии электронов на атомах поверхностного слоя диэлектрика как основного механизма эффекта управления.

Другим важным вопросом при изучении эффекта управления электронами с помощью диэлектрических поверхностей является характер зависимости пропускания диэлектрических каналов от величины силы падающего тока. Данная проблема важна для описания поверхностной проводимости диэлектрика при воздействии на него скользящего пучка электронов. В [14] было

продемонстрировано отсутствие явной зависимости угла отклонения электронов с энергией 10 кэВ от диэлектрической одиночной пластины от величины силы тока падающего пучка, однако для диэлектрического канала такое исследование не проводили.

Комплексное исследование процесса прохождения электронов с энергией 10 кэВ через керамический (оксид циркония) макрокапилляр было выполнено ранее [15]. Измерены зависимости пропускания канала от времени и величины силы падающего тока в геометрии, когда ось канала параллельна оси падающего пучка. Настоящая работа является продолжением выполненного эксперимента [15], в ней исследовано наличие эффекта управления для канала, подвергнутого многочасовому облучению пучком электронов с энергией 10 кэВ с обоих торцов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе использовали опытно-экспериментальную установку по исследованию процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, детальное описание которой приведено в [16]. Схема эксперимента показана на рис. 1. Первоначально был проведен эксперимент по исследованию временной зависимости пропускания пучка электронов диэлектрическим каналом [15] (рис. 1а). Пучок электронов генерируется электронной пушкой 1, проходит через систему электромагнитных линз 2 и коллиматор 3 диаметром 1 мм. Сформированный пучок 4 с угловой расходимостью не более 0.35° попадает на вход исследуемого канала 6, закрепленного в держателе 5. Длина канала 20 мм, внутренний диаметр 1.5 мм. Вход канала закрыт металлической заземленной маской с миллиметровым отверстием на входе образца. Маска позволяет экранировать торец канала от облучения электронами пучка и предотвращает запыление канала. Для измерения тока первичного пучка, падающего в канал, в маске было предусмотрено дополнительное сквозное отверстие диаметром 1 мм. В эксперименте было важно определить энергетическое состояние электронов, прошедших через канал, а именно оценить долю электронов, энергетические потери которых не превышают 1 кэВ, т.е. 10% от первоначальной энергии электронов пучка. Оценку выполняли с помощью предложенного авторами метода, детально описанного в [17]. Суть метода заключается в сравнении спектров излучения, генерируемого в металлической мишени при попадании на нее падающего и прошедшего пучка электронов 7, генерируемого в металлической (медной) пластине 10 при попадании на нее электронов. Спектр состоит из плавной кривой тормозного излучения и квазимонохроматических характеристических рентгеновских пиков, наи-

более важными из которых являются линии при энергии 8.04 (CuK_α) и 8.9 кэВ (CuK_β). Следует отметить, что обе K -линии меди могут генерироваться при падении на медную мишень электронов с энергией более 8.99 кэВ. Это свойство позволяет определить долю электронов, энергетические потери которых не превышают 1.01 кэВ от первоначальной энергии 10 кэВ. Оценку делали на основе сравнения отношения событий, касающихся характеристических пиков K -линий меди, к общему числу событий. В случае монохроматического пучка это отношение остается константой с хорошим приближением. Однако если часть электронов теряет энергию, то число событий, касающихся характеристических линий меди, уменьшается, что приводит к уменьшению соответствующего отношения. Спектр генерируемого в пластине излучения измеряли с использованием полупроводникового твердотельного детектора XR-100SDD 8. Одновременно измеряли силу тока, прошедшего или прямого пучка с помощью пикоамперметра Keithley 6482 11. Для подавления выхода вторичных электронов из медной пластины непосредственно перед ней устанавливали латунную сетку 12, на которую подавали напряжение 400 В. Давление в камере $\sim 10^{-6}$ Торр.

Типичный спектр, генерируемый в медной пластине при падении на нее электронов с энергией 10 кэВ, приведен на рис. 2. Важен алгоритм проведения эксперимента [15], при котором канал подвергается облучению пучком электронов: измерение силы тока пучка, проходящего через сквозное отверстие в маске, одновременный набор спектра излучения, генерируемого в медной пластине, в течение 5 мин; с помощью линейного транслятора под пучок устанавливали образец – керамический канал, который облучали в течение 2 мин, после чего падающий пучок перекрывали для разрядки образца в течение 2–5 мин. Такую зарядку канала с перерывами повторяли шесть–восемь раз в зависимости от динамики прохождения электронов через канал. Во время облучения керамического канала измеряли силу тока прошедших электронов и соответствующий спектр для оценки их энергетических потерь.

