

**На правах рукописи**

**Вересов Олег Леонидович**

**ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НА БАЗЕ РАЗРЯДОВ  
С НЕНАКАЛИВАЕМЫМИ КАТОДАМИ  
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Специальность: 05.27.02 «Вакуумная и плазменная электроника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт – Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт–Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный руководитель: – кандидат технических наук, доцент Барченко Владимир Тимофеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Завьялов Михаил Александрович, ФГУП Всероссийский электротехнический институт имени В.И. Ленина, ведущий научный сотрудник.

кандидат технических наук, профессор, Пономарев Андрей Николаевич, ЗАО «НТЦ Прикладных нанотехнологий», генеральный директор.

Ведущая организация: – ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

Защита диссертации состоится «\_\_» декабря 2011 года в \_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.08 Санкт–Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских и  
кандидатских диссертаций Д 212.238.08  
к.т.н

Смирнов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Традиционно наибольшее распространение ионно-плазменные технологии имели при производстве изделий электроники, микро- и оптоэлектроники. Однако в последние годы сфера их применения значительно расширилась. Анализ современного состояния развития исследований и производства в области «критических» технологий и техники новых поколений позволяет сделать заключение о том, что одним из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных научно-технических направлений является физика и технология микро- и наносистем. Ввиду того, что в указанных системах в качестве характерных выступают размеры атомного уровня, при их изготовлении необходимо использовать «инструмент», обеспечивающий устойчивое воспроизведение размеров в нанометровом диапазоне. В качестве «инструмента» для указанных целей весьма эффективно использование потоков заряженных частиц и плазмы.

В настоящее время, в связи со значительным расширением фронта работ в области нанотехнологии и наноматериалов, теоретические и прикладные исследования в указанных областях начинают активно развиваться, что отражает объективные потребности современной науки, техники и производства. Поэтому, представляется целесообразным более детальное и глубокое изучение плазменных эмиссионных систем на базе разрядов низкого давления для модификации поверхности и нанесения различного рода покрытий.

Изложенное выше, определяет актуальность исследований, представленных в настоящей работе. Их постановка обусловлена стремлением получения новых знаний о физике процессов в многокомпонентной плазме низкого давления, а также потребностями науки, техники и производства в разработке и использовании более совершенного технологического оборудования, обеспечивающего расширение областей использования новых процессов, базирующихся на применении потоков заряженных частиц и плазмы.

К таким процессам, в частности, относятся пучково-плазменные технологии. Без их применения невозможно выполнить некоторые технологические операции, а в некоторых случаях они существенно повышают качество. Среди таких процессов можно отметить ионную имплантацию, ионно-плазменное, ионно-лучевое травление и нанесение покрытий, обработку диэлектриков потоками быстрых нейтронов и т.п. Весьма перспективно применение пучково-плазменных технологий модификации поверхности конструкционных материалов в машиностроении.

Для повышения эффективности применения пучково-плазменных технологий требуется разработка нового или существенная модернизация уже применяемого оборудования. Несмотря на значительные достижения, достигнутые в области плазменной эмиссионной электроники, до сих пор остается актуальной задача разработки источников ионов различных сортов и направленных плазменных потоков

с технико-эксплуатационными характеристиками, отвечающими потребностям сегодняшнего дня.

**Целью диссертационной работы** является исследование процессов в источниках интенсивных пучков ионов с ненакаливаемыми катодами в магнитном поле на базе разрядов низкого давления и разработка конструкций источников, предназначенных для технологических пучково-плазменных установок и инжекторов ионных ускорителей прикладного назначения.

**Достижение поставленной в работе цели, потребовало:**

1. Выполнить анализ достижений в области разработки и применения плазменных эмиссионных систем с ненакаливаемыми катодами.

2. Разработать диагностическую аппаратуру для оперативного измерения параметров пучков ионов, извлекаемых из газоразрядных камер плазменных источников ионов и методику её применения.

3. Провести экспериментальное исследование характеристик плазменных источников ионов, с целью выяснения влияния внешних факторов на их физико-технические и эксплуатационные параметры.

4. Разработать плазменные источники ионов новых оригинальных конструкций адаптированных к применению в технологических установках для модификации поверхности и ускорителях для прикладных целей и определить эффективность их использования в производственных условиях.

