

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.3.049.772.1

КОРОТКЕВИЧ
Александр Васильевич

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ
И ЕГО ОКСИДОВ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 05.27.01 –Твердотельная электроника,
микроэлектроника и наноэлектроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2000

Работа выполнена в

Белорусском государственном университете
информатики и радиоэлектроники

Научный руководитель -

кандидат технических наук,
доцент Б.С.Колосницын

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор Л.М.Лыньков

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Соболев В.Р.

Оппонирующая организация -

НИИ радиоматериалов, г. Минск

Защита состоится " 2 " марта 2000 г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники по адресу: 220027, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, БГУИР, 1 уч. корпус, тел. 239-89-89.

БІБЛІОТЕКА
Беларускага дзяржаўнага
універсітэта інфармацыі
і радыёэлектронікі

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время наблюдается устойчивый рост интереса к приборам и устройствам для криогенных температур. Это обусловлено тем, что с понижением температуры свойства твердых тел существенно изменяются, а при достаточно низких температурах (менее 90 К) возникает целый ряд явлений и эффектов, на основе которых возможно создание качественно новых приборов и устройств с характеристиками на несколько порядков лучше, чем у известных приборов комнатного диапазона температур. Так, например, вымораживание примеси в полупроводнике при уменьшении тепловой энергии решетки ниже энергии ионизации примеси открывает пути для приема излучений и изображений в недоступных фотоприемнику и приборам с зарядовой связью участках спектра, вплоть до дальнего ИК диапазона. Глубокое охлаждение решетки твердого тела приводит к значительному уменьшению тепловых шумов, являющихся принципиальным ограничением на пути к повышению чувствительности электронных приборов, особенно в СВЧ и ИК диапазонах.

До последнего времени все исследования в области криоэлектроники были направлены на разработку активных элементов, датчиков (приборов на эффекте Джозефсона, болометров, сквидов и др.). Менее изученными являются вопросы создания устройств, осуществляющих прием, преобразование, обработку и передачу сигналов от активных криоэлементов к потребителю, которые конструктивно-технологически выполняют в виде гибридных интегральных микросборок. Потребность в быстродействующих, плотноупакованных микромодульных системах, работающих при низких температурах, продолжает расти, что предопределяет актуальность работ по исследованию низкотемпературных свойств многослойных тонкопленочных структур.

Постоянство температуры - неперемное условие нормального функционирования криоэлектронных приборов, так как колебания температуры приводят к изменению характеристик криоматериалов и, соответственно, параметров криоустройств и могут полностью расстроить работу сверхпроводниковых приборов. Керамические, ситалловые, стеклянные подложки, а также печатные платы из текстолита или гетинакса мало пригодны для использования при криогенных температурах из-за их низкой теплопроводности и хрупкости. Поэтому необходимы создаваемые на совершенно новых идеях материалы подложек и методы корпусирования, обеспечивающие высокий теплоотвод, механическую прочность, большие размеры и низкую стоимость. Среди материалов, способных составить конкуренцию применяемым, выделяются металлы, прежде всего, алюминий.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Исследования и разработки, отраженные в диссертационной работе, непосредственно связаны с долговременной программой работ, выполняемых в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники на кафедре "Микроэлектроника" и в научно-исследовательской лаборатории "Электрохимические методы изготовления гибридных интегральных микросхем" по изучению, разработке и внедрению в промышленное производство электрохимической алумооксидной технологии создания высокоинтегрированных микросхем. Диссертационная работа выполнялась в рамках республиканской научно-технической программы "Информатика", 6 хозяйственных НИР и 6 госбюджетных НИР.

Целью настоящей работы является разработка технологии изготовления тонкопленочных микросхем на основе алюминия, предназначенных для работы при криогенных температурах.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **основные задачи**:

- исследование процессов, происходящих в анодированных алюминиевых подложках при воздействии температуры;
- исследование закономерностей образования микрорельефа поверхности анодных оксидных пленок (АОП) алюминия в процессе анодирования;
- разработка технологии анодирования алюминиевых подложек для получения анодных оксидных пленок, имеющих большую толщину, высокое качество поверхности и высокую термостойкость;
- исследование электрофизических свойств пассивных элементов ГИМС (подложек, тонкопленочных проводников, резисторов и конденсаторов) в диапазоне температур 4...300 К;
- разработка промышленной технологии изготовления двусторонних многоуровневых микросборок со встроенными R- и C-элементами на алюминиевых подложках сложной формы, предназначенных для работы при гелиевых температурах.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, состоит в следующем:

1. Рассчитано распределение напряжений по поперечному сечению односторонне анодированной Al пластины. Показано, что нейтральная линия находится на расстоянии $2/3$ толщины слоя алюминия, и ее местоположение практически постоянно. На слой алюминия на границе раздела действуют сжимающие напряжения, а на поверхности подложки ---- растягивающие. По величине растягивающие напряжения в 2 раза меньше сжимающих. На слой анодного оксида действуют только растягивающие механические напряжения, величина которых постоянна по всей толщине слоя.

2. Впервые установлен характер температурных зависимостей относительного удлинения и температурного коэффициента линейного расширения

образцов, изготовленных из различных сплавов алюминия и имеющих различные толщины АІ и АОП Al_2O_3 . Показано, что графики этих зависимостей имеют три характерных участка, обусловленные процессами упругой и пластической деформаций алюминия. Характер изменения кривых на первом участке определяется алюминием, на третьем участке — анодной оксидной пленкой, второй участок является переходным между ними, и характер изменения кривых на нем определяется свойствами как алюминия, так и анодной оксидной пленки. Продолжительность участков и характер поведения кривых зависит от механических характеристик и соотношения толщин сплава алюминия и анодной оксидной пленки.

3. Установлено влияние режимов анодирования на величину стрелы прогиба односторонне анодированных алюминиевых подложек. Показано, что значительное влияние на величину стрелы прогиба оказывает граница раздела алюминия и анодной оксидной пленки. Для снижения величины стрелы прогиба предложено формировать на границе раздела эластичные пленки с помощью дополнительного пористого анодирования.

4. Установлены основные закономерности и предложена физическая интерпретация механизма образования рельефа поверхности анодных оксидных пленок алюминия в процессе анодирования. На зависимости шероховатость – время выявлены четыре характерных участка, коррелирующих с ходом зависимости напряжение – время. Показано, что изменение рельефа АОП происходит в соответствии с основными стадиями порообразования: ростом беспористой оксидной пленки, зарождением пор, упорядочением структуры пор и ростом пленки в глубину.

5. Установлено влияние технологии изготовления алюминиевых подложек на температурную зависимость удельной емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционного покрытия в диапазоне температур 4-300 К. Показано, что многостадийное анодирование позволяет снизить $tg\delta$ и уменьшить зависимость удельной емкости от температуры.

6. Впервые исследованы низкотемпературные свойства тонкопленочных проводников и резисторов, сформированных на алюминиевых анодированных подложках. Установлено влияние состава резистивного сплава на температурный коэффициент сопротивления резисторов в диапазоне температур 4-300 К. Показано, что минимизацию ТКС обеспечивает сочетание двух механизмов проводимости: металлической и полупроводниковой. Оценена длина свободного пробега электронов в напыленных пленках алюминия, которая составляет 6000 Å при толщине пленки 1 мкм.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана технология многостадийного анодирования алюминиевых подложек, позволяющая получать анодные оксидные пленки, устойчивые к воздействию температур в диапазоне 4-700 К, имеющие большую толщину и высокое качество поверхности.

