

На правах рукописи

**Черных Алексей Андреевич**

**ДИНАМИКА ПЛАЗМЕННЫХ И ИОННЫХ  
ПУЧКОВ В УСКОРИТЕЛЕ НА ОСНОВЕ  
ИМПУЛЬСНОГО ВАКУУМНО-ДУГОВОГО  
РАЗРЯДА**

Специальность: 3 01.04.08 – физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва - 2010

Работа выполнена в Иркутском государственном университете

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Паперный Виктор Львович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Окс Ефим Михайлович  
кандидат физико-математических наук, Кулевой Тимур Вячеславович

Ведущая организация: Физический Институт им. П.Н.Лебедева РАН

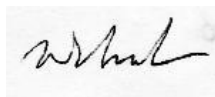
Защита диссертации состоится 17 мая 2010 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 при НИЯУ МИФИ

Адрес: 115409 Москва, Каширское ш., 31, корпус 33, ауд. 103

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.130.05, доктор физико-  
математических наук



И.В. Евсеев

**Актуальность темы.** Вакуумно-дуговые источники потоков металлической плазмы уже свыше 30 лет являются предметом обширных исследований, что обусловлено как фундаментальным характером процесса образования и ускорения плазмы в таких системах, так и их многочисленными технологическим применениями. Важной характеристикой плазменного потока в вакуумной дуге является энергетический спектр ионной компоненты, определяющий, в частности, реакционные характеристики металлической плазмы при синтезе композитных покрытий; структуру пленок, формируемых на поверхности подложки из углеродной плазмы и т.д. Хорошее соответствие разработанных моделей экспериментальным данным получено для процессов образования и ускорения ионов в стационарных вакуумно-дуговых разрядах. Однако в последнее время все более широкое применение находят импульсные вакуумно-дуговые источники плазменных потоков, для которых картина формирования пучков ускоренных ионов материала катода еще далека от завершения. В частности, важным вопросом, требующим дополнительного исследования, является наблюдаемое в экспериментах изменение в течение импульса зарядового состава и энергетического спектра ионной компоненты.

Одной из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся областей применения импульсных вакуумно-дуговых разрядов является создание на их основе технологических источников ускоренных пучков ионов металлов. Такие источники отличает простота конструкции, надежность, высокая интенсивность и большая апертура выходного ионного пучка, широкие функциональные возможности. Кроме того, сравнение различных типов источников ионных пучков, применяемых для модификации материалов, показывает, что энергетические затраты в источниках на основе дуговых разрядов ниже по сравнению, например, с лазерными источниками. Именно высокая эффективность источников на основе дугового разряда обуславливает их преимущественное применение для технологий. Вместе с тем, особенности процесса сепарации и ускорения ионной компоненты с помощью сеточной системы в сильноточных импульсных ионных источниках изучены недостаточно.

В связи с вышеизложенным, представляется актуальным экспериментальное исследование особенностей процессов ускорения ионов как в нейтрализованной катодной струе так и в сепарированном

ионной пучке обусловленных нестационарным характером импульсного вакуумно-дугового разряда.

**Цель работы:** установить основные характеристики процесса ускорения ионов в импульсном вакуумно-дуговом разряде. В частности, предполагается выяснить:

1. Динамику макроскопических параметров (концентрации, электронной температуры, потенциала) плазменного потока, а также ионных энергетических спектров на разных стадиях разряда и для различных материалов катода;

2. Особенности энергетических спектров ионных пучков, сепарированных из импульсного плазменного потока на различных стадиях разряда.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в ней впервые

- В импульсном вакуумно-дуговом разряде установлен временной ход в течение импульса основных макроскопических характеристик плазменного потока: температуры электронов, потенциала и концентрации плазмы;

- Получены энергетические спектры ионов катодного плазменного потока на разных стадиях импульсного разряда для набора материалов катода с различными электрофизическими свойствами;

- Найдена угловая зависимость формы энергетических спектров ионов и показаны существенные различия вида спектров и углового распределения макроскопических параметров ионной компоненты (средней энергии и концентрации ионов) на различных стадиях разряда;

- Выполнены прямые измерения энергетических спектров ионного пучка, сепарированного системой сеток из плазмы импульсного вакуумно-дугового разряда, и установлены особенности формы спектров на разных стадиях разряда, при разных значениях ускоряющего напряжения и амплитуды разрядного тока;

- На основе сопоставления полученных экспериментальных данных с результатами модельных расчетов предложен механизм, с помощью которого наблюдаемые эффекты можно объяснить действием объемного заряда сепарированного ионного пучка.

### **На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. В начальной, переходной, стадии импульсного вакуумно-дугового разряда энергетические спектры ионов *катодной струи* имеют аналогичную форму для материалов катода с различными электро- и теплофизическими свойствами и характеризуются сравнительно высокими значениями наиболее вероятной энергии  $\varepsilon_m / Z$ , а также значительными «хвостами» ускоренных ионов с энергиями до нескольких сотен электрон-вольт. На более поздней, квазистационарной, стадии величина  $\varepsilon_m / Z$  уменьшается и заметно отличается для разных материалов катода. Сопоставление энергетических ионных спектров с данными зондовых измерений, показало, что наблюдаемые эффекты можно объяснить возникновением в начальной стадии разряда *дополнительного* (помимо первичного ускорения ионов в катодной микроструе) ускорительного механизма. Этот механизм может быть связан с повышенной плотностью плазмы в основании катодной макроструи, вследствие ее локализации вблизи иницирующего электрода в начальной стадии разряда. В результате расплывания основания макроструи из-за хаотического движения микропятен по поверхности катода на последующей, квазистационарной, стадии разряда плотность плазмы падает, и механизм дополнительного ускорения выключается.

2. Направленная энергия ионов, *сепарированных* системой сеток из импульсного вакуумно-дугового разряда, при ускоряющем напряжении  $U_{acc}$  в диапазоне нескольких киловольт оказывается заметно ниже «электростатического» значения  $\varepsilon_m / Z = eU_{acc}$ , с увеличением  $U_{acc}$  энергия приближается к этому значению; при этом ширина энергетического спектра оказывается существенно больше ширины исходного спектра. Механизм формирования энергетического спектра импульсного ионного пучка, может быть обусловлен действием нестационарного электрического поля объёмного заряда пучка, формирующегося при входе в дрейфовый промежуток.

