

Фокусировка ионных пучков диэлектрическими микро- и нанокapиллярными структурами

Ф.Ф. Комаров*, А.С. Камышан, П.А. Гришин

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко»
БГУ, ул. Курчатова, 7, 220045 Минск, Беларусь

(Получено 04.02.2013; в отредактированной форме – 22.03.2013; опубликовано online 28.03.2013)

В работе приводятся результаты исследования по транспортировке протонных пучков с энергией 150-255 кэВ через микро- и нанокapиллярные структуры. Получены зависимости коэффициентов пропускания протонного пучка коническими стеклянными (боросиликатными) капиллярами с диаметрами выходных отверстий 5 и 10 мкм. Показано, что при прохождении пучка через конические капилляры имеют место фокусировка и guiding-эффект. Изучено влияние структуры нанопористого оксида алюминия на коэффициент пропускания и угловые характеристики прошедшего ионного пучка.

Ключевые слова: Капиллярные структуры, Guiding-эффект, Фокусировка ионного пучка, Конический стеклянный капилляр, Нанопористый оксид алюминия.

PACS number: 34.35. + a

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые прохождение положительных ионов сквозь диэлектрический канал без соударения со стенками наблюдалось в 2002 году [1]. В работе исследовалось прохождение пучков многозарядных ионов Ne^{7+} с энергией 3 кэВ через диэлектрические нанокapилляры в пленке PET (polyethylene terephthalate) толщиной 10 мкм. В результате было обнаружено, что выходной ток ионов наблюдался даже при больших углах наклона образца относительно оси пучка, и большинство ионов сохраняло при этом свое зарядовое состояние. В дальнейшем эксперимент был повторен с использованием различных типов ионов в широком диапазоне энергий и различных нанокapиллярных структур [2-4].

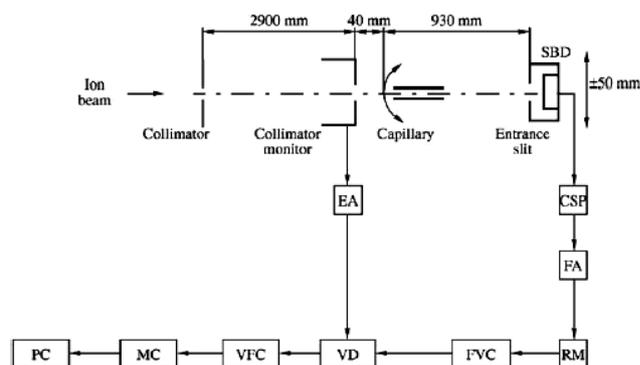
При проведении экспериментов по пропусканию ионных пучков через конические диэлектрические капилляры были обнаружены фокусирующие свойства таких капилляров [5-7]. Коэффициент фокусировки определяется как отношение плотностей входного и выходного токов. Он зависит от типа и энергии ионов и от формы капилляра. Этот коэффициент меняется в широком диапазоне от 10 для Ar^{8+} с энергией 8 кэВ до 1000 для He^+ с энергией 2 МэВ.

Проведенные исследования показали, что диэлектрические микро- и нанокapиллярные структуры имеют огромный потенциал для решения большого числа прикладных задач, таких как вывод ионного пучка на воздух для проведение микроэлементного анализа методами PIXE и RBS [8, 9], проведение высоколокального микроэлементного анализа, микро- и нанолитографии и т.д.

В нашей работе исследовалась трансмиссия протонного пучка с энергией 150-255 кэВ через различные микро- и нанокapиллярные структуры.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Измерения проводились на установке для исследования прохождения ускоренных ионов через капилляры и капиллярные системы, созданной на базе электростатического ускорителя ионов (см. рис. 1), состоящей из четырех основных узлов: 1) системы формирования ионного пучка; 2) камеры рассеяния; 3) измерительной камеры; 4) системы регистрации рассеянных ионов. Экспериментальная установка имеет следующие параметры: немонахроматичность исходного ионного пучка не более 0,1%; точность ориентирования капилляра относительно оси пучка не более $2,5 \times 10^{-2}$ градуса; измеренная расходимость исходного ионного пучка не более $\pm 2,0 \times 10^{-2}$ градуса [10].



