

На правах рукописи

**Хайлов Илья Павлович**

**Стабилизация параметров мощного ионного пучка, формируемого в диоде  
с магнитной самоизоляцией**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2015

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

**Научный руководитель:** Пушкарев Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Озур Григорий Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Ковивчак Владимир Степанович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела региональных проблем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Омск.

**Ведущая организация:** Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

**Защита диссертации состоится** 17 ноября 2015 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 \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного совета кандидат физико-математических наук, доцент

А. В. Кожевников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Модификация импульсными энергетическими потоками (лазерные, электронные и ионные пучки, плазменные потоки) является перспективным направлением улучшения эксплуатационных свойств различных металлических изделий. При этом достигаются высокие скорости нагрева и последующего охлаждения их приповерхностного слоя, превышающие  $10^7$ - $10^9$  К/с. Давление в области поглощения достигает  $10^8$ - $10^{10}$  Па. Такое воздействие образует твердые растворы и вторичные фазы, которые не характерны для равновесной диаграммы фазовых состояний [1]. Мощные ионные пучки (МИП) обеспечивают модификацию тонкого приповерхностного слоя без изменения объемных свойств изделия. При плотности ионного тока (40-70) А/см<sup>2</sup> и длительности импульса 100-150 нс плотность заряда за 1 импульс составляет (2-4) мкКл/см<sup>2</sup>. Это соответствует флюенсу ионов за один импульс  $(1.3-2.5) \times 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Пробег ионов с энергией 200–300 кэВ в металлах составляет 1-3 мкм и их концентрация в приповерхностном слое не превышает  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. Плотность энергии МИП при этом достигает 1-5 Дж/см<sup>2</sup>. Поэтому основным фактором, определяющим изменение свойств изделия при облучении МИП, является тепловое воздействие, а не имплантация ионов. Наиболее важными параметрами генератора пучка заряженных частиц, определяющие возможность его технологического применения, являются ресурс непрерывной работы, стабильность параметров в серии импульсов и однородность по сечению.

**Целью** настоящей работы является повышение стабильности генерации МИП в диоде со взрывоэмиссионным катодом<sup>2</sup> в двухимпульсном режиме при магнитной самоизоляции электронов.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**:

---

1. Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. - М: Физматлит, 2003. - 286 с.

2 При приложении к ионному диоду сдвоенных разнополярных импульсов взрывоэмиссионная плазма нарабатывается при приложении к потенциальному электроду первого (отрицательного) импульса. Генерация МИП происходит в течение последующего положительного импульса.

1. Исследование основных параметров, влияющих на стабильность параметров мощного ионного пучка, формируемого диодом с магнитной самоизоляцией в двухимпульсном режиме.

2. Стабилизация плотности энергии и полной энергии МИП, формируемого диодом с магнитной самоизоляцией в двухимпульсном режиме.

3. Разработка акустической диагностики плотности энергии МИП.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

Впервые выполнен систематический статистический анализ генерации ионного пучка гигаваттной мощности диодом со взрывоэмиссионным катодом в режиме магнитной самоизоляции. Получено, что среднеквадратичное отклонение полной энергии и плотности энергии ионного пучка в серии импульсов ниже среднеквадратичного отклонения плотности тока и полного заряда ионного пучка. Амплитуда импульса плотности ионного тока в серии слабо зависит от амплитуды импульса ускоряющего напряжения и других выходных параметров ускорителя, коэффициент детерминации  $R < 0.3$ . В тоже время полная энергия пучка и плотность энергии однозначно определяются параметрами ускорителя,  $R > 0.9$ .

Впервые для увеличения стабильности напряжения пробоя основного разрядника двойной формирующей линии при генерации сдвоенных разнополярных импульсов первый импульс, поступающий в нагрузку, также использовали для запуска основного разрядника. Выполненные исследования показали значительное увеличение стабильности напряжения пробоя основного разрядника (в управляемом режиме), длительности первого импульса и амплитуды полного тока в диоде в серии импульсов.

Разработана акустическая диагностика плотности энергии мощного ионного пучка при поперечном расположении пьезодатчика к оси пучка, которая позволяет измерять плотность энергии пучка и распределение плотности энергии по сечению при частоте следования до  $10^3$  имп/с.

**Практическая значимость** работы определяется тем, что её 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 для модернизации ускорителя мощных ионных пучков ТЕМП-4М в Томском политехническом университете и ускорителя ТЕМП-6 в Даляньском технологическом университете, г. Далянь, Китай (имеются акты внедрения).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В ионном диоде с магнитной самоизоляцией при работе в режиме сдвоенных разнополярных импульсов среднеквадратичное отклонение полной энергии и плотности энергии пучка в серии импульсов составляет 10-12%, что ниже среднеквадратичного отклонения плотности заряда пучка (18-20%).

2. Акустическая диагностика плотности энергии мощного ионного пучка при поперечном расположении пьезодатчика к оси пучка позволяет измерять плотность энергии в диапазоне 0.1–2 Дж/см<sup>2</sup> и распределение плотности энергии по сечению пучка с разрешением 5-7 мм при частоте следования до 10<sup>3</sup> имп/с.

3. Управляемый режим работы основного разрядника двойной формирующей линии при генерации сдвоенных разнополярных импульсов и запуске первым импульсом обеспечивает снижение среднеквадратичного отклонения напряжения пробоя с 4-6% до 1-2%, полного тока в диоде – с 5-6% до 2-3% и длительности первого импульса - с 6-8% до 1-2%.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Выводы, сделанные в работе, были получены на основе комплексных исследований, включающих анализ баланса энергии в ускорителе по ВАХ диода и генератора наносекундных импульсов, статистический анализ амплитуды плотности ионного тока, полной энергии и плотности энергии МИП, тепловизионную и акустическую диагностики. При исследованиях использовались современные методики и оборудование для измерения параметров ионных пучков, адаптированные для двухимпульсного режима работы ионного диода. Калиб-

ровка диагностического оборудования показала, что оно корректно отражает работу ускорителя в режиме короткого замыкания и при работе на резистивную нагрузку 4-8 Ом (ускоряющее напряжение 250-300 кВ). Достоверность полученных результатов подтверждается их сопоставлением с данными других исследователей. Научные положения не противоречат существующим данным о закономерностях формирования МИП в диодных системах с магнитной изоляцией.