**Научная новизна работы заключается в том, что:**

- впервые исследованы характеристики газоразрядной камеры типа дуоплазматрон с многополостным ненакаливаемым катодом магнетронного типа и реверсивной магнитной системой;

- впервые исследованы характеристики плазменного источника многокомпонентного ионного пучка оригинальной конструкции на базе газоразрядной ячейки Пеннинга с виртуальным антикатодом, способного генерировать многокомпонентные пучки, состоящие из ионов плазмообразующего газа и металла катода-мишени;

- экспериментально установлены способы управления компонентным составом многокомпонентного ионного пучка;

**Положения, выносимые на защиту.**

1. Использование в дуоплазматроне катодного узла с многокамерным полым катодом с конусной вставкой в магнитном поле и вспомогательным анодом обеспечивает снижение напряжения зажигания и горения разряда, повышает газовую экономичность и исключает попадание в пучок ионов материала катода.

2. Локализация открытой эмиссионной поверхности в экспандере с газопроницаемыми стенками позволяет повысить электрическую прочность ускоряющего промежутка в 1,5 – 2 раза и уменьшить нормализованный эмиттанс сформирован-

ного пучка с  $1,4 \cdot 10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-7}$  м·рад, за счет «обрезания» периферийных ионов, имеющих значительные поперечные скорости.

3. В плазменном источнике ионов с газоразрядной камерой на базе отражательного разряда низкого давления (вакуумный режим) и продольным извлечением ионов роль антикатода может выполнять открытая граница плазмы, локализованная в промежутке между анодом ГРК и экстрактором. Управляя ее положением можно формировать как ионный поток газовых ионов, так и поток, содержащий ионы материала катода.

**Практическая ценность диссертации состоит в том, что:**

- разработан оригинальный компактный диагностический комплекс аппаратуры для измерения характеристик ионных потоков, формируемых в плазменных источниках ионов, и отработаны методики оперативных измерений параметров пучков с его использованием;

- на базе созданных ионных источников и оптимизированных ионно-оптических систем разработаны ионные инжекторы для ускорителей прикладного назначения и технологических установок с улучшенными эксплуатационными характеристиками;

- предложены не применявшиеся ранее конструкции ненакаливаемых катодов для газоразрядных структур, использующих тлеющий и вакуумный дуговой разряд с интегрально холодным катодом, обеспечивающие более высокий срок службы, высокую газовую экономичность и пониженное напряжение зажигания и горения разряда и выполнено исследование их характеристик;

- разработан и реализован технологический кластер, позволяющий выполнять эксперименты по модификации поверхности потоками заряженных частиц и плазмы и осуществлять мелкосерийное производство;

- предложена и апробирована оригинальная конструкция плазменной ловушки с периферийным магнитным полем, позволившая существенно уменьшить поток углеводородов в технологический объем из откачной системы и проводить финишную ионную очистку элементов внутрикамерной арматуры.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** базируется на систематическом характере исследований, использовании апробированных экспериментальных методик, сопоставлении полученных результатов с результатами, полученными другими авторами, на практической реализации научных положений и выводов при разработке ионных источников, диагностической аппаратуры и технологического оборудования, а также на результатах применения разработанных устройств.

## **Внедрение результатов работы**

1. Инжектор на базе источника ионов водорода с ненакаливаемым магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы вблизи эмиссионного отверстия, является частью строящегося линейного ускорителя протонов на энергию 16 МэВ для наработки медицинских радионуклидов для применения в медицинских учреждениях юга России (договор № 9910-Н с МПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»).

2. Ионный источник на базе отражательного разряда с ненакаливаемым катодом, в котором формируется поток ионов из плазмообразующего газа и распыленных атомов катода-мишени, был применён в инжекторе многокомпонентных пучков ионов газа и металла, который вместе с пучково-плазменным реактором составляет технологический комплекс по нанесению плёночных покрытий методом ионно-лучевого распыления. Работа выполнялась по договору № 1485/0202-07 от 05.04.2007 с ОАО «Композит» по теме «Разработка технологии формирования композиционных изделий и покрытий, экспериментальные исследования в обеспечение создания новых материалов и технологических процессов для энергетических установок».

3. Специальный диагностический комплекс, включающий угломер и две модификации многоканального масс-анализатора, используемый для оперативного измерения параметров ионных пучков: тока пучка, радиального распределения плотности тока аксиально-симметричного пучка, угла расходимости и эмиттанса пучка, компонентного состава смешанных ионных пучков, в настоящее время эксплуатируется в Сухумском физико-техническом институте и НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

### **Личный вклад автора.**

Приведенные в диссертации результаты исследований и разработок получены лично или при непосредственном участии автора. Автором внесён определяющий вклад в постановку задач, выбор методик исследования, анализ полученных результатов исследований и разработку оборудования на базе полученных данных.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались на V Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками (Томск, 2000 г.), на IX Конференции по физике газового разряда (Рязань, 1998), на XI Международном совещании по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (СПб, 2005 г.), на 8<sup>ой</sup> и 9<sup>ой</sup> Международных конференциях «Плёнки и покрытия» (СПб, 2007 и 2009 г.г.), на 7<sup>ой</sup> Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия» (Москва, 2008 г.), на Международном семинаре «Вакуумная техника и технология» (СПб, 2008 г.), на III Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника»

(Улан-Удэ, 2009 г.), на Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, Беларусь, 2011г.).

