

**На правах рукописи**

**Рябчиков Игорь Александрович**

**Формирование ионных потоков из плазмы  
короткоимпульсными потенциалами смещения**

**01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**Томск, 2006 г.**

**Работа выполнена в Томском политехническом университете**

**Научный руководитель:** доктор технических наук,  
профессор Усов Юрий Петрович.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор  
Щанин Пётр Максимович,  
ИСЭ СО РАН, г. Томск.

доктор технических наук, профессор  
Окс Ефим Михайлович,  
ТГУСУР, г. Томск.

**Ведущая организация:** Институт электрофизики УрО РАН, г.  
Екатеринбург.

**Защита состоится «    » апреля в 15 часов на заседании  
диссертационного совета**

**Д 212.269.05 Томского политехнического университета по адресу:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а, ФГНУ НИИ ЯФ**

**С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Томского политехнического университета.**

**Автореферат разослан «    » марта 2006 г.**

**Учёный секретарь  
Диссертационного совета**  
кандидат физико-математических наук

Кононов В.К.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

Ионные пучки и плазменные потоки находят всё более широкое применение в технологиях модификации поверхностных свойств материалов. В то же время применение ионной имплантации (ИИ) для модификации свойств металлических и диэлектрических материалов ограничивается малой толщиной модифицируемого слоя и сложностью технической реализации обработки промышленных изделий с развитой поверхностью.

Практически значимые результаты применения ионной имплантации для направленного изменения свойств материалов появились в результате развития метода плазменно-иммерсионной ионной имплантации (ПИИИ, или ПИ<sup>3</sup>). Для реализации ПИ<sup>3</sup>, в основном, используется плазма различных газов. Хорошо развиты теоретические и численные модели, описывающие процессы у поверхности потенциального электрода, погружённого в газовую плазму. Металлическая плазма непрерывной вакуумной дуги, обеспечивающая возможность ионной имплантации многих элементов периодической системы и их композиций, к моменту начала исследований, в силу ряда причин не получила должного развития в плазменно-иммерсионном подходе. Считалось, что применение коротких по длительности импульсов для реализации плазменно-иммерсионного подхода энергетически неэффективно и, соответственно, исследований в этой области не проводилось. Возможность использования короткоимпульсных потенциалов смещения на детали, погруженные в плазму для разработки методов высокочастотной, короткоимпульсной ПИ<sup>3</sup>, обеспечивающей возможность ионной обработки как проводящих, так и диэлектрических материалов, с реализацией режимов «чистой» ИИ, высококонцентрационной ИИ и ионно-ассистированного осаждения покрытий, сделали эту задачу актуальной.

Актуальной также является задача разработки нового метода и соответствующего оборудования для измерения зарядового и массового

состава плазмы, в основе которых лежит применение короткоимпульсных потенциалов смещения.

## **Цель работы**

Установление основных закономерностей процессов формирования ускоряющего зазора вблизи поверхности потенциального электрода, погружённого в поток плотной металлической плазмы и характеристик формируемого ионного потока для широкого диапазона изменения параметров плазмы (концентрации и скорости плазменного потока, зарядового и массового состава ионов) и системы извлечения ионов (длительности, амплитуды и частоты следования импульсов ускоряющего напряжения, диэлектрических свойств мишени, геометрических параметров и др.), а также разработка новых методов ионной и плазменной обработки материалов и диагностики плазмы.

## **Научная новизна**

1. Проведено моделирование магнитных полей системы вакуумно-дуговой испаритель – плазменный фильтр с целью оптимизации распределения магнитных полей. Экспериментально показано, что применение дополнительной магнитной катушки обеспечивает возможность снижения тока по электродам электромагнитного плазменного фильтра жалюзийного типа в 3 раза с соответствующим снижением энергозатрат при одновременном увеличении эффективности прохождения плазменного потока через фильтр на 30%.
2. Экспериментально и численным моделированием установлены закономерности динамики изменения ускоряющего зазора и энергетического спектра ионов в зависимости от амплитуды импульса отрицательного потенциала смещения, его длительности, частоты следования и параметров плазменного потока.
3. Предложен и разработан метод короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки проводящих и диэлектрических материалов в условиях компенсации накапливаемого на

поверхности мишени положительного заряда в паузах между импульсами потенциала смещения электронным потоком из плазмы. Показано, что использование высокой частоты следования импульсов ( $f\tau \rightarrow 1$ ) обеспечивает не только увеличение интенсивности ионной обработки мишени, но и позволяет применять короткие по длительности (порядка десятков и сотен наносекунд) импульсы потенциала смещения без существенного снижения эффективности использования ускоряющего потенциала.

4. Предложены способ измерения спектра ионов и времяпролётный плазменно-иммерсионный спектрометр ионов. Экспериментально показана возможность исследования зарядового и массового состава плазмы практически любых элементов. Экспериментально исследовано влияние длительности и амплитуды импульса ускоряющего напряжения, геометрических и других параметров системы на чувствительность и разрешающую способность спектрометра. Определены условия, обеспечивающие наилучшее разрешение спектрометра.
5. Показана возможность использования метода короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки материалов для реализации режимов ионно-ассистированного осаждения плазмы, высококонцентрационной ионной имплантации и «чистой» ионной имплантации, а также для реализации всех этапов технологического процесса ионной и плазменной обработки материалов, включая очистку, активацию поверхности, обеспечение необходимого температурного режима, формирование переходного слоя и осаждения малодефектных покрытий с ионным ассистированием на любые материалы, включая диэлектрики.
6. На основании комплекса проведённых исследований создана установка нового поколения для ионно-лучевой и плазменной обработки материалов, включающая в себя импульсно-периодический источник ионов и плазмы «Радуга-5», 6 вакуумно-дуговых испарителей,

оснащённых модернизированными электромагнитными плазменными фильтрами, высокочастотный короткоимпульсный генератор потенциалов отрицательного смещения.

