На правах рукописи

Степанов Игорь Борисович

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ИОННОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Работа выполнена в ГОУ ВПО "Национальный исследовательский "Томский политехнический университет"

Научный консультант:	доктор физико-математических наук, профессор		
	Рябчиков Александр Ильич		
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, с.н.с.		
	Гаврилов Николай Васильевич		
	доктор технических наук, профессор		
	Ремнев Геннадий Ефимович		
	доктор технических наук, ведущий научный		
	сотрудник Юшков Георгий Юрьевич		
Ведущая организация:	ГОУ ВПО "Томский государственный университет		
	систем управления и радиоэлектроники"		

Защита состоится «28» декабря 2010 года в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05 ГОУ ВПО "Национальный исследовательский "Томский политехнический университет" по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 2, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Национальный исследовательский "Томский политехнический университет".

Автореферат разослан «____» ____ 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите Докторских и кандидатских диссертаций

Кожевников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Модификация поверхностных слоев материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы активно исследуется в последние десятилетия и представляет собой одно из важнейших направлений развития науки и техники. Существенно расширяется область использования ионно-лучевых и ионно-плазменных методов, как в научных исследованиях, так и в ряде практических применений.

способов поверхностной модификации Среди материалов широкое распространение получил метод плазменного осаждения покрытий на основе непрерывной вакуумной дуги. С целью решения проблемы ухудшения свойств формируемых покрытий из-за микрокапельной фракции в потоке вакуумно-дуговой плазмы, разработан целый ряд модификаций плазменных фильтров, обеспечивающих высокую эффективность очистки плазмы от микрочастиц, но представляющих собой достаточно сложные конструкции, обладающие ограниченной эффективностью прохождения плазмы и в силу этого, не получивших широкого распространения до настоящего времени. Такие плазменные фильтры практически не представляется возможным использовать в системах формирования пучков ионов металлов на основе непрерывной вакуумной дуги.

Существенное развитие в последние годы получил метод плазменноиммерсионной ионной имплантации. Наиболее часто он используется для ионного азотирования поверхностных слоев различных металлов. В абсолютном большинстве случаев плазменно-иммерсионная имплантация осуществляется при постоянных или импульсных 0,1-10 мс потенциалах смещения на мишени, погруженной в плазму. В ряде работ показана возможность и перспективность использования не только газовой, но и импульсной металлической плазмы в условиях применения достаточно короткоимпульсных потенциалов смещения. Преимущества плазменноиммерсионного метода ионной имплантации и (или) осаждения покрытий в условиях ионного ассистирования обусловлены возможностью однородной обработки деталей сложной формы, простотой технической реализации. В то же время плазменноиммерсионная имплантация практически не используется для модификации свойств диэлектриков, например, для изменения их поверхностной проводимости, поскольку при длинных или постоянных потенциалах смещения в диэлектриках накапливается значительный заряд и, как следствие, вблизи его поверхности происходит торможение ионов или возникает поверхностный пробой, разрушающий структуру материала. Большая длительность потенциала смещения ограничивает и возможность применения традиционных подходов к плазменно-иммерсионному формированию ионного потока при высоких концентрациях плазмы, например, в случае абляционной плазмы, формируемой воздействием мощных электронных, ионных пучков или лазерного излучения на поверхность твердого тела.

Развитие методов и технологий ионно-лучевой модификации металлов и сплавов и их практическое использование определяется, прежде всего, разработкой конструктивно простых, высокопроизводительных, с большим ресурсом работы ионных источников, в том числе легко встраиваемых в системы ионно-плазменного осаждения покрытий. В большинстве случае для получения пучков ионов металлов используется плазма импульсно-периодического вакуумно-дугового разряда. В виду

значительной доли микрокапельной фракции в плазме непрерывной вакуумной дуги, несмотря на её привлекательность с точки зрения создания ионных пучков высокой средней мощности, такие источники не получили своего развития, также как источники ионов металлов ленточного типа для модификации поверхности протяженных деталей.

В связи с вышеизложенным, тематика диссертационной работы, связанная с созданием и исследованием компактных фильтров для очистки плазмы непрерывной вакуумной дуги от микрокапельной фракции, разработкой метода короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий, с возможностью обработки диэлектриков, и импульсно-периодических и непрерывных источников ионов металлов аксиально-симметричных и ленточных пучков, как и новых систем диагностики плазмы, а также созданием на основе предложенных методов и оборудования комплексных установок нового поколения для ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов представляется актуальной.

Цель работы состояла в проведении исследований процессов генерации ионных потоков с использованием короткоимпульсных высокочастотных потенциалов смещения и многоэлектродных систем формирования пучков из плазмы газового разряда и непрерывного вакуумно-дугового разряда в условиях её очистки от микрокапельной фракции и создании на основе полученных результатов новых методов плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий, а также в разработке методов и оборудования для диагностики элементного состава и зарядового состояния ионов в плазме, в разработке ионных источников и систем очистки плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции, в создании серии установок для реализации комбинированных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые:

1. Предложены И разработаны прямоточные фильтры с аксиальносимметричными и плоскими электродами жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумной дуги от микрокапельной фракции. обеспечивающие непрерывной эффективность прохождения плазмы в пределах от 30 до 70 % при уменьшении количества микрочастиц в потоке плазмы в 10²-10³ раз. Определены основные закономерности влияния геометрических размеров и конфигурации электродов фильтра, условий магнитной изоляции электродов, величины положительного потенциала смещения на электродах, давления остаточного газа на параметры плазменного потока на выходе фильтра.

2. Предложены способы и устройство для измерения зарядового состояния и массового состава газовой и металлической плазмы на основе короткоимпульсного плазменно-иммерсионного извлечения ионов из плазмы, их транспортировки в эквипотенциальном пространстве трубы дрейфа с разделением на отдельные компоненты и последующей регистрацией импульсов тока. Определены основные закономерности влияния геометрических размеров трубы дрейфа, амплитуды и длительности потенциала смещения, давления газа, характеристик системы регистрации токовых импульсов на разрешающую способность спектрометра.

3. Предложен и разработан метод короткоимпульсной высокочастотной, с коэффициентом заполнения импульсов от 0,1 до 0,9, 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. Показана возможность использования метода для реализации широкого круга режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов, в том числе: нагрев образцов, очистка и активация поверхности, ионная имплантация, включая высококонцентрационную, формирования переходного слоя между основой и покрытием, осаждения покрытий с ионным ассистированием на материалы с различной проводимостью.

4. Показана возможность формирования импульсно-периодических и непрерывных аксиально-симметричных и псевдоленточных пучков ионов металлов из плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда в условиях фильтрации плазмы от микрокапельной фракции.

5. С использованием разработанных ионных источников, фильтрованной от микрочастиц вакуумно-дуговой плазмы и метода короткоимпульсной плазменноиммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий показаны: а) возможность формирования интерметаллидных систем Al–Ni, Al–Ti, Ti–Ni, Al–Fe на глубине до 2,6 мкм с достижением концентрации легирующей примеси до 60 % при дозе внедренных атомов $3,6\cdot10^{18}$ ион/см²; б) возможность формирования многослойных (TiAl)/TiN покрытий с наноразмерными слоями, обеспечивающих значительное увеличение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов; в) возможность формирования композиционного покрытия TiSiB с толщиной до 10 мкм, обеспечивающего повышение до 4 раз эрозионной стойкости образцов из сплава BT6, существенное повышение усталостной прочности при циклическом нагружении и до 20 раз сопротивления солевой коррозии.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Разработана серия прямоточных электромагнитных плазменных фильтров с аксиально-симметричными электродами жалюзийного И плоскими типа. обеспечивающих высокую эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока и высокую степень очистки вакуумно-дуговой плазмы от микрокапельной фракции. Компактная конструкция позволяет использовать плазменные фильтры как в технологических электродуговых испарителях, так и в ускорителях ионов металлов.

2. Полученные зависимости энергетического спектра ИОНОВ. динамики ускоряющего формирования зазора OT амплитуды импульса отрицательного потенциала смещения, его длительности и частоты следования, параметров плазмы и характеристик мишени существенно расширяют и дополняют преставление о физических процессах плазменно-иммерсионного формирования потоков ионов и позволяют сформулировать условия реализации технологических процессов модификации поверхности проводящих и диэлектрических материалов.

3. Предложенный и разработанный плазменно-иммерсионный времяпролетный спектрометр отличается простой и компактной конструкцией, обеспечивает измерение с высоким разрешением зарядового состояния и массового состава газовой и металлической плазмы и может быть использован для диагностики параметров плазмы в составе установок ионно-плазменного нанесения покрытий при проведении

экспериментальных исследований и отработке технологий ионно-плазменной модификации материалов.

4. Предложенный и разработанный метод короткоимпульсной высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий позволяет реализовать режимы традиционной и высококонцентрационной ионной имплантации, а также ионно-ассистированного осаждения покрытий на проводящие и диэлектрические мишени в широком диапазоне изменения концентрации плазмы.

5. Разработаны источники импульсно-периодических и непрерывных аксиально-симметричных и псевдоленточных пучков ионов металлов из плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда в условиях фильтрации плазмы от микрокапельной фракции, отличающиеся от известных устройств высокими техническими параметрами, надежностью, большим ресурсом работы и широкими функциональными возможностями. Источники предназначены для применения в технологиях ионной имплантации и ионно-ассистированного осаждения покрытий.

6. На основе разработанных ионных источников, фильтров для очистки плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции и метода короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий создана серия технологических комплексных установок нового поколения для реализации комбинированных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов. Установки доведены до стадии внедрения и нашли применение в технологиях ионной имплантации с формированием интерметаллидных систем Al–Ni, Al–Ti, Ti–Ni, Al–Fe с высокой концентрацией легирующей примеси, на глубине существенно превышающей проективные пробеги ионов, формирования многослойных (TiAl)/TiN покрытий с наноразмерными слоями, композиционного TiSiB покрытия с обеспечением значительного увеличения физико-механических и эксплуатационных свойств материалов.

Личный вклад автора в выполнение настоящей работы состоит В определяющей роли при инициировании и постановке задач большинства исследований, непосредственном участии в выполнении основных разделов работы, анализе и интерпретации полученных результатов, личном формулировании выводов и научных положений. Автор внес решающий вклад в разработку основных конструкционных решений представленного в работе экспериментального и технологического оборудования. Фамилии соавторов, принимавших участие в исследовании моделировании процессов, И разработках по отдельным направлениям, обсуждении результатов, указаны в списке основных публикаций по теме диссертационной работы.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Многоэлектродный, прямоточный аксиально-симметричный и плоскопараллельный плазменный фильтр жалюзийного типа с формированием вблизи электродов магнитного поля за счет пропускания по ним тока 300–1500 A и подачи на электроды положительного потенциала 10–20 В обеспечивает уменьшение количества микрокапель в потоке дуговой плазмы с широким поперечным сечением в 10^2-10^3 раз при 30–50 % эффективности прохождения заряженного компонента

плазмы. Однощелевая оптически непрозрачная жалюзийная система обеспечивает эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока до 70 %. Эффективность прохождения заряженного компонента плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда в плазменных фильтрах жалюзийного типа определяется геометрическими параметрам электродов, их расположением относительно направления распространения плазменного потока, величиной приложенного к ним положительного потенциала, а также топографией и величиной создаваемого в области плазменного фильтра магнитного поля.

2. Отрицательный потенциал наносекундной длительности, приложенный к эквипотенциальной трубе дрейфа. погруженной В плазму, обеспечивает формирование потока ионов вблизи мелкоструктурной сетки на её входе с динамически изменяющейся энергией ионов и эффективным пространственновременным их разделением по зарядовым состояниям и массе в процессе Разрешающая транспортировки. способность плазменно-эмиссионного спектрометра определяется геометрическими параметрами трубы дрейфа. давлением газа в области транспортировки ионного потока амплитудой и длительностью потенциала смещения, конфигурацией и структурой сеточного электрода на входе трубы дрейфа. Улучшение разрешающей способности спектрометра обеспечивается за счет вычитания осциллограмм импульсов ионного тока, полученных при различной длительности импульсов напряжения смещения.

3. Приложение коротких по длительности (0,5-9 мкс) импульсов потенциала смещения к мишени, погруженной в плазму, с частотой от 100 до 440 кГц и коэффициентом заполнения импульсов от 0,1 до 0,99, обеспечивает реализацию режимов ионной имплантации и осаждения покрытий в условиях ионного ассистирования как с проводящими, так и диэлектрическими мишенями при см⁻³. Метод ОТ 10^{8} ДО 10^{14} плазмы короткоимпульсной концентрации высокочастотной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий может быть реализован как с применением одно, так и биполярных потенциалов смещения. Измерение энергетического спектра ионов обеспечивает возможность определения времени стабилизации ионно-эмиссионной границы плазмы, определяющей начало формирования потока с максимальной энергией ионов. Для уменьшения требуемого максимального тока импульсного генератора передний фронт потенциала смещения по длительности должен быть соизмерим со временем стабилизации ионно-эмиссионной границы плазмы.

4. В случае применения диэлектрических мишеней ускоряющее ионы определяется разностью приложенного потенциала смещения напряжение И поверхности потенциала на диэлектрика, динамически изменяющегося В характеристик диэлектрика (толщина диэлектрическая зависимости ОТ И проницаемость), ионного тока, тока электронного смещения и тока вторичной ионно-электронной Для эффективного использования эмиссии. потенциала смещения его длительность не должна превышать время зарядки емкости, образованной в системе: плазма – диэлектрик – потенциальный электрод. Компенсация накапливаемого на поверхности диэлектрика положительного заряда осуществляется потоком электронов из плазмы в паузах между импульсами напряжения смещения.

5. Созданные на основе проведенных исследований источники, с использованием в качестве эмиссионной среды фильтрованной от микрокапельной фракции плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда, обеспечивают при ускоряющем напряжении до 40 кВ получение аксиально-симметричных и псевдоленточных пучков ионов металлов с длительностью от 400 мкс до непрерывных, с током до 2 А в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до 200 имп/с и 200 мА в непрерывном режиме. Источники предназначены для применения в технологиях ионной имплантации и ионно-ассистированного осаждения покрытий.

