

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 621.382.002

ПРУДНИК АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННОГО РЕЛЬЕФА ТОНКИХ ПЛЕНОК
ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОКСИДНЫХ МАСОК**

05.27.01 "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах"

АВТОРЕФЕРАТ

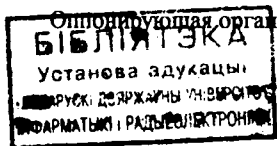
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Минск 2002

Работа выполнена в Учреждении образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Научный руководитель: д. т. н., проф. Лыньков Л.М.
(Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; декан факультета компьютерного проектирования).

Официальные оппоненты: д. т. н., проф. Сокол В.А.
(Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; зав. кафедрой микроэлектроники).
к. т. н., Чигирь Г.Г. (НПО "Интеграл"; нач. сектора).



Оппонирующая организация: Институт электроники НАН РБ

Защита диссертации состоится 30 мая 2002 года в 16 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при Учреждении образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (220027, Минск, ул. П. Бровки, 6; ауд. 232, 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 технологии микроэлектроники для формирования топологических элементов интегральных схем используются различные виды литографии --- оптическая, рентгеновская, электронно-лучевая и ионно-лучевая. Среди них по принципу переноса изображения можно выделить прямую и обратную литографии. Вследствие постоянного уменьшения элементов и компонентов интегральных схем, предъявляются все более жесткие требования к разрешающей способности, производительности и стоимости литографических процессов.

В связи с микроминиатюризацией многих устройств, переходом к субмикронным размерам, а также развитием микромеханики работы в этом направлении имеют большое значение. Разработка дешевых, воспроизводимых литографических процессов, позволяющих формировать субмикронный рельеф имеет огромное значение для технологии производства полупроводниковых интегральных схем и дальнейшего развития микро-, опто- и магнетoeлектроники.

С помощью рентгеновской литографии получено разрешение 0,02 мкм в режиме контактной печати, но технологии создания масок и системы экспонирования в настоящий момент технически достаточно сложные и дорогие. С помощью сканирующей электронно-лучевой литографии получено разрешение порядка 0,01 мкм, однако, использование пошагового метода экспонирования не может быть применено для серийного производства микросхем со структурами субмикронных размеров. Сканирующая литография на микрозоре, с помощью которой можно добиться разрешения порядка 0,01 мкм, находится на ранней стадии развития.

Обратная литография является одним из широко применяемых способов формирования рельефа тонких пленок субмикронных размеров. Обратный метод переноса рисунка был создан как альтернатива прямым методам для устранения трудностей, связанных с локальной обработкой активного слоя, так как его удаление совмещено с операцией снятия резистивной маски.

Существующие методы обратной литографии характеризуется рядом недостатков, одним из которых является необходимость выдерживания низкой температуры подложки при осаждении материала активного слоя.

Необходимо разработать методы обратной литографии, с принципиально новыми способами удаления масок, которые отличались бы от существующих низкой температурой удаления маски с возможностью использования в едином технологическом процессе производства интегральных схем.

Проблема осаждения материала активного слоя при более высоких температурах может быть решена путем применения металлических масок, так как в ряде металлов при определенных условиях происходят фазовые переходы, которые приводят к полному или частичному их разрушению, такие как фазовый переход $\beta\text{-Sn} \rightarrow \alpha\text{-Sn}$, объемный рост оксидов тугоплавких металлов. Использование фазовых переходов

в металлах для обратной литографии позволит снизить температуру взрыва маски, что увеличивает временную стабильность и температурную совместимость различных материалов интегральных схем.

Разработка новых способов обратной литографии особенно важна для формирования субмикронного рельефа тонких пленок в технологии интегральных схем на нестандартных подложках, устройств микромеханики и магнетозлектроники.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Материалы второй главы включают работу и ее результаты, полученные в рамках выполнения ГБЦ 97-3060 "Физико-химическое модифицирование оловянных тонкопленочных покрытий". Материалы четвертой главы включают работу и ее результаты, полученные в рамках выполнения ГБЦ 98-3098 "Разработка методов и средств формирования тонкопленочных ВТСП-компонентов с субмикронными размерами". Материалы пятой главы включают работу и ее результаты, полученные в рамках выполнения проекта 04.06.01 Государственной научно-технической программы "Информатика".

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка конструкторско-технологических методов и средств обратной литографии с использованием тонких маскирующих пленок металлов и оксидов на их основе.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести анализ современных методов и средств получения рельефа тонких пленок с субмикронными размерами;
- экспериментально исследовать процесс низкотемпературной $\beta \rightarrow \alpha$ модификации пленок олова в зависимости от условий их формирования и режимов их термообработки;
- адаптировать процессы анодного окисления пленок алюминия и их селективного травления для формирования на их основе масок для обратной литографии;
- изучить влияние режимов термического окисления пленок тугоплавких металлов на формирование оксидов на их основе для использования в качестве маскирующих покрытий;
- разработать технологические процессы формирования субмикронного рельефа тонких пленок методами обратной литографии для различных тонкопленочных структур и провести расчет воспроизводимости линейных размеров.

Объект и предмет исследования

Выбор в качестве основного объекта исследования пленок олова, алюминия и ряда тугоплавких металлов (ниобия, тантала, титана и ванадия) и их оксидов обусловлен наличием у них комплекса физико-химических свойств, позволяющих применять их при производстве изделий электронной техники. Ряд проблем, возникающих при получении наноразмерных структур и разработке технологических процессов об-

ратной литографии, может быть решен посредством низкотемпературной деструкции пленок олова, анодирования пленок алюминия и термического окисления пленок тугоплавких металлов.

Методология и методы проведенного исследования

При решении поставленных задач использовали известные методы электрохимического осаждения и анодирования, методы исследования микроструктуры и электрофизических свойств материалов.

При электрохимическом осаждении олова и анодировании алюминия использовали потенциостат П 5827. Регистрацию кинетических кривых процессов анодирования проводили с использованием потенциометров КСП-7 и ПДП-002. Образцы пленок тугоплавких металлов получали с использованием методов электронно-лучевого испарения. Структуру и внутренние механические напряжения, возникающие в оксиде при термическом окислении, изучали рентгенографическим анализом на установке ДРОН 2.0. Тестовые структуры получали литографическими методами на установке ЭМ-584.

Для вычисления погрешностей литографических процессов использован расчетно-аналитический метод анализа производственных погрешностей.

