

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 621.3.049.77:621.793

ЗАВАДСКИЙ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА  
РЕЛЬЕФНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ**

05.27.06 - "Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Минск 2002

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

Научный руководитель: академик НАНБ, д.т.н., проф. Достанко А.П. (Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; зав. кафедрой ЭТТ)

Научный консультант: к.т.н. Свадковский И.В. (Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; зав. НИЛ 10.1 кафедра ЭТТ)

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Сокол В.А. (Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"; зав. кафедрой микроэлектроники), к.т.н., Касинский Н.К. (Республиканское унитарное предприятие "Оптическое станкостроение и вакуумная техника"; директор).  
ИЮ "ИНТЕГРАЛ".

Оппонирующая организация:

Защита диссертации состоится "25" июня 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, г. 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 настоящее время происходит создание нового поколения технологических процессов формирования тонкопленочных структур на рельефной поверхности, которые обладают высокими эксплуатационными и техническими характеристиками. Достижения в этой области позволят выйти на качественно новый уровень производства изделий микро- и оптоэлектроники, электронной техники и оптики, поскольку они приблизят решение вопросов получения тонкопленочных структур с уникальными электрофизическими и эксплуатационными характеристиками.

Отечественные и зарубежные исследования свидетельствуют, что один из наиболее реальных путей решения этих задач лежит в направлении использования метода ионного распыления благодаря его исключительным возможностям и достоинствам: высокая технологичность метода, универсальность по роду применяемых материалов, простота применения.

При ионном распылении металлических мишеней кинетическая энергия конденсирующихся атомов ( $1 \dots 10$  эВ) значительно превышает энергию атомов, полученных термическим испарением (порядка  $0,1$  эВ) [1,2]. Следствием этого является различный уровень энергетического воздействия на поверхность подложки. В итоге, адгезия и плотность пленок, полученных распылением, заметно выше, по сравнению с пленками, полученными термическим испарением. Очевидно, данное явление обязано эффектам дополнительной очистки поверхности за счет каскадных столкновений, образованию дополнительных локальных дефектов на поверхности, внедрению конденсирующихся атомов в приповерхностную область, повышению поверхностной температуры.

В то же время научные разработки последних лет свидетельствуют о гораздо более широких потенциальных возможностях метода. Наиболее активно развивающимся направлением при этом является разработка технологических процессов формирования тонкопленочных структур с особыми функциональными свойствами: высокие адгезионные, механические и трибологические характеристики, магнитные, сверхпроводящие, фотоэлектрические свойства, оптические характеристики и т.д.

Одно из основных направлений деятельности ведущих научных центров и

лабораторий по разработке новых технологических методов и оборудования для нанесения тонких пленок основано на использовании плазмы или ионных пучков как технологического инструмента для формирования заданных свойств тонкопленочных структур. Благодаря дополнительному вводу энергии в процесс нанесения оказывается возможным получение тонких пленок с уникальными свойствами, которые не достижимы для массивных образцов. Несмотря на теоретическую проработку принципов применения ионно-стимулированного нанесения в технологии формирования пленочных структур, техническая реализация его не достаточно совершенна, что накладывает отпечаток на характеристики процесса и параметры структур. В этой связи разработка научных и практических аспектов ионно - плазменной технологии выдвигается на первый план и представляется актуальной.

### ***Связь работы с крупными научными программами, темами.***

Работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в рамках госбюджетных НИР по проектам Министерства образования РБ ГБЦ1334/01, ГБЦ 1535/98, ГБЦ 1551/99, ГБЦ 1557/00, договора №4805 «02.12. Разработать и изготовить тепловыделяющие элементы на гибких и жестких носителях и автоматизированный комплекс для их производства» ГНПП "Диагностика, медицинская техника и оборудование", где автор является ответственным исполнителем, и проекта Фонда фундаментальных исследований "Разработка научных основ формирования покрытий повышенной износостойкости на сложнорельефных поверхностях" (1992 - 1994 гг., №Т14-176).

### ***Цель и задачи исследования.***

Целью работы является разработка интегрированных ионно – плазменных процессов для формирования тонких пленок и систем для нанесения на поверхность микрорельефных и тканых подложек тонких металлических и диэлектрических пленок, с улучшенной адгезионной способностью. Задачи исследования:

- разработать интегрированные ионно - плазменные системы и процессы на их основе, экспериментальные установки для нанесения тонкопленочных структур функционального назначения;
- провести исследования влияния режимов ионной обработки на адгезионные свойства формируемых тонких пленок;

- экспериментально исследовать процессы реактивного ионно - лучевого распыления металлов (Al, Ti);
- разработать и внедрить в практику новые технологические процессы нанесения тонких пленок с улучшенными свойствами на микронные рельефы и гибкие подложки.

#### ***Объект и предмет исследования.***

Объектом исследования являются интегрированные ионно-плазменные процессы формирования тонкопленочных структур из разряда в скрещенных E×H полях. Предметом исследования являются химико - физические процессы, закономерности и механизмы взаимодействия ионов и конденсирующегося материала, протекающие в объеме и на поверхности различных подложек в процессе конденсации при ионно- плазменном нанесении тонкопленочных слоев и в условиях перераспыления.

#### ***Методология и методы проведенного исследования.***

При решении поставленных задач исследовалась поверхность образцов, оптические свойства (коэффициент пропускания), скорости формирования пленок.

Поверхность получаемых образцов исследовалась по микрофотографиям, полученным на растровом электронном микроскопе "Сатема". Коэффициент пропускания определялся по ослаблению излучения на длине волны 750 нм, толщина измерялась на микроинтерферометре МИИ4.

