УДК 53.043

СКОЛЬЗЯЩЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ С ИСКРИВЛЕННОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2023 г. Л. А. Жиляков[a], *, В. С. Куликаускас[a]

[a] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: zhiliakovla@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.06.2022 г.
После доработки 15.07.2022 г.
Принята к публикации 15.07.2022 г.

Работа направлена на продолжение исследования эффекта “гайдинга” в различных аспектах. Благодаря этому эффекту возможно организовать бесконтактное прохождение пучков ускоренных заряженных частиц вдоль диэлектрической поверхности. В частности, при взаимодействии с диэлектрической пластиной эффект гайдинга обеспечивает прохождение пучков протонов без ионизационных потерь энергии. Проведен эксперимент по скользящему взаимодействию пучков ускоренных протонов с искривленной диэлектрической стенкой, в котором пучки протонов прижимались к поверхности стенки внешним электрическим полем. Для пучков, испытавших такое взаимодействие, проводили измерения энергетического спектра. Сравнение энергетических спектров исходного пучка и пучка, прошедшего в скользящем режиме вдоль искривленной диэлектрической стенки, показало, что в этом взаимодействии так же, как и при скольжении вдоль плоской диэлектрической стенки, пучки протонов не испытывают ионизационных потерь энергии.

Ключевые слова: пучок протонов, эффект гайдинга, искривленная диэлектрическая стенка, ионизационные потери энергии, бесконтактное прохождение.

DOI: 10.31857/S1028096023010272, **EDN:** BLWNWR

ВВЕДЕНИЕ

Исследования протяженного (по длине капилляра) скользящего взаимодействия пучков ускоренных заряженных частиц с диэлектрическими капиллярами в последнее время привлекают внимание благодаря обнаруженному при таком взаимодействии эффекту “гайдинга” [1–3]. Этот эффект обусловлен самоорганизующейся электризацией диэлектрической поверхности. При этом наблюдается ряд интересных явлений. В частности, благодаря этому эффекту возможно бесконтактное прохождение пучков ускоренных заряженных частиц вдоль диэлектрической поверхности, когда не изменяется зарядовое состояние ионов [1] и не отмечается обмен энергией между частицами пучка и стенкой [2]. Наибольшее количество работ в этом направлении посвящено прохождению пучков заряженных частиц (электронов, ионов) через различные диэлектрические каналы – цилиндрические [1, 3–14] или конические трубки [15–22]. Также проводятся эксперименты по пропусканию пучков через изогнутые трубки [23, 24]. Эти работы носят не только фундаментальный характер, но и имеют практическую направленность – на основе наблюдаемых эффектов открываются возможности создания новых компактных устройств для транспортировки, фокусировки и управления пучками.

Цель настоящих исследований – выяснение характера движения протонов в пристенной области, а также исследование возможности управления пучком при пропускании его вдоль искривленной диэлектрической поверхности.

Ранее [2] при экспериментальных исследованиях скользящего взаимодействия пучков ускоренных протонов с поверхностью диэлектрической (стеклянной) пластины было отмечено, что энергетические спектры прямого и скользящего пучков в пределах погрешности эксперимента совпадают. Этот эксперимент показал, что пучки ускоренных протонов при скольжении вдоль диэлектрической пластины не испытывают ионизационных потерь энергии. В настоящей работе проведено сравнение энергетических спектров прямого пучка протонов и пучка протонов, испытавшего скользящее взаимодействие с искривленной диэлектрической поверхностью.