**Личный вклад автора** заключается в подготовке экспериментального оборудования и методов диагностики, проведении экспериментов, обработке и анализе результатов исследования, участии в обсуждении и формулировке основных

выводов. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично

**Научная и практическая значимость работы** состоит в том, что

1) Полученные данные о динамике энергетических спектров ионов в импульсном вакуумно-дуговом разряде полезны при использовании подобных систем в технологиях, чувствительных к энергии ионной компоненты (плазмохимический синтез металлосодержащих соединений и др.);

2) Результаты проведенных исследований указывают на существенную роль нестационарных процессов микросекундного масштаба длительности в ускорении ионов для систем на основе импульсного вакуумного разряда, и тем самым вносят вклад в общую картину ускорительных механизмов в плазме таких разрядов.

3) Наблюдаемую в работе структуру спектров ионного пучка, сепарированного из плазмы с помощью сеточной системы, необходимо учитывать при определении требуемых значений дозы и параметров профиля имплантированных ионов в случае применения импульсных сильноточных ионных источниках *в диапазоне относительно малых энергий*.

### **Достоверность и обоснованность**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, сопоставлением и удовлетворительным совпадением результатов экспериментов с результатами теоретического анализа и численного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами других исследователей.

### **Апробация работы**

Результаты, представленные в диссертации докладывались и обсуждались на Международных и Российских конференциях, симпозиумах и научных семинарах: семинары кафедры общей и космической физики Иркутского государственного университета (ИГУ, Иркутск); V Российский семинар по диагностике плазмы (МИФИ, 2006); Международная конференция по ионным источникам (Jeju-do, Корея, 2007); Конференция по физике плазмы и управляемому

термоядерному синтезу (Звенигород, 2008); Международный симпозиум по сильноточной электронике (Томск, 2008); Международный симпозиум по разрядам и электрической изоляции в вакууме (Бухарест, 2008).

Результаты исследований изложены в 5 статьях, опубликованных в центральных и зарубежных журналах, и 8 докладах международных и российских симпозиумов и конференций. Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения с общим объёмом 124 страниц, содержит 51 рисунок и 1 таблицу. Список цитируемой литературы включает 113 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность, цель, научная новизна и практическая ценность работы. Ставятся две цели исследования, в соответствии с которыми содержание работы можно разделить на две части. Излагается краткое содержание диссертации и формулируются выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** на основании анализа литературных данных рассматривается современное состояние исследований импульсных вакуумно-дуговых источников ускоренных ионов.

Вакуумно-дуговые разряды в течение ряда лет широко используются как непосредственно для технологических приложений, так и в качестве источников пучков металлических ионов для ускорителей различного назначения, например, в задачах ионной имплантации. Перспективным представляется применение здесь ускорителей на основе сильноточных импульсных вакуумно-дуговых разрядов. По сравнению со стационарными системами импульсные ускорители имеют меньшие габариты, энергопотребление, небольшую стоимость, обеспечивают высокую плотность среднего ионного тока (до  $100 \text{ мкА/см}^2$ ) при относительно небольших значениях ускоряющего напряжения, что обусловлено высокой зарядностью генерируемых в дуговом разряде металлических ионов. Однако, поскольку амплитудные значения плотности тока в сепарированном импульсном ионном пучке более чем на три порядка превышают значения в стационарных источниках, возникает вопрос о влиянии объемного заряда ионов пучка на его параметры (энергию и

интенсивность) при транспортировке в дрейфовом промежутке. Этот вопрос важен, например, при создании с помощью импульсных ионных имплантеров наноразмерных слоев металлических кластеров в диэлектрических матрицах, используемых для оптических приложений, поскольку параметры кластерных слоев (глубина слоя, размеры кластеров, их распределение по глубине) весьма чувствительны к энергии ионов и интенсивности пучка.

Согласно современным представлениям, плазма вакуумно-дугового разряда возникает в катодных микроструях, для которых характерны высокая плотность тока, удельная мощность и плотность плазмы. Благодаря этим параметрам в плазме микроструи рождаются высокозарядные ионы ( $Z = +1 \div +4$ ) материала эродирующего катода, и происходит ускорение ионов до высоких скоростей. Направленная энергия ионов для большинства материалов лежит в пределах от 20 до 150 эВ [1]. Как правило, при исследовании энергетических характеристик ионного потока находят среднюю или наиболее вероятную энергию с помощью различных модификаций времяпролётной методики [2]. В ряде работ показано, что энергия ионов практически не зависит от их заряда. Однако, более детальные измерения распределения ионов по энергиям с помощью электростатического анализатора дают противоречивые результаты. Результаты некоторых исследований [3] подтверждают упомянутую выше независимость энергии ионов от заряда, в то время, как в других работах [4-6] было показано, что для некоторых материалов энергия ионов растёт вместе с их зарядом.

Другим "загадочным" эффектом в импульсной вакуумной дуге является повышенные заряд и скорость ионов в начале разряда. Эти параметры уменьшаются в течение импульса дуги до некоторых квазистационарных значений, которых они достигают через несколько десятков микросекунд после начала разряда [7]. Заметим, что если процесс уменьшения заряда ионов в течение импульса достаточно детально исследовался в ряде работ для широкого набора материалов катода, то сведения о систематических исследованиях динамики энергетического спектра ионов в импульсной вакуумной дуге в литературе отсутствуют.

Согласно современным представлениям, ускорение ионов происходит в плазме катодных микроструй вследствие увлечения ионов электронным газом при его расширении в вакуум. Результаты этой модели были подтверждены в экспериментах с импульсной



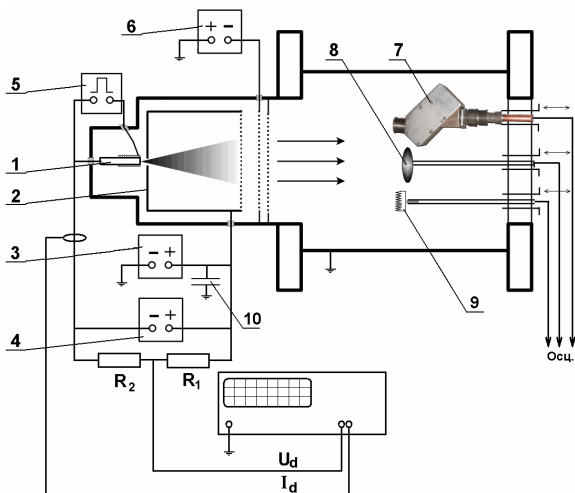
вакуумной дугой для большого количества материалов катода. Можно полагать, что газодинамическая модель, хорошо объясняет особенности рождения ионов и их первичного ускорения в катодных микроструях в установившейся стадии импульсной дуги. Однако, эта модель не может объяснить повышенную скорость ионов в начале импульса, а также рост направленной энергии с увеличением заряда, которые наблюдались в ряде экспериментов. Поэтому, для объяснения механизма ускорения ионов в импульсном вакуумно-дуговом разряде необходимы дополнительные исследования.

