

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Степанов Дмитрий Сергеевич

**Разработка и исследование эффективности ионных источников
портативных генераторов нейтронов**

Специальность 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Автор:



Москва, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Научный руководитель: **Школьников Эдуард Яковлевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты:

Долгов Александр Николаевич доктор физико-математических наук
Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский Институт автоматики имени Н.Л. Духова», ведущий научный сотрудник.

Митрофанов Константин Николаевич доктор физико-математических наук
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий Институт инновационных и термоядерных исследований», ведущий научный сотрудник.

Сорокин Дмитрий Леонидович кандидат физико-математических наук
Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук", научный сотрудник.

Защита состоится «13» апреля 2022 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.01.05 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «НИЯУ «МИФИ» по адресу: 115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «НИЯУ «МИФИ»

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МИФИ.01.05, кандидат технических наук, доцент  М.В. Лалаян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Портативные нейтронные генераторы (НГ) широко распространены в мировой науке и технике. Они представляют собой источники быстрых, надтепловых и тепловых нейтронов, обладающие малой площадью излучения, низкой стоимостью нейтрона и ограниченными массой и габаритами. Области применения этих приборов являются нейтронно-активационный анализ, радиография, досмотр багажа и грузов, исследование радиационной стойкости устройств, контроль состояния топливных сборок, геологоразведка, производство медицинских изотопов и др.

Непрерывное стремление к расширению области применения и повышению эффективности нейтронных технологий требует улучшения рабочих характеристик существующих и разработки новых портативных НГ. При этом, несмотря на относительно продолжительное время исследований, в большинстве случаев практически отсутствует в достаточной степени детальное описание физических процессов, лежащих в основе конкретных режимов работы различных видов портативных НГ. Настоящая работа посвящена исследованию физических процессов в некоторых видах портативных НГ, направленному на модификацию режимов их работы.

Генераторы нейтронов в соответствии с ГОСТ 21171-80 классифицируются следующим образом: генераторы постоянного потока нейтронов, генераторы модулированного потока нейтронов и генераторы импульсного потока нейтронов. Уже внутри этой классификации НГ можно разделить по типам ионных источников, лежащих в их основе. При этом, различные по характеру нейтронного потока генераторы могут реализовываться на одинаковых источниках, хотя каждый конкретный прибор и остается принадлежать только одному классу по ГОСТ 21171-80. Таким образом, несмотря на то, что далее будут рассматриваться конкретные

типы НГ (с конкретными источниками ионов), их рабочие характеристики и режимы, результаты могут быть использованы и в остальных классах НГ.

Портативные НГ постоянного потока главным образом применяются в областях, нуждающихся в получении больших экспозиционных доз нейтронного излучения. Например, при наработке изотопов, в досмотровых системах, при нейтронной радиографии и т.д. Следовательно, их ключевыми характеристиками являются нейтронный поток и ресурс. Данные НГ, как правило, основываются на СВЧ (ВЧ) источниках ионов с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР), либо на газонаполненных нейтронных трубках (ГНТ) с источниками ионов Пеннинга. Среди ГНТ одними из лучших характеристик обладает НГ-24 производства ВНИИА им. Н.Л. Духова, чьи поток и ресурс составляют 10^{11} н/с на $d(t,n)^4\text{He}$ ядерной реакции и 500 часов соответственно. Нейтронные генераторы на СВЧ источниках ионов с ЭЦР достигают здесь значительно больших значений. Например, генератор Thunderbird производства Pheonix LLC (США) обладает нейтронным потоком величиной в 10^{11} н/с на $d(d,n)^3\text{He}$ реакции (что может быть относительно легко увеличено до 10^{13} н/с на $d(d,n)^3\text{He}$ при ресурсе работы в 10 000 часов. Таким образом, наиболее перспективными портативными НГ постоянного потока являются генераторы на СВЧ (ВЧ) источниках ионов с ЭЦР. Однако, несмотря на преимущества, только несколько компаний занимаются их серийным производством: Adelphi Technology (США), ThermoFisher Scientific (США) и Pheonix LLC (США). В Российской Федерации подобные работы практически не ведутся, что только усиливает актуальность исследований физики развития СВЧ (ВЧ) разряда с ЭЦР в ионных источниках НГ, нацеленных на их последующую разработку.

Нейтронные генераторы модулированного потока применяются при активном контроле сред, в медицине и пр. Они актуальны в тех областях, где требуется изменение нейтронного потока в соответствии с заданным сигналом. Так, например, на таких генераторах базируется метод нейтронно-

радиационной терапии модулированной интенсивности (IMNRT), который позволяет поражать опухолевые клетки, минимизировав ущерб здоровым тканям пациента. Основой подобных портативных НГ также являются СВЧ (ВЧ) источники и ГНТ.

Нейтронные генераторы импульсного потока используются как в научных, так и в промышленных приложениях, в частности, при активационном анализе вещества в геологоразведке. В области нефтегазового каротажа основным генератором является ГНТ на источнике ионов Пеннинга. Несмотря на обширную историю эксплуатации и общую ясность происходящих в источнике физических процессов, исследования различных режимов его работы по-прежнему активно ведутся. Одним из актуальных направлений является реализация так называемого «быстрого старта», при котором временной промежуток между подачей напряжения на электроды и выходом нейтронного потока на амплитудный уровень в $1.5 \cdot 10^8$ н/с (0.4 мА в импульсе) не должен превышать 1 мкс при рабочем давлении ~ 1 мТорр. В настоящий момент, данная величина при указанном давлении складывается из времен задержки в 15 – 20 мкс и нарастания в 3 – 5 мкс, что в совокупности дает около 18 – 25 мкс. Реализация «быстрого старта» позволит значительно увеличить качество получаемой при каротаже информации и эффективность работы каротажного комплекса.

Среди нейтронных генераторов импульсного потока можно выделить приборы создающие высокоинтенсивные ($> 10^{10}$ н/имп) импульсы короткой длительности (< 1 мкс), чье главное применение заключается в исследовании быстропротекающих процессов и активационном анализе. В основном данный подкласс приборов занят генераторами на плазменном фокусе (ПФ), чьим наиболее мощным серийным представителем является ИНГ-105 ВНИИА им. Н.Л. Духова, генерирующий импульсы нейтронов величиной $1 \cdot 10^{10}$ н/имп на реакции $d(d,n)^3\text{He}$ и длительностью ~ 50 нс. К этой же категории портативных НГ можно отнести относительно новый генератор,

основанный на лазерно-плазменном ионном диоде с магнитной изоляцией, который будучи известным с 80-ых годов прошлого века все еще недостаточно разработан для практического использования. Создание эффективной системы магнитной изоляции даст возможность применять современную лазерную технику и генерировать импульсы нейтронов с ожидаемыми выходом до 10^{10} н/имп на реакции $d(d,n)^3\text{He}$ и длительностью ~ 300 нс, что достигает уровня генераторов на ПФ. При этом, нейтронный генератор на лазерно-плазменном ионном диоде будет обладать существенным преимуществом в частоте следования импульсов и ресурсе работы: 10 Гц против 1 импульса в 10 минут и 10^6 импульсов против 10^3 соответственно, что делает его создание весьма актуальным и перспективным.

Цели и задачи диссертационной работы:

Целью данной работы является разработка и исследование эффективности ионных источников портативных нейтронных генераторов на основе изучения протекающих в них физических процессов и изучения способов реализации новых режимов работы данных устройств. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка программы численного моделирования кинетики газового СВЧ разряда в молекулярном дейтерии в присутствии ЭЦР, основанной на решении кинетического уравнения Больцмана и позволяющей учитывать эволюцию ФРЭЭ.
2. Численное моделирование кинетики развития СВЧ разряда в присутствии ЭЦР в ионном источнике портативного нейтронного генератора при различных распределениях магнитного поля, амплитуде СВЧ поля и давлении.
3. Разработка оригинального технического решения магнитной системы СВЧ источника ионов с ЭЦР портативного нейтронного генератора, обеспечивающего максимальную эффективность ионизации в режиме

ЭЦР для получения больших ионных потоков на нейтронообразующую мишень.

4. Численное моделирование процесса развития разряда в импульсном Пеннинговском источнике ионов с электронным эмиттером ГНТ посредством электромагнитного кода KARAT при различных параметрах эмиттера, высоковольтного импульса, геометриях электродов, распределениях и индукции магнитного поля, а также давлениях.
5. Определение основных механизмов влияния параметров импульсного Пеннинговского источника ионов с электронным эмиттером ГНТ на форму и амплитуду импульса ионного тока.
6. Разработка оригинального технического решения импульсного Пеннинговского источника ионов с электронным эмиттером каротажной ГНТ, способного реализовать режим «быстрого старта» (резкое укорочение фронтов импульса тока и нейтронов), увеличивающий качество получаемой при каротаже информации и эффективность работы каротажных комплексов.
7. Разработка оригинального технического решения системы магнитной изоляции обратных электронов лазерно-плазменного ионного диода экспериментального импульсного НГ, позволяющее увеличить амплитуду и длительность импульсов ионного тока.
8. Экспериментальная апробация лазерно-плазменного ионного диода с системой магнитной изоляции обратных электронов экспериментального импульсного НГ.

Научная новизна:

1. Показан механизм влияния распределений внешнего магнитного поля и электрической компоненты СВЧ поля в СВЧ источнике ионов с ЭЦР на эффективность образования ионов и выделен оптимальный для наработки

ионов дейтерия диапазон напряженностей магнитного и СВЧ полей, значительно увеличивающий величину ионного тока источника. Предложен метод оценки эффективности работы СВЧ ионного источника с ЭЦР.

2. Предложено оригинальное техническое решение магнитной системы призматического СВЧ источника ионов с ЭЦР портативного НГ, обеспечивающее увеличение генерируемого ионного тока. Получен патент на полезную модель «СВЧ источник ионов с ЭЦР» № 206590 от 20.05.2021 г.

3. Сформулированы механизмы влияния геометрии и эмиссионной способности электронного эмиттера, формы и амплитуды высоковольтного импульса, геометрии электродов, распределения и индукции внешнего магнитного поля, а также давления рабочего газа импульсного источника ионов Пеннинга с электронным эмиттером ГНТ на форму и величину импульса ионного тока, позволившие выявить наиболее эффективные для генерации нейтронных потоков режимы его использования.