СС – схема согласования, ПН-Ч – преобразователь напряжение – частота, ДН – делитель напряжения, ЭУ – электрометрический усилитель, ПЧ-Н – преобразователь частота – напряжение, И – программно-управляемый интенсивметр, УФ – усилитель формирования, ПУ – предварительный зарядочувствительный усилитель, ППД – кремниевый поверхностно-барьерный детектор

Рис 1 – Схема экспериментальной установки

* KomarovF@bsu.by

The article was reported at the 2nd International Conference «Nanomaterials: Applications & Properties-2012»

Представленная на рисунке 1 экспериментальная установка использовалась для измерения углового распределения и угловой зависимости протонного пучка, прошедшего через нанопористый оксид алюминия толщиной 40 мкм.

Для измерения полного тока ионов прошедшего через конические стеклянные капилляры в зависимости от угла влета относительно оси капилляра использовался цилиндр Фарадея, помещенный в измерительную камеру (см. рис. 2).

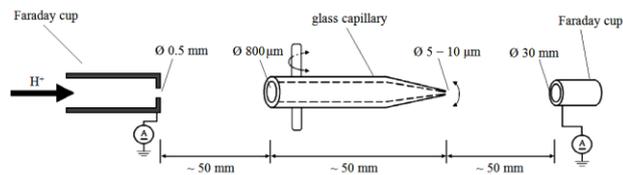


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки для измерения полного тока протонного пучка.

В исследованиях использовались следующие капиллярные структуры: конические стеклянные капилляры длиной 50 мм с входным диаметром 800 мкм и выходными диаметрами 5 и 10 мкм и пластинка аморфного нанопористого Al_2O_3 толщиной 40 мкм. Средний диаметр пор составляет 50 нм, поверхностная плотность пор достигает $5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Давление в измерительной камере составляло 2×10^{-6} мбар.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 Прохождение протонного пучка через конические стеклянные капилляры

При исследовании прохождения ионного пучка в конических стеклянных капиллярах измерялись коэффициенты пропускания протонного пучка и зависимости коэффициента пропускания от угла наклона капилляра относительно оси пучка.

На рисунке 3 представлена угловая зависимость коэффициента пропускания для конического стеклянного капилляра с диаметром выходного отверстия 10 мкм [11].

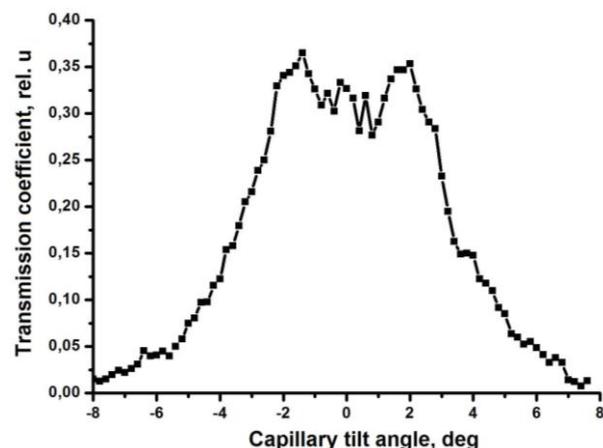


Рис. 3 – Зависимость коэффициента пропускания протонного пучка коническим стеклянным капилляром от угла наклона ($E = 255 \text{ кэВ}$, $I_{ex} = 1,5 \text{ нА}$)

Как видно из рисунка 3, максимальный коэффициент пропускания протонного пучка капилляром практически достигает 40%. При этом капилляр может отклоняться от оси пучка на угол до 2 градусов, без значительных потерь тока на внутренних стенках образца. Это позволяет несколько снизить требования к юстировке капилляра относительно оси пучка для получения максимально коэффициента пропускания.