### **Основные результаты работы, выносимые на защиту**

1. Оптимизация конструкции электромагнитного плазменного фильтра, позволяющая повысить эффективность транспортировки плазменного потока на 30% при снижении потребляемой мощности в 3 раза.
2. Зависимости энергетического спектра ионов, динамики формирования ускоряющего зазора от амплитуды импульса отрицательного потенциала смещения, его длительности и частоты следования, параметров плазмы и характеристик мишени.
3. Метод короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки проводящих и диэлектрических материалов.
4. Применения метода короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки проводящих и диэлектрических материалов.
5. Способ измерения спектра ионов и времяпролётный плазменно-иммерсионный спектрометр ионов.
6. Установка нового поколения для ионно-лучевой и плазменной обработки материалов.

### **Научная и практическая значимость работы**

1. Оптимизация конструкции электромагнитного плазменного фильтра позволила повысить эффективность транспортировки плазменного потока на 30% при снижении потребляемой мощности в 3 раза.
2. Полученные зависимости энергетического спектра ионов, динамики формирования ускоряющего зазора от амплитуды импульса отрицательного потенциала смещения, его длительности и частоты следования, параметров плазмы и характеристик мишени вносят существенный вклад в создание общей картины процессов формирования

потоков ионов в плазменно-иммерсионном подходе и позволяют сформулировать условия реализации технологических процессов модификации поверхности проводящих и диэлектрических материалов.

3. Предложенный и разработанный метод короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки материалов позволяет реализовать режимы ионной имплантации, высококонцентрационной ионной имплантации, а также ионно-ассистированного осаждения покрытий из плазмы как на проводящие, так и на диэлектрические мишени.
4. Предложенный и разработанный способ измерения спектра ионов и времяпролётный плазменно-иммерсионный спектрометр ионов позволяет исследовать зарядовый и массовый состав плазмы практически любых материалов.
5. Созданная установка нового поколения для ионно-лучевой и плазменной обработки материалов обеспечивает реализацию широкого спектра технологических режимов модификации поверхностных свойств материалов ионной имплантацией и плазменным осаждением малодефектных покрытий.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 5-й, 6-й и 7-й международных конференциях по модификации свойств материалов пучками заряженных частиц и плазменными потоками (Томск, Россия, 2000, 2002, 2004); международном совещании РВИ2003 (San Antonio, USA, 2003); международной конференции ION2004 (Kazimierz Dolny, Польша, 2004); 8-м международном совещании по плазменно-иммерсионной имплантации (Chengdu, Китай, 2005); международной конференции по ионным источникам ICIS'05 (Caen, Франция, 2005); международной конференции по модификации поверхности материалов ионными пучками SMMIB'05 (Kusadasi, Турция); международной конференции по Физике и химии высокоэнергетических систем (Томск, Россия, 2005); международной

конференции по взаимодействию излучения с твёрдым телом (Минск, Беларусь, 2004); конференции по наноструктурам и наноматериалам (Tsukuba, Япония, 2005).

## **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 22 работы в научных журналах и трудах конференций (см. список публикаций в конце автореферата), в том числе 4 работ в реферируемых научных изданиях, получено 2 патента.

## **Структура и объём**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 149 страниц, работа содержит 72 рисунка и одну таблицу. Список цитируемой литературы включает 136 источников.

## **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, ставятся цели работы, формулируются основные результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе литературных данных даётся обзор теоретических и экспериментальных исследований процессов формирования ускоряющего промежутка у поверхности потенциального электрода, погружённого в плазму, способов применения плазменно-иммерсионного подхода для реализации различных режимов обработки материала. Отмечается, что процессы, протекающие в короткий промежуток времени после подачи импульса отрицательного потенциала смещения на мишень, не рассматриваются детально. Кратко рассмотрены также наиболее известные способы реализации плазменно-иммерсионного подхода с использованием плазмы газов, а также металлической плазмы вакуумной дуги. Обсуждаются известные модели, описывающие формирование и релаксацию ускоряющего промежутка и полученные результаты.

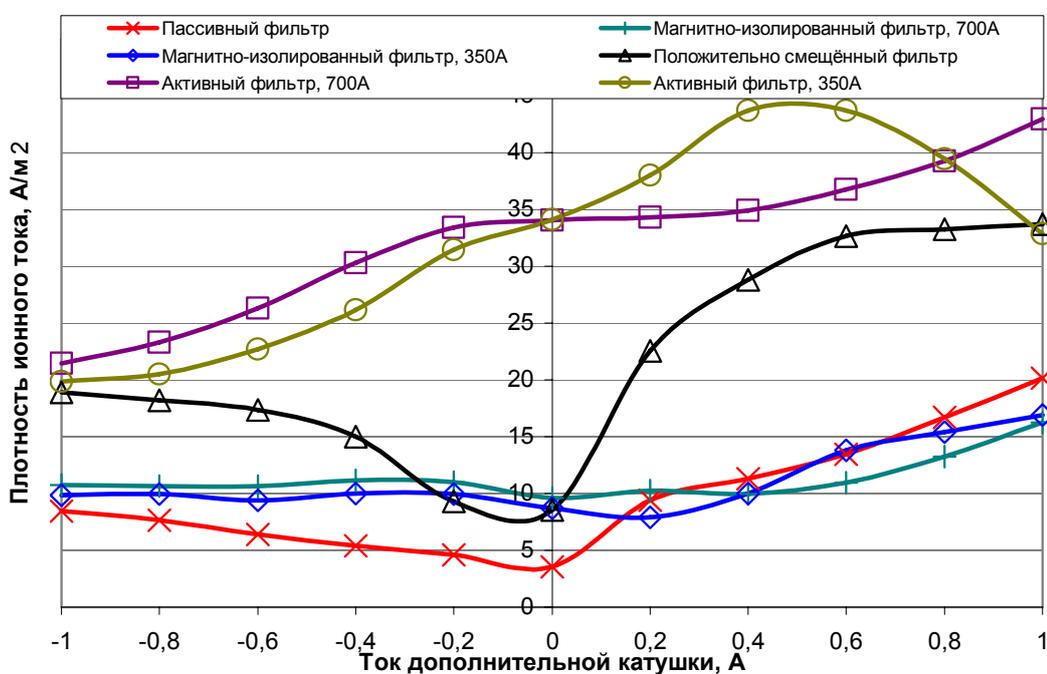
**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальной установки, методик проведения измерений и исследований. Описываются приборы и методы измерения потенциала на поверхности образца, энергетического спектра ионов, поверхностных характеристик и свойств материалов и

покрытий. Поскольку большая часть экспериментов в работе проведена с использованием плазмы вакуумной дуги, очищенной от микрокапельной фракции, одним из ключевых элементов экспериментальной установки является плазменный фильтр жалюзийного типа.

