

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
"БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ"

УДК 537.534.2; 621.384.637

КОТОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ
ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И СИНТЕЗА
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР**

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 2005

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

доктор технических наук, академик НАН Б,
профессор

Достанко А. П.

(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра электронной техники и технологии)

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор

Рогачев А. В.

(Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», ректор)

доктор технических наук

Калошкин Э. П.

(Научно-производственное объединение «Интеграл», научно-технический центр «Белмикросистемы» УП «Завод полупроводниковых приборов»)

Оппонирующая организация:

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Защита состоится 26 января 2006 г. в 16.00 час 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, тел. 239 – 89 – 89.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современный этап развития техники характеризуется использованием большого количества функциональных тонкопленочных структур и элементов изделий с модифицированной поверхностью, которые находят широкое применение в микро-, нано-, оптоэлектронном и оптическом приборостроении, металлообработке и машиностроении. В настоящее время наиболее перспективным направлением развития технологии модификации поверхности, нанесения и синтеза тонкопленочных структур является ионно-лучевая обработка, благодаря возможности проведения процессов очистки, активации и модификации поверхности, ионно-ассистированного нанесения и синтеза многокомпонентных соединений, а также гибкости и оперативности в управлении структурой и свойствами формируемых слоев. Вместе с тем, внедрение в промышленность этих технологических методов ограничивается техническими возможностями формирования интенсивных потоков ионов в диапазоне низких энергий, что определяется процессами генерации и ускорения заряженных частиц в автономных системах — источниках ионов.

Таким образом, обязательным условием дальнейшего развития и совершенствования ионно-лучевой технологии для создания передовой технологической базы является разработка новых, высокоэффективных разрядных систем и методов, обеспечивающих проведение обработки пучком ионов с высокой равномерностью при энергиях до 1000 эВ. Наиболее полно требованиям, к автономным разрядным системам для проведения высокоэффективных технологических процессов удовлетворяют источники ионов с замкнутым холловским током. В связи с этим, исследования, направленные на изучение основных закономерностей интенсивной генерации и ускорения ионов в устройствах с разрядом в скрещенных электрическом и магнитном полях и разработка принципов построения таких газоразрядных источников, являются актуальными и необходимыми. Сложность процессов, происходящих в объеме разрядной зоны и ускорительном канале, обусловлена рядом физических явлений, механизмы которых определяются внешними условиями, зависят от многих параметров и изучены недостаточно.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в рамках заданий республиканских научно-технических программ: 1. МПФИ «Пучковые взаимодействия». «Разработка физико-технических основ ионно-фотонной технологии формирования и модификации пленочных и поверхностных структур с управляемыми оптическими и механическими свойствами» (1996 – 2000 гг.), задание 15 (№ госрегистрации 19962425); 2. МПФИ «Наукоемкие технологии». «Разработка физико-химических основ формирования стехиометричных тонкопленочных соединений методами ионного синтеза и реактивного распыления» (2001–2005 гг.), задание 9 (№ госрегистрации 20011174); 3. МПФИ «Наукоемкие технологии». «Изучение свойств твердотельных микро- и наноструктур, полученных в ионно-плазменных технологических средах методами оптической, атомно-силовой, электронной микроскопии и спектроскопии» (2004 – 2005 гг.), задание 12 (№ госрегистрации 20042527); 4. ГПОФИ «Плазмодинамика». «Исследо-

вать условия формирования интенсивных ионно-плазменных потоков в скрещенных ЕхН полях для тонкопленочной технологии» (2002 – 2005 гг.), задание 51 (№ госрегистрации 20021219); 5. ГПОФИ «Вещество-2», «Исследование механизма взаимодействия интенсивных потоков ионов с поверхностями волокон, полимерной и неорганической матриц в условиях модификации и синтеза поверхностных структур» (2003 – 2005 гг.), задание 02 (№ госрегистрации 2002974).

По теме диссертационной работы выполнен ряд научно-исследовательских работ с УП «Завод «Транзистор» НПО «Интеграл» (2003 – 2005 гг.) (№ госрегистрации 20033281, 2005481, 2005834), а также по заданиям Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (1998 г.) (№ госрегистрации 19982338) и Министерства образования Республики Беларусь (1995 – 2005 гг.) (№ госрегистрации, 199513, 19962119, 19991180, 2000718, 2000719, 20031398).

Цель и задачи исследования. Разработка сильноточных разрядных систем с замкнутым холловским током, исследование и совершенствование процессов высокоэффективной ионно-лучевой обработки. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

- анализ современного состояния исследований и разработок в области источников ионов низких энергий, их использования в технологических процессах модификации поверхности и получения тонкопленочных структур;

- анализ факторов, влияющих на физические процессы генерации и ускорения ионов в торцевом холловском источнике с низковольтным разрядом постоянного тока и разработка методов управления энергией ионов и распределением плотности их направленного потока;

- разработка экспериментального комплекса и исследование влияния геометрии электродов, формы магнитного поля и параметров электронной эмиссии на инициализацию и характеристики разряда с замкнутым холловским током;

- разработка основных принципов построения и конструкций источников для генерации интенсивных пучков ионов с энергиями в диапазоне 10 – 1000 эВ;

- использование разработанных разрядных систем в технологических процессах модификации поверхности и получения тонкопленочных структур.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются автономные газоразрядные источники ионов низких энергий с замкнутым холловским током и генерируемые ими потоки заряженных частиц. Предмет исследования — механизмы, закономерности и зависимости процессов генерации плазмы и формирования направленного ионного потока в автономных источниках с замкнутым холловским током.

Методология и методы проведенного исследования. При проведении исследований использовались статистические методы анализа и обработки экспериментальных данных, метод измерения величины магнитной индукции с использованием датчика Холла, метод визуализации линий магнитного поля, зондовые методы и методики исследования параметров ионно-плазменных потоков с использованием электростатического анализатора с задерживающим потенциалом, плос-

кого многоячейного зонда, одиночного цилиндрического зонда, плоского зонда-экрана большой площади, современные и взаимодополняющие методы анализа морфологии поверхности, включая растровую электронную микроскопию (Nanolab – 7), атомно-силовую микроскопию (Nanotop – 206), оптическую микроскопию (Micro 200, МИН – 8, МИИ – 4), измерение удельного поверхностного сопротивления (ИУС – 3). Для численного расчета параметров магнитных полей в разрядных областях технологических систем использовался метод конечных элементов, реализованный в программном пакете ELKUT 5.1. Достоверность полученных результатов оценивалась методами сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными при измерениях параметров магнитного поля, разряда и ионно-плазменных потоков.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

1. Впервые установлен механизм ступенчатой ионизации атомов и/или молекул рабочего газа в разряде торцевого холловского источника при радиальной составляющей магнитного поля 5 – 8 мТл, величине энергии инжектируемых электронов 1,5 – 2,0 эВ, давлении 0,02 – 0,06 Па и напряжении ниже величины ионизационного потенциала.

2. Разработана физико-математическая модель процесса генерации ионов в источнике с разрядом постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях, учитывающая сечения полной и ступенчатой ионизации, что позволяет, на основе геометрических параметров электродов и условий в разрядной области и ускорительном канале, рассчитать токовые характеристики формируемого разряда и ионного пучка.

3. Для описания формы магнитного поля и взаимодействия с ним потока электронов инжектируемых в разрядную область, предложены понятия – коэффициент соотношения магнитных потоков и коэффициент электронной проводимости ускорительного канала.

4. Установлены основные закономерности формирования сильноточных ионных пучков в устройствах с многополосной магнитной системой и разрядом с замкнутым холловским током, заключающиеся в адаптивном изменении параметров магнитного поля и энергии инжектируемых электронов в объеме ускорительного канала разрядной системы, что позволило сформулировать базовые принципы построения технологических источников с рабочим диапазоном энергий генерируемых ионов 10 – 1000 эВ.