2. Разработана технология совмещения при изготовления многослойных микросхем на алюминиевых анодированных подложках, согласно которой знаки совмещения формируют встроенными в изоляционное покрытие подложки. Это позволяет за счет увеличения контрастности изображения знаков совмещения повысить точность и уменьшить трудоемкость фотолитографических операций.

3. Разработано четыре варианта технологических процессов разделения алюминиевых подложек на модули и отделения технологического поля от алюминиевой подложки. Каждый из разработанных технологических процессов можно успешно применять, исходя из конкретных условий производства и наличия того или иного оборудования. Общим для всех вариантов является то, что процесс разделения осуществляют в две стадии. Применение разработанных процессов увеличить надежность микросхем за счет устранения ломаного края подложки, деформаций по линии реза и связанных с ними внутренних напряжений.

4. Разработана конструкция, изготовлены рабочие образцы и проведены комплексные испытания резистивно-коммутационных плат для блока криогенной микроэлектроники. Показано, что в разработанных изделиях алюминиевые подложки являются не только прочным несущим основанием с высокой теплопроводностью, но и сложным схемно-конструктивным узлом, позволяющим существенно расширить диапазон использования и функциональные возможности тонкопленочных ГИМС.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Автор защищает:

- Установленные зависимости относительного удлинения, температурного коэффициента линейного расширения, модуля упругости и стрелы прогиба от температуры для образцов, изготовленных из различных сплавов алюминия и имеющих различные толщины А1 и АСП Al_2O_3 . Влияние режимов формирования анодных оксидных пленок на механические напряжения в одно- и двусторонне анодированных алюминиевых подложках.

- Установленные закономерности образования рельефа поверхности анодных оксидных пленок на алюминии и его сплавах в процессе анодирования, согласно которым изменение рельефа происходит в соответствии с основными стадиями порообразования: шероховатость не меняется в ходе роста барьерной пленки, круто растет на стадии зарождения пор, медленно увеличивается, приближаясь к пределу по мере упорядочения пористой структуры и утолщения пленки.

- Разработанную технологию многостадийного анодирования алюминиевых подложек, согласно которой анодирование проводят в три стадии: сначала для получения высокого качества поверхности проводят "блестящее анодирование", затем для получения требуемой толщины проводят толстослойное анодирование, и, наконец, для увеличения термостойкости проводят "демпфирующее" анодирование.

– Установленные зависимости низкотемпературных свойств пассивных элементов ГИМС (подложек, тонкопленочных проводников, резисторов и конденсаторов) от технологии их получения, позволяющие подобрать подходящие материалы и технологические процессы для получения изделий с требуемыми характеристиками.

– Разработанную технологию изготовления двусторонних многоуровневых микросборок со встроенными R- и C-элементами на алюминиевых подложках сложной формы, предназначенных для работы при гелиевых температурах, включающую технологию формирования комбинированных изоляционных покрытий на основе АОП Al_2O_3 , технологию совмещения при изготовлении многослойных микросхем; технологию присоединения внешних выводов и навесных элементов методом пайки и технологию разделения подложек на модули и отделения технологического поля от алюминиевой подложки.

Личный вклад соискателя. Все результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации материалов.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на научно-технической конференции "Перспективы развития и применения автоматизированной радиоизмерительной аппаратуры в народном хозяйстве" (Минск, 1985 г.), всесоюзной научной конференции "Состояние и перспективы развития микроэлектронной техники" (Минск, 1985 г.), на отраслевых семинарах "Прогрессивная технология изготовления гибридных микросхем", (Москва, 1985 и 1988 г.), на XII Всесоюзной научной конференции по микроэлектронике (Тбилиси, 1987 г.), на 1-5-й международных научно-технических конференциях (Нарочь 1990, 1992, 1994, 1996 и 1998 г.), на научно-технической конференции "Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике". (Минск, 1990 г.), на межотраслевых научно-технических семинарах "Электрохимическая алюмооксидная технология создания микросхем" (Минск, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999 г.), на 3-м Всесоюзном совещании по проблемам лазерно-плазменной микротехнологии (Туапсе, 1991 г.), на III всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития гибридной технологии и гибридных интегральных схем в приборостроении" (Ярославль, 1991 г.), на научной конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, докторантов, аспирантов, студентов, посвященной 30-летию деятельности коллектива БГУИР (Минск, 1994 г.), на международной научно-технической конференции "Новые информационные технологии в науке в производстве" (Минск, 1998 г.).

Опубликованность результатов. По результатам исследований опубликовано 10 статей в научно-технических журналах, 10 статей в сборниках трудов научно-технических конференций, 8 тезисов докладов, получено 12 авторских

свидетельств на изобретение. Материалы диссертационной работы вошли в 12 научно-технических отчетов о НИР. Общее количество опубликованных по теме диссертации материалов составляет 67 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, 5 глав, заключения и приложений. Работа изложена на 216 страницах, содержит 79 рисунков, 4 таблицы и 4 приложения. Список использованных источников включает 152 наименования работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены современное состояние, основные проблемы и пути дальнейшего развития криоэлектроники. Показано, что криоэлектроника является комплексной областью знаний и включает несколько основных направлений: криоэлектронное материаловедение, сверхпроводниковую микроэлектронику и технику криостатирования, СВЧ криоэлектронику и криоэлектронную ИК технику. Рассмотрены тенденции развития каждого из данных направлений.

Рассмотрены принципы построения приборов и устройств для криогенных температур. Показано, что основными задачами, решаемыми при построении данного класса приборов, являются достижение максимально возможной точности, минимизация массы, минимизация энергопотребления, минимизация температурных деформаций, минимизация чувствительности к магнитным полям и радиационным воздействиям, простота и надежность конструкции. Эти цели, как правило, противостоят друг другу, и для их достижения необходимо применение новых материалов и элементов.

Показано, что наиболее перспективным материалом для подложек криоэлектронных ИМС является анодированный алюминий. Достоинства алюминия наряду с возможностью формирования изоляционного покрытия методом электролитического анодирования связаны с удачным сочетанием его электрофизических свойств: высокими теплопроводностью и механической прочностью при криогенных температурах, малым весом, стойкостью к специальным видам воздействия.

Проведен детальный анализ конструкций подложек и технологических процессов их изготовления, выполнена классификация существующих типов металлических подложек по материалам основы и типу диэлектрического покрытия, рассмотрены методы формирования изоляционного покрытия на металлических подложках. Основной операцией, отвечающей практически за все параметры изоляционного покрытия алюминиевых подложек, является глубокое пористое анодирование. Проанализированы основные электролиты для анодирования алюминия и установлено что, ни один из электролитов не позволяет получить пленки Al_2O_3 , полностью соответствующие комплексу требований, предъявляемых к изоляционному покрытию подложек: имеющие одновременно высокое качество поверхности (11–13 класс), широкий диапа-

зон рабочих температур (0-800 К) и большую толщину (>50 мкм). Выявлены другие недостатки известных технологических процессов изготовления алюминиевых анодированных подложек, препятствующие их использованию при криогенных температурах.

Показано что, несмотря на ярко выраженные достоинства, для обеспечения возможности использования алюминиевых подложек при криогенных температурах, нужны дополнительные комплексные исследования.

На основе проведенного в первой главе анализа сформированы цель и задачи исследований.