Из рисунка 3 следует, что ширина кривой на полувысоте составляет около 6 градусов. Прохождение протонного пучка в таком широком диапазоне углов не может быть объяснена прямым пролетом ионов через капилляр, поскольку угол прямой видимости выходного отверстия относительно оси пучка составляет около 0,5 градуса. Таким образом, прохождение протонного пучка через капилляр при столь больших углах влета обусловлено образованием самоорганизующейся системы пучок-капилляр (guiding-эффектом) внутри капилляра.

Был измерен коэффициент усиления плотности ионного тока при прохождении через конический стеклянный капилляр, который достигал 1000. При этом плотность выходного тока составляла $\sim 1,3 \text{ мА/см}^2$.

Подобные результаты были получены при измерении угловой зависимости коэффициента пропускания для конического стеклянного капилляра с диаметром выходного отверстия 5 мкм (см. рис. 4).

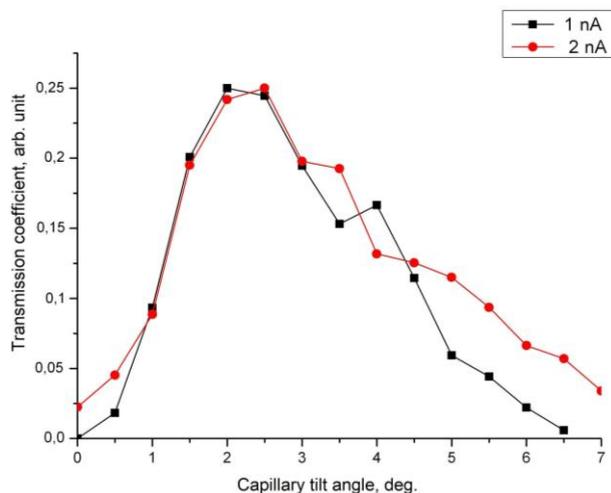


Рис. 4 – Зависимость коэффициента пропускания протонного пучка коническим стеклянным капилляром от угла наклона ($E = 150 \text{ кэВ}$)

На рисунке 4 в отличие от рисунка 3 наблюдается небольшая асимметрия кривых, что вероятно связано с неточностью юстировки протонного пучка относительно оси капилляра, которая не превышает 0,05 мм. Ширина кривой на полувысоте составляет около 3 градусов, что также не может быть объяснено прямым пролетом частиц через капилляр.

При измерениях, проводимых на коническом стеклянном капилляре с диаметром выходного отверстия 5 мкм, был обнаружен верхний предел по величине входного тока. Он составлял около 2,5 нА, что соответствует плотности протонного тока на выходе из капилляра $3,2 \text{ мА/см}^2$. Эти ограничения обу-

словлены малыми диаметрами входных и выходных отверстий образца, что не позволяет достигнуть высокого вакуума внутри капилляра. При более высоких входных токах наблюдается электрический пробой по воздушному промежутку внутри капилляра, и затем резкий спад выходного тока до нуля с его последующим медленным ростом. Таким образом, после электрического пробоя происходит запираание капилляра и для достижения прежних значений выходного тока требуется несколько минут для зарядки внутренней поверхности капилляра до величины, необходимой для обеспечения движения с минимальными потерями количества ионов.

Конический стеклянный капилляр с диаметром выходного отверстия 5 мкм проявил очень сильные фокусирующие свойства при прохождении протонного пучка через него. Зафиксированное увеличение плотности тока составило около 2500 раз.

Также стоит отметить, что коэффициент пропускания стеклянных конических капилляров при его расположении на оси пучка меняется незначительно (в пределах 1-2 %) в диапазоне энергий от 150 до 255 кэВ.

3.2 Прохождение протонного пучка через нанопористый оксид алюминия

В работе [6] обсуждалось прохождение протонного пучка с энергиями 150 и 320 кэВ через мембрану пористого оксида алюминия толщиной 42 мкм с диаметром пор 60-70 нм. Плотность пор составляла $1,2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

На рисунке 5 приведено угловое распределение прошедших через мембрану протонов.

