На правах рукописи

# Исакова Юлия Ивановна

## Генерация мощного ионного пучка из взрывоэмиссионной плазмы в ионном диоде с магнитной самоизоляцией

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в лаборатории пучково-плазменных технологий Института физики высоких технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Пушкарев Александр Иванович
Официальные оппоненты:	Бурдовицин Виктор Алексеевич, доктор техниче- ских наук, профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектро- ники, г. Томск.
	Ковивчак Владимир Степанович, кандидат физи- ко-математических наук, старший научный со- трудник комплексного научно-исследова- тельского отдела региональных проблем Феде- рального государственного бюджетного учреж- дения науки Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск.
Ведущая организация:	Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита диссертации состоится 30 сентября 2014 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (634050, г. Томск, проспект Ленина, 2а).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте http://portal.tpu.ru/council/912/worklist.

Автореферат разослан "\_\_\_\_ 2014 г.

Учёный секретарь диссертационного совета кандидат физико-математических наук, доцент

А. В. Кожевников

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования связана с получением новых научных данных об основных процессах, обеспечивающих генерацию импульсного ионного пучка из взрывоэмиссионной плазмы в режиме магнитной самоизоляции при апериодическом режиме зарядки двойной формирующей линии (ДФЛ). Тема исследований имеет практическую направленность. Радиационнопучковое модифицирование металлических изделий мощными ионными пучками (МИП) обеспечивает высокие скорости нагрева и последующего охлаждения их приповерхностного слоя, превышающие  $10^7-10^8$  К/с. При этом образуются твердые растворы и вторичные фазы, не характерные для равновесной диаграммы фазовых состояний. Сочетание высокого пресыщения твердого раствора, дисперсного, структурного и субструктурного строения создает уникальные эффекты повышения поверхностной прочности, износостойкости и улучшения других свойств материалов.

**Целью** настоящей работы является определение основных закономерностей процесса генерации импульсных ионных пучков в диоде со взрывоэмиссионным катодом в режиме магнитной самоизоляции при апериодическом режиме зарядки ДФЛ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование зарядки формирующих линий при работе на диод с магнитной самоизоляцией с использованием и без использования зарядной индуктивности в ДФЛ;

2. Исследование плазмообразования и генерации ионного пучка в ионном диоде в двухимпульсном режиме;

3. Статистические исследования влияния условий плазмообразования на стабильность параметров МИП в серии импульсов;

4. Исследование процессов, обеспечивающих снижение электронной компоненты полного тока в диодах с магнитной самоизоляцией;

5. Разработка и исследование новой (спиральной) конструкции диода с магнитной самоизоляцией;

6. Разработка тепловизионной диагностики полной энергии МИП и распределения его плотности энергии по сечению.

Научная новизна работы состоит в следующем:

Впервые показано, что при работе ДФЛ без зарядной индуктивности (переход от периодического режима зарядки формирующих линий к апериодическому) на ионный диод со взрывоэмиссионным катодом в двухимпульсном режиме обеспечивается формирование первого (плазмообразующего) импульса напряжения большей длительности, что создает более благоприятные условия для плазмообразования.

Впервые разработана и исследована спиральная геометрия диода с магнитной самоизоляцией. В спиральном диоде показана возможность повышения энергетической эффективности генерации МИП до 20% за счет превышения времени нахождения электронов в анод-катодном зазоре над временем ускорения ионов.

Разработана тепловизионная диагностика полной энергии и распределения плотности энергии МИП по сечению. Данный метод впервые адаптирован для измерения параметров ионного пучка при двухимпульсном режиме работы диода. Исследовано влияние электронов, взрывоэмиссионной плазмы и ИКизлучения от диода на нагрев мишени, а также влияние абляции материала мишени на показания тепловизионной диагностики. Тепловизионная диагностика позволяет измерять полную энергию МИП и распределение плотности энергии на мишени в диапазоне 0.05–5 Дж/см<sup>2</sup>, с пространственным разрешением 1 мм, время измерения не превышает 0.1 с.

**Практическая значимость** работы определяется тем, что ее результаты использованы при разработке технологического генератора МИП с большим ресурсом работы и высокой стабильностью полной энергии и плотности энергии ионного пучка в серии импульсов. Результаты диссертационной работы использованы в плановой научной деятельности Казанского ФТИ КазНЦ РАН, Института сильноточной электроники СО РАН, в учебном процессе кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета (имеются акты об использовании результатов НИР).

#### Положения, выносимые на защиту

1. Изменение режима зарядки формирующих линий - переход в апериодический режим работы при отсутствии зарядной индуктивности в ДФЛ обеспечивает формирование первого (плазмообразующего) импульса напряжения большей длительности, что создает более благоприятные условия для плазмообразования в диоде со взрывоэмиссионным катодом.

2. Генерация ионного тока в диоде со взрывоэмиссионным катодом идет неоднородно по площади диода и фокусировка МИП позволяет снизить среднеквадратичное отклонение плотности ионного тока в серии импульсов с 30-40% до 18-20% за счет взаимной компенсации случайных флуктуаций плотности ионного тока в разных частях диода.

3. Использование спиральной геометрии катода ионного диода с магнитной самоизоляцией обеспечивает значительное увеличение времени нахождения электронов в А-К зазоре и рост эффективности преобразования энергии, подводимой к диоду, в энергию ускоренных ионов до 20%.

#### Степень достоверности и апробация результатов работы

Выводы, сделанные в работе, были получены на основе комплексных исследований, включающих анализ ВАХ диода, измерение плотности ионного тока, состава и энергетического спектра МИП, тепловизионную и акустическую диагностику полной энергии МИП и распределения плотности энергии МИП по сечению. При исследованиях использовались современные методики и оборудование для измерения параметров ионных пучков, адаптированные для двухимпульсного режима работы ионного диода. Калибровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отражает работу ускорителя в режиме короткого замыкания и при работе на активную нагрузку 4-10 Ом (ускоряющее напряжение 250-300 кВ). Точность измерения напряжения, полного тока диода, плотности ионного тока, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать ионный и электронный ток с погрешностью не хуже 10%.