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на профильных международных конференциях: 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; 18th International Conference on Surface Modification of Materials by Ion Beams, Istanbul: ИКМИБ, 2013; Современные техника и технологии, Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 2012, 2013, 2014; Перспективы развития фундаментальных наук: Международная конференция студентов и молодых ученых, Томск, 2012, 2013, 2014.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 11 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК.

### **Личный вклад автора**

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

Автором самостоятельно адаптирована акустическая диагностика параметров МИП, ранее использовавшаяся для измерения параметров электронного

пучка. Данная диагностика впервые использована для исследования ионного диода в режиме магнитной самоизоляции и позволила исследовать процесс генерации МИП, а также стабилизировать работу ускорителя.

Защищаемые положения и основные выводы по диссертации сформулированы автором самостоятельно. Формулировка задач для исследования, постановка и проведение экспериментов, анализ полученных данных проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Она написана на 120 страницах машинописного текста, включая 112 рисунков, 16 таблиц, 89 источников литературы.

### **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.

**В первой главе** приведен литературный обзор публикаций по анализу стабильности работы ионных диодов различных конструкций.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Наибольший ресурс работы обеспечивают ионные диоды, использующие взрывную эмиссию электронов для формирования анодной плазмы (двухимпульсный режим) [3, 4].

2. Большинство генераторов МИП используют диоды с диэлектрическим анодом, главным недостатком которых является низкий ресурс работы диэлектрических покрытий и низкая стабильность параметров МИП в серии импульсов.

---

3. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат. 1984. 152 с.)

4. Рябчиков А.И., Волков С.Н., Диденко А.Н., Красик Я.Е. Исследование режимов генерации МИП с использованием предимпульса ускорителя // ЖТФ, 1984, т.54, в.4, с.816-818

3. Недостаточно систематических данных о стабильности полной энергии и плотности энергии МИП в диодах со взрывоэмиссионным катодом, работающих в режиме магнитной самоизоляции электронов.

4. Отсутствует методика измерения плотности энергии ионного пучка при частоте следования импульсов более 1 импульса в минуту.

5. Взрывная эмиссия обеспечивает плазмообразование на всей рабочей поверхности графитового катода при использовании генератора наносекундных импульсов на основе двойной формирующей линии (ДФЛ). Такой генератор формирует импульс напряжения с крутизной переднего фронта  $(1-2) \cdot 10^{13}$  В/с. Ресурс работы диода со взрывоэмиссионным катодом превышает  $10^6$  импульсов.

6. В диоде с магнитной самоизоляцией отсутствует внешний источник магнитного поля, который усложняет конструкцию и снижает к.п.д. генератора МИП.

**Вторая глава** описывает экспериментальный стенд, на котором проводились исследования, а также используемое диагностическое оборудование для измерения электрических параметров ускорителя и параметров МИП. Исследования проводились на ионном ускорителе **ТЕМП-4М**, который состоит из емкостного накопителя – генератора Маркса, генератора наносекундных импульсов на основе ДФЛ и вакуумного диода с магнитной самоизоляцией электронов. Блок-схема ДФЛ ускорителя **ТЕМП-4М** показана на рисунке 1.

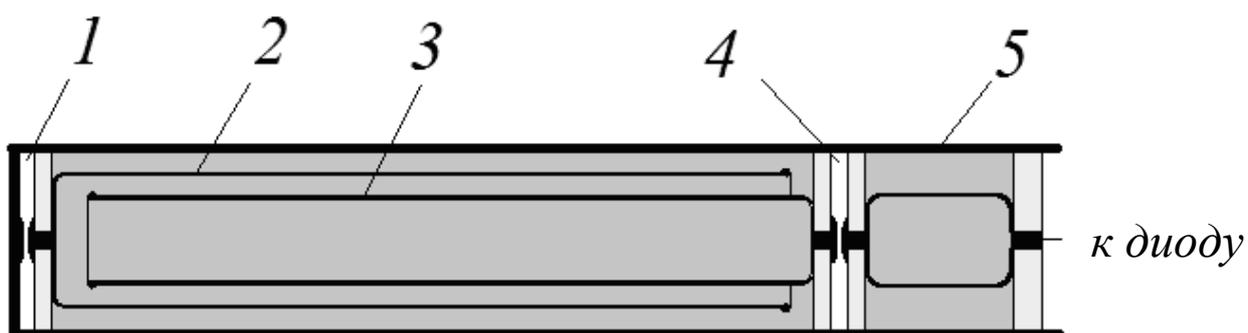


Рисунок 1 - Конструкция ДФЛ ускорителя **ТЕМП-4М**: 1 - основной разрядник, 2 - средний электрод, 3 – внутренний электрод, 4 – предразрядник, 5 – переходная камера

Ускоритель **ТЕМП-4М** формирует сдвоенные разнополярные импульсы – первый отрицательный (300–500 нс, 100–150 кВ) и второй положительный (120 нс, 200–250 кВ), частота следования импульсов (5–10) имп./мин, плотность энергии пучка, для разных диодов, 0.5-5 Дж/см<sup>2</sup>. Для генерации ионного пучка в ускорителе **ТЕМП-4М** использовали диоды с магнитной самоизоляцией электронов. Анод-катодный зазор выбирали из условия согласования импеданса диода с волновым сопротивлением ДФЛ, он составлял 8-10 мм. Потенциальный электрод изготовлен из графита, заземленный электрод – из нержавеющей стали с прорезями 0.4 см×2 см, прозрачность 70%. Для формирования МИП с плотностью энергии более 0.5 Дж/см<sup>2</sup> мы использовали диод с фокусирующей геометрией.

