

16.02.2016 (дата со знаком) состоялось совместное заседание кафедры материалов реакторостроения и физических технологий Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина и отдела плазменных технологий Научного физико-технологического центра МОН и НАН Украины.

Заслушаны материалы диссертации ЗЫКОВА Александра Владимировича на тему:

«ГЕНЕРАЦИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКА ИОННЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 «физика плазмы». Научный консультант – академик НАН Украины Н.А. Азаренков.

Принято решение рекомендовать диссертацию к защите на специализированном совете ФТФ ХНУ имени В.Н. Каразина.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В.Н.КАРАЗИНА
НАУЧНЫЙ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
МОН и НАН УКРАИНЫ

На правах рукописи

УДК 537.521.7

ЗЫКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

ГЕНЕРАЦИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКА ИОННЫХ ПОТОКОВ В
ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ С КОМБИНИРОВАННЫМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант
Азаренков Николай Алексеевич
доктор физ.-мат. наук, проф.,
академик НАН Украины

Харьков – 2016

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АС – анодный слой;

ГРК – газоразрядная камера;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

ВЧИР – высокочастотный индукционный разряд;

ВЧЕР – высокочастотный емкостной разряд;

МР – магнетронный разряд;

МРС – магнетронная распылительная система;

РИЛТ – реактивное ионно-лучевое травление;

РИПТ – реактивное ионно-плазменное травление;

РИЛС – реактивный ионно-лучевой синтез;

ИПС – ионно-плазменная система;

СЛМП – силовые линии магнитного поля;

ТК – термокатод;

ПХТ – плазмо-химическое травление;

ХАЧ – химически активные частицы;

ИИ – источник ионов;

ИП – ионный поток/пучок;

ЕН поля – электрические и магнитные поля.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ПРОБОЙ И ЗАЖИГАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

1.1. Обзор литературы по созданию газового разряда в скрещенных ЕН полях. Постановка задачи.

1.2. Экспериментальная установка, источник ионов «Радикал», методики измерений.

1.3. Результаты исследований пробоя, зажигания и погасания планарного магнетронного разряда.

1.4. Феноменологическая модель и дрейфовая теория возникновения планарного магнетронного разряда.

1.5. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Выводы.

РАЗДЕЛ 2. ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКА ИОНОВ В УСКОРИТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА .

2.1. Обзор литературы. Классификация режимов газового разряда в скрещенных ЕН полях. Постановка задачи.

2.2. Диагностический комплекс для изучения потоков заряженных частиц в источнике ионов «Радикал».

2.3. Результаты экспериментальных исследований.

2.4. Дрейфовая теория стационарных состояний ПМР в ускорительном режиме.

2.5. Механизм ПМР в ускорительном режиме на основании сравнения теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Выводы.

РАЗДЕЛ 3. ГЕНЕРАЦИЯ ПОТОКА ИОНОВ В ПЛАЗМЕННОМ РЕЖИМЕ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА .

3.1. Обзор литературы по исследованиям магнетронных распылительных систем. Постановка задачи.

3.2. Порог погасания магнетронного разряда при снижении давления рабочего газа.

3.3. Феноменологическая модель и дрейфовая теория ПМР в плазменном режиме.

3.4. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Выводы.

РАЗДЕЛ 4. ГЕНЕРАЦИЯ ПОТОКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ИОНОВ В ВЧ ИНДУКЦИОННОМ РАЗРЯДЕ

4.1. Особенности ВЧИ разряда низкого давления. Обзор литературы. Постановка задачи.

4.2. Экспериментальное оборудование для изучения ВЧИ разряда и методики измерений.

4.3. Обобщенные интегральные характеристики ВЧИ разряда при низких давлениях.

4.4. Пространственно усредненная модель ВЧИ разряда и границы ее применимости.

4.5. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Выводы.

РАЗДЕЛ 5. ФОРМИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПОТОКОВ ИОНОВ В КОМБИНИРОВАННЫХ РАЗРЯДАХ.

5.1. Комбинированный ВЧ индукционно-емкостной разряд.

5.2. Интегральные характеристики ВЧИЕ разряда.

5.3. Модель энергобаланса в комбинированном ВЧИЕ разряде.

5.4. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Выводы.

5.5. Комбинированный индукционно-магнетронный разряд.

5.6. Экспериментальная установка с комбинированным ВЧИМ разрядом и результаты измерений.

5.7. Модель энергобаланса в комбинированном ВЧИМ разряде. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Выводы.

РАЗДЕЛ 6. ТРАНСПОРТИРОВКА, ЗАРЯДОВАЯ И ТОКОВАЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ИОННЫХ ПУЧКОВ.

6.1. Особенности зарядовой и токовой нейтрализации ионных пучков в ИПС.

Постановка задачи.

6.2. Экспериментальная установка, методики измерений и результаты исследования ИПП, создаваемой ИИ «Радикал-М».

6.3. Пространственно-усредненная феноменологическая модель ионно-пучковой плазмы.

6.4. Нейтрализация ионных потоков при наличии интенсивных источников электронов.

Выводы.