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 17 работ, в числе которых 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, 10 работ в материалах международных, всероссийских научно-технических конференциях. Одна монография находится в печати.

#### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и содержит 147 страниц машинописного текста, 98 рисунков, таблиц и список литературы из 124 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи работы, приведено краткое изложение содержания диссертации, формулируются научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней рассмотрены достижения в области разработки ионных источников различного назначения. Описаны области применения источников ионов и требования, предъявляемые к ним. Рассмотрены основные типы источников ионов, применяемых для технологических целей и в качестве инжекторов для ускорителей ионов. Описаны особенности газоразрядных камер ионных источников для получения потоков газовых и металлических ионов. Показано, что определенными преимуществами обладают ионные источники, имеющие внутрикамерное исполнение, но вопросам их разработки уделяется еще недостаточно внимания.

На основании проведенного обзора литературы в конце главы сформулированы цели и задачи работы.

**Во второй главе** приведено описание экспериментального стенда и результаты разработки оригинальной измерительной аппаратуры, на которой были проведены описанные в диссертационной работе исследования. Приводятся методики, использованные для измерения параметров пучков ионов.

В вакуумной системе экспериментального стенда применена плазменная ловушка оригинальной конструкции. Она представляет собой газоразрядную систему с сеточными электродами и периферийным многокасповым магнитным полем. Ловушка располагается в угловом шиберном затворе со стороны откачиваемого объёма. Разработанная газоразрядная система позволяет эксплуатировать диффузионный насос без азотной ловушки. В тоже время, она является магниторазрядным насосом, улучшающим разряжение в откачиваемом объёме примерно на порядок, и источником плазмы для очистки и активи-

вазии поверхностей, находящихся в вакуумном объёме., поскольку электроны, попадающие в вакуумную камеру, при давлении в ней порядка  $1,33 \cdot 10^{-1} \div 1,33 \cdot 10^{-2}$  Па возбуждают разряд во всём вакуумном объёме.

Малогабаритный многофункциональный анализатор характеристик аксиально-симметричного пучка состоит из двух частей, секционированного цилиндра Фарадея (ЦФ), состоящего из шести изолированных друг от друга графитовых колец, с которых снимаются сигналы и измерителя угла расходимости элементарного ленточного пучка (ЭЛП), приёмником которого служит люминесцирующее кварцевое стекло, легированное европием. Конструкция диагностического прибора позволяет оперативно измерять в течение прохождения одного импульса такие параметры пучков ионов газа, как ток, распределение плотности тока по радиусу, диаметр, угол расходимости, эмиттанс. Причём определение угла расходимости ЭЛП, а, следовательно, эмиттанса пучка можно проводить также и визуально, что существенно повышает оперативность измерений.

В ионных источниках формирующих многокомпонентные пучки стоит задача определения его массового состава. Разработка малогабаритного диагностического прибора, позволяющего анализировать массовый спектр в пучке в диапазоне от лёгких частиц ( $H_2$ ) до тяжёлых - (Pb) оказалась не тривиальной задачей.

Анализ различных конструкций анализаторов масс и проведённые расчёты показали, что наиболее приемлемой, в наших условиях, является конструкция многоканального прибора с секторным магнитным полем и многоэлектродным коллектором. Для увеличения разрешающей способности анализатора применена входная апертура, убирающая из анализируемого потока ионы, имеющие большие углы наклона по отношению к оси пучка. Введение в масс-анализатор анализируемого ионного пучка с малым углом расходимости, позволяет располагать приёмные коллекторы вплотную к области анализирующего магнитного поля, что значительно уменьшает размеры прибора.

Расчёты показали, что при выбранной геометрии масс-анализатора и индукции магнитного поля в, разрешающая способность прибора при линейной дисперсии 10 мм имеет порядок 30.

Установка прибора на перемещающейся поперек оси пучка каретке позволяет измерять общий ток, распределение плотности тока, массовый состав, соотношения компонент в пучке и их распределение по сечению пучка.

**В третьей главе** представлены результаты исследования источников ионов дуоплазмотронного типа с ненакаливаемыми катодами, работающими в импульсном режиме. Эти исследования проводились с целью оценки возможности создания ионного источника с повышенным ресурсом работы для замены дуоплазмотрона с накаливаемым катодом в инжекторе линейного ускорителя.