Научная новизна и значимость полученных результатов

1. Предложено использование каталитической реакции $\beta \rightarrow \alpha$ модифицирования пленок олова для низкотемпературной ($< 50^\circ\text{C}$) обратной литографии. Установлен оптимальный состав катализатора $\beta \rightarrow \alpha$ модифицирования — 10 % спиртовой раствор гексахлорстannата аммония, и показано, что время перекристаллизации минимально при температуре 8°C , и с уменьшением толщины пленок до 0,1 мкм составляет 15...30 с, а время появления центров перекристаллизации минимально при температуре -30°C .

2. Экспериментально установлены граничные температуры термического окисления тонких пленок тугоплавких металлов, полученных электронно-лучевым испарением — для титана и ванадия $300...350^\circ\text{C}$; для ниобия и тантала $350...400^\circ\text{C}$, приводящие к их локальному деструктивному разрушению в процессе окисления согласно механизма формирования агломерационных пор вблизи фронта роста оксида и взаимодействия с подложкой.

3. Расчетно-аналитическим методом анализа погрешностей установлены оптимальные условия формирования элементов интегральных схем с субмикронными размерами в зависимости от режимов катодного осаждения, анодирования алюминия и термического окисления. Показано, что точность воспроизведения топологических элементов (относительная погрешность формирования) при катодном осаждении 1,7 %...8,3 % с разрешающей способностью 0,6...1,2 мкм; при пористом анодировании 1,2 %...3,3 % с разрешающей способностью 0,13...0,66 мкм; при плотном анодировании 8,0...10,0 % с разрешающей способностью 0,06...0,54 мкм; при термическом окислении тугоплавких металлов 3,3...13,3 % с разрешающей способностью 0,12...1,12 мкм.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработаны базовые технологические процессы обратной литографии высокой точности, которые позволяют применять их при изготовлении топологических структур субмикронных размеров с высокой регулярностью и произвольной конфигурацией.
2. Предложены конструктивно-технологические приемы формирования элементов интегральных схем способами самоформирования и самосовмещения, которые устраняют ошибки совмещения и позволяют получать субмикронные топологические элементы без применения прецизионных фотошаблонов.
3. Разработаны базовые критерии для выбора вариантов формирования топологических структур с использованием технологических режимов катодного осаждения, анодирования и термического окисления тонких пленок обратных маскирующих покрытий.

Результаты диссертационной работы внедрены в ФГУП Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (Российская Федерация, г. Москва) для изготовления датчиков специального применения и в учебном процессе в Минском высшем радиотехническом колледже в курсах "Физика твердого тела и активных элементов микросхем" и "Физико-химические основы микроразработки электроники".

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Модифицирование тонких пленок β -олова, формируемых электрохимическим осаждением, происходит при температуре $-30...+8$ °С, что позволяет применять его в технологических процессах обратной литографии, гальванопластики и изготовления фильтрующих материалов.
2. Граничными температурами термического окисления тонких пленок тугоплавких металлов (ниобия, тантала, титана и ванадия) в пределах которых происходит объемный рост их оксидов, применимый для процессов обратной литографии, является температура 300...400 °С.
3. Конструктивно-технологические приемы формирования субмикронных элементов интегральных схем и критерии для выбора их вариантов, что позволяет создавать топологические элементы с относительной погрешностью 1 %.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в участии в разработке, подготовке и непосредственном проведении экспериментов по электрохимическому осаждению, анодному и термическому окислению, в анализе, интерпретации и обобщении полученных экспериментальных результатов.

Апробация результатов диссертации

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на II, III, IV и V Международных научно-технических конференциях "Современные

средства связи" (Нарочь, 1997, 1998, 1999, 2000 гг.), "Nanomeeting" (Минск, 1999 г.), IV Международной научно-технической конференции "Современные технологии гибридных интегральных микросхем, включая элементы сверхпроводниковой электроники" (Нарочь, 1996 г.), I и II Республиканских научно-технических конференциях "Новые материалы и технологии" (Минск, 1996, 1998 гг.), V Международном симпозиуме "Современные средства отображения информации" (Раков, 1996 г.), V и VI Республиканских научных конференциях студентов и аспирантов "Физика конденсированных сред" (Гродно, 1997, 1998 гг.).

Опубликованность результатов

По материалам диссертации опубликовано 8 статей в научно-технических журналах, 2 статьи в сборниках материалов конференций и 2 тезиса докладов в сборниках тезисов конференций. Получен 1 патент РБ, опубликована информация о 4 патентах РБ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 140 страниц, из которых 88 страниц машинописного текста. Она включает 60 рисунков на 23 страницах, 24 таблицы на 16 страницах, библиографию из 146 наименований на 10 страницах и 2 приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы определено основное направление, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задача работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, охарактеризована научная новизна, научная и практическая значимость полученных в работе результатов.

В первой главе проведен анализ литографических методов и средств, применяемых в микроэлектронике.

Из анализа известных литературных данных приведены явления, ограничивающие применение оптической, рентгеновской, электронно-лучевой и ионной литографий.

Рассмотрены принципы и основные закономерности обратной литографии. Проанализированы возможности использования органических и неорганических маскирующих покрытий для формирования элементов интегральных схем субмикронных размеров.

В качестве главных критериев разработки новых литографических методов и средств определены температура удаления маски, температура осаждения активного материала, точность процессов.

Показано, что для разработки процессов обратной литографии перспективным является применение металлических масок, так как в ряде металлов при определенных условиях происходят фазовые переходы, которые приводят к полному или частичному разрушению (деструкция).

Отмечено, что для создания маскирующих покрытий в технологии обратной литографии наибольший интерес представляет исследование электрохимического осаждения и анодного окисления тонких пленок металлов, так как эти способы позволяют максимально контролировать процесс формирования масок с субмикронными размерами для получения элементов микрорисунка.

Во второй главе приведены результаты исследования локального низкотемпературного модифицирования тонких пленок олова осажденных электрохимическим методом для технологии обратной литографии.

Изучена кинетика деструкции тонких пленок олова в зависимости от типа катализатора. Показано, что наиболее высокая скорость деструкции тонкопленочных оловянных покрытий получаемых электролитическим осаждения, обеспечивается раствором гексахлорстannата аммония. Впервые показано, что с повышением концентрации гексахлорстannата аммония время перекристаллизации $\beta\text{-Sn} \rightarrow \alpha\text{-Sn}$ значительно уменьшается и максимально при 8°C .

Исследована кинетика деструкции пленок олова в зависимости от толщины. При этом толщина пленки олова изменялась от 0,07 до 12 мкм. Для изучения кинетики деструкции образцы были помещены в 10 % спиртовой раствор гексахлорстannата аммония при температуре -30°C . Визуально фиксировали время появления первых зародышей фазового перехода $\beta\text{-Sn} \rightarrow \alpha\text{-Sn}$ и время полной деструкции слоя олова. Установлено, что с уменьшением толщины пленки олова скорость деструкции значительно увеличивается.