Для измерения параметров МИП разработан комплекс диагностического оборудования: времяпролетная диагностика состава и энергетического спектра ионов; тепловизионная диагностика распределения плотности энергии пучка по сечению; акустическая диагностика плотности энергии МИП.

Далее во второй главе диссертации дано описание тепловизионной диагностики распределения плотности энергии пучка по сечению. Она позволяет измерять полную энергию МИП и распределение плотности энергии на мишени в диапазоне 0.05–3,5 Дж/см<sup>2</sup> при отсутствии процессов абляции на мишени, оптимизировать работу ионного диода и контролировать режим облучения мишени. Пространственное разрешение составляет 1-2 мм, время измерения менее 0.1 с.

Кроме того, во второй главе представлена акустическая диагностика плотности энергии мощного ионного пучка. С помощью тепловизионной диагностики получена калибровочная зависимость амплитуды сигнала с пьезодатчика от плотности энергии ионного пучка. На рисунке 2 показана схема измерения и калибровочная зависимость. Акустическая диагностика позволяет измерять плотность энергии пучка в диапазоне 0.1–2 Дж/см<sup>2</sup> и распределение плотности энергии на мишени. При плотности энергии более 2 Дж/см<sup>2</sup> происходит стабилизация амплитуды сигнала с пьезодатчика из-за плавления поверхностного слоя мишени.

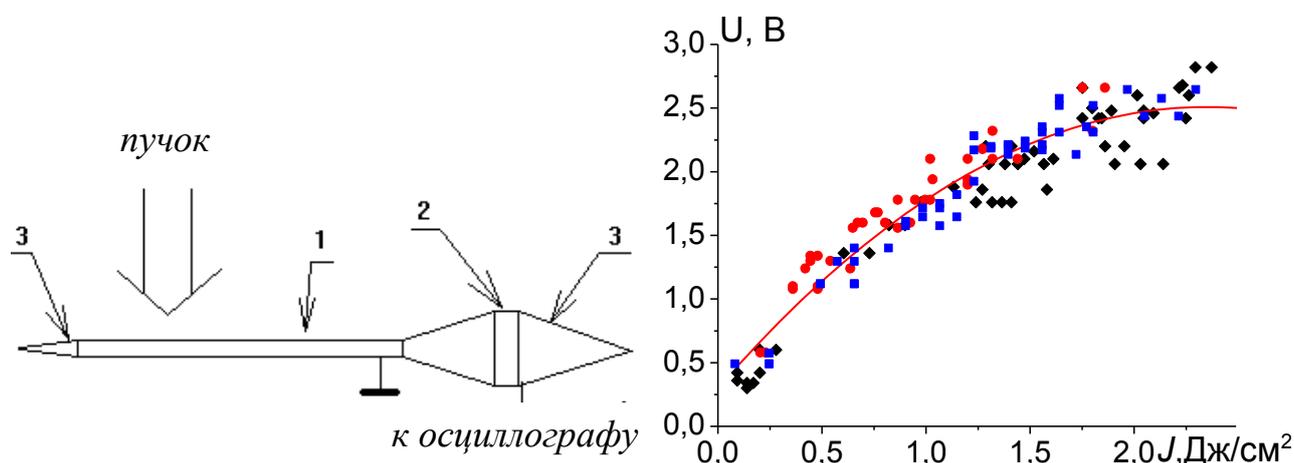


Рисунок 2 - Схема регистрации акустических волн, формируемых МИП (1-мишень (провод), 2-пьезодатчик, 3-гасящие конуса) и зависимость амплитуды сигнала с пьезодатчика от плотности энергии МИП

Разработанная акустическая диагностика не требует сложного оборудования и может быть использована для контроля параметров импульсного ионного пучка при частоте следования до  $10^3$  имп/с.

**Третья глава** посвящена исследованию стабильности генерации МИП в диоде с магнитной самоизоляцией. Как показал обзор работ по анализу стабильности генерации МИП в серии импульсов, для различных типов ионных диодов характерна низкая воспроизводимость плотности ионного тока от импульса к импульсу.

Приведены результаты исследования стабильности полной энергии и плотности энергии МИП для диодов различной конструкции. Основная часть исследований стабильности плотности энергии выполнена на фокусирующем полосковом диоде. На рисунке 3 показана фотография диода и распределение плотности энергии пучка в поперечном сечении. Для улучшения фокусировки пучка на заземленный электрод установлен сплошной экран коробчатой конструкции, выполненный из нержавеющей стали толщиной 1 мм.

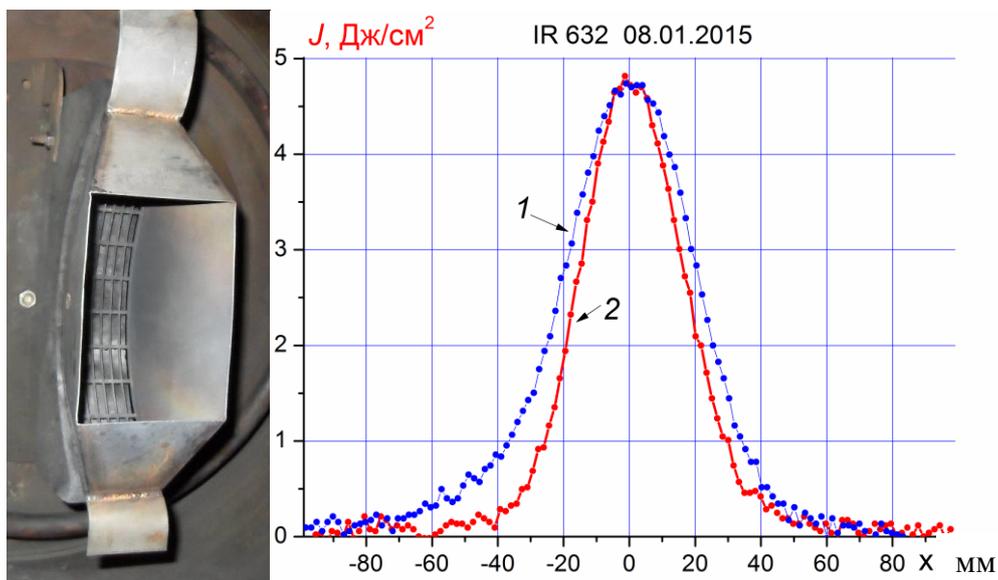


Рисунок 3 – Фотография фокусирующего диода с экраном и распределение плотности энергии пучка по сечению в фокусной плоскости в вертикальном (1) и горизонтальном (2) сечениях