Измерения по описанному выше алгоритму были проведены для разных токов падающего пучка – от ~ 50 до ~ 250 нА. Общее время облучения составило более 5 ч. Результаты экспериментов, выполненных по описанной схеме, приведены в [15]. Основные выводы, сделанные при анализе полученных данных, следующие. Канал “запирается” в течение нескольких минут, причем при увеличении силы тока пучка, падающего в канал, доля прошедших через канал электронов уменьшается.

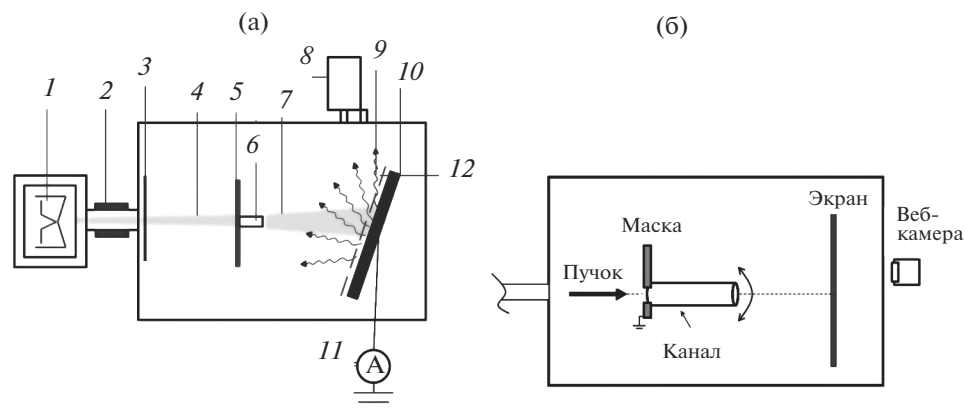


Рис. 1. Схема эксперимента: а – измерение временной и токовой зависимости падающего в канал пучка [15]: 1 – электронная пушка, 2 – система электромагнитных линз, 3 – коллиматор диаметром 1 мм, 4 – пучок ускоренных электронов, 5 – держатель с заземленной маской, 6 – исследуемый образец, 7 – пучок электронов, 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 В; б – исследование эффекта управления пучком электронов.

Однако в приведенной работе особенно интересен технический результат, а именно образование на внутренней поверхности канала вблизи его входа темного налета. Методами электронной микроскопии было подтверждено наличие на внутренней поверхности канала неоднородно распределенных пятен (рис. 3б) и установлено, что концентрация углерода в пятнах более чем в три раза превышает концентрацию в произвольной точке внутренней поверхности. Налет мог образоваться из остаточных газов, углеродсодержащих элементов крепления образца и любых возможных жировых или иных органических загрязнений поверхности. Возник вопрос, можно ли оказать существенное влияние на пропускание канала, создав аналогичный слой также вблизи его выходного торца. 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 ч) вследствие проведения необходимых технических работ, затем, так же, как и в исходном случае, облучали прямым пучком в течение 5 ч. Для развернутого положения канала были проведены аналогичные, как и для прямого положения, измерения при нескольких значениях силы падающего тока.

Результаты эксперимента показали, что с увеличением силы тока прямого пучка прохождение увеличивается до определенного максимума и затем начинает уменьшаться. Максимум достигается в диапазоне 50–120 нА. Причем при токе около 50 нА развернутый канал не “запирался” в отличие от первоначального положения, когда облучению подвергалась только входная часть канала

(рис. 3а). Явная зависимость пропускания канала от времени свидетельствует в пользу предположения о том, что на внутренних стенках канала формируется зарядовое распределение, чем может быть обусловлен эффект управления.

Если предположить, что пятна налета – это пятна нагара, подобные саже, то их проводимость превышает поверхностную проводимость керамики. Следует отметить, что измерения проводили в геометрии, когда ось канала была параллельна оси падающего пучка, и после многочасового облучения канала с обоих торцов пропускание канала существенно улучшилось.

