

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.793.18+519.688

**МЕЛЬНИКОВ**  
Сергей Николаевич

**КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ  
МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И  
ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ**

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Минск 2019

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель: **Кундас Семен Петрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Теплогазоснабжение и  
вентиляция» учреждения образования  
«Белорусский национальный технический  
университет»

Официальные оппоненты: **Рогачев Александр Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Материаловедение и  
технология материалов» учреждения  
образования «Белорусский государственный  
университет транспорта»

**Латушкина Светлана Дмитриевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующая лабораторией вакуумно-  
плазменных покрытий государственного  
научного учреждения «Физико-технический  
институт НАН Беларуси»

Оппонирующая организация: **Государственное научное учреждение  
«Институт порошковой металлургии имени  
академика О.В.Романа»**

Защита состоится « 03 » октября 2019 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «    » сентября 2019 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
кандидат технических наук, доцент

И.В.Дайняк

## **ВВЕДЕНИЕ**

Расширение номенклатуры материалов и стремление перейти к непрерывным технологическим процессам существенно повысили интерес к получению пленок методами ионно-плазменного распыления. Среди них следует выделить метод магнетронного распыления, который завоевал лидирующие позиции в процессах формирования тонкопленочных слоев. Метод позволяет гибко управлять процессом нанесения пленок путем изменения параметров разряда и с высокой воспроизводимостью получать пленки металлов, компонентных и многокомпонентных материалов с заданными свойствами. Несмотря на большой прогресс в исследованиях, технологии и практическом применении процессов магнетронного распыления существует ряд нерешенных проблем, касающихся локализации плазменного разряда, однородности наносимых слоев, эффективности использования мишеней и т.д. Помимо этого становятся все более жесткими требования к таким параметрам процесса как высокая равномерность толщины наносимых пленок, низкое энергетическое воздействие на подложку и высокая производительность. Однако проектирование как отдельных магнетронных систем, так и систем со сложным перемещением подложек без применения методов математического и компьютерного моделирования становится дорогостоящим или невозможным.

Таким образом, актуальной научной и практической задачей является комплексное компьютерное моделирование и проектирование, как отдельных высокоэффективных магнетронных распылительных систем (МРС), так и технологических процессов нанесения тонких пленок, и систем магнетронного распыления с различным взаимным расположением МРС относительно подложек, которые обеспечивают высокое качество наносимых пленок. Это позволит сократить время и стоимость разработок, а также минимизировать возможные ошибки при проектировании таких систем.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских проектов: ГПНИ “Электроника и фотоника” задание 1.1.14 “Разработка научных основ и технологий ионно-плазменного формирования тонких пленок проводящих оксидов для использования в качестве электродов ячеек сегнетоэлектрических элементов памяти” (2014 – 2015 г.г., № ГР 20142481), комплексных заданий Министерства образования РБ “Компьютерное моделирование процесса ионно-плазменного нанесения тонкоп-

леночных покрытий и формирования метастабильных фаз в условиях ионной бомбардировки” (2006 – 2008 г.г. № ГР 20063323), “Моделирование процессов ионно-плазменного распыления многокомпонентных материалов в инертных и активных средах” (2009 – 2010 г.г. № ГР 20090644), гранта БРФФИ–Минобразование № Т12МВ-025 “Разработка методов, алгоритмов и программных средств для прогнозирования профиля покрытий при магнетронном напылении” (2012 – 2014 г.г., № ГР 20122714), хозяйственного договора на выполнение НИР № 14-1025Б “Исследование процессов формирования структур энергонезависимой памяти с использованием ВЧ-магнетронного напыления” (заказчик – ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск, Беларусь, 2014 – 2015 г.г., № ГР 20142221). Тема диссертационной работы соответствует направлению 8 «Многофункциональные материалы и технологии» Перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016 – 2020 годы, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. №190.

### **Цель и задачи исследования**

**Целью** работы является установление особенностей влияния параметров МРС на их разрядные и эмиссионные характеристики, разработка на этой основе математических моделей, методики комплексного моделирования и их применение для проектирования систем и процессов магнетронного распыления.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать диагностическую программно-аппаратную систему для исследования разрядных и эмиссионных характеристик МРС;
- исследовать влияние параметров процесса магнетронного распыления и конфигураций магнитных систем МРС на их разрядные и эмиссионные характеристики (плотность ионного и электронного тока, скорость нанесения пленок, форму профилей эрозии);
- разработать модели планарных МРС и методику комплексного моделирования процессов нанесения тонких пленок металлов для различных конфигураций МРС и систем перемещения подложек;
- разработать программный комплекс, позволяющий рассчитывать распределение скорости нанесения и толщины пленок металлов для различных конфигураций МРС, который дает возможность определять наиболее рациональные технологические режимы нанесения тонких пленок;
- с использованием предложенных моделей и методики разработать МРС и

конфигурации процессов магнетронного нанесения пленок металлов на подложки с высокой равномерностью по толщине.

### **Научная новизна**

1. Экспериментально установлены новые закономерности изменения скорости нанесения, профилей распределения толщины пленки и ионного тока подложки при магнетронном распылении металлов, в частности:

– для исследуемых Cu, Al, Ti материалов мишеней скорость нанесения пленок в диапазоне токов разряда от 0,5 до 3,5 А изменяется пропорционально току разряда магнетрона, а профиль распределения толщины пленки не зависит от тока разряда и определяется свойствами распыленного материала. Изменение уровня несбалансированности МРС за счет изменения тока соле-ноида в диапазоне от –0,1 А до 0,5 А приводит к общему снижению скорости нанесения не более чем на 2,5 %;

– распределение плотности ионного тока подложки определяется свойствами распыляемого материала; увеличение степени несбалансированности приводит к фокусировке ионного потока и увеличению плотности ионного тока на оси магнетрона (для Cu мишени ионный ток на оси магнетрона достигает  $2,5 \text{ mA/cm}^2$  и при тех же режимах более чем в 2 раза превышает значения ионного тока для Al или Ti мишеней), при этом плотность тока на периферии разрядной зоны практически не увеличивается.

2. Впервые установлено, что форма профиля эрозии мишени планарной МРС при постоянном рабочем давлении не зависит от материала мишени, режимов и времени распыления, при этом коэффициент использования материала мишени является характеристикой определенной МРС и зависит только от параметров магнитной системы магнетрона, что позволяет при моделировании эрозии мишеней производить один расчет для заданной конфигурации магнитной системы, масштабировать полученный профиль в зависимости от времени распыления и прогнозировать срок службы мишени.

3. Предложена методика комплексного моделирования систем и процессов магнетронного распыления тонких пленок металлов, основанная на взаимосвязанных моделях расчета разрядной зоны МРС и процесса нанесения тонких пленок металлов, что позволяет проектировать и создавать системы магнетронного распыления с неравномерностью толщины наносимых пленок не более 10 % на подложках шириной до 500 мм, а также конструкции планарных МРС с коэффициентом использования материала мишени до 30 – 32 %.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально установленные закономерности изменения скорости нанесения пленок и распределения плотности ионного тока подложки при магнетронном распылении Cu, Al и Ti мишеней, которые показывают, что скорость нанесения пленок при токе разряда в диапазоне 0,5 – 3,5 А пропорциональна току разряда магнетрона, а изменение уровня несбалансированности МРС при изменении тока дополнительного соленоида в диапазоне от –0,1 А до 0,5 А приводит к общему снижению скорости нанесения не более 2,5 % и увеличению плотности ионного тока подложки на оси магнетрона для Cu мишени до 2,5 мА/см<sup>2</sup>, для Al до 1,2 мА/см<sup>2</sup> и для Ti до 1,1 мА/см<sup>2</sup>, что позволяет учитывать эти особенности при разработке моделей процессов магнетронного распыления.