Состав газовой среды в процессе десорбции примесей с поверхности подложек проводился при помощи масспектрометра МХ7304. Скорость десорбции оценивалась по интенсивности регистрируемых пиков.

#### ***Научная новизна и значимость полученных результатов.***

1. Разработаны принципы создания и предложена классификация интегрированных распылительных систем. Созданы физикотехнические предпосылки для разработки процессов формирования функциональных слоев с распределенными свойствами методами ионно-стимулированного распыления с технологически приемлемыми скоростями.

2. Разработаны варианты конструкций интегрированных распылительных систем, обеспечивающих работу при пониженном (вплоть до  $2 \cdot 10^{-2}$  Па) давлении и способные проводить ионно – стимулированные и реактивные процессы

формирования тонких пленок.

3. С использованием методики масспектрометрического контроля экспериментально исследована динамика активной десорбции газовых примесей из стеклянных подложек для молекул воды и азота в зависимости от интенсивности ионного пучка.

4. Установлено, что в процессе реактивного ионно - лучевого синтеза диэлектрических покрытий при дифференцированном газоснабжении разрядной области образование окисленных пленок возможно при скоростях, соизмеримых со скоростями формирования металлических пленок (на примере  $\text{Al}$  и  $\text{Ti}$ ).

5. Получено аналитическое выражение, устанавливающее зависимость толщины формирующихся пленок с учетом геометрии субмикронного рельефа подложки в присутствии ионного пучка. Показана возможность регулировки параметров нанесения за счет изменения интенсивности дополнительного ионного пучка.

#### ***Практическая значимость полученных результатов.***

1. Разработаны варианты снижения рабочего давления до  $2 \times 10^{-2}$  Па без снижения тока разряда. Разработаны и испытаны конструкции интегрированных ионно - плазменных систем для ионно - стимулированного формирования пленок.

2. Разработана экспериментальная методика контроля и исследования процесса ионной очистки на базе модифицированного масспектрометра МХ-7304, для контроля десорбированных газовых примесей с поверхности подложек.

3. Предложена схема раздельной подачи газов в разрядную область и область формирования пленки на поверхности подложки (на примере  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ), что позволило получать тонкопленочные слои диэлектриков из металлических мишеней с повышенными эксплуатационными характеристиками и использовать их в качестве элементов конструкции изделий НТФ "ИЗОВАК" для повышения их потребительских качеств.

4. Разработаны базовые технологические процессы локально управляемого нанесения тонких пленок на микронные ступенчатые рельефы подложек, перспективные для вакуумных интегральных схем и схема дифференцированного газоснабжения при реактивном ионно-лучевом распылении.

5. С использованием методики формирования тонкопленочных слоев на рельефных поверхностях были изготовлены элементы конструкций экранов, испытания которых показали эффективность ослабления электромагнитного

излучения - 15 dB в диапазоне 1.5 - 26.5 ГГц.

***Основные положения диссертации, выносимые на защиту.***

1. Конструкции интегрированных ионно - плазменных систем и новые технологические процессы для нанесения металлических и диэлектрических пленочных покрытий различного функционального назначения включая "рулонные технологии".

2. Экспериментальные зависимости времени обратной десорбции газовых примесей в зависимости от интенсивности ионного пучка, позволяющие оптимизировать процессы ионной очистки подложек и последующего нанесения тонких пленок.

3. Методика управляемого нанесения материала на микронный рельеф поверхности подложки и одновременного его перераспыления из локально утолщенных участков.

4. Схема дифференцированного газоснабжения при ионно – лучевом реактивном формировании тонкопленочных слоев оксидов.

***Личный вклад соискателя.***

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в подготовке и проведении теоретического анализа методов нанесения тонких пленок, подготовке и постановке экспериментов по формированию тонких пленок на рельефной поверхности, нанесению диэлектрических пленок, разработке представленной в диссертации модели и схемы дифференцированного газоснабжения при реактивных ионно-лучевых процессах.

***Апробация результатов диссертации.***

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на международной конференции "Физика и техника плазмы", г.Минск, Беларусь, 13-15 сентября 1994г., III International Conference Plasma physics and plasma technology: Contributed papers, Minsk, Belarus, September 18–22, 2000 / Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus.- Minsk, 2000, на IV международной конференции "Современные средства связи" (Нарочь, 1999г.).

***Опубликованность результатов.***

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в печатных работах общим объемом 29 страниц. По материалам диссертационной работы опубликованы: 1 монография, 3 статьи в научно-технических журналах, 4 - в сборниках материалов конференций, 7 тезисов докладов в сборниках тезисов конференций.

***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 112 страниц, из которых 82 страницы машинописного текста. Она включает 47 рисунка на 30 страницах, 1 таблицу на 1 странице, библиографию из 125 наименований на 9 страницах и 2 приложения на 2 страницах.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

*В первой главе* рассмотрены особенности ионно - плазменных и ионно - лучевых методов получения тонких пленок, методы формирования пленочных структур оптического назначения, формирование тонкопленочных структур на рельефных подложках, влияние ионной бомбардировки на параметры формируемых тонкопленочных слоев.

При объединении магнетронной распылительной системы (представителя ионно – плазменных методов) и ионно- лучевого источника на базе ускорителя с анодным слоем в единую систему возможны следующие типы интеграции:

1. Компонентная интеграция - предусматривает размещение магнетронной распылительной системы и ионно- лучевого источника в едином вакуумном объеме. Позволяет проводить в едином вакуумном цикле поочередно операции ионной очистки и нанесения металлических и диэлектрических слоев.

