

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

На правах рукописи
УДК 621.382.0149.77; 621.357.6

АНДРУХОВИЧ
Ирина Михайловна

**СОЗДАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ МИКРОСТРУКТУР В МАТРИЦАХ ИЗ
АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ СЕНСОРОВ ПОТОКОВ
ПЛАЗМЫ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Минск 2019

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» и государственном научно-производственном объединении «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Научный руководитель: **Гасенкова Ирина Владимировна**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории микро- и наносенсорики государственного научно-производственного объединения «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Официальные оппоненты: **Смирнов Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры микро и наноэлектроники Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Жарин Анатолий Лаврентьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация: **Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»**

Защита состоится 14 марта 2019 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.03 при Институте физики НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 68-2, к. 218.
e-mail: v.kalinov@ifanbel.bas-net.by
телефон ученого секретаря: +375 (17) 294–91–97

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики НАН Беларуси.
Автореферат разослан « 8 » февраля 2019 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
доктор физико-математических наук

В.С. Калинов

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг параметров межпланетной среды и солнечного ветра является одним из важнейших составляющих в сложной и актуальной как для науки, так и для практики, проблеме изучения геофизической обстановки в околоземном космическом пространстве и прогнозирования космической погоды. Исследования электромагнитных полей и параметров плазмы в космическом и околоземном пространствах, а также механизмов, влияющих на их формирование, представляют несомненный научный и практический интерес.

В настоящее время определение параметров солнечного ветра с высоким временным разрешением осуществляется обычно на основе интегральных или модуляционных цилиндров Фарадея. Необходимо контролировать основные параметры плазмы солнечного ветра и магнитослоя Земли с временным разрешением не хуже 1,5–3,0 с по переносной скорости, ионной температуре и концентрации, и разрешением в 0,03 с по величине и направлению вектора потока ионов солнечного ветра. Достижение таких параметров во многом определяется конструктивно-технологическими особенностями применяемых в цилиндрах Фарадея селективирующих элементов в виде металлических сеток. Характеристики известных приборов уже не удовлетворяют потребностям измерения параметров плазмы в окрестности Земли и в межпланетном пространстве. Разработанные ранее датчики потоков плазмы содержали селективирующие элементы, изготовленные вручную из тонкой проволоки, микросваркой каждой ячейки и контурных колец. Прозрачность (пропускание частиц) таких сеток составляла не более 80 %, точность выполнения витков была $\approx 0,1$ мм. Прецизионность таких элементов и стоимость их изготовления не соответствуют современному уровню технологий и не отвечают возросшим требованиям к датчикам потоков плазмы. А ведь от точности изготовления и параметров селективирующих элементов зависит точность измерений и функциональные возможности таких датчиков. Селективирующие элементы должны изготавливаться из химически чистых компонентов для того, чтобы формировать однородное электрическое поле, и при этом обладать высокой оптической прозрачностью, стойкостью к внешним тепловым и механическим воздействиям, большим сроком службы и надежностью.

В связи с вышеотмеченным, разработка прецизионных микроструктур селективирующих элементов для сенсоров потоков плазмы (на основе цилиндров Фарадея) в виде интегрированных с кольцами-держателями прецизионных металлических сеток с высокими прозрачностью, плоскостностью и другими улучшенными конструктивными и технологическими параметрами, неизменными в условиях применения в космических аппаратах при соответствующих механических и термоциклических нагрузках является актуальной и практически важной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь с крупными научными программами и темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом директора государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (Институт физики НАН Беларуси) № 162-к от 22.12.2012 г. Работа выполнялась в Институте физики НАН Беларуси до 2015 г. и в ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» с 2016 г. в рамках заданий: ГПНИ «Электроника и фотоника 1.1.07» – «Разработка конструктивно-технологических принципов создания ёмкостных и резистивных микродатчиков на основе объемных чипов с чувствительными элементами из анодного оксида алюминия и интегральных микросхем преобразователей ёмкость-напряжение и электросопротивление-напряжение» (2011–2013 гг., № ГР 20114142), ГПНИ «Электроника и фотоника 1.1.20» – «Разработка физико-технических принципов создания и контроля качества электромеханических микроструктур и микросенсорных устройств на основе пористого анодного оксида алюминия для высокоэффективных датчиков состояния окружающей среды и преобразователей инфракрасного лазерного излучения» (2014–2015 гг., № ГР 20141282), ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника 1.2.09» – «Разработка физико-технических принципов модифицирования конструкций и технологических процессов для создания новых оптических структур на основе анодного оксида алюминия и его композитов, и исследование их свойств» (2016–2020 гг., № ГР 20160237), Научно-технической программы Союзного Государства «Мониторинг – СГ» задание 2.3 (договор № 89 от 02.12.2013 г., № 2-16 от 12.01.2016 г.) «Разработать, изготовить и исследовать экспериментальные образцы чувствительных элементов из наноструктурированных материалов для нового поколения датчиков потока космической плазмы» (2013–2017 гг., № ГР 20140313), Научно-технической программы Союзного Государства «Технология – СГ» задание 1.2.2.1 (договор № 20-16 от 03.10.2016 г.) «Разработать технологию модифицирования алюминиевых подложек путем выращивания композитного материала на основе пористого анодного оксида алюминия с наноалмазами, редкоземельными элементами» (2016–2020 гг., № ГР 20164353), контракты на составные части опытно-конструкторских работ (СЧ ОКР) с Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт космических исследований Российской академии наук: (договор № 11-16 от 24.06.2016 г.) «Разработка и изготовление селективирующих элементов для датчиков потока космической плазмы прибора БМСВ-ЛГ», шифр: СЧ ОКР «БМСВ-ЛГ-М» (2016 г., № ГР 20163421); (договор № 51-18 от 08.06.2018 г.) «Разработка и изготовление селективирующих элементов для датчиков потока космической плазмы прибора БМСВ-С», шифр СЧ ОКР «Странник-БМСВ-С-СЭ» (2018 г., № ГР 20181446).

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы являлось установление закономерностей формирования микрорельефных металлических слоев в диэлектрических матрицах из пористого анодного оксида алюминия с последующим его

удалением, разработка метода изготовления прецизионных микроструктур селективирующих элементов в виде прецизионных сеток, интегрированных с элементами крепления к корпусу, для создания нового поколения приборов диагностики космической плазмы и исследование их параметров в условиях, приближенных к реальным космическим.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние условий формирования анодного оксида алюминия, обосновать выбор подложек с малым разбросом по диаметрам пор и их периодичности для создания матриц-шаблонов с прецизионной ($\pm 0,1$ мкм) точностью выполнения элементов в матрице.

2. Установить закономерности электрохимического формирования металлических никелевых структур в диэлектрических шаблонах-матрицах из пористого анодного оксида алюминия.

3. Разработать способ получения в едином технологическом цикле и технологический маршрут изготовления прецизионных селективирующих элементов с микронными сечениями с интегрированными периферийными элементами крепления – держателями миллиметровых размеров.

4. Изготовить экспериментальные образцы селективирующих элементов, провести их испытания при внешних механических и термоциклических воздействиях, приближенных к реальным космическим.

5. Изготовить экспериментальные образцы нового поколения датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея с разработанными селективирующими элементами нескольких типоразмеров, и продемонстрировать их работоспособность для регистрации параметров ионов плазмы.