Изучена кинетика деструкции пленок олова в зависимости от материала подложки и температуры. Установлено, что материал подложки не влияет при температурах выше 0°C на скорость деструкции и очень незначительно влияет при температурах -30°C , если в качестве катализатора используется 10 % спиртовой раствор гексахлорстannата аммония. При хранении образцов в присутствии мелкодисперсных частиц α -олова скорость деструкции тем выше, чем ниже температура. При хранении образцов в присутствии 10 % спиртового раствора гексахлорстannата аммония скорость деструкции пленок олова значительно возрастает при повышении температуры. При температуре $+8^\circ\text{C}$ пленки олова полностью разрушаются за несколько часов, а для полного разрушения тех же пленок при -30°C требуется несколько суток (рис. 1, 2). Установлено, что время начала фазового перехода $\beta \rightarrow \alpha$ -олово максимально при температуре -30°C .

Исследована кинетика деструкции пленок олова в тонкопленочных системах металл-олово-металл. При использовании в качестве катализатора 10 % спиртового раствора гексахлорстannата аммония материал подложки не оказывает существенного влияния на скорость деструкции пленок олова. Начало фазового перехода несколько ускоряется на подложках из никеля и незначительно замедляется на подложках из алюминия.

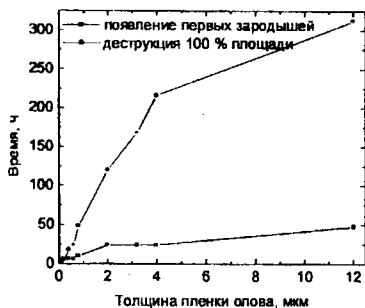


Рис. 1. Время появления зародышей α -Sn и кинетика деструкции олова в гексахлоростаннате аммония.

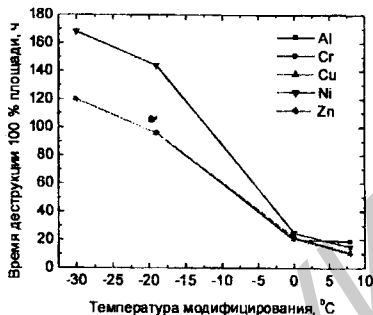


Рис. 2. Зависимость кинетики деструкции пленок олова от материала подложки и температуры в катализаторе $(\text{NH}_4)_2\text{SnCl}_6$.

Для получения элементов субмикронных размеров предложены конструктивно-технологические приемы самосовмещения и самоформирования.

Первый способ назван так, потому что в этом способе линия субмикронного размера создается за счет самосовмещения, так как осаждение активного материала проводится в "зазор" между двумя линиями контактной маски, осажденными на исходную структуру (рис. 3).

Второй конструктивно-технологический способ назван так, потому что при формировании контактной маски или субмикронного рельефа материал осаждается так, чтобы он покрывал поверхность боковую сторону исходной структуры (рис. 4).

Проведен анализ точности технологического процесса обратной литографии с модифицированием тонких пленок олова. Для этого использовался расчетно-аналитический метод анализа производственных погрешностей. В результате анализа получены уравнения для применения масок из олова в технологии обратной литографии. Разработанные методики расчета позволяют для заданных погрешностей технологических процессов и необходимых линейных размеров топологических элементов рассчитывать параметры технологических процессов обратной литографии.

Составлялось уравнение для определения размера структуры после осаждения маскирующего оловянного покрытия x_1 :

$$x_1 = x_0 - 2vt, \quad (1)$$

где x_0 — размер исходной структуры, v — скорость осаждения олова, t — время осаждения.

При этом учитывалось, что размер x_0 исходной структуры является величиной, равной сумме номинального значения и погрешности, а также погрешностями Δv , Δt , вводимыми в ходе электрохимического осаждения слоя олова.

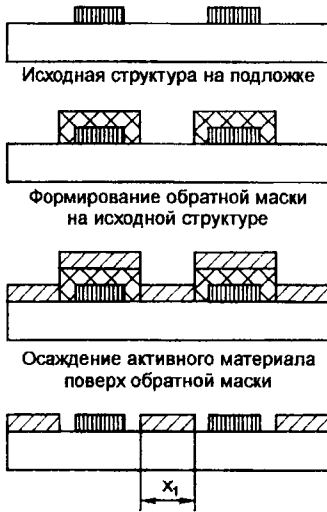


Рис. 3. Схематическое изображение конструктивно-технологического способа самосовмещения.

Используя расчетно-аналитический метод анализа производственных погрешностей, определялась относительная погрешность δx_1 размера x_1 .

$$\delta x_1 = \frac{x_0 \delta x_0 - 2vt(\delta v + \delta t)}{x_0 - 2vt} \quad (2)$$

В случае самоформирования, размер окна в маскирующем слое:

$$x_2 = vt \quad (3)$$

Относительная погрешность δx_2 размера x_2 :

$$\delta x_2 = \delta v + \delta t \quad (4)$$

Расчитывался критерий для выбора варианта конструктивно-технологического способа формирования элементов. За критерий принимался размер структуры x_1 в маскирующем слое, при котором погрешности для самосовмещения становятся равными погрешностям для самоформирования.

Погрешность δx_1 из (2) больше или равна погрешности δx_2 из (4) при условии:

$$\delta x_1 \geq \delta x_2 \quad (5)$$

Из (5) выведен величина предельного размера, ниже значения которого предпочтительнее применение самоформирования, выше которого — самосовмещение:

$$x_0 \leq \frac{\Delta x_0}{\delta v + \delta t} \quad (6)$$

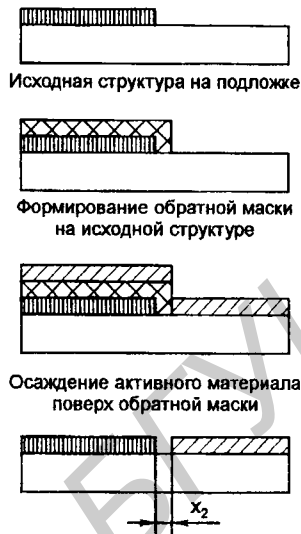


Рис. 4. Схематическое изображение конструктивно-технологического способа самоформирования.

Зависимости (6) при разных значениях δv и $\delta \lambda$ представлены на рис. 5 (при $\Delta x_{\sigma}=0,08$ мкм) и на рис. 6 (при $\Delta x_{\sigma}=0,018$ мкм).