2. Разрядная интеграция – предусматривает, помимо расположения магнетронной распылительной системы и ионно-лучевого источника на единой вакуумной арматуре, возможность их одновременного функционирования. Позволяет проводить процессы ионно - стимулированного нанесения тонких пленок.

3. Магнитная и газовая интеграция - предусматривает интеграцию магнетронной распылительной системы и ионно-лучевого источника в одном устройстве. Позволяет проводить стимуляцию как роста пленок, так и процесса плазмообразования в магнетронной распылительной системе.

Показана перспективность разработки технологических устройств и процессов, совмещающих в себе достоинства магнетронных и ионно – лучевых методов формирования тонких пленок. Область применения подобных устройств – различные ионно-ассистированные процессы формирования тонких пленок, в том числе отдельные этапы формирования матричных автоэмиссионных катодов (МАК).

Сформулирована задача проектирования новых интегрированных систем и процессов с их использованием, заключающаяся в обеспечении условий

формирования тонкопленочных структур, обладающих заданными характеристиками, с максимальной скоростью осаждения и надежностью функционирования технологических устройств.

В качестве основной тенденции развития интегрированных ионных систем определена разработка устройств формирования тонких пленок, по производительности соответствующих магнетронным распылительным системам, а по рабочему давлению, возможности организации ионного ассистирования и диапазону распыляемых материалов - ионно-лучевым устройствам с анодным слоем, т.е. необходимость создания такого метода или способа формирования тонких пленок, который бы обеспечивал:

- формирование тонкопленочных слоев с наибольшей скоростью нанесения (сравнимой с магнетронным распылением),
- высокую ионную бомбардировку для обеспечения распределенных свойств по глубине и по поверхности (ионно - лучевые устройства с УАС),
- возможность эффективного реактивного распыления,
- возможность функционирования при минимальном давлении для обеспечения гибкости процесса нанесения,
- не критичность к материалу мишени и рабочему газу.

**Во второй главе** разработаны варианты интегрированных ионно-плазменных систем.

Одной из задач данной работы является разработка опытных образцов интегрированных распылительных систем, использующих наиболее перспективные виды процессов формообразования покрытий на основе разрядов в скрещенных  $E \perp H$  полях, позволяющих снизить рабочее давление с сохранением высоких скоростей нанесения.

Применение разработанных систем в процессах нанесения тонких пленок позволяет: точно контролировать состав и энергию, а также угол падения бомбардирующих частиц на подложку; расширить диапазон энергий обрабатываемых ионов от десятков эВ до единиц кэВ, обеспечить режимы ионного ассистирования независимо от режимов МРС (например для предварительной очистки), что позволяет в широких пределах оказывать воздействие на физические параметры пленок, а также допускает высокий уровень контролируемости процесса фазообразования.

Были проведены исследования разработанных систем. Экспериментально установлено, что разработанные ионно-плазменные системы работоспособны при

давлении  $2 \times 10^{-2}$  Па (рис.1).

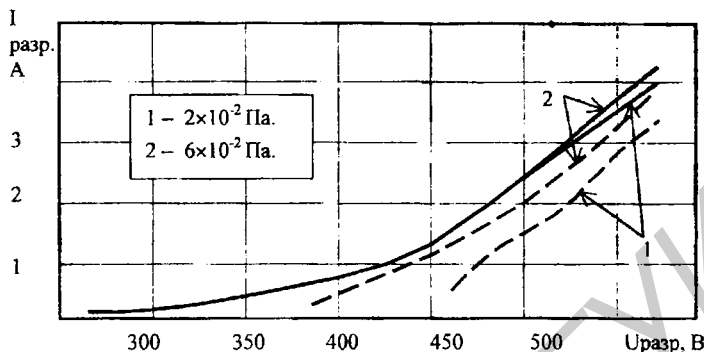


Рис. 1 Вольтамперные характеристики интегрированной системы распыления.

— — — — — магнетронный разряд

————— магнетронный разряд в присутствии ионного пучка

Такие режимы достигнуты путем увеличения интенсивности магнитного поля на поверхности распыляемой мишени, создания зоны повышенного давления непосредственно на поверхности мишени, а также использования компрессии магнитного поля и стимуляции разряда.

Пониженное рабочее давление разработанных магнетронных распылительных систем позволило обеспечить их одновременное функционирование с ионными источниками типа УАС, что достигнуто введением в зону распыления дополнительного ионного пучка, формируемого ионным источником и созданием зоны повышенного давления у поверхности мишени.

Разработана интегрированная конструкция устройства нанесения тонких пленок методом стимуляции магнетронного разряда ионным пучком на основе совместно - осевого их расположения. Экспериментально установлены оптимальные соотношения магнитных полей магнитных систем магнетрона и магнитной системы ионно - лучевого источника, полярность питающих соленоиды напряжений и установлено оптимальное положение магнетрона на оси ионно - лучевого источника.

Разработана интегрированная распылительно - ассистирующая система, обеспечивающая металлизацию рулонного носителя и ионное ассистирование распылению за один проход.

*В третьей главе* проведено исследование динамики десорбции газовых примесей с поверхности подложек. Проведен выбор режимов ионной очистки

поверхностей подложек, оценено влияние технологических параметров на адгезию тонких пленок к подложкам.

Были рассмотрены возможности применения разработанных интегрированных ионно – плазменных устройств для формирования высокоадгезионных покрытий. Теоретический анализ процесса десорбции примесей с поверхности твердого тела свидетельствует об эффективности применения ионных пучков для создания физически чистой поверхности

Проведены экспериментальные исследования процесса десорбции газовых примесей с поверхности подложек. В процессе экспериментов при помощи масспектрометра МХ-7304 проводился контроль газовой среды с регистрацией пиков соответствующих  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ .

