

На правах рукописи

Лисенков Александр Аркадьевич

**Создание научных основ, разработка и внедрение  
специального электрофизического оборудования,  
технологий и материалов в производство  
мощных генераторных ламп**

Специальность: 01.04.13 «Электрофизика, электрофизические установки»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2007

Работа выполнена в Институте проблем машиноведения Российской академии наук (г. Санкт-Петербург)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Саксаганский Георгий Леонидович

доктор технических наук, профессор  
Скотникова Маргарита Александровна

доктор технических наук, профессор  
Титков Василий Васильевич

Ведущая организация: Институт электрофизики и электроэнергетики  
РАН (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится “ 18 ” мая 2007 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,  
главное здание, аудитория 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” апреля 2007 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета доцент, к.т.н.

Н. М. Журавлева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Функционирование промышленно-развитого государства невозможно без наличия систем радиосвязи, радиовещания и телевидения. Элементами, определяющими тактико-технические характеристики таких систем, являются генераторные лампы. Кроме этого мощные генераторные лампы (МГЛ) также применяются в радиолокационных системах как гражданского, так и военного применения (системы ПВО, загоризонтной радиолокации раннего оповещения, а также в ряде систем наведения и управления стрельбой), в современном технологическом оборудовании и специальных электрофизических установках, предназначенных для ускорения заряженных частиц и исследований в областях ядерной физики и термоядерного синтеза.

Таким образом, направление научных и прикладных исследований, связанных с разработкой и производством МГЛ, является неотъемлемой частью жизнеобеспечения государства, а сами приборы – одним из видов стратегически важной продукции.

В зависимости от типа и характера применения уровень выходной мощности генераторных ламп изменяется от единиц киловатт до 2.5 МВт в непрерывном режиме и до 5 МВт в импульсном, а диапазон анодных напряжений – от единиц до сотен киловольт.

По комплексному сочетанию своих параметров (ток, напряжение, мощность, рабочий частотный диапазон) мощные лампы в настоящее время существенно превосходят твердотельные приборы и в обозримом будущем не могут быть заменены ими.

Несмотря на высокое качество и надежность приборов, отказы из-за выхода их из строя составляют значительную долю общего числа отказов радиоэлектронной аппаратуры. Увеличение срока службы на 10...20 % при долговечности несколько тысяч часов даст для большинства типов МГЛ значительный экономический эффект.

Основные направления совершенствования генераторных ламп – это увеличение удельной мощности на единицу объема и увеличение долговечности при высоком уровне надежности. Увеличение удельной мощности связано с ростом рабочей температуры сеточных узлов и анодов, что, в свою очередь, ведет к снижению надежности и срока их службы.

Улучшение качества выпускаемой продукции, повышение эффективности производства за счет снижения трудоемкости и себестоимости предполагает создание и внедрение в производство нового специального электрофизического оборудования, материалов и прогрессивных технологий.

Для увеличения срока службы МГЛ на анодах и сеточных электродах применяются различные защитные покрытия, удовлетворяющие специальным требованиям. Наиболее перспективным методом поверхностной обработки материалов в настоящее время является метод, использующий потоки металлической плазмы, генерируемой вакуумно-дуговым разрядом с инте-

грально-холодным катодом. Данный тип технологического оборудования обеспечивает высокую эффективность при получении ионизированных и высокоскоростных потоков вещества, открывает возможности управления технологическим процессом нанесения покрытий из плазмы различных чистых металлов, осуществления плазмохимического синтеза простых и сложных соединений, воспроизведения сплавов и получения сложных комбинированных покрытий, а также проведение как ионного распыления обрабатываемой поверхности, так и легирования приповерхностного объема. Протекание технологического процесса в вакууме обеспечивает чистоту получаемых покрытий и высокие адгезионные свойства на материалах с различными физико-химическими параметрами.

Создание нового класса электрофизического оборудования, позволяющего расширить области практического применения дуговых источников плазмы и технологических процессов на их основе, связано с теоретическим и экспериментальным изучением физических процессов в плазме вакуумно-дугового разряда. Однако в настоящее время вопросы генерации потоков металлической плазмы не имеют своей законченной теории и многие детали физической картины как в самом катодном пятне, так и в зоне транспортировки плазменного потока остаются неясными, что связано со сложной взаимосвязью между отдельными параметрами и многообразием протекающих физических явлений.

Таким образом, проблемы повышения надежности и увеличения срока службы деталей и конструкций, повышения их качества и эффективности работы, а также экономии металлов относятся к числу первоочередных задач науки и техники. Решение этих задач все теснее связывают с созданием на основе вакуумно-дугового разряда с интегрально-холодным катодом нового класса электрофизического оборудования, предназначенного для разработки ресурсосберегающих и экологически чистых технологических процессов объемного и поверхностного модифицирования материалов, формирования из потоков металлической плазмы покрытий из чистых металлов, плазмохимических соединений, и с разработкой новых принципов получения антиэмиссионных покрытий.

**Целью работы** является создание научных основ и разработка специализированного электрофизического оборудования для экологически чистых и ресурсосберегающих технологий направленного модифицирования поверхности и формирования на электродах мощных генераторных ламп защитных покрытий с заданными эксплуатационными свойствами из ускоренных потоков металлической плазмы, генерируемых вакуумно-дуговым разрядом, для повышения работоспособности и увеличения срока службы МГЛ.

Реализация поставленной цели достигается решением следующих задач:

- разработкой основ использования ускоренных потоков металлической плазмы для формирования покрытий и условий направленного поверхностного модифицирования свойств обрабатываемой поверхности;
- разработкой экологически чистых технологических процессов по на-

несению антиэмиссионных и газопоглощающих покрытий применительно к электродам мощных генераторных ламп;

- изучением взаимодействия направленного плазменного потока с поверхностью твердого тела и выявлением особенностей формирования покрытий на внутренней поверхности цилиндрической полости;

- выявлением общих закономерностей влияния температуры катода на параметры генерируемого потока металлической плазмы, определяющего свойства обрабатываемой поверхности;

- изучением движения заряженных частиц плазменного потока в неоднородном магнитном поле;

- разработкой методов управления плотностью тока плазменного потока с целью получения заданных тепловых режимов обрабатываемого изделия;

- разработкой специализированного технологического оборудования на основе протяженных испарителей;

- разработкой принципиально новых композиционных материалов и покрытий и методов их получения;

- разработкой антиэмиссионных покрытий с барьерным слоем для предотвращения встречной диффузии платины и молибдена;

- внедрением в промышленность разработанных технологий и специализированного электрофизического оборудования.

**Методы исследований.** Исследования выполнены с применением современных теоретических и экспериментальных методов, использующих математический анализ, численный расчет и математическое моделирование, металлографию, рентгенографический и микроструктурный анализ, электронную микроскопию и микрорентгеноспектральный анализ химического состава покрытий. Полученные результаты исследований, их согласованность и корреляция экспериментальных и расчетных данных подтверждают обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций работы.

**На защиту выносятся:**

1. Физические процессы генерации потоков металлической плазмы и их воздействие на поверхность твердого тела.

2. Закономерности управления плотностью тока плазменного потока и технологические процессы управления свойствами поверхностных слоев изделий, основанные на нагреве обрабатываемой поверхности, распылении и последующем осаждении напыляемого материала.

3. Закономерности перераспределения заряженных частиц в рабочем объеме для повышения скорости роста и формирования равномерного по толщине покрытия на внутренней поверхности камерных анодов и крупногабаритных сетках мощных генераторных ламп.

4. Способ формирования антиэмиссионного интерметаллического покрытия на основе карбида циркония и платины на сетках мощных генераторных ламп с диффузионным барьерным слоем из карбида тугоплавкого металла материала сеточного электрода.

5. Специальное электрофизическое оборудование на основе вакуумно-дуговых генераторов металлической плазмы протяженной конструкции для формирования равномерных покрытий на крупногабаритных изделиях и изделиях сложной геометрической формы.

6. Результаты исследования эксплуатационных свойств антиэмиссионных и газопоглотительных покрытий на электродах мощных генераторных ламп.

**Научная новизна.** В диссертационной работе решены следующие научные проблемы:

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований процесса разогрева катода вакуумно-дугового испарителя протяженной конструкции, формирующего ленточный поток металлической плазмы, выявлены основные закономерности изменения характера движения катодных пятен и их эмиссионных характеристик.

2. Разработаны теоретическая модель и математическая программа расчета траекторий движения плазменных потоков в осесимметричном магнитном поле катушек испарителя и катушек систем транспортировки плазменных потоков, позволившие создать новые электромагнитные системы для формирования равномерных покрытий на крупногабаритных изделиях и изделиях сложной геометрической формы.

3. На основе анализа процессов испарения материалов с катодов протяженной конструкции, процессов формирования плазменных потоков их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью созданы новые источники плазменных потоков, работающие в импульсном и непрерывном режимах горения вакуумной дуги и формирующие направленные ленточные и радиально расходящиеся потоки металлической плазмы.

4. Выполнен теоретический анализ токопрохождения ионной составляющей потока металлической плазмы через плазменный аттенюатор, позволяющий управлять потоком мощности на обрабатываемом изделии, регулировать скорость нанесения покрытий и одновременно значительно уменьшать содержание дефектов в покрытии в виде микрокапель.

5. Выполнен теоретический и экспериментальный анализ взаимодействия ускоренных потоков металлической плазмы с внутренней поверхностью цилиндрической формы, в том числе и с поперечными ребрами, результаты которого использованы при обработке камерных анодов мощных генераторных ламп.

6. Впервые на основе выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований технологией вакуумно-дугового нанесения покрытий получен один из наиболее эффективных и современных на сегодняшний день антиэмиссионных материалов  $Pt_3Zr$ , синтезируемый через карбид циркония.

7. Впервые применительно к антиэмиссионным покрытиям на сетках мощных генераторных ламп показана возможность повышения их срока службы за счет применения антидиффузионных барьерных слоев.

8. Разработаны высокоэффективные экологически чистые и ресурсосберегающие технологические процессы очистки поверхности и нанесения антиэмиссионных и газопоглощающих покрытий на электроды мощных генераторных ламп, а также электрофизические установки для их реализации, способствующие существенному (в 3 – 5 раз) увеличению срока службы ламп.

**Практическая значимость исследований**, проведенных автором, заключена в следующем:

1. Разработаны и внедрены в производство принципиально новые конструкции источников плазмы, реализующие новые ресурсосберегающие экологически чистые вакуумные технологии нанесения функциональных покрытий с высокими эксплуатационными свойствами.

2. Предложены новые конструкции вакуумно-дуговых источников плазмы с интегрально-холодным катодом протяженной конструкции, позволяющие наносить покрытия на крупногабаритные изделия сложной геометрической формы.

3. Разработаны методы магнитного управления движением заряженных частиц плазменного потока, позволяющие достичь их перераспределения в рабочем объеме, создать зоны с повышенной их концентрацией, повысить коэффициент использования плазмообразующего материала, увеличить скорость роста и равномерность толщины наносимого покрытия на обрабатываемых изделиях.

4. Разработаны и реализованы в программном комплексе алгоритмы расчета транспортировки заряженных частиц плазменного потока и распределения плотности ионного тока в рабочем объеме вакуумно-дугового источника плазмы.

5. Разработаны методы управления плотностью плазменного потока и его очистки от капельных образований, позволяющие за счет согласования теплового режима плазменного потока и обрабатываемого изделия расширить области практического применения источников плазмы.

6. Результаты разработок внедрены в серийное производство мощных генераторных ламп.

