

На правах рукописи



Емлин Даниил Рафаилович

**ИСТОЧНИКИ ШИРОКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ
ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ**

Специальность: 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

Научный руководитель: Гаврилов Н. В., доктор технических наук
член-корреспондент РАН
зав. лабораторией ИЭФ УрО РАН

Официальные оппоненты: Овчинников В. В., доктор физ.- мат.
наук, профессор, зав. лабораторией,
ИЭФ УрО РАН

Мартенс В. Я., доктор технических наук,
доцент, профессор кафедры физики,
электротехники и электроники Северо-
Кавказского федерального университета

Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Защита диссертации состоится « 3 » декабря в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 004.024.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИЭФ УрО РАН по адресу: г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

Автореферат разослан « 1 » ноября 2013 г.

Заверенные печатью учреждения отзывы просим направлять по адресу:
ИЭФ УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

Ученый секретарь

Диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



Н.Н.

Сюткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время для изменения свойств и характеристик поверхности материалов и изделий широко используется воздействие высокоэнергетических потоков ионов, электронов, плазмы, лазерного излучения и т.д. Использование технологий ионной имплантации или ионно-ассистированного нанесения покрытий открывает широкие возможности создания соединений и сплавов методом, изменяющим параметры и функциональные свойства поверхности без изменения объемных свойств материалов. К достоинствам ионной имплантации относят возможность внедрения в приповерхностный слой практически любых элементов, независимость состава слоя от растворимости компонентов, возможность легирования при низких температурах и отсутствие прямой связи результатов легирования с диффузионными процессами; сохранение исходных размеров изделий, возможность управления энергией ионов в широких пределах, и, как следствие, глубиной проникновения ионов и формой профиля легирующих ионов. Пучки ионов низких энергий (менее 1 кэВ) применяются, в основном, для очистки, полировки, травления поверхности, при нанесении покрытий ионным распылением мишеней. Воздействие пучка ионов с энергией в десятки кэВ позволяет легировать поверхностный слой, изменять его структурный и фазовый состав, создавать и залечивать дефекты кристаллической решетки. При ионно-ассистированном осаждении покрытий пучок ионов термомеханически активизирует поверхность, обеспечивает термостимулированное ионное насыщение поверхности, ионно-лучевое перемешивание осаждаемых атомов, изменение структуры покрытия.

Толщина модифицированного слоя складывается из двух составляющих – непосредственно легированного слоя, и слоя модифицированного в результате вторичных, в том числе, динамических эффектов, связанных с рассеянием энергии иона. Существенную роль могут играть пластические деформации, обусловленные напряжениями от внедряемых примесей, радиационно-стимулированная диффузия и другие эффекты. При энергиях ионов до 50 кэВ проективная длина пробега тяжелых ионов составляет несколько десятков нанометров. Разогрев мишеней пучками ионов и процессы радиационно-стимулированной диффузии увеличивают легированный слой приблизительно до ста нм. В то же время полная толщина слоя с модифицированной структурой и фазовым составом иногда достигает нескольких десятков микрон. В некоторых случаях радиационно-динамическое воздействие ионного пучка на метастабильные среды приводит к увеличению глубины модифицированного слоя вплоть до нескольких миллиметров¹.

Если при ионно-лучевой обработке с целью легирования

¹ Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных // УФН. - 2008. - Т. 178. - №9. - С. 991 - 1001.

полупроводников или изменения оптических свойств поверхности требуются экспозиционные дозы порядка 10^{15} - 10^{16} см⁻², то для изменения трибологических, механических, химических и других свойств металлов и сплавов и конструкционных материалов на их основе необходимы дозы до 10^{17} - 10^{18} см⁻².

Переход от лабораторных установок к промышленным устройствам достигается масштабированием разрядных систем и источников ионов для получения пучков большого сечения с высокой плотностью тока, постоянной по сечению пучка. Желательно, чтобы технологические источники обладали стабильностью параметров пучка, высоким ресурсом, надежностью, работали с высокой энергетической и газовой экономичностью, а также отличались простотой конструкции и обслуживания.

Широко распространенные источники с накаливаемыми катодами отвечают большинству из этих требований, однако имеют ограниченный ресурс катода при работе в химически активных средах и повышенных давлениях газа, что сужает сферу их применений. Альтернативными источниками являются источники с холодным катодом на основе тлеющего разряда. Холодный катод имеет высокий ресурс, способен работать в химически-активных газовых средах и при высоких давлениях. Значительное снижение рабочих давлений (до ~ 0,004 Па) было достигнуто применением разряда с плазменным катодом на основе тлеющего разряда², однако, задачи создания генераторов однородной плазмы большого объема, расширения диапазона рабочих давлений (от 0,5 до 0,005 Па), формирования слаборасходящихся широких (более 100 см²) или ленточных пучков (~ 1 м) с плотностями тока (≥ 1 - 10 мА/см²), энергиями ионов от ~ 100 эВ до 50 кэВ и средним током в сотни мА не являются до конца решенными. Отдельную проблему представляет создание источников для ионно-лучевого сопровождения процесса нанесения покрытий, способных работать в присутствии плотной металлической плазмы.

В связи с вышесказанных разработка необходимых для различных сфер применения технологических источников пучков ионов большого сечения с высокими физико-техническими и эксплуатационными характеристиками представляется актуальной и важной

Целью работы являлась разработка технологических источников широких пучков газовых ионов низких (300 - 1000 эВ) и высоких энергий (5 - 50 кэВ) на основе тлеющего разряда низкого давления с холодным катодом. Для достижения этой цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать ионно-эмиссионные характеристики плазмы самостоятельного тлеющего разряда с полым катодом и несамостоятельного разряда с плазменным катодом и ловушкой для

² Визирь А.В., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников // ЖТФ. - 1997. - Т. 67. - В. 6. - С. 27 - 31.

быстрых электронов.

2. Разработать на базе тлеющего разряда газоразрядные системы для создания однородного плазменного эмиттера ионов с большой площадью рабочей поверхности ($100 - 1000 \text{ см}^2$) и линейного эмиттера ионов значительной протяженности (100 см) с плотностью тока насыщения ионов из плазмы \sim нескольких мА/см^2 .

3. Исследовать влияние ионного слоя между плазмой и экранном (эмиссионным) электродом системы формирования ионного пучка (ИОС), характеризующегося значительной толщиной (несколько мм) и большим падением потенциала (сотни вольт) на формирование ионного пучка.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что переход от цилиндрического к коническому катоду в конструкции технологического источника широкого пучка ионов газа ($10 - 50 \text{ кэВ}$) на основе самостоятельного тлеющего разряда низкого давления в разрядной системе с полым катодом и стержневым анодом в аксиальном магнитном поле позволяет, сохраняя высокую однородность плазменного эмиттера, увеличить ток извлекаемых из плазмы ионов в ~ 2 раза. Эффект обусловлен увеличением отношения площади эмиссионной поверхности плазмы к полной площади катода и появлением аксиальной составляющей скорости эмитированных катодом электронов в направлении эмиссионного электрода, способствующей локализации плазмы вблизи эмиттера ионов.

2. Показано, что отбор ионов из плазмы самостоятельного тлеющего разряда через отверстия в катодном электроде приводит к снижению эффективности извлечения с уменьшением энергии ионов, но позволяет снизить угловую расходимость пучка из-за ухода ионов с большими радиальными скоростями на электроды оптики. Формирование широкого низкоэнергетического ионного пучка с максимальной плотностью тока до $\sim 1 \text{ мА/см}^2$ достигается применением электродных систем, в которых разряд стабильно функционирует при плавающем потенциале экранного электрода ИОС.

3. Предложена оригинальная разрядная система с полыми широкоапертурным катодом и анодом в аксиальном магнитном поле ($10 - 40 \text{ мТл}$), в которой устойчиво функционирует тлеющий самостоятельный разряд с токами до $\sim 1 \text{ А}$ при низких давлениях газа ($\sim 0,008 - 0,01 \text{ Па}$) и изменении потенциала эмиссионного электрода в широких пределах. Неоднородность плазменного эмиттера ионов, генерируемого в анодной области разряда, не превышает 5% на диаметре $\sim 80 - 100 \text{ мм}$ и не зависит от потенциала эмиссионного электрода, что позволяет формировать широкие низкоэнергетические ионные пучки с высокой эффективностью или малой угловой расходимостью.

4. Показано, что расширение анодной части (РАЧ) тлеющего разряда дает возможность использовать в разрядной системе плазменного катода с сеточной стабилизацией (СПК) сетки с большой площадью поверхности, что обеспечивает понижение давления газа и плотности

плазмы в области сетки и, соответственно, величины обратного ионного потока. В результате достигается повышение максимальных рабочих давлений СПК до $\sim 0,5$ Па. Снижение плотности плазмы и рост толщины ленгмюровских слоев в отверстиях позволяет применять в качестве сетки СПК толстые электроды с диаметром отверстий в несколько мм. Выбором размеров отверстий СПК задается диапазон давлений и плотностей тока, при которых СПК стабильно функционирует с эффективностью извлечения ~ 1 .

5. Несамостоятельный разряд с СПК и крупноструктурной сеткой реализован в двух типах разрядных систем: электродной системе с удержанием быстрых электронов в электростатической ловушке, образованной протяженным полым катодом, и в системе с полым анодом, экранированным периферийным многополюсным магнитным полем. Неоднородность распределения плотности эмиссионного тока ионов по поверхности плазменного эмиттера на основе самостоятельных разрядов не превышает 5 – 10 %. Показано, что энергетическая цена иона в пучке источника с самостоятельным разрядом с полым анодом составляет $\sim 0,4 - 0,8$ кэВ/ион, с полым катодом - ~ 2 кэВ/ион, а в источниках на основе самостоятельного тлеющего разряда $\sim 3 - 6$ кэВ/ион. Разрядная система с электростатическим удержанием быстрых электронов использована в источниках ленточных ионных пучков высоких энергий; а система с полым анодом – в источниках низкоэнергетических ионных пучков.

