

## 5 - Электрофизика, электрофизические установки. Физика плазмы, плазменные технологии

Дьячков Сергей Александрович, магистрант 1 года обучения  
Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет  
**Влияние поверхностного заряда на электрический пробой ксенона в длинной трубке**  
Ионих Юрий Зиновьевич, д.ф.-м.н.  
e-mail: [st076148@student.spbu.ru](mailto:st076148@student.spbu.ru) стр. 105

Евдокимов Александр Александрович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Модернизация блока питания развёртки промышленного ускорителя типа ИЛУ**  
Сингагулин Шавкат Рахимович,  
e-mail: [a.evdokimov1@g.nsu.ru](mailto:a.evdokimov1@g.nsu.ru) стр. 106

Иванов Артем Евгеньевич, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет  
**Лабораторное моделирование разлета квазисферического облака плазмы во внешнее магнитное поле и фоновую плазму**  
Чибранов Алексей Алексеевич,  
e-mail: [artemiyy.iv@gmail.com](mailto:artemiyy.iv@gmail.com) стр. 107

Корж Виталий Александрович, 4 курс  
Новосибирск, Институт ядерной физики имени Будкера, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Сравнение интенсивности D-D реакции для трех профилей магнитного поля на установке ГДЛ**  
Максимов Владимир Васильевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [v.korzha@g.nsu.ru](mailto:v.korzha@g.nsu.ru) стр. 108

Логинов Михаил Викторович, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, физико-технический факультет  
**Разработка измерительного контура, работающего по методу удалённого зонда в лабораторных экспериментах с лазерной плазмой**  
Березуцкий Артём Григорьевич, к.ф.-м.н.  
e-mail: [misha.logv@gmail.com](mailto:misha.logv@gmail.com) стр. 109

Лотов Игорь Константинович, 2 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Учёт захвата плазменных электронов в квазистатическом подходе к моделированию кильватерного ускорения**  
Туев Петр Викторович, к.ф.-м.н.  
e-mail: [i.lotov@g.nsu.ru](mailto:i.lotov@g.nsu.ru) стр. 110

Манегин Денис Сергеевич, аспирант 4 года обучения  
Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, факультет энергомашиностроения  
**Результаты испытаний бессточных ионных источников модифицированной конструкции**  
Ивахненко Сергей Геннадьевич, к.т.н.  
e-mail: [manegin@bmstu.ru](mailto:manegin@bmstu.ru) стр. 111

Параскун Александр Григорьевич, 4 курс  
Новосибирск, Новосибирский государственный университет, физический факультет  
**Спиральный генератор с разделёнными в пространстве индуктивной и емкостной частями для импульсного рентгеновского аппарата**  
Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н.  
e-mail: [a.paraskun@g.nsu.ru](mailto:a.paraskun@g.nsu.ru) стр. 113

Токарев Арсений Юрьевич, 4 курс

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, физико-механический факультет

**Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния для исследования магнитогидродинамических неустойчивостей в токамаке Глобус-М2**

Яшин Александр Юрьевич, к.ф.-м.н.

e-mail: [tokarev\\_ayu@spbstu.ru](mailto:tokarev_ayu@spbstu.ru)

стр. 114

# Влияние поверхностного заряда на электрический пробой ксенона в длинной трубке

Дьячков Сергей Александрович

Мещанов Александр Викторович

Санкт-Петербургский государственный университет

Ионих Юрий Зиновьевич, д.ф.-м.н.

[st076148@student.spbu.ru](mailto:st076148@student.spbu.ru)

Длинными трубками называются трубки, для которых расстояние между электродами много больше их диаметра. В таких трубках электрический пробой начинается с первичного пробоя между высоковольтным электродом (ВВЭ) и стенкой трубки, что приводит к инициализации прохождения локализованной области высокого градиента потенциала (волны ионизации) [1]. При движении вдоль трубки ВИ ионизует газ, что создает условия для дальнейшего развития пробоя.

Для возникновения и движения волны ионизации большое значение имеет состояние стенки трубки возле ВВЭ. При наличии заряда на ней напряжение пробоя может повышаться. [2]. Одним из объяснений этого эффекта служит явление фотодесорбции. В процессе медленного повышения напряжения на аноде слабосвязанные электроны под действием светового излучения видимого диапазона выбиваются со стенки трубки и уходят на анод. При этом стенка приобретает положительный потенциал.

В данной работе было рассмотрено, как происходит пробой при различных условиях. В частности, наблюдалось прохождение ВИ при различных видах импульсов напряжения на аноде, при импульсном и постоянном освещении. Также рассматривалось изменение напряжения пробоя на свету относительно напряжения пробоя в темноте.

Эксперименты проводились с использованием отпаянной стеклянной трубки, наполненной ксеноном при давлении 1 Торр. Расстояние между краями электродов – 790 мм, внутренний диаметр трубки – 15 мм. Для регистрации волны ионизации использовались оптические волноводы, ФЭУ, а также емкостные датчики. В качестве источников освещения использовались светодиод с длиной волны 400 нм и люминесцентные лампы.

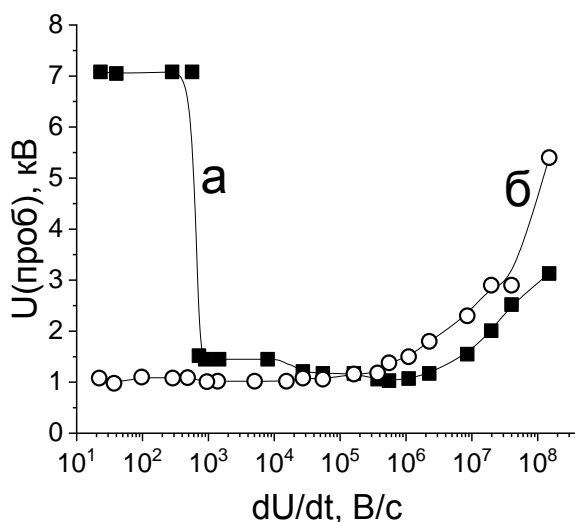


рис.1 Зависимость напряжения пробоя в ксеноне (1Торр) от скорости роста напряжения на аноде. а – при освещении, б – в темноте.