РАЗДЕЛ 7. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОТЛИЧИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ КОМБИНАЦИЯМИ ЕН-ПОЛЕЙ.

7.1. Параметры подобия и нормировка физических величин в дрейфовой теории ИПС с ЕН-полями.

7.2. Характеристики ИПС, вытекающие из уравнения баланса плотности заряженных частиц.

7.3. Характеристики ИПС, вытекающие из уравнения баланса энергии заряженных частиц.

7.4. Пространственный масштаб, граничные условия, роль вторично-эмиссионных процессов с поверхности электродов и геометрия ГРК.

7.5. Границы применимости дрейфовых моделей ИПС с комбинированными ЕН полями.

Выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

ЛИТЕРАТУРА

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

1. Ионно-плазменное оборудование с автономными источниками ионов низких и средних энергий.

2. Реактор РИПТ на базе ВЧ индукционно-емкостного разряда.

3. Магнетронная распылительная система низкого давления с дополнительной активацией рабочего газа.

4. Многофункциональная кластерная система для реактивного ионно-плазменного синтеза сложнокомпозиционных покрытий.

5. Нейтрализация пучков ионов и контроль ионно-плазменных технологических процессов.

Список публикаций.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время направленные потоки и пучки ионов (ИП) широко используются в промышленности, технике и научных исследованиях. Это накачка энергии в термоядерные реакторы, создание электрореактивных двигателей малой тяги для космических аппаратов, магниторазрядных сверхвысоковакуумных насосов и датчиков давления, ионные микрзонды, и импланторы вещества в твердое тело [1-5]. Многообразие технологических применений ИП обусловлено уникальными возможностями ионов концентрировать и транспортировать в вакууме энергию, импульс и вещество [6].

В последние десятилетия на первое место по использованию ИП в промышленности выходят ионно-плазменные технологии обработки поверхности твердого тела (в англоязычной научно-технической литературе – surface engineering - инженерия поверхности): размерное травление микро- и наноэлементов в технологии электроники, модификация приповерхностных слоев материалов, нанесение и синтез сложнокомпозиционных функциональных покрытий на изделия машиностроения, станкоинструментальной промышленности, оптики, на имплантаты для медицины [7-9].

Диапазон параметров ИП, используемых для обработки поверхности материала, достаточно широкий и задается технологическим процессом. Так **энергия ионов** ε_i определяет тип взаимодействия с поверхностью твердого тела и можно выделить три диапазона ε_i [9-10]:

- область *низких энергий* - $\varepsilon_i < 100$ эВ, в которой происходит конденсация вещества на поверхность и активация поверхностных химических реакций,
- область *средних энергий*- $300 \text{ эВ} < \varepsilon_i < 1000$ эВ, которая соответствует диапазону минимальной энергетической цены выбитых атомов при физическом распылении,

- область *высоких энергий* - $\varepsilon_i > 1000$ эВ, которая отвечает максимальной скорости физического распыления, значительной деструктуризации поверхности, и имплантации ионов на глубину более 1 нм.

Элементный состав ИП также качественно определяет физический либо химический механизм взаимодействия ионов с поверхностью твердого тела.

Плотность тока ионов j_i задает скорость процессов физического распыления либо химического травления, нанесения покрытий, дозу имплантации и, в зависимости от поставленной задачи, может изменяться от 0,1 до 100 мА/см².

Сечение пучка ионов S задается площадью обрабатываемой поверхности и определяет суммарную мощность ИП $P_i = \varepsilon_i j_i \cdot S$, которая в зависимости от области применения, может изменяться в широких пределах - (1 – 10⁴) Вт.

Как показано в настоящей работе, для эффективной ионизации рабочего газа величина оптимального **давления** в области генерации ионов должно составлять $p_i = (3 - 8)$ мТорр, а давление в пространстве транспортировки ИП p_k , для бесстолкновительного режима движения ионов, не должно превышать 1 мТорр при характерном размере рабочей камеры $d \sim 10$ см. Для реализации этих условий необходимо использовать дифференциальную откачку рабочей камеры и вакуумную систему с высокой производительностью [4].

На транспортировку сильноточных ионных пучков ($j_i > 1$ мА/см²) существенно влияет собственный положительный пространственный заряд, а также соотношение L/d длины транспортировки L к диаметру пучка d . При величине $L/d \gg 1$, что отвечает малоапертурному *ионному пучку*, эффект собственного пространственного заряда проявляется в радиальном расталкивании частиц и приводит к дефокусировке пучка. При величине $L/d \sim 1$, что соответствует направленному широкоапертурному *ионному*

потоку, основным эффектом проявления пространственного заряда становится торможение ионов и самозапирание ИП.

Поэтому необходимым условием распространения интенсивных ИП является компенсация (нейтрализация) его положительного объемного заряда электронами, вводимыми в систему с помощью дополнительного источника [11-13], либо появляющихся в результате столкновительных процессов ионов и вторичных электронов с атомами газа в пространстве транспортировки ионного пучка (явление *газовой автокомпенсации*) [14, 15]. При этом в пространстве транспортировки компенсированного ИП образуется специфичная квазинейтральная пучково-плазменное образование – *ионно-пучковая плазма* (ИПП) [14, 15]. Эта плазма обеспечивает зарядовую компенсацию пучка и является активной средой, непосредственно из которой на обрабатываемую поверхность попадают заряженные, возбужденные, химически активные частицы и электромагнитное излучение, что необходимо учитывать при реализации ионно-лучевых технологий.