Результаты статистического анализа полной энергии и плотности энергии МИП, формируемого фокусирующим полосковым диодом при работе с интервалом 120 секунд сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Стабильность генерации МИП в серии импульсов

	Среднее значение в серии и СКО			
	$U$ , кВ	$I$ , кА	$E$ , Дж	$q$ , Дж/см <sup>2</sup>
Серия 1	244 ±9%	68 ±8%	103 ±11%	4,2 ±8%
Серия 2	-	66 ±5%	100 ±8%	3,8 ±10%
Серия 3	-	56 ±4%	83 ±10%	3,8 ±9%
Серия 4	255 ±5%	59 ±5%	66 ±9%	2,7 ±11%

В отличие от плотности ионного тока, плотность энергии и полная энергия пучка являются интегральными параметрами, отражающими формирование пучка в течение всего процесса генерации. Поэтому более корректно сравнивать их с плотностью заряда МИП. Выполненные исследования показали, что плотность заряда ионов за импульс пропорциональна его амплитуде, коэффи-

коэффициент детерминации составляет 0.83. На рисунке 4 приведены данные корреляционного анализа плотности ионного тока и плотности заряда МИП.

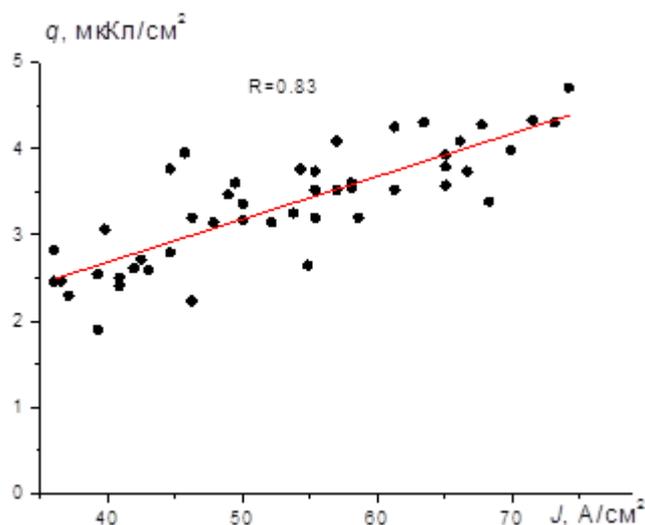


Рисунок 4 - Корреляционная зависимость между плотностью заряда МИП за импульс и амплитудой импульса плотности ионного тока. Выборка 50 импульсов.

Выполненный анализ стабильности генерации МИП ионным диодом с магнитной самоизоляции в двухимпульсном режиме показал, что среднеквадратичное отклонение полной энергии и плотности энергии ионного пучка в серии импульсов ниже среднеквадратичного отклонения плотности заряда ионного пучка. Поэтому анализ стабильности теплового воздействия МИП на мишень по амплитуде импульса плотности ионного тока дает завышенную величину среднеквадратичного отклонения.

**Четвёртая глава** посвящена повышению стабильности генерации МИП в диоде с магнитной самоизоляцией. Для определения наиболее важных факторов, влияющих на стабильность генерации МИП, нами был выполнен анализ корреляции полной энергии и плотности энергии пучка в фокусе с амплитудой импульса ускоряющего напряжения, амплитудой импульса полного тока в диоде и длительностью первого импульса при синхронных измерениях. Основная часть исследований выполнена на фокусирующем полосковом диоде размером 22 см×4.5 см, фокусное расстояние 14 см.

Так как плотность энергии и полная энергия пучка являются интегральными параметрами, отражающими формирование МИП в течение всего процесса генерации, более корректно сравнивать их с интегралом ускоряющего напряжения и полным зарядом, переносимым в А-К зазоре в течение генерации пучка. Ионный ток, протекающий в диоде в режиме ограничения объемным зарядом, можно рассчитать по одномерному соотношению Child-Langmuir с учетом сокращения А-К зазора при расширении плазменной поверхности и эффекта плазменного сжатия [5]. Тогда полная энергия ионного пучка равна:

$$E_{расч} = \int U(t)I_i(t)dt = \frac{4\epsilon_0 \sqrt{2z} \cdot S}{9\sqrt{m_i}} \int \frac{U^{5/2}(t)dt}{[d_0 - v \cdot (t - t_0)]^2} \quad (1)$$

где  $U$ —напряжение, приложенное к диоду;  $d_0$ —начальный зазор анод–катод;  $m_i$ —масса иона;  $z$ —заряд иона;  $S$ —рабочая площадь диода;  $v$ —скорость расширения плазмы;  $t_0$ —длительность первого импульса.

На рисунке 5 показана зависимость энергии пучка от расчетной по соотношению (1) при рабочей площади диода  $100 \text{ см}^2$  и скорости расширения плазмы  $1,5 \text{ см/мкс}$ .

