

На правах рукописи

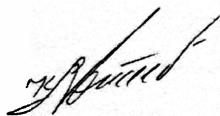
УДК 539.234

Моисеев Константин Михайлович

УПРАВЛЕНИЕ РЕЛЬЕФОМ ПОВЕРХНОСТИ
САМОУПОРЯДОЧЕННЫХ ГЛОБУЛЯРНЫХ МИКРОСТРУКТУР
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Специальность: 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Панфилов Юрий Васильевич

Официальные оппоненты:

Слепцов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, МАТИ-
РГТУ им. К.Э. Циолковского, заведующий кафедрой

Митрофанов Евгений Аркадьевич, кандидат технических наук, ФГУП «НИИВТ им.
С.А. Векшинского», заведующий лабораторией

Ведущая организация:

ОАО «НИИ точного машиностроения»

Защита состоится «24» _____ мая _____ 2012 г. в 14.00 часов на заседании дис-
сертационного совета Д212.141.18 при Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская,
д. 5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба направлять
по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

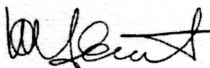
Автореферат разослан «20» _____ апреля _____ 2012 г.

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Ученый секретарь

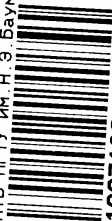
диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Цветков Ю. Б.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1997139

Моисеев К. М. Управление реп

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Уменьшение геометрических размеров элементов и приборов микроэлектроники с сохранением требуемых значений выходных параметров всегда являлось актуальной задачей. В последнее время, в связи с бурным развитием нанотехнологий, отдельные фрагменты электронных приборов, а иногда и сами приборы целиком выполнены в нанометровом масштабе.

Одной из отличительных особенностей объектов микроэлектроники является регулярность расположения элементов (транзисторов, эмиссионных центров, микропор, и др.). Формирование таких упорядоченных структур микро и нанометрового диапазона на данный момент осуществляется различными литографическими методами. Однако данные методы работают уже на пределе своих возможностей, что приводит к увеличению общей трудоемкости их изготовления и удорожанию технологии. Во всем мире осуществляется активный поиск и разработка новых технологий, основанных на физических процессах самоорганизации систем, которые позволили бы повысить разрешающую способность и технологичность. Благодаря достижениям в области технологий создания самоорганизующихся упорядоченных наноструктур (фуллеренов, углеродных нанотрубок, нанопористого анодного оксида алюминия, синтетических опаловых матриц и др.) в последние годы появилось большое количество исследований, посвященных их применению в микро- и нанoeлектронике. Причем некоторые структуры (фуллерены, нанотрубки) могут использоваться самостоятельно, тогда как другие (нанопористый анодный оксид алюминия, синтетическая опаловая матрица) являются основой и требуют дальнейшей модификации с использованием дополнительных технологических операций.

Наиболее ярким и актуальным применением, в котором требуются как упорядоченность элементов, так и форма каждого элемента, являются автоэмиссионные катоды, являющиеся компонентами ряда приборов микроэлектроники (вакуумные диоды, триоды, ЭЛТ, ионные источники, FED дисплеи и т.д.). Основные преимущества вакуумных автоэлектронных приборов перед полупроводниковыми приборами и приборами, основанными на термоэмиссии, обусловлены физической природой автоэлектронной эмиссии: малая инерционность, высокая стойкость к воздействию температуры и радиации, низкие напряжения, малый разброс энергий электронов. Также для автоэлектронных микроприборов характерно сверхвысокое быстродействие вследствие переноса электронов от катода к аноду за очень короткое время (менее одной пикосекунды).

Классическими автоэмиссионными материалами являются элементы вольфрам (W), углерод (C), и некоторые соединения (например, LaB_6 и Al_2O_3). Особое внимание из этих материалов в последнее время уделяется углероду в связи с его особыми структурами – углеродными нанотрубками.

В качестве материала основы (подложки), как правило, используют кремниевые и стеклянные пластины – для планарных катодов большой площади, либо конструкционные материалы (металлы) для катодов электровакуумных приборов. Однако общим является то, что поверхность основы – гладкая, а автоэмиссионный рельеф формируется литографическими методами.

Синтетические опаловые матрицы имеют наибольшую перспективу для применения как в автоэмиссионных катодах, так и в других изделиях микроэлектроники – газовых сенсорах, оптических волноводах, сенсорах для возбуждения плазмонного резонанса и др. Для автоэмиссионных катодов требуется острая форма с минимально возможным (в идеале порядка 10 нм) радиусом кривизны каждой глобулы, для газовых сенсоров требуется максимально развитая форма поверхности газочувствительного материала, для волноводов – кратность длине волны. Как правило, данные задачи решаются вакуумными методами формирования тонкопленочных покрытий.

