

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С НАНОПОРИСТЫМИ МАТРИЦАМИ ИЗ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Е.Н. Муратова¹⁾, А.А. Шемухин²⁾, Ю.В. Балакшин²⁾, А.П. Евсеев²⁾, В.А. Мошников¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
им. В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», ул. Проф. Попова 5, Санкт-Петербург 197376,
Россия, sokolovaeknik@yandex.ru

²⁾Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1/2, Москва 119991, Россия, shemuhin@gmail.com

В работе были приготовлены и исследованы два типа нанопористых мембран из оксида алюминия с использованием разных кислот. Структурные особенности образцов исследованы методами сканирующей электронной спектроскопии. В экспериментах по ионному облучению диэлектрических каналов на основе пористого оксида алюминия изучено пропускание и рассеяние ускоренных ионов He^+ . В качестве источника пучка He^+ с энергией 1,7 МэВ использовался ускоритель ионов. Рассеяние ионов изучалось методом резерфордовской спектрометрии обратного рассеяния. Наблюдался переход гелия через нанопористый оксид алюминия под разными углами между нормалью к образцу и направлением пучка. Благодаря малоугловому рассеянию это позволяет транспортировку ускоренных заряженных частиц по диэлектрическим капиллярам и, как следствие, локализацию эффектов облучения высокоэнергетическими ионами.

Ключевые слова: локализованные радиационные эффекты; нанопористый оксид алюминия; мембраны; ионные пучки; обратное резерфордовское рассеяние.

INTERACTION OF ION RADIATION WITH NANOPOROUS MATRICES OF ANODIC ALUMINA

E.N. Muratova¹⁾, A.A. Shemukhin²⁾, Yu.V. Balakshin²⁾, A.P. Evseev²⁾, V.A. Moshnikov¹⁾

¹⁾Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
5 Prof. Popova Str., 197376 Saint Petersburg, Russia, sokolovaeknik@yandex.ru

²⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University,
1/2 Leninskie gory, 119991 Moscow, Russia, shemuhin@gmail.com

In work, two types of nanoporous alumina membranes were prepared using different acids and were tested. Structural features of the samples were investigated by scanning electron spectroscopy. Transmission and scattering of accelerated He^+ ions were studied in experiments on ion irradiation of dielectric channels based on porous alumina. Ion accelerator was used as a source of the He^+ beam with an energy of 1.7 MeV. A scattering of ions was studied by Rutherford backscattering spectrometry. Helium transition through nanoporous alumina at various angles between the normal to the sample and the beam direction were observed. Owing to the small angle scattering, it allows the transportation of the accelerated charged particles through the dielectric capillaries, and, as a result, localization of high energy ion irradiation effects.

Keywords: localized radiation effects; nanoporous alumina; membranes; ion beams; Rutherford backscattering.

Введение

Тема прохождения положительных ионов через диэлектрический канал начала интенсивно изучаться в 1990-х годах с момента открытия направляющего эффекта. Интерес вызывает коэффициент фокусировки ускоренных пучков ионов, который определяется как отношение плотно-

стей входного и выходного токов [1] и зависит от типа и энергии ионов и формы капилляра. Он изменяется в широком диапазоне от 10 для Ar^{8+} с энергией 8 кэВ до 1000 для He^+ с энергией 2 МэВ. Исследования [2, 3] показали, что диэлектрические микро- и нанокapиллярные структуры имеют большой потенциал для реше-

ния большого числа решения прикладных задач, таких как вывод ионного пучка на воздух для микроэлементного анализа методом индуцированного частицами рентгеновского излучения и спектрометрии обратного резерфордского рассеяния, локального микроэлементного анализа, микро- и нанолитографии и облучения биологических объектов.

В отношении оксида алюминия с пористой структурой был проведен определенный объем работ, связанных с переходом пучка и изменением его параметров на выходе. Большое внимание было уделено влиянию параметров пористой структуры на свойства выходящего пучка. В работе [4] исследовано сечение торможения протонов и дейтронов в фольгах из оксида алюминия в области энергий 0.9 – 2.5 МэВ. Наличие пор изменяет потери энергии при прохождении частиц через образец, но позволяет проявить направляющий эффект с требуемой конфигурацией. Малая расходимость луча на выходе из мембраны делает пористый анодный оксид алюминия (ПАОА) перспективным материалом для использования в качестве масок для нанолитографии [5].

В представленной работе представлена методика изготовления матрицы ПАОА с использованием различных электролитов и исследованы оптические свойства полученных образцов, в том числе пропускание с помощью метода RBS. Рассмотрена зависимость прохождения ионов через матрицу от угла падения луча на образец.

Основная часть

Матрицы диэлектрических каналов на основе ПАОА формировались методом электрохимического анодирования. В качестве подложки использовалась алюминиевая фольга толщиной от 20 до 50 мкм. Геометрические размеры пор зависят от технологических условий формирования мембраны в широком диапазоне [6]. Диаметр пор может варьироваться от нанометров до микрометров. На структуру влияют варьируемые технологические па-

раметры (состав электролита, напряжение и т.д.).

При использовании электролита на основе H_2SO_4 были сформированы мембраны толщиной около 10 мкм, со средним диаметром пор 20 нм, толщиной барьерного слоя ≈ 200 нм и концентрацией пор в них 350 шт./мкм². С другой стороны, геометрические параметры мембран, полученных в электролите на основе H_3PO_4 , следующие: средний диаметр пор 80 нм, толщина пористого слоя 10 мкм, толщина барьерного слоя ≈ 200 нм, концентрация пор 50 шт./мкм².