6. Показано, что условиями получения однородного ленточного эмиттера ионов в самостоятельном разряде в электродной системе с электростатическим удержанием быстрых электронов в протяженном полом катоде длиной L являются: 1) выравнивание плотности газа в объеме катода, 2) инжекция электронов в соосном оси протяженного полого катода направлении и 3) выполнение соотношения $\Lambda > L$, где Λ - длина ионизационного пробега электронов.

Практическая реализация результатов работы:

1. Разработан технологический источник широких пучков газовых ионов импульсно-периодического (ИП) и непрерывного режимов генерации «Пион/Пульсар», в котором использован самостоятельный тлеющий разряд в системе типа обращенный магнетрон. Источник обеспечивает ток пучка до 200 мА, энергию ионов до 50 кэВ, время непрерывной работы более 4 – 8 часов и используется для ионно-лучевого сопровождения процесса вакуумно-дугового нанесения покрытий.

Источники непрерывного режима (10 - 40 кэВ, 50 мА) используются для ионной очистки, активации поверхности изделий, ионной имплантации основы и осаждения износостойких многослойных покрытий с ионно-лучевым сопровождением на лопатки компрессора газотурбинного двигателя на установках ННВ6,6И1 в ОАО «УЗГА» (Екатеринбург). На ФГУП «ВИАМ» (Москва) источники ИП/непрерывного режимов генерации ионного пучка (7 - 50 кэВ, средний ток 200 мА) используются в установках МАП-3, предназначенных нанесения ионно-плазменных

защитных и упрочняющих покрытий с ионно-лучевым сопровождением.

2. На основе разрядной системы с полыми широкоапертурными катодом и анодом в аксиальном магнитном поле создан низкоэнергетический (300 – 1000 эВ) источник слаборасходящихся (6 - 10ε) пучков газовых ионов с поперечным сечением $\sim 50 \text{ см}^2$. Радиальная неоднородность ионного пучка с плотностью тока до $0,6 \text{ мА/см}^2$ не превышает 10%. Источник способен длительное время (до 200 ч) работать в режиме генерации пучка ионов кислорода. Источник разработан по контракту с Брукхейвенской национальной лабораторией, США.

3. На основе разрядной системы с СПК и протяженным полым катодом разработан источник ленточных ионных пучков (10 – 40 кэВ), работающий в ИП, или непрерывном режимах со средним током пучка до 200 мА при линейной неоднородности $\sim 20\%$. Источник используется в Инновационном НТНП «Технопарк авиационных технологий» (Уфа) для комбинированной ионно-имплантационной и вакуумно-плазменной обработки материалов.

Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечивается детальным анализом закономерностей исследуемых процессов (при многократном воспроизведении результатов в проведенных экспериментах), отсутствием противоречий с полученными ранее данными других авторов, а также созданием на основе проведенных исследований действующих экспериментальных образцов газоразрядных систем, экспериментальных и технологических ионных источников.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В электродной системе тлеющего разряда с широкоапертурным ($\sim \text{Ш } 40 \text{ мм}$) полым катодом в магнитном поле (15 - 40 мТл) в анодной полости больших размеров ($\sim \text{Ш } 80 \times h 120 \text{ мм}$) при пониженных давлениях газа ($\sim 10^{-2} \text{ Па}$) создается плазменный эмиттер ($\sim 100 \text{ см}^2$), равномерное распределение плотности тока ионов ($\sim 1 - 2 \text{ мА/см}^2$) по поверхности которого создается при наличии радиальной неоднородности плотности плазмы и градиента электронной температуры.

2. В источнике ионов на основе тлеющего разряда изменение потенциала экранного электрода ионно-оптической системы от катодного (сотни вольт) до плавающего (десятки вольт) приводит к росту эффективности извлечения ионов из плазмы с ~ 2 до $\sim 4 \%$ и угловой расходимости низкоэнергетических ионных пучков (менее 1 кэВ) с $\sim 4\epsilon$ до $\sim 8\epsilon$, при увеличении энергии ионов свыше 20 кэВ потенциал электрода не оказывает существенного влияния на параметры ионного пучка.

3. Применение тлеющего разряда с полым катодом и расширенной анодной частью позволяет увеличить площадь сетки плазменного катода (с ~ 1 до 100 и более см^2) и снизить плотность плазмы и давление газа в области сетки, соответствующий рост толщины ленгмюровских слоев в отверстиях сетки позволяет использовать крупноструктурные сетки, обладающие повышенным ресурсом ($\sim 10^3$ ч), а снижение плотности

прямого электронного и обратного ионного потоков позволяет увеличить рабочее давление до 0,5 Па.

4. В протяженной электродной системе, образованной полым катодом и стержневым анодом и являющейся электростатической ловушкой для инжектируемых вдоль оси быстрых электронов, генерация плазмы с близким к однородному ($\pm 5\%$) распределением плотности по длине катода ($L \sim 1$ м) достигается при равномерном распределении плотности газа в объеме и длине ионизационного пробега инжектируемых электронов $l \geq L$, а высокая эффективность генерации ионов в объеме ловушки обеспечивается при увеличенном пропорционально отношению полного тока на анод к току на него вторичных частиц соотношении площадей анода и катода.

Апробация работы. Результаты работ докладывались и обсуждались на 2-й международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2000); 5-й конференции по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (Томск, 2000); 4th International Conference on Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams (Украина, 2001); 6th International conference of modification of materials with particle beams and plasma flows (Томск, 2002); Урало–сибирской научно-практической конференции (Екатеринбург, 2003); 10th international conference on ion sources (Дубна, 2003); 8th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Томск, 2006); 9th international conference on modification of materials with particle beams and plasma flows (Томск, 2008); III Международном семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Удэ, 2009); Российской научно – практической конференции «Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения» (Томск, 2009); Седьмой научно – практической конференции ОАО «ОКБ Новатор» «Люльевские чтения» (Екатеринбург, 2010); 3rd International Congress on Radiation Physics, High-Current Electronics and Modification of Materials (Томск, 2012); 11-й Международной конференции «Пленки и покрытия-2013» (С.-Петербург, 2013) и представлены в сборниках докладов конференций [1 - 20]. По результатам выполненных исследований опубликовано 12 статей в журналах, рекомендованных ВАК [21-32]. Технические решения, полученные в результате работ, защищены патентами РФ, правообладателем которых является ИЭФ УрО РАН [33 - 37].

Личный вклад автора состоит в проведении эксперимента, обработке и детальном анализе экспериментальных данных, написании и подготовке к публикации научных статей, формулировке совместно с научным руководителем основных положений и выводов, выносимых на защиту. На базе результатов исследования при непосредственном участии автора разработано и изготовлено несколько типов ионных источников для конкретных практических применений.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа представлена на 168 страницах и содержит 72 рисунка, 1 таблицу и список литературы, включающий 180 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления исследований, поставлена цель и определены основные задачи исследований, кратко описаны научная новизна и практическая значимость исследований. Кратко изложено содержание диссертационной работы и представлены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу свойств газоразрядных систем и систем формирования пучка в источниках широких пучков газовых ионов. Сформулированы основные проблемы разработки технологических источников: получение однородного плазменного эмиттера ионов с большой площадью поверхности; повышение энергетической эффективности и газовой экономичности; формирование пучков с малой угловой расходимостью многоапертурной электростатической ионно-оптической системой (ИОС); повышение ресурса электродов при работе с химически активными газами, обеспечение надежности работы, а также упрощение конструкции разрабатываемых устройств. Сделан вывод, что тлеющий разряд с холодным катодом имеет перспективы использования при разработке технологических источников широких ионных пучков.

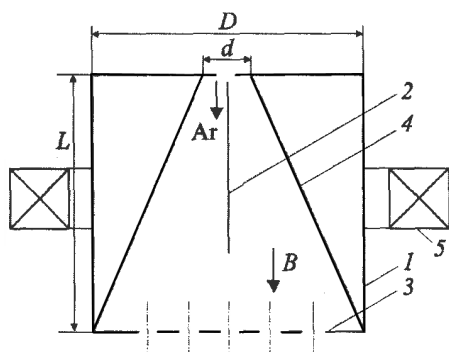


Рис. 1. Схема электродных систем типа обращенный магнетрон: 1 — цилиндрический полый катод, 2 — стержневой анод, 3 — перфорированный экранный электрод ИОС, 4 — коническая катодная вставка, 5 — соленоид.

Вторая глава посвящена разработке и модификации разрядных систем на основе самостоятельного тлеющего разряда низкого давления. Одной из задач работы является разработка систем обеспечивающих генерацию однородной плазмы большого объема; высокую эффективность извлечения ионов из плазмы $\alpha = I_i/I_d$ и повышенную энергетическую эффективность генерации ионов в плазме $\eta = I_i/U_d I_d = \alpha/U_d$ (I_d , U_d ток и напряжение разряда, I_i — ток ионов из плазмы). Другой задачей является разработка генератора плазмы, функционирующего при низких рабочих давлениях p (или расходах газа Q). Третья задача - исследование условий формирования широких ионных пучков низких и высоких энергий. Улучшение характеристик ионного источника широкого пучка на основе электродной системы с полым катодом и стержневым анодом в аксиальном

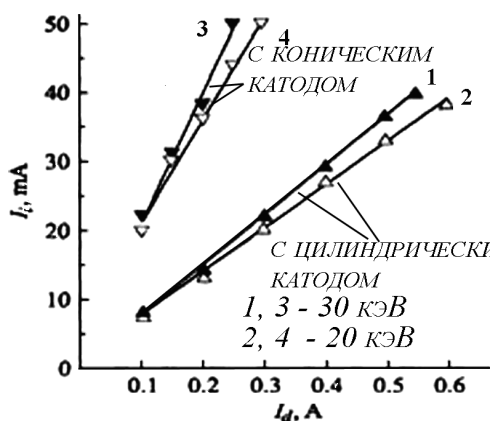


Рис. 2. Эмиссионные характеристики электронов в широкой части ионного источника. Магнитная индукция $B = 1$ (1, 2) и 1,5 мТл (3, 4).

