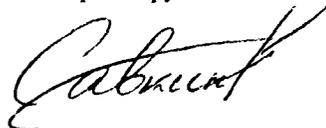


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи



САВКИН Константин Петрович

**МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКА
ИОНОВ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ
ВАКУУМНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА**

01.04.04. – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ТОМСК – 2005

Работа выполнена в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники и в Институте сильноточной электроники СО РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Окс Ефим Михайлович
(ТУСУР, г.Томск)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Усов Юрий Петрович
(ТПУ, г.Томск)

кандидат технических наук,
доцент
Аксенов Александр Иванович
(ТУСУР, г.Томск)

Ведущая организация: ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики
им. А.И. Алиханова,
г. Москва.

Защита состоится 5 октября 2005 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: г.Томск, пр.Ленина 40, ауд. 230.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа

Автореферат разослан 1 сентября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



Акулиничев Ю П

2006-4
12115

2169554

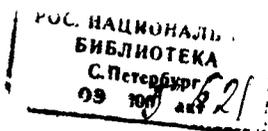
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования в области разработки источников ионов металлов на основе вакуумного дугового разряда с холодным катодом являются востребованными благодаря широкому применению этих устройств как в технологических процессах модификации поверхностных свойств материалов, так и для инъекции частиц в ускорители тяжелых ионов. Перспективные направления дальнейшего совершенствования источников ионов на основе вакуумной дуги связаны, прежде всего, с необходимостью увеличения времени их бесперебойного функционирования, повышения эффективности извлечения ионов из плазмы, а также получения пучков ионов металлов более высокой зарядностью. Решение данных проблем будет способствовать существенному совершенствованию источников ионов металлов на основе вакуумной дуги, отвечающих современным требованиям их использования.

Ресурс непрерывной работы ионного источника на основе вакуумной дуги в основном определяется возможностью стабильного зажигания разряда. Именно поэтому система инициирования вакуумного дугового разряда должна обеспечить его стабильное зажигание при предельно низком давлении остаточных газов и быть независимой от внешних параметров и условий горения разряда, в том числе и магнитного поля. Кроме этого она должна быть конструктивно простой, иметь малые габаритные размеры и обладать высокой энергетической эффективностью. Таким требованиям во многом отвечает система инициирования вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика. Оптимизация электрических параметров инициирующего разряда такой системы обеспечит существенное увеличение ресурса ионного источника в частотно-импульсном режиме функционирования, что является необходимым для дальнейшего развития технологии высокодозной ионной имплантации.

Существенным параметром, характеризующим эффективность источника ионов металлов, является отношение ионного тока, извлеченного из плазмы вакуумной дуги, к току разряда. Для того чтобы правильно оценить значение данной величины, необходимо произвести измерение полного ионного потока из катодной области вакуумного дугового разряда. Актуальным является вопрос разработки методики этого измерения, учитывающей физические особенности распространения плазмы в разрядном промежутке. Кроме определения эффективности вакуумного дугового источника, измерение доли извлекаемых ионов в полном токе разряда открывает возможность достаточно точной оценки коэффициентов удельной ионной эрозии материала катода в вакуумной дуге, что имеет, очевидно, важное значение для изучения физической природы катодного пятна.

Одним из приоритетных направлений дальнейшего совершенствования вакуумно-дуговых источников ионов является повышение средней зарядности



ионов в пучке. Привлекательность генерации многозарядных ионов связана с возможностью увеличения энергии ионов без соответствующего повышения ускоряющего напряжения. Наряду с ранее исследованными методами повышения зарядности ионов в плазме вакуумного дугового разряда (сильное магнитное поле, «скачок» тока, внешняя инжекция электронов) представляется перспективным повышение эффективности процесса ионизации в результате нагрева плазменных электронов мощным коротковолновым электромагнитным излучением в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР).

В соответствии с вышеизложенным, тематика диссертационной работы, направленная на модернизацию источников ионов металлов, отвечающих современным требованиям их применения представляется **актуальной**.

Основными задачами данной работы являются:

1. Повышение ресурса системы иницирования ионного источника на основе вакуумного дугового разряда путем оптимизации электрических параметров иницирующего разряда по поверхности диэлектрика.

2. Исследование максимальных эмиссионных параметров ионного источника и определение на основе результатов этих исследований коэффициента ионной эрозии для различных материалов катода вакуумного дугового разряда с целью оптимизации конструкции катодного узла ионного источника в зависимости от условий его применения.