5. Установлено, что воздействие ионов с энергиями в диапазоне 10 – 1000 эВ на поверхность углеродных волокон позволяет управлять развитостью их микро- и нанорельефа, а при ионно-ассистированном нанесении TiN получать тонкопленочные слои (порядка 100 нм) с величиной удельного поверхностного сопротивления менее 7 Ом/□.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Разработаны базовые принципы построения источников ионов с энергиями 10 – 1000 эВ при токах пучка до 3 А на основе разряда постоянного тока с замк-

нутым дрейфом электронов. Предложен способ оперативного управления распределением плотности ионного пучка, что позволяет проводить обработку подложек площадью более 250 см^2 с неравномерностью менее 10% без применения систем перемещения. Использование полученных результатов позволило создать конструкции ионно-лучевых систем для генерации направленных потоков ионов круглого и протяженного ($0,5 \text{ м}$) сечений.

2. Разработаны конструкции: ионного источника с двойным анодом (ток пучка до 3 А , энергия ионов $10 - 1000 \text{ эВ}$), ионного источника с комбинированным анодным слосом (энергия ионов $40 - 200 \text{ эВ}$ и $350 - 1000 \text{ эВ}$), ионного источника с интегрированным нейтрализатором (не требует термокатода, энергия ионов $40 - 120 \text{ эВ}$), а также интегрированной ионно-плазменной системы (позволяет управлять потенциалом самосмещения на подложке), которые могут быть использованы в промышленности и при проведении научных исследований.

3. Разработана методика и приспособления для экспериментального исследования формы и векторного распределения параметров магнитного поля в ускорительном канале и разрядных областях разрядных систем с величиной индукции в диапазоне $0,5 - 300 \text{ мТл}$.

4. Разработан способ модификации поверхности углеродных волокон с применением созданных разрядных устройств, что позволило на основе обработанных тканей из углеродных волокон создать композиционные пластики с повышенными, по сравнению с пластиками из исходной ткани, в $1,1 - 1,5$ раза значениями пределами прочности на изгиб и в $1,8 - 3,0$ раза значениями предела прочности на разрыв.

5. Разработан способ формирования барьерных контактных слоев TiN для силовой электроники с применением созданной интегрированной ионно-плазменной системы, позволивший наносить покрытия толщиной 100 нм со значениями удельного поверхностного сопротивления ниже $7 \text{ Ом}/\square$ при скоростях нанесения до $0,6 \text{ нм/с}$.

Результаты диссертационной работы внедрены на УП «Завод «Транзистор» НПО «Интеграл» при модернизации установок эпитаксиального наращивания «Эпиквар МТ», что позволило существенно (на 23%) снизить их энергопотребление; в ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси» при разработке способа ионно-лучевой модификации поверхности углеродных волокон и тканей из них, а также в учебном процессе на кафедре микро- и нанoeлектроники Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в курсе «Базовые технологические процессы в микроэлектронике».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Механизм ступенчатой ионизации нейтральных атомов и/или молекул рабочего газа в разряде торцевого холловского источника при радиальной составляющей магнитного поля $5 - 8 \text{ мТл}$, величине энергии инжектируемых электронов $1,5 - 2,0 \text{ эВ}$, давлении $0,02 - 0,06 \text{ Па}$ и напряжении ниже величины ионизационного потенциала.

2. Закономерности формирования пучков ионов с током 0,1–3 А и энергиями в диапазоне 10–1000 эВ, заключающиеся в адаптивном изменении параметров магнитного поля и энергии электронов в объеме ускорительного канала разрядной системы при варьировании токами электромагнитов и катодокompенсатора, и описываемые физико-математической моделью, учитывающей сечения полной и ступенчатой ионизации, позволяющей рассчитывать токовые характеристики разряда и ионного пучка.

3. Конструкции: ионного источника с двойным анодом (ток пучка до 3 А, энергия ионов 10–1000 эВ); ионного источника с комбинированным анодным слоем (энергия ионов 40–200 эВ и 350–1000 эВ); ионного источника с интегрированным нейтрализатором (не требует термокатода, энергия ионов 40–120 эВ), а также интегрированной ионно-плазменной системы (с управлением потенциала самосмещения на подложке).

4. Установленные зависимости величины равновесной работы поверхностной адгезии углеродных волокон с олигомерным связующим, определяемые развитостью микро- и нанорельефа, от плотности тока и энергии обрабатывающих ионов. Способ модификации поверхности углеродных волокон методом ионно-лучевой обработки с применением созданных источников ионов низких энергий.

5. Установленные зависимости электрических свойств покрытий TiN от параметров процесса нанесения. Способ синтеза TiN в виде слоев толщиной 100 нм со значениями удельного поверхностного сопротивления ниже 7 Ом/□ с применением созданной интегрированной ионно-плазменной системы.

Личный вклад соискателя. В диссертации изложены результаты научно-исследовательских работ, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных работах автором осуществлялись постановка задачи, обоснование направлений решения научных проблем, разработка методик проведения исследований, непосредственное проведение исследований, анализ результатов и формулировка выводов. Автором лично предложены: аналитические выражения для расчета токовых параметров источника ионов; принципы построения сильно-точных систем с замкнутым холловским током, генерирующих пучки ионов низких энергий; рекомендации по разработке ионно-стимулированных технологических процессов; методики проведения экспериментов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение научных результатов проводились совместно с научным руководителем диссертации д.т.н., академиком НАН Б, проф. А.П. Достанко, к.т.н., доц. И.В. Сवादковским, к.х.н. В.И. Дубковой, к.т.н. С.М. Завадским, к.т.н. Д.А. Голосовым.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях, семинарах и симпозиумах в Беларуси, России, Украине, Чехии и Франции: Международной конференции «Взаимодействия излучения с твердым телом» (Минск, Беларусь, 1995 г.); V Республиканской научной конференции «Физика конденсированных сред» (Гродно, Беларусь, 1997 г.); Научно-техническом симпозиуме «European Materials Research Society», (Strasbourg, France, 1998 г.); VI Республиканской научной конференции «Физика

конденсированных сред» (Гродно, Беларусь, 1998 г.); III Республиканской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии" (Минск, Беларусь, 1998 г.); X Научно-технической конференции «Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике» (Брест, Беларусь, 1998 г.); Втором научно-практическом симпозиуме «Вакуумные технологии и оборудование» (Харьков, Украина, 1998 г.); Международной конференции «Modification of properties of surface layers of non-semiconducting materials using particle beams» (Сумы, Украина, 1999 г.); Международном научно-техническом семинаре «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2000 г.); 4 Республиканской научно-технической конференции «Материалы и технологии – 2000» (Гомель, Беларусь, 2000 г.); III Международной конференции «Plasma physics and plasma technology» (Минск, Беларусь, 2000 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Биомедсистемы – 2001» (Рязань, Россия, 2001 г.); Международной научно-технической конференции «Медэлектроника – 2002» (Минск, Беларусь, 2002 г.); 6 Международной конференции «Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками» (Томск, Россия, 2002 г.); Международной научно-технической конференции «Медэлектроника – 2003» (Минск, Беларусь, 2003 г.); II Международной конференции «Коллоидная химия и физико-химическая механика» (Минск, Беларусь, 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2004 г.); 7 Международной конференции «Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками» (Томск, Россия, 2004 г.); 21 Симпозиуме «Plasma physics and technology» (Прага, Чехия, 2004 г.); Научной конференции «Молодежь в науке – 2004» (Минск, Беларусь, 2004 г.); Международной научно-технической конференции «Медэлектроника – 2004» (Минск, Беларусь, 2004 г.); 6 Международной конференции «Взаимодействия излучения с твердым телом» (Минск, Беларусь, 2005 г.).