источнике с модернизированной разрядной системой полученные значения $\alpha \sim 14 - 21\%$ выше характерных для разрядной системы с цилиндрическим катодом (5 - 10 %) (рис. 2). При используемых низких рабочих давлениях $\sim 0,03 - 0,1$ Па η составляет 0,2 — 0,25 А/кВт. В самостоятельном разряде достигнутая η близка к максимально возможному пределу, ограниченная ростом напряжения горения разряда U_d , связанным с увеличением доли отбираемых ионов ($U_d \sim U_0/(1 - \alpha) \sim 25\%$)⁴. Дополнительно, в условиях эксперимента U_d увеличивалось из-за уменьшения в ~ 2 раза объема разрядной системы. Причиной повышения доли отбираемых ионов является рост отношения площади эмиссии к площади катода $s/S_c \sim 0,13$ и локализация плазмы вблизи эмиссионной поверхности. Условия замкнутого дрейфа электронов в аксиальном магнитном поле вблизи эмитирующей поверхности сохраняются в системе с коническим катодом, в результате плазменный эмиттер однороден, как и в системе с цилиндрическим катодом, а степень его неоднородности регулируется изменением величины магнитной индукции. Недостатком исследованных разрядных систем являются относительно высокие рабочие давления: более $\sim 0,02$ Па в системе с цилиндрическим и $\sim 0,04$ Па – в системе с коническим катодом. Формирование интенсивных ионных пучков низких энергий затруднено большой разностью потенциалов (сотни вольт) и большой толщиной ионного слоя (до десятка миллиметров) между плазмой и эмиссионным электродом ИОС, катодный потенциал которого обеспечивает удержание быстрых электронов. Анализ характеристик разряда и плазмы в разрядных системах типа обращенный магнетрон, плазматронной с выходной апертурой в полом катоде малого диаметра и пеннинговской позволил предложить комбинированную разрядную

магнитном поле³ достигнуто заменой цилиндрического катода коническим. В такой системе ускоренные в катодном слое электроны приобретают аксиальную составляющую скорости в направлении эмиссионной поверхности (рис. 1).

Следствием этого является повышение плотности быстрых электронов в широкой части конического катода и локализация плазмы вблизи экранного электрода. В

³ Гаврилов Н.В., Никулин С.П., Радковский Г.В. Источник интенсивных широких пучков ионов газов на основе разряда с полым катодом в магнитном поле // ПТЭ. - 1996. - № 1. - С. 93 - 98.

⁴ Никулин С.П. Влияние ионной эмиссии на характеристики тлеющего разряда с полым катодом // ЖТФ. - 2000. - Т. 70, - №10, - С. 122 - 124.

систему (рис. 3) с широкоапертурным полым катодом и полым анодом, помещенными в аксиальное магнитное поле. Тлеющий разряд в такой системе устойчиво поддерживается при минимальном потоке газа и рабочем давлении: $\sim 6-8 \cdot 10^{-3}$ Па ($Q \sim 10$ см³/мин).

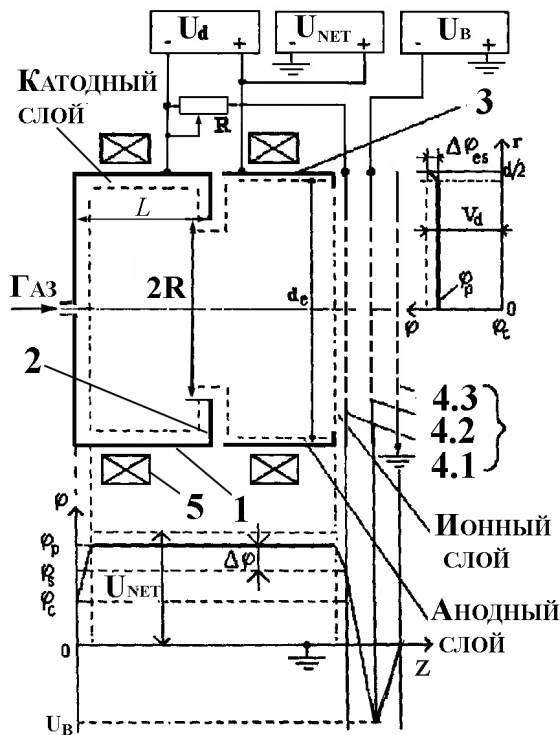


Рис. 3 Плазменно-эмиссионная система на основе тлеющего разряда. Распределение потенциалов в разрядной системе $\phi(z)$. 1, 2- полый катод, 3 –анод, электроды ИОС: 4.1 - эмиссионный, 4.2- ускоряющий, 4.3- замедляющий, 5 – магниты. ϕ_c, ϕ, ϕ_p - потенциалы катода, экранного электрода, плазмы.

Эффективное удержание быстрых электронов вблизи боковых стенок полого катода обеспечивается сильным магнитным полем (до 40 мТл), в котором ларморовский радиус быстрых электронов меньше расстояния до катодной апертуры (~ 20 мм). Разряд зажигается при $Q \sim 8$ см³/мин, $B = 8$ мТл и катодном потенциале экранного электрода ИОС.

Большой диаметр катодной апертуры ($D=2R \sim 0,8$ от диаметра катода) и применение расходящегося магнитного поля с осевым градиентом $\sim 0,2 - 1$ мТл/см позволяют получить плазменный эмиттер с неоднородностью 3 - 5 % на диаметре D (рис. 4). Отбор ионов из анодной плазмы и потенциал эмиссионного электрода (от катодного до плавающего) не влияют на характеристики разряда и однородность плазменного эмиттера. Плотность эмиссионного тока при токе разряда 0,25 – 0,7 А составляет 0,35 – 3 мА/см².

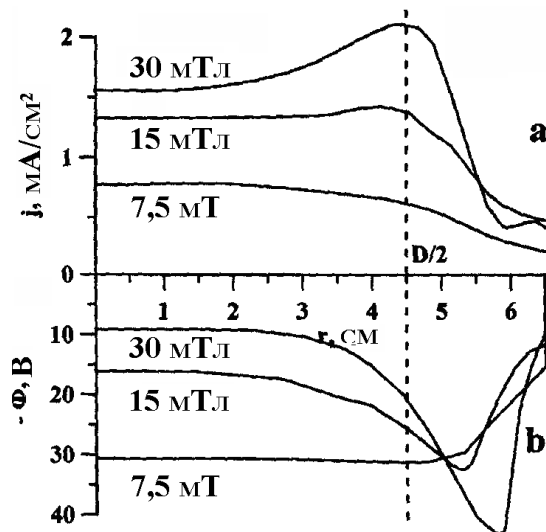


Рис. 4. Радиальные профили плотности тока j (а) и плавающего потенциала зонда Φ (б).

Увеличение неоднородности радиального распределения плавающего потенциала зонда ($-10 - 40$ В) является следствием наличия градиента температуры электронов ($\sim 3 - 5$ эВ/см) в анодной области плазмы: $kT_e \sim 8$ эВ на периферии, 1,2 эВ в осевой области. В системе с плавающим потенциалом экранного электрода T_e ниже из-за ухода на электрод электронов с высокими продольными скоростями. Измеренные профили плотности тока $j \sim env$ более однородны, чем профили плавающего потенциала, поскольку в

соответствии с соотношением Бома плотность тока эмиссии ионов $j \sim en(kT_e/M)^{1/2} \sim T_e^{1/2}$, а плавающий потенциал $\Phi(r) \sim (kT_e/e)\ln(0,77(M/m)^{1/2}) \sim T_e$. Плотность плазмы $n \sim j/\Phi^{1/2} \sim j/T_e^{1/2}$. При однородном распределении ионного тока насыщения и наличии градиента температур $\sim 3 - 5$ эВ/см зависимость радиального распределения плотности плазмы $n(r)$ должна быть немонотонной и иметь максимум в осевой области.

Возможность выбора потенциала экранного электрода ИОС позволила исследовать формирование широкого низкоэнергетичного пучка с плотностью тока ~ 1 мА/см² ускоряюще - замедляющей трехэлектродной многоапертурной ИОС с диаметром апертур 2 - 4 мм и толщиной электродов 2 - 0,5 мм при разности потенциалов между плазмой и экранным электродом $\Delta = 30 - 500$ В (рис. 5). При такой разности потенциалов толщина слоя пространственного заряда варьируется от $\sim 3,5$ до ~ 1 мм. Увеличение толщины слоя затрудняет формирование вогнутой плазменной поверхности, что повышает ток ионов на экранный электрод и

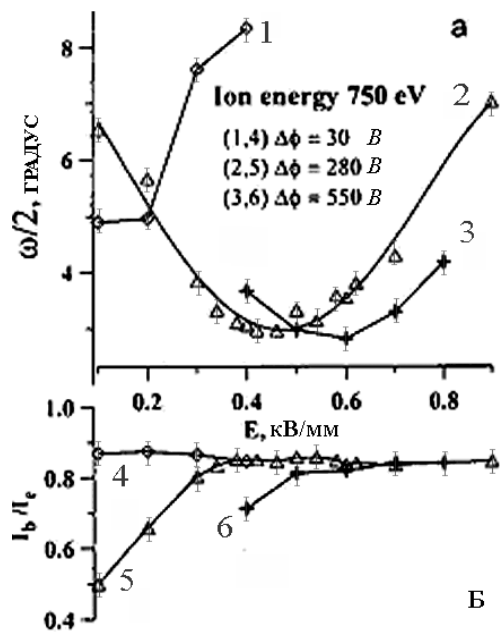


Рис. 5. Зависимость а) половинного угла расходимости $\omega/2$ и б) отношения тока на коллектор к току из плазмы I_b/I_e от напряженности поля в ускоряющем промежутке.

изменяет условия формирования пучка.