Таким образом, возникает необходимость уточнения наличия эффекта управления пучком

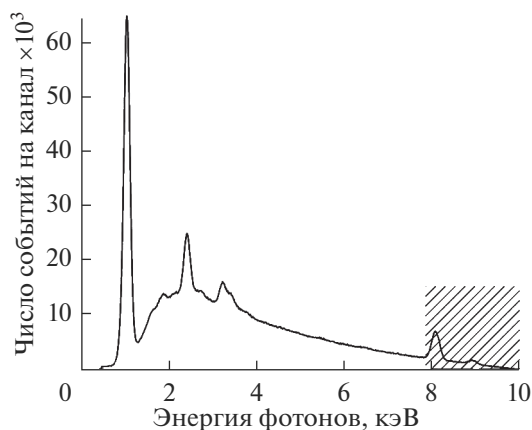


Рис. 2. Типичный спектр, генерируемый при попадании на медную пластину электронов первичного пучка (энергия 10 кэВ). Заштрихованная область спектра содержит события, соответствующие линиям CuK_α и CuK_β .

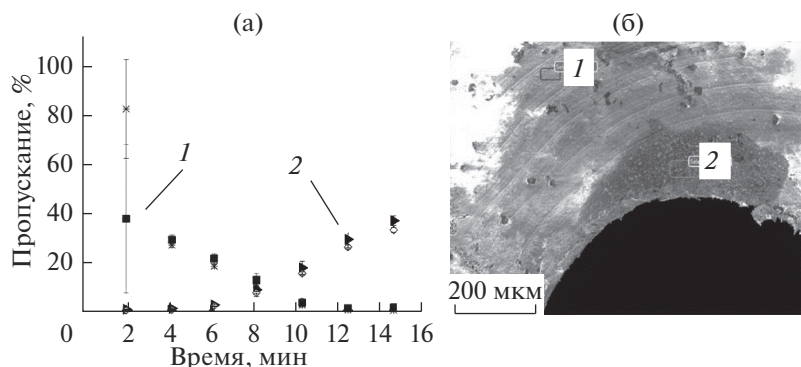


Рис. 3. График временной зависимости пропускания канала в прямом (1) и развернутом (2) положениях (а): сплошные квадраты и треугольники – доля прошедших электронов; звездочки и ромбы – доля электронов, энергетические потери которых не превышают 1 кэВ. Расчет проводился по отношению к падающему в канал току ~ 50 нА. Фотография входной части канала (внутренняя часть вблизи торца) (б): 1 – произвольная область канала, где не наблюдался нагар; 2 – область пятна (нагар).

электронов с помощью облученного керамического канала. Для подтверждения управляющей способности облученного канала был выполнен эксперимент по визуализации гайдинг-эффекта при изменении угла наклона канала по отношению к оси падающего пучка. Схема эксперимента приведена на рис. 1б. Пучок электронов (ток около 50 нА) падал в канал и облучал его в течение нескольких минут, необходимых для стабилизации его пропускания. Прошедшие через канал электроны попадали на стеклянный экран с нанесенной на него масштабной разметкой 10×10 мм. Стекло было покрыто полупрозрачным слоем се-

ребра и заземлено. На металлизированную поверхность также был нанесен порошок сцинтиллятора, что позволило визуализировать изменение положения следа пучка на экране при повороте канала. След пучка на экране фиксировали с помощью вебкамеры, установленной на вакуумном окне вне камеры (рис. 1б). Затем канал поворачивали относительно оси падающего пучка на некоторые углы вокруг горизонтальной или вертикальной осей (оси проходят через неподвижный вход канала) и снова делали снимки. Далее полученные изображения совмещали в единую серию (рис. 4а) и положение следа прошедшего пучка сравнивали с положением следа прямого пучка, прошедшего через сквозное отверстие.

