

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента 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 темы**

Вакуумно-дуговые разряды различных типов исследуются уже более полувека, тем не менее, эти работы не потеряли своей актуальности. Связано это, прежде всего, с весьма сложным, многофакторным характером фундаментальных процессов, протекающих в таких разрядах. Расширение класса материалов катода, в частности, переход к композитным и газосодержащим катодам, требует серьезного объема дополнительных исследований. Отметим также, что в то время как стационарные или квазистационарные (длительностью сотни микросекунд) вакуумные дуги изучены достаточно подробно, физика процессов, протекающих в коротких (порядка микросекунды) сильноточных (килоамперного диапазона) дугах остается, во многом неисследованной. Можно ожидать, что переход к подобным разрядам существенно расширит, как возможность управления параметрами генерируемого плазменного потока, в частности, зарядовым составом и энергетическим спектром ионной компоненты, так и, соответственно, область применения таких разрядов. В связи с вышеизложенным, выбор тематики данного исследования представляется вполне актуальным

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 135 страниц текста, 65 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 173 наименований

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

**Первая глава** носит обзорный характер и посвящена критическому обзору научных публикаций по тематике диссертации. Рассмотрены физические особенности генерации и параметры плазмы вакуумного дугового разряда, процессы, протекающие в катодном пятне вакуумной дуги, и эмиссионный метод исследования плазмы разряда. Проведен сравнительный анализ методов повышения зарядовых состояний ионов металлов, реализованных в ионных источниках на основе вакуумного дугового разряда.

Сделан важный вывод о перспективности проведения исследований сильноточной вакуумной дуги короткой длительности с целью дальнейшего повышения зарядовых состояний ионов пучка, генерируемого на основе этой формы разряда.

Описание экспериментальной установки и набора используемых методик приведено в **Главе 2**. Приведено описание экспериментального стенда, конструкции, принципов функционирования и параметров ионного источника особенностей диагностического оборудования, в частности времяпролетного масс-спектрометра, использовавшегося для изучения распределения ионного пучка по зарядовым состояниям. Затем описаны экспериментальные исследования, направленные на увеличение зарядовых состояний ионов пучка, генерируемого на основе разрядной системы с характерными параметрами импульса дуги: длительность – единицы микросекунд, амплитуда разрядного тока – несколько килоампер.

**Третья глава** посвящена изучению плазмы разряда с композитными катодами различных типов. В частности, рассмотрены катоды из материала, включающего пары элементов типа "металл-газ", "металл-неметалл" и "металл-металл", а также вопросы 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.

В **четвертой главе** описано экспериментальное и технологическое оборудование, модернизированное и созданное на основе исследований, выполненных в рамках настоящей диссертационной работы. Отмечены оригинальные конструктивные и схемные решения, реализованные в данном оборудовании.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, обосновывается достоверность полученных результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

#### **Оценка новизны и достоверности**

Наиболее важными и интересными научными результатами диссертации можно назвать следующие:

1. Показано, что в сильноточном вакуумно-дуговом разряде с током в диапазоне единиц килоампер и длительностью импульса порядка микросекунды реализуется режим пинчевания катодной плазменной струи, что обеспечивает генерацию пучков высокозарядных ионов широкого круга материалов катода, причем для каждой длительности импульса разряда и материала катода, установлена оптимальная амплитуда импульса тока дуги, при которой достигается максимальная зарядность ионного пучка.

2. Для сильноточного вакуумного дугового разряда с многокомпонентным катодом при микросекундной длительности импульса рост тока дуги приводит к существенному увеличению зарядовых состояний ионов всех элементов, входящих в материал катода, при этом достижение максимальных зарядовых состояний ионов каждого элемента определяется его потенциалами ионизации.

3. На основе импульсного вакуумного дугового разряда с катодом, выполненным из гексаборида лантана, получены пучки с высоким содержанием ионов бора, причем суммарная доля ионов бора в пучке соответствует атомной доле этого элемента в материале катода и составляет 86 %.

4. Экспериментально показано, что для вакуумной дуги с катодом, выполненным из циркония, насыщенного дейтерием, доля ионов дейтерия в извлеченном ионном пучке может существенно превышать его атомарную долю в катоде. Так, для катода из циркония с атомарной долей дейтерия 40 %, в случае дуги длительностью импульса тока 250 мкс доля ионов дейтерия в пучке достигала 50 %, а для дуги длительностью в единицы микросекунд - 80 %.

**Работа имеет несомненную практическую ценность работы, которая заключается в следующем:**

1. Полученные в Главе 2 результаты указывают на перспективы создания нового класса компактных ускорителей металлических ионов в которых ускоряющее напряжение оказывается почти на порядок (!) меньше установок с традиционными источниками ионов, что позволяет избежать использования высоковольтных источников питания и соответствующих элементов аппаратуры и существенно уменьшить габариты и стоимость таких установок.
2. Результаты Главы 3 позволяют разработать на основе коротких сильноточных вакуумных разрядов эффективные источники ионов бора для широкого спектра ионных имплантеров, используемых в микроэлектронике.
3. Результаты исследований вакуумно-дуговых разрядов с дейтерированным цирконием показывают, что источники нейтронов, разработанные на основе подобных разрядов, в принципе, могут составить конкуренцию традиционным нейтронным трубкам, использующим газообразный дейтерий.

