

Учреждение образования  
**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.3.049.77: 621.793

**Голосов Дмитрий Анатольевич**

**ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
СЛОЕВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ  
ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ**

Специальность **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: д.т.н., акад. НАН Беларуси, проф. А.П. Достанко (Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”, кафедра ЭТТ);

Научный консультант: к.т.н. И.В. Сладковский (Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”, кафедра ЭТТ);

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Сокол В.А. (Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”, кафедра микроэлектроники);

к.ф.-м.н. Пономарь В.Н. (НИКТП “Белмикросистемы” НПО “ИНТЕГРАЛ”);

Оппонирующая организация: Институт технической акустики НАН Беларуси

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации**

Получение высококачественных тонкопленочных слоев сверхтвердых материалов является одной из актуальных задач технологии. Несмотря на то, что производство тонких пленок располагает широким и разносторонним выбором методов и технических средств, применение известных разработок не всегда может в полной мере удовлетворить предъявляемым требованиям. Расширение номенклатуры материалов и стремление перейти к непрерывным технологическим процессам существенно повысили интерес к получению пленок распылением материалов ионной бомбардировкой. В последние годы интенсивно ведутся исследования по разработке и внедрению в промышленность ионно-ассистированных методов нанесения тонких пленок. Это связано, прежде всего, с тем, что методы ионного ассистирования позволяют получать пленки с заданными свойствами, активно управлять процессом формирования пленок путем изменения энергии, как распыленных частиц, так и параметров ассистирующего ионного пучка и, тем самым, обеспечивать условия для получения пленок с заданными структурно-фазовыми свойствами и воспроизводимостью параметров от процесса к процессу.

Выбор, в качестве основного объекта исследований, тонких пленок на основе сверхтвердых материалов продиктован наличием у них ряда интересных физико-химических свойств, позволяющих применить их в различных областях промышленности. Возможность воспроизводимого формирования пленок сверхтвердых материалов методами ионного ассистирования открывает перспективы для их активного внедрения в различных областях науки и техники.

Несмотря на все более активное применение ионного ассистирования в технологии формирования пленочных структур, проблема управления фазовыми превращениями в осаждаемых пленках при дополнительном энергетическом воздействии до настоящего времени не достаточно исследована. В этой связи разработка практических аспектов ионно-ассистированного нанесения тонких пленок сверхтвердых материалов является актуальной задачей. Данная проблема может быть решена путем анализа физических и химических процессов, протекающих в объеме и на поверхности осаждаемых покрытий, выявление факторов, которые оказывают воздействия на эти процессы, и выработку физико-технических принципов получения пленок с заданными параметрами.

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

Диссертационная работа выполнялась в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в рамках Государственной

научно-технической программы “Диагностика, медицинская техника и оборудование” задание “02.12. Разработать и изготовить тепловыделяющие элементы на гибких и жестких носителях и автоматизированный комплекс для их производства”, исследовательского проекта Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь № Т97М - 112 “Разработка физико-химических основ формирования пленок нитрида углерода методами ионного ассистирования”, научно-исследовательских проектов: № 1520/93 “Исследовать процессы генерации и ускорения пучков ионов низких энергий, и разработать принципы проектирования технологических устройств формирования плёночных структур методом радиационной ионно-лучевой химии”, № 1535/96 “Исследование механизма и кинетики взаимодействия энергетичных потоков ионов с поверхностью твердого тела в процессах модификации и синтеза тонких пленок”, № 1541/97 “Разработка физико-химических основ формирования пленок нитрида бора методами ионного ассистирования”, № 1324/97 “Разработка физико-технических основ ионно-фотонной технологии формирования и модификации пленочных и поверхностных структур с управляемыми оптическими и механическими свойствами.”, № 1558/00 “Исследовать процессы высокоинтенсивного ионно-стимулированного синтеза тонкопленочных структур и разработать принципы построения ассистирующих систем”, № 1551/99 “Разработка физических основ проектирования устройств и процессов ионного ассистирования магнетронному распылению”.

#### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка ионно-плазменных систем для ионно-ассистированного нанесения тонких пленок, экспериментальное исследование влияния параметров ионной бомбардировки на свойства формируемых пленок сверхтвердых материалов, разработка физико-технических основ технологических процессов получения сверхтвердых покрытий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

- провести анализ современного состояния исследований в области разработки методов и средств получения тонкопленочных покрытий сверхтвердых материалов;
- разработать методику расчета и проектирования ионно-плазменных систем для процессов ионно-ассистированного нанесения пленок сверхтвердых материалов;
- разработать и исследовать ионно-плазменные системы для ионно-ассистированного нанесения тонких пленок;
- экспериментально исследовать процессы формирования пленок сверхтвердых материалов под воздействием ионной бомбардировки;

- провести комплекс исследований по изучению влияния параметров процесса формирования пленок сверхтвердых материалов на их свойства.

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

Объектом исследования являются процессы взаимодействия ионов с поверхностью твердого тела, конструкции ионно-плазменных систем и структурно-фазовые превращения в наносимых слоях сверхтвердых материалов.

#### **Гипотеза**

Предполагается, что применение ионной бомбардировки конденсирующегося материала позволит активно управлять процессом фазообразования с целью обеспечения требуемых свойств покрытий.

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

Для решения данных задач необходимо было сконструировать, изготовить и испытать системы ионно-ассистированного осаждения, обеспечить их комплексом вспомогательных контрольно-измерительных средств. Определить основные характеристики процессов ионно-ассистированного осаждения. Провести исследования структурно-фазовых параметров полученных покрытий и установить закономерности влияния технологических режимов на эти свойства.

При выполнении работы использовались различные методы как формирования потока ионов (ионные источники, несбалансированные магнетроны), так и диагностики параметров, процессов происходящих в разряде, и качества полученных пленок.

Применение зондовых методов диагностики ионно-плазменных пучков позволило определять характеристики плазменного потока, т.е. энергию, концентрацию заряженных частиц и пространственное распределение данных параметров, что позволило связать параметры процесса нанесения со свойствами осажденных покрытий и судить о физико-химических процессах, происходящих в конденсирующемся на подложке материале под действием ионной бомбардировки. Использование метода ИК спектроскопии позволило производить анализ фазового состава полученных пленок сравнением ИК спектров поглощения пленок в диапазоне  $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ . Структура и морфология осажденных пленок анализировались методами просвечивающей электронной микроскопии, ЭПР спектроскопии. Исследования износостойкости осажденных пленок осуществлялись методом истирания индентором. Абсолютные значения твердости пленочных покрытий были получены с помощью измерителя микротвердости пленок.

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

1. Разработана методика расчета и проектирования ионно-плазменных систем, которая связывает компоновочные параметры магнетронной

распылительной системы с ее разрядными характеристиками. Для количественной оценки степени несбалансированности магнетронных распылительных систем предложены понятия коэффициента несбалансированности и коэффициента геометрической несбалансированности магнетронной распылительной системы, которые имеют прямую связь с отношением ион/атом на поверхности конденсации.