**Во второй главе** рассмотрены конструктивные особенности и принципы функционирования экспериментального и диагностического оборудования, использовавшегося для исследований параметров плазмы импульсной вакуумной дуги. Подробно описаны методики измерения, и проведена калибровка описываемого оборудования.

Экспериментальная система состояла из системы вакуумной откачки, рабочего объема, импульсного вакуумно-дугового источника плазмы и диагностического оборудования. Источником плазмы служила установка ионной имплантации “MEVVA-5.Ru”, предназначенная для облучения подложки пучком ускоренных ионов с целью изменения ее поверхностных свойств. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

Исследованы характеристики вакуумного разряда. Для измерения электротехнических параметров разряда и ионного пучка использовались традиционные устройства: пояс Роговского и высокоомные делители напряжения. Выяснено, что формирующая линия поддерживает постоянное напряжение разряда в течение всего импульса разрядного тока.

С помощью плоского ленгмюровского оценивались концентрация и электронная температура плазмы **катодной струи**. Подвижный зонд диаметром 6мм был ориентирован перпендикулярно к оси разряда и располагался в дрейфовой камере на расстоянии  $L = 150 \div 500 \text{ мм}$  от катода. Рассмотрены особенности работы ленгмюровского зонда, в сверхзвуковом потоке плазмы катодной струи. Исследование плазменного потенциала проводилось с помощью эмиссионного зонда. Зонд располагался напротив катода на расстоянии  $L = 200 \div 450 \text{ мм}$ .

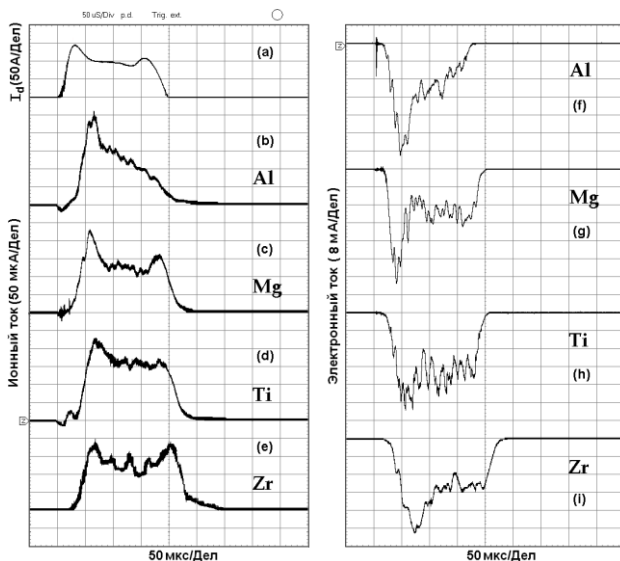


**Рисунок 1** – Принципиальная электрическая схема импульсного вакуумно-дугового источника плазмы. 1– катод, 2– анод, 3– высоковольтный источник питания, 4– источник питания дуги, 5– источник питания инициирующего импульса, 6– источник питания сетки электронной отсечки, 7– энергоанализатор, 8– лэнгмюровский зонд, 9– эмиссионный зонд, 10– ёмкость для поддержания  $U_{acc}$

По вольт-амперным характеристикам (ВАХ) зонда были оценены типичные значения концентрации ионов и электронов  $n_i \approx 2.8 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$  и  $n_e \approx 8.4 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$  на расстоянии порядка 40 см от катода. Выполнение условия квазинейтральности  $n_e / Zn_i \approx 1$ , в данном случае говорит об удовлетворительной точности измерений, а также подтверждает достоверность применения такой методики в целом.

Применение зондов в **сепарированных ионных потоках** имеет ряд особенностей. В присутствии ускоряющего электрического поля плазма в дрейфовом промежутке перестаёт быть квазинейтральной. Кроме того, в дрейфовом промежутке могут появиться вторичные электроны, возникшие из сеточной системы экстракции, а также, при взаимодействии ионного пучка с остаточным газом и с поверхностью зонда. Вид ВАХ зонда в таком пучке может существенно отличаться от аналогичной характеристики для нейтрализованной плазмы катодной струи. Наконец, некомпенсированный заряд ионного пучка может привести к появлению высоких значений плазменного потенциала.

Энергетический спектр ионной компоненты катодной струи измерялся с помощью электростатического анализатора типа



**Рисунок 2** – Типичные осциллограммы тока плоского ленгмюровского зонда для разных материалов катода. (а) – сигнал тока дуги, (b)-(e) – ионный ток, (f)-(i) – электронный ток

“плоское зеркало”. Из-за того, что такой энергоанализатор не разделял ионы по зарядам, под спектром понимается распределение ионов по энергии, отнесённой к среднему заряду,  $\varepsilon/Z$ . В главе описаны его устройство и основные характеристики.

Особое внимание уделено калибровке энергоанализатора и детектора частиц. На основе термоэлектронной пушки разработана схема калибровки, оценены разрешающая способность анализатора и его геометрический фактор. Полученные оценки практически совпадают с расчетными. Определен динамический диапазон линейности выходной характеристики ионного детектора: микроканальной пластины, и описаны ограничения её работы, связанные с эффектами насыщения.

**В третьей главе** представлены результаты исследований динамики параметров катодной струи импульсного вакуумно-дугового разряда.

С помощью зондовых методик были проведёны измерения электронной температуры, концентрации и потенциала плазмы струи. На рисунке 2 представлены характерные осциллограммы ионного и электронного токов плоского зонда для разных материалов катодов.

По осциллограммам видно, что ионный и электронный токи близки по форме к сигналу тока разряда. В начале сигналов наблюдается всплеск тока, как для электронов, так и для ионов. Видно также, что чем больше атомная масса материала катода, тем меньше этот начальный пик.

Наблюдаемый начальный выброс ионного тока (рисунок 2) может объясняться несколькими эффектами. Например, вследствие более высокого заряда ионов, который для широкого круга материалов в  $1.2 \div 1.5$  раз выше в начальной стадии разряда, чем через несколько десятков микросекунд [7]. С другой стороны, электронный ток зависит от тепловой скорости электронов  $V_{Te}$ , потенциала зонда и концентрации электронов ( $I_e \sim n_e V_{Te} \cdot f(\phi_p)$ ). Как было показано во второй главе, температура электронов слабо меняется в течение разряда, поэтому тепловую скорость можно считать практически постоянной  $V_{Te} = const$ . Плазменный потенциал  $\phi_{pl}$  согласно зондовым измерениям также слабо меняется в течение разряда. Следовательно, начальный выброс электронного тока зонда связан именно с повышенной электронной концентрацией в начале разряда, что в свою очередь, в силу квазинейтральности плазмы, означает здесь повышенную концентрацию ионов.