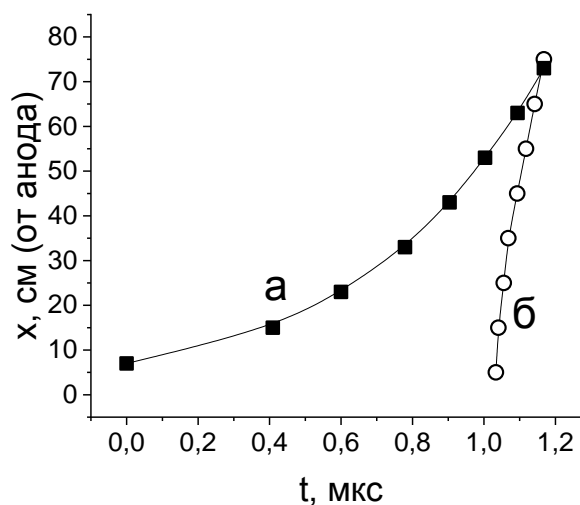


рис.2 Зависимость положения фронта волны ионизации (x) от времени (t). а – линейно растущее напряжение, с освещением; б – прямоугольный импульс напряжения, в темноте.

При низкой скорости роста напряжения на аноде (менее  $10^3$  В/с) напряжение пробоя намного выше при освещении, чем в темноте (рис.1).

При линейно растущем напряжении и при освещении волна ионизации ускоряется по мере отдаления от анода (рис.2, кривая а), что отличается от ситуации, когда напряжение подается в виде прямоугольного импульса и трубка не освещается (рис.2, кривая б). В данном случае скорость волны ионизации уменьшается.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что в прианодной области на стенке трубки при освещении накапливается заряд.

Список публикаций:

[1] Недоспасов А. В., Новик А. Е. // ЖТФ, 1960, т.30, с.1329.

[2] A. V. Meshchanov, A. I. Shishpanov, Y. Z. Ionikh // J. Phys. D: Appl. Phys. 57 (2024) 015204

## Модернизация блока питания развёртки промышленного ускорителя типа ИЛУ

Евдокимов Александр Александрович

Новосибирский государственный университет

Сингатулин Шавкат Рахимович

[a.evdokimov1@g.nsu.ru](mailto:a.evdokimov1@g.nsu.ru)

С 70-ых годов в ИЯФ СО РАН разрабатываются и производятся промышленные импульсные линейные ускорители (ИЛУ), используемые для холодной пастеризации пищевой продукции, полимеризации, деполимеризации и других целей. Ускорители через систему выпуска сканируют пучком рабочую зону горизонтальной развёрткой по типовой ширине облучаемой продукции около 70 см. Система развёртки включает магнит развёртки (рис.1) с соответствующим источником питания. Магнит развёртки должен равномерно поворачивать пучок от  $+50^\circ$  до  $-50^\circ$  за характерное время, а также обеспечить линейно меняющееся магнитное поле с нелинейностью не более 5% для качественного облучения выходной продукции.

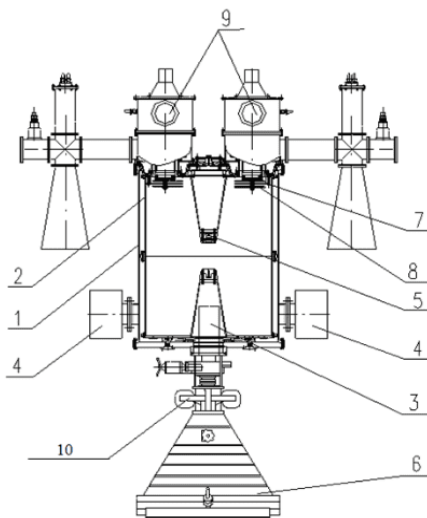


рис.1. Ускоритель ИЛУ-10.

1 – вакуумный бак, 2 – медный тороидальный резонатор, 3 – магнитная линза, 4 – магниторазрядные насосы, 5 – катодно-сеточный узел, 6 – устройство выпуска пучка с линейной развёрткой, 7 – опора петли связи, 8 – вакуумный конденсатор, 9 – ВЧ генераторы. 10 – Магнит развёртки пучка.

В связи с развитием полупроводниковой промышленности появился запрос на модернизацию питания магнита развёртки с целью программируемости амплитуды тока по времени (поля магнита), упрощения и удешевления конструкции источника, облегчения калибровки ускорителя, увеличения КПД. Задача разработки усложнена тем, что магнит развёртки находится на горловине, внутри которой проходит пучок. Горловина состоит из нержавеющей стали и создаёт паразитные магнитные поля, которые нарушают линейность магнитного поля.

В существующей схеме формирование тока в магните определяется релаксационным разрядом многоконтурной схемы с предварительно заряженными емкостями, с коммутацией на тиристорах. Подстройка форм тока реализована на механическом подборе набора конденсаторов, подстройке номиналов индуктивностей. Амплитуда тока определяется напряжением зарядки конденсаторов.

Были измерены параметры модели магнита с горловиной, предложенной в тексте [2]. Предложена новая схемотехника источника питания с использованием ШИМ модуляции тока.

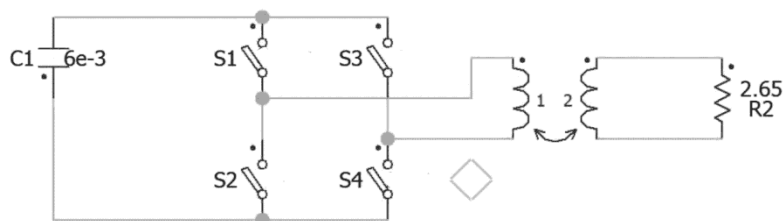


рис. 2. Новая принципиальная схема. Ключи S1-S4 – SiC транзисторы.