Полученные формулы позволяют рассчитать относительные погрешности формируемых линий металлизации, исходя из параметров электрохимического осаждения контактной маски олова и линейных размеров элементов первого слоя металлизации, и наоборот — рассчитать режимы электрохимического осаждения, исходя из величин относительных погрешностей.

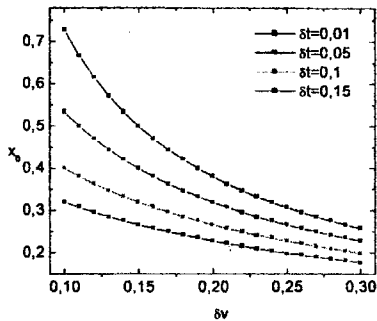


Рис. 5. Расчетные зависимости критерия выбора варианта конструктивно-технологического способа от погрешностей параметров процесса электрохимического осаждения обратной маски для $\Delta x_{\sigma}=0,08$ мкм.

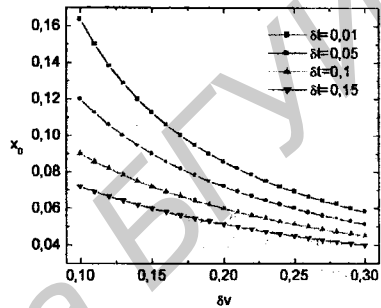


Рис. 6. Расчетные зависимости критерия выбора варианта конструктивно-технологического способа от погрешностей параметров процесса электрохимического осаждения обратной маски для $\Delta x_{\sigma}=0,018$ мкм.

Приведен пример расчета параметров технологического процесса получения рельефа тонких пленок путем низкотемпературного модифицирования тонких пленок олова.

Показано, что в разработанном технологическом процессе обратной литографии с применением низкотемпературного модифицирования электрохимически осажденного олова можно создавать топологические элементы шириной 0,6...1,2 мкм с погрешностью 0,0167...0,083.

В третьей главе проведен комплекс исследований процессов пористого и плотного анодирования алюминия для формирования маскирующих материалов обратной литографии.

Проведен анализ основных режимов плотного анодирования тонких пленок алюминия (гальваностатический, потенциостатический и комбинированный). Сделан вывод о преимуществе комбинированного режима, который заключается в начальном увеличении напряжения анодирования с последующим переходом к потенциостатическому режиму.

Проведен анализ основных режимов пористого анодирования тонких пленок алюминия. Представлены обобщенные условия формирования и их влияние на основные типоразмеры получаемых оксидов пористого типа.

Получение анодных оксидных пленок Al_2O_3 пористого типа с определенными типоразмерами определяется рядом факторов, которые можно разделить на две группы. В первую группу входят условия формирования исходного материала: структура и состав пленок и подложек из алюминия, способы получения пленок и подложек, методы и качество их подготовки к анодированию. Ко второй группе относятся условия формирования пленок Al_2O_3 , состав и температура электролита, плотность тока, длительность процесса.

Выбраны оптимальные режимы и составы электролитов для анодирования тонких пленок с воспроизводимыми линейными размерами анодного оксида.

Проведен анализ точности технологического процесса обратной литографии с применением пористого анодного окисления алюминия.

Полученные формулы позволяют рассчитать относительные погрешности формируемых линий металлизации, исходя из параметров пористого анодного окисления контактной маски из алюминия и ее линейных размеров, и наоборот — выбрать режимы анодного окисления, исходя из заданных величин относительной погрешности.

Проведен расчет критерия для выбора конструктивно-технологического варианта формирования субмикронных размеров с применением пористого анодирования алюминия. Для этого выведена формула расчета предельного размера структуры в маскирующем слое, при котором погрешности самосовмещения становятся равными погрешностям самоформирования.

Приведены результаты расчета линейных размеров субмикронных структур, полученных пористым анодированием алюминия, для различных параметров технологического процесса.

Проведено анализ точности технологического процесса обратной литографии с применением плотного анодного окисления алюминия.

Полученные формулы позволяют рассчитать относительные погрешности формируемых линий металлизации, исходя из параметров плотного анодного окисления контактной маски из алюминия и ее линейных размеров, и наоборот — выбрать режимы анодного окисления исходя из заданных величин относительной погрешности. Проведен расчет критерия для выбора конструктивно-технологического варианта формирования субмикронных размеров с применением пористого анодирования алюминия.

Приведены результаты расчета линейных размеров субмикронных структур, полученных плотным анодированием алюминия, для различных параметров технологического процесса.

Установлено, что в конструктивно-технологическом способе самосовмещение относительная погрешность формирования исходной структуры незначительно влияет на относительную погрешность формируемых структур, а наибольшая составляющая погрешности вносится погрешностями параметров технологических процессов. В конструктивно-технологическом способе самоформирования относительная погрешность формирования исходной структуры не влияет на относительную погрешность формируемых структур.

Показано, что в разработанных технологических процессах обратной литографии с применением анодного окисления алюминия при пористом окислении алюминия можно создавать топологические элементы шириной $0,1294...0,6602$ мкм с погрешностью $0,0116...0,0327$, а при использовании плотного окисления алюминия можно создавать топологические элементы шириной $0,06...0,54$ мкм с погрешностью $0,08...0,1000$. Минимальный размер структур, может быть достигнут при плотном анодировании алюминия, но при пористом анодировании алюминия процесс характеризуется большей точностью.

В четвертой главе проведен комплекс исследований и установлены граничные условия термического окисления тонких пленок тугоплавких металлов, при которых происходит их деструкционное локальное разрушение.

Показано, что механические напряжения в пленках обусловлены процессами объемного роста и перепадом температур от температуры окисления до нормальных температур. Установлено, что причиной разрушения окисла является значительное увеличение внутренних механических напряжений.

Исследовали зависимость кинетики окисления тонких пленок тугоплавких металлов (ниобий, тантал, титан и ванадий) от времени и температуры. Оксиды тонких пленок тугоплавких металлов изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа. Эксперименты показали логарифмическую зависимость толщины образующегося окисла в интервале $300...400$ °С и линейную зависимость в интервале $400...600$ °С (рис. 7, 8).

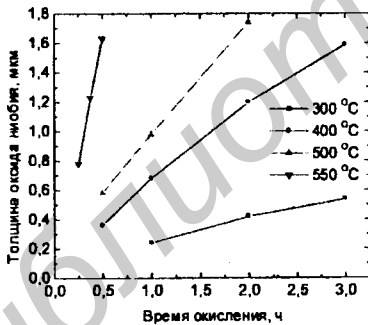


Рис. 7. Экспериментальная зависимость толщины образующегося оксида ниобия от температуры и времени окисления.