Для решения этой задачи были предложены разработанные и адаптированные к конструкциям дуоплазматронов новые газоразрядные структуры: полый сотовый катод (ПС) и обращённый цилиндрический многокамерный магнетронный катод (ОЦММ) (рисунок1).

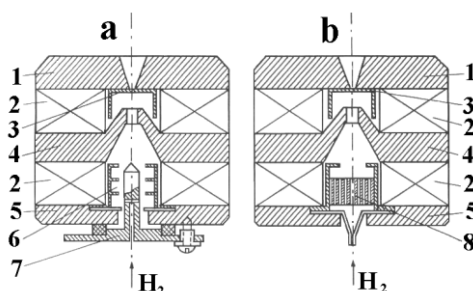


Рисунок 1. Конструкции ГРК дуоплазматрона с ОЦММ катодом (а) и с ПС катодом (b): 1 – анодный магнитный полюс, 2 – кольцевые постоянные магниты из FeBa, 3 – диафрагма эмиссионного электрода, 4 – промежуточный электрод, 5 – катодный магнитный полюс, 6 – ОЦММ катод, 7 – анод магнетрона, 8 – ПС катод.

Сравнение разрядных и эмиссионных характеристик дуоплазматрона с обоими типами катодов показало следующее:

- при одинаковых напряжениях зажигания разряда  $500 \div 800$  В, оптимальная работа дуоплазматрона с ОЦММ катодом происходила при горении в ГРК тлеющего разряда, при напряжении на её электродах порядка 400 В, а оптимальная работа дуоплазматрона с ПС катодом происходила при горении в ГРК дугового разряда, при напряжении на её электродах порядка 120 В;

- в дуоплазматроне с ОЦММ катодом при токах разряда  $50 \div 60$  А и напряжении экстракции  $\sim 40$  кВ ток пучка составлял  $100 \div 150$  мА, а в источнике с ПС катодом при том же напряжении экстракции те же токи пучка достигались при токах разряда  $20 \div 40$  А. Поэтому в пучке ионов водорода, формируемом источником с ПС катодом, процентное содержание протонов составило  $50 \div 70$  %. Тогда как в источнике с ОЦММ катодом  $60 \div 80$  %;

- срок службы дуоплазматронов с ненакаливаемыми катодами по сравнению с дуоплазматроном с накаливаемым катодом вырос с 60 до 1000 часов;

- газовая экономичность у дуоплазматрона с накаливаемым катодом в три-четыре раза выше, чем у дуоплазматрона с ОЦММ катодом и на порядок, чем у дуоплазматрона с ПС катодом.

В результате проведённых исследований показано, что для применения в инжекторах ионных ускорителей использование ОЦММ катода в дуоплазматроне предпочтительнее, поскольку определяющими параметрами являются: качество пучка, газовая экономичность, протонная составляющая в пучке. В тоже время для применения в технологических установках может оказаться предпочтительным применение дуоплазматрона с ПС катодом., когда на первый план могут выйти такие качества, как энергетическая эффективность, простота изготовления и эксплуатации.

Развитием дуоплазматрона с ОЦММ катодом стал ионный источник с ненакаливаемым магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы в области эмисси-

онного отверстия. Его отличительные конструктивные черты. Отсутствие промежуточного электрода. Наличие ОЦММ катода из шести камер с конусным окончанием (рисунок 2).

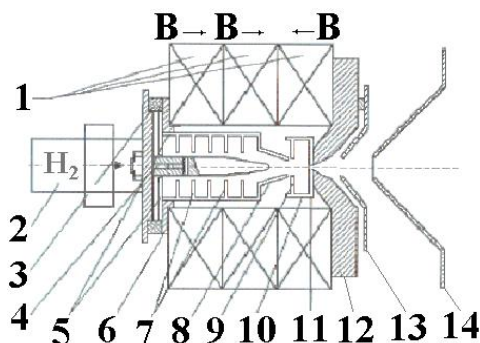


Рисунок 2 Конструктивная схема ионного источника: 1 – кольцевые феррит-баритовые магниты, 2 – электромагнитный клапан для импульсного напуска газа, 3 – кольцевой керамический изолятор, 4 – анод магнетрона, 5 – «обойма» катода магнетрона, 6 – опорное центрирующее кольцо, 7 – катодные диафрагмы, 8 – конусная вставка магнетронного катода, 9 – анодная диафрагма, 10 – защитный экран, 11 – коллимирующая диафрагма, 12 – эмиссионный электрод, 13 – конусная диафрагма экспандера, 14 – вытягивающий электрод.

