

На правах рукописи

МУРАТОВА Екатерина Николаевна

**ИСКУССТВЕННО И ЕСТЕСТВЕННО УПОРЯДОЧЕННЫЕ МИКРО- И
НАНОРАЗМЕРНЫЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ
АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Специальность 05.27.06 – технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), на кафедре микро- и наноэлектроники

Научный руководитель: доктор технических наук, Лучинин В.В., заведующий кафедрой микро- и наноэлектроники

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук Гаврилов Сергей Александрович, профессор, заведующий кафедрой материалов функциональной электроники, Национальный исследовательский университет «МИЭТ».

Кандидат химических наук Мякин Сергей Владимирович, доцент кафедры теоретических основ материаловедения, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).

Ведущая организация –

Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН), Санкт-Петербург

Защита состоится «13» ноября 2014 года в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте университета www.eltech.ru.

Автореферат разослан «12» сентября 2014г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.238.04

Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время активно развиваются методы создания наноструктурированных материалов, основанные на использовании процессов формирования и самоформирования. Одним из материалов, вызывающих практический интерес, является пористый анодный оксид алюминия. Мембраны на основе нанопористого оксида алюминия востребованы в нанотехнологии, микробиологии и ядерной физике, поскольку они обладают рядом уникальных свойств, а также механической прочностью, термической стабильностью и химической стойкостью.

Для формирования оксидных структур на основе Si , Al , Ti и других материалов наиболее часто используется электрохимическое анодирование, которое характеризуется технологической доступностью и совместимостью с традиционными технологическими процессами микро- и нанoeлектроники. Однако наиболее часто представленный в литературных источниках электрохимический метод формирования микро- и нанопористого оксида алюминия реализуется в условиях тонких пленок алюминия (~ 1 мкм), нанесенных на поверхность инородного субстрата, причем получаемые структуры характеризуются большой дисперсией пор по размерам и неоднородным распределением их по поверхности. Сложность, а в ряде случаев и невозможность отделения таких пористых анодных пленок от подложки, ограничивает перспективы их использования в качестве свободных мембран (масок, матриц) с требуемыми тополого-геометрическими параметрами пор.

Таким образом, формирование в тонкой (~ 10 мкм) алюминиевой фольге механически прочных мембран на основе пористого оксида алюминия с упорядоченными сквозными порами – капиллярами микро- и наноразмеров является актуальной задачей.

Значительный интерес вызывает использование таких мембран в качестве: проницаемых матриц для роста бактериальных культур; наноразмерных шаблонов – масок для фокусировки ионных пучков высоких энергий с достижением эффекта каналирования; искусственных оптических материалов – фотонных кристаллов.

Целью диссертационной работы являлось комплексное исследование процессов управляемого формирования и самоформирования нано- и микропористых мембран на основе оксида алюминия с упорядоченной системой одноосноориентированных пор – сквозных капилляров, создаваемых электрохимическим анодированием алюминиевой фольги.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследование процессов:

- искусственного формирования топологически упорядоченных микро- и нанопор в алюминиевой фольге с использованием литографии или локального ионно-лучевого травления и их эволюции при последующем электрохимическом анодировании;

- самоформирования композиций сквозных одноосноориентированных нанопор – капилляров при электрохимическом анодировании тонкой алюминиевой фольги, подвергнутой предварительным механической прокатке (фасетированию) и термическому отжигу (рекристаллизации).

2. Комплексное исследование состава, структуры, тополого-геометрических, электрофизических и оптических параметров микро- и нанопористых мембран на основе оксида алюминия.

3. Исследование возможности использования мембран на основе оксида алюминия, содержащих систему искусственно и естественно упорядоченных нано- и микропор в качестве наноразмерных капиллярных матриц и масок в микро- и нанотехнике.

Научная новизна

1. Осуществлено системное упорядочение основных технологических параметров, определяющих искусственное формирование и самоформирование пористых мембран на основе оксида алюминия электрохимическим анодированием алюминиевой фольги (~10 мкм) с заданными структурно-геометрическими и топологическими параметрами одноосноориентированных пор-капилляров микро- (5...20 мкм) и наноразмеров (20...220 нм).

2. Предложен и реализован эффективный метод оптического экспресс-контроля нанопористых мембран, основанный на совместном анализе спектров поглощения в УФ, видимом и ИК-диапазонах, позволивший обеспечить оперативную характеризацию мембран в отношении размера пор, их структурно-топологических параметров, основного химического состава и наличия примесей.

3. Комплекс исследований по использованию нанопористых капиллярных мембран на основе оксида алюминия в качестве маски – шаблона показал, что они позволяют реализовать каналирование пучков ускоренных ионов через диэлектрические капилляры с обеспечением пространственной локализации ионного воздействия; определены закономерности прохождения ионных пучков высоких энергий через нанокapилляры различного диаметра.

