На правах рукописи

Белоз –

Белозеров Олег Сергеевич

ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ДО МЕГАЭЛЕКТРОНВОЛЬТНЫХ ЭНЕРГИЙ НА СИЛЬНОТОЧНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Специальность 1.3.9. – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»).

Научный руководитель: *Данько Сергей Александрович*
доктор физико-математических наук, доцент, начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт».

Официальные оппоненты: *Никулин Валерий Яковлевич*
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва;

Орешкин Владимир Иванович
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, г. Томск.

Ведущая организация: Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", г. Москва.

Защита состоится «22» сентября 2021 г., начало в 15.00 часов, на заседании диссертационного совета 02.1.003.02 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.1.003.02
кандидат физико-математических наук Ю.В. Капустин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. Использование пучков ускоренных ионов с энергиями от нескольких десятков до нескольких сотен кэВ послужило основой для создания ряда технологий обработки конструкционных материалов, с целью обеспечения свойств, не достижимых традиционными методами обработки. Существенным фактором модификации поверхности материалов является необходимая глубина легируемого слоя, которая в ряде приложений достигается только при энергиях ионов больших нескольких МэВ. Так, увеличить глубину модифицируемой зоны до нескольких микрометров удается при использовании мощных наносекундных импульсных пучков ионов мегаэлектронвольтных энергий.

Работы по ионной имплантации в настоящее время ведутся в большом количестве лабораторий. Например, в Томском институте сильноточной электроники и в Томском государственном университете управляющих систем и радиоэлектроники исследуют усовершенствование керамических поверхностей и трудности, связанные с электрической зарядкой бомбардирующими частицами поверхности, имеющей плохую электропроводность. Так же в Томске на установке ГИТ-12 и в Вашингтоне на установке HAWK проводятся эксперименты с Z-пинчём и гибридной конфигурацией струи дейтериевого газа, где были получены ускоренные дейтроны с энергией до 30 МэВ, применяемые для генерации мощного нейтронного импульса, используемого в испытательных целях [1].

Во Франции в Université Paris-Saclay изучают физические механизмы, происходящие при облучении тяжелыми ионами в материалах для ядерной промышленности. В частности, проводятся эксперименты по наблюдению за развитием повреждений при облучении 4 МэВ ионами золота карбида бора, нашедшего широкое распространение в качестве поглотителя на атомных станциях [2].

В Германии в Friedrich-Schiller-Universität изучают изменения свойств полупроводников при ионной имплантации. Так, возможна регулировка

морфологии кремниевых нанопроволок при облучении ионами аргона с энергиями 100 и 300 кэВ. Воздействие ионов золота с энергий несколько МэВ на изменение структуры и морфологии нанопроволок висмута разных диаметров изучают в Institute of Physics, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil [3].

В Китае в Laboratory of Particle Physics and Particle Irradiation, Shandong University изучают модификацию ионным пучком двумерных материалов, в том числе графена, что взывает большой интерес, как для фундаментальных исследователей, так и для различных отраслей промышленности [4].

Несмотря на длительное время, прошедшее с выхода первых работ по ускорению ионов электронным пучком, инжектируемым в вакуумную камеру, до сих пор нет однозначной теоретической модели. Это объясняется наличием разнообразных физических процессов и неустойчивостей, возникающих в области пучок-плазма-вакуум и приводящих к различным интерпретациям экспериментов по ускорению ионов. Что же касается проблемы формирования пучков ионов с энергией ~ 10 МэВ, то они, как правило, создаются циклическими ионными ускорителями или линейными тандемными ускорителями, что сопряжено с трудоёмкими техническими решениями. Преимуществом пучков, получаемых в диодах сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП), является мегаэлектронвольтная энергия тяжёлых частиц при энергиях электронов в десятки раз меньших и при относительной простоте генерации.

В данной работе используется ускорение ионов в генераторах РЭП, которое позволяет разогнать частицы за несколько наносекунд до энергии, многократно превышающей разность потенциалов в высоковольтном диоде ($U \approx 300$ кВ), умноженную на заряд иона. При таком ускорении вполне достижимыми являются, например, энергии углеродных ионов 8–15 МэВ, которые проникают в металлы (Al, Ni, Fe) на глубину ~ 5 мкм, что соответствует требованиям ряда приложений.

Целью работы является исследование эффективности генерации плазменных потоков и пучков ионов мегаэлектронвольтных энергий при воздействии сильноточного электронного пучка на анодные нагрузки, детализация механизма ускорения ионов в таких экспериментах.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести модернизацию импульсного сильноточного генератора «Катран» (напряжение в импульсе ~ 300 кВ, ток ~ 150 кА, длительность импульса ~ 60 нс), создать электротехническую систему управления генератором «Катран» и регистрации параметров работы установки.
2. Разработать диагностический комплекс, включающий в себя набор электротехнических, рентгеновских, электронно-оптических и других методов, для выявления физических процессов, происходящих при взаимодействии сильноточного РЭП с фольгами, для уточнения механизмов ускорения ионов и определения параметров ионных сгустков.
3. Провести на сильноточных генераторах «Кальмар» и «Катран» эксперименты с целью выявления свойств и оптимизации условий генерации сгустков ионов для увеличения их энергии и полного ионного выхода.
4. Сопоставить полученные экспериментальные результаты с имеющимися теоретическими данными об ускорении ионов. Определить основные механизмы ускорения ионов в проведённых экспериментах. Дополнить эмпирические зависимости свойств пучка ионов от параметров высоковольтного импульса генератора, РЭП и образованной плазмы.