7. Технологический процесс получения интерметаллического соединения на основе карбида циркония и платины, используемого в качестве антиэмиссионного покрытия на сеточных электродах, внедрен в производство мощных генераторных ламп.

8. Разработан технологический процесс получения многослового покрытия с диффузионным барьерным слоем из карбида тугоплавкого металла, повышающий срок службы мощных генераторных ламп.

**Внедрение результатов работы.** Значимость выводов и рекомендаций работы, а также высокий уровень технологических разработок подтверждаются положительным опытом эксплуатации в промышленности. Новизна научных результатов, разработанных технологических устройств и процессов подтверждаются 5 авторскими свидетельствами и 7 патентами на изобре-

ния. Образцы выполненных разработок постоянно демонстрируются на Российских выставках. На последней выставке «Российский промышленник–2006» (г. С.-Петербург) в инновационных проектах передовых технологий машиностроения разработка ионно-плазменных технологий удостоена диплома 1-й степени с золотой медалью.

Разработанное электрофизическое оборудование и технологии внедрены в серийное производство мощных генераторных ламп на ЗАО «С.Е.Д.-СПб». Годовой экономический эффект от внедрения составил 1 419 740 рублей (2006 г.).

За проведенные научные исследования и выполненные разработки автор удостоен звания «Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники» (указ Президента Российской Федерации от 25.07.2000 г.).

#### **Апробация работы.**

Результаты работы регулярно представлялись и обсуждались на Всесоюзных и Международных научно-технических конференциях:

– The 7 International conference «High Technologies in Advanced metal science and Engineering», 2006, С.-Петербург;

– НТС «Электровacuумная техника и технология», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, Москва;

– 2-я Международная научно-практическая конференция «Высокие технологии и фундаментальные исследования», 2006, С.-Петербург;

– Международная конференция «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», Украина, Харьков, 2003, 2004;

– International conference «Plasma Physics and Plasma Technology», Belarus, Minsk, 2004, 2006;

– Международный симпозиум «Вакуумные технологии и оборудование», Украина, Харьков, 2001, 2002, 2003;

– Международная конференция «Алмазные пленки и пленки родственных материалов», Украина, Харьков, 2002;

– Международная специализированная выставка-конгресс: «Электротехнологии XXI века» (ЭЛТЕХ–2001), С.-Петербург, 2001;

– Международная конференция «Пленки и покрытия», С.-Петербург, 1998, 2001, 2005;

– 1-я Международная конференция «Покрытия – Технологии – Оборудование», С.-Петербург, 2000;

– IV НТК с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Гурзуф, 1995, 1996;

– V НТК «Материалы и упрочняющие технологии», Курск, 1997;

– Международная НТК «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП», Новосибирск, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004;

– III Всесоюзная НТК «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц», Томск, 1994;

– Всесоюзная НТК «Актуальные проблемы электронного приборострое-



ния», Ленинград, 1990;

– Всесоюзная НТК «Прогрессивная технология нанесения металлических покрытий на поверхности», Челябинск, 1986.

В ряде перечисленных конференций автор входил в состав оргкомитета, выступал в качестве председателя или ученого секретаря.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в монографии «Вакуумные дуговые источники плазмы», в 45 публикациях, 6 учебных пособиях, 55 материалах докладов и 12 авторских свидетельствах и патентах на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка используемых литературных источников из 230 наименований. Работа содержит 340 страниц машинописного текста, 142 иллюстрации и 27 таблиц. Приложение к диссертации содержит акты внедрения результатов работы в промышленность.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определена актуальность работы, представлены технологические возможности и преимущества вакуумно-дуговых источников плазмы при формировании металлических покрытий с заданными эксплуатационными свойствами из ускоренных потоков металлической плазмы. Сформулирована цель работы, изложены основные решаемые задачи и полученные научные результаты, представлена научная и практическая ценность выполненных исследований и технологических разработок, доведенных до практического внедрения в промышленность.

**Первая глава** содержит анализ современного состояния методов, обеспечивающих достижение специальных поверхностных свойств обрабатываемых материалов. В настоящее время важным и актуальным является поиск, изучение и внедрение в производство высокоэффективных экологически чистых методов направленного объемного и поверхностного модифицирования поверхности, являющихся альтернативными традиционными способами термической и механической обработки.

Решение технологических проблем повышения эксплуатационных свойств и срока службы поверхности всё теснее связывается с развитием технологий, основанных на применении различных методов вакуумной ионно-плазменной обработки. На примере существующих ионно-плазменных систем показано, что наиболее эффективными по своим технологическим параметрам являются вакуумно-дуговые источники, генерирующие ускоренный направленный поток плазмы и обеспечивающие эффективное взаимодействие потока с обрабатываемой поверхностью. При этом отмечается, что нанесение покрытия проводится в два этапа. На первом этапе очищается поверхность подложки: с обрабатываемой поверхности распыляются загрязнения, адсорбированные и оксидные пленки. Одновременно с распылением происходит и внедрение ионов в материал обрабатываемой поверхности, что

приводит к формированию псевдодиффузного слоя, имеющего большое значение в повышении адгезионных свойств получаемого покрытия. На втором этапе формируется покрытие, свойства которого на различных подложках определяются температурой нагрева обрабатываемой поверхности.

Представлено современное состояние применяемого технологического оборудования. Показано, что существующее оборудование не отвечает требованиям по формированию равномерных покрытий на ряде обрабатываемых изделиях.

На основе проведенного анализа современного состояния проблемы создания электрофизического оборудования с вакуумно-дуговыми источниками плазмы сформулированы основные задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена теоретическому рассмотрению вопросов формирования и транспортировки заряженных частиц в неоднородном магнитном поле. Процесс воздействия ускоренного потока плазмы на обрабатываемое изделие включает в себя: процессы, протекающие на катоде, связанные с эмиссией из области катодного пятна электронов, испарения атомов материала катода; формирование плазменного потока и транспортировку его в рабочем объеме; условия осаждения заряженных и нейтральных частиц на обрабатываемом изделии, их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, учитывающие ее свойства (рис. 1).



Рис. 1. Схема взаимосвязи параметров, определяющих процесс формирования покрытия из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда

Вакуумно-дуговой разряд с интегрально-холодным катодом существует в парах материала катода и поддерживается из катодных пятен, в которых температура превышает температуру кипения материала катода. В настоящее время самым неисследованным физическим объектом остается катодное пят-

но вакуумно-дугового разряда, существующее на интегрально-холодном катоде. Затруднения, встречающиеся при изучении катодных пятен, объясняются их малыми размерами, высокой скоростью перемещения, при постоянно изменяющихся параметрах системы, в которой они находятся.

Выделено два типа дуговых разрядов, характеризующихся различными условиями существования: дуговой разряд на диэлектрических пленках загрязнений, возникающий в первоначальный момент времени, и основной дуговой разряд с материала катода.

Первый тип разряда, неуправляемый, хаотично перемещающийся и очень быстро охватывающий всю поверхность, возникает на неочищенной поверхности катода. Данный тип разряда существует при более низких значениях разрядного тока, чем основной с материала катода. Разрядный ток определяет количество одновременно существующих пятен на рабочей поверхности катода. На тонкопленочных покрытиях ток, замыкающийся на каждое катодное пятно, имеет порядок всего лишь несколько ампер, отчего и наблюдается увеличение количества существующих пятен.

Отмечено, что появление на рабочей поверхности катода высокоскоростных и неуправляемых светящихся образований связано с частичным осаждением положительно заряженных частиц на поверхности загрязнений, с образованием двойных электрических слоев с высокой напряженностью электрического поля. Пробой подобного слоя хотя бы в одной точке инициирует лавину подобных пробоев. В результате на рабочей поверхности катода, в зонах загрязнений, появляются неуправляемые высокоскоростные поверхностные разряды, не вызывающие эрозионных процессов материала катода.

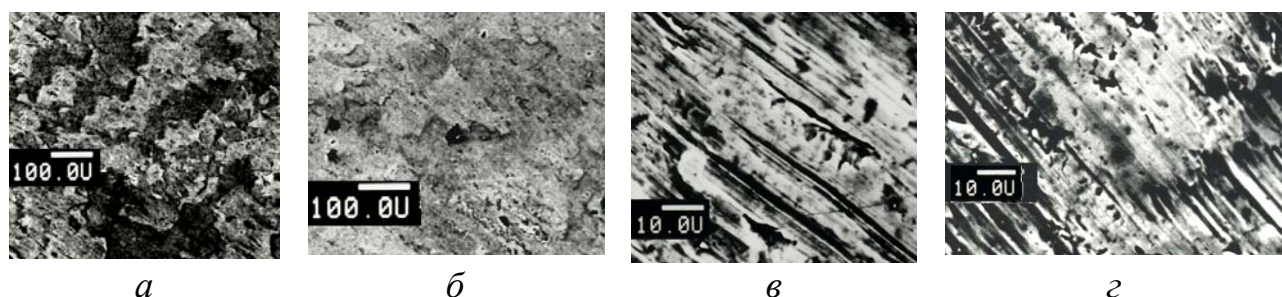


Рис. 2. Воздействие предварительного разряда на поверхность катода:  
*а, б* – неочищенная поверхность; *в, г* – очищенная поверхность  
(масштабы  $100.0U = 100$  мкм и  $10.0U = 10$  мкм)

На рис. 2 представлены фотографии рабочей поверхности, полученные с помощью растрового электронного микроскопа в *Z*-контрасте (рис. 2, *а, б*) и в топологическом контрасте (рис. 2, *в, г*). Явно выраженные зоны загрязненных участков, присутствующие на поверхности катода до начала работы испарителя, приведены на рис. 2, *а*. Результаты воздействия комбинированного разряда, возникающего в первоначальный момент времени и обеспечивающего очистку поверхности, отражает рис. 2, *б*. Поверхность катода, представленная в топологическом контрасте до (рис. 2, *в*) и после (рис. 2, *г*) существования на ней разряда, позволяет оценить характер его воздействия на

рельеф. На рис. 2, *г* хорошо видны результаты воздействия разряда, характеризующиеся наличием поверхностных оплавленных зон и одновременным отсутствием следов глубоких эрозионных процессов с материала катода. Данный эффект используется в промышленности для удаления загрязнений с металлических поверхностей с помощью дугового разряда.

После очистки рабочей поверхности при последующих токовых импульсах формируется дуговой разряд с материала катода. Движущееся пятно – точечный источник тепла, нагревающий катод по пути перемещения и оставляющий на поверхности катода, в зависимости от его температуры, характерные следы разрушений (рис. 3).