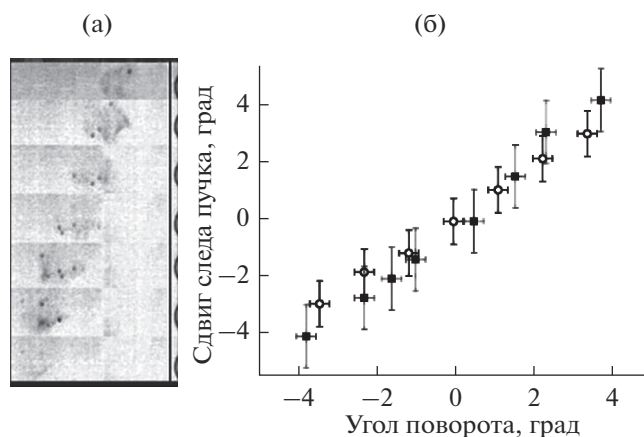


Рис. 4. Серия фотографий (цвет инвертирован), демонстрирующих сдвиг следа пучка прошедших электронов относительно следа прямого пучка в зависимости от угла поворота канала вокруг вертикальной оси (а) и графики соответствующих зависимостей (б): полые кружки – вокруг вертикальной оси, сплошные квадраты – вокруг горизонтальной оси. Черная вертикальная линия на фотографиях показывает положение следа прямого пучка, которое используется в качестве точки отсчета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента по визуализации эффекта управления приведены на рис. 3. Видно, что канал управляет пучком электронов как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении в пределах геометрического угла пропускания канала ($\pm 3.6^\circ$). Угол геометрического пропускания был рассчитан исходя из следующих параметров: входное отверстие 1 мм, выходное отверстие 1.5 мм, длина канала 20 мм.

На фотографиях видно, что положение следа прямого пучка не совпадает с “нулевым” положением следа. Это можно объяснить тем, что пятна нагара вблизи выходного отверстия канала распределены таким образом, что неравномерно заряженный выход канала дополнительно отклоняет пучок как единое целое. Поэтому “нулевое” положение канала выбрали условно после построения графика, ориентируясь на симметричность углового сдвига следа прошедшего пучка. Аналогичная картина имеет место и в случае по-

ворота канала вокруг горизонтальной оси (фотография не показана).