Неоднородное магнитное поле в области эмиссионного отверстия формируется кольцевыми FeBa магнитами, поле в которых направленно встречно. ОЦММ катод представляет собой газоразрядную систему с последовательно включенными магнетронными ячейками, а область у анода магнетрона представляет собой последовательно соединённые ячейки Пеннинга. Конусная диафрагма, разделяющая магнетронную область и область сжатия разряда, играет роль сжимающего электрода, преобразуя плазменный поток из кольцевой формы в цилиндрическую, тем самым делая проникающую в область основного разряда плазму более однородной в радиальном направлении. Такое построение ГРК по сравнению с дуоплазматронами с ОЦММ и ПС катодами позволило увеличить газовую экономичность источника до  $666,5 \div 933,1 \text{ Па}\cdot\text{см}^3/\text{имп.}$ , приблизив её к газовой экономичности дуоплазматрона с накаливаемым катодом  $399,9 \div 666,5 \text{ Па}\cdot\text{см}^3/\text{имп.}$ , а также повысить его эмиссионную способность с 35 до  $45 \text{ А}/\text{см}^2$ .

В экспандер конусного типа с плавно изменяемым углом, создающим криволинейную поверхность стенок экспандера, вставлена конусная диафрагма. Она жёстко связана с эмиссионным электродом и находится под потенциалом анода. Применение конусной диафрагмы экспандера позволило через откачную щель между стенками экспандера и диафрагмы сбрасывать часть газа из области ускоряющего зазора, повысив этим электрическую прочность высоковольтного зазора с 45 до 75 кВ. Конусная диафрагма уменьшила площадь плазменного эмиттера ионов, снизив угловую расходимость ионного пучка, диаметр которого на расстоянии 15 см от последнего электрода ИОС уменьшился со 180 мм до 40 мм. В тоже время она «обреза» периферийные ионы, имеющие значительные поперечные скорости. Тем самым нормализованный эмиттанс пучка был уменьшен примерно на порядок (с  $1,4 \cdot 10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}\cdot\text{рад}$ ).

В импульсном режиме работы ( $F_{\text{сл.}} = 1 \div 10$  Гц;  $\tau_{\text{сл.}} = 0.1 \div 1$  мс) при токе основного разряда  $20 \div 60$  А и напряжении экстракции 45 кВ из источника извлекались пучки ионов водорода с током  $120 \div 300$  мА. Процентное содержание протонов в пучке доходило до 86 %. Предложенный источник ионов является источником ионов различных газов и в отличие от ионных источников с термоэмиссионными катодами может работать в агрессивных плазмообразующих средах, например, кислороде.

Разработанный источник ионов с ненакаливаемым магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы превосходит, описанный выше дуоплазмотрон с ОЦММ катодом, по газовой и энергетической экономичности, эмиссионной способности и качеству оптических характеристик извлекаемых ионных пучков, а также по простоте конструкции.

**В четвёртой главе** представлены результаты исследования источника ионов для получения многокомпонентных пучков газовых и металлических ионов. Его основу составляет электродная структура с ГРК на базе разряда Пеннинга с виртуальным антикатодом, работающего в режиме вакуумной моды, в которой рабочее вещество образуется как с помощью катодного распыления мишени (рисунок 3), так и путем ионизации плазмообразующего вещества электронным ударом в объеме ГРК.

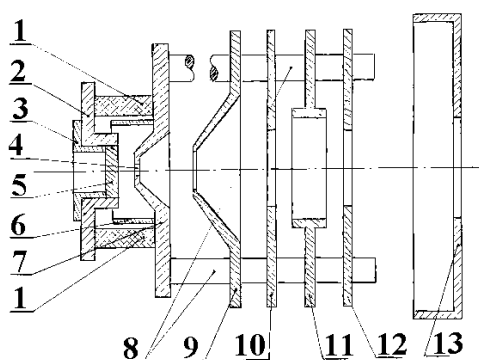


Рисунок 3 Конструкция источника: керамический изолятор; 2-катодный блок; 3-держатель диска-катада; 4-эмиссионное отверстие; 5-катод-диск; 6-экран изолятора; 7-анод; 8-керамические стержни; 9-ускоряющий электрод (экстрактор); 10-замедляющий электрод (земляной электрод линзы); 11-центральный (фокусирующий) электрод одиночной электростатической линзы; 12-земляной электрод линзы; 13-экран.

