

На правах рукописи



Сивин Денис Олегович

**ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕНТОЧНЫХ И ПСЕВДОЛЕНТОЧНЫХ
ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ И ПЛАЗМЫ**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Рябчиков Александр Ильич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Усов Юрий Петрович

доктор технических наук, профессор
Смирнов Серафим Всеволодович

Ведущая организация: Институт сильноточной электроники СО РАН

Защита состоится «21» декабря 2010 года в 15⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.05 при 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 «__» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите

докторских и кандидатских диссертаций



Кожевников А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В большинстве случаев эксплуатационные свойства материалов, деталей и изделий на их основе определяются свойствами поверхности. Развитие методов модификации поверхностных и приповерхностных слоев материалов стало определяющим в развитии технического прогресса. Среди многообразия методов модифицирования свойств поверхности, особое место занимают методы ионно-лучевой обработки и плазменного осаждения покрытий.

Исследования по взаимодействию пучков заряженных частиц с поверхностью твердого тела показали перспективность их использования в качестве уникального инструмента для улучшения поверхностных свойств различных материалов. Воздействие на поверхность полупроводников, металлов, органических материалов приводит к направленному изменению физико-химических, физико-механических, электрофизических, магнитных поверхностных и приповерхностных свойств материалов.

Ионная имплантация в металлы и сплавы требует применения доз облучения на несколько порядков больших по сравнению с полупроводниками. Именно развитие ионной имплантации в металлы и сплавы резко стимулировало создание сильноточных источников ионов металлов на основе импульсной и непрерывной вакуумной дуги.

Развитие и внедрение новых перспективных технологий ионной имплантации, ассистирования ионным пучком при осаждении покрытий в настоящее время сдерживается отсутствием ионных источников, обеспечивающих формирование широких ионных пучков для равномерной обработки крупногабаритных деталей и изделий. В этой связи, разработка и исследование источников ленточных и псевдоленточных пучков ионов металлов представляется актуальной задачей.

Фундаментальная проблема, связанная с имплантацией ионов металлов и ионно-плазменным осаждением покрытий с применением вакуумно-дугового разряда, обусловлена наличием в потоке вакуумно-дуговой плазмы значительного количества микрокапель, являющихся продуктами эрозии материала катода в катодном пятне. Создание фильтров для очистки плазмы вакуумной дуги от микрочастиц обеспечивает возможность существенного (на два три порядка) уменьшения количества микрочастиц в плазменном потоке. Однако применение любых конструкций плазменных фильтров существенно уменьшает концентрацию плазмы на выходе плазменного фильтра и не обеспечивает возможность полной очистки плазмы от микрочастиц. Наличие микрокапельной фракции при ионной имплантации и в технологиях ионно-плазменного осаждения покрытий, существенно ухудшает технологические возможности методов. В этой связи, актуальной представляется задача поиска альтернативного метода устранения микрочастиц в потоке плазмы или на поверхности обрабатываемой мишени. Таким образом, тема диссертационной работы, связанная с разработкой и исследованием источников ленточных и псевдоленточных пучков ионов и

плазмы на основе вакуумно-дуговых испарителей непрерывного действия, а также устройств и нового метода очистки плазмы от микрокапельной фракции для реализации широкого набора методов ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки поверхности материалов представляется актуальной.

Цель работы заключается в исследовании трансформации микрочастиц вакуумно-дугового разряда на поверхности мишени в условиях избирательного энергетического воздействия на них, в разработке псевдоленточного источника пучков ионов металлов и плазменных потоков, а так же в исследовании закономерностей формирования интерметаллидных слоев типа Ti-Al, Ni-Al при имплантации ионов алюминия в условиях компенсации ионного распыления поверхности осаждением металлической плазмы.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Предложен и разработан генератор металлической плазмы на основе непрерывной вакуумной дуги с замкнутым дрейфом катодного пятна по рабочей поверхности катода, оснащенный прямоточным фильтром с плоскими электродами жалюзийного типа для очистки плазмы от микрокапельной фракции. Определены основные закономерности влияния тока дугового разряда, напряженности магнитного поля на поверхности катода, условий магнитной изоляции электродов фильтра и положительного потенциала смещения на них на параметры плазменного потока на выходе генератора.

2. Показана возможность удаления продуктов эрозии катода вакуумно-дугового генератора металлической плазмы в виде микрокапель с поверхности мишени, погруженной в плазму, путем приложения к ней короткоимпульсных (2-2,5 мкс) высокочастотных (240 кГц) потенциалов смещения отрицательной полярности (1 кВ). Удаление микрочастиц на поверхности мишени достигается как в случае применения короткоимпульсного потенциала смещения одновременно с осаждением металлической плазмы, так и в случае, когда осаждение металлической плазмы уже прекращено, а короткоимпульсный потенциал смещения прикладывается к мишени, погруженной в газовую плазму.

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

4. С использованием импульсно-периодического источника пучков ионов металлов и плазменных потоков показана, возможность создания интерметаллидных слоев (типа Ni-Al, Ti-Al) с толщиной, на порядок превышающей пробег ионов в мишени (до 2,6 мкм), с достижением концентрации легирующей примеси до 60 ат.%, в условиях имплантации ионов металлов с компенсацией ионного распыления осаждением металлической плазмы в промежутках между импульсами формирования ионного пучка в источнике.

Научная и практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Разработан протяженный генератор металлической плазмы на основе непрерывной вакуумной дуги с замкнутым дрейфом катодного пятна по рабочей поверхности катода, оснащенный протяженным прямоточным плазменным фильтром для очистки металлической плазмы от микрокапельной фракции, с ионным током насыщения из плазмы на выходе до 1,8 А при токе дугового разряда 145 А. Генератор может быть использован как в установках для плазменного осаждения покрытий на детали со значительными линейными размерами, так и в источниках псевдоленточных пучков ионов металлов.

2. Новый метод удаления микрокапель вакуумно-дугового разряда с поверхности мишени, погруженной в плазму, при приложении к ней отрицательного короткоимпульсного высокочастотного потенциала смещения, открывает значительные перспективы его применения в технологиях ионно-плазменного осаждения наноструктурированных бездефектных и малодефектных покрытий.

3. Разработаны источники непрерывных и импульсно-периодических, ленточных и псевдоленточных пучков ионов металлов и плазменных потоков на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда с фильтрацией плазмы от микрокапельной фракции. Источники предназначены для ионно-ассистированного осаждения покрытий на детали с размерами до 0,6 м и для ионной имплантации в изделия, в том числе, в условиях компенсации ионного распыления поверхности мишени осаждением металлической плазмы из того же источника в промежутках между импульсами формирования ионного пучка.