4. Предложена технология создания ростовых платформ для биомедицинской экспресс-диагностики патогенных бактерий с использованием проницаемых для жидкости капиллярных нанопористых мембран на основе оксида алюминия, что обеспечивает резкое сокращение времени анализа за счет ускорения роста колоний патогенов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Базовым элементом технологического процесса формирования в алюминиевой фольге упорядоченных сквозных капиллярных мембран нанопористого оксида алюминия методом анодирования в различных электролитах является предварительное искусственное создание на поверхности фольги топологического микро- и нанорельефа методами травления или фасетированием поверхности механической обработкой.
2. Доминирующим технологическим фактором, определяющим размер нанопор оксида алюминия и, как следствие, аспектное отношение одноосноориентированных сквозных капилляров, формируемых электрохимическим анодированием алюминиевой фольги, является состав электролита. Для обеспечения минимального диаметра пор и максимального аспектного отношения предпочтителен электролит с более высокой кислотностью, в частности, на основе серной кислоты.
3. Экспериментально установлено, что функцию свободных масок для обеспечения наноразмерного пространственного упорядоченного корпускулярного воздействия высокоэнергетических (1,5...2 МэВ) ионных пучков гелия могут выполнять сквозные капиллярные мембраны на основе оксида алюминия с диаметрами пор до 20 нм и аспектным отношением до 500.

Практическая значимость работы:

1. Создана экспериментальная установка для получения пористых анодных оксидов металлов и технологически реализованы процессы получения упорядоченной системы сквозных нанопористых мембран диаметром до 20 нм аспектным отношением до 500 в алюминиевой фольге толщиной ~ 10 мкм. / Патент на полезную модель «Электрохимическая ячейка для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников» № 2012122692 (01.06.2012).
2. Изготовлены свободные наноразмерные капиллярные маски – мембраны на основе анодированной алюминиевой фольги, обеспечивающие пространственно локализованный транспорт потоков заряженных ионов высоких энергий с экспериментально установленным коэффициентом прохождения более 60%.
3. Разработаны и изготовлены на основе анодного оксида алюминия капиллярные матрицы – ростовые платформы, обеспечивающие эффективное культивирование колоний патогенных бактерий на проницаемых нанопористых мембранах с целью резкого сокращения времени биомедицинского анализа. / Патент на изобретение: «Способ выращивания колоний микробных клеток и устройство для его реализации» № 2522005 (10.07.2014).
4. Показано, что созданный электрохимическим анодированием алюминиевой фольги искусственный нанопористый материал обладает свойствами экранирования ИК

излучения в спектральном диапазоне от 8 до 14 мкм, что соответствует спектральной области теплового излучения биообъектов.

Внедрение результатов работы. Имеются акты использования результатов диссертационной работы НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина МГУ и НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс: курс лекций «Технология пористых наноматериалов» (по магистерской программе «Нанотехнология и диагностика»), цикл лабораторных работ по дисциплине «Наноматериалы» курс лабораторных работ по дисциплинам «Наноматериалы» и «Технология пористых наноматериалов» (Направление «Электроника и микроэлектроника» магистерская программа «Нанотехнологии и диагностика»). Результаты работы также отражены в отчетах по выполнению НИР в соответствии с ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» (Соглашение № 14.132.21.1662), в соответствии с грантом РФФИ на 2014-2015 гг. (Договор № НК 14-08-31609\14) и в соответствии с программой «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» (У.М.Н.И.К.) в 2011-2013 гг.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и научных школах:

- На международных конференциях: IV Международная конференция «Кристаллофизика XXI века», Москва, 2010; 14th International Workshop on New Approaches to High-Tech, Espoo, Finland, 2011; 15th Scientific Youth School “Physics and technology of micro- and nanosystems”, Saint-Petersburg, 2012; XLIV Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, 2014.

- На всероссийских конференциях: 9–10,12 Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, СПб, 2007–2008, 2010; IV Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО – 2011». Москва, 2011; IV–V, VII Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Рязань, 2011–2012, 2014; VIII Российская ежегодная конференция молодых сотрудников и аспирантов «Физико – химия и технология неорганических материалов», Москва, 2011; Всероссийская молодежная научная школа «Химия и технология полимерных и композиционных материалов». Москва, 2012; II Всероссийская научная конференция «Наноструктурированные материалы и преобразовательные устройства для солнечной энергетики 3-го поколения, Чебоксары, 2014.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 работ, из них 8 статей – в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 3 статьи – в других источниках и получено 2 патента Российской Федерации: на полезную модель и на изобретение.

Личный вклад автора. Автором лично выполнены все эксперименты по разработке технологии и получению нано- и микропористых мембран на основе оксида алюминия. Исследование образцов на прохождение высокоэнергетических заряженных пучков проводилось совместно с сотрудниками кафедры физики НИИЯФ МГУ. Микробиологические исследования ростовых платформ на основе оксида алюминия проводилось совместно с сотрудниками НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы (75 наименований). Основной материал изложен на 111 страницах, содержащих 73 рисунка и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, поставлены цель и основные задачи исследования, изложены основные полученные результаты, включая новизну и практическую значимость выполненных исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ литературы по вопросам формирования пористого оксида алюминия, закрепленного на различных подложках. Рассмотрен ряд аспектов теории порообразования и влияния технологических параметров на формируемую структуру, что позволило выбрать основные направления исследований по созданию мембран пористого оксида алюминия с системой пор – сквозных капилляров, создаваемых электрохимическим анодированием. Приведен обзор материалов по использованию пористого оксида алюминия в качестве различных матриц в современных областях науки и техники. Показано, что значительный интерес представляют отделяемые от подложки нано- и микропористые механически прочные мембраны (матрицы, свободные маски) и сделан вывод о необходимой реализации процесса их создания при использовании тонкой фольги. Глава завершается обобщающей таблицей, отражающей основные области применения пористого оксида алюминия.

