

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 621.398.694.3

ВРУБЛЕВСКИЙ ИГОРЬ АЛЬФОНСОВИЧ

**ПЛЕНОЧНЫЕ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА
ОСНОВЕ АНОДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ**

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Минск 2001

Работа выполнена в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Научный руководитель к.т.н., с.н.с. Воробьева А.И.

Официальные оппоненты д.ф.-м.н., проф. Погребняков А.В.
к.т.н. Мухуров Н.И.

Оппонирующая организация: Научно исследовательский институт
электронных вычислительных машин

Защита состоится “6” сентября 2001 г. в 16⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д02.15.03 в Учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по адресу: 220027, г.Минск, ул.П.Бровки, 6, БГУИР, 1 уч.корпус, тел.239-89-89

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В условиях научно-технического прогресса роль первичных источников информации становится все более значимой. В последние годы в технике измерения и регулирования различных процессов изготовление и применение первичных преобразователей выделилось в самостоятельное научное направление, получившее название “сенсорика”.

Среди всех типов первичных преобразователей важнейшей разновидностью являются преобразователи для измерения температуры. Это связано с тем, что многие процессы в природе, науке и в повседневной жизни человека регулируются температурой. Согласно статистическим данным около 40% всех измерений приходится на температурные. В отдельных областях промышленности эта доля значительно выше. Так в энергетике, температурные измерения составляют до 70% общего количества измерений. Принцип работы термопреобразователей сопротивления основан на температурной зависимости электрического сопротивления. Конструктивно термопреобразователь сопротивления состоит из чувствительного элемента, защитной арматуры и соединительных выводов. Высокими метрологическими характеристиками (взаимозаменяемость, линейность, широкий диапазон температур измерения) обладают термопреобразователи сопротивления на основе металлов. Поэтому они наиболее широко используются в различных системах измерения.

На современном этапе развития техники сформировались новые требования, предъявляемые к термопреобразователям, такие как, минимальные габариты и масса, малая инерционность, линейная характеристика преобразования, долговременная стабильность метрологических характеристик, большой ресурс и относительно невысокая стоимость. В этих условиях возникла необходимость разработки и изготовления нового поколения термопреобразователей сопротивления, отвечающих всем этим требованиям, на основе возможностей пленочной технологии. При этом на первый план выдвинулись вопросы выбора материалов, удовлетворяющих возросшим требованиям, и поиска новых технологий изготовления. Анализ отечественной и зарубежной литературы и собственные предварительные исследования показали, что по своим электрофизическим свойствам перспективными для термометрии являются алюминий, в качестве материала пленочного термочувствительного слоя, и его анодный оксид, в качестве материала пассивирующего покрытия. Поэтому настоящая работа, посвященная разработке конструкции,

технологии изготовления и исследованию электрофизических характеристик пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия, является актуальной.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в лаборатории НИЛ 4.2 “Гибридных интегральных микросхем” Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках исследовательских проектов Министерства образования РБ (ГБЦ 99-3012, ГБЦ 01-3070), Республиканской научно-технической программы “Информатика” (задание 04.01.01, ГБЦ 99-8005), договора с ЗАО «АТЛАНТ» (N 97-1037), ГП НИИ ЭВМ (N 96-4003) и подтверждена актами об использовании результатов диссертационной работы.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы явилось исследование и установление закономерностей изменения электрофизических свойств термочувствительного слоя из алюминия, изучение и выявление особенностей формирования алюминиевых структур методом анодирования для последующей разработки пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

- провести сравнительный анализ существующих конструктивно-технологических методов создания пленочных термопреобразователей сопротивления на основе металлов, определить основные проблемы;
- исследовать процесс формирования и электрофизические свойства термочувствительного слоя на основе пленок алюминия;
- исследовать механические напряжения в алюминии, возникающие при формировании пористого анодного оксида и изучить их влияние на скорость роста пористого анодного оксида;
- исследовать влияние маскирующего покрытия, уровня механических напряжений в пленке алюминия, материала подложки на формирование профиля пленочного термочувствительного слоя методом анодирования;
- разработать базовую конструкцию и исследовать температурные свойства пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия;

- рассчитать допустимую погрешность измерения температуры термопреобразователями сопротивления на основе анодированного алюминия.

Объект и предмет исследования. Композиция материалов алюминий – анодный оксид алюминия.

Методология и методы проведенного исследования. Для исследования процессов вакуумного осаждения пленок алюминия и формирования пленочных термочувствительных структур из алюминия методом анодирования использовались методы электронной микроскопии, для оценки влияния размерных эффектов в алюминии на изменение электрических свойств использовался метод измерения электрического сопротивления при гелиевых температурах.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Установлена взаимосвязь между величиной механических напряжений в алюминии для области упругой деформации и скоростью роста пористого анодного оксида алюминия. Рассчитано, что для величины механических напряжений растяжения в алюминии $2 \cdot 10^7$ Па (предел упругости), скорость роста пористого анодного оксида по сравнению с недеформируемым состоянием алюминия уменьшается на 17%.