4. Предложено оригинальные технические решения импульсного ионного источника Пеннинга каротажной ГНТ с кольцевым электронным эмиттером и профилированным анодом для реализации режима «быстрого старта», обеспечивающего короткие фронты нейтронных импульсов. Получен патент на полезную модель «Импульсный источник ионов Пеннинга» №192776 от 13.06.2019 г.

5. Предложено оригинальное техническое решение лазерно-плазменного ионного диода с магнитной изоляцией экспериментального импульсного НГ, позволяющее увеличить амплитуду и длительность импульсов ионного тока, и увеличить степень подавления обратного тока электронов для увеличения нейтронного выхода НГ. Получен патент на полезную модель «Ионный диод с магнитной изоляцией электронов» № 200931 от 02.07.2020 г.

6. Экспериментально показано значительное увеличение нейтронного выхода импульсного НГ при использовании разработанного технического решения лазерно-плазменного ионного диода с магнитной изоляцией.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Метод оценки эффективности работы СВЧ ионного источника с ЭЦР, основанный на анализе распределения параметра $E_0^2\gamma$ в объеме рабочей камеры источника позволяет проектировать высокоэффективные СВЧ источники ионов для портативных НГ.

2. Оригинальное техническое решение магнитной системы призматического СВЧ источника ионов с ЭЦР портативного НГ повышает эффективность преобразования СВЧ мощности в ионный ток на 80% по сравнению с существующими установками.

3. Оригинальное техническое решение импульсного ионного источника Пеннинга с электронным эмиттером ГНТ, реализующее режим «быстрого старта», позволяет значительно увеличить качество получаемой при каротаже информации и эффективность работы каротажных комплексов, оснащенных ГНТ.

4. Оригинальное техническое решение лазерно-плазменного ионного диода с магнитной изоляцией обратных электронов экспериментального импульсного НГ увеличивает амплитуду и длительность импульсов ионного тока и увеличивает степень подавления обратного тока электронов, что дает возможность генерировать импульсы нейтронов величиной до $6 \cdot 10^9$ н/имп на реакции $d(d,n)^3\text{He}$ и длительностью ~ 0.6 мкс (при лазерном импульсе длиной волны 1.064 мкм, длительностью 10 нс и энергией 0.7 Дж). Данный результат получен на экспериментальном импульсном нейтронном генераторе НИЯУ МИФИ и показал возможные пути дальнейшего увеличения нейтронного выхода на этом генераторе.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Сформулирован и обоснован критерий выбора рабочих распределений электромагнитного СВЧ и внешнего магнитного поля СВЧ источника ионов с ЭЦР портативного НГ, обеспечивающих максимальную эффективность

ионизации в режиме ЭЦР для получения больших ионных потоков на нейтронообразующую мишень. Разработано оригинальное техническое решение магнитной системы для призматического СВЧ источника ионов с ЭЦР на основной моде портативного НГ, повышающее эффективность генерации ионов на 80%. Патент №206590 от 20.05.2021 г.

2. Разработаны и обоснованы зависимости формы и величины импульсов ионного тока импульсного источника ионов Пеннинга с электронным эмиттером ГНТ от его параметров. На этой основе разработано оригинальное техническое решение разрядного узла каротажной ГНТ, позволяющее реализовать режим «быстрого старта» (резкое укорочение фронтов импульса тока и нейтронов), увеличивающий качество получаемой при каротаже информации и эффективность работы каротажных комплексов. Патент №192776 от 13.06.2019 г.

3. Разработано оригинальное техническое решение магнитной системы лазерно-плазменного ионного диода с магнитной изоляцией обратных электронов, позволяющее увеличить амплитуду и длительность импульсов ионного тока. Проведены изготовление магнитной системы ионного диода, измерение магнитных полей, его экспериментальная апробация в составе экспериментального импульсного НГ и анализ результатов апробации. Патент №200931 от 02.07.2020 г.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, соответствием результатов моделирования результатам моделирования других программ и результатам сторонних экспериментов, а также сопоставимостью экспериментальных данных и данных компьютерного моделирования.

Апробация результатов диссертации.

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на Международных и Российских конференциях, симпозиумах и научных семинарах:

1. V – VIII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий», 2016 – 2019, Россия, г. Москва.

2. 2016, 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE 2016, 2018), Russia, Saratov.

3. XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2017, Россия, г. Звенигород.

4. XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2018), 2018, Russia, Protvino.

5. IV – VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, 2018 – 2021, Россия, г. Москва.

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении работ по грантам Министерства науки и высшего образования РФ – соглашения № 14.575.21.0169 от 26.09.2017 г. (RFMEFI57517X0169) и № 05.605.21.0182 от 29.11.2019 г. (RFMEFI60519X0182), а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований – договор № 19-32-90033\19 от 22.08.2019 г.

Публикации.

Основные материалы диссертации изложены в **25 публикациях**, в т.ч. **5 статей** – в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных **Web of Science** и **Scopus**, входящих также в перечень, сформированный Министерством науки и высшего образования Российской

Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 17 публикаций в сборниках трудов и тезисов международных конференций, 3 патента Российской Федерации на полезные модели.

Личный вклад автора.

Автором проведены моделирование физических процессов в разрядах источников ионов различных типов, анализ результатов, их обобщение и разработка оригинальных технических решений источников ионов различных типов. Программа моделирования кинетики газового СВЧ разряда в присутствии ЭЦР, учитывающая эволюцию ФРЭЭ, описанная и используемая в Главе 1 создана автором. Электродинамический код KARAT, используемый в Главах 2 и 3, был взят в готовом виде; разработка моделей, анализ и обобщение результатов выполнены автором. Экспериментальная апробация системы магнитной изоляции в лазерно-плазменном ионном диоде импульсного нейтронного генератора, описанная в Главе 3, была проведена при участии автора; разработка конструкции системы магнитной изоляции ионного диода, его сборка, обработка результатов измерений, их интерпретация и анализ выполнены автором.

Автором обоснованы выносимые на защиту научные положения, сделаны выводы по работе, которые вносят существенный вклад в понимание физики плазменных процессов в различных типах источников ионов, предложены их оригинальные технические решения. Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключений к главам. Общий объем диссертации составляет 191 страницу, включая 89 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 169 наименований.

Содержание работы

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

В первой главе рассматривается СВЧ источник ионов с ЭЦР для портативных нейтронных генераторов, влияние условий ЭЦР на эффективность работы источника и технические решения, повышающие ее.

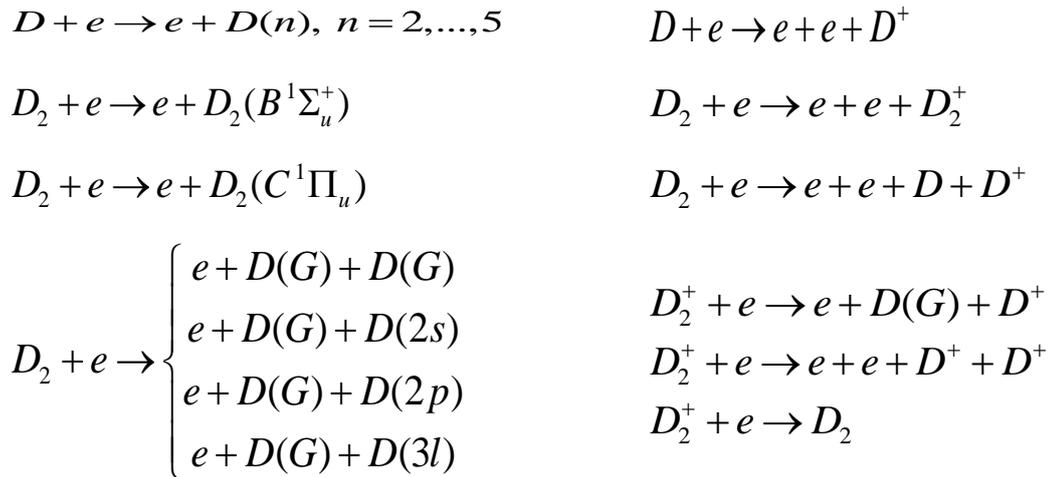
В разделе 1.1 разрабатывается кинетическая модель развития СВЧ разряда с ЭЦР в приближении максвелловской функции распределения энергии электронов и исследуется влияние условий ЭЦР и начального давления в СВЧ источнике на извлекаемый ионный ток.

Диссипация энергии СВЧ поля при ЭЦР описывается нерелятивистской траекторной моделью движения электрона в идеальной плазме в скрещенных электрическом и магнитном полях [1,2], что позволяет представить величину поглощаемой одним электроном мощности p следующим образом:

$$p = \langle -eE_0 v_e \rangle_t = \Delta_e \cdot v = \frac{e^2 E_0^2 v}{2m_e (\omega^2 + v^2)} \gamma$$
$$\gamma = \frac{\left(1 + \frac{\omega_L^2}{\omega^2} + \frac{v^2}{\omega^2}\right) \left(1 + \frac{v^2}{\omega^2}\right)}{\left(1 - \frac{\omega_L^2}{\omega^2} - \frac{v^2}{\omega^2}\right)^2 + 4 \frac{v^2}{\omega^2}}$$

e , m_e – заряд и масса электрона соответственно, p – энергия СВЧ поля, рассеиваемая одним электроном в единицу времени, Δ_e – средняя энергия электрона за период колебаний, E_0 – локальная амплитуда СВЧ поля, ω – его частота, ω_L – циклотронная частота электрона, v – эффективная частота

соударения электрона с тяжелыми частицами, γ – коэффициент резонансного усиления, показывающий во сколько раз диссипация энергии при ЭЦР больше, чем в отсутствие магнитного поля ($\gamma = 1$). Основной величиной, определяющей здесь кинетику разряда, является произведение $E_0^2\gamma$. Кинетическая схема разряда строится для молекулярного дейтерия и включает в себя следующие реакции:



Показывается (методами математического моделирования) существование оптимального для ионизации молекулярного дейтерия значения величины $E_0^2\gamma$ равного $1.6 \cdot 10^{11} \text{ В}^2/\text{м}^2$ (в приближении максвелловской функции распределения). При этом, уровень СВЧ мощности, необходимый для заполнения плазмой резонатора объемом $\sim 300 \text{ см}^3$ составляет $\sim 400 \text{ Вт}$, что определяет оптимальное среднее значение E_0 как $4 \cdot 10^4 \text{ В/м}$, а γ как 10^2 (слабый ЭЦР), чему соответствует магнитная индукция $B_0 = 0.0815 \text{ Тл}$ (резонансу отвечает значение $B_0 = 0.0875 \text{ Тл}$ и $\gamma \sim 10^9$). Данный результат хорошо согласуется с экспериментальным данным [3–5].