4. Возможность формирования наноструктурных интерметаллидных слоев (типа Ni-Al, Ti-Al) с толщиной до нескольких микрометров методом ионной имплантации ионов алюминия с компенсацией ионного распыления осаждением алюминиевой плазмы в промежутках между импульсами ионного пучка в источнике, обеспечивает увеличение физико-механических и эксплуатационных свойств изделий из никеля и титана, в том числе, в условиях повышенных температур.

Личный вклад автора состоит в проведении комплекса исследований по формированию ленточных и псевдоленточных потоков металлической плазмы, формированию ленточных и псевдоленточных пучков ионов металлов, разработке ионного источника, исследованию эффекта трансформации микрокапель на поверхности мишени, проведению исследований по формированию интерметаллидных слоев и изменению их макроскопических свойств. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации по результатам исследования. Обсуждение задач исследований, методов их решения и результатов осуществлялось совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Протяженный вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы с «двухарочным» магнитным полем напряженностью $(0,5-1,4) \cdot 10^{-2}$ Тл на

поверхности катода, оснащенный прямоточным плазменным фильтром с плоскими электродами жалюзийного типа, магнитноизолированными за счет пропускания по ним тока от 350 А до 1000 А, находящимися под положительным, по отношению к плазме, потенциалом смещения от 12 В до 18 В, обеспечивает формирование псевдоленточного потока очищенной от микрокапельной фракции, металлической плазмы с ионным током насыщения из плазмы на выходе источника до 1,8 А при токе дугового разряда 145 А. Выполнение конструкции магнитопровода с минимальным градиентом тангенциальной составляющей магнитного поля на рабочей поверхности катода, обеспечивает равномерную выработку катода и существенно увеличивает ресурс работы генератора.

2. Приложение к мишени, погруженной в плазму, отрицательных импульсов потенциала смещения микросекундной длительности, с частотой 240 кГц, амплитудой 1 кВ, обеспечивает существенную трансформацию продуктов эрозии катода вакуумно-дугового испарителя, в виде микрокапель, вплоть до их полного исчезновения с поверхности. Эффект удаления микрочастиц наблюдается как в условиях совместной работы вакуумно-дуговых генераторов газовой и металлической плазмы и генератора потенциала смещения, так и в условиях предварительного осаждения металлической плазмы и последующего удаления микрочастиц с помощью генератора газовой плазмы и источника короткоимпульсных потенциалов смещения.

3. Созданные источники ленточных и псевдоленточных пучков ионов металлов с применением двух аксиально-симметричных или одного протяженного, с «двухарочным» магнитным полем на катоде, вакуумно-дуговых испарителей, обеспечивают при ускоряющем напряжении до 40 кВ получение ионных пучков с сечением $0,6 \times 0,1 \text{ м}^2$ с током до 2-2,5 А в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 400 мкс, при частоте следования до 200 импульсов в секунду, и с током до 175 мА в непрерывном режиме. Импульсно-периодическое формирование псевдоленточных пучков ионов металлов требует десинхронизации циклической частоты перемещения катодного пятна по рабочей поверхности катода и частоты следования импульсов ускоряющего напряжения.

4. Импульсно-периодическая имплантация ионов алюминия в мишени из никеля и титана в условиях компенсации ионного распыления поверхности осаждением алюминиевой плазмы, формируемой тем же источником в промежутках между импульсами ускоряющего напряжения, обеспечивает возможность формирования интерметаллидов на глубинах (до 2,6 мкм), на порядок превышающих пробеги ионов, с достижением концентрации легирующей примеси до 60 ат.%, при дозе облучения до 10^{19} ион/см² и увеличения физико-механических и эксплуатационных свойств никеля и титана даже в условиях повышенных температур.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сравнением

полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 14 и 15 Международных конференциях по модификации поверхности ионными пучками (Кушадасы, Турция, 2005, Мумбай, Индия, 2007), 11 Международной конференции по ионным пучкам (Франция, Ко, 2005), 7-10 конференциях по модификации материалов пучками заряженных частиц и плазменными потоками (Томск, 2004, 2006, 2008, 2010), XIII Международном совещании «Радиационная физика твердого тела» (Украина, Севастополь, 2003), XV Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (Тольятти, 2003), XLIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (Беларусь, Витебск, 2004), V Международной конференции «Ионная имплантация и другие применения ионов и электронов» (Польша, Казимеж-Дольны, 2004), I Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2005).

Публикации. Материалы работы изложены в 38 научных публикациях, докладах и тезисах, опубликованных в отечественной и зарубежной печати и патенте на изобретение.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 153 страниц, работа содержит 64 рисунка и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 148 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе, на основе литературных данных, проведен обзор опубликованных работ и проанализировано современное состояние дел по формированию металлической плазмы вакуумно-дуговым разрядом. Подробно рассмотрены различные характеристики потока металлической плазмы, формируемой в катодных пятнах вакуумно-дугового разряда. Проанализированы особенности и закономерности появления микрокапельной фракции в результате эрозии катода в катодных пятнах. Рассмотрено современное состояние дел в области разработки вакуумно-дуговых генераторов плазмы различных конструкций. Большое внимание уделено обзору работ по исследованию и разработке устройств очистки вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции. Дан обзор работ, посвященных разработке и исследованию источников пучков ионов металлов и плазменных потоков на основе импульсно-периодической и непрерывной вакуумной дуги. В конце главы сформулированы выводы и задачи исследований.

Во второй главе описана экспериментальная установка для проведения исследований и оборудование для диагностики плазмы и измерения параметров ионного пучка.

Приведены результаты исследований по формированию протяженных потоков металлической плазмы, очищенной от микрокапельной фракции, с использованием двух аксиально-симметричных вакуумно-дуговых генераторов плазмы с плазменными фильтрами и с использованием протяженного генератора металлической плазмы с замкнутым дрейфом катодного пятна по рабочей поверхности катода, оснащенного жалюзийным плазменным фильтром протяженного типа.

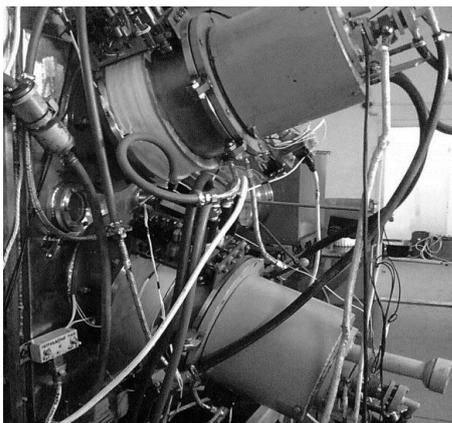


Рис. 1. Внешний вид системы из двух вакуумно-дуговых испарителей, оснащенных плазменными фильтрами

Выполненные эксперименты показали возможность формирования однородной по концентрации протяженной области ($0,6 \times 0,2 \text{ м}^2$) металлической плазмы при использовании двух аксиально-симметричных вакуумно-дуговых генераторов плазмы оснащенных плазменными фильтрами при их расположении под углом друг к другу (рис. 1). Из рис. 2 следует, что в случае, когда плазменный фильтр фокусирует плазменный поток, распределение плазмы по сечению плазменного потока оказывается неоднородным с выраженными двумя максимумами. При дефокусирующем включении плазменных фильтров достигается более однородное распределение плазмы.