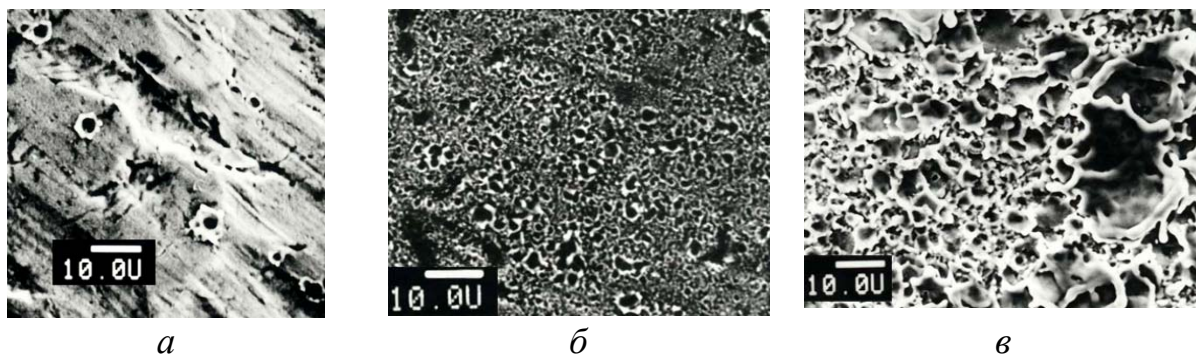


Рис. 3. Следы, оставляемые катодными пятнами, на рабочей поверхности катода: *а* – первый токовый импульс, холодный катод; *б* – температура катода 600 К; *в* – температура катода 900 К (масштаб 10.0U = 10 мкм)

Из-за большой длительности первых токовых импульсов (100 мс и более) перемещение катодных пятен по рабочей поверхности катода фиксировалось видеокамерой. Покадровая развертка изображения позволила оценить трансформацию катодных пятен во времени и определить скорость их перемещения по рабочей поверхности катода с точностью до 20 мс – времени отображения одного поля. Следующие друг за другом кадры дают представление о перемещении катодных пятен.

Изменение характера движения катодных пятен по рабочей поверхности с увеличением температуры катода представлено на рис. 4. Первый токовый импульс длительностью  $t = 80$  мс, зафиксированный на холодном катоде, соответствует трем кадрам видеоряда (рис. 4, *а*).

Групповое катодное пятно, наблюдаемое внизу кадра, связано с его задержкой у дугогасящего экрана. Наблюдаемая задержка катодных пятен в области дугогасящего экрана иногда превышает время пробега в 1.5...2 раза, что приводит к неравномерной эрозии материала катода.

При непрерывном перемещении катодных пятен по ограниченной рабочей поверхности, независимо от начального распределения температуры, на катоде устанавливается некоторая средняя равновесная температура, определяемая размерами катода, а также условиями его охлаждения.

По мере повышения температуры катода количество кадров, фиксирующих перемещение катодных пятен по рабочей поверхности, за один им-

пульс сокращается. Рис. 4, б сложен из двух кадров и имеет три момента перемещения ( $t = 60$  мс). Рис. 4, в соответствует двум моментам перемещения ( $t = 40$  мс). Рис. 4, г соответствует одному кадру и одному моменту перемещения ( $t = 20$  мс), при этом отчетливо виден след, оставляемый катодным пятном. Учитывая, что расстояние от поджигающего электрода до дугогасящего экрана равно 0.4 м, получаем возрастание скорости направленного перемещения катодных пятен с 5 до 20 м/с.

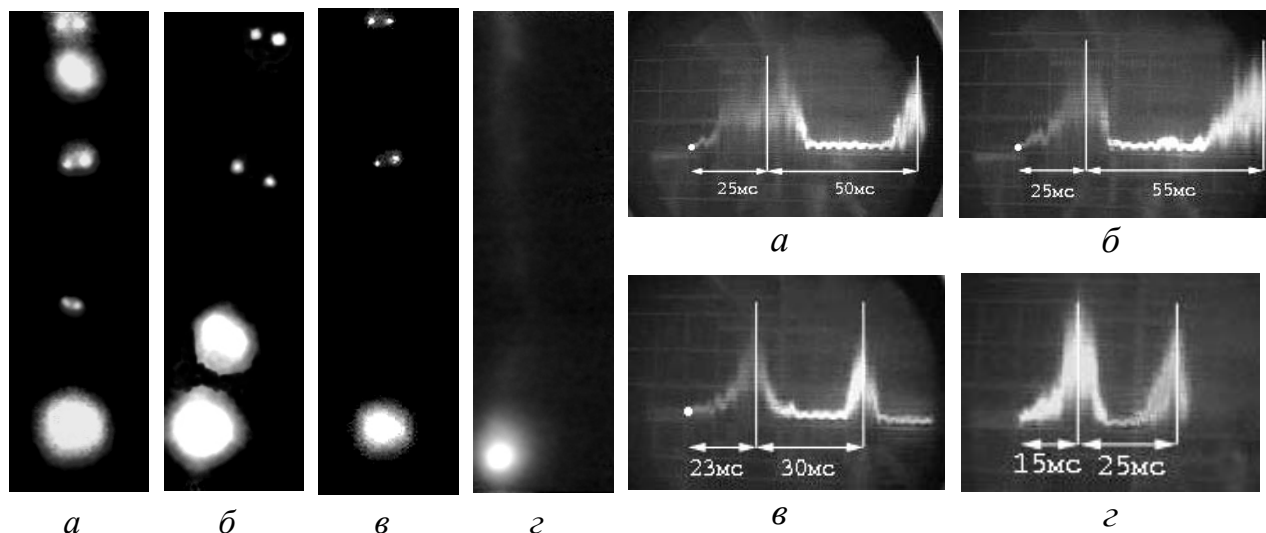


Рис. 4. Изменение скорости перемещения катодных пятен по рабочей поверхности с изменением температуры катода

Рис. 5. Осциллограммы тока на зонды при перемещении катодных пятен по рабочей поверхности с изменением температуры катода

Перемещение катодных пятен исследовалось с помощью зондов, расположенных на определенных расстояниях от поджигающего электрода до дугогасящего экрана, обеспечивающих регистрацию максимума ионной составляющей плазменного потока на экране осциллографа при условии совпадения перемещающихся катодных пятен с осью приемной поверхности зондов.

На рис. 5 представлены осциллограммы токовых импульсов в зависимости от температуры циркониевого катода.

Наблюдаемое на всех фотографиях плавное нарастание тока на отрезке от поджигающего электрода до первого зонда характеризуется хаотическим перемещением катодных пятен на начальном участке и связано с прогревом катода. С ростом температуры катода шумовые составляющие сигнала на осциллограммах уменьшаются, а направленная скорость перемещения катодных пятен по рабочей поверхности увеличивается.

Плотность эмиссионного тока зависит от температуры в пятне  $T_{\text{кп}}$  и напряженности электрического поля  $E$ , создаваемой у поверхности катода:  $j_e = f(T_{\text{кп}}, E)$ , где  $T_{\text{кп}}$  – температура в катодном пятне;  $E$  – напряженность электрического поля.

При тепловых расчетах мощность, выделяющаяся на катоде, определялась через полную мощность и коэффициент катодной мощности  $h_k$ :  $P_k = h_k I_{\text{раз}} U_k$ . Подводимая к катоду мощность расходуется на испарение, зависящее от скорости эрозии материала из катодного пятна,  $P_{\text{исп}} = W_{\text{исп}} (dn_{\text{исп}} / dt)$ , излучение  $P_{\text{изл}} = S_k \sigma \varepsilon (T_k^4 - T_0^4)$  и мощность, отводимую в систему охлаждения катода  $P = P_k - P_{\text{исп}} - P_{\text{изл}}$ .

Для расчета температуры протяженного цилиндрического катода последний моделировался в виде плоской пластины шириной  $l = 2\pi R_{\text{кат}}$ , соответствующей внешней длине окружности катода, и толщиной  $h = R_{\text{кат}} - R_{\text{охл}}$ . Расчет производился для ленточного потока задаваемой ширины, в пределах которого плотность потока в любой момент времени одинакова во всех точках расчетной области  $-\lambda(dT/dh)_{h=0} = q, (0 \leq r \leq R)$ , а вне его – равна нулю. В исходном состоянии температура поверхности катода одинакова во всех точках  $T_{t=0} = T_0$ . Для оценки температуры катода было осуществлено калориметрирование водяного потока, в результате было получено, что температура в рабочей зоне катода при выбранных условиях не превышает 570 К.

При рассмотрении транспортировки формируемого плазменного потока учитывалось, что прикатодная плазма, в которой электрическое поле относительно невелико, отделена от катода бесстолкновительным слоем пространственного заряда, локализуя катодное падение. Распределение потенциала и электрического поля в бесстолкновительном слое определяется положительным объемным зарядом ионов, поступающих из плазмы. Возникающее в этом слое электрическое поле облегчает эмиссию электронов из катода и сообщает энергию заряженным частицам, движущимся в этом слое. Основное количество испаряющихся атомов в ионизированном виде, ускоряясь в бесстолкновительном слое, возвращается на катод, разогревая его, а остальные испарившиеся атомы и ионы вытекают в газодинамический поток.

В рабочем объеме испарителя плазменный поток движется в заданном, расходящемся неоднородном магнитном поле, имеющем существенную пространственную неоднородность из-за использования в зоне транспортировки соленоидов с различной геометрией.

Строгое описание поведения плазмы может быть проведено с помощью кинетических уравнений Больцмана, однако во многих случаях целесообразно применять упрощенные физические модели потоков, допускающих более простое математическое описание. Использование квазигидродинамической модели для получения приближенных результатов расчета представляется достаточно обоснованным при решении задачи движения потока металлической плазмы во внешнем магнитном поле. В этом случае поток частиц разбивается на конечное число трубок тока. Предполагается, что скорость частиц, принадлежащих данной трубке тока, является однозначной функцией точки. В связи с чем описание движения каждой трубки в отдельности может быть проведено в рамках гидродинамического приближения.

Теоретический анализ движения плазменных потоков в неоднородном магнитном поле встречает серьезные трудности даже в простейшем случае магнитогидродинамического приближения. Поэтому вместо уравнений движения для ионов и электронов используют уравнение движения для всей плазмы в целом, являющееся обобщенным уравнением движения, не содержащим величины электрического поля

$$m_i n_i \frac{d\vec{\mathfrak{Q}}_i}{dt} = -(\nabla p_i + \nabla p_e) + en_i (\vec{\mathfrak{Q}}_i \times \vec{B} - \vec{\mathfrak{Q}}_e \times \vec{B}),$$

где  $m_i$  – масса иона;  $n_i$  – концентрация ионов;  $\nabla p_i$  и  $\nabla p_e$  – градиенты давления;  $\vec{\mathfrak{Q}}_i$  и  $\vec{\mathfrak{Q}}_e$  – скорости ионной и электронной компонент;  $e$  – элементарный заряд.

В результате преобразований получены дифференциальные уравнения, описывающие движение заряженной частицы в аксиально-симметричном магнитном поле.

Для расчета составляющих индукции магнитного поля использовались разработанные математические программы на основе следующих полученных расчетных выражений:

$$B_r(r, z) = j \frac{\mu \mu_0}{2\pi r} \int_R^{R+H} \sum_{v=1}^2 (-1)^{v+1} \sqrt{(z - z'_v)^2 + (r + r')^2} \left[ \left( 1 - \frac{k_v^2}{2} \right) K(k_v^2) - E(k_v^2) \right] dr',$$

$$B_z(r, z) = j \frac{\mu \mu_0}{2\pi r} \int_R^{R+H} \sum_{v=1}^2 (-1)^v \frac{(z - z'_v)}{\sqrt{(z - z'_v)^2 + (r + r')^2}} \left[ K(k_v^2) + \frac{r' - r}{r' + r} \Pi(h, k_v) \right] dr',$$

где  $z'_1 = L + B$ ,  $z'_2 = L$ ;  $h = 4rr'/(r + r')^2$ ;  $k_v = \sqrt{4rr'/[(z - z'_v)^2 + (r + r')^2]}^{-1}$ ;  $K(k_v^2)$ ,  $E(k_v^2)$  и  $\Pi(h, k_v)$  – эллиптические интегралы первого, второго и третьего рода соответственно;  $R$ ,  $H$ ,  $B$  – геометрические размеры соленоида: внутренний радиус, толщина обмотки, длина;  $L$  – расстояние от соленоида до начала координат.