Трансформатор с резистором во вторичной обмотке (рис. 2) – модель, описывающая магнит и горловину по теории электрических цепей. Получены аналитические зависимости тока от времени при приложении импульсного напряжения к магниту, на основе чего предложены алгоритмы управления магнитом. Ток в магните задается набором состояний ключей S1, S2, S3, S4. Для получения линейного спада тока необходимо включить одну диагональ моста (ключи S1 и S4), затем другую (ключи S2 и S3).

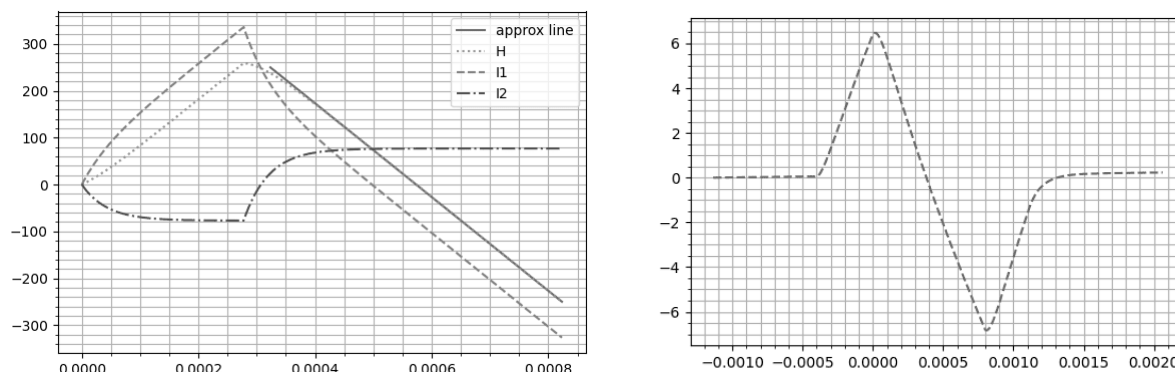


рис. 3. Слева изображены теоретические зависимости тока и магнитного поля от времени.  $I_1$  – ток в первичной обмотке,  $I_2$  – ток во вторичной обмотке,  $H$  – магнитное поле. Справа изображена экспериментально полученная зависимость магнитного поля от времени.

Для предложенного способа построены теоретические зависимости токов и магнитного поля. Проведены измерения магнитного поля, с помощью измерительной катушки и последующим численным интегрированием. Экспериментальные кривые совпали по виду с теоретическими зависимостями (рис. 3).

Данная работа посвящена модернизации питания магнита развёртки и включает новую схему питания магнита, аналитические выражения для зависимостей тока источника и магнитного поля от времени, экспериментальную установку, подтверждающую расчёты.

Список публикаций:

- [1] Безуглов В. В. и др. Промышленные ускорители ИЛУ в современных радиационно-технологических комплексах. Вопросы атомной науки и техники выпуск 71. Москва: АО «НИТФА» 2015, С. 25-36.
- [2] Безуглов В. В. и др. Препринт ИЯФ 2008-23: методика расчета и конструирования выпускных устройств для импульсных ускорителей электронов серии ИЛУ. Новосибирск: ИЯФ СО РАН 2008 г.
- [3] Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие для вузов / Г. И. Атабеков. — 10-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 592 с. — ISBN 978-5-8114-7104-1.

## Лабораторное моделирование разлета квазисферического облака плазмы во внешнее магнитное поле и фоновую плазму

**Иванов Артем Евгеньевич**

Березуцкий Артем Григорьевич, Долгов Александр Евгеньевич, Захаров Юрий Петрович, Логинов Михаил Викторович.,  
Мирошниченко Илья Борисович, Посух Виталий Георгиевич, Руменских Марина Сергеевна, Трушин Павел

Александрович, Чибранов Алексей Алексеевич, Шайхисламов Илдар Фаритович

Институт лазерной физики СО РАН

Новосибирский государственный технический университет

Чибранов Алексей Алексеевич

[arteemiyv.iv@gmail.com](mailto:arteemiyv.iv@gmail.com)

На установке КИ-1[1-2] в конце 2023 года был проведен лабораторный эксперимент, направленный на моделирование различных геофизических и астрофизических явлений, сопровождающихся сферическими выбросами плазмы в замагниченный фон. Основное новшество данной работы заключается во взаимодействии квазисферического облака лазерной плазмы (ОЛП) с замагниченным фоном.

Замагниченный фон представлял собой поток водородной плазмы в однородном магнитном поле, заполняющий весь объем вакуумной камеры. Источником фоновой плазмы являлся тета-пинч. Внешнее магнитное поле создавалось соленоидом вокруг камеры. ОЛП создавалось облучением 4-мя лучами мощного CO<sub>2</sub> лазера шарообразной полиэтиленовой мишени [3]. Измерения проводились системой магнитных и электрических зондов.