В заключении главы 1 сформулированы выводы по результатам проведенного анализа литературных источников, на основании которых поставлены задачи диссертационной работы.

Во второй главе особое внимание уделено технологии предварительной подготовки поверхности алюминиевой фольги толщиной ~ 10 мкм и собственно процессу электрохимического анодирования. Первым этапом исследования являлась подготовка фольги в рамках таких процессов как механическое фасетирование (рисунок 1а) и полировка поверхности, а также реструктуризации в процессе термического отжига. Как показано далее, фасетирование поверхности во многом определяет тополого-геометрические параметры процесса порообразования и габитус пор (рисунок 1б). Реструктуризация алюминиевой фольги исследовалась методом рентгеноструктурного анализа путем обратной съемки Лауэ. Исследования показали, что термический отжиг при температуре, близкой к температуре плавления алюминия, приводит к существенному увеличению размера монокристаллических зерен.

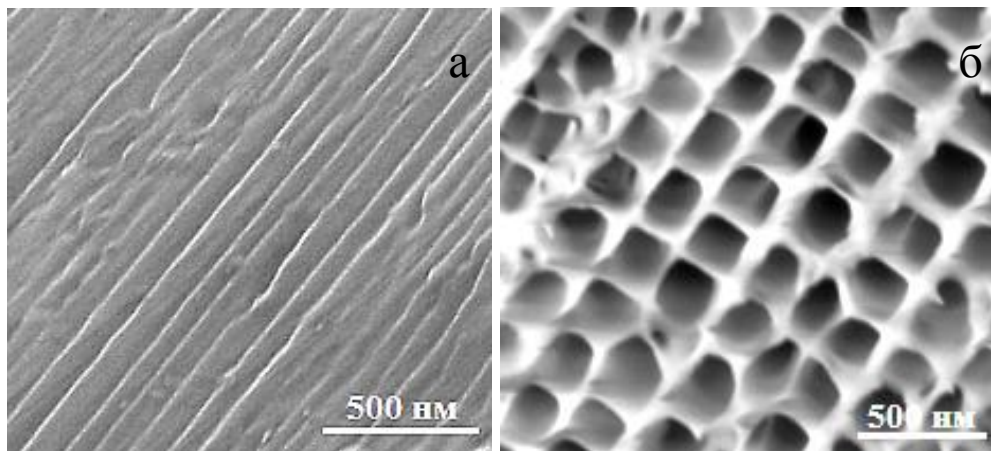


Рисунок 1 – РЭМ изображения алюминиевой фольги после процесса фасетирования (а) и после электрохимического анодирования (б)

Следующим этапом подготовки алюминиевой фольги являлось искусственное формирование топологического рисунка пор методами фотолитографии и локальным ионно-лучевым травлением. Приведен сопоставительный анализ методов, в результате которого в данной диссертационной работе выбор сделан в пользу фотолитографического метода.

Далее в работе проводилась отработка технологии электрохимического анодирования. Для этого была сконструирована экспериментальная установка, обеспечивающая получение пористого оксида алюминия, оборудованная системой охлаждения для поддержания необходимых технологических условий. Модель самоформирования сквозных пор-капилляров в алюминиевой фольге основана на предположении о том, что ее окисление протекает преимущественно по нормали к поверхности. Данный процесс стимулирует перераспределение электрического поля в материале фольги из-за объемных изменений, связанных с большим объемом, занимаемым оксидом алюминия по сравнению с чистым алюминием, а также наличие на окисляемой поверхности искусственно созданных или естественных микро- и наноразмерных структурно-геометрических неоднородностей. Максимальная

напряженность электрического поля локализуется на дне поры на границе между алюминием и оксидным слоем, что и обеспечивает самоформирование упорядоченных строго вертикальных пор – капилляров (рисунок 2).