Научная новизна. Исследуемый подход получения энергичных ионов в вакуумных высоковольтных диодах сильноточных генераторов РЭП является известным в мировых исследованиях. В проведённых экспериментах впервые удалось сопоставить локальный вклад РЭП с моментом ускорения конкретного сгустка ионов, оценить плотность РЭП в данном месте, связать измеренные параметры с атомным составом ионов и с их энергией. Впервые было установлено, что ускорение ионов происходит в двух местах в одном

эксперименте: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой. Опираясь на известные теории, объясняющие ускорение ионов в условиях близких к проведённым экспериментам, были определены наиболее вероятные физические процессы, приводящие к ускорению ионов в проведённых экспериментах. Достигнутые параметры ионных пучков: энергия отдельных ионов и направленность их движения, – находятся на уровне самых высоких для экспериментов в подобной постановке [5].

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана оригинальная методика регистрации одномерного рентгеновского изображения с помощью щелевой развёртки во времени на электронно-оптической камере, которая в сочетании с времяпролётной масс-спектрометрией и электротехническими измерениями позволяет определить эффективность ускорения ионных сгустков в вакууме в зависимости от плотности тока РЭП на аноде из тонкой фольги.
2. Установлено, что ускорение ионов происходит в двух местах: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой. Определены наиболее вероятные физические процессы, приводящие к ускорению ионов.
3. Подтверждены полученные ранее другими исследователями результаты по ускорению ионов в геометрии высоковольтного диода с тонкой анодной фольгой, связанные с: плазменными условиями, необходимыми для генерации ионов; многочисленностью сгустков ионов, генерируемых за один пуск генератора; продолжительностью ускорения одного сгустка ионов; угловым распределением ускоренных ионов.
4. Получены ионы алюминия с энергией до ~ 28 МэВ, которая достаточна для модификации твёрдотельных поверхностей на технологическую глубину в несколько микрон.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка следующих диагностических систем:

- времяпролётная диагностика, которая позволяет измерять энергию отдельных ионов по измерению скорости их движения на известной базе;
- тепловизионная диагностика для измерения полной энергии пучков заряженных частиц и распределения плотности энергии ионов в поперечном сечении;
- методика измерения нагрева анодной фольги по интенсивности теплового вакуумного ультрафиолетового излучения из плотной плазмы с помощью вакуумных рентгеновских диодов с фильтрами;
- методика цифровой регистрации в мягком рентгеновском излучении усреднённой по времени площади анодной фольги, на которую воздействует электронный пучок;
- методика измерения плотности тока электронов на анодной фольге с временным разрешением в рентгеновском излучении с использованием методики щелевой развёртки и обскурограммы.

2. Результаты экспериментальных исследований, проведённых на двух сильноточных генераторах «Кальмар» (напряжение в импульсе ~ 250 кВ, ток ~ 40 кА, длительность импульса ~ 150 нс) и «Катран» (напряжение в импульсе ~ 300 кВ, ток ~ 150 кА, длительность импульса ~ 60 нс) с анодами из разных материалов при разных условиях фокусировки электронного пучка.
3. Эффект создания устойчивых условий для ускорения ионов всех сортов атомов, составляющих анодную нагрузку, максимальная энергия которых многократно превышает энергию ускоренных в диоде электронов.
4. Получение пучков ионов, в которых энергия протонов достигала ~ 4 МэВ, ионов алюминия ~ 28 МэВ. Эффективное ускорение ионов связано с фокусировкой электронного пучка, приводящей к увеличению плотности тока РЭП и электрического поля в месте ускорения.
5. Эффект ускорения ионов в двух местах: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой, – и уточнение механизма их генерации. Первый механизм связан с глубокими и многократно

повторяющимися осцилляциями тока в течение одного пуска генератора, а второй – с движением виртуального катода в процессе ускорения.

Личный вклад. При активном участии автора была проведена постановка экспериментов и были подготовлены: интегральная во времени методика цифровой регистрации рентгеновского изображения фокусировки РЭП; времяпролётная методика измерения энергии ускоренных ионов; тепловизионная методика измерения полной энергии и углового распределения ускоренных ионов; методика измерения плотности тока РЭП на анодной фольге с временным разрешением. Был восстановлен и модернизирован генератор «Катран», была создана электротехническая система управления генератором «Катран» и регистрации параметров работы установки. При решающем участии автора были проведены эксперименты на генераторах РЭП «Кальмар» и «Катран», в которых измерялись параметры РЭП и параметры ускоренных ионов. Автор обрабатывал и участвовал в интерпретации полученных результатов, на основе которых был детализирован сценарий ускорения ионов.