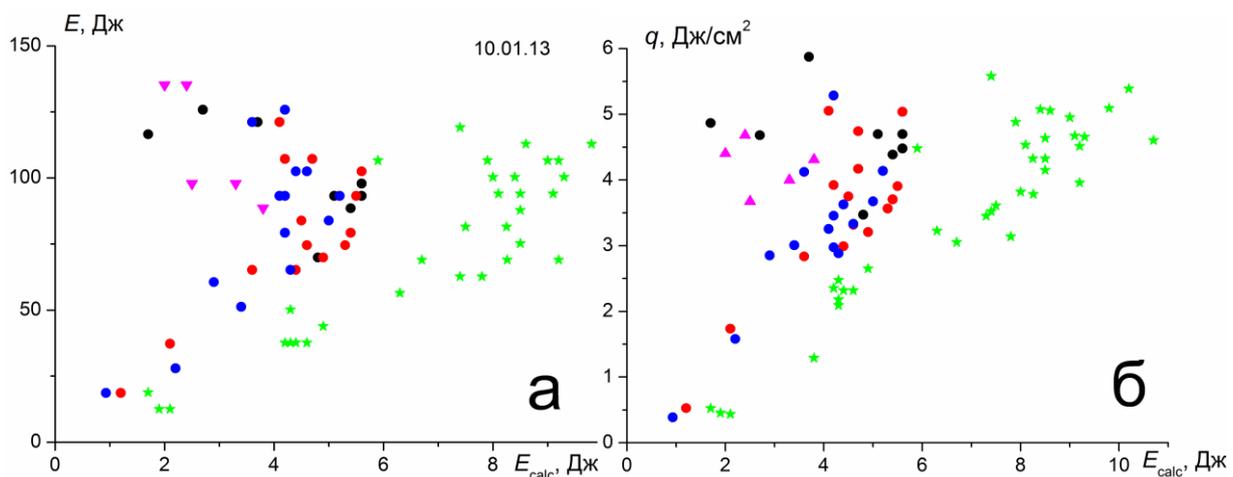


Рисунок 5 – Зависимость полной энергии пучка (а) и плотности энергии в фокусе (б) от расчетной по соотношению (1). Сводные данные при А-К зазоре 7, 8, 9 и 10 мм

Представлены сводные экспериментальные данные для фокусирующего полоскового диода при разных А-К зазорах, при измерении полной энергии пучка калориметром полного поглощения и с помощью тепловизионной диагностики.

На рисунке 6 показаны результаты анализа корреляции энергии пучка и плотности энергии в фокусе (данные рис. 5) с величиной полного заряда, переносимого в диоде в течение генерации МИП.

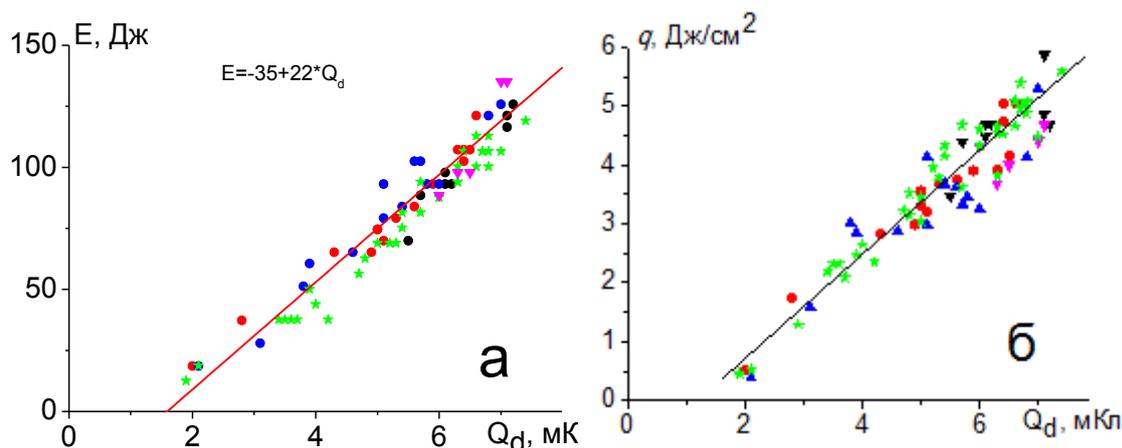


Рисунок 6 – Зависимость полной энергии пучка (а) и плотности энергии в фокусе (б) от полного заряда в диоде. Сводные данные при А-К зазоре 7, 8, 9 и 10 мм

Выполненные нами исследования показали высокую корреляцию плотности энергии и полной энергии МИП, формируемого диодом с магнитной самоизоляцией в двухимпульсном режиме, с величиной полного заряда, переносимого в диоде в течение генерации пучка. Для всех исследованных диодов зависимость полной энергии пучка от полного заряда описывается линейным соотношением при среднеквадратичном отклонении экспериментальных данных от расчетных не более 10%.

Корреляция с расчетной плотностью энергии МИП, зависящей только от ускоряющего напряжения и А-К зазора низкая,  $R < 0.02$ . Поэтому для стабилизации плотности энергии МИП в серии импульсов необходимо повышать стабильность полного заряда, а не величины ускоряющего напряжения.

Выполненные исследования показали наиболее сильную зависимость полного заряда от длительности первого импульса напряжения (см. рис. 7).

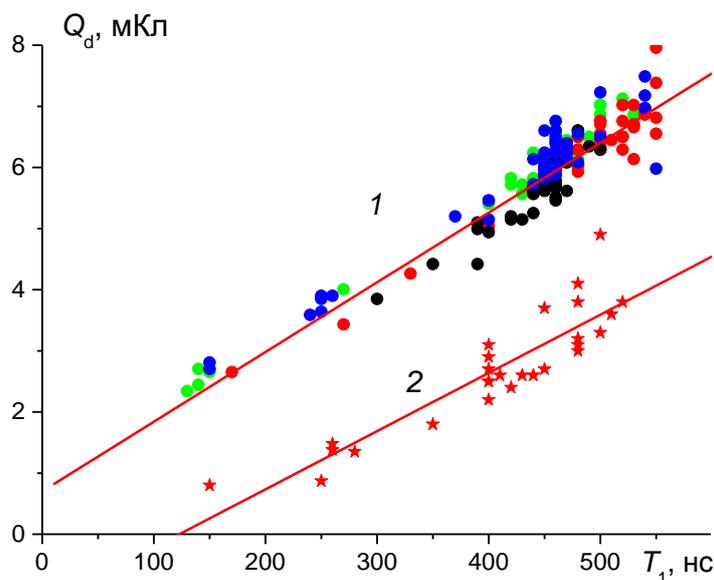


Рисунок 7 – Зависимость полного заряда, переносимого в диоде в течение генерации МИП, от длительности первого импульса: 1 – данные для диодов с незамкнутым дрейфом электронов (полосковые и конусный), 2 – данные для спирального проволочного диода

Коэффициент детерминации составил 0.8 для спирального диода и 0.9 для остальных диодов. Вклад других факторов в нестабильность полного заряда незначителен. Поэтому для повышения стабильности генерации МИП необходимо стабилизировать длительность первого импульса.