Исследованиями формирования упорядоченных самоорганизующихся структур и приборов на их основе занимались Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Булыгина Е.В. (формирование, исследование свойств и создание приборов на основе синтетических опаловых матриц), Татаренко Н.И., Кравченко В.Ф. (формирование и применение упорядоченных структур в технологии автоэмиссионной микроэлектроники), Суэтин Н.В., Пашенко П.В., Ильичев Э.А., Петрухин Г.Н. (формирование углеродных наноструктур для автокатодов, в т.ч. на структурированных поверхностях), Шешин Е.П. (автоэмиссионные свойства углеродных материалов), Татаринова Н.В. (вакуумная электроизоляция и природа автоэлектронной эмиссии) и другие ученые.

На сегодняшний день в области создания приборов микро и нанoeлектроники на регулярных самоупорядоченных структурах остаются открытыми вопросы управления структурой поверхности рельефообразующего слоя, поскольку именно в этом состоит основное отличие технологий формирования изделий в целом: в классической технологии рельеф формируется литографическими методами на плоской подложке, тогда как при использовании принципа самоупорядоченности необходимо модифицировать рельефообразующий слой.

Таким образом, возникла необходимость разработки технологии управления рельефом поверхности регулярных структур, проверки классической теории формирования тонкопленочных покрытий различными методами на таких структурах, а

также разработки специального лабораторного вакуумного оборудования для реализации этих задач.

Цель работы

Создание методики формирования и управления формой рельефа поверхности самоупорядоченных глобулярных структур для их использования в устройствах микро и нанoeлектроники.

Задачи исследований

1. На основании анализа исследований в области создания устройств микроэлектроники на основе синтетических опаловых матриц определить наиболее эффективные методы их модификации.
2. Разработать математические модели изменения рельефа поверхности синтетических опаловых матриц методами нанесения тонких пленок в вакууме и ионного травления.
3. Создать лабораторное оборудование, позволяющее проводить исследование влияния на процесс модификации синтетических опаловых матриц различных методов нанесения тонких пленок и ионного травления.
4. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработать методику практической реализации выбранных методов модификации рельефа поверхности синтетических опаловых матриц.

Научная новизна работы

1. Впервые построены математические модели модификации рельефа поверхности самоупорядоченных глобулярных наноструктур – синтетических опаловых матриц, при формировании на их поверхностях тонкопленочных покрытий и при их ионном травлении.
2. Теоретически и экспериментально подтверждено, что для эффективного управления рельефом синтетических опаловых матриц требуется комбинация методов вакуумного осаждения и ионно-лучевого травления тонкопленочных покрытий.
3. Впервые для метода магнетронного распыления и ионно-лучевого травления пленки Ti на синтетической опаловой матрице экспериментально получены геометрические характеристики рельефа поверхности в зависимости от толщины осажденного тонкопленочного покрытия и глубины его травления.

Практическая ценность работы

1. В результате анализа существующих методов нанесения тонкопленочных

покрытий и вакуумно-плазменного травления разработана лабораторная установка для проведения исследований по управлению рельефом самоупорядоченных глобулярных микроструктур, объединяющая методы магнетронного распыления и ионно-лучевого травления в едином технологическом цикле.

2. Выявлены наиболее эффективные технологические режимы магнетронного распыления и ионно-лучевого травления, позволяющие управлять процессом модификации рельефа поверхности самоупорядоченных глобулярных микроструктур – синтетических опаловых матриц.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность основывается на проведенном комплексном анализе результатов теоретических данных и экспериментальных исследований. Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными и не противоречат известным положениям.

На защиту выносятся

1. Результаты анализа современных методов формирования упорядоченных микроструктур с заданными геометрическими свойствами, согласно которым наиболее перспективными являются методы, использующие принцип самоорганизации.

2. Результаты математического моделирования рельефа поверхности синтетической опаловой матрицы при ее модификации, согласно которым наиболее эффективное управление рельефом поверхности осуществляется комбинацией вакуумных методов нанесения тонкопленочных покрытий и ионно-лучевого травления.

3. Результаты исследований рельефа поверхности синтетических опаловых матриц с тонкопленочными титановыми покрытиями, согласно которым модификация поверхности исходной опаловой матрицы методами магнетронного распыления и ионно-лучевого травления позволяет эффективно управлять формой самоупорядоченных глобулярных микроструктур.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII и XI Молодежной научно-технической конференции учащихся, студентов, аспирантов и молодых ученых «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 2006 и 2009), на 1-й и 2-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2008-2009), на 1-й и 2-й Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по

направлению «Наноинженерия» (Москва-Калуга, 2008-2009), на Международной конференции «Вопросы инженерной нанотехнологии» (Москва, 2008), на XI, XII, XIII, XIV Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» (Москва, 2005-2008), на XVII и XXII Международном симпозиуме «Тонкие пленки в электронике» (Москва, 2005, 2009), на IV международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» (Москва, 2009), на XVI, XVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Ялта, 2008, Сочи, 2010).