Начальные условия распределения плотности ионного тока для рассматриваемого плазменного потока задавались из экспериментальных данных. Расчет осуществлялся как при положительных, так и при отрицательных углах старта. Увеличение количества расчетных траекторий повышает точность проводимых расчетов. Математическая модель реализована в виде пакета расчетных программ. Показано, что за счет изменения конфигурации сопровождающего магнитного поля удается достичь перераспределения заряженных частиц и обеспечить создание областей с повышенной их концентрацией.

**Третья глава** посвящена вопросам создания специализированного электрофизического оборудования для поверхностной обработки деталей потоками металлической плазмы. Представлены вопросы, затрагивающие разработку технологического оборудования, а также аспекты стабилизации катодных пятен на рабочей поверхности катода, инициирования дугового разряда,

расчета системы электродов, зондовая схема измерения параметров плазменного потока и схема автоматической диагностики.

Для определения параметров плазменного потока и изучения пространственного распределения заряженных частиц в рабочем объеме использовался зондовый метод диагностики.

Исследование взаимодействия потока металлической плазмы с объектами цилиндрической формы показало, что эффективной приемной поверхностью зонда для ионов является площадь его продольного сечения, определяемая произведением  $2r_3L_3$ , где  $r_3$  – радиус зонда;  $L_3$  – высота приемной поверхности зонда, в то время как для электронов эта приемная поверхность определяется  $\pi r_3L_3$ . Эти соотношения справедливы, если толщина пограничного слоя существенно меньше диаметра зонда и если  $\vartheta_{is} < \vartheta_{пп}$ .

Данное обстоятельство учитывается при определении концентрации ионов в потоке, а также при вычислении скорости плазменного потока  $\vartheta_{пп}$  по данным, получаемым из зондовых измерений:

$$n_i = 4I_{e0}(r_3L_3)^{-1}(e\vartheta_{eT})^{-1};$$

$$\vartheta_{пп} = 0.5I_{i0}(r_3L_3)^{-1}(en_e)^{-1},$$

где  $I_{e0}$ ,  $I_{i0}$  – токи насыщения электронов и ионов на зонд.

Скорость распространения плазменного потока, генерируемого вакуумным дуговым источником плазмы, полученная предложенным зондовым методом, составила для Al –  $1.3 \cdot 10^4$  м/с; Ti –  $1.2 \cdot 10^4$  м/с; Cu –  $10^4$  м/с; Zr –  $1.1 \cdot 10^4$  м/с; Mo –  $1.5 \cdot 10^4$  м/с.

При взаимодействии плазменного потока с поверхностью, произвольно ориентированной в пространстве под углом  $\alpha$ , ток ионов, поступающий из плазмы на поверхность, представляется в виде суммы двух составляющих:

$$I_i(\alpha) = I_{i0} + I_{in} \cos \alpha = 0.5Sen_e(kT_e / m_i)^{1/2} + en_e\vartheta_{пп}S \cos \alpha.$$

Здесь первое слагаемое, определяемое величиной  $I_{i0}$ , не зависит от ориентации поверхности относительно плазменного потока и связано лишь с выходом ионов из плазмы с ионно-звуковой скоростью  $\vartheta_{is}$ .

Взаимодействие приемной поверхности с плазменным потоком целесообразно представить отношением ионного тока на пластину при угле  $\alpha \neq 0$  к зафиксированному значению тока при  $\alpha = 0$ :

$$\frac{I_i(\alpha)}{I_i(\alpha = 0)} = \frac{(0.5\vartheta_{is} / \vartheta_{пп}) + \cos \alpha}{(0.5\vartheta_{is} / \vartheta_{пп}) + 1},$$

где  $I_i(\alpha)$  – ток ионов на поверхность при произвольном угле ориентации;  $I_i(\alpha = 0)$  – ток ионов на поверхность при  $\alpha = 0$ .

На базе микроконтроллера PIC16F877 разработана схема автоматической диагностики параметров плазменного потока и расчета распределения заряженных частиц в рабочем объеме. Микроконтроллер управляет ключевыми элементами электрической схемы: мультиплексором, широтно-



импульсным модулятором и блоком питания. Одновременная обработка данных осуществляется с десяти зондов, расположенных в рабочем объеме на пути плазменного потока. На зонды подается импульсное пилообразное напряжение, изменяющееся от 0 до  $-70$  В. Результаты обрабатываются компьютером.

Использование вакуумно-дуговых испарителей, работающих в импульсном режиме, потребовало разработать электрическую схему, обеспечивающую необходимое количество стартовых импульсов, и провести оптимизационный выбор материала для поджигающего электрода, так как в этом случае он должен выдерживать большое количество стартовых импульсов, при условии воздействия на него электротермических ударных нагрузок большой интенсивности.

Проведенный анализ позволил связать параметры электрической схемы с размерами высокопрочной алюмооксидной керамики и обеспечить высокую вероятность инициирования дугового разряда и одновременно продлить срок службы поджигающего электрода.

Исследование вопросов инициирования катодных пятен показало, что скорость распространения ионов в момент инициирования разряда в 2...3 раза выше, чем в стационарной вакуумной дуге: у Ti скорость увеличивалась с  $1.2 \cdot 10^4$  до  $2.6 \cdot 10^4$  м/с, а у Zr – с  $1.1 \cdot 10^4$  до  $2.8 \cdot 10^4$  м/с.

Проведенные исследования и изложенные подходы позволили создать высокопроизводительное технологическое оборудование как для нанесения равномерных покрытий на крупногабаритные изделия из чистых металлов, так и для осуществления плазмохимического синтеза соединений на их основе. Специальное оборудование снабжено источниками плазмы протяженной конструкции, работающими в импульсном режиме и формирующими направленный ленточный или радиально расходящийся поток плазмы. Технологические устройства оснащены надежными импульсными схемами инициирования вакуумно-дугового разряда и диагностическим оборудованием.

**Четвертая глава** отражает физические основы взаимодействия потока заряженных частиц с обрабатываемой поверхностью, условия формирования покрытия, вопросы управления плотностью плазменного потока, удаления капельной фракции и определения свойств наносимых покрытий.

В основе вакуумно-плазменной технологии лежит формирование покрытий за счет осаждения ионов с высокой кинетической энергией. В этом случае обрабатываемая поверхность подвергается сильному тепловому воздействию. Для получения пленок с высокой адгезией необходимо, чтобы температура поверхности соотносилась с температурой плавления наносимого материала следующим образом:  $T_{\text{пов}} = (1/3 \dots 2/3)T_{\text{пл}}$ .

Энергия ионов  $W_i$ , движущихся к обрабатываемой поверхности, раскладывается на начальную энергию  $W_{i0} = m\vartheta_i^2 / 2$  и энергию, приобретаемую в дебаевском слое  $e\xi U_{\text{см}}$ , где  $\xi$  – среднее зарядовое число, примыкающем к подложке, при условии, что на нее задан ускоряющий отрицательный потен-

циал  $U_{\text{см}}$ . Изменение значения ускоряющего потенциала  $U_{\text{см}}$  регулирует энергию осаждающихся ионов.

При нанесении покрытий возможен пробой пограничного слоя с микроскопических неоднородностей с последующим образованием термоэмиссионных центров на обрабатываемой поверхности, трансформирующихся в катодные пятна.

Теоретический анализ процессов в пограничном слое с учетом коэффициентов вторичной эмиссии ионно-электронного типа с поверхности изделия и вторичной эмиссии электрон-ионного типа потока металлической плазмы позволил получить выражение для оценки электрической прочности системы в зависимости от параметров плазменного потока, состояния обрабатываемой поверхности и ее шероховатости.

Для получения количественной связи максимально допустимой температуры подложки и плотности плазменного потока учитывалась скорость роста наносимого покрытия:  $\vartheta_{\text{рос}} = j_i(\chi(W_i) - k(W_i))/\xi en_0$ , зависящая от коэффициентов аккомодации  $\chi(W_i)$  и распыления  $k(W_i)$  материала; толщина формируемого покрытия  $\delta$  за время работы  $t$ :  $\delta = t \vartheta_{\text{рос}}$ ; мощность, выделяющаяся на образце  $P_{\text{выд}} = j_i U_{\text{см}}$ , и мощность, отводимая за счет излучения  $P_{\text{изл}} = \sigma \varepsilon (T_{\text{max}}^4 - T_0^4)$ . Данные предположения позволили получить значения оптимальной скорости роста наносимого покрытия, которую образец может выдержать без перегрева, при максимальной для этого концентрации заряженных частиц:

$$\vartheta_{\text{рос}} = \frac{n_e}{\xi en_0} \vartheta_{\text{эф}} (\chi(W_i) - k(W_i)); \quad n_e \leq \frac{\sigma \varepsilon (T_{\text{max}}^4 - T_0^4)}{e U_{\text{см}} \vartheta_{\text{эф}}},$$

где  $\vartheta_{\text{эф}}$  – эффективное значение скорости, определяющее ход процесса ионной обработки и учитывающее ориентацию поверхности в потоке.

В определенных пределах изменять условия конденсации в процессе напыления удается за счет изменения значения ускоряющего потенциала, задаваемого на подложку и позволяющего регулировать энергию осаждающихся ионов, а следовательно, и управлять протеканием технологического процесса, переводя его из режима распыления и очистки – в режим формирования покрытия. Бомбардировка поверхности металлическими ионами позволяет формировать псевдодиффузионный слой. Указанные условия обеспечивают получение адгезии, недостижимой при использовании в других технологиях для нанесения покрытий.

Заданный тепловой режим подложки и устранение условий возникновения на обрабатываемой поверхности катодных пятен были достигнуты за счет управления плотностью плазменного потока с помощью плазменного аттенюатора – набора плоскопараллельных пластин шириной  $L$  и с расстоянием  $H$  между ними. Аттенюатор располагается в рабочем объеме на пути плазменного потока и находится под плавающим потенциалом, что позволяет

снизить на него тепловые воздействия.

Параметром, характеризующим прохождение заряженной компоненты плазменного потока, является плотность ионного тока. Коэффициент прозрачности системы определяется отношением ионного тока, измеренного за системой электродов  $I_i(L)$ , к току этих частиц на входе –  $I_i(L=0)$ :

$$\eta = \frac{I_i(L)}{I_i(L=0)} .$$

Взаимодействие плазменного потока с системой электродов рассматривалось из условия баланса положительно заряженной компоненты:

$$I_i(L) = I_i(L=0) - \int_S j_i(L) dS ,$$

где  $j_i(L)$  – плотность тока ионов, нейтрализующихся на поверхности электродной системы.

Анализ записанных соотношений позволил определить коэффициент прозрачности электродной системы:

$$\eta = \exp\left(-\frac{\mathfrak{G}_{is}}{\mathfrak{G}_{пл}} \frac{H}{L}\right) .$$

Предложенная математическая модель удовлетворительно описывает взаимодействие потока плазмы с системой плоскопараллельных электродов и позволяет с достоверной степенью точности определить коэффициент ослабления для ионной составляющей плазменного потока.

Особенностью генерируемого потока плазмы является наличие в нем заметного количества частиц материала катода: капельных образований, имеющих прямолинейные траектории движения и приводящих к снижению качества формируемого покрытия за счет ухудшения микрорельефа и возникновения пористости в формируемой структуре.

Требования к уменьшению содержания капельных образований относятся ко многим типам покрытий, так как данный недостаток является первопричиной их преждевременного разрушения, коррозии и снижения эксплуатационных свойств. За счет уменьшения разрядного тока не удастся значительно сократить общее количество капельных образований в плазменном потоке.