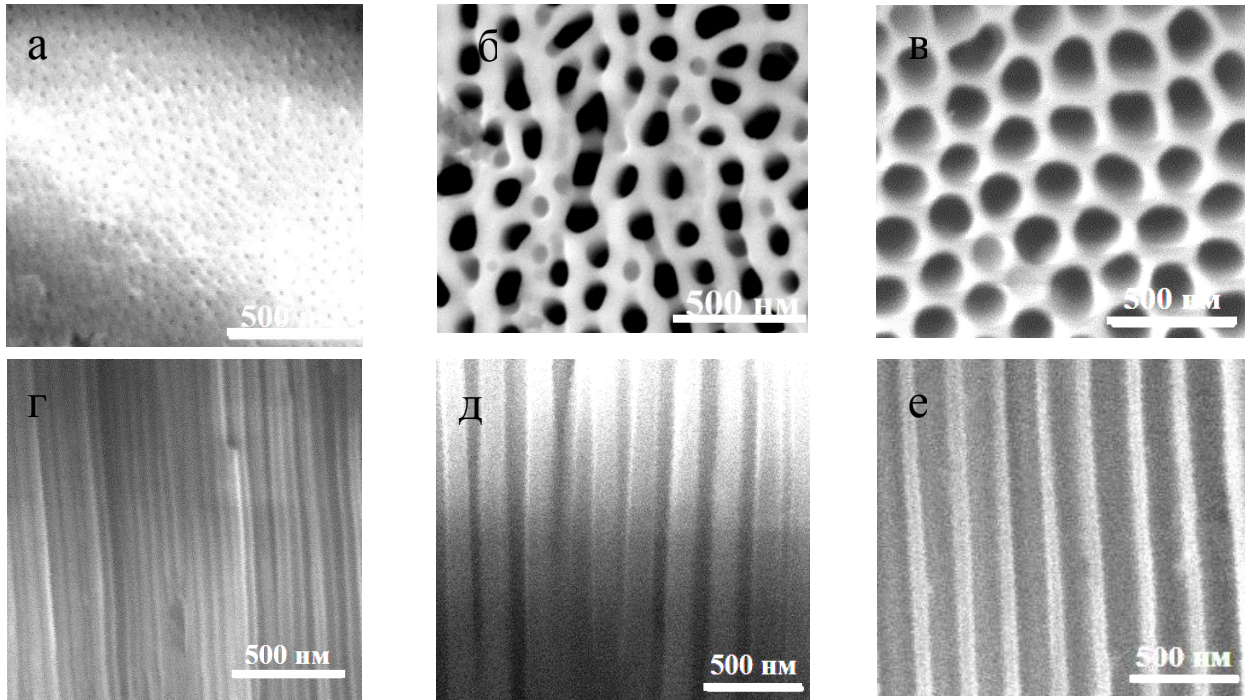


Рисунок 2 – РЭМ изображения мембран пористого оксида алюминия, полученных в электролите на основе серной кислоты при $U=20$ В (а, г); ортофосфорной кислоты при $U=80$ В (б, д); ортофосфорной кислоты с добавлением 10% глицерина при $U=125$ В (в, е)

Показано, что варьируя различные технологические условия (таблица 1), можно контролировать и оптимизировать такие структурные параметры, как размер и плотность пор, структурное упорядочение и толщину пористого слоя.

Таблица 1. Взаимосвязь типа электролита с технологическими условиями и геометрическими параметрами

Электролит	Напряжение формирования, В	Диаметр оксидной ячейки ¹ , нм	Диаметр пор ¹ , нм
H_2SO_4	15-27	25-65	12-40
H_3PO_4	80-150	150-300	80-250

Установлено, что доминирующим технологическим фактором, определяющим размер нанопор оксида алюминия, является кислотный состав электролита. В качестве основы электролита использовались водные растворы серной и ортофосфорной кислот. Для формирования пор с минимальным диаметром предпочтителен электролит с более высокой кислотностью, в частности, на основе серной кислоты (таблица 1 и рисунок 2).

¹ См. рисунок 4

В диссертации приведены кинетические зависимости для гальвано- и потенциостатических режимов, трехмерные зависимости скорости анодирования и геометрических параметров от технологических условий анодирования. Один из примеров таких зависимостей представлен на рисунок 3.

Результатом данной части работы является систематизация доминирующих факторов (таблица 2) процесса анодирования, влияющих на геометрические параметры мембран с системой наноразмерных капилляров на основе оксида алюминия.

Таблица 2. Общие закономерности формирования нанопористых мембран на основе оксида алюминия

Объекты оптимизации	Доминирующие факторы в процессах формирования пористых мембран					
	Структурирование поверхности	Состав электролита	Загустители	Напряжение	Время процесса	Температура процесса
Диаметр пор		х	х	х		
Пористость	х	х		х		
Структурное упорядочение	х		х			х
Толщина мембраны					х	х

Третья глава посвящена исследованию характеристик полученных пористых мембран. В первую очередь изучались структура и состав пористого слоя (рисунок 4).

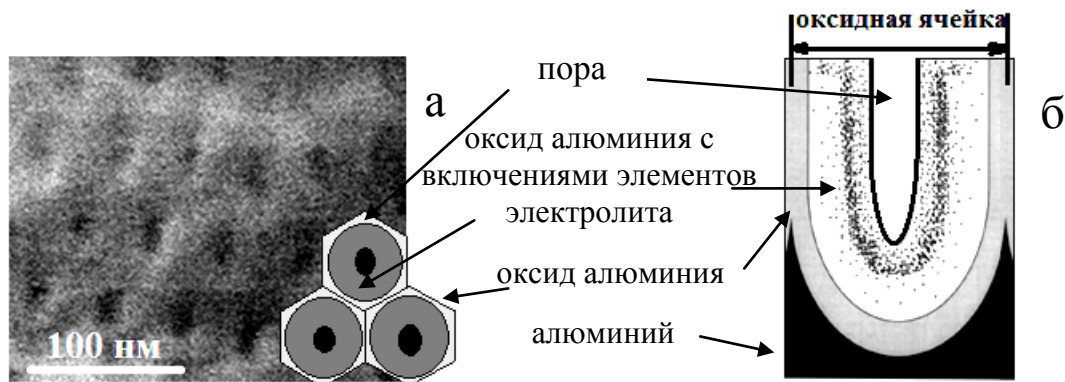


Рисунок 4 – РЭМ изображение и схематическое представление структуры пористого слоя (а) и оксидной ячейки (б)