2. Установлены зависимости плотности ионного тока на подложку от степени несбалансированности магнетронной распылительной системы. Показано, что применение несбалансированной конфигурации магнитного поля МРС позволяет в несколько раз увеличить плотность ионного тока бомбардирующей подложку. Установлено, что плотность ионного тока магнетронной распылительной системы с дополнительным соленоидом достигает  $25.0 \text{ mA/cm}^2$  на оси магнетрона при токе разряда МРС  $I_r = 3.0 \text{ A}$ , и примерно, на порядок величины превышает плотность ионного тока обычной МРС и в три – четыре раза – несбалансированной МРС с усиленным боковым магнитным полем.

3. Предложена концепция магнетронной распылительной системы, в которой изменение конфигурации и интенсивности магнитного поля в промежутке мишень – подложка достигается за счет магнитного поля, создаваемого дополнительным соленоидом, что позволяет в широких пределах изменять степень несбалансированности магнетрона и добиться оптимизации разрядных характеристик магнетрона.

4. Установлены зависимости образования нитрида бора с  $sp^3$ -гибридизацией связей от параметров процесса (энергии и плотности тока бомбардирующих ионов, соотношения рабочих газов, температуры подложки). Показано, что фактором, наиболее полно характеризующим процесс ионного ассистирования, является импульс, воздействующий на осажденный атом конденсирующейся фазы. Установлено, что образование нитрида бора с  $sp^3$ -гибридизацией связей достигается в узком диапазоне значений импульса порядка  $40 - 90 \text{ (эВ} \cdot \text{а.е.м.)}^{1/2}$ .

5. Установлены зависимости показателя преломления на длине волны  $10.5 \text{ мкм}$  и твердости алмазоподобных пленок, полученных методом несбалансированного реактивного магнетронного распыления, от соотношения рабочих газов  $\text{Ar}/\text{CH}_4$ , скорости осаждения пленок и энергии бомбардирующих ионов. Синтез алмазоподобных покрытий с коэффициентом преломления  $n \geq 2.0$  и микротвердостью  $1300 - 2100 \text{ кгс/мм}^2$  возможен при энергии бомбардирующих ионов  $50 - 90 \text{ эВ}$  и содержании  $\text{CH}_4$  в смеси рабочих газов в пределах  $5 - 10 \%$ .

### **Практическая значимость полученных результатов**

Создана лабораторная установка для формирования тонкопленочных структур методом двойного ионно-лучевого распыления, где для генерации распыляющего и ассистирующего ионных потоков применены ионные источники с замкнутым дрейфом электронов на основе ускорителя с анодным слоем и торцевого холловского ускорителя.

Разработана методика проектирования магнетронных распылительных систем несбалансированного типа, которая применена при проектировании и оптимизацию параметров магнетронных распылительных систем несбалансированного типа с замкнутой областью для получения высокоадгезионных слоев на крупноформатных подложках. Разработанная магнетронная распылительная система вошла в состав комплекса для реализации технологических процессов формирования функциональных тонкопленочных слоев на УП “Завод транзистор”.

Создана лабораторная установка для получения покрытий методом несбалансированного магнетронного распыления, где для синтеза покрытий в присутствии ионной бомбардировки применена экспериментальная магнетронная распылительная система несбалансированного типа с управляемым соотношением ион/атом на поверхности конденсации.

Разработан способ получения алмазоподобных покрытий для защиты и просветления ИК германиевой оптики, где в качестве источника углерода используется комбинация реакции диссоциации углеводородов в плазме тлеющего разряда МРС и ионного распыления графитовой мишени (метод реактивного магнетронного распыления). Данный способ нанесения покрытий позволил получать защитные алмазоподобные покрытия с управляемым показателем преломления и коэффициентом поглощения. Применение алмазоподобных покрытий позволило повысить пропускание германиевого окна до 92 % на длине волны 10.5 мкм.

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

1. Результаты исследований основных закономерностей формирования пленок сверхтвердых материалов, в том числе зависимости от энергии и интенсивности ионной бомбардировки, позволяющие судить о ключевой значимости ионного ассистирования в процессах синтеза данного класса покрытий.
2. Способ получения тонких пленок нитрида бора двойным ионно-лучевым распылением с использованием ускорителей с анодным слоем и торцевых холловских ускорителей;
3. Принципы проектирования и технические решения создания магнетронных распылительных систем несбалансированного типа, основанные

на взаимосвязи разрядных характеристик магнетрона с конфигурацией магнитного поля в области мишень - подложка;

4. Способ получения защитных и просветляющих покрытий на основе углерода и его соединений методом несбалансированного магнетронного распыления.

#### **Личный вклад соискателя**

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в создании экспериментального комплекса, непосредственном участии в подготовке и проведении экспериментов по получению тонких пленок сверхтвердых материалов, анализе, интерпретации и обобщении полученных результатов. В совместно опубликованных работах автор осуществлял постановку задачи, предлагал и обосновывал направления решения научных проблем.

#### **Апробация результатов диссертации**

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на международных конференциях European Materials Research Society, (Strasbourg, France, 1997 г., 1998 г.), международной конференции Materials Research Society, (Boston, USA, 1997 г.), международных конференциях "Взаимодействие излучения с твердым телом" (Минск, Беларусь, 1997 г., 2001 г.), международной конференции New electrical and electronic technologies and their industrial implementation (Kazimierz Dolny, Poland, 2001 г.), республиканских научных конференциях студентов и аспирантов по физике конденсированных сред (Гродно, Беларусь, 1997 г., 1998 г.), республиканской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии" (Минск, Беларусь, 1998), университетских научных конференциях студентов и аспирантов (БГУИР, Минск, 1997 г., 1998 г.). Материалы диссертационной работы вошли во 2-ой том монографии "Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники." /А.П. Достанко, С.В. Бордусов, И.В. Свадковский и др.; Под общ. ред. А.П. Достанко.

#### **Опубликованность результатов**

По материалам диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ, в том числе 4 в научно-технических журналах, 6 статей в материалах конференций и 9 тезисов докладов.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, общих выводов, списка использованных источников. Полный объем диссертации составляет 158 страниц основного машинописного текста, в том числе: 93 рисунков на 46 страницах, 5 таблиц на 4 страницах. Библиографический список содержит 200 наименований литературных источников на 15 страницах.



## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ свойств, методов получения и применения тонких пленок на основе сверхтвердых материалов. Наиболее интересными в этом классе, с точки зрения их промышленного применения, являются алмазоподобные покрытия, кубический нитрид бора и  $\beta$ -нитрид углерода. Рассмотрены особенности кристаллической структуры и физико-химические свойства пленок сверхтвердых материалов, и возможные области применения данного класса покрытий. Показано, что в настоящее время тонкие пленки на основе сверхтвердых материалов являются перспективными покрытиями, которые благодаря уникальным физико-химическим свойствам могут найти широкое применение в микро- и оптоэлектронике, оптике, машиностроении и биомедицине в качестве защитных, просветляющих и упрочняющих покрытий.