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на профильных международных конференциях: 18th International Conference on High Power Particle Beams EEPPC-BEAMS 2010, Jeju, South Korea, 2010; IEEE Pulsed Power Conference 2011, Chicago, 2011; 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and 19th International Conference on High-Power Particle Beams, Karsruhe, Germany, 2012; 8-ой международной конференции Ядерная и радиационная физика, Алма-Ата, Казахстан, 2011; 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Томск, 2012, a также на конференциях студентов и молодых ученых.

### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 2 монографии и 20 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК.

### Личный вклад автора

Диссертационная работа является итогом комплексных исследований процессов генерации МИП в лаборатории пучково-плазменных технологий Института физики высоких технологий Томского политехнического университета, начатых 2009 году. При непосредственном участии автора были выполнены эксперименты и получены данные, которые позволили выявить основные закономерности генерации ионных пучков в диодах с самоизоляцией. Автор участвовал в постановке и проведении экспериментов, обработке полученных данных, а также подготовке к публикации статей.

Автором самостоятельно разработана методика измерения параметров мощных ионных пучков с помощью тепловизора. Данная диагностика впервые использовалась для исследования диода в двухимпульсном режиме и позволила исследовать многие процессы в диодах, а также оптимизировать режим работы ускорителя для более стабильной генерации МИП.

Автором самостоятельно сформулированы защищаемые научные положения, сделаны выводы. Обсуждение задач исследования, проведение экспериментов и анализ результатов проводилось совместно с научным руководителем и соавторами.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит их введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 128 страницах машинописного текста, включая 99 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 97 наименований.

# СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель работы, поставлены задачи и аргументирована научная новизна результатов исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения.

<u>В первой главе</u> приведен анализ результатов исследования диодов с магнитной самоизоляцией, известных в литературе. Имеющиеся литературные данные позволили сделать следующие **выводы**:

1. Большинство работ было направлено на исследование диодов с диэлектрическим анодом. Для таких диодов достаточно иметь один импульс, в течение которого создается плазма и ускоряется ионы. Главным недостатком диэлектрических анодов является их недолговечность, связанная с ограниченным ресурсом работы диэлектрических покрытий.

2. Применение ионных диодов с самоизоляцией со взрывоэмиссионным плазмообразующим электродом (катодом) представляется перспективным для технологических применений МИП, связанных с модификацией поверхности материалов.

3. К моменту начала работ по диссертации в литературе имелось недостаточно данных исследований диода со взрывоэмиссионным электродом в режиме магнитной самоизоляции. В частности, нет данных о влиянии условий плазмообразования на характеристики МИП (пространственная однородность, повторяемость в серии импульсов).

4. Выполненный анализ диодов с самоизоляцией позволяет сделать вывод о возможности получения высокой эффективности генерации МИП, сравнимой с эффективностью, получаемой в ионных диодах с внешнем магнитным полем, с учетом затрат на формирование внешнего магнитного поля.

<u>Во второй главе</u> приведено описание экспериментальной установки и основных конструкций диодов с магнитной самоизоляцией. Описано диагностическое оборудование для измерения ВАХ диода и параметров МИП. Представлены экспериментальные данные баланса энергии в узлах ускорителя.

Исследования проведены на ускорителе ТЕМП-4М в режиме формирования сдвоенных импульсов - первый (плазмообразующий) отрицательный (400-500 нс, 100-150 кВ) и второй (генерирующий) положительный (150 нс, 200-250 кВ). Плотность энергии пучка 0.5-5 Дж/см<sup>2</sup> (для разных диодов), частота следования импульсов 5-10 имп./мин. Для генерации ионного пучка в ускорителе ТЕМП-4М использовали диод с магнитной самоизоляцией электронов. Основная часть исследований выполнена на диодах полосковой геометрии размером 22 см×4.5 см. Зазор между потенциальным и заземленным электродами выбирали из условия согласования импеданса диода с волновым сопротивлением двойной формирующей линии (5 Ом), он составлял 7-10 мм. Потенциальный электрод изготовлен из графита, заземленный электрод – из нержавеющей стали с прорезями 0.4 см × 2 см, прозрачность 70%. На рисунке 1 показана блоксхема диодного узла и типичные осциллограммы, характеризующие работу диода с магнитной самоизоляцией в двухимпульсном режиме.



Рисунок 1 - Схема диодного узла (а): ионный пучок (1); потенциальный электрод (2); заземлённый электрод (3); мишень (4); CaF<sub>2</sub> окно (5); тепловизор (6). Регистрируемые осциллограммы (б): ускоряющего напряжения (6), полного тока диода (7) и плотности ионного тока (8).

Для формирования МИП с плотностью энергии более 1 Дж/см<sup>2</sup> мы использовали полосковый диод с фокусирующей геометрией. Ток диодного узла измеряли поясом Роговского с обратным витком. Напряжение на потенциальном электроде диода контролировали высокочастотным высоковольтным делителем, установленным перед диодным узлом.

Плотность ионного тока измеряли коллимированным цилиндром Фарадея (КЦФ) с магнитной отсечкой электронов. Электрические сигналы с датчиков регистрировали осциллографом Tektronix 2024В (200 МГц, 5·10<sup>9</sup> отсч./с). Все исследованные конструкции диодов со взрывоэмиссионным катодом эффективно работали при давлении 0.1 Па с ресурсом более 10<sup>6</sup> импульсов.