2. Модель разрядной зоны и распределения ионного тока мишени МРС, основанная на расчете относительной скорости ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона, которая определяется величиной индукции магнитного поля и углом между векторами электрического и магнитного полей, где верхняя и боковые границы плазмы ограничены величиной горизонтальной составляющей индукции магнитного поля от 0,02 Тл и более, а нижняя граница определяется шириной темного катодного пространства, что позволяет с погрешностью не более 20 % определить распределение плотности ионного тока в разрядной зоне планарных МРС и профиль зоны эрозии металлических мишеней.

3. Модели процесса нанесения тонких пленок металлов методом магнетронного распыления для планарных аксиальных и протяженных МРС при различном взаимном расположении распылительных устройств и систем перемещения подложек, основанные на интегрировании функции плотности потока распыленного материала с учетом разрядных характеристик МРС, распределения плотности ионного тока, свойств однокомпонентных и многокомпонентных мозаичных мишеней при рабочем давлении 0,04 – 1,0 Па, которые обеспечивают определение профилей скорости нанесения, компонентного состава и толщины пленок с погрешностью не более 10 %.

4. Методика комплексного моделирования систем и процессов магнетронного распыления металлов с использованием взаимосвязанных моделей, основанная на последовательном расчете параметров магнитных систем МРС, уровня несбалансированности и распределения плотности ионного тока в разрядной зоне магнетрона; профилей распределения скорости нанесения для различных вариантов перемещения подложек, применение которой позволяет проектировать и создавать конструкции планарных МРС с коэф-

фициентом использования материала мишени до 30 – 32 % и систем магнетронного распыления с неравномерностью толщины наносимых пленок не более 10 % на подложках шириной до 500 мм.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Все результаты, изложенные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Личный вклад автора состоит в разработке методик исследования, подготовке образцов, подготовке и постановке экспериментов, в разработке представленных математических моделей, проведении исследований и анализе их результатов. В публикациях с соавторами вклад соискателя определялся рамками излагаемых в диссертации результатов. Определение структуры, цели и задач работы, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводилось совместно с научным руководителем д.т.н. С. П. Кундасом, а также с сотрудниками Центра 10.1 НИЧ БГУИР академиком НАН Беларуси д.т.н. А. П. Достанко, членом-корреспондентом НАН Беларуси д.т.н. Л. И. Гурским, к.т.н. Д. А. Голосовым и к.т.н. С. М. Завадским.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты работы обсуждались на IX, X, XI международных научно-технических конференциях «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия» (Минск, Беларусь, 2010, 2012, 2014 г.г.); IX – XII международных научно-технических конференциях «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь, 2011, 2013, 2015, 2017 г.г.); XIX – XXI Symposium on Physics of Switching Arc (Brno, Czech Republic, 2011, 2013, 2015 г.г.); XXV, XXVII Symposium on Plasma Physics and Technology (Prague, Czech Republic, 2012, 2016 г.г.); IV Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, Беларусь, 2016 г.); VII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, Беларусь, 2016 г.), IX Международной научно-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, Россия, 2017 г.); I Международной научно-технической конференции «Опто-, микро- и СВЧ электроника - 2018» (Минск, Беларусь, 2018 г.).

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований опубликовано 35 печатных работ, в том числе 1 глава в коллективной монографии, 16 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень ВАК (8,24 авторских листа), 15 ста-

тей в материалах научных конференций, 2 тезиса докладов. Получены 1 патент Республики Беларусь на полезную модель и свидетельство о регистрации компьютерной программы №736 в Национальном центре интеллектуальной собственности Республики Беларусь (приведены в приложениях диссертации).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 219 страниц, из них 115 страниц основного текста, 127 рисунков и 2 таблицы размещены на 60 страницах, библиографический список из 203 наименований, включая 35 работ соискателя, на 18 страницах, и 9 приложений на 26 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

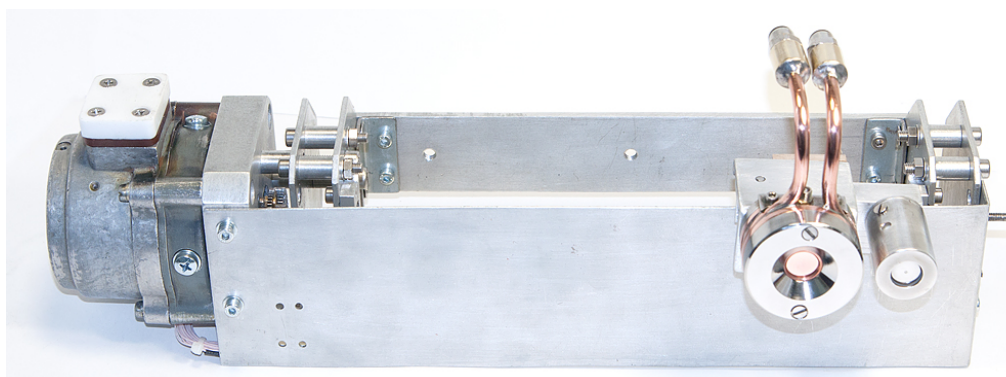
Во **введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, определены основные направления исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме работы.

**Первая глава** посвящена обзору научных работ по теме диссертации. Рассмотрены ионно-плазменные методы формирования тонких пленок. Показано, что в настоящее время самым распространенным вакуумным методом нанесения тонкопленочных покрытий является магнетронное распыление. Проанализированы литературные источники о современном состоянии этой области науки. Рассмотрены наиболее применяемые конструкции МРС, представлены их рабочие параметры на постоянном токе и определены основные факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Показано, что несмотря на достаточно развитые технологии магнетронного распыления и опыт их использования, существует ряд нерешенных проблем, касающихся методов локализации плазменного разряда, однородности наносимых слоев, эффективности использования мишеней и т.д. Также отсутствуют простые в использовании и адекватные модели и программные продукты, которые позволяли бы определять характеристики магнетронов на этапе проектирования. Поэтому проектирование таких систем является дорогостоящим или, в некоторых случаях, невозможным без применения методов математического и компьютерного моделирования.



