Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 621.315.592.9 : 539.3

Цаладонов
Арсений Дмитриевич

Упругие свойства комбинированных структур на основе анодированного алюминия

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0717-01 «Нанотехнологии и наноматериалы»

_____
(подпись магистранта)

Научный руководитель
Короткевич Александр Васильевич
Кандидат технических наук, доцент

_____
(подпись научного руководителя)

Минск 2026

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Изготовление наноструктур на основе упорядоченного пористого оксида алюминия (ПОА) представляет значительный интерес для создания магнитной памяти высокой плотности, одноэлектронных приборов и наноэмиттеров в ЖКИ. Использование матриц ПОА (впервые полученных Masuda в 1995 г.) в качестве шаблонов является экономически эффективной альтернативой электронно-лучевой литографии и позволяет формировать наноструктуры на больших площадях.

Основным методом заполнения пор является электрохимическое осаждение, при котором рост наноструктур происходит направленно со дна пор к поверхности. Однако наличие диэлектрического барьерного слоя на дне пор (толщиной 1,0–1,2 нм на 1 В потенциала) изолирует электрический контакт и затрудняет осаждение. В связи с этим одной из критических технологических операций является утонение или полное удаление данного барьерного слоя.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа посвящена развитию технологических основ управляемого синтеза упруго-жестких нанокомпозиционных структур на основе матриц пористого анодного оксида алюминия (ПАОА). Модифицирование пространственной геометрии пор и их направленное заполнение металлическими наноструктурами методом электрохимического осаждения открывает широкие перспективы для создания новых элементов микросистемной техники, сенсорики и наноэлектроники, обладающих повышенной эксплуатационной стойкостью и стабильностью геометрических параметров при механических нагрузках.

Цель работы является исследование и установление закономерностей влияния пространственной симметрии слоев (одностороннего и двустороннего анодирования) и электрохимического осаждения меди в наноструктурированные поры ПАОА на комплексные физико-механические и упругие свойства полученных композитов.

Объектом исследования являются пространственно-модифицированные металлизированные нанокомпозиты, сформированные на основе пористых анодных оксидов алюминия односторонней и двусторонней геометрии, наноканалы которых заполнены медью методом электрохимического осаждения.

Научная новизна работы:

– Экспериментально обнаружен и обоснован масштабный (геометрический) эффект, выражающийся в нелинейном увеличении эффективного модуля Юнга композита при уменьшении ширины исследуемых образцов от 5 до 1 мм, обусловленный вкладом краевых напряжений и технологических особенностей электроосаждения на границах раздела фаз.

– Впервые проведена сравнительная оценка влияния пространственной геометрии (односторонней и двусторонней архитектуры) ПАОА на сопротивление изгибающим нагрузкам, и доказано преимущество симметричных двусторонних структур в минимизации внутренних градиентов напряжений.

Практическая значимость заключается в разработке научно обоснованных технологических режимов получения высокопрочных и упруго-жестких нанокомпозитов «ПАОА + *Cu*». Полученные структуры со средним значением модуля Юнга 102,4 ГПа превосходят по жесткости технически чистый алюминий (70 ГПа) почти в 1,5 раза, что позволяет рекомендовать их для использования в качестве жестких подложек, мембран и конструкционных элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС), работающих в условиях знакопеременных нагрузок и микровибраций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения , списка литературы, списка публикаций и приложения А. Общий объем работы составляет 56 страниц, включая 23 рисунка и 15 таблиц (в том

числе таблицы 3.10 – 3.13, содержащие результаты расчетов упругих свойств).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Основные положения, отражающие актуальность темы, цель, задачи, научную новизну и практическую значимость исследования, подробно изложены в разделе «Общая характеристика работы».

В Первой главе (Литературный обзор) проведен детальный анализ научно-технической литературы в области управляемого синтеза регулярных матриц пористого анодного оксида алюминия (ПАОА). Рассмотрены механизмы анодирования, способы контроля геометрических параметров пор и методы формирования наноструктур внутри оксидных каналов. Особое внимание уделено методу шаблонного электрохимического осаждения металлов. Обоснована технологическая необходимость модификации (утонения или полного удаления) диэлектрического барьерного слоя на дне пор (толщиной 1,0–1,2 нм на 1 В потенциала) для обеспечения стабильного электрического контакта при гальваническом осаждении меди.