При ориентации системы электродов плазменного аттенюатора относительно плазменного потока под некоторым углом  $\alpha$  происходит частичная очистка плазменного потока. В этом случае для коэффициента прозрачности  $\eta$  получено

$$\frac{\eta(\alpha)}{\eta(\alpha=0)} = \exp\left[-\left(\operatorname{tg} \alpha + \frac{\mathfrak{G}_{is}}{\mathfrak{G}_{пл}}\right) \frac{H}{L}\right] .$$

Специальная плазмооптическая система транспортировки плазменного потока, дающая возможность развернуть поток на  $90^\circ$ , позволила обеспечить очистку плазменного потока с управлением скоростью роста формируемого покрытия. Сканирование потока заряженной компоненты плазмы по поверх-

ности подложки, за счет суммарного выравнивания числа осаждаемых частиц в каждой точке, позволяет получить покрытие с неравномерностью по толщине, не превышающей 10 %. Встречное магнитное поле соленоида в этом случае изменяется от минимального значения, при котором обеспечивается максимально возможная плотность ионного тока на краю подложки, обращенной к соленоиду, до значения, способствующего перемещению потока к противоположному краю подложки.

Таким образом, за счет изменения магнитного поля во времени удается управлять толщиной формируемого покрытия с предсказуемой степенью неравномерности, не превышающей единицы процентов, и кроме этого получить задаваемую толщину в любой точке поверхности.

Для очистки плазменного потока предложена конструкция сепаратора типа жалюзи, создающего сплошной, непроходимый барьер для образований, имеющих прямолинейные траектории движения. В этом случае они осаждаются на поверхности сепаратора, обращенной к рабочей поверхности катода. Скорость роста формируемого покрытия, при условии полной очистки плазменного потока, определяется исключительно плотностью ионного тока  $j_i$  на деталь.

Плазменный поток проходит объем сепаратора с достаточно большими потерями, коэффициент прохождения не превышает 15 %. Для повышения коэффициента использования плазмообразующего материала и повышения скорости роста наносимого покрытия за подложкодержателем устанавливается дополнительный соленоид. Эффективность системы транспортировки заряженной компоненты плазменного потока определяется согласованностью геометрии используемого сепаратора и пространственного распределения управляющего магнитного поля, создаваемого дополнительным магнитным источником.

Использование магнитного поля приблизило коэффициент прохождения к 60 %. Наличие положительного потенциала на сепараторе способствует увеличению коэффициента прохождения, однако ставит трудно решаемую задачу его охлаждения в процессе работы.

Изучение взаимодействия заряженных частиц с поверхностью твердого тела и разработка методов параметрического управления плазменным потоком позволили расширить список обрабатываемых материалов за счет диэлектрических подложек, а также инструментальных углеродистых и легированных сталей применяемых в машиностроении. Использование плазменного аттенюатора позволяет в достаточно широких пределах изменять плотность потока металлической плазмы и формировать дозированный плазменный поток, позволяющий согласовывать тепловые режимы подложки как в процессе ионной очистки, так и в процессе формирования покрытия, устраняя возможность образования катодных пятен на обрабатываемой поверхности изделий и повышая качество наносимого покрытия. Сепараторы металлической плазмы позволяют получать покрытия без капельных образований, что открывает возможность их практического применения в микроэлектронике.

**Пятая глава** отражает вопросы формирования металлических покрытий на изделиях сложной геометрической формы. Эксплуатационные свойства деталей определяются состоянием их поверхностного слоя. Обработка поверхности с нанесением покрытий позволяет существенно повысить механическую прочность деталей, улучшить их антикоррозионные свойства и сопротивление износу, изменить коэффициенты трения и повысить теплозащитность деталей.

В электронной промышленности в качестве газопоглощающих покрытий используется титан. В этом случае определяющее значение имеют капельные образования, увеличивающие поверхность взаимодействия с газом. Максимальное количество капельных образований испаряется с рабочей поверхности катода под углом  $20...30^\circ$  к его плоскости, при этом для генерируемого потока наблюдается картина радиальной симметрии.

Наличие в продуктах эрозии капельных образований приводит к получению шероховатого покрытия с развитой поверхностью. Данное условие оказывает благоприятное влияние на газопоглощающие свойства титанового покрытия, наиболее эффективно поглощающего преобладающие в вакуумных системах остаточные газы активной группы. При этом максимальное газопоглощение соответствует максимуму распределения капельных образований в рабочем объеме.

Газопоглощающие свойства титановых покрытий, полученных при температуре катода ниже температуры рекристаллизационного отжига, начинали проявляться при 770 К. С повышением температуры до 970 К сорбция воздуха возрастала в 10 раз по сравнению с сорбцией при температуре 770 К. Удельная сорбция при этом составляла  $2.6 \text{ л}\cdot\text{мкм}/\text{см}^2$ .

При температуре катода выше 970 К полученные покрытия имели рыхлый, шероховатый характер. В этом случае сорбционные свойства покрытия начинали проявляться при температуре 570 К, а по достижении 970 К сорбция увеличивалась примерно в 16 раз по сравнению с начальными результатами. Удельная сорбция в этом случае составила  $7.4 \text{ л}\cdot\text{мкм}/\text{см}^2$ , что в три раза превысило значение для гладких покрытий.

В качестве антиэмиссионных покрытий на сеточных электродах в присутствии катодов, испаряющих барий, широко используется титан, с верхним пределом рабочей температуры сетки с покрытием 1250 К.

Возможность формирования в вакуумно-дуговом устройстве плазменного потока со скоростью порядка  $10^4 \text{ м}/\text{с}$  и выше обуславливает особенность его взаимодействия с обрабатываемой поверхностью сложной геометрической формы, в том числе и с деталями, где необходимо нанесение покрытия на внутренние поверхности. Поиски методов, предотвращающих распыление, привели к разработке по защите рабочей поверхности медных анодов мощных генераторных ламп слоем тугоплавкого металла, обладающего низким коэффициентом вторичной эмиссии и высоким коэффициентом излучения и имеющего при этом хорошую адгезию с подложкой.

Однако в этом случае, из-за широкой диаграммы направленности генерируемого плазменного потока, в процессе работы используется лишь незначительная, приосевая его часть, а приток заряженных частиц на вход полости определяется исключительно площадью ее входного сечения. При попадании плазменного потока в объем, ограниченный из-за пространственной неоднородности ухода заряженных частиц на стенку цилиндрической полости, имеющей отрицательный потенциал, наблюдается неравномерное осаждение материала по его длине.

Математический анализ проникновения плазменного потока проводился на модели, представляющей цилиндрическую полость, ось симметрии которой совпадала с осью источника и была параллельна вектору скорости распространения плазменного потока. Одним из условий задачи являлось наличие на обрабатываемой полости отрицательного относительно плазмы потенциала, который выбирался таким, чтобы обеспечивался ток насыщения ионов, дрейфующих из плазменного потока на стенки полости.

Уравнение непрерывности тока ионов при пренебрежении рекомбинацией имеет вид

$$I(z=0) = I(z) + 2\pi R \int_0^z j_i(z) dz,$$

где  $I(z=0)$  – ток ионов на входе в полость;  $I(z) = \pi R_0^2 \xi e \vartheta_{\text{пл}} n_i(z)$  – ток ионов на расстоянии  $z$  от входа;  $j_i(z) = 0.5\pi R^2 \xi e \vartheta_{\text{пл}} n_{i\text{гр}}(z)$  – плотность ионного тока на стенку полости;  $R$  – внутренний радиус обрабатываемой полости;  $n_i$  – концентрация ионов;  $n_{i\text{гр}}(z)$  – концентрация ионов на границе “плазма – стенка полости”.

Плотность тока ионов на стенку полости при условии, что напряжение отрицательного смещения  $U_{\text{см}} \geq kT_e$ , определяется боровским током  $j(z)$ . Считаем, что в условиях, характерных для плазменных ускорителей, плазма за время прохождения полости не успевает релаксировать к радиальному распределению, и в связи с этим принимаем, что  $n_{i\text{гр}}(z) \approx n_i(z)$ .

Решением уравнения при граничных условиях  $n_i(z=0) = n_{i0}$  будет являться соотношение

$$\frac{\delta(z)}{\delta(z=0)} = \frac{j_i(z)}{j_i(z=0)} = \frac{n_i(z)}{n_i(z=0)} = \exp\left(-\frac{\vartheta_{\text{ис}}}{\vartheta_{\text{пл}}} \frac{z}{R}\right),$$

где  $\delta(z=0)$ ,  $j_i(z=0)$ ,  $n_i(z=0)$  – соответственно, толщина наносимого покрытия, плотность ионного тока и концентрация заряженных частиц на входе полости при  $z=0$ .

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений толщины наносимого покрытия, распределения плотности ионного тока и концентрации заряженных частиц по длине исследуемых макетов свидетельствует об удовлетворительном соответствии между ними, разница не превышала 20 %.

На конечные результаты оказывает влияние процесс распыления наносимого материала под воздействием заряженных частиц. При этом учитывалось количество частиц, осажденных в единицу времени на единичную поверхность за счет конденсации ионов, поступающих из плазменного потока, количество частиц, осажденных на единичную поверхность за счет перепыления, и количество уносимых ионов в единицу времени с единичной поверхности с учетом коэффициента распыления.

Количество частиц, распыляемых с конечной площадки  $dS_x$ , зависит от приложенного напряжения смещения и определяется коэффициентом распыления  $k_{\text{рас}} = f(U_{\text{см}})$ .

Полученное выражение позволяет определить связь процессов осаждения и распыления с координатой  $z$ :

$$\left( \frac{\partial^2 n}{\partial S \partial t} \right)_{\text{кон}} = j_i(z=0) \frac{k_{\text{рас}}}{\xi e \pi R^2} \frac{z_0}{r_0} \int_{\frac{z'}{z}=0}^1 \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{r_0} \right)^2 \left( \frac{z}{z_0} - \frac{z'}{z_0} \right)^2 \right]^{-3/2} \cdot \exp \left( - \frac{\vartheta_{\text{ис}}}{\vartheta_{\text{ип}} R_0} \frac{z_0}{z_0} \frac{z'}{z_0} \right) d \left( \frac{z'}{z_0} \right)$$

где  $z'$  – вспомогательная независимая переменная, имеющая в этом случае тот же геометрический смысл, что и координата  $z$ .

Повышение скорости роста наносимого покрытия достигается перераспределением заряженных частиц в рабочем объеме и созданием области с повышенной концентрацией на входе в обрабатываемую цилиндрическую полость. Для этого использовалась дополнительная магнитная система, расположенная в рабочем объеме на пути плазменного потока. Данный элемент позволяет уменьшить расходимость плазменного потока, обеспечить его фокусировку и почти в два раза увеличить плотность ионного тока.

С целью управления процессом осаждения заряженных частиц и выравнивания толщины наносимого покрытия формировалось встречное магнитное поле, препятствующее проникновению потока в глубину полости.

Для обеспечения более эффективной транспортировки заряженной компоненты плазменного потока было разработано и исследовано вакуумно-дуговое устройство с дополнительным конусным соленоидом, расположенным во внутреннем объеме анода, в плоскости фокусирующей катушки. Следует отметить, что в процессе оптимизации геометрии конусного соленоида удалось создать поле с неравномерностью магнитной индукции в приосевой области, не превышающей единицы процентов.