Эффективными источниками ИП с вышеперечисленными параметрами являются планарные, газоразрядные плазменные или *ионно-плазменные системы* (ИПС) с различными комбинациями электрических (E) и магнитных (H) полей. Эти системы обеспечивают генерацию, ускорение и транспортировку ИП рабочего вещества на обрабатываемую поверхность во всем диапазоне необходимых параметров и к настоящему времени в развитии ИПС, в зависимости от применения ИП, сформировалось несколько относительно самостоятельных направлений в разработке ИПС:

- источники ионов, плазменные ускорители и ионные инжекторы [10, 16],
- магнетронные распылительные и вакуумно-дуговые системы - ИПС для нанесения покрытий [17],
- плазмо-химические реакторы [7],

- изучение транспортировки, фокусировки, в том числе плазменной (плазмооптика), зарядовой и токовой компенсации интенсивных ИП [14, 16].

Ионно-плазменные системы представляют собой сложный комплекс взаимосвязанных функциональных составляющих элементов (подсистем) [8] и включают в себя:

- систему электродов для создания электрических полей (постоянного, переменного в диапазоне частот от 10^3 до 10^{10} Гц, потенциального или вихревого) и передачи электромагнитной энергии в плазму;
- магнитную систему, состоящую из соленоидов, постоянных магнитов и магнитопроводов, для создания магнитного поля, локализации и удержания плазмы в заданной области, а также формирования слоев пространственного заряда, ускоряющих ионы;
- системы электропитания (специализированных источников постоянного или переменного тока мощностью от 100 до 10^5 Вт), согласованные с газоразрядными устройствами для создания плазмы (плазменными модулями);
- вакуумные системы, обеспечивающая низкое остаточное давление (менее 10^{-5} Торр) и необходимый массоперенос в диапазоне рабочих давлений плазменного модуля;
- системы диагностики, контроля и управления ИПС. (Число параметров, которые необходимо контролировать и изменять при проведении технологических процессов, может достигать нескольких десятков, что требует автоматизации с использованием компьютерной техники).

Многообразие разработанных к настоящему времени ИПС было бы невозможно без развития фундаментальной научной базы. Еще в 70-х гг. 20 века М.Д. Габович предложил выделить физику ионных пучков (*ионную физику*), как самостоятельный раздел науки, возникшей на стыке атомной физики, плазменной электроники, физики газового разряда и физики плазмы

[6], которая является фундаментом для разработки перспективных ионно-плазменных систем и технологий.

Представленная диссертационная работа посвящена комплексным экспериментальным и теоретическим исследованиям процессов генерации и транспортировки ионных потоков в газоразрядных плазменных системах с комбинированными электрическими и магнитными полями разного типа, а именно: в планарном магнетронном разряде (ПМР) в ускорительном и плазменном режимах, ВЧ-индукционном (ВЧИ) разряде, а также в комбинированных ВЧ-индукционно-емкостном (ВЧИЕ) и ВЧ-индукционно-магнетронном (ВЧИМ) разрядах. Изучение и определение общих закономерностей формирования ИП в этих системах представляет интерес не только для фундаментальной физики газового разряда и низкотемпературной плазмы в магнитном поле, а является актуальным для разработки нового поколения ионно-плазменного оборудования для микро- и нанотехнологий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время ионно-плазменные технологии (ИПТ) являются одним из наиболее важных, интенсивно развивающихся практических приложений физики газового разряда и низкотемпературной плазмы. С помощью методов ИПТ могут быть усовершенствованы существующие и созданы принципиально новые технологические процессы упрочнения поверхностных слоев материалов, очистки, активации и полировки поверхности, нанесения сложнокомпозиционных функциональных покрытий, прецизионного травления в производстве изделий микро- и нанoeлектроники [2, 4-8].

Одним из перспективных направлений ИПТ являются методы, основанные на комбинированном воздействии на поверхность потоков ионов низких (менее 100 эВ), средних (0,5 – 1 кэВ) и высоких (более 1 кэВ) энергий, химически активных частиц (ХАЧ) и распыленных атомов. Это методы реактивного ионно-плазменного, ионно-лучевого травления (РИПТ и РИЛТ)

и реактивного ионно-плазменного синтеза (РИПС). Для управления электрофизическими, оптическими, механическими и другими свойствами пленок, синтезированных методом РИПС, можно контролировать структуру и стехиометрию покрытий, как с помощью изменения параметров состояния подложки, так и выбирая энергию, величину и состав потока частиц, которые конденсируются на поверхности осаждения. В процессе РИПС функциональных покрытий величина энергий на один конденсированный атом может составлять сотни электрон-вольт, что позволяет синтезировать соединения с уникальными свойствами, принципиально недостижимыми другими методами. В технологии микро- и нанoeлектроники методы РИПТ и РИЛТ позволяют получать топологический рисунок на тонкопленочных покрытиях с размерами элементов менее 0,1 мкм [9].