В ускоряющем зазоре ИОС ионы приобретают энергию $eU_{tot} = e(U_{net} + U_b)$ и тормозятся в замедляющем зазоре до заданной энергии eU_{net} (U_b - отрицательное напряжение на ускоряющем электроде), в котором завершается формирование пучка. Угловая расходимость ионного пучка оценивалась по ширине радиальных профилей плотности ионного тока.

Условия достижения максимального тока в низкоэнергетическом пучке не совпадают с условиями формирования пучка с минимальной угловой расходимостью (рис. 5).

Максимальный ток обеспечивается в расходящемся пучке при плавающем потенциале экранного электрода. При увеличении падения напряжения на слое Δ , т.е. при увеличении энергии извлекаемых ионов, для фокусировки пучка и уменьшения угла расходимости необходимо увеличивать напряженность поля E в ускоряющем промежутке. В результате ухода ионов с большой радиальной скоростью на электроды ИОС минимальный угол расходимости достигается при катодном потенциале экранного электрода (~ 6 е при энергиях ионов ~ 500 эВ).

Однако, при формировании пучка высоких энергий разность потенциалов между плазмой и экранным электродом не оказывает

заметного влияния на условия его формирования и угловую расходимость, поскольку напряженность поля в ускоряющем промежутке, обеспечивающая фокусировку пучка, на 1 - 2 порядка выше напряженности поля в ионном слое пространственного заряда, и толщина слоя не влияет на форму мениска плазменного эмиттера в отверстиях сетки ИОС. В соответствии с законом Чайлда-Ленгмюра для плоского диода при ускоряющих напряжениях 10 - 50 кэВ, плотности тока $\sim 0,2 - 3 \text{ мА/см}^2$ эффективная длина ускоряющего промежутка ИОС l_e составит несколько см. Угол расходимости ионного пучка уменьшается с уменьшением величины аспектного соотношения ИОС $S_x = d/2l_e$.⁵ При рекомендуемой величине $S_x \sim 0,2 - 0,3$ слаборасходящийся ионный пучок может быть сформирован ИОС с диаметром единичных апертур $\sim 12 \text{ мм}$. Использование таких отверстий, как и повышение толщины электродов до нескольких мм, принципиально упрощает технологию изготовления электродов, сборку и юстировку отверстий в электродах ИОС. Как следствие, повышается стойкость электродов к термическим и механическим нагрузкам. Минимальный угол расходимости высокоэнергетического ионного пучка составляет $\sim 1,2^\circ$.

Возможность формировать пучок с токами 5 - 200 мА в широком диапазоне плотностей токов ($\sim 0,05 - 2 \text{ мА/см}^2$) достигается в непрерывном режиме. При переходе к такому режиму увеличивается длина ускоряющего промежутка ИОС L и снижается напряженность поля E . Искажение эквипотенциалей ускоряющего поля на периферии пучка под влиянием стенок заземленного корпуса и наличия собственного пространственного заряда приводит к искривлению траекторий пучка, его расширению на $\sim 4 \text{ мм}$ и замыканию периферийных единичных пучков на ускоряющий электрод ИОС. Проведенное моделирование и эксперимент позволили устранить проблему размещением на эмиссионном электроде в ускоряющем промежутке фокусирующего кольцевого электрода высотой $\sim 5,5 \text{ мм}$.

Результатом модернизации ИОС, доработки разрядной системы и конструкции экспериментального источника ионов «Пульсар» с разрядной системой типа «обращенный магнетрон»³ стала разработка источника импульсно-периодического/непрерывного широкого пучка газовых ионов (10 - 50 кэВ), который обеспечивает средний ток пучка до 200 мА, время непрерывной работы до 8 часов. Доработки позволили использовать источники в промышленных технологиях осаждения ионно-плазменных защитных и упрочняющих покрытий на установках ННВ6.6-И1 в ОАО «УЗГА» (Екатеринбург) и МАП-3 в ФГУП «ВИАМ» (Москва).

Результатом исследования тлеющего разряда в разрядной системе с широкоапертурными полым катодом и анодом в аксиальном магнитном поле (рис. 3) и исследования условий формирования низкоэнергетических

⁵ Kaufman H.R., Cuomo J.J., Harper J.M.E. Technology and applications of broad beam ion sources used in sputtering. Part 1. Ion source technology // J. Vac. Sci. Technol. - 1982. - V. 21. - No. 3. - P. 725 - 736.

ионных пучков стала разработка источника широкого слаборасходящегося пучка низкоэнергетических ионов. Он обеспечивает генерацию ионного пучка с энергиями от 300 эВ, током до 15– 30 мА при $Q(\text{Ar}, \text{O}_2) = 8 - 12 \text{ см}^3/\text{мин}$, $p = (0,8 - 1,2) \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. Неоднородность пучка с энергиями ионов 300 – 1000 эВ не превышает 10 % на диаметре ~ 8 см. Минимальные значения угла расходимости составляют ~ 6°-8° для пучка ионов с энергиями 750 – 300 эВ. В ионном источнике ~ 3,5 %, а $\eta \sim 0,068 - 0,04 \text{ А/кВт}$. В номинальных режимах работы при токе разряда: $I_d = 0,8 \text{ А}$ и $Q \sim 10 \text{ см}^3/\text{мин}$ ресурс подвергаемой интенсивному распылению ионной бомбардировкой защитной молибденовой вставки ($h = 0,2 \text{ мм}$), размещенной внутри цилиндрической поверхности катода, составляет ~ 130 ч при работе на аргоне и ~ 220 часов на кислороде. Источник по своим параметрам не уступает широко распространенным термокатодным источникам типа Кауфмана, но, в отличие от них, может длительно работать в среде химически активного газа (кислорода). Источник поставлен по контракту в Брукхэйвенскую национальную лабораторию (США).

Третья глава посвящена разработке генератора плазмы на основе плазменного катода с сеточной стабилизацией (СПК), который, в отличие от известного⁶, должен эффективно работать не только при низких, но и при высоких (до ~ 1 Па) давлениях газа. Высокие давления в полном катоде с малой апертурой обеспечивают поддержание самостоятельного тлеющего разряда при малых потоках газа и низких напряжениях (300 – 400 В). В области отбора ионов и формирования пучка сохраняется низкое давление (0,1 - 0,005 Па). Для сеток СПК малой площади (~ см²) при высоких плотностях тока (до сотен мА/см²) и малой толщине слоя пространственного заряда (доли мм) стабилизация плазменной границы СПК обеспечивается мелкоструктурными плетеными вольфрамовыми сетками. Высокие давления вблизи сетки (единицы Па) приводят к появлению плотной плазмы вблизи сетки и к высокой плотности ионного тока на сетку. Ионное распыление и нагрев сетки ограничивают ее ресурс (десятки часов).

Решением проблемы является использование сетки СПК большой площади. В этом случае по сравнению с системой СПК с сеткой малого диаметра (~ Ш 10 мм)⁶ плотность электронного тока снижается в ~ 10 - 100 раз, давление газа вблизи сетки СПК - в ~ 20 - 100 раз и, соответственно, плотность ионного тока в ~ 50 - 1000 раз. Верхняя граница диапазона рабочих давлений СПК с сеткой большого диаметра повышается почти на порядок величины до ~ 0,1 - 0,4 Па.

Повышение площади сетки СПК достигнуто расширением анодной части (РАЧ) в электродной системе (рис. 6) с контрагирующим тлеющий

⁶ Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. Источник ионов газов с сетчатым плазменным катодом // ПТЭ. - 2005, - №1, - С. 107 - 111.

разряд отверстием (~ Ш5 - 20 мм) в полем катоде. В двухступенчатой разрядной системе с СПК РАЧ сохраняются оптимальные условия как для формирования эмитирующей ионы однородной плазмы (низкие давления - десятые и сотые доли Паскаля, пониженное содержание продуктов распыления катода); так и для генерации быстрых электронов

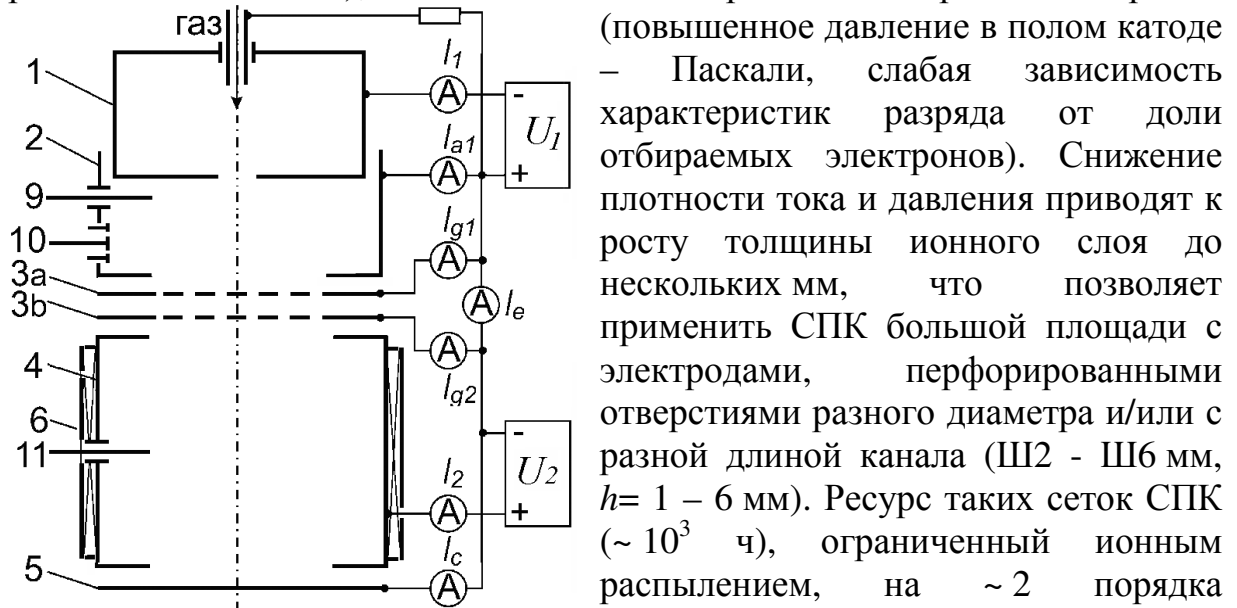


Рис. 6. Схема электродной системы. 1 - катод, 2 - РАЧ, 3 - составная сетка СПК, 4 - полый анод 2-й ступени, 5 - коллектор, 6-12 рядов постоянных магнитов; 9, 11 - ленгмюровский и 10-плоский зонды.