В целом из рис. 4 видно, что пучок следует за поворотом канала в соотношении практически один к одному, т.е. имеет место эффект гайдинга [11], несмотря на то, что канал подвергался многочасовому облучению с обоих торцов. Данный факт важен как с практической, так и с теоретической стороны, поскольку в настоящее время особо привлекает внимание возможность управления пучками заряженных частиц с помощью капилляров, изготовленных из материалов, содержащих в своем составе углерод (полисульфонные биосовместимые волокна [10], мембраны ПЭТ [18–20]). Также следует учесть наличие возможных углеродсодержащих загрязнений в вакуумных камерах при проведении подобных экспериментов. Образование нагара может являться фактором, способствующим изменению поверхностной проводимости капилляров, и тем самым объяснять нестабильность пропускания пучков заряженных частиц через диэлектрические каналы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Das S., Dassanayake B.S., Winkworth M., Baran J.L., Stolterfoht N., Tanis J.A.* // Phys. Rev. A. 2007. V. 76. P. 042716. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.76.042716>
2. *Milosavljević A., Viktor G., Pešić Z., Kolarz P., Šević D., Marinković B., Mátéfi-Tempfli S., Mátéfi-Tempfli M., Piraux L.* // Phys. Rev. A. 2007. V. 75. P. 030901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.030901>
3. *Dassanayake B.S., Bereczky R.J., Das S., Ayyad A., Tokesi K., Tanis J.A.* // Phys. Rev. A. 2011. V. 83. P. 012707. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.83.012707>
4. *Wickramarachchi S.J., Dassanayake B.S., Keerthisinghe D., Ikeda T., Tanis J.A.* // Phys. Scr. 2013. V. T156. P. 014057. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2013/T156/014057>
5. *Lemell C., Burgdörfer J., Aumayr F.* // Progr. Surf. Sci. 2013. V. 88. P. 237. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2013.06.001>
6. *Vokhmyanina K.A., Pokhil G.P., Zhukova P.N., Irribarra E., Kubankin A.S., Levina V.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Kishin I.A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015. V. 355. P. 307. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.02.068>
7. *Vokhmyanina K.A., Zhukova P.N., Kubankin A.S., Kishin I.A., Klyuev A.S., Nazhmudinov R.M., Oleinik A.N., Pokhil G.P.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2015. V. 9. № 2. P. 286. <https://doi.org/10.1134/S1027451015020196>
8. *Petukhov V.P., Petukhov M.V.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 5. P. 1056. <https://doi.org/10.1134/S1027451017050330>
9. *Nguyen H.-D., Wulfkühler J.-Ph., Heisig J., Tajmar M.* // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 8345. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87156-4>
10. *Vokhmyanina K.A., Myshelovka L.V., Kolesnikov D.A., Sotnikova V.S., Kaplii A.A., Kubankin A.S., Zhukova P.N., Ionidi V.Y.* // Tech. Phys. Lett. 2021. V. 47. Iss. 1. P. 31. <https://doi.org/10.1134/S1063785021010132>
11. *Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V., Hellhammer R., Fink D., Petrov A., Sulik B.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.133201>
12. *Pokhil G.P., Mironchik A.I., Zhilyakov L.A., Ikeda T., Yamazaki Y.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2010. V. 74. № 2. P. 221. <https://doi.org/10.3103/S1062873810020267>
13. *Ikeda T., Ikekame M., Hikima Y., Mori M., Kawamura S., Minowa T., Jin W.-G.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2020. V. 470. P. 42. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.03.004>
14. *Vokhmyanina K.A., Zhukova P.N., Irribarra E.F., Kubankin A.S., Le Thu Hoai, Nazhmudinov R.M., Nazsonov N.N., Pokhil G.P.* // J. Surf. Invest.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2013. V. 7. № 2. P. 271. <https://doi.org/10.1134/S1027451013020249>
15. *Вохмянина К.А., Мышеловка Л.В., Сотникова В.С., Кубанкина А.А., Пятигор А.Д., Кубанкин А.С., Григорьев Ю.В.* // Письма в журн. тех. физики. 2021. Т. 47. Вып. 16. С. 51. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.16.51331.18806>
16. *Vokhmyanina K.A., Kubankin A.S., Kishin I.A., Nazhmudinov R.M., Kubankin Yu.S., Sotnikov A.V., Sotnikova V.S., Kolesnikov D.A.* // J. Nano- Electr. Phys. 2018. V. 10. № 6. P. 06036. [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(6\).06036](https://doi.org/10.21272/jnep.10(6).06036)
17. *Vokhmyanina K.A., Kubankin A.S., Myshelovka L.V., Zhang H., Kaplii A.A., Sotnikova V.S., Zhukova M.A.* // J. Instrum. 2020. V. 15. P. C04003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/04/C04003>
18. *Juhász Z., Sulik B., Biri S., Tikési K., Bereczky R.J., Rácz R., Kövér Á., Pálinkás J., Stolterfoht N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 388. P. 132007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/388/13/132007>
19. *Stolterfoht N.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 488. P. 132003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/488/13/132003>
20. *Stolterfoht N., Yamazaki Y.* // Phys. Rep. 2016. V. 629. P. C1. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSREP.2016.02.008>

Effect of Fast Electron Beam Control Using a Ceramic Channel

K. A. Vokhmyanina^{1, *}, L. V. Myshelovka¹, A. D. Pyatigor¹, V. S. Sotnikova^{1, 2},
V. Yu. Novikov¹, Yu. V. Grigoriev³

¹*Belgorod State National Research University, Belgorod, 308015 Russia*

²*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, 308012 Russia*

³*Shubnikov Institute of Crystallography, FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Moscow, 119333 Russia*

*e-mail: vokhmyanina@bsu.edu.ru

The possibility of controlling charged particle beams using dielectric channels (guiding) is an urgent problem in view of the potential possibility of creating inexpensive autonomous control and focusing devices. Currently, experiments using ions with energies of the order of MeV are aimed at using radiation with the spot size of the order of a micrometer for material analysis, surface modification, and cell surgery. When applied to electron beams, this feasibility is still being studied. The paper demonstrates the possibility to control a beam of accelerated electrons using a ceramic channel when it is tilted both in the vertical and horizontal planes. The control data were obtained for the channel after irradiation of both its ends for at least 5 h. After such exposure, an irregular carbon layer forms on the inner surface of the channel near the ends. It is shown that the formed layer does not affect the control properties of the channel.

Keywords: electron beam, dielectric channel, characteristic radiation, time dependence, control effect, carbon-containing layer, X-ray radiation, beam deflection, fast electrons, geometric transmission angle, electron beam imaging, scintillator, ceramics.