Для подтверждения того, что регистрируемые пики связаны с десорбцией примесей с поверхности обрабатываемых образцов, была проведена серия экспериментов в режиме перемещения подложек. На рис.2 представлены полученные для этого случая зависимости изменения динамики десорбции  $N_2$  (М-28). Динамический режим обработки поверхности стекла отмечается осцилляцией показаний прибора, период которых соответствует периоду смены образцов (периоду вращения карусели). Сделаны следующие выводы:

- ионный пучок является интенсивным стимулятором десорбции примесей с поверхности твердого тела;
- время наиболее активной десорбции газовых примесей измеряется единицами-десятками секунд в зависимости от интенсивности ионного пучка;
- динамика адсорбции примесей имеет насыщающийся характер.

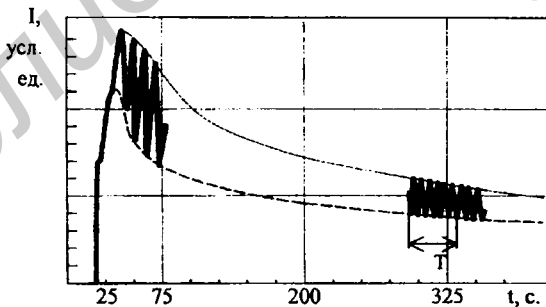


Рис. 2. Динамика изменения содержания  $N_2$  (м – 28) в вакуумной камере в процессе обработки вращающихся подложек ионным пучком.  $T$  – период вращения карусели.

В четвертой главе представлены результаты исследования процесса синтеза кислородсодержащих соединений при распылении металлических мишеней, разработана схема проведения процесса реактивного ионно - лучевого распыления с дифференцированным газоснабжением, исследовано формирование тонких пленок окислов Ti и Al методом дифференцированного реактивного ионно - лучевого распыления.

В процессе реактивного ионного плазменного распыления процесс образования соединения будет протекать в трех стадиях. Первая - мишенный синтез (происходит распыление смеси металла с его оксидами). Образуется положительный поверхностный заряд, который может не только блокировать поток поступающих ионов, но и влиять на сам процесс плазмообразования. Вторая стадия - пролетный синтез. Распыленные атомы металла и кислорода от мишени транспортируются к основанию (подложке). При этом возможен процесс столкновения их с атомами рабочего газа, т.е. возможно протекание процесса синтеза соединения. Третья стадия - пленочный синтез. Конденсированные атомы на поверхности основания за счет своей значительной энергии обладают высокой миграционной способностью и активно взаимодействуют между собой и с поверхностными атомами, в том числе и теми, которые адсорбировались из газовой среды. В результате такого процесса взаимодействия на поверхности подложки будет наблюдаться синтез соединения.

Для дифференцированного газоснабжения, при ионно - лучевом распылении, плазма локализована в отдельном замкнутом объеме, следовательно, при такой схеме организации процесса распыления становится возможным проведение процесса реактивного синтеза при иных технологических условиях. Введение активной компоненты в плазму будет приводить к образованию на поверхности мишени продуктов химического взаимодействия. Однако, в отличие от ионно-плазменного распыления, возникающий в данном случае поверхностный заряд на мишени, не влияет на режим разряда ионного источника, поскольку он достаточно легко компенсируется за счет притяжения свободных электронов из пучковой плазмы, возникающих благодаря вторичной электронной эмиссии.

Проводились исследования по распылению мишеней из Ti и Al ионным пучком аргона при одновременной подаче в рабочую камеру кислорода. Измерение скорости роста пленок в зависимости от содержания кислорода показало, что производительность процесса практически не снижается. На рис 3

приведены данные измерений скорости нанесения пленки  $Al_xO_y$  при распылении  $Al$  мишени в зависимости от относительного давления кислорода. Полученные данные подтвердили предположение о том, что применение схемы дифференцированного газоснабжения процесса реактивного распыления позволяет повысить производительность процесса при неизменной мощности разряда.

Проведенные исследования показали, что использование принципа дифференцированного газового снабжения для процесса ионно-лучевого реактивного распыления металлов, позволяет более рационально организовать процесс получения многокомпонентных соединений. Полученные результаты составляют основу для разработки новых технологических процессов с увеличенной производительностью.

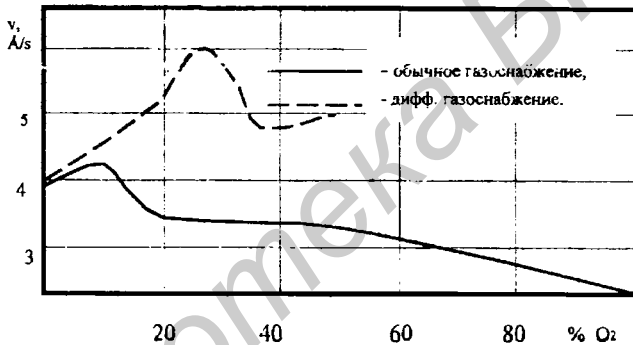


Рис. 3 Зависимость скорости осаждения пленки  $Al_xO_y$  от содержания кислорода в камере для различных способов газоснабжения.

**В пятой главе** приводятся примеры разработки процессов нанесения тонких пленок на микрорельефные поверхности (Рис. 4.) при помощи разработанных интегрированных систем, предложена и рассмотрена феноменологическая модель формирования пленки в присутствии дополнительного ионного пучка, разработаны процессы формирования тонкопленочных электромагнитных экранов на тканых трикотажных полотнах, использование ионно - лучевого распыления для получения алмазоподобных тонких пленок, технологического процесса формирования пленочных структур при изготовлении матричных автоэмиссионных



Рис. 4.