2. Выявлено влияние температурного коэффициента линейного расширения материала подложки на профиль и электрическое сопротивление измерительного резистора, формируемого методом анодирования из пленок алюминия, полученных электронно-лучевым испарением при температуре подложек 150°C . Установлено, что форма профиля алюминиевой структуры зависит от величины термических механических напряжений в пленке.

3. Установлено, что край маски является дополнительным концентратором механических напряжений в прилегающих к краю областях алюминия. Глубина зоны действия дополнительных механических напряжений в пленке порядка двух толщин маски. Определена зависимость скорости бокового анодирования алюминия под маску в зоне краевого эффекта от толщины и уровня механических напряжений в маске, и напряжения анодирования.

4. Установлено, что термопреобразователи сопротивления из алюминия 99,9% чистоты в диапазоне температур $-60 \dots +160^\circ\text{C}$ имеют

линейную зависимость сопротивления с максимальным отклонением не более $0,02$ °С.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

1. Установлено, что операция формирования разделительного диэлектрика и пассивирующего покрытия методом локального пористого анодирования пленки алюминия, не приводит к увеличению механических напряжений в термочувствительном слое и обеспечивает необходимую стабильность электрических параметров пленочного термопреобразователя сопротивления в диапазоне температур $-60...+160$ °С. Это обусловлено близкими значениями модулей упругости алюминия (термочувствительного слоя) и его пористого анодного оксида (разделительного и пассивирующего слоев), что делает сочетание этих материалов перспективным в термометрии.

2. Разработан технологический процесс изготовления пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия с использованием интегральной технологии, позволяющий получать номинальное сопротивление 100 Ом на площади 2×5 мм².

3. Разработан метод определения типа внутренних механических напряжений в алюминиевых структурах, сформированных методом анодирования, основанный на результатах измерения величины их электрического сопротивления на подложках, отличающихся значениями температурного коэффициента линейного расширения.

4. Установлена температурная зависимость изменения электрического сопротивления и величина ее отклонения от линейности для пленочных термопреобразователей сопротивления из анодированного алюминия в диапазоне температур $-60...+160$ °С.

5. Определена зависимость допустимой погрешности измерения температуры от абсолютного ее значения для термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Минимальная толщина пленки алюминия, необходимая для формирования термочувствительного слоя с воспроизводимыми электрическими свойствами методом электронно-лучевого испарения, составляет 500 нм.
2. Установленные закономерности и характер влияния механических напряжений в алюминии на скорость роста пористого

анодного оксида (растягивающие – уменьшают, сжимающие – увеличивают).

3. Использование подложки из поликора со значением температурного коэффициента линейного расширения ($6,9 \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$) при формировании пленочных алюминиевых структур методом анодирования позволяет при одинаковой топологии увеличить электрическое сопротивление на 28% по сравнению с той же величиной на подложке с температурным коэффициентом линейного расширения ($3,2 \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$, кремний) и для номинального сопротивления 100 Ом уменьшить геометрические размеры.

4. Формирование пассивирующего и разделительного диэлектрика на основе пористого анодного оксида алюминия со значением модуля упругости близким к алюминию, не увеличивает величину механических напряжений в алюминиевом термочувствительном слое и обеспечивает необходимую стабильность электрических параметров пленочных термопреобразователей.

5. Использование алюминия в качестве материала термочувствительного слоя пленочного термопреобразователя позволяет улучшить линейность температурной характеристики сопротивления до значения $0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$ в диапазоне температур $-60 \dots +160 \text{ } ^\circ\text{C}$ и обеспечить повышение точности измерения температур.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в его непосредственном участии в проведении экспериментальных исследований, в разработке в диссертации теоретических представлений, в анализе, обобщении и интерпретации полученных результатов, в разработке конструкции, технологии изготовления и исследовании электрических характеристик пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на ежегодных Международных научно-технических конференциях “Современные средства связи” (Нарочь 1994, 1996, 1997, 1999, 2000 г.), на конференции “Новые информационные технологии в науке и производстве” (Минск, 1998 г.), на ежегодных XI и XII научно-технических конференциях с участием зарубежных специалистов “Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления” (Москва, Россия, 1999, 2000), на XIII и

XIV Международных научно-технических конференциях по проблемам микросистемной и сенсорной техники (Миттвейда, Германия, 1998, 2000 г.), на III Международном Симпозиуме “Electrochemical Microsystem Technologies” (Гармиш-Партенкиршен, Германия, 2000 г.), на 38-ой ежегодной сессии Немецкого общества по гальванике и технике обработки поверхности в рамках 15-го Всемирного конгресса INTERFINISH-2000 (Гармиш-Партенкиршен, Германия, 2000 г.), на 11-ом международном семинаре по прикладному анализу поверхности АОФА-11 (Лейпциг, Германия, 2000 г.).