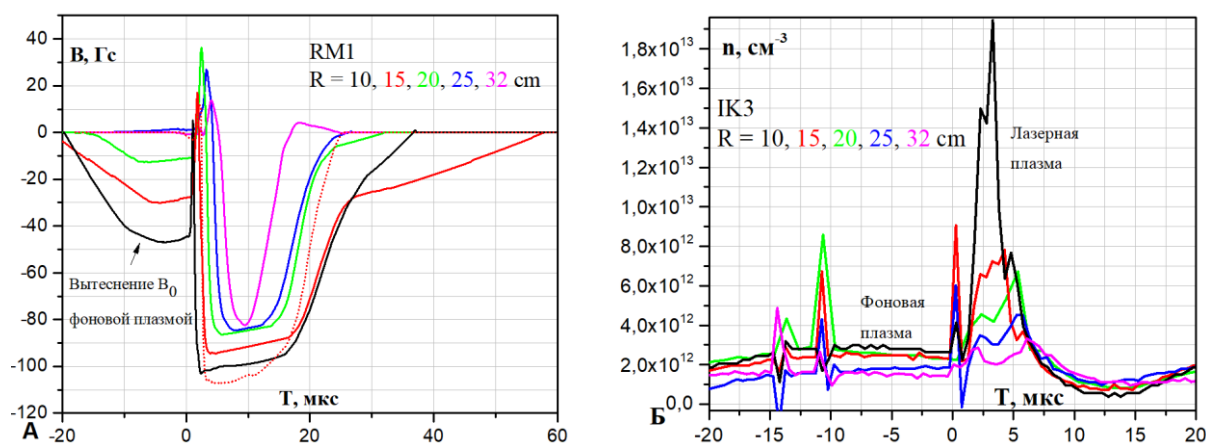


рис. 1. Разлет ОЛП в фоновую плазму и внешнее магнитное поле  $B_0 = 96$  Гс. А - Магнитная каверна при разлете ОЛП в замагниченный фон, красным пунктиром – разлет в вакуумное магнитное поле на расстоянии 15 см; Б - Концентрация ионов при разлете ОЛП в замагниченный фон;  $T = 0$  мкс – момент облучения лазерной мишени.

В результате проведенного эксперимента были получены данные о влиянии замагниченного фона на динамику ОЛП, а также на длительность, скорость и характер протекания коллапса диамагнитной каверны. На рисунке продемонстрированы эффекты вытеснения внешнего поля фоновой плазмой, а также вытеснения фона при разлете ОЛП.

Проведенный эксперимент на установке КИ-1 по моделированию явлений, происходящих как в околоземном космическом пространстве, так и в дальнем космосе, поможет лучше разобраться в эффектах взаимодействия сферических плазменных облаков с фоновой плазмой во внешнем магнитном поле, а также позволит создавать численные модели, более приближенные к натурным явлениям.

Работа выполнена при поддержке программы 10 «Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика» Национального Центра Физики и Математики и гранта РФФ 23-22-00386.

Список публикаций:

- [1] Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г. Лазерная плазма и лабораторное моделирование нестационарных космических процессов. – (1988).
- [2] Антонов В. М. и др. Мощные CO<sub>2</sub>-лазеры для плазменных экспериментов и технологии //Новосибирск: Изд ИТПМ СО АН СССР. – (1986).
- [3] Berezhitsky A. G. et al. Sub-Alfvénic Expansion of Spherical Laser-Produced Plasma: Flutes, Cavity Collapse and Field-Aligned Jets //Plasma Physics Reports. – (2023). – Т. 49. – №. 3. – С. 351-361.

## Сравнение интенсивности D-D реакции для трех профилей магнитного поля на установке ГДЛ

**Корж Виталий Александрович**

Новосибирский государственный университет

Институт ядерной физики имени Г. И. Будкера

Максимов Владимир Васильевич, к.ф.-м.н.

[v.korzh@gsnu.ru](mailto:v.korzh@gsnu.ru)

Газодинамическая ловушка [1] (ГДЛ) – линейная осесимметричная магнитная ловушка, разработана в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера (ИЯФ) для проведения исследований в области физики плазмы и создания управляемого термоядерного синтеза. На основе ГДЛ возможно создать источник 14 МэВ нейтронов (дейтерий-третиевая плазма) для испытания материалов, которые будут использоваться в термоядерных реакторах, на устойчивость к нейтрону потоку [2]. Особенностью газодинамической ловушки является двухкомпонентная плазма: мишенная плазма, быстрые ионы. Мишенная плазма - дейтериевая или водородная плазма, удерживаемая в газодинамическом режиме. Данная компонента создается с помощью генератора плазмы. Быстрые ионы – инжектируемые под углом 45° атомы дейтерия с энергией 25 кэВ, захваченные мишенной плазмой. Удержание данной компоненты происходит в адиабатическом режиме (аналогично пробкотрону Будкера-Поста [3]). При движении быстрых ионов вдоль магнитного поля сохраняется магнитный момент (адиабатический инвариант). Продольная скорость частиц равняется нулю в точках остановки (пробочное отношение 2), в дальнейшем они отражаются и двигаются в противоположную сторону. Таким образом, концентрация быстрых ионов имеет пикированный профиль (максимальная плотность около точек

остановки). Время жизни определяется столкновениями с электронами. Распределение быстрых ионов зависит от конфигурации магнитного поля, создаваемого с помощью магнитных катушек. С помощью недавно установленных катушек можно значительно изменить положение точек остановки, тем самым поменять функцию распределения. На установке ГДЛ можно работать в трех конфигурациях: стандартная, средняя, короткая.

Энергия быстрых ионов на установке ГДЛ достаточна для наблюдения продуктов термоядерных D-D реакций (при инжекции дейтерия). В результате столкновения быстрых ионов с быстрыми ионами и дейтронами мишенной плазмы появляется с равной вероятностью 3,02 МэВ протон и 1,01 МэВ T или 2,45 МэВ нейтрон и 0,82 МэВ  $^3\text{He}$ . Целью данной является измерение полного числа реакций в единицу времени для всех трех возможных конфигураций магнитного поля. Таким образом D-D реакции на установке ГДЛ моделируют нейтронный поток в D-T 14 МэВ источнике нейтронов.

В данной работе используется сцинтилляционный детектор (для регистрации 2,45 МэВ нейтронов) и набор полупроводниковых детекторов (для регистрации 3,02 МэВ протонов). Сцинтилляционный детектор, установленный в центральной плоскости на расстоянии 175 см от центра установки, работает в потоковом режиме, регистрируя сигнал, пропорциональный числу нейтронов и гамма квантов в единицу времени. Гамма кванты образуются в результате захвата нейтронов. Сигнал с данного детектора показывает обзорный поток нейтронов. Полупроводниковые детекторы, установлены вдоль оси установки с характерным расстоянием до оси установки 30 см, работают в счетном режиме, сигнал пропорционален энергии, оставленной в полупроводниковом слое, позволяют получить число реакций в единицу времени из единицы длины.

