

- РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи



Шандриков Максим Валентинович

**ГЕНЕРАТОРЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ
РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ
ИЗ ДУГОВОГО КОНТРАГИРОВАННОГО РАЗРЯДА**

05.27.02 - вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

ТОМСК - 2004

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской Академии Наук, г.Томск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Окс Е.М.
(ИСЭ СО РАН, г.Томск)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Щанин П.М.
(ИСЭ СО РАН, г.Томск)

кандидат технических наук, доцент
Бурдовицин В.А.
(Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники)

Ведущая организация: Институт электрофизики УрО РАН,
г.Екатеринбург

Защита состоится "___" _____ 2005 г. в "___" часов

на заседании диссертационного совета Д.003.41.01 в Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г.Томск, пр.Академический 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН.

Автореферат разослан "17" сентября 2004г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических
наук, профессор



Проскуровский Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы связана с возрастающей потребностью в технологических установках, использующих объемные плазменные образования и ионные потоки для модификации материалов. Развитие ионно-плазменных технологий требует непрерывного создания принципиально новых и совершенствования известных устройств с более высокими параметрами, улучшенными характеристиками и широкими функциональными возможностями. Разрядные системы с внешней инжекцией электронов из тлеющего разряда, благодаря ряду принципиальных преимуществ, в частности низким значениям рабочего давления и напряжения горения для основного разряда, являются перспективным направлением развития ионно-плазменных технологических устройств. Для дальнейшего увеличения плотности генерируемой плазмы необходимо, прежде всего, увеличение тока инжектируемых электронов. В то же время, максимальная величина тока тлеющего разряда в непрерывном режиме ограничена на уровне единиц ампер возникновением нестабильностей и переходом в дуговой режим. Для достижения больших значений тока тлеющего разряда необходимо использование специальных мер, таких как секционирование и кондиционирование поверхности катода, применение системы питания разряда с дугогашением. Указанные меры несколько улучшают ситуацию, но они не являются решением проблемы.

В то же время, использование в качестве эмиттера электронов дугового контрагированного разряда представляется целесообразным, поскольку это позволит повысить значения тока инжектируемых электронов по крайней мере на порядок величины, а в сочетании с существенно меньшим напряжением горения, обеспечить более высокую энергетическую эффективность устройства в целом. Экранирование катодной области дугового контрагированного разряда малым отверстием в промежуточном контрагирующем электроде необходимо для повышения стабильности его параметров в условиях хаотического перемещения катодных пятен. Кроме того, это позволит снизить «загрязнение» плазмы продуктами эрозии материала электрода в катодном пятне. Возможность генерации плотной плазмы в основном разряде при меньшем напряжении горения позволит значительно снизить «загрязнение» газовой плазмы в результате ионного распыления электродов.

Таким образом, тематика диссертационной работы, направленная на исследование газоразрядной системы на основе разряда с внешней инжекцией электронов, в которой в качестве эмиттера используется дуговой контрагированный разряд, представляется актуальной, поскольку решение данной проблемы обусловит дальнейшее развитие техники генерации ионных пучков и плазменных потоков.

Целью настоящей **работы** являются:

1. Реализация разрядной системы с внешней инжекцией электронов, в которой для генерации инжектируемых электронов используется дуговой контрагированный разряд.

2. Исследование в данной разрядной системе условий генерации однородной газовой плазмы в больших объемах (до 1 м^3) и формирование в непрерывном режиме интенсивных (несколько ампер) ионных потоков сверхнизкой (менее 20 эВ) энергии.

3. Создание на основе проведенных исследований генераторов газоразрядной плазмы и источников ионных потоков, обладающих более высокими параметрами и улучшенными эксплуатационными характеристиками, такими, как энергетическая эффективность, ресурс, ионный ток и его плотность, чистота генерируемой плазмы.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Реализована и детально исследована двухступенчатая разрядная система для генераторов объемной плазмы с инжекцией электронов из плазмы дугового контрагированного разряда низкого давления.

2. Предложена, реализована и детально исследована двухкомпонентная структура полого катода дугового контрагированного разряда без внешнего магнитного поля, обеспечивающая высокий ресурс эмиттерного узла генераторов плазмы.

3. Для предложенной разрядной системы исследованы условия генерации однородной газовой плазмы в больших объемах (до 1 м^3).

