

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

УДК621.318.4

Кушнер
Анастасия Дмитриевна

МЭМС-индуктор на основе анодного оксида алюминия

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 Микро- и нанoeлектроника

Научный руководитель
Короткевич Александр Васильевич
кандидат технических наук, доцент

Минск 2021

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии микроэлектроники привело к созданию новой базы радиоэлектронных устройств. К ней относятся микроэлектромеханические системы (МЭМС) – интегрированные микроустройства, комбинирующие электрические и механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией интегральных схем и имеющие размеры от микрометров до миллиметров. К перспективным образцам МЭМС следует отнести полностью интегрированные катушки индуктивности, что представляет собой довольно сложную проблему. Пассивные элементы, такие как катушки индуктивности, не удовлетворяют всем требованиям современных устройств беспроводной связи и быстродействующих цифровых систем. Недостатками индуктивных элементов являются потери на вихревые токи, большая потребляемая мощность и проникновение электрического поля в подложку.

Основной задачей при разработке МЭМС-индуктора с высоким показателем эффективности является снижение потерь и повышение добротности. Для этого при разработке индукторов необходимо учитывать их основные параметры: внешние размеры, ширину и шаг металлических дорожек, толщину металла, число витков и материал подложки.

Основным материалом для изготовления подложки МЭМС является кремний, что связано с его хорошими механическими свойствами и отработанной технологией структурирования, которая необходима при создании современных интегральных схем и изделий микроэлектроники. Все это позволяет интегрировать МЭМС с уже существующими электронными компонентами. Однако в последнее время присутствует значительный интерес исследователей к созданию и исследованию наноструктурированных материалов. Одним из таких материалов является анодный оксид алюминия (АОА), обладающий возможностью его синтеза с высокой степенью упорядоченности структуры, а также способностью варьирования диэлектрической проницаемости путем изменения режимов анодирования.

В настоящее время отсутствуют исследования в области формирования МЭМС-индуктора на основе анодного оксида алюминия, поэтому актуальным является проведение исследований в области разработки воспроизводимой и экономичной технологии формирования индукторов на основе анодных оксидов алюминия и исследования их физических свойств.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На данный момент наблюдается постоянный рост требований, предъявляемых к современным устройствам беспроводной связи и быстродействующих цифровых систем. Для современных МЭМС-индукторов актуальными задачами являются снижение потерь и повышение добротности. Для этого при разработке индукторов необходимо учитывать их основные параметры: внешние размеры, ширину и шаг металлических дорожек, толщину металла, число витков и материал подложки.

Основным материалом для изготовления подложки МЭМС является кремний, что связано с его хорошими механическими свойствами и отработанной технологией структурирования, которая необходима при создании современных интегральных схем и изделий микроэлектроники. Все это позволяет интегрировать МЭМС с уже существующими электронными компонентами. Однако в последнее время присутствует значительный интерес исследователей к созданию и исследованию наноструктурированных материалов. Одним из таких материалов является анодный оксид алюминия (АОА), обладающий возможностью его синтеза с высокой степенью упорядоченности структуры, а также способностью варьирования диэлектрической проницаемости путем изменения режимов анодирования.

В связи с этим, возникает необходимость исследования и разработки различных конструкций МЭМС-индукторов на основе анодного оксида алюминия, обеспечивающих более лучшие характеристики по сравнению с существующими решениями.

Цель и задачи исследования. Целью магистерской диссертации является разработка технологии создания микроэлектромеханического индуктора на основе системы Al/Al₂O₃.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- 1) произвести поиск и обзор научно-технической и патентной литературы по теме магистерской диссертации, а также анализ известных конструктивно-технологических приемов изготовления МЭМС;
- 2) изучить методики, технологические процессы и оборудование, используемое для проведения экспериментальных исследований;
- 3) разработать конструкции индукторов соленоидной и спиральной конфигураций на основе системы Al/Al₂O₃;

4) изучить технологические особенности формирования индуктивных элементов МЭМС на основе анодного оксида алюминия методом двухстороннего сквозного анодирования.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является анодный оксид алюминия, полученный методом сквозного двухстороннего анодирования. Предметом исследования является индуктор на основе анодного оксида алюминия.

Научная новизна полученных результатов. Научная новизна заключается в получении новых, теоретически обоснованных результатов, описывающих разработку МЭМС-индукторов на основе анодного оксида алюминия, а также в разработке методик планаризации структуры.

Личный вклад соискателя. Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Во время работы над диссертацией, автором был разработан технологический процесс проектирования МЭМС-индуктора на основе анодного оксида алюминия, а также проведено его проектирование. Анализ параметров анодирования, а также измерение и анализ полученных результатов проектирования МЭМС-индукторов проводились соискателем лично.