Для получения полного числа реакций в единицу времени (интенсивность) D-D реакций требуется провести калибровку сцинтилляционного детектора, с помощью полупроводниковых детекторов и модельного профиля нейтронного выхода DD реакций, построенного на основе парных кулоновских столкновений. Образование неустойчивостей в плазме приводит к значительному изменению профиля реакции, таким образом профиль, полученный с помощью полупроводниковых детекторов, можно сравнивать с модельным профилем только до момента образования неустойчивости. Калибровка детектора производится сравнением сигнала со сцинтиллятора и временного хода полупроводникового детектора.

В результате был получен коэффициент пропорциональности между сигналом со сцинтилляционного детектора и интенсивности D-D реакций для трех конфигураций равный  $(1,1 \pm 0,6) \cdot 10^{11} \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Так же было учтено изменение потока связи с изменением конфигурации. В стандартной и средней конфигурации полное число реакций равно  $3,4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ , а для короткой ямы результат на 20% меньше.

Список публикаций:

- [1] Мирнов В. В., Рютов Д. Д. Газодинамическая ловушка линейная ловушка для удержания плазмы // Письма в ЖТФ. - 1979. - Т. 5, N 11. - С.673-682.
- [2] Котельников И. А. и др. Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловушки //препринт ИЯФ, Новосибирск. – 1990.
- [3] Будкер Г. И. Термоядерные реакции в системе с магнитными пробками. К вопросам о непосредственном преобразовании ядерной энергии в электрическую // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. / Ред. М. А. Леонтович. - М.: Изд. АН СССР, 1968ю — Т.3. - С.3.

## **Разработка измерительного контура, работающего по методу удалённого зонда в лабораторных экспериментах с лазерной плазмой**

**Логинов Михаил Викторович**

*Березуцкий Артем Григорьевич, Долгов Александр Евгеньевич, Захаров Юрий Петрович, Иванов Артём Евгеньевич, Мирошниченко Илья Борисович, Посух Виталий Георгиевич, Руменских Марина Сергеевна, Трушин Павел Александрович, Чибранов Алексей Алексеевич, Шайхисламов Илдар Фаритович*

*Институт лазерной физики СО РАН*

*Новосибирский государственный технический университет*

*Березуцкий Артем Григорьевич, к.ф.-м.н.*

*[misha.logv@gmail.com](mailto:misha.logv@gmail.com)*

На установке КИ-1[1-2] в 2023 году был введён в эксплуатацию новый измерительный контур для регистрации моделей различных геофизических и астрофизических явлений, которые сопровождалась сферическими выбросами лазерной плазмы в замагниченную фоновую плазму. Актуальность данной работы заключается в измерении возмущения внешнего магнитного поля и контроле повторяемости параметров плазмы, что является важным условием при проведении лабораторных экспериментах.

В работе представлены результаты измерительного контура, работающего в качестве удаленного зонда на экспериментальной установке. Зонд позволяет контролировать создание внешнего магнитного поля  $B_0$  в вакуумной камере, интегральное возмущение поля  $B_0$  при разлете облака лазерной плазмы и замагниченной фоновой плазмы, а также отслеживать повторяемость разлета лазерной плазмы (см. рисунок).

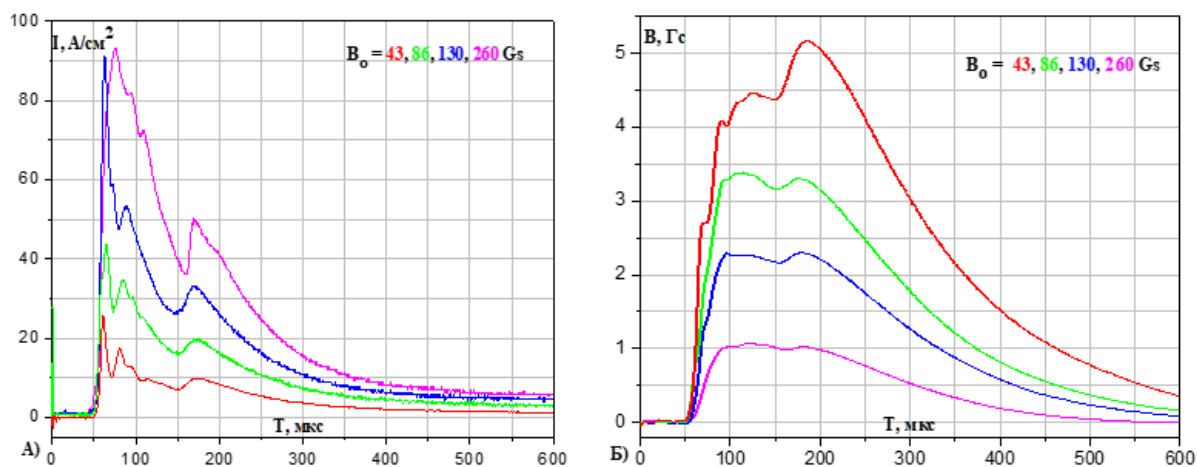


рис.1. Плотность тока, измеренная при разлете фоновой плазмы во внешнее магнитное поле  $B_0$  разной величины (А) и соответствующее поджатие поля, зарегистрированное зондом (Б).

Таким образом, зонд продемонстрировал хорошую чувствительность к плотности и скорости разлета плазменного облака и позволил отслеживать повторяемость плазменных параметров во время проведения эксперимента. Также он позволял более точно контролировать внешнее магнитное поле, генерируемое соленоидом вакуумной камеры.

Список публикаций:

- [1] Y.P. Zakharov et al // *AIP Conference Proceedings*. – American Institute of Physics, 369, № 1, p. 357-362, (1996).  
 [2] I. F. Shaikhislamov et al // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 56, № 12, p. 125007, (2014).