В четвертой главе также представлены результаты статистического анализа работы генератора наносекундных импульсов, состоящего из двойной формирующей линии, предварительного и основного газовых разрядников (см. рис. 1). Стабильность длительности первого импульса напряжения в серии определяется стабильностью напряжения пробоя предварительного и основного разрядников. На первом этапе исследований мы провели анализ стабильности работы ДФЛ на резистивную нагрузку 4.8 Ом. В таблице 2 и на рисунке 8 приведены результаты статистической обработки результатов измерений.

Таблица 2. Стабильность работы ДФЛ на резистивную нагрузку

Параметр	Серия 1	Серия 2	Серия 3
	Одноимпульсный режим	Двухимпульсный режим	
Напряжение пробоя основного разрядника, кВ	$289 \pm 8\%$	$302 \pm 6\%$	$315 \pm 4\%$
Напряжение пробоя предразрядника, кВ	-	$211 \pm 2\%$	$213 \pm 2\%$
Ток в нагрузке ДФЛ, кА	$42 \pm 6\%$	$47 \pm 7\%$	$46 \pm 5\%$
Длительность первого импульса, нс	90	$472 \pm 10\%$	$473 \pm 8\%$

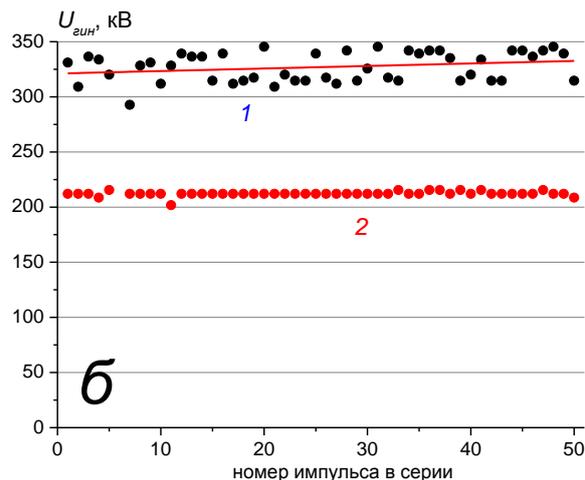
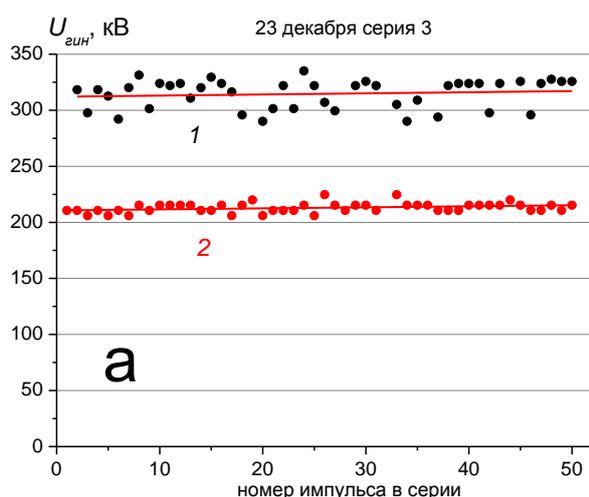


Рисунок 8 – Изменение напряжения пробоя основного (1) и предварительного (2) разрядников в серии импульсов при работе на резистивную нагрузку (а) и диод (б)

Высокая стабильность работы предразрядника при значительном разбросе напряжения пробоя основного разрядника в серии импульсов сохраняется и при работе ДФЛ на ионный диод. На рисунке 9 и в таблице 3 приведены данные исследования стабильности напряжения пробоя предварительного ( $U_1$ ) и основного ( $U_2$ ) разрядников. Среднеквадратичное отклонение напряжения про-

боя основного разрядника превышает среднеквадратичное отклонение напряжения пробоя предразрядника в 2-3 раза.

Таблица 3. Стабильность работы ДФЛ на диод

Параметр	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4
$U_1, \text{kV}$	$204 \pm 1.9\%$	$212 \pm 1.9\%$	$202 \pm 1.4\%$	$190 \pm 1.7\%$
$U_2, \text{kV}$	$257 \pm 3.9\%$	$268 \pm 3.4\%$	$263 \pm 4\%$	$267 \pm 3.3\%$
$T, \text{ns}$	$466 \pm 4.8\%$	$472 \pm 7.4\%$	$485 \pm 9\%$	$500 \pm 7.4\%$

Выполненные исследования показали, что основным источником нестабильности полной энергии и плотности энергии МИП в серии импульсов является разброс напряжения пробоя основного разрядника. Поэтому были выполнены эксперименты с разными режимами работы основного разрядника и с разными конструкциями его электродов (с концентрическими канавками, киритовыми вставками и др.). Но изменение конструкции электродов основного разрядника не позволило существенно повысить стабильность его работы, среднеквадратичное отклонение напряжения пробоя в серии импульсов при ресурсе более 200-300 импульсов составляло 4-6%. Большой коммутируемый ток, достигающий 100 кА, вызывает сильную эрозию электродов. Полный заряд, переносимый при этом в разряднике, составлял 8 - 9 мКл.