Научная новизна

Выполненные в работе исследования позволили получить совокупность новых знаний:

– экспериментально установлены закономерности размерного осаждения никеля в условиях синтеза в диэлектрических шаблонах-матрицах из пористого анодного оксида алюминия, проявляющиеся в уменьшении скорости осаждения и неоднородности толщины осаждаемых металлических слоев в различной ширины элементах матрицы, позволяющие выявить взаимосвязь между геометрическими параметрами матрицы и осаждаемых слоев и целенаправленно управлять однородностью по толщине путем изменения соотношения геометрических размеров шаблона и электрических параметров процесса осаждения;

– экспериментально установлен эффект равномерности осаждаемых слоев никеля при толщинах диэлектрической шаблона-матрицы в 2,5 раза превышающих толщину осаждаемых металлических слоев;

– впервые продемонстрирована возможность формирования оксида алюминия в комбинированном режиме анодирования с минимальным разбросом размеров и повышенными (до 80 нм) значениями диаметров пор при сопоставимых значениях межпорового расстояния и минимальной толщиной оксида с нерегулярной структурой, сформированной на стадии роста величины электрического тока;

– разработан технологический маршрут формирования прецизионных микроструктур селективирующих элементов для сенсоров потока плазмы, включающий формирование анодного оксида алюминия на подготовленной поверхности алюминия, изготовление шаблона-матрицы методом фотолитографии, последующие локальное травление оксида алюминия и размерное электрохимическое осаждение никеля, удаление диэлектрической шаблона-матрицы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Формирование анодного оксида алюминия с упорядоченно расположенными порами при анодировании алюминия обеспечивается в электролите на основе 0,3М щавелевой кислоты $(\text{COOH})_2$ в гальваностатическом и комбинированных режимах при плотностях электрического тока (70–80 mA/cm^2) и значениях электрического напряжения 140–150 В с морфологическими параметрами, отличными от параметров, полученных в других режимах формирования, характеризующимися повышенными значениями размера пор до 80 нм и минимальной толщиной оксида с нерегулярной структурой, сформированной на стадии роста величины электрического тока.

2. Установленные закономерности электрохимического формирования металлических слоев в условиях геометрических ограничений микронных и миллиметровых размеров элементов шаблона-матрицы из пористого анодного оксида алюминия и оптимальное соотношение между толщинами осаждаемых слоев и шаблона-матрицы, равное 1,0:2,5, обеспечивающее равномерность осаждаемого слоя никеля из сульфатного электролита в интервале скоростей 9,6–10,2 $\text{mkm}/\text{ч}$, что позволило создать селективирующие элементы с интегрированными периферийными элементами крепления.

3. Прецизионные микроструктуры селективирующих элементов, созданные электрохимическим осаждением никелевых слоев в сформированные на алюминии с использованием фотолитографии диэлектрические шаблоны-матрицы из пористого анодного оксида алюминия, имеют прозрачность свыше 90% и увеличенную плоскостность рабочей поверхности (не плоскостность – не более 0,02 % от диаметра сетки в собранном датчике), устойчивы к воздействиям: вибрационным и ударным в диапазоне ускорений до 10 g, частотой в диапазоне 20–2000 Гц и многократным термоциклическим в диапазоне температур от -50 до +200 °С.

4. Технологический маршрут изготовления прецизионных микроструктур селективирующих элементов, включающий формирование основного и дополнительного слоев анодного оксида на алюминии электрохимическим окислением последнего, формирование шаблона-матрицы толщиной, превышающей в два с половиной раза толщину осаждаемого металлического слоя, и последующие осаждение никеля из сульфатного электролита при температуре 25 ± 1 °С с плотностью электрического тока $10,0 \pm 0,5$ mA/cm^2 и удаление диэлектрической шаблона-матрицы.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании и экспериментальном подтверждении выбора нанопористых подложек из анодного оксида алюминия, разработке технологического маршрута формирования прецизионных сеточных микроструктур, создании экспериментальных образцов селективирующих элементов для сенсоров потоков космической плазмы, работоспособных в условиях эксплуатации космических аппаратов.

Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с научным руководителем, доктором физико-математических наук, доцентом И.В. Гасенковой. Испытания селективирующих элементов и датчиков потоков плазмы на их основе, обсуждение полученных результатов проводились в Институте космических исследований Российской академии наук и Специальном конструкторском бюро космического приборостроения Института космических исследований РАН совместно с д.т.н. Мухуровым Н.И., д.ф.-м.н. Застенкером Г.Н., к.ф.-м.н. Бородковой Н.Л. и вед. инженером Каримовым Б.Т.

Апробация результатов диссертации

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на: Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики», 13-15 июня 2012 г., Минск, Беларусь, XIV International Conference «Physics and technology of thin films and nanosystems», 20-25 may 2013 г., Ivano-Frankivsk, Ukraine, XVIII Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, 3-7 июня 2013 г., Черногоровка, Россия, Российской конференции (с международным участием) «Высокотемпературная химия оксидных наносистем», 7-9 октября 2013 г., Санкт-Петербург, Россия, Международной научно-практической конференции «Молодежь в науке – 2013», 19-22 ноября 2013 г., Минск, Беларусь, Международной конференции «Физика диэлектриков», 2-6 июня 2014 г., Санкт-Петербург, Россия, XXV Российской конференции по электронной микроскопии, 2-6 июня 2014 г., Черногоровка, Россия, VI Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики», 11-13 июня 2014 г., Минск, Беларусь, IV Международной конференции «Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь-Россия-Украина», 7-10 октября 2014 г., Минск, Беларусь, 9-м Международном симпозиуме «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка», 8-10 апреля 2015 г., Минск, Беларусь, XII конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», 13-15 апреля 2015 г., Москва, Россия, IV Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», 15 апреля 2015 г., Гомель, Беларусь, XIX Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, 1-4 июня 2015 г.,

Черноголовка, Россия, 12-й Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», 25-27 мая 2016 г., Минск, Беларусь, XXVI Российской конференции по электронной микроскопии, 30 мая - 3 июня 2016 г., Москва Зеленоград, Россия, Шестой Всероссийской конференции по наноматериалам, 22-25 ноября 2016 г., Москва, Россия, МНТК «Фундаментальные и прикладные космические исследования» ИКИ РАН, 12-14 апреля 2017 г., Москва, Россия, 10-м Международном симпозиуме «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка», 5-7 апреля 2017 г., Минск, Беларусь, XIV Международной конференции Физика диэлектриков (Диэлектрики-2017), Санкт-Петербург, Россия, 29 мая - 2 июня 2017 г., Седьмом Белорусском космическом конгрессе, 24-26 октября 2017 г., Минск, Беларусь, 2-м Международном форуме «Техноюнити – Электронно-лучевые технологии для микроэлектроники», 9-12 октября 2017 г., Москва, Зеленоград, Россия, Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные космические исследования» ИКИ РАН, 11-13 апреля 2018 г, Москва, Россия, Международном молодежном научном форуме «ЛОМОНОСОВ-2018» МГУ, 9-13 апреля 2018 г., Москва, Россия, XXVII Российской конференции «Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нанобиоматериалов по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел», 28-30 августа 2018 г., Черноголовка, Россия.

Опубликованность результатов диссертации

Материалы по теме диссертации опубликованы в 8 научных статьях в рецензируемых научных журналах в соавторстве (3,5 авторских листа), соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Опубликовано 13 статей в сборниках материалов конференций, 12 тезисов докладов в сборниках тезисов докладов конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка, списка публикаций соискателя и приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 183 страницы, в том числе 93 рисунка на 47 страницах, 15 таблиц на 11 страницах, библиографический список из 180 источников, включая 33 собственных публикации автора на 17 страницах, 3 приложения на 4 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость проведения исследований, связанных с созданием прецизионных микроструктур селективирующих элементов в матрицах из анодного оксида алюминия для сенсоров потока плазмы.

В **первой главе** приведен анализ разработок в области создания датчиков потоков плазмы. Рассмотрены методы формирования металлических микроструктур для селективирующих элементов датчиков, определены основные особенности размерного осаждения металлов. Определены направления развития технологии формирования анодного оксида алюминия как матрицы для прецизионного осаждения металлов. На основании литературного обзора обоснована необходимость разработки технологии получения селективирующих элементов с использованием матрицы из анодного оксида алюминия.