Результаты рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и резерфордского обратного рассеяния (РОР) (рисунок 5,а,б) показали, что в состав мембраны,

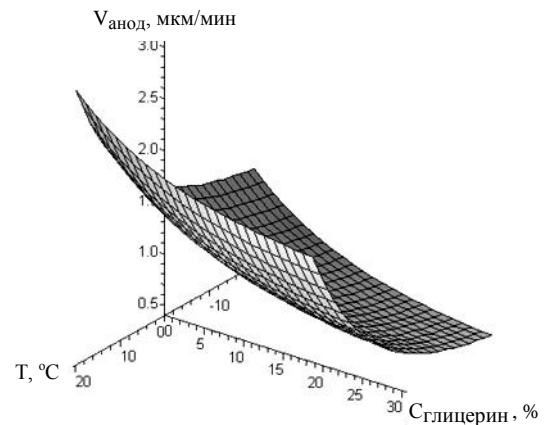


Рисунок 3 – Зависимость скорости анодирования от температуры процесса и концентрации глицерина в электролите на основе серной кислоты

полученной в электролите на основе серной кислоты с добавлением глицерина, входят такие элементы как Al , O , C , S , которые равномерно распределены по всей глубине сквозной мембраны.

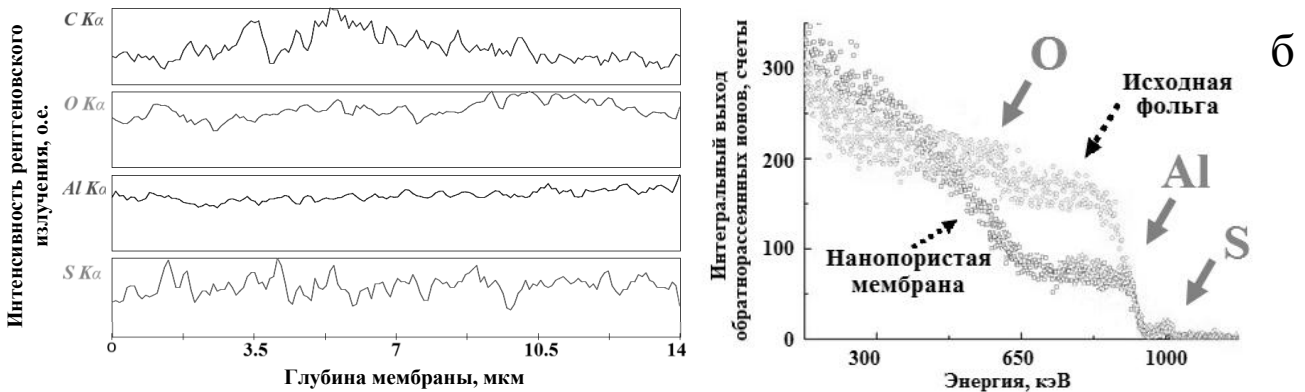


Рисунок 5 – Распределение элементов по толщине мембраны, полученное с помощью РСМА (а) и энергетический спектр обратнорассеянных ионов He^+ , полученный с помощью РОР (б)

Для характеристики геометрических параметров пор были разработаны две методики.

Первая основана на специально реализованной программе по обработке цифровых изображений (АСМ и РЭМ) исследуемых мембран, реализованной на графическом языке программирования. Данная программа позволяет вычислять поверхностную концентрацию пор и их распределение по размерам. Результаты исследований показали, что разброс значений по диаметру пор может составлять не более 15%.

Вторая методика основана на анализе оптических спектров пропускания в широком диапазоне (от 200 нм до 15 мкм) длин волн (рисунок 6). В спектре пропускания выделены зоны, позволяющие осуществлять экспресс-характеризацию мембраны: оценить средний размер пор и распределение по размерам (участок 1), толщину мембраны (участок 4), наличие остаточных продуктов (участки 2 и 5), а идентифицировать материал мембраны как оксид алюминия (участок 3).

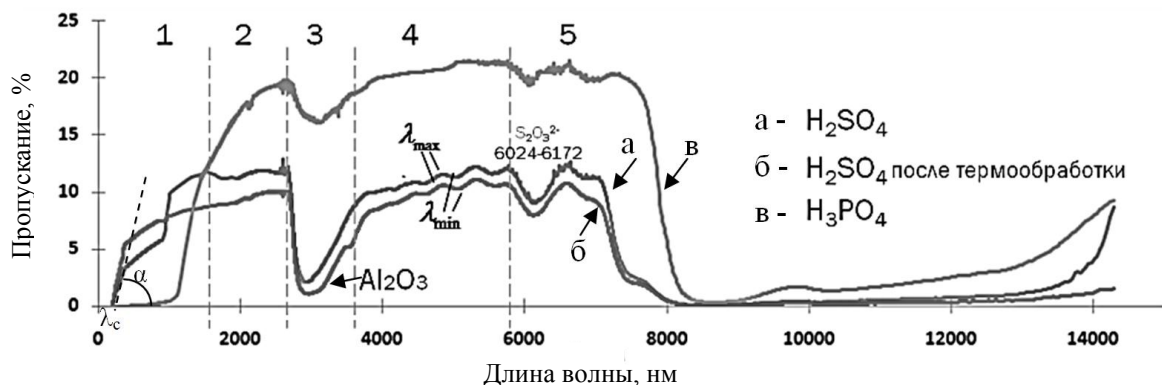


Рисунок 6 – Спектр пропускания оптического излучения для мембран на основе анодного оксида алюминия в широком диапазоне длин волн (1–5 в тексте)