катодов (МАК).

При одновременном воздействии на подложку атомарных и ионных потоков, наряду с нанесением материала, протекают и процессы его распыления с последующим переосаждением, что позволяет рассматривать отдельные участки поверхности в качестве микроисточников наносимого материала. Такой "микроисточник" обладает косинусоидальным законом распределения (рис 5).

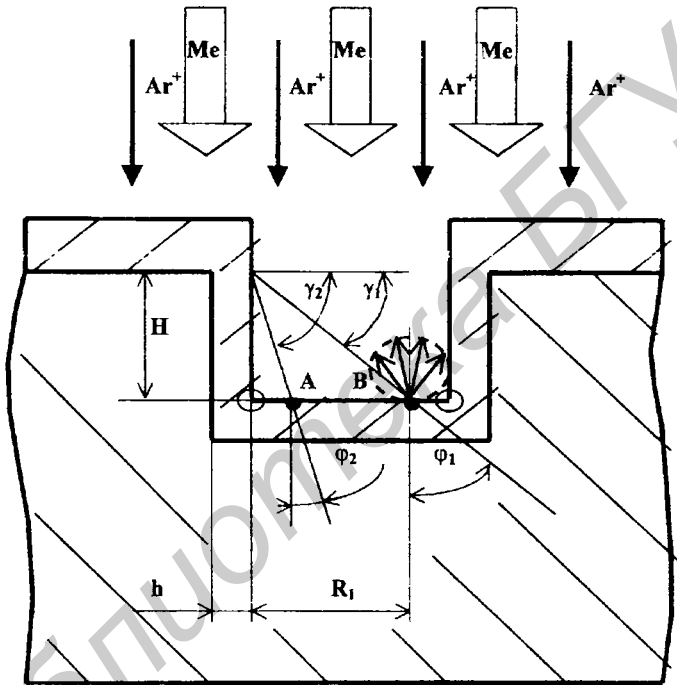


Рис. 5.

Учитывая вклад каждой из стадий (нанесение, распыление, перенесение), можно выразить результирующую скорость формирования пленки:

$$R = R' - S + M' \int_0^{R_H} \int_0^H \frac{\cos \varphi(RH) \cos \gamma(RH) \Pi(R)}{r'^2(RH)} dR dH$$

где  $M'$  - постоянный параметр, пропорциональный скорости распыления,

$\varphi(R, H)$  - угол распыления,  $\gamma(R, H)$  - угол конденсации,  $r'(R, H)$  - расстояние до вертикальной стенки,  $(R)$  - координата точки микроисточника,  $H$  - координата точки вертикальной стенки,  $\Pi(R)$  - полином, учитывающий неоднородность в распылении поверхности АВ,  $R'$  - скорость нанесения основным источником,  $S$  - скорость травления.

Если учесть, что  $M'$  и  $S$  определяются в основном интенсивностью дополнительного ионного пучка, то, изменяя последнюю, можно легко регулировать скорость осаждения, а, соответственно, и толщину покрытия на вертикальных и горизонтальных стенках. При этом становится возможным улучшение профиля заполнения рельефа, даже при отсутствии наклона подложки.

Для проверки адекватности модели было проведено несколько серий опытов с различной ориентацией подложек относительно ионного источника и изменяющейся внутри каждой группы интенсивностью дополнительного направленного ионного пучка. В качестве образцов использовались кремниевые пластины со сформированными на них поликремневыми шинами с отношением ширины к высоте и к интервалу между ними как 2:1:2 (Рис. 4).

При перпендикулярном расположении подложки относительно осаждаемого молекулярного потока при включенном дополнительном ионном пучке происходит переосаждение напыляемого материала на боковые стенки. При этом получаемая пленка практически не имеет неоднородностей по толщине и повторяет рельеф, на который наносится.

Применение дополнительного ионного пучка позволяет: получать равномерное заполнение рельефной поверхности при отсутствии наклона подложки; улучшить равномерность заполнения рельефа при наклоне подложки; отказаться в ряде случаев от сложных механических устройств перемещения подложек; использовать простейшее линейное перемещение.

В последнее время особый интерес вызывают технологии создания материалов на основе частиц субмикронных размеров. Такие материалы имеют развитую поверхность и обладают пониженной отражательной способностью при наклонном падении электромагнитной волны.

Многослойное покрытие ( $Ni - TiO_2 - Ni$ ) на подобной поверхности формировалось в едином вакуумном цикле. При формировании слоя  $TiO_2$  использовался способ дифференцированного газоснабжения распылительного оборудования.

Экранирующие свойства материалов исследовались с помощью комплекса



векторных анализаторов цепей, измеряющих  $S$  – параметры четырехполюсников в СВЧ диапазоне (1.5 – 18 ГГц и 18 – 37 ГГц).

Установлено, что при нанесении металлических покрытий на пористую волокнистую массу возможно создание градиентной структуры, позволяющей уменьшить отражение электромагнитного излучения за счет плавного перехода от волнового сопротивления среды распространения излучения к характеристикам металлизированного слоя. Эффективность подобной конструкции повышена за счет использования чередования слоев металл – диэлектрик, где в качестве диэлектрика используется материал с высокими диэлектрическими потерями. Кроме того, применение многослойного металл - диэлектрического покрытия позволяет создавать изменение магнитных и проводящих свойств структуры с меньшим градиентом и обеспечивать дополнительное подавление электромагнитного излучения за счет магнитных потерь в материале экрана.