Во **второй главе** описаны особенности формирования анодного оксида алюминия на алюминиевых подложках. Приведен вариант подготовки алюминия перед операцией получения оксида. Описаны основные методы исследований, использованных в работе, для оценки основных свойств алюминия, анодного оксида алюминия и слоев металла. Разработаны методики контроля устойчивости селективирующих элементов к типичным механическим и термоциклическим воздействиям, характерным для программы космического полета.

В **третьей главе** приведена полученная оценка двух методов формирования алюмооксидных шаблонов-матриц. По первому методу фоторезистивная маска заданного рисунка была создана на алюминиевой подложке, и было произведено анодирование открытых участков. По второму методу фоторезистивная маска была создана на уже выращенном анодном оксиде алюминия, сквозным травлением до алюминия была сформирована алюмооксидная матрица. Матрица, полученная методом травления, обеспечивает воспроизведение топологического рисунка с необходимой точностью. Клин травления составляет $(0,01-0,03) d$, где d – толщина оксида. Неровность края обусловлена морфологическими особенностями анодного оксида (рисунок 1).

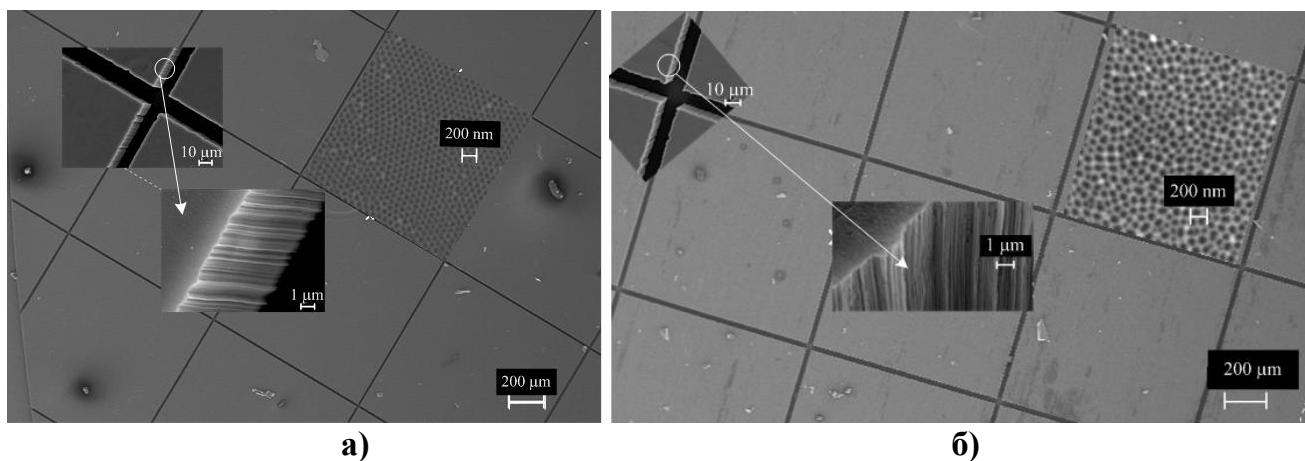
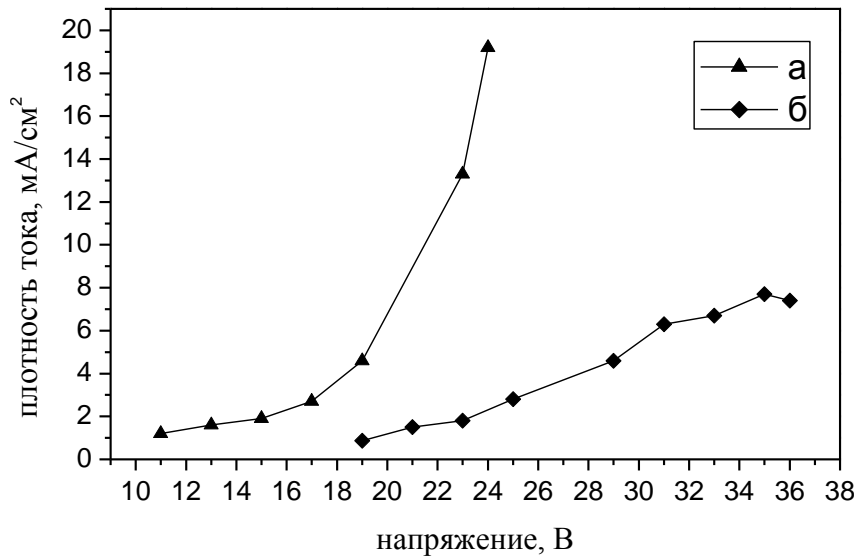


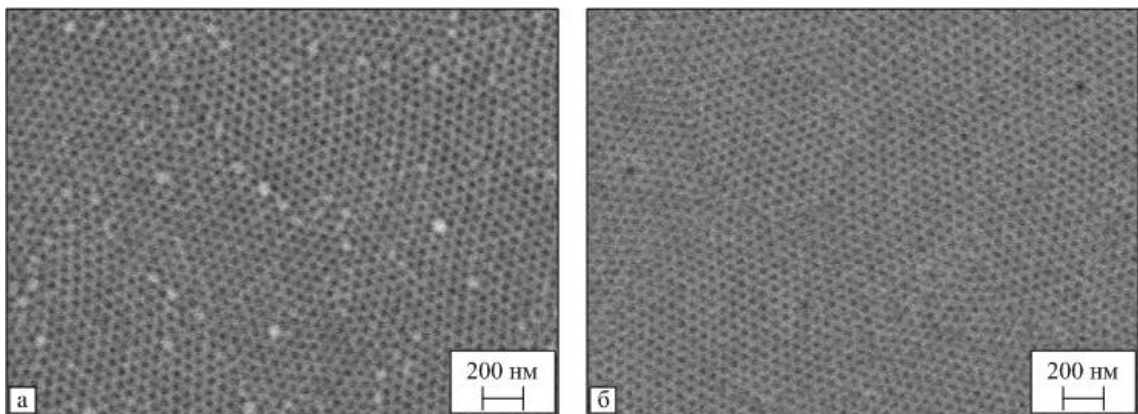
Рисунок 1. – РЭМ-изображение матрицы из упорядоченного (а) и неупорядоченного (б) анодного оксида алюминия

Использование упорядоченного анодного оксида алюминия позволяет улучшить воспроизведение рисунка за счет одинакового размера пор. Показано, что применение электролита на основе серной кислоты с этиленгликолем позволяет увеличить напряжение анодирования от 24 В до 36 В (рисунок 2) и получать оксид с большим межпоровым расстоянием (рисунок 3). Установлены условия анодирования, при которых упорядоченный анодный оксид алюминия характеризуется минимальным размером пор 13 нм. Пористость полученного оксида варьируется от 6,9% до 17,7%. Уменьшение размера пор позволяет обеспечить прецизионность топологии элементов за счет ровности края.



а) без этиленгликоля; б) с добавкой этиленгликоля

Рисунок 2. – Зависимость плотности тока от напряжения при анодировании в электролите с серной кислотой



а) – со стороны электролита; б) – со стороны барьерного слоя

Рисунок 3. – РЭМ-изображение поверхности анодного оксида алюминия, полученного в электролите 1М H₂SO₄ с этиленгликолем при напряжении анодирования 25 В

Проведено сравнение методов отжига алюминия перед операцией анодирования. Предложен вместо высокотемпературного отжига альтернативный метод подготовки алюминия перед анодированием, который позволяет получать

анодный оксид алюминия с областями упорядочения большего размера, что улучшает качество получаемых шаблонов-матриц.