Опубликованность результатов. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 39 печатных работах: 5 статей в научных журналах, 21 статья в сборниках материалов конференций, 13 тезисов докладов. Общее количество страниц опубликованных материалов – 105. Без соавторства опубликовано 10 работ (30 стр.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 185 страниц. Она включает 98 страниц основного текста, 94 иллюстрации на 66 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, список использованных источников из 198 наименований на 10 страницах, список публикаций автора, содержащий основные научные результаты диссертации из 39 наименований на 4 страницах, и 3 приложения на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы изложены результаты анализа состояния научных проблем по теме диссертации, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных данных по процессам, происходящим при взаимодействии ионов с твердым телом, основным методам и устройствам низкоэнергетичной ионно-лучевой обработки.

Анализ литературных данных показал, что для гибкого и оперативного управления параметрами и свойствами поверхности и формируемых тонкопленочных структур необходимо контролировать потоки энергии (энергию и плотность потока заряженных частиц — ионов) и материала. Особый интерес для ионно-лучевой обработки представляет диапазон энергий 10 – 1000 эВ, позволяющий проводить процессы очистки, активации и модификации поверхности, нанесения и синтеза тонкопленочных структур. Однако ограниченные возможности применения данной технологии обусловлены узким энергетическим и токовым диапазонами пучков ионов генерируемых в существующих источниках, что приводит к необходимости использования нескольких устройств в одной вакуумной камере, что не всегда приемлемо вследствие ограниченности пространства и требований электромагнитной совместимости. Кроме этого, недостатками данных устройств являются сложность конструкции, необходимость применения дорогостоящих материалов и технологий при их изготовлении.

На основе классификации основных конструкций автономных устройств генерирующих направленные потоки заряженных частиц для технологического применения и анализа их достоинств и недостатков, определен перспективный класс сильноточных разрядных систем — источники ионов с замкнутым холловским током. Данные устройства благодаря компенсации положительного объемного заряда, за счет дрейфующих в разряде в азимутальном направлении электронов, не имеют физических ограничений по плотности потока ускоряемых ионов низких энергий. Тем не менее, сложность и недостаточная изученность процессов генерации и ускорения ионов в источниках с замкнутым холловским током требует проведения исследований для определения закономерностей формирования интенсивных ионных пучков в диапазоне энергий 10 – 1000 эВ.

Во второй главе описан разработанный комплекс экспериментального оборудования и зондовые устройства, реализованные методики исследования характеристик ионно-плазменного потока и параметров магнитного поля в ускорительном канале и разрядной области источников ионов низких энергий.

Комплекс экспериментального оборудования включает разработанную силовую аппаратуру: блоки питания анодов 10 А, 600 В и 0,2 А, 3 кВ; блок питания компенсатора 30 А, 25 В; два блока питания электромагнитов 10 А, 10 В; и блок питания системы перемещения внутрикамерной оснастки. Реализован ряд методик и разработаны зондовые устройства: пятисеточный электростатический ана-

лизатор для определения энергетического спектра ионов; одиночный плоский зонд для изучения распределения плотности ионного пучка; одиночные зонды-экраны для измерения суммарного тока ионного пучка и потенциала ионно-плазменного потока; одиночный цилиндрический зонд для определения концентрации и энергетического спектра электронов на выходе ускорительного канала источника. Разработана методика и индикаторные устройства для определения параметров магнитного поля в ускорительном канале и разрядной области ионных источников.

Третья глава посвящена анализу факторов влияющих на физические процессы генерации и ускорения ионов, определению основных закономерностей формирования пучка ионов низких энергий из разряда с замкнутым холловским током, разработке физико-математической модели для расчета токовых параметров ионного пучка и разряда с напряжением ниже ионизационного потенциала, а также разработке трех конструкций источников ионов низких энергий и интегрированной ионно-плазменной системы. Выполнены численные расчеты параметров магнитных систем разработанных разрядных устройств.

Проанализированы механизмы генерации и ускорения ионов низких энергий в скрещенных электрическом и магнитном полях, а также технические аспекты функционирования устройств с замкнутым холловским током и осевой составляющей магнитного поля в ускорительном канале. Показано, что гибкое управление конфигурацией линий и величиной магнитной индукции, а также параметрами инжектируемого электронного потока в ускорительном канале ионного источника позволяет управлять энергией ионов, интенсифицировать процессы их генерации и соответственно увеличивать плотность ионного потока.

Особенностью торцевого холловского источника (ТХИ) является отличие на два порядка проводимости по длине ускорительного канала по отношению к радиальной проводимости в его объеме, что определяется линиями индукции магнитного поля и позволяет понизить анодное напряжение вследствие меньшего значения магнитной индукции вдоль них.

Для количественной оценки влияния конфигурации магнитного поля на поток электронов предложен коэффициент электронной проводимости ускорительного канала источника G_e , который показывает соотношение между эффективным электронным током $I_{d\text{эф}}$, поступающим в зону ионизации, и током электронов I_d на входе в ускорительный канал:

$$G_e = \frac{I_{d\text{эф}}}{I_d}. \quad (1)$$

Прохождение ускорительного канала электронами определяется исходя из пролетной длины электрона в ускорительном канале источника и значением силы Лоренца, действующей на частицу. Последнюю величину можно выразить через

значение ларморовского радиуса. Тогда коэффициент электронной проводимости ускорительного канала можно представить как

$$G_e = \frac{n_{ea}}{n_{ed}} = \frac{\frac{2R_{Le}}{L_{КП}}}{1 + \frac{2R_{Le}}{L_{КП}}}, \quad (2)$$

где n_{ea} – количество электронов, попавших в зону ионизации, м^{-3} ; n_{ed} – количество электронов на входе в ускорительный канал источника, м^{-3} ; R_{Le} – ларморовский радиус электронов, м ; $L_{КП}$ – длина пролетной зоны электрона в ускорительном канале, м , которая определяется из выражения

$$L_{КП} = L_K - L_i, \quad (3)$$

где L_K – длина ускорительного канала, м ; L_i – длина зоны образования ионов, м . Выразив ларморовский радиус через кинетическую энергию частицы E_{ke} и индукцию магнитного поля B , эффективный электронный ток можно представить как

$$I_{d\text{эф}} = I_d \frac{\frac{2,132 \cdot 10^{-6} \sqrt{E_{ke}} / B}{L_K - L_i}}{1 + \frac{2,132 \cdot 10^{-6} \sqrt{E_{ke}} / B}{L_K - L_i}}. \quad (4)$$

В случае, когда траектория движения электрона приближается к прямой, и соответственно ларморовский радиус стремится к бесконечности, коэффициент электронной проводимости $G_e \approx 1$. Таким образом, данный коэффициент позволяет исходя из геометрических параметров ускорительного канала, параметров магнитного поля и энергетических характеристик электронов определить величину электронного тока, определяющего условия процесса генерации ионов.

Ток разряда определяется исходя из параметров процесса ионизации и зависит от значений эффективного сечения процесса упругого рассеяния электронов σ_e , транспортного сечения σ_r и сечения ионизации атомов рабочего газа σ_i , которые в свою очередь определяются кинетической энергией электронов и химическими свойствами атомов или молекул рабочего газа. Данный процесс можно оценить через вносимый отрицательными частицами импульс ионизации, определяемый эффективным сечением процесса ионизации. Для предельного случая, при $G_e = 1$ и рабочем газе аргоне, минимальная величина пробойного потенциала будет равна потенциалу ионизации (15,68 эВ), а минимальное напряжение разряда $\sim 12 - 13$ эВ, что определяется максимальным значением эффективного

транспортного сечения рассеяния электронов. Поскольку разряд в ТХИ является несамостоятельным и требует постоянной внешней инжекции электронов, то очевидно, что исходная энергия электронов определяются параметрами их выхода из термокатода. Для вольфрамового катода плотность тока вышедших электронов будет определяться уравнением Ричардсона-Дэшмена, с учетом потенциала ионного пучка – уравнением Шоттки.