Во Второй главе (Методика эксперимента) описаны технологические этапы подготовки образцов и процессы их первичного анодирования. Подробно изложена методика нанесения фоторезиста и проведения фотолитографии для получения локальных областей оксидирования. Приведены режимы формирования ПАОА односторонней и двусторонней пространственной геометрии, а также описана критическая операция селективного травления алюминия и удаления барьерного слоя. Описан процесс гальванического заполнения нанопор пластичной медью (*Cu*) и представлена экспериментальная методика измерения модуля Юнга полученных нанокомпозитов методом упругого изгиба полосок варьируемой ширины (от 1 до 5 мм).

В Третьей главе (Результаты и их обсуждение) представлены и проанализированы экспериментальные данные:

– Изучена кинетика формирования пористых анодно-оксидных структур в зависимости от параметров электролиза.

– Установлены оптимальные параметры электрохимического осаждения меди в пористую матрицу, обеспечивающие плотное и равномерное заполнение каналов со дна пор к их поверхности.

– На основе механических испытаний рассчитаны упруго-жесткие свойства полученных систем. Экспериментально обнаружен геометрический масштабный эффект: при уменьшении ширины образцов от 5 до 1 мм наблюдается нелинейный рост эффективного модуля Юнга.

– Доказано, что переход от асимметричной односторонней к симметричной двусторонней архитектуре анодирования минимизирует внутренние напряжения, а в сочетании с медным наполнением («Двустороннее ПАОА + Cu») обеспечивает максимальный армирующий эффект, увеличивая жесткость системы (модуль Юнга) до 102,4 ГПа что на 80,9% выше, чем модуль Юнга системы одностороннего анодирования без осаждения частиц меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассчитанных значений эффективного модуля Юнга (E) проведен сравнительный анализ влияния пространственной геометрии анодирования и электрохимического осаждения меди в поры на упруго-механические свойства синтезированных структур. Сравнение средних значений модулей упругости показывает, что интегральные механические свойства композита с медью кардинально превосходят показатели пустых оксидных матриц. Так, при переходе от базовой пустой односторонней структуры (Eср = 56,6 ГПа) к финальному двустороннему композиту со сформированными медными наноструктурами (Eср = 102,4 ГПа), эффективный модуль Юнга увеличивается на 80,9%, что указывает на прирост жесткости почти в 2 раза. Если рассматривать изолированный эффект внедрения металла в уже сформированную двустороннюю пористую матрицу при сравнении Двустороннее ПАОА и Двустороннее ПАОА + Cu, то электрохимическое осаждение меди в наноканалы обеспечивает дополнительное улучшение упругих свойств на 33,9%, при этом среднее значение возрастает с 76,5 до 102,4 ГПа.

Экспериментально доказано, что симметрия слоев и пространственная геометрия анодирования играют ключевую роль в сопротивлении композита изгибающим нагрузкам. Двустороннее анодирование формирует жесткий каркас с обеих сторон подложки, что исключает появление градиента внутренних напряжений, характерного для асимметричных систем. Для пустых матриц переход от одностороннего анодирования к двустороннему приводит к росту эффективного модуля Юнга с 56,6 до 76,5 ГПа, что означает улучшение механических свойств на 35,2%. Для металлонаполненных структур переход от одностороннего модифицирования к строго симметричному двустороннему электроосаждению меди обеспечивает скачок модуля упругости с 69,8 до 102,4 ГПа, улучшая прочностные характеристики на 46,7%.

Столь значительное улучшение механических характеристик обусловлено изменением механизма деформации системы под нагрузкой. В пустом пористом оксиде алюминия устья пор работают как концентраторы напряжений, инициирующие развитие хрупких микротрещин. Электрохимическое осаждение пластичной меди в каналы полностью ликвидирует внутренние пустоты, а полученные металлические нанонити начинают выполнять роль высокопрочной арматуры. При изгибе они эффективно перераспределяют механические напряжения, связывают жесткие ячейки ПАОА между собой и блокируют раскрытие микротрещин. Симметричная двусторонняя архитектура композита при этом гарантирует равномерное распределение сжимающих и растягивающих усилий по всему сечению образца, переводя материал на принципиально новый уровень прочности и упругости.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Цаладонов, А.Д. МЭМС на основе анодного оксида алюминия для применения в высокочастотных схемах / А.Д. Цаладонов, В.С. Козлов, С.А. Биран, А.В. Короткевич // иформационные радиосистемы и радиотехнологии: Тезисы докл. к республиканской научно-практическая конференции – Минск, 2022 – С.290 – 291.
2. Цаладонов, А.Д. Вертикальные токопроводящие переходы в диэлектрических подложках на основе анодного оксида алюминия / А.Д. Цаладонов, Д.В. Ревенько, С.А. Биран // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники – 2025. – №5. – С.5–11.