Получены упорядоченные анодные оксиды алюминия с использованием комбинированного и гальваностатического режимов в электролите на основе щавелевой кислоты при высоких значениях плотностей тока ($70-80 \text{ мА/см}^2$) и электрического напряжения (140-150 В). Гальваностатический режим позволяет уменьшить время роста при динамических условиях, способствующих росту оксида с изменяющимися параметрами (величина ячейки, поры, упорядочение пор). Увеличение значений электрического тока приходится на стадию формирования пор, а не стационарного роста. Экспериментально было установлено, что наиболее упорядоченный оксид алюминия формируется при плотности тока 70 мА/см^2 (рисунок 4).

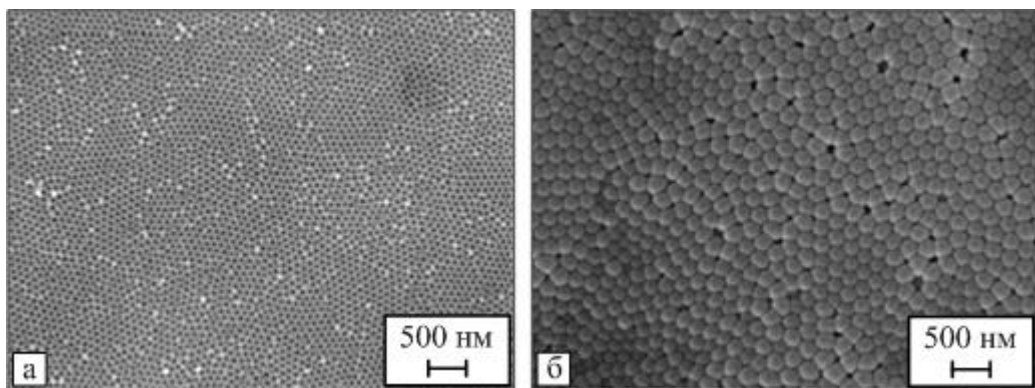
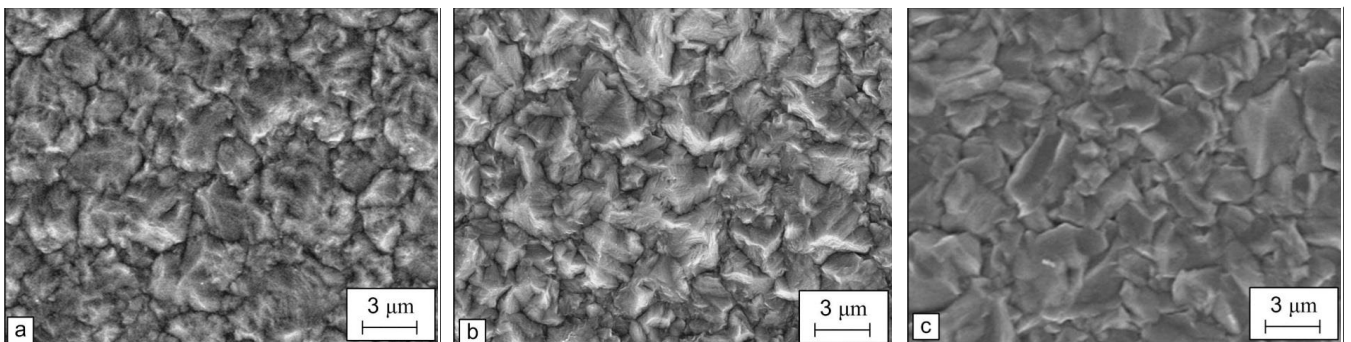


Рисунок 4. - Морфология поверхности анодного оксида алюминия, полученного в гальваностатическом режиме, со стороны а) барьерного, б) пористого слоя

В четвертой главе приведено сравнение трех электролитов никелирования для получения селективирующих элементов для сенсоров потока космической плазмы. Приведены установленные оптимальные режимы осаждения для получения никелевых элементов из сульфатного, сульфаматного и электролита с сульфаминовой кислотой. На рисунке 5 представлены РЭМ изображения слоев осажденного никеля, полученного из различных электролитов.



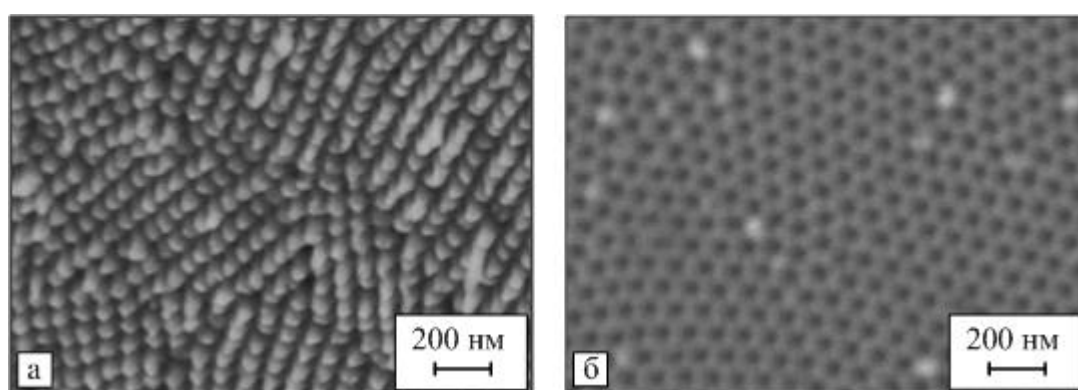
а) сульфатный, б) сульфаматный, в) с сульфаминовой кислотой

Рисунок 5. – Морфология поверхности никеля, осажденного из различных электролитов

Изучен процесс электрохимического формирования металлических слоев в матрицах-шаблонах из анодного оксида алюминия. Были сформированы модельные

структуры матрицы и проведен ряд экспериментов, при осаждении никеля в шаблон-матрицу было установлено отклонение значений скоростей осаждения от скоростей согласно закону Фарадея. Экспериментально установлено, что равномерность по толщине осажденного слоя никеля достигается в сульфатном электролите в интервале скоростей 9,6-10,2 мкм/ч при соотношении высоты матрицы к высоте слоя осаждаемого металла составляющим 2,5:1,0.

Разработан режим осаждения никеля на алюминий через слой анодного оксида. Анодный оксид сформирован в щавелевокислом электролите в гальваностатическом режиме и утонен ступенчатым снижением плотности тока. Определено, что утонение необходимо проводить до толщины барьерного слоя 10 нм. Применение разработанного режима утонения позволяет получать пленки никеля с наноструктурированным рельефом поверхности (рисунок 6).



а) пористый анодный оксид алюминия; б) наноструктурированная поверхность пленки никеля

Рисунок 6. – РЭМ-изображение морфологии поверхности

Разработан технологический маршрут получения сеточных микроструктур селективирующих элементов с крепежным кольцом-держателем для сенсоров космической плазмы с сечением элемента сетки $15 \times 15 \text{ мкм}^2$, расстоянием между элементами 1000 мкм при сохранении достаточной механической прочности с прозрачностью сеток более 90% (рисунок 7).