Опубликованность результатов. По материалам диссертации опубликовано 10 статей в научно-технических журналах, 6 статей в сборниках материалов конференций и 3 тезиса докладов в сборниках тезисов конференций. Общее количество опубликованных материалов составляет 67 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации составляет 130 страниц, в том числе 50 рисунков на 34 страницах, 11 таблиц на 9 страницах, приложения на 3 страницах и библиографии из 116 наименований на 8 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель и основные задачи, изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дано описание современного этапа развития термометрии и использования электрических средств измерения температуры. Приведены требования к основным параметрам термопреобразователей сопротивления, к которым относятся инерционность, класс точности и термочувствительность, определяющие точность измерения температуры.

Проведен анализ конструктивно-технологических методов создания пленочных термопреобразователей сопротивления. Показано, что топология измерительных резисторов при использовании термочувствительного материала с низким и высоким значением удельного поверхностного сопротивления имеет свои отличительные особенности, заключающиеся в

конструкции подгоночных секций и возможном допуске на подгонку. Отмечено, что такие параметры термопреобразователей сопротивления, как температурный коэффициент сопротивления и линейность температурной характеристики, определяются свойствами материала, используемого в качестве термочувствительного слоя. Показано, что при изготовлении пленочных термопреобразователей сопротивления наиболее труднодостижимой метрологической характеристикой является температурный коэффициент сопротивления. Об этом свидетельствует большое количество работ посвященных выбору режимов и оптимизации методов формирования термочувствительного слоя. Установлена важность материала и толщины защитного диэлектрического слоя, используемого для пассивации термочувствительного слоя измерительного резистора для обеспечения надежной работы и точности измерения температуры. Рассмотрены конструкции пленочных термопреобразователей сопротивления, обеспечивающих повышенную механическую прочность соединения проволочных выводов с контактными площадками.

Проведен сравнительный анализ характеристик материалов термочувствительного слоя на основе металлов. Сделан вывод о перспективности использования алюминия по таким параметрам, как термочувствительность и линейность. В связи с этим обоснована необходимость проведения углубленных исследований и разработки процесса изготовления пленочных термопреобразователей сопротивления на основе алюминия. В заключении на основе проведенного анализа конструктивно-технологических решений создания пленочных термопреобразователей сопротивления сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены вопросы формирования, выбора режимов осаждения и термической обработки пленок алюминия, выбраны тип подложки и материалы, обеспечивающие технологичность изготовления пленочных термопреобразователей сопротивления, рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением воспроизводимости электрических свойств пленок алюминия, приведено описание основных методов и оборудования для испытания электрических свойств пленочных термопреобразователей.

Сформулированы требования к выбору материала подложки для пленочных термопреобразователей сопротивления. На основе анализа сравнительных характеристик различных типов подложек и особенностей работы пленочного термопреобразователя сопротивления из алюминия выбрана подложка на основе поликора с содержанием Al_2O_3 не менее 99,0% и толщиной 0,5 мм. Обосновано использование слоя оксида тантала,

сформированного термическим окислением пленки тантала для сглаживания рельефа поверхности подложки и образования барьера, ограничивающего диффузию примесей из подложки. Рассмотрены преимущества использования алюминия в качестве материала термочувствительного слоя. Показана возможность формирования электрохимическим анодированием рисунка межсоединений из алюминия. Отмечены особые свойства анодного оксида алюминия (низкая растворимость кислорода в алюминии), делающие его наилучшим материалом для защиты проводящей пленки алюминия от влияния внешних воздействий. Сформулированы основные требования к условиям осаждения пленок алюминия, необходимые для формирования термочувствительного слоя. Обоснован выбор метода электронно-лучевого испарения для получения пленок алюминия с высокой степенью чистоты и воспроизводимостью электрических свойств. В качестве слоя для лужения контактных площадок измерительного резистора на основе алюминия выбраны пленки никеля толщиной не менее 80 нм. Приведено описание режимов осаждения слоев металлов, используемых для изготовления пленочного термопреобразователя сопротивления (тантал, алюминий, никель) методами электронно-лучевого испарения. Для осаждения пленок алюминия в установке электронно-лучевого испарения «Оратория-9» с планетарным механизмом вращения и инфракрасным нагревом подложек использовался следующий режим: нагрев подложек до 140°C и выдержка при этой температуре в течение 30 минут; остаточное давление в вакуумной камере на уровне $4 \cdot 10^{-4}$ Па; ток луча - 1,25 А; ускоряющее напряжение потока электронов - 8кВ; сканирование луча по поверхности материала-заготовки на площади около $1 \cdot 10^{-4}$ м²; скорость осаждения - 3 нм/с.

Методом электронной микроскопии проведены исследования влияния термообработки на структуру пленок алюминия. Установлено, что используемый режим электронно-лучевого испарения позволяет получать пленки алюминия с крупнозернистой структурой, а дополнительный отжиг при температуре 500°C приводит к упорядочению внутренней структуры пленки с увеличением размера зерна в среднем в 1,5 раза.