4. Определены условия генерации в разрядной системе с инжекцией электронов в аксиально-симметричном неоднородном магнитном поле интенсивных ионных потоков низкой энергии.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием различных экспериментальных методик, сопоставлением экспериментальных результатов и численных оценок, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании генераторов плазмы.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основании проведенных исследований созданы генераторы объемной газоразрядной плазмы ("SPACE-1", "SPACE-2") и источник интенсивных низкоэнергетичных ионных потоков "SPACE-3", отличающиеся большей достигнутой плотностью плазмы, более высокой эффективностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками. Разработанные генераторы поставлены по контрактам Института в научно-производственные компании США. Кроме того, результаты работы могут быть использованы в ряде других устройств, использующих аналогичные или близкие по принципу действия разрядные структуры.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на 6^й и 7^й Конференциях по модификации свойств конструкционных материалов пучками частиц и плазменными потоками (Томск, Россия, 2002, 2004 гг.), на 1^й Международном конгрессе по физике плазмы (Сидней, Австралия, 2002), на 9^{ой} Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Красноярск, 2003), на 4^й Евро-Азиатской международной конференции по плазменной обработке поверхностей (Корея, 2003), на 16^{ой} Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2003), на Всероссийской научной конференции по физике низкотемпературной плазмы (Петрозаводск, 2004), на научной сессии МИФИ (Москва, 2003).

Публикации. По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 12 работ.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В двухкаскадной разрядной системе генератора однородной объемной плазмы на основе разряда с внешней инжекцией электронов, использование в первом каскаде (инжекторе электронов) вместо тлеющего разряда контрагированной дуги с холодным катодом не оказывает влияния на однородность распределения параметров генерируемой плазмы, но приводит, в результате увеличения тока инжектируемых электронов и снижения напряжения горения, к повышению эффективности ее генерации приблизительно на порядок величины, увеличению концентрации плазмы и снижению уровня загрязнения плазмы продуктами распыления материала электродов.

2. В двухкаскадной разрядной системе с инжекцией электронов из дугового контрагированного разряда с полым катодом, в который помещен элемент рабочего материала с более низким пороговым током дуги, предотвращается эрозия стенок полого катода, осуществляется многократное и полное использование рабочего материала, что, в сочетании с возможностью восполнения рабочего материала и отсутствием внешнего магнитного поля, многократно повышает ресурс работы устройства.

3. В генераторе плазмы на основе разряда с внешней инжекцией электронов установившееся распределение потенциала плазмы обеспечивает преимущественную транспортировку ионов вдоль оси системы по направлению к коллектору. Создание в такой разрядной системе аксиально-симметричного неоднородного магнитного поля, достаточного лишь для замагничивания электронного компонента плазмы, не оказывает влияния на движение ионов в осевом направлении, но приводит к образованию потенциальной ямы в радиальном распределении потенциала плазмы, снижающей потери ионов на стенках камеры.

4. На основе разрядной системы с инжекцией электронов из плазмы дугового контрагированного разряда создан ряд устройств, обеспечивающих генерацию однородной плазмы в объеме порядка 1 м^3 с концентрацией

до $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Сочетание разрядной системы такого типа с внешним аксиально-симметричным неоднородным магнитным полем позволяет получать направленные потоки низкоэнергетичных ионов с током в непрерывном режиме до 4,5 А и энергетическим разбросом не более 10 эВ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения; общий объем диссертации: 144 страницы, иллюстрирована 51 рисунком и 4 таблицами; список цитируемой литературы включает 132 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу известных из литературы данных о физических процессах генерации объемной газовой плазмы в разрядах низкого давления, а также извлечения и транспортировки интенсивных низкоэнергетичных (<100 эВ) ионных пучков на основе разрядов такого типа. Требования к столь низкой энергии ионов обусловлены стремлением избежать загрязнения генерируемой плазмы в результате нежелательного ионного распыления элементов разрядной системы, например в полупроводниковых технологиях. Показано, что в системах без нейтрализации пространственного заряда максимальный ток пучка ограничен на уровне единиц мА. Для нейтрализации пространственного заряда пучка ионов с требуемыми параметрами (ток - единицы ампер, энергия ионов - десятки эВ) необходимо обеспечение чрезвычайно низкой температуры электронов¹². Обоснована целесообразность реализации отбора ионов из окружающей мишень плотной объемной плазмы при контроле ее потенциала и ускорении их в слое между плазмой и мишенью. Рассмотрены разрядные системы, наиболее подходящие для получения плотной газовой плазмы. Особое внимание уделено разрядным системам с внешней инжекцией электронов, позволяющим функционировать при относительно низких рабочем давлении и напряжении горения разряда. Показано, что наилучшими параметрами обладают системы, в которых в основной разряд осуществляется инжекция электронов с энергией, равной катодному падению основного разряда. В то же время, в существующих системах ток разряда в непрерывном режиме ограничен единицами ампер. В заключении главы сформулированы основные задачи исследований.