На рис. 1 представлены результаты моделирования магнитных полей в области фильтра с использованием дополнительной катушки на выходе фильтра.



**Рис. 1. Распределение магнитного поля в дуговом испарителе и в области фильтра при включении дополнительной катушки, расположенной на выходе фильтра**



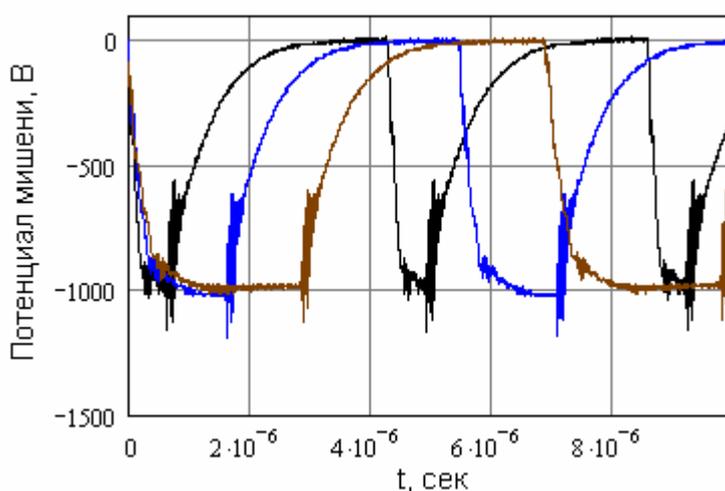
**Рис. 2. Зависимость плотности ионного тока из плазмы от тока в дополнительной катушке, на расстоянии от фильтра 9 см.**

Экспериментальные зависимости плотности ионного тока из плазмы от тока в дополнительной катушке для различных режимов работы плазменного фильтра представлены на рис. 2 ( $\varphi_{см} = 12$  В).

В целом, показано, что оптимизация магнитных полей в области фильтра позволяет не только повысить прозрачность фильтра для плазмы на 30% и эффективность транспортировки плазменного потока до обрабатываемой мишени, соответственно, на  $30 \div 100\%$ , но и снизить мощность, потребляемую системой фильтров в три раза.

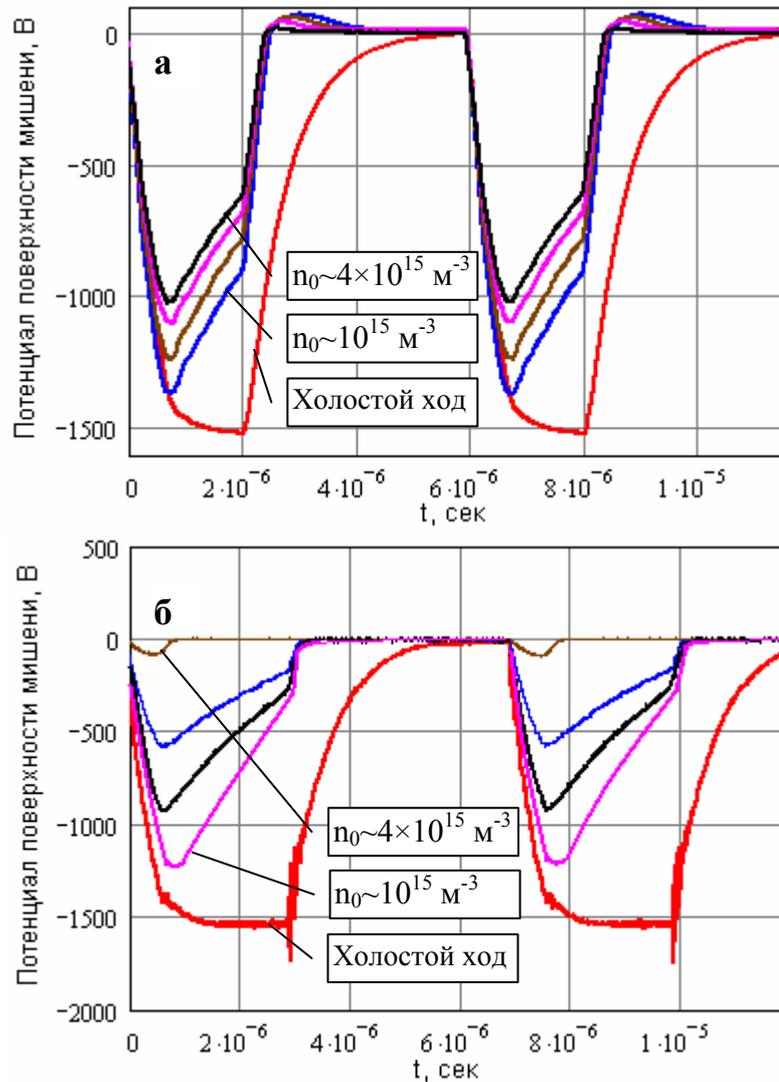
**В третьей главе** описывается физическая модель процессов формирования ускоряющего промежутка у поверхности потенциального электрода. В отличие от существующих моделей, рассматривается случай, когда мишень погружена в направленный поток плазмы вакуумной дуги. Рассматриваются особенности процессов как для проводящих, так и для диэлектрических мишеней.

Экспериментально исследуется влияние длительности, амплитуды и частоты следования импульсов ускоряющего напряжения, а также параметров плазмы и характеристик мишени. Характерные осциллограммы потенциала металлической мишени для различных длительностей импульса подаваемого на мишень потенциала смещения представлены на рис.3.



