

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 544.6; 621.316.849; 621.319.4; 539.216.2

ПЛИГОВКА
Андрей Николаевич

**ПРЕЦИЗИОННЫЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ
И ЕМКОСТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ВЕНТИЛЬНЫХ
МЕТАЛЛОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ АНОДНЫХ МЕТАЛЛОКСИДОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Минск 2013

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научные руководители:

Горох Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией «Нанотехнологии» научно-исследовательской части учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Мозалев Александр Михайлович, кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Хатько Вячеслав Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры микро- и нанотехники Белорусского национального технического университета

Залесский Валерий Борисович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»

Оппонирующая организация
Установа адукацыйна-навуковая
БЕЛАРУСКИ ДЗЯРЖАВНЫ УНІВЕРСІТЭТ
ІНФАРМАТЫКІ І РАДЫЁЭЛЕКТРОНІКІ

Открытое акционерное общество «**Минский научно-исследовательский институт радиоматериалов**»

Защита состоится «3» октября 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Технология гибридных интегральных микросхем (ИМС), микросборок и коммутационных плат сохраняет высокую конкурентоспособность, а в некоторых областях техники является доминирующей при производстве радиоэлектронных устройств благодаря своей многофункциональности и способности гибко реагировать на вводимые новшества и изменения рынка. В современных гибридных ИМС пассивные электронные компоненты (ПЭК) – резисторы, конденсаторы и индуктивности – занимают до 80 % площади. Наряду с общей тенденцией микроминиатюризации все возрастающие требования предъявляются и к электрофизическим характеристикам ПЭК. На практике же улучшение одних характеристик ПЭК зачастую приводит к ухудшению других, а применение сложных технологических методик, уникального и дорогостоящего оборудования, а также редких и дорогостоящих материалов не всегда приводит к желаемому результату, но значительно повышает себестоимость изделий и соответственно снижает конкурентоспособность.

В результате проведенных исследований и разработанных на их основе методов был решен ряд научно-исследовательских задач, направленных на получение оптимальных сочетаний технологических условий формирования и электрохимических условий обработки тонкопленочных систем Al/Ta для создания металлосидных высокоструктурированных пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой с прогнозируемыми и стабильно воспроизводимыми свойствами. Решение названных задач позволило не только создать наноструктурированные материалы с новыми свойствами, но и разработать научные основы технологии изготовления тонкопленочных резисторов (ТПР) и конденсаторов (ТПК), а также интегральных резистивно-емкостных компонентов современных радиоэлектронных устройств с улучшенными характеристиками.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации утверждена Советом БГУИР (протокол № 4 от 28.12.2007 г.) и соответствует подразделу 6.7 «Нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике» перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585.

Диссертационная работа выполнялась в БГУИР в рамках заданий Республиканских научно-технических программ, грантов, проектов, финансируемых Фондом фундаментальных исследований Республики Беларусь и международ-

ными организациями: ГПФИ «Электроника» «Исследовать и разработать процессы анодного формирования наноструктурированных металлодиэлектрических резистивных покрытий с высокоомными и термостабильными свойствами» (2003 – 2005 гг., № ГР 20031056); ГКПНИ «Нанотех» «Синтез пористых матриц на основе нанокomпозиционных металлооксидных полупроводников для тонкопленочных химических сенсоров» (2006 – 2010 гг., № ГР 20061890); ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии» «Синтез массивов периодических проводниковых и диэлектрических наноструктур из двухслойных систем вентильных металлов для интегральных и микроминиатюрных резисторов и конденсаторов с улучшенными характеристиками» (2006 – 2010 гг., № ГР 20061380); грант Министерства образования «Высокоомные термостабильные элементы интегральных микросхем на основе наноструктурных анодированных пленок Al/Ta» (2008 – 2009 гг., № ГР 20090512); проект БРФФИ № T09M – 137 «Синтез планарных металло-оксидных пленочных наноструктур для ВЧ/СВЧ элементов интегральных схем» (2009 – 2011 гг., № ГР 20091280); проект БРФФИ № T11M – 138 «Наноструктурные элементы резистивно-емкостных микрофильтров для устройств синхронизации электронной аппаратуры» (2011 – 2013 гг., № ГР 20120384); ГПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии» «Разработать и исследовать интегральные автоэмиссионные элементы на основе металлических, металлооксидных и нанокристаллических эмиттеров для перспективных микро- и наноэлектронных устройств» (2011 – 2013 гг., № ГР 20115138); ГПНИ «Электроника и фотоника» «Разработка методов создания высокочувствительных сенсорных элементов на основе нанопористых анодных оксидных матриц Al с внедренными наночастицами активных соединений, металлооксидных и углеродных наноструктур» (2011 – 2013 гг., № ГР 20115149).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей формирования металлооксидных пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой методом электрохимического анодирования тонкопленочной системы Al/Ta, определение их морфологических, структурных и электрофизических характеристик, а также разработка на их основе конструкций и технологий изготовления прецизионных термостабильных резистивных и емкостных элементов интегральных микросхем.

Для достижения поставленной цели предстояло решить следующие задачи:

1. Провести анализ современного состояния в области формирования резистивных и диэлектрических тонких пленок, их электрофизических характеристик и методов формирования резистивно-емкостных элементов интегральных микросхем на их основе.

2. Выбрать материалы, оборудование и разработать методики формирования высокоупорядоченных металлоксидных пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурами, исследовать их морфологические, структурные и электрофизические свойства.

3. Исследовать механизмы роста островково-сетчатых и столбиково-матричных пленок, а также влияние условий формирования на морфологические и структурные параметры этих пленок.

4. Оптимизировать условия формирования пленок с островково-сетчатой и со столбиково-матричной наноструктурой для получения тонкопленочных резисторов и конденсаторов с улучшенными электрофизическими и термостабильными характеристиками.

5. Разработать конструкции и технологии изготовления термостабильных резистивных и емкостных элементов интегральных микросхем.

6. Изготовить экспериментальные образцы тонкопленочных микросхем на основе резистивно-емкостных элементов и исследовать их характеристики.

В качестве *объекта исследования* выбраны наноструктурированные металлоксидные тонкие пленки, получаемые электрохимическим анодированием двухслойной системы Al/Ta. *Предмет исследования* – физико-химические свойства металлоксидных пленок и закономерности изменения этих свойств в зависимости от условий формирования, технологических обработок и применения таких пленок в качестве пассивных компонентов интегральных микросхем.

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование высокоупорядоченных металлоксидных пленок с островково-сетчатой наноструктурой электрохимическим анодированием двухслойной системы Al/Ta в 0,2 М растворе щавелевой кислоты (ЩК) при напряжении 53 В требует использования подслоя Ta с ограниченной толщиной до 22 нм для его сквозного окисления через поры анодного оксида алюминия (АОА) с образованием локальных оксидных неоднородностей, окруженных наноразмерной периодической танталовой сеткой.

2. Электрохимическое анодирование двухслойной системы Al/Ta в 0,2 М растворе ЩК при напряжении 53 В с последующим анодированием в 0,5 М растворе борной кислоты (БК) при напряжении, равном соотношению $E=k \cdot h_{Al}$, где коэффициент k равен $1,2 \pm 0,05$ В/нм, а толщина анодируемой пленки Al h_{Al} связана с толщиной Ta h_{Ta} эмпирически полученным соотношением $h_{Al}=4,8 \cdot h_{Ta}-3$, приводит к формированию высокоупорядоченной металлоксидной планаризованной пленки со столбиково-матричной наноструктурой, состоящей из оксида алюминия, поры которого заполнены анодным оксидом тантала (АОТ) с общим оксидным слоем.