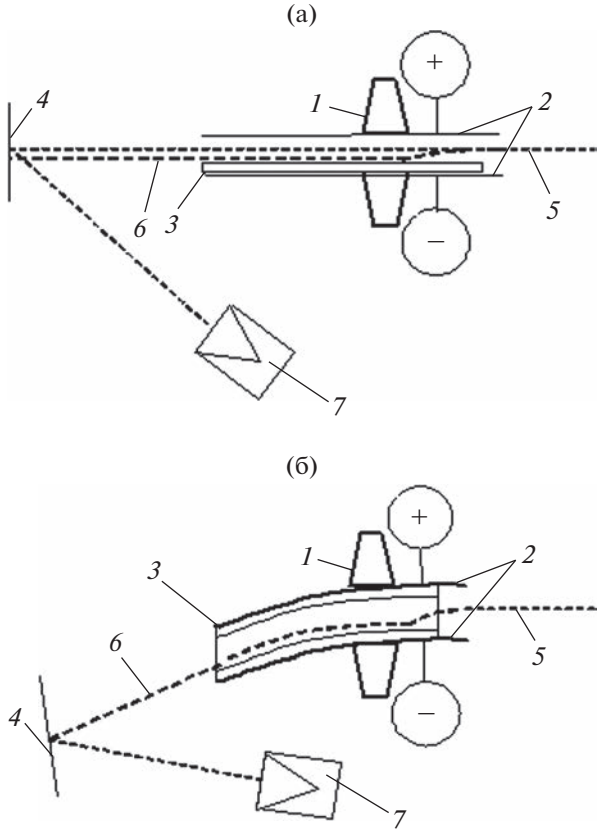

Рис. 1. Схема экспериментального участка с использованием плоской (а) или искривленной поверхности (б): *1* – гониометр; *2* – отклоняющий конденсатор; *3* – пластина из ПММА или искривленная стеклянная трубка; *4* – экран или мишень; *5* – исходный пучок протонов; *6* – скользящий пучок протонов; *7* – детектор.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема рабочего участка показана на рис. 1. В качестве источника пучков ускоренных протонов использовали каскадный ускоритель КГ-500 НИИЯФ МГУ, позволяющий получать пучки с энергией 50–500 кэВ и током до 100 мкА. Пучок протонов от ускорителя по ионопроводу направлялся в вакуумную камеру, где был смонтирован рабочий участок. В вакуумной камере пучок протонов *5* направляется либо напрямую на экран *3*, либо проходит через отклоняющий конденсатор *2*, закрепленный на гониометре *1*. Использовали как плоский, так и искривленный отклоняющие конденсаторы. В первом случае (рис. 1а) на отрицательно заряженной обкладке закрепляли диэлектрическую пластину. Во втором (рис. 1б) – искривленный конденсатор, который представлял собой искривленную стеклянную трубку с металлическими обкладками. В обоих случаях скольжение пучков протонов по диэлектрической стенке было обеспечено тем, что на конденсатор подавали отклоняющее напряжение до 5 кВ. Вследствие этого поперечное электрическое поле прижимало пучок протонов к диэлектрической стенке. В то же время благодаря эффекту гайдинга, обусловленному тем, что поверхность диэлектрической стенки заряжалась одноименным зарядом с частицами пучка, они изолировались от контакта со стенкой. В результате совместных действий сил, прижимающих пучок к стенке и отталкивающих его от нее, пучок протонов двигался в скользящем режиме вдоль стенки *6*. При настройке эксперимента визуальные наблюдения следа пучка осуществляли с помощью экрана *3*, покрытого сцинтиллятором и установленного за отклоняющим конденсатором. В эксперименте, в котором измеряли энергетический спектр пучка, экран с сцинтиллятором заменяли мишенью, на которой происходило рассеивание пучка протонов. В качестве мишени использовали тонкую пленку золота (100 Å), напыленную на кремниевую пластину. Измерения проводили методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Рассеянное излучение регистрировали с помощью кремниевого поверхностно-барьерного детектора *7*. Энергетическое разрешение детектора с предусилителем составляло 12 кэВ.

ЭКСПЕРИМЕНТ

С целью уточнения вопроса об обмене энергии между скользящим пучком и диэлектрической стенкой в качестве материала диэлектрика использовали полиметилметакрилат (ПММА) (оргстекло). Такой эксперимент позволяет провести качественный экспресс-тест на характер скользящего взаимодействия пучка ускоренных заряженных частиц, прижимаемого поперечным электрическим полем к стенке, с диэлектрической поверхностью. А именно, имеет ли место контакт пучка с поверхностью, или взаимодействие носит бесконтактный характер. Дело в том, что ПММА имеет низкую температуру размягчения (~150°C) и радиационно нестойкий. В контрольных экспериментах при нормальном падении пучка на поверхность эрозия пластины ПММА (ее прогорание) происходила за время менее 1 с даже при низкой энергии пучка (50 кэВ) и малой величине тока (1–2 мкА).