## Учёт захвата плазменных электронов в квазистатическом подходе к моделированию кильватерного ускорения

**Лотов Игорь Константинович**

*Новосибирский государственный университет*

*Петр Викторович Туев, к.ф.-м.н.*

[i.lotov@g.nsu.ru](mailto:i.lotov@g.nsu.ru)

В последнее время все больше исследований посвящено уменьшению размеров ускорителей заряженных частиц. Плазменное кильватерное ускорение – удачный для этого метод, при котором электроны ускоряются в полях, достигающих сотен ГВ/м [1]. Особенно интересным представляется режим ускорения, для которого не требуется отдельный инжектор ускоряемых частиц. В этом случае ускоряемый пучок формируется из захваченных волной плазменных электронов. Захват происходит в сильно нелинейном режиме взаимодействия, для исследования которого используют численное моделирование [2]. Современные задачи требуют значительных вычислительных мощностей, поэтому важно развивать эффективно их использующие программные комплексы (коды), например, разрабатываемый в ИЯФ СО РАН LCODE [3]. Он использует квазистатическое приближение [2], дающее выигрыш в быстродействии вплоть до 6 порядков в сравнение с моделированием из первых принципов [4]. Однако пока что использование этого приближения при исследовании захвата плазменных электронов давало лишь качественное представление о происходящих процессах.

В квазистатическом приближении частицы плазмы и пучка описываются разными физическими моделями. При захвате плазменной частицы ее необходимо начать рассматривать как частицу пучка. Сложность заключается в том, что если при захвате напрямую подменить плазменную частицу на пучковую, то развиваются сильнейшие шумы, из-за которых дальнейшее моделирование становится абсолютно неправильным.

Развитие численной неустойчивости удалось побороть следующим образом. Теперь, шаг моделирования, на котором происходит захват плазменных частиц, вычисляется несколько раз, причем быстрые частицы



плазмы заменяются частицами пучка. В этот момент согласованно изменяются токи системы, чтобы не возникало скачка производной в уравнениях на электромагнитные поля. В итоге впервые можно говорить о количественном согласии с результатами расчетов без квазистатического приближения, на примере кода FBPIC [5] (рис. 1). Это доказывает возможность использования модифицированного квазистатического подхода для исследования захвата плазменных электронов кильватерной волной.

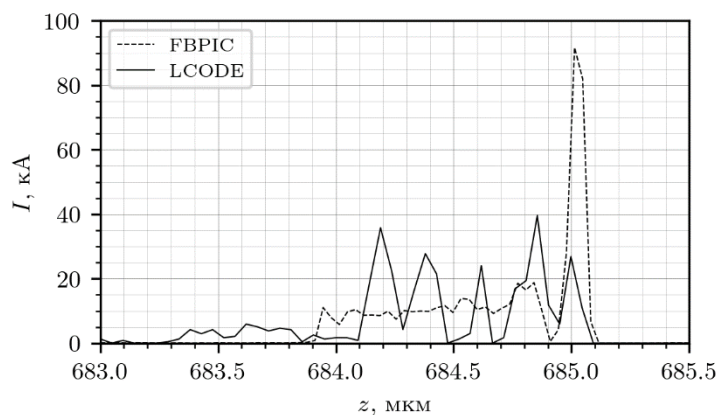


рис.1. Зависимость тока пучка захваченных электронов  $I$  от продольной координаты  $z$ , рассчитанная кодом без приближений FBPIC и квазистатическим кодом LCODE.

Список публикаций:

- [1] Albert F., Couprie M.E., Debus A., Downer M.C., Faure J., Flacco A., Gizzi L.A., Grismayer T., Huebl A., Joshi C., Labat M., Leemans W.P., Maier A.R., Mangles S.P.D., Mason P., Mathieu F., Muggli P., Nishiuchi M., Osterhoff J., Rajeev P.P., Schramm U., Schreiber J., Thomas A.G.R., Vay J.-L., Vranic M., Zeil K. // *New J. Phys.* 2021. № 23. С. 031101.  
 [2] Vay J.-L., Lehe R. // *Rev. Accelerator Science Technology.* 2016. № 9. С. 165.  
 [3] lcode <https://lcode.info/>.  
 [4] Дорожжина М.С., Балугев К.В., Кутергин Д.Д., Лотов И.К., Минаков В.А., Спицын Р.И., Туев П.В., Лотов К.В. // *Квантовая электроника.* 2023. № 53. С. 176.  
 [5] Lehe R., Kirchen M., Andriyash I.A., Godfrey B.V. and Vay J.-L. // *Computer Physics Communications.* 2016. № 203. С. 66.

## Результаты испытаний бессеточных ионных источников модифицированной конструкции

**Манегин Денис Сергеевич**

Соколов Владимир Дмитриевич, Плотникова Ольга Петровна, Воробьев Евгений Валентинович  
 Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
 Ивахненко Сергей Геннадьевич  
[manegin@bmstu.ru](mailto:manegin@bmstu.ru)

Одним из распространённых типов ионных ускорителей на эффекте Холла являются бессеточные ионные источники (БИИ), также называемые торцевыми холловскими ускорителями (ТХУ) или End-Hall [1]. Возможность генерации широко расходящихся ускоренных пучков со средней энергией до 300 эВ и интегральным значением ионного тока в пределах нескольких ампер позволяет успешно использовать БИИ при ионном ассистировании, финишной очистке и травлении поверхности. Большая часть производящихся различными компаниями БИИ выполнены по общей конструктивной схеме, предложенной Гарольдом Кауфманом [2]. Характерной отличительной чертой данной схемы является то, что задняя стенка разрядной камеры гальванически изолирована от анода и находится под плавающим потенциалом. Данная схема также называется схемой с отражателем. В то же время существует альтернативный подход, при котором задняя стенка разрядной камеры находится под потенциалом анода и является его составной частью [3].