3. Резистивные свойства островково-сетчатых пленок, созданных электрохимическим анодированием двухслойной системы Al/Ta, обусловлены особенностями их структуры, определяющей их проводимость, включающей компенсационное влияние диффузионного токопереноса в металлических нанопроводниках, туннелирование электронов через потенциальный барьер оксидных островков и полупроводниковую проводимость n-типа у основания оксидных островков, что обеспечивает изменение их поверхностного сопротивления в диапазоне от 150 Ом/кв до 360 кОм/кв при температурном коэффициенте сопротивлений до $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

4. Повышенная диэлектрическая проницаемость (ϵ до 13) и малые потери ($\text{tg}\delta$ не более $3 \cdot 10^{-3}$) столбиково-матричных пленок в диапазоне частот от 1 до 500 кГц при высокой термостабильности обусловлены их составной структурой, представляющей собой массивы столбиков анодного оксида тантала в порах оксида алюминия с общим подслоем оксида тантала у основания пор, в которых наряду с процессами поляризационного смещения протекают электронная поляризация и доминирующая ионно-релаксационная поляризация.

5. Разработанная и защищенная патентами электрохимическая технология изготовления прецизионных термостабильных резистивно-емкостных элементов интегральных микросхем на основе анодированных тонкопленочных систем Al/Ta позволяет создавать тонкопленочные резистивные элементы с поверхностным сопротивлением 150–5800 Ом/кв с точностью обеспечения номиналов 1,4 % при высокой рассеиваемой мощности до 24 мВт/мм², высокой термостабильностью до $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур 213–403 К, а также создавать конденсаторы с удельной емкостью 100–700 пФ/мм² при диэлектрических потерях до $3 \cdot 10^{-3}$, электрической прочностью не менее $3,5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ и токах утечки до $3 \cdot 10^{-11} \text{ А/см}^2$ с высоким значением выхода годных до 90 %.

Личный вклад соискателя

Вклад соискателя состоит в постановке задач исследований, разработке методик и проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и интерпретации экспериментальных результатов, полученных автором лично и в соавторстве. Научные руководители кандидаты технических наук Г.Г. Горох и А.М. Мозалев координировали и оказывали консультативную помощь при выполнении исследований, обсуждении и обобщении научных результатов. Непосредственную помощь в проведении измерений электрофизических параметров наноструктур оказали А.В. Луферов и Р.Ф. Носик.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались автором на следующих конференциях: VII Международная конференция «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, Беларусь, 2013);

EMRS Fall Meeting 2012 (Варшава, Польша, 2012); IV Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2011» (Минск, Беларусь, 2012); XVI Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (Минск, Беларусь, 2011); 123rd Conference of the Surface Finishing Society of Japan (Yokohama, Japan, 2011); Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии КрыМиКо» (Севастополь, Украина, 2010, 2009); EDS IMAPS CS 2009 Conference Schedule (Прага, Чехия, 2009); Международная научно-техническая конференция БГУИР (Минск, Беларусь, 2009); Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО – 2009» (Екатеринбург, Россия, 2009); Научно-техническая конференция аспирантов и студентов «Микроэлектроника и информатика» (Зеленоград, Россия, 2009, 2008, 2007, 2006); Первая международная научная конференция «Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина (НАНО – 2008)» (Минск, Беларусь, 2008); Республиканская научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, Беларусь, 2008, 2006); Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО – 2007» (Новосибирск, Россия, 2007); Международная научно-техническая конференция «Новые технологии изготовления многокристалльных модулей» (Нарочь, Беларусь, 2006); 6-th International Symposium on Electrochemical Micro- and Nanosystem Technologies (Бонн, Германия, 2006); 56-th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry (Бусан, Южная Корея, 2005); VI Solid State Chemistry Meeting (Прага, Чехия, 2004); III Международная научная конференция «Наноструктурные материалы – 2004: Беларусь – Россия» (Минск, Беларусь, 2004).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликованы 4 статьи в рецензируемых научных журналах, 7 статей в сборниках материалов конференций, 17 тезисов докладов конференций, 1 патент и 1 заявка на патент Республики Беларусь на изобретение. Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений с материалами практического использования результатов работы.

Общий объем диссертационной работы составляет 146 страниц, из них 92 страницы основного текста, 46 рисунков на 26 страницах, 17 таблиц на семи страницах, библиография из 140 наименований, включая 30 публикаций автора, на 15 страницах и 4 приложения на шести страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** и в **общей характеристике работы** показана актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** показано, что в странах СНГ способны развиваться и успешно конкурировать лишь производства усовершенствованных и специальных ПЭК, основным условием конкурентоспособности которых является использование специфических ноу-хау.

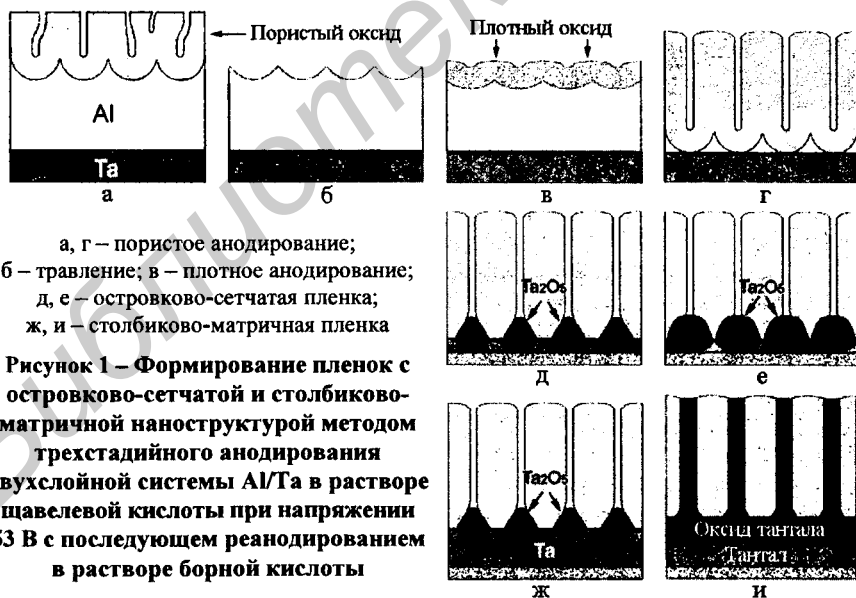
Рассмотрены свойства и особенности современных материалов, оборудования и методик изготовления тонкопленочных резистивных и емкостных элементов ИМС. Рассмотрены методы и средства наноструктурирования металлов и диэлектриков. Проведен анализ электрофизических свойств и характеристик тонкопленочных резистивно-емкостных элементов ИМС. Представлены известные методы изготовления ТПК и ТПР на основе электрохимической технологии, в том числе методом электрохимического анодирования металлов. На основе проведенного анализа сформулированы основные требования, предъявляемые к тонкопленочным резистивным и емкостным элементам ИМС, выбраны исходные материалы, определены цели и задачи работы.

Идея работы состоит в том, чтобы с применением малозатратной электрохимической технологии анодирования двухслойной тонкопленочной системы Al/Ta создать распределенные 2D наноструктуры, которые могут быть использованы в качестве нанокompозитных высокодобротных диэлектриков с улучшенными свойствами для ТПК и электропроводящих покрытий с высокоомными, термостабильными свойствами для ТПР. Тонкие пленки выбранных вентильных металлов при анодной поляризации в определенных электрохимических условиях обеспечивают самоорганизованный рост наноструктурированных слоев с требуемыми структурными и электрофизическими свойствами. В качестве базового электролита для анодирования Al на подслое Ta был выбран 0,2 М водный раствор ЩК, являющийся экологически безопасным и обеспечивающий воспроизводимые параметры ячеисто-пористой структуры анодных оксидных пленок с хорошими диэлектрическими свойствами. Техническое осуществление идеи состоит в последовательном анодировании верхнего слоя Al для формирования нанопористой матрицы АОА и последующего локального анодирования подслоя Ta через поры АОА при более высоком напряжении.