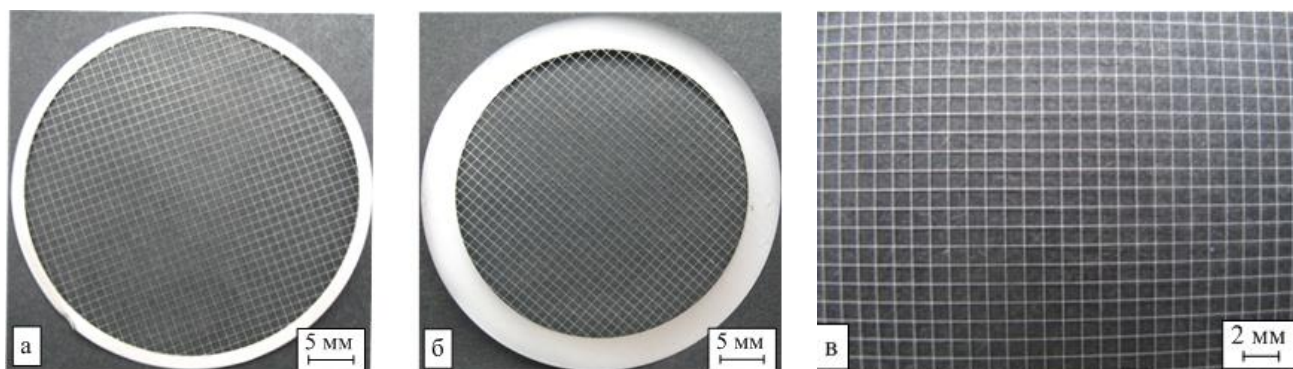
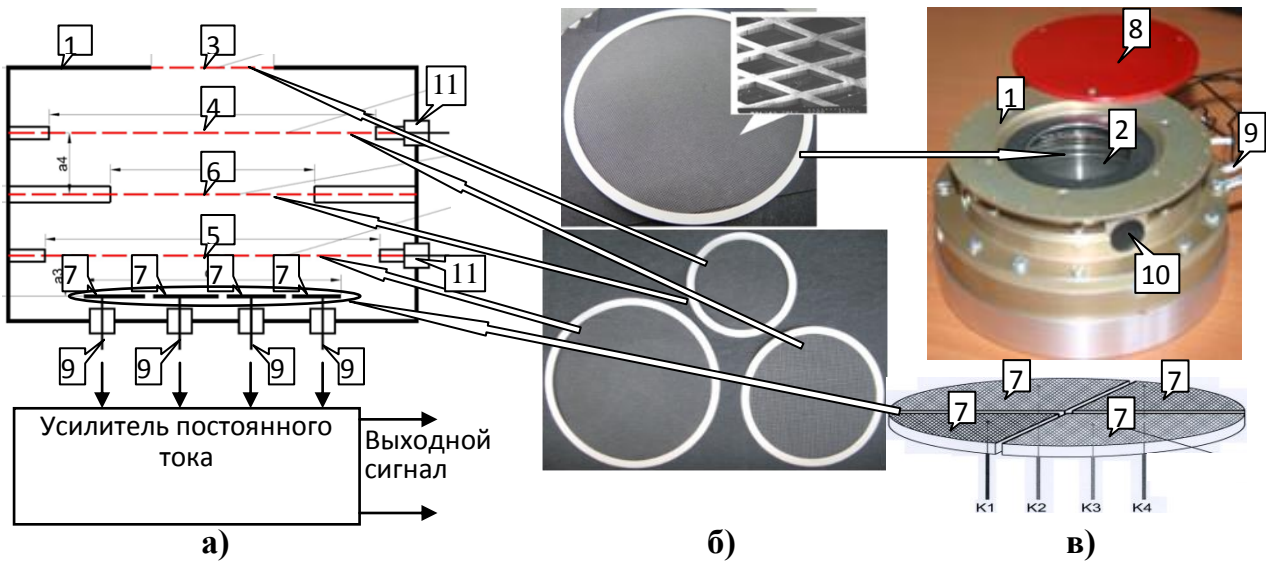


Рисунок 7. – Микрофотографии разработанных никелевых селективирующих элементов (а, б) и увеличенный фрагмент сеточной микроструктуры (в)

Маршрут включает подготовку поверхности алюминиевых пластин, операцию двухстороннего анодирования, процесс формирования алюмооксидной матрицы-шаблона методом фотолитографии, электрохимическое осаждение никеля, удаление шаблона-матрицы с приведенными конкретными режимами.

В пятой главе описан экспериментальный образец датчика потоков плазмы, отличительной особенностью которого является использование прецизионных селективирующих элементов в виде никелевых сеточных микроструктур с интегрированными с ними кольцами-держателями по периферии. Коллектор датчика выполнен в виде четырех секций, что позволяет существенно улучшить алгоритм быстрого определения параметров потока плазмы и минимизировать массу прибора, в который будет встраиваться датчик потока плазмы (рисунок 8).



1 – корпус; 2 – входное окно; 3 – внешняя диафрагма; 4 – управляющий элемент; 5 – супрессорный элемент; 6 – внутренняя диафрагма; 7 – четыре секции коллекторов; 8 – технологическая пылевлагозащитная крышка; 9 – контакты коллекторов в виде штырей; 10 – гнездо для подключения высокого напряжения; 11 – изоляторы

Рисунок 8. – Схематическое изображение конструкции экспериментального образца (а), фотографии селективирующих элементов (сеточных структур) (б) и фотография датчика потока ионов космической плазмы и 4-секционного коллектора (с)

Выполнено сравнение расчетных характеристик датчика с результатами экспериментальных исследований. Показано, что запирающие характеристики при нормальном и наклонном падении потока ионов на входное окно датчика хорошо совпадают с расчетными характеристиками, что подтверждает возможность надежного измерения переносной скорости потока и его температуры в изотропном приближении. Угловые характеристики четырех коллекторов датчика оказываются достаточно симметричными и наглядно демонстрируют возможность определения с помощью одного датчика направления вектора потока ионов. Фотоэлектрические характеристики четырех коллекторов достаточно идентичны. Фототоки при отрицательном напряжении на супрессорной сетке весьма малы, а подавление фототоков с коллектора при этом достигает не менее 50 раз.

Описаны программа и методика комплексных испытаний селективирующих элементов при механических и термоциклических воздействиях, характерных для электронной аппаратуры космических микроспутников. При проведении испытаний фиксировались такие показатели как целостность и провисание ячеек, степень кручения линейных составляющих, правильность формы контура ячеек, прозрачность сеточного полотна (свыше 90%), плоскостность селективирующих элементов (не плоскостность – не более 0,02 % от диаметра сетки в собранном датчике).

Результаты проведенных комплексных испытаний подтвердили устойчивость селективирующих элементов к воздействиям механических в виде вибрационных колебаний с амплитудой до 10g и частотой в диапазоне 20-2000 Гц и термоциклических в виде неоднократных нагрева и последующего охлаждения от -50 °С до +200 °С с выдержкой при граничных значениях температур до 30 мин. Отклонение от контролируемых значений наблюдалось у десятка ячеек при общем количестве ячеек в сеточном полотне более 1000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты

1. Разработан способ получения упорядоченного анодного оксида алюминия с использованием гальваностатического и комбинированного (гальваностатического с потенциостатическим) режимов анодирования в электролитах на основе щавелевой кислоты (0,3М (COOH)₂) и с добавкой фосфорной кислоты (0,3М (COOH)₂ + 0,5М Н₃РO₄). Морфологические параметры анодного оксида алюминия характеризуются значениями, недостижимыми в других режимах анодирования: при сопоставимом межпоровом расстоянии величина диаметра пор составляет 80 нм. Установлено, что увеличение вязкости электролита при введении органического растворителя обеспечивает понижение размера пор упорядоченного анодного оксида алюминия до 13 нм и обусловлено понижением плотности тока до 0,9 мА/см². Состав электролита обеспечивает повышение диапазона значений формирующих электрических напряжений с предельного значения 24 В для известных электролитов на основе серной кислоты до 36 В, что позволяет увеличить размер ячейки анодного оксида на 30 нм и также позволяет изменять значение пористости в диапазоне от 6,9% до 17,7%. Анодный оксид алюминия, сформированный в комбинированном электролите с содержанием органических кислот (0,35 % щавелевой и 1% лимонной кислот), обладает улучшенными диэлектрическими и механическими (525 кгс/мм²) свойствами [1, 2, 4, 9, 13, 14, 16-18, 24, 26, 27].