Проведен анализ современных методов моделирования МРС и процессов магнетронного распыления. Вопросами исследования магнетронного распыления с применением методов математического моделирования занимались многие научные школы. Показано, что к текущему моменту разработаны модели отдельных этапов процесса магнетронного распыления, а созданные на их основе программные средства используют несколько численных методов: метод конечных элементов, метод Монте Карло или метод частиц в сетке. Реализованные на их основе программные средства являются сложными и не позволяют получить результат с использованием доступной вычислительной техники. Показано, что в настоящее время не созданы методики, модели и программные средства, которые позволяют производить комплексное моделирование и рассчитать конструкции МРС с различными системами перемещения подложек. На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** приведено описание экспериментального оборудования для исследования МРС и процессов нанесения тонких пленок методом магнетронного распыления, оснащенного как существующими, так и разработанными в рамках диссертационной работы планарными МРС аксиального и протяженного типа. Также показаны схемы модернизированных вакуумных постов, применяемых для верификации разработанных моделей. Приведено описание исследуемых аксиальных МРС RIF.036  $\varnothing$  39 мм и RIF.039  $\varnothing$  39 мм, протяженной МСПР.610 и несбалансированной МРС с дополнительным соленоидом МАС.80  $\varnothing$  80 мм. В данной МРС соленоид служит для изменения конфигурации и интенсивности магнитного поля в промежутке мишень – подложка. Для регистрации профилей распределения скорости осаждения материала и плотности ионного тока при магнетронном распылении впервые разработана и запатентована программно-аппаратная система, которая обеспечивает одновременное измерение распределений толщины покрытия и плотности ионного тока (рисунок 1).



**Рисунок 1.** – Система контроля скорости нанесения и плотности ионного тока

В третьей главе установлены особенности влияния параметров МРС на их разрядные и эмиссионные характеристики, что позволяет создавать математические модели, обеспечивающие достаточную для практического использования погрешность и возможность их применения на доступной вычислительной технике. Экспериментальные исследования проведены на МРС оригинальной конструкции RIF.036, RIF.039 и MAC.80 при распылении металлических Cu, Al, Ti мишеней и различном уровне несбалансированности. Установлено, что при магнетронном распылении различных металлов скорость нанесения изменяется пропорционально току разряда при изменении тока разряда от 0,5 А до 3,5 А (рисунок 2) и практически не зависит от уровня несбалансированности магнетрона при токе дополнительного соленоида от 0 А до 0,5 А (рисунок 3).

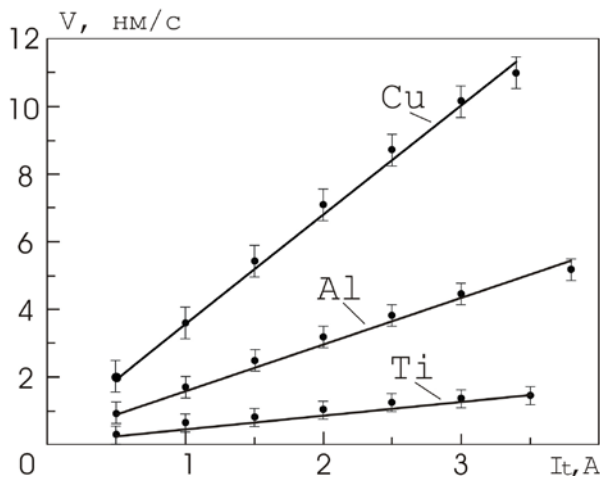


Рисунок 2. – Зависимости скорости нанесения на оси магнетрона RIF.039 от тока разряда для различных материалов

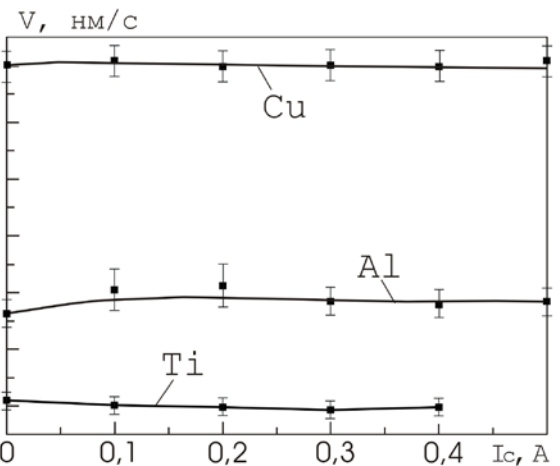
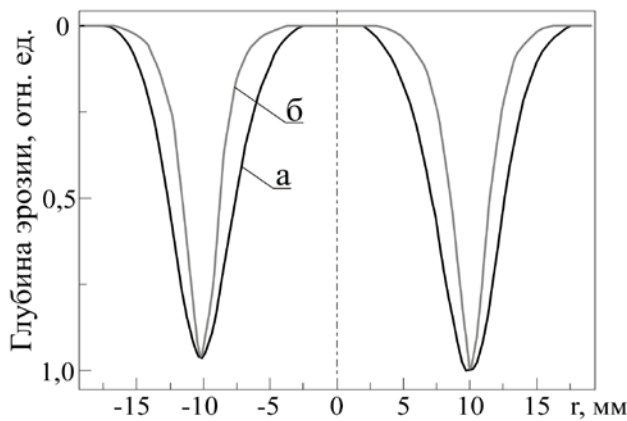


Рисунок 3. – Зависимости скорости нанесения на оси магнетрона RIF.039 от тока дополнительного соленоида для различных материалов ( $I_t = 2,0$  А)

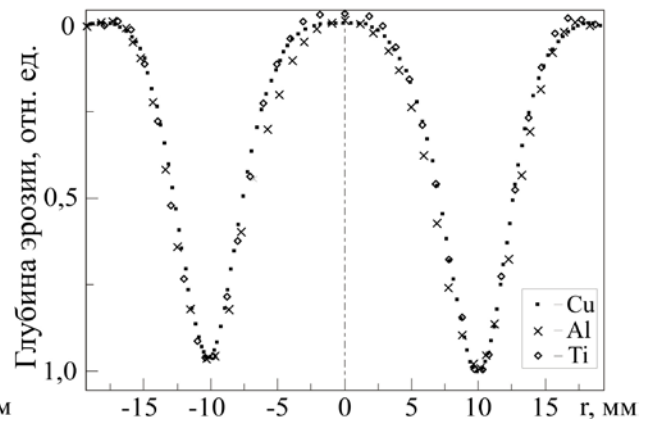
Установлено, что в режиме стабилизации тока разряда  $I_t = 0,2$  А магнетрона при увеличении зоны эрозии мишени напряжение разряда постепенно снижается (для Cu мишени за 20 часов с  $-672$  В до  $-352$  В, для Ti мишени за 12 часов работы с  $-407$  В до  $-362$  В, для Al мишени за 20 часов с  $-407$  В до  $-362$  В), что ведет к уменьшению средней энергии ионов и, как следствие, снижению коэффициента распыления. Учет изменения средней энергии бомбардирующих ионов в процессе выработки мишени позволяет более точно рассчитать скорость распыления. Для всех исследуемых материалов мишени плотность ионного тока подложки на оси магнетрона увеличивалась пропорционально току разряда и току дополнительного соленоида. Сравнение ионных токов при распылении различных материалов показало, что плотность бомбардирующего подложку ионного тока зависит от уровня несбалансиро-

ванности и от вида распыляемого материала. Так при распылении Cu мишени ионный ток на оси магнетрона достигал  $2,5 \text{ mA/cm}^2$ , и более чем в 2 раза превышал ионный ток при распылении Ti или Al мишеней при тех же режимах.