Сужение зоны распространения плазменного потока с увеличением скорости нарастания индукции магнитного поля к срезу анода сопровождается уменьшением потерь ионов на расфокусировке потока в периферийной области с соответствующим возрастанием концентрации заряженных частиц в приосевой области. Максимальное превышение концентрации заряженных частиц на оси системы составило более чем в три раза, при этом ввод данной магнитной системы не оказывал влияния на стабильность работы испарителя. Неравномерность распределения плотности ионного тока по радиусу на выхо-

де конусного соленоида не превышала 5 %.

Решение задачи управления плотностью плазменного потока позволило отработать физические процессы его взаимодействия с диэлектрическими подложками, особенностью обработки которых является то, что при напылении они находятся под плавающим потенциалом.

При определении температуры подложки исходили из того, что вся подводимая мощность расходуется на излучение. С использованием данного подхода успешно были реализованы технологические операции по формированию покрытий Al, Cu и Ti на стеклянных подложках. Были изготовлены контактные площадки ультразвуковых линий задержки и анодные сегменты вакуумных люминесцентных индикаторов. Разработка технологии формирования покрытий на диэлектрических подложках потребовала проведения оптимизации параметров процесса. С этой целью использовался метод математического планирования эксперимента, позволивший выявить основные факторы, оказывающие влияние на адгезию формируемого покрытия: подготовка поверхности; толщина покрытия; ток разряда и время обработки.

На основе полученных результатов, с использованием магнитных полей специальной конфигурации, отработана технология формирования защитного покрытия на внутренней поверхности камерных анодов мощных генераторных ламп. Отработаны методики формирования равномерных покрытий на внутренних поверхностях длинномерных цилиндрических полостей. Решена задача нанесения покрытия на диэлектрические подложки.

**Шестая глава** отражает вопросы плазмохимического синтеза нитридных, карбидных и карбонитридных соединений и получения композиционных покрытий из потока металлической плазмы вакуумно-дугового разряда.

Для осуществления синтеза соединений в плазменный поток вводится реакционно-способный газ. Скорость подачи газа согласуется с потоком взаимодействующих частиц металлических ионов:  $\partial n_{\text{мет}} / \partial t \approx \partial n_{\text{газ}} / \partial t$ . Ток ионов материала катода вычисляется через ток вакуумно-дугового разряда:  $I_i \approx 0.08 I_{\text{раз}}$ .

Движение плазменного потока в расходящемся аксиально-симметричном магнитном поле приводит к тому, что концентрация заряженных частиц по мере удаления от рабочей поверхности катода уменьшается. В этом случае при получении синтезируемого покрытия важным параметром оказывается расстояние между обрабатываемым изделием и катодом. Таким образом, учитывая значение разрядного тока и режимы работы испарителя, распределение плотности ионного тока в рабочем объеме и давление газа, удается управлять составом и структурой формируемого покрытия.

В ходе проведенных исследований были отработаны технологические процессы получения нитридных и карбидных соединений переходных металлов титана, циркония, алюминия, молибдена и вольфрама. Исследуемые соединения обладают высокой твердостью, износостойчивостью, тугоплавкостью (2300...4300 К), пластичностью при высоких температурах, а также



специфическими магнитными и электрическими характеристиками. Кроме того, простота строения, широкие пределы гомогенности, однотипность межатомных связей, образование взаимных твердых растворов позволяет направленно регулировать их служебные характеристики.

Перспективность использования нитрида алюминия AlN в электронной технике обусловлена такими характеристиками, как высокие теплопроводность и скорость распространения звука. AlN в комбинации с другими покрытиями может быть использован в качестве изоляционного слоя.

Основная задача при синтезе соединения заключалась в очистке потока плазмы от капельных образований и повышении скорости роста наносимого покрытия. На рис. 6 представлены дифрактограммы покрытия AlN, полученные при различных условиях синтеза и с применением сепаратора плазменного потока (рис. 7). Покрытие имеет хорошо сформированную кристаллическую структуру с преимущественной ориентацией [111].

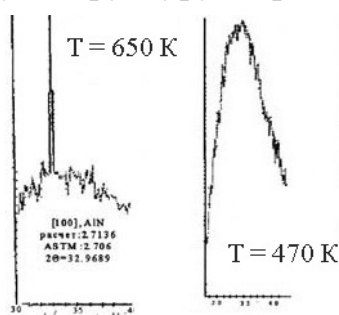


Рис. 6. Дифрактограммы покрытия AlN в зависимости от условий синтеза

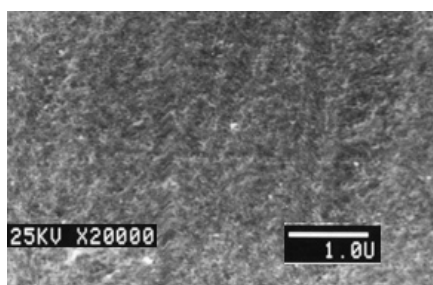


Рис. 7. Покрытие AlN, полученное сепарацией плазменного потока (1.0U = 1 мкм)

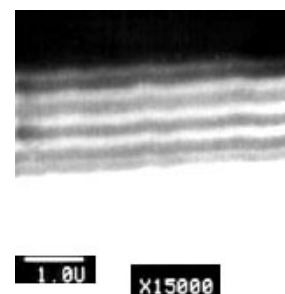


Рис. 8. Шлиф покрытия с чередующимися слоями AlN – TiN (1.0U = 1 мкм)

Полученные вакуумно-дуговым методом покрытия нитрида алюминия обладают высокими электрическими изоляционными свойствами.

Разработка технологии плазменной техники привела к возможности точной регулировки по заданной программе давления и состава реакционного газа, степени фокусировки плазменного потока, сепарирования потока от капельной фазы, что позволило развить технологию получения сложных композиционных покрытий карбонитрида титана TiCN и алюмонитрид титана Ti<sub>2</sub>AlN.

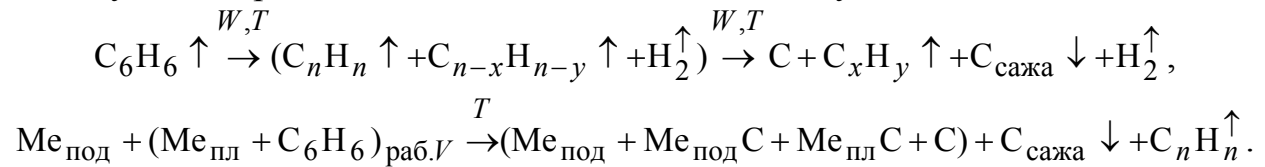
Покрытие Ti<sub>2</sub>AlN характеризуется высокой твердостью и температурной стойкостью. Основная технологическая задача при формировании покрытия заключалась в согласовании плотности плазменных потоков на обрабатываемом изделии и отсечении зон, где существовала вероятность синтеза одного из металлов. Решение данной задачи дало возможность получить образцы с хорошо сформированной кристаллической структурой с преимущественной ориентацией [111]. Управление технологическим процессом формирования покрытия позволяет получать составы с изменяемыми свойствами в зависимости от процентного соотношения в потоке титана и алюминия. При этом изменяются твердость, коэффициент трения, шероховатость поверхности и

цвет покрытия. Все это позволяет оптимизировать свойства покрытия для выполнения конкретной задачи.

К композиционным покрытиям следует отнести покрытия, состоящие из чередующихся слоев: например,  $Ti_2AlN$  и  $CrN$  или  $TiN$  и  $AlN$  (рис. 8), позволяющие увеличить твердость и сократить абразивный износ полученного покрытия на режущем инструменте.

Для плазмохимического синтеза карбидных соединений переходных металлов использовался широкий спектр газов, начиная от метана ( $CH_4$ ) и кончая циклогексаном ( $C_6H_{12}$ ). Получено, что с увеличением относительной молекулярной массы углеводородных молекул выход углерода увеличивается, однако при этом наблюдается повышенный выход сажи. Размер частиц сажи, а также удельная поверхность и степень структурности зависят от условий образования.

При использовании паров бензола, обладающего наименьшим первым потенциалом ионизации, плазмохимический синтез соединения  $Me_{пл}C$  на металлической подложке  $Me_{под}$  может протекать по следующей схеме расщепления углеводородов с длинными связями на молекулы меньшей длины:



Сбалансированный поток молекул газа  $dn_{газ}/dt$  определялся с учетом коэффициента химической реакции  $A$  взаимодействия металла с реакционно-способным газом:  $(d^2n_i)/(dS dt) \approx A(d^2n_{газ})/(dS dt)$ .

При анализе процесса синтеза карбидов учитывалась особенность диссоциации молекулы, происходящей под действием электронной бомбардировки. При условии полной диссоциации поток атомов углерода определялся следующим образом:  $d^2n_{газ}/dt \approx A(dn_{C_6H_6}/dt) \exp(-W/kT_e)$ , где  $dn_{C_6H_6}/dt$  – поток молекул бензола, поступающих в вакуумную камеру через натека-тель;  $W$  – энергия разрыва связей в молекуле бензола. Исходя из этих условий определялся минимальный поток атомов газа, необходимый для синтеза карбидных покрытий.

Разработанные электрофизическое оборудование и технологии позволили получить карбидные соединения с постоянным фазовым составом переходных металлов, применяемых в производстве мощных генераторных ламп.

$ZrC$  характеризуется хорошо сформированной кристаллической структурой с преимущественной ориентацией [111].

Из получаемых соединений  $MoC$  следует выделить следующие типы:  $\beta$ - $Mo_2C$ ,  $\alpha$ - $Mo_2C$ ;  $\beta$ - $MoC_{1-x}$ ,  $\alpha$ - $MoC_{1-x}$ . При этом следует отметить, что при низких температурах устойчив лишь карбид  $\alpha$ - $Mo_2C$ .

Особенность синтеза  $WC$  заключалась в том, что в покрытии одновременно присутствовали фазы как  $W_2C$ , с гексагональной плотноупакованной структурой, так и  $\alpha$ - $WC$ , с простой гексагональной решеткой.

**Седьмая глава** посвящена вопросам создания антиэмиссионных покрытий на сеточных электродах мощных генераторных ламп. Отработанный метод синтеза карбидных соединений позволил отработать получение интерметаллического соединения  $Pt_3Zr$ .

подавляющая часть современных радиопередающих устройств, работающих на частотах до 30 МГц, с уровнем выходной мощности более 40 кВт, в качестве усилительных приборов оконечных каскадов используют мощные генераторные лампы, представляющие конструктивно сложные изделия, изготовленные из различных чистых металлов и композиционных материалов. Основными направлениями развития приборов данного типа являются увеличение удельной мощности с одновременным увеличением их долговечности, что связано и с ростом рабочей температуры сеточных электродов, определяющих параметры и характеристики приборов.

Улучшение параметров приборов в настоящее время возможно лишь за счет применения более эффективных технологических процессов и, в частности, за счет формирования покрытий со специальными физико-химическими свойствами на сетках генераторных ламп. Технология получения антиэмиссионного покрытия заключается в формировании на сетке плазменным методом покрытия карбида циркония  $ZrC$ , с последующим осаждением гальваническим способом платины. При температуре 1500 К в вакууме в системе  $Pt - ZrC - Me$  происходит химическое взаимодействие элементов с образованием интерметаллического соединения



Интерметаллиды имеют кристаллическую структуру, отличную от структур исходных металлов. Состав интерметаллических соединений не всегда подчиняется правилам валентности, но эти соединения имеют ярко выраженную индивидуальность свойств.

В кристаллической решетке металлида  $Pt_3Zr$  атомы металлов занимают строго определенные положения, создавая как бы несколько вставленных одна в другую подрешеток. В этих подрешетках существует значительное количество незанятых узлов, что обеспечивает создание соединений с высокой валентностью. Рентгенофазовый анализ показал, что основной фазой в составе покрытия при температурах 1400...1600 К является интерметаллическое соединение  $Pt_3Zr$ .