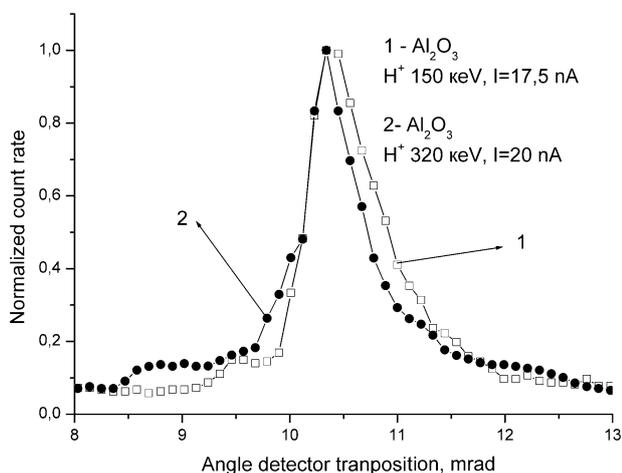


Рис. 5 – Угловое распределение ионов H^+ , прошедших через капилляры в мембране Al_2O_3 при угле наклона 0°

Следует отметить, что угловые размеры пучка за мишенью практически совпадают с угловым распределением исходного пучка. Проведенное интегрирование угловых распределений показало, что коэффициент пропускания мишени не превышает 2×10^{-4} . Полученный коэффициент пропускания слишком мал для практического применения.

По этой причине исследовались возможности по его увеличению, и при создании следующего образца в технологический процесс была добавлена процедура

ра травления тыльной стороны образца. Исходный образец имел толщину около 45 мкм с диаметром пор 35-40 нм. В процессе анодирования алюминия рост значительного числа пор прекратился на расстоянии около 0,2-0,5 мкм от тыльной стороны, т.е. они не являлись сквозными. Для того, чтобы открыть эти поры было проведено травление образца в 10 %-ом растворе NaOH в течение 1,5 минут. В результате была получена мембрана аморфного нанопористого Al_2O_3 толщиной 40 мкм со средним диаметром пор 50 нм. Стоит отметить, что в результате травления произошло открытие значительного числа пор с тыльной стороны и некоторое расширение и изменение формы входных и выходных отверстий каналов. Поверхностная плотность пор с обеих сторон образца составляла около $5 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$.

В измерениях использовался пучок протонов с энергией 150 кэВ, диаметром 1 мм и током 4,5 нА, который падал на полученный образец.

Угловое распределение протонного пучка после прохождения образца представлено на рисунке 6.

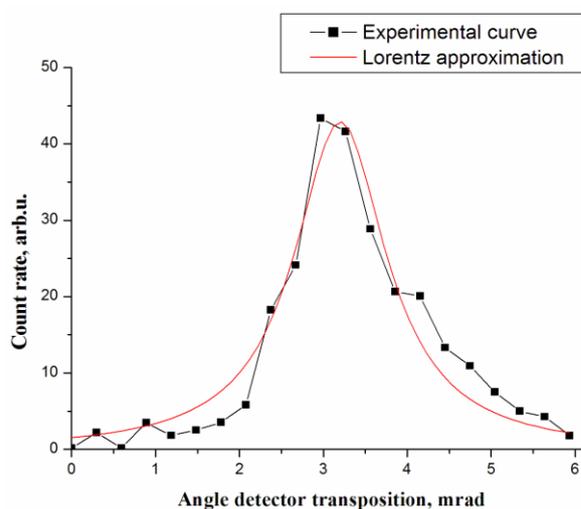


Рис. 6 – Угловое распределение протонов прошедших через аморфный нанопористый Al_2O_3 ($E = 150 \text{ кэВ}$)

Как видно из рисунка 6, ширина на полувысоте кривой составляет около 1,2 мрад. Таким образом, при прохождении через образец практически не изменяется угловая ширина исходного пучка. Расходимость пучка на выходе также изменяется незначительно, что делает нанопористый оксид алюминия перспективным материалом для применения в качестве масок для целей нанолитографии. Проведенное интегрирование показало, что коэффициент пропускания мишени составляет $\sim 10^{-3}$. Таким образом по сравнению с результатами, полученными в работе [6], было получено увеличение коэффициента пропускания образца примерно на порядок.