Во второй главе приведены результаты исследований физико-механических свойств анодированного алюминия.

Было проведено математическое описание поведения бинарной системы Al-AOP Al_2O_3 при воздействии температуры. Осуществлена оценка величины стрел прогиба, радиусов кривизны и механических напряжений, возникающих в односторонне анодированных алюминиевых пластинах при воздействии температуры. Рассчитано распределение напряжений по поперечному сечению односторонне анодированной Al пластины. Установлено, что нейтральная линия находится на расстоянии $2/3$ толщины слоя алюминия, и ее местоположение практически постоянно. На слой алюминия на границе раздела действуют сжимающие напряжения, а на поверхности подложки — растягивающие. По величине растягивающие напряжения в 2 раза меньше сжимающих. На слой анодного оксида действуют только растягивающие механические напряжения, величина которых постоянна по всей толщине слоя.

Получены экспериментальные зависимости стрелы прогиба алюминиевых подложек от толщины слоев Al и AOP Al_2O_3 , их соотношения и режимов анодирования. На экспериментальных зависимостях можно выделить ряд характерных участков. Сначала, при нагреве до 520-590 К, наблюдается линейная зависимость стрелы прогиба от температуры; затем при температурах свыше 520-590 К - стрела прогиба резко увеличивается и зависимость отклоняется от линейного хода. При охлаждении ход зависимости аналогичен: при высоких температурах (от 720 до 570-510 К) наблюдается нелинейный участок. Однако изгиб кривых на нем значительно меньше, чем при нагреве. При охлаждении ниже 570-510 К кривые выходят на линейный участок. Угол наклона кривых близок к углу наклона на первом участке.

Объяснить полученные результаты можно следующим образом. Первый участок характеризуется упругими деформациями алюминия и AOP Al_2O_3 . При нагреве и последующем охлаждении в этом диапазоне температур подложка возвращается в исходное состояние. Для линейного участка справедливы выведенные формулы расчета стрел прогиба, радиусов кривизны и механических напряжений. Нарушение линейности изменения стрелы прогиба от температуры на втором участке вызвано пластической деформацией алюминия. Предел упругости алюминия с увеличением температуры сильно уменьшается и при некоторой температуре сравнивается с механическими напряже-

ниями в слое Al. В этой точке начинается пластическая деформация алюминия. Нагрев алюминиевых анодированных подложек выше указанного диапазона температур приводит к их необратимому искривлению. Установлено довольно хорошее согласование экспериментально-расчетных зависимостей напряжений в слое алюминия и справочных данных по механическим свойствам алюминия.

Установлено влияние режимов анодирования на величину стрелы прогиба алюминиевых подложек. Показано, что состав электролита оказывает существенное влияние на кинетику стрелы прогиба. Наибольший изгиб имеют пленки, сформированные в серной кислоте. Далее стрелы прогиба уменьшаются в ряду щавелевая кислота → многокомпонентный электролит → хромовая кислота. Характер зависимостей для всех электролитов аналогичен. Различие в поведении подложек при анодировании в различных электролитах объясняется разными механическими свойствами получаемых АОП. В серной кислоте получают твердые, хрупкие пленки, имеющие высокий модуль Юнга, по своим механическим свойствам близкие к керамике. В хромовой кислоте наоборот, получают упругие эластичные покрытия, имеющие низкий модуль Юнга, по свойствам близкие к металлам. В подложках, анодированных в хромовой кислоте, не происходит пластической деформации алюминия - после охлаждения она возвращается в исходное состояние с нулевой стрелой прогиба. Изгиб кривой при высоких температурах в данном случае объясняется нелинейной зависимостью модуля Юнга алюминия от температуры.

Проведены исследования влияния многостадийного анодирования на температурную зависимость величины стрелы прогиба. В результате установлено, что при проведении после толстослойного дополнительного анодирования в электролитах на основе хромовой кислоты или растворах зматалирования происходит уменьшение дефектности и повышение однородности сформированной ранее анодной оксидной пленки; снятие внутренних механических напряжений в системе пленка-подложка; формирование на границе раздела алюминия и оксида пластичной бездефектной пористой анодной оксидной пленки толщиной 1–5 мкм, являющейся демпфером, гасящим термические напряжения, что в конечном итоге приводит к уменьшению величины стрелы прогиба. Уменьшение стрелы прогиба свидетельствует об уменьшении механических напряжений в слоях Al и АОП Al_2O_3 и, следовательно, об увеличении термостойкости получаемых покрытий. Поэтому для повышения термостойкости предложено формировать на границе раздела эластичные пленки с помощью повторного пористого анодирования в электролитах на основе хромовой кислоты или растворах зматалирования.

Были проведены математическое моделирование и экспериментальные исследования поведения двусторонне анодированного алюминия при нагреве и охлаждении. Рассчитаны модуль Юнга, температурный коэффициент линейного расширения и механические напряжения в трехслойной структуре. Были получены аналитические выражения, описывающие поведение двухсто-

ронне анодированных алюминиевых пластин при воздействии температуры. Выражены параметры и механические напряжения в слое АОП Al_2O_3 через параметры алюминия и подложки. Исследованы температурные зависимости модуля Юнга, относительных удлинений (dl/l_0) и температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) образцов, изготовленных из различных сплавов алюминия и имеющих различные толщины Al и АОП Al_2O_3 в интервале температур 100-700 К. Установлено, что экспериментальные зависимости относительного удлинения от температуры имеют три характерных участка:

- первый - близкое к линейному увеличение относительного удлинения;
- второй - отклонение от линейного хода зависимости и наклон кривых в сторону оси температур (перегиб);
- третий - снова близкое к линейному увеличение относительного удлинения (выход из перегиба).

Продолжительность и характер участков зависят от механических характеристик сплава алюминия, а также от соотношения прочностей слоев Al и АОП Al_2O_3 , которая определяется соотношением их толщин: чем толще слой Al и тоньше слой АОП Al_2O_3 , тем продолжительней участок упругой деформации алюминия, и наоборот: чем тоньше слой Al и толще слой АОП Al_2O_3 , тем раньше начинается участок пластической деформации алюминия.

Исходя из полученных экспериментальных зависимостей и выведенных аналитических выражений, были рассчитаны механические напряжения в слое алюминия и получены расчетно-экспериментальные зависимости величин механических напряжений в слое алюминия от температуры для анодированных алюминиевых образцов с различной толщиной АОП Al_2O_3 .

Проведенные исследования позволили установить суть процессов, происходящих при нагреве и охлаждении образцов из двусторонне анодированного алюминия. Показано, что графики зависимостей относительных удлинения и температурного коэффициента линейного расширения от температуры имеют три характерных участка, обусловленных процессами упругой и пластической деформации алюминия. Поведение кривой на первом участке определяется алюминием, на третьем участке - анодной оксидной пленкой, а второй участок является переходным между ними. Отжиг образцов приводит к релаксации механических напряжений и стабилизации структуры алюминиевых анодированных образцов.

Исследованы основные закономерности образования рельефа поверхности анодных оксидных пленок алюминия в процессе анодирования. Установлено, что на зависимости шероховатость – время можно отметить четыре характерных участка, коррелирующих с ходом зависимости напряжение – время. Первый участок (0–75 с) соответствует росту напряжения формовки (УФ) от нуля до максимума и характеризуется отсутствием изменения рельефа поверхности. На втором участке (75–110 с), который соответствует переходу напряжения формовки через максимум и его спаду, наблюдается резкое, почти скачкообразное увеличение шероховатости поверхности (Ra). На третьем уча-

стке (110 с – 30 мин), на котором Уф переходит через минимум и начинает возрастать, происходит дальнейшее, но уже более плавное увеличение Ra. После 30 минут анодирования кривая шероховатость – время выходит на насыщение (участок IV), то есть при дальнейшем увеличении длительности анодирования изменения шероховатости поверхности не происходит.