Важнейшей электрической характеристикой, определяющей электропроводность металлов, является длина свободного пробега электронов. Влияние структурного совершенства пленок алюминия, полученных методом электронно-лучевого испарения, на электропроводность и, следовательно, длину свободного пробега электронов было исследовано по значению их остаточного электрического сопротивления при гелиевых температурах. На основе проведенных исследований было установлено, что при толщине пленки алюминия свыше

500 нм отсутствует влияние поверхности пленки на электропроводность. Проведен анализ влияния внутренних механических напряжений в пленках алюминия на воспроизводимость значений температурного коэффициента сопротивления. Показано, что уровень механических напряжений в алюминиевых пленках может оказать влияние на воспроизводимость электрических параметров пленочных термопреобразователей.

Рассмотрены вопросы формирования тонких пленок анодного оксида на алюминии и выбора режимов электрохимического анодирования. Описаны методы и оборудование, используемые при измерениях электрических характеристик пленочных термопреобразователей.

В конце главы на основе проведенных исследований сформулированы основные требования, предъявляемые к процессу формирования пленок алюминия электронно-лучевым испарением, для обеспечения требуемой воспроизводимости электрических параметров пленочных термопреобразователей сопротивления.

В третьей главе проведены исследования механических напряжений в алюминии, возникающих при образовании анодного оксида, и рассмотрено их влияние на процесс анодирования. Ввиду присутствия в пленках алюминия одновременно структурных и термических компонент механических напряжений, разделить которые в процессе исследований практически невозможно, обоснована возможность рассмотрения напряженно-деформируемого состояния и расчета механических напряжений в слоях анодированного алюминия на примере пластины алюминия. Проведен анализ результатов дилатометрических измерений коэффициентов теплового расширения анодированного алюминия для образцов различной толщины. Установлено, что при одинаковой толщине анодного оксида в симметричной структуре $Al_2O_3-Al-Al_2O_3$ величина возникающих напряжений в алюминии обратно пропорциональна толщине слоя алюминия. На основе данных дилатометрических измерений рассчитаны механические напряжения в слое алюминия разной толщины для системы $Al_2O_3-Al-Al_2O_3$ с толщиной оксида 100 мкм. Получено, что при увеличении толщины слоя алюминия от 0,6 мм до 3,7 мм уровень структурных механических напряжений уменьшается от $22,9 \cdot 10^6$ Па до $2,68 \cdot 10^6$ Па. Причиной возникновения структурных механических напряжений в алюминии при образовании анодного оксида является объемный рост оксида и связанное с этим затруднение свободного удлинения за счет механической связи между оксидом и алюминием. Исследовано влияние упругой деформации в алюминии на процесс анодного окисления. Рассмотрены вопросы влияния механических

напряжений в области упругой деформации на изменение электрофизических свойств алюминия. Показано, что при возникновении механических напряжений растяжения в алюминии происходит относительное увеличение объема образца, как следствие, уменьшается концентрация электронов проводимости и их энергия Ферми. Получены количественные соотношения, показывающие, что изменение энергии Ферми электронов прямо пропорционально уровню механических напряжений в алюминии. Установлена связь кинетики роста анодной оксидной пленки с уровнем внутренних механических напряжений в алюминии. Воздействие растягивающих механических напряжений в алюминии при анодировании по сравнению с недеформируемым состоянием приводит к увеличению потенциала электрода со стороны алюминия на величину пропорциональную изменению энергии Ферми электронов. Это приводит к соответствующему уменьшению падения напряжения на слое анодного оксида.

Сделана оценка влияния механических напряжений растяжения в алюминии величиной $2 \cdot 10^7$ Па на кинетику процесса его анодирования. Рассчитано, что в этом случае электрическое поле в слое оксида алюминия уменьшается на величину $2,25 \cdot 10^6$ В/м. Это приводит к уменьшению плотности тока анодирования по сравнению с алюминием без механических напряжений на 17%.

Получены количественные соотношения для зависимости кинетики роста анодного оксида от толщины алюминия, которые могут быть использованы для проведения экспериментальных исследований по влиянию различного уровня механических напряжений. Приведены результаты исследований кинетики роста анодного оксида для алюминиевых образцов пяти различных толщин (0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мм), подтверждающие правильность полученных в этой главе количественных соотношений.

В четвертой главе приведены результаты исследований процесса формирования измерительного резистора из алюминия методом анодирования. Рассмотрены факторы, определяющие уровень внутренних механических напряжений в пленке алюминия (геометрия и материал маскирующего покрытия, температурный коэффициент линейного расширения подложки) и их влияние на процесс получения анодированием измерительного резистора с заданным электрическим сопротивлением. Определены оптимальные технологические условия достижения планируемых параметров пленочных термопреобразователей

сопротивления. Рассмотрены вопросы формирования анодных оксидных пленок на алюминии.

