

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТОННОГО ПУЧКА С ПОМОЩЬЮ КАПИЛЛЯРОВ НА УСТАНОВКЕ «МИКРОЗОНД»

К. С. Величко, И. А. Карпов, А. Д. Тумкин, Д. А. Федотов, М. В. Таценко

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров Нижегородской обл.

Введение

В настоящее время использование пучков заряженных частиц для анализа различных материалов стало широко применяемым инструментом. Физические методы анализа, основанные на применении пучков заряженных частиц, имеют очевидные достоинства: неразрушимость образцов при анализе, локальность анализа, многоэлементность, высокое пространственное разрешение и т. д. При использовании ядерно-физических методов в исследовании современных материалов, структурированных на микро- и наномасштабе, к параметрам пучка, включая размер, предъявляют жесткие требования. Поэтому исследователи занимаются поиском простых и дешевых способов фокусировки и формирования ионных пучков микронных и субмикронных размеров.

Интерес к взаимодействию заряженных частиц с диэлектрическими капиллярами возник в начале 2000-х, тогда было обнаружено, что при прохождении положительных ионов через диэлектрические капилляры значительная их часть не испытывает соударений со стенками [1]. Позже ряд исследований показали, что взаимодействие пучков заряженных частиц с диэлектрическим капилляром обладает удивительными свойствами самоорганизации поверхностного заряда [2]–[9]. Благодаря этому эффекту практически все частицы, которые проходят через диэлектрический капилляр, не испытывают потерь энергии и перезарядки.

Управление пучками ионов с помощью диэлектрических капилляров имеет широкие перспективы применения, благодаря возможности достаточно просто получать большую интенсивность тока на выходе из капилляра, что позволяет проводить анализы методами Резерфордского рассеяния (RBS), ионно-индуцированного рентгеновского излучения (PIXE), ядерных реакций (NRA) т. д.

1. Физические принципы капиллярного метода фокусировки

Управление пучком с помощью диэлектрического капилляра авторы работ [1] назвали *guiding-эффект*. Входящие в капилляр заряженные частицы, сталкиваясь с внутренней стенкой, заряжают её. Заряд в дальнейшем препятствует столкновениям заряженных частиц со стенкой, и они движутся, не касаясь её. Таким образом, часть частиц поддержи-

вает заряд стенок, компенсируя стекающий заряд, а другая часть проходит через диэлектрический капилляр без соприкосновения со стенкой, т. е. не изменяя свою энергию и заряд.

Было предположено, что в канале образуется две заряженные области (рис. 1): область рассеяния (scattering) и область транспортировки (guiding).

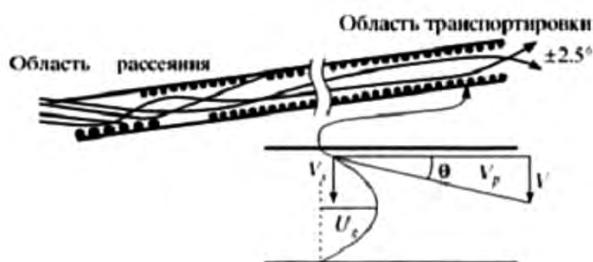


Рис. 1. Заряженные области капилляра

Предположение о наличии области транспортировки объясняется тем, что при любом повороте диэлектрического капилляра относительно оси пучка ширина углового распределения на выходе одна и та же. Т. е. пучок, пройдя определенный путь, как бы «забывает» начальный угол входа в капилляр, и движение заряженных частиц во второй области продолжается так, как будто частицы вошли под нулевым углом к оси капилляра. В области рассеяния частицы падают на стенку до тех пор, пока на ее поверхности не образуется заряженное «пятно», которое препятствует дальнейшей зарядке стенке и способно отклонять все заряженные частицы на определенный угол, практически параллельно оси капилляра. Далее частицы пучка, испытывая соударения со стенкой, подзаряжают ее. Постепенно образуется область, в которой основная часть пучка транспортируется без взаимодействия со стенкой диэлектрического капилляра до выхода.

2. Формирование протонного пучка с помощью диэлектрического капилляра

Формирование протонного пучка было выполнено на установке «Микрозонд». Источником заряженных частиц служит ускоритель ионов ЭП-10 [10]. Диэлектрический капилляр Femtotip (рис. 2) подсоединялся к выходу установки «Микрозонд»

с помощью алюминиевого держателя. Для определения размера пятна протонов, прошедших через капилляр, была выбрана дозиметрическая плёнка GafchromicEBT3.