6. На основе разработанных фильтров для очистки плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции, метода короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий, металлов созданы комплексные установки, позволяющие источников ИОНОВ реализовать как традиционные технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов, так и новые технологии, такие как формирование: интерметаллидных систем Al \rightarrow Ni, Al \rightarrow Ti, Ti \rightarrow Ni, Al \rightarrow Fe с толщиной слоя до 2,6 мкм с достижением концентрации легирующей примеси до 60 % при дозе внедренных атомов 3,6·10¹⁸ ион/см²; многослойных (TiAlN)/TiN покрытий с наноразмерными слоями, композиционного покрытия TiSiB с толщиной до 10 мкм, обеспечивающие увеличение физико-механических и эксплуатационных свойств материалов.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается совпадением результатов, полученных при использовании различных методов измерения, и результатами аналитических расчетов. Подтверждением достоверности и обоснованности положений и выводов являются успешные испытания опытных образцов электрофизического оборудования и предложенных методов модификации свойств материалов, а также наличие патентов РФ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на III и IV конференциях "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц" (Томск, 1994, 1996), 12, 14 и 15 Международных конференциях по модификации поверхности ионными пучками (Германия, Марбург, 2001; Кушадасы, Турция, 2005, Мумбай, Индия, 2007), 18-м симпозиуме по физике плазмы и технологиям (Чешская Республика, Прага, 1997), 7, 8, 11 Международных конференциях по ионным источникам (Италия, Таормина, 1997; Япония, Киото, 1999; Франция, Ко, 2005), II и III Международных конференциях "Взаимодействие излучений с твердым телом" (Беларусь, Минск, 1997, 1999), 5 Международной конференции "Пленки и покрытия `98" (С-Петербург, 1998), 5-9 конференциях по модификации материалов пучками заряженных частиц и плазменными потоками (Томск, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008), 13 Международной конференции по пучкам частиц высокой энергии (Япония, Нагаока, 2000), 5 и 8 Русско-Корейском международных симпозиумах по науке и технологиям (Томск, 2001, 2004), XIII и XIV совещании "Радиационная Международном физика твердого тела (Украина, Севастополь, 2003), XV Международной конференции "Физика прочности и пластичности материалов" (Тольятти, 2003), V Международной конференции "Ионная имплантация и другие применения ионов и электронов" (Польша, Казимир Долни, Всероссийской конференции "Центры 2004), коллективного пользования

аналитическим оборудованием" (С-Петербург, 2004), XLIII Международной конференции "Актуальные проблемы прочности" (Беларусь, Витебск, 2004), 10-м Международном симпозиуме по перспективным физическим направлениям (Япония, Тсукуба, 2005), 8-м Международном совещании по ионной имплантации и осаждению покрытий с использованием плазмы (Китай, Ченгду, 2005), 5 Международной конференции "Ядерная и радиационная физика" (Казахстан, Алма–Ата, 2005), Всероссийской научно-технической конференции "Новые материалы и технологии НМТ-2006" (Москва, 2006), Российской научно-практической конференции "Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения (Томск, 2007, 2009).

Публикации. По теме работы опубликовано 95 работ, в том числе: 43 статьи и доклада в рецензируемых изданиях, получено 6 патентов РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и приложения, содержит 347 страниц машинописного текста, 162 иллюстрации, список литературы из 366 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цель, научная новизна и практическая значимость работы. Излагается краткое содержание диссертационной работы и формулируются выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований и тенденций развития в области разработки оборудования и методов ионно-лучевой и плазменной обработки материалов на основе плазмы вакуумно-дугового разряда. Рассмотрены конструктивные особенности вакуумно-дуговых генераторов плазмы и концептуальные подходы применения плазмы вакуумной дуги при разработке источников ионов проводящих материалов. Особое внимание уделено работам посвященным исследованию характеристик распространяющейся в потоке вакуумно-дуговой плазмы микрокапельной фракции, способам и устройствам очистки плазмы от микрочастиц.

Выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований, а также основных моделей процессов формирования и релаксации ускоряющего промежутка у поверхности потенциального электрода, погруженного в плазму.

На основе проведенного анализа показано, что к началу выполнения исследований по теме диссертационной работы в различных лабораториях мира предложено и разработано большое количество вариантов генераторов плазмы, в том числе с очисткой плазмы от МКФ. Предложены и реализованы методы формирования пучков ускоренных ионов из плазмы ВДР с использованием диодных систем и на основе плазменно-иммерсионного подхода. Разработанные генераторы плазмы и источники ионов обеспечивают реализацию широкого круга режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной модификации материалов, включая различные методы ИИ, осаждения покрытий, а также сочетающие режимы совместного воздействия на поверхность потока плазмы и ионов различной энергии.

В то же время интенсивное развитие методов ионно-лучевой и ионноплазменной обработки различных материалов предопределило необходимость решения следующих задач:

1. Разработка простых, надежных в эксплуатации, эффективных систем очистки плазмы ВДР от МКФ, которые могли бы использоваться как в составе генераторов плазмы, так и в ионных источниках.

2. Разработка и исследование источников ускоренных ионов и плазмы на основе генерации плазмы непрерывным ВДР с возможностью изменения среднего тока ионного пучка в широких пределах, обеспечивающих высокопроизводительную обработку материалов, отличающихся надежностью и большим ресурсом работы.

3. Разработка и исследование метода и оборудования плазменно-иммерсионного формирования ионного потока, обеспечивающих реализацию режимов комбинированной ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов с различной проводимостью.

4. Разработка оборудования для исследования зарядового состояния и массового состава низкотемпературной плазмы.

5. Выполнение научно-организационных мероприятий для организации комплексного исследования физико-механических свойств поверхностных и приповерхностных слоев материалов, подвергнутых воздействию потока плазмы и ионных пучков.

6. Разработка технологического оборудования для реализации комбинированных режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной модификации материалов.

Вторая глава посвящена адаптации традиционных и разработке новых экспериментальных методик и оборудования для диагностики параметров плазмы, ионных пучков И комплексного изучения физико-механических свойств модифицированных слоев материалов И покрытий, применительно К рассматриваемым в работе комбинированным режимам воздействия на поверхность одно- и многокомпонентной газометаллической плазмы и пучков ионов в широком энергетическом диапазоне.

На основе зондовых, коллекторных и калориметрических методов разработан

комплекс диагностического оборудования для измерения локальных и интегральных характеристик плазмы с концентрацией частиц до 10¹² см⁻³, с направленной скоростью распространения до $2 \cdot 10^4$ м/с, в том числе в магнитных полях с индукцией до 2·10⁻⁴ Т и ионных пучков с энергией до 160 кэВ, током ЛО 2 А с плошалью 700 CM^2 . поперечного до сечения области Определены условия И применимости оборудования.



Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Предложены способ и устройство для измерения зарядового состояния и массового состава газовой и металлической плазмы на основе короткоимпульсного плазменноиммерсионного извлечения ионов из плазмы, их транспортировки в эквипотенциальном пространстве трубы дрейфа (ТД) с разделением на отдельные компоненты и последующей регистрацией импульсов тока. Схема принципа работы плазменноиммерсионного времяпролётного спектрометра для исследования зарядового состояния и массового состава плазмы представлена на рис. 1.

Плазменно-иммерсионный времяпролетный спектрометр представляет собой ТД, установленную в вакуумной камере соосно с генератором плазмы. На входе ТД располагаются две сетки, формирующие ускоряющий зазор. Одна из сеток закреплена на ТД, другая заземлена. Сетки на входе и выходе ТД формируют внутри неё эквипотенциальное пространство. От источника импульсного смещения на ТД подается отрицательный потенциал амплитудой 0,5–2 кВ и длительностью 50–650 нс. Частота импульсов напряжения 20–30 имп/с. ЦФ располагался на расстоянии 10–30 мм от выхода ТД.

Коллектор находился под отрицательным потенциалом (50–100) В. С целью уменьшения электронного тока на коллектор между ним и дальним концом ТД располагался кольцевой магнит с индукцией $(1,5-3)\cdot10^{-2}$ Т. Минимальную длину ТД (*L*), необходимую для измерения энергетического спектра ионов массой $m_{ион}$ и максимальной зарядностью $Z_{макс}$, с использованием импульса напряжения амплитудой *U* и длительностью τ , можно оценить как:

$$L \ge \tau \cdot \upsilon = \tau \cdot \left(\sqrt{(2 \cdot Z_{Makc} \cdot e \cdot U) / m_{uoh}} + \upsilon_0 \right),$$

где υ_0 – проекция скорости направленного движения плазменного потока на ось ТД, или бомовская скорость для случая свободно расширяющейся плазмы. Исходя из параметров плазмы и импульса потенциала смещения, длина пролетной базы в различных экспериментах составляла 35, 61 и 89 см. Регистрация сигналов с ЦФ осуществлялась с помощью осциллографа LeCroy-6000A при статистическом усреднении по 200 осциллограммам. С целью исключения торможения ионов в зазоре между ЦФ и выходной сеткой ТД длительность импульса ускоряющего напряжения должна быть меньше времени пролёта самых быстрых ионов. Время пролета ионов в ТД можно оценить из выражения:

$$t_{u} = (L + L_{1}) \cdot m_{uoh}^{1/2} / (2Z_{uoh}eU + m_{uoh}v_{uoh}^{2})^{1/2},$$

где: $Z_{ион}$, $m_{ион}$, $\upsilon_{ион}$ – зарядовое состояние, масса и скорость ионов, U – ускоряющее напряжение, e – заряд электрона, L – длина ТД, L_1 – расстояние от выходной сетки ТД до коллектора ЦФ.

На рис. 2 показаны различные фазы формирования эмиссионной границы плазмы вблизи сеточного электрода на входе в ТД. Из рисунка следует, что структура сетки играет важную роль в динамическом процессе формирования ионного потока. На первом этапе формирования слоя разделения зарядов большая часть ионов, находящихся в ускоряющем промежутке, получает значительное радиальное приращение энергии, обусловленное искривлением линий напряжённости электрического поля



Рис. 2. Формирование эмиссионной границы плазмы вблизи сеточного электрода

вдоль нормали к поверхности нитей сетки. В этих условиях распределение ионов, миновавших сеточный электрод, близко к однородному по углам.

По мере расширения зазора эмиссионная граница плазмы приобретает всё более плоскую форму и радиальная составляющая электрического поля остаётся ненулевой

только в непосредственной близости к сетке. Это отражается и на угловом распределении ионов, пересекших ускоряющий зазор.

Наилучшие результаты получаются В случае стационарного состояния ускоряющего зазора, определяемого "трёх вторых", отношением если величина этого зазора много больше сетки¹. В экспериментах шага С различными сетками показано, что уменьшение размера ячейки сетки с 1 мм ДО 100 МКМ увеличило амплитуду регистрируемого сигнала в 2 раза при прозрачности сеток 0,8. Тем не менее, использование мелкоструктурной сетки полностью не позволило решить проблему высоких угловых скоростей проходящих ИОНОВ, ускоряющий промежуток в период динамического расширения зазора. Увеличения амплитуды сигнала с ЩΦ удалось достигнуть при использовании на входе спектрометра выпуклой сетки С радиусом кривизны, равным длине ТД. В результате фокусировки ионного потока сигнал с ЦФ возрос на 50 %.

Для снижения влияния динамики процесса расширения ускоряющего промежутка на энергетический разброс ИОНОВ было предложено ограничить промежутка ширину С помощью дополнительной заземлённой сетки. установленной перед потенциальным сеточным электродом на расстоянии чем ширина стационарного меньшем, зазора, определяемого отношением "трёх вторых". Так, например, при длительности



Рис. 3 Осциллограммы сигнала с ЦФ для Ті плазмы при амплитуде ускоряющего напряжения –2 кВ: а) длительность импульсов напряжения смещения 300 и 325 нс; б) результат вычитания осциллограмм, в) результат вычитания осциллограмм при использовании ограничивающей сетки на входе в ТД

¹ Рябчиков А.И., Дектярев С.В., Степанов И.Б. Особенности эмиссионных свойств импульсных широкопучковых источников ионов и плазмы на основе испарения металла вакуумной дугой // Известия вузов. Физика. – 1994. – Т. 37. – № 2. – С. 82–92.

импульса ускоряющего напряжения 200 нс, размещение дополнительной сетки на расстоянии 3 мм позволяет снизить полуширину пика до 270 нс.

Существенное улучшение разрешающей способности спектрометра достигается на основе предложенного метода вычитания осциллограмм ионного тока с коллектора, полученных при различной длительности импульсов напряжения смещения на ТД. Как следует из рис. За, для осциллограмм, полученных с использованием импульсов смещения длительностью 300 и 325 нс, динамический процесс расширения слоя разделения зарядов и формирования ускоряющего зазора протекает одинаково – низкоэнергетичная часть спектра совпадает. Следовательно, эта часть спектра может быть удалена путем вычитания осциллограмм. Результат вычитания осциллограмм представлен на рис. Зб. Видно, что ширина пиков существенно снижается – результат не содержит низкоэнергетичной части спектра. Экспериментально показано, что метод вычитания импульсов различной длительности позволяет провести детальное исследование энергетического спектра ионов и восстановить первоначальный спектр на входе в трубу дрейфа, поскольку снимается вопрос о моменте пересечения ионами потенциальной сетки ускоряющего промежутка. Чем меньшую длительность имеет исследуемый интервал времени, тем более точен получаемый результат.

Результат вычитания осциллограмм, полученных с использованием дополнительной заземлённой сетки, расположенной на расстоянии 3 мм от потенциальной сетки на входе в ТД, приведен на рис. Зв. Из представленных данных следует, что использование дополнительной сетки позволяет не только уменьшить ширину результирующих пиков до 170 нс, но и получить моноэнергетический пучок с энергией, близкой ZeU в интервале времени, когда в неограниченном зазоре процесс динамического расширения ещё не закончен. Несмотря на существенное снижение амплитуды полезного сигнала, при использовании дополнительной сетки, интегральные характеристики, определяющие отношение количества ионов разной зарядности в исходной плазме, остаются неизменными.