Исследовано влияния маски на профиль анодирования пленки алюминия на границе край маски-алюминий. Показано, что боковой профиль анодирования пленки алюминия под защитную маску, полученный по окончании процесса пористого анодирования, отражает результат воздействия механических напряжений действующих в пленке. Установлена прямо пропорциональная зависимость уровня механических напряжений в алюминии у края маски от величины механических напряжений и толщины маски. Рассмотрены возможные варианты профиля бокового анодирования в зависимости от величины механических напряжений в пленке алюминия. Представлены результаты электронно-микроскопических исследований сколов поперечного сечения алюминиевых структур из пленок толщиной 500 и 300 нм, показывающие варианты формируемого бокового профиля. Сделан вывод, что наряду с напряжением анодирования, материал защитной маски существенно влияет на боковой профиль алюминиевых структур, формируемых локальным анодированием. Проведено теоретическое исследование влияния уровня механических напряжений на зависимость сопротивления измерительного резистора из алюминия, формируемого методом анодирования. Получено, что сопротивление формируемого анодированием измерительного резистора (при условии, когда ширина значительно больше высоты) обратно пропорционально уровню механических напряжений в алюминии. В случае преобладания в пленке алюминия термических механических напряжений величина сопротивления обратно пропорциональна разности значений температурного коэффициента линейного расширения алюминия и подложки. Проведены экспериментальные исследования влияния материала подложки на электрическое сопротивление измерительного резистора из алюминия. Для проведения исследований были использованы подложки из поликора и монокристаллического кремния n -типа ориентации (100) со слоем термического оксида кремния на поверхности. Показано, что отношение средних значений сопротивлений измерительного резистора на таких подложках равно 1,28. Полученный экспериментальный результат близок к рассчитанному с использованием справочных данных для разности значений температурных коэффициентов линейного расширения алюминия и материала подложки (1,22). Это свидетельствует о доминировании компоненты термических механических напряжений по сравнению со структурными, связанными с образованием анодного оксида. С использованием электронной микроскопии проведено исследование массопереноса в пленке алюминия толщиной 3000 нм при двухстадийном

сквозном локальном анодировании. Показано, что массоперенос в пленке алюминия возникает из-за краевого эффекта бокового анодирования алюминия под маску. Установлено, что длину зоны массопереноса в пленке алюминия при сквозном локальном анодировании можно принять равной толщине пленки. В конце главы по результатам проведенных исследований разработаны рекомендации для выбора конструкции и технологии изготовления пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия, позволяющие обеспечить воспроизводимость их электрических параметров.

В пятой главе представлены разработанная конструкция и технологический процесс изготовления пленочного термопреобразователя сопротивления на основе анодированного алюминия. Приведены результаты испытаний электрических параметров термопреобразователей сопротивления. Рассмотрены конкретные варианты предлагаемых конструкций для проведения измерений в различных условиях. Описан пример схемной реализации электронного медицинского термометра с использованием разработанных термопреобразователей.

Приведены результаты расчета топологии пленочного измерительного резистора из алюминия. Учет особенностей рельефа подложки из поликора и рекомендаций по выбору конструкции, рассмотренных в предыдущей главе, позволил определить для толщины алюминия значение 1,5 мкм и для ширины измерительного резистора значение 10 мкм. Показано, что максимальная плотность тока в рассчитанной конструкции пленочного термопреобразователя составляет $1,35 \cdot 10^4$ А/см² (рабочий ток 2 мА), что намного меньше значения 10^6 А/см², при котором проявляется эффект электромиграции в пленках алюминия.

Разработанная топология пленочного измерительного резистора, включающая пошаговые подгоночные секции, позволяет корректировать номинальное сопротивление до заданного значения 100 Ом в диапазоне сопротивлений от 94 Ом с точностью $\pm 0,12$ Ом перерезанием необходимого числа перемычек подгоночных секций с помощью луча лазера.

Описан разработанный технологический маршрут, используемый для изготовления пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия. Исследовано рассеяние значений электрического сопротивления пленочных термопреобразователей на подложке из поликора. Показано, что величина электрического сопротивления в этом случае имеет рассеяние в пределах не более $\pm 5\%$ от среднего значения и описывается симметричной функцией рассеяния. Методом электронной микроскопии изучен профиль и рабочая поверхность

пленочного термопреобразователя сопротивления на основе анодированного алюминия.

Проведено исследование электрических свойств пленочных термопреобразователей. По точке таяния льда и кипения воды измерены значения сопротивлений при 0 (R_0) и 100 (R_{100}) градусах Цельсия. Для пленки алюминия толщиной 1,5 мкм для отношения R_{100}/R_0 получено значение равное 1,450. Исследована температурная зависимость сопротивления в медицинском диапазоне температур +35...+40°C. Установлено, что в этом диапазоне отклонение от линейности составляет не более $\pm 0,01$ °C и величина изменения сопротивления на 1°C составляет 0,45 Ом. Приведены результаты исследований температурной зависимости сопротивления в интервале температур -60...+160 °C, полученные в термостате фирмы «Табай Мини Сабзеро» (Япония) модели МС71. Установлено, что в этом температурном диапазоне значение отклонения от линейности температурной характеристики сопротивления не превышает $\pm 0,02$ °C при том же значении термочувствительности. Рассмотрены вопросы, касающиеся погрешности градуировки термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия. Показано, что расчет допустимой погрешности (ΔT) в градусах при значении температуры измерения (T) может осуществляться по следующей формуле:

$$\Delta T = \pm(0,3 + 3,6 \cdot 10^{-3} T)$$

Предложены четыре конструкции пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия для различных условий измерения. Представлена структурная схема реализации электронного термометра с применением разработанного типа термопреобразователя сопротивления и описан принцип его работы.