**Рис. 3. Осциллограммы потенциала металлической мишени для различных длительностей импульса**

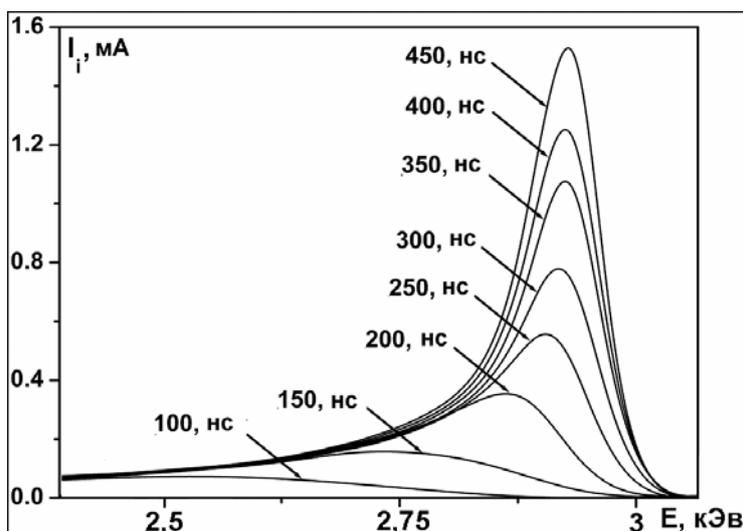
Рис. 4 демонстрирует изменение потенциала поверхности керамической (а) и стеклянной (б) мишеней в течение импульса приложенного потенциала смещения для различных концентраций плазменного потока.



**Рис. 4. Осциллограммы потенциала поверхности стекла (а) и ситала (б) при различных значениях концентрации плазмы**

Экспериментально показана возможность использования биполярного синусоидального потенциала смещения для реализации плазменно-иммерсионного подхода применительно к плазме вакуумно-дугового разряда для ионно-плазменной обработки металлических и диэлектрических образцов.

На рис. 5 представлены энергетические спектры двухзарядных ионов титана для импульсов потенциала смещения амплитудой 1,5 кВ с различной



**Рис. 5 Энергетический спектр двухзарядных ионов титана для импульсов ускоряющего напряжения амплитудой 1,5 кВ с различной длительностью**

полученной распылением титановой мишени высокоинтенсивным ионным пучком с плотностью тока  $300 \text{ А/см}^2$  при энергии ионов водорода и углерода до 350 кэВ и длительности импульса 90 нс, показано, что применение коротких по длительности импульсов потенциала смещения на мишень позволяет значительно увеличить амплитуду потенциала смещения, по сравнению с постоянным (-60 В). При длительности импульса 3 мкс ( $f = 160 \text{ кГц}$ ) не наблюдались пробои при повышении потенциала смещения до -250 В. Снижение длительности импульса потенциала смещения до 1 мкс обеспечило возможность увеличения потенциала до -2 кВ.

В главе приводятся также результаты численного моделирования процессов, сопровождающих формирование ускоряющего промежутка. Показано, что экспериментальные результаты и результаты численного моделирования хорошо согласуются.

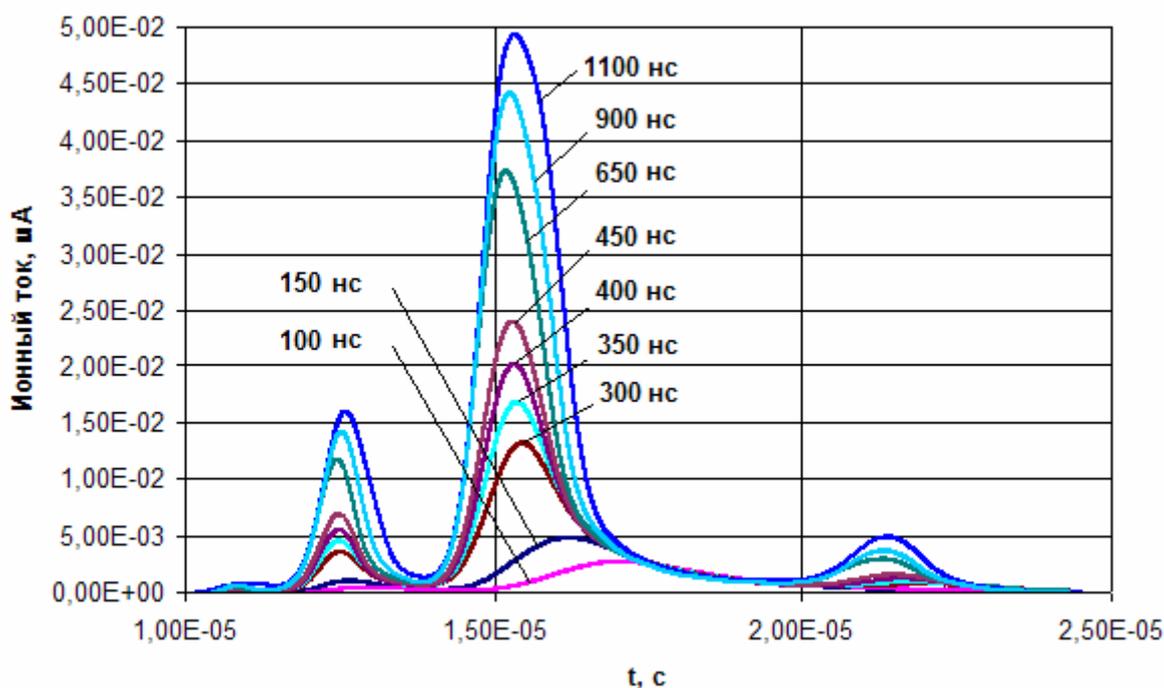
[Четвёртая глава посвящена описанию концепции нового способа измерения спектра ионов и спектрометра зарядового и массового состава плазмы на его основе. Метод предусматривает совместное использование](#)

длительностью, полученные с использованием плазменно-иммерсионного подхода времяпролётным методом.

Представленные данные демонстрируют существенное влияние длительности импульса потенциала смещения на среднюю энергию ионов.