3. Исследование условий генерации многозарядных ионов металлов в результате инжекции плазмы из разрядной ячейки вакуумно-дугового источника ионов в открытую магнитную ловушку и последующем нагреве плазменных электронов мощным электромагнитным излучением в условиях ЭЦР.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Показана возможность увеличения ресурса системы зажигания вакуумного дугового разряда для ионного источника в результате оптимизации электрических параметров вспомогательного иницирующего разряда по поверхности диэлектрика (тока и напряжения при заданной длительности).

2. Исследованы максимальные значения эффективности извлечения ионов из плазмы вакуумного дугового разряда для различных материалов катода. На основе этих исследований определены коэффициенты ионной эрозии в катодном пятне вакуумной дуги без влияния капельной фракции.

3. Показано, что инжекция плазмы из разрядной системы ионного источника на основе вакуумного дугового разряда в область электронного циклотронного резонанса приводит к увеличению среднего зарядового состояния ионов в 2 – 3,5 раза.

Научная и практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что:

1. Научные положения и выводы, сделанные на основании проведенных исследований вносят существенный вклад в понимание особенности генерации ионных пучков в источниках ионов на основе вакуумной дуги, а также

физических процессов в вакуумном дуговом разряде.

2. Результаты работы, направленные на увеличение ресурса системы инициирования вакуумного дугового разряда, а также на повышение эффективности извлечения ионов из плазмы вакуумной дуги были использованы для модернизации ионного источника Mevva-V. Они представляют интерес для применения в иных версиях вакуумно-дуговых ионных источников, а также в плазменных источниках электронов, ионно-плазменных напылительных системах и других устройствах, использующих данный тип разряда.

3. На основе исследований по увеличению зарядового состояния ионов методом инъекции плазмы вакуумного дугового разряда в область ЭЦР, проведенных совместно с Институтом прикладной физики РАН (гор. Нижний Новгород) создана уникальная экспериментальная установка для генерации пучков многозарядных ионов металлов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами численных оценок, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В ионном источнике на основе вакуумного дугового разряда оптимизация амплитуды и длительности импульса тока вспомогательного разряда по поверхности диэлектрика, иницирующего вакуумную дугу, при условии поддержания амплитуды напряжения зажигания этого разряда на уровне, достаточном для пробоя, предотвращает как металлизацию диэлектрической поверхности в течение импульса основного разряда, так и ее интенсивное разрушение, и, тем самым, обуславливает стабильное инициирование вакуумного дугового разряда с ресурсом более, чем 10^6 импульсов.

2. Электродная конфигурация разрядной системы вакуумного дугового источника ионов с сетчатым анодом и коллектором ионов, выполненными в виде полусфер, позволяет регистрировать полный ток ионного пучка, извлекаемый из плазмы, что одновременно с измерением зарядового состава ионного потока делает возможным определение коэффициентов удельной ионной эрозии в катодном пятне вакуумной дуги.

3. Значения полных ионных токов нормированных на величину тока разряда обратно пропорциональны энергии связи атомов материала катода. Создание внешнего магнитного поля приводит к увеличению извлекаемого из плазмы полного ионного тока лишь за счет появления в плазме ионов с более высоким зарядовым состоянием, при этом коэффициент удельной ионной

эрозии остается постоянной величиной, зависящей только от свойств материала катода.

4. Инжекция плазмы из разрядной ячейки вакуумно-дугового источника ионов в открытую магнитную ловушку и последующий нагрев плазменных электронов мощным электромагнитным излучением в условиях электронно-циклотронного резонанса позволяет увеличить среднюю зарядность ионов металлов в 2–3,5 раза.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 11-ой Международном конгрессе по физике плазмы (Австралия, Сидней, 2003); 7-ой Международной конференции «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы» (Томск, 2004); Международном совещании по применению вакуумной дуги для генерации плазмы, ионных и электронных пучков (Байкал, 2002);

Всероссийской конференции по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск, 2004), Всероссийской научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2003); IV школе-семинаре молодых ученых "Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития" (Томск, 2003); IX Всероссийской научной конференции молодых ученых, (Красноярск, 2003).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы: в 3 статьях и в 6 докладах Международных и Российских конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения с общим объемом 112 страниц, содержит 51 рисунок и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 123 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, основные цели, научная новизна и практическая ценность работы. Излагается краткое содержание диссертации, и формулируются выносимые на защиту научные положения.