В выводах по главе отмечено, что разработанная конструкция пленочного термопреобразователя сопротивления на основе анодированного алюминия успешно прошла испытания на заводе «Электроника» НПО ИНТЕГРАЛ и в ГП НИИ ЭВМ, что подтверждено соответствующими актами об использовании диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Минимальная толщина пленки алюминия, необходимая для формирования термочувствительного слоя с воспроизводимыми электрическими свойствами методом электронно-лучевого испарения, составляет 500 нм [9].

2. В алюминии при образовании на его поверхности анодной оксидной пленки, возникают структурные растягивающие механические

напряжения, величина которых находится в границах зоны упругой деформации (предел упругости алюминия - $2,0 \cdot 10^7$ Па). Влияние механических напряжений растяжения в алюминии на процесс анодирования проявляется в уменьшении скорости роста анодного оксида. Рассчитано, что для величины механических напряжений растяжения в алюминии $2 \cdot 10^7$ Па (предел упругости), скорость роста пористого анодного оксида по сравнению с недеформируемым состоянием алюминия уменьшается на 17%. [10,13-15,17-19].

3. Использование в качестве пассивирующего разделительного диэлектрика пористого анодного оксида алюминия со значением модуля упругости близким к алюминию ($70,0 \cdot 10^9$ Па), не приводит к увеличению механических напряжений в алюминиевых структурах. Это позволяет для пленочных термопреобразователей на основе анодированного алюминия обеспечить необходимую стабильность электрических параметров [1,5].

4. Температурный коэффициент линейного расширения материала подложки оказывает влияние на профиль и величину электрического сопротивления алюминиевых структур, формируемых методом анодирования, из пленок алюминия, полученных электронно-лучевым испарением при температуре подложек 150° С. Показано, что в этом случае формируемый профиль зависит от величины действующих в пленках алюминия термических механических напряжений [7,8].

5. С использованием принципов интегральной технологии разработан технологический процесс изготовления пленочных термопреобразователей сопротивления на основе анодированного алюминия с номинальным сопротивлением 100 Ом на площади $2,5 \text{ мм}^2$. Показано, что применение алюминия в качестве материала термочувствительного слоя приводит к улучшению линейности температурной характеристики сопротивления до значения $0,02^{\circ}$ С в диапазоне температур $-60 \dots +160^{\circ}$ С и обеспечивает повышение точности измерения температур [2-4,6,11,12,16].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статья и материалы конференций

1. Печатные платы на металлических основаниях/ В.А. Сокол, А.И. Воробьева, И.А. Врублевский, В.М. Паркун // Зарубежная радиоэлектроника. - 1991. - №5. - С.43-65.

2. Воробьева А.И., Врублевский И.А. Применение алюминиевых подложек в качестве основания для пленочных термометров сопротивления // Современные технологии гибридных интегральных микросхем включая элементы сверхпроводниковой технологии: Материалы III международной

научно-технической конференции, Нарочь, 26-30 сентября 1994 г./ БГУИР.-Минск,1994.-С.105-107.

3. Vorobiova A.I., Vrublevsky A.I. The increase of the resistance film metallic thermal converter sensitivity due to Al substrate utilization // Turkish Journal Physics.- 1996.-Vol.20,№4.-P.403-405.

4. Воробьева А.И., Врублевский И.А., Паркун В.М. Исследование и разработка алюминиевых температурных сенсоров сопротивлением 500 Ом // Известия Белорусской Инженерной Академии. – 1996.- №1.- С.26-28.

5. Врублевский И.А. Исследование температурной стабильности пленочных алюминиевых термопреобразователей сопротивления // Известия Белорусской Инженерной Академии. – 1997.- №3.- С.68-69.

6. Сокол В.А., Врублевский И.А., Паркун В.М. Пленочные алюминиевые термопреобразователи сопротивления // Новые информационные технологии в науке и производстве: Материалы научно-технической конференции, 25-27 ноября 1998 г./ БГУИР.-Минск,1998.-С.343-345.

7. Wrublewski I., Parkun W. Die elektrischen Eigenschaften von Aluminium-Schicht-Temperatursensoren // Journal of the University of Applied Sciences Mittweida (Germany).-1998.-№5.-S.31-34.

8. Врублевский И.А., Паркун В.М., Казанцев А.П. Пленочные алюминиевые термопреобразователи сопротивления // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XI международной научно-технической конференции, 25-31 мая 1999 г./ МГИЭМ.-Москва,1999.-С.93-94.

9. Короткевич А.В., Врублевский И.А., Плешкин В.А. Исследование низкотемпературных свойств тонких пленок алюминия // Известия Белорусской Инженерной Академии. – 1999.- №1.- С.5-9.

10. Врублевский И.А., Паркун В.М., Сокол Л.А. Исследование пластической деформации в пленке алюминия при локальном анодном окислении // Известия Белорусской Инженерной Академии. – 1999.- №1.- С.15-18.