Предложена схематическая интерпретация зависимости шероховатости поверхности АОП от напряжения формовки и времени анодирования. На начальной стадии анодирования (напряжение формовки растет) происходит образование анодной оксидной пленки плотного типа. Барьерная пленка полностью повторяет существующий на подложке рельеф поверхности и не приводит к изменению шероховатости. На второй стадии анодирования (напряжение формовки переходит через максимум и снижается пропорционально уменьшению толщины барьерного слоя) происходит зарождение пор сначала в местах выхода дислокаций, на границах зерен и других активных участках, а затем и по всей поверхности подложки. Данный процесс характеризуется сильной неоднородностью и неодновременностью. Вследствие этого шероховатость поверхности резко возрастает. На третьей стадии порообразования (напряжение формовки переходит через минимум и слегка возрастает) происходит стабилизация структуры пор, сопровождающаяся вытеснением одних ячеек другими, выравниванием ячеек по размерам и их перегруппировкой до образования компактной структуры. Толщина пор на этой стадии достигает единиц микрон. Шероховатость поверхности продолжает увеличиваться. Скорость прироста Ra замедляется по мере увеличения толщины и, соответственно, упорядоченности структуры АОП. Третья стадия анодирования плавно переходит в четвертую: на поверхности алюминия формируется окончательная структура АОП и дальнейшее увеличение толщины пленки не сопровождается изменением шероховатости поверхности.

Сделаны обобщения о закономерностях процесса формирования рельефа АОП Al_2O_3 в процессе анодирования в различных электролитах. Исследовано влияния режимов анодирования (состав электролита, плотность тока и температура электролита) на качество поверхности анодных оксидных пленок. Показано, что изменение рельефа АОП происходит в соответствии с основными стадиями порообразования: ростом беспористой оксидной пленки, зарождением пор, упорядочением пористой структуры и ростом пленки в глубину.

Третья глава посвящена разработке технологии проведения отдельных операций технологического процесса создания тонкопленочных микросхем на основе алюминия, предназначенных для работы при криогенных температурах.

Для изготовления алюминиевых подложек были предложены:

- технология обработки алюминиевых пластин перед анодированием,
- технология многостадийного анодирования алюминиевых подложек,
- технология формирования комбинированных изоляционных покрытий на алюминиевых подложках.

Суть метода обработки алюминиевых пластин перед анодированием заключается в том, что операциям предварительной подготовки и прецизионной обработки подвергаются не подложки стандартного (малого) размера, (например, 60x48 мм), а алюминиевый лист размерами более, чем 1000x1000 мм. Это позволило наиболее нетехнологичные и трудоемкие операции предварительной подготовки и прецизионной обработки осуществлять групповым методом и, тем самым, значительно снизить себестоимость подложек. После прецизионной обработки на поверхности алюминиевого листа методом анодного окисления формируют защитную пленку, которая обеспечивает защиту поверхности алюминия от повреждения при транспортировке, хранении и других вспомогательных технологических операциях.

Согласно разработанной технологии анодирования алюминиевых пластин, для получения анодных оксидных пленок с высоким качеством поверхности, большой толщиной и высокой термостойкостью анодирование проводят в три стадии: сначала для получения высокого качества поверхности проводят "блестящее" анодирование, затем для получения требуемой толщины АОП проводят толстослойное анодирование, и, наконец, для увеличения термостойкости проводят "демпфирующее" анодирование.

Данная технология очень хорошо совместима с приведенным ранее методом обработки пластин перед анодированием - просто совмещают защитное анодирование из первого метода и "блестящее" анодирование (1-ю стадию) из второго.

Анодные оксидные пленки вследствие своей пористости и низкой химической стойкости не могут быть использованы в "чистом" виде в качестве оснований тонкопленочных ГИМС. Для устранения вышеназванных недостатков нами было разработано 3 варианта технологических процессов изготовления изоляционных покрытий на алюминиевых подложках, которые обеспечивают возможность изготовления всех возможных разновидностей микросхем, предназначенных для работы при криогенных температурах, таких как многоуровневые системы межсоединений, резистивные, высоковольтные, мощные, высокочастотные, прецизионные микросхемы, печатные платы и т.д.

В работе были рассмотрены вопросы формирования микросхем на алюминиевых подложках. Проведены исследования, направленные на разработку методов повышения контраста изображения знаков совмещения. С этой целью было исследовано влияние структуры алюминиевой подложки на коэффициент зеркального отражения многослойной структуры, сформированной на ее поверхности. В результате было предложено для увеличения контрастности изображения при формировании многослойной микросхемы на алюминиевой подложке перед проведением толстослойного пористого анодирования осуществлять маскирование мест будущих знаков совмещения, тем самым формируя встроенные в подложку знаки совмещения.

Для присоединения внешних выводов и навесных элементов методом пайки разработан технологический процесс нанесения никеля на выходные

контактные площадки многоуровневой системы межсоединений. Разработанный процесс характеризуется высокой технологичностью, высокой адгезией никеда к алюминию и практически нулевым переходным сопротивлением между ними.

Заключительной операцией технологического процесса создания микросхем являются разделение подложек на модули и отделение технологического поля от алюминиевой подложки. Было разработано и исследовано несколько вариантов технологических процессов отделения технологического поля от подложки и разделения подложек на модули. Каждый из разработанных технологических процессов можно успешно применять, исходя из конкретных условий производства и наличия того или иного оборудования. Общим для всех вариантов является то, что процесс разделения осуществляют в две стадии. Применение разработанных процессов позволяет увеличить надежность микросхем за счет устранения ломаного края подложки, деформаций по линии реза и связанных с ними внутренних напряжений; устранить возможность замыкания выводов микросхемы в разьеме за счет изоляции торцов подложки; получить подложки любой конечной геометрической формы без увеличения трудоемкости процесса; повысить воспроизводимость процесса анодирования и автоматизировать окончание процесса анодирования.

В четвертой главе приведены результаты исследования электрофизических характеристик пассивных элементов ГИМС в диапазоне температур 4...300 К.

Для проведения исследований была разработана тестовая структура, которая обеспечивает формирование двухуровневых микросхем со встроенным R- и C- элементами, использование алюминиевых подложек в качестве основания микросхем, а также возможность сочетания в тестовых образцах различных технологий формирования микросхем на основе операций травления, анодирования и взрыва.

Измерения электрических параметров криомикросхем в интервале температур 4,2–320 К проводили в гелиевом криостате оригинальной конструкции, специально разработанном и изготовленном для проведения настоящих исследований.

Исследование величин $\text{tg}\delta$ алюминиевых подложек с различным типом изоляционного покрытия в диапазоне температур $T = 4.2...300$ К показали, что наибольшим количеством локализованных состояний (донорных и ловушечных) обладают алюминиевые подложки, грунтованные сухим пленочным фоторезистом. И далее уменьшение количества локализованных состояний наблюдается в ряду покрытий:

- подложки, грунтованные полиимидом,
- подложки, изготовленные по технологии двухстадийного анодирования,
- подложки, изготовленные по технологии трехстадийного анодирования.