Установлено, что отличительной особенностью сверхтвердых материалов является наличие нескольких аллотропных модификаций кристаллической решетки с различной гибридизацией связей. Наиболее твердые модификации являются метастабильными - равновесная область их существования лежит при высоких давлениях и температурах. Основной проблемой получения покрытий на основе сверхтвердых материалов, является сложность селективного выращивания  $sp^3$ -гибридизованной фазы. На основе анализа литературных источников, установлено, что главной особенностью технологии получения пленок сверхтвердых материалов с  $sp^3$ -гибридизацией связей является необходимость применения ионной бомбардировки в процессе роста пленки.

Отдельный параграф посвящен анализу современных методов получения покрытий на основе сверхтвердых материалов. Показано, что в последние годы интенсивно ведутся исследования по разработке и внедрению в промышленность ионно-ассистированных методов нанесения тонких пленок. Это связано, прежде всего, с тем, что методы ионного ассистирования позволяют получать пленки с уникальными свойствами, активно управлять процессом формирования слоев путем изменения параметров ассистирующего ионного пучка и, тем самым, обеспечивать условия для получения пленок с заранее заданными свойствами и воспроизводимостью параметров от процесса к процессу.

Рассмотрены методы и устройства для создания интенсивных ионных потоков. Установлено, что ионные источники с замкнутым дрейфом электронов

на основе ускорителей с анодным слоем и торцевых холловских ускорителей имеют большой потенциал применения в технологии ионно-ассистированного осаждения для создания как распыляющих, так и ассистирующих ионных потоков. Отдельно рассматриваются магнетронные распылительные системы несбалансированного типа, которые обеспечивают низкоэнергетичную ионную бомбардировку растущей пленки, что в сочетании с высокой скоростью осаждения обуславливает перспективность применения данного типа устройств для ионно-стимулированного формирования алмазоподобных пленок.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному оборудованию для нанесения тонких пленок сверхтвердых материалов. В качестве базовых методов были выбраны методы двойного ионно-лучевого распыления и несбалансированного магнетронного распыления.

Для нанесения покрытий методом двойного ионно-лучевого распыления была создана экспериментальная установка на базе вакуумного поста ВУ-2МП. Камера вакуумной установки была оборудована внешним фланцевым двухлучевым ионным источником с замкнутым дрейфом электронов на основе ускорителя с анодным слоем. Особенностью данной конструкции источника является возможность генерирования двух независимых ионных пучков. Один из пучков служит для распыления материала мишени, а второй – для очистки подложки и ионного ассистирования. Данный тип источников способен генерировать пучок ионов с энергией до 2000 эВ при токе разряда до 240 мА. Была проведена оптимизация конструкции электронно-оптической системы ассистирующей ступени ионного источника, что позволило добиться значительного увеличения площади обрабатываемой поверхности подложки.

Для исследования влияния бомбардировки ионами низких энергий камера вакуумной установки была оборудована ионно-лучевой системой, состоящей из двух ионных источников: фланцевого распыляющего источника на основе ускорителя с анодным слоем и независимого ассистирующего ионного источника. В качестве ассистирующего ионного источника был использован независимый источник на основе торцевого холловского ускорителя с двойным анодным слоем оригинальной конструкции. К достоинствам данного источника можно отнести равномерность плотности тока бомбардирующего пучка на больших площадях и возможность работы в различных режимах, каждому из которых соответствует свой энергетический диапазон (от 20 эВ до 320 эВ и от 200 эВ до 1100 эВ).

Проведенные исследования характеристик ионных потоков ассистирующих ионных источников показали, что данные ионные источники позволяют в широких пределах генерировать пучки ионов с управляемой энергией и плотностью тока пучка, что позволяет гибко управлять структурой и свойствами тонкопленочных покрытий, формируемых в условиях ионной

бомбардировки. Разработанный экспериментальный комплекс обеспечивает следующие технологические параметры процесса: остаточное давление в камере  $<10^{-3}$  Па; рабочее давление  $1.0 \times 10^{-2}$  –  $6.0 \times 10^{-2}$  Па; энергия бомбардирующих ионов 25 – 1500 эВ; плотность тока бомбардирующего пучка до 200 мкА/см<sup>2</sup>; энергия распыляющих ионов до 1500 эВ при токе разряда распыляющей ступени до 200 мА; температура подложки – до 600 °С.

Для нагрева подложек применялся подложкодержатель с ИК нагревом. Температура подложки контролировалась термодатчиком, вмонтированным в пьедестал подложкодержателя. Нагреватель подложек был электрически изолирован от внутрикамерной оснастки, что позволило изменять напряжение смещения подложки.

Третья глава посвящена разработке и исследованию методов несбалансированного магнетронного распыления.

Проведены исследования особенностей построения магнитных систем несбалансированных магнетронных распылительных систем (НМРС). Для этого был разработан макетный образец магнетронной распылительной системы (МРС). В качестве источника магнитного поля МРС применены феррит-стронциевые марки 28СА260 и Sm-Co магниты.

В результате анализа МРС с различным соотношением магнитных потоков бокового и центрального полюсных наконечников установлено, что особенностью НМРС является наличие на оси устройства области с противоположным направлением магнитного поля (рис.1). Экспериментально определено, что расстояние от мишени до точки на оси МРС, в которой  $B_{\perp}$  изменяет направление на противоположное,  $Z_0$  зависит от соотношения периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени. Увеличение объема боковых магнитов приводит к возникновению “незамкнутых” силовых линий магнитного поля. В этом случае незамкнутые линии магнитного поля с периферии катода направлены к подложке, и вторичные электроны имеют возможность двигаться по данным линиям магнитного поля. Следовательно, плазма в НМРС полностью не ограничена примыкающей областью, и может распространяться до подложки. В данном случае из плазмы могут извлекаться ионные токи значительной плотности даже без внешнего смещения подложки.

Проведены исследования разрядных характеристик несбалансированной МРС. Обнаружено, что ионный ток подложки прямо пропорционален току разряда и пропорционально уменьшается с увеличением давления и расстояния мишень – подложка

$$I_s = mI_r, \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от рабочего давления, расстояния мишень – подложка и материала мишени,  $I_r$  – ток разряда МРС. Применение

несбалансированной конфигурации магнитного поля МРС позволяет в несколько раз увеличить плотность ионного тока подложки по сравнению со сбалансированными магнетронами. Установлено, что степень несбалансированности магнетрона, определяющая характеристики НМРС, зависит от распределения  $B_z$  на оси устройства. На основе анализа особенностей работы несбалансированных МРС предложено объяснение механизма возникновения ионного потока, бомбардирующего подложку.