Во **второй главе** изложены методики и дано описание оборудования для формирования методом электрохимического анодирования двухслойной системы Al/Ta высокоструктурированных металлоксидных тонких пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой, исследования их состава, структуры и электрофизических характеристик в частотном и температурном диапазонах. Описаны методики и оборудование при проведении скани-

рующей и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФСЭ) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС). Разработаны фотошаблоны и методики для формирования тестовых ТПР с островково-сетчатой и ТПК со столбиково-матричной наноструктурой. Описаны оборудование, методики измерений и расчета основных электрофизических характеристик и их зависимостей от условий формирования тестовых ТПР и ТПК. Для ТПР измерялись: поверхностное сопротивление R_s ; мощность рассеяния P ; максимальное отклонение R_s ; температурный коэффициент сопротивления ТКС; коэффициент старения $K_{ст}$. Для ТПК – удельная емкость C ; относительная диэлектрическая проницаемость ϵ ; тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$; температурный коэффициент емкости (ТКЕ); токи утечки I_u ; пробивное напряжение $E_{пр}$; импеданс $|Z|$; угол сдвига фаз между напряжением и током α° ; собственная индуктивность L_c ; эквивалентное сопротивление R_c ; вольт-амперные характеристики.

В третьей главе приведены результаты исследований электрохимических процессов анодной поляризации двухслойной системы Al/Ta и получения высокоупорядоченных металлоксидных пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой (рисунок 1), имеющих характерные размеры: период матрицы ~ 125 нм, диаметр пор ~ 20 нм, удельная плотность $\sim 7,2 \cdot 10^9$ см⁻², диаметр столбиков АОТ ~ 50 нм.

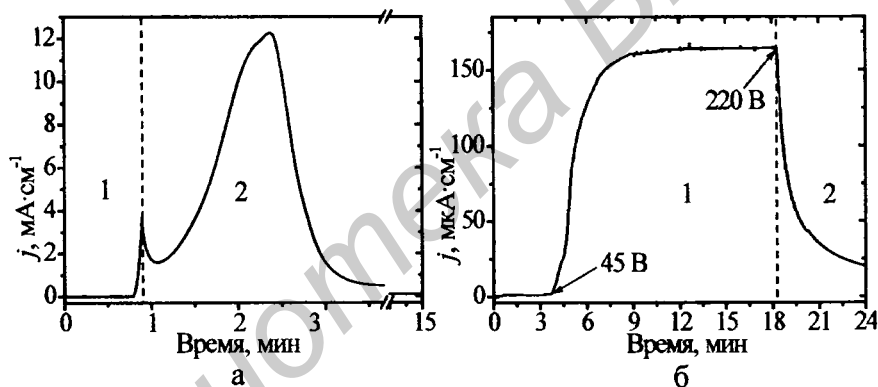


а, г – пористое анодирование;
б – травление; в – плотное анодирование;
д, е – островково-сетчатая пленка;
ж, и – столбиково-матричная пленка

Рисунок 1 – Формирование пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой методом трехстадийного анодирования двухслойной системы Al/Ta в растворе щавелевой кислоты при напряжении 53 В с последующим реанодированием в растворе борной кислоты

На начальном этапе развертки напряжения анодирования ток возникает при 43 В (рисунок 2, а), что объясняется потенциальным барьером из плотного АОА, созданного на второй стадии анодирования (рисунок 1, в). После стабилизации напряжения на 53 В и переходных процессов ток начинает постепенно возрастать, что характерно для формирования пористого АОА, которое длится примерно 2 мин. Как только барьерный слой АОА касается пленки Та (рисунок 1, г), ток падает, а анодирование продолжается до тех пор, пока ток не уменьшится до уровня токов утечки примерно 5 мкА/см².

В начале развертки напряжения реанодирования ток отсутствует вследствие потенциального барьера (рисунок 2, б), создаваемого танталовыми оксидными nanoостровками (рисунок 1, д, ж). Однако, когда напряжение реанодирования достигает 45 В, ток начинает расти, а примерно через 8 мин анодный ток достигает и стабилизируется на значении 160 мкА/см². При этом напряжение реанодирования составляет 220 В, реанодирование переходит и продолжается в потенциостатическом режиме, пока ток не упадет до значения 20 мкА/см².

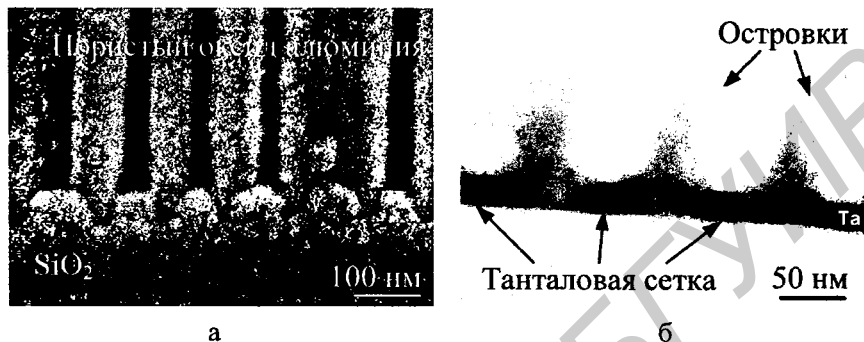


1 – развертка напряжения; 2 – постоянное напряжение

Рисунок 2 – Зависимости плотности тока j от времени на третьем этапе анодирования (а) и реанодирования (б) двухслойной системы Al/Ta

Методами СЭМ и ПЭМ были изучены морфологические параметры островково-сетчатых пленок различной толщины (8, 12, 16 и 22 нм) на разных этапах анодирования/реанодирования, промоделированы процессы зарождения и роста оксидных островков и формирования танталовой сетки (рисунок 3). Установлено, что при анодировании системы Al/Ta при толщине подслоя Ta до 22 нм образующиеся оксидные островки касаются диэлектрической подложки, увеличение же толщины подслоя Ta даже на 5–10 нм уже не позволяет сформировать танталовую проводящую сетку анодированием, а последующее реанодирование приводит к срастанию островков в сплошной слой АОТ с после-

дующим фронтальным поглощением оставшегося Ta в направлении к подложке. Таким образом, для формирования пленок с островково-сетчатой наноструктурой в 0,2 М растворе ЦК при напряжении 53 В толщина подслоя Ta не должна превышать 22 нм.



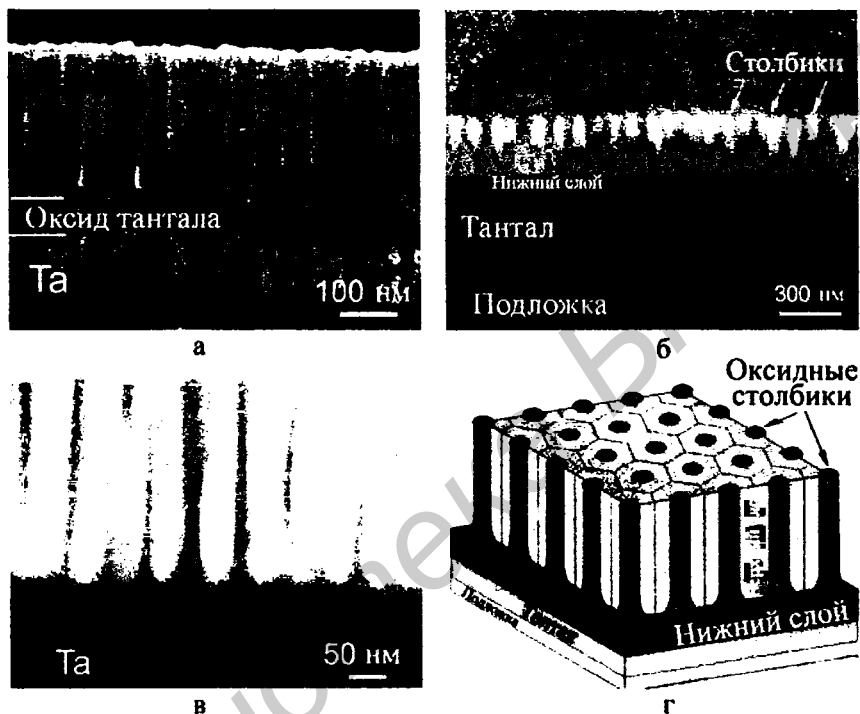
а
б
а – сканирующая электронная микроскопия;
б – просвечивающая электронная микроскопия