Предполагая определяющее значение эффективного электронного тока через сечение разрядной области вследствие уменьшения в магнитном поле скорости поперечного дрейфа и токов смещения, рассчитывается плотность электронного тока в ускорительном канале источника:

$$J_e = en_e \mu_e E = \frac{e^2 n_e}{m \sigma_{tr} \frac{p}{kT} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}}}, \quad (5)$$

где e – заряд электрона, $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; n_e – концентрация электронов м^{-3} ; μ_e – подвижность электронов, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; E – напряженность электрического поля, В; σ_{tr} – транспортное сечение электронов, м^2 ; k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; T_e , T – температура электронов и атомов газа соответственно, К; p – давление, Па; m_e , m – масса электрона и атома или молекулы газа соответственно, кг.

Учитывая, что длина свободного пробега сравнима с размерами системы, можно предположить, что рассеяние электронов происходит на нейтральных и возбужденных атомах. Причем первый механизм будет превалировать в случае анодного потенциала в несколько десятков вольт, а второй должен позволить формировать разряд при напряжениях ниже 16 В.

Особенностью процесса ионизации медленными электронами (с энергией частицы ниже энергии ионизации из основного состояния) является ступенчатая ионизация. Используя в качестве рабочего вещества аргон при энергии электронов меньше ионизационного потенциала, но больше потенциала возбуждения ($\sim 11,5$ эВ), учитывая время между столкновениями электронов τ_e , которое гораздо меньше, чем время между столкновениями ионов τ_i ($\tau_e \ll \tau_i$), и на несколько порядков меньше времени пребывания атома в возбужденном τ_m метастабильном состоянии ($\tau_m > 1,3$ с), можно сделать вывод о превалирующем механизме ионизации в результате соударений двух (или более) электронов с атомом через промежуточную стадию возбуждения последнего до метастабильного состояния.

Ионный ток определялся исходя из частоты актов полной ионизации в единицу времени. При максвелловском распределении энергетического спектра электронов в выражении можно использовать линейный закон сечения $\sigma_i(E_{ke})$, справедливый при энергии электронов, близкой к порогу ионизации. Тогда с учетом дополнительной ионизации возбужденных атомов можно записать

$$v_i = N_a v_e \left(\sigma_i \left(\frac{I}{kT_e} + 2 \right) e^{-I/kT_e} + \sigma_{ia} \right), \quad (6)$$

где v_i – частоты актов полной ионизации, с^{-1} ; N_a – концентрация нейтральных атомов, м^{-3} ; v_e – средняя скорость электронов в потоке, м/с ; I – ток электронов, А; σ_{ia} – сечение процесса ступенчатой ионизации, м^2 . Для учета доли каждого из механизмов в общем процессе ионизации можно ввести эмпирические коэффициенты.

Плотность тока положительных частиц, предполагая их однозарядное состояние, можно представить выражением

$$J_i = en_i v_i, \quad (7)$$

где n_i – концентрация ионов, м^{-3} ; v_i – скорость ионов, м/с .

Концентрация ионов определяется через частоту актов ионизации. Скорость частиц определяется потенциалом в месте образования иона и его удаленностью от анода. Ток ионного пучка рассчитывается исходя из плотности электронов и объема зоны интенсивной ионизации и в предельном случае будет равен произведению рабочей площади анода и длины свободного пробега электрона. Результирующий разрядный ток на аноде будет равен сумме термоэмиссионного тока в канале и тока электронов, образовавшихся в результате процессов ионизации.

Основываясь на приведенном выше, можно сформулировать основные физико-технические принципы проектирования источников ионов низких энергий, которые включают: снижение энергии ионов за счет создания условий транспортировки электронной компоненты в разрядную область по заданному каналу; сохранение оптимального диапазона энергии инжектируемых в разряд электронов; повышение степени генерации ионов за счет сохранения близких к максимальным сечений процесса ионизации; управление величиной и распределением плотности и энергетики ионного потока изменением значений, формы и конфигурации индукции магнитного поля в ускорительном канале и разрядной области устройства; исключение возможности утечки рабочего вещества из областей активной ионизации и плазмообразования; повышение моноэнергетичности ионного потока путем создания условий для равномерного распределения магнитного потока над рабочей поверхностью анода.

На базе приведенных принципов проектирования разработаны конструкции трех источников ионов и интегрированной ионно-плазменной системы, проведено аналитическое исследование параметров их магнитных полей. Показано, что магнитная система источника с двойным анодом, состоящая из двух электромагнитов и трехполюсной конфигурации магнитопровода, обеспечивает возможность управления величиной, формой и вектором магнитной индукции в ускорительном канале (для аналитического описания параметров магнитного поля предложено

понятие коэффициента соотношения токов внешнего и внутреннего соленоидов K_c связанного с коэффициентом соотношения магнитных потоков через численный коэффициент магнитной системы); конструкции источников с двухступенчатым разрядом обеспечивают стимуляцию низковольтного разряда ионными и электронными потоками; конструкция интегрированной ионно-плазменной системы позволяет исследовать вопросы электромагнитной совместимости и взаимодействия катодного и анодного разрядов, а также управлять потенциалом самосмещения на подложке.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик разрядов с пониженным рабочим напряжением и ионных пучков низких энергий.

Установлено, что эффективное управление параметрами разряда и пучка ионов возможно в диапазоне рабочих давлений от 0,02 до 0,1 Па. При величине радиальной составляющей магнитного поля в разрядной области источника 10 – 12 мТл напряжение инициализации разряда минимально и составляет 200 – 210 В, что объясняется увеличением сечения ионизации и генерацией двухзарядных ионов. Изучение зависимости потенциала инициализации разряда при изменении осевой составляющей магнитного поля и K_c в канале приведено на рис. 1. Видно, что управлять потенциалом, следовательно, и напряжением разряда и энергией генерируемых ионов можно в широком диапазоне (15 – 450 В) посредством варьирования формой и величиной магнитного поля. Минимальный пробойный потенциал наблюдался (см. рис. 1, б) при внешней инжекции электронов и индукции поля 8 мТл.

На рис. 2 представлены вольтамперные характеристики источника в режиме наименьших напряжений разряда. Продемонстрирована возможность формирования разрядов с напряжением ниже ионизационного потенциала при значениях K_c

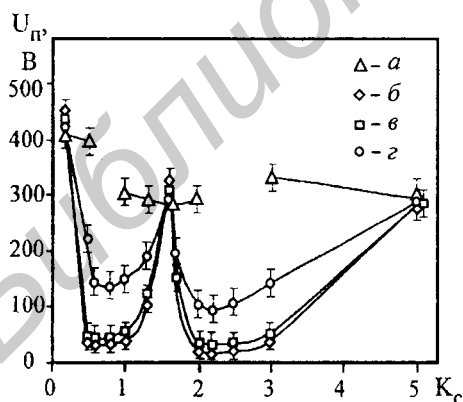


Рис. 1. Зависимость величины пробойного потенциала от K_c : а – без внешней инжекции электронов и $B=16$ мТл; при инжекции электронов б – $B=8$ мТл; в – $B=16$ мТл; г – $B=25$ мТл

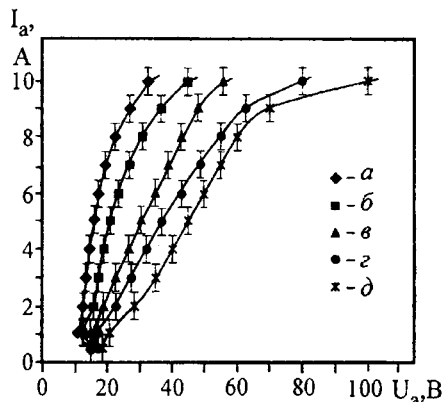


Рис. 2. ВАХ разряда в низковольтных режимах работы при различных конфигурациях поля: а – $K_c=2,6$; б – $K_c=2,3$; в – $K_c=3,1$; г – $K_c=2$; д – $K_c=3,7$

в диапазоне 2,3 – 2,6, (см. рис. 2, а, б) что объясняется минимальной величиной радиальной составляющей магнитного поля в ускорительном канале.