I_e к току разряда I_1) возрастает с ростом p , достигает насыщения ($\alpha \sim 1,3$ для толстой и $\alpha \sim 1,1$ для тонкой сетки) и практически не зависит от тока разряда. Чем меньше толщина сетки, тем при меньших давлениях α достигает максимальных значений.

Среднее число ионов n , генерируемых в расчете на один быстрый электрон, инжектированный в плазму, $n = I_i / I_e = I_i / \alpha I_1$ (I_i - ток ионов) достигает 4 - 5 ион/ e^- при ускоряющих электронах напряжениях $U_2 = 200 - 300$ В. Зависимости среднего числа ионов n от p , или U_2 имеют нелинейный характер с выраженным максимумом. При низких давлениях n мало из-за ухода части быстрых электронов на анод до ионизации ими газа. После прохождения максимума n уменьшается с ростом давления, тока самостоятельного разряда I_1 или напряжения несамостоятельного разряда U_2 , из-за снижения разности потенциалов на двойном слое пространственного заряда в отверстиях сетки СПК и уменьшения энергии электронов. Причиной снижения служит рост потенциала эмитирующей электроны плазмы самостоятельного разряда связанный с увеличением в нее встречного ионного потока.

При отрицательном потенциале плазмы относительно анода и сетки СПК α равна прозрачности сетки, которая обычно не превышает ~ 60-80%. Однако в рассматриваемых разрядных системах с большой площадью

(повышенное давление в полем катоде - Паскаля, слабая зависимость характеристик разряда от доли отбираемых электронов). Снижение плотности тока и давления приводят к росту толщины ионного слоя до нескольких мм, что позволяет применить СПК большой площади с электродами, перфорированными отверстиями разного диаметра и/или с разной длиной канала (Ш2 - Ш6 мм, $h = 1 - 6$ мм). Ресурс таких сеток СПК ($\sim 10^3$ ч), ограниченный ионным распылением, на ~ 2 порядка превышает ресурс плетеных мелкоструктурных сеток.

Эффективность извлечения электронов из плазмы самостоятельного разряда $\alpha = I_e / I_1$ (отношение тока эмиссии электронов

анода и сетки $S_a/S_c \gg (m/M)^{1/2}$, плазма приобретает положительный потенциал относительно анода. Электроны извлекаются через анодный слой ускоряющим напряжением, приложение которого в осевой части эмиссионных отверстий приводит к повышению потенциала, а потом к снятию потенциального барьера, разрыву ионного слоя и эмиссии электронного тока насыщения с открытой плазменной поверхности. Ток в цепи анода становится ионным, а ток электронов на анод практически отсутствует. Если увеличение эмиссионного тока и уменьшение толщины слоя при сдвиге плазменной границы не компенсируются ростом разности потенциалов между плазмами и площадь эмиссионной поверхности возрастает, то сетка СПК перестает выполнять свою стабилизирующую роль.

Анализ уравнения баланса токов, связывающего ток разряда с плотностями ионного и электронного тока, показал, что стабилизация границы плазмы СПК при высокой эффективности извлечения электронов (~ 1) обеспечивается, если толщина ионного слоя и размер апертур сетки изменяются согласованно. С увеличением диаметра отверстий сетки необходимо повышать толщину ионного слоя h в отверстиях сетки, в этом случае эффективность $\alpha = 1$ достигается при более низких давлениях, или меньшем обратном ионном токе. С увеличением длины канала в отверстиях сетки, которое сопровождается смещением плазменной границы и ростом тока ионов на стенку отверстий, ионный поток в плазму СПК и/или рабочее давление могут быть увеличены.

В двухступенчатых системах энергетическую эффективность генерации ионов в плазме можно оценить по мощности, вкладываемой в первую $I_1 U_1$ и вторую $I_a U_2$ ступени разряда $\eta = I_i / (I_1 U_1 + I_a U_2)$. В разрядной системе с СПК и РАЧ максимальная энергетическая эффективность $\eta \sim 2,5$ А/кВт, что превышает энергетическую эффективность генерации ионов в самостоятельном тлеющем разряде с полым катодом ($\leq \sim 0,2$ А/кВт). Причиной низкой энергетической эффективности самостоятельного тлеющего разряда низкого давления является высокая доля энергии qU_d/γ (q – заряд иона), уносимая из разряда ионами, обеспечивающими эмиссию одного электрона с холодного катода, обусловленная высоким напряжением горения U_d ($\sim 500 - 1000$ В) и низким коэффициентом ион-электронной эмиссии $\gamma \sim 0,1$. Если выразить η через параметры n и α , то более удобной для анализа оказывается обратная величина энергетической эффективности – цена иона ε : $\varepsilon = e(U_1/(\alpha n) + (1/n+1)U_2)$, которая включает три компонента (рис. 7): удельную долю затрат энергии самостоятельного разряда на поддержание эмиссии СПК в расчете на один ион $eU_1/(\alpha n)$, удельную долю затрат энергии в несамостоятельном разряде на создание одного иона eU_2/n и энергию, уносимую из разряда ионом eU_2 .

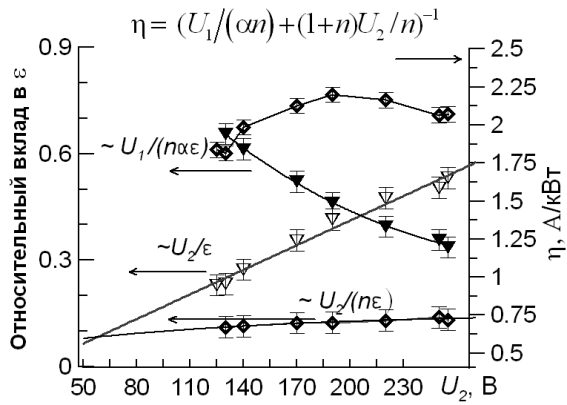


Рис. 7. Вклад в цену иона ϵ затрат энергии в самостоятельном и несамостоятельном разряде, и зависимость энергетической эффективности η от ускоряющего напряжения U_2 . $P=0,09$ Па.

Величина $eU_1/(\alpha n)$ значительно снижается с ростом тока разряда, давления и ускоряющего ионы напряжения. eU_2/n - с ростом энергии ионов быстро достигает насыщения, а eU_2 с ростом напряжения линейно возрастает. Такой характер изменения составляющих

обуславливает немонотонную зависимость энергетической цены иона ϵ от величины напряжения на двойном слое. В результате, максимум η в плазме достигается в диапазоне ускоряющих электроны напряжений $U_2 \sim 150 - 250$ В при максимальных α и максимальной разности потенциалов на двойном слое пространственного заряда в отверстиях сетки СПК.

Если оценивать η без учета затрат энергии на ускорение уходящих на стенки разрядной системы ионов eU_2 , то в системе с СПК РАЧ она составит около $\eta \sim (U_1/(\alpha n) + (U_2/n))^{-1} \sim 3,5$ А/кВт при токе до нескольких ампер. С ростом тока разряда она может достигать 7 А/кВт, что свидетельствует о возможности создавать источники ионов на основе несамостоятельного разряда, отличающиеся высокой электрической экономичностью. Максимальные значения $\eta \sim I_i \sim n\alpha$ слабо зависят от размера отверстий в сетках СПК, поскольку, как правило, в режимах с максимальной эффективностью при уменьшении толщины сетки СПК растет α , но снижается n . Размеры отверстий сетки СПК определяют диапазон давлений, при которых ионный ток из плазмы и энергетическая эффективность генерации ионов максимальны.

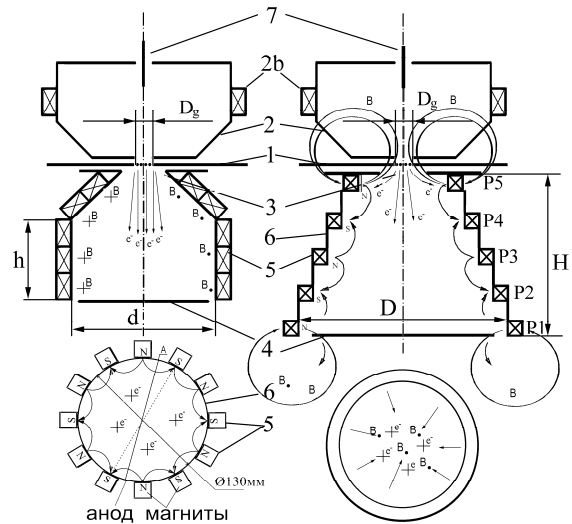


Рис. 8. Схемы электродных систем. А – линейные полюса ММП и цилиндрический полый анод; В – кольцевые полюса ММП и квазиконический полый анод. 1 - сетка СПК, 2 - катод первой ступени разряда, 2b – магниты; 3 – входная апертура полого анода, 4 - коллектор ионов (катод №2), 5 – ММП, 6 – анод. Диаметр СПК $D_g = 10, 20, 30$ мм, ячейка сетки $0,6 \times 0,6$ мм, $D = 180$ мм, $d = 110$ мм. $h = 100$ мм, $H = 160$ мм. Магниты (КС25Д, $T_c = 250^\circ\text{C}$): А – 12 рядов, В – 4 или 5 кольцевых полюсов P5-P1 с внутренними диаметрами от 100 до 180 мм.