11. Врублевский И.А., Паркун В.М., Казанцев А.П. Погрешности измерения температуры термопреобразователями сопротивления на основе алюминия // Известия Белорусской Инженерной Академии. – 1999.- №1.- С.18-19.

12. Пленочные алюминиевые терморезисторы для чувствительных элементов медицинского термометра. В.А. Сокол, И.А. Врублевский, В.М. Паркун, А.П. Казанцев // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Материалы XII международной научно-технической конференции, 25-31 мая 2000 г./ МГИЭМ.-Москва, 2000.-С.130-131.

13. Врублевский И.А., Паркун В.М., Томилин В.Ф. Исследование влияния механических напряжений в пленочных термопреобразователях сопротивления на погрешность измерения температуры // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: Материалы докладов международной научно-технической конференции, 25-29 сентября 2000 г./ БГУИР.-Минск,2000.-С.133-136.

14. Врублевский И.А., Паркун В.М. Исследование зависимости кинетики роста анодного оксида от толщины пластины алюминия // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: Материалы докладов международной научно-технической конференции. 25-29 сентября 2000 г./ БГУИР.-Минск,2000.-С.203-206.

15. Исследование напряженно-деформируемого состояния в анодированном алюминии / В.М. Паркун, И.А. Врублевский, А.П. Казанцев, К.В. Москвичев // Известия Белорусской Инженерной Академии. – 2000.- №2.- С.78-79.

16. Wrublewski I., Parkun W., Moskvitschev K. Aluminium-Schicht-Temperatur Sensoren als elektronischen, medizinisch Thermometer // Journal of the University of Applied Sciences Mittweida (Germany).-2000.-№10.-S.39-43.

Тезисы докладов

17. Wrublewski I., Parkun V. The Al mechanical stress effect on the ion transfer in the oxide layer under anodic oxidation // EMT-3: Abstracts of 3rd Int.Symposium, Electrochemical Microsystem Technologies, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 10-15 September 2000/ Garmisch-Partenkirchen, Germany,2000.-P.104.

18. Vrublevsky I., Parkun V. Der Effekt der mechanischen Spannung des Aluminiums auf den Ionentransfer in der Oxidschicht bei der anodischen Oxidation // INTERFINISH-2000: Kurzfassungen der Vortraege INTERFINISH 2000, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 10.-15. September 2000/ Garmisch-Partenkirchen, Germany,2000.-S.126.

19. Wrublewski I., Parkun V. Einfluss der strukturellen mechanischen Spannungen im Aluminium auf die Formierung der Mikrostruktur der poesen anodischen Oxides // AOFA 11: Beitragskurzfassungen AOFA 11, Leipzig, Germany, 24.-28. September 2000/ Leipzig, Germany,2000.-S.105.

РЭЗЮМЭ

Урублеўскі Ігар Альфонцавіч, Пленачныя тэрмаператваральнікі супраціўлення на падставе анадзіраваннага алюмінію

Ключавыя словы: анодныя аксідныя пленкі, пленкі алюмінію, тэрмаператваральнік супраціўлення, вымярэння тэмпературы.

Дысертацыя прысвечана даследаванню і выяўленню заканамернасцей змянення электрафізічных уласцівасцей тэрмаадчувальнага слою з алюмінію, вывучэнню і выяўленню асаблівасцей фарміравання алюмініявых структур метадам анадзіравання дзеля наступнай распрацоўцы пленачных тэрмаператваральнікаў супраціўлення.

Даследванні працэсаў вакуумнага асаджэння пленак алюмінію і фарміравання пленачных тэрмаадчувальных структур з алюмінію метадам анадзіравання праводзіліся метадам электроннай мікраскапіі, дзеля ацэнкі уплыву размерных эфектаў у алюмінію на змяненні электрычных уласцівасцей выкарыстоўваўся метада вымярэння электрычнага супраціўлення пры геліевых тэмпературах.

З дапамогай электронна-мікраскапічнага даследавання павярхоўнасці пленак алюмінію вызначына, што метада электронна-прамяневага выпарвання алюмінію пры току прамяня 1,25 А і скорасцы асаджэння 3 нм/с і наступнага адпалу дазваляе атрымаваць пленкі з буйназарністай структурай, неабходнай дзеля забяспячэння стабільнасці электрычных уласцівасцей тэрмаадчувальнага слою. Пры тэмпературы вадкага гелія даследавана уплысце размерных эфектаў у пленках алюмінію на велічыню электрычнага супраціўлення. Выяўлена, што мінімальная таўшчыня пленкі алюмінію, неабходная пры стварэнні тэрмаадчувальнага слою з узнаўляльнымі электрычнымі уласцівасцямі складае 500 нм. На падставе вынікаў электроннай мікраскапіі і вымярэння электрычнага супраціўлення пленачных структур зробленых метадам навілетнага порыстага анадзіравання алюмінію на розных падлогах, выяўлена уплысце тэмпературнага каэфіцыента лінейнага пашырэння матэрыялу падлогі на профіль і велічыню супраціўлення тэрмаадчувальных структур.