Определены виды зависимостей тока ионов от тока разряда при различных конфигурациях магнитного поля (рис. 3). Установлено, что ток ионов пропорционален разрядному току (I_p) и в зависимости от режимов составляет $I_i = (0,15 - 0,4) \cdot I_p$. Для формирования интенсивных пучков наиболее подходят режимы рис. 3, а, в. В первом случае не наблюдалось насыщение ионного тока с увеличением тока разряда, а второй режим соответствует пучка ионов с энергиями от 10 эВ. Исследования пространственного распределения плотности ионного тока для различных конфигураций и величин магнитного поля показали, что ионный источник при низкоэнергетичном режиме генерирует потоки круглой формы (рис. 4, а, б, в), неравномерностью которых можно оперативно управлять. Образование максимума в приосевой области можно объяснить радиальным сжатием периферийной части ионного пучка и повышением плотности ионов вблизи взаимного пересечения их траекторий в центре. В этих режимах были получены плотности тока более 3 mA/cm^2 . При работе в высокоэнергетичном режиме (рис. 4. г) пучок имеет круглую форму с небольшим провалом, что объясняется трубчатой формой пучка, и невысокую, по сравнению с предыдущим режимом, плотность ионного тока.

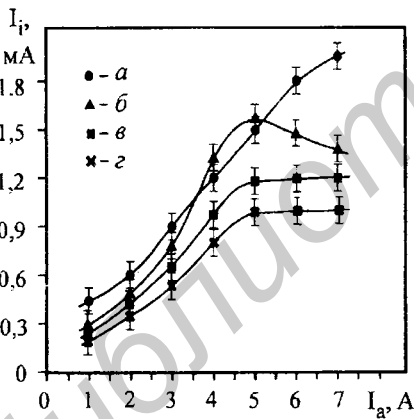


Рис. 3. Зависимость тока ионного пучка от тока разряда при различных конфигурациях магнитного поля в разрядной области: а – $K_c=1,8$; б – $K_c=1,5$; в – $K_c=2,6$; г – $K_c=0,6$

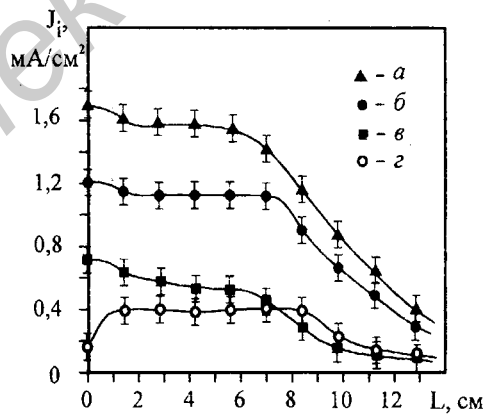


Рис. 4. Распределение плотности ионного тока в источнике с двойным анодом: а – $K_c=1,5$; б – $K_c=1,8$; в – $K_c=2,6$; г – $K_c=0,6$

Средняя энергия ионов в пучке составляла в зависимости от режима (0,3 – 0,85) U_a . Как видно из рис. 5., наблюдается увеличение плотности ионного тока с увеличением анодного напряжения до значений 200 – 250 В, и в дальнейшем снова снижение интенсивности образования ионов. Следует отметить, что

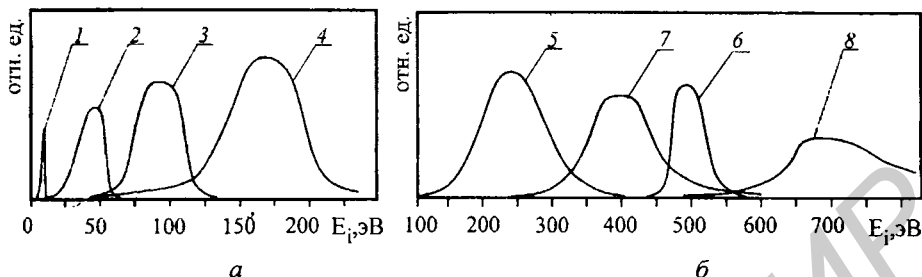


Рис. 5. Энергетические спектры ионного пучка источника с двойным анодом: при встречном включении соленоидов (а, б) — 1 — $U_p=12$ В, $K_c=2,2$; 2 — $U_p=75$ В, $K_c=0,5$; 3 — $U_p=155$ В, $K_c=1,1$; 4 — $U_p=240$ В, $K_c=1,3$; 5 — $U_p=320$ В, $K_c=1,5$; 6 — $U_p=550$ В, $K_c=1,7$; при параллельном включении соленоидов (б) — 7 — $U_p=570$ В; 8 — $U_p=2$ кВ

моноэнергетичность пучка ионов определялась размерами зоны ионизации и энергией электронов. Наиболее узкие спектры были получены при низкой энергии ионов и в случае функционирования источника без накального катода-компенсатора рис. 5 (1, б)

В результате исследования источника с комбинированным анодным слоем установлена возможность интенсификации анодного разряда ТХИ стимуляцией его дополнительным потоком ионов. Показано, что в комбинированном режиме работы напряжение в ускорителе с анодным слоем снижается вплоть до 350 В и повышается (до 280 В) в ТХИ, при этом в 1,7 раза снижается ток накала внешнего катода-компенсатора, плотность тока пучка достигает $2,5$ мА/см². Определены геометрические и газодинамические условия в разрядных зонах ТХИ и ускорителя с анодным слоем для устойчивой работы системы в комбинированном режиме.

Источник с интегрированным нейтрализатором и интегрированная ионно-плазменная система позволили сформировать сильноточные пучки ионов без использования накального катода-компенсатора. Электроны инжектируются по оси симметрии в разрядную область ТХИ вдоль линий индукции магнитного поля. Исследования зависимости тока ионного пучка от тока разряда для ТХИ с интегрированным плазменным нейтрализатором показали, что ток генерируемого пучка ионов ограничивается возможностями апертурной электронно-оптической системы нейтрализатора. Сокращение пути транспортировки электронной компоненты и наличие единой магнитной системы позволили реализовать концепцию низкоэнергетичной разрядной системы для формирования пучков ионов активных газов (например O_2). Интегрированная разрядная система позволила проводить процессы ионно-ассистированного магнетронного нанесения покрытий и управлять суммарным потенциалом самосмещения на подложке от -30 до $+60$ В.

Пятая глава посвящена разработке и исследованию способов модификации поверхности и синтеза тонкопленочных структур методами ионно-лучевой и

ионно-плазменной обработки с применением созданных разрядных систем и устройств.

Приведены результаты исследования зависимостей равновесной работы поверхностной адгезии и характеристик микро- и нанорельефа поверхности от параметров технологического процесса обработки. Предложен многостадийный способ последовательной ионно-лучевой очистки, модификации и нанесения слоев в едином вакуумном цикле. Определен оптимальный энергетический диапазон ионов (300–600 эВ) для модификации поверхности, необходимое минимально время обработки (5 мин) при плотностях ионного тока $0,2 - 0,6 \text{ mA/cm}^2$. После ионной обработки достигнуто понижение краевого угла смачивания поверхности волокон в зоне контакта на величину $5 - 33^\circ$, позволившее повысить значение равновесной работы поверхностной адгезии на 7–28%. На основе обработанной ткани из углеродных волокон созданы композиционные пластики с повышенными, по сравнению с пластиками из исходной ткани, в 1,1–1,5 раза значениями предела прочности на изгиб и в 1,8 – 3,0 раза значениями предела прочности на разрыв.

Применение разработанной интегрированной ионно-плазменной системы для синтеза методом ионно-ассистированного реактивного магнетронного распыления тонкопленочных структур TiN позволило сформировать слои толщиной 100 нм со значениями удельного поверхностного сопротивления ниже $7 \text{ Ом/}\square$ при скоростях нанесения до $0,6 \text{ нм/с}$.