Построенное распределение ионной концентрации  $n_i$  вдоль оси плазменной струи в дрейфовом промежутке показало, что в данных экспериментальных условиях концентрация ионов  $n_i$  падает медленнее, чем следует из модели свободного, сферического разлета плазмы (пропорционально квадрату расстояния от катода). Предполагается, что такое несоответствие, связано со сжатием плазмы собственным магнитным полем тока струи, однако этот вопрос требует дополнительного изучения.

Из ВАХ ленгмюровского зонда была получена динамика температуры электронов  $T_e$  в течение разряда. Температура оценивалась для двух моментов времени:  $t_1$  – соответствующий максимуму разрядного тока;  $t_2$  –, сдвинутый на  $100 \text{ мкс}$  относительно  $t_1$  и соответствующий квазистационарной стадии разряда ("плато"). Показано, что в обоих случаях электронные температуры близки к  $3 \text{ эВ}$ .

Исследовано распределение плазменного потенциала  $\phi_d$  в дрейфовом промежутке для различных материалов катода. Показано, что вдоль дрейфового промежутка потенциал меняется слабо, и, чем больше атомная масса материала катода, тем выше плазменный потенциал.

Основное внимание в главе 3 уделено изучению динамики распределения ионов по энергиям в течение разряда. С помощью электростатического ионного энергоанализатора были получены энергетические распределения ионов по параметру  $\varepsilon/Z$  (здесь  $Z$  – средний заряд ионов) в различных временных сечениях пучка в зависимости от следующих параметров: материала катода, тока разряда, расстояния катод-анализатор. Исследовано угловое распределение ионов в пучке.

На рисунке 3 представлены типичные осциллограммы тока с выхода анализатора.

Из осциллограмм видно, что сигнал анализатора имеет явно выраженный пик в начале разряда, который, приблизительно, через  $50 \text{ мкс}$  релаксирует к плато. Этот пик отчасти связан с рассмотренными в главе 2 эффектами насыщения МКП. Однако, даже с учётом поправок на эти эффекты, плотность ионов в начальном “выбросе” тока выше, чем в основной части, что согласуется с данными зондовых измерений. Кроме того, на этих осциллограммах показана динамика ионного сигнала при разных энергиях регистрируемых ионов.

Энергетические спектры ионов по параметру  $\varepsilon/Z$  строились согласно следующей методике. При данной величине  $\varepsilon/Z$  фиксировался уровень сигнала на осциллограмме в некоторый момент времени. Чтобы получить статистически обоснованный результат, эта величина усреднялась по 10 выстрелам при неизменных параметрах разряда, таким образом находилась точка в спектре для этого значения  $\varepsilon/Z$ . Затем процедура повторялась при *другой энергии* регистрируемых ионов, и строились энергетические спектры ионов в данном временном сечении ионного пучка. Описанным образом при фиксированной величине  $\varepsilon/Z$  регистрируются ионы из разных областей пучка, оказавшиеся в этот момент на входе анализатора, причем, поскольку данная методика не позволяет разрешить различные зарядовые ионные компоненты, все они дают вклад в полученный спектр (рисунок 4).

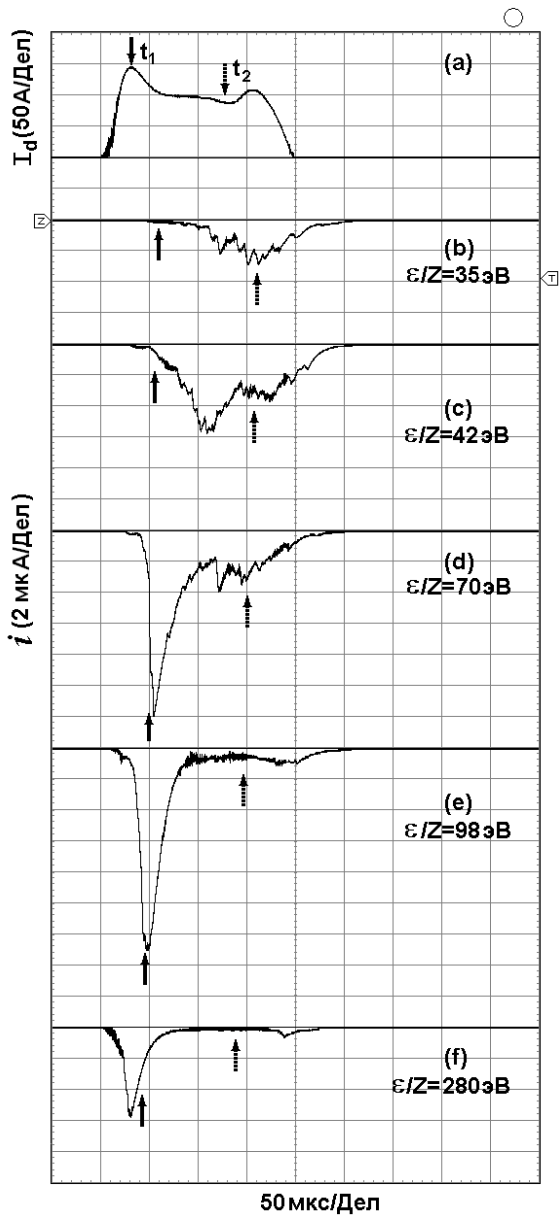


Рисунок 3 – Типичные осциллограммы тока анализатора для разных энергий ионов

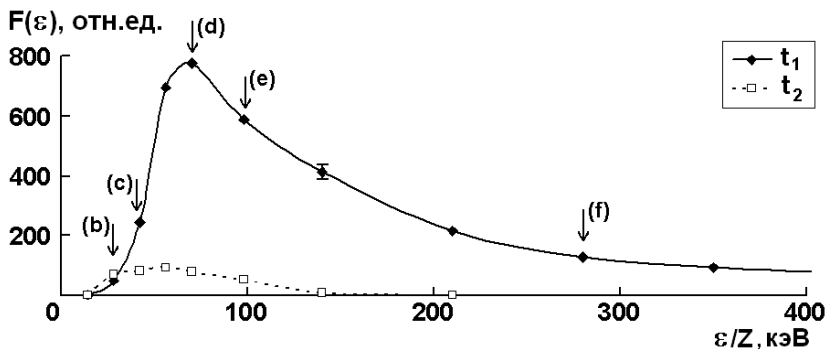


Рисунок 4 – Энергетические спектры ионов циркония в моменты  $t_1$  и  $t_2$ .

