

## ТРАНСПОРТИРОВКА ПУЧКА ПРОТОНОВ ЧЕРЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫЕ КАНАЛЫ В ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

А.С. Камышан, П.А. Гришин

НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова, 7, Минск, 220045, Беларусь, тел. +375(17)212-48-33, e-mail: komarovF@bsu.by

В работе приводятся результаты исследования по транспортировке протонных пучков с энергией 150 кэВ через наноразмерные каналы в аморфном оксиде алюминия. Получены угловое распределение прошедшего пучка и зависимость скорости счета прошедших частиц детектором от угла наклона образца относительно оси пучка. Изучалось влияние структуры оксида алюминия на характеристики выходного пучка.

### Введение

В 2002 году было обнаружено, что при прохождении положительных ионов сквозь диэлектрические каналы значительная их часть не испытывают соударения со стенками [1]. В дальнейших исследованиях было обнаружено, что в процессе прохождения основная часть ионов сохраняет свое исходное зарядовое состояние и практически не испытывает потерь энергии, даже при больших углах наклона диэлектрических каналов относительно оси пучка [2, 3]. Все эти свойства делают диэлектрические микро- и наноканалы интересными для дальнейших исследований и перспективными для практического использования.

Целью представленной работы было исследование транспортировки пучка протонов с энергией 150 кэВ через мембрану аморфного пористого оксида алюминия толщиной 40 мкм, средним диаметром сквозных каналов 50 нм и их поверхностной плотностью около  $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Исследовалось влияние травления барьерного слоя образца на характеристики выходного пучка.

Измерения проводились на установке для исследования прохождения ускоренных ионов через капилляры и капиллярные системы, схематическое изображение которой приведено на рисунке 1. Протонный пучок после прохождения коллиматора-монитора (диаметр отверстия 1 мм) падал на закрепленный в гониометре образец, который мог поворачиваться в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Прошедшие через образец протоны регистрировались подвижным полупроводниковым детектором, работающим в режиме счета. Диапазон перемещения детектора осуществляемого в вертикальной плоскости составлял  $\pm 3^\circ$ . Режим перемещения – непрерывный и пошаговый.

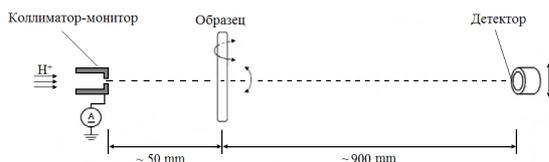


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки

При изготовлении образца проводилось травление барьерного слоя с тыльной сторо-

ны, с целью увеличения числа сквозных каналов. В результате травления произошло открытие значительного числа пор с тыльной стороны, изменение формы и некоторое расширение входных и выходных отверстий каналов [4].

### Экспериментальные результаты

При проведении измерений использовался пучок протонов ( $d = 1 \text{ мм}$ ,  $E = 150 \text{ кэВ}$ ,  $I_{\text{ср}} = 4,5 \text{ нА}$ ), который падал на образец. Протоны, прошедшие сквозь образец, регистрировались полупроводниковым детектором.

На рисунке 2 изображено угловое распределение протонного пучка, прошедшего сквозь мембрану аморфного пористого оксида алюминия, при нормальном падении.

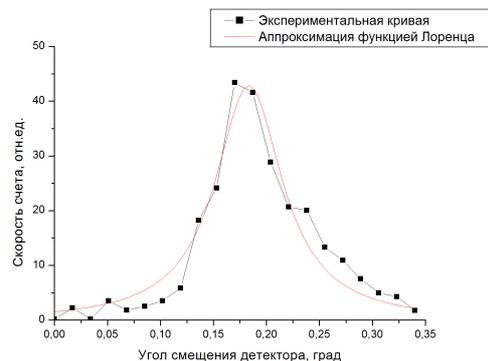


Рис. 2. Угловое распределение протонов прошедших через аморфный нанопористый  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $E=150 \text{ кэВ}$ )

Из рисунка 2 видно, что угловая ширина пучка составляет около  $7 \cdot 10^{-2}$  градуса, что соответствует угловой ширине исходного пучка. Таким образом, при прохождении протонного пучка сквозь нанопористую мембрану  $\text{Al}_2\text{O}_3$  практически не изменяются угловая ширина и расходимость пучка, что делает данный материал перспективным материалом для использования в качестве масок для нанолитографии. Проведенное интегрирование кривой показало, что коэффициент пропускания протонного пучка образцом составляет  $\sim 10^{-3}$ . Стоит отметить, что травление барьерного слоя и связанное с ним изменение характеристик и формы каналов не оказало значительного влияния на угловые характеристики выходного пучка, но приводит к некоторому увеличению коэффициента пропускания мембраны за счет увеличения количества сквозных каналов.