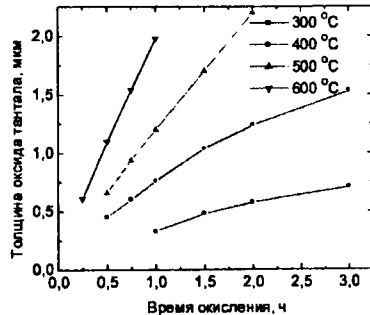


Рис. 8. Экспериментальная зависимость толщины образующегося оксида тантала от температуры и времени окисления.

Исследована структура и внутренние механические напряжения, возникающие в термических окислах тонких пленок тугоплавких металлов. Показано, что кристаллический оксид тантала сохранял свойства при температуре 600 °С на протяжении 1 часа и лишь при дальнейшем увеличении длительности нагревания переходил в аморфное состояние.

Показано, что при температурах 400...600 °С происходит значительный объемный рост оксида, а разрушение в первую очередь происходит вблизи края окисляемого покрытия, что можно связать с одновременным окислением торцевой части покрытия и его поверхности (рис. 9).

Показано, что при температурах 300...400 °С происходит незначительный объемный рост оксида. Это объясняется тем, что при этих температурах происходит незначительный рост внутренних механических напряжений (рис. 10).

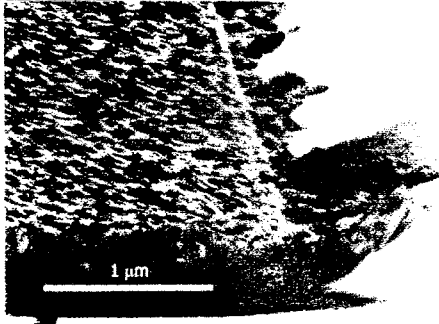


Рис. 9. Внешний вид боковой поверхности Ta_2O_5 после окисления пленки Ta толщиной 0,25 мкм при температуре 600 °С.

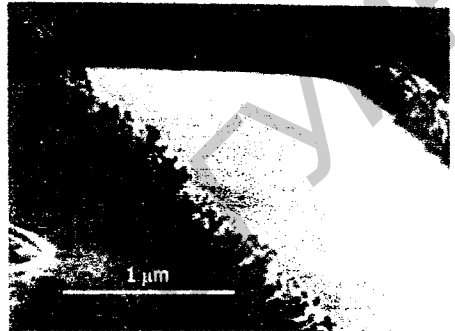


Рис. 10. Поверхность Ta_2O_5 после окисления пленки Ta толщиной 0,2 мкм при температуре 300 °С.

По установленным закономерностям окисления тонких пленок тугоплавких металлов был проведен ряд экспериментов по созданию рельефа тонких пленок. Создавали рисунок пленки алюминия толщиной 0,4 мкм обратной литографией по маскирующим пленкам тугоплавких металлов толщиной 300...500 нм. Для этого производили термическое окисление полученной структуры в среде кислорода при атмосферном давлении при температуре 350 °С для удаления обратной маски в результате объемного роста оксида (рис. 11).

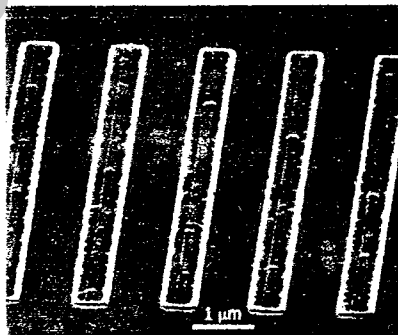


Рис. 11. Внешний вид подложки с осажденной пленкой алюминия после взрыва ниобиевой маски толщиной 0,4 мкм.

Показано, что термическое окисление тугоплавких металлов при повышенном давлении (2...10 атм.) приводит к повышению внутренних механических напряжений. Вследствие чего происходит более тонкое измельчение оксида при разрушении, что позволяет снизить нижний предел толщины маскирующей пленки тугоплавких металлов.

Предложена методика расчета механических напряжений в пленке оксида. На основании которой были сделаны выводы, что окисление тонких пленок связано с упорядочением структуры, повышением твердости, уменьшением коэффициентов диффузии влаги; и механические напряжения в пленках обусловлены объемным ростом и перепадом температур при охлаждении образца от температуры окисления до нормальных температур.

Проведено анализ точности технологического процесса обратной литографии с применением термического окисления пленок тугоплавких металлов.

Полученные выражения позволяют рассчитать относительную погрешность формируемых линий металлизации исходя из параметров термического окисления контактной масок из тонких пленок тугоплавких металлов (Nb, Ta, Ti, V) и ее линейных размеров, и наоборот — выбрать режимы термического окисления, исходя из необходимой величины относительной погрешности размера.

Проведен расчет критерия для выбора конструктивно-технологического варианта формирования субмикронных размеров.

Для каждого из тугоплавких металлов (Nb, Ta, Ti, V) производился расчет относительных погрешностей и находится критический размер формирования структур.

Показано, что при термическом окислении обратных масок из тонких пленок тугоплавких металлов (ниобия, тантала, титана и ванадия) можно создавать топологические элементы шириной 0,1240...1,1230 мкм с погрешностью 0,0332...0,1330.

Показано, что наиболее точным из разработанных процессов является технология, основанная на удалении обратной маски путем селективного травления пористого анодного оксида алюминия по отношению к алюминию, которая погрешностей характеризуется относительной погрешностью 0,0116...0,0327.

В пятой главе предложено применение разработанных процессов в микро- и наноэлектронике.

Предложен базовый способ обратной литографии с использованием в качестве контактной маски тонкой пленки β -олова. Приведены карты электрохимического осаждения олова и фазового модифицирования олова, которые содержат последовательность операций и режимы нанесения на подложку контактной маски из β -олова и ее взрыва. С уменьшением температуры "взрыва" контактной маски до температуры $-13,2...+8$ °C значительно расширяется номенклатура используемых рабочих материалов, повышается временная стабильность и совместимость материалов интегральных схем, при этом удаление контактной маски происходит без использования химических реактивов.

Предложен способ гальванопластики с применением фазового перехода олова. Предложенный способ повышает качество и точность получаемых копий за счёт эффективности отделения копий, и увеличивает технологичности процесса за счёт исключения операций по изготовлению матрицы. В результате перекристаллизации промежу-

точного слоя β -олова в предлагаемом способе копия отделяется от оригинала не требует механического отделения, что исключает возможность ее повреждения.

Предложен способ создания фильтрующих элементов для изготовления фильтрующих материалов из вязаных металлических сеток для высокоскоростных фильтрационных систем. Предложенный метод позволяет изготавливать фильтрующие материалы с пористостью 0,7...0,9 и размером пор 0,7...2 мкм, что существенно повышает тонкость фильтрования.