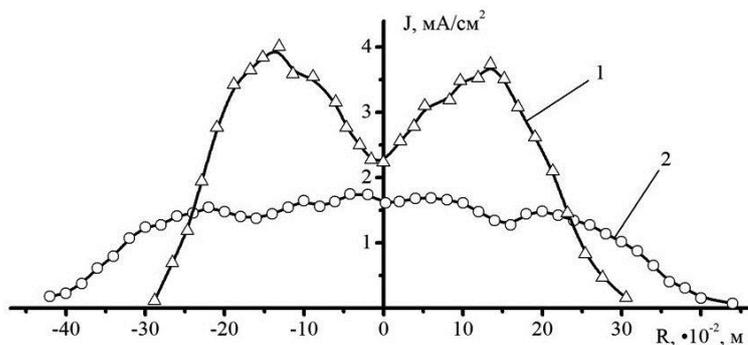


Рис 2. Распределение плотности ионного тока насыщения (J) по сечению плазменного потока: 1 – при фокусирующем включении плазменных фильтров; 2 - при дефокусирующем включении плазменных фильтров

С целью формирования плазмы на протяженной по линейным размерам области была исследована конструкция вакуумно-дугового испарителя с катодом в условии формирования «двухарочного» магнитного поля на его поверхности с помощью магнитной катушки. В качестве протяженного вакуумно-дугового испарителя была выбрана конструкция в виде пластины толщиной $0,01 \text{ м}$, шириной $0,10 \text{ м}$ и длиной $0,60 \text{ м}$. Схемы экспериментального стенда и конструкции протяженного вакуумно-дугового испарителя представлены на рис. 3.

На рис. 4 представлены данные изменения ионного тока насыщения из плазмы для различных материалов катода в зависимости от величины напряженности магнитного поля на поверхности катода при токе дуги 145 А.

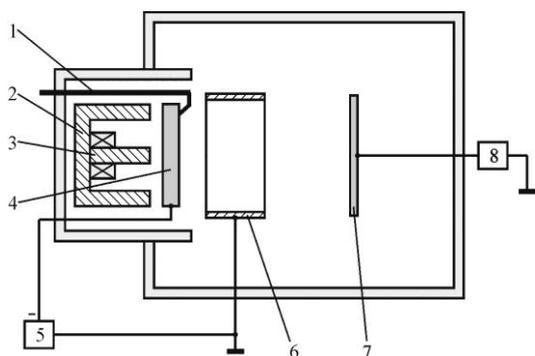


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: 1 – поджигающий электрод; 2 – «Ш»-образный магнитопровод; 3 – сердечник с магнитной катушкой; 4 – катод; 5 – источник питания; 6 – анод; 7 – коллектор; 8 – измерительная схема

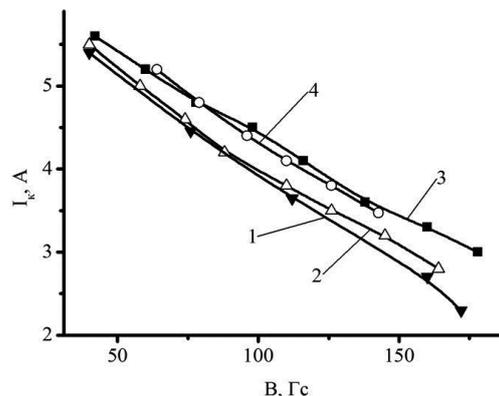


Рис. 4. Зависимость ионного тока насыщения (I_k) из плазмы для катодов из титана, дюралюминия, нержавеющей стали и меди от величины напряженности магнитного поля (В) (1 – титан; 2 – дюралюминиевый сплав; 3 – нержавеющая сталь; 4 – медь)

Стабильное горение разряда наблюдается при индукции магнитного поля $(4,0-15) \cdot 10^{-3}$ Тл. Из представленных данных следует, что увеличение напряженности магнитного поля приводит к снижению регистрируемого ионного тока, а значит и уменьшению эмиссионных характеристик генератора плазмы. Как видно из рис. 4, эффективность извлечения ионов из плазмы дугового разряда изменяется в значительных пределах, например, при напряженности магнитного поля около $4 \cdot 10^{-3}$ Тл на поверхности катода, ионный ток насыщения из плазмы на коллектор достигает 4% от тока дуги (для катода из титана).

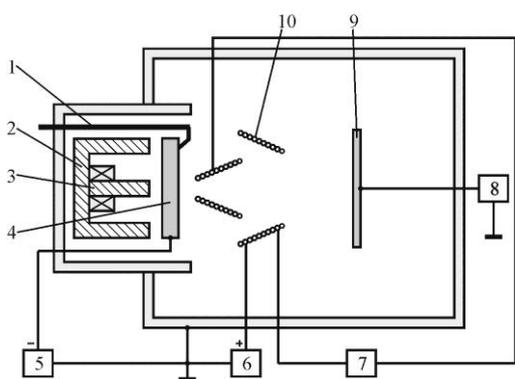


Рис. 5. Схема экспериментального стенда: 1 – поджигающий электрод; 2 – «Ш»-образный магнитопровод; 3 – сердечник с магнитной катушкой; 4 – катод; 5, 6, 7 – источники питания; 8 – измерительная схема; 9 – коллектор; 10 – плазменный фильтр

Исследования, проведенные с плазменным фильтром протяженного типа, конструкция которого представлена на рис. 5, показывают, что при определенных режимах работы вакуумно-дугового испарителя (ток дугового разряда 145 А) и плазменного фильтра, ионный ток насыщения из плазмы на выходе достигал 1,8 А, что является достаточным для использования такого генератора плазмы в ионном источнике. Наличие свободной от эрозии зоны на поверхности катода, а также магнитной изоляции дугового источника и плазменного фильтра, позволили приблизить центральные электроды плазменного фильтра на

расстояние ~ 5 см от поверхности катода. При таком расположении плазменного фильтра, наблюдалось влияние магнитного поля, формируемого током по электродам плазменного фильтра, на условия генерации плазмы на катоде (рис 6). Когда магнитное поле, формируемое плазменным фильтром, сонаправлено по отношению к магнитному полю вакуумно-дугового испарителя, из рис. 6 видно, что с ростом тока протекающего по электродам плазменного фильтра, наблюдается максимум ионного тока, регистрируемого на коллекторе, а затем при дальнейшем увеличении тока, происходит уменьшение ионного тока. Увеличение магнитного поля плазменного фильтра приводит к росту напряженности магнитного поля на поверхности катода, и как следствие к снижению эмиссионных свойств генератора (рис. 4). В то же время, увеличение тока в фильтре приводит к повышению эффективности магнитной изоляции электродов, что обеспечивает улучшение прозрачности плазменного фильтра.