На рисунке 3 представлена зависимость скорости счета протонов детектором при различных углах наклона мембраны относительно оси пучка.

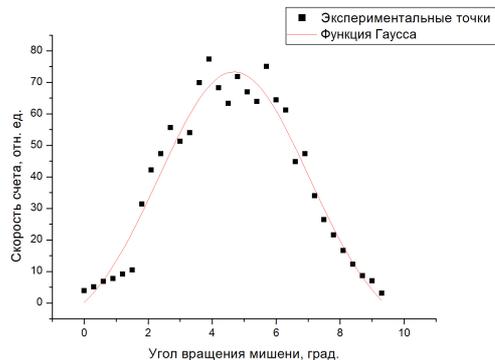


Рис. 3. Зависимости скорости счета прошедших частиц от угла наклона мишени относительно пучка ( $E=150$  кэВ)

Из рисунка 3 видно, что значительная часть протонов проходит через мишень в широком диапазоне углов наклона. Ширина кривой на полувысоте составляет 6 градусов. Полученные результаты не могут быть объяснены прямым пролетом протонов через канал, поскольку угол прямой видимости выходного отверстия относительно оси пучка не превышает 0,1 градуса. Это свидетельствует о том, что внутри капилляра создаются условия для пролета частиц сквозь капилляр (т.н. guiding-эффект), вызванные накоплением заряда на внутренних стенках каналов образца.

Стоит отметить, что кривые, приведенные на рисунках 2 и 3, получены за мишенью, толщина

которой более чем на порядок превышает длину пробега протонов с энергией 150 кэВ в  $Al_2O_3$ , не превышающая 1 мкм (расчеты производились программным комплексом SRIM). Это свидетельствует о том, что в сквозных каналах мишени создаются условия, при которых часть пучка имеет возможность пройти anomalously большое расстояние с незначительными энергетическими потерями.

### Выводы

Проведенные эксперименты позволили экспериментально показать, что:

- после прохождения протонного пучка через мембрану аморфного нанопористого оксида алюминия не происходит изменения его угловой ширины и угловой расходимости;
- непродолжительное травление образца не приводит к значительному изменению угловых характеристик выходного пучка, но позволяет увеличить коэффициент пропускания протонного пучка образцов за счет увеличения количества сквозных каналов;

### Список литературы

1. Stolterfont N., Bremer J.-H., Hoffmann V., Hellhammer R., Fink D., Petrov A., Sulik B. // Phys. Rev. Lett. – 2002. – 88. – P. 133201.
2. Juhász Z., Sulik B., Biri S., Iván I., Tőkési K., Fekete É., Mátéfi-Tempfli S., Mátéfi-Tempfli M., Víkor Gy., Takács E. // Nucl. Instr. and Meth. – 2009. – B267 – P. 321 – 325.
3. Komarov F.F., Kamyshan A.S., Grishin P.A. // IL Nuovo Cimento C. – 2011. – 34, No 4. – P. 365 – 372.
4. Комаров Ф.Ф., Камышан А.С., Гришин П.А. // J. of Nano- Electron. Phys. – 2013. – Vol. 5, No 1. – P. 01015.

## TRANSPORT OF PROTON BEAM THROUGH NANOSIZED CHANNELS OF ALUMINUM OXIDE

A.S. Kamyshan, P.A. Hryshyn  
*Institute of Applied Physics Problems Belarusian State University*  
 7 Kurchatov Street, Minsk, Belarus 220045

The 150 keV proton beam transmission through amorphous nanoporous aluminum oxide was studied. The angular distribution transmitted beam was measured. The effect of the structure of nanoporous aluminum oxide on the transmission coefficient and angular characteristics of the transmitted ion beam was studied.