Реализация методов РИПТ, РИЛТ и РИПС осуществляется в ионно-плазменных системах (ИПС) – комплексе взаимосвязанных функциональных элементов (газоразрядной камеры с системой электродов, магнитной системы, вакуумной системы, системы электропитания, системы контроля и управления) и ионно-плазменного модуля, к параметрам которого предъявляются следующие требования:

- возможность независимого управления потоками ионов, ХАЧ и конденсированных атомов в широком диапазоне плотности тока (0,1–100 мА/см²) и энергии (0,1 – 3 кэВ),
- высокая однородность потоков частиц на большой площади,
- зарядовая и токовая компенсация потоков заряженных частиц,
- возможность длительной работы с химически активными газами,
- высокая энергетическая и газовая экономичность, большой ресурс работы, простота и надежность конструкции, возможность автоматизировать управление,
- низкое рабочее давление (менее 1 Торр).

Низкое давление рабочего газа обеспечивает бесстолкновительный, молекулярный режим движения активных частиц, при котором можно

увеличивать размер пространства транспортировки между источником частиц и обрабатываемой поверхностью до 30 – 40 см и, соответственно, площадь рабочей поверхности, независимо управлять потоками ионов ХАЧ и распыленных атомов.

По совокупности параметров этим требованиям удовлетворяют газоразрядные ионно-плазменные системы с комбинированными электрическими E и магнитными H полями. Именно магнитное поле позволяет снизить рабочее давление, локализовать область генерации активных частиц и формировать в комбинации с электрическими полями направленные потоки частиц. Вместе с тем обеспечить требуемый диапазон параметров активных частиц для методов РИПТ, РИЛТ и РИЛС в одном типе ИПС не удастся и необходима разработка независимых плазменных модулей, основанных на различных комбинациях EH полей и совместимых по рабочим параметрам. Обеспечить научно обоснованную разработку и развитие ИПС с заданными параметрами возможно только на основе фундаментальных исследований.

Связь с научными программами, планами, темами.

Основные исследования, результаты которых представлены в диссертационной работе, проводились в ходе выполнения госбюджетных фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ (НИР) Министерства образования и науки Украины. До 1993 г. НИР выполнялись на кафедре физики плазмы ФТФ ХГУ, в период 1993-2013 гг на кафедре физических технологий Института высоких технологий ХНУ им. В.Н.Каразина, а с 2013 г. на кафедре материалов реакторостроения и физических технологий ФТФ ХНУ.

- 1985-1990 гг НИР «Розробка комплексу установок іонно-плазмового травлення навіпровідникових матеріалів діаметром до 100 мм, що використовуються при виробництві фотоприймачів та фотоприймальних пристроїв», шифр «Альтаір-Тополь».

- 1992-1993 гг НИР «Дослідження умов формування електричних розрядів у комбінованих полях та процесів взаємодії плазми складної молекулярної структури з поверхнями твердих тіл», № ДР UA010086188.
- 1994-1995 гг НИР «Дослідження іонно-пучкової плазми, прикатодних та прианодних шарів просторового заряду у комбінованих (постійному і високочастотному) електричному та магнітному полях у процесах травлення та нанесення тонких плівок різних матеріалів», № ДР 0194U018581.
- 1997-1999 гг НИР «Дослідження процесів формування потоків заряджених частинок в іонно-плазмових системах з комбінованими ЕН полями», № ДР 0197U016507.
- 2000-2002 гг НИР «Дослідження умов формування потоків заряджених частинок низьких та середніх енергій, методів керування їх параметрами та взаємодії синтезованих потоків з поверхнями твердих тіл, № ДР 0100U003301.
- 2003-2005 гг НИР «Дослідження процесів генерації та методів керування комбінованими потоками заряджених та нейтральних частинок у іонно-плазмових системах низького тиску», № ДР 0103U004209.
- 2006-2008 гг НИР «Дослідження процесів формування потоків активних частинок у кластерних плазмових системах для синтезу та обробки наноструктур, № ДР 0106Г001574.
- 2009-2010 гг НИР «Технологічна апробація кластерної іонно-плазмової системи», № ДР 0109U001323.
- 2011-2012 гг НИР «Реактивний іонно-плазмовий синтез функціональних нанокompозитних покриттів в кластерній плазмово-технологічній системі», № ДР 0111U001463.

- 2013-2014 гг НИР «Розробка технологій формування наноструктурованих покриттів на основі оксидів і нітридів металів перехідної групи», № ДР 0113U001080.

Также, для выполнения Государственной программы развития промышленности на 2003-2011гг. в части выполнения задач по развитию наиболее конкурентноспособных направлений микроэлектроники в Украине по заказу Министерства промышленной политики Украины на КФТ ХНУ были проведены следующие научно-исследовательские опытно-конструкторские работы (НИОКР):

1. 2003-2006 гг. НИОКР «Дослідження та створення комплексу реакторних модулів для проведення основних технологічних процесів вакуумно-плазмового травління при виробництві сучасних виробів мікроелектроніки та інтегральних схем», № ДР 0102U005322.

