

"УТВЕРЖДАЮ"

Зам. директора  
ФГБУН ИЭФ УрО РАН  
д.ф.-м.н. Г.Ш. Болтачев



2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)** на диссертационную работу **Фроловой Валерии Петровны «Генерация многозарядных и многокомпонентных импульсных ионных пучков на основе сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.04.04 – физическая электроника**.

### Актуальность

Интерес к исследованию вакуумного дугового разряда определяется его широким использованием в установках нанесения покрытий на поверхность, в сильноточных коммутаторах, в источниках пучков заряженных частиц и нейтронов. Привлекательность этого вида разряда для таких задач обусловлена его уникальными возможностями генерации плазмы высокой плотности, образующейся при практически полной ионизации материала катода в катодных пятнах вакуумной дуги. На протяжении ряда последних лет интерес к исследованию дуги связан с формированием на её основе сильноточных пучков многозарядных ионов металлов. Повышение зарядовых состояний ионов плазмы вакуумной дуги позволяет обеспечить увеличение энергии ионов в извлекаемом пучке без соответствующего повышения ускоряющего напряжения, что делает ионные источники более компактными и менее затратными при изготовлении. Ранее для повышения зарядовых состояний ионов в плазме вакуумного дугового разряда и, соответственно, в ионном пучке, использовались такие подходы, как: создание в катодной области разряда сильного аксиального магнитного поля, кратковременное приложение дополнительных импульсов тока дуги, инжекция в плазму разряда электронного пучка, а также нагрев электронов плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса микроволновым излучением мощного гиротрона. Каждый из этих методов обеспечивает увеличение зарядности ионов в плазме вакуумного дугового разряда, но в ограниченных пределах. В связи с этим, на момент начала исследований по диссертации большей перспективностью обладал относительно новый и наименее экспериментально изученный метод генерации многозарядных ионов в сильноточной вакуумной дуге короткой длительности, а проведение исследований, направленных на дальнейшее увеличение зарядовых состояний ионов пучка с применением этого метода, являлось актуальной задачей физики вакуумных разрядов и ионных пучков.

Генерация многокомпонентных ионных пучков на основе вакуумной дуги расширяет область их технологического применения. Она осуществима при использовании в дуговой разрядной системе катода, выполненного из нескольких элементов, даже в том случае, если один из элементов материала катода в «чистом виде» не обладает достаточной для функционирования вакуумной дуги проводимостью. К такому случаю, в первую очередь, следует отнести бор, поскольку этот материал является одним из перспективных элементов для решения задач модификации поверхности: бориды обладают высокой твердостью, износо- и коррозионной стойкостью. Однако особенности функционирования



дугового разряда с многокомпонентным катодом и взаимосвязь ионного и зарядового состава плазмы с условиями горения и параметрами разряда изучены недостаточно. Исследования, направленные на решение этих задач, важны как для понимания физических процессов генерации многоэлементной вакуумной дуговой плазмы, так и для получения многокомпонентных ионных пучков. Одним из методов получения импульсных потоков нейтронов является термоядерная реакция при взаимодействии ускоренных ионов дейтерия с мишенью, содержащей дейтерий или тритий. В системах на основе вакуумной дуги генерация ионов дейтерия осуществляется при использовании катода, насыщенного дейтерием. Повышение интенсивности потока нейтронов за импульс может быть обеспечено как увеличением длительности импульса тока ионного пучка, так и повышением доли ионов дейтерия в нем. В связи с этим, детальное исследование дугового разряда с дейтерированным катодом представляется актуальной задачей.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 135 страниц, включая 65 рисунков и 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна, научная и практическая ценность работы.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу физических особенностей генерации и параметров плазмы вакуумного дугового разряда. Рассмотрены процессы, протекающие в катодном пятне вакуумной дуги, и эмиссионный метод исследования плазмы разряда. Показаны практические аспекты формирования ионных пучков на основе вакуумного дугового разряда, проведено сравнение параметров вакуумных дуговых источников ионов и выделены их конструктивные особенности. Проведен сравнительный анализ методов повышения зарядовых состояний ионов металлов, реализованных в ионных источниках на основе вакуумного дугового разряда. Рассмотрен вопрос генерации многокомпонентного ионного пучка при использовании в качестве катода вакуумного дугового источника ионов материала сложного состава.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям, направленным на увеличение зарядовых состояний ионов пучка, генерируемого на основе разрядной системы с характерными параметрами импульса дуги: длительность - единицы микросекунд, амплитуда тока - единицы килоампер. В ней рассмотрены вопросы влияния магнитного поля в катодной области разряда на зарядовые состояния ионов материала катода, приведены результаты оптимизации параметров импульса дуги, выявлены особенности физического механизма, ответственного за генерацию ионов с высокими зарядовыми состояниями, представлены параметры широкоапертурных пучков многозарядных ионов металлов.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований плазмы разряда с катодом из материала, включающего сочетание элементов типа "металл-газ", "металл-неметалл" и "металл-металл", а также генерации на основе такого разряда многокомпонентных импульсных ионных пучков. В качестве модельных материалов катода использовались: цирконий, насыщенный дейтерием, гексаборид лантана и сплавы олова и свинца с различным долевым соотношением этих металлов.

Четвертая глава посвящена описанию оборудования, модернизированного и созданного на основе исследований, проведенных при выполнении настоящей диссертации.

В заключении приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы, включающий 173 ссылки, содержит обширную и достаточную библиографию по тематике диссертации.

**Достоверность и обоснованность результатов** диссертационной работы подтверждается систематическим характером результатов исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, проведением измерений на



различных экспериментальных установках, 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.