Ранее коллективом сотрудников МГТУ им. Н.Э. Баумана были разработаны и испытаны бессеточные ионные источники, выполненные по обоим конструктивным схемам [4]. В настоящей работе представлены результаты исследований работы БИИ улучшенной конструкции, с модифицированной системой охлаждения и оптимизированной формой анода. БИИ был изготовлен как в исполнении с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры (БИИ-10ан), так и в исполнении с отражателем (БИИ-10отр). Оба ионных источника работали совместно с газопроточным термоэмиссионным катодом-нейтрализатором. В качестве рабочего газа и для источника, и для катода использовался аргон. Расход через катод-нейтрализатор был постоянным во всех экспериментах и составлял 0,17 мл/с. Напротив ионного источника была установлена гальванически изолированная мишень. Ток эмиссии катода-нейтрализатора подбирался таким образом, чтобы потенциал,

приобретаемый мишенью в пучке, не превышал  $\pm 5$  В относительно земли. Для облегчения условий работы катода на него подавался отрицательный относительно земли потенциал смещения, который составлял 25 В или 50 В и учитывался в величине разрядного напряжения. Для изучения пространственного распределения ионного тока БИИ использовался зонд Фарадея с охранным кольцом, установленный на поворотном манипуляторе.

Оба ионных источника продемонстрировали стабильную работу при напряжениях разряда от 100 до 300 В. При этом диапазон рабочих расходов аргона БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры оказался смещён в сторону более низких значений по сравнению с БИИ с отражателем, что соответствует ранее полученным результатам [4]. Так БИИ-10ан функционировал при расходах  $2,5 \cdot 10^{-2} \dots 0,25$  мл/с, в то время как БИИ-10отр –  $0,17 \dots 0,5$  мл/с. Для обоих ионных источников были подобраны значения индукции магнитного поля, при которых достигались наибольшие значения ионного тока на зонд. В целом плотность ионного тока, генерируемого БИИ с отражателем, оказалась существенно выше, чем в случае БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры – до  $1,97$  мА/см<sup>2</sup> для БИИ-10отр и до  $0,68$  мА/см<sup>2</sup> для БИИ-10ан на расстоянии от среза 275 мм. Значения тока на зонд в области напротив среза источника для БИИ-10отр превышали значения для БИИ-10ан практически в два раза (рис. 1). Однако на периферии токи практически совпадали и к тому же мало зависели от значения индукции магнитного поля.

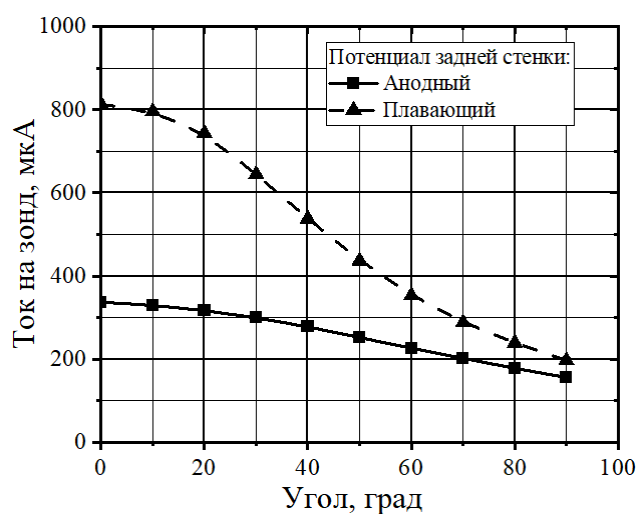


рис.1. Пространственное распределение ионного тока на зонд для БИИ с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры (ток разряда 5 А, напряжение 175 В)

Оба ионных источника показали более стабильную и эффективную работу по сравнению с предыдущей модификацией. БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры характеризовался существенно меньшими значениями плотности ионного тока, однако позволял достигать целевых значений разрядного напряжения при меньших расходах аргона и более низких давлениях в вакуумной камере. Последнее было также подтверждено в ходе дополнительных испытаний БИИ-10отр и БИИ-10ан на ксеноне, криптоне, азоте и кислороде при напряжениях разряда 50 В, 150 В и 300 В.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках субсидии на выполнение государственного задания № 075-03-2023-095/8 от 10 августа 2023 г.

Список публикаций:

- [1] Zhurin V.V. *Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. Weinheim: Wiley-VCH. 2012. 312 p.
- [2] H.R. Kaufman, R.S. Robinson. *End-Hall Ion Source*. United States Patent № 4,862,032. 1989.
- [3] W. G. Sainty. *Ion Source*. United States Patent US № 6,849,854 B2. 2005.
- [4] Манегин Д.С., Соколов В.Д., Шилов С.О., Воробьев Е.В., Серушкин С.В., Ивахненко С.Г. Исследование параметров работы бессеточных ионных источников. // *Инженерный журнал: наука и инновации*. №12. 2023. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-12-2322.

## Спиральный генератор с разделёнными в пространстве индуктивной и емкостной частями для импульсного рентгеновского аппарата

*Параскун Александр Григорьевич*

*Новосибирский государственный университет*

*Пальчиков Евгений Иванович, д.т.н.*

*[a.paraskun@g.nsu.ru](mailto:a.paraskun@g.nsu.ru)*

Среди методов исследования динамики вещества и его распределения в пространстве рентгеновские методики занимают особое место, оказываясь, в ряде случаев, практически единственными, позволяющими получить достоверную информацию об исследуемых объектах и процессах. Одной из таких задач является проведение на баллистическом стенде ударных испытаний углеволоконных композитных материалов на ударное воздействие. Основными требованиями к рентгеновской аппаратуре в такой задаче являются мобильность и малогабаритность используемого рентгеновского аппарата.

Наиболее подходящим для создания такого рентген-аппарата, однако, в то же время, наиболее малоисследованным источником высоковольтных импульсов напряжения является спиральный генератор, предложенный Фитчем и Хауэллом в 1964 году [1]. Устройство данного типа позволяет получать наносекундные импульсы с напряжением 100 – 600 кВ и содержит при этом минимальное количество деталей.