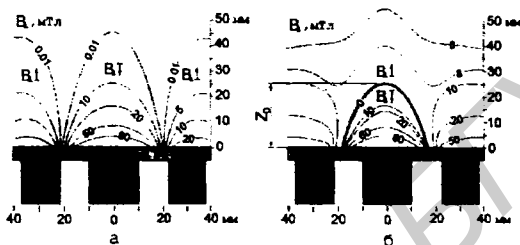


Рис. 1. Распределение вертикальной составляющей индукции магнитного поля  $B_z$  над поверхностью мишени при сбалансированной (а), несбалансированной (б) конфигурации магнитного поля МРС

Установлено, что увеличение несбалансированности за счет усиления бокового магнитного поля МРС ведет к искажению формы магнитной ловушки и уменьшению ее эффективности. Уменьшение эффективности магнитной ловушки приводит к ухудшению предельного рабочего давления магнетрона. Основным недостатком НМРС с усиленным боковым магнитным полем является отсутствие возможности изменения степени несбалансированности магнитной системы МРС.

На основе анализа НМРС предложена концепция несбалансированной МРС, где для создания вертикальной составляющей магнитного поля используется электромагнит. Применение дополнительного соленоида позволяет достигать изменения конфигурации магнитных полей в области мишень-подложка практически без искажения основной магнитной ловушки, что, в свою очередь, позволяет независимо регулировать поток осаждаемого материала, плотность тока и энергию бомбардирующих ионов, т.е. соотношение ион/атом на поверхности конденсации.

На основе исследований разрядных характеристик МРС с дополнительным соленоидом установлено, что ионный ток на подложку прямо пропорционален току дополнительного соленоида и увеличивался при уменьшении рабочего давления. Максимальная плотность ионного тока достигает  $25.0 \text{ mA/cm}^2$  на оси магнетрона при токе разряда МРС 3.0 А. В

отличие от некоторых других процессов ионного осаждения, при повышении скорости осаждения отношение ионного потока к потоку осаждаемых атомов на определенном расстоянии остается постоянным. Плотность ионного тока подложки для МРС с дополнительным соленоидом примерно на порядок величины превышает плотность тока обычной МРС и в три – четыре раза – несбалансированной МРС с усиленным боковым магнитным полем (рис. 2).

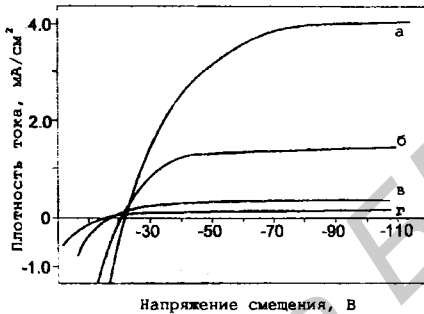


Рис. 2. Зависимость плотности тока от напряжения смещения подложки: (а) – МРС с дополнительным соленоидом в режиме второго типа при  $I_c = 600$  мА, (б) – несбалансированной МРС, (в) – сбалансированной МРС, (г) – МРС с дополнительным соленоидом в режиме первого типа

Предложена методика расчета и магнетронных распылительных систем несбалансированного типа. Для количественной оценки степени несбалансированности введены понятия коэффициентов несбалансированности и геометрической несбалансированности МРС, которые характеризуют конфигурацию магнитного поля и, следовательно, величину ионного тока на подложку. Коэффициент несбалансированности  $K$  равен отношению периферийного и центрального магнитных потоков на поверхности мишени МРС

$$K = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \quad (2)$$

Степень несбалансированности магнетрона можно оценить с помощью коэффициента геометрической несбалансированности  $K_G$ , который рассчитывается по формуле

$$K_G = \frac{Z_0}{2\bar{R}}, \quad (3)$$

где  $\bar{R}$  – радиус средней линии зоны распыления. Следует отметить, что существует однозначная зависимость между  $K$  и  $K_G$ . Очевидно, что взаимосвязь этих параметров будет определяться компоновочными параметрами

магнетронной распылительной системы, а значение  $K$  может быть рассчитано опосредованно через  $K_G$ .

В результате проведения экспериментальных исследований установлена взаимосвязь между коэффициентами несбалансированности и разрядными характеристиками магнетронов. На основе данных исследований МРС с дополнительным соленоидом получена эмпирическая формула зависимости плотности ионного тока в точке, находящейся на расстоянии  $z$  от мишени под углом  $\gamma$  к оси при давлении 0.1 Па,

$$j(z, \gamma) = \frac{(1.96(K - K_0) + 1)I_t}{10z^{1.7}} \cos^n \gamma, \quad (4)$$

где  $I_t$  – ток разряда МРС,  $n$  – коэффициент, зависящий от  $K$  (изменяется от  $n \approx 6$  при  $K = 1.23$ , до  $n \approx 12 - 20$  при  $K = 4.15$ ).

Скорость осаждения в точке подложки, расположенной на расстоянии  $r_2$  от оси планарного магнетрона с кольцевой зоной распыления, может быть рассчитана по формуле

$$V(r_2) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_m} \frac{V_p(r_1) r_1 \cos^2 \varphi(r, \theta)}{l^2(r, \theta)} dr_1 d\theta, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол конденсации;  $\theta$  – полярный угол;  $l$  – расстояние от точки распыления до точки конденсации;  $V_p(r_1)$  – скорость распыления материала мишени по толщине.

Установлено, что в несбалансированных МРС, в отличие от некоторых других процессов ионного осаждения, при повышении скорости осаждения отношение ионного потока к потоку осаждаемых атомов на определенном расстоянии остается постоянным. Отношение потока ионов к потоку осаждаемого материала являются фундаментальным параметром, во многих случаях определяющим структуру и свойства пленок, осаждаемых методами ионно-ассистированного осаждения. Таким образом, из известных распределений плотности ионного тока (4) и скорости осаждения (5) может быть рассчитано отношение ион/атом в любой точке подложки

$$\frac{i}{a} = \frac{j(z, \gamma) A_m}{N_A e \rho V_p(r_2)}. \quad (6)$$

В результате проведенных расчетов установлено, что отношение ион/атом пропорционально увеличивается с ростом  $K$ . Так, например, на рис. 3 представлена зависимость отношения ион/атом на оси устройства от  $K$  и  $K_G$  для МРС, НМРС и МРС с дополнительным соленоидом. Данные были получены при распылении Ti мишени  $\varnothing 80$  мм в одинаковых условиях ( $I_t = 2.0$  А,  $P = 0.1$  Па, расстояние мишень – подложка 7.5 см).

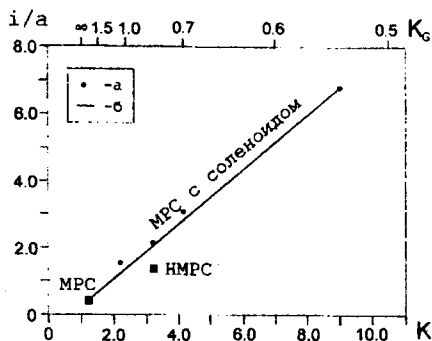


Рис. 3. Зависимость отношения ион/атом от  $K$  и  $K_c$  для различных конфигураций магнетронов: (а) – экспериментальные данные, (б) – рассчитанные по формуле (6)

Установлена зависимость эффективности магнитной ловушки для электронов от  $K$ , которая оценивалась минимальным напряжением существования разряда и минимальным рабочим давлением для различных конфигураций магнетронов. Оптимизация распределения магнитных полей с помощью дополнительного соленоида за счет ограничения распространения электронов и увеличения концентрации электронов в примышенной области в момент возникновения разряда позволило понизить минимальное рабочее давление MPC до 0.03 Па, что позволило реализовать перспективный метод ионно-ассистированного магнетронного распыления в замкнутой области.