Zharinov A./ Lett. Sov. J. Experimental and Tech. Phys., 1978, V.17, p.508.

² Popov Yu./ Lett. Sov. J. Experimental and Tech. Phys., 1966, V. 4, p. 1352.

Вторая глава посвящена методике и технике эксперимента. Представлена конструкция экспериментального макета разрядной системы, электродная схема (рис. 1) и особенности работы такой системы. Устройство функционирует в непрерывном режиме и представляет собой двухступенчатую систему. Первая ступень — вспомогательный разряд (эмиттер электронов), вторая ступень - основной разряд. Вспомогательный (эмиттерный) разряд с катодным пятном функционирует между полым катодом 1 с малой выходной апертурой и вольфрамовым сеточным анодом. Разряд контрагируется промежуточным электродом 3, находящимся под плавающим потенциалом, также как и экран 2 полового катода. Выходное отверстие катода 1 смещено относительно отверстия в электроде 3. Сеточный анод эмиттера одновременно является катодом 4 основного разряда. В такой системе в область основного разряда обеспечивается инжекция порядка 75% тока эмиттерного разряда³. Объемная плазма в вакуумной камере 9 образуется в результате ионизации рабочего газа инжектированными электронами, ускоренными дополнительно в катодном слое основного разряда. Анодом основного разряда служит электрод 8.

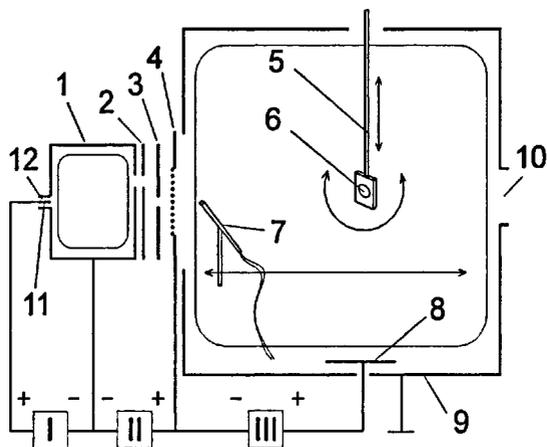


Рис.1 Схема разрядной системы: 1 - катод эмиттерного разряда; 2 - экран катода; 3 - промежуточный контрагирующий электрод; 4 - катод основного (анод эмиттерного) разряда; 5 - подвижный держатель зондов; 6 - плоский ленгмюровский зонд с охранным кольцом; 7 - подвижный термоэмиссионный зонд; 8 - анод основного разряда; 9 - вакуумная камера; 10 - откачка; 11 - поджигающий электрод; 12 - напуск газа.

Визирь А.В., Оке Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников.// ЖТФ, 1997, Т.67, В.6, с. 27.

Вся система питания разрядов изолирована от земли. При этом потенциал плазмы основного разряда относительно стенок заземленной вакуумной камеры составляет $10 \div 25$ В в зависимости от давления. В ряде экспериментов в качестве анода основного разряда служили стенки вакуумной камеры. Рабочий газ подается в полость катода 1. Возникающий при протекании газа перепад давления обеспечивает, с одной стороны, низкое рабочее давление в области генерации плазмы, с другой - стабильное зажигание и горение эмиттерного разряда. Инициирование эмиттерного разряда осуществляется сильным газовым разрядом при подаче высоковольтного импульса (5 кВ, 30 мкс) между поджигающим электродом 11 и полым катодом 1.

Рассмотрена методика измерения параметров объемной плазмы зондовыми методами, а именно с использованием плоского лэнгмюровского, двойного, термоэмиссионного зондов. Также рассмотрена методика и основные особенности проведения измерений с использованием 127° электростатического энергоанализатора типа цилиндрического дефлектора (анализатора Юза-Рожанского). Проведена калибровка такого анализатора на электронах с термоэмиттера и оценено уширение, вносимое анализатором в измеряемый спектр.