В экспериментах по формированию АПП методом ионно-лучевого распыления была использована интегрированная ионно-лучевая распылительная система типа холловского ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. Система позволяла формировать два независимых пучка ионов с энергиями от 300 до 1500 эВ и осуществлять независимое изменение параметров этих потоков. В качестве рабочего газа как для распыляющего, так и для бомбардирующего пучка использовались газы аргон и фреон, а в качестве материала распыляемой мишени - графит. Давление рабочего газа в вакуумной камере соответствовало диапазону  $2 \cdot 7 \times 10^{-2}$  Па, ускоряющее напряжение обеих ступеней изменялось в пределах 15 кВ, плотность ионного тока –  $0-10$  мА/см<sup>2</sup>. Расстояние ионный источник – подложка составляло 10 см. Скорость формирования - не более 5 нм/мин. Использование фреона в качестве рабочего газа позволило повысить скорость до 8...10 нм/мин.

При получении структур на основе матричных автоэмиссионных катодов (МАК) (рис. 6) одними из основных операций являются этапы формирования электрода сетки и подсеточного диэлектрика. При металлизации самоформирующихся структур невозможно использовать какие-либо литографические процессы из-за изменяющихся случайным образом размеров ячеек и шага между ними. Например, размер ячейки может колебаться в пределах 0.3 – 0.45 мкм, шаг ячеек - 0.4 – 0.6 мкм.

Задачей металлизации в этом случае является обеспечение локализации наносимого слоя на вершинах электродов катодов и на торцах межкатодного диэлектрика (Рис. 7,8).

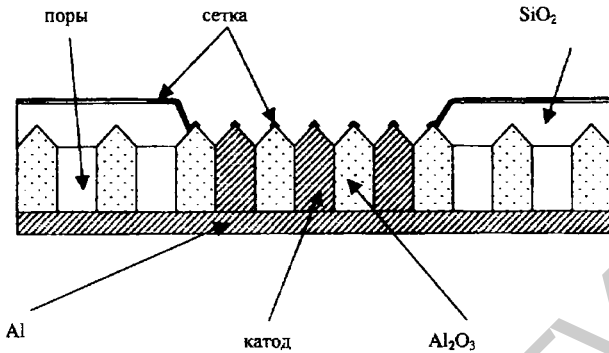


Рис. 6. Структурная схема элемента на матричных автоэмиссионных катодах.

При нанесении электрода сетки и подсеточного диэлектрика использовалась разработанная интегрированная распылительная система. В качестве подсеточного диэлектрика наносился оксид кремния. Проводилось распыление мишени из монокристаллического кремния в среде инертного газа (Ar) с дифференцированной газоподачей кислорода. Была достигнута скорость нанесения пленки  $\text{SiO}_2$   $3 \text{ \AA/s}$ . Диэлектрическая прочность полученных пленок оксида кремния составила  $950 \text{ В/мкм}$ .

В приложениях представлены акты о внедрении результатов диссертационной работы.

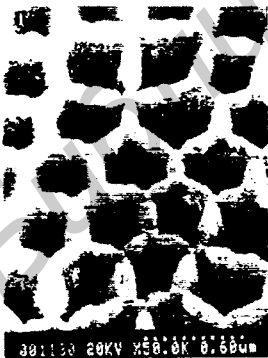


Рис. 7. Поверхность для МАК

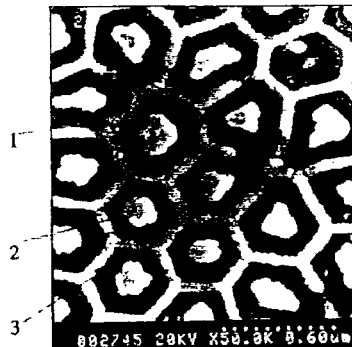


Рис. 8. Поверхность структуры с МАК после формирования электрода сетки, 1 – электрод сетки, 2 – катод, 3 – зазор катод – сетка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны и испытаны конструкции интегрированных ионно - плазменных систем для ионно - стимулированного формирования пленок. Созданы физико-технические предпосылки для разработки процессов формирования функциональных слоев с распределенными свойствами методами ионно-стимулированного распыления с технологически приемлемыми скоростями /2,3,4,5,7,9,10,15/.

2. Разработана экспериментальная методика контроля и исследования процесса ионной очистки на базе модифицированного масспектрометра МХ7304 для контроля десорбированных газовых примесей с поверхности подложек /13/.

3. Разработана схема дифференцированного газоснабжения при ионно - лучевом реактивном формировании тонкопленочных слоев оксидов (на примере  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ), что позволило получать тонкопленочные слои металлов и диэлектриков из металлических мишеней с повышенными эксплуатационными характеристиками и использовать их в качестве элементов конструкции изделий НТФ "ИЗОВАК" для повышения их потребительских качеств /5/.

4. Разработаны базовые технологические процессы локально управляемого нанесения тонких пленок на ступенчатые рельефы подложек, перспективных для вакуумных интегральных схем /1,8,11/.

5. Изготовлены элементы конструкции экранов электромагнитного излучения на основе металлических и диэлектрических тонкопленочных покрытий, наносимых на поверхность микронных волоконных матриц. Изготовленные элементы экранов испытаны и внедрены в НИЛ - 5.3 БГУИР в качестве элементов гибких конструкций экранов электромагнитного излучения с эффективностью - 15 dB в диапазоне 1.5 - 26.5 ГГц /1,8/.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Монография

1. Лыньков Л.М., Богуш В.А. Глыбин В.П., Гусинский А.В., Кострикин А.М., Дзисяк А.Б., Петрова В.А., Сवादковский И.В., Завадский С.М., Хижняк А.В., Чембрович В.Е. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения. – Мн.: БГУИР, 2000.- 284 с.