В первой главе на основе анализа литературных данных проводится обзор современного состояния вопросов инициирования вакуумного дугового разряда, изучения эрозии катода при его горении, генерации пучков многозарядных ионов металлов в широкоапертурных источниках ионов. Формулируются основные тенденции дальнейшего развития и совершенствования ионных источников на основе вакуумного дугового разряда.

Показано, что возбуждение вакуумной дуги вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика в достаточной степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам инициирования основного разряда в ионных источниках, а определение оптимальных электрических параметров инициирующего разряда (тока и напряжения) позволит обеспечить высокий

ресурс источника ионов металлов на основе вакуумного дугового разряда.

Важными характеристиками ионного источника являются максимальная эффективность генерации ионов в разряде, определяемая соотношением максимального ионного тока извлеченного из плазмы к току вакуумного дугового разряда α_i или, связанная с α_i , удельная ионная эрозия γ_i - масса материала, унесенная с катода в виде ионов, к перенесенному в разряде электрическому заряду. Рассмотрен ряд работ, связанных с оценками и экспериментальными измерениями α_i и γ_i для различных катодных материалов. Делается вывод, что разброс результатов экспериментов по измерению эрозии в рассмотренных работах, обусловлены, в основном, влиянием микрокапельной фракции, неизменно присутствовавшей среди продуктов катодной эрозии, а в случае определения γ_i , в том числе и неопределенностью зарядности ионов плазмы. Отмечается, что для измерения указанных величин необходима специальная методика измерения, учитывающая как особенности распространения плазмы вакуумной дуги в разрядном промежутке, так и зарядность ионов.

Проведен анализ методов увеличения зарядностей ионов металлов вакуумно-дуговых ионных источников. Показано что способы, основанные на воздействии сильного магнитного поля или электронного пучка на плазму вакуумного дугового разряда, позволяют значительно повысить зарядность ионов, но имеют ограничения по максимальной зарядности. В то же время, известен способ генерации многозарядных ионов газообразных веществ, с зарядовым состоянием более $10+$, в магнитной ловушке, при дополнительном нагреве плазменных электронов электромагнитным излучением в условиях ЭЦР. Формулируется вывод о перспективности проведения исследований связанных с инжекцией на плазмы вакуумного дугового разряда в открытую магнитную ловушку с целью повышения зарядности ионов плазмы за счет дополнительного нагрева электронов мощным коротковолновым излучением в условиях ЭЦР.

В заключение главы формулируются задачи исследований.

Во второй главе представлены результаты исследований, направленных на оптимизацию электрических параметров разряда по поверхности диэлектрика, инициирующего вакуумную дугу, с целью обеспечения максимального времени непрерывного функционирования разрядной системы в частотно-импульсном режиме. В этом же разделе диссертационной работы приводятся результаты экспериментов, посвященных измерению полного тока ионного пучка, извлекаемого из плазмы вакуумного дугового разряда, для ряда катодных материалов. Исследования выполнялись с использованием оригинальной разрядной системы (рис. 1), состоящей из цилиндрического катода 2, расположенного в центре полусферического сетчатого анода 1 и коллектора 4. В ряде экспериментов в прикатодной области создавалось магнитное поле при помощи короткого соленоида 5.

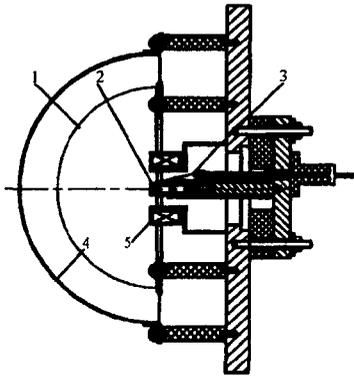


Рис.1.

Возбуждающий вакуумную дугу разряд зажигался между катодом 2 и инициирующим электродом 3 по поверхности разделяющей их керамической втулки.