особенностью ускорителей серии Отличительной ТЕМП является наличие зарядной индуктивности, соединяющей электрод внутренней линии ДФЛ с корпусом. Зарядная индуктивность, включенная параллельно диоду, обеспечивает зарядку внутренней линии ДФЛ, но снижает эффективность передачи энергии из ДФЛ в диод. При модернизации ускорителя ТЕМП-4 в 2009 году авторами [Патент 86374 РФ/Пушкарев А.И. и др.] предложено убрать индуктивность в ДФЛ. Зарядка происходила только зарядную через предварительный газовый разрядник и диод в процессе формирования и развития взрывоэмиссионной поверхности потенциального плазмы на электрода. Ha рисунке осциллограммы 2 показаны напряжения на потенциальном электроде диода.



Рисунок 2 - Осциллограммы напряжения на потенциальном электроде ускорителя ТЕМП с зарядной индуктивностью (1) и без зарядной индуктивности (2).

При отсутствии зарядной индуктивности процесс зарядки емкости между средним и внутренним электродами ДФЛ продолжается более 300 нс, полярность напряжения на потенциальном электроде диода не меняется (рисунок 2). Это создает более благоприятные условия для формирования сплошного плазменного слоя на всей рабочей поверхности потенциального электрода. Если зарядка внутренней линии идет через зарядную индуктивность и диод, то время зарядки (и соответственно длительность первого импульса напряжения) не превышает 120 нс. За это время не более 50% рабочей поверхности графитового потенциального электрода заполняется взрывоэмиссионной плазмой. Это вызывает значительную неоднородность формируемого ионного пучка в ускорителях серии ТЕМП.

Во второй главе выполнен анализ причин ограничения тока через диод на первом импульсе. Экспериментально установлено, что основным фактором, ограничивающим ток через диод на первом импульсе и обеспечивающим медленную зарядку внутренней линии ДФЛ, является ограничение электронного потока через диод магнитной самоизоляцией и последующим ограничением тока объемным зарядом.

В главе 2 представлена модернизированная времяпролетная методика контроля параметров ионного пучка на основе одного быстродействующего датчика - КЦФ с магнитной отсечкой. Методика позволяет определить состав пучка (тип ионов и кратность ионизации), абсолютные значения плотности тока ионов и энергетический спектр для каждого типа ионов с погрешностью не хуже 20%.

В главе 2 представлена оригинальная тепловизионная диагностика распределения плотности энергии пучка для диода, работающего в двухимпульсном режиме. Диагностика параметров МИП проводилась по тепловому отпечатку на мишени с использованием тепловизора Fluke TiR10. Схема регистрации приведена на рисунке 1. Выполнен анализ влияния электронов на нагрев мишени в течение первого импульса для различных конструкций диодов, а также анализ вклада других факторов (взрывоэмиссионая плазма, ИКизлучение от диода, абляция материала мишени) на результаты измерения плотности энергии ионного пучка тепловизионной диагностикой.

В главе 2 приведены результаты калибровки датчиков тока и напряжения. Калибровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отра-

жает работу ускорителя в режиме короткого замыкания и при работе на активную нагрузку 4-10 Ом (ускоряющее напряжение 250-300 кВ). Точность измерения напряжения, полного тока диода, плотности ионного тока, частотные характеристики диагностического оборудования позволяют рассчитать ионный и электронный ток с погрешностью не хуже 10%.

<u>Третья глава</u> посвящена исследованию плазмообразования и генерации МИП в диоде с магнитной самоизоляцией и взрывоэмиссионным катодом.

Для эффективной генерации МИП прежде всего нужно сформировать на поверхности анода плотную плазму, концентрация ионов в которой должна значительно превышать концентрацию ионов в МИП. В ускорителе ТЕМП-4М для формирования плазмы используется явление взрывной эмиссии электронов. Двойная формирующая линия генерирует сдвоенные импульсы - первый импульс отрицательной полярности и второй положительной полярности. В течение первого импульса на поверхности потенциального электрода (катода) формируется взрывоэмиссионная плазма. В течение второго импульса ионы эмитируют из плазмы и ускоряются в А-К зазоре диода.

В главе 3 выполнен анализ режимов работы диода в течение первого импульса. Анализ выполнен на основе сравнения полного тока диода с расчетной величиной критического тока *I*<sub>crit</sub>. Результаты анализа приведены на рисунке 3.



Рисунок 3– Осциллограммы ускоряющего напряжения (1), полного тока в диоде (2) и изменение критического тока (3) в диоде в течение первого импульса.

Расчет критического тока выполнен по формуле:

$$I_{crit} = \frac{8500 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot b}{6.28(d_0 - vt)} \qquad \beta = \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right)^{0.5} \qquad \gamma = 1 + \frac{U}{0.511} \qquad (1)$$

где b – ширина электрода,  $d_0$  - геометрический А-К зазор; U – ускоряющее напряжение, приложенное к А-К зазору (в МВ);  $\beta u \gamma$  определяются из выражений.

В знаменателе формулы (1) введена поправка ( $d_0$ -vt), учитывающая сокращение геометрического А-К зазора за счет расширения плазмы. При токах, меньших  $I_{crit}$ , поток в диоде будет одномерным и ламинарным. При  $I > I_{crit}$  приближение одномерного потока перестает работать. В главе 3 также выполнен анализ режимов работы диода и динамики взрывоэмиссионной плазмы в А-К зазоре по изменению импеданса диода. В используемых полосковых диодах ионная компонента тока не превышает 10% полного тока диода. Поэтому в пределах точности измерения ВАХ динамику взрывоэмиссионной плазмы в А-К зазоре можно контролировать по полному току диода с использованием одномерного соотношения Чайлда-Ленгмюра для электронной компоненты тока. С учетом сокращения А-К зазора при расширении плазменной эмиссионной поверхности электронный ток равен:

$$I_{e}(t) = \frac{4 \cdot \varepsilon_{0} \sqrt{2e}}{9\sqrt{m_{e}}} \cdot \frac{U^{3/2} \cdot S}{d^{2}} = \frac{2.33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2} \cdot S}{(d_{0} - vt)^{2}}$$
(2)

где U – напряжение, приложенное к диоду;  $m_e$  - масса электрона; e – заряд электрона, S – рабочая площадь диода, v – скорость расширения плазмы.