Внедрение результатов работы

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы:

1. В ОАО «НИИТМ» при разработке нового технологического оборудования.
2. В учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Также результаты работы целесообразно использовать при проектировании перспективной элементной базы функциональных изделий автоэмиссионной электроники, оптоэлектроники, волоконной и интегральной оптики, микро и нанoeлектроники, а предложенная компоновка лабораторной вакуумной установки и технологические варианты модификации синтетических опаловых матриц рекомендуется использовать во ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина», ФГУП «НПП «Торий», а также в других предприятиях, связанных с изготовлением изделий автоэмиссионной электроники и вакуумного технологического оборудования для их производства.

Публикации

По теме диссертации опубликованы 2 статьи в рецензируемых научных журналах и 9 докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

Личный вклад автора

Проведение аналитического обзора современного состояния самоупорядоченных регулярных микроструктур с целью их применения в изделиях электронной техники, определение требований к рельефу поверхности синтетических опаловых матриц для их использования в автоэмиссионных катодах, разработка методики модификации рельефа поверхности синтетической опаловой матрицы вакуумными методами осаждения тонкопленочных покрытий и ионного травления и ее реализация на созданном лабораторном вакуумном оборудовании, исследование полученных

экспериментальных образцов, обработка экспериментальных данных и выдача рекомендаций по использованию результатов работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 87 наименований. Работа содержит 139 страниц машинописного текста, в том числе 13 таблиц и 89 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определена цель и поставлены задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа текущего состояния, тенденций развития и перспектив использования регулярных самоупорядоченных структур в изделиях микро и нанoeлектроники. Показано, что автоэмиссионные катоды являются наиболее ярким применением, в котором реализуются все преимущества таких самоупорядоченных структур, в частности, синтетических опаловых матриц.

Самоупорядоченные глобулярные структуры, такие как синтетические опаловые матрицы, в последнее время активно рассматриваются как перспективные для использования их в функциональных элементах микро и нанoeлектроники: как планарные транзисторы и диоды, квантовые точки, автоэмиссионные матричные катоды и ряд других. Общими параметрами для таких функциональных элементов являются высочайшая плотность упаковки элементов (до 10^7 шт./мм²), субмикронные размеры самих элементов (сотни и десятки нм), правильная геометрическая форма элементов (параллелепипеды, конусы, пирамиды). С точки зрения реального применения данные элементы должны быть воспроизводимы, должны иметь возможность изготавливаться методом групповой обработки, а технология их производства должна быть относительно недорогой.

Наиболее наглядно данные характеристики прослеживаются на матричных автоэмиссионных катодах, для которых характерен массив элементов определенной формы – остров, с плотностью упаковки до 10^5 шт./мм². Такие катоды формируются с использованием фотолитографии, вакуумных методов осаждения тонкопленочных покрытий и ионно-плазменного травления.

В последнее время для матричных автоэмиссионных катодов появился ряд материалов, упорядоченная структура и геометрия характерных элементов которых

создается по принципу самоорганизации ещё на этапе их формирования – углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки, нанонити), нанопористый анодный оксид алюминия и синтетические опаловые матрицы. Принцип самоупорядочивания (самоорганизации, самосборки) позволяет без использования литографических операций получать регулярные массивы элементов, причем технология их получения позволяет управлять параметрами элементов, прежде всего - геометрическими размерами. Так, например, диаметр опаловых глобул может составлять от 100 до 1000 нм и задается еще на этапе формирования самой синтетической опаловой матрицы.

Работы Белянина А.Ф. и Самойловича М.И. по использованию модифицированных опаловых матриц в автоэмиссионных катодах, показали перспективность их использования, а предварительные эксперименты по формированию тонкопленочных покрытий на поверхности синтетических различными методами доказали возможность управления формой рельефа поверхности в зависимости от метода осаждения, однако открытыми остаются вопросы выбора методов и технологических режимов процесса модификации, а также влияние процесса модификации на характеристики синтетических опаловых матриц.

Во второй главе представлено математическое моделирование рельефа поверхности синтетической опаловой матрицы при его модификации методами вакуумного осаждения и ионно-лучевого травления тонкопленочных покрытий, и проанализированы его результаты на примере требований к рельефу для автоэмиссионных катодов.