При обеспечении экспериментально определенной амплитуды напряжения инициирующего разряда на уровне 2 кВ, достаточной для возбуждения вакуумной дуги, осуществлялось варьирование амплитуды тока этого же разряда. В экспериментах использовался алюминиевый катод, поскольку данный материал обеспечивает наиболее низкий ресурс катодного узла из-за высокой доли капельной фракции, генерируемой в катодных пятнах, что является причиной интенсивной металлизации рабочей поверхности изолятора. Зависимости максимального заряда, перенесенного в разряде от амплитуды тока инициирующего разряда имеют немонотонный характер с четко выраженным максимумом, существование которого обусловлено влиянием двух противоположных факторов, зависящих от величины тока инициирующего разряда: образования проводящей пленки на поверхности керамики за время действия импульса вакуумной дуги и разрушения керамики при переносе заряда импульсом инициирующего разряда. Выбор тока вспомогательного разряда соответствующего максимуму обуславливает стабильное инициирование вакуумной дуги с ресурсом более чем 10^6 импульсов.

На основании полученных результатов исследований формулируется вывод о возможности применения методики определения условий соответствующих максимальному ресурсу системы инициирования для других разрядных систем, использующих вспомогательный разряд по поверхности диэлектрика для возбуждения вакуумной дуги.

Результаты измерений полного ионного тока из плазмы вакуумной дуги и сделанные на их основе оценки коэффициентов ионной эрозии также представлены во второй главе. В качестве модельных материалов для исследования были выбраны 14 металлов с различными физическими и поверхностными свойствами: Mg, Al, Ti, Co, Cu, Y, Mo, Cd, Sm, Ta, W, Pt, Pb, Bi, а также графит. Определение α , производилось методом регистрации полного потока ионов из разрядной плазмы для указанных материалов катодов с использованием разрядной системы, представленной на рис. 1. Корректность выбранной методики измерения α , косвенно подтверждалась линейным характером эмиссионных зависимостей. Определение значений нормированного ионного тока α , при измеренном зарядовом составе

дало возможность определить коэффициенты удельной ионной эрозии γ , с помощью выражения:

$$\gamma_i = \left(\frac{I_i}{\eta \cdot I_d} \right) \frac{M_i}{e \cdot \langle Q \rangle}, \quad (1)$$

где I_i – ионный ток, I_{arc} – ток разряда, η – коэффициент прозрачности анодной сетки, M_i – масса иона, e – элементарный заряд, $\langle Q \rangle$ – средняя зарядность ионов, а выражение в скобках численно равно α_i . Полученные значения α_i и γ_i в сравнении с результатами других работ представлены в Табл. 1.

Табл. 1.

Катод	Эксперимент		C.Kimblin ¹	Г А Месяц ²	J Daalder ³
	$\alpha_i, \%$	$\gamma_i, 10^{-9}$, кг/Кл	$\alpha_i, \%$	$\gamma_i, 10^{-9}$ кг/Кл	$\gamma_i, 10^{-9}$ кг/Кл
C	19	23,8	10	16-17	...
Mg	12,7	18,8	...	25	15
Al	11,2	15,9	...	25	15
Ti	9,7	22,4	8	...	...
Co	9,6	30,4	8	..	..
Cu	11,4	33,4	...	35-40	...
Y	5,5	21	...	...	...
Mo	3,8	11,6	...	47	...
Cd	12	94,6	8	130	79,1
Sm	6,5	46,1	...	...	...
Ta	5,3	31,2	...	...	59
W	5	27,1	7	62	57
Pt	5,6	50,6	...	...	...
Pb	14,3	172,8	...	...	120,8
Bi	10,2	171,5	...	..	168

При сопоставлении полученных максимальных ионных токов α_i , нормированных на ток вакуумной дуги со значениями энергии связи атомов с веществом E_{ce} (рис. 2), было установлено, что значения α_i обратно пропорциональны энергии связи атомов материала катода.

¹ C W Kimblin Erosion and ionization in the cathode spot region of vacuum arcs J Appl Phys, V 44, 1973, p 3074 – 3081

² 6 Месяц Г А Эктоны в вакуумном дуговом разряде пробой, искра, дуга – М Наука, 2000 – 424 с

³ J E Daalder Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs J Phys D Appl Phys, V 8, 1975, p 1647 – 1659

Создание внешнего магнитного поля в катодной области вакуумного дугового разряда приводило к увеличению значений ионного тока, извлекаемого из разрядной плазмы, лишь за счет повышения зарядности ионов, в то время как величина удельной ионной эрозии оставалась неизменной.