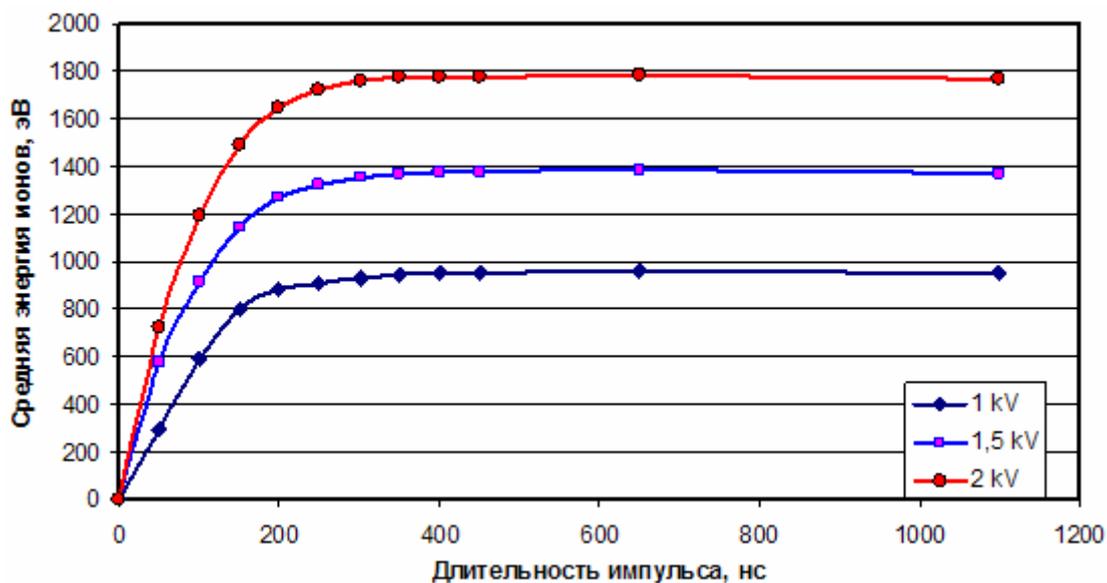
В экспериментах с абляционной плазмой,

плазменно-иммерсионного формирования ионного потока вблизи входной сетки трубы дрейфа, последующего времяпролётного разделения ионов по массам и зарядовым состояниям и дополнительной обработки полученных сигналов тока в цепи цилиндра Фарадея, установленного на выходе трубы дрейфа. Параметры трубы дрейфа и импульса потенциала смещения выбираются таким образом, чтобы исключить торможение ионов между трубой дрейфа и цилиндром Фарадея.

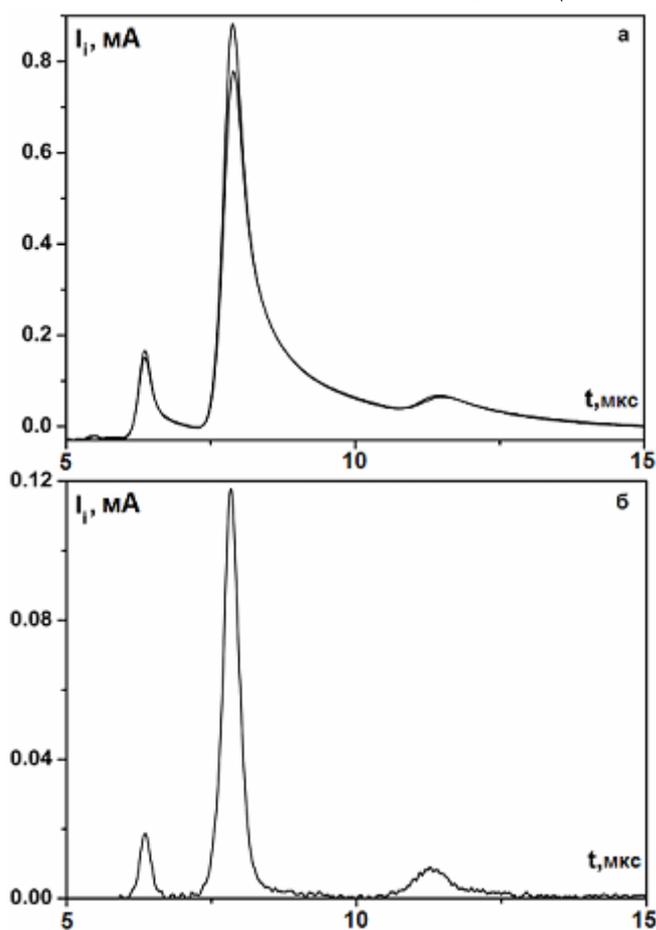


**Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока для различных длительностей импульса ускоряющего напряжения**

На рис. 6 представлены осциллограммы импульсов тока ионов титана на выходе трубы дрейфа длиной 0,89 м и диаметром 0,1 м, полученные при различных длительностях импульса потенциала смещения амплитудой -0.5 кВ. Рис. 7 демонстрирует рост средней энергии двухзарядных ионов титана с увеличением длительности импульса для различных значений амплитуды потенциала смещения. В целом, исследования влияния длительности импульса потенциала смещения на разрешающую способность спектрометра показали, что этот параметр играет существенную роль и оптимальным является значение длительности импульса, близкое, но существенно не превышающее время формирования стационарного слоя разделения зарядов для данной конкретной плазмы.



**Рис. 7. Зависимости энергии, соответствующей максимуму пика двухзарядных ионов титана для различных значений амплитуды отрицательного потенциала смещения, от длительности импульса потенциала смещения**



**Рис. 8. Осциллограммы сигнала для импульсов длительностью 300 и 325 нс (а) и результат вычитания этих осциллограмм (б)**

Наилучшие значения полуширины пика были получены с использованием дополнительной процедуры. Как следует из данных рис. 5 и 6, низкоэнергетичная часть спектра совпадает для осциллограмм, полученных с использованием импульсов смещения различной длительности. Это означает, что динамический процесс расширения слоя разделения зарядов и формирования ускоряющего зазора для импульсов различной длительности протекает одинаково. Это позволило выделить часть спектра, относящуюся к определённому интервалу времени

в течение импульса ускоряющего напряжения, находя разность осциллограмм, полученных при длительностях импульса, соответствующих верхней и нижней границе исследуемого временного интервала. На рис. 8(а) представлены осциллограммы, полученные для титановой плазмы при использовании импульса ускоряющего напряжения амплитудой -2 кВ с длительностями 300 и 325 нс.