В четвертой главе приводятся результаты исследования формирования пленок нитрида бора методом двойного ионно-лучевого распыления. В главе представлена методика проведения экспериментов и идентификации структурно-фазовых параметров, полученных BN слоев.

Полученные пленки анализировались методом просвечивающей ИК спектроскопии, ЭПР-спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, измерением износостойкости и микротвердости. Наиболее широко распространенным методом для оперативного определения местных связей структуры нитрида бора в образцах является ИК спектроскопия. Процентное содержание структуры с  $sp^3$ -гибридизацией связей оценивалось с точностью до 5 % по соотношению пиков поглощения с-BN на  $1065\text{ см}^{-1}$  и h-BN на  $1370\text{ см}^{-1}$  по формуле

$$cBN(\%) = \frac{I_{cBN}}{I_{cBN} + I_{hBN}} \times 100, \quad (7)$$

где  $I_{cBN}$  - высота пика на  $1065\text{ см}^{-1}$ ,  $I_{hBN}$  - высота пика на  $1370\text{ см}^{-1}$  на полученном спектре. Вышеназванные методы анализа или их сочетание

позволяют однозначно интерпретировать структурно-фазовый и композиционный состав слоев нитрида бора.

Методом двойного ионно-лучевого распыления при использовании для генерации ассистирующего ионного потока ионного источника на основе ускорителя с анодным слоем, получены пленки нитрида бора с содержанием с-BN до 28 %. На основе экспериментальных данных установлены зависимости образования  $sp^3$ -связанного нитрида бора в пленках от параметров процесса (энергии и плотности тока бомбардирующих ионов, соотношения рабочих газов и температуры подложки). Отмечено, что образование  $sp^3$ -связанного нитрида бора происходит только в случае ионной бомбардировки растущей пленки и одновременном нагреве подложки. Было установлено, что большое влияние на параметры BN пленок оказывает соотношение рабочих газов, подаваемых в бомбардирующую ступень ионного источника.

Проведены исследования как светлопольных электронно-микроскопических изображений пленок, так и микродифракций отдельных участков. Анализ микродифракций показал, что полученные слои имеют мелкодисперсную структуру, а диффузные кольца, в основном, соответствуют  $sp^2$ -гибридизированным связям. Однако, в отдельных случаях, были зафиксированы диффузные кольца небольшой интенсивности, соответствующие  $sp^3$ -связанному нитриду бора. На ЭПР спектрах пленок нитрида бора наблюдались сигналы, характерные для кубического и вюрцитоподобного нитрида бора.

С целью исследования трибологических свойств BN покрытий некоторые образцы были подвергнуты истиранию индентором в условиях сухого трения. Нагрузка индентора составляла 100 г. Результаты измерений показали, что образцы, полученные при нагреве подложки и воздействии ассистирующего ионного пучка, более износостойки, что также косвенно свидетельствует о наличии более высокого процентного содержания кубической фазы в пленке. Сравнение коэффициента трения данных покрытий с углеродными и нитридуглеродными покрытиями показывает, что полученные BN пленки имеют коэффициент трения, сравнимый с алмазоподобными и  $CN_x$  пленками (0.3 – 0.6). Абсолютные значения микротвердости пленок BN были получены на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке 70 г. Микротвердость различных образцов изменялась в пределах от 1072 до 1990 HV, при этом критическая нагрузка достигала 200 г. Следует отметить, что значения микротвердости и критической нагрузки коррелировали с процентным содержанием с-BN.

На основе анализа влияния параметров ионного потока на фазовый состав BN пленок установлено, что энергия и плотность тока бомбардирующих ионов оказывают сходное влияние и не могут рассматриваться раздельно.



Определено, что наиболее полно характеризующим процесс ионного ассистирования фактором является импульс, вносимый в конденсирующуюся фазу, на осажденный атом.

$$\frac{P}{a} = \sum_i \frac{i_i}{a} \sqrt{2m_i \gamma_i E_i} \quad (8)$$

где  $m$  - масса бомбардирующих ионов,  $E_i$  - энергия бомбардирующих ионов,  $i$  - количество бомбардирующих ионов,  $a$  - количество осажденных атомов,  $\gamma$  - коэффициент аккомодации

$$\gamma = \frac{4mM}{(m+M)^2} \quad (9)$$

где  $M$  - масса бомбардируемого атома. Образование кубической фазы нитрида бора отмечено в узком диапазоне вносимого импульса порядка 40 - 90 (эВ·а.е.м.)<sup>1/2</sup> (рис. 4).

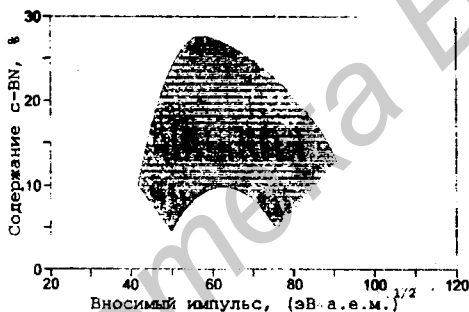


Рис. 4. Зависимость содержания с-BN в осажденных пленках от вносимого при ионной бомбардировке импульса на осажденный атом

В пятой главе приводятся результаты исследования формирования углеродных покрытий методом несбалансированного магнетронного распыления. В главе описана разработанная экспериментальная установка для получения углеродных покрытий методом несбалансированного магнетронного распыления с использованием МРС с дополнительным соленоидом. Применение МРС с дополнительным соленоидом позволило повысить ионизацию распыленного материала в области мишень - подложка, что в сочетании с применением смещения подложки позволило независимо регулировать поток осаждаемого материала, плотность тока и энергию бомбардирующих ионов.

Представлена методика проведения экспериментов по получению углеродных покрытий и методы анализа параметров алмазоподобных тонких пленок (АПП). Поскольку целью исследований было получение

алмазоподобных покрытий с требуемыми оптическими характеристиками, важными показателями являлись коэффициент преломления и поглощение в ИК области спектра АПП и оптическое пропускание системы пленка – подложка. Пропускание оценивалось методом FTIR спектроскопии в диапазоне 400 – 4000 см<sup>-1</sup>. Были получены спектры пропускания одностороннего и двухстороннего АПП покрытий на Ge и Si подложках, а также спектры отражения одностороннего покрытия.