Рисунок 3 – Изображения пленок с островково-сетчатой наноструктурой толщиной 22 нм, сформированных методом анодирования двухслойной системы Al/Ta в 0,2 М растворе щавелевой кислоты при напряжении 53 В

Пленки со столбиково-матричной наноструктурой состоят из АОА, поры которого заполнены наноразмерными столбиками АОТ, выходящими из нижнего сплошного слоя АОТ (рисунок 4). Для формирования планаризованной диэлектрической пленки, когда поры АОА полностью заполнены АОТ, необходимо соблюдать соотношение толщин исходного алюминия (h_{Al}) и тантала (h_{Ta}) и проводить их реанодирование при напряжениях (E_r), связанных с величинами исходных толщин пленок следующими эмпирически полученными соотношениями, выведенными расчетным путем на основе анализа многочисленных СЭМ и ПЭМ изображений экспериментальных наноструктур: $h_{Al}=4,8 \cdot h_{Ta}-3$; $h_{Al}=0,85 \cdot E_r+1$; $h_{Ta}=0,18 \cdot E_r-1$.

Результаты исследований состава оксидных столбиков и нижнего сплошного слоя АОТ показали наличие в них С, В, О, Al и Ta. Углерод присутствует только в верхних слоях органических загрязнений и не включен в более глубокие слои пленки; кислород же присутствует в виде O^{2-} , а также гидроксильных групп OH и химически связанной воды. Металлический и окисленный Al присутствует только снаружи, в пределах 15 нм толщины слоя столбикового материала, который остается после растворения матрицы АОА; металлический Ta присутствует как в столбиковом оксиде (концентрация 1,3 %), так и в сплошном оксиде (концентрация 3,5 %), основной материал оксидных столбиков и нижнего сплошного слоя АОТ – это АОТ в разной степени окисления TaO_x.

($0,5 < x < 1$). Борсодержащие образования, появление которых связано с отрицательно заряженными анионами электролита или их производных, способных к миграции внутрь столбиков под действием высокого электрического поля, включены во внешнюю область вершины столбика на глубину до 10 нм.



а – сканирующая электронная микроскопия;

б, в – просвечивающая электронная микроскопия; г – 3D модель

Рисунок 4 – Изображения пленок со столбиково-матричной наноструктурой, сформированных методом анодирования двухслойной системы Al/Ta в 0,2 М растворе щавелевой кислоты при напряжении 53 В

Результаты исследований ионпереноса под действием сильных электрических полей в процессе реанодирования столбиково-матричных пленок показали наличие зон с разной ионной проводимостью. Первая зона характеризуется стехиометрическим Al_2O_3 и находится у наружной части стенки оксидной ячейки. Третья – во внутренней ее части, а вторая промежуточная (переходная) часть находится между первой и третьей. Самая высокая ионная проводимость в третьей зоне является результатом структурного несовершенства, схожего с физическим дефектом, разновидностью твердого электролита – связанной воды

и группы протонов, занявших свободные вакансии в оксиде. Большинство связей Al-O во внутренней зоне диссоциируют под воздействием сильных электрических полей из-за большого количества структурных дефектов и сравнительно низкого удельного сопротивления этой пленки. В процессе расчетов чисел переноса кислорода $t_0=0,6$ и Ta $t_T=0,4$ было установлено, что они являются сложными, усредненными значениями всех присутствующих чисел переноса с разной степенью окисления. Полученные числа переноса могут изменяться в зависимости от режимов обработки, например, наиболее существенное понижение числа переноса отмечено в момент уменьшения электрического поля через пленку, приводящее к увеличению плотности тока или повышению температуры электролита во время реанодирования. Это значит, что соотношение между верхней (столбик) и нижней (плотный оксид Ta) частью пленки можно управляемо изменять, изменяя режимы анодирования.

В четвертой главе представлены результаты исследований экспериментальных ТПР с островково-сетчатой и ТПК со столбиково-матричной наноструктурой. Установлены зависимости влияния толщины пленок Ta и напряжения реанодирования на поверхностное сопротивление R_s и ТКС ТПР (рисунок 5). Исследованы температурные и временные зависимости R_s . Установлено, что островково-сетчатые пленки благодаря своей структуре имеют предельно высокую термостабильность (до $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) в широком диапазоне поверхностных сопротивлений (150 Ом/кв – 360 кОм/кв).

При этом повышенные значения ТКС обнаружены у структур, сформированных на подслое Ta толщиной 12 нм, а увеличение толщины Ta приводит к снижению ТКС. Для объяснения высоких термостабильных свойств островково-сетчатая пленка была представлена как периодическая гетерогенная многофазная (металл-изолятор) система, включающая электронно-проводящую матрицу с регулярно распределенными нестехиометрическими оксидными фазами, имеющими профили распределения по глубине и ширине. Таким образом, в данной системе при уменьшении толщины слоя Ta происходит усиление вклада в механизм проводимости туннелирования электронов между соседними наноразмерными

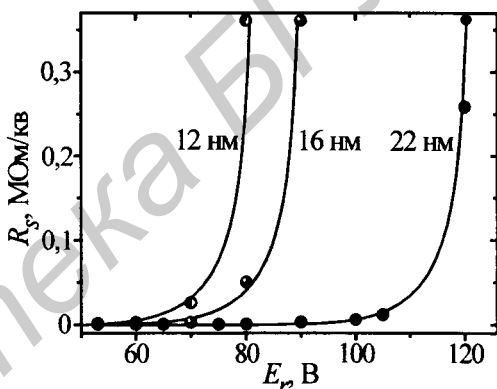
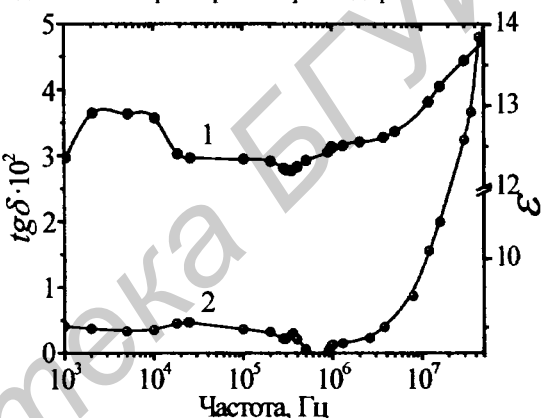


Рисунок 5 – Зависимость поверхностного сопротивления R_s от напряжения реанодирования E_p резисторов с островково-сетчатой наноструктурой и разными толщинами подслоя Ta

проводниками в результате уменьшения физических размеров диэлектрических промежутков (потенциального барьера) до величин, сравнимых с длиной свободного пробега электронов в условиях повышенных температур. Низкие значения ТКС в данных пленках достигаются за счет взаимокompенсирующего влияния толщины и структуры исходного материала, морфологии, соотношения металлической и диэлектрической фаз, сжимающих или растягивающих напряжений в пленке. Поскольку основания островков главным образом состоят из обеднённого кислородом TaO, они ведут себя как акцепторный полупроводник, который понижает ТКС. При этом важным преимуществом ТПР на основе островково-сетчатых пленок перед существующими аналогами является возможность прецизионной подгонки их характеристик реанодированием.