В разделе 1.2 кинетическая модель дополняется механизмами учета поступления и гибели частиц, а также отражения СВЧ волны. Это позволяет оценить минимально необходимое рабочее давление, а также описать режим работы источника при превышении концентрации нейтрального газа над критической концентрацией плазмы, которое по данным [3–5] составляет около $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (0.1 Па), против предельной для излучения частотой 2.45 ГГц концентрации плазмы в $8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Показывается, что извлечение из

источника ионного тока на уровне 10 мА (соответствует натеканию рабочего газа со скоростью $Q_{D_2} = 1 \text{ см}^3/\text{мин}$) может осуществляться только при величине начальной концентрации рабочего газа большей $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1), что соответствует экспериментальным данным [3–5]. Режим работы при превышении критической концентрации плазмы, исходя из полученных результатов (рис. 2), представляется следующим образом. При поступлении СВЧ мощности в резонатор электроны достаточно быстро (за единицы мкс) нагреваются до энергий $\sim 500 \text{ эВ}$, что обеспечивает ионизацию до критической концентрации. При ее превышении поступление СВЧ мощности в рассматриваемую локальную область резонатора прекращается, однако накопленной энергии хватает для полной ионизации рабочего газа и поддержания заданной ($\sim 10 \text{ мА}$) эмиссионной способности плазмы в течение значительно большего промежутка времени (несколько мс). В результате, за непрерывным режимом работы СВЧ источника ионов с ЭЦР стоит импульсно-периодический режим ионизации со средним временем на амплитудном уровне концентрации плазмы $\sim 10 \text{ мс}$ и спадом за $\sim 5 \text{ мс}$. Сильная пространственная неоднородность условий ионизации, наряду со стремящейся к 1 скважностью импульсно-периодического режима усредняет интенсивность образования ионов по объему резонатора, что проявляется как непрерывный режим работы источника, наблюдаемый экспериментально.

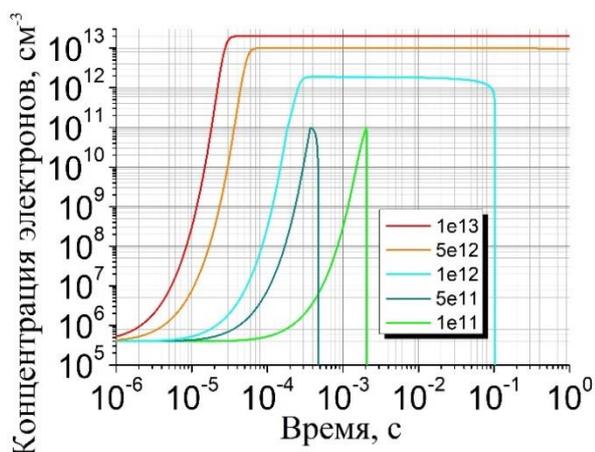


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов плазмы от времени для различных начальных концентраций молекулярного дейтерия (без учета отражения СВЧ волны) при $Q_{D_2} = 1 \text{ см}^3/\text{мин}$.

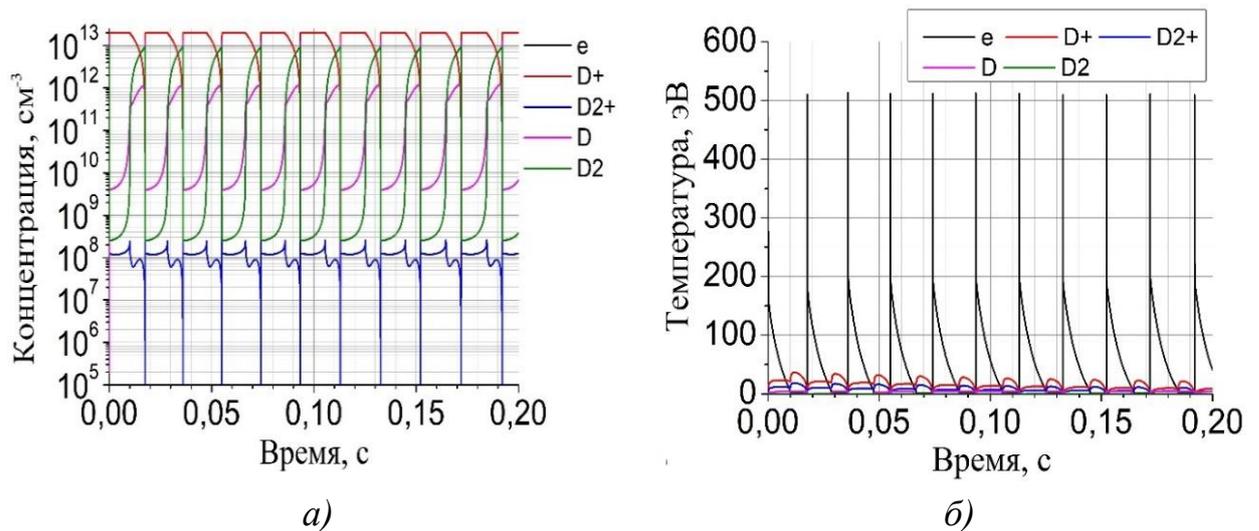


Рис. 2. Зависимости параметров плазмы при $Q_{D_2} = 1 \text{ см}^3/\text{мин}$, $n_{D_{20}} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $I_{\text{ext}} \sim 10 \text{ мА}$ от времени: а) – концентрация, б) – температура

Таким образом, предлагается метод оценки эффективности работы СВЧ источников ионов с ЭЦР, основанный на рассмотрении распределения величины $E_0^2\gamma$ в объеме резонатора и сравнении его с оптимальным значением для данного рабочего газа, полученным в результате численного моделирования кинетики разряда. Показано, что типичная для многих экспериментальных СВЧ источников ионов с ЭЦР эффективность составляет около 40 – 50%, что обуславливается наличием в объеме источника областей точного циклотронного резонанса, приводящих только к сильному перегреву электронов, при практически отсутствующей ионизации. Простая без резонансная модификация распределения магнитного поля, устраняющая эти области, повышает эффективность источника до 65%. Идеальное же распределение магнитного поля должно обеспечивать равенство $E_0^2\gamma = \text{const}$ в каждой точке резонатора, что для призматического резонатора на основной моде означает распределение магнитного поля, определяемое функцией \sin^{-2} в горизонтальных измерениях и однородное в вертикальном. Предложено оригинальное техническое решение магнитной системы, стремящееся реализовать идеальное \sin^{-2} распределение, с которым эффективность источника повышается до 84% (рис. 3).

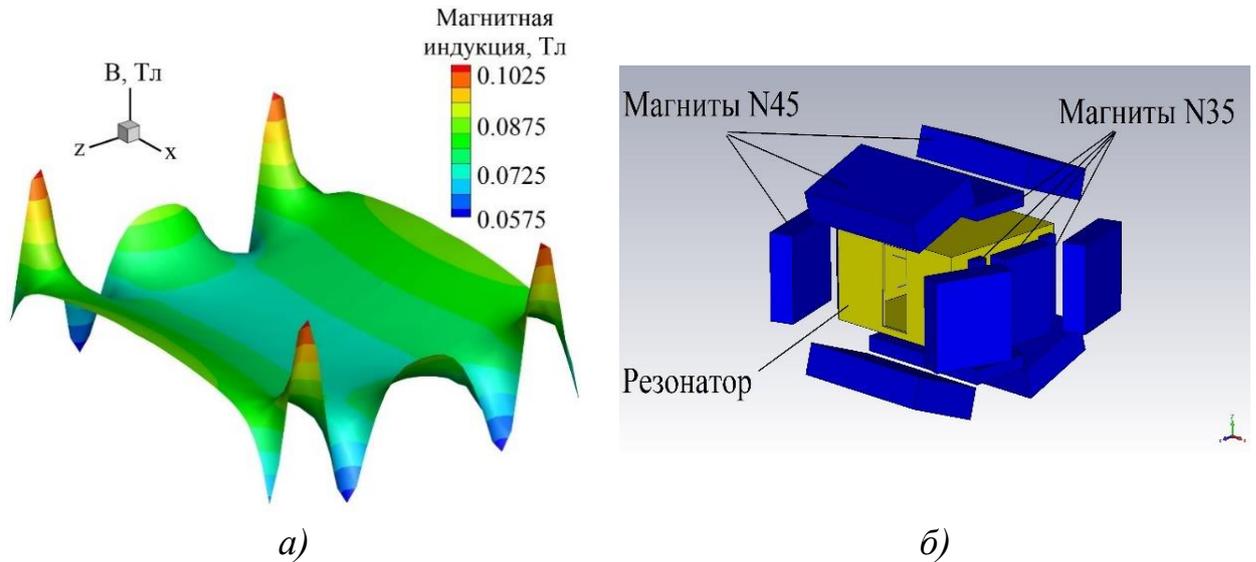


Рис. 3. Реализация магнитного поля \sin^{-2} :
 а) – распределение, б) – схема магнитной системы.