2. 2007-2010 гг. НИОКР «Розробка універсального джерела іонів для малоенергоємного іонно-радикального травління матеріалів мікроелектроніки на базі комбінованого індукційно-ємнісного ВЧ розряду», № ДР 0107U010814

В 2002-2007 гг. в рамках международной программы Cost-532 «Трибология и триботехнология» и согласно Договора о научно-техническом сотрудничестве между ХНУ и Институтом технологии эксплуатации (г. Радом, Польша) на КФТ ФТФ была выполнена совместная НИОКР «Разработка и создание оборудования и технологий для синтеза покрытий на основе оксида алюминия», результаты которой вошли в диссертационную работу.

Часть результатов, вошедших в диссертационную работу, была получена в процессе проведения совместных фундаментальных и прикладных НИР в Научном физико-технологическом центре (НФТЦ) Министерства образования и науки и НАН Украины.

- 1997-1999 гг. НИР «Дослідження умов формування електричних розрядів в комбінованих полях та процесів взаємодії плазми з поверхнею твердого тіла», № ДР 0197U004860.
- 2000-2001 гг. НИР «Дослідження процесів переносу активованих частинок у низькотемпературній плазмі електричних розрядів у комбінованих полях», № ДР 0100U004406.
- 2004-2006 гг. НИР «Дослідження динаміки іонно-променевих та ВЧ розрядних плазмових систем у комбінованих електричному та магнітному полях», № ДР 0104U003157.

Во всех вышеперечисленных НИР и НИОКР соискатель был ответственным исполнителем.

Цели и задачи исследований.

Целью настоящей диссертационной работы являлось определение и обобщение физических закономерностей процессов генерации и транспортировки ионных потоков в плазменных системах с комбинированными ЕН полями на основе фундаментальных положений физики газового разряда и низкотемпературной плазмы.

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

- Определить условия возникновения (определить кривые зажигания, погасания и пробоя) и физический механизм газового разряда постоянного тока от давления рабочего газа, величины и топологии электрического и магнитного полей, граничных условий, определить параметры подобия.
- Определить закономерности в интегральных стационарных характеристиках планарного разряда в магнитном поле в ускорительном и плазменном режимах и процессах генерации потоков заряженных частиц.
- Определить причины перехода планарного магнетронного разряда из ускорительного в плазменный режим и исследовать в дрейфовом

приближении физический механизм разряда с учетом существования групп электронов с различными ФРЭЭ.

- Определить закономерности существования порога погасания разрядов по давлению рабочего газа в плазменных системах с объемной ионизацией на базе магнетронного и ВЧ индукционного разрядов и факторы, влияющие на пространственную однородность и энергию потока ионов.
- Определить оптимальные параметры комбинированных ВЧ индукционно-емкостного и индукционно-магнетронного разрядов для энергетически эффективной ионизации рабочего газа и формирования ионных потоков с различной энергией. Изучить взаимовлияние ВЧ индукционного, ВЧ емкостного и магнетронного разрядов.
- Найти закономерности процессов транспортировки, зарядовой и токовой компенсации широкоапертурных ионных потоков и формирования параметров ионно-пучковой плазмы для источников ионов на базе плазменных систем с различными комбинациями ЕН полей.
- На основе сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами, определить общие закономерности и отличительные особенности процессов генерации и транспортировки ионных потоков в плазменных системах с различными комбинациями ЕН полей.

Объект исследований: плазменные системы с комбинированными электрическими (постоянным, высокочастотным, потенциальным, вихревым) и магнитными (постоянным, вихревым) полями на базе планарного магнетронного разряда в ускорительном и плазменном режимах, ВЧ-индукционного разряда, комбинированных индукционно-емкостного и индукционно-магнетронного разрядов.

Предмет исследований: процессы генерации, транспортировки, зарядовой и токовой компенсации стационарных ионных потоков, процессы возникновения и погасания разрядов, интегральные и локальные характеристики разрядов в комбинированных ЕН полях.

Методы исследований. Экспериментальное измерение интегральных характеристик разрядов: напряжений зажигания, пробоя и погасания в зависимости от давления рабочего газа, топологии и напряженности магнитного поля, вольт-амперных и ватт-амперных характеристик. Измерение локальных параметров плазмы и потоков заряженных частиц зондовыми методами: цилиндрическим одиночным и двойным зондами Ленгмюра - энергетических спектров, температуры и плотности электронов и ионов, многосеточным анализатором – энергетических спектров ионов, одиночным плоским зондом в режиме ионного тока насыщения – пространственных распределений плотности ионного тока.

Разработка феноменологических моделей равновесной максвелловской, электронно-пучковой и ионно-пучковой плазмы, прианодных и прикатодных слоев пространственного заряда в скрещенных ЕН полях и теоретические расчеты параметров потоков заряженных частиц в дрейфовом приближении и сравнительный анализ экспериментальных данных и теории.

Научная новизна полученных результатов.