Так как напряжение пробоя предразрядника (в двухимпульсном режиме) в серии импульсов меняется незначительно (см. рис. 8), то первый импульс, поступающий в нагрузку ДФЛ, можно использовать для запуска основного разрядника. С этой целью напряжение с выхода ДФЛ через коаксиальный кабель РК 50-15 подавали на запускающий электрод, установленный в заземленном электроде основного разрядника. На рисунке 9 приведена схема запуска основного разрядника.

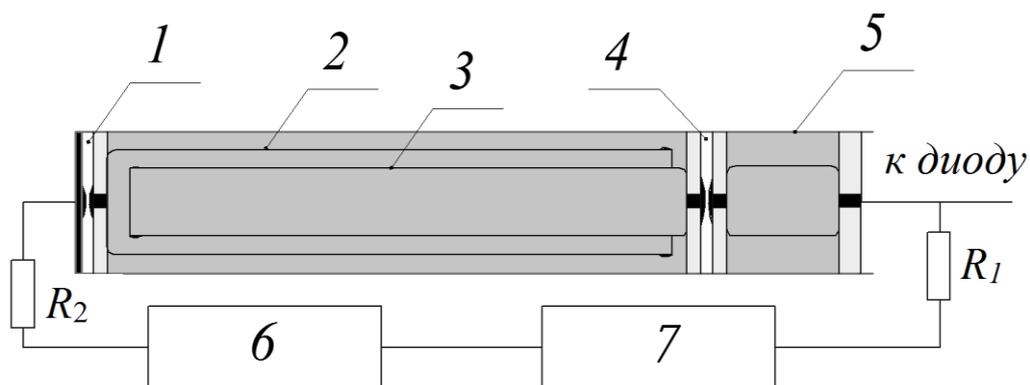


Рисунок 9 – Схема формирования импульса запуска основного разрядника:  $R_1$  и  $R_2$  – 1 - основной разрядник, 2 - средний электрод, 3 – внутренний электрод, 4 – предразрядник, 5 – переходная камера, 6 – трансформатор, 7 - кабельная линия задержки;

В таблице 4 и на рисунке 10 приведены результаты исследования стабильности работы ДФЛ в серии импульсов на резистивную нагрузку.

Таблица 4. Стабильность работы ДФЛ с тригатроном на резистивную нагрузку

Параметр	Среднее значение и СКО		
	Серия 1	Серия 2	Серия 3
Напряжение пробоя основного разрядника, кВ	$272 \pm 2.2\%$	$275 \pm 1.1\%$	$272 \pm 0.6\%$
Напряжение пробоя предразрядника, кВ	$200 \pm 2.3\%$	$201 \pm 1.7\%$	$219 \pm 0.7\%$
Ток в нагрузке ДФЛ, кА	$35 \pm 1.1\%$	$35 \pm 1\%$	$36 \pm 1.3\%$
Длительность первого импульса, нс	$505 \pm 0.7\%$	$506 \pm 0.7\%$	$506 \pm 0.7\%$

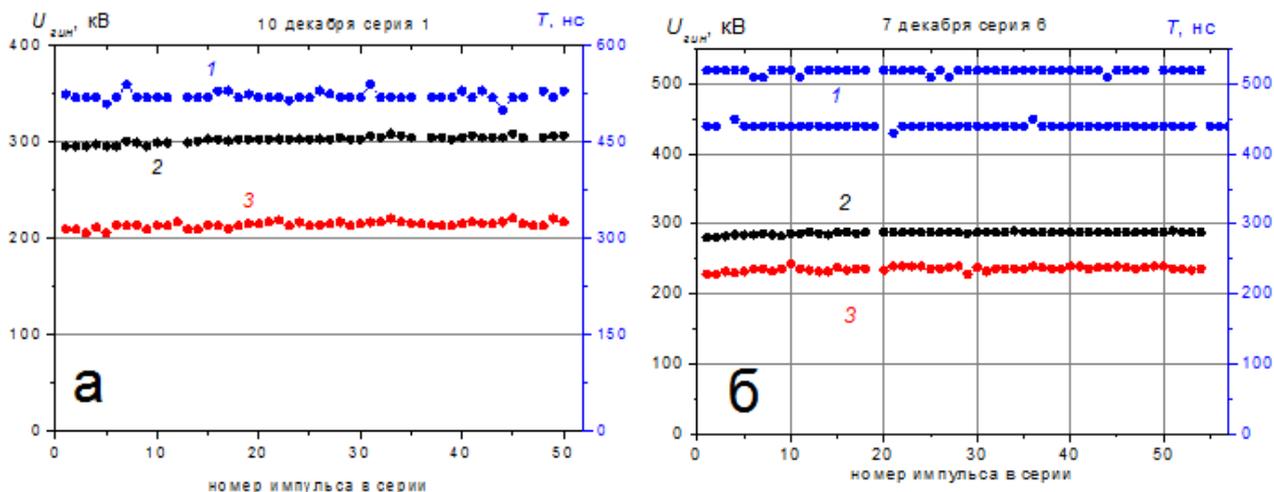


Рисунок 10 – Изменение длительности первого импульса напряжения при разной длине кабеля линии задержки (1), напряжения пробоя основного (2) и предварительного (3) разрядников в серии импульсов при работе на резистивную нагрузку (а) и ионный диод (б)

Управляемый режим работы основного разрядника повысил стабильность работы ионного диода. На рисунке 11 показано распределение плотности энергии в поперечном сечении ионного пучка.