Приведены результаты, позволяющие многократно увеличить ресурс работы катода дугового разряда. Для этого в полом катоде, выполненном из материала с относительно высоким пороговым током дуги, например из меди, размещался небольшой элемент рабочего материала с относительно низким значением порогового тока, например магния. Функционирование катодного пятна преимущественно на поверхности материала с более низким пороговым током, обеспечивает равномерное распределение магния по поверхности медного катода. При выработке магния до медной основы катодное пятно переходит на соседний участок, а полая форма катода способствует запылению выработанного участка новой магниевой пленкой. Ресурсные испытания такого эмиттера показали, что при достаточном количестве магния медный корпус катода не подвергается значительной эрозии. Такой подход не требует управления движением катодного пятна, например, с помощью магнитного поля. Хаотический характер перемещения катодного пятна по поверхности полого катода способствует использованию всей рабочей поверхности. В этом случае осуществляется 100% использование рабочего материала (магния), а возможность его восполнения не требует замены медного корпуса катода в течение длительного времени.

В третьей главе представлены результаты исследования процесса генерации объемной плазмы в разрядной системе с инжекцией электронов из плазмы дугового контрагированного разряда.

Измерены основные параметры плазмы, такие как концентрация и потенциал плазмы, температура электронов, и факторы, влияющие на эти параметры. В большинстве экспериментов в качестве рабочего газа использовался аргон.

Напряжение горения эмиттерного разряда достаточно слабо меняется в диапазоне тока разряда от 4 до 20 А и, в зависимости от давления в катодной полости, составляет от 25 до 45 В. Показано, что в системе такого типа существует оптимальное значение напряжения основного разряда, определяющее энергию инжектированных электронов, выше которого энергетическая эффективность устройства в целом снижается. Насыщение на ВАХ основного разряда (рис.2, кривая 1) связано с тем, что при достаточно низком давлении, с ростом энергии электронов, начинают сказываться потери вкладываемой энергии за счет ухода энергетичных электронов на анод и стенки камеры. Положение точки насыщения определяется, в первую очередь, концентрацией нейтралов в объеме и длиной рабочей камеры, и в эксперименте составляло от 40 до 100 В. Минимальная цена иона в плазме основного разряда в такой системе составляет 150-200 эВ/ион (рис.2, кривая 2). Увеличение тока инжектируемых электронов позволяет снизить напряжение основного разряда для получения требуемой концентрации плазмы, что, в совокупности с низким потенциалом плазмы относительно стенок вакуумной камеры, обеспечивает условия, в которых «загрязнение» генерируемой плазмы в результате ионного распыления минимально.

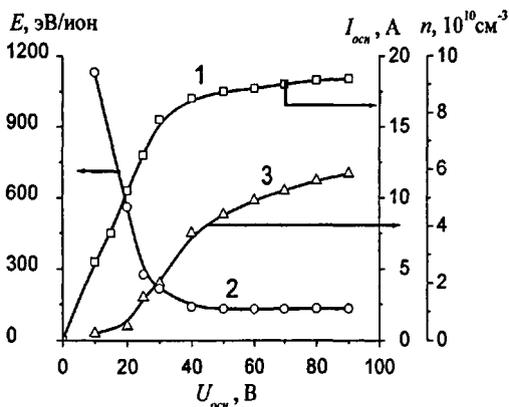


Рис.2 Зависимость тока основного разряда (1), цены иона (2) и концентрации объемной плазмы (3) от напряжения основного разряда. $I_{эм.р.}=20$ А, $p=5 \cdot 10^{-2}$ Па. Рабочий газ - аргон.

Показано, что с увеличением тока инжектированных электронов возрастает пространственная неоднородность распределения концентрации плазмы, обусловленная влиянием собственного магнитного поля электронного пучка. В эксперименте по оси инжектируемого пучка размещался проводник, по которому пропускался ток от изолированного источника. При протекании по проводнику электронного тока, в направлении, противоположном инжекции электронов, пространственная неоднородность объемной плазмы заметно

уменьшалась, и, при токе в проводнике, равном току инжектируемых электронов, неоднородность распределения концентрации плазмы на расстоянии 60 см не превышала $\pm 10\%$ от среднего значения. Для снижения эффекта самодифракции необходимо увеличение начального диаметра пучка инжектированных электронов, либо использование эмиссионного окна щелевой формы.