Предложена технология получения масок из тонких пленок алюминия для создания субмикронного рельефа тонких пленок. В предлагаемом процессе окно в алюминиевой маске равно толщине выращенного анодного оксида алюминия на боковой стенке пленки, что позволяет получать размеры активных элементов интегральных схем с линейными размерами 0,2 мкм.

Разработан и запатентован способ обратной литографии с использованием алюминиевой контактной маски. Импульсная термообработка на воздухе алюминиевой маски до температуры 500...800 °С, последующее охлаждение до комнатной температуры и удаление контактной маски химическим путем с использованием УЗ-колебаний позволяет устранить ограничение рабочего материала по толщине и повысить воспроизводимость процесса, так как облегчается доступ травителя к материалу контактной маски.

Предложена технология изготовления многоэмиттерной автоэлектронной структуры на основе пористого оксида алюминия. Показано, что микроприборы с активной площадью 4 мм² и плотностью эмиттеров 2×10^6 мм⁻² обеспечивают ток 500...600 мА.

Второй предложенный вариант технологии создания многоэмиттерной автоэлектронной структуры позволяет создавать автоэлектронные приборы с различными технико-эксплуатационными характеристиками за счет возможности использования в широком диапазоне материалов для катода, как однородных по своей структуре, так и неоднородных в виде последовательно осажденных слоев. Испытания экспериментальных образцов показали, что структуры с рабочей площадью 1 см² и плотностью эмиттеров 10^6 мм⁻² обеспечивали ток 15...20 мА.

Предложенная технология автоэлектронных структур с использованием пористого оксида алюминия в качестве контактной маски позволяет увеличить максимальный ток эмиссии, повысить стабильность и надежность.

Предложены технологии изготовления автоэлектронной микроструктуры с управляющим электродом с применением модифицирования олова и с применением плотного и пористого анодирования Al. Предложенные процессы позволяют изготовить автоэлектронные микроструктуры с меньшим расстоянием между эмиттером и управляющим электродом и установить эмиттер не ниже уровня управляющего электрода, что позволяет снизить рабочее напряжение. Испытания изготовленных по разработанному процессу приборов показали, что для обеспечения плотности тока 2 А/см² необходимо рабочее напряжение менее 100 В, причем стабильность автоэлектронного тока находится на уровне 10...15 %.

Разработан базовый технологический процесс обратной литографии для формирования субмикронного рельефа тонких пленок с использованием Nb, Ta, Ti, V в качестве контактных масок.

Предложен метод обратной литографии, при котором в качестве контактной маски используется сплав титана с цирконием (50 %-50 %), а удаление контактной маски осуществляют путем термообработки на воздухе полученной структуры при температуре 250...350°C. Данный метод приводит к снижению температуры взрыва маски, что расширяет диапазон используемых рабочих материалов, вследствие критичности ряда материалов к высоким температурам, при этом снижение температуры увеличивает совместимость материалов имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения.

В приложениях представлены акты о внедрении результатов диссертационной работы в производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено использование каталитической реакции $\beta \rightarrow \alpha$ модифицирования пленок олова для низкотемпературной (<50 °C) обратной литографии. Установлен оптимальный состав катализатора $\beta \rightarrow \alpha$ модифицирования — 10 % спиртовой раствор гексахлоростанната аммония, и показано, что время перекристаллизации минимально при температуре 8 °C, и с уменьшением толщины пленок до 0,1 мкм составляет 15...30 с, а время появления центров перекристаллизации минимально при температуре -30 °C [4, 8, 11, 12].
2. Адаптированы процессы плотного и пористого анодного окисления пленок алюминия и их селективного травления для формирования на их основе масок для обратной литографии. Установлено влияние различных условий на изменение рельефа алюминия в случае формирования на нем оксида плотного и пористого типа [6].
3. Экспериментально установлены граничные температуры термического окисления тонких пленок тугоплавких металлов, полученных электронно-лучевым испарением — для титана и ванадия 300...350 °C; для ниобия и тантала 350...400 °C, приводящие к их локальному деструктивному разрушению в процессе окисления согласно механизма формирования агломерационных пор вблизи фронта роста оксида и взаимодействия с подложкой [7, 9, 10].
4. Расчетно-аналитическим методом установлены оптимальные условия формирования элементов интегральных схем с субмикронными размерами в зависимости от режимов катодного осаждения, анодирования алюминия и термического окисления. Предложены конструктивно-технологические приемы формирования элементов интегральных схем способами самоформирования и самосовмещения. Разработаны базовые критерии для выбора вариантов формирования топологических структур, которые позволяют создавать топологические элементы с относительной погрешностью 1 %. Разработанные методики расчета позволяют по заданным ли-

нейным размерам топологических элементов и их погрешностям рассчитать параметры и погрешности технологических процессов электрохимического осаждения масок, а также решить обратную задачу [1, 2, 3, 5].

5. На основе установленных режимов модифицирования пленок олова получаемых катодным осаждением разработан базовый технологический процесс обратной литографии для формирования субмикронного рельефа тонких пленок. Предложен технологический процесс формирования алюминиевых масок для создания субмикронного рельефа пленок. Разработан и запатентован способ обратной литографии с использованием алюминиевой контактной маски. Предложены базовые технологические процессы обратной литографии для формирования субмикронного рельефа тонких пленок с использованием ниобия, тантала, титана и ванадия в качестве контактных масок. Разработана технология обратной литографии с использованием в качестве маски сплава Ti-Zr [6, 13, 14, 15]. Технологические процессы обратной литографии с использованием в качестве масок пленок олова и тугоплавких металлов внедрены в ФГУП Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения (Российская Федерация, г. Москва) для изготовления датчиков специального применения.
6. Предложены способы гальванопластики и создания фильтрующих элементов для изготовления фильтрующих материалов для высокоскоростных фильтрационных систем. Разработан базовый технологический процесс изготовления автоэлектронных микроструктур с управляющим электродом с применением контактной маски из олова. Разработаны технологические процессы изготовления автоэлектронных микроструктур, которые позволяют получить систему эмиттеров повышенной плотности. Применение пористого анодного окисления позволило увеличить максимальный ток эмиссии, повысить стабильность и долговечность. Предложена технология изготовления автоэлектронной микроструктуры с управляющим электродом [16, 17].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**Статьи в журналах**