Отмеченные точки соответствуют осциллограммам на рисунке 3

На рисунке 5 представлены энергетические спектры разных материалов катода, измеренные в момент  $t_1$ .

Как можно увидеть из рисунка, форма спектров ионов для момента  $t_1$  практически одинакова при всех исследованных материалах. Также близки и наиболее вероятные энергии спектров.

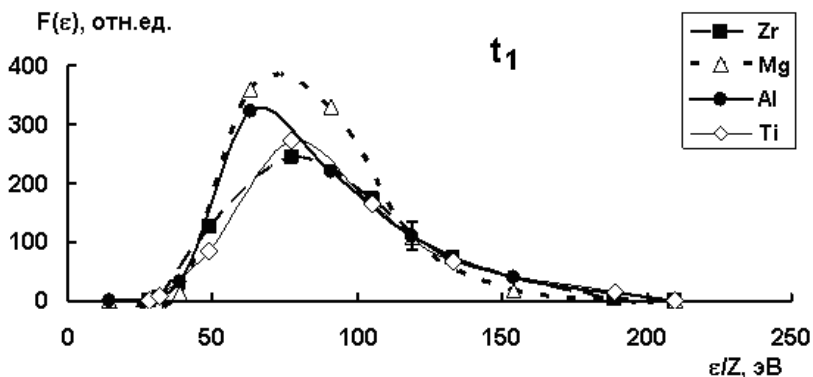
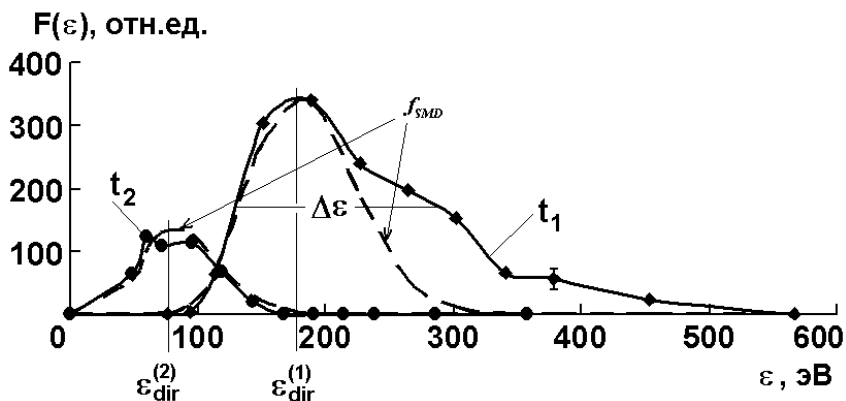


Рисунок 5 – Энергетические спектры ионов разных материалов, измеренные в момент  $t_1$

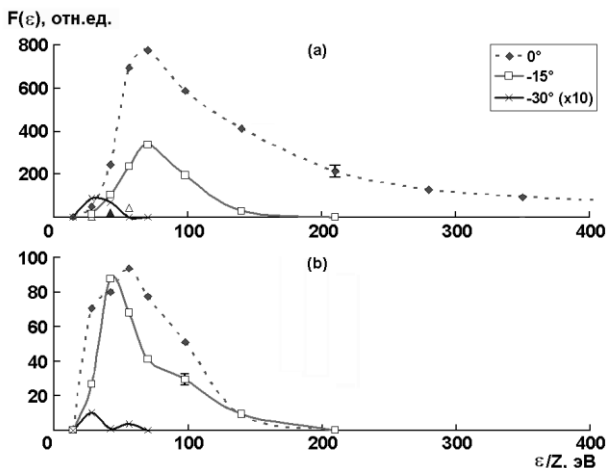


**Рисунок 6** – Энергетические спектры ионов для моментов  $t_1$  и  $t_2$  с аппроксимацией сдвинутом распределением Максвелла для циркониевого катода

На рисунке 6 показаны полученные “мгновенные” энергетические спектры ионов циркония для моментов  $t_1$  и  $t_2$ , измеренные с помощью энергоанализатора. В данном случае, эти распределения построены с учётом среднего заряда ионов и плазменного потенциала. Пунктиром показаны спектры, аппроксимированные сдвинутом распределением Максвелла. Следует отметить наличие высокоэнергетичного “хвоста” ионов для момента  $t_1$  (до нескольких сотен электрон-вольт). Благодаря этому “хвосту” сильно завышается средняя энергия ионов для момента  $t_1$ . Отмечается, что сдвинутое распределение Максвелла с хорошей точностью аппроксимирует энергетический спектр ионов для момента  $t_2$ . Для момента  $t_1$  точность аппроксимации существенно ниже из-за наличия хвоста высокоэнергетичных ионов.

Было проведено сравнение полученных результатов с данными других авторов. Отмечается, что в работах [4, 5] исследования, проводились для *стационарного* вакуумно-дугового разряда. В импульсной дуге средняя энергия ионов в работах [1, 3, 6,] измерялась на квазистационарной стадии дуги, что соответствует моменту  $t_2$  в данном эксперименте. Измеренные в данной работе энергии ионов для этого момента хорошо согласуются результатами, полученными другими авторами различными методиками, при этом расхождение результатов составляет 10–15%

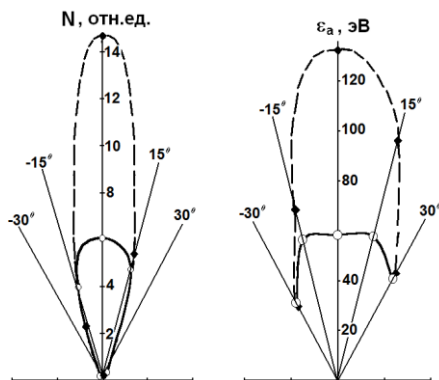




**Рисунок 7** – Энергетические спектры ионов на разных углах относительно оси пучка для  $t_1$  (a) и  $t_2$  (b)

Однако, отмечается значительное (около 50%) расхождение с данными других авторов для алюминия. Предполагается, что это связано с особенностями работы экспериментальных установок.

Измерены энергетические спектры ионов, движущихся под разными углами относительно оси плазменного пучка. Конструкция энергоанализатора была изменена так, чтобы он имел возможность поворачиваться относительно оси. Отмечается, что в отличие от выполненных другими авторами измерений, вследствие наличия коллимирующей входной трубки, энергоанализатор регистрировал ионы, движущиеся только под небольшими углами относительно входной диафрагмы анализатора (около  $5^\circ$ ). Как видно из рисунка 7, с увеличением угла относительно оси пучка уменьшается наиболее вероятная энергия в спектре, исчезает “хвост”, падает



**Рисунок 8** – Распределение по углам полного числа ионов (a) и средней энергии ионов для моментов  $t_1$  (пунктир) и  $t_2$  (сплошная)

амплитуда спектра, что означает уменьшение средней энергии и полного числа ионов. Этот вывод справедлив для обоих исследуемых моментов времени.