Коэффициент преломления и коэффициент поглощения в видимой области осажденных пленок определялся косвенным методом по спектрам отражения АПП в диапазоне 400 – 1200 нм. На полученных спектрах анализировались интенсивность и положение пиков отражения. С помощью разработанной программы моделирования спектров отражения и пропускания многослойных оптических покрытий устанавливалась оптическая толщина покрытия ( $n \cdot d$ ) и коэффициент поглощения в видимой области. Физическая толщина покрытия определялась с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Проведены эксперименты по получению АПП методом несбалансированного магнетронного распыления графитовой мишени в среде аргона. Установлено, что показатель преломления пленок, полученных при распылении графитовой мишени, находился в пределах от 2.0 до 2.2. Коэффициент поглощения в видимой области в зависимости от параметров процесса был в пределах от 0.2 до 6.0. Критическая нагрузка АПП, полученных методом магнетронного распыления графитовой мишени, не превышала 220 г и уменьшалась при увеличении мощности разряда МРС. Критическая толщина пленок зависела от параметров осаждения и материала подложки. В общем случае, при распылении графитовой мишени в среде аргона, наиболее толстые пленки были получены на Si (100) подложках ( $d=470$  нм). Превышение критической толщины приводило к возникновению частичного отслаивания пленки после взаимодействия покрытия с атмосферным воздухом.

Для устранения некоторых недостатков получения АПП методом магнетронного распыления углеродной мишени, было предложено использовать, в качестве дополнительного источника углерода, реакцию диссоциации углеводородов в плазме тлеющего разряда МРС (метод реактивного магнетронного распыления). При этом поток конденсирующегося на подложке материала образовывался в результате комбинации деструкции газовых источников в разряде МРС и ионного распыления графитовой мишени. В качестве рабочих газов применялась смесь  $\text{CH}_4/\text{Ar}$ . Установлены зависимости показателя преломления и микротвердости алмазоподобных пленок, полученных методом несбалансированного реактивного магнетронного распыления от параметров процесса (соотношения рабочих газов  $\text{Ar}/\text{CH}_4$ , скорости нанесения пленок и энергии бомбардирующих ионов). Установлено,

синтез алмазоподобных покрытий с коэффициентом преломления  $n \geq 2.0$  и микротвердостью  $1300 - 2100 \text{ кгс/мм}^2$  возможен при энергии бомбардирующих ионов в диапазоне  $50 - 90 \text{ эВ}$  и содержании  $\text{CH}_4$  в смеси рабочих газов в пределах  $5 - 10 \%$ .

На основе полученных результатов разработан способ получения алмазоподобных покрытий для защиты и просветления ИК оптики на основе германия, где в качестве источника наносимого материала используется комбинация реакций диссоциации углеводородов в плазме тлеющего разряда МРС и ионного распыления графитовой мишени (метод реактивного магнетронного распыления). Разработанная методика нанесения покрытий позволила получать защитные АПП с управляемым показателем преломления и коэффициентом поглощения. Применение АПП позволило повысить пропускание германиевой окна до  $92 \%$  на длине волны  $10.5 \text{ мкм}$ .

Проведены исследования особенностей синтеза покрытий на основе углерода, полученных методом несбалансированного магнетронного распыления графитовой мишени при добавке к рабочему газу азота. При этом содержание азота в смеси газов  $\text{Ar/N}_2$  изменялось от  $0$  до  $100 \%$ . Получены зависимости скорости осаждения пленок от содержания азота в рабочей смеси газов и давления в камере. Установлено, что при увеличении содержания азота в рабочей смеси газов происходило увеличение скорости осаждения. Результаты резко отличаются от поведения наблюдаемого при реактивном распылении нитридов переходных металлов, где при увеличении парциального давления азота скорость осаждения уменьшается по причине более низкого коэффициента распыления нитридов, по сравнению с чистыми металлами.

Проведен анализ ИК спектров пропускания пленок нитрида углерода, полученных методом реактивного несбалансированного магнетронного распыления. В отличие от АПП на полученных спектрах пленок  $\text{CN}_x$  присутствовало четыре области поглощения: около  $700 \text{ см}^{-1}$ , широкая область от  $1000$  до  $1700 \text{ см}^{-1}$ , около  $2200 \text{ см}^{-1}$  и около  $3250 \text{ см}^{-1}$ . Пик  $700 \text{ см}^{-1}$  соответствует внеплоскостной моде графитоподобной структуры. Широкий пик поглощения  $1000 - 1700 \text{ см}^{-1}$  представляет собой суперпозицию пиков поглощения G и D областей соответственно графитоподобного и разориентированного  $\text{sp}^2$ -связанного углерода. Большая ширина данной области поглощения может свидетельствовать о степени аморфизации полученной структуры, а также в некоторых случаях может быть обусловлено наличием пика  $\text{sp}^3$ -гибридизированного углерода. Пик поглощения на  $2200 \text{ см}^{-1}$  (область III) соответствует вытянутым связям  $\text{C}\equiv\text{N}$  (углерод в  $\text{sp}$ -гибридизированном состоянии). Небольшая область поглощения около  $3250 \text{ см}^{-1}$  возникают при взаимодействии остаточного водорода с распыленным углеродом и азотом до образования связей  $\text{NH}_2$  и C-H.

Установлено, что увеличение энергии бомбардирующих ионов от 10 до 100 эВ приводит к увеличению соотношения D/G рамановских областей при увеличении интегральной интенсивности области поглощения 1000 – 1700 см<sup>-1</sup>. Кроме того, установлена обратная зависимость интенсивности пика поглощения 2200 см<sup>-1</sup>. При увеличении температуры подложки до 300 °С наблюдалось некоторое уменьшение абсолютной интенсивности пиков, что, по-видимому, связано с уменьшением процентного содержания азота в пленках.

Трибологические характеристики пленок нитрида углерода зависели от соотношения рабочих газов Ar/N<sub>2</sub>. Абсолютные значения микротвердости CN<sub>x</sub> покрытий на Si(100) подложках были в пределах 800 – 1300 кгс/см<sup>2</sup>, хотя наибольшая твердость была достигнута без использования азота. Установлен рост напряжений с увеличением дозы бомбардировки. При напряжении смещения подложки порядка -80 В критическая толщина CN<sub>x</sub> пленок не превышала 300 нм.

## ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования особенностей синтеза слоев сверхтвердых материалов в условиях ионного ассистирования. На основе экспериментальных данных установлены зависимости образования sp<sup>3</sup>-связанного нитрида бора от параметров процесса (энергии и плотности тока бомбардирующих ионов, соотношения рабочих газов и температуры подложки) показывающие, что фактором, наиболее полно характеризующим процесс ионного ассистирования, является импульс, воздействующий на осажденный атом конденсирующейся фазы и образование sp<sup>3</sup>-связанного нитрида бора достигается в узком диапазоне значений импульса порядка 40 – 90 (эВ×а.с.м.)<sup>1/2</sup> [2 - 5, 11 - 17].
2. Разработан способ получения алмазоподобных покрытий для защиты и просветления ИК германиевой оптики, где в качестве источника углерода используется комбинация реакции диссоциации углеводородов в плазме тлеющего разряда МРС и ионного распыления графитовой мишени (метод реактивного магнетронного распыления). Данный способ нанесения покрытий позволил получать защитные АПП с управляемым показателем преломления и коэффициентом поглощения. Применение АПП позволило повысить пропускание германиевого окна до 92 % на длине волны 10.5 мкм [8].
3. Разработано и создано экспериментальное оборудование для формирования тонкопленочных покрытий методом двойного ионно-лучевого распыления, где для генерации ионных потоков используются двухлучевой ионный источник на основе ускорителя с анодным слоем или