Анализ зависимости Фаулера-Нордгейма показывает, что плотность автоэмиссионного тока для одного и того же материала значительно зависит от радиуса кривизны острия (микронеровности). Например, изменение радиуса кривизны от 10 нм до 45 нм при постоянном расстоянии между катодом и анодом в 100 мкм для внешнего напряжения между электродами в 50 В приводит к уменьшению плотности автоэмиссионного тока от $1,8 \cdot 10^5$ А/см² до $6,4 \cdot 10^5$ А/см² даже для таких материалов, как углеродные наноструктуры (нанотрубки) с работой выхода порядка 1 эВ. В то же время, расстояния между регулярными структурами (остриями автоэмиссионного катода) также влияют на общую плотность автоэмиссионного тока. Оптимальными считаются расстояния порядка 400 нм.

Данные требования приводят к необходимости формирования регулярного массива элементов (острий) с заданным шагом и геометрией элементов.

Современные технологии формирования самоупорядоченных структур, таких как синтетические опаловые матрицы, позволяют еще в процессе формирования регулировать размеры глобул, а, следовательно, и расстояние между ними, в результа-

те чего поверхность синтетической опаловой матрицы представляет собой упорядоченный массив полусфер с заданными размерами. Используя методы вакуумного осаждения тонкопленочных покрытий можно изменять рельеф поверхности в зависимости от метода осаждения и его параметров.

Аналитические исследования процесса формирования тонких пленок на неплоских поверхностях, в т.ч. и сферических, показали, что современными термическими и ионно-плазменными методами осаждения можно изменять исходную форму поверхности, причем полученная геометрия исходной поверхности с тонкопленочным покрытием зависит от метода осаждения. Показано, что варьируя параметры методов осаждения можно добиться примерно равных условий осаждения для термических и ионно-плазменных методов, при которых процесс осаждения описывается законом Кнудсена.

Рассмотрены физические модели и проведено математическое описание изменения формы глобул синтетической опаловой матрицы при осаждении тонкопленочного покрытия и при ионном травлении по отдельности. Теоретически показано, что при осаждении тонкопленочного покрытия на отдельной полусферической поверхности происходит незначительное увеличение радиуса кривизны и увеличивается аспектное соотношение, тогда как при ионном травлении происходит уменьшение радиуса кривизны, а полусфера в конечном итоге полностью стравливается.

В результате анализа методов и условий осаждения и травления, в т.ч. и на основании предварительных экспериментов, для эффективного управления формой поверхности целесообразно объединить в едином вакуумном цикле операции осаждения и ионного травления, причем первым должен быть процесс осаждения тонкопленочного покрытия.

Для оценки последовательности процессов была составлен алгоритм методики, реализованный в среде MathCad, описывающий процессы осаждения тонкопленочного покрытия и его травления, в том числе и комбинацию этих двух методов. В результате моделирования выявлено, что при осаждении тонкопленочного покрытия на опаловую глобулу (полусферу) изменения радиуса кривизны не происходит (рис. 1, а), тогда как при ионном травлении радиус кривизны значительно изменяется (рис. 1, б).

Приведенные результаты моделирования позволяют говорить о том, что вакуумные методы осаждения и травления тонкопленочных покрытий позволяют управлять рельефом поверхности таких структур, как синтетические опаловые матрицы.

Функционал модели позволяет выводить результат в графическом виде: форма сечение глобулы и трехмерная модель (рис. 2). Кроме того, реализована возмож-

ность использования изображений, полученных на сканирующих зондовых микроскопах, в качестве начальной формы модифицируемой поверхности.

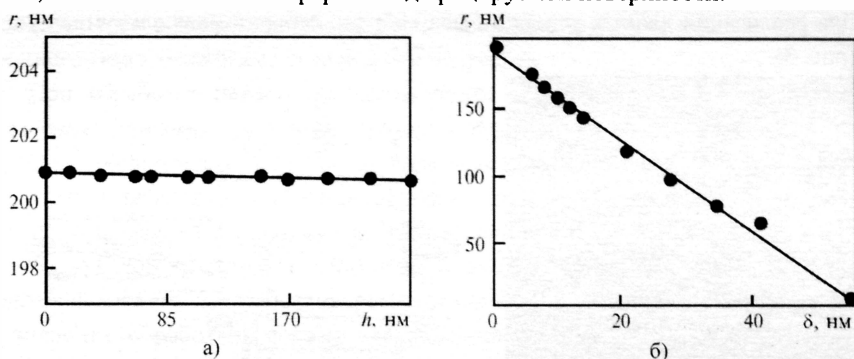


Рис. 1. Изменение радиуса кривизны идеальной глобулы при ее модификации осаждением тонкопленочного покрытия (а) и ионным травлением (б)