У алюминиевых подложек, грунтованных сухим пленочным фоторези-

стом, величина $\text{tg}\delta$ в диапазоне температур $T = 4,2 \text{ К} \dots 50 \text{ К}$ имеет наименьшее значение, указывая, вероятно, на то, что ширина и высота потенциального барьера ловушечных состояний этого покрытия недостаточно малы для прохождения туннельного тока.

Двух- и трехстадийное анодирование приводит к улучшению электроизоляционных свойств алюминиевых подложек. Температурную зависимость относительного изменения емкости алюминиевых подложек можно объяснить узорчатым микроскопическим путем носителя, соответствующим локальным флуктуациям потенциала. Изменение длины пути носителя можно интерпретировать как модуляцию толщины диэлектрика (изоляционного покрытия алюминиевой подложки), что приводит к изменению емкости.

Отсутствие деградации параметров изоляционного покрытия алюминиевых подложек при циклическом воздействии температур, когда металлическое основание и диэлектрическое покрытие испытывают воздействие механических напряжений, говорит о структурной устойчивости и высокой надежности разработанного изоляционного покрытия.

Исследованы электрические свойства пленок алюминия различной толщины, сформированных на подложках различного типа. Установлено, что все графики температурных зависимостей относительного изменения сопротивления пленок Al имеют два характерных участка: линейный в диапазоне температур $50 \text{ К} \dots 300 \text{ К}$ и практически пологий, слабо зависящий от температуры в диапазоне $4 \dots 50 \text{ К}$ (остаточное сопротивление). С уменьшением температуры от 300 К до 4 К сопротивление алюминиевых проводников в зависимости от толщины пленки и материала подложки меняется в $3 \dots 20$ раз. Отношение значений сопротивлений пленки при температурах 300 К и $4,2 \text{ К}$ ($R_{300\text{K}}/R_{4,2\text{K}}$), рассчитанные из экспериментальных зависимостей, составляет для пленки алюминия толщиной $1,0 \text{ мкм}$ 20 , для пленки алюминия толщиной $0,4 \text{ мкм}$ - $14,8$; для пленки алюминия толщиной $0,2 \text{ мкм}$ - $3,4$. Определено значение длины свободного пробега электронов в напыленных пленках, которое при толщине пленки 1 мкм составляет порядка 6000 \AA . Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) проводников зависит от толщины пленки алюминия: чем меньше толщина пленки, тем меньше ТКС. Тип подложки влияет на величины сопротивления проводников и ТКС: чем лучше качество поверхности, на которой сформирована исследуемая алюминиевая пленка, тем меньше величина сопротивления. Это, вероятно, связано с тем, что на границе алюминиевый проводник — развитая поверхность подложки имеет большое количество как донорных, так и ловушечных состояний, и, следовательно, там более интенсивно проходят процессы термостимулированной прыжковой проводимости.

Температурные зависимости относительного изменения сопротивления резистивных пленок из сплава РС3710 на различных типах подложек, включая и алюминиевую, имеют неявно выраженный максимум при температурах $100 \dots 120 \text{ К}$, что свидетельствует о наличии двух типов проводимости: метал-

лической и полупроводниковой. Различные величины сопротивления пленок на различных типах подложек для одной и той же температуры обусловлены различием в свойствах подложек (кристаллической структуре, качестве поверхности, теплопроводности), что оказывает влияние на зародышеобразование и рост пленок, а, следовательно, на её сопротивление. Незначительный рост сопротивления тонкопленочных криорезисторов при термоциклировании связан с увеличением сопротивления резистора граничного слоя $R_{гп}$, который является одним из двух параллельно включенных резисторов, моделирующих сопротивление резистивной пленки. Увеличение вызвано структурными превращениями, которые, в частности, можно объяснить различием температурных коэффициентов расширения материалов пленки и подложки.

В пятой главе приводятся результаты практической реализации проведенных научных исследований. По заказу одного из предприятий ВПК были разработаны конструкция и топология резистивно-коммутационных плат (РКП) для блока криогенной микроэлектроники, в соответствии с которыми изготовлены рабочие образцы двух вариантов резистивно-коммутационных плат для блока криогенной микроэлектроники. РКП выполнены на алюминиевых подложках сложной формы с изолированными переходными отверстиями и представляют собой двухсторонние гибридных интегральные микросхемы с тонкопленочными R- и C-элементами, использующие алюминиевое основание в качестве "общей" шины или шины "земли". При изготовлении РКП были использованы различные варианты разработанных технологических процессов формирования изоляционного покрытия подложек. Полученное изоляционное покрытие характеризуется высокими изоляционными свойствами ($R > 10^{11}$ Ом), низкой удельной емкостью ($C < 1$ пФ/мм²) и широким диапазоном рабочих температур ($T = 4...700$ К).

Разработанная технология обеспечивает создание надежной высокофункциональной малогабаритной аппаратуры, предназначенной для работы при криогенных температурах. Технология наиболее полно использует все преимущества анодированного алюминия: высокую теплопроводность, механическую прочность, хорошую обрабатываемость, возможность прецизионного изготовления подложек и использования их в качестве элемента корпуса. При этом достигается максимальная степень интеграции, обеспечивается возможность подгонки тонкопленочных резисторов и конденсаторов в широком диапазоне номиналов, минимизируется количество сборочных операций, навесных элементов и применяемых материалов, что позволяет повысить надежность микросборок, уменьшить их габариты и вес, а также увеличить их стойкость к вибрационным и механическим воздействиям. В разработанных изделиях алюминиевые подложки перестают быть только несущим основанием, а становятся сложным функциональным узлом, позволяющим существенно расширить диапазон использования тонкопленочных ГИМС. Проведенные испытания позволили рекомендовать полученные изделия для использования при криогенных температурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены температурные зависимости относительного удлинения, температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга двусторонне анодированного алюминия в диапазоне температур 160-700 К. Показано, что зависимость относительного удлинения от температуры имеет три характерных участка: поведение кривой на первом участке определяется алюминием, на третьем участке - анодной оксидной пленкой, а второй участок, на котором температурный коэффициент линейного расширения принимает отрицательные значения, является переходным между ними [14, 15, 17].

2. Установлен характер температурных зависимостей стрелы прогиба алюминиевых подложек от толщины слоев алюминия и анодной оксидной пленки и выявлено влияние режимов анодирования на стрелу прогиба. Оценены механические напряжения в слоях алюминия и АОП Al_2O_3 . Показано, что нелинейное увеличение стрелы прогиба от температуры наблюдается, когда механические напряжения в слое Al превышают предел упругости алюминия. Получено хорошее согласование расчетных зависимостей с экспериментальными и справочными данными по механическим свойствам алюминия. Для снижения механических напряжений в слоях Al и АОП Al_2O_3 было предложено с помощью дополнительного анодирования формировать на границе раздела эластичные пленки [1, 21, 23, 34, 39].