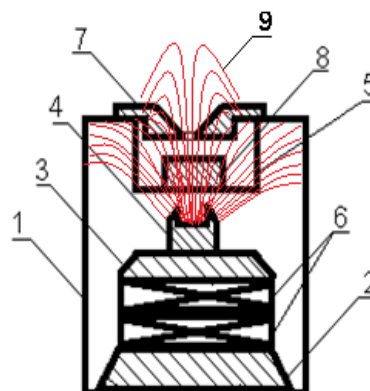


Рисунок 4 Магнитная система источника: 1 – цилиндрический корпус магнитной системы, 2 – нижний концентратор, 3 – верхний концентратор, 4 – цилиндрический концентратор, ГРК источника, 6 – постоянные магниты из  $\text{SaCo}_5$ , 7 – анод, 8 – катод, 9 – силовые линии магнитного поля.

При анализе конструкции нового ионного источника и сравнении её с классическим пеннинговским источником с продольным извлечением было установлено

основное отличие данной конструкции – отсутствие антикатада. В рассматриваемой конструкции антикатод является виртуальным. Его функции выполняет поверхность в промежутке анод - ускоряющий электрод (экстрактор), имеющая потенциал катода газоразрядной камеры. От этой поверхности происходит отражение наиболее быстрых электронов, выбитых из катода и не успевающих отдать энергию, приобретенную в катодном слое. Третья особенность заключается в том, что эмиссионная поверхность «не привязана» к какому-либо электроду, а располагается в промежутке анод-экстрактор. Четвёртое обстоятельство, которое нужно учитывать при рассмотрении процессов в источнике - отсутствие диафрагмы, которая бы обеспечивала резкий перепад давления между областью генератора плазмы и областью экстракции первичного формирования пучка.

Ввиду того, что подача плазмообразующего газа происходит со стороны катода, максимальное давление его будет наблюдаться в промежутке катод-анод, в ускоряющем промежутке анод-экстрактор оно будет спадать. Поэтому основная область генерации ионов находится между катодом и анодом. Области и условия образования потоков электронов, осуществляющих ионизацию газа в газоразрядной камере, определяются конструктивными особенностями, рассматриваемого в данной работе ионного источника. Его газоразрядная ячейка помещена в «веерное» магнитное поле с пробочным отношением  $2000\text{Гс}/120\text{Гс}$  (рисунок 4), силовые линии которого расходятся от катода к аноду. Такое распределение магнитного поля создаёт у катода область скрещенных электрического и магнитного полей.

Разработанный источник ионов может работать при питании как от двух источников (ГРК и ускоряющий промежутки), так и от одного источника питания.

Геометрия катодных дисков и электродов ГРК, конфигурация силовых линий магнитного поля и режимы работы источника ионов позволяют получать поток атомов из материала катода, как испарением в центре катодного диска, так и распылением на периферии катодного диска.

Слаботочный режим горения разряда соответствует магнетронному режиму работы источника, когда плазменная граница находится в области анодного отверстия. Интенсивный режим горения разряда соответствует отражательному режиму работы источника, когда плазма через анодное отверстие проникает в ускоряющий промежуток и формирует границу в виде «плазменного языка», являющуюся виртуальным антикатодом.

Для получения ионов металла предпочтителен магнетронный режим, для получения ионов газа отражательный.

Конструктивные и физические особенности разработанного ионного источника определяют следующие его достоинства. Источник имеет довольно высокую эмиссионную способность. В непрерывном магнетронном режиме работы при токе разряда  $10\text{ мА}$  и диаметре анодного отверстия  $3\text{ мм}$  ток пучка ионов металла составил  $\sim 250\text{ мкА}$ , при общем токе пучка  $\sim 470\text{ мкА}$ . В непрерывном режиме работы

ток пучка ионов газа составил  $\sim 2.5$  мА при токе пучка ионов металла  $\sim 120$  мкА. В импульсном режиме работы ток пучка ионов газа достигал десятков миллиампер.

В источнике используется холодный катод магнетронного типа, позволяющий ему работать со всеми газами, в том числе с химически активными.

Из источника были получены пучки ионов следующих элементов:  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ , He, Ne, Ar, Xe, Al, Cu, В, С, Zr, Mo, W, Ta, Ti, Cr, Y, Pb, Nb, Co, Fe.

Время непрерывной работы источника определяется временем распыления примерно  $70 \div 80\%$  массы катода и составляет сотни амперчасов.

Применённая ионно-оптическая система с ускорением-замедлением, позволила фокусировать ионный пучок и управлять его энергией  $o$  в диапазоне от 1 до 100 кэВ без заметного изменения его характеристик.

**В пятой главе** приведены примеры применения, разработанных ионных источников, в ускорительной технике и пучково-плазменных технологических установках.