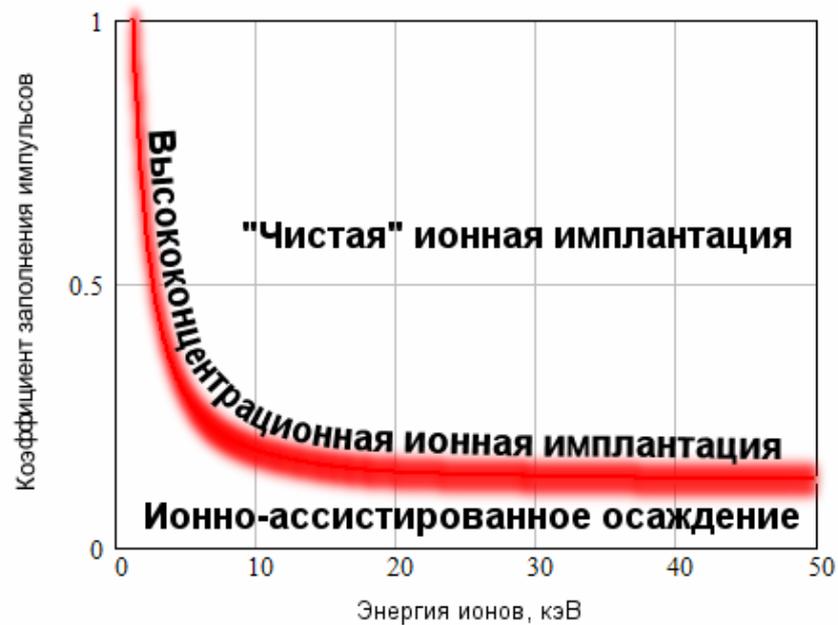
На рис. 8 (б) представлен результат вычитания этих осциллограмм. Как видно из представленных данных, ширина пиков измеренного тока существенно снижается, результат не содержит низкоэнергетичной части спектра.

[В главе рассмотрены основные факторы, влияющие на характеристики спектрометра, обсуждается степень их влияния, а также область применимости спектрометра для исследования зарядового и массового состава плазмы различных материалов.](#)

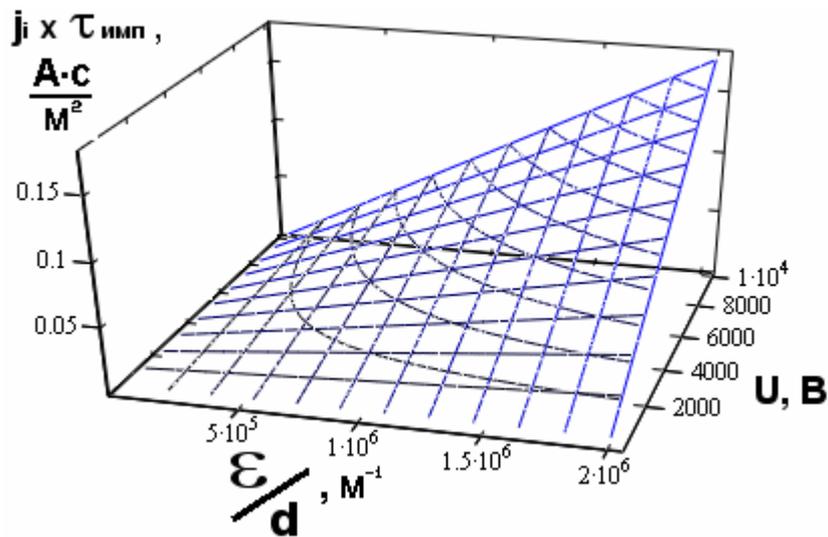
[В пятой главе](#) рассматриваются возможности применения метода короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки материалов с различным коэффициентом заполнения импульсов для реализации ионного ассистирования осаждения покрытий, ионной обработки материала без осаждения покрытий с компенсацией ионного распыления осаждением плазмы и «чистой» ионной имплантации в материалы различной проводимости. Рис. 9 демонстрирует области реализации различных режимов обработки металлических мишеней с учётом коэффициента распыления материала медной мишени.

На рис. 10 представлена диаграмма, характеризующая эффективность применения метода для обработки диэлектрических мишеней. Поверхность определяет режим, при котором средняя энергия ускоренных ионов достигает половины произведения амплитуды ускоряющего напряжения на заряд иона. Область большей эффективности лежит под поверхностью, положение которой определяется, с одной стороны, произведением плотности ионного тока из плазмы на длительность импульса ускоряющего

напряжения, с другой стороны, отношением диэлектрической проницаемости мишени к её толщине, а также амплитудой потенциала смещения.



