

ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ «МИКРОЗОНД» ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 4 МЭВ ПРИ ПОМОЩИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАПИЛЛЯРА

К. С. Величко, И. А. Карпов, Д. А. Федотов

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

На комплексе «Микрозонд» ведутся работы по получению пучков ускоренных протонов микронного и субмикронного размера при помощи диэлектрических капилляров. Использование диэлектрических капилляров для фокусировки пучков заряженных частиц (протоны, ядра гелия, тяжелые ионы) позволит расширить возможности установки «Микрозонд» по пространственному разрешению при проведении элементного и структурного анализа материалов.

При использовании диэлектрических капилляров часто наблюдается эффект самоорганизации системы пучок-капилляр, при котором ионы заряжают стенки капилляра, вследствие чего следующие частицы движутся в капилляре без соударения со стенками. Такой эффект был назван *guiding-эффект* [1–2]. В конических капиллярах *guiding-эффект* приводит к эффекту фокусировки пучка на выходе капилляра. При этом часть ионов пучка поддерживают заряд на стенках капилляра, а оставшаяся часть ионов пучка фокусируется на выходе конической части капилляра. Для *guiding-эффекта* важно, в какой области капилляра образуется объемный заряд, так как при определенных условиях вместо самоорганизации системы пучок-капилляр заряд будет препятствовать прохождению и фокусировке ионов. Место образования объемного заряда зависит от геометрии входного пучка ионов, формы капилляра и возможности самоорганизации равновесного состояния заряда и разряда этой области. Геометрия входного пучка ионов зависит от режима работы фокусирующей системы установки «Микрозонд», а именно - расположения фокуса ионного пучка.

Для определения оптимальной геометрии входного пучка протонов с энергией 4 МэВ при их фокусировке диэлектрическим капилляром были определены несколько точек фокусировки: в цилиндрической области капилляра, в области конусообразного сужения, на расстоянии 1 и 3 мм от конца капилляра.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Держатель 3 с диэлектрическим капилляром 2 Femtotips (выходной диаметр 0,5 мкм, входной диаметр 1,5 мм) устанавливался на торец системы сканирования 5 в специальный корпус. Перед капилляром была установлена диафрагма 4 диаметром 1 мм для коллимации входящего в капилляр пучка протонов и регистрации входного тока. Точки Ф1, Ф2, Ф3 и Ф4 соответствуют расстояниям 66, 73, 83 и 86 мм от торца системы сканирования установки «Микро-

зонд». Цилиндрическая часть капилляра 2 была заземлена на корпус держателя для стекания излишнего заряда.

Без капилляра пучок протонов с энергией 4 МэВ фокусировался с помощью линз установки «Микрозонд» в точках Ф1 – Ф4 с фиксацией значений токов линз. После установки капилляра значения токов линз для каждой из точек Ф1 – Ф4 были последовательно восстановлены и проведены измерения токов на цилиндре Фарадея 1.

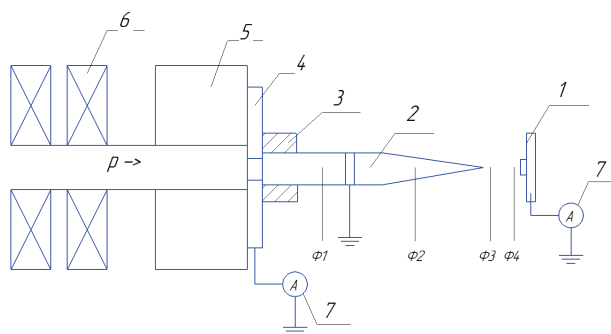


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – ЦФ (цилиндр Фарадея), 2 – капилляр Femtotips II, 3 – держатель, 4 – диафрагма, 5 – система сканирования установки «Микрозонд», 6 – линзы системы фокусировки установки «Микрозонд», 7 – пикоамперметр Keithley 6485

При фокусировке протонов в точках Ф1 – Ф3 ток протонов после капилляра зафиксирован не был. Это можно объяснить тем, что на стенках капилляра образуется объемный самоподдерживающийся заряд, который препятствует появлению *guiding-эффекта*.

В случае фокусировки протонов в точку Ф4 был зафиксирован ток протонов (рис. 2). На диафрагме ток протонов составил 12 нА, а максимальное значение тока после капилляра – 0,13 нА, что соответствует 1 % от входной величины. На диаграмме виден «пилообразный» характер тока, который можно объяснить процессом заряда и разряда области капилляра, отвечающей за фокусировку и пропускание протонов. Такой характер выходного тока ионов наблюдался и в работе [3], где также исследовались особенности прохождения и фокусировки ионов диэлектрическими капиллярами с субмикронным выходным отверстием. Провал на диаграмме обусловлен механическим прерыванием пучка оператором установки.