2. Исследовано влияние плотности тока и температуры электролита на морфологию поверхности никеля при электрохимическом осаждении. При использовании электролита никелирования с сульфаминовой кислотой повышение температуры электролита с 20 °С до 50 °С приводит к увеличению размера зерен никеля от 1,5 до 5,0 мкм при плотности тока 10 мА/см². Повышение плотности тока до 90 мА/см² приводит к укрупнению зерен до 19 мкм. При использовании сульфатного электролита при повышении плотности тока до 50 мА/см² размер зерен увеличивается до 5 мкм. Установлено неравномерное

заполнение электрохимическим никелем элементов матрицы с различным аспектным соотношением из сульфатного электролита. Заполнение электрохимическим никелем канавок с аспектным соотношением от 1 до 6 происходит медленнее, величина неоднородности определяется соотношением толщины шаблона-матрицы и осажденного слоя и составляет 10–15% при соотношении больше 0,5. Установлено, что оптимальным для получения однородных по толщине слоев никеля является соотношение толщин шаблона-матрицы и осаждаемого слоя никеля, равное 2,5. Используя полученные закономерности, определена толщина матрицы анодного оксида алюминия для получения никелевых селективирующих элементов толщиной 15 ± 1 мкм, которая составляет 40 ± 1 мкм [5, 11, 15, 21, 28, 31, 33].

3. Проведена сравнительная оценка вариантов технологических процессов получения шаблонов-матриц из пористого анодного оксида алюминия с использованием метода фотолитографии для формирования топологического рисунка. Определен оптимальный вариант получения шаблонов-матриц, обеспечивающий необходимые точности выполнения микрометровых размеров канавок, и формирования в них методом гальванопластики прецизионных селективирующих элементов в виде никелевых сеточных структур с интегрированным с ним периферийным крепежным кольцом миллиметровых размеров. Описаны особенности технологических режимов формирования анодного оксида алюминия и локального электрохимического осаждения никеля. Получены прецизионные микроструктуры селективирующих элементов для датчиков потока ионов плазмы с сечением элемента сетки 15×15 мкм², расстоянием между элементами 1000 мкм и крепежным кольцом с различными внешними диаметрами от 42 до 75 мм. Полученные селективирующие элементы по разработанной последовательности технологических операций, включающей двухстороннее анодирование алюминиевой пластины, формирование литографическими методами матриц, электрохимическое осаждение никеля из сульфатного электролита, характеризуются более высокой плоскостностью (неплоскостность – не более 0,02 % от диаметра сетки в собранном датчике), не уступают по механической прочности существующим, а по прозрачности (более 90%) превосходят известные [3, 5-8, 10, 12, 22, 23, 25].

4. Предложен технологический маршрут изготовления прецизионных микроструктур селективирующих элементов, который основан на использовании анодного оксида алюминия в качестве шаблона-матрицы для осаждения материала селективирующего элемента и интегрированного с ним держателя. Маршрут включает следующую последовательность операций: формирование фоторезистивной маски на поверхности упорядоченного анодного оксида алюминия, полученного электрохимическим окислением алюминия; травление незащищенных маской областей оксида для формирования матрицы требуемой точности с прямоугольным краем; электрохимическое осаждение никеля на алюминий в алюмооксидную матрицу; удаление матрицы. По сравнению с известными технологический маршрут характеризуется возможностью в едином технологическом цикле изготавливать прецизионные микроструктуры селективирующих элементов в виде прецизионных сеточных структур микронных

размеров с интегрированными с ними кольцевыми держателями миллиметровых размеров. Разработаны программа и методика комплексных испытаний селектирующих элементов при механических и термоциклических воздействиях, характерных для электронной аппаратуры космических микроспутников. Результаты проведенных комплексных испытаний подтвердили устойчивость селектирующих элементов к воздействиям механических в виде вибрационных колебаний с амплитудой до 10g и частотой в диапазоне 20–2000 Гц и термоциклических в виде неоднократных нагрева и последующего охлаждения от -50 °С до +200 °С с выдержкой при граничных значениях температур до 30 мин. Экспериментальные образцы датчиков позволяют проводить измерения переносной скорости потока и его температуры в изотропном приближении, что подтверждается совпадением экспериментально полученных запирающих характеристик при нормальном и наклонном падении потока ионов на входное окно датчика с расчетными характеристиками. Симметричные угловые характеристики показывают возможность определения направления вектора потока ионов с помощью одного датчика. Фототоки при отрицательном напряжении на супрессорной сетке весьма малы, а подавление фототоков с коллектора достигает не менее 50 раз. Расширение диапазона электрического напряжения, прикладываемого к управляющей сетке (до 4 кВ), позволяет оценивать энергетическое распределение ионов в потоке и регистрировать α -частицы солнечного ветра [5-8, 19, 20, 29, 30, 32].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Прецизионные сеточные микроструктуры могут применяться в качестве селектирующих элементов для нового поколения сенсоров потока плазмы. Предполагается, что с использованием новых разработанных датчиков можно будет с высокой надежностью и с очень высоким временным разрешением определять основные параметры космической плазмы – скорость (величину и направление) потоков ионов, их температуру и плотность, оценивать энергетическое распределение ионов в потоке.

Практическая значимость данной работы подтверждена актами о практическом использовании. Прецизионные сеточные микроструктуры, полученные по предложенной технологии, могут использоваться в датчиках потока космической плазмы ДП-10-34-4К для анализа энергоуглового распределения потоков заряженных частиц в магнитосферной и межпланетной плазме в широком диапазоне энергий и плотностей на специализированных и прикладных космических аппаратах для исследования магнитосферы Земли, межпланетной среды, плазменных оболочек планет.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1 Богомазова, Н. В. Влияние состава электролита на особенности формирования пористого анодного оксида алюминия / Н. В. Богомазова, Е. В. Остапенко, И. М. Андрухович // Труды БГТУ. – 2012. – Т. 3, № 150. – С.26–28.

2 Гасенкова, И. В. Микротвердость анодного оксида алюминия, полученного в комбинированных электролитах / И. В. Гасенкова, Е. В. Остапенко, И. М. Андрухович // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18, № 4. – С.1603–1604.

3 Андрухович, И. М. Использование анодного оксида алюминия для формирования управляющих электродных структур / И. М. Андрухович // Молодежь в науке – 2013 : прил. к журн. «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. физ.-мат. наук ; сер. физ.-тех. наук. – 2014. – Ч. 2. – С.3–6.

4 Mukhurov, N. I. Ordered growth of anodic aluminum oxide in galvanostatic and galvanostatic-potentiostatic mode / N. I. Mukhurov, I. V. Gasenkova, I. M. Andrukovich // Journal of Materials Science & Nanotechnology. – 2014. – Vol. 1, No. 1. – P. 101–106.

5 Мухуров, Н. И. Особенности формирования прецизионных чувствительных элементов датчиков космической плазмы / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Нано- и микросистемная техника – 2015. – Т. 174, № 1. – С.48–56.

6 Мухуров, Н. И. Конструкция датчиков потоков космической плазмы на основе цилиндра Фарадея / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович, Г. Н. Застенкер, Н. Л. Бородкова, В. И. Костенко, Б. Т. Каримов // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 8. – С. 305–313.

7 Мухуров, Н. И. Датчики потоков космической плазмы с прецизионными селективирующими элементами / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович, Г. Н. Застенкер, Н. Л. Бородкова, Б. Т. Каримов // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – № 12. – С. 757–765.

8 Мухуров, Н. И. Разработка датчика потока космической плазмы с четырехсекционным коллектором / Н. И. Мухуров, Н. Л. Бородкова, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович, Г. Н. Застенкер, О. В. Сапунова, В. И. Костенко, Б. Т. Каримов, Е. В. Рыжова // Известие вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 624–632.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

9 Гасенкова, И. В. ИК спектры нанопористого Al_2O_3 , полученного в комбинированном электролите / И. В. Гасенкова, Н. В. Богомазова, Е. В. Остапенко, И. М. Андрухович, А. Г. Кароза // Современные проблемы физики : материалы междунар. школа-конф. молодых ученых и специалистов, Минск, 13–15 июня 2012 г. / Институт физики им. Б. И. Степанова; под ред.: В. В. Машко [и др.]. – Минск, 2012. – С. 161–165.