3. Исследовано влияние режимов анодирования (время, плотность тока, температура и состав электролита) и состава алюминия на качество поверхности анодных оксидных пленок. В результате установлены основные закономерности образования микрорельефа поверхности анодных оксидных пленок в процессе анодирования. Показано, что изменение рельефа АОП происходит в соответствии с основными стадиями порообразования: ростом беспористой оксидной пленки, зарождением пор, упорядочением пористой структуры и ростом пленки в глубину. Разработан метод повышения качества поверхности анодных оксидных пленок, согласно которому для получения толстослойных диэлектрических покрытий с высоким качеством поверхности анодирование проводят в две стадии: сначала в электролите, обеспечивающем получение АОП с высоким качеством поверхности: так называемое "блестящее" или "зеркальное" анодирование, а затем в электролите для толстослойного анодирования до получения требуемой толщины АОП [4, 8, 24, 27, 33].

4. Разработана технология изготовления алюминиевых подложек, которая включает технологию обработки алюминиевых пластин перед анодированием, технологию многостадийного анодирования алюминиевых подложек и технологию формирования комбинированных изоляционных покрытий на алюминиевых подложках. Разработана технология формирования микросхем на алюминиевых подложках, которая включает технологию совмещения при изготовлении многослойных микросхем; технологию присоединения внешних

выводов и навесных элементов методом пайки и технологию разделения подложек на модули и отделения технологического поля от алюминиевой подложки [2, 3, 7, 9, 11, 20, 29-32, 35-38, 40].

5. Исследованы электрофизические свойства пассивных элементов ГИМС (подложек, тонкопленочных проводников, резисторов и конденсаторов) в диапазоне температур 4...300 К. Установлено влияние технологии изготовления алюминиевых подложек на температурную зависимость удельной емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционного покрытия в диапазоне температур 4-300 К. Полученные результаты, интерпретированные с позиций механизма прыжковой проводимости, хорошо коррелируют с особенностями технологических процессов получения того или иного типа изоляционного покрытия. Установлен характер температурной зависимости сопротивления тонкопленочных резисторов, сформированных на подложках различного типа, в диапазоне температур 4-300 К. Выявлено влияние состава резистивного сплава на механизм проводимости тонкопленочных резисторов. Показано, что минимизацию ТКС обеспечивает сочетание двух типов проводимости: металлической и полупроводниковой. Исследованы низкотемпературные свойства многоуровневых систем межсоединений на основе Al и Al_2O_3 , сформированных на алюминиевых анодированных подложках. Установлено влияние типа подложки и толщины пленки Al на сопротивление алюминиевых проводников в диапазоне температур 4-300 К. Оценена длина свободного пробега электронов в напыленных пленках алюминия, которая составляет 5000 Å при толщине пленки 1 мкм. Установлено влияние технологии формирования на диэлектрические свойства межслойной изоляции многоуровневых систем межсоединений [5, 10, 12, 16, 18, 19, 22, 25, 28].

6. Разработаны конструкция и топология резистивно-коммутационных плат для блока криогенной микроэлектроники, в соответствии с которыми изготовлены рабочие образцы двух вариантов резистивно-коммутационных плат для блока криогенной микроэлектроники. РКП выполнены на алюминиевых подложках сложной формы с изолированными переходными отверстиями и представляют собой двухсторонние гибридные интегральные микросхемы с тонкопленочными R- и C-элементами, использующие алюминиевое основание в качестве "общей" шины или шины "земли". При изготовлении РКП были использованы различные варианты разработанных технологических процессов формирования изоляционного покрытия подложек. Полученное изоляционное покрытие характеризуется высокими изоляционными свойствами ($R > 10^{11}$ Ом), низкой удельной емкостью ($C < 1$ пФ/мм²) и широким диапазоном рабочих температур ($T = 4...700$ К). Проведенные испытания позволили рекомендовать полученные изделия для использования при криогенных температурах [6, 9, 11, 13, 26].

Статьи и материалы конференций

1. Костюченко С.А., Короткевич А.В. Исследование термостойкости алюминиевых анодированных подложек ГИМС // Прогрессивная технология изготовления гибридных микросхем: Материалы отраслевого семинара / ЦНИИ информации.- М., 1985.- С. 18.
2. Панченко Е.Н., Короткевич А.В. Анодирование алюминиевых оснований в гальванодинамическом режиме // Прогрессивная технология изготовления гибридных микросхем: Материалы отраслевого семинара / ЦНИИ информации.- М., 1985.- С. 12-13.
3. Костюченко С.А., Короткевич А.В. Алюминиевые подложки с комбинированным покрытием для тонкопленочных ГИМС // Прогрессивная технология изготовления гибридных интегральных микро схем: Материалы отраслевого семинара, Минск, 25-27 октября 1988 г. / ЦНИИ информации.- М., 1988.- С. 29-30.
4. Костюченко С.А., Короткевич А.В. Анализ методов прецизионной обработки алюминиевых подложек // Обмен производственно-техническим опытом.- 1989.- № 1.- С. 24-25.
5. Костюченко С.А., Короткевич А.В., Коцаренко В.А., Плешкин В.А. Низкотемпературные исследования электросопротивления тонкопленочных резистивных структур // Современная технология получения материалов и элементов сверхпроводниковых микросхем: Материалы межотраслевого научно-технического семинара, Минск, 17-21 сентября 1990 г.- М., 1990.- С. 96-98.
6. Короткевич А.В., Костюченко С.А., Коцаренко В.А., Плешкин В.А. Криомикросборка на алюминиевой подложке // Современная технология получения материалов и элементов сверхпроводниковых микросхем: Материалы межотраслевого научно-технического семинара, Минск, 17-21 сентября 1990 г.- М., 1990.- С. 99-101.
7. Короткевич А.В., Коцаренко В.А. Техпроцесс изготовления изоляционного покрытия на алюминиевых подложках // Электрохимическая алюмооксидная технология создания микросхем: Материалы межотраслевого научно-технического семинара. Минск, сентябрь 1991 г.- М., 1991.- С. 88-90.
8. Костюченко С.А., Короткевич А.В. О закономерностях изменения микрорельефа анодно оксидируемой поверхности алюминия // Защита металлов.- 1992.- Т. 28, № 2.- С. 488-490.
9. Короткевич А.В., Коцаренко В.А., Плешкин В.А. Расширение функциональных возможностей криоИМС // Современная технология получения материалов и элементов высокотемпературных сверхпроводниковых микросхем: Материалы 2-го международного научно-технического семинара, 21-25 сентября 1992 г.- Минск, 1992.- С. 81-82.

10. Короткевич А.В., Коцаренко В.А. Плешкин В.А. Исследование диэлектрических покрытий на алюминиевых подложках при криотемпературах // Современная технология получения материалов и элементов высокотемпературных сверхпроводниковых микросхем: Материалы 2-го международного научно-технического семинара, Нарочь, 21-25 сентября 1992 г.- Минск, 1992.- С. 72-73.

11. Короткевич А.В., Коцаренко В.А., Плешкин В.А. Расширение функциональных возможностей подложек ГИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 1993.- № 1.- С. 3-7.

12. Короткевич А.В., Плешкин В.А. Исследование температурной зависимости электросопротивления тонких пленок, облученных гамма квантами // Современная технология гибридных интегральных микросхем, включая элементы сверхпроводящей электроники. Материалы 3-й международной научно-технической конференции.- Нарочь, 1994.- С. 161-164.

13. Короткевич А.В., Плешкин В.А. Исследование свойств тонкопленочных нагревательных элементов, сформированных на металлических подложках // Известия Белорусской инженерной академии - 1996.- № 1.- С. 67-68.

14. Короткевич А.В., Плешкин В.А. Исследование теплового расширения анодированного алюминия // Известия Белорусской инженерной академии.- 1996.- № 1.- С. 69-72.