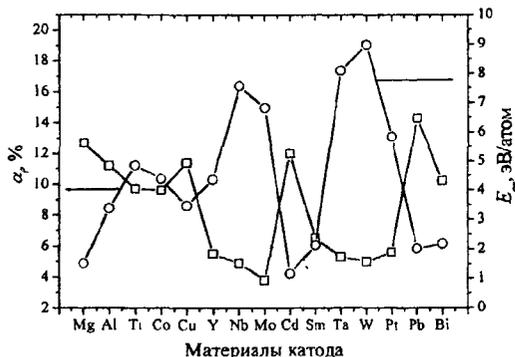


Рис. 2

созданию магнитного поля в катодной области разряда и степени повышения зарядности ионов ($\langle Q \rangle_{им} / \langle Q \rangle_{i0}$), измеренной при тех же условиях (Табл. 2).

Третья глава посвящена изучению вопросов генерации пучков многозарядных ионов металлов при инжекции плазмы вакуумной дуги в открытую магнитную ловушку с дополнительной накачкой излучением микроволнового диапазона в условиях ЭЦР.

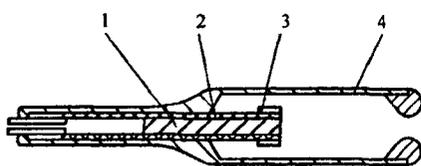


Рис. 3.

Для инжекции плазмы в систему ЭЦР использовался миниатюрный вакуумно-дуговой генератор плазмы (рис. 3). С целью исключения влияния микроволнового излучения на катодную область вакуумного дугового разряда катод 1 с «поджигающим» электродом 3 располагались внутри полого анода 4, выходной апертурой которого являлось отверстие диаметром 4 мм. Несмотря на относительно малую апертуру, наличие сильного магнитного поля величиной более 1 Тл увеличивало эффективность заполнения ловушки плазмой. Согласование волнового тракта ловушки осуществлялось посредством размещения генератора плазмы внутри конического экрана. Исследование влияния ЭЦР нагрева на дополнительную ионизацию плазмы

Об этом свидетельствует примерное равенство кратности увеличения ионного тока ($\alpha_{им} / \alpha_{i0}$) при отсутствии и при

Табл. 2.

Катод	$\frac{\alpha_{им}}{\alpha_{i0}}$	$\frac{\langle Q \rangle_{им}}{\langle Q \rangle_{i0}}$
C	2,05	1,8
Al	1,4	1,3
Cu	1,66	1,5
Pt	1,66	1,7

вакуумной дуги проводились в рамках совместных экспериментов на стенде Института прикладной физики РАН (гор. Нижний Новгород),

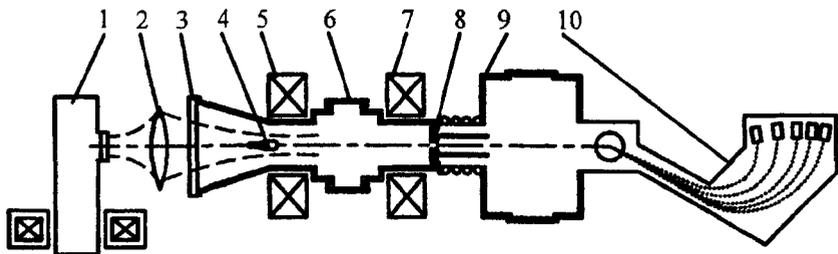


Рис. 4.

оборудованном гиротроном 1 со следующими параметрами: частота – 37,5 ГГц, мощность излучения - до 100 кВт, длительность импульса - 1,5 мс. Зеркальная магнитная ловушка длиной 27 см с пробочным отношением 5 создавалась двумя соленоидами 5 и 7, при этом амплитудное значение магнитного поля, за время импульса 20 мс, достигало 3 Тл. Камера ловушки 6 с размещенным на оси генератором плазмы 4, анод которого находился под тем же потенциалом, была оснащена, с одной стороны, фторопластовым окном 3 для ввода электромагнитного излучения вдоль силовых линий магнитного поля, с другой – магнитостатическим спектрометром 10. Конструктивные элементы камеры ловушки обеспечивали эффективную фокусировку излучения в области, расположенной непосредственно за анодной апертурой разрядной системы. Таким образом, в условиях ЭЦР осуществлялся нагрев плазменных электронов, что, в свою очередь, приводило к дополнительной ионизации ионов электронным ударом. Сформированный ионный пучок поступал на вход пятиканального магнитостатического спектрометра. В качестве исследуемых материалов были выбраны тяжелые металлы с атомной массой более 70, а именно: платина и свинец, поскольку именно металлы с таким диапазоном атомных масс наиболее перспективны для инжекции ионов в ускорители высоких энергий.