Для создания комплекса по наработке радионуклидов, применяемых в изготовлении медицинских радиофармпрепаратов, в Сухумском Физтехе проводились работы по модернизации линейного ускорителя протонов на энергию 16 МэВ и средний ток пучка  $\sim 100$  мА. Для этого ускорителя был разработан новый инжектор протонов, на базе источника ионов водорода с ненакаливаемым магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы у эмиссионного отверстия, который был описан в третьей главе. По сравнению с дуоплазматроном с накаливаемым катодом применявшемся в этом инжекторе у него значительно увеличен ресурс работы с 60 до 1000 часов, формируемый им ток пучка увеличен в два раза со 150 до 300 мА, протонная компонента пучка выросла с 60 до 80 %. В тоже время по сравнению с дуоплазматроном с полым катодом, планировавшемся для замены дуоплазматрона с накаливаемым катодом в этом инжекторе, у предложенного источника значительно снижено напряжение зажигания разряда с 2000 до  $600 \div 800$  В, а также расход плазмообразующего газа с  $6666,12$  Па·см<sup>3</sup>/имп. до  $666,5 \div 933,1$  Па·см<sup>3</sup>/имп.

На базе источника формирующего многокомпонентные пучки ионов газа и металла описанного в четвёртой главе был создан технологический комплекс по нанесению покрытий методом ионно-лучевого распыления. Основными элементами комплекса являются ионный источник и пучково-плазменный реактор, помещённые в вакуумную камеру установки. Предлагаемый технологический пучково-плазменный комплекс рассчитан на обработку деталей небольшого размера и применения в нём инжекторов ионов, формирующих одноапертурные пучки диаметром не более двадцати миллиметров. Пучково-плазменный реактор устанавливается на передвижную площадку напротив ионного источника. Площадка перемещается электродвигателями вакуумного исполнения в двух направлениях: поперек и вдоль ионного пучка. Конструкция пучково-плазменного реактора представляет собой корпус, в виде параллелепипеда размером  $(100 \times 70 \times 40)$  мм, изготовленного из

нержавеющей стали. Внутри корпуса реактора, изолированно от него, располагается обрабатываемый образец и две распыляемые пластины под углом по направлению к ионному пучку. На пластинах размещается распыляемый материал. Обрабатываемый образец может вращаться реверсивно с помощью электродвигателя вакуумного исполнения.

К настоящему времени на разработанном комплексе, выполнены исследования по повышению срока службы катодов ионно-плазменных двигателей космических летательных аппаратов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты диссертационной работы можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Разработаны и исследованы новые перспективные конструкции катодных узлов с полым сотовым катодом и обращённым цилиндрическим многокамерным магнетронным катодом. За счёт увеличения площади эмитирующей поверхности и увеличения индукции магнитного поля удалось в магнетронном катоде понизить напряжение возбуждения и поддержания разряда (с 500 до 300 В) и снизить расход плазмообразующего газа (с 1600 до 667 Па·см<sup>3</sup>/имп.).

2. Разработан и исследован дуоплазматрон с магнетронным многополостным катодом и реверсивным магнитным полем, в котором роль сжимающего электрода выполняет конусная насадка на катоде, а плазменная граница формируется в экспандере с газопроницаемыми стенками и диафрагмой, отсекающей периферийные ионы, увеличивающие эмиттанс формируемого пучка.

3. Разработан и исследован ионный источник с ГРК на базе ячейки Пеннинга с виртуальным антикатодом, роль которого выполняет граница плазмы, проникающий в ускоряющий промежуток.

4. Показано, что управляя положением виртуального антикатада, можно реализовать два режима работы источника: режим с отражательным разрядом, когда в формируемом ионном пучке преобладают газовые ионы, и режим с магнетронным разрядом, когда формируется многокомпонентный ионный пучок, содержащий газовые ионы и ионы материала катода.

5. Разработан аналитический измерительный комплекс, позволяющий измерять параметры ионных пучков при работе ионных источников, как в непрерывных, так и в импульсных режимах.

6. Разработана и применена на практике оригинальная методика определения эмиттанса и диаграммы эмиттанса с помощью прибора, в котором для визуализации элементарных пучков использовано явление люминисценции кварцевых стекол, легированных редкоземельными элементами.

7. Разработаны и апробированы подходы к конструированию измерителей массового состава ионных пучков, позволяющих определять компонентный состав ионного пучка даже в режиме одиночных импульсов.

8. Разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию технологический кластер для модификации поверхности потоками заряженных частиц и плазмы.

9. Разработана и испытана плазменная ловушка оригинальной конструкции, применение которой позволило отказаться от азотной ловушки, а также проводить с ее помощью финишную ионную очистку внутрикамерной арматуры.