Очевидно, что ионы, отличающиеся по зарядовому состоянию, но имеющие одинаковую массу, характеризуются различной скоростью (как корень из отношения зарядностей ионов разного сорта), а потому могут быть без труда разрешены для практически любой плазмы. Оценим возможности спектрометра с точки зрения разрешения массового состава плазмы. Полагаем, что $ZeU >> (mv_0^2)/2$ (где *Z*, *m*, v_0 – зарядовое состояние, масса и скорость ионов, *e* – заряд электрона, *U* – амплитуда потенциала смещения). Отношение времени пролёта трубы дрейфа для ионов с одинаковой зарядностью, но различающихся по массе, будет определяться выражением:

$$\tau_1 / \tau_2 = \sqrt{m_1 / m_2}$$

Когда $m_2 > m_1$, ионы второго типа будут зарегистрированы на коллекторе через $\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1$ после ионов первого типа. По сути, $\Delta \tau$ определяет необходимое временное разрешение спектрометра для разделения частиц и может быть выражена, как:

$$\Delta \tau \leq \tau_1 \cdot \left(\sqrt{m_2 / m_1} - 1 \right) = L \left(\sqrt{m_2 / m_1} - 1 \right) / \sqrt{2 Z e U / m_1} ,$$

где *L* – длина пролетной базы.

Например, для Ti⁺ (A = 48) и его изотопа (A = 46) при U = -2 кВ и L = 0,9 м, $\Delta \tau = 211$ нс. Это означает, что полученное разрешение позволяет исследовать даже изотопный состав плазмы ионов одного материала с одинаковым зарядовым состоянием.

Примеры практического применения плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра представлены на рис. 4.



Рис. 4. Сигнал с цилиндра Фарадея: a) Ti; б) W; в) N₂; г) Аг

С использованием спектрометра проведено изменения зарядового состояния ионов металлической и газовой плазмы в зависимости от давления реакционного газа - азота. Эксперимнтально измеренные зависимости приведены на рис. 5.

Экспериментально показано, что разрешающая способность плазменноэмиссионного времяпролетного спектрометра определяется геометрическими параметрами трубы дрейфа, давлением газа в области транспортировки ионного потока амплитудой и длительностью потенциала смещения, конфигурацией и структурой сеточного электрода на входе трубы дрейфа.

Если спектрометр применяется для измерения зарядового и массового состава вакуумно-дуговой плазмы, отличающейся временной нестабильностью параметров, то для получения надежных результатов необходим статистический набор спектров. В этом случае на полуширину результирующего энергетического спектра ионов будет оказывать влияние и статистический разброс амплитуды ускоряющего напряжения спектрометра, в том числе и в условиях изменяющейся от импульса к импульсу ионной нагрузки генератора. Для устранения этого влияния необходимо применять генератор импульсного напряжения с высокой стабильностью и слабой зависимостью выходного напряжения от тока нагрузки.

Ha разрешающую способность спектрометра влияет начальный И энергетический разброс ионов в плазме. Например, когда направление распространения плазмы вакуумной дуги совпадает с осью спектрометра, необходимо учитывать, что энергетический разброс составляет ИОНОВ в плазме несколько десятков эВ². Для уменьшения влияния на спектрометра разрешение начального энергетического разброса ионов следует ускоряющее применять напряжение U >> W / Ze \overline{W} -(где средняя энергия направленного движения ионов в плазме).

Влияние на энергетический спектр ИОНОВ может оказывать И пространственный заряд пучка. В случае фактора необходимо выявления ЭТОГО использовать дополнительную систему зарядовой нейтрализации пучка в ТД, или уменьшить его ток до величины, при которой продольное провисание потенциала, не будет оказывать существенного влияния на энергию ионов.



Рис. 5. Зависимости изменения зарядового состояния ионов для газовой и металлической плазмы от давления азота в камере: а) в процентном соотношении; б) в абсолютном значении

Наконец, при оптимизации разрешающей способности спектрометра необходимо учитывать геометрические параметры системы. При длине пролетной базы L и диаметре входной апертуры Dна выходе ТД будет наблюдаться размытие энергетического спектра ионов примерно на $D/L \cdot 100$ %. Это обусловлено тем, что ионно-оптическая система допускает движение ионов в ТД как параллельно оси, так и под углом $\alpha \approx D/L$. Снизить влияние этого фактора позволяет коллимирование и фокусировка пучка или увеличение амплитуды потенциала смещения на ТД.

Влияние пролетной базы на перезарядку ионов исследовано в эксперименте с Ті плазмой для ТД длиной 61 и 35 см. Результаты измерений при давлении азота 0,01–1 Па позволяют сделать вывод, что варьирование длины пролетной базы не влияет на зарядовое состояние ионного потока. Следовательно, перезарядка ионов происходит во время дрейфа плазмы от катода вакуумно-дугового испарителя до входа в плазменно-иммерсионный спектрометр.

В целом, экспериментальные исследования подтвердили высокую разрешающую способность плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра, позволяющего, в совокупности с предложенными методиками обработки результатов измерений, определять зарядовое состояние ионов с точностью до десятых – сотых

² Лунев В.М., Падалко В.Г., Хороших В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // ЖТФ. – 1977. – Т. 7. – С. 1486–1495.

долей процента, а массовый состав плазмы с чувствительностью до 1 а.е.м. ($\Delta \tau = 50-200$ нс). Внешний вид разработанного времяпролетного плазменно-иммерсионного спектрометра с системой питания представлен на рис. 6.

Во второй главе также обосновывается необходимость проведения комплексных исследований свойств материалов и установления взаимосвязи их изменения от совокупности условий и режимов ионнолучевого и ионно-плазменного воздействия



Рис. 6. Внешний вид спектрометра

при отработке технологий модификации свойств материалов. Сформирован комплекс аналитического оборудования и методик измерения физико-механических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев материалов и покрытий, обеспечивающий высокую достоверность измерения элементного состава и физико-механических характеристик ионно-модифицированных материалов и покрытий в диапазоне: элементный состав с чувствительностью 0,1–0,5 ат. %, с разрешением по глубине 0,5–1 нм; морфология поверхности с разрешением до 1 нм; толщина покрытий 0,1–50 мкм; твердость 0,1–100 ГПа и модуль упругости 10–1000 ГПа с разрешением по вертикали 0,3 нм; адгезионная прочность 0,01–30 Н; коэффициент трения в диапазоне 0,01–1 с погрешностью 0,005; износ 10⁻²–10⁻¹⁰ мм³H⁻¹м⁻¹. Определяются условия и области применимости оборудования и методик исследования.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований основных закономерностей формирования очищенных от микрокапельной фракции потоков вакуумно-дуговой плазмы в оптически непрозрачных системах жалюзийного типа. Принцип работы ПФ с плоскопараллельными электродами продемонстрирован на рис. 7.

Очистка плазмы вакуумно-дугового разряда (ВДР) от микрокапельной фракции $(MK\Phi)$ осуществляется В результате взаимодействия макрочастиц с оптически непрозрачными электродами ΠФ B направлении распространения плазменного Распространение заряженного потока. компонента плазмы реализуется в условиях жалюзийные на электроды подачи 10 - 20положительного потенциала B И пропускания по электродам тока 300-1500 А. К наиболее важным характеристикам



Рис. 7. Схема принципа работы ПФ

ПФ относятся эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока и степень очистки плазмы от МКФ. Соответствующие коэффициенты (η) и (ξ), определяются, как: $\eta = I_{nn\phi}/I_{nn}$ и $\xi = N_{nn}/N_{nn\phi}$, где $I_{nn\phi}$, I_{nn} – ионный ток насыщения из плазмы на коллектор, а $N_{nn\phi}$, N_{nn} , число частиц, зарегистрированных на поверхности образца при наличии и в отсутствии ПФ.

Экспериментально показано, что эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока зависит от геометрических параметров электродов (длины электродов L и ширины межэлектродного промежутка h), рис. 8, угла поворота электродов относительно направления распространения плазменного потока α , подаваемого на электроды положительного смещения U, а также величины, направления и конфигурации магнитного поля в межэлектродных промежутках ПФ, формируемого при пропускании по электродам тока (I) и достигает для однощелевой системы электродов 70 %, рис. 9.

Предложено и исследовано несколько вариантов многоэлектродных ПФ для очистки плазменных потоков с широким поперечным сечением, включая плоскопараллельную конструкцию, конструкцию с изменяющемся углом поворота электродов относительно направления распространения плазменного потока, с электродами, выполненными в виде поверхностей второго порядка, с электродами из постоянных магнитов, а также аксиально-симметричных фокусирующих и дефокусирующих систем электродов, рис. 10 и рис.11.



Рис. 8. Эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока в зависимости от длины электродов (L) и ширины межэлектродного промежутка (h) в условиях оптической непрозрачности системы: I - L = 30 мм; h = 10 мм; 2 - L = 45 мм; h = 10 мм; 3 - L = 45 мм; h = 15 мм



Рис. 9. Эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока в зависимости от потенциала электродов. $I - (I_{2\pi} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ A}, \alpha = 15^0), 2 - (I_{2\pi} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ A}, \alpha = 45^0), 3 - (I_{2\pi} = 0 \text{ A}, \alpha = 30^0)$

B



Рис. 10. Варианты жалюзийных электродов.



Рис. 11. Распределение плотности ионного тока на сыщения на зонды по сечению плазменного потока на расстоянии 13 см от ПФ ($I_{д} = 100$ A). Конфигурация электродов ПФ: а) – сходящаяся, б) расходящаяся: 1a, 2a – без ПФ; 3a, 4a, 5б – с ПФ. (1a, 3a) – Согласованное направление магнитных полей катушек ЭДИ, (2a, 4a, 5б) – Встречное направление магнитных полей катушек ЭДИ.

Отражение плазменных ионов от формируемого вблизи электродов ПФ положительного потенциала смещения наиболее эффективно реализуется в условиях эксвипотенциализации силовых линий магнитного поля в межэлектродных промежутках жалюзийной системы. Показано, что необходимое для замагничивания электронной компоненты плазменного потока с концентрацией до 10^9-10^{10} ион/см³ магнитное поле составляет от 10^{-2} до $3 \cdot 10^{-2}$ Т.

На основе экспериментальных исследований и моделирования конфигурации силовых линий магнитного поля в аксиально-симметричной системе электродов показано, что наряду с уже отмеченными выше условиями дополнительное влияние на эффективность транспортировки плазмы в многоэлектродных жалюзийных системах оказывает направление магнитных полей в соседних межэлектродных промежутках, количество электродов, их толщина, а также суперпозиция магнитных полей катушек электродугового испарителя и ПФ, рис.11, 12. Показана возможность управления распределением плотности ионного тока насыщения из плазмы j по сечению потока при изменении пространственного расположения электродов жалюзийной системы, рис.11.



Рис. 12. Конфигурация силовых линий магнитного поля вблизи электродов ПФ. *1*–анод, *2*– катушки ВДИ, *3*–дополнительная магнитная катушка, *4*–электроды ПФ, *5*-защитный электрод, *6*–катод

Представлены результаты исследования эффективности прохождения заряженного компонента плазменного потока в зависимости от давления в вакуумном объеме. Определена область применимости ПФ при работе в газовой среде. Показано, что стабильная работа электромагнитного ПФ наблюдается в диапазоне давлений электродугового испарителя от 10⁻³ до 10⁻¹ Па, рис.13.

Исследованы закономерности снижения МКФ при прохождении плазменного потока в межэлектродном пространстве ПФ жалюзийного типа. Показано, что в условиях оптической непрозрачности жалюзийной системы наименьшее количество МКФ регистрируется в телесном угле, определяемом наклоном электродов плазменного фильтра к оси электродугового испарителя, рис.14. Дополнительное снижение МКФ в потоке вакуумно-дуговой плазмы достигается на расстоянии, превышающем геометрический фокус жалюзийной системы, а также в случае применения электродов с ребристой структурой поверхности. Наиболее вероятным механизмом проникновения капельной фракции на выход ПФ может быть разбрызгивание жидких капель и упругое отражение капель в твердом агрегатном состоянии от электродов ПФ, рис.15 и рис. 16.





Рис. 13. Изменение ионого тока на выходе ПФ (*1-3*) и тока в Ри цепи источника дополнительного смещения (*4*, *5*) в на зависимости от давления в вакуумном объеме: *1*–в отсутствие ПФ (N₂), *2*, *4*–при наличии ПФ (Ar), *3*, *5*–при наличии ПФ (N₂). Ток по электродам ПФ–1470 А, потенциал электродов–18 В

Рис. 14. Схема распределения МКФ на выходе ПФ

разработана Предложена И серия плоскопараллельных И аксиальносимметричных ПФ жалюзийного типа для технологического применения в вакуумно-дуговых генераторах плазмы и источниках ускоренных ионов, рис.17. Разработанные устройства обеспечивают прохождение до 30-55 % заряженной компоненты плазмы и снижение микрокапельной фракции в $10^2 - 10^3$ раз без направления распространения плазменного потока. Обсуждаются изменения возможности повышения степени очистки плазмы вакуумно-дуговой плазмы от МКФ в системах жалюзийного типа, рис. 15 и рис. 18. Рассматриваются перспективы применения ПФ в технологических установках, реализующих методы ионнолучевой и ионно-плазменной обработки материалов, рис.19.



Рис. 15. Изменение количества МКФ на поверхности подложки в зависимости от расстояния между ПФ и образцом ($I_0 = 150$ A).



Рис. 16. Диаграмма изменения количества зарегистрированных микрочастиц на поверхности TiN покрытия по сечению плазменного потока на расстоянии 25 см от ЭДИ





Рис. 17. Электромагнитный аксиальносимметричный ПФ жалюзийного типа с дополнительной катушкой и инверторной системой питания

Рис. 18. Изменение тока и скорости осаждения покрытий в зависимости от расстояния до ПФ.