Эксперимент по скользящему взаимодействию пучка протонов с пластиной из ПММА проводили при энергии пучка от 100 до 400 кэВ и токе от 10 до 50 мкА. Расходимость пучка 0.1°. Направление распространения исходного пучка параллельно поверхности пластины. Диаметр пучка 2 мм. Расстояние от центра пучка до поверхности пластины 2 мм. Время взаимодействия пучка с пластиной составляло до 30 мин. После проведения скользящего облучения на пластине ПММА следов эрозии не отмечено. Данный эксперимент подтверждает принятую в настоящее время модель скользящего взаимодействия пучков заряженных частиц с диэлектрической стенкой. Со-

гласно этой модели, при скольжении пучка вдоль диэлектрической поверхности происходит изоляция частиц пучка от стенки за счет электростатического взаимодействия заряженных частиц со стенкой, одноименно заряженной в начальный момент самим пучком, и прохождение пучков вдоль стенки является бесконтактным. Кроме того, в экспериментах с пластиной из ПММА отмечено, что режим скольжения пучка без рассеяния наблюдается при поперечной энергии пучка до 1000 эВ, т.е. существенно более высокой, чем в случае использования стеклянной пластины (до 400 эВ) [2]. Отсюда можно оценить угол падения исходного пучка на поверхность пластины ПММА, при котором пучок переходит в скользящий режим без рассеяния – до 3°. Для стеклянной пластины этот угол составляет до 2°.

Предложенная модель [25] электродинамической изоляции пучка ускоренных заряженных частиц от диэлектрической стенки при воздействии на пучок внешнего поперечного электрического поля, прижимающего пучок к стенке, не исключает возможности того, что самоизоляция пучков от стенки должна происходить не только при скольжении пучка вдоль плоской поверхности, но и при скольжении вдоль искривленной поверхности. Были проведены эксперименты по сравнению РОР-спектров исходного пучка протонов и пучка протонов, испытавших скользящее взаимодействие с искривленной диэлектрической поверхностью.

Возможность скольжения по искривленной поверхности пучков протонов, прижимаемых электрическим полем к стенке, исследовали при энергии пучка 300 кэВ. В качестве искривленной диэлектрической поверхности использовали внутреннюю поверхность искривленной стеклянной трубки с радиусом кривизны R = 50 см, длина трубки 15 см, внешний диаметр 4 мм, внутренний 3 мм. На рис. 2 представлен РОР-спектр протонов, испытавших скользящее взаимодействие с искривленной поверхностью в сравнении со спектром исходного пучка. В данном эксперименте существенным являлся вопрос, насколько изменится энергия протонов, испытавших скользящее взаимодействие с искривленной поверхностью, по сравнению с энергией протонов исходного пучка (сдвиг пика). В экспериментах сдвиг пика составил не более одного канала (0.5 кэВ). Отсюда можно сделать вывод, что изменение энергии пучка протонов, испытавших скользящее взаимодействие с искривленной поверхностью, не превышает 0.5 кэВ.