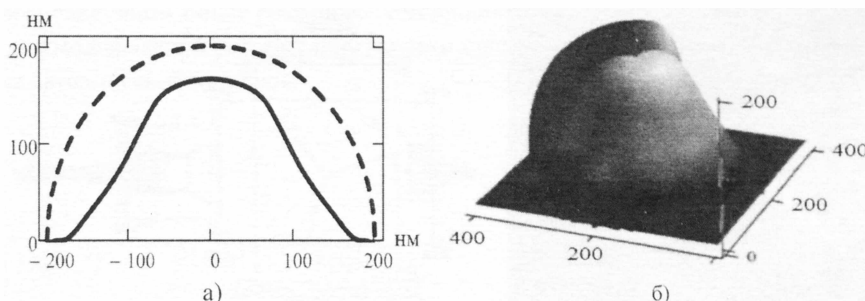


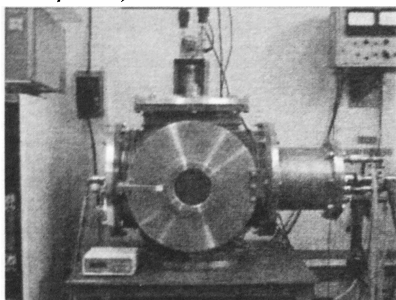
Рис. 2. Представление результатов моделирования: форма сечения опаловой глобулы (а) и трехмерная модель (б)

Третья глава посвящена разработке лабораторного технологического оборудования, реализующего вакуумные методы осаждения и травления тонкопленочных покрытий.

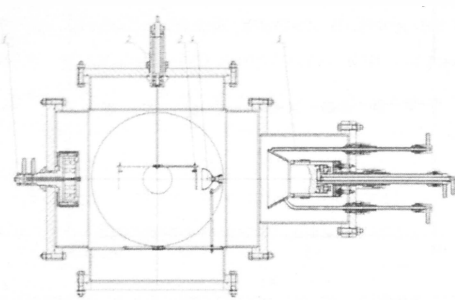
Одним из главных условий реализации технологии модификации рельефа поверхности синтетических опаловых матриц, осуществляемой комбинацией методов вакуумного осаждения и травления тонкопленочных покрытий, является объединение в одной установке технологических источников, реализующих эти методы. Кроме того, в случае формирования автоэмиссионных катодов желательно, чтобы в установке присутствовала возможность, позволяющая в едином вакуумном цикле

производить как модификацию поверхности, так и формирование автоэмиссионного покрытия.

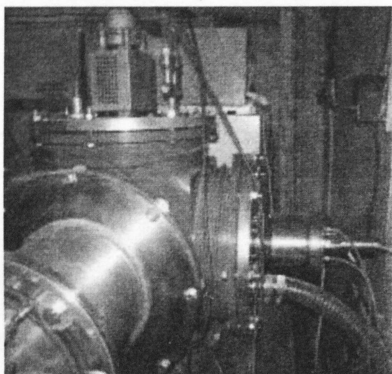
Для реализации данных условий была собрана лабораторная вакуумная установка (рис. 3).



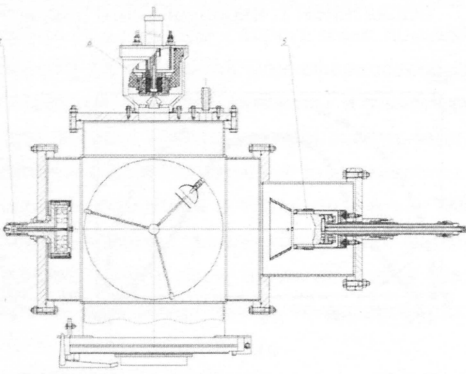
а)



б)



г)



г)

Рис. 3. Внешний вид лабораторной вакуумной установки (а, б) и расположение внутрикамерных элементов (в, г): 1 – магнетронная распылительная система, 2 – ввод вращения подложкодержателя, 3 – подложкодержатель, 4 – галогенная лампа, 5 – дуговой испаритель, 6 – автономный источник ионов

Для реализации метода магнетронного распыления был специально разработан бестрансформаторный источник питания постоянного тока, а замена материала постоянных магнитов магнитной системы магнетрона позволила повысить скорость распыления Ti и Ni в 2 раза.

Для увеличения стабильности работы автономного источника ионов с холодным катодом (АИИ) был в значительной степени модернизирован блок питания

АИИ, что позволило увеличить диапазон энергий ионов в пучке до 10 кэВ. Посредством АИИ осуществляется ионное травление, ионное ассистирование и активация подложки перед осаждением покрытия, а также при введении в плазму углеродсодержащего газа – осаждение углеродного покрытия.