Стоит отметить, что приведенная на рисунке 6, кривая получена за мишенью, толщина которой более чем на порядок превышает длину пробега зондирующих ионов в Al_2O_3 . Это свидетельствует о том, что в сквозных нанопорах мишени создаются условия, при которых часть пучка имеет возможность пройти аномально большое расстояние с незначительными энергетическими потерями. Это явление

аналогично эффекту гиперканализирования при движении ионов вдоль низкоиндексных направлений в кристалле, при котором заряженные частицы обладают способностью проникать вглубь твердого тела существенно глубже, чем длина пробега для конкретных энергии и материала.

Была измерена скорость счета частиц в зависимости от угла наклона образца относительно оси пучка (см. рис. 7).

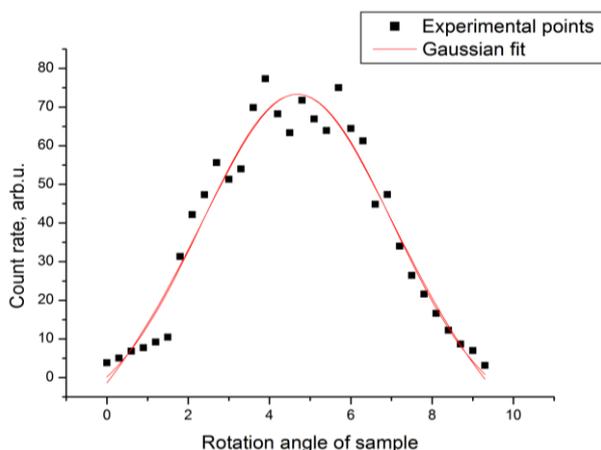


Рис. 7 – Зависимость скорости счета частиц от угла наклона мишени ($E = 150$ кэВ)

Как видно на рисунке 6, значительная часть протонов проходит через мишень в широком диапазоне углов наклона. Ослабление выходного тока в 2 раза наблюдается при угле наклона образца ~ 3 градуса, который значительно превосходит угол прямой видимости выходного отверстия относительно оси пучка, не превышающий 0,1 градуса. Это свидетельствует о сильном guiding-эффекте внутри капилляра, вызванном накоплением заряда на внутренних стенках каналов образца.

4. ВЫВОДЫ

Были проведены исследования по прохождению пучка протонов с энергией 150-255 кэВ через диэлектрические микро- и нанокapиллярные структуры. Были получены зависимости коэффициента пропускания пучка протонов коническими стеклянными капиллярами с микронными выходными отверстиями. Как и в работах других авторов [1-6] наблюдался сильный guiding-эффект. Были зафиксированы существенные фокусирующие свойства конических капилляров с микронными выходными отверстиями, что делает их перспективными для практического использования, например для проведения субмикронного RBS и PIXE элементного анализа. При этом использование конических капилляров отличаются своей простотой и низкой стоимостью по сравнению с традиционными фокусирующими системами. Было отмечено, что в представленном диапазоне энергий коэффициент пропускания капилляром протонного пучка меняется незначительно. При давлении в исследовательской камере 2×10^{-6} мбар был обнаружен верхний предел входного тока для 5-ти микронного капилляра.

Была измерена зависимость скорости счета частиц от угла наклона образца нанопористого оксида алюминия и угловое распределение протонного пучка с энергией 150 кэВ, прошедших через образец. В этом случае также наблюдался сильный guiding-эффект. При прохождении пучка протонов через мембрану Al_2O_3 не наблюдалось уширения исходного пучка, что делает нанопористые мембраны из диэлектрических материалов перспективными при создании масок для проведения ионной имплантации.