- независимый источник ионов на основе торцевого холловского ускорителя с двойным анодным оригинальной конструкции [4, 6, 8, 16, 18, 19].
4. Разработана методика расчета и проектирования магнетронных распылительных систем несбалансированного типа, которая связывает геометрические параметры магнетронной распылительной системы с его разрядными характеристиками. Для количественной оценки степени несбалансированности магнетронных распылительных систем введены понятия коэффициента несбалансированности и коэффициента геометрической несбалансированности МРС, которые имеют прямую связь с отношением ион/атом на поверхности конденсации [1, 7, 9, 10].
  5. Разработана магнетронная распылительная система несбалансированного типа с управляемым соотношением ион/атом на поверхности конденсации. Применение дополнительного соленоида позволило достигать изменения конфигурации магнитных полей в области мишень-подложка практически без искажения основной магнитной ловушки, что в свою очередь позволяет независимо регулировать поток осаждаемого материала, плотность тока и энергию бомбардирующих ионов [7, 9].
  6. Проведены исследования особенностей построения магнитных систем МРС. Установлено, что применение несбалансированной конфигурации магнитного поля МРС позволяет в несколько раз увеличить плотность ионного тока бомбардирующего подложку. Плотность ионного тока МРС с дополнительным соленоидом достигает  $25.0 \text{ mA/cm}^2$  на оси магнетрона при токе разряда МРС  $I_r = 3.0 \text{ A}$ , и примерно, на порядок величины превышает плотность ионного тока обычной МРС и в три – четыре раза – несбалансированной МРС с усиленным боковым магнитным полем. [7, 10].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Статьи и материалы конференций

1. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. Characterisation parameters for unbalanced magnetron sputtering systems // Vacuum.- 2002.- Vol. 68, № 4.- P. 283-290.
2. Голосов Д.А. Свойства, применение, и методы анализа тонких пленок нитрида бора // Электронная обработка материалов.- 1999.- №3.- С. 17-24.
3. Голосов Д.А. Методы получения тонких пленок нитрида бора // Электронная обработка материалов.- 1999.- № 2.- С. 57-65.
4. Голосов Д.А., Свадковский И.В., Телеш Е.В., Достанко А.П. Структурно-фазовые и трибологические свойства пленок нитрида бора, полученных

методом двойного ионно-лучевого распыления // Электронная обработка материалов.- 1999.- № 4.- С. 51-58.

5. Golosov D.A., Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Zavatski S.M., Dudin S.I. Research of ion bombardment influence on boron nitride films phase // 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. 444 – 447.

6. Zavatskiy S.M., Khokhlov A.E., Golosov D.A., Svadkovski I.V., Dostanko A.P. 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.

7. Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. Developing and investigation of unbalanced magnetron sputtering system // 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.

8. Kotov D.A., Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A. Low energy ion source for thin film technology // 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. 712–715.

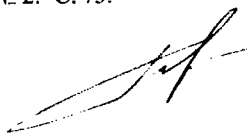
9. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M. Low pressure unbalanced magnetron and ion beam assisted magnetron sputtering // II international symposium New electrical and electronic technologies and their industrial implementation NEET' 2001: Contributed papers, Kazimierz Dolny, Poland, February,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

10. Голосов Д.А., Свадковский И.В., Завадский С.М. Методика расчета магнетронных распылительных систем несбалансированного типа // Взаимодействие излучения с твердым телом: Материалы IV Междунар. научн. конф., Минск, Беларусь, 3-5 окт. 2001 г. / БГУ, НАН РБ, Мин. Образования РБ.- Минск, 2001.- С. 338-340.

#### **Тезисы докладов**

11. Golosov D.A., Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Zavatski S.M. The cubic boron nitride films prepared by the dual ion beam deposition technique // European Materials Research Society spring meeting E-MRS'97: Book of abstracts, Strasbourg, France, June 16-20, 1997.- P. K-31.

12. Голосов Д.А., Свадковский И.В., Завадский С.М., Достанко А.П. Влияние ионной бомбардировки на параметры пленок нитрида бора. // Взаимодействие излучения с твердым телом: Тезисы II Междунар. научн. конф., Минск, Беларусь 23-25 сентября 1997 г. / БГУ, НАН РБ, Мин. Образования РБ.- Минск, 1997.- С. 84.
13. Golosov D.A., Svadkovski I.V., Zavadski S.M., Dostanko A.P. Ion bombardment effect in boron nitride films formation. // Materials Research Society fall meeting MRS'97: Book of abstracts, Boston, USA, December 1-5, 1997.- P. B-6.
14. Голосов Д.А., Котов Д.А. Исследование фазового состава тонких пленок нитрида бора, полученных методом двойного ионно-лучевого распыления // Физика конденсированных сред: Тез. докл. V республиканской науч. конф. студентов и аспирангов., Гродно, Беларусь, 21-25 апр. 1997 г. / Гродненский государственный университет. Гродно, 1997.- С. 33.
15. Svadkovski I.V., Golosov D.A., Dostanko A.P., Kotov D.A., Zavadski S.M. Influence of the assisting ion beam energy ranges on the BN films structure // European Materials Research Society spring meeting E-MRS'98: Book of abstracts, Strasbourg, France, June 16-19, 1998.- P. J-56.
16. Голосов Д.А., Свадковский И.В., Достанко А.П., Котов Д.А. Исследование влияния энергетического диапазона ассистирующего ионного пучка на структурно-фазовые параметры пленок BN // Тез. докл. республиканской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии". Минск, Беларусь, 21-22 мая 1998. / Материалы, технологии, инструменты.- 1998.- Том 3, № 2.- С. 66.
17. Голосов Д.А., Буховец М.К. Влияние режимов осаждения на структурно-фазовые параметры тонких пленок нитрида бора // Физика конденсированных сред: Тез. докл. VI республиканской науч. конф. студентов и аспирантов., Гродно, Беларусь, 22-24 апреля 1998 г. / Гродненский государственный университет. Гродно, 1998.- С. 41.
18. Bukhovets M.K., Svadkovski I.V., Golosov D.A. The properties TiB<sub>2</sub> films prepared by the dual ion beam deposition technique // Third International Conference MPSL '99: Book of abstracts, Sumy, Ukraine, May 25-29, 1999.- P. 157.
19. Котов Д.А., Свадковский И.В., Голосов Д.А. Многофункциональный источник низкоэнергетичной плазмы для процессов ионно-лучевой очистки поверхности, модификации и синтеза поверхностных структур // Тез. докл. республиканской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии". Минск, Беларусь, 21-22 мая 1998. / Материалы, технологии, инструменты.- 1998.- Том 3, № 2.- С. 73.