Эффективным способом снижения неоднородности также является использование дополнительных распределяющих электродов (РЭ)¹. Экспериментально было показано, что наиболее эффективной конструкцией такого электрода является плоский сеточный РЭ с шагом ячейки порядка 5 мм. Проведенные исследования позволяют генерировать достаточно однородную плазму в объемах до 1 м^3 для проведения так называемой трехмерной ионной обработки.

Также в этой главе представлены результаты исследований генерации более плотной (10^{11} см^{-3}) локализованной плазмы при наложении на область основного разряда внешнего аксиально-симметричного неоднородного магнитного поля, создаваемого одним, либо двумя соленоидами, с целью получения интенсивных низкоэнергетичных ионных потоков. Коллектор ионов располагался на расстоянии 25-30 см от генератора и представлял собой диск площадью 500 см^2 . Влияние конфигурации и величины магнитного поля двух соленоидов на плазму основного разряда показано на рис.3.

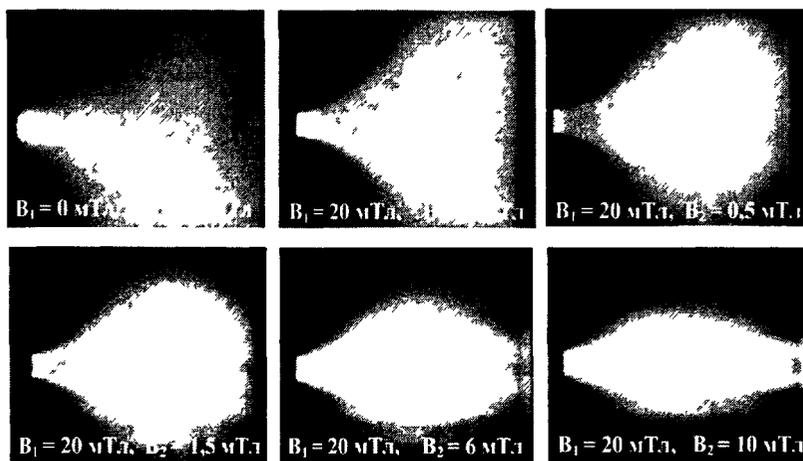


Рис.3. Влияние магнитного поля соленоидов на конфигурацию генерируемой плазмы. B_1 — магнитное поле в центре соленоида, расположенного на генераторе плазмы (слева), B_2 — в области коллектора (справа).

Крейндель Ю.Е., Оке Е.М., Шанин П.М. Импульсный источник электронов с плазменным эмиттером на основе каскадной дуги.// ПТЭ, 1984, №4, с. 127.

Измерения осевого распределения потенциала плазмы (рис.4, а) термоэмиссионным зондом показали, что в исследуемой разрядной системе в установившемся режиме в плазме существует электрическое поле, ускоряющее ионы к коллектору, с напряженностью 5/7 В/м. При этом увеличение магнитного поля соленоидов не оказывает влияния на аксиальную составляющую электрического поля, но, в результате уменьшения подвижности электронов, приводит к понижению потенциала плазмы в целом. Увеличение магнитного поля в области коллектора приводит также к изменению радиального распределения, в результате чего для ионов формируется потенциальная яма (рис.4,б; кривые 3,4).

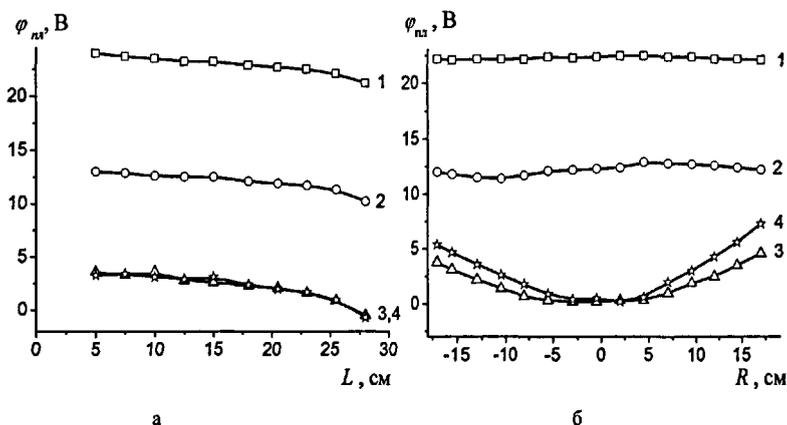


Рис.4 Осевое (а) и радиальное (б) распределение потенциала плазмы: 1- $B_1=0$ мТл, $B_2=0$ мТл; 2 - 20 мТл, 0 мТл; 3 - 20 мТл, 2 мТл; 4 - 20 мТл, 4 мТл. $I_{эпр} = 10$ А, $U_{оснр} = 30$ В, $p = 7 \cdot 10^{-2}$ Па, $\phi_{кол} = -150$ В. Расстояние генератор-коллектор 30 см. Радиальное распределение на расстоянии 25 см от генератора. «0» - центр коллектора.