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

- Впервые экспериментально установлено, что возникновение газового разряда в магнитном поле в зависимости от величины и топологии электрического и магнитного полей имеет два различных механизма:
 - скачкообразный *пробой* при сильном однородном электрическом поле в результате развития электронных лавин,
 - плавное, монотонное *зажигание* в слабом и неоднородном электрическом поле высокоэнергетичными электронами, захваченными в электромагнитную ловушку.
- Впервые разработана дрейфовая теория возникновения газового разряда в магнитоизолированном диоде на основе теории Таунсенда, адаптированной к разряду в магнитном поле, получены аналитические выражения для энергетической цены иона и коэффициент ионизации для

ансамбля электронов с различной функцией распределения по энергиям и рассчитаны кривые зажигания и пробоя трех типов.

- Экспериментально показано принципиальное влияние граничных условий – проводник, вакуум, ионно-пучковая плазма, плазма с интенсивной ионизацией, термокатод, - на интегральные характеристики планарного магнетронного разряда в ускорительном режиме и исследованы параметры системы предслой-прианодный электронный слой.
- Впервые разработана дрейфовая теория самосогласованных состояний системы предслой-прианодный электронный слой при различных условиях на катодной границе и показана их определяющее влияние на характеристики разряда.
- Впервые экспериментально доказана определяющая роль параметра подобия pd_i , где p – давление рабочего газа, d_i – характерный размер ионизационной ловушки, на погасание разрядов с объемной ионизацией – ВЧ индукционного и планарного магнетронного разрядов, - при снижении давления рабочего газа и определена его пороговая величина $(pd_i)_{min}=h(3\pm 0,5)$ мТорр·см, где h – параметр, характеризующий пространственную неоднородность плазмы.
- Впервые экспериментально установлена и теоретически обоснована принципиальная роль первичных высокоэнергетичных электронов, осциллирующих в электромагнитной ловушке, на зажигание и вольт-амперные характеристики ПМР в плазменном режиме.
- Впервые экспериментально и теоретически доказано изменение равновесной температуры плазменных электронов в ПМР в результате существования группы высокоэнергетичных электронов, плотность которых зависит от удельной мощности в разряде. Эта зависимость определяет ВАХ разряда при низком давлении рабочего газа.
- Впервые экспериментально определена верхняя граница по давлению рабочего газа p применимости пространственно усредненной модели ВЧ индукционного разряда $pd_i < 20$ мТорр·см (d_i – характерный размер

электростатической ловушки для электронов) и теоретически показано, что существование пространственной неоднородности плотности тока ионов в плазме ВЧ индукционного разряда при $pd > 20$ мТорр-см обусловлено уменьшением длины релаксации электронов и увеличением градиента электронной температуры.

- Впервые экспериментально установлено и теоретически обосновано принципиальная роль асимметрии электродов в энергобалансе ВЧ индукционно-емкостного разряда, ее влияние на суммарную энергетическую цену иона и энергетическую эффективность плазменных реакторов и источников ионов на базе ВЧ индукционного разряда, определены энергетически оптимальные соотношения площадей электродов в зависимости от энергии ионов.
- Впервые разработана феноменологическая модель энергетического баланса в комбинированном индукционно-магнетронном разряде и теоретически объяснено существование высоковольтного и сильноточного режимов в зависимости от давления рабочего газа и вкладываемой мощности.
- Впервые установлены общие закономерности и отличия процесса газовой автокомпенсации потоков ионов, генерируемых источниками различных типов (ускорителя с анодным слоем, плазменных ИИ с односеточной и двухсеточной ИОС) и доказана определяющая роль вторичной ион-электронной эмиссии с поверхности в формировании параметров ионно-пучковой плазмы. Изучено влияние термоэлектронной эмиссии и определен оптимальный режим нейтрализации тока ионного пучка при положительном смещении потенциала термокатода относительно стенок рабочей камеры.
- Впервые проведена систематизация процессов генерации и транспортировки ионных потоков в плазменных системах с комбинированными ЕН полями на основе дрейфовой теории, определены общие параметры подобия и закономерности на основе фундаментальных

положений физики газового разряда, низкотемпературной плазмы и законов сохранения частиц, импульса и энергии.

Практическое значение полученных результатов.

Представленные в диссертационной работе фундаментальные исследования плазменных систем с комбинированными ЕН полями проводились параллельно с выполнением прикладных НИР и НИОКР по разработке ионно-плазменного оборудования для обработки поверхности. Основная часть экспериментальных исследований проводилась на серийном плазменном оборудовании (ИИ «Радикал»), либо в устройствах с параметрами (геометрические размеры, величина плотности и энергии потока ионов, рабочие газы) характерными для проведения реальных ионно-плазменных технологических процессов травления и модификации обрабатываемой поверхности, нанесения и синтеза тонких пленок. Поэтому результаты физических исследований непосредственно применялись на практике и позволили разработать ряд оригинальных технических решений для оптимизации источника низкоэнергетичных ионов и способов обработки диэлектрических поверхностей, защищенных патентами Украины и представленных в Приложении 1.