В разделе 1.3 разрабатывается вторая кинетическая модель, нацеленная на уточнение оптимального значения величины $E_0^2\gamma$ посредством снятия приближения Максвелловской функции распределения с помощью непосредственного решения кинетического уравнения Больцмана вместе с системой сопутствующих уравнений на концентрации и энергии остальных компонент разряда:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_e(t, E)}{\partial t} &= \frac{eE_0^2 v}{2m_e(\omega^2 + v^2)} \gamma(\omega, \omega_L, v) \frac{\partial f_e}{\partial E} + \int [f_e(E', E_t') f_e(E_t') - f_e(E) f_e(E_t)] v_{ee} d\sigma_{ee}(E_{ee}) n_e dE_t + \\ &+ \sum_{j=1}^4 [f_e(E'_{ej}(E, w_j)) - f_e(E)] v_{ej} \sigma_{ej}(E_{ej}) n_j + \sum_{j=1}^M [f_e(E + E'_j) - f_e(E)] v_{ej} \sigma_j(E_{ej}) n_j + \\ &+ \sum_{j=1}^L [f_e(E'_{j1}(E)) + f_e(E'_{j2}(E)) - f_e(E)] v_{ej} \sigma_j(E_{ej}) n_j \\ \frac{\partial n_e(t)}{\partial t} &= \sum_{j=1}^{G_e} \int f_e(E) v_{ej} \sigma_j(E_{ej}) n_j n_e dE \\ \frac{\partial w_1(t)}{\partial t} &= \int f_e(E) v_{e1} \sigma_j(E_{e1}) E_{e1} (m_e/M_1) n_e dE \\ \frac{\partial n_1(t)}{\partial t} &= \sum_{j=1}^{G_1} \int f_e(E) v_{e1} \sigma_j(E_{e1}) n_1 n_e dE \\ &\dots = \dots \\ \frac{\partial w_4(t)}{\partial t} &= \int f_e(E) v_{e4} \sigma_j(E_{e4}) E_{e4} (m_e/M_4) n_e dE \\ \frac{\partial n_4(t)}{\partial t} &= \sum_{j=1}^{G_4} \int f_e(E) v_{e4} \sigma_j(E_{e4}) n_4 n_e dE \end{aligned}$$

Численное решение системы осуществляется неявным методом Адамса-Мултона с переменным шагом и порядком интегрирования, реализованным на языке Fortran с использованием параллельных вычислений посредством OpenMP. Проводится анализ точности получаемых в модели результатов, а также оцениваются оптимальные с точки зрения времени счета и величины погрешности численные параметры модели: 26 часов работы и 3% ошибки при 201 расчетной точке и равной 20 кратности учитываемых значений ФР ее максимальному значению.

В разделе 1.4 исследуется влияние условий ЭЦР в СВЧ разряде на динамику плазмообразования с использованием разработанной в разделе 1.3 кинетической модели. Показывается, что при достаточных для ионизации рабочего газа значениях электрического и магнитного полей ФР энергии электронов плазмы стремится к виду δ -функции. Уточненное значение оптимальной для ионизации молекулярного дейтерия величины $E_0^2\gamma$ составило $4 \cdot 10^{10} \text{ В}^2/\text{м}^2$, что в 4 раза меньше полученного с использованием Максвелловского приближения. Показано, что значительное превышение данного значения приводит не к медленному затуханию скорости ионизации, как это было в рамках Максвелловской ФР, а к резкому переходу электронов в режим «убегания» и практически полному прекращению ионизации. Показано, что данный эффект является причиной наблюдаемого в экспериментальной работе [9] влияния распределения магнитного поля на плотность извлекаемого из СВЧ источника тока. Наибольший же ионный ток может быть достигнут при выполнении условия $E_0^2\gamma = 4 \cdot 10^{10} \text{ В}^2/\text{м}^2$ в каждой точке резонатора, что для призматического резонатора на основной моде означает распределение магнитного поля в соответствии с функцией \sin^2 .

Во второй главе рассматривается импульсный источник ионов Пеннинга газонаполненной нейтронной трубки, механизмы управления параметрами импульса извлекаемого тока, а также способы реализации т.н. режима «быстрого старта».

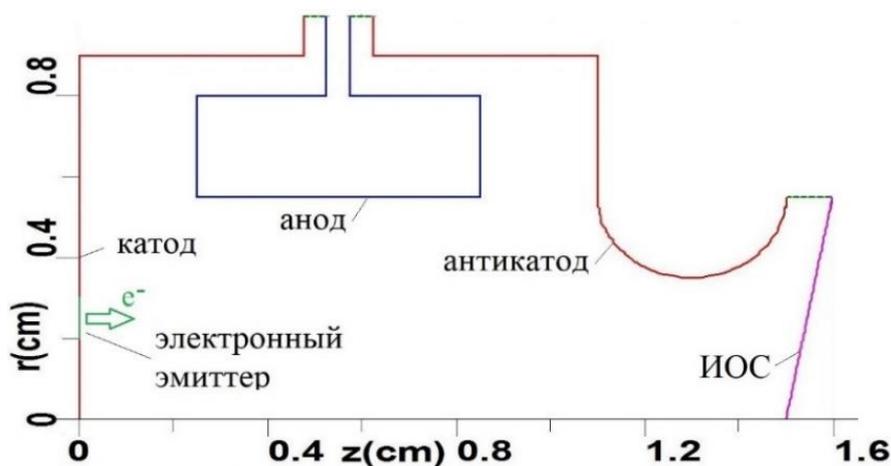


Рис. 4. Модель импульсного источника ионов Пеннинга с электронным эмиттером в коде KARAT.

В разделе 2.1 описывается создание математической модели импульсного источника ионов Пеннинга с электронным эмиттером посредством электромагнитного кода KARAT (рис. 4). Приводится обоснование выбора ее численных и физических параметров (давление ~ 1 мТорр, напряжение ~ 2.5 кВ, магнитная индукция ~ 1500 кГс), упрощений относительно реальной конструкции ионного источника, а также рассматриваемых кинетических процессов.

В разделе 2.2 исследуется влияние формы, размеров, расположения и величины тока электронного эмиттера на параметры импульса извлекаемого ионного тока.

Показывается, что структура импульсов ионного тока, извлекаемого из импульсного Пеннинговского ионного источника с электронным эмиттером такова, что на ней можно выделить три участка (рис. 5). На первом имеет место быстрый рост тока, скорость которого затем резко уменьшается. Данная точка характеризуется величиной $I_{0.5}$, значение которой соответствует извлекаемому в этот момент току, а индекс означает время в мкс. На втором

участке возрастание ионного тока замедляется, после чего наступает третий участок, где ток постоянен, что характеризуется величинами максимального извлекаемого тока I_m и общим временем его нарастания τ_m . Таким образом, импульс ионного тока Пеннинговского источника ионов с электронным эмиттером описывается тремя параметрами: $I_{0.5}$, I_m и τ_m .

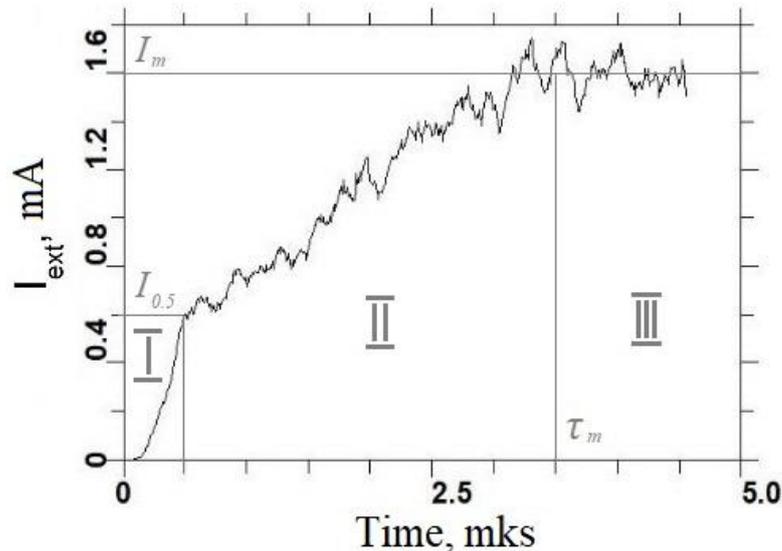


Рис. 5. Структура импульсов ионного тока источника ионов Пеннинга с электронным эмиттером

Эмиссионный ток является не самым удобным способом управления ионным током, т.к. определяет только начальную концентрацию электронов, а, следовательно, и начальную скорость развития разряда. Ускорение ионизации при его повышении приводит к более быстрому уменьшению потенциала внутри анода, что в итоге его же и ограничивает. Поэтому, зависимость $I_{0.5}$ от тока электронов имеет вид затухающей экспоненты и не превосходит 1 мА (рис. 6 а). Зависимость τ_m также носит асимптотический характер и не опускается ниже 3 мкс. Обе асимптоты начинают насыщаться при токе большем 10 мА. Величина I_m от электронного тока не зависит.

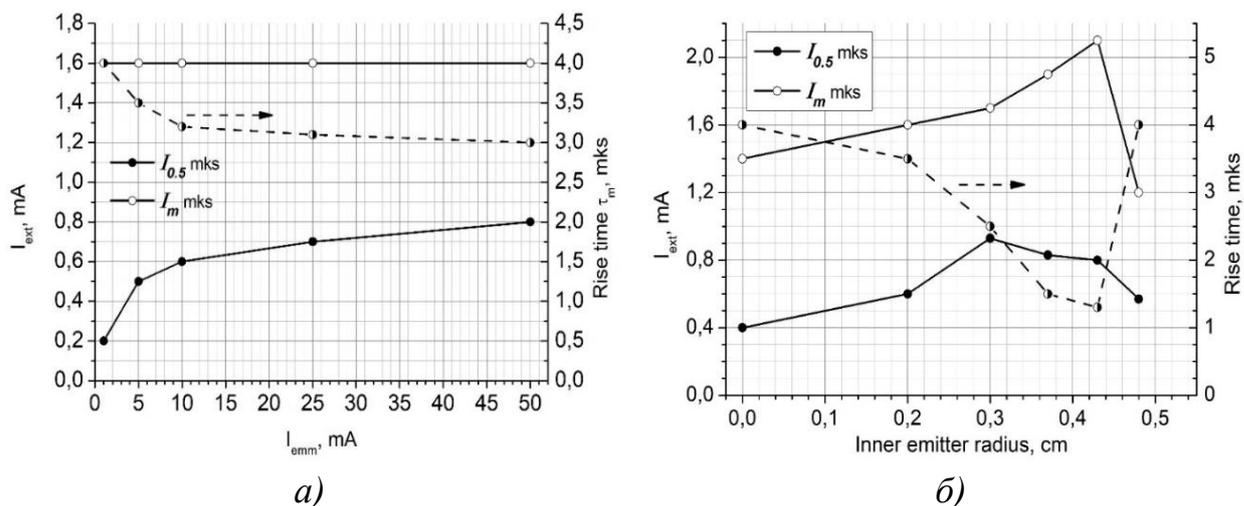


Рис. 6. Зависимости параметром импульса ионного тока от свойств электронного эмиттера: *a)* – эмиссионного тока, *б)* – внутреннего радиуса

Радиальное положение электронного эмиттера значительнее чем электронный ток, влияет на параметры извлекаемого из ионного источника импульса. Зависимости параметров импульса ионного тока $I_{0.5}$, I_m и τ_m от этого положения имеют экстремальный вид. Так, при увеличении радиуса эмиттера электроны инжектируются в область более высокого потенциала и уменьшение электрического поля происходит не так быстро, а скорость ионизации возрастает. С другой стороны, электронный поток приближается к аноду и антикатоде, в результате чего гибель электронов на них усиливается. Отсюда следует наличие оптимального радиуса кольцевого эмиттера, позволяющего уменьшить время нарастания ионного тока вплоть до 1.5 мкс и поднять максимальный ионный ток до величины свыше 2 мА (рис. 6 б).