### Статьи, материалы конференций

2. Федосенко Г.Н., Достанко А.П., Емельянов В.А., Свадковский И.В., Панков В.В., Завадский С.М. Применение энергетичных пучков для получения алмазоподобных пленок// Электронная обработка материалов.- 1996.- №2.- С. 18-19.

2. Shiripov V.J. , Pankov V.V., Svadkovski I.V., Khokhlov A.E., Fedosenko G.N., Zavatskiy S.M. Production of diamond-like carbon films using energetic beams// Journal of Chemical Vapor Deposition.-1996.- Vol. 4., №4.- P. 311-317.

4. Влияние ионной бомбардировки на параметры пленок нитрида бора. / Д.А. Голосов, И.В. Свадковский, С.М. Завадский, А.П. Достанко // Материалы II Международной конференции "Взаимодействие излучения с твердым телом". Минск, Беларусь, 23-25 сентября 1997 г. БГУ, НАН РБ, Мин. образования РБ.- Минск., 1997.- С. 84.

5. Zavatskiy S.M., Khokhlov A.E., Golosov D.A. Oxide films deposition using reactive ion beam sputtering with differentiated gas supply// III International Conference Plasma physics and plasma technology: Contributed papers, Minsk, Belarus, September 18–22, 2000. Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus.- Minsk.- 2000.- Vol. 2.- P. 441 – 443.

6. Developing and investigation of unbalanced magnetron sputtering system/ I.V. Svadkovski, A.P. Dostanko, D.A. Golosov, S.M. Zavatskiy// III International Conference Plasma physics and plasma technology: Contributed papers, Minsk, Belarus, September 18–22, 2000. Institute of Molecular and Atomic Physics National Academy of Sciences of Belarus.- Minsk. - 2000.- Vol. 2.- P. 716-719.

7. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. Low pressure unbalanced magnetron and ion beam assisted magnetron sputtering// NEET 2001 (New electrical and electronic technologies and their industrial implementation). II international symposium Kazimierz Dolny, Poland, February, 14-17, 2001. - P. 217-221

8. Осаждение тонких пленок на гибкие трикотажные полотна для формирования радиопоглощающих экранов/ В.А. Богущ, С.М. Завадский, Л.М. Лыньков, В.А. Петрова. // Известия Белорусской инженерной академии. - 1999. - №1(7)/2.- С. 171 – 173.

## Тезисы докладов

9. Хохлов А.Е., Завадский С.М., Ширипов В.Я. Комбинированная система распыления на основе разрядов в скрещенных полях// Тез. докл. на Научной конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников, докторантов, аспирантов, посвященной 30-летию деятельности коллектива Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск, 15-18 февраля 1994г.- Мн., 1994.- С.88.

10. Хохлов А.Е, Завадский С.М., Ширипов В.Я. Система распыления на основе магнетронного разряда, стимулируемого ионным пучком// Тез. докл. на Международной конференции "Физика и техника плазмы", г. Минск, Беларусь, 13-15 сентября 1994г.-Т.2.- Мн., 1994.- С.289.

11. Хохлов А.Е, Завадский С.М. Использование направленного ионного потока при формировании равномерных по толщине покрытий на сложнорельефных поверхностях// Взаимодействие излучений с твердым телом г. Минск, 16-19 октября 1995: Тез. конфер.- Мн., 1995 г.- С 47.

12. Shiripov V.J., Pankov V.V., Svadkovski I.V., Khokhlov A.E., Fedosenko G.N., Zavadski S.M. Production of diamond-like carbon films using energetic beams// International Conference on C-BN and Diamond Crystallization under Reduced Pressure. Jabionna near Warsaw, Poland, June 27-29, 1995г.-Warsaw, 1995.-P.67.

13. The cubic boron nitride films prepared by the dual ion beam deposition technique/ D.A. Golosov, I.V. Svadkovski, A. P. Dostanko, S.M. Zavadski // European Materials Research Society, 1997 spring meeting. Strasbourg, France, June – Strasbourg, 1997.- P. 16.

14. Ion bombardment effect in boron nitride films formation/ D.A. Golosov, I.V. Svadkovski, S.M. Zavadski, A.P. Dostanko // Materials Research Society, 1997 fall meeting. Boston, USA, December 1-5, 1997.- Boston, 1997.-P87.

15. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Dostanko A.P., S.M. Zavadski, Kotov D.A. Influence of the assisting ion beam energy ranges on the BN films structure// European Materials Research Society, 1998 spring meeting. Strasbourg, France, June 16-19, 1998.-P166.



Завацкі Сяргей Міхайлавіч

## ІНТЭГРАВАННЯ ІОННА-ПЛАЗМЯННЫХ ПРАЦЭСЫ ФАРМАВАННЯ ТОНКАПЛЕНАЧНЫХ СТРУКТУР НА РЭЛЬЕФНЫХ ПАВЕРХНЯХ

*Ключавыя словы:* іон, пленка, магнетрон, іонна – прамяневы істочнік, адгезія, аксід, рэльеф, нанясенне, распыленне.

*Аб'ектам даследавання* з'яўляюцца інтэграваныя іонна – прамяневые працэсы для фарміравання тонкіх пленак і сістэм для нанясення на паверхнасць мікрарэльефных і тканых падложак тонкіх металічных і дыэлектрычных пленак, з палепшанай адгезійнай якасцю.

Распрацаваны інтэграваныя іонна-прамяневые сістэмы, працэсы на іх базе і эксперыментальныя устаноўкі для нанясення тонкіх пленак.