При отработке режимов формирования покрытий методом магнетронного распыления с предварительной активацией поверхности ионами аргона посредством АИИ было обнаружено уменьшение шероховатости покрытия в 5 раз (с 30 нм до 6 нм), причем шероховатость уменьшается как при обработке поверхности до осаждения покрытия, так и при обработке покрытия после его осаждения.

На дуговом испарителе торцевого типа ИД-200-01 реализовано распыление графитовой мишени и отработаны режимы осаждения тонкопленочных покрытий, в том числе и с обработкой ионами аргона до или после формирования углеродного покрытия. При этом шероховатость углеродного покрытия также зависит от наличия ионной обработки.

В результате разработаны технологические варианты (рис. 4), реализующие в едином вакуумном цикле различные комбинации методов формирования покрытий как для модификации рельефа поверхности опаловой матрицы, так и для формирования автоэмиссионного слоя.

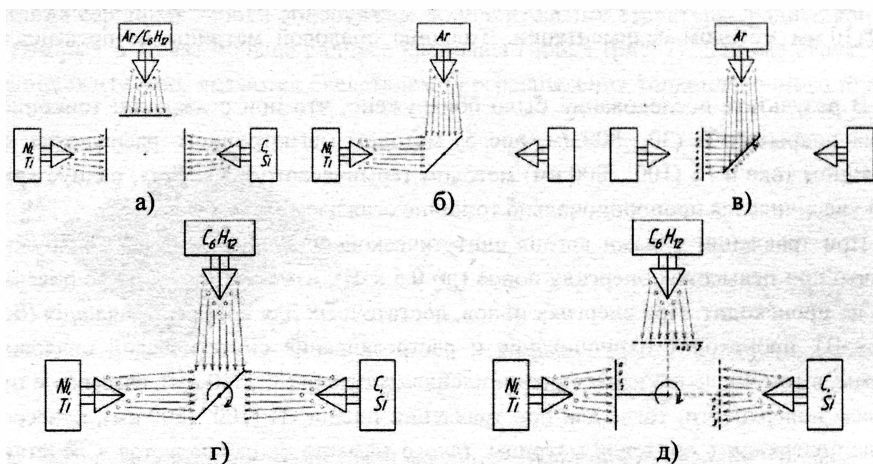


Рис. 4. Технологические варианты реализации тонкопленочных покрытий на установке ВУП: осаждение однокомпонентных покрытий и травление (а), осаждение с ионным ассистированием (б), осаждение ионно-лучевым распылением (в), осаждение многокомпонентных покрытий (г), осаждение многослойных покрытий (д)

На данном оборудовании отрабатывались технологические режимы формирования тонкопленочных покрытий Ti и Ni магнетронным распылением на постоянном токе и С дуговым испарением на ситалловых подложках и на поверхности синтетических опаловых матриц, ионной обработки посредством АИИ поверхности ситалловых подложек и синтетических опаловых матриц, а также комбинации данных методов.

Кроме того, формирование покрытий Вi термическим испарением проводилось на установке УВН-1М.

При проведении аналитических исследований полученных тонкопленочных структур было задействовано различное оптико-электронное и измерительное оборудование, а именно сканирующий зондовый микроскоп «Solver Next» и микроинтерферометр «МИИ-4».

В четвертой главе представлены результаты исследований рельефа поверхности синтетической опаловой матрицы после ее модификации методами термического испарения, магнетронного распыления, ионного травления и их комбинацией, полученного на экспериментальном оборудовании.

В экспериментах использовались синтетические опаловые матрицы с размерами глобул 400 ± 10 нм, сформированные на подложках из полированного кремния 10×10 мм методом седиментации. Толщина опаловой матрицы не превышала 1 мм.

В результате исследований было обнаружено, что при осаждении тонкопленочных покрытий Ti (30...800 нм, рис. 5) методом магнетронного распыления на постоянном токе и Вi (100...800 нм) методом термического испарения, радиус кривизны увеличивался пропорционально толщине осаждаемого покрытия.

При травлении ионами аргона синтетической опаловой матрицы обнаружилось, что при невысоких энергиях ионов (до 0,5 кэВ), изменений в рельефе поверхности не происходит. При энергиях ионов, достаточных для ионного травления (более 4 кэВ), происходит охрупчивание и растрескивание синтетической опаловой матрицы, в том числе и с нанесенными пленками титана (30...50 нм), вызванное перегревом поверхности, тогда как при травлении пленок Ti (100...800 нм), нанесенного на поверхность опаловой матрицы, такого эффекта не наблюдается. Следствием данного эффекта является то, что при модификации поверхности опаловой матрицы первой операцией должно быть осаждение тонкопленочного покрытия, причем толщина покрытия должна быть не менее 100 нм.

В результате исследований рельефа поверхности опаловой матрицы после процесса ионного травления нанесенных на нее магнетронным распылением пленок

Ti (400...650 нм) было подтверждено уменьшение радиуса кривизны (рис. 6), однако характер изменения формы отличается от модели.