В процессе создания источника с плазменным фильтром, рассматривалось несколько конструкций и, в частности, конструкция с взаимным перемещением катода и магнитопровода для обеспечения равномерной выработки катода. Было выбрано техническое решение для увеличения ресурса работы катода и поддержания стабильности характеристик источника плазмы за счет изменения формы магнитопровода определенным образом. На рис. 7 представлен вариант магнитной системы, который основан на формировании тангенциального к плоскости перемещения катодного пятна магнитного поля с минимальным градиентом в области рабочей поверхности катода. Концентраторы магнитного поля вблизи боковых торцов катода, обеспечивают однородное магнитное поле вблизи рабочей поверхности, вне зависимости от его толщины по мере выработки.

Была исследована конструкция протяженного вакуумно-дугового испарителя с плазменным фильтром, представленная на рис. 7.

В данном случае магнитное поле на поверхности катода формировалось не

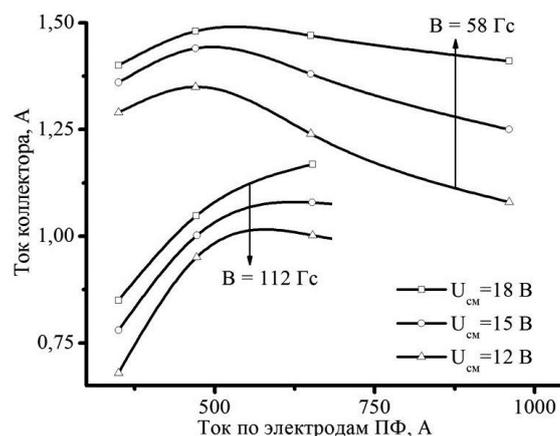


Рис. 6. Зависимость изменения тока коллектора от тока, протекающего по электродам плазменного фильтра, и напряжения смещения подаваемого на электроды фильтра

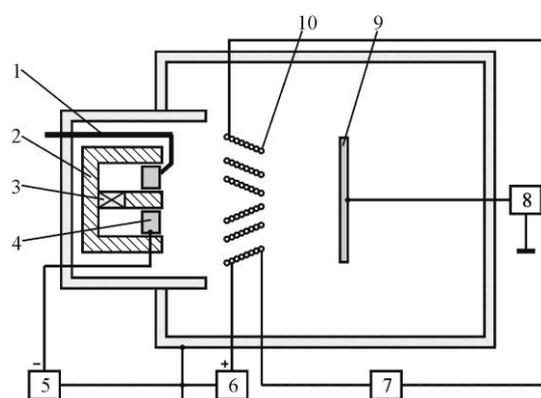


Рис. 7 Схема экспериментального стенда: 1 – поджигающий электрод; 2 – «Ш»-образный магнитопровод; 3 – постоянный магнит; 4 – катод; 5, 6, 7 – источники питания; 8 – измерительная схема; 9 – коллектор; 10 – плазменный фильтр

магнитной катушкой, как в предыдущем случае, а системой постоянных магнитов. Пламенный фильтр представлял собой систему из шести прямолинейных электродов, наклоненных под определенным углом к поверхности катода. Каждый электрод плазменного фильтра выполнен из десяти медных трубок диаметром 4 мм, по которым пропускается вода, обеспечивающая охлаждение электродов. По электродам плазменного фильтра течет ток, который создает магнитное поле для замагничивания плазменных электронов. На электроды фильтра относительно анода подавался положительный потенциал смещения. Такая конструкция генератора позволяет эффективно очищать плазменный поток от микрокапельной фракции вне зависимости от положения катодного пятна на рабочей поверхности катода. На рис. 8 представлены результаты исследования по формированию плазмы на выходе плазмогенератора при токе дугового разряда 130 А, напряженности магнитного поля на поверхности катода $9 \cdot 10^{-3}$ Тл, положительном потенциале на плазменном фильтре 15 В.

Данные рис. 8 показывают, что такая конструкция генератора плазмы обеспечивает достаточно эффективное прохождение плазмы через плазменный фильтр.

Экспериментально установлено, что при использовании плазменного фильтра данной конфигурации (рис. 7) шероховатость поверхности (по параметру R_a) исследуемых образцов снижается в 2 раза по сравнению с поверхностью образцов, полученных без плазменного фильтра, а количество микрочастиц при осаждении покрытий на расстоянии 23 см в течение 5 мин уменьшается примерно в 140 раз для титанового катода.

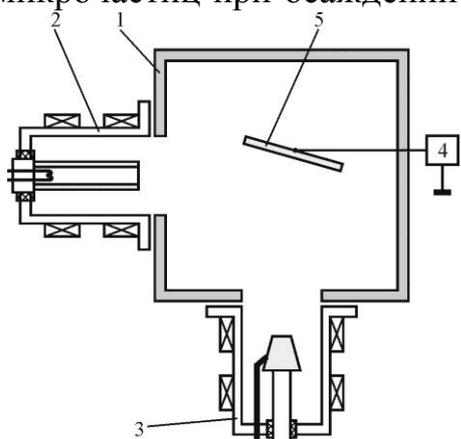


Рис. 9. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, 2 – генератор газовой плазмы «ПИНК», 3 – вакуумно-дуговой испаритель, 4 – источник короткоимпульсного потенциала смещения; 5 – образец

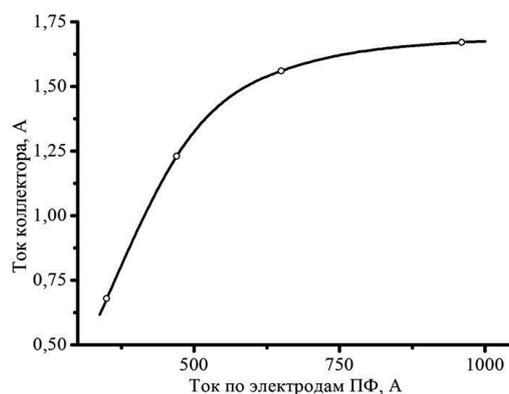


Рис. 8. Зависимость изменения тока коллектора от тока, протекающего по электродам плазменного фильтра

На рис. 9 представлена схема установки для исследования возможности трансформации микрочастиц на поверхности образца в условиях обеспечения избирательного энергозатрата в микрочастицы.