Показано, что при возбуждении ЭЦР в плазме вакуумной дуги внутри магнитной ловушки наблюдается процесс дополнительной ионизации

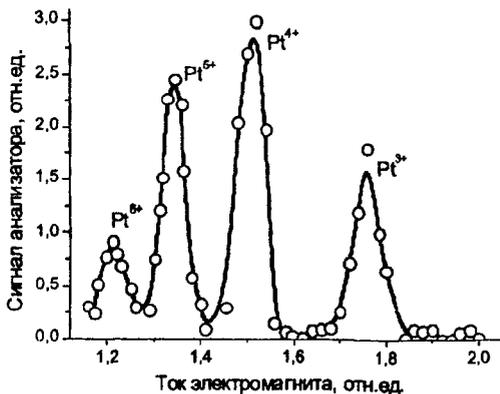


Рис. 5

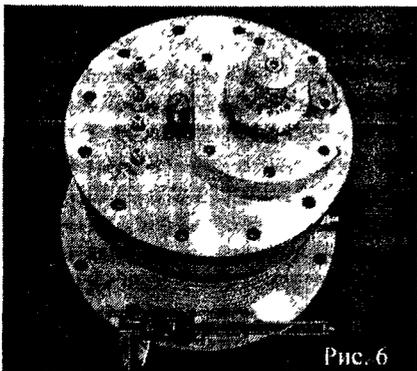
для всех исследуемых материалов катода. Так, например, максимальная средняя зарядность, равная 4,3 для ионов платины, была получена при токе вакуумной дуги 80 А, магнитном поле в пробках ловушки 2,6 Тл и вводимой СВЧ мощности на уровне 60 кВт (рис 5).

Эксперименты, проведенные с другими материалами катода, также показали значительное увеличение зарядности ионов при нагреве электронов плазмы в условиях ЭЦР. Так, средняя зарядность ионов железа была повышена в 2,1 раз, свинца в 3,7 раза. Кроме этого, анализ масс-зарядовых спектров показал, что в плазме присутствует значительное (до 50 %) количество ионов примесей. Главным образом, это ионы веществ Fe, Ni, Cr - составляющих нержавеющей стали, из которой была выполнена ловушка, и ионы газов (H, O, N). Отмечается, что получение плазмы вакуумной дуги в системе ЭЦР свободной от примесей позволит обеспечить дальнейший рост зарядности ионов, и будет являться следующим этапом совершенствования источника ионов подобного типа. Вместе с тем, делается вывод, что даже со значительной долей ионов примесей в плазме ионный источник может быть применен в качестве инжектора ускорителя, поскольку на входе в ускорители высоких энергий всегда имеется магнитный сепаратор, выделяющий ионы только требуемого типа. Плотность тока ионного пучка, который можно извлечь из многозарядной плазмы источника, полученной в данных исследованиях, превышает величину 30 мА/см^2 , что в совокупности с достигнутой кратностью ионизации для ионов тугоплавких металлов, является рекордной величиной.

Четвертая глава посвящена ионным источникам и их применению для модификации поверхностных свойств материалов разработанным на основе проведенных исследований

Представлена конструкция модифицированного источника ионов металлов на основе вакуумного дугового разряда Mevva – 5.RU. Величина тока ваку-

умного дугового разряда регулируется в диапазоне от 30 до 300 А при длительности импульса 200 – 400 мкс и частоте повторения импульсов до 10 Гц. Полный ионный ток, извлекаемый из источника, достигает 0,5 А при ускоряющем напряжении до 50 кВ. При этом площадь поперечного сечения ионного пучка на выходе из системы извлечения составляет 100 см^2 , а распределение плотности ионного тока по сечению пучка, при котором снижение плотности тока на 50 % от