В четвертой главе рассмотрены возможности применения нанопористых мембран с системой одноосноориентированных капилляров в микро- и нанотехнике в

качестве ростовых платформ для лаборатории на чипе, наноразмерных масок для каналирования ионных пучков, поглощающих покрытий среднего ИК-диапазона.

1. Ростовые платформы как базисный элемент для лаборатории на чипе разрабатывались с целью повышения эффективности микробиологического анализа. В НОЦ ЦМИД СПбГЭТУ «ЛЭТИ» совместно с НИИ эпидемиологии и микробиологии имени Пастера выполнена разработка ростового модуля для колоний бактерий. Данный ростовой модуль – ростовая платформа представляет собой композиционную микро-наноструктуру, содержащую мембрану с системой микропор (диаметр микропор определяется размерами колоний бактерий $\approx 5\text{--}20\ \mu\text{м}$), причем каждая микропора содержит нанопористые капилляры для подачи через них питательной среды (рисунок 7).

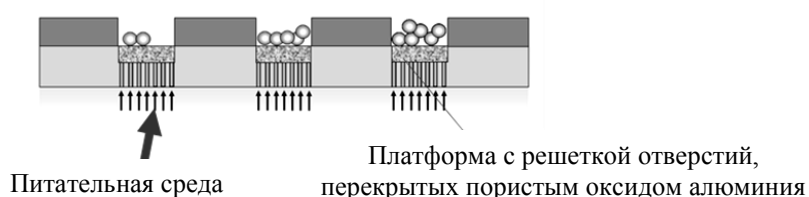


Рисунок 7 – Схематическое представление ростовой платформы

В основу процесса создания такой платформы была положена технология, сочетающая искусственное формирование топологического рисунка микропор с помощью фотолитографии (глава 2) и последующее электрохимическое анодирование алюминиевой фольги. В результате имело место самоформирование нанопор, образующих сквозные нанокапилляры (рисунок 8).

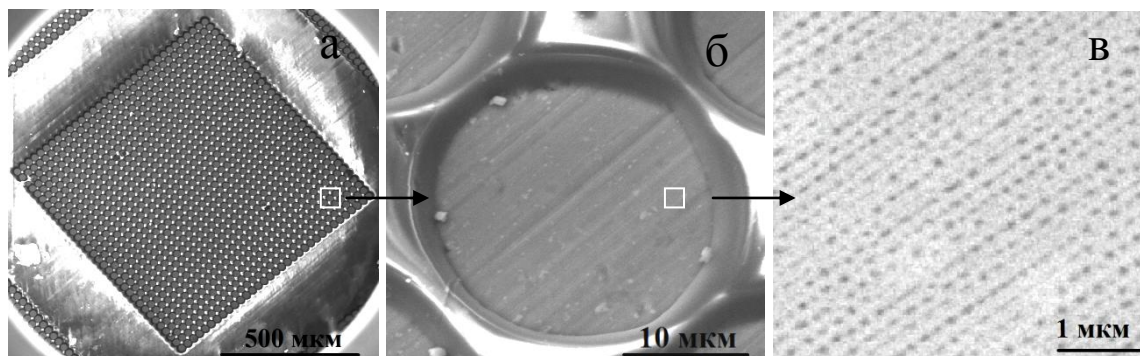


Рисунок 8 – РЭМ изображения мембраны оксида алюминия после фотолитографии и электрохимического анодирования: а) мембрана с фотолитографическим рисунком микропор, б) фрагмент микропоры с нанокапиллярами, в) нанокапилляры

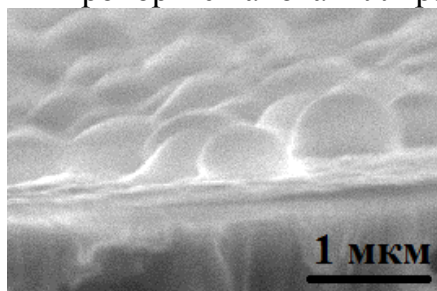


Рисунок 9 – Фотография колоний бактерий стафилококка (*s. aureus*) в зоне микропоры

Медико-биологические исследования созданных ростовых платформ (рисунок 9), которые выполняли функцию субстрата для осуществления подачи питательной среды, подтвердили эффективность их использования при проведении экспресс-анализа колоний патогенных бактерий, резко сокращая временной интервал для роста и, как следствие, продолжительность диагностической процедуры.