Основные положения, выносимые на защиту:

Конструкция соленоидного МЭМС-индуктора, представляет собой структуру из анодного оксида алюминия с расположенными на двух сторонах встроенными в оксид дорожками, соединение между которыми осуществляется неанодированными участками алюминиевой фольги; технология изготовления данной структуры включает маскирование мест расположения дорожек металлизации и контактных переходов с двух сторон алюминиевой фольги и последующее сквозное пористое анодирование; при увеличении частоты от 50 кГц до 10 МГц индуктивность полученной структуры уменьшается в 2-3 раза, а добротность увеличивается на 1-2 порядка в зависимости от геометрии МЭМС-индуктора.

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные теоретические результаты и законченные этапы диссертационной работы, а также результаты прикладных исследований и разработок отражены в следующих научных трудах:

1) Звонова, А.Д. МЭМС-индуктор на основе анодного оксида алюминия / А.Д. Звонова // 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Секция «Радиотехника и электроника» : Тезисы докл. – Минск, 2020. – С. 80.

2) Кушнер, А.Д. МЭМС-индуктор на основе анодного оксида алюминия / А.Д. Кушнер, А.В. Короткевич // Республиканская научно-техническая конференция «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020», Секция «Радиотехнологии и их элементная база» : Тезисы докл. – Минск, 2020. – С. 307-308.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в двух опубликованных работах общим объемом 3,0 п.л. (авторский объем 3,0 п.л.), представленных в материалах научных и научно-технических конференциях.

Структура и объем работы. Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 50 страниц. Работа содержит 41 рисунок и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 52 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы по исследованию материалов, применяемых при изготовлении микроэлектромеханических систем, определены основные направления исследований, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** приведен анализ литературных данных, обзор научных статей, патентов по теме магистерской диссертации. Рассмотрены конструктивно-технологические варианты изготовления МЭМС.

Во **второй главе** рассмотрены теоретические основы формирования пористого анодного оксида алюминия. Изучена структура пористого оксида алюминия, химические реакции, протекающие во время роста, а также основные морфологические параметры оксидной пленки. Также изучены кинетические

особенности роста пористого оксида алюминия и факторы, влияющие на морфологию структуры. Рассмотрена перспективность использования анодного оксида алюминия при изготовлении микроэлектромеханических систем.

В **третьей главе** приведена технология изготовления индуктивного элемента микроэлектромеханических систем на основе анодного оксида алюминия.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований по изучению режима анодирования индуктивного элемента, а также измерены электрофизические характеристики.

В **заключении** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации, приведены основные характеристики разработанного индуктивного элемента МЭМС на основе анодного оксида алюминия.

В **графической части** приведена краткая презентация основных результатов магистерской диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерской диссертации произведен поиск и обзор научно-технической и патентной литературы по теме диссертации, изучены методы, методики, технологические процессы и оборудование, используемые для проведения экспериментальных исследований. Также изучена нормативно-техническая документация, необходимая для выполнения магистерской диссертации. Сформированы индуктивные структуры МЭМС соленоидной и спиральной конфигураций на основе системы Al/Al₂O₃.

В ходе выполнения работы исследованы режимы анодирования и измерены электрофизические параметры, полученных структур. Результат измерения показывает, что полученные индукторы имеют высокую добротность и стабильную индуктивность в широком диапазоне частот.

Таким образом, была разработана технология изготовления индуктивных структур МЭМС на основе Al/Al₂O₃ методом сквозного двухстороннего анодирования.

Отличительной особенностью магистерской диссертации является исследование и разработка экономичных низкотемпературных электрохимических процессов получения индуктивных структур МЭМС на основе анодного пористого оксида алюминия. Это позволит использовать технологические процессы и оборудование промышленного типа и снизить стоимость готовых изделий. Преимуществами данной технологии являются: простая и недорогая

электрохимическая технология изготовления; миниатюризация структурно-геометрических размеров; устойчивость в среде азота, аргона, кислорода, углекислого и угарного газов, паров ацетона, диметилформамида, изопропилового спирта, фенола, толуола, аммиака и других органических соединений; высокая чувствительность и высокое быстродействие (малое время отклика, низкая инерционность); незначительный гистерезис и малое время восстановления; температурная и долговременная стабильность и воспроизводимость характеристик.

Разработка выполнялась в научно-исследовательской лаборатории НИЛ 4.2 «Технология гибридных микросхем» НИЧ БГУИР.

СПИСОК ПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Звонова, А.Д. МЭМС-индуктор на основе анодного оксида алюминия / А.Д. Звонова // 56-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Секция «Радиотехника и электроника» : Тезисы докл. – Минск, 2020. – С. 80.

[2] Кушнер, А.Д. МЭМС-индуктор на основе анодного оксида алюминия / А.Д. Кушнер, А.В. Короткевич // Республиканская научно-техническая конференция «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020», Секция «Радиотехнологии и их элементная база» : Тезисы докл. – Минск, 2020. – С. 307-308.