В разделе 2.3 исследуется влияние амплитуды и фронта импульса анодного напряжения на параметры импульса извлекаемого ионного тока.

Изменение амплитуды анодного напряжения является наиболее простым способом воздействия на импульс ионного тока. Поток электронов, эмитируемый внутрь рабочего объема импульсного Пеннинговского источника ионов, распространяется вдоль линий магнитного поля и занимает область, профиль которой подобен форме эмиттера (кольцо). Из-за замагниченности электронов приобретаемая ими энергия равняется не непосредственно потенциалу анода, а максимальному значению потенциала

на том радиусе, на котором замагничены электроны. Приобретаемая ими энергия затрачивается на ионизацию рабочего газа, в результате чего заряженные частицы накапливаются в источнике и уменьшают величину ускоряющего электроны потенциала. В пределе она устремляется к нулю, лишая вновь эмитированные электроны возможности получить достаточную для ионизации энергию, а также ограничивая их ток. С другой стороны, увеличение концентрации частиц в разряде увеличивает поток частиц к стенкам источника, что способствует достижению разрядом стационарного состояния. В результате, рост скорости ионизации и величины извлекаемого ионного тока замедляются, пока ток не достигнет максимального значения I_m . Вместе с величиной $I_{0.5}$ максимальный ток практически линейно зависит от анодного напряжения (в масштабах единиц мА), а для τ_m эта зависимость носит асимптотический характер и не опускается ниже 3 мкс (рис. 7 а).

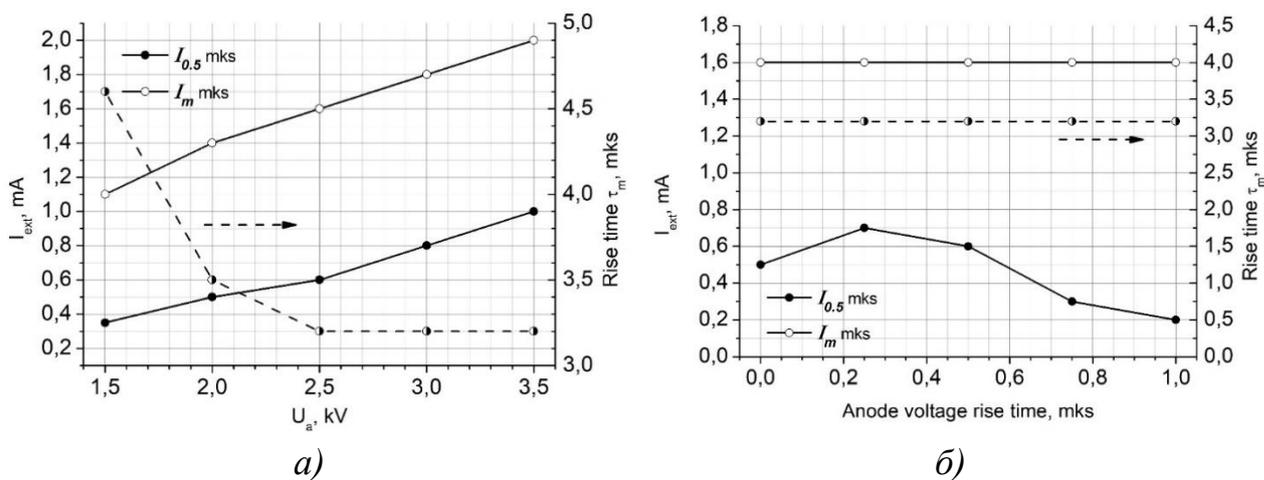


Рис. 7. Зависимости параметров импульса ионного тока от параметров импульса анодного напряжения: а) – амплитуды, б) – времени нарастания

Время нарастания анодного напряжения существенно только на начальной стадии развития разряда. Так, слишком быстрый его рост заставляет электроны находиться в объеме источника с чрезмерно большой энергией и скорость ионизации снижается, а слишком медленный рост приводит к недостаточной для быстрой ионизации энергии электронов. Отсюда вытекает наличие некоторого оптимального значения времени нарастания анодного напряжения, обеспечивающее наиболее быстрый рост ионного тока. В рассмотренной конфигурации источника этому

соответствует значению 0.25 мкс, при котором величина $I_{0.5} = 0.7$ мА (рис. 7 б). Таким образом, время нарастания анодного напряжения влияет только на прямоугольность импульса ионного тока.

В разделе 2.4 исследуется влияние формы внутренней поверхности анода на параметры импульса извлекаемого ионного тока.

Геометрия анода позволяет управлять распределением потенциала внутри источника, влияя на его свойства, например, на долю извлекаемых ионов. Придание внутренней поверхности анода формы усеченного конуса изменяет положение максимума потенциала, тем самым увеличивая или уменьшая величину объема из которого происходит извлечение ионов. При этом имеет место оптимальное расположение сужения анода, при котором энергия электронного потока и доля извлекаемых ионов будут максимальными и которое находится приблизительно посередине между прикатодным краем анода и его центром. Максимальная величина ионного тока слабо реагирует на изменения формы анода, оставаясь на уровне ~ 1 мА, а время ее достижения изменяется в диапазоне 1.5 – 2.5 мкс (рис. 8). Тем не менее, это позволяет получать импульсы тока, форма которых близка к прямоугольной, а колебания тока на плоской вершине не превосходят 15%.

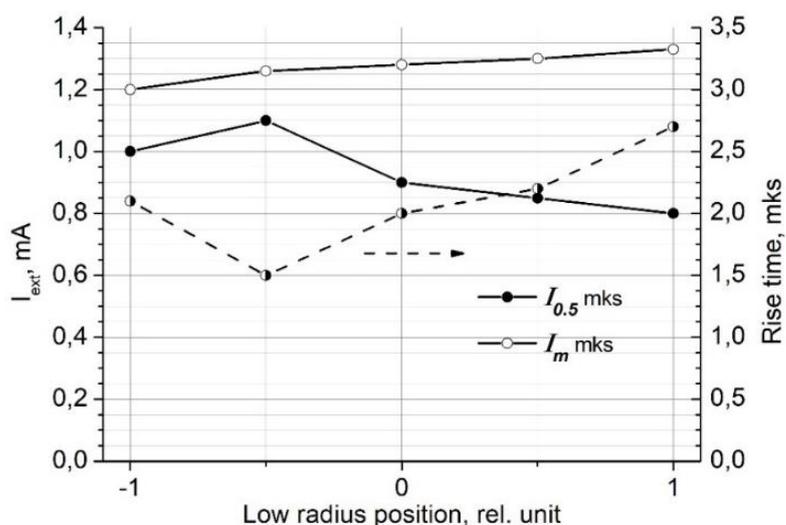


Рис. 8. Зависимости параметром импульса ионного тока от относительного положения сужения анода

В разделе 2.5 исследуется влияние распределения и величины магнитного поля на параметры импульса извлекаемого ионного тока.

Сильной способностью влиять на распределение потенциала обладает распределение магнитного поля. Так, транслируя порождаемое катушкой магнитное поле вдоль продольной оси источника можно реализовать разряд, форма которого подобна усеченному конусу и создает соответствующее распределение потенциала внутри источника. Это позволяет относительно легко регулировать величину извлекаемого из источника тока в широком диапазоне значений от долей до единиц миллиампер. Недостаток заключается в одновременном изменении формы импульса вместе с временем его нарастания, которое может составлять величину от 0.5 до единиц микросекунд. При этом, трансляцией магнитного поля катушки можно добиться достаточно прямоугольных по форме импульсов тока, колебания на плоской вершине которых не превосходят 10% (рис. 9 а).

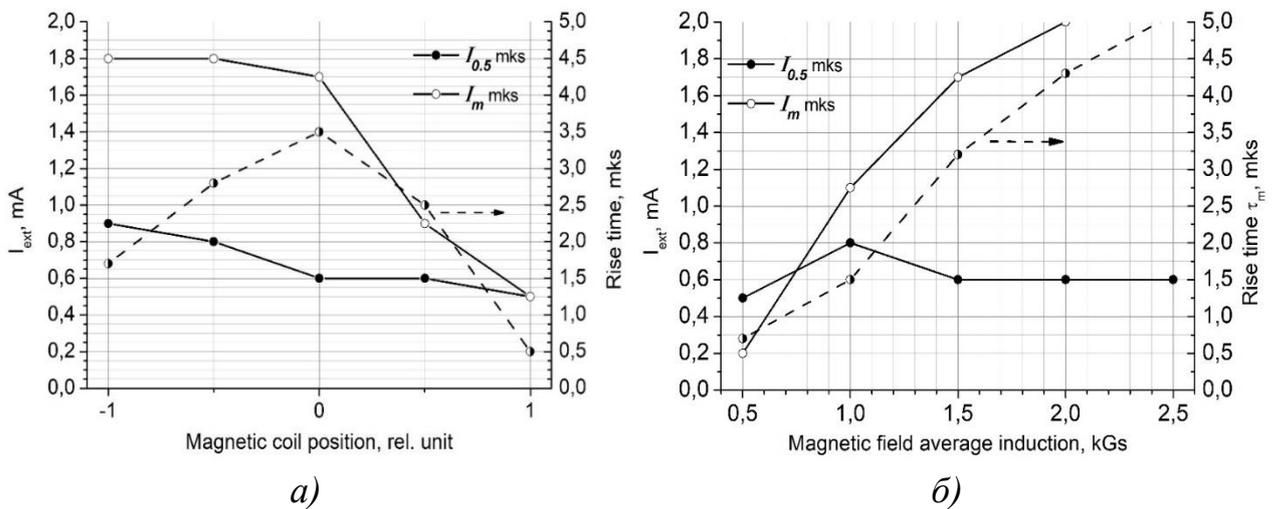


Рис. 9. Зависимости параметром импульса ионного тока от магнитного поля: а) – положения центра магнитной катушки относительно анода, б) – среднего значения величины магнитного поля

Индукция магнитного поля влияет преимущественно на скорость диффузии и является крайне удобным способом воздействия на импульс извлекаемого ионного тока из-за близкой к линейной зависимости максимального тока и времени его нарастания, которые изменяются в диапазоне от ~ 0.5 мА до > 2 мА и от 1 мкс до > 5 мкс соответственно. Зависимость скорости роста ионного тока от индукции магнитного поля

слабая, но она носит экстремальный характер, с максимумом в области более слабого поля (рис. 9 б).