Рис. 19. Трехмерные изображения поверхности TiN покрытия, сформированные на расстоянии 25 см от ЭДИ: а) без ПФ, б) с ПФ

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию импульснопериодических и непрерывных аксиально-симметричных и псевдоленточных пучков ионов металлов из плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда в условиях фильтрации плазмы от МКФ. Принцип действия источников основан на непрерывной генерации очищенной от МКФ плазмы непрерывным вакуумнодуговым разрядом с последующим импульсно-периодическим или непрерывным формированием ионного пучка в диодной системе прямого действия. Структурные схемы источников приведены на рис. 20 и рис. 21.

В импульсно-периодическом режиме формирования ускоряющего напряжения амплитудой до 40 кВ, с длительностью импульсов до 400 мкс и частотой их следования до 200 имп/с источник "Радуга–5" обеспечивает генерацию аксиальносимметричного пучка ионов с током до 2 А при средней мощности до 6,4 кВт. При постоянном ускоряющем напряжении 15 кВ продемонстрирована возможность генерации ионного пучка со средней мощностью более 10 кВт. Источник псевдоленточных пучков ионов "Радуга–6" обеспечивает в непрерывном режиме формирование ионного пучка с током до 200 мА при ускоряющем напряжении 40 кВ с площадью поперечного сечения на выходе пучка 600×120 мм². Ресурс непрерывной работы ионного источника на основе непрерывного ВДР определяется выработкой массивного катода и может достигать нескольких сотен часов. Источники предназначены для применения в технологиях ионной имплантации и ионно-ассистированного осаждения покрытий. Технические характеристики источников приведены в таблице.



Рис. 20. Структурная схема источника "Радуга–5": 1 – ускоряющая сетка, 2 – ПФ, 3 – катушки с током, 4, 5 – источники питания ПФ, 6 – генератор импульсов ускоряющего напряжения, 7 – блок поджига, 8 – источник питания ВДР, 9 – поджигающий электрод, 10 – катод, 11 – анод, 12 – сетка для отсечки плазменных электронов



Рис. 21. Структурная схема источника "Радуга-6": Схема экспериментального стенда: 1 – анод; 2 – водоохлаждаемый катод; 3 – магнитопровод; 4 – ПФ; 5; 6 – сеточный электрод; 7 – изделия; 8; 9 – источники питания ПФ; 10; 11 – источники питания электродугового испарителя; 12 – источник питания ускоряющего напряжения

Технические характеристики источников ионов

	"Радуга-5"	"Радуга–6"
Режим генерации плазмы	Непрерывный ВДР	
Сорт ионов	Ионы металлов	
Режим генерации ионного пучка	Импульсно-	Непрерывный
	периодически	й/
	Непрерывный	й
Ток дугового разряда, А	90-180	20–200
Зарядовое состояние ионов	Определяется зарядовым состоянием	
	ионов в дуговой плазме	
Концентрация плазмы на выходе источника, ион/см ²	$10^9 - 5 \cdot 10^{10}$	-
Ускоряющее напряжение, кВ		
в импульсно-периодическом режиме	20/40	
в непрерывном режиме	15	20/30/40
Энергия ионов, кэВ	до 160	
Ток ионов в импульсе, А	до 2	до 0,2
Выходная апертура источника, мм	Ø 180	600×120
Длительность импульса ионного пучка, мкс	400	-
Частота следования импульсов, имп/с	до 200	-
Средняя мощность ионного пучка, кВт		
в импульсно-периодическом режиме	до 6,4	
в непрерывном режиме	до 10	до 8
Скорость осаждения пленок, мкм/ч	до 20	-

Рассмотрены особенности конструкции и системы питания прямоточного, аксиально-симметричного ПФ для ионного источника "Радуга-5". Установлено, что генерации металлической плазмы эффективность режиме потоков В транспортировки плазмы в ПФ источника "Радуга-5", в зависимости от условий эксперимента, составила 30-37 %. Экспериментально и методами численного моделирования показана возможность управления распределением плотности ионного тока ПО сечению пучка при изменении конфигурации электродов ΠФ. Продемонстрированы примеры формирования аксиально-симметричных пучков ионов широкого поперечного сечения с неоднородностью распределения плотности ионного тока не превышающей 25-30 %.

Для формирования псевдоленточного пучка ионов металлов предложен и реализован протяженный вакуумно-дуговой генератор плазмы непрерывного действия с замкнутой траекторией движения катодного пятна на поверхности массивного водоохлаждаемого катода длиной 695 мм и шириной 85 мм. Стабилизация катодного пятна на рабочей поверхности катода реализована в условиях формирования двухарочного магнитного поля с индукцией 50–100 Гс, создаваемого набором

двухарочного магнитного поля с индукциси постоянных магнитов или электромагнитной катушкой. Результаты исследования процессов инициирования и стабильного горения ВДР в разрядной системе протяженного типа показали, что скорость перемещения катодного пятна существенно изменяется в зависимости от материала катода и напряженности магнитного поля в диапазоне от 1,5 м/с до 16,2 м/с при изменении напряженности магнитного поля от 25 до 180 Гс.

Результаты исследования ионносвойств вакуумно-дугового эмиссионных генератора плазмы протяженного типа с замкнутой траекторией движения катодного пятна в зависимости от индукции магнитного вблизи рабочей поверхности катода поля представлены на рис. 22. Из представленных данных следует, что увеличение индукции приводит магнитного поля К снижению тока насыщения ионного ИЗ плазмы. Стабильное горение разряда наблюдается при индукции магнитного поля 50–100 Гс. При этом магнитного поля ионный ток значении насыщения из плазмы достигает 4 % от тока разряда. Рассмотрены различные системы формирования магнитного поля вблизи поверхности протяженного катода. В результате конструкции оптимизации магнитопровода достигнута 75 % выработка катода.



Рис. 22. Ионный ток насыщения из плазмы в зависимости от магнитного поля при токе ВДР 145 А.



Рис. 23. Зависимости изменения ионного тока насыщения на коллектор (I_{κ}) от тока по электродам ПФ ($I_{n\phi}$) и напряжения смещения на электродах

Очистка плазмы непрерывного ВДР от МКФ в испарителе протяженного типа реализована с использованием прямоточного электромагнитного ПФ жалюзийного типа. Конструкция ПФ представляет собой оптически непрозрачную систему прямолинейных электродов, наклоненных под углом к направлению распространения плазменного Ha электродах ΠФ формируется потока. положительный по отношению к плазме потенциал смещения до 18 В. Электронная компонента плазменного потока замагничивается магнитным полем, формируемым при пропускании по электродам ПФ постоянного тока, изменяющегося от 400 до

700 А. Зависимости изменения ионного тока насышения на коллектор, расположенный выходе ΠΦ, при на индукции магнитного поля на поверхности катода 58 и 112 Гс приведены на рис. 23. При оптимизации топографии магнитного поля ионный ток насыщения из плазмы лостигает 1.8 обеспечивает A. что необходимую эмиссионную среду ДЛЯ эффективной работы ионного источника. Полученные результаты позволяют сделать прогноз о перспективности применения предложенной конструкции протяженного генератора плазмы не только в источнике ускоренных ионов, но и в генераторах металлической плазмы для использования в технологиях ионно-плазменного осаждения покрытий на крупногабаритные изделия.

Разработано И экспериментально исследовано несколько вариантов сеточных блоков для систем формирования аксиальносимметричных и псевдоленточных ионных пучков. Для источника аксиальносимметричного ионного пучка экспериментально установлено, что применение в сеточном блоке системы перемещающихся проводников снимает проблемы, связанные С нарушением юстировки результате сеток В ИХ провисания под действием значительных



Рис. 24. Распределение эквипотенциальных линий электрического поля и траектории движения заряженных частиц в области формирования ионного пучка для системы с расходящейся геометрией электродов ПФ



Рис. 25. Распределение плотности тока по сечению ионного пучка при различном ускоряющем напряжении ($I_{\rm d} = 70$ A): 1) 5; 2) 10; 3) 20; 4) 30; 5) 40 кВ

тепловых нагрузок, а также с отслоением пленки, сформированной на поверхности струн в режиме генерации источником потока металлической плазмы, и обеспечивает длительную и надежную работу источника при 95% прозрачности сеточных электродов.

При формировании ионного пучка высокой средней мощности надежная и длительная работа источника достигается применением сеточной системы с постоянным натяжением струнных проводников в условиях их самоочистки

(испарении и/или распылении продуктов эрозии материала катода) под воздействием ионов. Разработанные ионно-оптические системы обеспечивают стабильную работу источника в диапазоне изменения давления в вакуумном объеме от 5·10⁻² Па для $U_{\rm yck} = 40$ кВ до 10⁻¹ Па для $U_{\rm yck} = 20$ кВ.

Показано, что снижение ионного тока на выходе источника при повышении давления в вакуумном объеме преимущественно связано с процессами перезарядки ионов, а также их потерей на аноде и электродах ПФ, вследствие ухудшения магнитной изоляции. учетом особенностей формирования условий С псевдоленточного ионного пучка (периодическое изменение местоположения эмиссионной плазменной границы и периодический характер теплового воздействия электроды извлекающей системы) разработана ионно-оптическая на система источника "Радуга-6" в виде двойной сетки, образованной вольфрамовыми стержнями диаметром 1,5 мм. За счет "горячего" режима работы сеточного блока его конструкционные элементы в меньшей степени подвержены образованию И последующему отслоению пленок. Компенсация теплового расширения вольфрамовых стержней реализована за счет свободного перемещения в держателях.

Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований основных закономерностей формирования и распространения ионного пучка при наличии в диодной системе источника ПФ жалюзийного типа. Рассматривается влияние амплитуды ускоряющего напряжения и конфигурации электродов ПФ на величину и распределение плотности ионного тока на выходе источника, рис. 24. Экспериментально показано, что для аксиально-симметричного ионного источника характерна многопиковая форма распределения плотности тока ионов по сечению пучка, рис. 25. В тоже время, вместо пяти ярко выраженных пиков вблизи источника, с увеличением расстояния многопиковая структура в распределении плотности ионного источника формируемое распределение плотности ионного тока существенно зависит от структуры и конструкции ПФ. Установлено, что при ускоряющем напряжении 40 кВ ионный ток на выходе источника на 20 % превышает ионный ток насыщения из плазмы, измеренный на выходе ПФ в отсутствие импульсов ускоряющего напряжения.



Рис. 26. Распределение плотности тока (*j*) по сечению ионного пучка (*R*) на различном расстоянии от источника (*L*): $I_{\pi} = 90$ A; $U_{yck} = 20$ кВ



Рис. 27. Плотность тока плазменных (*1*, *2*) и средняя плотность тока ускоренных ионов (3–5) на различном расстоянии от источника.

Наблюдаемый эффект связан с электрического проникновением поля В ΠФ межэлектродные промежутки с формированием развитой эмиссионной плазменной границы. Эффект повышения 20%, ионного тока на В условиях формирования ионного пучка, по сути увеличивает эффективность прохождения плазмы в электродах ПФ.

Непрерывный режим генерации плазмы в сочетании импульсно-периодическим С формированием ионного пучка позволяет эффективно варьировать интенсивностью и последовательностью ионного и плазменного воздействия на мишень при изменении тока разряда, амплитуды и скважности импульсов ускоряющего напряжения, конструкции И режимов работы ПФ, расстояния от источника до мишени, рис.27. Внешний вид источников "Радуга-5" и "Радуга-6" показан на рис.28.

В пятой главе описывается физическая модель процессов формирования ускоряющего промежутка быстро изменяющихся В электрических полях вблизи поверхности, погруженного В плазму, потенциального электрода. существующих В отличие OT моделей рассматривается случай, когда

мишень погружена в направленный поток плазмы вакуумной дуги. Для металлических подложек нагрузка импульсного генератора потенциала смещения имеет как емкостную, так и активную составляющую. Емкостная составляющая проявляется во время переходного процесса, когда слой разделения зарядов увеличивается до стационарного состояния, определяемого законом Чайльд– Ленгмюра или фиксированного расстояния между образцами и сеточным электродом, формирующим эмиссионную границу плазмы.

Процесс формирования потока ионов из плазмы в сторону потенциального диэлектрической электрода при наличии между ними мишени имеет специфическую особенность. В данном случае формируется система типа конденсатора, обкладками которого являются с одной стороны потенциальный проводящий электрод, а с другой стороны плазма. Если диэлектрический образец полностью перекрывает потенциальный электрод, то активная составляющая нагрузки полностью исключена и процессы формирования ионного потока определяются толщиной и диэлектрической проницаемостью подложки, динамикой накопления заряда на поверхности образца, параметрами плазмы и импульса потенциала смещения. При высокой плотности плазмы процесс зарядки емкости, сформированной поверхностью диэлектрической подложки и потенциальным



Рис. 28. Внешний вид источников ионов металлов: а) "Радуга–5", б) "Радуга–6"

a)

б)

электродом (держателем) завершится достаточно быстро. Поэтому использование импульсов потенциала смещения длительностью, превышающей время зарядки диэлектрической поверхности, представляется не целесообразным. Таким образом, для случая использования диэлектрической мишени принципиально важным является выбор концентрации плазмы, длительности импульса потенциала смещения в зависимости характеристик диэлектрической мишени (диэлектрическая OT проницаемость, толщина диэлектрика). Оптимизация совокупности данных параметров должна обеспечить условия, при которых за время действия импульса потенциала смещения не произойдет существенного уменьшения потенциала на поверхности диэлектрика.

При плазменно-иммерсионном подходе к формированию ионного потока вблизи диэлектрической мишени принципиально важным является решение вопроса о компенсации заряда на его поверхности. Если плазменный поток непрерывен во времени, то после отключения потенциала смещения между заряженной ионами поверхностью диэлектрика и плазмой появляется электрическое поле, благодаря которому из плазмы извлекаются уже не ионы, а электроны. Ток электронов и их подвижность существенно выше тока и подвижности ионов, поэтому процесс компенсации заряда на поверхности диэлектрика будет происходить почти мгновенно. Оценки показывают, что время компенсации заряда не будет превышать нескольких наносекунд. Время компенсации играет важную роль, поскольку фактически определяет допустимый фактор заполнения импульсов. Использование потенциала смещения микросекундной длительности импульса И паузы наносекундного диапазона позволяет увеличить коэффициент заполнения импульсов практически до единицы. С другой стороны, это означает, что для больших значений ft→1 (где f – частота следования импульсов смещения, т – длительность импульса потенциала смещения) может быть реализован не только режим осаждения плазмы, но и режимы традиционной и высококонцентрационной ионной имплантации.