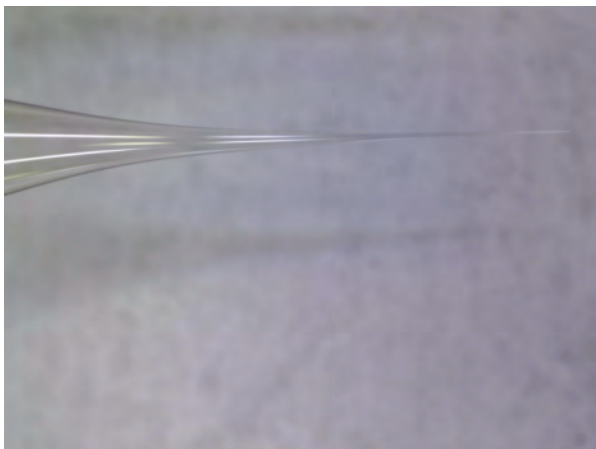


Рис. 2. Внешний вид капилляраFemtotip

Выходной диаметр диэлектрического капилляра, использованного в работе, по его паспортным данным, составляет 0,2–0,5 мкм. Энергия протонов 4 МэВ, ток пучка протонов $\sim 1,5 \cdot 10^{-12}$ А. Расстояние от конца капилляра до плоскости плёнки 100, 1100 и 2100 мкм.

Изображение капилляра и образца дозиметрической плёнки перед облучением и в его процессе представлены на рис. 3.

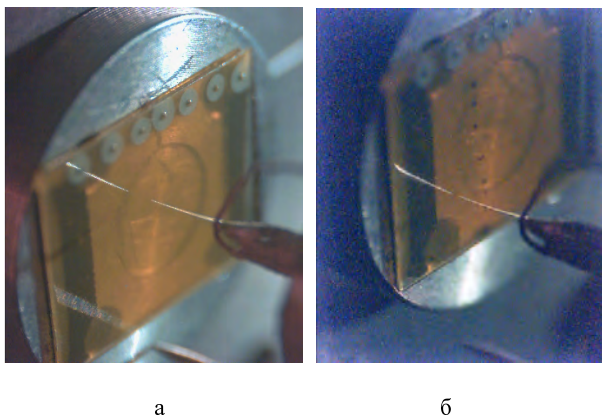


Рис. 3. Изображение капилляра и образца дозиметрической плёнки до и в процессе облучения: а – до облучения, б – в процессе облучения

На рис. 4 представлена диаграмма тока, снятого при облучении металлического держателя протонами, прошедшими через капилляр.

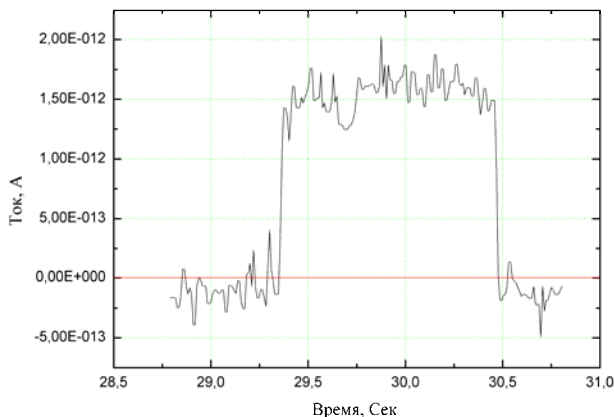


Рис. 4. Характерный ток, снятый при облучении протонами металлического держателя

Результаты облучения образца дозиметрической плёнки представлены в таблице. На рис.5 представлены изображения пучка после капилляров. Характерный след пучка на дозиметрической плёнке, рис. 6, можно разделить на три зоны: 1 – зона образования нагара на плёнке (ядро пучка), 2 – зона основного ореола, 3 – зона слабого ореола.