2. Свободные маски в виде мембран со сквозными нанокapиллярами формировались и исследовались с целью их применения в качестве наноразмерных шаблонов для высокоэнергетических ионных пучков. Изготовленные нанопористые мембраны исследовались совместно с кафедрой физики НИИЯФ МГУ на эффект прохождения ионного пучка гелия с энергией 1,5–2 МэВ. На рисунке 10 представлен спектр резерфордского обратного рассеяния для маски – шаблона с диаметром пор ≈ 20 нм. В качестве «регистрающей» среды – мишени за мембраной располагался образец, содержащий более «тяжелый» элемент, в частности, гафний (*Hf*). Даже незначительное отклонение мембраны от нормали (1,5...3 градуса) по отношению к направлению распространения ионного пучка приводит к уменьшению выхода обратнорассеянных ионов с HfO_2 мишени и, следовательно, к уменьшению фиксируемого тока. Таким образом, созданные и исследованные мембраны – шаблоны обеспечивают выполнение функций каналирования высокоэнергетического потока ионов.

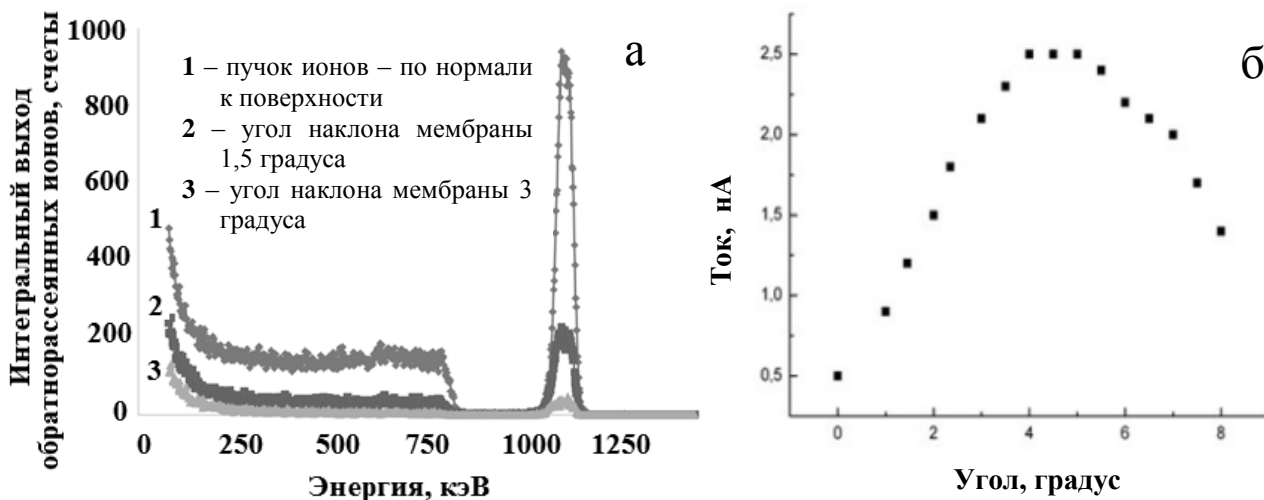


Рисунок 10 – Энергетический спектр обратнорассеянных ионов He^+ с энергией 1.7 МэВ для угла рассеяния 120° (а), зависимость числа пролетевших ионов He^+ от угла наклона образца (б)

Установлено, что коэффициент прохождения ускоренных ионов через мембрану, может превышать 60%. Это позволяет реализовать пространственную локализацию ионного воздействия на подложку с наноразмерным разрешением.

3. Как было ранее экспериментально показано (рисунок 6), нанопористые мембраны на основе оксида алюминия существенно ослабляют пропускание ИК-

излучения в диапазоне от 8 до 14 мкм. В вышеуказанных пределах находится максимум теплового излучения биообъектов. Данные, полученные с помощью ИК-Фурье спектроскопии, полностью подтверждаются исследованиями, проведенными с помощью тепловизора (*SDS INFRARED hotfind LXT*). На рисунке 11 представлены результаты тепловизионных исследований и

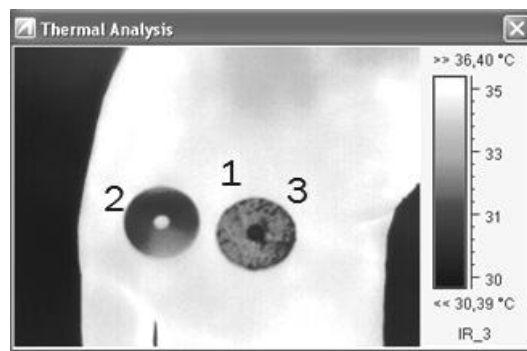


Рисунок 11 – Тепловизионные исследования: 1 – поверхность биообъекта, 2 – фторопластовый держатель мембраны, 3 – мембрана на держателе

показано, что мембрана толщиной в 15 мкм, расположенная на фторопластовом кольцевом держателе толщиной 5 мм, обеспечивает эффективное экранирование теплового излучения тела человека, при этом регистрируемое изменение разницы температур от биообъекта при наличии и отсутствии мембраны составляет не менее 4–5 градусов.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена технология самоформирования пористых мембран с системой упорядоченных одноосноориентированных наноразмерных (диаметр пор от 20 нм и более) капилляров на основе оксида алюминия с аспектным отношением до 500 электрохимическим анодированием алюминиевой фольги толщиной в десятки микрон.