Тогда импеданс диода можно рассчитать по соотношению:

$$R_{pacy} = \frac{U}{I_e} = \frac{(d_0 - v \cdot t)^2}{2.33 \cdot 10^{-6} \cdot S \cdot U^{1/2}}$$
(3)

На рисунке 4 приведены экспериментальные и расчетные значения импеданса диода.



Рисунок 4 - Осциллограмма напряжения (1) и величина импеданса полоскового плоского диода с самоизоляцией (2 – эксперимент, 3 – расчет), зазор 8 мм.

В течение первого (отрицательного) импульса напряжения можно выделить два режима работы диода: режим дискретной эмиссионной поверхности и режим ограничения объемным зарядом. С момента приложения напряжения к диоду до формирования сплошной плазменной поверхности на потенциальном электроде (режим дискретной эмиссионной поверхности, 0<t<250 нс на рисунке 4) ток диода ограничивается магнитной самоизоляцией и эмиссионной способностью катода. Импеданс диода больше расчетных значений, полученных при условии неограниченной эмиссионной способности потенциального электрода (катода). Снижение импеданса диода при этом связано с увеличением площади эмиссионной поверхности на графитовом электроде, сокращением А-К зазора за счет движения взрывоэмиссионной плазмы к заземленному электроду и снижением магнитной самоизоляции электронного потока.

В дальнейшем, после заполнения поверхности потенциального электрода плазмой и снижения полного тока ниже критической величины (250 нс <t< 600 нс на рисунках 3 и 4), полный ток диода ограничивается только объемным зарядом электронов в А-К зазоре. Экспериментальные значения импеданса диода при этом хорошо описываются соотношением (3) при условии образования сплошного плазменного слоя на всей рабочей поверхности потенциального электрода (катода) и постоянной скорости расширения взрывоэмиссионной плазмы, равной 1.3±0.1 см/мкс.

Дополнительным подтверждением образования сплошного плазменного слоя на всей рабочей поверхности потенциального электрода являются данные исследования генерации МИП в плоском диоде с помощью тепловизионной диагностики. На рисунке 5 приведены результаты измерения распределения плотности энергии по сечению МИП в плоском полосковом диоде при А-К зазоре 8 мм (начало диода) и 10 мм (конец диода). Получено, что геометрические размеры термограммы соответствуют размерам диода (22 см×4.5 см).



Рисунок 5 - Тепловой отпечаток МИП (три разных импульса) и распределение плотности энергии на мишени в продольном (1) и поперечном сечении (2).

Дополнительным подтверждением генерации МИП со всей рабочей поверхности ионного диода с магнитной самоизоляцией являются отпечатки МИП на латунной пластине, установленной непосредственно на заземленном электроде, см. рисунок 6.



Рисунок 6 - Отпечаток МИП на мишени за катодной решеткой.

Так как генерация МИП из области анода, где отсутствует плазма, не происходит, наличие отпечатка МИП на всей поверхности мишени указывает на эффективное плазмообразование на всей рабочей поверхности анода. При использовании зарядной индуктивности (до модернизации ускорителя ТЕМП- 4М) плазма формировалась не на всей поверхности анода [Ремнев Г.Е. //Автореферат дисс. док. тех. наук, Томск, 1994 г.].

На основе результатов трех независимых методик измерения - анализа ВАХ диода, тепловизионных измерений и анализа отпечатка МИП можно сделать вывод о том, что в течение первого импульса напряжения на поверхности потенциального электрода (катода) образуется сплошной плазменный слой.

В главе 3 выполнены исследования влияния условий плазмообразования на стабильность параметров МИП в серии импульсов. На рисунке 7 и в таблице 1 приведены результаты статистической обработки измерений при работе ускорителя ТЕМП-4М с плоским диодом без зарядной индуктивности в ДФЛ.



Рисунок 7 - Изменение амплитуды импульса ускоряющего напряжения (a) и амплитуды импульса плотности ионного тока (б) в серии 50 импульсов.

· · ·	<b>J</b> 1	I I	
Параметры	Серия 1	Серия 2	СКО за 2 серии
Напряжение	232 кB ± 6%	223 кB ± 6%	6%
Ток	60 кА ± 9%	61 кА ± 11%	10%
Длит-ть 1-го импульса	454 нс ± 10%	458 нс ± 10%	10%
Плотность тока МИП 1	$14 \text{ A/cm}^2 \pm 46\%$	$9 \text{ A/cm}^2 \pm 29\%$	280/
Плотность тока МИП 2	$22 \text{ A/cm}^2 \pm 37\%$	$16 \text{ A/cm}^2 \pm 39\%$	30%

Таблица 1. Стабильность работы ускорителя ТЕМП-4М при генерации МИП

Статистический анализ работы ускорителя показал, что при высокой стабильности выходных параметров ДФЛ (напряжение, ток, длительность импульса) для диодов со взрывоэмиссионным графитовым катодом характерна низкая воспроизводимость плотности тока ионного пучка в серии импульсов.

Для планарного полоскового диода среднеквадратичное отклонение (СКО) плотности ионного тока в серии из 300 импульсов достигает 35-45% и наблюдается закономерное уменьшение амплитуды плотности тока с ростом числа импульсов.

