

Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.315

Чушкова
Дарья Ивановна

Емкостные элементы микроэлектромеханических систем на основе анодного
оксида алюминия

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 «Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Научный руководитель
Короткевич Александр Васильевич
к.т.н., доцент

Минск 2015

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: реализованные на едином кристалле средства обработки информации, датчики (температуры, давления, влажности, ускорения, гироскопы и т.п.) и исполнительные устройства (микродвигатели, форсунки и т.п.); микросхемы с многослойной металлизацией, с включением элементов на основе поликремния и контактных областей на основе силицидов различных металлов; элементы памяти, изготовленные с использованием нанотехнологий и функционирующие на основе квантово-механических эффектов.

Основным материалом для изготовления 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 свойств наноструктурированных материалов. Наноструктуры представляют практический и научный интерес как для понимания фундаментальных электронных, магнитных, оптических, тепловых и механических свойств материалов, имеющих нанометровые размеры, так и с точки зрения создания электронных приборов с качественно новыми характеристиками, в частности, низкоинерционных сенсорных элементов для микроэлектромеханических систем.

Технология получения пористого оксида алюминия известна достаточно давно. Однако исследователи непрерывно развивают методы синтеза нанопористого оксида алюминия и разрабатывают более совершенные технологии, обеспечивающие получение оксида алюминия Al_2O_3 с повышенной степенью упорядоченности структуры.

Несмотря на многочисленные опубликованные данные, до сих пор существуют проблемы, связанные с получением наноструктурированных материалов, удовлетворяющих современным требованиям к сенсорным элементам; отсутствуют также исследования в области формирования низкоомных электродных систем для таких элементов. Поэтому проведение

исследований в области разработки воспроизводимой и экономичной технологии формирования материалов на основе анодных оксидов алюминия, исследования их физических свойств является актуальным.

Формирование наноструктурированных материалов на основе анодных оксидов алюминия позволит создать новый тип сенсоров МЭМС. Это связано с высокой однородностью размеров элементов наноструктурированной среды. Проблема заключается в формировании топологии с наноразмерными элементами по заданному рисунку. В настоящее время это можно осуществить только с использованием методов электронно-лучевой, лазерной, а также интерференционной литографии, которые требуют использования дорогостоящего оборудования и материалов. Кроме того, данные методы являются весьма трудоемкими и энергоемкими, поскольку при формировании рисунка на большой площади требуются существенные затраты времени, что делает процесс формирования непригодным для широкого промышленного освоения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации. Развитие технологии микроэлектроники привело к созданию новой базы радиоэлектронных устройств. К ней относятся микроэлектромеханические системы. Основным материалом для изготовления 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 свойств наноструктурированных материалов. Разработан ряд эффективных методов создания наноструктурных материалов, в их числе методы, основанные на принципе самоформирования. Методы самоформирования включают агрегацию наночастиц в структуры с заданной формой и размером. Одним из приемлемых материалов для создания наноструктур на основе самоформирования является пористый оксид алюминия Al_2O_3 . Отличительная его особенность – потенциальная возможность его синтеза с высокой степенью упорядоченности структуры, а также способность варьирования диэлектрической проницаемости от 5 до 9. Несмотря на многочисленные опубликованные данные, до сих пор существуют проблемы, связанные с получением наноструктурированных материалов,

удовлетворяющих современным требованиям к сенсорным элементам; отсутствуют также исследования в области формирования низкоомных электродных систем для таких элементов. Поэтому проведение исследований в области разработки воспроизводимой и экономичной технологии формирования материалов на основе анодных оксидов алюминия, исследования их физических свойств является актуальным.

Цели и задачи исследований. Целью магистерской диссертации является разработка технологии создания конденсатора переменной емкости гребенчатой структуры с подвижными балками на основе системы Al/Al₂O₃.

Для достижения поставленной цели необходимо решить 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, используемые для проведения экспериментальных исследований;

3) разработать конструкцию конденсатора переменной емкости гребенчатой структуры с упругими проводящими балками на основе системы Al/Al₂O₃;

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

5) разработать методику планаризации структуры.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является анодный оксид алюминия, полученный методом сквозного двухстороннего анодирования. Предметом исследования является конденсатор переменной емкости гребенчатой структуры на основе анодного оксида алюминия.