Результаты облучения

№ точки облучения	Энергия облучения, МэВ	Время облучения, сек	Расстояние от конца капилляра до пленки, мкм	Ядро пучка, мкм
1	4	1	100	31
2		3	100	43,4
3		10	1100	59,3
4		10	2100	76
5		60	100	69
6		300	100	80,3

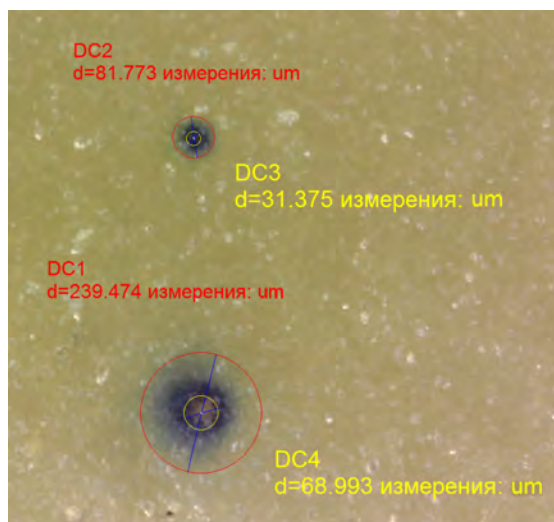


Рис. 5. Результат облучения (1 сек для следа с $d = 31$ мкм, и 60 сек для следа с $d = 69$ мкм) дозиметрической плёнки (расстояние от конца капилляра до плёнки 100 мкм)

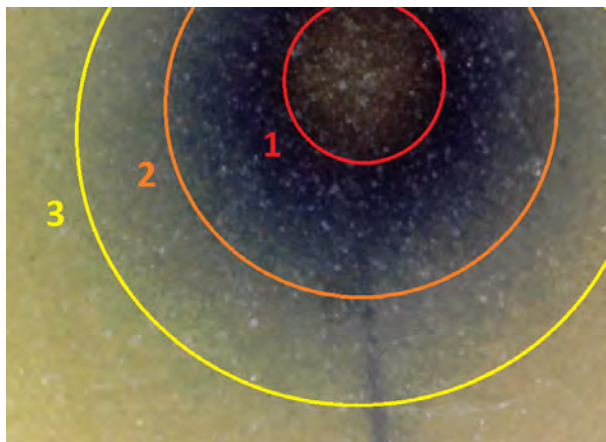


Рис. 6. Характерный след пучка на дозиметрической плёнке

В ходе эксперимента достигнут минимальный размер пятна ~31 мкм.

Заключение

В результате работы получены следующие результаты:

- разработано и испытано при энергии протонов 4 МэВ устройство для крепления капилляра (формирователь);
- проведено тестирование капиллярного канала «Микрозонд»;
- исследован процесс формирования пучков ускоренных протонов с энергиями 4 МэВ с помощью диэлектрических капилляров;
- получены изображения пятна пучка после прохождения диэлектрического капилляра (выходной диаметр 0,2–0,5 мкм) на расстояниях 100, 1100 и 2100 мкм;
- получен минимальный размер пятна ~31 мкм.

1. Stolterfoht N., Bremer J. H., Hoffmann V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. V.88, p. 133201.

2. Ikeda, Kanai Y., Kojima T. M., Iwai Y., Kanazawa Y., Hoshino M., Kobayashi T., Pokhil G. P., Yamazaki Y. // J. Phys. Conf. Ser. 2007. 88, 012031.

3. Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Лагутин А. Е. // Тезисы докладов XXXVII Международной конференции по ФВЗЧК. – Москва: Изд-во Моск. Ун-та, 2007. С. 26.

4. Г.П. Похил, К.А. Вохмянина // Поверхность, 2008. № 3. С. 71–73.

5. Stolterfoht N., Hellhammer R., Pešić Z. D., Hoffmann V. // Nucl. Instrum.Methods in Phys. Res. B 225, 169 (2004).

6. Комаров Ф. Ф., Камышан А. С., Гришин П. А. Фокусировка ионных пучков диэлектрическими микро- и нанокapиллярными структурами // Журнал нано и электронной физики, 2013. Т. 5, № 1, 01015 (5cc).

7. Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Лагутин А. Е. Особенности прохождения быстрых протонов через диэлектрический капилляр // Вестник БГУ, 2007. Сер. 1, № 2. С. 8–12.

8. Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Лагутин А. Е. Транспортировка пучков заряженных частиц через диэлектрические капилляры. // Сборник трудов 7й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск, 2013. С. 38–40.

9. Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Партыка Я. Н. Фокусирование ионных пучков конусным диэлектрическим капилляром. // Сборник трудов 8й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск, 2009. С. 32–33.

10. Абрамович С. Н. // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов 1997. ТИЯС-ХI. Специальный выпуск. С. 4.