В разделе 2.6 исследуется влияние давления молекулярного дейтерия на параметры импульса извлекаемого ионного тока.

Давление рабочего газа достаточно просто влияет на развитие разряда, а потому оба токовых параметра импульса демонстрируют практически линейную зависимость от давления. Время нарастания тока τ_m имеет форму затухающей экспоненты с асимптотой на уровне 1.5 мкс, близость к которой наблюдается уже при 3.0 мТорр (рис. 10).

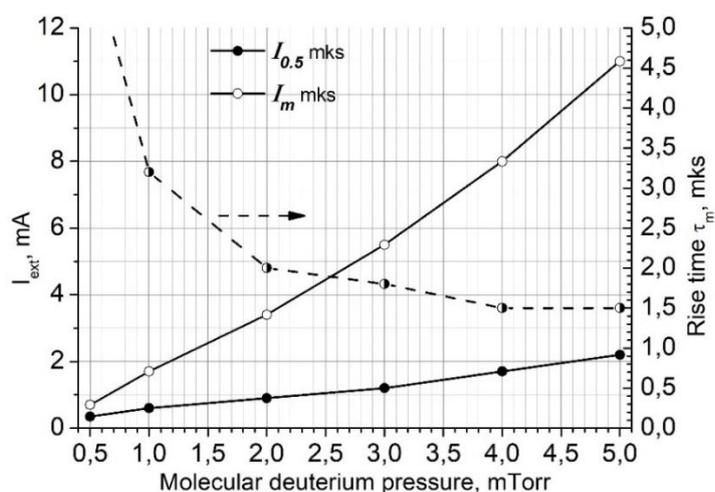


Рис. 10. Зависимости параметром импульса ионного тока от давления

Итого, управление работой импульсного Пеннинговского источника ионов с электронным эмиттером возможно эффективно осуществлять через такие его параметры как величина анодного напряжения, распределение и индукция магнитного поля, а также давление рабочего газа. Остальные же параметры источника: расположение и величина тока электронного эмиттера, время нарастания анодного напряжения и форма анода должны принимать определенные значения для каждого режима работы источника. Таким образом, возможна реализация импульсов ионного тока со временем нарастания от 0.5 мкс, амплитудой до единиц миллиампер и различной степенью прямоугольности, что в полной мере позволяет реализовывать режим «быстрого старта».

В третьей главе рассматривается разработка, создание и экспериментальная апробация ионного диода с магнитной изоляцией электронов для генерации импульсных нейтронных потоков высокой интенсивности.

В разделе 3.1 проводится литературно-технический анализ развития лазерно-плазменных ионных диодов с магнитной изоляцией за последние 40 лет (с момента их появления), на основании которого определяется наиболее перспективный прототип – лазерно-плазменный ионный диод с прямым ускорением и системой магнитной изоляции на базе постоянных магнитов [6]. Схема этого диода представлена на рис. 11.

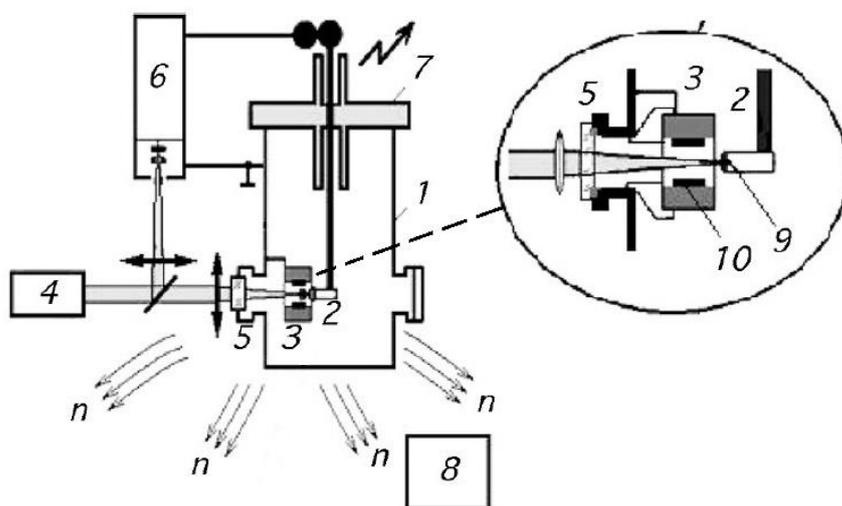


Рис. 11. Схема эксперимента с прототипом лазерно-плазменного ионного диода: 1 – вакуумная камера, 2 – анод, 3 – катод (постоянный магнит), 4 – импульсный лазер, 5 – оптическое окно, 6 – генератор Аркадьева-Маркса, 7 – высоковольтный ввод, 8 – нейтронный детектор, 9 – плазмообразующая TiD мишень, 10 – нейтронообразующая мишень.

В разделе 3.2 разрабатывается лазерно-плазменный ионный диод с магнитной изоляцией вторичных электронов на постоянных магнитах.

Новый лазерно-плазменный ионный диод должен обеспечивать полную магнитную изоляцию вторично-эмиссионных электронов. Степень выполнения данного требования по ходу разработки контролировалась посредством численного моделирования разлета лазерной плазмы в текущей геометрии диода посредством кода KARAT. Итоговая конструкция ионного диода представлена на рис. 12. Диод состоит из четырех NdFeB

магнитов марки НмБ 320/88 и двух магнитов марки НмБ 310/130, соединенных в две сборки, установленные навстречу друг другу. Внешняя часть магнитной цепи замыкается через стальные магнитопроводы, а распределение магнитного поля внутри диода корректируется с помощью полюсных наконечников. Таким образом, устанавливается достаточно однородное вдоль мишени магнитное поле, с индукцией в промежутке от 0.3 до 0.4 Тл на расстоянии до 5 мм от нее.

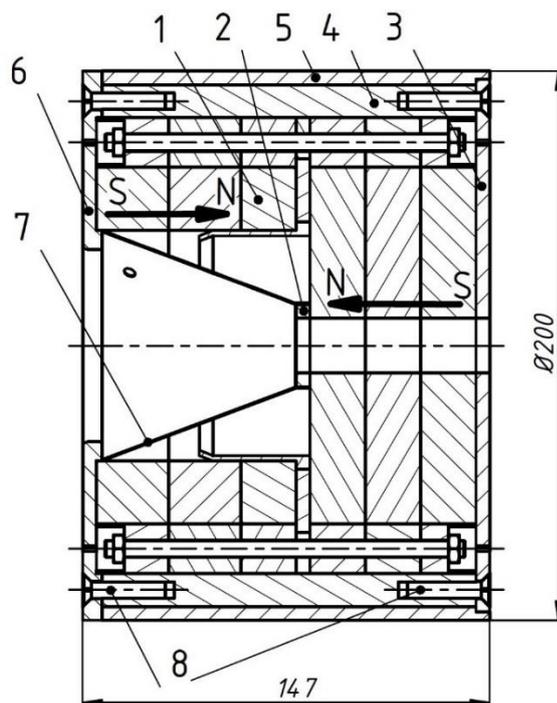


Рис. 12. Сборочный чертеж лазерно-плазменного ионного диода:
1 – магнитный блок, 2, 3, 5, 6 – элементы магнитопровода, 4 – дюралевая вставка, 7 – мишень, 8 – крепеж.

Внешний вид собранного диода представлен на рис. 13.



Рис. 13. Лазерно-плазменный ионный диод с магнитной изоляцией.

Измерение магнитного поля в рабочей области лазерно-плазменного ионного диода с магнитной изоляцией проводилось с помощью двухпозиционного датчика Холла, установленного на автоматической механической платформе. Данные о величинах продольной и поперечной компонентах магнитного поля снимались на 12 каналах, расположенных на 3-х радиусах: 20, 26 и 32 мм, по 4 равномерно распределенных канала на каждом и одном канале на оси системы. Относительная точность измерений составляла 1%. Восстановленное по экспериментальным данным распределение магнитного поля вдоль поверхности нейтронообразующей мишени представлено на рис. 14. Средняя величина различий с расчетным распределением равняется 3%. Само же измеренное магнитное поле имеет среднюю угловую неоднородность продольной компоненты около 3%, а радиальной ~ 10%.

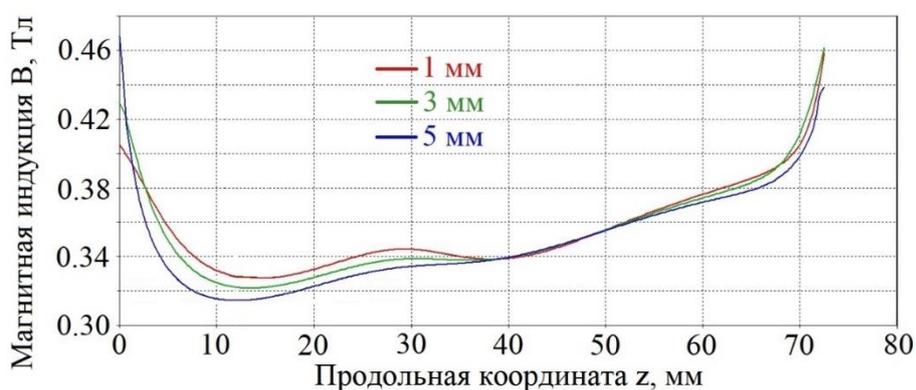


Рис. 14. Магнитное поле вдоль поверхности нейтронообразующей мишени на удалении в 1, 3 и 5 мм.