## РЭЗЮМЭ

Голасаў Дзмітрый Анатольевіч

**Іонна-плазменная сістэма для нанясення слаёў звышцвёрдых матэрыялаў  
ва ўмовах іоннага асіціравання**

**Ключавыя словы:** тонкія плёнкi, звышцвёрдыя матэрыялы, нітрыд бора, алмазападобныя тонкія плёнкi, нітрыд углерода, іоннае асіціраванне, двойное іонна-прамяневае распыленне, незбалансаванае магнетроннае распыленне

Праведзены даследаванні эфектаў узаемадзеяння інтэнсіўных іонных патокаў з паверхняй у працэсах роста і мадыфікацыі тонкаплёначных слаёў на аснове звышцвёрдых матэрыялаў. Распрацавана і створана эксперыментальнае абсталяванне для фарміравання тонкаплёначных пакрыццяў метадам двойнога іонна-прамяневага распылення і незбалансаванага магнетроннага распылення.

Праведзены комплекс даследаванняў па вывучэнню ўплыву параметраў асаджэння на структурна-фазавыя параметры плёнак нітрыда бора, атрыманых метадам двойнога іонна-прамяневага распылення. Устаноўлены залежнасці ўтварэння  $sp^3$ -злучанага нітрыда бора ад параметраў працэса (энергіі і шчыльнасці тока бомбардуемых іонаў, суадносін рабочых газаў і тэмпературы падложкі). Выяўлена, што фактарам, найбольш поўна характэрным працэс іоннага асіціравання, з'яўляецца імпульс, уносімы у кандэнсіруючую фазу, на асаджаны атам.

Распрацавана метадыка разліка магнетронных распыляльных сістэм незбалансаванага тыпу, якая звязвае геаметрычныя параметры магнетрона з яго разраднымі характарыстыкамі. Для колькаснай ацэнкі ступені незбалансаванасці магнетронных распыляльных сістэм уведзены паняцці каэфіцыента незбалансаванасці і каэфіцыента геаметрычнай незбалансаванасці магнетрона, якія маюць прамую сувязь з адносінамі іон/атам на паверхні кандэнсацыі.

На аснове метада незбалансаванага магнетроннага распылення распрацаваны спосаб утварэння алмазападобных і  $CN_x$  пакрыццяў. Распрацавана тэхналогія ўтварэння алмазападобных пакрыццяў для абароны і прасвятлення інфрачырвонай германіевай оптикі, дзе ў якасці крыніцы асаджаемага матэрыяла выкарыстоўваецца камбінацыя рэакцый дысацыяцыі вуглевадародаў у плазме тлеючага разрада магнетрона і іоннага распылення графітавай мішэні. Устаноўлены залежнасці трыбалагічных, электронных і аптычных уласцівасцяў алмазападобных і  $CN_x$  плёнак ад інтэнсіўнасці, энергіі іоннай бомбардыроўкі і тэмпературы падложкі ў пачатку роста плёнкi.



## РЕЗЮМЕ

Голосов Дмитрий Анатольевич

### Ионно-плазменные системы для формирования слоев сверхтвердых материалов в условиях ионного ассистирования

**Ключевые слова:** тонкие пленки, сверхтвердые материалы, нитрид бора, алмазоподобные тонкие пленки, нитрид углерода, ионное ассистирование, двойное ионно-лучевое распыление, несбалансированное магнетронное распыление

Проведены исследования эффектов взаимодействия интенсивных ионных потоков с поверхностью в процессах роста и модификации тонкопленочных слоев на основе сверхтвердых материалов. Разработано и создано экспериментальное оборудование для формирования тонкопленочных покрытий методом двойного ионно-лучевого распыления и несбалансированного магнетронного распыления.

Проведен комплекс исследований по изучению влияния параметров осаждения на структурно-фазовые параметры пленок нитрида бора, полученных методом двойного ионно-лучевого распыления. Установлены зависимости образования  $sp^3$ -связанного нитрида бора от параметров процесса (энергии и плотности тока бомбардирующих ионов, соотношения рабочих газов и температуры подложки). Обнаружено, что фактором, наиболее полно характеризующим процесс ионного ассистирования, является импульс, вносимый в конденсирующуюся фазу, на осажденный атом.

Разработана методика расчета магнетронных распылительных систем несбалансированного типа, которая связывает геометрические параметры магнетрона с его разрядными характеристиками. Для количественной оценки степени несбалансированности магнетронных распылительных систем введены понятия коэффициента несбалансированности и коэффициента геометрической несбалансированности MPC, которые имеют прямую связь с отношением ион/атом на поверхности конденсации.

На основе метода несбалансированного магнетронного распыления разработан способ получения алмазоподобных и  $CN_x$  покрытий. Разработана технология получения алмазоподобных покрытий для защиты и просветления ИК германиевой оптики, где в качестве источника осаждаемого материала используется комбинация реакций диссоциации углеводородов в плазме тлеющего разряда MPC и ионного распыления графитовой мишени. Установлены зависимости трибологических, электрических и оптических свойств алмазоподобных и  $CN_x$  пленок от интенсивности, энергии ионной бомбардировки и температуры подложки в течении роста пленки.

## SUMMARY

Golosov Dmitriy Anatolyevich

### **Ion-plasma systems for deposition of superhard thin films by ion-assisted method**

**Key words:** thin films, superhard materials, boron nitride, diamond-like carbon thin films, carbon nitride, ion-assisted deposition, dual ion-beam deposition, unbalanced magnetron sputtering

Investigation of interaction effects of ion fluxes with surface during growth and modification of thin films based on of superhard materials has been made. Experimental equipment for thin films formation was developed and made by dual ion-beam deposition and unbalanced magnetron sputtering methods.

A series of investigations of deposition parameters' influence on the structure and phase of boron nitride thin films, deposited by dual ion-beam deposition method has been made. The dependences of  $sp^3$ -bonded boron nitride formation on process parameters (ion energy, ion current density, working gases ratio and substrate temperature) were determined. It was determined that the factor, most fully characterizing the ion-assisted process is momentum transferred into the film by the bombarding ions per deposited atom.

Method of estimation of unbalanced magnetron sputtering systems, which bonded geometrical parameters of magnetron with its discharge characteristics have been developed. The following parameters, serving as criteria for estimation of unbalanced magnetron parameters have been developed: the unbalance coefficient and the coefficient of magnetron geometrical unbalance, which has a direct link with ion-to-atom ratio on condensing surface.

On the basis of unbalanced magnetron sputtering methods the technique of diamond-like carbon and  $CN_x$  coatings deposition was developed. Technology of diamond-like carbon deposition for protective coatings and blooming of IR germanium windows, where as a source of deposited material used the combination of dissociation reaction of hydrocarbons in magnetron plasma and sputtering of graphite target was developed. Dependences of tribological, electrical and optical properties of DLC and  $CN_x$  films vs. intensity and ion bombardment energy and substrate temperature were determined.

Голосов Дмитрий Анатольевич

**ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
СЛОЕВ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ  
ИОННОГО АССИСТИРОВАНИЯ**

Специальность 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 05.12.2002.	Формат 60×84 1/16.	
Бумага офсетная.	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.- изд. л. 1,3.	Тираж 90 экз.	Заказ 732.

---

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, ул. П. Бровки, 6.