Результаты рекомендаций, полученных в диссертационной работе, были использованы и частично внедрены в производство в НИИ Вакуумной техники им. С.А. Векшинского, г. Москва, Россия (раздел 2), НПО «Сапфир», г. Москва, Россия (раздел 6), ПО «Сатурн», г. Киев, Украина (разделы 4, 5), ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина (раздел 4), НПО «Монокристаллхимреактив», г. Харьков, Украина (раздел 4), Институт технологии и эксплуатации, г. Радом, Польша (раздел 3), а также в настоящее время используются в учебном процессе ХНУ им. В.Н. Каразина и НФТЦ МОН и НАН Украины.

Также эти технические решения легли в основу оригинальной кластерной многофункциональной установки, не имеющей мировых

аналогов, для синтеза сложнокомпозиционных соединений, в том числе микро- и наноструктур, которая была разработана и изготовлена совместно ХНУ и НФТЦ. К настоящему времени на установке отработаны технологии получения оксидов и нитридов переходных металлов Al, Ti, Ta, Zr и др., имеющих широкое практическое применение в машиностроение, станкоинструментальной промышленности и имплантологии (Приложение 1).

Личный вклад соискателя.

(Ссылки в данном пункте соответствуют пункту **Публикации**)

Во всех работах, опубликованных по теме диссертации, соискатель принимал решающее участие при постановке задачи, подготовке экспериментов, обработке экспериментальных данных и проведении теоретических расчетов, написании текста статей.

В работах [1-4] по исследованиям ионно-пучковой плазмы соискатель лично разработал и подготовил экспериментальный диагностический стенд с источником ионов «Радикал–М», принимал непосредственное участие в экспериментах и предложил механизм зарядовой компенсации ИП на основе вторичной ион-электронной эмиссии с поверхности мишени.

В работах [5-7, 20, 22] по изучению ускорительного режима планарного магнетронного разряда соискатель участвовал в подготовке и проведении экспериментов и самостоятельно провел теоретические расчеты стационарных состояний предслоя и прианодного слоя электронов.

В работах [6-9, 11, 14, 19], посвященных изучению комбинированного ВЧ индукционно-емкостного разряда, соискателем лично разработана конструкция односеточного источника низкоэнергетичных ионов с внутренним индуктором и предложена модель энергобаланса асимметричного плазменного конденсатора.

В работах [13, 15, 16], в которых изучается плазмохимический реактор на базе ВЧ индукционного разряда, соискатель самостоятельно разработал и

запустил экспериментальное оборудование, провел основные эксперименты и сформулировал постановку задачи для численно аналитического 2-D моделирования дрейфово-диффузионного режима.

В работах [12, 21, 23] соискатель предложил концепцию и разработал проект кластерной многофункциональной установки с магнетроном низкого давления, источником плазмы и ускорителем с анодным слоем для нанесения сложнокомпозиционных покрытий и непосредственно принимал участие в пуско-наладочных работах и проведении основных экспериментов.

В работах [17, 22, 24], посвященных вопросу возникновения газового разряда в скрещенных ЕН полях, соискатель предложил идею проведения экспериментов с сетчатым катодом, самостоятельно разработал модель пробоя и зажигания разряда при участии разных групп электронов и провел теоретические расчеты.

Апробация результатов диссертации.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на таких международных конференциях:

- I, II Межотраслевые научно-технические семинары «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике», Харьков, 1989, 1991.
- International Conference on Plasma Science, Santa Fe, 1994, Madison, 1995, San Diego, 1997, USA.
- Научно-практические конференции «Вакуумная техника и вакуумная технология», Харьков, 1995, 1997.
- 7th International Conference on Ion Sources, Taormina, Italy, 1997.
- II Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (ФППТ-2), Минск, 1997.
- XXVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Greifswald, Germany, 2003.

- Международная научная конференция «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур», Харьков, 2007.
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Alushta 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, Kharkiv 2014.
- International Conference on Plasma Electronics, Kharkiv, 2015.

Кроме публикаций в тезисах перечисленных выше конференций, результаты диссертации опубликованы в 24 статьях в специализированных изданиях из перечня ДАК МОН Украины и защищены 3 патентами Украины.

Публикации

1. Зыков А.В., Марущенко Н.Б., Фареник В.И. Роль у-электронов в механизме автокомпенсации ионного пучка // Письма в ЖТФ, 1989, т. 15, вып. 9, с. 9-13.
2. Дудин С.В., Зыков А.В., Фареник В.И. Функция распределения электронов в ограниченном пространстве транспортировки автокомпенсированного ионного пучка низкой энергии // Письма в ЖТФ, 1991, т. 17, вып. 6, с. 22-26.
3. Dudin S.V., Zykov A.V., Farenik V.I. Low Energy Intense Ion Beam Space Charge Neutralization // Review of Scientific Instruments. 1994, v. 65, № 4, part II, p.1451-1453.
4. Дудин С.В., Зыков А.В. Влияние термоэлектронной эмиссии на компенсацию объемного заряда широкого пучка ионов низкой энергии // Письма в ЖТФ, 1994, т. 20, в. 11, с. 58-63.
5. Дудин С. В., Зыков А.В., Ушаков А.В. Особенности динамики электронов в аксиально-неоднородном прианодном ЕН слое // Письма в ЖТФ, 1995, т. 21, вып.2, с. 25-30.
6. Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И. Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе комбинированного ВЧ индукционно-емкостного разряда // Письма в ЖТФ. 1996, т. 22, в. 19, с. 54-59.
7. Дудин С.В., Зыков А.В., Ушаков А.В., Фареник В.И. Исследование