Возможная причина снижения амплитуды импульса плотности ионного тока с ростом номера импульса в серии – ухудшение эмиссионной способности катода за счет нагрева потенциального электрода. После серии 50 импульсов потенциальный электрод нагревается до 130-140 °C. Если источником анодной

плазмы является слой адсорбированных (в течение паузы между импульсами, равной 10 сек) молекул остаточного газа в диодной камере, то нагрев электрода ухудшает адсорбцию. В этом случае состав анодной плазмы может измениться. Если в составе остаточного газа присутствуют пары вакуумного масла, то с уменьшением слоя адсорбированных молекул  $C_nH_{2n}$  на поверхности графитового потенциального электрода уменьшается содержание протонов в МИП. Это приведет к уменьшению плотности ионного тока в А-К зазоре диода при ограничении плотности тока объемным зарядом.

В серии экспериментов с плоским полосковым диодом после пропитки его рабочей поверхности вакуумным маслом удалось уменьшить СКО плотности тока МИП с 29-46% (таблица 1) до 20-29%. На рисунке 8 и в таблице 2 приведены результаты статистической обработки результатов измерений.



Рисунок 8 - Изменение амплитуды импульса ускоряющего напряжения (а) и амплитуды импульса плотности ионного тока (б) в серии 50 импульсов после пропитки маслом графитового электрода.

Та	блица	2.	Стабилі	ьность	работь	и ускорите	еля TEN	МП-4М	[ при	гене	рации	ΜИΠ	(после
пp	опитки	1 M	аслом гр	рафито	вого эл	ектрода)							

	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4	СКО за 4 серии
Напряжение, кВ	$242 \pm 7\%$	241 ±5.4%	258±5.7%	$255\pm5\%$	5.8%
Длит. 1-го им- пульса, нс	457 ±9%	470 ±9%	453 ±11%	451±10%	10%
Плотность тока МИП, А/см <sup>2</sup>	34 ±20%	38±27%	30 ±27%	35 ±29%	27%

В диоде с графитовым взрывоэмиссионным катодом важную роль в плазмообразовании играет наличие на поверхности (и в порах) графитового электрода диэлектрических включений (капли масла). Изменение условий плазмообразования (пропитка маслом графитового электрода) позволило повысить стабильность генерации МИП (СКО плотности тока уменьшилось с 29-46% до 20-29%), закономерное снижение плотности ионного тока не наблюдалось. Среднее значение плотности тока за 300 импульсов оставалось постоянным и было больше, чем в случае без пропитки электрода маслом.

Для установления наиболее важных факторов, влияющих на нестабильность генерации МИП в диоде с магнитной самоизоляцией, был выполнен корреляционный анализ плотности ионного тока, формируемого одновременно в разных частях ионного диода. Плотность ионного тока была измерена двухсекционным КЦФ или двумя отдельными КЦФ, установленными на одинаковом расстоянии от плоского диода, но на удалении друг от друга. На рисунке 9 показаны корреляционные зависимости амплитуды импульса плотности тока МИП, измеренные синхронно двумя КЦФ.



Рисунок 9 - Корреляционная зависимость между амплитудами импульсов плотности ионного тока с двух КЦФ при расстоянии между ними 5 см (а) и 1 см (б).

Для оценки силы корреляционной связи применялись стандартные подходы, используемые в корреляционном анализе. Для количественной оценки силы связи между переменными в программе Origin был определен коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент детерминации. В таблице 3 приведены данные корреляционного анализа синхронных измерений плотности ионного тока в плоском полосковом диоде с магнитной самоизоляцией.

Расстояние между КЦФ	Объем выборки	Коэффициент детерминации	Коэффициент кор- реляции Пирсона		
8 см	275 импульсов	0.04	0.18		
5 см	100 импульсов	0.12	0.36		
1 см	110 импульсов	0.74	0.86		
1 см	110 импульсов	0.49	0.70		
1 см	100 импульсов	0.58	0.77		

Таблица 3. Корреляция плотности ионного тока по сечению пучка

Результаты корреляционного анализа плотности тока показали слабую взаимосвязь между величинами плотностей тока в разных точках по длине диода. Это означает, что генерация ионного тока в диоде с магнитной самоизоляцией и взрывоэмиссионным катодом идет несинхронно по сечению пучка. Возможной причиной является влияние неоднородности параметров плазмы на поверхности потенциального электрода в различных точках по длине диода. Также проявляется влияние дрейфующих вдоль зазора электронов и их срыв (при нарушении условий магнитной изоляции) на потенциальны электрод, что вносит изменения в объемный заряд ионов и, как следствие, в плотность ионного тока.

В условиях слабой взаимосвязи между величинами плотностей тока в различных точках по длине диода, характерной для исследуемого диода с взрывоэмиссионым катодом, способом повышения стабильности генерации МИП в серии импульсов является использование фокусирующей геометрии диода. На рисунке 10 приведена схема измерений плотности тока МИП и изменение плотности тока МИП в серии импульсов. Плотность ионного тока измеряли двухсекционным КЦФ. Размер рабочей области диода 25×4 см, фокусное расстояние 15 см.



Рисунок 10 - Схема измерения и изменение амплитуды импульса плотности ионного тока в серии 5×50 импульсов. Расстояние до КЦФ 15 см.

Выполненные исследования показали, что фокусировка МИП позволяет увеличить стабильность плотности ионного тока в серии импульсов за счет взаимной компенсации случайных флуктуаций плотности ионного тока в разных частях диода. Среднеквадратическое отклонение амплитуды импульса плотности ионного тока снизилось с 30-46% (для планарного диода) до 18-20%.

<u>В четвертой главе</u> приведены результаты исследования подавления электронной компоненты тока в диодах с магнитной самоизоляцией. На основе полученных данных предложена новая (спиральная) конструкция диода, в которой удалось значительно повысить эффективность генерации МИП по сравнению с другими диодами с магнитной самоизоляцией.

Высокая эффективность генерации мощных ионных пучков в диодах с магнитной изоляцией обеспечивается в основном за счет подавления электронного тока диода. На рисунке 11 приведены осциллограммы, характеризующие работу плоского диода в двухимпульсном режиме, и расчетные значения электронного тока по соотношению (2). Получено, что для диодов разной конструкции, при работе в одноимпульсном и двухимпульсном режиме происходит подавление электронной компоненты полного тока в 1.5-5 раз.