Применение наряду с генератором металлической (титановой) плазмы еще и источника плазмы газа (аргона) обеспечивало возможность изменения концентрации плазмы вблизи поверхности образца. В качестве источника смещения на образце использовался высоковольтный импульсно-периодический источник напряжения. Давление газа в камере составляло 0,1-1 Па.

Образец устанавливался на расстоянии 0,6 м от катода вакуумно-дугового испарителя и на расстоянии 0,3 м от выхода генератора газовой плазмы, таким образом, чтобы поверхность образца одновременно подвергалась воздействию металлической и газовой плазмы.

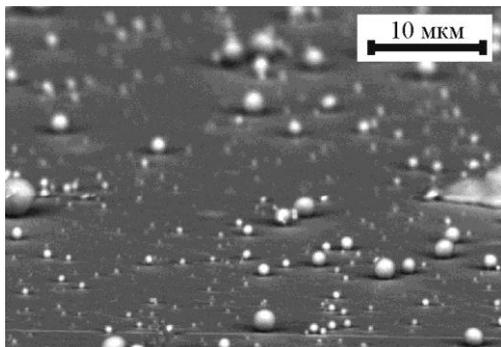


Рис. 10. Растровое электронное изображение поверхности образца из VT-6, после осаждения титановых капель без потенциала смещения

После осаждения тонкого титанового покрытия без потенциала смещения на поверхности образца отчетливо видны микрокапли титана (рис. 10). Форма, размеры и плотность микрочастиц на поверхности образца существенно не изменялись при предварительном нагреве образцов до температуры 600° С.

Применение короткоимпульсного высокочастотного отрицательного потенциала смещения длительностью 2,4 мкс, с частотой следования импульсов 240 кГц и амплитудой потенциала смещения -1 кВ привело к существенной трансформации микрочастиц. Рис. 11 показывает, что на поверхности образца практически не наблюдаются микрочастицы. Отсутствие кратеров характерных для микровзрывов острей, подтверждает механизм распыления и испарения частиц с поверхности. Длительность процесса осаждения и испарения составляла 20 минут. Применение коротко-импульсного высокочастотного потенциала смещения приводило за 20 минут к увеличению интегральной температуры образца до 540° С.

Для выяснения возможности удаления микрочастиц уже остывших на поверхности покрытия за счет теплоотвода был проведен эксперимент, в котором мишень, предварительно нагретая до температуры 500° С, подвергалась периодическому воздействию. Осуществлялось осаждение плазмы на мишень в течение 2 мин, а затем процесс осаждения прерывался и на 2 мин включался газовый генератор плазмы, при этом на мишень подавался отрицательный коротко-импульсный высокочастотный потенциал смещения. Общее время обработки составило 20 мин. Температура мишени не превышала 600° С. В результате с поверхности мишени микрочастицы в основном были удалены.

Исследование зарядовых состояний ионов в плазме протяженного вакуумно-

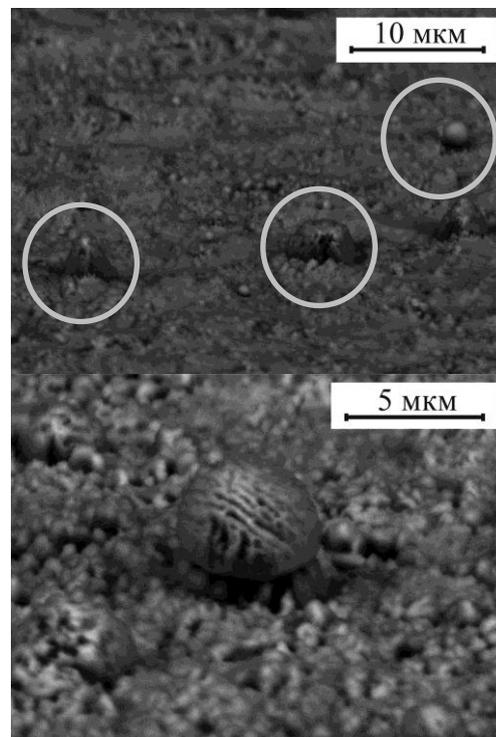


Рис. 11 Растровое электронное изображение поверхности VT-6 после плазменного осаждения с непрерывной подачей импульсно-периодического потенциала

дугового испарителя, выполненное с использованием плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра показало, что зарядовый состав ионов практически совпадает с данными, полученными для аксиально-симметричного вакуумно-дугового испарителя.

Третья глава посвящена исследованию закономерностей и особенностей формирования пучков ионов металлов. В случае использования металлической плазмы, созданной двумя аксиально-симметричными вакуумно-дуговыми испарителями, оснащенными плазменными фильтрами, исследована возможность формирования импульсно-периодического ленточного ионного пучка.

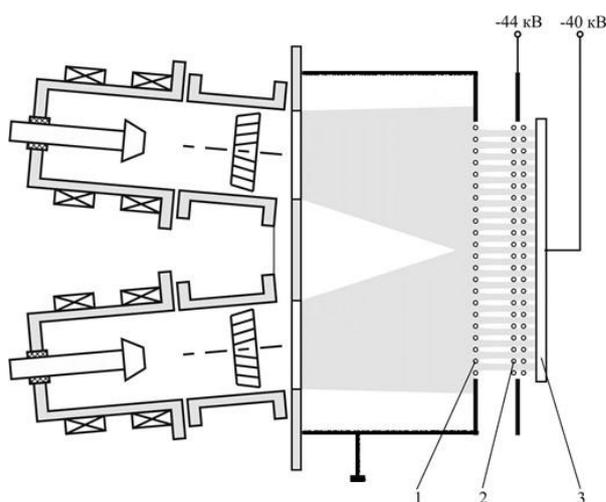


Рис. 12. Схема формирования ленточного ионного пучка. 1 — электрод для формирования ионно-эmissiveнной границы; 2 — электрод отсекки вторичных электронов; 3 — мишень-коллектор

Схема эксперимента представлена на рис. 12.

Ионно-эmissiveнная граница была сформирована с помощью прямоугольного электрода 1 с размерами $0,6 \times 0,1 \text{ м}^2$, установленного в области однородного распределения концентрации металлической плазмы, полученной от двух вакуумно-дуговых генераторов. Электрод 1 выполнен в виде набора вольфрамовых стержней диаметром 1,5 мм на расстоянии 8 мм друг от друга. На расстоянии 3 см от электрода 1 установлен электрод 2 для отсекки вторичных электронов. Показана возможность устойчивого формирования импульсно-

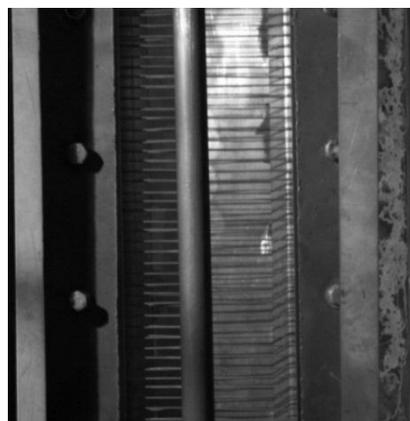
периодического пучка ионов титана с частотой следования импульсов до 200 импульсов в секунду при длительности 400 мкс и ускоряющем напряжении 20-40 кВ, в условиях, когда на двойной сеточный блок подавалось отрицательное смещение по отношению к мишени-коллектору не менее 4 кВ. Измеренный ток в импульсе составил 3 А, при этом ионный ток составил 2,5 А. Выполненный анализ показал, что ионный ток составляет около 2,5 А.