Научная новизна и значимость полученных результатов. В рамках приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь особое внимание уделяется поиску новых наноструктурированных материалов, которые могут быть использованы при изготовлении микроэлектромеханических систем, сенсорных структур и могут обеспечить получение таких их характеристик, как быстродействие, высокая чувствительность, миниатюризация геометрических размеров в сочетании с простотой технологии изготовления. Однако некоторые параметры, например, стабильность и гистерезис, не всегда удовлетворяют необходимым требованиям и нуждаются в дальнейших усовершенствованиях. В связи с этим полученные результаты представляют научный и практический интерес, поскольку направлены на исследование и формирование нового типа

микроэлектромеханических систем на основе пористого анодного оксида алюминия, функционирование которого позволяет усовершенствовать конструкцию, а также упростить технологию их изготовления.

Практическая значимость полученных результатов. Пористые наноструктурированные материалы обладают высоким потенциалом практического применения в технологии поверхностных и объемных МЭМС и для создания трехмерных форм. Анизотропия формы нанопор основано на уникальной самоорганизующейся морфологии, образованной однородными регулируемыми в широком интервале наноразмерными, перпендикулярными обеим поверхностям нанопорами. Методы самоформирования включают агрегацию наночастиц в структуры с заданной формой и размером. Одним из приемлемых материалов для создания наноструктур на основе самоформирования является пористый оксид алюминия Al_2O_3 . Отличительная его особенность – потенциальная возможность его синтеза с высокой степенью упорядоченности структуры, что весьма важно при формировании МЭМС.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения:

1) Предложена конструкция и метод изготовления конденсатора переменной емкости гребенчатой структуры с упругими проводящими балками на основе системы Al/Al_2O_3 .

2) Предложено для удаления дефектных алюминиевых включений в массиве анодного оксида алюминия использовать методику биполярного анодирования, заключающуюся в использовании двухкамерной электролитической ванны с перегородкой в виде образца и электролитом анодирования (7 % $H_2C_2O_4$) с одной стороны и буферным электролитом (10 % $CuSO_4$) – с другой, помещая в первую из камер катод, а во вторую – анод.

3) Разработана методика планаризации структур на основе анодного оксида алюминия, заключающаяся в селективном химическом травлении, предварительно выращенного анодного оксида алюминия на необходимую толщину для создания микрорельефа, и дальнейшего сквозного двухстороннего анодного окисления оставшегося алюминия.

Личный вклад соискателя. Основные результаты, изложенные в работе, получены автором самостоятельно. Автор проводил разработку конструкции емкостного элемента МЭМС, экспериментальные исследования по изготовлению конденсатора переменной емкости гребенчатой структуры с упругими проводящими балками на основе системы Al/Al_2O_3 , а также измерения электрофизических и структурно-морфологических параметров. Научному руководителю в совместных работах принадлежат предметные постановки задач, выбор направлений исследования, руководства при

проведении экспериментальных исследований и анализе полученных результатов.

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

1) Шиманович, Д.Л. Методы электрохимического формирования однослойных и двухслойных мембранных структур на основе наноструктурированного анодного оксида алюминия / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2014. – № 2. – С. 19-23.

2) Шиманович, Д.Л. Формирование бимембранных матричных наноструктур на основе анодного оксида алюминия / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Материалы и структуры современной электроники: Тезисы докл. – Минск, 2014 г. – С. 242-245.

3) Шиманович, Д.Л. Исследование механизма формирования нанопористых матриц на основе анодного Al_2O_3 при двухстороннем сквозном анодировании / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: Тезисы докл. – Минск, 2014. – С. 38-39.

4) Chushkova, D.I. Nanostructured membranes for MEMS based on anodic alumina / D.I. Chushkova, S.I. Liahushевич // 51-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Секция «Английский язык»: Тезисы докл. – Минск, 2015.

Публикации. Основные положения работы и результаты диссертации изложены в восьми опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций, а также в научном журнале (см. список опубликованных работ).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 54 наименования, а также графического материала. Общий объем диссертации составляет 77 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы по исследованию материалов, применяемых при изготовлении

микроэлектромеханических систем, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** приведен анализ литературных данных, обзор научных статей, патентов по теме магистерской диссертации. Рассмотрена перспективность использования анодного оксида алюминия при изготовлении микроэлектромеханических систем, а также конструктивно-технологические варианты 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.

В **третьей главе** приведена технология изготовления емкостного элемента микроэлектромеханических систем на основе анодного оксида алюминия. Разработана методика удаления дефектных алюминиевых включений в массиве анодного оксида алюминия, а также предложен метод по планаризации структуры.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований по изучению структурно-морфологических параметров двухстороннего оксида алюминия в конструкции емкостного элемента, а также измерены электрофизические характеристики.