Из полученных спектров было построено распределение полного числа ионов и средней энергии по углам (рисунок 8) Показано, что практически все ионы плазменного пучка, движутся под углами в пределах  $\pm 15^\circ$  относительно оси пучка.

Проведён подробный анализ полученных результатов. Высказано предположение о существовании помимо газодинамического механизма ускорения ионов в катодной микроструе, также некоторого *дополнительного* механизма ионного ускорения в макроструе, работающего лишь в начальной стадии разряда.

Этот механизм, в принципе, может быть связан с влиянием форплазмы, рождающейся при инициации дуги. Однако, измерения при разных энергиях иницирующего разряда показали, что влиянием форплазмы можно пренебречь. С другой стороны, наблюдаемый эффект повышенной энергии в начальной стадии разряда может объясняться повышенными значениями температуры электронов и потенциала плазмы. Оценка электронной температуры и плазменного потенциала на разных стадиях разряда показала, что эти характеристики практически не меняются в течение разряда.

В качестве возможного механизма *дополнительного* ускорения ионов рассмотрен привлекавшийся ранее И.А. Кринбергом [8] для объяснения повышенного ионного заряда в начале импульсной дуги, связанный с малым размером площади основания катодной макроструи, и вследствие этого – относительно высокой плотностью плазмы в начале импульса. Вместе с тем, эти особенности ионных спектров в начальной стадии разряда: немаксвелловский вид (наличие «хвостов» высокоэнергичных частиц), равенство энергий на единицу заряда для разных материалов катода, узкая диаграмма направленности, – свидетельствуют о возможности реализации также механизма ускорения ионов в самосогласованном электрическом поле, возникающем во фронте катодной струи.

В главе 4 исследованы параметры многокомпонентного пучка металлических ионов со средним зарядом  $Z$ , сепарированного напряжением  $U_{acc}$  из плазменной струи импульсного вакуумно-дугового разряда.

На рисунке 9 представлены ВАХ плоского ленгмюровского зонда при разных  $U_{acc}$ . Из рисунка видно, что электронный ток зонда регистрировался во всем диапазоне ускоряющих напряжений  $U_{acc}$ . Вид ВАХ зонда, помещённого в сепарированный пучок ионов, отличается от наблюдаемого в плазме катодной струи.

В частности, переходный участок оказывается слабо выраженным, а на участок электронного насыщения характеристика выходит лишь при положительном смещении на зонде порядка ста вольт.

Из рисунка 9 видно, что электронная концентрация, оцененная из участка насыщения ВАХ зонда, при включении ускоряющего напряжения падает приблизительно на два порядка, в то время как концентрация ионов падает меньше, чем на порядок. Это означает нарушение квазинейтральности плазменного потока. Следовательно, в дрейфовом промежутке формируется положительный объемный заряд некомпенсированного пучка ионов, который должен приводить к установлению положительного потенциала. Это предположение было проверено с помощью измерений эмиссионным зондом.

Результат измерений плазменного потенциала при различных значениях ускоряющего напряжения  $U_{acc}$ , представленный на рисунке 11, показывает, что при  $U_{acc} < 1$  кВ потенциал пучка  $\phi$  относительно

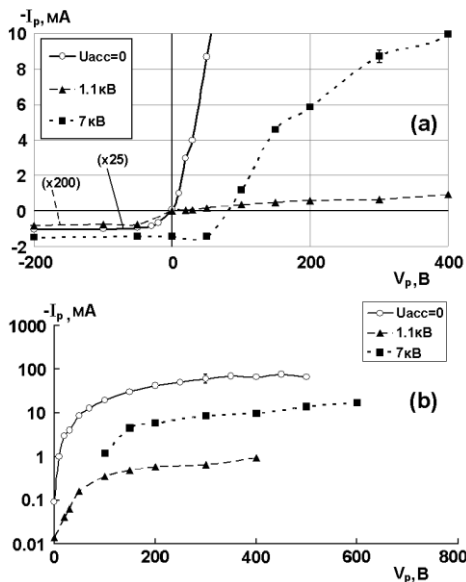
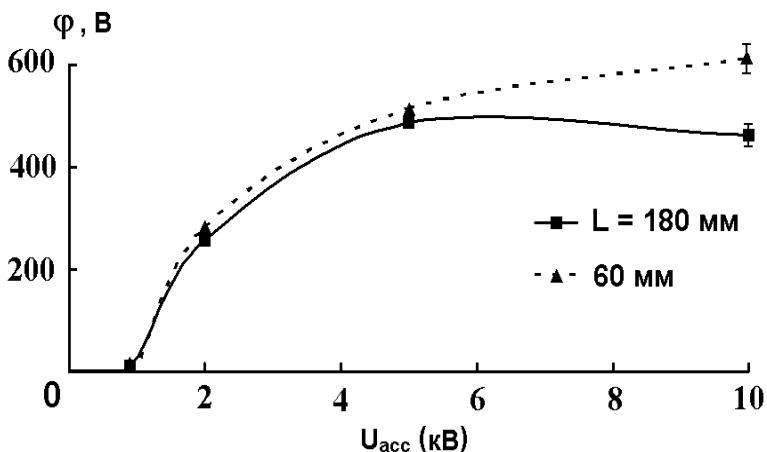


Рисунок 9 – ВАХ ленгмюровского зонда для разных сепарирующих напряжений  $U_{acc}$ . Ионная ветка (а), электронная ветка (б)

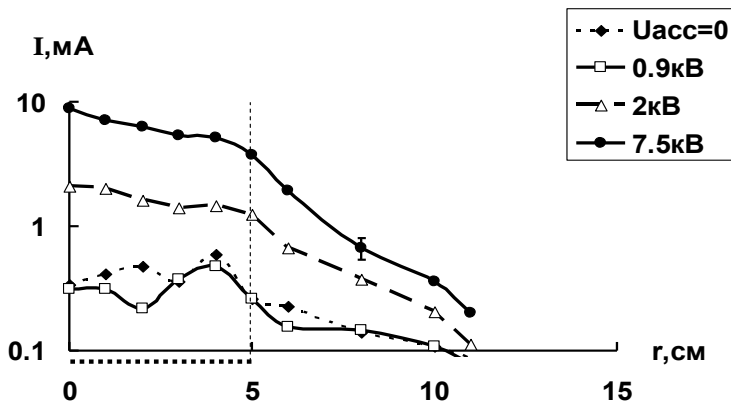


**Рисунок 10** – Зависимость от ускоряющего напряжения потенциала ионного пучка, измеренного на разных расстояниях  $L$  от входа в дрейфовый промежуток

мал и составляет, порядка  $10$  В. При  $U_{acc} > 1$  кВ потенциал быстро растет, достигая, приблизительно,  $300$  В при  $U_{acc} \approx 2$  кВ. Дальнейшее повышение ускоряющего напряжения до  $U_{acc} = 15$  кВ приводит к сравнительно медленному увеличению потенциала до  $600$  В. Заметим также, что, как показывает рисунок 10, значения потенциала, измеренные на разных расстояниях от входа в дрейфовый промежуток, мало отличаются во всем диапазоне ускоряющих напряжений, следовательно, распределение потенциала вдоль дрейфового промежутка является достаточно однородным.