Формирование псевдоленточного ионного пучка исследовалось с использованием протяженного вакуумно-дугового испарителя с замкнутым дрейфом катодного пятна. Рассмотрены особенности формирования псевдоленточного ионного пучка как в случае применения постоянного, так и в случае импульсно-периодического ускоряющего напряжения. Внешний вид и конструкция источника «Радуга-6» представлены на рис. 13 и 14. Формирование металлической плазмы осуществляется в протяженном вакуумно-дуговом испарителе непрерывного действия с замкнутой траекторией движения катодного пятна на поверхности массивного водоохлаждаемого катода длиной 0,695 м и шириной 0,085 м. Стабилизация катодного пятна на рабочей поверхности катода реализована в условиях формирования двухарочного магнитного поля с индукцией 10^{-2} Тл,

создаваемого набором постоянных магнитов. У торцевой поверхности катода размещен поджигающий электрод. Катод размещен внутри цилиндрического анода диаметром 0,21 м. Напротив рабочей поверхности катода размещен многощелевой сеточный электрод. Для очистки плазменного потока от микрокапель, на расстоянии 60 мм от рабочей поверхности катода был установлен протяженный плазменный фильтр жалюзийного типа.



а)



б)

Рис. 13. Источник «Радуга-6»: а) внешний вид источника на экспериментальном стенде; б) внешний вид сетки из камеры

Для защиты конструктивных элементов вакуумно-дугового испарителя от продуктов эрозии катода и инициирования дугового разряда предусмотрены защитные экраны. В выходном патрубке ионного источника размещена изолированная от корпуса двойная ускоряющая сетка. Охлаждение катода, анода, электродов плазменного фильтра и источников питания вакуумно-дугового испарителя и фильтра, находящихся под ускоряющим потенциалом, осуществляется деионизированной водой.

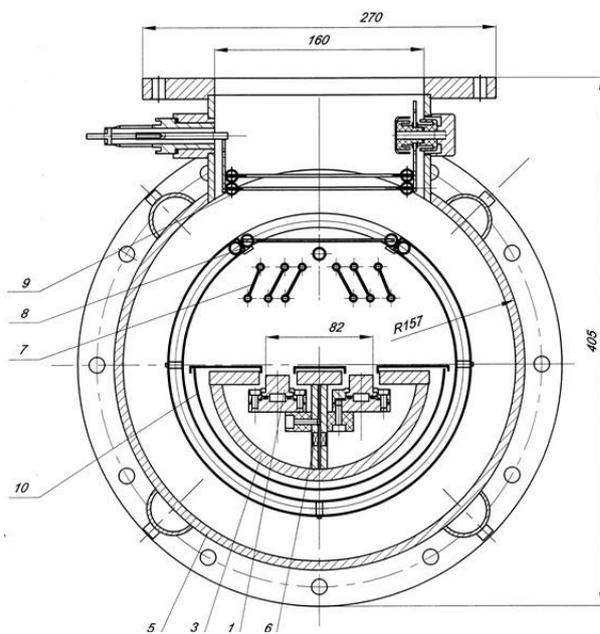


Рис. 14. Схема электродов источника «Радуга-6»: 1 – катод, 3 – магнитопровод, 5 – корпус источника, 6 – магниты, 7 – плазменный фильтр, 8 – анодная сетка, 9 – ускоряющая сетка, 10 – экран

Измерения мощности ионного пучка на выходе источника при постоянном ускоряющем напряжении с пассивным фильтром, проводились с использованием, перемещаемого вдоль источника, проточного калориметра с площадью рабочей поверхности $150 \times 20 \text{ мм}^2$. На рис. 15 представлено распределение интегральной плотности мощности в ионном пучке по длине источника.

Как следует из представленных данных, интегральная мощность ионного пучка достигает $\sim 7 \text{ кВт}$ при токе генератора ускоряющего напряжения

200 мА и величине ускоряющего напряжения 40 кВ. Измеренное значение мощности говорит о том, что порядка 13% мощности источника ускоряющего напряжения затрачивается на ускорение вторичных электронов в диоде, а ионный ток составляет около 175 мА.

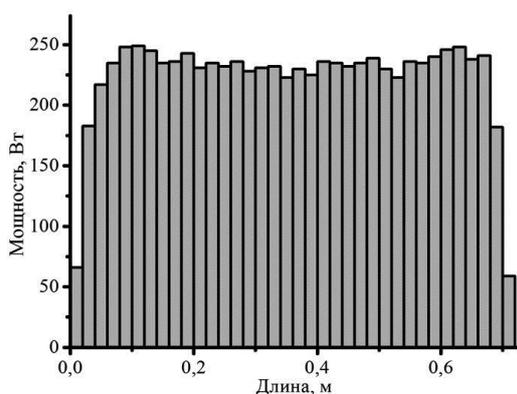


Рис. 15. Распределение мощности ионного пучка по длине выходной апертуры источника на расстоянии 0,1 м от источника: $I_d=95$ А; $U_{\text{уск}}=40$ кВ

При использовании фильтра в активном режиме, когда концентрация плазмы на выходе увеличивается в несколько раз, был использован импульсно-периодический режим формирования ионного пучка. При ускоряющем напряжении 40 кВ, при длительности импульса 400 мкс и частоте следования импульсов 200 импульсов секунду на коллекторе с положительным потенциалом смещения -200 В, был получен импульсный пучок ионов титана с током 1,7 А.

Экспериментально установлено, что импульсно-периодическое формирование псевдоленточного ионного пучка может сопровождаться значительной неоднородностью интегрального распределения плотности тока по сечению пучка. Для формирования однородного по длине интегрального распределения плотности тока требуется десинхронизация циклической частоты перемещения катодного пятна по рабочей поверхности катода и частоты следования импульсов ускоряющего напряжения.

В четвертой главе рассмотрены технологические особенности и возможности использования ленточных и псевдоленточных пучков ионов металлов.