10. На базе выполненных исследований разработаны образцы ионных источников и диагностической аппаратуры, используемые в настоящее время в Сухумском физико-техническом институте и НИИ ЭФА им Д.В. Ефремова.

11. Материалы диссертации используются в отделе линейных ускорителей ГНЦ ИФВЭ (Протвино Московской области) при проведении работ по модернизации инжектора линейного ускорителя.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации.**

#### **Публикации, входящие в перечень ВАК:**

1. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Скрипаль Л.П. Прибор для измерения параметров ионного пучка круглого сечения, позволяющий оценивать эмиттанс пучка за импульс. // Журнал технической физики. 1997. Т.67. Вып. 9. С. 135.

2. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Дзкуя М.И. и др. Прибор для анализа состава многокомпонентных ионных пучков. // Журнал технической физики. 2000. Т.70. Вып. 3. С. 66 – 68.

3. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Литвинов П.А. Исследование ионного источника, предназначенного для пучковых технологий. // Журнал технической физики. 2000. Т.70. Вып.4. С. 111 – 117.

4. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Дзкуя М.И. и др. Исследование холодных катодов плазменных источников, генерирующих пучки ионов водорода. // Журнал технической физики. 2001. Т.71. Вып. 10. С. 50 – 53.

5. Вересов Л.П., Вересов О.Л. Ионный источник с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы. // Журнал технической физики. 2003. Т.73. Вып. 10. С. 122 – 129.

6. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Чачаков А.Ф. Источник ионов водорода с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы. // Журнал технической физики. 2006. Т.76. Вып. 1. С. 132 – 135.

7. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Кушакевич Ю.П., Петров Г.Ф., Чачаков А.Ф., Цеквава И.А. Пучково-плазменный технологический комплекс для модификации поверхности конструкционных материалов // Вакуумная техника и технология, 2008, том 18, №4, С. 249-259.

#### **Другие публикации:**

8. Barchenko V.T., Veresov L.P., Veresov O.L. and Grigorenko S.V. Plasma Ion Source for Modification of Materials (Плазменный источник ионов для модификации

поверхности материалов) // 5<sup>th</sup> Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk. 2000. P. 220 – 223.

9. Барченко В.Т., Вересов О.Л. Плазменный источник ионов технологического назначения. // Материалы IX конференции по физике газового разряда. Рязань. 1998. Часть 2. С. 71 – 72.

10. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Чачаков А.Ф. Инжектор протонов на базе источника ионов с холодным магнетронным катодом и магнитным сжатием плазмы. // Труды XI Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине С.-Пб., 10-14 октября 2005, С. 307 – 310.

11. Вересов О.Л., Григоренко С.В., Межов И.И., Цыганков С.С. Пучково-плазменная установка для нанесения наноструктурированных покрытий. // Труды 8<sup>ой</sup> Международной конференции «Плёнки и покрытия – 2007», С Пб., 22 – 25 мая 2007, С. 267 – 269.

12. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Кушакевич Ю.П., Петров Г.Ф., Чачаков А.Ф., Цеквава И.А. Пучково-плазменный технологический комплекс для модификации поверхности конструкционных материалов. // Материалы семинара «Вакуумная техника и технология», том 18, Номер 2, 2008, С. 64 – 66.

13. Барченко В.Т., Вересов Л.П., Вересов О.Л. и др. Установка для модификации конструкционных материалов потоками заряженных частиц и плазмы. // Труды 7<sup>ой</sup> Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия», Москва, 2 – 3 декабря 2008, С. 149 – 153.

14. Вересов О.Л., Григоренко С.В., Удовиченко С.Ю. Комплекс пучковых технологий для модификации поверхности конструкционных материалов. // Сборник докладов: Завалишинские чтения. СПб, ГУАП, 2008, С. 42 – 47.

15. Барченко В.Т., Вересов Л.П., Вересов О.Л. Плазменно-пучковый комплекс для модификации поверхности потоками заряженных частиц и плазмы. // Труды III Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан-Удэ, 23 – 30 июня 2009, С. 122 – 125.

16. Магнетронное нанесение покрытий на внутренние и внешние цилиндрические поверхности. Вересов Л.П., Вересов О.Л., Кушакевич Ю.П., Хупория А.Л., Чачаков А.Ф. // Труды 10-ой Международной конференции «Пленки и покрытия-2011», Санкт-Петербург, 31 мая-3 июня 2011 г., С. 217-219.

17. Барченко В.Т., Вересов Л.П., Вересов О.Л. Технологический кластер для модификации поверхности потоками заряженных частиц и плазмы. Инновационные технологии в машиностроении // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 35-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 19-20 октября 2011г., С. 18.