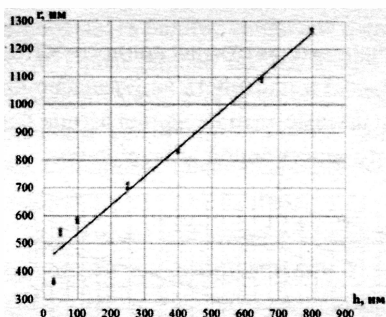


Рис. 5. Изменение радиуса кривизны синтетической опаловой матрицы от толщины осаждаемого методом магнетронного распыления тонкопленочного покрытия Ti

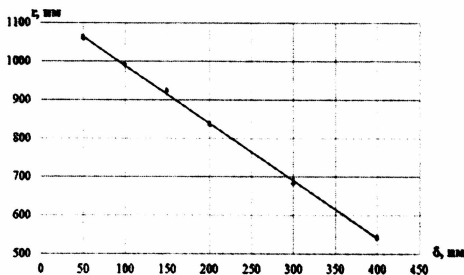


Рис. 6. Изменение радиуса кривизны тонкопленочного покрытия Ti, осажденного на поверхность синтетической опаловой матрицы, от глубины ионно-лучевого травления

На образцах с пленками толщиной 700...800 нм при продолжительном травлении на вершинах глобул обнаружены дополнительные структуры, радиус кривизны которых в 2 раза меньше радиуса кривизны глобул (рис. 7). Данные структуры, предположительно, являются следствием перераспыления тонкопленочного покрытия.

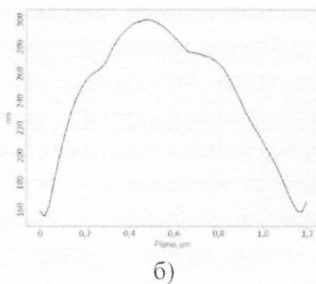
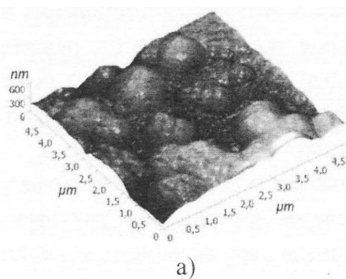


Рис. 7. Рельеф поверхности опаловой матрицы с нанесенной пленкой Ti после ионного травления: изображение с СЗМ (а) и формы профиля рельефа опаловой матрицы до и после травления (б)

В результате формирования автоэмиссионного слоя углеродных наноструктур методом CVD на модифицированных синтетических опаловых матрицах и исследо-

ваний свойств полученных автоэммиттеров установлена принципиальная возможность стабильного роста углеродных нанотрубок (рис. 8, а) на подложках с упорядоченным рельефом.

Сравнение измеренных параметров полученного автоэмиссионного катода (рис. 8, б), таких как пороговое напряжение (3 В/мкм) и плотность автоэмиссионного тока (8 мкА/мм²) позволяют считать автоэмиссионные катоды данного типа перспективными для использования в устройствах автоэмиссионной электроники.

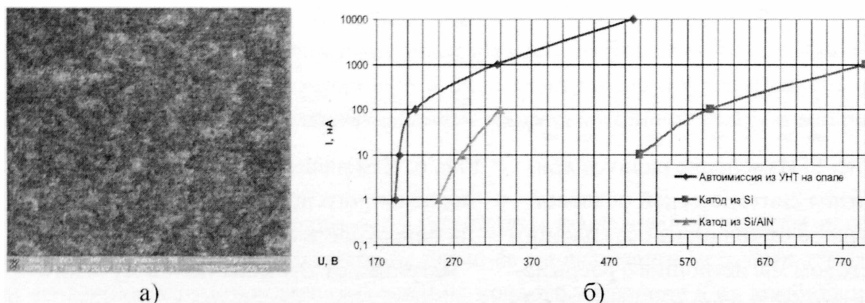


Рис. 8. Модифицирования опаловая матрица с углеродными нанотрубками: изображение со сканирующего электронного микроскопа (а) и ВАХ в сравнении с другими типами автокатодов (б)

Общие выводы

1. Проведенный анализ материалов и технологий создания регулярных структур на поверхности изделий микроэлектроники показал, что для формирования необходимой топологии автоэммиттеров, газовых сенсоров, волноводов и т.д. рекомендуется использовать самоупорядоченные глобулярные микроструктуры на основе синтетических опаловых матриц, формируемых по принципу самоорганизации и имеющих необходимые геометрические характеристики.