В разделе 3.3 проводилось экспериментальное исследование лазерно-плазменного ионного диода.

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 15. Вакуумная камера (1) объемом ~ 15 литров изготовлена из нержавеющей стали и оснащена капролоновым изолятором (7) на рабочее напряжение до 500 кВ, через который подводится высокое напряжение к аноду с лазерной мишенью (2). На противоположенной стороне камеры установлено оптическое окно для ввода лазерного излучения от источника (4) с просветлением для длины волны $\lambda = 1,06$ мкм. Вакуумная камера так же

оснащена вакуумным постом (9), обладающим средствами откачки для низкого и высокого вакуума, и датчиками контроля остаточного давления. Остаточное давление в камере во время экспериментов находилось на уровне ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Торр.

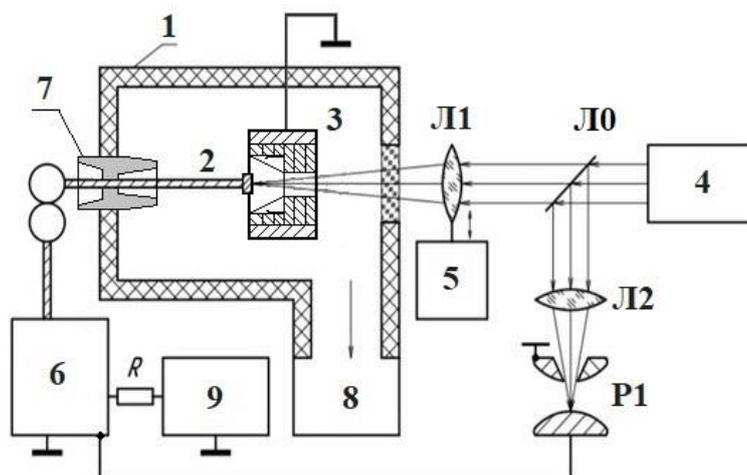


Рис. 15. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера, 2 – анод с лазерной мишенью, 3 – лазерно-плазменный ионный диод с магнитной изоляцией, 4 – импульсный лазер, 5 – сканирующее устройство, 6 – генератор импульсных напряжений, 7 – высоковольтный изолятор, 8 – вакуумный пост, 9 – блок высоковольтного питания.

Лазерный источник излучения (4) имеет следующие характеристики: длина волны 1064 нм, энергия в импульсе ~ 0.2 Дж, плотность мощности $\sim 10^{10}$ Вт/см², расходимость $2 \cdot 10^{-4}$ рад, длительность импульса ~ 10 нс, частота следования до 10 Гц. Лазерная мишени (2), изготовлена из ZrD и имеет стехиометрию 0.8.

Генератор импульсного напряжения (ГИН) выполнен по схеме Аркадьева-Маркса и состоит из 10 каскадов, залитых парафином. В каждом каскаде используется конденсатор с емкостью 0,05 мкФ и рабочим напряжением до 50 кВ. Ударная емкость ГИН составляет 5 нФ при амплитуде выходного напряжения до 500 кВ, а запасаемая энергия может достигать 625 Дж. Собственная индуктивность ГИН не превышает 7 мкГн. Для коммутации используется лазерный разрядник P1, чей запуск осуществляется частью лазерного импульса ($\leq 10\%$) преломляющегося при прохождении линзы Л0 и фокусирующегося линзой Л2.

Экспериментальные осциллограммы токов и напряжений, получены из выборок по 15 импульсов путем фильтрации частот ниже 5 МГц (необходимой для уменьшения уровня помех) с последующим усреднением. Ниже, на рис. 16, представлены данные по трем сериям импульсов, полученным на медной мишени при амплитудном напряжении ГИН в 150 кВ в различные дни. Черным цветом на рисунках представлен чистый сигнал на осциллографе, красным сплошным – фильтрованный ниже 5 МГц, красным пунктиром показана область доверительного интервала с доверительной вероятностью 68% (σ). Наибольший вклад в доверительный интервал вносит статистический разброс импульсов: для тока $\sim 15\%$, а для напряжения до 3%. Погрешность самих измерений не превышает 3%.

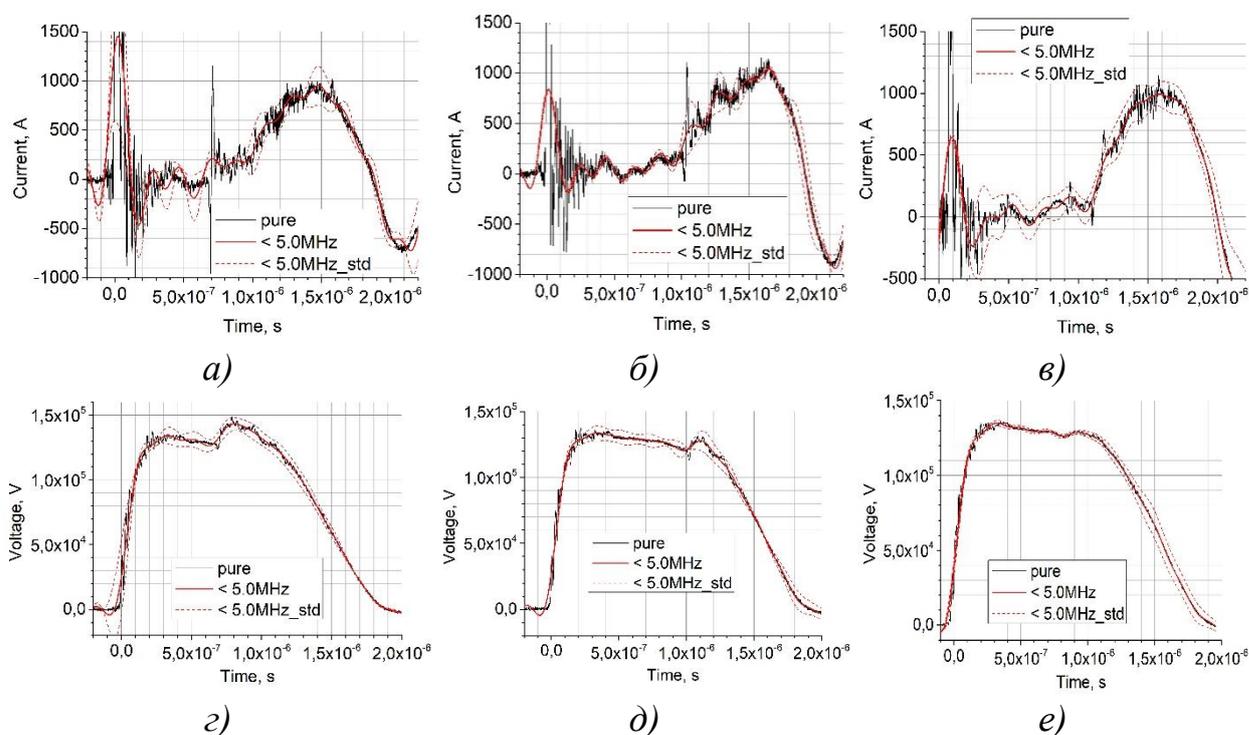


Рис. 16. Осциллограммы токов (а, б, в) и напряжений (з, д, е) трех серий импульсов при амплитудном напряжении ГИН в 150 кВ на медной мишени.

Из рисунков видна хорошая повторяемость амплитуды и длительности импульсов тока величиной ~ 800 А и 0.6 мкс (на полувысоте) соответственно. В работе [6], чья конструкция послужила прототипом исследуемого здесь диода с магнитной изоляцией, амплитуда импульсов ионного тока достигала ~ 120 А при длительности на полувысоте ~ 0.3 мкс и амплитудном напряжении ГИН в 350 кВ. Более чем шестикратное увеличение амплитуды

ионного тока, вместе с двукратным увеличением длительности при в половину меньшем ускоряющем напряжении указывает на значительный положительный эффект от введения в конструкцию ионного диода разработанной системы магнитной изоляции. Причиной этому является замедление расширения лазерной плазмы в сильном магнитном поле индукцией до 0.4 Тл, что не только удлиняет временной промежуток до переключения плазмой ускоряющего промежутка, но и увеличивает время, в течение которого она располагается вблизи поверхности нейтронообразующей мишени, что, в свою очередь, повышает средний предельный ток.

Эксперименты с увеличением амплитудного напряжения ГИН были успешны вплоть до 250 кВ. Причиной этому являлась невозможность термической дегазации поверхностей диода вследствие близости постоянных магнитов, что необходимо для предотвращения вакуумного искрового пробоя, ограничивающего максимальное напряжение диода. Тем не менее, эти результаты использовались для расчета нейтронного выхода и сравнения с нейтронным выходом из работы [6]. Расчет нейтронного выхода осуществлялся с помощью программы SRIM [7] (вычисление зависимости энергии иона от глубины проникновения в мишень) и данных о сечениях ядерных реакций взятых из [8]. При этом, на основании работы [9], было принято, что ионы дейтерия составляют 20% от полного тока диода. Степень магнитной изоляции была принята равной 1.

Для сравнения полученных результатов с работой [6] полученные в ней данные о нейтронном выходе и данные расчета нейтронного выхода на исследуемом диоде были сведены в таблица 1. В таблице используются следующие обозначения: U_a – амплитудное напряжение ГИН, U_s – среднее за импульс напряжение на диоде, Y – нейтронный выход. Напомним также, что в [6] стехиометрия лазерной мишени составляла ~ 1.5 , в то время как в описываемом эксперименте только 0.8.

Таблица 1. Сравнение данных [6] и результатов эксперимента.