- функции распределения электронов в ионно-пучковой плазме с сильно неоднородными ЕН полями // Письма в ЖТФ. 1996, т. 22, в. 23, с.43-48.
8. Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И., Фареник В.И. Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде // Письма в ЖТФ, 1998, т. 24, № 22, с. 33 – 38.
 9. Дудин С.В., Зыков А.В., Ушаков А.В., Фареник В.И. Равновесные состояния ионно-пучковой плазмы с замагниченными электронами при низких давлениях // Письма в ЖТФ, 1998, т.24, вып.5, с.33-38.
 10. Дудин С.В., Зыков А.В., Калмыков Я.М., Ушаков А.В., Фареник В.И., Маишев Ю.П. Особенности зарядовой и токовой нейтрализации широкоапертурных пучков ионов низкой энергии в системах ионно-лучевого травления и нанесения покрытий // Труды ФТИРАН, 1999, т. 15, с.60-86
 11. Зыков А.В., Положий К.И. Стационарные состояния ВЧ индукционного разряда низкого давления вблизи порога погасания // Письма в ЖТФ, 2000, т. 26, в. № 11, с. 68-74.
 12. Walkowicz J., Miernik K., Dudin S., Zykov A.V., Farenik V. Pulsed-plasma assisted magnetron methods depositing TiN coating // Surface and coating technology. 2000, v. 125, p. 341-346.
 13. Igor Denysenko, Stanislav Dudin, Aleksandr Zykov , Nikolay Azarenkov. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources // Physics of Plasmas. 2002, v. 9, №. 11, p. 4767-4775.
 14. K.I. Polozhiy, A.V. Zykov, V.I. Farenik V. The energy balance of the asymmetric combined inductive-capacitive RF discharge at a low gas pressure // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics, 2003, № 1, p. 130-132.
 15. S.V. Dudin, A.V. Zykov, A.N. Dahov, V.I. Farenik. Experimental research of ICP reactor for plasma-chemical etching // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics (12), 2006, №6. p. 189-191.
 16. A.V. Gapon, A.N. Dahov, S.V. Dudin, A.V. Zykov, N.A. Azarenkov. 2D fluid

- model for interactive development of ICP technological tools // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics (12), 2006, № 6, p. 186-188.
17. L.A. Zagrebelnyy, A.V. Zykov, M.V. Glaznev . Break-down of the magnetically insulated diode // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics, 2007, N 1, p. 197- 199.
18. S.V. Dudin, D.V. Rafalskyi, A.V. Zykov. High homogeneity 25 cm low-energy rf ion source with inherent electron compensation // Review of Scientific Instruments. 2010, vol. 81, No.8, p.083302.
19. С.В. Дудин, Д.В. Рафальский, А.В. Зыков. Широкоапертурный высокочастотный источник ионов низкой энергии с электронной компенсацией // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010, № 2, с. 52-55.
20. A. Jamirzoev, S.Yakovin, A. Zykov. Characteristics of discharge in crossed EH fields near breakdown curve in acceleration and plasma regime // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics, 2013, N 1, p. 186-188.
21. С.Д. Яковин, О.В. Зиков, С.В. Дудин, В.І. Фаренік, М.М. Юнаков. Іонно-плазмова система для реактивного магнетронного нанесення покриттів // Физическая инженерия поверхности. 2014, т. 12, № 3, с.428-239
22. A. Jamirzoev, S.Yakovin, A. Zykov. Low pressure gas discharge in magnetically insulated diode// Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics, 2015, N 1, P.259-262.
23. А.В. Зыков, С.В. Дудин, С.Д. Яковин. Стационарные и переходные режимы магнетронного разряда // Физическая инженерия поверхности. 2015, т. 12, № 3, с.428-239.
24. A. V. Zykov, N. A. Azarenkov. Ignition and break-down of the gas discharge in magnetic field // Problems of atomic science and technology. Series Plasma physics, 2015, N 1, P.259-262.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи разделов основного текста с 000 рисунками, заключения, приложения и списка литературы из 000 источников.

Шесть разделов посвящены решению поставленных задач диссертационной работы, которые являются относительно самостоятельными. Поэтому, каждый раздел состоит из краткого обзора литературы, описания экспериментальных устройств и методов измерений, результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов. В конце каждого раздела проведено сравнение теории и эксперимента и сформулированы выводы.

В седьмом разделе проведено обобщение физических закономерностей и отличительных особенностей плазменных систем с комбинированными ЕН полями, изученных в разделах 1-6.

В Приложении 1 представлены примеры практической реализации результатов диссертационной работы и приведен список полученных патентов и публикаций по прикладным результатам диссертации.

Полный объем диссертации составляет 000 страниц, рисунков, которые размещены по всей площади страницы 00. Список использованных литературных источников размещен на 00 страницах.