Тонкопленочные конденсаторы со столбиково-матричной наноструктурой показывают высокие диэлектрические характеристики в диапазоне частот 1–500 кГц при температурной стабильности не ниже $3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (рисунок 6). Наличие выступов и прогибов на кривых $\epsilon(f)$ и $\text{tg}\delta(f)$ при разных температурах и $\text{tg}\delta(T)$ свидетельствует о присутствии в механизме поляризации столбиково-матричных пленок релаксационной составляющей. Таким образом, на основании результа-



1 – диэлектрическая проницаемость $\epsilon(f)$;
2 – тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta(f)$

Рисунок 6 – Диэлектрические характеристики конденсаторов со столбиково-матричной наноструктурой

тов исследований и литературных источников установлено, что поляризация столбиково-матричных пленок наряду с электронной и ионной включает ионно-релаксационную составляющую, возникающую из-за смещения слабо связанных ионов под действием поля на расстояния, превышающие межатомные. С увеличением температуры вследствие усиления хаотического теплового движения растет количество ионов, участвующих в поляризации. Достигнув максимального значения, $\text{tg}\delta$ постепенно уменьшается, так как усиленное тепловое движение включенных в состав пленки ионов начинает препятствовать их перемещению под действием электрического поля, после чего преобладающим видом поляризации в диэлектрике остается лишь электронная поляризация.

Преобладающее влияние ионно-релаксационного механизма на поляризацию оксидно-столбиковых диэлектриков определяется положительными значениями температурных коэффициентов емкости этих типов пленок. Ионная поляризуемость диэлектриков приводит к увеличению рассеяния электрической энергии в ТПК при повышении температуры, что проявляется в характерном линейном росте I_{gd} , обусловленном началом активации процесса поляризации анодно-оксидных диэлектриков вследствие усиления свободной ориентации ионов под действием поля.

В пятой главе представлены научные основы технологии создания интегральных резистивных и емкостных элементов на основе островково-сетчатых и столбиково-матричных наноструктур, и проведена апробация при изготовлении тестовых ТПР и ТПК. Исследованы основные функциональные характеристики и проведен их сравнительный анализ с наиболее известными аналогами.

По разработанному технологическому маршруту были изготовлены тестовые ТПР с островково-сетчатой наноструктурой, одинаковой топологией (размер контактных площадок 8×3 мм, резистивного слоя $40 \times 0,1$ мм), разными режимами реанодирования и толщинами Al и Ta. На исследуемых ТПР измеряли сопротивление при разных температурах, определяли отклонения от номинала сопротивления, изменения сопротивления в течение 1000 ч, максимально пропускаемый ток и прикладываемое напряжение; рассчитывали мощность рассеивания P , ТКС, коэффициент старения $K_{ст}$ и процент выхода годных ТПР (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты статистической обработки измеренных и рассчитанных параметров тестовых тонкопленочных резисторов

R_s Ом/кв	P мВт/мм ²	ТКС·10 ⁶ К ⁻¹	$K_{ст}$ ·10 ⁵ Ом/ч	Отклонение номинала резистора, %	Выход годных, %
150	21,5	3	2,4	1,4	90
380	22,0	5	2,5	1,8	80
5800	24,0	8	2,4	2,9	85

Анализ результатов, представленных в таблице 1, показал, что по сравнению с известными аналогами величины поверхностных сопротивлений соответствуют расчетным с точностью 1,8 %, что в 55 раз лучше; мощность рассеивания оказывается в 2 раза выше; ТКС – примерно на 2 порядка меньше, коэффициент старения – в 2 раза меньше, а выход годных – в 4 раза выше. Такой технологический подход приводит к улучшению эксплуатационных характеристик ТПР: расширению диапазона возможных поверхностных сопротивлений, повышению термостабильности (снижению ТКС) и точности обеспечения номинала сопротивления, увеличению рассеиваемой мощности, повышению надежности и процента выхода годных ТПР.

При изготовлении ТПК на основе столбиково-матричных наноструктур варьировали толщину второго слоя Al и толщины токоподводящей, вспомогательной и защитной пленок Ta. Все конденсаторы имели одинаковую топологию (площадь верхних обкладок составляла 1 мм^2). На изготовленных ТПК измеряли емкость C , пробивное напряжение, ток утечки I_y и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$; а также рассчитывали диэлектрическую проницаемость ϵ , электрическую прочность конденсаторного диэлектрика $E_{\text{пр}}$ и процент выхода годных ТПК (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты статистической обработки измеренных и рассчитанных параметров тестовых тонкопленочных конденсаторов

Толщина диэлектрика, мкм	C , пФ	ϵ	$E_{\text{пр}}$, МВ/см	$I_y \cdot 10^{11} \text{ А/см}^2$ при напряженности поля $1,0 \text{ МВ/см}$	$\text{tg}\delta \cdot 10^3$	Выход годных, %
1,0	112	12,6	3,5	3	5	80
0,7	159	12,6	3,5	4	5	85
0,4	279	12,6	3,5	4	4	90

У ТПК со столбиково-матричной наноструктурой ϵ не зависит от его толщины и оказывается в 1,7 раза больше; электрическая прочность – в 1,5 раза выше; токи утечки – примерно на два порядка меньше, диэлектрические потери – примерно на порядок меньше, а выход годных – в 1,6–1,8 раза выше, чем у ТПК, изготовленных по аналогичной технологии.

Результаты практической реализации показали, что разработанные методы позволяют получить высококачественные планарные ТПР и ТПК, обладающие расширенным диапазоном возможных поверхностных сопротивлений, повышенной термостабильностью и минимальным разбросом номиналов сопротивления, увеличенной рассеиваемой мощностью, повышенной электрической прочностью и минимальными токами утечки, повышенной надежностью и процентом выхода годных.

В приложении представлены документы, отражающие результаты практического использования разработки и измерений основных функциональных параметров изготовленных элементов на их основе, в том числе резистивно-емкостного микрофильтра нижних частот, а также акты внедрения диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально установлено, что при электрохимическом анодировании двухслойных систем Al/Ta в 0,2 М растворе ЩК при напряжении 53 В в зависимости от толщины подслоя Ta образуются высокоструктурированные металлоксидные тонкие пленки либо с островково-сетчатой (толщина Ta до

22 нм), либо столбиково-матричной (толщина Ta более 22 нм) наноструктуризацией. Эмпирически получены феноменологические выражения, устанавливающие связь между требуемыми толщинами исходных слоев Al и Ta и режимами их анодирования для получения металлоксидных пленок с заданной наноструктурой. Установлено, что для получения композитной планаризованной пленки со столбиково-матричной наноструктурой процесс анодирования системы Al/Ta с последующим реанодированием в 0,5 М растворе БК следует проводить при напряжении, равном соотношению $E = k \cdot h_{Al}$, где коэффициент k равен $1,2 \pm 0,05$ В/нм, а толщина анодируемой пленки Al h_{Al} связана с толщиной подслоя Ta h_{Ta} соотношением $h_{Al} = 4,8 \cdot h_{Ta} - 3$ [3-А, 5-А, 13-А, 14-А, 16-А].

2. Тонкопленочные резисторы на основе пленок с островково-сетчатой наноструктурой, формируемые методом анодирования тонкопленочных систем Al/Ta с толщиной Ta до 22 нм, обладают высокой стабильностью в диапазоне 150–5800 Ом/кв с точностью подгонки номиналов не хуже 1,4 % при высокой рассеиваемой мощности до 25 мВт/мм² и высоким выходом годных до 90 %. Высокоомные свойства таких пленок обусловлены уменьшением эффективной толщины пленки металла и увеличением сопротивления металлической сетки вокруг оксидных островков. Малые значения температурного коэффициента сопротивления до $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне температур 213–403 К достигаются за счет взаимокompенсирующего влияния толщины и структуры исходного материала, морфологии, соотношения металлической и диэлектрической фаз, сжимающих или растягивающих напряжений в пленке [1-А, 7-А, 12-А, 19-А, 25-А, 28-А, 29-А].