**Рис. 9. Области реализации режимов обработки материалов**

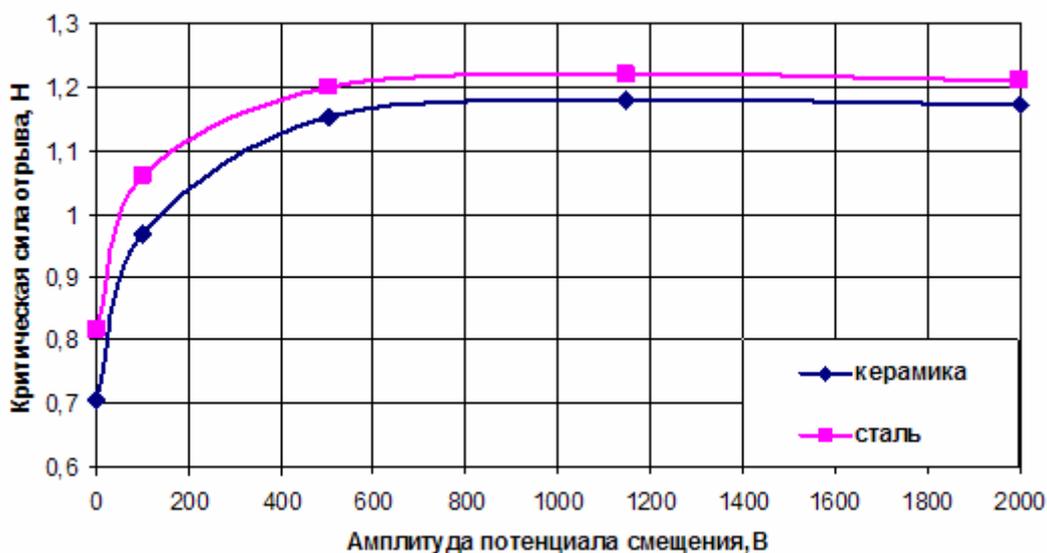


**Рис. 10. Область эффективности метода применительно к диэлектрическим мишеням**

Рисунок показывает, что метод может быть реализован как с использованием плотной плазмы, позволяющей извлекать ионный ток с плотностью в десятки и сотни  $A/cm^2$ , при длительности импульса в десятки, или сотни наносекунд, так и редкая плазма, обеспечивающая ионный ток плотностью в единицы и доли миллиампер, однако при этом длительность импульса может быть без потери эффективности увеличена до десятков микросекунд.

Экспериментально исследованы зависимости поверхностных свойств керамических и металлических мишеней после их обработки от амплитуды и коэффициента заполнения импульсов потенциала смещения.

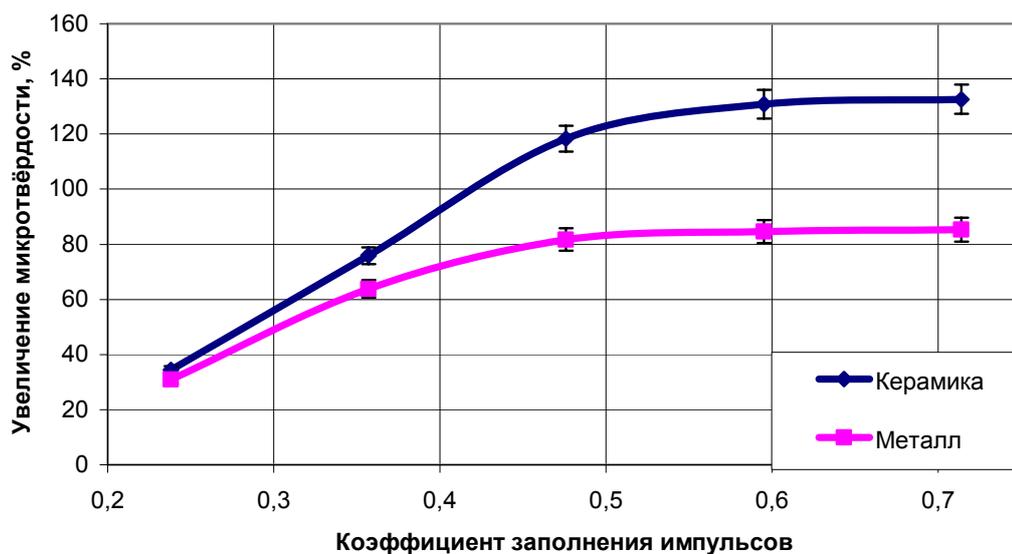
На рис. 11 представлена зависимость адгезионной прочности титанового покрытия толщиной  $\sim 1$  мкм на металлической и керамической мишени от амплитуды импульса потенциала смещения длительностью 2,5 мкс с частотой следования 165 кГц ( $f\tau = 0.42$ ).



**Рис. 11. Зависимость критической силы отрыва нанесённого на металлические и керамические образцы покрытия от амплитуды потенциала смещения**

Увеличение микротвёрдости поверхности керамических и металлических образцов с ростом коэффициента заполнения импульсов потенциала смещения амплитудой -1 кВ демонстрирует рис. 12.

В главе приводятся также результаты исследования шероховатости наносимых покрытий. В целом, демонстрируется существенное улучшение поверхностных свойств материалов.



**Рис. 12. Увеличение микротвёрдости поверхности керамических и металлических мишеней в зависимости от коэффициента заполнения импульсов потенциала смещения**

[В заключении приводятся основные результаты работы.](#)

### Основные результаты работы

1. Предложен и разработан метод короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки проводящих и диэлектрических материалов. Экспериментально и численным моделированием установлены закономерности динамики изменения ускоряющего зазора и энергетического спектра ионов в зависимости от амплитуды импульса отрицательного потенциала смещения, его длительности, частоты следования и параметров плазменного потока. Экспериментально и численно продемонстрирована возможность применения короткоимпульсных потенциалов смещения для ионной обработки диэлектрических мишеней в условиях компенсации накапливаемого на поверхности мишени положительного заряда в паузах между импульсами потенциала смещения электронным потоком из плазмы. Показано, что использование высокой частоты следования импульсов ( $f\tau \rightarrow 1$ ) обеспечивает не только увеличение интенсивности ионной обработки мишени, но и позволяет применять короткие по

длительности (порядка десятков и сотен наносекунд) импульсы потенциала смещения без существенного снижения эффективности использования ускоряющего потенциала. На примере титановой плазмы исследовано влияние режимов короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной и плазменной обработки материалов на макроскопические характеристики покрытия, наносимого на диэлектрические и проводящие мишени. Показана возможность использования метода для реализации режимов ионно-ассистированного осаждения плазмы, высококонцентрационной ионной имплантации и «чистой» ионной имплантации, а также для реализации всех этапов технологического процесса ионной и плазменной обработки материалов, включая очистку, активацию поверхности, обеспечение необходимого температурного режима, формирование переходного слоя и осаждения малодефектных покрытий с ионным ассистированием.