Впервые получены закономерности формирования профилей эрозии различных металлических мишеней планарных MPC на постоянных магнитах. На основе экспериментальных данных установлено, что форма профиля эрозии мишени зависит только от параметров магнитной системы магнетрона, это позволяет производить один расчет для заданной конфигурации магнитной системы и масштабировать полученный профиль в зависимости от времени распыления. При сбалансированной конфигурации магнитного поля формируется сравнительно узкая зона распыления (рисунок 4), которая увеличивается при несбалансированной конфигурации магнитной системы и практически полное совпадение профилей на одной и той же магнитной системе (рисунок 5).



**Рисунок 4. – Профили эрозии Cu мишени несбалансированной MPC RIF.036 (а) и сбалансированной MPC RIF.039 (б)**



**Рисунок 5. – Нормированные профили эрозии мишеней при распылении MPC RIF.036 различных металлов**

**Четвертая глава** посвящена разработке моделей MPC. Модель расчета разрядной зоны и распределения ионного тока мишени MPC основана на определении относительной скорости ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона. В модели предполагается, что ионизация рабочего газа в основном происходит в области скрещенных  $E \times H$  полей, где вектор магнитной индукции практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля и индукция магнитного поля имеет величину от 0,02 Тл и более. Концентрация актов ионизации в каждой точке объема плазмы пропорциональна отношению величины горизонтальной составляющей индукции магнитного поля к квадрату индукции:

$$v_i(r, z) \propto \frac{B_r(r, z)}{B^2(r, z)}, \quad (1)$$

где  $B_r(r, z)$  и  $B(r, z)$  соответственно горизонтальная составляющая вектора индукции магнитного поля и вектор магнитной индукции в точке  $(r, z)$  над мишенью МРС. Для расчета конфигурации магнитного поля использовался метод конечных элементов, основанный на расчете уравнения Пуассона для векторного магнитного потенциала  $\mathbf{A}$  ( $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$ ). Компоненты индукции магнитного поля  $B_z$  и  $B_r$  для осесимметричного поля находились из уравнений  $B_z = (1/r) \cdot (d(rA)/dr)$ ,  $B_r = -dA/dz$ .

Распределение плотности тока бомбардирующих мишень ионов рассчитывается путем интегрирования функции, описывающей акты ионизации во всем объеме плазмы

$$j_i(r) = \int_0^{z_{sh}} n_e(r, z) v_i(r, z) dz, \quad (2)$$

где  $n_e$  – плотность ионизирующих электронов,  $z_{sh}$  – граница плазмы,  $v_i$  – частота ионизации. В качестве граничных условий принято: нижняя граница зоны плазмообразования  $Z_{min} = Z_{ТКП}$ ,  $Z_{ТКП}$  – ширина темного катодного пространства,  $Z_{sh}(r_1) = Z(r_1)$ , – верхняя и боковые границы зоны плазмообразования, где  $B_r \geq 0,02$  Тл. Распределение плотности тока бомбардирующих мишень ионов используется для определения профиля выработки, коэффициента использования материала мишени и скорости распыления мишени

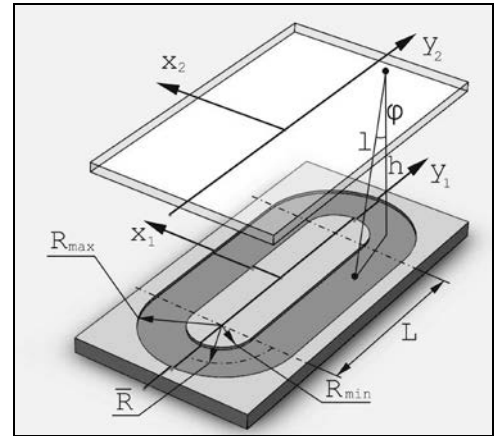
$$v_t(r) = \langle Y_t(r) \rangle \frac{j_i(r) A_t}{N_A e \rho_t}, \quad (3)$$

где  $\langle Y_t(r) \rangle$  – средняя по энергетическому спектру величина коэффициента распыления материала мишени на радиусе  $r$ ,  $A_t$  – атомная масса распыляемого материала,  $\rho_t$  – плотность материала,  $e$  – заряд электрона;  $N_A$  – число Авогадро.

Таким образом, в разработанной модели распределение относительной плотности ионного тока рассчитывается по формуле (2) путем интегрирования относительной плотности актов ионизации на определенном радиусе зоны распыления. Полученные данные нормируются и формируется профиль распределения плотности ионного тока и профиль эрозии мишени. На последнем этапе рассчитывается полное время работы мишени и коэффициент использования материала мишени. Предложенная модель оперирует реальными параметрами процесса и позволяет вычислить время ее выработки и массу распыленного материала, а также определить условия для повышения

коэффициента использования материала мишени.

Для расчета скорости нанесения пленок использовался метод интегрирования функции плотности потока распыленного материала с каждой точки зоны распыления. При построении моделей сделаны допущения: распыленные атомы имеют направленное движение; распыленные атомы конденсируются в точке соударения с подложкой; рабочее давление находится в диапазоне 0,04 – 1,0 Па, где отсутствует значительная термалиция. При расчете протяженных МРС зона распыления мишени разделялась на четыре участка (рисунок б): два закругленных и два прямолинейных. При этом скорость нанесения в точке подложки с координатами  $(x_2, y_2)$ , расположенной на расстоянии  $l$  от точки распыления МРС с протяженной зоной распыления, может быть рассчитана как сумма скоростей нанесения из прямолинейных и закругленных участков зоны распыления



**Рисунок 6. – Геометрическая схема модели для МРС с протяженной зоной распыления**

$$V(x_2, y_2) = V_1(x_2, y_2) + V_2(x_2, y_2) + V_3(x_2, y_2) + V_4(x_2, y_2), \quad (4)$$

где  $V_1(x_2, y_2)$ ,  $V_2(x_2, y_2)$  – скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени,  $V_3(x_2, y_2)$ ,  $V_4(x_2, y_2)$  – скорости нанесения с прямолинейных участков зоны распыления мишени. Скорость нанесения пленки из участка закругления зоны распыления

$$V_1(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dr_1 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{r_1 v_t(r_1) \cos \varphi(r_1, \theta) F(r_1, \theta)}{l^2(r_1, \theta)} d\theta, \quad (5)$$

где  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – минимальный и максимальный радиус зоны эрозии мишени,  $l$  – расстояние от точки распыления до точки конденсации,  $\varphi$  – угол конденсации,  $\theta$  – угол текущей точки распыления относительно длинной оси магнетрона, при  $\alpha = 1$  формула преобразуется в обычное косинусное распределение. Для протяженных участков зоны распыления формула скорости нанесения имеет вид

$$V_3(x_2, y_2) = \frac{1}{\pi} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} dx_1 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{v_t(x_1) \cos \varphi(x_1, y_1) F(r_1, \theta)}{L^2(x_1, y_1)} dy_1, \quad (6)$$

где  $L$  – длина прямолинейного участка зоны распыления мишени,  $(x_1, y_1)$  –

координаты текущей точки распыления.  $F$  – функция пространственного распределения распыленных частиц, которая использовалась для группы материалов, у которых максимум эмиссии при распылении не совпадает с направлением нормали к поверхности

$$F(\theta) = \frac{\cos \theta}{\alpha^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, от которого зависит форма распределения распыленных частиц. При  $\alpha > 1$  функция имеет форму надкосинусного распределения, а при  $\alpha < 1$  – подкосинусного распределения. При расчете скорости аксиальных МРС в формуле (7) остаются только скорости нанесения с закругленных участков зоны распыления мишени.