Четвертая глава посвящена исследованию несамостоятельного

разряда с СПК РАЧ на основе тлеющего разряда и разработке на его основе источников широких низкоэнергетических ионных пучков (0,5 - 5 кэВ) и ленточных пучков с энергией ионов до 40 кэВ.

В разрядной системе с полым анодом, экранированным многополюсным магнитным полем (ММП), исследовано влияние конфигурации ММП: линейной, с цилиндрическим анодом (рис. 8а), и кольцевой, с анодом квазиконической формы - на характеристики самостоятельного разряда с СПК (рис. 8).

В системе ММП с линейными полюсами электроны вводятся в цилиндрическую область разряда диаметром ~ 60 мм, в которой поле практически отсутствует, и осциллируют между катодами. В системе с кольцевыми полюсами параллельная оси компонента пристеночного магнитного поля меняет направление после каждого полюса. В области вблизи торцов полого анода магнитное поле, создаваемое крайними кольцевыми полюсами, не скомпенсировано и составляет на оси $\sim 6 - 10$ мТл. Быстрые электроны поступают в разряд вдоль линий магнитного поля (рис. 8б) и перемещаются к ближайшему полюсу магнитной системы, совершая одновременно вращение в плоскости, перпендикулярной линиям магнитного поля, под действием силы Лоренца.

В системе с кольцевым ММП и квазиконическим анодом повышение числа генерируемых ионов связано с уменьшением эффективной площади анода и длины магнитных полюсов, что обеспечивает снижение потерь быстрых электронов и повышение плотности плазмы. Увеличение отношения площади эмиссии S_c к площади поверхности плазмы S , как в случае применения конического катода (глава 2) приводит к повышению тока ионов на коллектор в $\sim 1,5 - 1,7$ раза по сравнению с током в

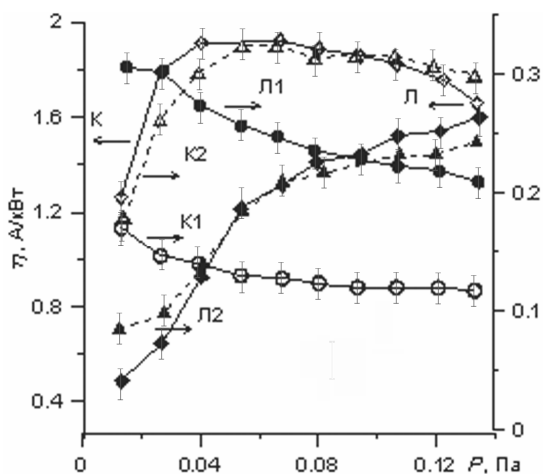


Рис. 9. Зависимость мощности, потребляемой в первой (1) и во второй (2) ступенях разряда, а также энергетической эффективности η от давления аргона. К - кольцевой, Л - линейный мультиполь. Диаметр апертуры СПК $D_g = 30$ мм. $I_1 = 0,6$ А, $U_2 = 150$ В.

цилиндрической системе с линейными полюсами.

Проникновение некомпенсированного магнитного поля в область полого катода СПК снижает напряжение горения самостоятельного разряда, что способствует повышению энергетической эффективности генерации ионов. Такая система с увеличением объема плазмы и площади эмиссионной поверхности потенциально способна обеспечить повышение числа генерируемых ионов в 2 - 3 раза и высокую энергетическую эффективность (рис. 9). Недостаток системы: движение быстрых электронов вдоль линий магнитного поля к ближайшему полюсу приводит к локализации

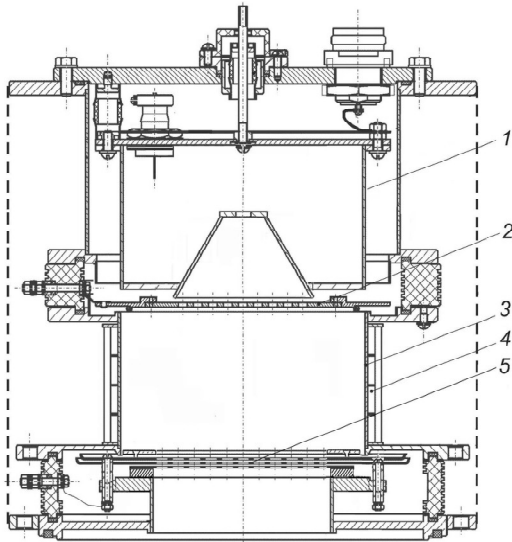


Рис. 10. Конструкция ионного источника 1- полый катод, 2 – сетка СПК, 3 – полый анод, 4- система линейного мультиполя, 5 – экраный ускоряющий и замедляющий электроды ИОС.

давлений (глава 3) и повысить ресурс в ~ 3 раза. Поэтому система с линейным ММП представляется предпочтительной для применения в ионных источниках.

На основе несамостоятельного отражательного разряда разработан технологический источник низкоэнергетичного ионного пучка (рис. 10). Полый анод источника экранирован ММП с линейными полюсами. Анодом самостоятельного разряда служит несущий СПК электрод перфорированный на площади $\sim 80 \text{ см}^2$ отверстиями ШЗ – 4 мм и толщиной несколько мм с прозрачностью $\sim 66\%$. Экранировка анода периферийным магнитным полем обеспечивает получение плазменного эмиттера с малой неоднородностью ($\sim 3 - 5\%$) в области, свободной от магнитного поля. Трехэлектродная система формирования ионного пучка, прототип которой описан в главе 2, содержит молибденовые электроды толщиной 0,5 мм с 540 отверстиями диаметром 3 мм в каждом.

Источник генерирует широкие (80 см^2) пучки ионов газов (Ar , N_2 , O_2 и др.) с энергией 0,5 - 4 кэВ и током до 200 мА в диапазоне давлений 0,01-0,1 Па. Ресурс сетки СПК составляет $\sim 10^3$ ч. Энергетическая эффективность источника достигает $\sim 0,6 \text{ А/кВт}$. Источник по своим характеристикам конкурентоспособен с источниками типа Кауфмана и обладает существенно большим ресурсом при работе с химически активными газами. Исследованы характеристики несамостоятельного разряда в системе с СПК, в котором используется электростатическое удержание быстрых электронов, инжектируемых вдоль оси протяженного полого катода (плазменной камеры) диаметром 150 мм длиной 0,5 - 0,8 м (рис. 11). Стержневой анод регулируемой длины установлен на противоположном от сетки торце камеры. В эмиссионном окне с размерами $s = 600 \times 100 \text{ мм}^2$ устанавливалась мелкоструктурная сетка

плазмы вблизи сетки СПК, повышению плотности тока на сетку СПК в 2 - 3 раза и пропорциональному снижению ее ресурса. Увеличение диаметра сетки повышает отбор быстрых электронов на ближайший кольцевой полюс ММП, что приводит к снижению в несколько раз n и η . Достоинством системы с цилиндрическим анодом, экранированным линейным ММП, является генерация однородной плазмы во всем объеме, свободном от магнитного поля. В такой системе диаметр сетки СПК может быть увеличен до размера зоны, свободной от магнитного поля, что позволяет расширить диапазон рабочих

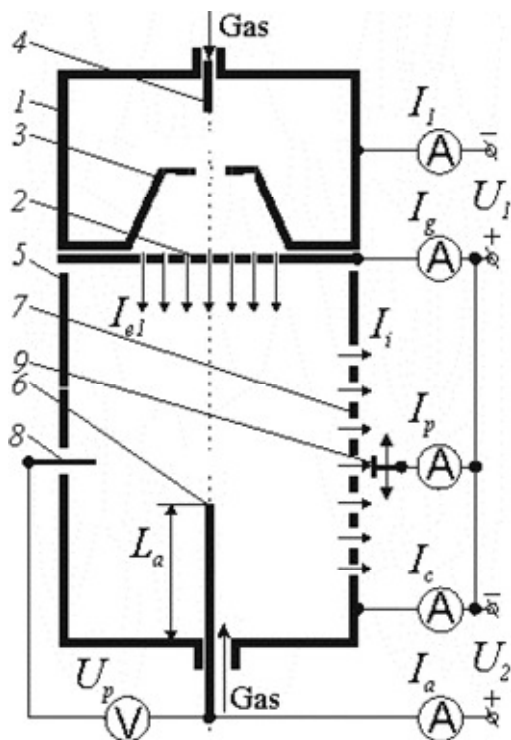


Рис. 11. Схема разрядной системы: 1- катод, 2- сетка СПК, 3- коническая вставка, 5- плазменная камера, 6- анод, 7- эмиссионное окно, 8- ленгмюровский зонд, 9- коллектор.

быстрых электронов с противоположных сторон разрядной системы обеспечивает получение симметричного распределения в результате суперпозиции плотностей плазмы, создаваемых каждым потоком электронов. 4) Энергия быстрых электронов - с повышением энергии число ионизаций, которые может совершить быстрый электрон до термализации, а, следовательно, и максимальное расстояние от плазменного катода, проходимое быстрыми электронами увеличивается. Учет перечисленных факторов позволил получить плазменный эмиттер ионов с неоднородностью, не превышающей 5% на длине ~ 0,8 м.

Оптимальное отношение площади анода S_a и катода S_c , при котором в несамостоятельном разряде падение напряжения на анодном слое отрицательного пространственного заряда минимально: $S_a/S_c = (2m/M)^{1/2} (I_a/I_c) = (2m/M)^{1/2} (1+1/n)$, где $I_c \sim I_b$ - ток ионов на катод несамостоятельного разряда. Из соотношения следует, что с уменьшением отношения тока вторичных электронов к току инжектируемых электронов, поступающих на анод, требуется увеличивать площадь анода.

На основе двухступенчатого разряда с инжекцией электронов в протяженную электростатическую ловушку разработан технологический источник ленточного пучка газовых ионов (10 - 40 кэВ) с поперечным сечением $s = (50 - 100) \times (500 - 800) \text{ мм}^2$. Ионный пучок формируется двухэлектродной многощелевой ИОС с прозрачностью 0,8. Неоднородность распределения плотности тока вдоль длинной оси сечения

(1 x 1 мм²). Диапазон давлений газа (Ar, N₂) в камере - 0,01 - 0,1 Па. Ускоряющее электроны напряжение $U_2 = 50 - 300 \text{ В}$.