Проведенный тепловой расчет сеточного электрода показал, что при работе температура электрода достигает 1900 К, что приводит к постепенному разложению  $Pt_3Zr$  с последующим образованием соединений  $Pt_{11}Zr_9$  и  $Pt_9Zr_5$ . При этих же температурах наблюдается образование таких металлических соединений как  $MoPt$  и  $Mo_2Pt$ .

Одновременно с протеканием химических реакций наблюдаются процессы диффузии платины в молибден и встречной диффузии молибдена в платину, сопровождающиеся образованием твердых многокомпонентных растворов на основе как чистых металлов  $Mo + Zr + Pt$ , так и их промежуточ-

ных фаз MoPt + Zr (рис. 9).

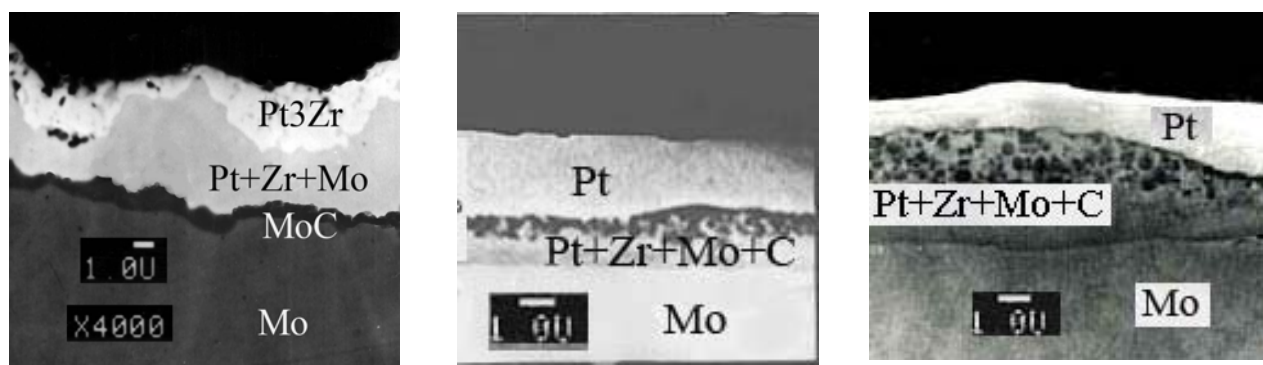


Рис. 9. Шлифы покрытий с образованными твердыми растворами (1.0U = 1 мкм)

Из-за высокой диффузионной подвижности компонентов зона диффузии достигает значительных размеров: так, молибден фиксируется по всей толщине сформированного покрытия  $Pt_3Zr$ , а диффузия платины, проходящая вдоль граней кристаллов, фиксируется на глубине до 20 мкм и более (рис. 10). Наблюдаемые на фотографиях столь крупные зерна молибдена говорят о его рекристаллизации.

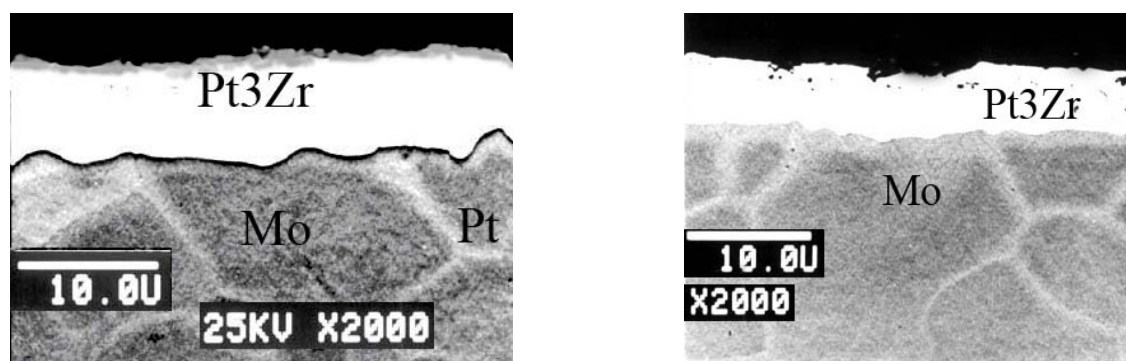


Рис. 10. Диффузия платины по границам зерен (10.0U = 10 мкм)

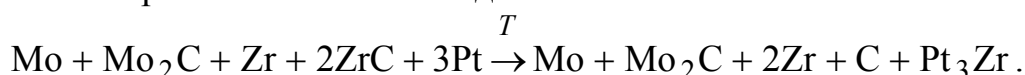
Коэффициент диффузии вдоль границ зерен намного превышает коэффициент объемной диффузии, что объясняется большой энергией объемной диффузии. Наблюдаемая при этом диффузия углерода обусловлена свойствами используемого материала сетки и возможностью перехода углерода из карбидного соединения в основу, т. е. наблюдается переход из менее устойчивого состояния в более устойчивое.

Для создания барьерного слоя, предотвращающего диффузию платины в материал сеточного полотна, и обеспечения более эффективной схемы протекания реакции получения интерметаллического соединения  $Pt_3Zr$  было предложено предварительно формировать переходный слой карбида материала тугоплавкого металла: MoC или WC. При оценке толщины карбидного слоя учитывали возникающую хрупкость материала, увеличивающуюся с ростом карбидного слоя, толщина которого оценивалась как путем измерения электрического сопротивления сетки, так и путем изучения шлифов.

Конденсация металла на грань родственного металла с таким же типом

кристаллической решетки и близким периодом, как у осаждаемого металла, способствует образованию параллельной ориентации, т. е. в этом случае совпадающими оказываются не только плоскости, но и направления с одинаковыми индексами. Таким образом, нанесение на основу подслоя молибдена и карбида молибдена способствует получению структурно ориентированного покрытия.

Получение многослойного покрытия, содержащего в качестве подслоя карбид тугоплавкого материала (рис. 11), создает благоприятные условия для получения интерметаллического соединения



Использование разработанной технологии позволило получить интерметаллическое соединение  $\text{Pt}_3\text{Zr}$  высокого качества и обеспечить заданные эксплуатационные свойства антиэмиссионных сеточных покрытий (рис. 12).

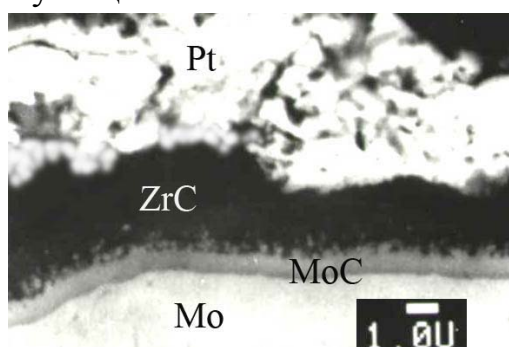


Рис. 11. Шлиф многослойного покрытия  $\text{Mo} - \text{MoC} - \text{ZrC} - \text{Pt}$  ( $1.0\text{U} = 1 \text{ мкм}$ )

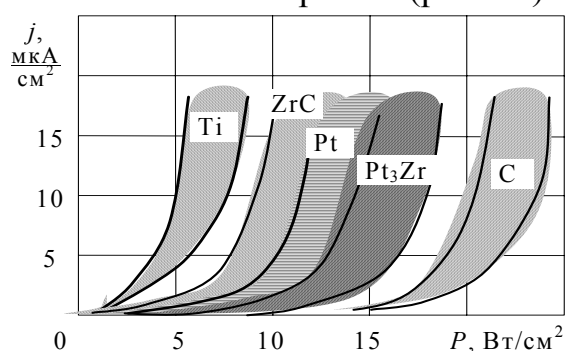


Рис. 12. Уровень мощности, рассеиваемой на сетках, в зависимости от типа используемого покрытия

Рассмотрена возможность использования в качестве материала сеточного электрода пиролитического графита (углерод обеспечивает высокую работу выхода 4.7 эВ и обладает спектром излучения, близким к спектру абсолютно черного тела), образующегося при термической диссоциации низкомолекулярных углеводородов типа метан, этан или ацетилен на предварительно нагретой поверхности. Получаемый пиролитический графит характеризуется упорядоченной кристаллической структурой, приближающейся к идеальному кристаллу графита. Атомы углерода располагаются в узлах шестиугольников, образуя при этом слои, слабо связанные между собой. В сочетании с высоким коэффициентом излучения пиролитический графит обладает низкими термо- и вторично-эмиссионными свойствами (рис. 12), способными обеспечить необходимый уровень термотокков при высоких удельных тепловых нагрузках. Однако технология получения пиролитического графита не нашла широкого применения из-за высокой технической сложности производства, больших капитальных затрат и высокой себестоимости готовых изделий.

Разработанные конструкции вакуумно-дуговых источников и созданное на их основе специальное электрофизическое оборудование позволили отработать плазмохимический синтез карбидных соединений в потоке металли-

ческой плазмы, сформировать композиционные покрытия и отработать способ получения антиэмиссионного интерметаллического покрытия  $Pt_3Zr$ , включающего в свой состав барьерный слой, препятствующий встречной диффузии платины и материала сеточного полотна.

Отражены вопросы производственных испытаний и инновации технологического оборудования и материалов применительно к производству мощных генераторных ламп. Приведен список электронных приборов, выпускаемых по разработанной технологии.

**Заключение** отражает все основные научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы. Для повышения работоспособности и увеличения срока службы мощных генераторных ламп созданы новое электрофизическое оборудование и ресурсосберегающие технологии. С учетом особенностей разработанных технологий получены принципиально новые структуры материалов покрытий, пористость и шероховатость поверхности которых обеспечивают максимальную газопоглотительную способность при обеспечении высокой электрической прочности междуэлектродных промежутков в лампе. Синтезируемый с использованием разработанных технологий антиэмиссионный материал  $Pt_3Zr$  обладает минимальной эмиссионной способностью по сравнению с аналогичными материалами, полученными другими методами.

#### **Основные результаты и выводы по работе:**

1. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований физико-химических основ использования потоков металлической плазмы для формирования покрытий и условий направленного поверхностного модифицирования свойств обрабатываемой поверхности.

2. Разработаны новые экологически чистые и ресурсосберегающие технологические процессы по нанесению антиэмиссионных и газопоглотительных покрытий на электроды мощных генераторных ламп. Внедрение данной технологии позволило отказаться от использования экологически вредных и взрыво- и пожароопасных технологических процессов.

3. Изучено взаимодействие направленного плазменного потока с поверхностью твердого тела, выполнен теоретический и экспериментальный анализ взаимодействия ускоренных потоков металлической плазмы с внутренней поверхностью цилиндрической формы, результаты которого использованы при обработке камерных анодов мощных генераторных ламп.

4. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, протекающих в плазме вакуумно-дугового разряда, позволивший выявить основные закономерности характера перемещения катодных пятен и их эмиссионных характеристик с изменением температуры катода, оказывающих влияние на параметры генерируемого потока металлической плазмы и на свойства формируемого покрытия.

5. Изучено движение заряженных частиц в осесимметричном магнитном поле катушек испарителя и систем транспортировки плазменных потоков, на основе чего разработаны теоретическая модель и математическая программа

расчета траекторий движения плазменных потоков, позволившие создать новые электромагнитные системы для формирования равномерных покрытий на крупногабаритных изделиях и изделиях сложной геометрической формы.