Описан метод короткоимпульсной высокочастотной, с коэффициентом заполнения импульсов от 0,1 до 0,9, 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 (КВПИ³ОП).

В предложенном методе предполагается, что использование коротких длительности ПО потенциалов смещения должно быть совмещено с высокой частотой следования импульсов. Это определяется, прежде всего, необходимостью разработки высокопроизводительных И высокотемпературных технологий ионнолучевой и плазменной обработки материалов использованием как газовой, с так И металлической плазмы. В случае применения металлической выбор плазмы частоты



Рис. 29. Осциллограммы импульсов тока, измеренные на выходе трубы дрейфа, $U_{\rm yck} = -0.5 \text{ kB}.$

следования импульсов при фиксированной длительности будет определяться не только необходимостью компенсации заряда на поверхности диэлектрика, но и выбором метода ионной и плазменной обработки материалов. Высокочастотный режим формирования импульсов потенциала смещения имеет еще одно важное преимущество. В случае, когда время паузы будет много меньше времени заполнения плазмой ускоряющего зазора после окончания импульса потенциала каждый будет смещения, последующий импульс быстро приводить к восстановлению ускоряющего зазора. Это означает, что энергия извлекаемых из плазмы ионов будет приближаться к энергии ионов, прошедших максимальную разность потенциалов.

На рис. 29 представлены результаты исследования динамики изменения импульсов тока ионов Ті на выходе плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра, полученные при длительностях импульса потенциала смещения 100-1100 нс. При малой длительности импульса напряжения ионы, проходя ускоряющий зазор, приобретают энергию меньшую, чем произведение амплитуды ускоряющего напряжения и заряда иона. Увеличение длительности импульса приводит к повышению амплитуды сигнала всех пиков и меньшему смещению максимума вправо. Это означает, что расширение зазора приближается к его стационарному состоянию, определяемому законом Чайльд-Ленгмюра. Данные по ионному току, соответствующие длительности импульса 400 и 450 нс, свидетельствуют о том, что формирование зазора практически закончено и положение максимума пика почти не меняется. Ионы, пересекающие ускоряющий зазор после стабилизации эмиссионной границы, ускоряются В установившемся электрическом поле и приобретают полную энергию, формируя пик, соответствующий приложенной к промежутку разности потенциалов. Следовательно, энергетические спектры ионов могут быть использованы для определения времени стабилизации ионноэмиссионной границы плазмы, соответствующего началу формирования ионного потока с максимальной энергией ионов.

Результаты исследований показали, что динамическое формирование слоя разделения зарядов (ускоряющего зазора) оказывается достаточно длительным процессом и составляет сотни наносекунд. Это означает, что для технологических применений нет необходимости использования высокочастотных, короткоимпульсных генераторов с крутыми фронтами импульса. Наличие фронта импульса, составляющего даже несколько сотен наносекунд, приведет только к увеличению полиэнергетичности ионов в потоке, но принципиально не изменит динамику его формирования. В то же время, наличие крутого переднего фронта импульса потенциала смещения приводит к значительным по амплитуде емкостным токам электронного смещения, что требует применения более сильноточных генераторов импульсов и снижает энергетическую эффективность.

Анализ осциллограмм тока в цепи потенциала смещения, зарегистрированных при изменении концентрации плазмы от 10^9 до $6 \cdot 10^9$ ион/см³ на образцах из Cu, Al, нержавеющей стали, даже без предварительной очистки их поверхности от загрязнений и диэлектрических включений, не выявил всплесков тока, характерных для пробойных явлений при потенциале смещения до -4 кВ. Таким образом, применение режимов короткоимпульсного, высокочастотного, плазменно-иммерсионного формирования ионного потока позволяет использовать высокие по

амплитуде потенциалы смещения, исключить появление катодных пятен на поверхности металлов, даже загрязненных, И при выполнении определенных условий реализовать режимы, при которых энергия ионов будет определяться полной амплитудой ускоряющего потенциала смещения.

Экспериментальная схема для условий исследования плазменноиммерсионного формирования ионного быстроизменяющихся потока В вблизи электрических полях диэлектрических мишеней приведена на рис. 30. Ha рис. 31 приведены осциллограммы импульсов потенциала



Рис. 30. Схема экспериментального стенда: *1* – источник короткоимпульсного потенциала смещения, *2* – активный делитель, *3* – пояс Роговского, *4* – экран, *5* – потенциальный электрод, *6* – диэлектрическая мишень, *7* – потенциометр, *8* – ЭДИ с ПФ, *9* – система питания ЭДИ и ПФ

смещения, измеренного на поверхности мишени из ситала и стекла при различной концентрации плазмы, а также тока на керамической мишени.



Рис. 31. Осциллограммы импульсов потенциала на поверхности мишени из ситала (а) и стекла (с) и тока на керамическую мишень (б): $1 - 4 \cdot 10^{15}$ ион/м⁻³, $2 - 10^{15}$ ион/м⁻³, 3 - XX.Развертка 2 мкс/дел: а) 400 В/дел;б) 0,2 А/дел.

В случае применения диэлектрических мишеней ускоряющее ионы определяется разностью приложенного потенциала смещения напряжение И поверхности диэлектрика, потенциала на динамически изменяющегося В характеристик диэлектрика (толщина диэлектрическая зависимости OT И проницаемость), ионного тока, тока электронного смещения и тока вторичной ионно-электронной эмиссии.

Экспериментально показана возможность компенсации ионного заряда на поверхности диэлектрика при использовании биполярных потенциалов смещения. В целом, техническая реализация предложенного подхода по применению биполярных импульсов для формирования потока ускоренных ионов вблизи поверхности погруженной в плазму мишени с различной проводимостью представляется более простой по сравнению с однополярными импульсами потенциала смещения. При этом нейтрализация заряда на поверхности диэлектрика реализуется более эффективно при подаче на неё дополнительного положительного потенциала смещения. Дополнительный технологический эффект от применения биполярных

потенциалов смещения видится в возможности эффективного нагрева обрабатываемой поверхности перед и во время проведения ионно-плазменной обработки изделий.

На рис. 32 представлена диаграмма, отражающая область применимости метода короткоимпульсной плазменноиммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий лля обработки диэлектрических материалов при концентрации плазмы от 10⁸ до 10¹⁴ см⁻³. 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



Рис. 32. Область применимости метода КВПИ³ОП при обработке диэлектрических мишеней

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. Предложенный быть реализован метод может с использованием высококонцентрационной позволяющей извлекать плазмы, ионный ток С плотностью в десятки и сотни A/см² при длительности импульса в десятки или сотни наносекунд. В случае использования плазмы с низкой концентрацией, обеспечивающей ионный ток плотностью в доли миллиампер, длительность импульса потенциала смещения может быть увеличена до десятков и сотен микросекунд без потери эффективности его использования.

В экспериментах с абляционной плазмой, полученной распылением Ti мишени высокоинтенсивным ионным пучком с плотностью тока 300 A/cm² при энергии ионов водорода и углерода до 350 кэВ и длительности импульса 90 нс, показано, что для увеличения адгезионной прочности осаждаемого покрытия должны использоваться импульсы потенциала смещения с длительностью, не превышающей 500 нс, обеспечивающей возможность применения потенциала с амплитудой до –4 кВ при существенном снижении вероятности взрывоэмиссионных процессов на поверхности мишени.

Шестая глава посвящена созданию современных технологических комплексов для реализации широкого круга комбинированных технологий на основе предложенных в работе методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов и оборудования по генерации очищенной от МКФ плазмы ВДР и источников ионов проводящих материалов. Определены технологические возможности и области применимости оборудования.

В первом параграфе главы рассмотрена конструкция комплексной установки "Радуга–5С", предназначенной для реализации комбинированных режимов ионной имплантации и осаждения покрытий из плазмы непрерывного ВДР, рис. 33. Установка включает вакуумный пост, источник ускоренных ионов и плазмы на основе непрерывной вакуумной дуги "Радуга–5" и три вакуумно-дуговых генератора плазмы, оснащенных устройствами фильтрации от МКФ. Установка позволяет формировать в последовательном или совмещенном режиме пучки ионов проводящих материалов с током до 2 А при ускоряющем напряжении до 40 кВ с длительностью до 400 мкс и с частотой генерации до 200 имп/с, а также потоки плазмы проводящих материалов.

С использованием установки "Радуга–5С" реализованы режимы высокоинтенсивной и высококонцентрационной ионной имплантации с формированием интерметаллидных систем Al \rightarrow Ni, Al \rightarrow Ti, Ti \rightarrow Ni, Al \rightarrow Fe на глубине до 2,6 мкм с достижением дозы внедренной примеси до 3,6·10¹⁸ ион/см² при дозе облучения 2,2·10¹⁸ ион/см², рис. 34 и 35. Высокие концентрации легирующей

примеси. достигнуты условиях В высококонцентрационной ионной имплантации³. Этот режим реализуется в ионное условиях, когда распыление поверхности компенсируется осаждением металлической плазмы между импульсами ускоряющего напряжения. В результате атомов имплантируемого внедрения материала с поверхности вглубь мишени в виде атомов отдачи доза внедренной примеси может превышать дозу



Рис. 33. Внешний вид установки "Радуга-5С"

Исследования структурно-фазового состояния ионно-легированных облучения. "Томский слоев, выполненные сотрудниками ГОУ ВПО государственный архитектурно-строительный университет" и Института физики прочности И материаловедения СО РАН показали, что в результате ионной обработки в формируются мелкодисперсные поверхностных слоях трех металлов всех выделения систем Ni \rightarrow Al, Ti \rightarrow Al и Fe \rightarrow Al⁴. Для сформированных систем экспериментально подтверждено улучшение ряда физико-механических свойств поверхностных слоев материалов, включая повышение твердости, износостойкости, снижение коэффициента трения, рис. 36, 37.

Технологические возможности установки "Радуга–5С" по формированию покрытий в комбинированном режиме ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки реализованы для системы TiSiB. Для нанесения покрытия были использованы источник ионов и плазмы "Радуга–5", электродуговой испаритель, оснащенный электромагнитным аксиально-симметричным ПФ и короткоимпульсный высокочастотный источник напряжения смещения.

³ Ryabchikov A.I., Nasyrov R.A. Repetitively pulsed, high-concentration implantation // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. – 1991. – V. 61. P. 48–52.

⁴ Kurzina I.A., Kozlov E.V., Sharkeev Yu.P., Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Bozhko I.A., Kalashnikov M.P., Sivin D.O., Fortuna S.V. Influence of ion implantation on nanoscale intermetallic-phase formation in Ti–Al, Ni–Al and Ni–Ti systems // Surface and Coating Technology. – 2007. – V. 201. – P. 8463–8468.



Рис. 34. Распределение концентрации элементов по глубине Ті мишени при имплантации ионами Al: Средняя энергия ионов 40 кэВ, время обработки 125 мин., доза внедренной примеси 3.6·10¹⁸ ион/см²



Рис. 36. Изменение нанотвердости по глубине исходных Ті и Ni мишеней и ионно-легированных слоев систем Al—Ti и Ti—Ni

Образцы были подвергнуты воздействию пучка ионов Ті с плотностью тока 10 мА/см², средней энергией 40 кэВ, длительностью 400 мкс, формируемого с частотой 200 имп/с В условиях высокочастотного формирования на мишени короткоимпульсных потенциалов амплитудой до 700 смещения B. c последующим снижением потенциала и переходом в режим осаждения покрытия из плазмы вакуумной дуги, генерируемой электродуговым испарителем с катодом



35. Изменение дозы облучения Рис. И интегральной дозы внедренных атомов от имплантации времени ионной 2) (1,для системы Al→Ti и расстояния до выхода ионного источника (3, 4) для системы Ti-Ni



Рис. 37. Изменение интенсивности износа и коэффициента трения интерметаллидных систем и мишеней из Ti и Ni в зависимости от температуры



Рис. 38. Профили распределения элементов по глубине мишени и толщине TiSiB покрытия

TiSiB. На серии пластин из титановых сплавов было сформировано покрытие толщиной от 5 до 10 мкм с шириной переходного слоя "подложка–покрытие" до 2 мкм, рис. 38.

Исследования микроструктуры и эксплуатационных свойств TiSiB покрытия, выполненные в сотрудничестве с ВИАМ и МАИ (г. Москва) показали, что при толщине покрытия 5 мкм структурные изменения поверхностного слоя, с

формированием аморфной фазы, наблюдаются на глубину до 25 мкм от поверхности мишени. Сформированное в режиме комбинированной ионно-лучевой и ионноплазменной обработки покрытие на основе системы TiSiB обладает комплексом свойств, уровень которых существенно превышает характеристики исходного материала. Так, например, эрозионная стойкость TiSiB покрытия на образце из сплава BT6 в 4 раза превосходит стойкость исходного образца, наблюдается существенное повышение усталостной прочности при циклическом нагружении, до 20 раз зарегистрировано повышение сопротивления солевой коррозии.

Второй параграф главы посвящен разработке комплексной установки для реализации комбинированных режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов, включающей импульсно-периодический источник ионов и плазмы проводящих материалов "Радуга–5", четыре аксиально-симметричных электродуговых испарителя с электромагнитными ПФ жалюзийного типа, генератор газовой плазмы с накаленным катодом "ПИНК", среднечастотную дуальную

магнетронную распылительную систему, короткоимпульсный высокочастотный генератор напряжения смещения, рис. 39. Установка обеспечивает генерацию частотой до 200 имп/с длинноимпульсных (до 400 мкс) пучков ионов проводящих материалов с током до 2 А при ускоряющем 40 напряжении 20 И κВ И (1 - 10)короткоимпульсных мкс) газометаллических ионных потоков при напряжении до 4 кВ с током до 20 А при



частоте генерации импульсов до 10^5 и Рис. 39. Внешний вид установки коэффициентом заполнения до 0,9. Технологические возможности установки обеспечивают совместную работу всего электрофизического оборудования в диапазоне давления 10^{-2} — $5 \cdot 10^{-1}$ Па. Последовательная и (или) совместная генерация ионных пучков и плазменных потоков обеспечивает реализацию режимов очистки и активации поверхности материалов, высокоинтенсивной и высококонцентрационной ионной имплантации, формирования широких переходных слоев между основой и покрытием, нанесения покрытий в условиях интенсивного ионного перемешивания на проводящих и диэлектрических материалах.