15. Короткевич А.В., Плешкин В.А. Исследование относительного удлинения и температурного коэффициента линейного расширения анодированного алюминия // Известия Белорусской инженерной академии.-1997.- №1(3)/3.- С. 156-158.

16. Короткевич А.В., Плешкин В.А., Сокол В.А. Сопротивление тонкопленочных криорезисторов на подложках из анодированного алюминия // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 1997.- № 2.- С. 12-15.

17. Сокол В.А., Колосницын Б.С., Короткевич А.В., Плешкин В.А. Исследование температурной зависимости модуля Юнга анодированного алюминия // Известия Белорусской инженерной академии.- 1998.- № 2(6)/1.- С. 98-99.

18. Сокол В.А., Колосницын Б.С., Короткевич А.В., Плешкин В.А. Исследование электрофизических свойств алюминиевых подложек в криогенном диапазоне температур // Новые информационные технологии в науке в производстве: Материалы международной НТК, 25-27 ноября 1998 г.- Минск, 1998.- С. 353-354.

19. Короткевич А.В., Врублевский И.А., Плешкин В.А. Исследование низкотемпературных свойств тонких пленок алюминия // Известия Белорусской инженерной академии.- 1999.- № 1(7)/2.- С. 5-6.

20. Короткевич А.В., Плешкин В.А. Использование сухого пленочного фоторезиста в качестве изоляционного покрытия алюминиевых подложек //

Технология и конструирование в электронной аппаратуре.- 1999.- № 5-6.- С. 14-18.

Тезисы докладов

21. Костюченко С.А., Короткевич А.В. Применение металлических подложек для мощных гибридных интегральных микросхем // Перспективы развития и применения автоматизированной радиоизмерительной аппаратуры в народном хозяйстве: Тез. докл. НТК / МНИПИ.- Минск, 1985.- С. 145.
22. Костюченко С.А., Короткевич А.В., Кураева С.Н. Исследование частотных свойств изоляционных покрытий на основе анодных оксидных пленок Al_2O_3 // Состояние и перспективы развития микроэлектронной техники. Часть II: Тез. докл. Всес. научн. конф., Минск, 24-26 сентября 1985 г.- Минск, 1985.- С. 31.
23. Демиденко Л.П., Короткевич А.В., Костюченко С.А. Формирование диэлектрических покрытий алюминиевых подложек // Состояние и перспективы развития микроэлектронной техники: Часть II: Тез. докл. Всес. научн. конф., Минск, 24-26 сентября 1985 г.- Минск, 1985.- С. 158.
24. Костюченко С.А., Короткевич А.В. Изменение рельефа поверхности анодных оксидных пленок Al_2O_3 в процессе анодирования // XII Всесоюзная научная конференция по микроэлектронике: Тез. докл., Тбилиси, 26-28 октября 1987 г.- Тбилиси, 1987, ч. VI.- С. 243-244.
25. Короткевич А.В., Костюченко С.А., Коцаренко В.А., Плешкин В.А. Влияние гамма излучения на характер температурной зависимости электросопротивления тонких резистивных пленок // Перспективные материалы твердотельной электроники. Твердотельные преобразователи в автоматике и робототехнике: Тезисы НТК, Минск, 23-24 октября 1990 г. / ИФТГиП АН БССР - Минск, 1990, ч. I. - С.154-155.
26. Короткевич А.В., Костюченко С.А. Коцаренко В.А. Плешкин В.А. Гибридные интегральные микросхемы для криогенного диапазона температур // Состояние и перспективы развития гибридной технологии и гибридных интегральных схем в приборостроении: Тезисы докладов III всесоюзной научно-технической конференции, Ярославль, 4-6 июня 1991 г.- Ярославль, 1991.- С. 127-128.
27. Гвай Е.К., Короткевич А.В., Коцаренко В.А. Плешкин В.А. Метод повышения качества поверхности алюминиевых подложек // Научная конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, докторантов, аспирантов, студентов, посвященная 30-летию деятельности коллектива БГУИР: Тезисы докладов, Минск, 15-18 февраля 1994 г.- Минск, 1994.- С. 183.
28. Калошкина Е.Э., Короткевич А.В., Коцаренко В.А. Плешкин В.А. Тестовая структура для исследования тонкопленочных микросхем // Научная конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, докторантов, аспирантов, студентов, посвященная 30-летию деятельности коллек-

тива БГУИР: Тезисы докладов, Минск, 15-18 февраля 1994 г. - Минск, 1994. - С. 184.

Авторские свидетельства

29. А.с. СССР № 1329599, МКИ³ Н 05 К 1/05. Способ изготовления алюминиевой подложки для гибридных интегральных микросхем / Костюченко С.А., Короткевич А.В., Татаренко Н.И., Демиденко Л.П. - №3920145/24-21; Заявлено 28.06.85; Оpubл. 07.08.87, Бюл. №29 // Открытия. Изобретения. - 1987. - №29. - С. 252.

30. А.с. СССР № 1445547, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления гибридных интегральных микросхем / Сокол В.А., Костюченко С.А., Панченко Е.Н., Короткевич А.В., Малюгов В.М. - №4221685/24-21; Заявлено 06.04.87; Оpubл. 15.12.88, Бюл. №46 // Открытия. Изобретения. - 1988. - №46. - С. 291.

31. А.с. СССР № 1473625, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления многослойной микросхемы на алюминиевой подложке / Демиденко А.П., Короткевич А.В., Костюченко С.А., Сокол В.А., Харьковская Н.А. - №4265716/24-21; Заявлено 22.06.87; Оpubл. 15.04.89, Бюл. №14 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №14. - С. 270.

32. А.с. СССР № 1530674, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления алюминиевых подложек / Короткевич А.В., Костюченко С.А., Сокол В.А. - №4418229/24-21; Заявлено 28.04.88; Оpubл. 15.12.89, Бюл. №46 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №46. - С. 276.

33. А.с. СССР № 1549467, МКИ³ Н 05 К 1/05. Способ получения диэлектрического покрытия на алюминиевой подложке / Короткевич А.В., Костюченко С.А., Сокол В.А. - №4395309/24-21; Заявлено 17.03.88; Оpubл. 07.03.90, Бюл. №9 // Открытия. Изобретения. - 1990. - №9. - С. 271.

34. А.с. СССР № 1554431, МКИ³ С 25 D 11/02. Электрический модуль для анодирования алюминиевых подложек / Катерного О.С., Панченко Е.Н., Короткевич А.В., Крютков А.В., Самулевич А.В. - №4312795/31-02; Заявлено 05.10.87; Оpubл. 30.03.90, Бюл. №12 // Открытия. Изобретения. - 1990. - №12. - С. 257.

35. А.с. СССР № 1568797, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления гибридных интегральных микросхем на алюминиевых подложках / Короткевич А.В., Костюченко С.А., Лункин В.Я. - №4501661/24-21; Заявлено 11.11.88; Оpubл. 30.05.90, Бюл. №20 // Открытия. Изобретения. - 1989. - №20. - С. 265.

36. А.с. СССР № 1600604, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления гибридных интегральных микросхем на алюминиевых подложках / Короткевич А.В., Костюченко С.А., Лункин В.Я. - №4520751/24-21; Заявлено 24.01.89; Оpubл. 15.10.90, Бюл. №38 // Открытия. Изобретения. - 1990. - №38. - С. 260.