максимального лежит в круге диаметром 14 см, на 30 % - внутри диаметра 10 см, является характерным для вакуумно-дуговых ионных источников. Фотография внешнего вида ионного источника представлена на рис. 6. Модернизация ионного источника заключалась, прежде всего, в выборе оптимального напряжения и тока инициирующего разряда по результатам экспериментов, представленных во второй главе, что обеспечило значительное увеличение ресурса катодного узла. Для устранения известного недостатка многоапертурных систем извлечения, связанного с необходимостью согласования ионно-эмиссионных параметров плазмы и параметров системы извлечения при каждом случае их изменения, эмиссионный электрод, расположенный со стороны торца полого анода, был перекрыт дополнительной мелкоструктурной сеткой с высокой геометрической прозрачностью. Роль этого дополнительного элемента заключалась в стабилизации плазменной границы вблизи эмиссионного электрода в оптимальной плоскости и сохранении неизменности положения границы плазмы в широком диапазоне изменения плотности плазмы и величины ускоряющего напряжения. Известным недостатком прототипа ионного источника являлось то, что большой размер катододержателя существенно увеличивал возможность зажигания на нем катодных пятен и, вследствие этого, «загрязнения» ионного пучка продуктами эрозии материала этого электрода. Указанный недостаток был устранен тем, что поверхность многокатодного узла была закрыта экраном из тантала - материала с максимальным пороговым током зажигания катодного пятна. Другое конструктивное отличие электродной системы ионного источника состояло в том, что с целью более легкой очистки поверхности полого анода от паров материала катода и микрокапель он был выполнен разборным.

Исследования по модернизации катодного узла, представленные в предыдущих разделах диссертационной работы, послужили основой для разработки разрядной системы ионного источника, оснащенного магнитным плазменным фильтром, функционирующего в импульсном режиме и осуществляющего поворот плазменного потока на 90 градусов. Таким образом, реализуется режим очистки плазменного потока от электрически нейтральных микрокапель, присутствие которых зачастую ограничивает область применения технологии вакуумно-дугового осаждения покрытий и ионной имплантации. Коэффициент прохождения ионного потока, оцениваемый как отношение токов ионов на входе и выходе фильтра, составлял типичную для данных устройств величину 4-8 %. В разработанном устройстве можно было получать ионные пучки с током уровня 100 мА при ускоряющем напряжении до 7 кВ, или использовать его без ускоряющего напряжения в качестве генератора плазмы.

Вакуумно-дуговой генератор с магнитным плазменным фильтром применялся для нанесения тонкопленочных покрытий на основе композиционных сплавов для решения ряда задач в области физики

полупроводников. Источник ионов металлов Mevva – 5.RU использовался для модифицирования поверхностной проводимости изоляционных материалов для применения в ускорительной технике. При помощи ионного источника осуществлялась имплантация ионов металла до достижения экспозиционной дозы порядка 10^{18} ион/см² с целью повышения поверхностной проводимости изделий из алундовой керамики.

В заключении изложены основные результаты работы, обоснована достоверность результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлены оптимальные с точки зрения достижения максимального ресурса ионного источника параметры инициирующего разряда по поверхности диэлектрика: амплитуды напряжения и тока. При этом ресурс системы инициирования вакуумной дуги превышает 10^6 импульсов. Методика определения оптимальных параметров инициирующего разряда может быть применена и для других конструкций, или даже устройств, использующих для зажигания импульсного вакуумного дугового разряда вспомогательный разряд такого типа.

2. На основании измерения полного ионного тока из плазмы вакуумного дугового разряда определены значения нормированных на величину тока дуги ионных токов и коэффициентов удельной ионной эрозии для ряда материалов катодов. Показано, что существует обратная зависимость между нормированным ионным током и энергией связи атомов материала катода. Создание внешнего магнитного поля в прикатодной области вакуумного дугового разряда приводит к увеличению извлекаемого из плазмы полного ионного тока лишь за счет появления в разрядной плазме ионов с более высокими зарядовыми состояниями, при этом удельная ионная эрозия катода остается постоянной величиной.

3. Для инжекции плазмы тугоплавких металлов в открытую зеркальную магнитную ловушку с последующим нагревом плазменных электронов в условиях ЭЦР создан миниатюрный вакуумно-дуговой плазменный генератор оригинальной конструкции, обеспечивающий концентрацию плазмы в области СВЧ нагрева вплоть до 10^{13} см⁻³. Определены оптимальные значения тока разряда генератора плазмы, индукции магнитного поля, а также мощности СВЧ излучения, вводимого в ловушку, для повышения зарядности ионов при инжекции плазмы вакуумной дуги в систему ЭЦР. Достигнутое в эксперименте значение параметра удержания плазмы в ловушке $3 \cdot 10^8$ см³ обеспечило увеличение среднего зарядового состояния ионов в 2 - 3,5 раза, при поддержании плотности тока ионного пучка на уровне десятков миллиампер на квадратный миллиметр.