10 Андрухович, И. М. Использование анодного оксида алюминия для формирования управляющих электродных структур / И. М. Андрухович // Молодежь в науке : материалы междунар. научн. конф., Минск, 19–22 ноября 2013 г. / НАН Беларуси. – Минск, 2013. – С. 637–638.

11 Андрухович, И. М. Морфология поверхности никеля, полученного из электролита никелирования с сульфаминовой кислотой / И. М. Андрухович // Современные проблемы физики : материалы междунар. школы-конф. молодых ученых и специалистов, Минск, 11–13 июня 2014 г. / Институт физики им. Б. И. Степанова; под ред.: В. В. Машко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 182–185.

12 Гасенкова, И. В. Использование анодного оксида алюминия в качестве матрицы для получения металлических структур в гальванопластике / И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2014) : материалы XIII междунар. конф., Санкт-Петербург, 2–6 июня 2014 г. / РГПУ им. А. И. Герцена. – Санкт-Петербург, 2014. – С. 252–254.

13 Мухуров, Н. И. Формирование анодного оксида алюминия с малым диаметром пор / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка : материалы докл. 9-го Междунар. симп., Минск, 8–10 апреля 2015 г. / НАН Беларуси. – Минск, 2015. – Ч.2. – С. 386–392.

14 Гасенкова, И. В. Формирование анодного оксида алюминия в электролитах с различной диэлектрической проницаемостью / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Актуальные вопросы физики и техники: материалы IV Респуб. научн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 15 апреля 2015 года, в 3 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, 2015. – Ч. 1. – С. 9–11.

15 Мухуров, Н. И. Электроосаждение никеля в поры анодного оксида алюминия для получения никелевых покрытий на алюминии / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 12-й Междунар. НТК, Минск, 25–27 мая 2016 г. / НАН Беларуси. – Минск, 2016. – С. 128–130.

16 Гасенкова, И. В. Морфология пористого анодного оксида алюминия по данным растровой электронной микроскопии / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях наноструктур и наноматериалов : материалы XXVI Росс. конф. по электронной микроскопии и 4-й Школы молодых ученых г. Москва Зеленоград, 30 мая – 3 июня 2016 г. / ИПТМ РАН. – Москва Зеленоград, 2016. – С. 410–411.

17 Гасенкова, И. В. Морфологические особенности упорядоченного пористого анодного оксида алюминия / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Материалы VI Всероссийской конференции по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи, Москва, 22–25 ноября 2016 г. / ИМЕТ РАН. – Москва, 2016. – С. 507–508.

18 Андрухович, И. М. Особенности формирования анодного оксида алюминия в электролите с добавкой этиленгликоля / И. М. Андрухович, И. В. Гасенкова // Физика диэлектриков (Диэлектрики-2017) : материалы XIV Междунар.

конф.: в 2 т., Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2017 г.. / РГПУ им. А. И. Герцена. – Санкт-Петербург, 2017 – Т. 2. – С. 314–315.

19 Чувствительные элементы из наноструктурированных материалов для нового поколения датчиков потока космической плазмы / Н. И. Мухуров [и др.] // Седьмой Белорус. космич. конгресс : материалы конгресса: в 2 т., Минск 24–26 октября 2017 г. / ОИПИ НАН Беларуси. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 116–119.

20 Андрухович, И. М. Датчики потока космической плазмы с селективирующими элементами высокой прозрачности / И. М. Андрухович // ЛОМОНОСОВ-2018 : материалы Международного молодежного научного форума, Москва 9–13 апреля 2018 г. / МГУ; отв. ред.: И. А. Алешковский, А. В. Андриянов, Е. А. Антипов. [Электронный ресурс] – Москва, 2018.

21 Мухуров, Н. И. Формирование пленок никеля с наноструктурированной поверхностью / Н. И. Мухуров, И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович, В. В. Ткачев // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы XIII Междунар. НТК, Минск, 16–18 мая 2018 г. / НАН Беларуси – Минск, 2018. – С. 237–238.

Тезисы докладов

22 Гасенкова, И. В. Формирование матриц из нанопористого анодного оксида алюминия для получения микроструктур / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Высокотемпературная химия оксидных наносистем: материалы рос. конф. (с междунар. участием), Санкт-Петербург, 7–9 октября 2013 г. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 102.

23 Гасенкова, И. В. Контроль РЭМ в создании микроструктур сенсоров потока плазмы / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // XVIII Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, Черногоровка, 3–7 июня 2013 г. / ИПТМ РАН. – Черногоровка, 2013. – С. 80–81.

24 Гасенкова, И. В. Исследование модифицированной поверхности анодного оксида алюминия методами растровой электронной микроскопии / И. В. Гасенкова, Е. В. Остапенко, Н. И. Мазуренко, И. М. Андрухович // XVIII Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, Черногоровка, 3–7 июня 2013 г. / ИПТМ РАН. – Черногоровка, 2013. – С. 82–83.

25 Gasenkova, I. V. Microstructure of selecting elements for plasma flow sensors / I. V. Gasenkova, I. M. Andrukhovich // Physics and technology of thin films and nanosystems : materials of XIV International conference, Ivano-Frankivsk, 20–25 May 2013 / Vasyl Stefanyk Precarpathian national university. – Ivano-Frankivsk, 2013. – P. 450.

26 Гасенкова, И. В. Контроль морфологических параметров анодного оксида алюминия, сформированного в различных режимах / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // XXV Росс. конф. по электронной микроскопии, Черногоровка, 2–6 июня 2014 г. / ИПТМ РАН. – Черногоровка, 2014. – С. 388–389.

27 Гасенкова, И. В. Формирование упорядоченного анодного оксида алюминия / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // Наноструктурные материалы - 2014: Беларусь - Россия - Украина : матер. IV Междунар. науч. конф., Минск, 7–10 октября 2014 г. / редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Минск, 2014. – С. 189.

28 Гасенкова, И. В., Электронно-микроскопическое исследование заполнения низкоразмерных канавок и отверстий электролитическим никелем / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович // XIX Росс. симп. по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел, Черногловка, 1–4 июня 2015 г. / ИПТМ РАН. – Черногловка, 2015. – С. 232–233.

29 Андрухович, И. М. Селектирующие элементы для датчиков потока плазмы / И. М. Андрухович, Н. Л. Бородкова, И. В. Гасенкова, Г. Н. Застенкер, Мухуров Н. И. // Фундаментальные и прикладные космические исследования : материалы XII конф. молодых ученых, Москва 13 – 15 апреля 2015 г. / ИКИ РАН. – Москва, 2015. – С. 6.

30 Андрухович, И. М. Характеристики селективирующих элементов датчиков потока ионов / И. М. Андрухович, Н. Л. Бородкова, И. В. Гасенкова, Г. Н. Застенкер, Б. Т. Каримов, Н. И. Мухуров // Фундаментальные и прикладные космические исследования : тезисы XIV конф. молодых ученых, Москва 12 – 14 апреля 2017 г. / ИКИ РАН; ред. кол.: А. М. Садовский. – Москва, 2017. – С. 79.

31 Андрухович, И. М. Исследование роста никелевых слоев с применением анодного оксида алюминия / И. М. Андрухович, И. В. Гасенкова, В. В. Ткачев // 2-ой Междунар. форум по электронно-лучевым технологиям для микроэлектроники Москва, Зеленоград, 9–12 октября 2017 г./ Москва, Зеленоград. – 2017. – С. 89.

32 Применение распределения электростатического потенциала поверхности для оценки качества селективирующих элементов датчиков потока ионов / И. М. Андрухович [и др.] // Фундаментальные и прикладные космические исследования : тезисы XV конф. молодых ученых, Москва, 11–13 апреля 2018 г. / ИКИ РАН. – Москва, 2018. – С. 5.