Рисунок 11 - Осциллограммы ускоряющего напряжения (1), полного тока в плоском диоде (2), расчетный ток электронов (3).

В главе 4 приведены результаты моделирования подавления электронного тока. Эффективность снижения электронной компоненты в диодах с магнитной изоляцией определяется соотношением времени нахождения электронов и ионов в А-К зазоре. В главе 4 приведен расчет времени дрейфа электронов и времени ускорения ионов в А-К зазоре. При расчетах среднего времени дрейфа электронов использовали усредненную длину области дрейфа электрона, равную половине длины заземленного электрода. Расчет выполнен по соотношению:

$$\tau_{e} = \frac{L}{2v_{op}(t)} = \frac{L \cdot B(t)}{2E(t)} = \frac{L \cdot d(t) \cdot B(t)}{2U(t)} = \frac{L \cdot [d_{0} - v(t - t_{0})] \cdot 0.014I(t)}{2U(t)};$$
(4)

где *L* – длина заземленного электрода.

Распределение магнитной индукции в поперечном сечении диода получено моделированием в программе ELCUT. При условии равноускоренного движения ионов в А-К зазоре продолжительность их ускорения (с учетом сокращения А-К зазора и эффекта плазменной эрозии [Pushkarev A.I., Isakova Y.//Plasma Sci.& Tech., Vol.13 (2011)]) равна:

$$\tau_{\rm ion}(t) = \frac{[d_0 - v(t - t_0)]\sqrt{2m_i}}{\sqrt{z \cdot U}};$$

На рисунках 12 и 13 показаны результаты расчета изменения (в течение генерации ионного пучка) времени дрейфа электронов и времени нахождения ионов в А-К зазоре.

Получено, что время дрейфа электронов в полосковом диоде с магнитной самоизоляцией близко к времени нахождения протонов в А-К зазоре и значительно меньше продолжительности ускорения ионов углерода  $C^+$ . Это указывает на низкую эффективность подавления электронной компоненты тока.

Выполненные исследования показали, что эффект магнитной самоизоляции не обеспечивает подавление электронной компоненты полного тока и в других конструкциях диодов. Средняя длина витка электрода конусного диода равна 46 см, а средняя длина витка электрода кольцевого диода составляет 55 см, что в 2 - 2.5 раза превышает длину полоскового диода. Это приводит к значительному увеличению времени дрейфа электронов. Но из-за высокой скорости дрейфа электронов время их движения вдоль электродов в исследованных диодах не превышает времени нахождения ионов в А-К зазоре.



Рисунок 12 (слева) - Осциллограмма ускоряющего напряжения (1), время нахождения ионов  $C^+(2)$ , протонов (3) и электронов (4) в А-К зазоре. Рисунок 13 (справа) - Изменение отношения времени нахождения электронов и ионов  $C^+$  в А-К зазоре в течение генерации ионного пучка в плоском (1), кольцевом (2) и конусном (3) диодах.

На основе проведенного анализа предложен механизм снижения электронного тока в исследуемых диодах. Снижение электронного тока в диоде с магнитной самоизоляцией на втором импульсе может быть вызвано увеличением плотности электронов у поверхности заземленного электрода (катод на втором импульсе) дрейфующими электронами. Средняя концентрация электронов в области дрейфа составляет  $\approx 10^{13}$ - $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, что значительно превышает концентрацию электронов в области объемного заряда ( $\approx 10^{12}$  см<sup>-3</sup>). Дрейфующие электроны образуют виртуальный катод, препятствующий эмиссии электронов с поверхности заземленного электрода. Данный механизм обеспечивает снижение электронов из взрывоэмиссионной плазмы, а не за счет увеличения времени их дрейфа в A-K зазоре.

В главе 4 представлены результаты исследования процесса генерации МИП в ионном диоде новой (спиральной) конструкции в режиме магнитной самоизоляции. Для эффективного подавления электронного тока в ионном диоде с незамкнутым дрейфом необходимо уменьшать скорость дрейфа электронов и (или) увеличивать длину диода, что легко реализовать в спиральной конструкции. Эту идею впервые предложили в 1991 году В.М. Быстрицкий и др. На рисунке 14 показан внешний вид диода и термограмма ионного пучка. Взрыво-эмиссионный графитовый катод изготовлен в виде плоского диска диаметром 20 см и высотой 4 см. Заземленный электрод выполнен в виде спирали Архимеда с внешним диаметром 14 см, внутренним диаметром 5 см, шаг спирали 0.8-1.0 см, длина спирали 150-170 см. Спиральный электрод выполнен из стальной проволоки диаметром 3 мм. Величина А-К зазора по всей длине диода была постоянна и составляла 6.5-7 мм.

17



Рисунок 14 - Фотография спирального диода: потенциальный электрод (1), заземленный электрод (2). Термограмма ионного пучка, формируемого спиральным диодом.

Экспериментальные исследования показали, что в спиральном диоде происходит эффективное плазмообразование на всей рабочей поверхности потенциального электрода, и генерация МИП идет по всей площади (см. рис. 14).

На рисунке 15 показаны результаты моделирования распределения магнитной индукции в поперечном сечении диода в программе ELCUT.



Рисунок 15 - Распределение магнитной индукции в А-К зазоре спирального диода.

Диаметр проволоки спирального электрода 3 мм, шаг спирали 10 мм, полный ток по заземленному электроду 40 кА.

Для экспериментальной оценки продолжительность дрейфа замагниченных электронов в спиральном диоде использовали цилиндр Фарадея без магнитной отсечки (ЦФО). ЦФО выполнен из разъёма СР 50-812ФВ, диаметр коллектора составлял 8 мм, диаметр отверстия в крышке - 4 мм. Схема измерения показана на рисунке 16.