Принципиально новые возможности для реализации комбинированных режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов предоставляет метод высокочастотной короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий. Например, применение коротких по длительности потенциалов смещения многократно снижает вероятность инициирования микродуговых процессов на поверхности обрабатываемых изделий, в том числе при многократном (до нескольких кВ) повышении потенциала смещения на изделии по сравнению с "традиционными" технологиями.

Дополнительные преимущества метода возможностью. связаны С при определенной концентрации плазмы, осуществлять эффективную обработку изделий сложной геометрической формы и изделий с различной проводимостью, включая диэлектрики в широком диапазоне изменения плотности ионного тока из плазмы, рис.40.

Технологические преимущества установки связаны с возможностью адаптации комплекса к реализации различных технологических задач и его оперативной Например, конструкция модернизации. вакуумной камеры обеспечивает возможность быстрого изменения конфигурации входящего в состав комплекса оборудования путем замены съемных стенок. Это позволяет увеличить число используемых электродуговых испарителей до 8 шт., или четырех МРС. В частности, универсальное крепление генераторов плазмы предоставляет возможность адаптации обработки установки для



Рис. 40. Области реализации режимов обработки материалов с использованием метода КВПИ³ОП

изделий формирования крупногабаритных или многокомпонентных покрытий с катодами различного элементного состава.

Режимы энергетического воздействия на материалы, реализуемые С использованием комплексной установки, приведены на рис. 41. В зависимости от способа формирования ионов их энергия, с учетом зарядового состояния, может изменяться от нескольких десятых до 160 кэВ и достигать при плотности ионного тока 10 мА/см² средней плотности мощности до 36 Вт/см². При этом для плазменноиммерсионного режима формирования ионного потока отношение плотности тока насыщения ионов из плазмы и плотности тока ускоренных ионов, в зависимости от коэффициента заполнения импульсов, может изменяться от 0,1 до 0,9. В случае формирования ионного пучка в источнике "Радуга-5" соотношение плазменных и ускоренных ионов может изменяться и за счет расстояния от источника до мишени и составлять, например, на расстоянии 80 см от его выхода от 3,2 до 0,15, в зависимости от коэффициента заполнения импульсов.



Рис. 41. Области изменения средней плотности мощности ионов (W) (1-4) при j = 10 мА/см² и соотношение плотности ионного тока насыщения из плазмы *j*_{пл} и ускоренных ионов *j*_{ион} в зависимости от коэффициента (*Q*) заполнения импульсов (5, 6): 1, 2 – плазменноиммерсионный подход (U_{см} = 1 кВ и 4 кВ соответственно), 3, 4 – "Радуга–5" ($U_{vc\kappa} = 20 \text{ кB}$ и 40 кВ соответственно), 5 – плазменноиммерсионный подход, 6 – "Радуга-5" (U_{vcк} = 40 кB, $\tau = 400$ мкс на расстоянии 80 см от источника)

С использованием комплексной установки и предложенных в работе методов обработки материалов отработана технология улучшения физико-механических свойств однослойных (TiN, TiAlN) и формирование многослойных, функциональноградиентных, наноразмерных и наноструктурных покрытий системы (TiAl)N/TiN, состоящих из 23 отдельных слоев толщиной от 200 до 500 нм., с достижением шероховатости поверхности, высокой алгезионной прочности, низкой износостойкости и твердости, рис. 42, 43, 44. В многослойных системах чередование отдельных слоев покрытия реализовано в условиях перемещения держателей с образцами от одного электродугового испарителя к другому. Толщина отдельных слоев устанавливалась скоростью перемещения образцов. Стехиометрический достигался выбором давления вакуумном состав покрытия В объеме И соотношением основных компонентов в композиционном катоде или соотношением тока ВДР, при использовании одноэлементных катодов. По сравнению с "традиционными" однослойными системами для многослойных покрытий характерно повышение основных физико-механических свойств, а также изменение механизма трещинообразования с поперечного, к продольному вдоль отдельных слоев, рис.46.



Рис. 42. Схема эксперимента по нанесению покрытий составов TiN, (TiAl)N, (TiAl)N/TiN: *1*–вакуумная камера, *2*–электродуговой испаритель с ПФ, *3*–генератор газовой плазмы, *4*–образцы, *5*–экраны, *6*–нагреватели, *7*–высоковольтный генератор

Рис. 43. Изображение сферического шлифа многослойной (TiAlN)/TiN структуры: толщина покрытия 4,5 мкм, число слоев 23



Рис. 44. Профиль поверхности покрытия: a) – TiN в отсутствие ПФ; б) – TiN с ПФ ($I_{дут} = 125$ A, $U_{cm} = 500$ В); в) – (TiAl)N с ПФ

Результаты измерения адгезионной прочности покрытия с использованием скрейтч-теста.

	Толщина	F _n cog,	F_n ad,
	покрытия, мкм	H^{5}	H^{6}
ТіN без ПФ– постоянный потенциал смещения	5	0,81	
ТіN с ПФ – постоянный потенциал смещения	5	1,17	
ТіN– импульсно-периодический потенциал смещения	5	2,67	4,25
ТіАІN – импульсно-периодический потенциал смещения	3,5	3,62	6
ТіАІN – с периодически изменяемой структурой	5,4	3,34	6
(TiAl)N/TiN – импульсно-периодический потенциал смещения	5,4	4,05	7,5



Рис. 45. Изображение трека от индентора: однослойное (TiAl)N покрытие: а) при постоянной амплитуде потенциала смещения, б) с периодически изменяемой структурой; в) многослойная система (TiAl)N/TiN

Благодаря возможности варьирования В широких амплитудой пределах импульса напряжения смещения, высокие значения адгезионной прочности были достигнуты и для (TiAl)N однослойного покрытия, сформированного в условиях динамического изменения энергии ионов в процессе конденсации покрытия. Изображение сферического шлифа градиентно-структурной системы представлено на рис. 46. Периодичность изменения полос соответствует динамически изменяющейся энергии ионов. При соответствующем выборе концентрации плазмы кратковременное



Рис. 46.Сферический шлиф градиентноструктурного (TiAl)N покрытия

изменение энергии ионов позволяет поддерживать оптимальную температуру процесса. На рис 47 и 48 представлены результаты измерения твердости сформированных покрытий и трибологических характеристик в зависимости от соотношения потоков Al и Ti плазмы, а также приложенного к образцам короткоимпусного высокочастотного потенциала смещения. Эрозионные испытания многослойных (TiAl)N/TiN систем, сформированных на лопатках ГТД из сплава ВТ–13У, выполненные на стенде ВИАМ, показали увеличение эрозионной стойкости лопаток ГТД практически на порядок.

 6 F_n аd – нормальная нагрузка, при которой происходит полное отслоение покрытия внутри трека

 $^{^{5}\} F_{n}\ cog-$ нормальная нагрузка, при которой происходит отслоение покрытия по сторонам царапины



Рис. 47. Изменение твердости покрытия в зависимости от режимов нанесения покрытий. Максимальная нагрузка на индентор 100 мН. (Ток ВДР с Ті катодом 112 А)

Рис. 48. Интенсивность износа образцов из стали P6M5 в зависимости от условий испытания, типа покрытия и режимов их формирования

В третьем параграфе главы рассмотрена комплексная система реализации технологий ионно-лучевой гибридных ионно-плазменной обработки И крупногабаритных изделий. Установка предназначена для реализации гибридных ионно-лучевой технологий И ионно-плазменной модификации свойств поверхностных слоев, включая нагрев, ионную очистку и активацию поверхности, традиционную и высококонцентрационную, в том числе короткоимпульсную высокочастотную плазменно-иммерсионную имплантацию ионов газов и проводящих материалов, ионно-ассистированное азотирование, формирование переходных слоев между основой и покрытием, нанесение одно- и многослойных покрытий способом конденсации вещества с ионным ассистированием на проводящие и диэлектрические изделия диаметром до 0,8 м и длиной до 1 м. Внешний вид установки представлен на рис. 49. Принципиальные преимущества созданной установки связаны с высокой производительностью, возможностью обработки крупногабаритных изделий и

изделий сложной геометрической формы, в том числе в различных газовых средах.

Электрофизическое оборудование размещено поста, включающего на базе вакуумного камеру объемом 1,3 м³, системы питания, управления, вакуумирования, водоохлаждения, газораспределения и диагностики. Фланцы размещения источников ионов ДЛЯ И генераторов плазмы унифицированы ПО размеру, что позволяет в широких пределах изменять конфигурацию оборудования для различных технологических режимов обработки изделий.



Рис. 49. Внешний вид установки

Высокий технологический уровень установки, BO многом, определяется использованием автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ Разработанная совместно TΠ). с 000 «ИНСИТЕК» (г. Томск) АСУ ТП обеспечивает возможность работы установки в ручном и автоматическом режимах. Блочная конфигурация системы позволяет реализовать программно-управляемую работу как отдельных систем, так и всего комплекса в целом, рис. 50. Предложенная конфигурация АСУ ТП на базе контроллеров промышленных И системы



Рис. 50. Внешний вид окна интерфейса "Источники"

управления SCADA представляет собой открытую структуру с возможностью оперативного расширения как технологических, так и аппаратных средств разработанного комплекса.

Для генерации псевдоленточных ионных пучков с током до 0,2 А при ускоряющем напряжении 20, 30 и 40 кВ установка оснащена источником "Радуга-6". Поперечное сечение пучка составляет 600×120 мм. Формирование пучков ионов газов реализовано с использованием, разработанного в институте электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), источника ленточного пучка с поперечным сечением 600×100 мм, средним током ионов 0,2 А при ускоряющем напряжении, изменяемом дискретно от 20 до 40 кВ с шагом 10 кВ. Благодаря применению унифицированных фланцевых соединений, конструкция вакуумного поста обеспечивает возможность одновременной установки и использования обоих источников ионов.

Для генерации потоков газовой и металлической плазмы в состав установки включены вакуумно-дуговые генераторы металлической плазмы протяженного типа с замкнутой траекторией движения катодного пятна с площадью рабочей поверхности катода 600 см² при длине 1 м, протяженные (1 м) генераторы газовой плазмы на основе источника дугового разряда низкого давления с накаленным катодом ПИНК-П-1.ОМ, разработанным в институте сильноточной электроники СО дуальными PAH, среднечастотными магнетронными а также двумя распылительными системами с размерами мишеней 900×120 мм. Изолированные друг от друга магнетроны подключены к источнику питания, формирующему прямоугольные импульсы напряжения с частотой 4·10⁴ с⁻¹. Ток разряда при использовании в качестве рабочего газа Ar достигает 30 A.

Наряду с источником металлических и газовых ионов, ионная имплантация и ионное ассистирование процессов осаждения покрытий на базе установки могут быть реализованы и в условиях короткоимпульсного высокочастотного плазменно-иммерсионного формирования ионного потока. Для реализации этого режима установка укомплектована источником напряжения смещения, формирующим последовательность импульсов амплитудой от -0,5 до -4 кВ с частотой 10⁵ имп/с. Возможность изменения длительности импульсов от 1 до 10 мкс позволяет формировать последовательность импульсов с коэффициентом заполнения от 0,1 до 0,9 с током на образцы до 20 А. С учетом того, что конструкция установки позволяет

использовать до 4-х протяженных электродуговых испарителей, ток на образцы в режиме конденсации покрытия может достигать 50 А. В этом случае может быть использован, имеющейся в составе установки, комплект инверторных источников напряжения смещения "ELB-32/550" и "ELB-48/350". Две ступени источников питания обеспечивают при токе разряда до 32 А напряжение смещения от –300 до – 900 В и от –30 до –350 В при ионном токе до 50 А.

В заключении кратно сформулированы основные результаты диссертационной работы. Приведены сведения об апробации результатов, полноте опубликования в научной печати, содержащихся в работе результатов и выводов, личном вкладе автора.

Основной итог выполненной работы состоит в том, что на основе совокупности полученных научных и практических результатов созданы: новый метод плазменноиммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий; плазменноиммерсионный времяпролетный спектрометр для измерения элементного состава и зарядового состояния ионов в газовой и металлической плазме, новые источники ионов металлов, генерирующие в импульсно-периодическом и непрерывном режимах пучки с широким поперечным сечением и обладающие широкими функциональными возможностями; фильтры для очистки плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции, а также серия установок для реализации комплексных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки поверхности материалов.

Более детально результаты работы формулируются следующим образом.

1. Установлены закономерности распространения плазмы непрерывного вакуумнодугового разряда в оптически непрозрачных системах жалюзийного типа в условиях пропускания по электродам постоянного тока и формирования на них положительного потенциала смещения. На основе полученных результатов предложена и разработана фильтров прямоточных электромагнитных плазменных серия С аксиальносимметричными и плоскими электродами жалюзийного типа, обеспечивающих высокую эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока и высокую степень очистки вакуумно-дуговой плазмы от микрокапельной фракции. Определены основные закономерности влияния геометрических размеров И конфигурации электродов фильтра, различных условий магнитной изоляции электродов, величины положительного потенциала смещения на электродах, давления остаточного газа на параметры плазменного потока на выходе фильтра.