Для расчета толщины нанесенной пленки при линейном перемещении подложек учитывается время, скорость перемещения подложки и протяженность зоны нанесения пленки

$$W(x_2) = \int_{-\frac{t_{dep}}{2}}^{\frac{t_{dep}}{2}} V(x_2, t \times V_{sub}) dt, \quad (8)$$

где  $V(r_2, t \times V_{sub})$  – скорость нанесения в точке  $t \times V_{sub}$  на расстоянии  $x_2$  от короткой оси магнетрона,  $t_{dep}$  – время нахождения подложки в зоне нанесения, равное отношению протяженности зоны нанесения пленки к скорости перемещения подложки.

В моделях с вращением подложки при расчете учитываются параметры угла наклона подложки и угловая скорость вращения подложки, в каждый момент времени рассчитывается положение точки распыления и точки конденсации. Новизной предложенных моделей является учет распределения плотности тока в зоне эрозии мишени, ионно-электронной эмиссии материала распыляемой мишени и пространственного распределения потока распыленных частиц. В моделях учтен как осесимметричный, так и протяженный вариант МРС. В отличие от большинства существующих моделей, где рассматривается вариант нанесения пленок на неподвижную подложку, впервые разработаны модели для наиболее часто применяемых в промышленности конфигураций систем (линейное перемещение подложек; нанесения на подложки, расположенные на вращающемся барабанном подложкодержателе для двух конфигураций процесса: магнетрон располагается снаружи вращающегося барабанного подложкодержателя; магнетрон располагается внутри вращающегося барабанного подложкодержателя; вращающаяся подложка, расположенная на расстоянии от оси магнетрона; прогнозирование элемент-

ного состава нанесенных пленок при распылении мозаичных мишеней с произвольным расположением вставок), учитывающих технологические и кинематические факторы, влияющие на распределение толщины покрытий.

На основе разработанных моделей впервые предложена методика комплексного моделирования систем и процессов магнетронного распыления, которая позволяет пошагово от этапа анализа конфигурации магнитных, электрических и тепловых полей рассчитывать конструкцию планарной МРС на постоянных магнитах с последующей передачей кривой распределения плотности тока разряда и параметров зоны распыления в модели расчета скорости нанесения и формирования толщины покрытий.

Для практической реализации методики комплексного моделирования разработаны соответствующие программные средства. Программный модуль TargProf обеспечивает расчет конфигурации магнитных полей, формирование матриц выходных данных и анализ получаемых результатов, что позволяет рассчитать профиль зоны эрозии мишени на этапе проектирования магнетронной системы. С применением разработанного программного модуля MagParam можно определить наиболее рациональные размеры магнитной системы МРС и рассчитать ее основные параметры. Также разработан программный комплекс Deposition, предназначенный для расчета распределения скорости нанесения и толщины наносимых слоев в любой точке подложки для различных конфигураций зон распыления магнетронных распылительных систем и систем перемещения подложек.

**Пятая глава** посвящена верификации разработанных моделей и их практическому применению. Верификация предложенной модели расчета разрядной зоны МРС RIF.039 (аксиальный) и МСПР.616 (протяженный) показала, что для различных конфигураций магнитных полей получено практически полное совпадение положений максимума и границы зоны эрозии мишени, при этом погрешность расчета профиля зоны эрозии магнетронов не превышала 20 %, что позволяет использовать ее при проектировании магнетронных систем и повышения эффективности расхода материала мишеней.

Численные и экспериментальные исследования по нанесению металлического покрытия на полиэтилентерефталатную пленку шириной 500 мм при линейном перемещении пленки показали, что погрешность профиля распределения толщины нанесенного слоя не более 5 % по сравнению с полученным экспериментальным профилем (рисунок 7). Также были верифицированы модель нанесения на барабанные подложкодержатели, модель вращения подложки, смещенной относительно оси магнетрона, и модель многокомпонентного распыления, погрешность которых не превышала 10 %.

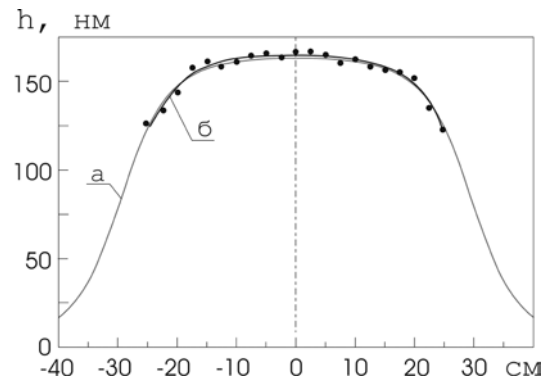
Предложенная методика применена к расчету и проектированию новой конструкции МРС МАРС.011-80 с мишенью диаметром 80 мм. Магнетронная система используется для нанесения покрытий на кремниевые подложки диаметром до 200 мм или на фрагменты таких подложек. Также разработана МРС протяженного типа МСПР.610, которая использовалась для нанесения отражающей структуры  $Al/SiO_2$  на внутреннюю поверхность изделия «Эпиквар–121» при выполнении хоздоговоров с УП «Завод транзистор». Благодаря этому удалось снизить потребляемую мощность оборудования для эпитаксиального наращивания на 23 % при установленной мощности 166 кВт.

В приложениях представлены копии документов, подтверждающих практическую значимость результатов диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. С применением разработанной программно-аппаратной системы [35] экспериментально установлены закономерности изменения скорости нанесения пленок и распределения плотности ионного тока при магнетронном распылении  $Cu$ ,  $Al$  и  $Ti$  мишеней: скорость нанесения пленок пропорциональна току разряда магнетрона в диапазоне 0,5 – 3,5 А и составляет 2 – 11 нм/с для  $Cu$ , 1 – 4,5 нм/с для  $Al$ , 0,3 – 1 нм/с для  $Ti$  [27]; нормирование профилей распределения скорости нанесения, полученных при различных токах разряда для  $Al$  мишени, показало практически полное совпадение профилей [27]; при увеличении тока дополнительного соленоида от –0,1 А до 0,5 А отмечалось незначительное изменение профиля и снижение скорости нанесения на оси магнетрона при постоянном токе разряда, для  $Cu$  – с 7 до 6,9 нм/с, для  $Al$  – с 2,8 до 2,7 нм/с, для  $Ti$  – с 1,1 до 1,0 нм/с [27]; для всех исследуемых материалов мишеней плотность ионного тока на оси магнетрона увеличивалась пропорционально току дополнительного соленоида, при распылении  $Cu$  мишени ионный ток на оси магнетрона достигал  $2,5 \text{ mA/cm}^2$ , и при тех же режимах



а – результаты моделирования  
б – реальный профиль

Рисунок 7. – Профиль распределения толщины нанесенной пленки стали 12Х18Н10Т при линейном перемещении подложки



более чем в 2 раза превышал ионный ток при распылении Ti или Al мишеней [27]; при распылении Cu мишени и увеличении тока дополнительного соленоида от  $-0,1$  до  $0,5$  А происходила фокусировка ионного потока, при этом плотность ионного тока на периферии разрядной зоны практически не увеличивалась [4, 11, 22, 24, 26, 27]. Установлено, что форма профиля эрозии мишени МРС при постоянном рабочем давлении не зависит от материала мишени, режимов и времени распыления, что позволяет при моделировании эрозии мишеней производить один расчет для заданной конфигурации магнитной системы и масштабировать полученный профиль в зависимости от времени распыления [20, 24].