Показано, что в системе с одним соленоидом, расположенным в области генератора плазмы, для достижения высокой плотности ионов на коллектор необходимо увеличение диаметра соленоида и уменьшение начального радиуса пучка инжектируемых электронов, что обеспечивает условия лучшей фокусировки, в частности, за счет меньшей расходимости силовых линий магнитного поля. В этом случае также наблюдается формирование потенциальной ямы в радиальном распределении потенциала плазмы. Необходимо также отметить, что ограниченный срок службы эмиссионного зонда в режиме максимальной эмиссии не позволял проводить измерения при максимальных значениях магнитного поля и тока разряда. В то же время характер поведения зависимостей показывает, что полученные значения глубины потенциальной ямы (в системе как с одним, так и с двумя соленоидами), по-видимому, не являются максимально реализуемыми в эксперименте. Снижение потенциала плазмы

основного разряда в магнитном поле ниже величины, соответствующей энергетическому порогу ионного распыления (<20 эВ), создает условия для генерации плазмы с высокой степенью чистоты.

В четвертой главе приведены конструкции и характеристики разработанных в результате проведенных исследований генераторов плазмы на основе газового разряда низкого давления с инжекцией электронов из плазмы дугового контрагированного разряда.

Представлены две конструкции генераторов объемной плазмы (рис.5). Генераторы позволяют при давлении рабочего газа $3 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$ Па получать в объеме до 1 м^3 газовую плазму с концентрацией до $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ с неравномерностью на 60 см порядка $\pm 26\%$ от среднего значения, и предназначены для проведения предварительной ионной обработки объемных деталей с большой площадью поверхности.

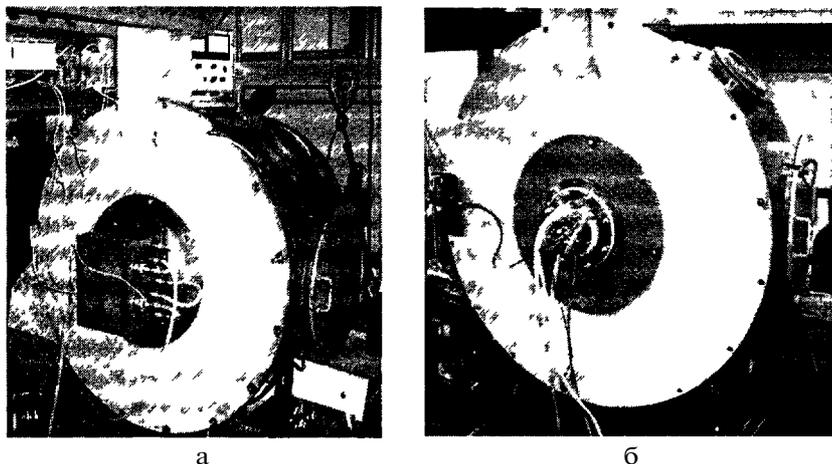


Рис. 5 Внешний вид генераторов объемной плазмы "SPACE-1" (а) и "SPACE-2" (б).

Особенностью конструкции генератора плазмы "SPACE-1" являлась возможность ориентировать выходной щелевой канал катода дугового разряда как в сторону основного разряда, так и в противоположную сторону. В первом случае обеспечивались условия для стабильного инициирования дуги при минимальном расходе газа, во втором - условия для снижения «загрязнения» плазмы основного разряда продуктами эрозии из катодной области эмиттерного разряда.

Ресурсные испытания генератора с использованием кислорода в качестве рабочего газа показали, что в процессе функционирования разряда часть рабочего материала (магния) окисляется с образованием непроводящего порошка, что увеличивает расход рабочего материала в 2-3 раза.

Улучшенный теплоотвод от электродов в генераторе плазмы "SPACE-2" (рис.5,б) позволил увеличить ток эмиттерного разряда с 10 до 20 А.