1. Лыньков Л.М., Прудник А.М. Методика расчета самоформирования субмикронных структур при термическом окислении пленок тугоплавких металлов // Известия Белорусской инженерной академии. — 2000. — № 1/2. — С. 65-66.
2. Прудник А.М., Болдышева И.П., Лыньков Л.М. Моделирование изменения линейных размеров топологических элементов интегральных схем в процессах создания металлизации // Веснік Сувязі. — 1999. — № 1. — С. 186-189.
3. Лыньков Л.М., Прудник А.М. Расчет топологических размеров элементов ИМС получаемых обратной литографией с применением пористого анодирования алюминия // Известия Белорусской инженерной академии. — 1999. — № 1/2. — С. 68-70.
4. Прудник А.М. Изучение кинетики деструкции олова для технологии обратной литографии // Материалы, технологии, инструменты. — 1998. — т. 3, № 2. — с. 124.
5. Прудник А.М. Оценка возможностей литографических методов с учетом погрешностей // Известия Белорусской инженерной академии. — 1998. — № 2/2. С. 218-220.
6. Лыньков Л.М., Жданович С.В., Петров Н.П., Болдышева И.П., Прудник А.М. Конструктивно-технологические методы получения компонентов интегральных микросхем с субмикронными размерами // Известия Белорусской инженерной академии. — 1997. — № 1/3. — С. 225-229.
7. Лыньков Л.М., Жданович С.В., Петров Н.П., Прудник А.М., Богущ В.А. Материалы для обратных масок технологии литографии и методы их термодеструкции // Материалы, технологии, инструменты. — 1996. — № 2. — С. 88.
8. Лыньков Л.М., Прудник А.М. Изучение граничных условий деструкции олова для технологии обратной литографии // Известия Белорусской инженерной академии. — 1996. — № 1. — С. 96-100.

Материалы конференций

9. Proudnik A.M., Lynkov L.M. Lift-off Techniques for Production of Submicron Metal Patterns / Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. — Singapore: World Scientific, 1999. — P. 298-301.
10. Лыньков Л.М., Жданович С.В., Петров Н.П., Прудник А.М., Болдышева И.П. Материалы для обратной литографии в технологии нанесения покрытий // Современные средства отображения информации: Материалы V международного симпозиума, Минск, 1996. — С. 158-161.

Тезисы докладов

11. Прудник А.М. Кинетика деструкции пленок олова в тонкопленочных системах металл-олово-металл // Физика конденсированных сред: Тез. докл. науч. конф., Гродно, 1998 / Гродненский госуниверситет. — С. 164.
12. Прудник А.М. Каталиизация процесса фазового перехода β -олово \rightarrow α -олово // Физика конденсированных сред: Тез. докл. науч. конф., Гродно, 1997 / Гродненский госуниверситет. — С. 134.

Патенты

13. Лыньков Л.М., Жданович С.В., Петров Н.П., Прудник А.М., Богуш В.А. Патент С2 ВУ № 2428; МПК H01L 21/312. Способ обратной литографии. Заявл. 10.04.1996; Опубл. 30.09.1998 // Официальный бюллетень / Государственный патентный комитет Республики Беларусь. — 30.12.1997. — № 4 (ч. 1). — С. 69.
14. Лыньков Л.М., Болдышева И.П., Прудник А.М. Способ создания межкомпонентной изоляции интегральных микросхем / Заявка на выдачу патента РБ на изобретение № а19990581 РБ, МПК H01L 21/72. — Заявл. 10.06.1999 // Официальный бюллетень / Государственный патентный комитет Республики Беларусь. — 30.12.2000. — № 4. — С. 75.
15. Лыньков Л.М., Прудник А.М., Болдышева И.П., Белятко Д.П. Способ обратной литографии / Заявка на выдачу патента РБ на изобретение № а19990582, МПК H01L 21/31. — Заявл. 10.06.1999 // Официальный бюллетень / Государственный патентный комитет Республики Беларусь. — 30.12.2000. — № 4. — С. 75.
16. Лыньков Л.М., Прудник А.М. Способ изготовления фильтрующего элемента / Заявка на выдачу патента РБ на изобретение № 970175, МПК B21F 27/18. Заявл. 27.03.1997 // Официальный бюллетень / Государственный патентный комитет Республики Беларусь. — 30.09.1998. — № 3. — С. 51.
17. Лыньков Л.М., Прудник А.М. Способ гальваноластики / Заявка на выдачу патента РБ на изобретение № 960258, МПК C25D 1/00, C25D 1/02. Заявл. 28.05.1996 // Официальный бюллетень / Государственный патентный комитет Республики Беларусь. — 30.12.1997. — № 4 (ч. 1). — С. 45.



Р Э З Ю М Э

Пруднік Аляксандр Міхайлавіч

Фармаванне субмікронага рельефа тонкіх плёнак зваротнай літаграфіяй з выкарыстаннем металічных і аксідных масак

Ключавыя словы: зваротная літаграфія, зваротныя маскі, субмікронныя памеры, тонкія плёнкi, нізкатэмпературнае мадыфіцыраванне, катоднае асаджэнне, аноднае акісленне, тэрмічнае акісленне.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца тонкія плёнкi олава, алюмінія і шэрагу тугаплаўкіх металаў і іхных аксідаў. Прадметам даследавання з'яўляецца распрацоўка метадаў зваротнай літаграфіі па металічных і аксідных лакальна нанесеных маскуючых пакрыццях для фармавання субмікронага рельефу тонкіх плёнак.

Мэтаю работы з'яўляецца даследаванне ўплыву рэжымаў нізкатэмпературнай і высокатэмпературнай апрацоўкі тонкіх плёнак разнастайных металаў і іхных аксідаў на іхняе лакальнае мадыфіцыраванне, электрахімічнае і тэрмічнае акісленне для выкарыстоўвання ў якасці маскуючых рельефаў, у тым ліку с субмікроннымі памерамі.

Даследаваны працэс кінэтыкі нізкатэмпературнага мадыфіцыравання тонкіх плёнак олава. Вызначана, што павышэнне хуткасці $\beta \rightarrow \alpha$ пераўтварэнняў плёнак олава з выкарыстоўваннем спіртавога раствора гексахлорстанната аммонія максімальна ў пачатку фазавага пераходу пры тэмпературы -30°C , значна павялічваецца пры павышэнні да тэмпературы 8°C і змяншэнні таўшчыны плёнак. Адаптаваны працэсы селектыўнага плотнага і порыстага аноднага акіслення плёнак алюмінія для тэхналогіі зваротнай літаграфіі.