Рисунок 16 (слева) – Схема измерения электронного тока на первой импульсе для спирального диода.

Рисунок 17 (справа) - Осциллограммы ускоряющего напряжения, первый импульс (1) и плотности электронного тока, измеренной верхним и нижним (2) и средним (3) ЦФО.

ЦФО, расположенный в центре, зафиксировал значительный рост тока через 300-400 нс после генерации электронов на первом импульсе (см. рис. 17). На остальных двух ЦФО, расположенных в области максимальной плотности МИП, плотность электронного тока была гораздо меньше, чем на центральном ЦФО. Появление электронов (в конце первого импульса) в центральной части спирального диода может быть обусловлено сбросом дрейфующих электронов в конце диода.

Выполненные исследования показали, что продолжительность дрейфа замагниченных электронов на первом импульсе превышает 200-300 нс. Это может быть вызвано только увеличением длины дрейфа электронов за счет реализации частичной замкнутой траектории их движения.

Эффективность генерации ионного пучка в диодах различной конструкции является важнейшим параметром, определяющим перспективность диода данного типа и данной конструкции. На рисунке 18 показана эффективность генерации МИП в диодах разной конструкции. Полную энергию ионного пучка рассчитывали интегрированием распределения плотности энергии МИП по сечению. Диагностику проводили по тепловому отпечатку на мишени. Энергия МИП рассчитана с учетом прозрачности катода. Энергию, поступающую от генератора наносекундных импульсов в диод, рассчитывали по ВАХ диода (интеграл произведения ускоряющего напряжения на полный ток в течение второго импульса).



Рисунок 18 - Зависимость энергии МИП от энергии, поступающей в диодный узел, для диодов разной конструкции.

Высокая эффективность генерации МИП в спиральном диоде реализована при значительном превышении магнитной индукции в А-К зазоре над величиной критической магнитной индукции ( $B/B_{\rm kp} \ge 5$ ). Спиральная конструкция заземленного электрода обеспечивает более высокую оптическую прозрачность для ионов и позволяет увеличить до 80-90% долю МИП, выведенную из А-К зазора в область транспортировки.

<u>В заключении</u> приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Экспериментально показано, что в течение первого импульса напряжения на поверхности потенциального электрода образуется сплошной плазменный слой, что подтверждается результатами трех независимых методик измерения.

2. Экспериментально получено, что в диоде с магнитной изоляцией скорость расширения графитовой плазмы (поперек А-К зазора) составляет 1.3±0.1 см/мкс, что значительно ниже скорости расширения плазмы в электронном диоде с графитовым катодом, равной 2-2.5 см/мкс.

3. Впервые проведены статистические исследования влияния условий плазмообразования на графитовом электроде на стабильность плотности тока ионного пучка в серии импульсов. Показано, что при высокой стабильности выходных параметров ДФЛ (СКО ускоряющего напряжения и тока ≤ 10%), для диодов со взрывоэмиссионным графитовым катодом характерна низкая воспроизводимость (СКО=35-45%) плотности тока ионного пучка и наблюдается закономерное уменьшение амплитуды плотности тока с ростом числа импульсов.

4. В диоде с графитовым взрывоэмиссионным катодом важную роль в плазмообразовании играет наличие на поверхности (и в порах) графитового электрода диэлектрических включений (капли масла). Изменение условий плазмообразования (пропитка маслом графитового электрода) позволило повысить стабильность генерации МИП (СКО плотности тока уменьшилось с 35-45% до 20-29%), закономерное снижение плотности ионного тока не наблюдалось.

20

5. Экспериментально показано, что генерация ионного тока в диоде с магнитной самоизоляцией и взрывоэмиссионным катодом идет неоднородно по сечению пучка. Возможной причиной является влияние неоднородности параметров плазмы на поверхности потенциального электрода в различных точках по длине диода. Также проявляется влияние дрейфующих вдоль зазора электронов и их срыв (при нарушении условий магнитной изоляции) на потенциальны электрод, что вносит изменения в объемный заряд ионов и как следствие плотность ионного тока.

6. Впервые показано, что фокусировка МИП позволяет увеличить стабильность плотности ионного тока в серии импульсов за счет взаимной компенсации случайных флуктуаций плотности ионного тока в разных частях диода. Среднеквадратическое отклонение амплитуды импульса плотности ионного тока снизилось с 30-46% (для планарного диода) до 18 -20%.

7. Показано, что во всех исследуемых конструкциях диодов время дрейфа электронов не превышает времени нахождения ионов углерода  $C^+$  и протонов в А-К зазоре. Дрейф электронов вдоль А-К промежутка диода с магнитной самоизоляцией не обеспечивает подавление электронного тока за счет увеличения времени нахождения электронов в зазоре. Это указывает на низкую эффективность подавления электронной компоненты полного тока диода за счет магнитной самоизоляции в диодах полосковой конструкции, а также в кольцевом и конусных диодах.

8. Предложен механизм снижения электронного тока в исследуемых диодах. Снижение электронного тока в диоде с магнитной самоизоляцией может быть вызвано увеличением плотности электронов у поверхности заземленного электрода (катод на втором импульсе) дрейфующими электронами. Эти электроны образуют виртуальный катод, препятствующий эмиссии электронов с поверхности заземленного электрода.

9. Впервые экспериментально исследована новая геометрия диода с самоизоляцией со спиральным заземленным электродом. Экспериментально показано, что использование спиральной геометрии заземленного электрода обеспечивает увеличение времени нахождения электронов в А-К зазоре над временем ускорения ионов за счет увеличения длины дрейфа электронов. Показана возможность реализации частичного замкнутого движения электронов в А-К зазоре без внешнего магнитного поля в новом спиральном диоде. Это привело к росту эффективности генерации МИП до 20% в спиральном диоде.