Для исследования прохождения ионного пучка через диэлектрические каналы использовалась установка на базе ускорителя АН-2500, расположенного в НИИЯФ МГУ [7, 8]. Была создана специальная экспериментальная камера, включающая коллиматорные диафрагмы, систему контроля пучка, систему регистрации обратно рассеянных ионов и гониометрическую систему. Для удобства работы внутри вакуумной камеры ускорителя все мембраны были закреплены с помощью фторопластового дискового каркаса. Это позволило избежать деформации образцов при испытаниях.

На мембрану поступает коллимированный пучок ионов He^+ с энергией 1.2 МэВ: часть пучка проходит через капилляры, а другая часть рассеивается. Во всех экспериментах детектируемый угол рассеяния составлял 120°. Диаметр пучка на мембране составлял около 1 мм. Остаточное давление в камере не превышало $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Плотность тока на мишени поддерживалась постоянной на уровне 4 нА.

Результаты ускоренного прохождения пучков через мембраны, приготовленные в электролите на основе H_2SO_4 , показали, что интенсивность прошедшего пучка практически не изменяется в пределах 2.5 градусов. Уменьшение сигнала в два раза соответствует повороту цели на 3 градуса. Измеренный коэффициент пропускания находился в диапазоне 0.50-0.625, в зависимости от толщины образца. В то же

время при отклонении в 3 градуса в высокоэнергетической части спектра практически отсутствуют обратнорассеянные частицы от Hf, а в случае регистрации точным прибором проходит 25% пучка.

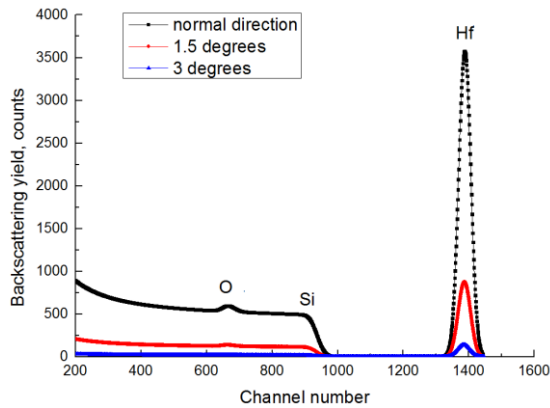


Рис. 1. Энергетический спектр обратно рассеянных ионов He^+ с энергией 1200 кэВ. Черная кривая — спектр в направлении нормали, красная кривая — спектр при отклонении 1.5 градуса от нормали, синяя кривая — спектр при отклонении 3 градуса

Показано, что при малом угловом рассеянии на стенке мембраны генерируется достаточно большое количество электронов, что необходимо учитывать при дальнейшем использовании таких мембран.

Заключение

В работе были исследованы мембраны на основе пористого анодного оксида алюминия с системой упорядоченных наноразмерных (диаметр пор 20 нм и более) капилляров. Установлено, что пропускание пучков высокоэнергетических ионов для мембран на основе H_2SO_4 значительно выше, чем на основе H_2SO_4 , что можно объяснить структурными различиями.

Мембраны на основе ПАОА успешно использовались для обеспечения транспорта потока высокоэнергетических

ионов гелия: для мембран с диаметром пор 20 нм коэффициенты пропускания находятся в диапазоне 0,50-0,625.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда № 23-42-10029 от 20.12.2022, <https://rscf.ru/project/23-42-10029/>.

Библиографические ссылки

1. Stolterfoht N., Bremer J.-H., Hoffmann V. et.al. Transmission of 3 keV Ne^{7+} Ions through Nanocapillaries Etched in Polymer Foils. *Evidence for Capillary Guiding*, *Phys. Rev. Lett.* 2002; (88): 133201.
2. Fujita N., Ishii K., Ogawa H. Development of two-dimensional mapping technique by in-air-PIXE with metal capillary. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 2011; (269): 1023-1025.
3. Grotzer M.A., Schültke E., Bräuer-Krisch E., Laisue J.A. Microbeam radiation therapy: Clinical perspectives. *Phys. Medica.* 2015; (31): 564-567.
4. Clark Turner D., Mangelson N.F., Rees L.B. Determination of aluminum oxide stopping cross sections for protons and deuterons by backscattering from thin targets. *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. B.* 1995; (103): 28-32.
5. Reddy P.R., Ajith K.M., Udayashankar N.K. Structural and optical analysis of silver nanoparticles grown on porous anodic alumina membranes by electro-less deposition. *Mater. Today Proc.* 2019; (19): 2633-2638.
6. Muratova E.N., Luchinin V.V., Moshnikov V.A. et.al. Features of the formation of nanoporous membranes based on alumina from foil and new fields of applications. *Glas. Phys. Chem.* 2017; (43): 163-169.
7. Shemukhin A.A., Balaskshin Y. V., Evseev A.P., Chernysh V.S. The parameter influence of ion irradiation on the distribution profile of the defect in silicon films, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 2017; (406): 507-510.
8. Luchinin V. V., Moshnikov V.A., Muratova E.N., Samigullin R.S. Formation of ordered nanoscale capillary membranes based on anodic alumina, *J. Phys. Conf. Ser.* 2015; (586): 012008.