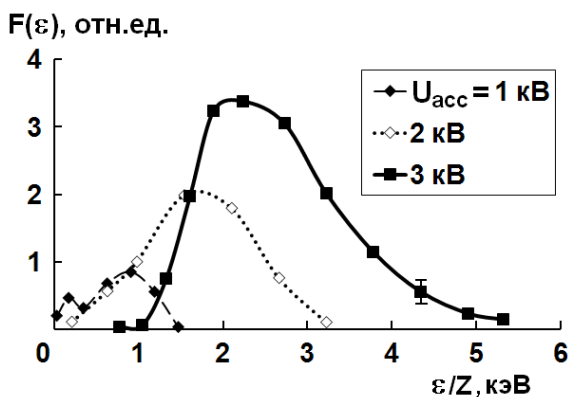
Принимая во внимание, что непосредственные измерения потенциала ионного пучка эмиссионным зондом в условиях сильного отклонения от квазинейтральности могут оказаться некорректными, потенциал оценивался также из ВАХ ленгмюровского зонда. Полученные обоими способами значения находятся в удовлетворительном согласии.

С помощью подвижного ленгмюровского зонда также было измерено поперечное распределение ионного тока в плазменном пучке (рисунок 11). Показано, что основная ширина пучка определяется размерами выходной сеткой системы извлечения, но имеется заметная доля ионов за пределами этих размеров.



**Рисунок 11** – Поперечное распределение ионного тока ленгмюровского зонда в плазменной струе вакуумно-дугового источника MEVVA-V. Пунктиром показано положение выходной сетки системы извлечения ионов

Были проведены детальные измерения энергетических спектров сепарированного пучка ионов. Согласно зондовым измерениям, значительное влияние объемного заряда на ионный спектр следует ожидать при достаточно большом значении ускоряющего напряжения  $U_{acc} > 1 \text{ кВ}$ . Для изучения этого эффекта были проведены измерения ионных спектров при различных значениях  $U_{acc}$ . Результаты, приведенные на рисунке 12, показывают,



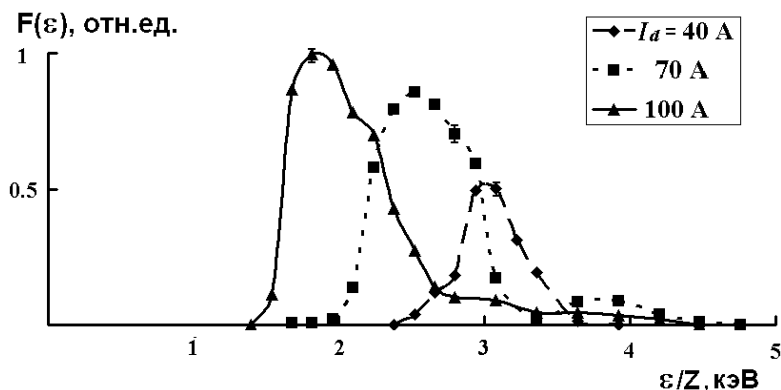
**Рисунок 12** – Энергетические спектры ионов пучка при различных значениях ускоряющего напряжения  $U_{acc}$  и амплитуде разрядного тока  $I_d = 100 \text{ А}$

что при  $U_{acc} = 1 \text{ кВ}$  максимум спектра, приблизительно, соответствует “электростатической” величине:  $\varepsilon_Z / Z = eU_{acc}$ . При больших ускоряющих напряжениях максимум лежит заметно ниже величины  $eU_{acc}$ .

Очевидно, что влияние объемного заряда на энергетический спектр ионного пучка определяется плотностью заряда, т.е. током ионного пучка, который при неизменной величине ускоряющего напряжения  $U_{acc}$  пропорционален разрядному току. Поэтому были проведены измерения энергетического спектра пучка при различных значениях амплитуды тока  $I_a$ .

Результаты измерений, приведенные на рисунке 13, показывают, что с уменьшением тока положение максимума спектра приближается к  $eU_{acc}$ , а его ширина существенно уменьшается, т.е. действительно влияние объёмного заряда на форму спектра падает.

В последнем разделе главы 4 с целью интерпретации экспериментальных результатов, рассмотрен процесс распространения в дрейфовом промежутке импульсного многокомпонентного ионного пучка и образование положительного объемного заряда. Отмечается, что, результаты численного моделирования согласуются с проведенным качественным анализом и не противоречат экспериментальным данным.



**Рисунок 13** – Энергетические спектры ионов пучка для ускоряющего напряжения  $U_{acc} = 3 \text{ кВ}$  при различных значениях амплитуды разрядного тока

## Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. С помощью зондовых методик измерены макроскопические параметры плазменного потока импульсного вакуумно-дугового разряда ионного источника. Показано, что электронная температура и плазменный потенциал практически не меняются в течение разряда, а концентрация частиц в начале разряда выше, чем в последующей, квазистационарной, стадии.

2. Для исследованных материалов катода с разными электрофизическими характеристиками наблюдается существенное увеличение и направленной энергии, и ширины 'мгновенных' энергетических спектров ионов, измеренных в начальной, переходной, стадии разряда, по сравнению со спектрами ионов последующей квазистационарной стадии разряда.

3. С помощью электростатического энергоанализатора показано, что в начальной, переходной, стадии разряда спектры имеют аналогичную форму для различных материалов катода и характеризуются сравнительно высокими значениями наиболее вероятной энергии  $\varepsilon_m / Z$  (близкими к  $70 \text{ эВ}$ ), а также значительными «хвостами» ускоренных ионов с энергиями до нескольких сотен электрон-вольт. На более поздней, квазистационарной, стадии величина  $\varepsilon_m / Z$  уменьшается (до, приблизительно,  $40 \text{ эВ}$ ).