2. Установлено, что важнейшим элементом технологического процесса формирования системы упорядоченных сквозных капиллярных мембран нанопористого оксида алюминия электрохимическим анодированием алюминиевой фольги является искусственное создание на поверхности фольги топологического рельефа механическим фасетированием поверхности, при этом доминирующим технологическим фактором, определяющим диаметр нанопор оксида алюминия, является состав электролита.

3. Установлено, что оптическая спектроскопия нанопористых мембран в широком диапазоне длин волн (от 200 нм до 15 мкм) обеспечивает их экспресс-характеризацию по базовым геометрическим параметрам, включая толщину мембраны, средний размер пор и распределение их по размерам.

4. Показано, что нанопористые мембраны на основе оксида алюминия, содержащие систему наноразмерных одноосноориентированных капилляров, обеспечивают выполнение функций каналирования высокоэнергетического потока ионов гелия с энергией 1,5–2 МэВ.

5. Показано, что нанопористые капиллярные матрицы на основе оксида алюминия могут выполнять функции ростовых платформ для экспресс-анализа колоний патогенных бактерий.

6. Установлено, что нанопористые мембраны на основе оксида алюминия существенно ослабляют пропускание ИК-излучения в диапазоне от 8 до 14 мкм, что соответствует спектральной области ИК-излучения биологических объектов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах из списка ВАК:

1. Мошников В.А, Соколова (Муратова) Е.Н., Спивак Ю.М. Формирование и анализ структур на основе пористого оксида алюминия / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. вып. 2. С. 13–19.
2. Афанасьев А.В., Ильин В.А., Мошников В.А., Соколова (Муратова) Е.Н., Спивак Ю.М. Синтез нано- и микропористых структур электрохимическими методами / Биотехносфера. № 1–2(13–14). 2011г. С. 20–26.
3. Зимина Т.М., Муратова Е.Н., Спивак Ю.М., Дрозд В.Е., Романов А.А. Технологии формирования и применение нанослоев и нанопористых композиций Al_2O_3 для микро- и нанотехники / Нано- и микросистемная техника. 2012. № 12. С. 15–24.
4. Муратова Е.Н., Шпаковский А.И. Компьютерное моделирование роста перколяционного кластера на пористой поверхности / Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. вып. 5. С. 28–35.
5. Муратова Е.Н., Спивак Ю.М., Мошников В.А., Петров Д.В., Шемухин А.А., Шиманова В.В. Влияние технологических параметров получения слоев нанопористого Al_2O_3 на их структурные характеристики / Физика и химия стекла. 2013. Т. 39. С. 473–480.
6. Зимина Т.М., Соловьев А.В., Лучинин В.В., Муратова Е.Н., Краева Л.А., Хамдулаева Г.Н. Принципы создания гибридных миниатюрных приборов для выращивания колоний микробных клеток на основе пористого анодного оксида алюминия / Нано- и микросистемная техника. 2013. № 12. С. 19–33.
7. Лучинин В.В., Муратова Е.Н., Шемухин А.А. Матрицы из пористого оксида алюминия как капиллярные матрицы – шаблоны для локализации воздействия ионов высоких энергий / Нано- и микросистемная техника. 2013. № 12. С. 39–41.

8. Шемухин А.А., Муратова Е.Н. Исследование прохождения пучков 1.7 MeV He^+ через мембраны пористого оксида алюминия / Письма в журнал технической физики. 2014. том 40. вып. 5. С. 67–74.

В других изданиях:

9. Спивак Ю.М., Соколова (Муратова) Е.Н., Петенко О.С., Травкин П.Г. Определение параметров пористой структуры в *por-Si* и *por-Al₂O₃* путем компьютерной обработки данных растровой и атомно-силовой микроскопии / Молодой ученый. 2012. № 5. С. 1–4.

10. Муратова Е.Н. Формирование пористых слоев на основе оксида алюминия для целей микробиологии / Молодой ученый. 2012. № 10. С. 14-17.

11. Muratova E.N., Matyushkin L.B. Investigation of the optical properties of nanoporous membranes based on Alumina / Smart Nanocomposites. 2014. V.4. № 2. P. 25–31.

Патенты:

12. *Патент на полезную модель*: «Электрохимическая ячейка для получения пористых анодных оксидов металлов и полупроводников». Заявитель СПбГЭТУ. Авторы: Травкин П.Г., Соколова (Муратова) Е.Н., Спивак Ю.М., Мошников В.А. № 2012122692 (01.06.2012).

13. *Патент на изобретение*: «Способ выращивания колоний микробных клеток и устройство для его реализации». Заявитель СПбГЭТУ. Авторы: Зимина Т.М., Соловьев А.В., Лучинин В.В., Кареева Л.А., Ценева Г.Я., Соколова (Муратова) Е.Н., Мухуров Н.И. № 2522005 (10.07.2014).

Соавторство в учебных пособиях:

14. Химические методы получения керамических и полимерных наноматериалов из жидкой фазы: Учеб.пособие / Под общ. ред. В.В. Лучинина и О.А. Шиловой / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб. 2013. 218 с.

15. Диагностика материалов методами сканирующей зондовой микроскопии: Учеб. пособие / Под ред. Проф. В.А. Мошникова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. 172 с.