В **заключении** кратко изложены основные результаты магистерской диссертации, приведены основные характеристики разработанного емкостного 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 переменные конденсаторные структуры МЭМС толщиной 50, 75, 100 мкм. В результате сквозного анодного окисления алюминиевой фольги было выявлено, что массив выращенного

анодного оксида алюминия имеет разброс дефектных локальных алюминиевых включений произвольной формы и разной величины, которые анодно не окисляются по этой причине возможно появление закороток между алюминиевыми электродами конденсаторной структуры, что не позволяет производить различные электрофизические измерения. Для решения этой проблемы была разработана методика по доокислению этих алюминиевых включений, заключающаяся в применении биполярного анодирования, а именно в использовании двухкамерной электролитической ванны с электролитом анодирования в катодной камере (7% р-р $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) и буферным электролитом в анодной камере (10% р-р CuSO_4), где между этих двух камер располагался образец. В результате включения тока, на одной стороне образца напротив алюминиевых включений появлялся положительный заряд, она становилась анодом, и проходил процесс анодного доокисления (анодирования) этих включений, а вторая заряжалась отрицательно, становилась катодом, и наблюдалось восстановление катионов (Cu^{2+}) буферного электролита на катодной стороне напротив алюминиевых включений. Такая методика позволяет искривления и прожоги окисленного слоя в таких зонах. В ходе выполнения работы была разработана методика по планаризации структуры. Данная методика заключается в селективном химическом травлении, предварительно выращенного анодного оксида алюминия на необходимую толщину и дальнейшего сквозного двухстороннего анодного окисления алюминия. Изучены структурно-морфологические и электрофизические параметры, полученных структур.

Таким образом, была разработана технология изготовления переменных конденсаторных структур МЭМС с упругими проводящими балками на основе системы $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ методом сквозного двухстороннего анодирования.

Отличительной особенностью магистерской диссертации является исследование и разработка экономичных низкотемпературных электрохимических процессов получения емкостных 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; высокая однородность размеров чувствительного наноструктурированного слоя; устойчивость в среде азота, аргона, кислорода, углекислого и угарного газов, паров ацетона, диметилформамида, изопропилового спирта, фенола, толуола, аммиака и др. 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. Потенциальными потребителями полученных результатов являются предприятия и организации, занимающиеся разработкой устройств электронной техники и микроэлектроники, малоинерционных систем для анализа метрологических параметров внешней среды и др.

Разработка выполнялась в научно-исследовательской лаборатории НИЛ 4.2 «Технология гибридных микросхем» НИЧ БГУИР, а также в Институте фотонных технологий г. Йена, Германия.

Список опубликованных работ

1) Shimanovich, D.L. Nanoporous alumina membrane structures for relative humidity sensing elements / D.L. Shimanovich, D.I. Chushkova // Proc. of the International Conference «PHYSICS, CHEMISTRY AND APPLICATION OF NANOSTRUCTURES (NANOMEETING-2013)», 28-31 May 2013 / Minsk, Belarus, – 2012. – P. 622-624.

2) Шиманович, Д.Л. Синтез бимембранных Al_2O_3 -структур методом сквозного двухстороннего анодирования / Д.Л. Шиманович, Д.И. Чушкова // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: Тезисы докл. – Саранск, 2013 – С. 37.

3) Чушкова, Д.И. Глубокое сквозное и биполярное анодирование для формирования двухслойных мембранных наноструктур на основе пористого оксида алюминия / Д.И. Чушкова, Д.Л. Шиманович // Материалы и технологии гибкой электроники: Тезисы докл. – Санкт-Петербург, 2013 – С. 90.

4) Чушкова, Д.И. Бимембранные структуры на основе пористого анодного оксида алюминия / Д.И. Чушкова, Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол // Молодежь в науке: Тезисы докл. – Минск, 2013 – С. 630-631.

5) Шиманович, Д.Л. Методы электрохимического формирования однослойных и двухслойных мембранных структур на основе наноструктурированного анодного оксида алюминия / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2014. – № 2. – С. 19-23.

6) Шиманович, Д.Л. Формирование бимембранных матричных наноструктур на основе анодного оксида алюминия / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Материалы и структуры современной электроники: Тезисы докл. – Минск, 2014 г. – С. 242-245.

7) Шиманович, Д.Л. Исследование механизма формирования нанопористых матриц на основе анодного Al_2O_3 при двухстороннем сквозном анодировании / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: Тезисы докл. –Минск, 2014. – С. 38-39.

8) Chushkova, D.I. Nanostructured membranes for MEMS based on anodic alumina / D.I. Chushkova, S.I. Liahushevich // 51-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Секция «Английский язык»: Тезисы докл. –Минск, 2015.

Библиотека БГУИР