33 Гасенкова, И. В. Методы растровой электронной микроскопии с микроанализом для исследования электрохимического осаждения никеля через слой пористого анодного оксида алюминия / И. В. Гасенкова, И. М. Андрухович, В. В. Ткачев // Современные методы электронной и зондовой микроскопии в исследованиях органических, неорганических наноструктур и нанобиоматериалов : XXVII Российская конференция, Черногловка, 28–30 августа 2018г.: в 2 т. / ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН – Черногловка, 2018. – Т. 2. – С. 42–43.

РЭЗІЮМЭ

Андруховіч Ірына Міхайлаўна

Стварэнне прэцызійных мікраструктур у матрыцах з аноднага аксіду алюмінія для сэнсараў патокаў плазмы

Ключавыя словы: селектуючыя элементы, нікелевыя прэцызійныя мікраструктуры, шаблон-матрыца на аснове аноднага аксіду алюмінія, сэнсары патоку касмічнай плазмы.

Мэтай працы палягае распрацоўка тэхналогіі атрымання прэцызійных сеткавых мікраструктур з кальцом-трымальнікам, выяўленне заканамернасці размернага асаджэння нікеля ў алюмааксідную матрыцу, даследаванне атрыманых селектуючых элементаў у выглядзе сеткавых мікраструктур ва ўмовах, набліжаных да касмічных.

Метады даследавання і апаратура: падчас працы праводзіліся тэарэтычныя і эксперыментальныя даследаванні з выкарыстаннем сканіруючай электроннай мікраскапіі, аптычнай мікраскапіі, кліматычных камер, камбінаваных шматфункцыянальных мультыметраў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны і створаны селектуючыя элементы для датчыкаў патоку касмічнай плазмы ў выглядзе прэцызійных сеткавых мікраструктур з кальцом-трымальнікам. Атрыманы селектуючыя элементы празрыстасцю больш за 90%, з счэннем элемента сеткі 15×15 мкм² і адлегласцю паміж элементамі 1000 мкм. Прапанаваны спосаб атрымання спарадкаванага аноднага аксіду алюмінія ў гальванастатычным рэжыме, спарадкаванага аноднага аксіду алюмінія з малым дыяметрам пор 13 нм, што дазваляе палепшыць якасць краю элементаў. Выяўлены заканамернасці фарміравання металічных мікраструктур з высокімі аспектнымі суадносінамі. Праведзены выпрабаванні эксперыментальных узораў, якія падцвердзілі іх устойлівасць да тыповых механічных і тэрмацыклічных уздзеянняў, што характэрныя для праграмы касмічнага палёту. Па выніку выпрабаванняў выяўлена магчымасць прымянення распрацаваных элементаў у складзе новага пакалення датчыкаў патоку касмічнай плазмы.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: прэцызійныя мікраструктуры селектуючых элементаў могуць выкарыстоўвацца ў датчыках патоку касмічнай плазмы для аналізу энергоуглового размеркавання патокаў зараджаных часцінак у магнітасфернай і міжпланетнай плазме ў шырокім дыяпазоне энергій і шчыльнасцяў на спецыялізаваных і прыкладных касмічных апаратах для даследавання магнітасферы Зямлі, міжпланетнага асяроддзя, плазменных абалонак планет.

Вобласць выкарыстання: даследаванні міжпланетнай плазмы і плазмы ў наваколлі розных планет.

РЕЗЮМЕ

Андрухович Ирина Михайловна

Создание прецизионных микроструктур в матрицах из анодного оксида алюминия для сенсоров потока плазмы

Ключевые слова: селективирующие элементы, никелевые прецизионные микроструктуры, шаблон-матрица на основе анодного оксида алюминия, сенсоры потока космической плазмы.

Цель работы заключается в разработке технологии получения прецизионных сеточных микроструктур с кольцом-держателем, установлении закономерности размерного осаждения никеля в алюмооксидную матрицу, исследовании полученных селективирующих элементов в виде сеточных микроструктур в условиях, приближенных к космическим.

Методы исследования и аппаратура: в ходе работы проводились теоретические и экспериментальные исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии, оптической микроскопии, климатических камер, комбинированных многофункциональных мультиметров.

Полученные результаты и их новизна: разработаны и изготовлены селективирующие элементы для датчиков потока космической плазмы в виде прецизионных сеточных микроструктур с кольцами-держателями. Получены селективирующие элементы прозрачностью более 90%, с сечением элемента сетки 15×15 мкм² и расстоянием между элементами 1000 мкм. Предложен способ получения упорядоченного анодного оксида алюминия в гальваностатическом режиме, упорядоченного анодного оксида алюминия с малым диаметром пор 13 нм, что позволяет улучшить качество края элементов. Установлены закономерности формирования металлических микроструктур с высоким аспектным соотношением. Проведены испытания экспериментальных образцов, которые подтвердили их устойчивость к типичным механическим и термоциклическим воздействиям, характерным для программы космического полета. По результатам испытаний установлена возможность применения разработанных элементов в составе нового поколения датчиков потока космической плазмы.

Рекомендации по использованию: прецизионные микроструктуры селективирующих элементов могут использоваться в датчиках потоков космической плазмы для анализа энергоуглового распределения потоков заряженных частиц в магнитосферной и межпланетной плазме в широком диапазоне энергий и плотностей на специализированных и прикладных космических аппаратах для исследования магнитосферы Земли, межпланетной среды, плазменных оболочек планет.

Область применения: исследования межпланетной плазмы и плазмы в окрестности различных планет.

SUMMARY

Andrukhovich Irina Mikhailovna

Creation of precision microstructures in anodic alumina matrixes for plasma flow sensors

Key words: selecting elements, nickel precision microstructures, matrix-template based on anodic alumina, sensors for cosmic plasma flow.

The aim of the work is to develop a technology for obtaining precision grid microstructures with a holder ring, define the regularity of the dimensional deposition of nickel in an alumina matrix, and study the resulting selecting elements in the form of grid microstructures under the conditions close to the cosmic ones.

Research methods and equipment: theoretical and experimental studies using scanning electron microscopy, optical microscopy, climatic chambers, combined multifunctional multimeters were carried out during the work.

The findings and their novelty: selecting elements for cosmic plasma flow sensors in the form of precision grid microstructures with a ring-holder are developed and manufactured. Selecting elements with a cross-section of the grid element of $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ are obtained, the distance between the elements is $1000 \mu\text{m}$, the transparency is more than 90%. A method is proposed for obtaining ordered anodic alumina in a galvanostatic regime, ordered anodic alumina with pores of a small diameter of 13 nm, which allows improving the edge quality of the elements. The regularities of the formation of metallic microstructures with a high aspect ratio are defined. The experimental samples were tested to withstand the typical mechanical and thermal cycle effects typical for the space flight program. The result of the tests proved the possibility of using the developed elements in the new generation of cosmic plasma flow sensors.

Recommendations for useagee: precision microstructures selects elements may be used in the space plasma flow sensors for analyzing the energy-angular distribution of charged particle fluxes in the magnetosphere and interplanetary plasma over a wide range of energies and densities in specialized and applied spacecraft for studying the Earth's magnetosphere, interplanetary medium, plasma shells of planets.

Scope of usage: studies of interplanetary plasma and plasma in the vicinity of various planets.

АНДРУХОВИЧ
Ирина Михайловна

**СОЗДАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ МИКРОСТРУКТУР В МАТРИЦАХ ИЗ
АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ СЕНСОРОВ ПОТОКОВ
ПЛАЗМЫ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Подписано в печать «06» февраля 2019 г. Формат 60x90/16
Бумага - офисная. Печать: ризография
Объем: 1,5 усл. печ. л.; 1,3 уч.-изд. л.
Тираж 60 экз. Заказ № 4

Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси»
220072, Минск, Беларусь, пр. Независимости, 68-2.

Отпечатано на ризографе Института физики НАН Беларуси