2. Впервые разработана модель разрядной зоны и распределения ионного тока мишени МРС, основанная на расчете относительной скорости ионизации рабочего газа в разрядной зоне магнетрона, которая определяется величиной индукции магнитного поля и углом между векторами электрического и магнитного полей, где верхняя и боковые границы плазмы ограничены величиной горизонтальной составляющей индукции магнитного поля более  $0,02$  Тл, а нижняя граница определяется шириной темного катодного пространства, что позволяет с погрешностью не более 20 % определить распределение плотности ионного тока в разрядной зоне МРС и профиль зоны эрозии планарных металлических мишеней [2, 4, 9, 18, 20, 28].

3. Разработаны модели процесса нанесения тонких пленок металлов методом магнетронного распыления для планарных аксиальных и протяженных МРС при различном взаимном расположении распылительных устройств и систем перемещения подложек, основанные на интегрировании функции плотности потока распыленного материала с учетом разрядных характеристик МРС, распределения плотности ионного тока, свойств однокомпонентных и многокомпонентных мозаичных мишеней при рабочем давлении  $0,04 - 1,0$  Па, которые обеспечивают определение профилей скорости нанесения, компонентного состава и толщины пленок с погрешностью не более 10 % [3, 6 – 9, 13, 21 – 23, 33]. Модели реализованы в оригинальном программном комплексе Deposition [23, 25, 29, 34].

4. Впервые предложена методика комплексного моделирования систем и процессов магнетронного распыления с использованием взаимосвязанных моделей, которая позволяет осуществлять расчет и проектирование конструкций планарных МРС и реализуемых на их основе технологических процессов [9, 19, 29]. Все этапы моделирования показаны на примере конструкции МРС МАРС.011-80 с мишенью  $\varnothing 80$  мм (НИР № 14-1025Б, № ГР20142221). Также с применением методики разработаны: а) МРС RIF.039

(мишень  $\varnothing$  39 мм), небольшие размеры мишени позволяют эффективно применять данный магнетрон для распыления драгоценных металлов [1, 10, 14 – 17, 24, 31, 32]; б) МРС МАС.080 с мишенью  $\varnothing$  80 мм с дополнительным соленоидом для управления распределением магнитного поля в области мишень-подложка, эта конфигурация позволяет управлять плотностью ионного тока на подложку и также отношением ион/атом на поверхности конденсации путем изменения уровня несбалансированности магнетрона [11, 12, 30]; в) МРС протяженного типа МСПР.610 (размер мишени 610 × 100 мм), которая обеспечивает нанесение покрытия на подложки размером до 500 мм и внутреннюю поверхность цилиндрических объектов диаметром 350 – 500 мм с неравномерностью толщины нанесенной пленки не превышающей 10 % [5].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации**

1. Разработанный программный комплекс Deposition, реализующий разработанные модели, может применяться для расчета параметров процесса и технологических режимов нанесения тонких пленок металлов. С применением программного комплекса для обособленного подразделения «Институт сварки и защитных покрытий» ГНУ «Институт порошковой металлургии» разработаны рекомендации по конфигурации системы магнетронного нанесения медных покрытий на заготовки фрикционных дисков, что позволило повысить равномерность покрытия толщиной 3,0 – 5,0 мкм (акт внедрения приведен в приложении к диссертации).

2. Разработанная система контроля распределения скорости осаждения материала и плотности тока заряженных частиц при ионно-плазменном распылении, может быть использована для оперативного контроля и анализа распределений скорости осаждения и плотности ионного или электронного токов в технологических процессах ионно-плазменного распыления или ионной обработки.

3. Методика комплексного моделирования может быть использована при проектировании магнетронных распылительных систем и технологических процессов ионно-плазменного нанесения тонких пленок широкого промышленного назначения, и для определения наиболее рациональных технологических режимов нанесения тонкопленочных покрытий. Результаты внедрены в учебный процесс в учреждениях образования «БГУИР» и «МГЭУ им. А.Д. Сахарова», а также в научной части УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины», копии соответствующих актов внедрения приведены в диссертации.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Монографии

1. Магнетронные системы формирования функциональных слоев в изделиях микроэлектроники // Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники / А. П. Достанко, С. М. Аваков, О. А. Агеев, М. П. Батура, С. В. Бордусов, В. Н. Джуплин, С. М. Завадский, О. В. Клим, В. Л. Ланин, С. И. Мадвейко, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, И. Б. Петухов, Г. Е. Ретюхин, А. М. Русецкий, Д. С. Титко, В. С. Томаль, Г. А. Трапашко, С. Б. Чередниченко, Д. И. Школык. – Минск : Беларуская навука, 2016. – Гл. 3. – С. 71–79.

### Статьи в рецензируемых научных журналах

2. Мельников, С. Н. Моделирование и численные исследования параметров магнетронных распылительных систем / С. Н. Мельников, С. П. Кундас, И. В. Свадковский // Доклады БГУИР. – 2007. – № 3(19). – С. 80–87.

3. Мельников, С. Н. Модель процесса осаждения тонких пленок магнетронным распылением / С. Н. Мельников, С. П. Кундас // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2008. – № 3. – С. 92–98.

4. Прогнозирование эрозии мишени магнетронных распылительных систем / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. П. Кундас, А. П. Достанко // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 62–67.

5. Ионно-плазменная система для нанесения многослойных структур методом реактивного ионно-лучевого и магнетронного распыления / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, И. В. Свадковский, С. Н. Мельников // Вакуумная техника и технология. – 2010. – Т. 20, № 4. – С. 227–234.

6. Голосов, Д. А. Расчет элементного состава тонкопленочных слоев при магнетронном распылении мозаичных мишеней / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, А. П. Достанко // Электронная обработка материалов. – 2012. – Т. 48, № 1. – С. 63–72.

7. Голосов, Д. А. Моделирование процесса нанесения тонких пленок в установках магнетронного распыления с барабанным подложкодержателем / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников // Физика и химия обработки материалов. – 2012. – № 4. – С. 28–37.

8. Голосов, Д. А. Распределение толщины тонкопленочных слоев при магнетронном нанесении на линейно перемещаемые подложки / Д. А. Голосов, А. П. Достанко, С. Н. Мельников // Вакуумная техника и технология. – 2012. – Т. 22, № 1. – С. 27–34.