37. А.с. СССР № 1600605, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления гибридных интегральных микросхем на алюминиевых подложках / Короткевич

А.В., Костюченко С.А., Лункин В.Я. - №4520752/24-21; Заявлено 24.01.89; Оpubл. 15.10.90, Бюл. №38 // Открытия. Изобретения.- 1990.- №38.- С. 260.

38. А.с. СССР № 1600606, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления гибридных интегральных микросхем на алюминиевых подложках / Короткевич А.В., Костюченко С.А., Лункин В.Я. - №4520752/24-21; Заявлено 24.01.89; Оpubл. 15.10.90, Бюл. №38 // Открытия. Изобретения.- 1990.- №38.- С. 260.

39. А.с. СССР № 1799233, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ получения диэлектрического покрытия на алюминиевой подложке / Короткевич А.В., Костюченко С.А. Коцаренко В.А. - №4805130/24-21; Заявлено 23.04.90; Оpubл. 08.10.92, Бюл. №8 // Изобретения.- 1993.- №8.- С. 246.

40. А.с. СССР № 1825285, МКИ³ Н 05 К 3/00. Способ изготовления тонкопленочной микросхемы. Короткевич А.В., Костюченко С.А., Коцаренко В.А., Плешкин В.А., Якимович А.Г. - №4861231/24-21; Заявлено 20.08.90; Оpubл. 12.10.92, Бюл. №24 // Изобретения.- 1993.- №24.- С. 138.



РЭЗІЮМЭ

Караткевіч Аляксандр Васільевіч

ТАНКПЛЕНАЧНЫЯ МІКРАСХЕМЫ НА АСНОВЕ АЛЮМІНІЯ
І ЯГОНЫХ АКСІДАЎ ДЛЯ КРЫЯГЕННЫХ ТЭМПЕРАТУР

Ключавыя словы: танкапленачная мікрасхема, крыягенныя тэмпературы, алюміній, анадзіраванне, анодная аксідная плёнка, падложка, рэзістар, кандэнсатар, шматузроўневыя сістэмы міжзлучэнняў.

Праведзены даследаванні механічных свойстваў анодных аксідных плёнак. Выяўлены характар тэмпературных залежнасцяў стралы прагібу аднабакова анадзіраванага алюмінія, а таксама адносных падаўжэння, тэмпературнага каэфіцыенту лінэйнага пашырэння і модуля Юнга двухбакова анадзіраванага алюмінія.

Выяўлены асновныя заканамернасці ўтварэння мікрарэльефу паверхнасці анодных аксідных плёнак у працэсу анадзіравання. Паказана, што змяненне рэльефу адбываецца ў адпаведнасці з асновнымі стадыямі пораўтварэння: ростам бяспорыстай аксіднай плёнкі, зараджаннем пор, упарадкаваннем порыстай структуры і ростом плёнкі ў глыбіню.

Разпрацавана тэхналогія анадзіравання алюмініевых пласцін, згодна з якой анадзіраванне праводзяць у тры стадыі: спачатку для атрымання высокай якасці паверхні праводзяць "бліскачае" анадзіраванне, потым для атрымання патрэбнай таўшчыні праводзяць таўстаслойнае анадзіраванне, і, ўрэшце, для павелічэння тэрмастойкасці праводзяць "дэмпфіруючае" анадзіраванне.

Праведзены даследаванні электрафізічных свойстваў пасіўных элементаў мікрасхем (падложак, танкопленачных праваднікоў, рэзістараў і кандэнсатараў) у дыяпазоне тэмператур 4...300 К.

В выніку праведзеных даследаванняў разпрацавана тэхналогія, якая забяспечвае стварэнне надзейнай высокафункцыянальнай малагабарытнай апаратуры, прызначанай для работы пры крыягенных тэмпературах, і найбольш поўна выкарыстоўвае ўсі перавагі анадзіраванага алюмінія: высокую цеплаправоднасць, механічную моцнасць і добраапрацовываемасць.

РЕЗЮМЕ

Короткевич Александр Васильевич

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО ОКСИДОВ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Ключевые слова: тонкопленочная микросхема, криогенные температуры, алюминий, анодирование, анодная оксидная пленка, подложка, резистор, конденсатор, многоуровневые системы межсоединений.

Проведены исследования механических свойств анодных оксидных пленок. Установлен характер температурных зависимостей стрелы прогиба односторонне анодированного алюминия, а также относительные удлинения, температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга двусторонне анодированного алюминия.

Установлены основные закономерности образования микрорельефа поверхности анодных оксидных пленок в процессе анодирования. Показано, что изменение рельефа происходит в соответствии с основными стадиями порообразования: ростом беспористой оксидной пленки, зарождением пор, упорядочением пористой структуры и ростом пленки в глубину.

Разработана технология анодирования алюминиевых пластин, согласно которой анодирование проводят в три стадии: сначала для получения высокого качества поверхности проводят "блестящее" анодирование, затем для получения требуемой толщины проводят толстослойное анодирование, и, наконец, для увеличения термостойкости проводят "демпфирующее" анодирование.

Проведены исследования электрофизических свойств пассивных элементов микросхем (подложек, тонкопленочных проводников, резисторов и конденсаторов) в диапазоне температур 4...300 К.

В результате проведенных исследований разработана технология, которая обеспечивает создание надежной высокофункциональной малогабаритной аппаратуры, предназначенной для работы при криогенных температурах, и наиболее полно использует все преимущества анодированного алюминия: высокую теплопроводность, механическую прочность и хорошую обрабатываемость.

SUMMURY

Alexander V. Korotkevich

THIN-FILM MICROCIRCUITS BASED ON ALUMINUM
AND ITS OXIDES FOR CRYOGENIC TEMPERATURES

Key words: a thin-film microcircuit, cryogenic temperatures, aluminum, anodizing, anodic oxide film, substrate, resistor, capacitor, interconnection multilevel systems.

The researches of mechanical properties of anodic oxide films have been carried out. The temperature dependence pattern of sag of the single-sided anodized aluminum, and the temperature dependence pattern of relative elongation, thermal extension coefficient and Young's module of the double-sided anodized aluminum have been established.

The basic regularities of the surface microrelief formation of anodic oxide films during anodizing process have been established. It is shown that relief formation proceeds according to basic stages of formation pores: growth of a dense oxide film, pores initiation, porous structure ordering and growth of film in depth.

The anodizing technology of aluminum substrates has been developed, according ones anodizing is carried out in three stages: at first to obtain anodic oxide films with high quality surface the bright anodizing is carried out, then to obtain required thickness of anodic oxide film the thick-film anodizing is carried out, and at last to increase thermostraightness the damping anodizing is carried out.

The researches of physical properties of passive elements of microcircuit (substrates, thin-film conductors, resistors and capacitors) in range of temperatures 4...300 K have been carried out.

The technology providing the creation reliable, high-functional, small-sized apparatus for cryogenic temperatures and using all advantages of anodized aluminum: high heatconducting, mechanical strength and good machinability has been developed as a result of the researches.

КОРОТКЕВИЧ АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ МИКРОСХЕМЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И
ЕГО ОКСИДОВ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Специальность 05.27.01 –Твердотельная электроника, микроэлектроника и
наноэлектроника

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать	18.01.2000.	Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная	Печать ризографическая	Усл.печ.л. 1,62.
Уч.-изд.л. 1,0.	Тираж 90 экз.	Заказ 23.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156
220027, Минск, ул. П.Бровки, 6