В приложениях представлены акты внедрения результатов диссертационной работы при выполнении хозяйдоговора, НИР и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые установлен механизм ступенчатой ионизации атомов и/или молекул рабочего газа в разряде торцевого холловского источника при радиальной составляющей магнитного поля $5 - 8 \text{ мТл}$, величине энергии инжектируемых электронов $1,5 - 2,0 \text{ эВ}$, давлении $0,02 - 0,06 \text{ Па}$ и напряжении ниже величины ионизационного потенциала. Разработана физико-математическая модель процесса генерации ионов в источнике с разрядом постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях, учитывающая сечения полной и ступенчатой ионизации, что позволяет, на основе геометрических параметров электродов и условий в разрядной области и ускорительном канале, рассчитать токовые характеристики формируемого разряда и ионного пучка. Для описания формы магнитного поля и взаимодействия с ним потока электронов инжектируемых в разрядную область, предложены понятия – коэффициент соотношения магнитных потоков и коэффициент электронной проводимости ускорительного канала. [5, 10, 11, 24, 39].
2. Установлены основные закономерности формирования ионных пучков в устройствах с многополюсной магнитной системой и разрядом с замкнутым

холловским током в диапазоне энергий 10 – 1000 эВ, заключающиеся в адаптивном изменении параметров магнитного поля и энергии инжектируемых электронов в объеме ускорительного канала разрядной системы, что позволило сформулировать базовые принципы построения технологических источников для генерации направленных потоков заряженных частиц круглого и протяженного (0,5 м) сечений. Определены условия формирования разряда, позволившие увеличить ток в 1,5 – 3,0 раза за счет поддержания максимального сечения процесса ионизации. Предложен способ оперативного управления распределением плотности ионного пучка для обработки подложек площадью более 250 см² с неравномерностью менее 10% [1, 3, 7, 8, 27, 28, 33, 34, 35].

3. Изучены особенности и разработаны принципы стимуляции катодного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях ионами низких энергий, заключающиеся в соблюдении условий электромагнитной совместимости источника ионов и магнетронной распылительной системы, взаимной интенсификации разрядов и компенсации объемного заряда, что обеспечило снижение пробойного потенциала магнетрона до рабочего напряжения, позволило исключить необходимость применения накаливаемого катода для генерации пучков ионов низких энергий, реализовать возможность гибкого и оперативного изменения потенциала самосмещения обрабатываемой подложки в диапазоне от – 30 до + 60 В [2, 9, 12, 22, 23, 38].
4. Разработаны и исследованы три сильноточных (с током пучка до 3 А) источника ионов с энергиями 10 – 1000 эВ и интегрированная ионно-плазменная система, которые могут быть использованы в промышленности и для научных исследований [3, 7, 8, 13, 14, 17, 18, 25, 29, 30, 31, 32].
5. Разработан способ ионно-стимулированной модификации поверхности углеродных волокон. Определен оптимальный энергетический диапазон ионов (300–600 эВ) для модификации поверхности, необходимое минимальное время обработки (5 мин) при плотностях ионного тока 0,2 – 0,6 мА/см². После ионной обработки достигнуто понижение краевого угла смачивания поверхности волокон в зоне контакта на величину 5 – 33°, позволившее повысить значение равновесной работы поверхностной адгезии на 7–28%. На основе обработанной ткани из углеродных волокон созданы композиционные пластики с повышенными, по сравнению с пластиками из исходной ткани, в 1,1 – 1,5 раза значениями предела прочности на изгиб и в 1,8 – 3,0 раза значениями предела прочности на разрыв. [4, 21, 37].
6. Применение разработанной интегрированной ионно-плазменной системы для синтеза методом ионно-ассистированного реактивного магнетронного распыления тонкопленочных структур TiN позволило сформировать слои толщиной 100 нм со значениями удельного поверхностного сопротивления ниже 7 Ом/□ при скоростях нанесения до 0,6 нм/с. [6, 15, 16, 19, 20, 26, 36].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научных журналах

1. Котов Д.А., Достанко А.П. Исследование параметров пучка ионов, формируемого в скрещенных электрическом и магнитном полях // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, №2. – С. 196 – 200.
2. Котов Д.А. Исследование вольтамперных характеристик интегрированной ионно-плазменной системы // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2003. – Т. 1, №3. – С.78 – 82.
3. Kotov D.A. Broad beam low-energy ion source for ion-beam assisted deposition and material processing // Review of Scientific Instruments – 2004. – Vol. 75. №5. Part II – P. 1934 – 1936.
4. Дубкова В.И., Родцевич С.П., Комаревич В.Г., Котов Д.А. Влияние ионно-лучевой обработки поверхности углеродных волокон на краевой угол смачивания эпоксиолигомерами // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, №3. – С. 196 – 200.
5. Котов Д.А. Закономерности генерации ионов в разрядах с напряжением ниже ионизационного потенциала // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2005. – Т. 3, №2. – С. 86 – 89.

Материалы научных конференций

6. Котов Д.А., Осипов А.Н., Бондарик В.М. Формирование тонких пленок TiN для системы электродов многоканальной электронейростимуляции // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – №1(11)/3. – С. 149 – 152.
7. Котов Д.А., Свядковский И.В. Ионный источник для процессов ионно-лучевого ассистирования осаждению // Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками: Сб. тр. VI Междунар. конф. Томск, 23 – 28 сентября, 2002 г. – Томск, 2002. – С. 89 – 92.
8. Котов Д.А., Свядковский И.В., Достанко А.П. Исследование источника низкоэнергетичных ионов на основе разряда в скрещенных E×H полях. // Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками: Сб. тр. VI Междунар. конф. Томск, 23 – 28 сентября, 2002 г. – Томск, 2002. – С. 176 – 180.
9. Kotov D.A., Zavatskiy S.M., Dostanko A.P., Salavey A.L. Study of features of magnetron discharge stimulating by intensive ion beam // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceeding of VII International Conference. Tomsk, Russia, 25 – 30 July, 2004. – Tomsk, 2004. – P. 97 – 100.
10. Kotov D.A. Investigation of filament operating mode influence on discharge within E×H fields. // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma

Flows: Proceeding of VII International Conference. Tomsk, Russia, 25-30 July, 2004. – Tomsk, 2004. – P. 93 – 96.

11. Котов Д.А. Исследование влияния тока накала термокомпенсатора на параметры разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях // Молодежь в науке – 2004: Тр. Конф., Минск, 8 – 13 ноября, 2004 г. – Мн., 2004. – С. 105 – 109.
12. Котов Д.А., Соловей А.Л. Исследование особенностей совместного функционирования ионно-лучевого источника и магнетронной распылительной системы // Молодежь в науке – 2004: Труды конференции, Минск, 8-13 ноября, 2004 г. – Мн., 2004. – С. 109 – 113.
13. Котов Д. А., Свадковский И. В., Дудин С.И. Высокоточное ионно-лучевое устройство, предназначенное для ионного ассистирования // Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике: Тр. X Науч.-техн. конф., Брест, 31 марта – 1 апреля 1998 г. – Брест, 1998. – Ч.2. – С. 262–263.
14. Котов Д. А., Свадковский И. В. Ионный источник для ионно-лучевой очистки и ассистирования в вакууме // Вакуумные технологии и оборудование: Матер. Второго науч.-практ. симпозиума, Харьков, 15 – 18 ноября 1998 г. – Харьков, 1998. – С.65 – 66.
15. Котов Д.А., Буховец М.К., Свадковский И.В., Голосов Д.А. Свойства пленок TiB_2 полученных методом двойного ионно-лучевого осаждения // Материалы и технологии – 2000: Материалы 4-ой республ. науч.-техн. конф., Гомель, 12–13 сент. 2000 г. – Гомель, 2000. – С. 83 – 84.
16. Котов Д.А., Буховец М.К., Свадковский И.В., Достанко А.П. Получение тонких пленок нитрида титана магнетронным распылением // Материалы и технологии – 2000: Матер. 4 Республ. науч.-техн. конф., Гомель, 12 – 13 сент. 2000 г. – Гомель, 2000. – С. 89 – 90.
17. Kotov D.A., Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A. Low energy ion source for thin film technology // Plasma physics and plasma technology. Contributed Papers, Minsk, September 18 – 22, 2000. – Minsk, 2000. – Vol. II, P. 712 – 716.
18. Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., Zavatskiy S.M., Kotov D.A. Developing and investigation of unbalanced magnetron sputtering system // Plasma physics and plasma technology. Contributed Papers, Minsk, September 18 – 22, 2000. – Minsk, 2000. – Vol. II, – P. 716 – 720.
19. Котов Д.А. Ионно-плазменное формирование проводящих покрытий для биомедицинского применения // Медэлектроника – 2002: Матер. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20 – 21 ноября 2002 г. – Мн., 2002. – С. 95 – 98.
20. Котов Д.А. Интегрированная ионно-плазменная система для формирования биомедицинских покрытий // Медэлектроника – 2003: Матер. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20 – 21 ноября 2003 г. – Мн., 2003. – С. 147 – 150.
21. Котов Д.А., Достанко А.П., Свадковский И.В., Дубкова В.И. Изучение изменения адгезионных свойств поверхности углеволокна при модификации