6. На основе теоретического анализа решена задача прохождения ионной составляющей потока металлической плазмы через плазменный аттенюатор, позволившая управлять плотностью плазменного потока, регулировать тепловой режим на обрабатываемом изделии и скорость нанесения покрытия.

7. На основе анализа процессов испарения материала с катода протяженной конструкции, формирования плазменных потоков и их взаимодействия с обрабатываемой поверхностью разработаны и созданы новые источники плазменных потоков, работающие в импульсном и непрерывном режимах горения вакуумной дуги и формирующие направленные ленточные и радиально расходящиеся потоки металлической плазмы. Разработанные вакуумно-дуговые испарители легли в основу созданного принципиально нового электрофизического оборудования, используемого в производстве генераторных ламп.

8. Впервые на основе выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований получено интерметаллическое соединение  $Pt_3Zr$ , являющееся наиболее эффективным антиэмиссионным материалом, синтезируемым через карбид циркония, получаемого из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда, что позволило повысить мощность, рассеиваемую на сеточных электродах генераторных ламп, и способствовало снижению массогабаритных показателей самих ламп.

9. Впервые применительно к антиэмиссионным покрытиям на сеточных электродах показана возможность повышения их срока службы за счет получения диффузионного барьерного слоя в составе антиэмиссионного покрытия, влияющего на стабильность состава, параметры и долговечность службы мощных генераторных ламп.

10. Разработанное электрофизическое оборудование и технологии внедрены в серийное производство мощных генераторных ламп (ГУ-35Б, ГУ-40Б, ГУ-92 А / Б, ГУ-94 А / Б, ГУ-97А, ГУ-98, ГУ-104, ГУ-108, 4СХ1500А, 4СХ3500А и др.) на ЗАО «С.Е.Д.-СПб», что позволило повысить срок службы мощных генераторных ламп с 3000...5000 до 12000...15000 часов и по техническим характеристикам достичь уровня лучших мировых аналогов.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. *Лисенков, А.А.* Вакуумные дуговые источники плазмы / А.А. Лисенков, Н.З. Ветров; под ред. проф. В.С. Клубника. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 208 с.
2. *Лисенков, А.А.* Плазмохимический синтез соединений в металлической плазме вакуумно-дугового разряда / А.А. Лисенков // Вакуумная техника и технология. – 2006. – Т. 16, № 3. – С. 207–214.

3. Лисенков, А.А. Создание диффузионного барьера в антиэмиссионном покрытии сеток генераторных ламп / А.А. Лисенков // Вакуумная техника и технология. – 2006. – Т. 16, № 2. – С. 153–158.
4. Особенности технологии производства мощных генераторных ламп: конспект лекций / А.А. Лисенков и др. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – 128 с.
5. Лисенков, А.А. Исследование свойств антиэмиссионных покрытий сеток мощных генераторных ламп / А.А. Лисенков, А.Г. Амброк, Л.А. Исламгазина // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т. 15, № 2. – С. 175–178.
6. Лисенков, А.А. Технология формирования интерметаллического антиэмиссионного покрытия на сетках мощных генераторных ламп / А.А. Лисенков // Вакуумная техника и технология. – 2005. – Т. 15, № 2. – С. 169–173.
7. Лисенков, А.А. Температурный режим работы катода вакуумно-дугового источника плазмы протяженной конструкции / А.А. Лисенков, А.С. Карнышев, Л.А. Исламгазина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2005. – № 1. – С. 24–28.
8. Пат. на изобрет. 2261940 Российская Федерация, МПК 7С23С14/35, 7Н05Н1/50. Способ получения интерметаллического антиэмиссионного покрытия / Лисенков А.А. и др.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ЗАО «С.Е.Д.-СПб». – № 2004114090; заявл. 30.04.2004; опубл. 2005, Бюл. № 28.
9. Лисенков, А.А. Влияние температуры катода на скорость перемещения катодных пятен вакуумно-дугового разряда / А.А. Лисенков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2004. – № 2. – С. 24–28.
10. Лисенков, А.А. Катодные пятна вакуумно-дугового разряда и динамика их развития / А.А. Лисенков // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 221–226.
11. Лисенков, А.А. О динамике развития катодных пятен вакуумно-дугового разряда / А.А. Лисенков, Н.З. Ветров, В.Д. Гончаров // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2004. – № 1. – С. 49–53.
12. Лисенков, А.А. Технология формирования интерметаллического покрытия на сетках мощных генераторных ламп / А.А. Лисенков, Н.З. Ветров, Э.Г. Павлюк // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2003. – № 2. – С. 17–20.
13. Лисенков, А.А. Перспективы выращивания сеток мощных генераторных ламп из газовой фазы / А.А. Лисенков, Н.З. Ветров, Н.М. Радциг // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Физика твердого тела и электроника. – 2003. – № 2. – С. 21–23.
14. Пат. на изобрет. 2207399 Российская Федерация, МКП 7С23С14/35, 7Н05Н1/50. Вакуумное дуговое устройство / Буров В.И., Кузнецов В.Г., Лисенков А.А., Рыбников С.И.; заявитель и патентообладатель ИПМАН РАН. – № 201122532/02(023890); заявл. 07.08.2001; опубл. 2003, Бюл. № 18.
15. Lisenkov, A.A. Dynamics development of the cathode spots of the vacuum arc discharge on working surface of the extended design plasma source / A.A. Lis-



enkov, V.D. Goncharov, S.A. Matveev // 4 International conference: Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, Belarus, 15–19.10.03. – Vol. 1. – P. 100–103.

16. *Lisenkov, A.A.* Method of automatic diagnostics plasma flow, generated vacuum-arc discharge / A.A. Lisenkov, Y.V. Barachovich, A.V. Simkin // 4 International conference: Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, Belarus, 15–19.10.03. Vol. 1. – P. 380–384.

17. *Барченко, В.Т.* Несамостоятельный тлеющий разряд: физические процессы, модели, применение / В.Т. Барченко, А.А. Лисенков // Материалы 4-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» / НИЦ ХФТИ. – Харьков, 2003. – С. 224–240.

18. *Kuznezov, V.G.* Influence of thermal cathode mode on properties of coatings reshaped settled, deposited from metal plasma of vacuum-arc discharge / V.G. Kuznezov, A.A. Lisenkov, V.A. Pavlova, N.Z. Vetrov // Plasma Devices and operations. – 2002. – Vol. 10, № 3. – P. 179–186.

19. *Lisenkov, A.A.* Adjustment of the plasma density in the process of coating formation / A.A. Lisenkov, I.V. Burov, V.A. Pavlova // Plasma Devices and operations. – 2002. – Vol. 10, № 1. – P. 9–15.

20. *Лисенков, А.А.* Современное состояние и перспективы развития технологии вакуумного дугового нанесения износостойких покрытий / А.А. Лисенков, И.В. Буров // Вакуумная техника и технология. – 2002. – Т. 12, № 1. – С. 55–60.

21. *Пат. на изобрет. 2180472 Российская Федерация, МКП 7Н05Н1/50, С23С14/35.* Вакуумно-дуговой источник плазмы / Лисенков А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ИПМАШ РАН, ЗАО «С.Е.Д.-СПб». – № 20001103758/06; заявл. 07.02.2000; опубл. 2002, Бюл. № 7.

22. *Лисенков, А.А.* Синтез нитрида алюминия из металлической плазмы вакуумного дугового разряда / А.А. Лисенков, И.В. Буров // Материалы 5-й Межд. конф. «Алмазные пленки и пленки родственных материалов» / НИЦ ХФТИ. – Харьков, 2002. – С. 258–261.

23. *Burov, I.V.* Control of technological process of coating formation from plasma of vacuum arc discharge / I.V. Burov, A.A. Lisenkov // Вакуумные технологии и оборудование: сб. докл. 4-го Межд. симпозиума / НИЦ ХФТИ. – Харьков, 2001. – С. 343–346.

24. *Буров, И.В.* Современное состояние и перспективы развития технологии вакуумного дугового нанесения износостойких покрытий / И.В. Буров, В.Г. Кузнецов, А.А. Лисенков // Пленки и покрытия: сб. докл. 6-й Межд. конф. / СПбГТУ. – СПб., 2001. – С. 131–136.

25. *Lisenkov, A.A.* Vacuum-arc radiant of plasma an extended construction for synthesis zirconium carbide on grids of power transmitting valves / A.A. Lisenkov, N.Z. Vetrov, N.M. Radzig // Plasma Devices and operations. – 2000. – Vol. 8, № 3. – P. 179–185.

26. Вакуумные плазменные покрытия для сеток мощных генераторных ламп с вольфрамовым торированно-карбидированным катодом / А.А. Лисенков и др. // Вакуумная техника и технология. – 1999. – Т. 10, № 2. – С. 67–71.
27. Влияние капельной фракции на газопоглощающие свойства титанового покрытия, формируемого из плазмы вакуумного дугового разряда / А.А. Лисенков и др. // Вакуумная техника и технология. – 1999. – Т. 9, № 3. – С. 27–30.
28. Пат. на изобрет. 2098512 Российская Федерация, МПК 6С23С14/32. Вакуумно-дуговой источник плазмы / Абрамов И.С., Быстров Ю.А., Лисенков А.А.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 96110833/2; заявл. 29.05.96; опубл. 1997, Бюл. № 34.
29. Верещагин, Д.В. Распределение плотности ионного тока в рабочем объеме вакуумно-дугового источника плазмы / Д.В. Верещагин, А.А. Лисенков // Изв. СПбГЭТУ. Сер. Вакуумная и плазменная электроника. – 1997. – Вып. 503. – С. 11–17.
30. Пат. на изобрет. 2072642 Российская Федерация, МПК Н05Н1/50. Вакуумно-дуговое устройство / Лисенков А.А. и др.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 94021421/25; заявл. 07.06.94; опубл. 1997, Бюл. № 3.
31. Пат. на изобрет. 2058423 Российская Федерация, МПК 6С23С14/24. Вакуумно-дуговое устройство / Лисенков А.А. и др.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 94026110/10; заявл. 15.07.94; опубл. 1996, Бюл. № 11.
32. А.с. 1529765 СССР, МКИ С23С14/32. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных цилиндрических полостей / Лисенков А.А. и др.; заявитель ЛЭТИ. – № 4327353/24-21; заявл. 16.11.87; опубл. 1996, Бюл. № 2.
33. А.с. 1561739 СССР, МКИ Н01 7/18. Способ вакуумно-дугового нанесения титановых покрытий / Лисенков А.А. и др.; заявитель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 4368420/21-22; заявл. 18.01.88; опубл. 1996, Бюл. № 4.
34. А.с. 1552688 СССР, МКИ С23С14/32. Способ нанесения покрытий в вакууме / Лисенков А.А. и др.; заявитель ЛЭТИ. – № 4380130/24-21; заявл. 21.12.87; опубл. 1996, Бюл. № 2.
35. Пат. на изобрет. 2039849 Российская Федерация, МПК С23С14/32. Вакуумно-дуговое устройство / Лисенков А.А. и др.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 5031104/10; заявл. 09.03.92; опубл. 1995, Бюл. № 20.
36. А.с. 1780455 СССР, МКИ Н01J31/12. Способ изготовления вакуумных люминесцентных индикаторов / Лисенков А.А. и др.; СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – № 4877056/21; заявл. 23.07.90; опубл. 1995, Бюл. № 35.
37. Исследование возможности применения дуоплазмотрона с вакуумным дуговым разрядом для создания пленок из порошковых материалов с низкой проводимостью / А.А. Лисенков и др. // Изв. вузов. Физика. – 1994. – № 3. – С. 121–131.