9. Голосов, Д. А. Сквозное моделирование процессов нанесения покрытий при магнетронном распылении / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2013. – № 4. – С. 75–82.
10. Golosov, D. A. Physical and Electrical Properties of Yttria-Stabilized Zirconia Thin Films Prepared by Radio Frequency Magnetron Sputtering / D. A. Golosov, S. M. Zavadsky, S. N. Melnikov // Acta Polytechnica. – 2013. – Vol. 53, № 1. – P. 155–159.
11. Golosov, D. A. Effects of magnetic system unbalance on magnetron sputtering characteristics / D. A. Golosov, S. N. Melnikov, S. M. Zavadski // Plasma Physics and Technology. – 2014. – Vol. 1, № 2. – P. 61–63.
12. Optical and Tribological Properties of PVD/CVD Diamond-like Carbon Films / D. A. Golosov, S. N. Melnikov, S. M. Zavadski, M. V. Ermolenko // Plasma Physics and Technology. – 2015. – Vol. 2, № 1. – P. 17–20.
13. The increase in thickness uniformity of films obtained by magnetron sputtering with rotating substrate / D. Golosov, S. Melnikov, S. Zavadski, V. Kolos, J. Okojie // Plasma Physics and Technology. – 2016. – Vol. 3, № 3. – P. 100–104.
14. Формирование пленок нитрида титана методом реактивного магнетронного распыления при пониженном давлении / А. П. Достанко, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Д. Э. Окоджи, Д. Д. Котинго, Г. М. Рубан // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – Т. 27, № 2. – С. 12–17.
15. Трибологические характеристики покрытий TiN, полученные методом реактивного магнетронного распыления при пониженном давлении / М. В. Ермоленко, С. М. Завадский, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, Е. Г. Замбург // Трение и износ. – 2016. – Т. 37, № 3. – С. 369–373.
16. Диэлектрические характеристики пленок оксида гафния / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Н. Вилья // Российские нанотехнологии. – 2017. – Т. 12, №. 9–10. – С. 63–68.
17. Сегнетоэлектрические свойства пленок танталата стронция-висмута, нанесенных методом ВЧ магнетронного распыления / Д. Э. Окоджи, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. М. Завадский, В. В. Колос, Е. А. Поплевка, Ю. А. Жукович // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 1 (34). – С. 33–37.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

18. Мельников, С. Н. Моделирование и анализ параметров магнетронных распылительных систем / С. Н. Мельников, И. В. Свадковский, С. П. Кундас // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : сборник материалов IV междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. : в 2 т. / Полоцкий гос. ун-т ; редкол.: А. П. Достанко [ и др.]. – Новополоцк, 2006. – Т. 2. – С. 270–274.

19. Мельников, С. Н. Алгоритм компьютерного моделирования формирования тонкопленочного покрытия в магнетронной распылительной системе / С. Н. Мельников, С. П. Кундас // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств : материалы V междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 мая 2008 г. : в 3 т. / Полоцкий гос. ун-т ; под. общ. ред. С. В. Абламейко, М. Л. Хейфеца. – Новополоцк, 2008. – Т. 3. – С. 11–14.

20. Голосов, Д. А. Моделирование и оптимизация магнитной системы магнетрона для процессов нанесения тонкопленочных покрытий / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. П. Кундас // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы IX междунар. науч.-техн. конф., Минск, 29–30 сент. 2010 г. / Ин-т порошковой металлургии ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 187–189.

21. Мельников, С. Н. Моделирование процессов магнетронного нанесения пленочных покрытий на стационарные и перемещаемые подложки / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. П. Кундас // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы Междунар. конф. ВИТТ-2011, Минск, 20–22 сентября 2011 г. / Белорусский гос. ун-т ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – С. 429–431.

22. Golosov, D. A. Simulation of mosaic target sputtering / D. A. Golosov, S. N. Melnikov // XIXth Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, 5–9 september, 2011 / Brno University of Technology. – Brno, 2011. – P. 197–200.

23. Мельников, С. Н. Модели и программные средства для анализа и оптимизации распределения толщины защитных тонкопленочных покрытий при магнетронном распылении / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. П. Кундас // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 12–14 сентября 2012 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – С. 278–281.

24. Golosov, D. A. Erosion of metallic targets at magnetron sputtering / D. A. Golosov, S. N. Melnikov, S. M. Zavatskiy // XX<sup>TH</sup> Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, September 2–6, 2013 / Brno University of Technology. – Brno, 2013. – P. 155–158.

25. Мельников, С. Н. Применение методов компьютерного моделирования при проектировании систем и процессов нанесения тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. П. Кундас // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы : материалы междунар. симпозиума, Минск, 10–12 апр. 2013 г. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: П. А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Ч. 2. – С. 140–146.

26. Исследование изменения профиля эрозии металлических мишеней при DC магнетронном распылении / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, А. П. Достанко, С. П. Кундас, Б. А. Тонконогов // Междунар. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР, Минск, 18–19 марта 2014 г. : в 2 ч. / Белорусский гос. ун–т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: А. Н. Осипов [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 198–199.

27. Исследование методом перемещаемых зондов распределений скорости нанесения и плотности ионного тока при магнетронном распылении / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, А. П. Достанко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая 2014 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2014. – С. 426–429.

28. Увеличение коэффициента использования материала мишени при магнетронном распылении / А. П. Достанко, Д. А. Голосов, С. Н. Мельников, С. М. Завадский, М. В. Ермоленко, Д. Э. Окоджи // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 11-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент. 2015 г. / Белорусский гос. ун–т ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 398–400.

29. Применение сквозного моделирования при проектировании систем магнетронного распыления / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, Д. Э. Окоджи, Г. М. Рубан, Д. Д. Котинго // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Междунар. науч. конф., Гомель, 9–11 ноября 2016 г. : в 2 ч. / Гомельский гос. ун–т им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – Ч. 2. – С. 245–250.

30. Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя для предварительной «мягкой» очистки подложек / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Xiubo Tian, Д. Э. Окоджи, В. В. Колос // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Междунар. науч. конф., Гомель, 9–11 ноября 2016 г. : в 2 ч. / Гомельский гос. ун–т им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – Ч. 2. – С. 35–39.

31. Формирование пленок оксида циркония методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, Д. Э. Окоджи // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Междунар. конф., Минск 19–22 сент. 2017 г. / Белорусский гос. ун–т ; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 438–440.

32. Поляризация пленок танталата стронция-висмута при легировании ниобием / Д. А. Голосов, С. М. Завадский, С. Н. Мельников, В. В. Колос, Д. Э. Окоджи, Б. А. Тонконогов // Микро- и нанотехнологии в электронике : материалы IX Международной науч.-техн. конф., Нальчик, 29 мая – 3 июня 2017 г. / Каб. –Балк. ун–т ; редкол.: А. М. Кармоков (гл. ред.) [и др.]. – Нальчик, 2017. – С. 229–233.

### **Тезисы докладов на научных конференциях**

33. Голосов, Д. А. Модель расчета толщины тонкопленочных слоев для магнетронных установок с подложкодержателями барабанного типа / Д. А. Голосов, С. Н. Мельников // Энергоэффективные технологии : тез. междунар. молодежного форума, Санкт-Петербург, 19–23 сентября 2011 г. : тез. докл. / СПбГЭТУ. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 49.