Работа [6]			Эксперимент			
U_a , кВ	U_s , кВ	Y, нейтрон	U_a , кВ	U_s , кВ	Y, нейтрон	
		DD			DD	DT
150	120	10^6	150	60	$6 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^9$
200	160	$2 \cdot 10^6$	200	90	$3 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^9$
260	200	$5 \cdot 10^6$	250	110	$6 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^{10}$
300	240	$1.4 \cdot 10^7$	-	-	-	-
350	280	$5 \cdot 10^7$	-	-	-	-

Из представленных в таблица 1 данных видно, что простое сравнение режимов с одинаковым зарядным напряжением ГИН дает 10-кратное увеличение нейтронного выхода, а при введении корректировки на использовавшуюся в эксперименте лазерную мишень со стехиометрией 0.8 – 20-кратное. Принимая во внимание показанную выше маломощность ГИН и проводя сравнение по фактически прилагаемому к ионному диоду напряжению (усредненному за импульс), система магнитной изоляции увеличивает нейтронный выход более чем в 120 раз (при скорректированной стехиометрии).

Таким образом, разработанная система магнитной изоляции для лазерно-плазменного ионного диода позволяет значительно увеличить амплитуду и длительность импульса ионного тока, извлекаемого из лазерной плазмы, подавить часть обратного тока вторичных электронов и существенно повысить нейтронный выход импульсного нейтронного генератора на лазерно-плазменном ионном диоде.

Публикации автора по теме диссертации

1. Stepanov D.S., Shkolnikov E.Y. Development of a Kinetic Model of Microwave Discharge Plasma in Electron Cyclotron Resonance Mode with Allowance for the Temporal Evolution of the Electron Distribution Function // High Temperature. 2021. Vol. 59, № 1. P. 10–18. (Scopus (Q2), WoS (Q4)).

2. Stepanov D.S., Skripnik A.P., Shkolnikov E.Y. Effect of the Electron-Emitter Parameters of a Pulsed Source of Light Penning Ions on the Extracted

Current // Atomic Energy. 2020. Vol. 128, № 5. P. 318–324. (Scopus (Q3), WoS (Q4)).

3. Stepanov D.S., Chebotarev A.V., Shkolnikov E.Y. Analysis of the Operation of the Microwave Ion Source in the Electron–Cyclotron Resonance Mode for a Portable Neutron Generator // High Temperature. 2019. Vol. 57, № 3. P. 347–352. (Scopus (Q1), WoS (Q4)).

4. Stepanov D.S., Agafonov A.V., Shkolnikov E.Y. Analysis of the Ion-Optical Systems of Portable Neutron Generators // Atomic Energy. 2019. Vol. 126, № 2. P. 124–128. (Scopus (Q3), WoS (Q4)).

5. Stepanov D.S., Chebotarev A.V., Shkolnikov E.Y. Kinetics of Deuterium Gas-Discharge Plasma in the Resonator of a Neutron Generator in Electron-Cyclotron Resonance Mode // High Temperature. 2018. Vol. 56, № 6. P. 843–848. (Scopus (Q1), WoS (Q4)).

6. Патент 206590 РФ U1 H01J 27/18. СВЧ источник ионов с ЭЦР / Степанов Д.С., Школьников Э.Я. (Россия) – №2021114208, Заявлено 20.05.2021; Оpubл. 16.09.2021, Бюл. №26.

7. Патент 200931 РФ U1 H05H 3/00. Ионный диод с магнитной изоляцией электронов / Степанов Д.С., Школьников Э.Я., Козловский К.И. (Россия) – №2020121850, Заявлено 02.07.2020; Оpubл. 02.07.2020, Бюл. №32.

8. Патент 192776 РФ U1 H01J 27/04. Импульсный источник ионов Пеннинга / Степанов Д.С., Школьников Э.Я., Козловский К.И. (Россия) – №2019118316, Заявлено 13.06.2019; Оpubл. 01.10.2019, Бюл. №28.

9. Степанов Д.С., Школьников Э.Я. Оптимальные параметры электронно-циклотронного резонанса в СВЧ источнике ионов // Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез: тезисы докладов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2021». 23-26 марта 2021. – М: НИЯУ МИФИ, 2021 – С. 269-270.

10. Степанов Д.С., Школьников Э.Я. Разработка алгоритма моделирования эволюции функции распределения электронов по энергиям в

СВЧ разряде в режиме ЭЦР // Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез: тезисы докладов VI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2020». 11-14 февраля 2020 – М: НИЯУ МИФИ, 2020 – С. 179-180.

11. Степанов Д.С., Скрипник А.П., Школьников Э.Я. Влияние параметров электронного эмиттера импульсного источника легких ионов пеннинга на извлекаемый ток // Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез: тезисы докладов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2020». 11-14 февраля 2020. – М: НИЯУ МИФИ, 2020 – С. 171-172.

12. Степанов Д.С., Агафонов А.В., Школьников Э.Я. Влияние параметров импульса анодного напряжения на динамику плазменных потоков в источнике ионов // Современные проблемы физики и технологий: тезисы докладов VIII Международной молодежной научной школы-конференции, 15-20 апреля 2019. – М: НИЯУ МИФИ, 2019 – С. 295-296.

13. Степанов Д.С., Агафонов А.В., Школьников Э.Я. Влияние конфигурации анода на динамику плазменных потоков в источнике Пеннинга // Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез: тезисы докладов V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2019». 12-15 февраля 2019. – М: НИЯУ МИФИ, 2019 – С. 97-98.

14. Stepanov D.S., Shkolnikov E.Y. Numerical Investigation of the Influence of the Magnetic Field in the Ion Source With the Penning Discharge of a Gas-Filled Neutron Tube on the Ion Current Pulse // Ion sources and electron guns: proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2018), 1-5 October 2018. – Protvino: IHEP, Russia, 2018 – THPSC42.

15. Stepanov D.S., Agafonov A.V., Shkolnikov E.Y., etc. Investigation of the Electron Emitter Parameters of the Gas-Filled Neutron Tube's Penning Ion Source // Actual Problems of Electron Devices Engineering: proceedings of 2018

International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 27-28 September 2018. – Saratov: SSTU, Russia, 2018 – P. 38-44.

16. Stepanov D.S., Agafonov A.V., Shkolnikov E.Y., etc. Non-Recombined Plasma Influence on the Neutron Pulse of the Gas-Filled Neutron Tube // Actual Problems of Electron Devices Engineering: proceedings of 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 27-28 September 2018. – Saratov: SSTU, Russia, 2018 – P. 21-27.

17. Stepanov D.S., Agafonov A.V., Shkolnikov E.Y., etc. Gas-Filled Neutron Tube's Ion Source Modeling by the Karat Code // Actual Problems of Electron Devices Engineering: proceedings of 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 27-28 September 2018. – Saratov: SSTU, Russia, 2018 – P. 11-16.

18. Степанов Д.С., Школьников Э.Я. Разработка конструкции портативного нейтронного генератора с СВЧ источником ионов // Современные проблемы физики и технологий: тезисы докладов VII Международной молодежной научной школы-конференции, 16-21 апреля 2018. – М: НИЯУ МИФИ, 2018 – С. 215-216.

19. Степанов Д.С., Школьников Э.Я., Горбунов М.А. Портативный нейтронный генератор с СВЧ источником ионов для широкой сферы применения // Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез: тезисы докладов IV Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2018». 30.01-01.02 2018. – М: НИЯУ МИФИ, 2018 – С. 261-262.

20. Степанов Д.С., Агафонов А.В., Школьников Э.Я. Генерация потоков вторичных частиц в ионно-оптическом тракте нейтронных трубок // Физические процессы в низкотемпературной плазме: тезисы докладов XLIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 13-17 февраля 2017. – М: РАН, 2017 – С. 43.

21. Степанов Д.С., Агафонов А.В., Школьников Э.Я. Подавление вторичных электронов в ионно-оптической системе нейтронной трубки // Современные проблемы физики и технологий: тезисы докладов VI Международной молодежной научной школы-конференции, 18-23 апреля 2017. – М: НИЯУ МИФИ, 2017 – С. 302-303.

22. Степанов Д.С., Горбунов М.А., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. СВЧ разряд в источнике ионов водорода // Современные проблемы физики и технологий: тезисы докладов V Международной молодежной научной школы-конференции, 18-23 апреля 2016. – М: НИЯУ МИФИ, 2016 – С. 343-345.

23. Stepanov D.S., Chebotarev A.V., Shkolnikov E.Ya. Electromagnetic Field in the Resonator of Neutron Generator's Hydrogen Ion Source // Actual Problems of Electron Devices Engineering: proceedings Vol. 2 of 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 September 2016. – Saratov: SSTU, Russia, 2016 – 7879076.

24. Stepanov D.S., Chebotarev A.V., Shkolnikov E.Ya. Magnetic Field of Microwave ECR Ion Source of Portable Neutron Generator // Actual Problems of Electron Devices Engineering: proceedings Vol. 2 of 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 September 2016. – Saratov: SSTU, Russia, 2016 – 7879075.

25. Stepanov D.S., Chebotarev A.V., Shkolnikov E.Ya. Plasma Dynamic Research in the Resonator of Hydrogen Ion Source by Trajectory Model // Actual Problems of Electron Devices Engineering: proceedings of 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22-23 September 2016. – Saratov: SSTU, Russia, 2016 – 7879074.

Список литературы

1. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая Кинетика, X. 1979. Р. 528.
2. Гинзбург В.Л. Волны в магнитоактивной плазме. Москва: НАУКА, 1975. 256 р.

3. Tuske O. et al. BETSI, a new test bench for ion sources optimization at CEA SACLAY // *Rev. Sci. Instrum.* 2008. Vol. 79, № 2. P. 2006–2009.
4. Waldmann, O B.L. Development of a Permanent-Magnet Microwave Ion Source for a Sealed-Tube Neutron Generator // PAC 11 2011 Particle Accelerator Conference, New York, NY, 03/28-05/01 2011. New York, 2011. P. 1984–1986.
5. Waldmann O., Ludewigt B. Measurements of beam current density and proton fraction of a permanent-magnet microwave ion source // *Rev. Sci. Instrum.* 2011. Vol. 82, № 11.
6. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I. Neutron Generation in a Plasma Diode with Electrons Insulated by a Constant Magnetic Field // *At. Energy.* 2016. Vol. 119, № 4. P. 258–264.
7. James F. Ziegler. SRIM [Electronic resource].
8. Nuclear Energy Agency. JANIS [Electronic resource].
9. Skladnik-Sadowska E. et al. Study of plasma produced from deuterized-titanium irradiated by intense laser pulses // *Radiat. Eff. Defects Solids.* 2010. Vol. 165, № 6–10. P. 412–418.