Распрацавана базавая канструкцыя і тэхналагічны працэс стварэння пленачных тэрмаператваральнікаў супраціўлення на падставе анадзіраваннага алюмінію з намінальным супраціўленнем 100 Ом на плошчы 2·5 мм². З вынікаў вымярэння электрычных параметраў выяўлена, што у дыяпазоне тэмператур -60...+160 °С тэрмаператваральнікаў супраціўлення з алюмінію 99,% чыстаты маюць лінейную залежнасць супраціўлення з максімальным адхіленнем не болей за 0,02 °С. Гэтыя уласцівасці дазваляюць узяць дакладнасць вымярэння тэмпературы.

РЕЗЮМЕ

Врублевский Игорь Альфонсович, Пленочные термопреобразователи сопротивления на основе анодированного алюминия

Ключевые слова: анодные оксидные пленки, пленки алюминия, термопреобразователь сопротивления, измерение температуры.

Диссертация посвящена исследованию и установлению закономерностей изменения электрофизических свойств термочувствительного слоя из алюминия, изучению и выявлению особенностей формирования алюминиевых структур методом анодирования для последующей разработки пленочных термопреобразователей сопротивления.

Для исследования процессов вакуумного осаждения пленок алюминия и формирования пленочных термочувствительных структур из алюминия методом анодирования использовались методы электронной микроскопии, для оценки влияния размерных эффектов в алюминии на изменение электрических свойств использовался метод измерения электрического сопротивления при гелиевых температурах.

С помощью электронно микроскопических исследований поверхности пленок алюминия установлено, что метод электронно лучевого испарения алюминия при токе луча 1,25 А и скорости осаждения 3 нм/с с последующим отжигом позволяет получать пленки с крупнозернистой структурой, необходимой для обеспечения стабильности электрических свойств термочувствительного слоя. При температуре жидкого гелия исследовано влияние размерных эффектов в пленках алюминия на величину электрического сопротивления. Установлено, что минимальная толщина пленки алюминия, необходимая при изготовлении термочувствительного слоя с воспроизводимыми электрическими свойствами, составляет 500 нм. На основе результатов электронной микроскопии и измерений электрического сопротивления пленочных структур, формируемых методом сквозного пористого анодирования алюминия на различных подложках, выявлено влияние ТКЛР материала подложки на профиль и величину сопротивления термочувствительных структур.

Разработана базовая конструкция и технологический процесс изготовления пленочных термопреобразователей на основе анодированного алюминия с номинальным сопротивлением 100 Ом на площади 2·5 мм². Установлено, что термопреобразователи сопротивления из алюминия 99,9% чистоты в диапазоне температур -60...+160 °С имеют линейную зависимость сопротивления с максимальным отклонением не более 0,02 °С. Такие свойства позволяют повысить точность измерения температуры.

SUMMARY

Igor A. Vrublevsky, Film temperature sensors based on anodic Al oxide.

Key words: anodic oxide films, aluminum films, temperature sensors, temperature measurements.

The thesis is devoted to investigation of regularity for electro-physical properties variation of thermo-sensitive Al layer, examination and characterizing Al structures growth by means of anodizing intended for consecutive development of film temperature sensors.

Electronic microscopy was applied to investigate processes of Al films vacuum deposition and formation of Al film thermo-sensitive structures of by means of anodizing, and the stress measurement technique under helium temperatures was used to assess impact of dimensions effects in Aluminum on electrical parameters variation.

In the course of electronic microscopy investigations of Al films surface it was observed that the electronic beam evaporation of Aluminum with beam current of 1.25A and deposition rate of 3nm/s with further baking yields films with large-grain structure, required to provide reliability of electrical properties in the thermo-sensitive layer. The impact of dimensions effects in Al films on the stress value was studied under the temperature of liquid helium. It was determined that the minimal Al film thickness required to form a thermo-sensitive layer with reproducible electrical properties is 500 nm.

Based on electronic microscopy results and electrical stress measurements of film structures, formed by means of through porous Al anodic coating of various substrates it was established that TLEF of the substrate material has significant influence on the profile and resistance value of thermo-sensitive structures.

The basic design and technological process were developed to manufacture film temperature sensors based on anodized Aluminum with rated resistance of 100 Ohm over the area of 1.5 mm². Based on the electrical parameters measurement results it was discovered that temperature sensors of 99.9% pure Aluminum have linear resistance dependence with maximum deviation not exceeding 0.02 °C in the temperature range of -60 to +160 C. These properties help enhancing the temperature measurement accuracy.

ВРУБЛЕВСКИЙ ИГОРЬ АЛЬФОНСОВИЧ

**ПЛЕНОЧНЫЕ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ АНОДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ**

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на
квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	18.07.2001.	Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная.	Печать ризографическая	Усл.печ.л. 1,39.
Уч.-изд.л. 1,0.	Тираж 90 экз.	Заказ 375.

Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”

Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП N 156
220027, Минск, ул. П.Бровки, 6