Спиральный генератор представляет собой устройство, запасующее электрическую энергию при одном, относительно низком напряжении, и разряжающее накопленную энергию в виде электрического импульса с напряжением, во много раз превосходящим запасенное. Он состоит из двухшинной проводящей линии, свернутой в рулон. При распространении волны в спиральной линии, электрическая энергия переходит в энергию магнитного поля, и электрическую энергию коаксиальных емкостей, включающихся последовательно. После отражения от разомкнутых концов линии, энергия магнитного поля в ней начинает переходить в электрическую, и волна в активной линии меняет полярность. Когда отраженная волна окажется в точке, где установлен коммутатор, напряжение между началом и концом спирали достигает своего максимального значения.

Однако низкое волновое сопротивление двухшинной линии плохо согласуется с реальной паразитной индуктивностью замыкающего её разрядника. Что ухудшает КПД устройства. В работе создаются и исследуются различные варианты спиральных генераторов, индуктивная и емкостная части которых разделены в пространстве вдоль оси намотки рулона [2]. В результате такого профилирования волновое сопротивление длинной двухшинной спиральной линии повышается в три раза, что положительно влияет на КПД устройства.

Параметры изготовленного генератора следующие. Размеры: внешний диаметр спирали, состоящей из двух шин из 11 и 12 витков – 52 мм, внутренний диаметр 40,5 мм. Измеренный коэффициент трансформации  $k=12,5$ . Измеренное время нарастания импульса от нуля до максимального напряжения составляет 60 нс.

Представлено численное решение задачи зависимости напряжения на выходе генератора от времени. Процесс распространения электромагнитной волны в активной и пассивной линиях описывается телеграфными уравнениями, а процесс стекания заряда описывается моделью классического колебательного контура. Решение распространения волн находилось методом Годунова, а для вычисления граничных условий для спирального генератора использовались явные разностные схемы первого порядка.

В работе также представлены экспериментальные результаты распределения индукции магнитного поля внутри спиральной линии во времени, полученные численным интегрированием напряжения на индуктивном датчике, размещённом внутри генератора. Приводятся численные модели пространственного моделирования распределения магнитного поля внутри и снаружи спирального генератора, полученные в программе моделирования в конечных элементах femm. Выявлены зависимости влияния ферритового магнитопровода в спиральной линии на распределение магнитного поля и на КПД генератора соответственно.

Результаты, полученные в работе, позволяют с достаточной точностью предсказывать и моделировать физические параметры спиральных генераторов. Решение позволяет создать компактный генератор наносекундных высоковольтных импульсов, который может быть использован для изготовления портативного рентгеновского аппарата с взрывной эмиссией электронов.

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет - 2030».

Список публикаций:

[1] Fitch R.A., Howell V.T.S. // *Patent. Appl.* 1961. P. 18 136.

[2] Пальчиков Е.И. Спиральный генератор высоковольтных импульсов. Патентная заявка, приоритет №2021120420 от 09.07.2021, МПК – H03K 31, H01P 30, H05G 30.

## Применение диагностики доплеровского обратного рассеяния для исследования магнитогидродинамических неустойчивостей в токамаке Глобус-М2

Токарев Арсений Юрьевич

Яшин Александр Юрьевич, Пономаренко Анна Михайловна

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Яшин Александр Юрьевич, к.ф.-м.н.

[tokarev\\_ayu@spbstu.ru](mailto:tokarev_ayu@spbstu.ru)

В современных установках магнитного удержания плазмы наблюдается большое количество разнообразных плазменных неустойчивостей. Особое внимание заслуживают магнитогидродинамические (МГД) явления ввиду их разнообразия и сильного влияния на удержание [1]. Развитие некоторых из них, например, периферийных локализованных мод (ELMs), может привести к повреждению установки [2]. Из-за этого исследование МГД неустойчивостей является важной задачей. В установках с термоядерными параметрами плазмы для ее решения возможно использование только бесконтактных методов диагностики. Благодаря возмущению магнитного поля, всегда сопровождающему данные неустойчивости, их появление возможно обнаруживать, а их развитие исследовать с помощью многих методов диагностики, обнаруживающих возмущения магнитного поля. Наиболее часто для этого используются магнитные зонды. Однако они обладают плохим пространственным разрешением и не позволяют определять амплитуду возмущения. В случае плотной и неоднородной плазмы сложно сопоставить сигнал магнитного зонда с реальным расположением и амплитудой неустойчивости из-за эффектов затухания и экранирования магнитного поля. Необходимы более локальные методы, использующие зондирование плазмы СВЧ или лазерным излучением.

Одним из мощных способов, позволяющих изучать магнитогидродинамические неустойчивости, является диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), установленная на токамаке Глобус-М2 в ФТИ им. Иоффе в Санкт-Петербурге [3]. Она включает 2 многочастотных рефлектометра с наклонными антеннами для зондирования плазмы. Диагностика ДОР позволяет оценивать флуктуации плотности плазмы и измерять скорость ее вращения перпендикулярно магнитному полю, а значит и радиальное электрическое поле  $E_r$  [4]. Благодаря применению многочастотного зондирования возможно построение радиальных профилей электрического поля и флуктуаций плотности. В данной работе приведено применение диагностики ДОР для исследования различных МГД неустойчивостей в токамаке Глобус-М2. Показаны ее возможности по обнаружению и локализации таких явлений, как неоклассические тиринг-моды, альфвеновские колебания, геодезические акустические моды (GAM), периферийные локализованные моды, филаменты, колебания предельного цикла (LCO). Результаты диагностики ДОР сравниваются с сигналами магнитных зондов, также установленных на токамаке Глобус-М2. Показана возможность определения относительной амплитуды флуктуаций по сигналу ДОР.

Список публикаций:

[1] Hender T.C., et al // *Nucl. Fusion*. 2007. V. 47. P. S128.

[2] Leonard A.W. // *Phys. Plasmas*. 2014. V. 21. P. 090501.

[3] Yashin A.Y., et al // *JINST*. 2022. V. 17. P. C01023.

[4] Conway G.D., et al // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2004. V. 46. P. 951.