Распрацаваныя іонна – прамяневые сістэмы функцыянуюць у шырокім дыяпазоне ціску  $2 - 8 \times 10^{-2}$  Па, забяспечваючы магчымасць правядзення шырокага спектру тэхналагічных працэсаў з ужываннем дадатковага энэргетычнага ўплыву на фарміруемую пленку.

Знойдзены умовы ужывання йоннага пучка, як інструмента для ачысткі паверхнасці цвёрдых цел. Праведзены эксперыментальныя даследаванні працэсаў десорбцыі прымасей з паверхнасці цвёрдага цела пад уздзеяннем йоннай бамбардыроўкі, апрадэлен час найбольшай актыўнай десорбцыі газавых прымасей з паверхнасці падложак. Вынікі даследаванняў дазваляюць прагназаваць тэхналагічныя рэжымы правядзення йоннай ачысткі паверхнасці перад нанясеннем пленачных структур.

Зроблен аналіз працэсаў фармавання кіслародсодержащих саедіненій шляхам рэактыўнага распылення металічных мішеняў. Абгрунтавана і эксперыментальна даказана эфектыўнасць правядзення працэса з ужываннем прынцыпа раздальнага газаснабжэння. Паказана, што новая методика распылення дазволіць павысіць праіздвальнасць працэса ў 2...3 разы.

Распрацавана феноменалагічная мадэль фармавання пакрыцця на рэльефнай падложке ў прысутнасці йоннай бамбардыроўкі. Паказана і эксперыментальна падцвержана эфектыўнасць прымянення йонных пучкоў для упраўлення ступенню запаленасці вертыкальных сценак углубленняў сложнарэльефных паверхнасцей.

**РЕЗЮМЕ**

Завадский Сергей Михайлович

**Интегрированные ионно-плазменные процессы формирования тонкопленочных структур на рельефных поверхностях**

*Ключевые слова:* ион, пленка, магнетрон, ионно – лучевой источник, адгезия, оксид, рельеф, нанесение, распыление.

*Объектом исследования* являются интегрированные ионно-плазменные процессы формирования тонкопленочных структур из разряда в скрещенных Е×Н полях. Предметом исследования являются химико - физические процессы, закономерности и механизмы взаимодействия ионов и конденсирующегося материала, протекающие на поверхности различных подложек в процессе конденсации при ионно - плазменном нанесении тонкопленочных слоев и в условиях перераспыления.

Разработанные интегрированные ионно – плазменные системы способны функционировать в широком диапазоне давлений  $2 - 8 \times 10^{-2}$  Па, обеспечивая возможность проведения широкого спектра технологических процессов с применением дополнительного энергетического воздействия на поверхность конденсации.

Определены условия использования ионного пучка, как инструмента для очистки поверхности. Проведены экспериментальные исследования процессов десорбции примесей с поверхности твердого тела под действием ионной бомбардировки, определено время наиболее активной десорбции газовых примесей с поверхности подложек. Результаты исследований позволяют прогнозировать технологические режимы проведения операций ионной очистки перед нанесением пленочных структур.

Проведен анализ процессов формирования кислородсодержащих соединений путем реактивного распыления металлических мишеней. Обоснована и экспериментально доказана эффективность проведения процесса с использованием принципа дифференцированного газоснабжения. Показано, что новая методика распыления позволят повысить производительность процесса в 2...3 раза.

Разработана феноменологическая модель формирования покрытия на рельефной подложке в присутствии ионной бомбардировки. Показана и экспериментально подтверждена эффективность применения ионных пучков для управления степенью запыления вертикальных стенок углублений сложнорельефных поверхностей.

**SUMMARY**

**Zavatskiy Sergey Mixailovich**

**The integrated ion plasma processes of thin film structures formation on complicated - relief surfaces.**

**Key words:** ion, thin film, magnetron, ion beam source, adhesion, oxide, relief, deposition, sputtering.

Object of investigation are development integrated ion plasma processes of thin film structures formation and systems for discharges with crossed  $E \times H$  fields.

Subject of investigation are physical – chemical processes regularity and mechanisms ions and condensing materials on the surface substrate during thin films deposition at the resputtering.

Designed ion plasma systems are capable to operate in wide pressure range, ensuring an opportunity of carrying out of a wide spectrum of technological processes with application of padding energy action to the condensed surface. The range of working pressures at carrying out of such processes is  $(2 - 8) \cdot 10^{-2}$  Pa.

The requirement parameters use of an ion beam, as instrument for clearing a surface are determined. The experimental research of processes of a desorption of impurities from a surface under activity of an ion bombardment are carried out, the time most of fissile desorption of gas impurities from a surface is spotted. The results of examinations allow to forecast technological modes of carrying out of operation of an ion-clearing process of a surface before deposition of film structures.

The analysis of processes of formation of metal oxide films is carried out by a reactive sputtering of metal targets. Experimentally efficiency of carrying out of process with use of a principle differentiated gaze supply is proved. Is shown, that a new procedure of a sputtering will allow to increase productivity of process in 2... 3 times.

The phenomenological model of formation of a coating on a relief substrate at the presence of an ion bombardment is designed. Is shown and experimentally efficiency of application of ion beams for guidance cover of a dust content of vertical walls of dimples relief of surfaces is confirmed.



Завадский Сергей Михайлович

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР НА РЕЛЬЕФНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЯХ**

05.27.06 - "Технология и оборудование для производства полупроводников,  
материалов и приборов электронной техники"

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

---

Подписано в печать 22.05.2002. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,63. Уч.- изд. л. 1,1. Тираж 90 экз. Заказ 329.

---

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.