- ионным пучком // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Матер. III междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк, 26 – 28 мая 2004 г. – Новополоцк, 2004. – Т.1 – С. 33 – 36.
22. Котов Д.А., Достанко А.П., Завадский С.М., Соловей А.Л. Исследование особенностей электромагнитной совместимости в интегрированной ионно-плазменной системе // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Матер. III междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк, 26 – 28 мая, 2004 г. – Новополоцк, 2004. – Т.1 – С. 24 – 27.
 23. Достанко А.П., Котов Д.А., Соловей А.Л. Исследование возможности управления зарядовым состоянием ионно-плазменного потока при синтезе тонкопленочных слоев // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Матер. III междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк, 26 – 28 мая 2004 г. – Новополоцк, 2004. – Т.1 – С. 28 – 31.
 24. Котов Д.А., Достанко А.П. Исследование влияния формы и величины магнитного поля на пробойный потенциал разряда в ЕхН полях. // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Матер. III междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк, 26 – 28 мая 2004 г. – Новополоцк, 2004. – Т.1 – С. 36–39.
 25. Котов Д.А. Исследование разрядных характеристик мостового плазменного нейтрализатора // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Матер. III междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк, 26 – 28 мая 2004 г. – Новополоцк, 2004. – Т.1 – С. 106 – 108.
 26. Завадский С.М., Котов Д.А. Магнетронное формирование проводящих покрытий на основе слоев Ti для биомедицинского применения // Медэлектроника–2004: Материалы междунар. науч.-техн. конф. Минск, 9 – 10 декабря 2004 г. – Мн., 2004. – С. 124 – 127.

Тезисы докладов

27. Свадковский И.В., Достанко А.П., Ширипов В.Я., Котов Д.А. Исследование параметров ускорителя с анодным слоем // Взаимодействия излучения с твердым телом: Тез. докл. междунар. науч. конф., Минск, 16–19 октября 1995 г. – Мн., 1995. – С. 169.
28. 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 республ. науч. конф., Гродно, 21 – 25 апреля 1997 г. – Гродно, 1997. – С.41.
29. Котов Д. А., Свадковский И. В., Голосов Д. А. Многофункциональный источник низкоэнергетичной плазмы для процессов ионно-лучевой очистки поверхности, модификации и синтеза поверхностных структур // Материалы, технологии, инструменты. – 1998. – Том 3, №2. – С. 73. (Новые материалы и технологии: Тез. докл. III республ. науч.-техн. конф., Минск, 21 – 22 мая 1998 г.)

30. 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 // Материалы, технологии, инструменты. – 1998. – Том 3, №2. – С. 66. (Новые материалы и технологии: Тез. докл. III республик. науч.-техн. конф., Минск, 21 – 22 мая 1998 г.)
31. Kotov D.A., Svadkovski I.V., Dostanko A.P. Discharge characteristics of the double closed-drift ion source // European Materials Research Society, 1998 spring meeting. – Strasbourg, June 16 – 19, 1998. – Strasbourg, 1998. – P. 85.
32. 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, 1998 spring meeting. – Strasbourg, June 16 – 19, 1998. – Strasbourg, 1998. – P. 71.
33. Котов Д.А. Исследование разрядных характеристик пучка ионов в торцевом холловском источнике ионов с двойным анодом // Физика конденсированных сред: Тез. докл. VI республик. науч. конф., Гродно, 22 – 24 апреля 1998 г. – Гродно, 1998. – С. 95.
34. Котов Д.А. Исследование пространственных характеристик пучка ионов в торцевом холловском источнике ионов с двойным анодом // Физика конденсированных сред: Тез. докл. VI республик. науч. конф., Гродно, 22 – 24 апреля 1998 г. – Гродно, 1998. – С. 96.
35. Kotov D.A., Svadkovsky I.V. The ion source for ion-beam-assisted deposition material process in vacuum // Modification of properties of Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams: Abstract of Third International Conference., Sumy, May 25-29, 1999. – Sumy, 1999. – P. 65.
36. Котов Д.А., Осипов А.Н., Соловей А.Л. Технология создания системы электродов для многоканальной элекронейростимуляции. // Биомедсистемы – 2001: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф., Рязань, 15 – 19 ноября, 2001г. – Рязань, 2001. – С. 50 – 51.
37. Дубкова В.И., Котов Д.А., Родцевич С.П., Комаревич В.Г. Влияние ионно-лучевой обработки поверхности углеродных волокон на краевой угол смачивания эпоксиолигомерами // Коллоидная химия и физико-химическая механика: Тез. докл. II междунар. конф., Минск, 20 – 24 октября 2003 г. – Мн., 2003. – С. 59.
38. Kotov D.A., Dostanko A.P., Salavei A.L. Investigation of integrated system with controllable ion-plasma beam charge // Plasma Physics and Technology: Book of Abstracts of 21st Symposium. Praha, 14 – 17 June, 2004, – Praha, 2004. – P. 119.
39. Kotov D.A. Research of influence of filament emission current on discharge within crossing E and H fields // Plasma Physics and Technology: Book of Abstracts of 21st Symposium. Praha, 14 – 17 June, 2004, – Praha, 2004. – P. 83.



РЭЗЮМЭ

Котаў Дзмітрый Анатольевіч

МОЦНАТОКАВЫЯ ІСТОЧНІКІ ІОНАЎ НІЗКІХ ЭНЕРГІЙ ДЛЯ МАДЫФІКАВАННЯ ПАВЕРХНІ І СІНТЭЗУ ТОНКОПЛЕНКАВЫХ СТРУКТУР

Ключавыя словы: нізкавольны разрад; істочнік іонаў; інтэграваная іонна-плазменная сістэма; мадыфікацыя паверхні; сінтэз тонкапленкавых структур.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца аўтаномныя газаразрадныя істочнікі іонаў з зачыненным холлаўскім токам і генерыруемыя імі патокі зараджаных частін. **Прадметам даследавання** з'яўляецца механізмы, заканамернасці і залежнасці працесаў генерацыі плазмы і фарміравання напраўленага іоннага патока ў аўтаномных істочнікаў з замкнёным холлаўскім токам. **Мэтай работы** з'яўляецца распрацоўка моцнатокавых разрадных сістэм з замкнёным холлаўскім токам, даследаванне і паліпшэнне працэсаў высокаэфектыўнай іонна-прамяневай апрацоўкі.

Упершыню ўстаноўлены механізм ступенчатай іанізацыі атамаў і/або малекул працоўнага газу ў разраде тарцавога холлаўскага істочніка пры радыяльнай састаўляючай магнітнага поля 5 – 8 мТл, велічыня энергіі інжэктуемых электронаў 1,5 – 2,0 эВ, даўленне 0,02 – 0,06 Па і напружанні ніжэй велічыні іанізацыйнага патэнцыялу.