Напряжение основного разряда определялось точкой перегиба ВАХ и составляло 100В. Использование трех идентичных разрядных систем "SPACE-2", установленных на одной вакуумной камере, позволило получить объемную (1 м^3) плазму с концентрацией в центре камеры до $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Для улучшения однородности генерируемой плазмы использовались эмиссионные каналы шелевой формы в совокупности с дополнительными рассеивающими электродами.

Представлена конструкция генератора плазмы "SPACE-3", предназначенного для получения интенсивных низкоэнергетичных ионных потоков. Отличительной особенностью данного генератора являлась инжекция электронного пучка круглого сечения, наличие промежуточного электрода сложной формы для более эффективной фильтрации, а также наличие внешнего магнитного поля, создаваемого соленоидом, установленном на генераторе плазмы. Кроме того, в связи с жесткими требованиями к степени загрязнения генерируемой плазмы, в эмиттере электронов в качестве рабочего материала вместо магния использовался висмут, имеющий не только низкое значение порогового тока дуги, но и меньшее давление паров при той же температуре, что необходимо для снижения сублимации материала, осажденного на промежуточном фильтрующем электроде. Рабочее напряжение основного разряда было снижено до 20 В. При токе эмиттерного разряда 35 А, максимальный ток ионов на коллектор площадью 500 см^2 , расположенный на расстоянии 25 см от генератора, в непрерывном режиме составил 4,5 А, а степень «загрязнения» плазмы в области коллектора - уровня 10^{-4} атомов примеси на ион без промежуточного фильтрующего электрода. Использование фильтрующего электрода обеспечивает дальнейшее снижение степени «загрязнения» благодаря эффективному осаждению материала внутри полости фильтра. Источник предназначен для распыления мишеней в процессе нанесения чистых пленочных покрытий в полупроводниковых технологиях.

Представлены результаты, позволяющие оптимизировать параметры и характеристики созданных устройств для обеспечения требований реального технологического процесса.

В заключении изложены основные результаты работы:.

1. Показано, что в двухкаскадной разрядной системе генератора однородной объемной плазмы на основе разряда низкого давления с внешней инжекцией электронов, использование в первом каскаде (инжекторе электронов) вместо тлеющего разряда контрагированной дуги с холодным катодом не оказывает влияния на однородность распределения параметров генерируемой плазмы, но позволяет увеличить концентрацию (и) или объем плазмы приблизительно на порядок величины. При этом, за счет увеличения тока инжектируемых электронов и снижения напряжения горения в обоих каскадах, снижается цена иона в плазме основного разряда. Кроме того, в результате снижения

напряжения основного разряда уменьшается «загрязнение» плазмы продуктами распыления материала электродов в результате ионной бомбардировки.

2. Предложена, реализована и исследована двухкомпонентная структура полого катода дугового контрагированного разряда, обеспечивающая более высокий ресурс по сравнению с инжектором электронов на основе тлеющего разряда (или обычного дугового разряда). Для этого в полый катод, выполненный из материала с высоким пороговым током дуги, помещается элемент рабочего материала с более низким пороговым током дуги. В процессе функционирования разряда рабочий материал равномерно распределяется по внутренней поверхности полого катода и предотвращает эрозию его стенок. Полая форма катода способствует запылению выработанного участка новой пленкой и уменьшает выход рабочего материала из полости. Хаотический характер перемещения катодного пятна по поверхности полого катода в отсутствии внешнего магнитного поля способствует использованию всей рабочей поверхности. Возможность восполнения рабочего материала предотвращает выработку полого катода и не требует его замены в течение длительного времени.

3. Показано, что увеличение пространственной неоднородности распределения концентрации плазмы при увеличении тока инжектированных электронов обусловлено влиянием собственного магнитного поля электронного пучка. Для снижения данного эффекта целесообразно использование вместо круглого контрагирующего канала и, соответственно, эмиссионного окна в катоде основного разряда, протяженной щели той же площади, а также дополнительного плоского сеточного рассеивающего электрода с высокой геометрической прозрачностью и большим шагом ячейки.