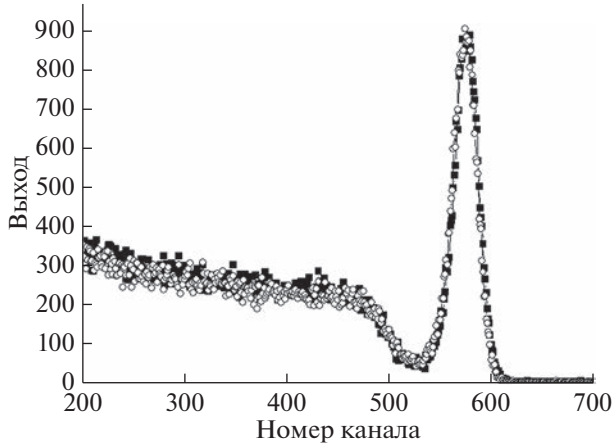

Рис. 2. РОР-спектры пучков протонов исходного (кружки) и скользящего по искривленной диэлектрической поверхности (квадраты).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Если бы при описанном скользящем взаимодействии пучков протонов с поверхностью изогнутой стеклянной трубки они испытывали ионизационные потери энергии (т.е. происходил бы контакт частиц пучка с поверхностью диэлектрика и проникновение протонов вглубь материала стенки), то длина их распространения не превышала бы длины пробега, обусловленной удельными ионизационными потерями энергии. В этом случае на расстоянии, превышающем длину пробега, пучок невозможно было бы зарегистрировать. Соответствующую длину пробега протона в стекле можно оценить по формуле Бете–Блоха для удельных ионизационных потерь энергии:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} Zn\left[\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I_{\text{ион}}(1-\beta^2)}\right) - \beta^2 - \delta - U\right].$$

Используя упрощающие соотношения, связанные с тем, что при названной энергии пучок протонов можно считать нерелятивистским и эмпирические значения коэффициентов взяты из [26], эта длина не превышает 10 мкм. В эксперименте длина участка скольжения пучка протонов (от точки падения пучка на поверхность трубки до конца трубки) составляла около 10 см, т.е. на четыре порядка больше. Энергетический спектр скользящего пучка отличается от спектра исходного пучка с точностью до погрешности измерений (менее чем на 0.2%).

Таким образом, экспериментально показано, что скользящий режим бесконтактного прохождения пучков протонов, прижимаемых внешним поперечным электрическим полем к диэлектрической поверхности, возможен не только в случае плоской поверхности, но и в случае искривленной поверхности. И в том, и в другом случае скользящие пучки практически не испытывают ионизационных потерь энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V., Hellhammer R., Fink D., Petrov A., Sulik B.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 133201. https://doi.org./10.1103/PhysRevLett.88.133201
2. *Жиляков Л.А., Костановский А.В., Иферов Г.А., Куликаускас В.С., Похил Г.П., Швей И.В.* // Поверх-