Экспериментально показано, что в случае формирования ионного пучка с постоянным ускоряющим напряжением, ионный источник предпочтительно должен быть использован для ионной имплантации в хороших вакуумных условиях. Увеличение давления остаточного газа в экспериментальной камере будет приводить к увеличению вероятности возникновения пробоев ускоряющего зазора источника и к срыву его устойчивой работы. При повышенных давлениях газа до 1 Па, предпочтительно применение источника ионов с импульсно-периодическим формированием ионного пучка.

Представлены результаты исследования по имплантации в мишени из никеля и титана ионов алюминия, с

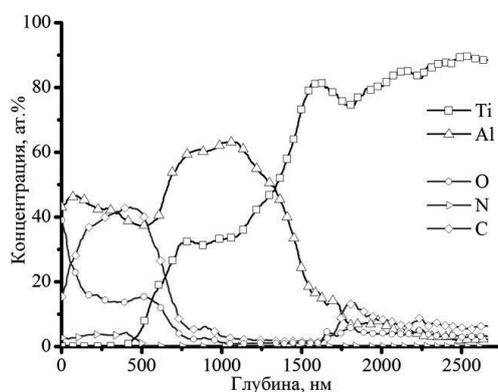


Рис. 16. Концентрационные ОЭС-профили поверхностных ионно-легированных слоев титана при дозе облучения ионами алюминия $2,2 \cdot 10^{18}$ ион/см²

целью создания интерметаллидных модифицированных слоев, характеризующихся высокой жаропрочностью и износостойкостью. Облучение проводилось в импульсно-периодическом режиме формирования ионного пучка в условиях компенсации ионного распыления поверхности никеля и титана осаждением плазмы алюминия. В результате имплантации были получены наноразмерные интерметаллидные слои с толщинами до 2,6 мкм с достижением концентрации легирующей примеси до 60 ат.%, при дозе облучения до 10^{19} ион/см². На рис. 16 представлен концентрационный профиль ионно-легированного слоя титана.

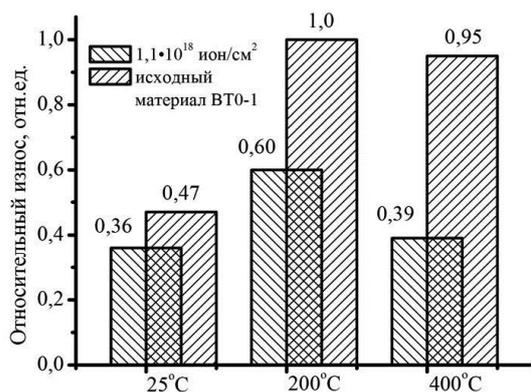


Рис. 17. Относительный износ при трибологических испытаниях ионно-легированного слоя титана

Исследования показали, что формирование многофазных ионно-легированных слоев, содержащих интерметаллидные фазы, позволяет существенно повысить механические свойства имплантированных материалов в том числе и при повышенных температурах (рис. 17). Так, например, при увеличении температуры образцов до 400° С, уровень износа исходного титана увеличился в 2,4 раза, в то время как уровень износа легированного титана практически не изменился.

В заключении изложены основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Применение двух аксиально-симметричных вакуумно-дуговых испарителей оснащенных плазменными фильтрами обеспечивает возможность формирования протяженной области ($0,6 \times 0,1$ м²) плазменного потока с неоднородностью концентрации плазмы по длине не превышающей 15-20%.

2. Протяженный вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы с «двухарочным» магнитным полем напряженностью $(0,5-1,4) \cdot 10^{-2}$ Тл на поверхности катода, совмещенный с прямоточным плазменным фильтром с плоскими электродами жалюзийного типа, магнитоизолированными за счет пропускания по ним тока от 350 А до 1000 А, находящимися под положительным, по отношению к плазме, потенциалом смещения от 12 В до 18 В, обеспечивает формирование квазиленточного потока, очищенной от микрокапельной фракции, металлической плазмы с ионным током насыщения из плазмы на выходе источника до 1,8 А при токе дугового разряда 145 А. Обычное магнитное поле «арочного» типа на поверхности катода приводит к локальной выработке его поверхности. Выполнение конструкции магнитопровода с минимальным градиентом тангенциальной составляющей магнитного поля на рабочей поверхности катода, обеспечивает равномерную выработку катода и существенно увеличивает ресурс работы генератора.

3. Приложение к мишени, погруженной в плазму, отрицательных импульсов потенциала смещения микросекундной длительности, с частотой 240 кГц, амплитудой 1 кВ, обеспечивает существенную трансформацию продуктов эрозии катода вакуумно-дугового испарителя, в виде микрокапель, вплоть до их полного исчезновения с поверхности. Эффект удаления микрочастиц наблюдается, как в условиях совместной работы вакуумно-дуговых генераторов газовой и металлической плазмы и генератора потенциала смещения, так и в условиях предварительного осаждения металлической плазмы и последующего удаления микрочастиц с помощью генератора газовой плазмы и источника короткоимпульсных потенциалов смещения. В экспериментах наблюдались микрокапли с различной степенью трансформации их формы: еще сферические, в виде конуса и усеченного конуса. Такое поведение микрочастиц говорит об их постепенном испарении в условиях избирательного, по отношению ко всей поверхности мишени, энерговыделения в них за счет ионного облучения и эффекта значительного увеличения напряженности электрического поля на поверхности микрочастицы, вызывающего увеличение электронного тока эмиссии с поверхности микрочастицы.

4. Экспериментально показано, что зарядовые состояния ионов в плазме протяженного вакуумно-дугового испарителя существенно не отличаются от зарядовых состояний ионов в плазме аксиально-симметричного вакуумно-дугового испарителя.

5. Разработан источник псевдоленточных пучков ионов металлов, обеспечивающий формирование непрерывного плазменного потока, импульсно-периодического или непрерывного формирования пучков ионов металлов.

6. Экспериментально показана возможность импульсно-периодического формирования ленточного потока ионов металлов с током 2-2,5 А на мишень, погруженную в плазму, при подаче на нее отрицательных импульсов напряжения с амплитудой до -40 кВ, длительностью 400 мкс, с частотой следования импульсов до 200 импульсов в секунду.

7. Источник псевдоленточных пучков ионов металлов с применением протяженного, с «двухарочным» магнитным полем на катоде, вакуумно-дугового испарителя, обеспечивает при ускоряющем напряжении до 40 кВ получение ионных пучков с сечением $0,6 \times 0,1 \text{ м}^2$, с током до 2-2,5 А в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса 400 мкс, при частоте следования до 200 импульсов в секунду, и с током до 175 мА в непрерывном режиме.

8. Экспериментально установлено, что импульсно-периодическое формирование псевдоленточного ионного пучка может сопровождаться значительной неоднородностью интегрального распределения плотности тока по сечению пучка. Для стабильного формирования однородного по длине интегрального распределения плотности тока, требуется десинхронизация циклической частоты перемещения катодного пятна по

рабочей поверхности катода и частоты следования импульсов ускоряющего напряжения.