2. Наиболее эффективным средством модификации (управления) рельефа самоупорядоченных глобулярных наноструктур является комбинация вакуумного осаждения тонкопленочных покрытий магнетронным распылением и ионно-лучевого травления, т.к. они позволяют сократить число литографических операций для получения функциональных элементов изделия, например, автоэлектронных эммиттеров.

3. Для оценки формы рельефа поверхности регулярных упорядоченных структур при ее модификации вакуумными методами термического испарения, ионно-плазменного распыления и ионно-лучевого травления тонкопленочных покрытий рекомендуется использовать разработанную методику, описывающую косинусои-

дальные зависимости скоростей осаждения и травления на субмикронном глобулярном рельефе поверхности, позволяющую выводить результаты в графическом виде и рассчитывать радиус кривизны в любой точке поверхности.

4. Проведенные исследования показали, что при модификации поверхности вакуумными методами осаждения тонкопленочных покрытий толщиной 30...800 нм происходит увеличение радиуса кривизны профиля опаловых глобул, пропорциональное толщине наносимого покрытия, причем этот эффект не зависит от метода осаждения.

5. При исследовании рельефа поверхности синтетических опаловых матриц с нанесенными тонкими пленками Ti толщиной 650...800 нм обнаружено пропорциональное уменьшение радиуса кривизны профиля опаловых глобул в зависимости от глубины (50...400 нм) ионно-лучевого травления, однако при продолжительном травлении (520 нм) на глобулах появляются дополнительные выступы вследствие эффекта перераспыления.

6. При модификации поверхности синтетической опаловой матрицы методами магнетронного распыления и ионно-лучевого травления в едином вакуумном цикле необходимо следовать разработанным рекомендациям:

- первой операцией необходимо осуществлять нанесение тонкопленочного покрытия, толщина которого должна быть достаточна для предотвращения растрескивания опаловой матрицы при последующем ионном травлении (не менее 100 нм для тонкопленочных покрытий Ti), при этом энергия ионов должна быть минимально необходимой для реализации процесса травления (порядка 2 кэВ для пленок Ti).
- толщина тонкопленочного покрытия должна обеспечивать возможность ионного травления на требуемую глубину с сохранением сплошности покрытия. Для этого толщина должна превышать глубину последующего травления не менее, чем в 2 раза.

Основные работы по теме диссертации

1. Моисеев К.М., Панфилов Ю.В. Формирование углеродных наноструктур для эмиссионной электроники на вакуумном универсальном посту // Тонкие пленки в электронике. Материалы XVII Международного симпозиума. М.: 2005. С. 493-497.

2. Залесов А.Н., Моисеев К.М. Многопозиционная вакуумная установка для формирования углеродных наноструктур // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы. Материалы VIII Молодежной международной научно-технической конференции. М.: 2006. С. 136-138.

3. Импульсный бестрансформаторный источник питания для магнетронных распылительных систем / К.М. Моисеев [и др.] // Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники). Материалы XII Международной научно-технической конференции. М.: 2006. С. 252-254.

4. Исследование автоэмиссионных свойств углеродных нанотрубок на опаловых матрицах / К.М. Моисеев [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2008. №6. С. 10-13.

5. Формирование требуемого рельефа поверхности экспериментального катода на основе опаловой матрицы / К.М. Моисеев [и др.] // Высокие технологии в промышленности России (Материалы и устройства функциональной электроники и микрофотоники). Материалы XIV Международной научно-технической конференции. М.: 2008. С. 109-112.

6. Моисеев К.М., Янович С.В. Модификация рельефа поверхности опаловой матрицы ионно-лучевым травлением для автоэмиссионных катодов // Наноинженерия-2008. Сборник трудов Первой всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия». Калуга-Москва.: 2008. С. 66-70.

7. Панфилов Ю.В., Моисеев К.М. Использование опаловых матриц в автоэмиссионной электронике // Вакуумная техника, материалы и технология. Материалы IV международной научно-технической конференции. М.: 2009. С. 111-113.

8. Моисеев К.М., Янович С.В. Влияние ионной обработки на шероховатость тонкопленочных покрытий нанометровых толщин // Будущее машиностроения России. Сборник трудов Четвертой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. М.: 2009. С. 296-298.

9. Беседина К.Н., Моисеев К.М. Особенности формирования опаловых матриц // Наноинженерия-2009. Сборник трудов Второй всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия». Калуга-Москва.: 2009. С. 24-26.

10. Перспективы создания средств восприятия и преобразования на основе фотонных кристаллов / К.М. Моисеев [и др.] // Датчики и системы. №7. 2011. С. 69-77.

11. Моисеев К.М., Янович С.В., Панфилов Ю.В. Модификация поверхности синтетической опаловой матрицы вакуумными методами // Наноинженерия. №1. 2012. С. 4-7.