#### **Рекомендации по внедрению результатов работы**

Представленные в диссертации результаты, могут быть использованы в ряде ведущих отечественных научных и технологических центров, занимающихся разработкой аппаратуры для ионной имплантации и исследованиями в области материаловедения, ядерной физики и физики высоких энергий, в частности, в РНЦ «Курчатовский институт», ТРИНИТИ, Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ, НИ ТПУ.

### **Обоснованность научных положений и выводов,**

выдвинутых соискателем, основывается на использовании различных современных методик, хорошо отработанных в предыдущих исследованиях (скоростная фотография, корпускулярная диагностика), сопоставлении с известными литературными данными, а также разумным физическим обоснованием полученных экспериментальных данных. Последнее обстоятельство является важным достоинством работы.

Таким образом, являются несомненными и актуальность тематики, и научная значимость, и новизна работы, и достоверность полученных результатов. О высоком уровне и актуальности проведенных исследований, в частности, свидетельствует их поддержка грантами российских научных фондов, а также стипендией Президента Российской Федерации.

**Автореферат полностью соответствует структуре и отражает содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.**

### **Апробация работы.**

По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 28 печатных работ: 16 статей в рецензируемых журналах, из которых 13 статей входят в список ВАК; 12 публикаций в трудах международных симпозиумов и конференций. Особенно следует отметить высокий научный уровень результатов работы, опубликованных в рейтинговых журналах: «IEEE Transactions on Plasma Science» и «Physics of Plasmas». Следует также указать на представление результатов на ведущих российских и международных конференциях по физике плазмы.

Как всякое серьезное исследование, диссертация не свободна от **недостатков.**

1. На с. 73 для оценки скорости многозарядных ионов, генерируемых в области пинчевания плазменной струи, использована формула (1.1). С этим нельзя согласиться, поскольку указанная формула получена для совершенно других условий, а именно, для случая плазменной струи эмитируемой катодным микропятном и ускоряемой при расширении в вакуум за счет градиента электронного давления. В то же время известны работы, где экспериментально показано, что ускорение многозарядных ионов в подобных экспериментальных условиях связано с их захватом в нестационарную потенциальную яму, т.е. обусловлено действием электрических сил.

2. Одним из выводов работы является утверждение о том, что наиболее эффективно образование многозарядных ионов происходит в момент достижения максимума тока. В то же время, согласно рис. 2.6, максимум выделяемой мощности в разряде приходится на существенно более ранний момент. Необходимо пояснить это возможное противоречие.

3. На с. 61 утверждается, что причиной уменьшения зарядности ионов, образующихся в области пинчевания катодной струи, в случае


превышения током разряда некоторого оптимального значения является перезарядка ионов на атомах материала катода, испаряющихся с его поверхности. Однако простейшие оценки показывают, что время пролета испаренных атомов с тепловой скоростью до области пинчевания составляет несколько десятков микросекунд, в то время как разряд длится около микросекунды. Необходимы комментарии по этому вопросу.

4. Рис. 2.29 показывает, что наиболее высокозарядные ионы генерируются в начале разрядного импульса, а рис. 2.25-2.28 показывают, что зарядность ионов повышается с уменьшением длительности импульса. Необходимо пояснить возможный механизм этого интересного эффекта, а также как он согласуется с утверждением автора, рассмотренном в замечании 2.

Указанные замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не снижают высокой итоговой оценки диссертационной работы Фроловой В.П., которая подтверждает достаточную научную квалификацию ее автора.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели соответствуют полученным результатам, ее содержание соответствует специальности 01.04.04 - физическая электроника. Отметим также, что работа написана грамотно, легко читается, хорошо оформлена.

Таким образом, диссертация Фроловой В.П. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решены важные вопросы, касающиеся физических процессов, протекающих в сильноточных вакуумно-дуговых разрядах микросекундной длительности. Работа соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г. а ее автор Фролова В.П заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника.

Отзыв составил Паперный Виктор Львович,  
адрес: 664003, Иркутск, К.Маркса,1; тел.+7(914)9333884; e-mail:  
paperny@math.isu.runnet.ru; место работы ФГБОУ ВО «Иркутский  
государственный университет»; зав. кафедрой общей и космической физики;  
д.ф.-м.н., профессор.  В.Л. Паперный

Ученый секретарь ФГБОУ ВО ИГУ,  
Н.Г. Кузьмина  
664003, Иркутск, ул. К.Маркса,1, (3952) 521-900, office@admin.isu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Иркутский государственный университет (ФГБОУ ВО  
ИГУ), 664003, Иркутск, К.Маркса,1; (3952) 521-900; e-mail: office@admin.isu.ru