9. Экспериментально установлено, что импульсно-периодический режим формирования ионного пучка обеспечивает возможность технологического применения ионного источника в более широком диапазоне давлений в экспериментальной камере (до 1 Па).

10. Для исключения неоднородного облучения вращающихся протяженных изделий из-за горизонтального расположения элементов сеточной системы источника, необходимо элементы сетки располагать под небольшим углом к их горизонтальному положению.

11. Импульсно-периодическая имплантация ионов алюминия в мишени из никеля и титана в условиях компенсации ионного распыления поверхности осаждением алюминиевой плазмы, формируемой тем же источником в промежутках между импульсами ускоряющего напряжения, обеспечивает возможность формирования интерметаллидов на глубинах (до 2,6 мкм), на порядок превышающих пробеги ионов, с достижением концентрации легирующей примеси до 60 ат.%, при дозе облучения до 10^{19} ион/см² и увеличения физико-механических и эксплуатационных свойств никеля и титана даже в условиях повышенных температур.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. 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.

2. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Еремин С.Е., Сивин Д.О., Дектярев С.В. Плазменно-иммерсионный времяпролетный спектрометр для исследования массового и зарядового состава газовой и металлической плазмы // Известия вузов. Физика. – 2009. – Т. 52, №11/2. – С. 112-116.

3. 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.

4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Шаркеев Ю.П., Рябчиков А.И., Козлов Э.В., Курзина И. А., Степанов И.Б., Божко И.А., Калашников М.П., Фортюна С.В., Сивин Д.О. Высокоинтенсивная ионная имплантация – метод формирования мелкодисперсных интерметаллидов в поверхностных слоях металлов // Известия Вузов. Физика.–2004.–№ 9.–С. 44-52.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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. 2. Микроструктура и фазовый состав // *Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками: Труды 6 конференции.* – Томск, 2002. – С. 242-246.

24. Рябчиков А.И., Степанов И.Б., Рябчиков И.А., Сивин Д.О., Шулепов И.А., Дектярев С.В. Комплексное оборудование для исследования покрытий и модифицированных слоев материалов, сформированных на основе методов ионно-лучевого и ионно-плазменного воздействия // *Модификация материалов пучками частиц и плазменными потоками: Труды 6 конференции.* – Томск, 2002. – С. 649-653.

25. Козлов Э. В., Рябчиков А. И., Шаркеев Ю. П., Курзина И. А., Степанов И. Б., Сивин Д.О.[и др.] Формирование нанофазных поверхностных слоев в процессе высокоинтенсивной ионной имплантации // *Пятый международный уральский семинар «Радиационная физика металлов и сплавов»: Сборник трудов.* – Снежинск, 2003. – С. 28-29.

26. Божко И.А., Козлов Э.В., Рябчиков А.И., Шаркеев Ю.П., Курзина И.А., Степанов И.Б., Сивин Д.О., Калашников М.П. Модификация поверхностных слоев титана при ионной имплантации алюминия // *Радиационная физика и*

химия неорганических материалов: Тезисы докладов Всероссийской школы-семинара молодых ученых. – Томск, 2003. – С. 6-8.

27. Шаркеев Ю. П., Рябчиков А. И., Курзина И. А., Божко И. А., Фортуна С. В., Шулепов И. А., Сивин Д.О., Калашников М. П. Модификация поверхностных слоев титана в процессе высокоинтенсивной имплантации ионов алюминия // Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития: Сборник трудов IV Региональной школы-семинара молодых ученых. – Томск, 2003. – С. 20-22.

28. Kozlov E. V., Ryabchikov A. I., Sharkeev Yu. P., Kurzina I. A., Fortuna S. V., Sivin D.O., Bozhko I. A., Kalashnikov M. P. Hardening of the surface layer of titanium by ion implantation // Fundamentals and Applications: Proceedings of International Workshop Mesomechanics – Tomsk, 2003. – P. 107-108.

29. Bozhko I. A., Kurzina I. A., Kalashnikov M. P., Fortuna S. V., Stepanov I. B., Ryabchikov A. I., Sharkeev Yu. P., Kozlov E. V., Sivin D.O. Formation of Nanoscale Intermetallic Phases in Ni Surface Layer at High Intensity Implantation of Al Ions // Nanoparticles, Nanostructures and nanocomposites NNN200 – St. Petersburg, 2004. - P. 186.

30. Kozlov E. V., Ryabchikov A. I., Sharkeev Yu. P., Kurzina I. A., Stepanov I. B., Sivin D.O., Kalashnikov M. P., Bojko I. A. Formation of intermetallic surface layers with high intensity ion implantation // 8 th International conference of Solid state physic. – Almaty, Kazakhstan, 2004. – P.

31. Козлов Э.В., Божко И.А., Курзина И. А., Калашников М.П., Фортуна С.В., Сивин Д.О. Жаропрочные, износостойкие поверхностные слои титана, сформированные в условиях высокоинтенсивной ионной имплантации алюминия // Радиационная физика твердого тела: Труды XIV Международного совещания. – Севастополь, Украина, 2004. – С. 357-361.

32. Курзина И. А., Божко И.А., Калашников М.П., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Сивин Д.О. Высокоинтенсивная имплантация ионов алюминия в титан. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2004 – Т. 26, N12 – С. 1645-1660.

33. 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.

34. Ryabchikov A.I., Ryabchikov I.A., Stepanov I.B., Sivin D.O. The installation for high-intensity ion treatment and coatings deposition for materials with different conductivity // Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons: Proceedings of Vth International Conference. – Poland, Kazimierz Dolny, 2004 – P. 23.

35. Сивин Д.О. Формирование интерметаллидных слоев методом высокоинтенсивной ионной имплантации // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов I Всероссийской конференции молодых ученых. –Томск, 2005. – С. 335-337.

36. Nochovnaya N.A., Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Ryabchikov I.A., Shulepov I.A., Sharkeev Yu.P., Fortuna S.V., Sivin D.O. Vacuum Arc Filtered

Metal Plasma Application in Hybrid Technologies of Ion Beam and Plasma Material Processing // Book of Abstracts of the 14th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams. – Kusadasi, Turkey, 2005. – P. 69.

37. Ryabchikov A .I., Koval N.N., Stepanov I.B., Lopatin I.V.,Sivin D.O., Eremin S.E. Investigation of Composition and Charge State of Vacuum Arc Single- and Multi-Component Plasma. // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – №8, Приложение. – С.69-52.

38. Ryabchikov A.I., Shulepov I.A., and Sivin D.O. Investigation of Microdefects Transformation on the Coatings Surface during Vacuum-Arc Plasma Deposition // Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings of 10th International Conference on. – Tomsk, 2010. – P. 209-212.