Micro- and Nanocapillary Structures Based on Dielectric Materials to Focus the Ion Beams

F.F. Komarov, A.S. Kamyshan, P.A. Hryshyn

Institute of Applied Physics Problems Belarusian State University, 7, Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus

The 150-255 keV proton beams transmission through micro- and nanocapillary structures was studied. The dependences of coefficient of proton beam transmission through tapered glass (borosilicate) capillaries with outlet diameters of 5 and 10 μm were obtained. The focusing and guiding effects for transmitted proton beams were observed. The effect of the structure of nanoporous aluminum oxide on the transmission coefficient and angular characteristics of the transmitted ion beam was studied.

Keywords: Capillary structures, Guiding effect, Ion beam focusing, Tapered glass capillary, Nanoporous aluminum oxide.

Фокусування іонних пучків діелектричними мікро- і нанокapіллярними структурами

Ф.Ф. Комаров, О.С. Камишан, П.О. Грішін

*Науково-дослідна установа «Інститут прикладних фізичних проблем ім. А.Н. Севченко» БДУ,
вул. Курчатова, 7, 220045 Мінськ, Білорусь*

У роботі наводяться результати дослідження з транспортування протонних пучків з енергією 150-255 keV через мікро-і нанокapіллярні структури. Отримано залежності коефіцієнтів пропускання протонного пучка конічними скляними (боросилікатними) капілярами з діаметрами вихідних отворів 5 і 10 мкм. Показано, що при проходженні пучка через конічні капіляри мають місце фокусування і guiding-ефект. Вивчено вплив структури нанопористого оксиду алюмінію на коефіцієнт пропускання та кутові характеристики проїшов іонного пучка.

Ключові слова: Капілярні структури, Guiding-ефект, Фокусування іонного пучка, Конічний скляний капіляр, нанопористий оксид алюмінію.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. N. Stolterfoht, J.H. Bremer, V. Hoffmann, R. Hellhammer, D. Fink, A. Petrov, B. Sulik, *Phys. Rev. Lett.* **88**, 133201 (2002).
2. N. Stolterfoht, R. Hellhammer, P. Sobocinski, Z.D. Pešić, J. Bundesmann, B. Sulik, M.B. Shah, K. Dunn, J. Pedregosa, R.W. McCullough, *Nucl. Instr. Meth. B* **235**, 460 (2005).
3. D.H. Li, Y.Y. Wang, Y.T. Zhao, G.Q. Xiao, D. Zhao, Z.F. Xu, F.L. Li, *Nucl. Instr. Meth. B* **267**, 469 (2009).
4. Z. Juhász, B. Sulik, S. Biri, I. Iván, K. Tókési, É. Fekete, S. Mátéfi-Tempfli, M. Mátéfi-Tempfli, Gy. Viktor, E. Takács, J. Pálinkás, *Nucl. Instr. Meth. B* **267**, 321 (2009).
5. T. Nebiki, D. Sekiba, H. Yonemura, M. Wilde, S. Ogura, H. Yamashita, M. Matsumoto, K. Fukutani, T. Okano, J. Kasagi, Y. Iwamura, T. Itoh, S. Kuribayashi, H. Matsuzaki, T. Narusawa, *Nucl. Instr. Meth. B* **266**, 1324 (2008).
6. F.F. Komarov, A.S. Kamyshan, P.A. Grishin, *Il Nuovo Cimento C* **34** No4, 365 (2011).
7. M. Kreller, G. Zschornack, U Kentsch, *Nucl. Instr. Meth. B* **269**, 1032 (2011).
8. K Ishii, N. Fujita, H. Ogawa, *Nucl. Instr. Meth. B* **269**, 1026 (2011).
9. N. Fujita, K Ishii, H. Ogawa, *Nucl. Instr. Meth. B* **269**, 1023 (2011).
10. F.F. Komarov, A.S. Kamyshan, Gz. Karwat, *Vacuum*, **83** 51 (2009).
11. F.F. Komarov, A.S. Kamyshan, P.A. Grishin, *4th International Conference – Radiation Interaction with material and its use in technologies (Interaction – 2012)*, 304 (Kaunas, Lithuania, 2012).