4. На основании исследования возможности формирования интенсивных низкоэнергетичных ионных потоков на коллектор показано, что в системе с пробочной конфигурацией магнитного поля, создаваемого двумя соленоидами, а также в системе с одним соленоидом, расположенным в области генератора плазмы и создающим аксиально-симметричное неоднородное магнитное поле, спадающее в направлении от генератора к коллектору, в установившемся режиме формируется осевое распределение потенциала плазмы, обеспечивающее транспортировку ионов преимущественно по направлению к коллектору, с напряженностью электрического поля $6/7$ В/м. При этом увеличение магнитного поля не приводит к изменению аксиальной составляющей поля, но за счет более эффективного удержания электронов в объеме приводит к понижению потенциала плазмы в целом. Формирование потенциальной ямы в радиальном распределении потенциала плазмы происходит при значениях магнитного поля в области коллектора составляющих единицы мТл. При этом снижение потенциала плазмы основного разряда относительно стенок вакуумной камеры и элементов разрядной системы до величины $(5/10)$ В, а также возможность его дальнейшего понижения, предотвращает загрязнение газовой плазмы вследствие ионного распыления.

5. На основании проведенных исследований созданы генераторы объемной плазмы на основе разряда низкого давления с инжекцией электронов из плазмы дугового контрагированного разряда, позволяющие при давлении рабочего газа $3 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$ Па получать в объеме до 1 м^3 плазму с концентрацией до $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ с неоднородностью не более $\pm 30 \%$, а также основанный на этом же принципе генератор газоразрядной плазмы с внешним аксиально-симметричным неоднородным магнитным полем, обладающий низким уровнем загрязнения (порядка $10^{-4} - 10^{-5}$) и обеспечивающий в непрерывном режиме интенсивные (до 4,5 А) низкоэнергетичные потоки ионов с разбросом по энергиям не более 10 эВ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Визирь Л.В., Оке Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Генерация объемной плазмы на основе сильноточного газового разряда с внешней инжекцией электронов.// Прикладная физика, 2004, №6.
2. Визирь А.В., Оке Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Генератор объемной плазмы на основе разряда с плазменным катодом.// ПТЭ, 2003, №3, с. 108.
3. Vizir A.V., Shandrikov M.V., Yushkov G.Yu. and Oks E.M. Gaseous Plasma Production Using Electron Emitter Based on Arc Discharge. // In Book Emerging Applications of Vacuum-Arc-Produced Plasma, Ion and Electron Beams. Edited by Efim Oks and Ian Brown. Kluwe Academic Publishers. The Netherlands. 2002. p. 115.
4. Vizir A.V., Oks E.M., Shandrikov M.V., Yuehkov G.Yu. Effective Source of High Purity Gaseous Plasma.// Proc. of 7th International Conference on modification of materials with particle beams and plasma flows, Tomsk, Russia, 2004, p.81.
5. Визирь А.В., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Генератор плазмы на основе газового разряда с внешней инжекцией электронов.// Материалы бой Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками, "Наука", Томск, 2002, с. 155.
6. Визирь А.В., Оке Е.М., Шандриков М.В., Юшков Г.Ю. Сильноточный газовый разряд с инжекцией электронов.// Всероссийская научная конференция по физике низкотемпературной плазмы, г.Петрозаводск, 2004, Т. 1, стр.251.
7. Визирь А.В., Шандриков М.В., Оке Е.М. Формирование объемной плазмы на основе разрядных систем с внешней инжекцией электронов. // 3я Региональная школа-семинар молодых ученых "Современные проблемы физики и технологии", Томск, 2002, с. 167.
8. Shandrikov M.V., Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Oks E.M. Bulk plasma production using gaseous discharge systems with external electron injection.// Proc. of 11th International Congress on Plasma Physics, Sydney, Australia, 2002 p.377.
9. Визирь А.В., Шандриков М.В., Оке Е.М. Генераторы объемной плазмы на основе газового разряда с внешней инжекцией электронов.// Научная сессия МИФИ, Москва, 2003, Т.4, стр.89.
10. Шандриков М.В., Визирь А.В., Оке Е.М. Генераторы объемной газоразрядной плазмы технологического назначения.// Тез. докл 9ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых. Красноярск, 2003, Т.1, с.486
11. Визирь А.В., Шандриков М.В., Оке Е.М., Юшков Г.Ю. Генератор объемной плазмы на основе сильноточного газового разряда с внешней инжекцией электронов.// Всероссийская научно-практическая конференция «Электронные средства в системы управления», Томск, 2003, с. 254.
12. Oks E.M., Shandrikov M.V., Vizir A.V., Yushkov G.Yu. Large volume plasma gun for surface treatment technologies // Proc. of 4th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering, Korea, 2003. p.111.

№ 25251

1011