ность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2002. № 11. С. 65.
3. *Stolterfoht N., Hoffmann V., Hellhammera R., Pesica Z.D., Finka D., Petrova A., Sulikab B.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2003. V. 203. P. 246. https://doi.org./10.1016/S0168-583X(02)02224-3
4. *Sahana M.B., Skog P., Vikor Gy., Kumar R.T.R., Schuch R.* // Phys. Rev. A. 2006. V. 73. P. 040901. https://doi.org./10.1103/PhysRevA.73.04090
5. *Вохмянина К.А., Жиляков Л.А., Похил Г.П.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2006. Т. 70. № 6. С. 828.
6. *Vokhmyanina K.A., Zhilyakov L.A., Kostanovsky A.V., Kulikauskas V.S., Petukhov V.P., Pokhil G.P.* // J. Phys. A. 2006. V. 39. P. 4775.
7. *Stolterfoht N.* // Phys. Rev. A. 2013. V. 87. P. 032901. https://doi.org./10.1103/PhysRevA.87.032901
8. *Lemella C., Burgdörfera J., Aumayrb F.* // Prog. Surf. Sci. 2013. V. 88. № 3. P. 237. https://doi.org./10.1016/j.progsurf.2013.06.001
9. *Víkora Gy., Rajendrakumara R.T., Pešič b Z.D., Stolterfoht N., Schucha R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2005. V. 233. P. 218. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2005.03.109
10. *Matefi-Tempfli S., Matefi-Tempfli M., Piraux L., Juhasz Z., Biri S., Fekete E., Ivan I., Gall F., Sulik B., Vikor Gy., Palinkas J., Stolterfoht N.* // Nanotechnology. 2006. V. 17. P. 3915. https://doi.org./10.1088/0957-4484/17/15/050
11. *Fursatz M., Meissl W., Pleschko S., Gebeshuber I.C., Stolterfoht N., Winter H.P., Aumayr F.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2007. V. 58. P. 319. https://doi.org./10.1088/1742-6596/58/1/071
12. *Skog P., Soroka I.L., Johansson A., Schuch R.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2007. V. 258. P. 145. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2006.12.127
13. *Juhasz Z., Sulik B., Biri I.S., Tokesi K., Fekete E., Matefi-Tempflic S., Matefi-Tempflic M., Víkor G., Takacs E., Palinkas J.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2009. V. 267. P. 321. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2008.10.017
14. *Li D.H., Wang Y.Y., Zhao Y.T., Xiao G.Q., Zhao D., Xu Z.F., Li F.L.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2009. V. 267. P. 469. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2008.11.041
15. *Nebiki T., Yamamoto T., Narusawa T., Breese M.B.H., Teo E.J., Watt F.* // J. Vac. Sci. Technol. A. V. 21. № 5. P. 1671. https://doi.org./10.1116/1.1597889
16. *Hasegawa J., Shiba S., Fukuda H., Oguri Y.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2008. V. 266. P. 2125. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2008.02.051
17. *Sekiba D., Yonemura H., Nebiki T., Wilde M., Oguraae S., Yamashita H., Matsumoto M., Kasagi J., Iwamura Y., Itoh T., Matsuzaki H., Narusawa T., Fukutani K.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2008. V. 266. P. 4027. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2008.06.032
18. *Iwai Y., Ikeda T., Kojima T.M., Yamazaki Y., Maeshima K., Imamoto N., Kobayashi C.T., Nebiki T., Narusawa T., Pokhil G.P.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 023509 https://doi.org./10.1063/1.2834695
19. *Nebiki T., Yamamoto T., Narusawa T., Breese M.B.H., Teo E.J., Watt F.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2003. V. 21. P. 1671. https://doi.org./10.1116/1.1597889
20. *Wickramarachchi S.J., Dassanayake B.S., Keerthisinghe D., Ayyad A., Tanis J.A.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2011. V. 269. P. 1248. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2010.11.089
21. *Wang W., Chen J., Yu D.Y., Yang B., Wu Y.H., Zhang M.W., Ruan F.F., Cai X.H.* // Phys. Scripta. 2011. V. 144. P. 014023. https://doi.org./10.1088/0031-8949/2011/T144/014023
22. *Gong Z., Yan S., Ma H., Nie R., Xue J., Wang Y.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2012. V. 272. P. 370. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2011.01.103
23. *Kojima T.M., Ikeda T., Kanai Y., Yamazaki Y., Esaulov V.A.* // J. Phys. D. 2011. V. 44. P. 355201. https://doi.org./10.1088/0022-3727/44/35/355201
24. *Kojima T.M., Ikeda T., Kanaia Y., Yamazaki Y.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2015. V. 354. P. 16. https://doi.org./10.1016/j.nimb.2014.11.031
25. *Жиляков Л.А., Куликаускас В.С.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 6. С. 71. https://doi.org./10.31857/S1028096022060188
26. *Черняев А.П.* Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. М.: Физматлит, 2004. 152 с.

Sliding Interaction of Accelerated Proton Beams with Curved Dielectric Surface

L. A. Zhilyakov[1, *], V. S. Kulikauskas[1]

[1]*Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: zhiliakovla@mail.ru*

The work is aimed at continuing the study of the "guiding" effect in various aspects. Due to this effect, it is possible to organize contactless transmission of beams of accelerated charged particles along a dielectric surface. In particular, when interacting with a dielectric plate, the guiding effect ensures the transmission of proton beams without ionization energy losses. An experiment was carried out on the sliding interaction of accelerated proton beams with a curved dielectric wall, in which proton beams were pressed against the wall surface by an external electric field. For beams that experienced such an interaction, the energy spectrum was measured. Comparison of the energy spectra of the initial beam and the beam that passed in a sliding mode along a curved dielectric wall showed that in this interaction, as well as when sliding along a flat dielectric wall, proton beams do not experience ionization energy losses.

Keywords: proton beam, guiding effect, curved dielectric wall, ionization energy loss, non-contact transmission.