4. Создан усовершенствованный вакуумно-дугового ионный источник Mevva – V.RU характеризующийся, по сравнению с прототипом, пони-

женным уровнем загрязнения ионного пучка при сохранении высокой однородности плотности тока ионного пучка, улучшенными ионно-оптическими свойствами системы формирования ионного пучка, простотой конструкции, надежностью и высоким ресурсом системы инициирования разряда.

5. Разработана оригинальная конструкция разрядной системы вакуумного дугового ионного источника с магнитным фильтром микрокапельной фракции с параметрами: амплитуда импульса тока дугового разряда - до 250 А, длительность – 1 мс, частота повторения импульсов - до 10 Гц, ток ионного пучка при ускоряющем напряжении 7 кВ – 100 мА.

6. Применение созданных устройств продемонстрировано на примерах создания подложек, покрытых пленками специального состава, для полупроводниковой промышленности и модификации поверхностного сопротивления керамических изоляторов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Водопьянов А.В., Голубев С.В., Мансфельд Д.А., Николаев А.Г., Окс Е.М., Разин С.В., Савкин К.П., Юшков Г.Ю. Генерация многозарядных ионов тугоплавких металлов в электронно-циклотронном резонансном разряде в прямой магнитной ловушке. // ЖТФ – 2005 –Т.75, вып.9 – с.101 – 105.

2. Савкин К.П. Измерение удельной ионной эрозии для ряда материалов в вакуумном дуговом разряде // Изв. вузов. Физика, Т.48, №6, 2005.

3. Bugaev A.S., Gushenets V.I., Nikolaev A.G., Oks E.M., Savkin K.P., Schanin P.M., Yushkov G.Yu., Brown I.G. Producing of Gas and Metal Ion Beams with Vacuum Arc Ion Sources // Emerging Applications of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams / E. Oks, I. Brown, Eds. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 2002, pp. 79-90.

4. Николаев А.Г., Окс Е.М., Савкин К.П., Юшков Г.Ю., Браун Я., Мак-Гилл Р. Вакуумно-дуговой источник ионов металлов. Патент РФ. Заявка №2005110641/22(012435). Положительное решение от 15 июня 2005 г.

5. К.П. Савкин, А.Г. Николаев. Оптимизация параметров иницирующего разряда в вакуумно-дуговом ионном источнике. / Материалы Всероссийской практической конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2004, 28-30 июня 2004г. Петрозаводск, 2004. С. 230-234.

6. Савкин К.П. Николаев А.Г., Ионно-плазменные устройства на основе вакуумного дугового разряда и их применение. / Сборник тезисов IV школы-семинара молодых ученых "Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития", 5-7 февраля 2003, Томск. С. 110-112.

7. К.П. Савкин, А.Г. Николаев. Генерация ионов металлов и плазменных потоков в устройствах на основе вакуумного дугового разряда. / Сборник тезисов IX Всероссийской Научной Конференции Студентов-Физиков и моло-

дых ученых, 28 марта-3 апреля 2003 г. Екатеринбург-Красноярск, 2003. С.478-480.

8. К.П. Савкин, В.И. Гушенец, А.Г. Николаев, Е.М. Окс, Г.Ю. Юшков. Генератор плазмы на основе вакуумного дугового разряда с магнитным фильтром. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», 21-23 Октября 2003г. Издательство ИОА СО РАН, Томск, 2003. С. 253-254.

9. Bugaev A. S., Gushenets V. I., Nikolaev A. G., Oks E. M., Savkin K. P., and Yushkov G. Yu. Development and Application of Vacuum Arc Ion Source at HCEI // AIP Conference Proc., v. 669 (1), ICOPP 2002, Australia Sydney, 2003, pp. 377-380.

10. K.P. Savkin, A.G. Nikolaev, E.M. Oks. Lifetime of Vacuum Arc Triggering System Based on Surface Discharge. / 7-th International Conference Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings. Tomsk: Published house of the IOA SB RAS, 2004. P. 67-69.

РНБ Русский фонд

2006-4

12115

Тираж 100. Заказ 788.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40