**Научная новизна** результатов заключается в следующем:

1. Автором было показано, что при генерации ионных пучков в системах на основе сильноточного вакуумного дугового разряда микросекундной длительности импульса кратный рост зарядовых состояний ионов обусловлен сжатием («пинчеванием») разряда собственным магнитным полем тока дуги. Перетяжка пинча образуется на расстоянии около одного сантиметра от катода в момент достижения амплитудой импульса тока дуги оптимального значения. Установлено, что степень повышения зарядовых состояний ионов зависит от материала катода и параметров разряда. В результате этих исследований на примере электрода, выполненного из висмута, максимальное зарядовое состояние ионов повышено до  $17+$  при средней зарядности этих ионов  $12,6+$ , что является рекордным значением для вакуумных дуговых ионных источников.

2. Установлено, что для импульсного вакуумного дугового разряда с катодом, выполненным из материала, содержащего различные элементы, зарядовое распределение ионов в плазме и, соответственно, в извлеченном из нее ионном пучке, определяется потенциалами ионизации каждого из элементов. Обнаружено, что доленое соотношение ионов этих элементов в пучке соответствует составу материала катода в атомных процентах. Результат этих исследований на примере дуги с катодом из гексаборида лантана показал, что доля ионов бора в пучке составляет 86 %.

3. Показано, что для импульсной вакуумной дуги с газонасыщенным металлическим катодом существенное превышение доли ионов газа в плазме по сравнению со степенью насыщения газом катода, а, следовательно, и доминирование газового компонента в извлеченном из плазмы ионном пучке, связано с выходом и последующей ионизацией атомов газа с поверхности катода, превышающей размеры катодного пятна. В случае катода из циркония, насыщенного дейтерием до 40 ат.%, была осуществлена генерация пучков с долевым содержанием ионов дейтерия уровня 80 %. Таким образом, показана возможность эффективной генерации широкоапертурного пучка ионов дейтерия микросекундной длительности в вакуумном дуговом источнике с газонасыщенным катодом.

### **Практическая ценность результатов**

Сформулированные автором научные положения и выводы, сделанные на основании проведенных исследований, вносят вклад в понимание особенностей функционирования сильноточной вакуумной дуги микросекундной длительности с различными типами катодов и на их основе обеспечена генерация многозарядных и многокомпонентных ионных пучков.

### **Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в печати**

По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 28 печатных работ: 16 статей в рецензируемых журналах, из которых 13 статей входят в перечень ВАК, а также 12 публикаций в трудах международных симпозиумов и конференций.

Таким образом, актуальность тематики, научная значимость, новизна работы и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений.

Автореферат и сама диссертация дают достаточно полное представление о проведенных автором исследованиях, а автореферат полноценно соответствует структуре и содержанию диссертации.

Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.04 – физическая электроника.

### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Полученные В.П. Фроловой в процессе диссертационных исследований результаты и выводы можно рекомендовать для использования в таких организациях, как Институт



прикладной физики РАН (г. Н.Новгород), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Иркутский государственный университет, Институт электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск), Физический институт РАН (г. Москва) и других организациях, занимающихся разработкой и исследованием вакуумного дугового разряда или разработкой ионно-пучкового оборудования.

#### **Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом**

Диссертационная работа в целом производит впечатление цельного самостоятельного исследования, основные научные положения, выводы, предложения и рекомендации достаточно логичны, аргументированы и являются значимыми для развития областей науки и техники, связанных с получением низкотемпературной плазмы и пучков ионов и созданием ионно-плазменных технологий модификации материалов.

#### **Замечания по диссертации**

1. Хотя название диссертационной работы включает в себя термин «генерация ионных пучков», тем не менее, основное внимание в работе уделено изучению ионного компонента плазмы вакуумной дуги. Параметры такой плазмы при некоторых условиях однозначно определяют состав и параметры пучка ускоренных ионов. Однако непосредственному изучению характеристик ионного пучка в диссертации уделено недостаточное внимание. Например, не приведены результаты исследований распределения плотности тока ионного пучка по сечению или измерения его угловой расходимости.

2. В диссертации не приведено объяснение экспериментально наблюдаемой немонотонной зависимости максимального зарядового состояния ионов висмута от длительности импульса тока дуги.

3. Фраза, приведенная на стр. 14 автореферата: «Найдено, что для вакуумной дуги с катодом из гексаборида лантана появление максимальных зарядовых состояний ионов бора и лантана в плазме разряда определяется, как и в случае катода из сплава олова и свинца, потенциалами ионизации компонентов, входящих в материал катода» не определяет в явном виде связи между «появлением максимальных зарядовых состояний ионов» и «потенциалами ионизации компонентов, входящих в материал катода».

4. На стр. 13 автореферата сформулировано: «Определено, что соотношение долей ионов олова и свинца в плазме дуги с катодом из их сплава всегда соответствует стехиометрическому составу катода». Здесь необходимо уточнить, что понятие стехиометрии обычно относят к химическим соединениям, более того, в стехиометрических соединениях химические элементы присутствуют в строго определённых соотношениях. Сплав из олова и свинца не является химическим соединением, поэтому правильнее говорить о содержании элементов в атомных %.

5. В работе не обсуждается длительность существования эффекта существенного превышения доли ионов газа в плазме по сравнению со степенью насыщения газом катода импульсной вакуумной дуги.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы, которая четко структурирована, в ней использован простой и понятный стиль изложения. По каждой главе сформулированы содержательные выводы, что облегчает понимание материала.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать вывод о том, что диссертация В.П. Фроловой является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение таких задач как: получение пучков многозарядных ионов с рекордным увеличением зарядовых состояний ионов, получение пучков многокомпонентных ионов с высоким содержанием бора или дейтерия. Эти результаты являются значимыми для физики ионных пучков и физики вакуумных разрядов.