4. Измерения энергетического спектра многокомпонентного пучка ионов со средним зарядом  $Z$ , сепарированного сеточной системой из импульсного плазменного потока, показали, что средняя энергия ионов оказывается ниже «электростатической» величины  $\varepsilon_Z / Z = eU_{acc}$ , а ширина спектра оказывается существенно выше, чем в исходном плазменном потоке.

5. С увеличением ускоряющего напряжения  $U_{acc}$  энергия ионов  $\varepsilon_m$  приближается к величине  $\varepsilon_Z / Z = eU_{acc}$ , так что при  $U_{acc} = 10 \text{ кВ}$  максимум энергетического спектра оказывается вблизи этой величины. Наблюдается также дальнейшее уширение спектра с ростом напряжения  $U_{acc}$ .

6. Зондовые измерения показали, что объемный заряд ионов в дрейфовом промежутке формируется при ускоряющем напряжении  $U_{acc}$ , превышающем, приблизительно,  $1 \text{ кВ}$ . Действием нестационарного электрического поля этого заряда можно объяснить

наблюдаемый вид ионного энергетического спектра и его зависимость от тока разряда и величины ускоряющего напряжения. Результаты модельных расчетов подтверждают это предположение.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Паперный В.Л. Особенности измерений ленгмюровским зондом параметров сверхзвукового потока металлической плазмы / В.Л. Паперный, С.П. Горбунов, В.И. Красов, А.А. Черных, П.В. Тихонравов // Материалы V российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды. -Москва, МИФИ. -2006. -С.16-18.

2. Gorbunov S.P. Characteristics of metal ions acceleration in pulsed vacuum arc / S.P. Gorbunov, V.I. Krasov, V.L. Paperny, A.A. Chernih, P.V. Tichonravov // **Известия вузов, Физика.** -2006. -№8, приложение. -С.19-21.

3. Паперный В.Л. Энергетический спектр многокомпонентного потока ускоренных ионов / В.Л. Паперный, В.А. Шкляев, А.А. Черных // **Письма в ЖТФ.** -2007. -Т.32. -В.24. -С.26-32.

4. Paperny V.L. Energy distribution of the multi-species intensive beam of the accelerated metal ions / V.L. Paperny, V.A. Shklyayev, A.A. Chernih // The 12<sup>th</sup> Int. Conf. On Ion Sources Program and Abstract Book. -Jejudo, Korea. -2007, August 26-31. -P.124.

5. Коробкин Ю.В. Формирование энергетического спектра многокомпонентного ионного пучка, движущегося в дрейфовом промежутке / Ю.В. Коробкин, В.Л. Паперный, А.А. Черных // Тез. Докладов. XXXV конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. -Звенигород. -2008, 11–15 февраля. -С.245.

6. Paperny V.L. Influence of a Space Charge on Energy Spectrum of a Multi-Species Accelerated Ion Beam / V.L. Paperny, V.A. Shklyayev, A.A. Chernih // Proc. of 15-th Intern. Symp. On High Current Electronics. -Tomsk, Russia. -2008. -P.37-41.

7. Paperny V.L. On Abnormal Acceleration of Ions at Initial Stage of a Pulse Vacuum Arc / V.L. Paperny, A.A. Chernih // Proc. of 15-th Intern. Symp. On High Current Electronics. -Tomsk, Russia. -2008. -P.60-62.

8. Paperny V.L. Characteristics of plasma flow from a pulse vacuum arc / V.L. Paperny, A.A. Chernih // Proc. XXIII-rd Int. Symp. On



Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. –Bucharest. -2008. -P.307-309.

9. Paperny V.L. Parameters of Accelerated multi-species pulse ion beam propagating through a drift gap / V.L. Paperny, V.A. Shklyayev, A.A. Chernih // Proc. XXIII-rd Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Bucharest. -2008. -P.511-513.

10. Паперный В.Л. Особенности вольтамперных характеристик плоского ленгмюровского зонда в некомпенсированном пучке ускоренных ионов / В.Л. Паперный, А.А. Черных // Материалы VI российского семинара «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды. - Москва, МИФИ. -2008. -С.124-126.

11. Паперный В.Л. Влияние объемного заряда на энергетический спектр многокомпонентного ионного пучка / В.Л. Паперный, В.А. Шкляев, А.А. Черных // **Физика плазмы**. -2009. -Т.35. -№2. -С.202-208.

12. Коробкин Ю.В. Формирование энергетического спектра многокомпонентного ионного пучка, движущегося в дрейфовом промежутке / Ю.В. Коробкин, В.Л. Паперный, А.А. Черных // **Прикладная физика**. -2009. -№ 1. -С.60-65.

13. Paperny V.L. Ion acceleration at different stages of a pulsed vacuum arc / V.L. Paperny, A.A. Chernih, N.V. Astrakchantsev, N.V. Lebedev // **J. Phys. D: Appl. Phys.** -2009. -V.42, -P.155201-155210.

### Цитируемая литература

1. Anders A. Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field / A. Anders, G.Yu Yushkov // J. Phys.D: Appl. Phys. -2002. -V.91. -N.8. -P.4824-4832.
2. Bugaev A.S. Study of directed ion velocities in a vacuum arc by an emission method / A.S. Bugaev, V.I. Gushenets, A.G. Nikolaev, E.M. Oks, G.Yu. Yushkov // Tech. Phys. -2000. -V.45. -N.9. -P.1135-1140.
3. Anders A. Charge-state-resolved ion energy distribution functions of cathodic vacuum arcs: A study involving the plasma potential and biased plasmas / A. Anders, E.M. Oks // J. Appl. Phys. -2007. -V.102. P.043304/1-6.
4. Kutzner J. Integrated ion flux emitted from the cathode spot region of a diffuse vacuum arc / J. Kutzner, H.G. Miller // J. Phys. D: Appl. Phys. -1992. -V.25. -N.4. P.686-693.
5. Лунев В.М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги / В.М. Лунев, В.Г. Падалка, В.М. Хороших // ЖТФ. 1977. Т.47. №7. p.1491-1495.
6. Rosén J. Charge-state-resolved ion energy distributions of aluminum vacuum arcs in the absence and presence of a magnetic field / J. Rosén, A. Anders, S. Mráz, J.M. Schneider // J. Appl. Phys. -2005. -V.97. -I.10. -P.103306-103306-6.
7. Anders A. A periodic table of ion charge-state distributions observed in the transition region between vacuum sparks and vacuum arcs // IEEE Trans. Plasma Sci. -2001. V.29. -N.2. -P.393-398.
8. Krinberg I.A. Additional ionization of ions in the interelectrode gap of vacuum arc / I.A. Krinberg, E.A. Zverev // Plasma Sources Science and technology. 2003. №12. P. 372379.