Основные факторы, влияющие на неоднородность (рис. 12 - 13):

1) Давление - снижение давления обеспечивает рост длины ионизационного пробега электронов Λ , и ограничено минимальным потоком газа, при котором поддерживается самостоятельный разряд. 2) Перепад давления вдоль оси протяженной разрядной системы, уменьшается распределением потока газа в разрядной системе - плотность плазмы прямо пропорциональна плотности газа. Разделение поступающего в систему газа на несколько потоков ограничено величиной Q_{min} , при котором функционирует самостоятельный тлеющий разряд в СПК. 3) Инжекция

пучка (рис. 14) в оптимальных режимах формирования составляет $\pm 10\%$ при $p = (2,5-5) \cdot 10^{-2}$ Па. Источник работает в импульсно-периодическом (0,5мс, 500 Гц) или непрерывном режимах. Средний ток в цепи ускоряющего ионы источника питания - 200 мА ($\sim 0,15$ мА/см²) при среднем токе несамостоятельного разряда $\sim 1-2$ А, а импульсный ток $\sim 2-3$ А (~ 1 мА/см²) при токе разряда 10-15 А.

Энергетическая эффективность источника η_i пропорциональна величине эффективности генерации ионов в плазме и отношению тока пучка I_i к току ионов на катод $I_i/I_c \sim s/S_c$. В разработанном источнике $I_i/I_c \sim 0,1 - 0,15$ и $\eta_i \sim 0,2-0,3$ А/кВт. Ток ионов на водоохлаждаемый коллектор оценивался калориметрическим методом. С ростом энергии ионов от 20 - 22 до 40 кэВ отношение тока в цепи источника питания к току ионов на коллектор возрастает от $\sim 1,1$ до ~ 2 . Причиной увеличения потока заряженных частиц на электроды источника является ионизация ионным ударом остаточного газа в ускоряющем промежутке ИОС. Уменьшение в соответствии с «законом «3/2»» длины ускоряющего промежутка при использовании ИП режима снижает потери мощности в $\sim 1,3-1,5$ раза.

Ленточный источник используется в «Технопарке АТ» (Уфа).

В заключении диссертации приведены основные результаты, полученные при ее выполнении, подтверждены достоверность и обоснованность результатов работы, приведены публикации по теме диссертации и отмечен личный вклад автора.

В приложении представлены документы, подтверждающие использование ионных источников на предприятиях.

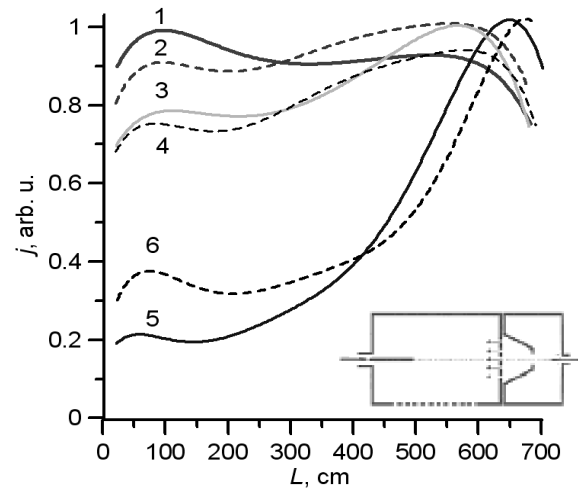


Рис. 12. Распределение плотности тока насыщения ионов из плазмы. 1, 3, 5 - $U_2 = 200$ В, 2, 4, 6 - $U_2 \sim 350$ В, 1, 2 - 0,04 Па, 3, 4 - 0,2 Па, 5, 6 - 0,5 Па. 1, 3, 5 - напуск с 2 сторон, 2, 4, 6 - напуск со стороны катода.

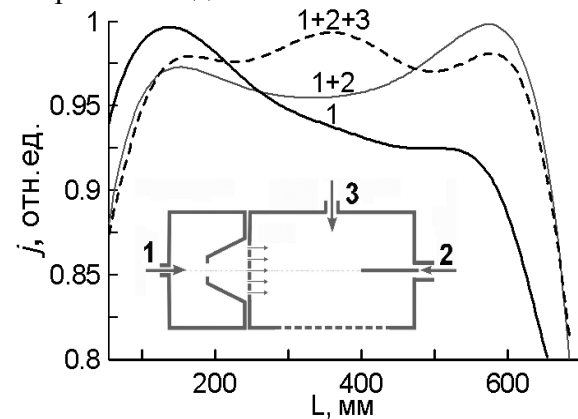


Рис. 13. Распределения плотности тока ионов при различных способах подачи газа. Давление $P \sim 0,04$ Па.

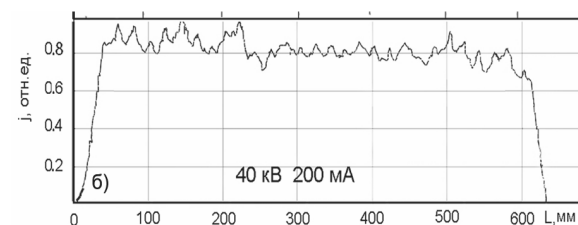


Рис. 14. Продольное распределение плотности тока ионного пучка. $P = 0,04$ Па. Ar.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были получены следующие основные результаты:

1. В электродной системе типа обращенный магнетрон при использовании полого катода конической формы в плазме самостоятельного тлеющего разряда сохраняются условия для замкнутого дрейфа осциллирующих в магнитном поле быстрых электронов, что обеспечивает однородность плазменного эмиттера. Следствием увеличения отношения площади эмиссии к площади катода, по сравнению с катодом цилиндрической формы, является рост отношения тока пучка к току разряда в $\sim 2 - 3$ раза. Цена иона в пучке снижается в $\sim 1,5 - 2$ раза, несмотря на рост напряжения разряда, связанный с уменьшением объема разрядной системы и повышением доли отбираемых ионов.

2. Предложена оригинальная разрядная система с широкоапертурными полым катодом и полым анодом, помещенными в аксиальное магнитное поле, которая сочетает признаки пеннинговской, плазматронной и разрядной системы с полым катодом. Применение сильного магнитного поля (до 40 мТл) позволяет устойчиво поддерживать тлеющий разряд при низких давлениях газа ($\sim 0,01$ Па). Плазма в анодной области разряда формирует однородный широкий плазменный эмиттер с неоднородностью не более 5-10%. Слабое влияние потенциала экранного электрода на параметры разряда позволяет управлять эффективностью извлечения и угловой расходимостью низкоэнергетичного ионного пучка.

3. Показано, что катодный слой, существующий между плазмой и эмиссионным электродом, характеризующийся значительной толщиной (до 5 мм) и падением напряжения (порядка напряжения горения разряда), оказывает существенное влияние на формирование пучка в источниках на основе самостоятельного тлеющего разряда. При низких энергиях ионов (менее 1000 эВ) и отборе ионов через катодный слой эффективность извлечения ионов не превышает 2 - 3 % из-за неоптимальной конфигурации эмитирующей плазменной поверхности в отверстиях ионной оптики, однако отсечка ионов пучка с большими радиальными составляющими скорости на электродах оптики может быть использована для снижения угловой расходимости пучка до 3 - 6%. Плавающий потенциал экранного электрода (падение потенциала на ионном слое пространственного заряда ~ 30 В) используется при формировании низкоэнергетического пучка ($\sim 300 - 500$ эВ) с максимальной эффективностью извлечения (до 4 %). Угловая расходимость такого пучка составляет 6 - 8°.

4. Наличие катодного слоя не оказывает значительного влияния на формирование широкого пучка ионов с энергией 20 - 50 кэВ, поскольку напряженность поля в ускоряющем промежутке на 1 - 2 порядка величины превышает напряженность поля в катодном слое, влияние которого на конфигурацию плазменного мениска в отверстиях ионной оптики оказывается минимальным.

5. Расширение анодной части разрядной системы СПК позволяет увеличить площадь сетки СПК, повысить рабочее давление до $\sim 0,3 - 0,5$ Па и использовать в качестве сетки перфорированные отверстиями Ш 2 - 5 мм крупноструктурные электроды толщиной $\sim 1 - 6$ мм. Выбор размеров отверстий определяет условия стабилизации плазменного катода и диапазон давлений, в котором эффективность извлечения электронов $\sim 100\%$ и их энергия максимальна. Ресурс крупноструктурного электрода СПК на ~ 2 порядка больше ($\sim 10^3$ ч), чем для плетеной мелкоструктурной сетки.

6. Энергетическая эффективность генерации ионов в плазме несамостоятельного разряда зависит от эффективности извлечения электронов и их энергии. Максимальная эффективность $\eta \sim 2,5$ А/кВт достигается, если плазменный катод работает в режиме эмиссии с открытой плазменной поверхностью, в несамостоятельном разряде падение напряжения на анодном слое пространственного заряда минимально, рост потенциала эмитирующей электроны плазмы ограничен и обеспечивается высокая степень релаксации энергии электронов в плазме несамостоятельного разряда. Последнее условие выполняется в диапазоне ускоряющих электроны напряжений $\sim 150 - 250$ эВ. Цена иона в несамостоятельном разряде в 2 - 5 раз ниже, чем в самостоятельном разряде, поскольку отбор ионов из плазмы самостоятельного разряда приводит к росту напряжения, а низкие давления газа в катодной полости ведут как к росту напряжения, так и к росту затрат энергии на генерацию одного электрона.