3. Тонкопленочные конденсаторы с диэлектриком на основе пленок со столбиково-матричной наноструктурой, образуемой при анодировании двухслойной композиции Al/Ta с толщиной пленки Ta более 22 нм и представляющей собой композитную пленку, в которой поры матрицы АОА заполнены столбиками АОТ до поверхности, имеют удельную емкость в диапазоне 100–700 пФ/мм² при диэлектрических потерях не хуже $3 \cdot 10^{-3}$, электрическую прочность $3,5 \cdot 10^6$ В/см и токи утечки до $3 \cdot 10^{-11}$ А/см². Планарность топологических слоев дополнительно уменьшает дефектность диэлектрика и повышает надежность и выход годных изделий [4-А, 6-А, 30-А].

4. Установлены зависимости влияния толщины подслоя Ta, режимов реанодирования и отжига на микрогеометрическое строение, состав, структуру и электрофизические свойства островково-сетчатых пленок. Обнаружено, что уменьшение толщины подслоя Ta от 22 до 12 нм приводит к увеличению R_s в диапазоне 10^2 – 10^6 Ом/кв и увеличению отрицательного ТКС в диапазоне от 3 до $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Увеличение напряжения реанодирования приводит не только к увеличению сопротивления, но и к постепенному росту ТКС из отрицательной области в положительную [1-А, 9-А, 22-А, 26-А].

5. Экспериментально установлено, что реанодирование пленок со столбиково-матричной наноструктурой до сравнительно высоких напряжений, так же как и увеличение общей толщины пленки, приводит к заметному снижению тока утечки в композитной пленке за счет сужения или полной блокировки кольцевых наноканалов проводимости на границе раздела Ta_2O_5/Al_2O_3 , из-за роста и расширения АОТ в порах АОА, а также из-за уменьшения доли субоксидов Та в составе композиционного диэлектрика [4-А, 8-А, 15-А].

6. Разработаны и защищены патентами конструктивно-технологические методы изготовления прецизионных термостабильных резистивных и емкостных элементов ИМС на основе пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой. Результаты практической реализации показали, что для созданных тонкопленочных элементов разброс номиналов сопротивлений не превышает 2 %, мощность рассеивания в 2 раза выше, ТКС на 2 порядка меньше, диэлектрическая проницаемость диэлектрика в 1,7 раза больше, электрическая прочность в 1,5 раза выше, токи утечки на два порядка меньше, диэлектрические потери, примерно, на порядок меньше, а выход годных в 1,6–1,8 раза выше, коэффициент старения в 2 раза меньше по сравнению с аналогичными элементами [2-А, 10-А, 17-А, 24-А, 27-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Установленные граничные условия и коэффициенты формирования высокоструктурированных металлоксидных пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой позволяют получать прецизионные термостабильные резистивные и емкостные элементы ИМС с улучшенными и воспроизводимыми характеристиками [1-А, 4-А, 20-А, 21-А, 23-А].

2. Результаты исследований морфологических, структурных, резистивных и диэлектрических характеристик островково-сетчатых и столбиково-матричных пленок имеют фундаментальный характер и используются как справочные данные при расчете и конструировании резистивно-емкостных элементов ИМС [2-А, 11-А, 18-А].

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс БГУИР при подготовке инженеров по специальностям «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» и «Микро- и нанoeлектронные системы и технологии».

4. В ФГПУ «НПП «Дельта» изготовлена и испытана опытная партия тонкопленочных резистивно-емкостных микрофильтров (в количестве 12 шт.) в соответствии с технологическим процессом, разработанным в диссертационной работе, для схемы измерения сигнала с интеллектуального газочувствительного сенсора СГ-2140-А1.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1—А. Плиговка, А.Н. Исследование и моделирование в реальном времени процессов анодного формирования двумерных массивов металло-оксидных наноструктур / А.Н. Плиговка, В.Н. Сахарук, А.М. Мозалев // Известия Белорусской инженерной академии. — 2005. — № 1(19)/2. — С. 44–47.

2—А. Плиговка, А.Н. Получение и свойства наноструктурных металло-оксидных пленок на основе анодированных композиций Al/Ti / А.Н. Плиговка, А.М. Мозалев // Доклады БГУИР. — 2008. — № 4. — С. 50–57.

3—А. Growth of Multioxide Planar Film with the Nanoscale Inner Structure via Anodizing Al/Ta layers on Si / А.М. Mozalev, A.J. Smith, S. Borodin, A. Plihauka, A.W. Hassel, M. Sakairi, H. Takahashi // Electrochimica Acta. — 2009. — № 54. — P. 935–945.

4—А. Мозалев, А.М. Высокочастотные интегральные конденсаторы с наноструктурными анодно-оксидными диэлектриками / А.М. Мозалев, А.Н. Плиговка, А.О. Крупко // Нанотехника. — 2011. — № 3. — С. 65–73.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

5—А. Плиговка, А.Н. Исследование формирования нанопористых диэлектриков из двухслойной тонкопленочной системы Al/Ti / А.Н. Плиговка, А.М. Мозалев // Нанотехнологии. Тонкие пленки в оптике и электронике: сборник докладов Харьковской нанотехнологической ассамблеи — 2008, Харьков, Украина, 26–30 мая 2008 г.: в 2 т. / Харьковский технический университет; редкол.: И.М. Нелюдов [и др.]. — Харьков, 2008. — Т. 1. — С. 145–149.

6—А. Высокочастотные характеристики МДМ конденсаторов с наноструктурными анодно-оксидными диэлектриками / А.М. Мозалев, А.Н. Плиговка, А.Н. Луферов, Е.Л. Попичев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2009): материалы 19-й Международной Крымской конференции, Украина, 14–18 сентября 2009 г.: в 2 т. / Севастопольский национальный технический университет; редкол.: П.П. Ермолов [и др.]. — Севастополь, 2009. — Т. 2. — С. 653–654.

7—А. Mozalev, A. Morphology and electric properties of metal/oxide nanostructures formed by low-potential anodizing Al/Ta layers / A. Mozalev, A. Plihauka, A.W. Hassel // Electronic Devices and Systems (EDS'09): proceedings EDS'09 IMAPS CS international conference, Brno, 2–3 September 2009 / Brno university of technology; editors: O. Hégr [et al.]. — Brno, 2009. — P. 235–238.

8—А. Диэлектрические характеристики тонкопленочных конденсаторов на основе анодированной системы Al/Ta / А.Н. Плиговка, А.Н. Луферов, Р.Ф. Носик, А.М. Мозалев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии

(КрыМиКо 2010): материалы 20-й Международной Крымской конференции, Украина, 13–17 сентября 2010 г.: в 2 т. / Севастопольский национальный технический университет; редкол.: П.П. Ермолов [и др.]. – Севастополь, 2010. – Т. 2. – С. 880–881.

9–А. Mozalev, A. Extending the functionality of anodically oxidized valve metal multilayers by tailoring their morphology, nanostructure and properties / A. Mozalev, A. Pligovka, H. Habazaki // Invited lecture at the 2011' Annual Meeting of the Japan's Surface Finishing Society: 123rd conference of the surface finishing society of Japan, Japan, 17–18 March 2011 / Kanto Gakuin University; editors: J. Hun [et al.]. – Yokohama, 2011. – P. 314–317.

10–А. Плиговка, А.Н. Коэффициент старения наноструктурных тонкопленочных резисторов на основе анодированной системы Al/Ta / А.Н. Плиговка, А.О. Крупко // Приборостроение – 2011: материалы 4-й международной научно-технической конференции, Беларусь, Минск, 16–18 ноября 2011 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011. – С. 385–387.

11–А. Плиговка, А.Н. Тонкопленочные интегральные RC-элементы на основе островково-сетчатых и столбиково-матричных наноструктур / А.Н. Плиговка, Г.Г. Горох // Наноструктуры в конденсированных средах: сборник научных статей VII Международной конференции «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах», Минск, 9–12 июня 2013 г. / Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2013. – С. 103–112.