34. Мельников, С. Н. Программный комплекс для моделирования и оптимизации процессов магнетронного нанесения тонкопленочных покрытий / С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. П. Кундас // Информационные технологии в промышленности (ITI\*2012) : тез. докл. VII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 30–31 октября 2012 г. / ОИПИ НАН Беларуси ; редкол.: М. Я. Ковалев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2012. – С. 49 – 50.

### **Патенты**

35. Система контроля распределения скорости осаждения материала и плотности ионного тока заряженных частиц при ионно-плазменном распылении : полез. модель ВУ 10422 / А. П. Достанко, С. Н. Мельников, Д. А. Голосов, С. М. Завадский. – Опубл. 15.08.2014.

## РЭЗІЮМЭ

Мельнікаў Сяргей Мікалаевіч

### Комплекснае мадэляванне планарных магнетронных распыляльных сістэм і працэсаў нанясення тонкіх плёнак металаў

**Ключавыя словы:** магнетронная распыляльная сістэма, магнетронны разрад, матэматычнае мадэляванне, профіль эрозіі мішэні, хуткасць нанясення, таўшчыня тонкіх плёнак.

**Мэта працы:** усталяванне асаблівасцяў ўплыву параметраў МРС на іх разрадныя і эмісійныя характарыстыкі, распрацоўка на гэтай аснове матэматычных мадэляў, метадыкі комплекснага мадэлявання і іх прымяненне для праектавання сістэм і працэсаў магнетроннага распылення.

**Метады даследавання:** метады лікавага мадэлявання, розныя мадыфікацыі зондавых вымярэнняў для кантролю хуткасці асаджэння матэрыялу і шчыльнасці іёнага току, метады аптычнай інтэрфэраметрыі, а таксама стандартныя метады вымярэння электрафізічных велічынь.

**Асноўныя вынікі:** эксперыментальна вызначаны заканамернасці змены разрадных і эмісійных характарыстык МРС у залежнасці ад канструктыўных параметраў магнітных сістэм магнетронаў, ступені незбалансаванасці, параметраў працэсу распылення, а таксама заканамернасці фарміравання профіляў хуткасці нанясення плёнак металаў і профіляў эрозіі металічных мішэняў пры магнетронным распыленні, якія паказваюць, што пры току разраду да 3,0 А гэтыя параметры не залежаць ад віду матэрыялу, што распыляецца, і вызначаюцца канфігурацыяй магнітнага поля ў зоне разраду. Прапанаваны і праграмна рэалізаваны мадэлі і метадыка комплекснага мадэлявання сістэм і працэсаў магнетроннага распылення для нанясення тонкіх плёнак металаў пры розным узаемным размяшчэнні планарных МРС і сістэм перамяшчэння падкладак, з дапамогай якіх распрацаваны шэраг новых магнетронных прылад аксіяльнага і працяглага тыпаў, якія выкарыстоўваюцца для нанясення плёнак металаў.

**Ступень выкарыстання:** вынікі даследаванняў выкарыстаны пры распрацоўцы канструкцый новых МРС, працэсаў магнетроннага распылення, укаранёны ў навучальны працэс і вытворчасць.

**Галіна прымянення:** прадпрыемствы аптычнай і электронай прамысловасці, мікраэлектронікі, машынабудавання.



## РЕЗЮМЕ

Мельников Сергей Николаевич

### **Комплексное моделирование планарных магнетронных распылительных систем и процессов нанесения тонких пленок металлов**

**Ключевые слова:** магнетронная распылительная система, магнетронный разряд, математическое моделирование, профиль эрозии мишени, скорость нанесения, толщина тонких пленок.

**Цель работы:** установление особенностей влияния параметров МРС на их разрядные и эмиссионные характеристики, разработка на этой основе математических моделей, методики комплексного моделирования и их применение для проектирования систем и процессов магнетронного распыления.

**Методы исследования:** методы численного моделирования, различные модификации зондовых измерений для контроля скорости осаждения материала и плотности ионного тока, метод оптической интерферометрии, а также стандартные методы измерения электрофизических величин.

**Основные результаты:** экспериментально установлены закономерности изменения разрядных и эмиссионных характеристик МРС в зависимости от конструктивных параметров магнитных систем магнетронов, степени несбалансированности, параметров процесса распыления, а также закономерности формирования профилей скорости нанесения пленок металлов и профилей эрозии металлических мишеней при магнетронном распылении, которые показывают, что при токе разряда до 3,0 А эти параметры не зависят от вида распыляемого материала и определяются конфигурацией магнитного поля в зоне разряда. Предложены и программно реализованы модели и методика комплексного моделирования систем и процессов магнетронного распыления для нанесения тонких пленок металлов при различном взаимном расположении планарных МРС и систем перемещения подложек, с помощью которых разработан ряд новых магнетронных устройств аксиального и протяженного типов, используемых для нанесения пленок металлов.

**Степень использования:** результаты исследований использованы при разработке конструкций новых МРС, процессов магнетронного распыления, внедрены в учебный процесс и производство.

**Область применения:** предприятия оптической и электронной промышленности, микроэлектроники, машиностроения.

## SUMMARY

Melnikov Sergei Nikolaevich

### **Complex simulation of planar type magnetron sputtering systems and processes for depositing thin metal films**

**Keywords:** magnetron sputtering system, magnetron discharge, mathematical modeling, target erosion profile, deposition rate, thickness of thin metal films.

**Purpose of the research:** the establishment of the features of MSS parameters influence on their discharge and emission characteristics, the creation on this base of mathematical models and methodic of complex simulation of magnetron sputtering systems and processes and theirs application for the development of magnetron sputtering systems for the deposition of thin metal films.

**Methods of research:** numerical simulation methods, various modifications of probe measurements to control material deposition rate and ion current density, optical interferometry method, and also standard methods for measuring electro-physical quantities.

**Obtained results and novelty:** it is experimentally established patterns of change in the discharge and emission characteristics of MSS in dependence from the design parameters of magnetic systems of magnetrons, the degree of imbalance and parameters of the sputtering process, also patterns of metal films profile formation, deposition rate and erosion profiles of metal targets during magnetron sputtering, which show that with a discharge current up to 3.0 A, these parameters do not depend on the type of material being sprayed and they are determined by the configuration of the magnetic field in the discharge zone. For the first time models and methods for complex modeling of systems and processes of magnetron sputtering for deposition of thin metal films with different relative positions of planar MSS and substrate transfer systems are proposed and implemented in software. Using the technique of complex modeling, a number of new magnetron devices of axial and extended type, used for film deposition were developed.

**Degree of use:** the results of the research were used in the development of new MSS, for magnetron sputtering processes, were introduced into production and the educational process.

**Field of application:** enterprises of optical and electronic engineering, microelectronics, mechanical engineering.

*Научное издание*

**Мельников Сергей Николаевич**

**КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ  
МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И  
ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

---

Подписано в печать 22.08.2019.	Формат 60×84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 90.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛИ №02330/264 от 14.04.2014  
220013, Минск, П. Бровки, 6