7. На основе несамостоятельного разряда с плазменным катодом разработаны и исследованы газоразрядные системы для источников широкого (до 100 см^2) низкоэнергетического ($0,8 - 3$ кэВ) пучка и ленточного пучка (до $0,8$ м) ионов средних энергий (до 50 кэВ). Снижение неоднородности протяженного плазменного эмиттера до 10% на длине до $0,8$ м достигнуто двухсторонней инжекцией электронов в разряд в соосном направлении и увеличением длины ионизационного пробега электронов выше длины разрядной камеры уменьшением давления в ее объеме.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гаврилов Н.В. Источник слаборасходящихся низкоэнергетических пучков большого сечения / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Кулешов С.В., Радковский Г.В. // 2-я международная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах», - 2000, Tomsk, Russia. - С. 157 – 159.

2. Gavrilov N.V. A glow-discharge-based source of low-energy low-divergent broad ion beams / Gavrilov N.V., Emlin D.R., Kuleshov S.V. // 5-я конференция по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы. – 2000, Tomsk, Russia. - С. 168 - 173.

3. Gavrilov N.V. A source of ribbon ion beams based on a glow

discharge with closed drift of electrons / Gavrilov N.V., Emlin D.R. // 4 International Conference on Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams (MPSL), - 2001, Ukraine, - P. 30.

4. Gavrilov N.V. Gas ion beam source for combined ion mixing/coating deposition technologies / Gavrilov N.V., Emlin D.R. // 4 International Conference on Modification of Properties of Surface Layers of Non-Semiconducting Materials Using Particle Beams (MPSL), - 2001, Ukraine, - P. 31.

5. Гаврилов Н.В. Источник ленточного пучка газовых ионов на основе тлеющего разряда с замкнутым дрейфом электронов / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецких А.С. // 6th international conference of modification of materials with particle beams and plasma flows. - 2002. Tomsk, Russia. - С. 100 – 103.

6. Гаврилов Н.В. Источник широких пучков ионов газов для использования в установке ионно-плазменного нанесения покрытий / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. // 6th international conference of modification of materials with particle beams and plasma flows, - 2002. Tomsk, Russia. - С. 104 – 107.

7. Гаврилов Н.В. Повышение эффективности ионного эмиттера на основе тлеющего разряда с осциллирующими электронами, 6th international conference of modification of materials with particle beams and plasma flows / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. // 6th international conference of modification of materials with particle beams and plasma flows. - 2002. Tomsk, Russia. - С. 488 – 491.

8. Гаврилов Н.В. Использование ионно-лучевого ассистирования в технологии нанесения высокотвердых износостойких покрытий ионно-плазменным методом / Гаврилов Н.В., Буреєв О.А., Емлин Д.Р. // Уралосибирская научно - практическая конференция. - 2003, Екатеринбург, Россия. - С. 82 -83.

9. Gavrilov N.V. Source of ribbon ion beams with coarse-structure gridded plasma cathode / Gavrilov N.V., Bureyev O.A., Emlin D.R., Kamenetskikh A.S., Menshakov A.I. // 9th international conference on modification of materials with particle beams and plasma flows, - 2008, Tomsk, Russia, - P. 7 - 10.

10. Gavrilov N.V. Effect of anode dimensions on Characteristics of Non-self sustained hollow cathode discharge / Gavrilov N.V., Bureyev O.A. Emlin D.R., Kamenetskikh A.S. // 9th international conference on modification of materials with particle beams and plasma flows. - 2008, Tomsk, Russia. – P. 175 - 178.

11. Гаврилов Н.В. Источник ленточного пучка ионов газов / Гаврилов Н.В., Буреєв О.А., Емлин Д.Р., Каменецких А.С., Меньшаков А.И. // III Международный семинар «Плазменная эмиссионная электроника», - 2009. Улан-Удэ, Россия, Изд-во БНЦ, - С. 92 - 99.

12. Гаврилов Н.В. Источник ленточных пучков ионов газов для

модификации рулонных материалов / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Меньшаков А.И. // «Люльевские чтения»: 7 научно – практическая конференция ОАО «ОКБ Новатор». – 2010, Челябинск. Изд. Центр ЮУрГУ, - 2010. - С. 80.

13. Emlin D.R. Scaling of DLC chemical vapor deposition method with the use of the plasma cathode / Emlin D.R., Plotnikov S. A., Gavrilov N. V., Trachtenberg I. S., Khatmullin I.G. // 3rd International Congress on Radiation Physics, High-Current Electronics and Modification of Materials. – 2012. Tomsk, Russia, - С. 303.

14. Емлин Д.Р. Свойства TiC/a-C:H покрытий, осаждаемых из плазмы дугового разряда с титановым катодом в смеси (C₂H₂+Ar), ионизируемой электронным пучком / Емлин Д.Р., Меньшаков А.И. // 11-я Международная конференция «Пленки и покрытия-2013» / Под ред. В. Г. Кузнецова. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, - 2013. - С. 167-169.

15. Гаврилов Н.В. Efficiency of ion generation and ion extraction in an ion source with a gridded plasmas cathode and a magnetic multipole / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. Каменецких А.С. // Изв. вузов, Физика. – 2006. - №8. Приложение. – С. 88 – 91.

16. Гаврилов Н.В. Формирование ленточного эмиттера ионов в импульсном разряде с плазменным катодом / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецких А.С., Меньшаков А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2009. - №11/2. – С. 85 – 90.

17. Гаврилов Н.В. A source of extended (1.4 m) ribbon ion beams with a grid-bounded plasma cathode / Гаврилов Н.В., Буреев О.А., Емлин Д.Р. // Изв. вузов. Физика. - 2006,- №8. Приложение. – С. 92 – 95.

18. Gavrilov N.V. Research of the plasma cathode with a coarse-cellular grid / Gavrilov N.V., Emlin D.R., Kamenetskikh A.S. // Изв. вузов. Физика. - 2007. - №9. Приложение. - С. 30 - 34.

19. Гаврилов Н.В. Стабилизация сеточно-плазменного катода в широком диапазоне давлений газа / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецких А.С. // Известия Вузов. Физика. - 2007. - Т. 50, - № 10/2. - С. 154 - 160.

20. Гаврилов Н.В. Ионный источник с крупноструктурным сеточно-плазменным катодом / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецких А.С. Известия Вузов. Физика. - 2007. -Т. 50. - № 10/2. - С. 149 - 153.

21. Гаврилов Н.В. Генерация однородной плазмы в тлеющем разряде с полым анодом и широкоапертурным полым катодом / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Никулин С.П. // Письма в ЖТФ, - 1999. - Т. 25, -№ 12, - С. 83 – 88.

22. Гаврилов Н.В. Формирование пучков ионов, извлекаемых из плазмы тлеющего разряда / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. // ЖТФ. - 2000.- Т. 70. - В. 5, - С. 74 – 81.

23. Гаврилов Н.В. Источник широких однородных пучков низкоэнергетических (~ 0,5 кэВ) газовых ионов / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р.,

Радковский Г.В. // ПТЭ. - 2000. - №2, С. 113 - 118.

24. Gavrilov N.V. A cold-cathode source of low-energy low-divergent broad ion beams /Gavrilov N.V., Emlin D.R., Kuleshov S.V. // Rev. of Sci. Instrum. – 2000. - V. 71, - No. 10. - P. 3662 – 3667.

25. Гаврилов Н.В. Использование тлеющего разряда в магнитном поле для получения широких ионных пучков технологического применения / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Никулин С.П. // Известия Вузов. Физика. - 2001. - № 9. - С. 48 - 56.

26. Гаврилов Н.В. Источник ленточного пучка газовых ионов с широкоапертурным холодным полым катодом / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецких А.С. // ПТЭ. – 2003. - № 1, - С. 93 – 98.

27. Гаврилов Н.В. Повышение эффективности ионного эмиттера на основе тлеющего разряда с осциллирующими электронами / Гаврилов Н.В. Емлин Д.Р. // ЖТФ. – 2003. - Т. 73. - В. 9, - С. 107 - 112.

28. Gavrilov N.V. Cold-cathode source of ribbon gaseous ion beams / Gavrilov N.V., Emlin D.R. // Rev. Sci. Instrum. – 2004. - V. 65, - No. 5, - P. 1872 – 1874.

29. Гаврилов Н.В. Плазменный катод электронного ускорителя с большим сечением пучка / Гаврилов Н.В., Осипов В.В., Буреев О.А., Емлин Д.Р., Каменецких А.С., Шитов В.А. // Письма в ЖТФ, - 2005. - Т. 31. - В. 3, -С. 72 - 78.

30. Гаврилов Н.В. Высокоэффективная эмиссия плазменного катода с сеточной стабилизацией / Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецких А.С. // ЖТФ. - 2008. Т. 78. - №10, - С. 59 – 64.

31. Емлин Д.Р. Источник ленточных пучков ионов газов для модификации рулонных материалов / Емлин Д.Р., Меньшаков А.И. // Вестник ЮУрГУ, серия "Машиностроение". - 2012. - №33 (292), - С. 131-138.

32. Gavrilov N. V. Scaling of DLC Chemical Vapor Deposition Method with the Use of the Plasma Cathode / Gavrilov N. V., Emlin D.R., Plotnikov S. A. // Изв. Вузов. Физика. – 2012. – №12/2. – С. 66 - 70.

33. Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Никулин С.П. Плазменный эмиттер ионов: Пат. РФ №2150156 от 27.05.2000. Патентообладатель ИЭФ УрО РАН.

34. Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. Плазменный эмиттер ионов: Пат. РФ №2229754 от 27.05.2004. Патентообладатель ИЭФ УрО РАН.

35. Гаврилов Н.В., Буреев О.А., Емлин Д.Р. Ленточный плазменный эмиттер ионов: Патент РФ №2294578 от 14.07.2005. Патентообладатель ИЭФ УрО РАН.

36. Гаврилов Н.В., Буреев О.А., Емлин Д.Р. Источник широкоапертурных ионных пучков: Пат. РФ №2370848 от 26.03.2008. Патентообладатель ИЭФ УрО РАН.

37. Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. Ленточный плазменный эмиттер ионов: Пат. РФ №2221307 от 10.01.2004. Патентообладатель ИЭФ УрО РАН.