Тезисы докладов на научных конференциях

12–А. Термостабильные микрорезисторы, изготавливаемые по электрохимической технологии / А. Мозалев, Г. Горох, А. Сурганов, А. Плиговка // Наноструктурные материалы – 2004: Беларусь – Россия: материалы III Международного семинара, Беларусь, 12–15 октября 2004 г. / Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2004. – С. 234–235.

13–А. The growth and electrical properties of tantalum nanowires self-organized under the porous alumina film / A. Mozalev, G. Gorokh, A. Plihauka, I. Mozaleva // VI. Solid State Chemistry Meeting: book of abstract, Czech Republic, 13–17 september 2004 / Institute of inorganic chemistry; editors: E. Balladova [et al.]. – Prague, 2004. – P. 158.

14–А. Mozalev, A. Morphology and conductance properties of metal/oxide nanostructures formed by low-voltage anodising of Al/Ta layers / A. Mozalev, A. Plihauka, A.W. Hassel // 56-th Annual Meeting of the International Society of Elec-

trochemistry: book of abstracts, Korea, 25–30 September 2005 / Seoul National university; editors: H. Kim [et al.]. – Busan, 2005. – P. 756.

15–А. Mozalev, A. Ionic transport in anodically oxidised Al/Ta layers during the growth of metal-oxide nanostructures / A. Mozalev, A. Poznyak, A. Plihauka, A.W. Hassel // 6th International Symposium on Electrochemical Micro- and Nanosystem Technologies: book of abstracts, Germany, 22–25 August 2006 / Max–Planck institute fur eisenforschung; editors: A.W. Hassel [et al.]. – Bonn, 2006. – P. 72.

16–А. Плиговка, А.Н. Моделирование твердофазных реакций на границе раздела двухслойной системы Al/Ta во время её анодного окисления / А.Н. Плиговка, Ю.В. Глузд, А.М. Мозалев // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XIV Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Беларусь, Гродно 26–28 апреля 2006 г. / Гродненский государственный университет им. Янки Купалы; редкол.: Е.А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2006. – С. 76–79.

17–А. Электрические свойства массивов самоорганизованных металло-оксидных наноструктур, получаемых анодированием тонкопленочных систем Al/Ta / А.М. Мозалев, Г.Г. Горох, А.Н. Плиговка, Ю.В. Глузд, А.В. Сурганов // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: материалы докладов и краткие сообщения международной научно-технической конференции, Беларусь, Минск–Нарочь, 25–29 сентября 2006 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: М.П. Батура [и др.]. – Нарочь, 2006. – С. 66.

18–А. Плиговка, А.Н. Электрические свойства металло-оксидных наноструктур, формируемых анодированием тонкопленочных систем Al/Ta / А.Н. Плиговка, Ю.В. Глузд // Микроэлектроника и информатика – 2006 (МЭИ – 2006): тезисы доклада 13-й научно-технической конференции аспирантов и студентов, Россия, Москва–Зеленоград 19–21 апреля 2006 г. / Московский институт электронной техники; редкол.: В.А. Бархоткин [и др.]. – Москва, 2006. – С. 14.

19–А. Электрохимическое формирование тонкопленочных массивов металло-оксидных наноструктур с уникальными электрофизическими свойствами / А.М. Мозалев, Г.Г. Горох, А.Н. Плиговка, Ю.В. Глузд // Вторая Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО – 2007», Россия, 13–16 марта 2007 г.: сборник тезисов / Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН; редкол.: И.Г. Констанчук [и др.]. – Новосибирск, 2007. – С. 66.

20–А. Плиговка, А.Н. Разработка R–C элементов интегральных схем на основе анодированной тонкопленочной системы Al/Ta / А.Н. Плиговка // Микроэлектроника и информатика – 2007 (МЭИ – 2007): тезисы докладов 14-й научно-технической конференции аспирантов и студентов, Россия, Москва–Зеленоград, 22–24 апреля 2008 г. / Московский институт электронной техники; редкол.: В.А. Бархоткин [и др.]. – Москва, 2008. – С. 18.

21–А. Плиговка, А.Н. Формирование нанопористых тонкопленочных диэлектриков из двухслойной системы Al/Ti / А.Н. Плиговка, А.М. Мозалев // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XVI Республиканской научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Беларусь, 23 – 25 апреля 2008 г. / Гродненский государственный университет им. Янки Купалы; редкол.: Е.А. Ровба [и др.]. – Гродно, 2008. – С. 177–178.

22–А. Мозалев, А.М. R,C элементы интегральных микросхем на основе наноструктурных вентильных металлов и композиционных металлоксидов / А.М. Мозалев, А.Н. Плиговка // Наноструктурные материалы – 2008 (НАНО – 2008): материалы первой международной научной конференции «Беларусь – Россия – Украина», Беларусь, 22–25 апреля 2008 г. / Национальная академия наук Беларуси; редкол.: П.А. Витязь [и др.]. – Минск, 2008. – С. 536.

23–А. Плиговка, А.Н. Формирования нанопористых алюмооксидных темплатов для тонкопленочных газовых сенсоров / А.Н. Плиговка, А.М. Мозалев // Микроэлектроника и информатика – 2008 (МЭИ – 2008): тезисы докладов 15-й научно-технической конференции аспирантов и студентов, Россия, Москва–Зеленоград 23–25 апреля 2008 г. / Московский институт электронной техники; редкол.: В.А. Бархоткин [и др.]. – Москва, 2008. – С. 20.

24–А. Мозалев, А.М. Тонкопленочные элементы интегральных схем на основе наноструктурированных металлов и анодных металлоксидов / А.М. Мозалев, А.Н. Плиговка // Наноструктурные материалы – 2009 (НАНО – 2009): материалы Первой Международной научной конференции «Беларусь – Россия – Украина», Россия, Екатеринбург, 20–24 апреля 2009 г. / Институт физики металлов УО РАН; редкол.: В.В. Устинов [и др.]. – Екатеринбург, 2009. – С. 773–774.

25–А. Плиговка, А.Н. Зависимость электропроводности наноструктурных анодированных пленок тантала от режимов получения и обработки / А.Н. Плиговка // Микроэлектроника и информатика – 2009 (МЭИ – 2009): тезисы докладов 16-й научно-технической конференции аспирантов и студентов, Россия, Москва–Зеленоград, 22–24 апреля 2009 г. / Московский институт электронной техники; редкол.: С.А. Гаврилов [и др.]. – Москва, 2009. – С. 63.

26–А. Плиговка, А.Н. Влияние условий формирования на электросопротивление металло-оксидных пленок на основе анодированной системы Al/Ta / А.Н. Плиговка, А.М. Мозалев // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР: тезисы докладов Международной научно-технической конференции, Беларусь, Минск, 19 марта 2009 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск, 2009. – С. 192–193.

27–А. Плиговка, А.Н. Временная стабильность резистивных параметров наноструктурированных пленок на основе анодированной системы Al/Ta /

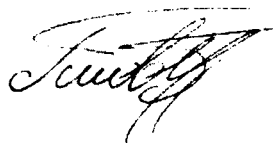
А.Н. Плиговка, А.О. Крупко // Современные средства связи: материалы XVI Международной научно-технической конференции, Беларусь, Минск 27–29 сентября 2011 г. / Высший государственный колледж связи; редкол.: М.А. Баркун [и др.]. – Минск, 2011. – С. 64.

28–А. Pligovka, A. Metal-Oxide Nanostructures Formed by Anodizing Al/Ta Layer / A. Pligovka, G. Gorokh // EMRS Fall Meeting 2012 – Symposium L. Defect-induced effects in nanomaterials: the symposium proceedings, physica status solidi (c), Warszawa, 17–20 September 2012 / Warsaw university of technology; editors: N. Sobolev [et al.]. – Poland, 2012. – P. L43.

Патенты

29–А. Способ изготовления тонкопленочного резистора: заявка на пат. Респ. Беларусь, МПК7 Н 01С 17/075, С 25D 11/12 / А.М. Мозалев, А.Н. Плиговка; заявитель Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – № а 20110172; заявл. 11.02.2011.