2. Предложен способ измерения спектра ионов и времяпролётный плазменно-иммерсионный спектрометр ионов. Экспериментально показана возможность исследования зарядового и массового состава плазмы практически любых элементов. Экспериментально исследовано влияние длительности и амплитуды импульса ускоряющего напряжения, геометрических и других параметров системы на чувствительность и разрешающую способность спектрометра. Определены условия, обеспечивающие наилучшее разрешение спектрометра.
3. Проведено моделирование магнитных полей системы вакуумно-дуговой испаритель – плазменный фильтр с целью оптимизации распределения магнитных полей. Экспериментально показано, что применение дополнительной магнитной катушки обеспечивает возможность снижения тока по электродам электромагнитного плазменного фильтра жалюзийного типа в 3 раза с соответствующим снижением энергозатрат при одновременном увеличении эффективности прохождения плазменного потока через фильтр до 30%.

4. На основании комплекса проведённых исследований создана установка нового поколения для ионно-лучевой и плазменной обработки материалов, включающая в себя импульсно-периодический источник ионов и плазмы «Радуга-5», 6 вакуумно-дуговых испарителей, оснащённых модернизированными электромагнитными плазменными фильтрами, высокочастотный короткоимпульсный генератор с током нагрузки до 20 А в импульсе и автоматизированную систему управления параметрами технологического процесса.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. И.Б. Степанов, С.В. Дектярев, А.И. Рябчиков, И.А. Рябчиков, Д.О. Сивин, И.А. Шулепов, “Комплексное оборудование для исследования покрытий и модифицированных слоёв материалов, сформированных на основе методов ионно-лучевого и ионно-плазменного воздействия”, *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск (2002)*, 649-653.
2. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, “Recent advances in surface processing with filtered DC vacuum-arc plasma”, *J. Vacuum* **78** (2005), 445-449.
3. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, “Development of filtered DC metal plasma ion implantation and coating deposition methods based on high frequency short-pulsed bias voltage application”, *J. Vacuum* **78** (2005), 331-336.
4. А.И. Рябчиков, И.А. Рябчиков, И.Б. Степанов, “Способ импульсно-периодической имплантации ионов и плазменного осаждения покрытий”, патент RU №2238999, приоритет от 19.02.2003, БИ №30 (2004).
5. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, “High-frequency short pulsed metal plasma immersion ion implantation using filtered DC vacuum arc plasma (part I)”, *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск (2004)*, 134-137.

6. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, "High-frequency short pulsed metal plasma immersion ion implantation using filtered DC vacuum arc plasma (part II)", *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск* (2004), 138-141.
7. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, "Experimental Investigation Of Repetitively-Pulsed And Plasma Material Treatment Using A Dc Vacuum Arc", *Books of Abstracts of the International Workshop on Plasma Based Ion Implantation, San Antonio, USA* (2003), 75.
8. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, "Numerical Simulations Of Coating Deposition Processes And High Frequency Plasma Immersion Ion Treatment Of Materials Using A Dc Vacuum Arc", *Books of Abstracts of the International Workshop on Plasma Based Ion Implantation, San Antonio, USA* (2003), 76.
9. И.А. Рябчиков, Ю.П. Усов, "Метод высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации", *Сборник материалов I Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск* (2005), 333-335.
10. I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, "Development of Plasma-Immersion Ion Implantation and Coating Deposition Methods Based on High Frequency Short-Pulsed Bias Voltage Application", *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Physical Fields, Tsukuba, Japan* (2005), 165-172.
11. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, "High Frequency Short-Pulsed Plasma-Immersion Ion Implantation and Deposition", *Book of Abstracts of the 14<sup>th</sup> International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams, Kusadasi, Turkey* (2005), 72.
12. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, A.A. Sinebryukhov, S.V. Dektyarev, "High-Current Vacuum Arc Ion source for Ion Implantation and Coating Deposition Technologies", *Books of Abstracts of the 11<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, Caen, France* (2005), 200.

13. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, "Pulsed plasma-immersion surface processing", *Proceedings of V-th International Conference "Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons" Poland, Kazimierz Dolny (2004)*, 235.
14. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, YU.P. Usov, "High-Frequency Short-Pulsed Metal Plasma-Immersion Ion Implantation Using Filtered DC Vacuum-Arc Plasma", *Book of Abstracts of the 8<sup>th</sup> International Workshop on Plasma-Based Ion Implantation and Deposition. Chengdu, China, (2005)*, 36.
15. А.И. Рябчиков, И.А. Рябчиков, "Экспериментальное исследование импульсно-периодической ионной и плазменной обработки различных материалов с использованием непрерывной вакуумной дуги", *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск (2002)*, 571-577.
16. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, A.A. Sinebryukhov, "Plasma Immersion Ion Charge State and Mass Spectrometer", *Rev. Sci. Instrum.* **77** (2006).
17. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, YU.P. Usov, "New approaches to Plasma Diagnostics", *Book of Abstracts of the 8<sup>th</sup> International Workshop on Plasma-Based Ion Implantation and Deposition. Chengdu, China (2005)*, 36.
18. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, A.A. Sinebryukhov, "Plasma Immersion Ion Charge State and Mass Spectrometer", *Books of Abstracts of the 11<sup>th</sup> International Conference on Ion Sources, Caen, France (2005)*, 205
19. А.И. Рябчиков, И.А. Рябчиков, "Моделирование процессов нанесения покрытий и высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной обработки материалов с использованием непрерывной вакуумной дуги", *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск (2002)*, 578-582.

20. А.И. Рябчиков, И.А. Рябчиков, И.Б. Степанов, “Способ измерения спектра ионов и времяпролётный спектрометр ионов”, патент RU №2266587, приоритет от 23 июля 2004, БИ 20 декабря 2005, №35.
21. A.I. Ryabchikov, I.A. Ryabchikov, I.B. Stepanov, A.A. Sinebryukhov, S.V. Dektyarev, “High-Current Vacuum Arc Ion source for Ion Implantation and Coating Deposition Technologies”, *Rev. Sci. Instrum.* **77** (2006).
22. A.I. Ryabchikov, I.B. Stepanov, S.V. Dektyarev, I.A. Shulepov, E.I. Lukonin, “Technological Possibilities of “Raduga-5” DC Vacuum Arc Source of Accelerated Ions and Plasma”, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск* (2000), 489-493.