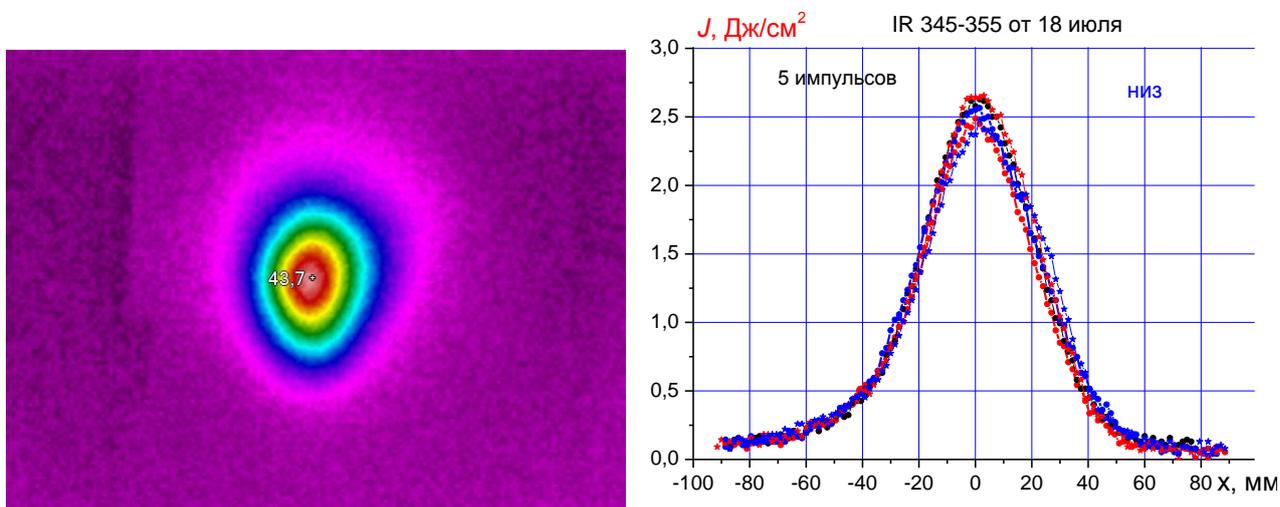


Рисунок 11 – Термограмма и распределение плотности энергии МИП в вертикальном сечении фокусирующего диода. Пять последовательных импульсов

Выполненные исследования показали, что при работе основного разрядника в управляемом режиме и при запуске импульсом отрицательной полярно-

сти распределение плотности энергии в поперечном сечении МИП меняется незначительно в серии импульсов.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Акустическая диагностика позволяет измерять плотность энергии МИП в диапазоне 0.1–2 Дж/см<sup>2</sup>. Разработанная диагностика может быть использована для контроля параметров импульсного ионного пучка при частоте следования импульсов до 10<sup>3</sup> имп/с.

2. Выполнены комплексные исследования стабильности генерации пучка в диодах разной конструкции с магнитной самоизоляцией в двухимпульсном режиме. Получено, что в серии импульсов среднеквадратичное отклонение плотности заряда превышает 18-20%. Также была получена корреляционная зависимость между плотностью заряда МИП за импульс и амплитудой импульса плотности ионного тока, коэффициент детерминации составлял 0.87. Поэтому в исследованиях стабильность генерации МИП оценивали по амплитуде импульса плотности ионного тока.

3. В серии импульсов полная энергия и плотность энергии меняются незначительно, среднеквадратичное отклонение не превышает 10-12%. Увеличение частоты следования импульсов до 5-6 имп/мин не снижает стабильность генерации пучка, она значительно выше, чем в ионных диодах другого типа – диодах с внешней магнитной изоляцией и с магнитной самоизоляцией, работающих в одноимпульсном режиме.

4. Для увеличения стабильности длительности первого импульса напряжения (в двухимпульсном режиме) первый импульс, поступающий в нагрузку ДФЛ, также использовали для запуска основного разрядника. Управляемый режим работы обеспечивает снижение среднеквадратичного отклонения напряжения пробоя с 4-6% до 1-2%, полного тока в диоде – с 5-6% до 2-3% и полной энергии ионного пучка с 10-15% до 5-6%.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Издания, рекомендованные ВАК:

1. A. I. Pushkarev, Y. I. Isakova, I. P. Khaylov Shot-to-shot reproducibility of a self-magnetically insulated ion diode // Review of Scientific Instruments - 2012 - Vol. 83 - Issue 7, Article number 073309

2. A. I. Pushkarev, Y. I. Isakova, Y. Xiao, I. P. Khaylov Characterization of intense ion beam energy density and beam induced pressure on the target with acoustic diagnostics // Review of Scientific Instruments. - 2013 - Vol. 84. - Issue 8, Article number 083304

3. Y. I. Isakova, A. I. Pushkarev, I. P. Khaylov The energy transfer in the TEMP-4M pulsed ion beam accelerator// Review of Scientific Instruments. 2013. 84, 073302;

4. A. I. Pushkarev, Y. I. Isakova, I. P. Khaylov The influence of a shield on intense ion beam transportation // Laser and Particle Beams - 2013 - Vol. 31 - Issue 2, - p. 493-501.

5. A. I. Pushkarev, Y. I. Isakova, I. P. Khaylov Statistical analysis of the ion beam production in a self magnetically insulated diode // Physics of Plasmas. - 2013 - Vol. 20. - Issue 9, Article number 093105

6. A. I. Pushkarev, Y. I. Isakova, I. P. Khaylov Correlation analysis of intense ion beam energy in a self magnetically insulated diode // Laser and Particle Beams. - 2014 - Vol. 32. - Issue 2. - p. 311-319

7. A. I. Pushkarev, Y. I. Isakova, I. P. Khaylov Improvement in the statistical operation of a Blumlein pulse forming line in bipolar pulse mode // Review of Scientific Instruments. - 2014 - Vol. 85. - Issue 7, Article number 073303

8. Исакова Ю.И., Пушкарев А.И., 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

9. Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Хайлов И.П. Эффект стабилизации энергии пучка, формируемого диодом с магнитной самоизоляцией // Приборы и техника эксперимента, 2015, No. 1, pp. 91–99

10. Pushkarev A.I., Isakova Yu.I., Khailov I.P. Intense ion beam generation in a diode with explosive emission cathode in self-magnetically insulated mode // The European Physical Journal D, section Plasma Physics (2015), vol. 69, article #40.

11. И. П. Хайлов Исследование режимов работы двойной формирующей линии // Приборы и техника эксперимента, 2015, № 4, с. 53–55