Вывучаны ўплыў рэжымаў тэрмічнага акіслення плёнак тугаплаўкіх металаў для тэхналогіі зваротнай літаграфіі. Вызначаны гранічныя тэмпературы воджыгу тонкіх плёнак ніобія, тантала, тытана і ванадыя пры $300\text{--}400^\circ\text{C}$, што прыводзяць да іх лакальнага дэструктыўнага зруйнавання.

Распрацаваныя базавыя тэхналагічныя працэсы зваротнай літаграфіі для разнастайных тонкаплёнкавых мікраструктур і праведзены разлік іхняй дакладнасці. Паказаная магчымасць забяспячэння дакладнасці вырабу тапалагічных элементаў з памылкай 1 % у выпадку порыстага аноднага акіслення.

Прапанаваныя ўніверсальныя метадыкі разліка ўлічва тэхналагічных умоваў катоднага асаджэння, аноднага і тэрмічнага акіслення тонкіх плёнак на лінейныя мікронныя і субмікронныя памеры фармуемых рельефаў, якія адрозніваюцца ўлікам механізма іхняга фармавання. Распрацаваныя базавыя крытэрыі для выбару канструктыўна-тэхналагічных варыянтаў фармавання тапалагічных структур.

Прапанаваныя спосабы гальванопластыкі і вырабу фільтруючых элементаў для вытворчасці фільтруючых матэрыялаў для высокахуткасных фільтрацыйных сістэм. Распрацаваныя тэхналагічныя працэсы вырабу аўтаэлектронных мікраструктур, якія дазваляюць атрымоўваць сістэму эмітэраў высокай шчыльнасці.

РЕЗЮМЕ

Прудник Александр Михайлович

**Формирование субмикронного рельефа тонких пленок
обратной литографией с использованием металлических и оксидных масок**

Ключевые слова: обратная литография, обратные маски, субмикронные размеры, тонкие пленки, низкотемпературное модифицирование, катодное осаждение, анодное окисление, термическое окисление.

Объектом исследования являются тонкие пленки олова, алюминия и ряда тугоплавких металлов и их окислов. Предметом исследования является разработка методов обратной литографии по металлическим и оксидным локально нанесенным маскирующим покрытиям для формирования субмикронного рельефа тонких пленок.

Целью работы является разработка конструкторско-технологических методов и средств обратной литографии с использованием тонких маскирующих пленок металлов и оксидов на их основе.

Предложено использование каталитической реакции $\beta \rightarrow \alpha$ модифицирования пленок олова для низкотемпературной ($< 50^\circ\text{C}$) обратной литографии. Установлен оптимальный состав катализатора $\beta \rightarrow \alpha$ модифицирования — 10 % спиртовой раствор гексахлорстannата аммония, и показано, что время перекристаллизации минимально при температуре 8°C , и с уменьшением толщины пленок до $0,1\ \mu\text{м}$ составляет $15\text{...}30\ \text{с}$, а время появления центров перекристаллизации минимально при температуре -30°C . Адаптированы процессы плотного и пористого анодного окисления пленок алюминия и их селективного травления для формирования на их основе масок для обратной литографии.

Экспериментально установлены граничные температуры термического окисления тонких пленок тугоплавких металлов, полученных электронно-лучевым испарением — для титана и ванадия $300\text{...}350^\circ\text{C}$; для ниобия и тантала $350\text{...}400^\circ\text{C}$, приводящие к их локальному деструктивному разрушению в процессе окисления согласно механизма формирования агломерационных пор вблизи фронта роста оксида и взаимодействия с подложкой.

Разработаны базовые технологические процессы обратной литографии для различных тонкопленочных микроструктур и проведен расчет их точности. Предложены конструктивно-технологические приемы формирования элементов интегральных схем способами самоформирования и самосовмещения. Разработаны базовые критерии для выбора вариантов формирования топологических структур, которые позволяют создавать топологические элементы с относительной погрешностью до 1 % в случае пористого анодирования. Разработанные методики расчета позволяют по заданным линейным размерам топологических элементов и их погрешностям рассчитать параметры и погрешности технологических процессов электрохимического осаждения маски, а также решить обратную задачу

Предложены способы гальваноластики и создания фильтрующих элементов для изготовления фильтрующих материалов для высокоскоростных фильтрационных систем. Разработаны технологические процессы изготовления автоэлектронных микроструктур, которые позволяют получить систему эмиттеров повышенной плотности.

SUMMARY

Proudnik Alexander Mikhailovich

Producing of thin film submicron patterns by lift-off lithography using metal and oxide masks

Key words: lift-off lithography, lift-off masks, submicron dimensions, thin films, low temperature modification, electrochemical deposition, anodization, thermic oxidation.

The researches are concerned with tin thin films, aluminum, some refractory metals and their oxides. The investigation subject is development of lift-off methods on metal and oxide masking coatings for production of submicron metal patterns.

The aim of the work is to research influence of low-temperature and high-temperature treatment conditions on thin films of different metals and their oxides on local modification, electrochemical and thermal oxidation for using them as masks for lift-off lithography to produce patterns of submicron dimensions.

The process of low-temperature modification of tin thin films is investigated. It has been found that the treatment at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ with 10 % spirit solution of ammonia hexachlorostannate as catalyst provides the favorable conditions for starting phase transition. This transformation normally reaching maxima at $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ and significantly decreases with reduce of tin film thickness. The processes of selective barrier and porous anodization of aluminum films were adapted for lift-off technology.

The conditions of thermal oxidation of the refractory metals thin films were researched for lift-off technology. The boundary conditions of annealing of niobium, tantalum, titanium and vanadium are determined at $300\text{...}400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Treatment at these temperatures is resulted in local destruction due to the rapid volumetric growth of oxide film.

Base technological processes of lift-off lithography to produce different thin film structures are developed and calculations of their precision are performed. The possibility of producing topological elements with error $\sim 1\%$ in case of porous anodization of aluminum is disclosed.

Universal methods of calculation of technological condition influence of cathodic deposition, anodization, thermal oxidation of thin films on linear microstructure dimensions, which are differentiated by producing mechanism account. Base criteria for the choice of constructive-technological mode for production submicron-sized structures are deduced.

Methods of galvanoplastics and producing filter elements for manufacturing filter materials for high-speed filter systems are developed. Technological processes for producing field-emission structures, which are allow manufacture emitter system of high density are proposed.

ПРУДНИК АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ СУБМИКРОННОГО РЕЛЬЕФА ТОНКИХ ПЛЕНОК
ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ОКСИДНЫХ МАСОК**

Специальность 05.27.01 — "Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 18.04.2002. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,63. Уч.- изд. л. 1,5. Тираж 90 экз. Заказ 257.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Лицензия ЛП № 156 от 05.02.2001.

Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001.

220013, Минск, П. Бровки, 6.