Распрацавана фізіка-матэматычная мадэль працэса генерацыі іонаў у істочніку з разрадам пастаяннага току ў скрыжаваных электрычным і магнітным палях, якая ўлічвае сячэнні поўнай і ступенчатай іанізацыі, што дазваляе, на выснове геаметрычных параметраў электродаў і ўмоваў ў разраднай вобласці і паскаральным канале, разлічыць токавыя характэрыстыкі створамага разраду і іоннага пучка.

Для апісання формы магнітнага поля і ўзаемадзеяння з ім патокаў электронаў, інжэктуемых у разрадную вобласць, прапанаваны паняцці – каэфіцыент сцудносін магнітных патокаў і каэфіцыент электроннай правадзімасці паскаральнага каналу.

Вызначаны асноўныя заканамернасці стварэння моцнатокавых іонных пучкоў ў паскаральніках з многапалюсной магнітнай сістэмай і разрадам з замкнёным холлаўскім токам, заключаныя ў адаптыўным змяненні параметраў магнітнага поля і энергіі інжэктуемых электронаў ў аб'ёме паскаральнага каналу разраднай сістэмы, што дазволіла сфармуляваць базавыя прынцыпы пастроення тэхналагічных істочнікаў з рабочым дыяпазінам энергій генерыруемых іонаў 10 – 1000 эВ.

Распрацаваны канструкцыі тэхналагічных паскаральнікаў: іоннага істочніка з падвоенным анодам; іоннага істочніка з камбінаваным анодным слоём; іоннага істочніка з інтэграваным нейтралізатарам; інтэграванай іонна-плазменнай сістэмы з кіраваннем патэнцыяла напраўленага патоку зараджаных частін, прыгодныя дзеля прымянення ў прамысловасці і навуковых даследаваннях.

Вызначына, што ўздзеянне іонаў з энергіямі ў дыяпазоне 10 – 1000 эВ на паверхню угляродных валокнаў дазваляе кіраваць велічыней іх паверхнявай адгезіі змяненнем развітасці мікра- і нанарэльефу, а пры іонна-асіставаным сінтэзу TiN атрымліваць слаі таўшчыней 100 нм з велічыней удельнага паверхнявага супраціўлення менш за 7 Ом/л.

Результаты дысертацыі выкарыстаны ў прамысловасці на УП «Завод «Транзістар» НПО «Інтэграл», для навуковых даследаванняў ў ГНУ «Інстытут агульнай і неарганічнай хіміі» НАН Беларусі і ў вучэбным працесе БДУП.

РЕЗЮМЕ

Котов Дмитрий Анатольевич

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И СИНТЕЗА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР

Ключевые слова: низковольтный разряд; источник ионов; интегрированная ионно-плазменная система; модификация поверхности; синтез тонкопленочных структур.

Объектом исследования являются автономные газоразрядные источники ионов низких энергий с замкнутым холловским током и генерируемые ими потоки заряженных частиц. **Предметом исследования** являются механизмы, закономерности и зависимости процессов генерации плазмы и формирования направленного ионного потока в автономных источниках с замкнутым холловским током. **Целью работы** является разработка сильноточных разрядных систем с замкнутым холловским током, исследование и совершенствование процессов высокоэффективной ионно-лучевой обработки.

Впервые установлен механизм ступенчатой ионизации атомов и/или молекул рабочего газа в разряде торцевого холловского источника при радиальной составляющей магнитного поля 5 – 8 мТл, величине энергии инжектируемых электронов 1,5 – 2,0 эВ, давлении 0,02 – 0,06 Па и напряжении ниже величины ионизационного потенциала.

Разработана физико-математическая модель процесса генерации ионов в источнике с разрядом постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях, учитывающая сечения полной и ступенчатой ионизации, что позволяет, на основе геометрических параметров электродов и условий в разрядной области и ускорительном канале, рассчитать токовые характеристики формируемого разряда и ионного пучка.

Для описания формы магнитного поля и взаимодействия с ним потока электронов инжектируемых в разрядную область, предложены понятия – коэффициент соотношения магнитных потоков и коэффициент электронной проводимости ускорительного канала.

Установлены основные закономерности формирования сильноточных ионных пучков в устройствах с многополюсной магнитной системой и разрядом с замкнутым холловским током, заключающиеся в адаптивном изменении параметров магнитного поля и энергии инжектируемых электронов в объеме ускорительного канала разрядной системы, что позволило сформулировать базовые принципы построения технологических источников с рабочим диапазоном энергий генерируемых ионов 10 – 1000 эВ.

Разработаны конструкции технологических устройств: ионного источника с двойным анодом; ионного источника с комбинированным анодным слоем; ионного источника с интегрированным нейтрализатором; интегрированной ионно-плазменной системы с управляемым суммарным потенциалом направленного потока заряженных частиц, пригодные для применения в производстве и научных исследованиях.

Установлено, что воздействие ионов с энергиями в диапазоне 10 – 1000 эВ на поверхность углеродных волокон позволяет управлять величиной их поверхностной адгезии изменением развитости микро- и нанорельефа, а при ионно-ассистированном синтезе TiN получать слои толщиной 100 нм с величиной удельного поверхностного сопротивления менее 7 Ом/□.

Результаты диссертации внедрены в промышленности на УП «Завод «Транзистор» НПО «Интеграл», для научных исследований в ГНУ «Институт общей и неорганической химии» НАН Беларуси и в учебном процессе БГУИР.

SUMMARY

Dmitry A. Kotov

HIGH CURRENT LOW ENERGY ION SOURCES FOR SURFACE MODIFICATION
AND THIN FILM SYNTHESIS

Key words: low voltage discharge; ion source; integrated ion-plasma system; surface modification; thin film structure synthesis.

Research object were the independent gas-discharge low energy ion sources with a closed Hall current and ion beams, generated by them.

Subject of investigation are the mechanisms, regularities and dependences the processes of plasma and ion beam generation in independent sources with closed Hall current.

The aim of the work is the development of high-current gas-discharge ion sources with a closed Hall current, research and perfecting the processes of high efficacy ion-beam processing.

The mechanism of the step ionization the atoms and/or of molecules of working gas in End-Hall ion source discharge the first time is established at a radial component of a magnetic field 5 – 8 mTl, value of energy the injecting electrons 1,5 – 2,0 eV, pressure are 0,02 – 0,06 Pa and voltage lower then an ionization potential.

The physico-mathematical model of the ion generation process in a source with a direct current in crossed electrical and magnetic fields which are taking into account cuts of complete and step ionization designed, that allows the basis on the geometrical parameters of electrodes and conditions in discharge area and accelerating channel, to calculate the current characteristics of discharge and ion beam.

For the description of the magnetic field form and the interactions with it of the electrons that are injection in discharge area, are offered the concepts of the magnetic fluxes relation coefficient and the electron conductivity of the accelerating channel coefficient.

The main regularities of the high-current ion beam in the accelerator with a multipolar magnet system and closed Hall current have been creation. They are contain in the adaptive change of a magnetic field parameters and energy of the injection electrons in region of the accelerating channel system are established that has allowed to formulate base principles of build-up of the technological sources with the operating range of generated ions energies 10 – 1000 eV.

The constructions of technological sources have been designed: the ion source with the double anode; the ion source with a combined anode layer; the ion source with the integrated neutralizer; the integrated ion-plasma system with a controlled offset potential of the ion-plasma flow of charged particles suitable for application in production and scientific researches.

Have been established, that the effect of ions with energies in a range 10 – 1000 eV on a surface of carbon fibers allows to control the value of their surface adhesion by change evolution micro- and nanotopography, and at ion-assisting synthesis TiN films with thickness 100 nm and the value of a specific surface resistance less than 7 Ohm/cm².

The results of dissertation used in industry «Tranzistor» Plant» SIC «Integral», for the science research in «Institute of general and non-organic chemistry» NAS Republic of Belarus and in educational process BSUIR.

КОТОВ ДМИТРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**СИЛЬНОТОЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ
ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И СИНТЕЗА
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР**

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 20.12.2005.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 791.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6.