2. Экспериментально установлены закономерности изменения энергетического спектра ионов при формировании на поверхности, погруженных в вакуумно-дуговую плазму, проводящих и диэлектрических мишеней в зависимости от амплитуды импульса отрицательного потенциала смещения, его длительности и частоты следования, параметров плазмы и характеристик мишени. В результате выполненных работ предложены и практически реализованы метод и устройство для измерения зарядового состояния и массового состава ионов в газовой и металлической плазме на основе короткоимпульсного плазменно-иммерсионного ионов ИХ транспортировки ИЗ плазмы, В извлечения эквипотенциальном пространстве трубы дрейфа с разделением на отдельные компоненты И последующей регистрацией импульсов тока. Определены основные закономерности влияния геометрических размеров трубы дрейфа, амплитуды и длительности

потенциала смещения, давления газа, характеристик системы регистрации токовых импульсов на разрешающую способность спектрометра. Разработанный плазменноиммерсионный времяпролетный спектрометр отличается простой и компактной конструкцией, не требует применения дополнительных систем формирования ионного пучка, обеспечивает измерение с высоким разрешением зарядового состояния и массового состава газовой и металлической плазмы и может быть использован для диагностики параметров плазмы в составе установок ионноплазменного нанесения покрытий при проведении экспериментальных исследований и отработке технологий ионно-плазменной модификации материалов.

3. Предложен и разработан метод короткоимпульсной высокочастотной, с коэффициентом заполнения импульсов от 0,1 до 0,9, плазменно-иммерсионной ионной имплантации и (или) осаждения покрытий применительно к мишеням с различной проводимостью в условиях компенсации накапливаемого на поверхности мишени положительного заряда в паузах между импульсами потенциала смещения электронным потоком из плазмы. Показана возможность использования метода для реализации широкого круга режимов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки включая нагрев образцов, ионную имплантацию, материалов, В том числе высококонцентрационную, формирование переходного слоя между основой и покрытием, осаждение покрытий с ионным ассистированием на материалы с различной проводимостью. Установлены условия и область применимости метода при обработке диэлектрических мишеней, а также при изменении в широком диапазоне концентрации плазмы.

4. Показана возможность формирования импульсно-периодических И непрерывных аксиально-симметричных и псевдоленточных пучков ионов металлов из плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда в условиях фильтрации плазмы от микрокапельной фракции. Разработаны источники импульсно-периодических и непрерывных аксиально-симметричных и псевдоленточных пучков ионов металлов из плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда в условиях фильтрации плазмы от микрокапельной фракции, отличающиеся от известных устройств высокими техническими параметрами, надежностью, большим ресурсом работы и широкими функциональными возможностями. Показано, что источники обладают необходимым набором параметров для применения в технологиях ионной имплантации и ионно-ассистированного осаждения покрытий.

5. На основе разработанных ионных источников, фильтров для очистки плазмы непрерывного вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции и метода короткоимпульсной плазменно-иммерсионной ионной (или) имплантации И осаждения покрытий создана серия технологических комплексных установок для реализации комбинированных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов. Показана возможность применения установок для технологиях использования в ионной имплантации С формированием интерметаллидных систем Al-Ni, Al-Ti, Ti-Ni, Al-Fe с высокой концентрацией легирующей примеси, на глубине существенно превышающей проективные пробеги ионов, формирования многослойных (TiAl)/TiN покрытий с наноразмерными слоями, композиционного TiSiB покрытия, с обеспечением значительного увеличения физико-механических и эксплуатационных свойств материалов. Разработанные

технологические комплексы соответствуют требованиям, предъявляемым к оборудованию для применения в промышленности и при проведении научноисследовательских работ. Установки могут применяться в различных отраслях машиностроительного производства, в том числе для обработки крупных партий изделий, включая крупногабаритные и сложной геометрической формы с целю повышения износостойкости, твердости, коррозионной и эрозионной стойкости и других физико-механических свойств.

6. Разработка и создание источников, ориентированных на технологическое применение, позволили развить прикладные исследования материаловедческого характера с применением ионных пучков и очищенных от МКФ потоков металлической плазмы в научно-исследовательском институте ядерной физики (г. Томск), институте физики прочности и материаловедения СО РАН, НПФ "Эвротех", ООО "Центр новых технологий", ГОУ ВПО "Уфимский авиационный технический университет", ГОУ ВПО "Сибирский государственный медицинский университет", Пекинском исследовательском институте авиационных технологий, ФГУП "ММПП "Салют".

Список основных публикаций автора по теме диссертации

- Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. Development of filtered DC metal plasma ion implantation and coating deposition methods based on high-frequency short-pulsed bias voltage application // Vacuum. – 2005. – V. 78. – P. 331–336.
- 2. Рябчиков А.И., Дектярев С.В., Степанов И.Б. Источники "Радуга" и методы импульснопериодической ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 193–207.
- 3. Рябчиков А.И., Дектярев С.В., Степанов И.Б. Особенности эмиссионных свойств импульсных широкопучковых источников ионов и плазмы на основе испарения металла вакуумной дугой // Известия вузов. Физика. 1994. Т. 37. № 2. С. 82–92.
- 4. Степанов И.Б. Разработка и исследование источника ускоренных ионов и плазмы на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда и систем очистки плазмы от микрокапельной фракции: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1998. 186 с.
- 5. Ryabchikov A.I., Dektjarev S.V., Stepanov I.B. The metal vapor vacuum arc ion sources Raduga // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. № 10. –P. 3126–3130.
- 6. Рябчиков А.И. Импульсно-периодические многофункциональные источники ионов на основе вакуумной дуги и нетрадиционные методы ионно-лучевой, ионно-плазменной обработки материалов: Дис... док. физ.-мат. наук. Томск, 1994. 257 с.
- 7. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Investigations of forming metal-plasma flows filtered from micropaticle fraction in vacuum-arc evaporators // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. P. 893–897.
- Ryabchikov A.I., Petrov A.V., Stepanov I.B., Shulepov I.A., Tolmachjeva V.G. High current and high intensity pulsed ion beam sources for combined treatment of materials // Rev. Sci. Instrum. – 2000. – V. 71. – P. 783–785.
- 9. Petrov A., Ryabchikov A., Stepanov I., Struts V., Tolmachjeva V., Usov Yu., Shulepov I. Processes of material surface modification under combined treatment by pulsed ion beams of different power and plasma flows //13th International Conference on High-power Particle Beams. Nagaoka, Japan, 2000. P. 117.
- Petrov A., Ryabchikov A., Stepanov I., Struts V., Polkovnikova N., Usov Yu., Shulepov I. Research on Materials Surface Element Structure Formation under the Combined Treatment with Pulsed Ion Beams of Different Power // 12th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams. – Marburg, Germany, 2001. – P. 37–40.

- Petrov A., Ryabchikov A., Stepanov I., Struts V., Tolmacheva V., Usov Yu. Mass Transfer of Elements in the Undersurface Layers Under Combined Treatment by Pulsed Ion Beams and Plasma Flows // 5th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. – Tomsk, 2001. – V. 1. – P. 363–366.
- 12. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Исследования по формированию очищенных от микрокапельной фракции потоков металлической плазмы // Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц: Тез. докл. IV Всероссийской конференции. – Томск, 1996. – С. 29–31.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. A New Micropatical Filtering System for Vacuum Arc Plasma Generators // 18 th Symposium on Plasma Physics and Technology. – Prague, Czech Republic, 1997. – P. 56.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Investigations of forming metal-plasma flows filtered from micropaticle fraction in vacuum-arc evaporators // 7th International Conference on Ion Sources. – Taormina, Italy, 1997. – P. 23.
- 15. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Исследования по формированию очищенных от микрокапельной фракции потоков металлической плазмы в электродуговых испарителях // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тезисы ІІ-й международной конференции. – Минск, Беларусь, 1997. – с.184.
- Stepanov I.B., Ryabchikov I.A., Dektyarev S.V. Investigation of tungsten dc vacuum arc characteristics. Technological application //Surface and coatings technology. – 2007. – V. 201. – P. 6526–6529.
- 17. Рябчиков А.И., Рябчиков И.А., Степанов И.Б. Способ измерения спектра ионов и времяпролётный спектрометр ионов: пат. 2266587 Рос. Федерация. № 2004122707/28; заявл. 23.07.2004; опубл. 20.12.05, Бюл. № 35.
- Sinebryukhov A.A., Dektyarev S.V., Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Investigation Of Plasma Filter Influence On Ions Charge State Of Dc Vacuum Arc Plasma // Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of 7th International Conference. – Tomsk, 2004. – P. 16–19.
- 19. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Sinebryukhov A.A. Plasma Immersion Ion Charge State and Mass Spectrometer // Proceedings of the 11th International Conference on Ion Sources. Caen, France, 2005. P. 205.
- 20. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Usov YU.P. New approaches to Plasma Diagnostics // Plasma-Based Ion Implantation and Deposition: Proceedings of the 8th International Workshop. Chengdu, China, 2005. P. 18-22.
- 21. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Sinebryukhov A.A. Plasma immersion ion charge state and mass spectrometer // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 303–307.
- 22. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Еремин С.Е., Сивин Д.О., Дектярев С.В. Плазменноиммерсионный времяпролетный спектрометр для исследования массового и зарядового состава газовой и металлической плазмы // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – №11/2. – С. 112–116.
- 23. Степанов И.Б. Аксиально-симметричные фильтры жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции // Технология машиностроения. 2007. № 5. С. 44–51.
- 24. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Еремин С.Е. Исследование зарядового состояния газовой и металлической плазмы с использованием плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра // Известия Томского политехнического университета. 2010 Т. 316. № 4. С. 90–93.
- 25. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Usov Yu.P. New approaches to Plasma Diagnostics // Surf and Coat Technol. 2007 V. 201. P. 6635–6637.

- 26. Stepanov I.B. The center for collective use as a subject of regional and scientific-educational complex and innovation activity // Centers for collective use of analytical instrumentation: present status and prospects: Proceedings of All-Russian Conference. St. Petersburg, 2004. C. 58–59.
- 27. Stepanov I.B., Shulepov I.A., Sivin D.O., Eremin S.E. Methods and Equipment for Complex Investigation of Modified Surface Layers and Coatings // Известия вузов. Физика. 2006. № 8. Приложение. С. 497–500.
- Ерёмин С. Е., Сохорева В.А., Степанов И.Б., Шулепов И.А. Комплексные исследования модифицированных поверхностных слоёв и покрытий // Новые материалы и технологии HMT-2006: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, 2006. – T. 1. – С. 67–68.
- 29. Степанов И.Б., Шулепов И.А., Солдатов А.И., Сорокин П.В. Автоматическое управление и регистрация на Оже-спектрометре 09 ИОС-3 // Приборы и техника эксперимента. 2003 № 3. С. 166–167.
- 30. Stepanov I.B., Shulepov I.A., Mankov G.V. Non-Etalon Atomic Emission Method Of Quantitative Element Analysis Of Materials // Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of 7 th International Conference. Tomsk, 2004. C. 503–507.
- Kozlov E.V., Ryabchikov A.I., Sharkeev Yu.P., Stepanov I.B., Fortuna S.V., Sivin D.O., Kurzina I.A., Prokopova T.S., Mel'nik I.A. Formation of intermetallic layers of high intensity ion implantation // Surface and Coating Technology. 2002 V. 158–159. P. 343–448.
- 32. Козлов Э.В., Рябчиков А.И., Шаркеев Ю.П., Фортуна С.В., Степанов И.Б., Курзина И.А., Сивин Д.О., Мельник И.А., Прокопова Т.С., Шулепов И.А. Формирование интерметаллидных слоев методом высокоинтенсивной ионной имплантации. 1. Элементный состав и макроскопические характеристики титана, имплантированного алюминием // Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками: Труды 6 конференции. – Томск, 2002. – С. 238–241.
- 33. Козлов Э. В., Рябчиков А. И., Шаркеев Ю. П., Курзина И. А., Фортуна С. В., Степанов И. Б., Сивин Д. О., Божко И. А., Калашников М. П. Формирование наноразмерных интерметаллидов при высокоинтенсивной имплантации ионов алюминия в никель, титан и железо // Радиационная физика твердого тела: Труды международного совещания. Севастополь, 2003. С. 364–368.
- 34. Козлов Э.В., Рябчиков А.И., Шаркеев Ю.П., Курзина И.А., Фортуна С.В., Степанов И.Б., Божко И.А., Калашников М.П., Сивин Д.О. Формирование жаропрочных и износостойких поверхностных слоев микронных толщин на основе ультрадисперсных интерметаллидов при высокоинтенсивной ионной имплантации // Физика прочности и пластичности материалов: Труды XV Международной конференции. – Тольятти, 2003. – С. 3-31.
- 35. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Geikin V.A., Nochovnaya N.A., Legostaev V.N., Shulepov I.A., Sivin D.O., Eremin S.E. (Ti, Al)N and (Ti, Al)N/TiN Multilayer Coating Deposition Using Filtered Vacuum Arc Plasma // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2008. – P. 631–634.
- 36. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Шулепов И.А., Сивин Д.О. Комплексное исследование модифицированных поверхностных слоев и покрытий // Известия вузов. Физика. 2007 № 10/3. С. 10–15.
- 37. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Dektjarev S.V., Sergeev O.V. Vacuum arc ion and plasma source Raduga 5 for materials treatment // Rev. Sci. Instrum. 1998. V.69. P. 810–813.
- 38. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Sivin D.O., Stepanov I.B. Recent advances in surface processing with filtered DC vacuum-arc plasma // Vacuum. 2005. V. 78. P. 445–449.
- 39. Рябчиков А.И., Степанов И.Б.Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от микрочастиц (его варианты): пат. 2097868 Рос. Федерация. № 96114637/07; заявл. 09.07.96; опубл. 21.11.97.