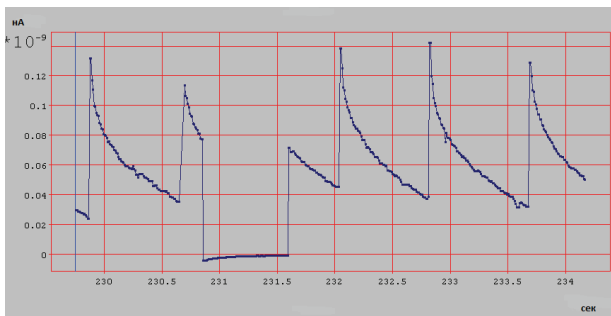


Рис. 2. Диаграмма тока в при фокусировке протонов в точке Ф4

Затем фокусирующие линзы установки «Микрозонд» были переведены в режим, при котором на входе в капилляр формировался квазипараллельный пучок. Полученная диаграмма тока представлена на рис. 3. При токе протонов на диафрагме 12 нА максимальное значение тока после капилляра составило 0,26 нА или 2,1 % от входного. При этом «пилообразный» характер диаграммы тока не изменился.

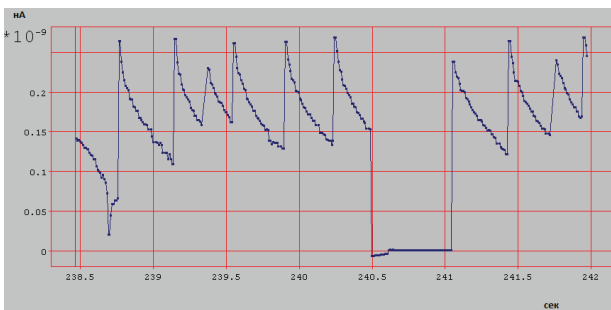


Рис. 3. Диаграмма тока при квазипараллельном пучке протонов на входе в капилляр

Очевидно, что самоорганизации системы пучок-капилляр не произошло, так как накопление заряда на капилляре, обусловленное столкновениями части протонов со стенками капилляра, происходило быстрее, чем его стекание, и приводило к уменьшению количества прошедших капилляр частиц. Таким образом, для самоорганизации системы пучок-капилляр скорость образования объемного заряда, определяемая входным током протонов, и скорость его стекания, обусловленная конструкцией держателя, должны быть одинаковы.

При уменьшении входного тока протонов на диафрагме до 1 нА была получена диаграмма тока без характерных для процессов зарядки-разрядки пиков (рис. 4). При этом значение тока после капилляра составило 0,03 – 0,04 нА или ~4 % от входного тока.

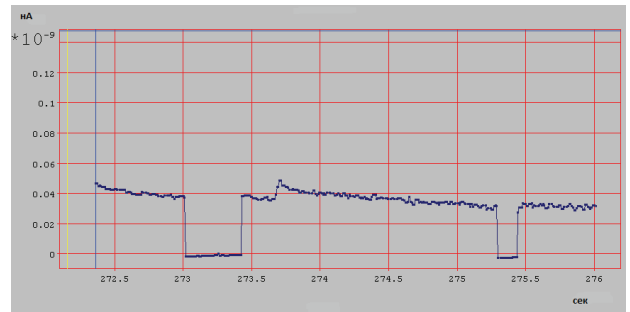


Рис. 4. Диаграмма тока при квазипараллельном пучке протонов на входе в капилляр и токе на диафрагме 1 нА

В результате проведенных экспериментов выбран оптимальный режим работы магнитооптической фокусирующей системы установки «Микрозонд» для эффективной фокусировки пучков протонов диэлектрическим капилляром. Фокусирующая система должна обеспечивать квазипараллельный пучок на входе в капилляр, при этом ток протонов на входе в капилляр должен составлять ~ 1 нА. Эффективность передачи протонов через капилляр составила ~4 %, а плотность потока протонов после капилляра увеличилась в 16000 раз.

Литература

1. Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. Vol. 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. 88, 012031 (2007).
3. Tokihiro Ikeda, Takao M. Kojima, Yoshio Natsume, Jun Kimura, and Tomoko Abe Stable transmission of slow highly charged ions through tapered glass capillary with active discharging method for sub-micron sized beams // APPLIED PHYSICS LETTERS. 2016, № 133501. P. 109–113.