10. Для измерения параметров МИП разработана тепловизионная диагностика распределения плотности энергии пучка по сечению. Тепловизионная диагностика позволяет измерять плотность энергии пучка в диапазоне 0.05–5 Дж/см<sup>2</sup> при отсутствии процессов абляции на мишени. При использовании тепловизора с матрицей 140×160 пикселей пространственное разрешение составляет 0.9 мм. Время измерения не превышает 0.1 с.

# СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монографии:

1. Пушкарев А.И., <u>Исакова Ю.И.</u>, Сазонов Р.В., Холодная Г.Е. Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. - М: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 240 с.

2. Пушкарев А.И., <u>Исакова Ю.И.</u> Ионный диод с магнитной самоизоляцией. Аналитический обзор и экспериментальные исследования. - Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012 - 152 с.

#### Издания, рекомендованные ВАК:

1. Pushkarev A.I., <u>Isakova J.I.</u>, Saltimakov M.S., Sazonov R.V. Investigation of magnetically self-insulated effect in an ion diode with an explosive emission potential electrode // Phys. Plasmas - 2010. - Vol.17 – 013104.

2. <u>Ю. И. Исакова</u> А. И. Пушкарев В. А. Тарбоков. Измерение состава и энергетического спектра импульсного ионного пучка времяпролетным методом высокого разрешения // Известия ТПУ - 2010 - Т. 316 - № 2 - С. 76–79.

3. Pushkarev A.I., <u>Isakova Y.I.</u> Explosive-emission plasma dynamics in ion diode in double-pulse mode // Plasma Science and Technology – 2011. - Vol.13 - №.6 -P. 698-702.

4. Пушкарёв А. И., <u>Исакова Ю. И.</u> Локальное увеличение плотности энергии в ионном диоде с магнитной самоизоляцией // Известия вузов. Физика. -2011 - Т. 54 - №. 11/3 - С. 53-59.

5. Pushkarev A.I., <u>Isakova, Yu.I.</u>, Guselnikov V.I.. Limitation of the electron emission in an ion diode with magnetic self-insulation // Phys. Plasmas - 2011 - Vol.18 – 083109.

6. <u>Isakova Y.I.</u>, Kholodnaya G.I., Pushkarev A.I. Influence of Cathode Diameter on the Operation of a Planar Diode with an Explosive Emission Cathode // Advances in High Energy Physics – 2011 - Vol. 2011 - Article ID 649828.

7. Пушкарев А.И., <u>Исакова Ю.И.</u> Кольцевой ионный диод с магнитной самоизоляцией // Журнал технической физики - 2012. - Т.82 - Вып. 2 - С. 24-30.

8. Пушкарев А.И., <u>Исакова Ю.И.</u> Механизм подавления электронного тока в ионном диоде с магнитной самоизоляцией // Письма в ЖТФ – 2012 – Т. 38 - Вып. 3 - С. 79-87.

9. <u>Isakova Y.I.</u> Diagnostic Equipment for the TEMP-4M Generator of Highcurrent Pulsed Ion Beams / // Journal of the Korean Physical Society - 2012 - Vol. 59 - №. 6 - P. 3531-3535.

10. Pushkarev A.I., <u>Isakova Yu.I.</u> A spiral self-magnetically insulated ion diode // Laser and Particle Beams - 2012 – Vol. 30 – Iss.03 – P. 427-433.

11. Pushkarev A.I., <u>Isakova Yu.I.</u>, Khailov, I.P. Shot-to-shot reproducibility of a self-magnetically insulated ion diode // Review of Scientific Instruments - 2012 - 83(7) - 073309.

12. <u>Исакова Ю.И.</u>, Пушкарев А. И. Тепловизионная диагностика мощных ионных пучков // Приборы и техника эксперимента - 2013 - № 2 - С. 69–76.

13. Pushkarev A.I., <u>Isakova Yu.I</u>. A gigawatt power pulsed ion beam generator for industrial application // Surface & Coatings Technology - 2013- Vol. 228 – P. 382–S384.

14. <u>Isakova Y.I.</u>, Pushkarev A.I., Khaylov I.P. The energy transfer in the TEMP-4M pulsed ion beam accelerator // Rev. Sci. Instrum. - 2013 - 84 – 073302.

15. Pushkarev A.I., <u>IsakovaY.I.</u>, Khaylov I.P. The influence of a shield on intense ion beam transportation // Laser and Particle Beams. - 2013 - Vol. 31. - Issue 3. - P. 493-501.

16. <u>IsakovaY. I.</u>, Pushkarev A. I., Khaylov I. P. Statistical analysis of the ion beam production in a self magnetically insulated diode // Physics of Plasmas. - 2013 - Vol. 20. - Issue 9 - P. 1-4.

17. Pushkarev A.I., <u>Isakova Yu.I</u>. Closed electron drift in a self-magnetically insulated ion diode // Physics of Plasmas. – 2013 - Vol. 20. - Issue 5 - P. 1-7.

18. Pushkarev A.I., <u>Isakova Y.I.</u>, Khaylov I.P., Xiao Y. Characterization of intense ion beam energy density and beam induced pressure on the target with acoustic diagnostics // Rev. Sci. Instrum. – 2013 - Vol. 84. - Issue 8 - P. 1-6.

19. Pushkarev A.I., <u>Isakova Yu.I.</u>, Khaylov I.P. Investigation of the powerful ion beam energy correlation // Laser and particle beams -2014 - 32 - P. 311 - 319.

20. Пушкарев, А.И., <u>Исакова Ю.И.</u>, Хайлов И.П. Анализ эффективного анод-катодного зазора ионного диода при работе в двухимпульсном режиме – Письма в ЖТФ – 2014 - Том 40 - Вып. 13 - С. 10-17.

### Патенты:

Положительное решение по заявке на Евразийский патент от 26.11.2013 г. / А.И. Пушкарев, Ю.И. Исакова. Ионный диод с магнитной самоизоляцией.