30–А. Способ изготовления тонкопленочного конденсатора: пат. 15861 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01G 4/33, С 25D 11/12 / А.М. Мозалев, А.Н. Плиговка; заявитель и патентообладатель Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – № а 20091562; заявл. 04.11.2009; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 3(86). – С. 181.



Плігаўка Андрэй Мікалаевіч

Прэцызійныя тэрмастабільныя рэзістыўныя і ёмістыя элементы інтэгральных мікрасхем на аснове нанаструктураваных плёнак вентыльных металаў і кампазіцыйных анодных металаксідаў

Ключавыя словы: электрахімічнае анадзіраванне, порысты аксід алюмінію, аксід танталу, астраўкова-сеткаватая плёнка, слупкова-матрычная плёнка, тонкаплёнкавы рэзістар, тонкаплёнкавы кандэнсатар, рэзістыўна-ёмісты мікрафільтр.

Мэта працы: выяўленне заканамернасцей фармавання металаксідных плёнак з астраўкова-сеткаватай і слупкова-матрычнай нанаструктурай метадам электрахімічнага анадзіравання тонкаплёнкавай сістэмы Al/Ta, вызначэнне іх марфалагічных, структурных, электрафізічных характарыстык і распрацоўка на іх аснове канструкцый і тэхналогій вырабу прэцызійных тэрмастабільных рэзістыўных і ёмістых інтэгральных мікрасхем.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню метадам трохстадыйнага электрахімічнага анадзіравання двухслаёвай сістэмы Al/Ta у 0,2 М раствору шчаўевай кіслаты пры напружанні 53 В з наступным рэанадзіраваннем у 0,5 М раствору борнай кіслаты сфармаваны высокаструктураваныя металаксідныя тонкія плёнкі з астраўкова-сеткаватай і слупкова-матрычнай нанаструктурай. Даследаваны іх склад, структурныя і марфалагічныя характарыстыкі мэтадамі СЭМ, ПЭМ, РФЭС, ЭДРС. Вызначаны механізмы фарміравання, росту і іонапераносу ў працэсе рэанадзіравання, межавыя ўмовы і каэфіцыенты фармавання астраўкова-сеткаватай і слупкова-матрычнай плёнак, даследаваны іх рэзістыўныя і дыэлектрычныя характарыстыкі і іх залежнасць ад умоў фармавання. Упершыню распрацаваны канструктыўна-тэхналагічныя прынцыпы вырабу прэцызійных тэрмастабільных рэзістыўных і ёмістых элементаў інтэгральных мікрасхем на аснове плёнак з астраўкова-сеткаватай і слупкова-матрычнай нанаструктурай.

Ступень выкарыстання: атрыманыя ў рабоце вынікі ўкаранены ў навучальны працэс БДУІР. Па распрацаваным канструктыўна-тэхналагічным прынцыпам у ФДПУ «НВП Дэльта» выраблена партыя тонкаплёнкавых рэзістыўна-ёмістых мікрафільтраў для схемы вымярэння сігналу з інтэлектуальнага газаадчувальнага сэнсара СД-2140-А1.

Галіна скарыстання: матэрыялазнаўства, тэхналогія цвёрдацельнай электронікі, фізіка і тэхналогія тонкіх плёнак.

Плиговка Андрей Николаевич

Прецизионные термостабильные резистивные и емкостные элементы интегральных микросхем на основе наноструктурированных пленок вентильных металлов и композиционных анодных металлоксидов

Ключевые слова: электрохимическое анодирование, пористый оксид алюминия, оксид тантала, островково-сетчатая пленка, столбиково-матричная пленка, тонкопленочный резистор, тонкопленочный конденсатор, резистивно-емкостной микрофильтр.

Цель работы: установление закономерностей формирования металлоксидных пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой методом электрохимического анодирования тонкопленочной системы Al/Ta, определение их морфологических, структурных и электрофизических характеристик, а также разработка на их основе конструкций и технологий изготовления прецизионных термостабильных резистивных и емкостных элементов интегральных микросхем.

Полученные результаты и их новизна: впервые методом трехстадийного электрохимического анодирования двухслойной системы Al/Ta в 0,2 М растворе щавелевой кислоты при напряжении 53 В с последующим реанодированием в 0,5 М растворе борной кислоты сформированы высокоструктурированные металлоксидные тонкие пленки с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой. Исследованы их состав, структурные и морфологические характеристики методами СЭМ, ПЭМ, РФЭС, ЭДРС. Установлены механизмы образования, роста и ионпереноса в процессе реанодирования, граничные условия и коэффициенты формирования островково-сетчатых и столбиково-матричных пленок, исследованы их резистивные и диэлектрические характеристики и их зависимость от условий формирования. Впервые разработаны конструктивно-технологические принципы изготовления прецизионных термостабильных резистивных и емкостных элементов интегральных микросхем на основе пленок с островково-сетчатой и столбиково-матричной наноструктурой.

Степень использования: полученные в работе результаты внедрены в учебный процесс БГУИР. По разработанным конструктивно-технологическим принципам в ФГПУ «НПП «Дельта» изготовлена партия тонкопленочных резистивно-емкостных микрофильтров для схемы измерения сигнала с интеллектуального газочувствительного сенсора СГ-2140-А1.

Область применения: материаловедение, технология твердотельной электроники, физика и технология тонких пленок.

SUMMARY

Pligovka Andrei Nikolaevich

Precision thermostable resistive and capacitive elements of integrated circuits based on nanostructured valve metal films and composite anodic metal oxides

Keywords: electrochemical anodization, porous anodic alumina, tantalum oxide, island-grid film, column-matrix film, thin film resistor, thin film capacitor, resistive-capacitive microfilter.

Objective: the establishment of ways of metal oxide film formation with island-grid and column-matrix nanostructures by electrochemical anodization of the bilayer Al/Ta system, the determination of their morphological, structural, electrical properties, and the development on their basis design and manufacturing technologies of precision thermostable resistive and capacitive elements of integrated circuits.

Results and novelty: highly ordered metal oxide thin films with island-grid and column-matrix nanostructures were formed by a three step electrochemical anodization of the bilayer Al/Ta system in 0.2 M oxalic acid solution at voltage of 53 V with reanodizing in 0.5 M solution boric acid. After various fabrication steps, the island-grid and column-matrix nanostructures were evaluated by FESEM, XRD, TOF-SIMS, XPS surface and depth profiling analysis.

The nanostructured island-grid films possessing highly resistive and thermostable properties as well as planar multioxide films, where an array of tantalum oxide nanocolumns reaching precisely the anodic alumina pores top, have been grown by smart anodizing of Al/Ta layers. The mechanisms of the formation, boundary conditions and rates of formation of island-grid and column-matrix films, transport numbers in anodic tantalum have been determined, and the resistive and dielectric properties of such films have been investigated. Background of producing high-precision resistors and capacitors was designed. For the first time the precision thermostable resistive and capacitive elements of integrated circuits based on nanostructured valve metal films and composite anodic metal oxides were made and tested.

From the technological viewpoint, this unique approach allows for integration of anodically formed planar resistors and capacitors with interconnections and other elements for promising new applications.

Efficiency: the results were used in the FSEU "SPE "Delta" to produce RC-microassemblages for the circuit measuring signals from the intelligent gas sensitive sensor SG-2140-A1 and have also been used in education process at BSUIR.

Field of application: materials science, micro- and nanoelectronics technology, physics and technology of thin films.

Плиговка Андрей Николаевич

**ПРЕЦИЗИОННЫЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ
И ЕМКОСТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
НА ОСНОВЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК ВЕНТИЛЬНЫХ
МЕТАЛЛОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ АНОДНЫХ МЕТАЛЛОКСИДОВ**

Специальность 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.09.2019.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 4,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 346.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6.