- 40. Рябчиков А.И., Степанов И.Б.Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от микрочастиц (его варианты): пат. 2107968 Рос. Федерация. № 96116291/09; заявл. 06.08.96; опубл. 27.03.98.
- 41. Рябчиков А.И, Рябчиков И.А., Степанов И.Б., Еремин С.Е., Сивин Д.О. Устройство для очистки плазмы дугового испарителя от микрочастиц: пат. 2364003 Рос. Федерация. № 2008107365/28; заявл. 26.02.08; опубл. 10.08.09, Бюл. № 22.
- 42. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Дектярев С.В., Сергеев О.В. Формирование очищенных от микрокапельной фракции пучков ускоренных ионов и потоков металлической плазмы в системах с вакуумно-дуговыми ионно-плазменными источниками // Пленки и покрытия: Труды 5 Международной конференции. Санкт-Петербург, 1998. С.47–51.
- 43. Stepanov I.B., Ryabchikov I.A., Shaposhnikov P.A., Kurdyukov D.M. Formation of Vacuum-Arc Plasma Flows in Optically Opaque Plasma-Guides of The Shutter Type // Proceedings of the 5th Conference no Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2000. – P. 198–203.
- 44. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Sivin D.O., Stepanov I.B. Recent advances in surface processing with filtered DC vacuum-arc plasma // Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons: Proceedings of V-th International Conference. Kazimierz Dolny, Poland, 2004. P. 235.
- 45. Степанов И.Б. Оптически непрозрачные системы жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции // Известия вузов. Физика. 2007. № 10/3. С. 16–24.
- 46. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Исаков П.Я. Особенности формирования очищенных от микрокапельной фракции потоков плазмы и пучков ионов металла в источниках на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы III международной конференции. – Минск, 1999. – Ч. 1. – С. 66–69.
- 47. Рябчиков А.И., Рябчиков И.А., Степанов И.Б., Еримин С.Е. Времяпролетный способ измерения зарядового и массового состава ионов плазмы: пат. 2314594 Рос. Федерация. № 2006128656/28; заявл. 07.08.06; опубл. 10.01.08, Бюл. № 1.
- 48. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Sivin D.O., Eremin S.E. Plasma Immersion Ion Charge State and Mass Spectrometer // Известия вузов. Физика. 2006. № 8. С. 530–533.
- 49. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Eremin S.E., Sivin D.O. Quasiribbon Vacuum Arc Ion Source "Raduga–6" // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, 2008. P. 11–14.
- 50. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Еремин С.Е., Сивин Д.О. Источник ионов Радуга 6 для формирования псевдоленточных пучков ионов металлов // Известия вузов. Физика. 2009. № 11/2. С. 80–84.
- 51. Ryabchikov A.I., Koval N.N., Stepanov I.B., Goncharenko I.M., Sivin D.O., Ryabchikov I.A., Shulepov I.A. Formation Of Wear-Resistant TiN and (Ti_{1-x}, Al_x)N Coatings Using Dc Fil-Tered Vacuum Arc Plasma // Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of 7th International Conference. – Tomsk, 2004. – P. 404–408.
- 52. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Развитие методов импульсно-периодической ионной имплантации и нанесении покрытий на основе вакуумной дуги в НИИ ЯФ при ТПУ // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flow: Proceedings of the 6th Conference. Tomsk, 2002. P. 221–227.
- 53. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Dektyarev S.V., Shulepov I.A., Lukonin E.I. Technological Possibilities of "Raduga–5" DC Vacuum Arc Source of Accelerated Ions and Plasma // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of the 5th Conference. Tomsk, 2000. P. 489–493.

- Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Dektyarev S.V. High current vacuum-arc ion source for ion implantation and coating deposition technologies // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. № 3. P. 03B516.
- 55. Рябчиков А.И., Дектярев С.В., Степанов И.Б., Сергеев О.В. Сильноточный импульснопериодический источник ионов и плазмы на основе вакуумной дуги "РАДУГА 5" // Взаимодействие излучений с твердым телом: Труды II-й международной конференции. – Минск, 1997. – С. 165.
- 56. Дектярев С.В., Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Сергеев О.В., Сильноточный источник для импульсно-периодической ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов // Пленки и покрытия: Труды 5 Международной конференции. – Санкт-Петербург, 1998. – С. 52–55.
- 57. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Dektjarev S.V., Lukonin E.I., Shulepov I. A. High broad vacuum arc ion and plasma sources with extended large area cathodes // Ion Sources: Proceedings of the 8th International Conference. Kyoto, Japan, 1999. P. 47.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Dektjarev S.V., Lukonin E.I., Shulepov I.A. Very broad vacuum arc ion and plasma sources with extended large area cathodes // Rev. Sci. Instrum. – 2000. – V. 71. – P. 704–706.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Isakov P.Ya., Dektyarev S.V., Lukonin E.I. High Average Power Metal Ion Beams Production from DC Vacuum Arc Plasma // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of the 5th Conference. – Tomsk, 2000. – P. 159–163.
- Ryabchikov A., Stepanov I., Dektyarev S., Shulepov I., Lukonin E., Sivin D. Vacuum arc Ion and Plasma Source Raduga–5 // Proceedings of the 5th Korea–Russia International Symposium on Science and Technology. – Tomsk, 2001. – V. 1. – P. 380–383.
- Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Оборудование и методы реализации комбинированных технологий ионно-лучевой и ионно-плазменной модификации свойств поверхностных слоев // Ядерная и радиационная физика: Сборник тезисов докладов 5 международной конференции. – Алм–Ата, 2005 г. – С. 390.
- 62. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. New metal ion and plasma surface modification methods // Surf. and Coat. Technol. 2007. V. 201. P. 8637–8640.
- 63. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Исаков П.Я. Управление параметрами сильноточных пучков в импульсных многоэлементных технологических ускорителях с вакуумно-дуговым источником плазмы // Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц: Тезисы докладов III Конференции. Томск, 1994. Т. 1. С. 22–24.
- 64. Stepanov I.B., Ryabchikov A.I., Kozlov E.V., Sharkeev Yu.P., Shulepov I.A., Kurzina I.A., Sivin D.O. High-current vacuum-arc ion and plasma source "Raduga–5" application to intermetallic phase formation // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 03C115.
- 65. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Сивин Д.О. Источник псевдоленточных пучков ионов металлов // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4 С. 94–96.
- 66. Рябчиков А.И., Рябчиков И.А., Степанов И.Б. Способ импульсно-периодической имплантации ионов и плазменного осаждения покрытий: пат. 2238999 Рос. Федерация. № 2003104995/02,; заявл. 19.02.03; опубл. 27.10.04, Бюл. № 30. С. 235.
- 67. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. High-frequency short pulsed metal plasma immersion ion implantation using filtered DC vacuum arc plasma (Part I) // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proc of the 7th International Conference. Tomsk, 2004. P. 134–137.
- 68. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Высокочастотный, короткоимпульсный потенциал смещения, как универсальный метод ионно-лучевой и плазменной обработки проводящих и

диэлектрических материалов с использованием вакуумно-дуговой и абляционной плазмы // Известия вузов. Физика. – 2009. – № 11/2. – С. 155–160.

- 69. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. High Frequency Short-Pulsed Plasma-Immersion Ion Implantation and Deposition // Surf. and Coat. Technol. – 2007. – V. 201. – P. 8610–8614.
- Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. Development of plasma-immersion ion implantation and coating deposition methods based on high frequency short-pulsed bias voltage application // Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Physical Fields. – Tsukuba, Japan, 2005. – P. 165–172.
- 71. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Usov Yu. P. High-frequency short-pulsed metal plasma-immersion ion implantation or deposition using filtered DC vacuum-arc plasma // Surf and Coat Technol. 2007. V. 201. P. 6523–6525.
- 72. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. High-frequency short-pulsed plasmaimmersion ion implantation or deposition // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 8. – Приложение. – С.304–306.
- Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B. High-Frequency Short-Pulsed Metal Plasma-Immersion Ion Implantation Using Filtered Dc Vacuum-Arc Plasma (Part II) // Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of 7th International Conference. – Tomsk, 2004. – P. 138–141.
- 74. Ryabchikov A.I., Matvienko V.M., Stepanov I.B. Coating deposition using vacuum arc and ablation metal plasma // Surf. and Coat. Technol. 2009. V. 203. P. 2735–2738.
- 75. Ryabchikov A.I., Matvienko V.M., Stepanov I.B. Coating Deposition Using Vacuum Arc and Ablation Metal Plasma // Surface Modification of Materials by Ion Beams: Proceedings of the 15th International Conference. Mumbai, India, 2007. P. 27.
- 76. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Шулепов И.А., Сивин Д.О. Формирование композиционных покрытий из плазмы дугового разряда с использованием раздельных катодов // Известия вузов. Физика. –2007. Т. 50.–№ 10/3. С. 4–9.
- 77. Петров А.В., Полковникова Н.М., Рябчиков А.И., Сохорева В.В., Степанов И.Б., Струц В.К., Усов Ю.П., Шулепов И.А. Массоперенос первоначально имплантированной примеси и изменение морфологии поверхности материалов при многократном воздействии мощных ионных пучков // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 4. С. 71–75.
- 78. Petrov A.V., Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Struts V.K., Tolmachjeva V.G., Usov Yu. P., Shulepov I.A. Processes of Material Surface Modification under Combined Treatment by Pulsed Ion Beams of Different Power and Plasma Flows // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of the 5th Conference. – Tomsk, 2000. – P. 97–99.
- 79. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Equipment and Methods for Hybrid Technologies of Ion Beam and Plasma Surface Properties Modification // Proceedings of the 15th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams. Mumbai, India, 2007. P. 119.
- 80. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Equipment and Methods for Hybrid Technologies of Ion Beam and Plasma Surface Materials Modification//9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Tomsk, Russia, 21-26 September 2008, pp. 91-95
- 81. Козлов Э.В., Рябчиков А.И., Шаркеев Ю.П., Фортуна С.В., Курзина И.А., Мельник И.А., Прокопова Е.С., Степанов И.Б., Шулепов И.А. Проблемы формирования твердых растворов и интерметаллидных фаз системы Al-Ni при высокоинтенсивной ионной имплантации // Известия Академии наук. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 6. С. 818–822.
- 82. Курзина И.А., Божко И.А., Калашников М.П., Фортуна С.В., Батырева В.А, Степанов И.Б., Шаркеев Ю.П.. Высокоинтенсивная имплантация ионов алюминия в никель и титан // Известия Томского политехнического университета. 2004. № 3. С. 30–35.

- 83. Шаркеев Ю.П., Рябчиков А.И., Козлов Э.В., Курзина И. А., Степанов И.Б., Божко И.А., Калашников М.П., Фортуна С.В., Сивин Д.О. Высокоинтенсивная ионная имплантация метод формирования мелкодисперсных интерметаллидов в поверхностных слоях металлов // Известия Вузов. Физика.–2004.–№ 9.–С. 44–52.
- Kurzina I.A., Bozhko I.A., Kalashnikov M.P., Fortuna S.V., Stepanov I.B., Sharkeev Yu.P., Kozlov E.V. The High Intensity Implantation of Aluminium Ions into Titanium // Proceedings of 8th Korean-Russian International Symposium on Science & Technology (KORUS 2004). – Tomsk, 2004. – P. 127–131.
- 85. Курзина И. А., Калашников М.П., Божко И.А., Батырева В.А, Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Шаркеев Ю.П. Термостабильность поверхностных слоев титана, формированных при высокоинтенсивной имплантации ионов алюминия // Радиационная физика твердого тела: Труды XIV Международного совещания. Севастополь, 2004. С. 362-366.
- Kurzina I.A., Bozhko I.A., Kalashnikov M.P., Fortuna S.V., Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Sivin D.O., Sharkeev Yu.P., Kozlov E.V. High Intensity Implantation Of Aluminium Ions Into Titanium // Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of 7th International Conference. – Tomsk, 2004. – P. 221–224.
- 87. Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П., Рябчиков А.И., Курзина И. А., Степанов И.Б., Божко И.А., Калашников М.П., Сивин Д.О. Формирование наноструктурных интерметаллидных поверхностных слоев методами высокоинтенсивной имплантации ионов металлов // Актуальные проблемы прочности: Труды XLIII Международной конференции. – Витебск, 2004. – С. 174–175.
- Stepanov I.B., Ryabchikov A.I., Kozlov E.V., Sharkeev YU.P., Sivin D.O., Shulepov I.A., Kurzina I.A. High-Current Vacuum-Arc Ion and Plasma Source "Raduga–5" Application for Intermetallic Phase Formation in the Surface Layer of Metal Target // Proceedings of the 11th International Conference on Ion Sources. – Caen, France, 2005. – P. 140.
- Bozhko I. A., Fortuna S. V., Kurzina I. A., Stepanov I. B., Kozlov E. V., Sharkeev Yu.P. Formation of Nanoscale Intermetallic Phases in Ni Surface Layer at High Intensity Implantation of Al Ions // J. Mater. and Sci. Technol. – 2004. – V. 20. – P. 583–586.
- 90. Kurzina I.A., Kozlov E.V., Sharkeev Yu.P., Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Bozhko I.A., Kalashnikov M.P., Sivin D.O., Fortuna S.V. Influence of ion implantation on nanoscale intermetallic-phase formation in Ti–Al, Ni–Al and Ni–Ti systems // Surface and Coating Technology. 2007. V. 201. P. 8463–8468.
- Stepanov I.B., Ryabchikov A.I., Nochovnaya N.A., Sharkeev Y.P., Shulepov I.A., Ryabchikov I.A., Sivin D.O., Fortuna S.V. Vacuum arc filtered metal plasma application in hybrid technologies of ion-beam and plasma material processing // Surface and Coating Technology. 2007. V. 201. P. 8596–8600.
- 92. И.Б. Степанов. Оборудование для реализации комбинированных методов ионно-лучевой и ионно-плазменной модификации материалов // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flow: Proceedings of the 6th Conference. Tomsk. 2002. Р. 33–39.
- 93. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. New Generation Installation for Material Processing by Metal Ion Beam and Plasma // Известия вузов. Физика. 2006. № 8. Приложение. С. 47–50.
- 94. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Equipment and methods for hybrid technologies of ion beam and plasma surface materials modification // Surface and Coating Technology. 2009. V. 203. № 17/18. P. 2784–2787.
- 95. Рябчиков А.И., Степанов И.Б. Применение высокочастотного, короткоимпульсного потенциала смещения для ионно-лучевой и плазменной обработки проводящих и диэлектрических материалов // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4 С. 85–89.

96. Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Legostaev V.N., Shulepov I.A., Sivin D.O., Eremin. S.E. (Ti, Al)N and (Ti, Al)N/TiN Multilayer Coating Deposition Using Filtered Vacuum Arc Plasma// Surface Modification of Materials by Ion Beams: Proceedings of the 15th International Conference.–Mumbai, India, 2007.–P. 137–142.