Достоверность полученных результатов определяется надёжностью и взаимным дополнением применявшихся методов исследования, повторяемостью значений измеряемых параметров в многочисленных экспериментах на разных установках. Полученные в данной работе результаты подтверждают эффективность исследуемого подхода получения энергичных ионов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на шести международных конференциях и молодежных школах: 5-я международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», Москва, Россия, 2019; 46-я международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, Россия, 2019; 16-я Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа, Москва, Россия, 2019; 47-я международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, Россия, 2020; 48-я международная Звенигородская конференция по

физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, Россия, 2021; 7-я международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», Москва, Россия, 2021.

Публикации. Содержание работы отражено в 10 публикациях, в том числе – в четырех опубликованных статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus и рекомендованных в действующем перечне ВАК, и в шести сборниках материалов и тезисов конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего в себя 114 наименований. Работа изложена на 102 страницах печатного текста, содержит 1 таблицу и 35 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен краткий обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию получения и использования энергичных ионов. Описано несколько основных типов ускорителей мощных импульсных пучков (МИП):

- линейные ускорители;
- циклические ускорители;
- ускорители ионов с использованием лазерных систем;
- ускорители, основанные на коллективном ускорении ионов в системах с виртуальным катодом.

Перечислены те известные модели коллективного ускорения ионов, которые соответствуют экспериментальным условиям на сильноточных генераторах «Кальмар» ($I \approx 40$ кА, $U \approx 250$ кВ, $t \approx 150$ нс) и «Катран» ($I \approx 100$–150 кА, $U \approx 300$ кВ, $t \approx 60$ нс) без внешнего магнитного поля. В эксперименте РЭП генерировался в процессе электронной автоэмиссии в вакуумном

высоковольтном диоде при давлении остаточного воздуха менее 10^{-4} торр, а анодная нагрузка обычно была представлена прозрачной для релятивистских электронов тонкой фольгой или плёнкой. Модели по ускорению ионов, применяемые к условиям экспериментов, разбиты на две группы: в первой ускорение происходит в области за анодом, отделённой от анода прозрачной для электронов фольгой, во второй – в катод-анодном промежутке.

Во второй главе описываются разработанные методы диагностики, используемые в проведённых экспериментах по ускорению ионов на импульсном генераторе РЭП. Энергия отдельных ионов рассчитывалась по измеренной при помощи времяпролётной методики скорости их движения на известной базе; при этом сорт ионов определялся по пробегу в веществе. Полная энергия пучков заряженных частиц и угловое распределение плотности энергии ионов измерялись тепловизионной методикой. Температура анодной фольги определялась по интенсивности теплового излучения из плотной плазмы с помощью вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) в диапазоне вакуумного ультрафиолета. Усредненная по времени площадь анодной фольги, на которую воздействует электронный пучок, получалась при обработке цифрового рентгеновского изображения. Плотность тока РЭП на анодной фольге с временным разрешением определялась по току, измеренному низкоомным шунтом, и размеру фокусного пятна, полученному в рентгеновском излучении с использованием щелевой развёртки. Подробное описание используемых диагностик приведено в 1 и 4 рецензируемых публикациях автора.

В третьей главе описываются результаты, полученные в ходе экспериментов на сильноточном электронном ускорителе «Кальмар», который генерирует РЭП с максимальной энергией электронов 250 кэВ, током 40 кА и длительностью импульса на полувысоте 150 нс.

Для исследования ускорения ионов использовалась вакуумная камера с давлением $P < 10^{-4}$ торр, в которой можно устанавливать тонкие анодные нагрузки из фольг и плёнок, визуально контролировать расположение катода и

измерять зазор между электродами (рисунок 1). Электронный пучок генерировался в высоковольтном диоде, в котором анодом обычно служила прозрачная для электронов 10-ти микронная лавсановая плёнка, покрытая слоем алюминия толщиной 0.1 мкм. Ионный пучок генерировался в направлении движения электронов и попадал преимущественно в осевую пролётную камеру, а также в наклонённые к оси под углами 18º–22.5º патрубки с диагностической аппаратурой. Максимальная длина патрубков и осевой камеры составляли 182 см. Осевой патрубок был предназначен, в основном, для тепловизионной диагностики, но в ряде опытов на оси располагались ВРД, регистрировавшие поток ионов во времяпролётном спектрометре. В боковых патрубках располагались: ВРД и камера-обскура с регистрирующей оптической системой. Для регистрации импульсных потоков гамма-излучения электронов использовались электронные детекторы ССДИ8М с временным разрешением 10 нс и СКД с временным разрешением 3 нс.

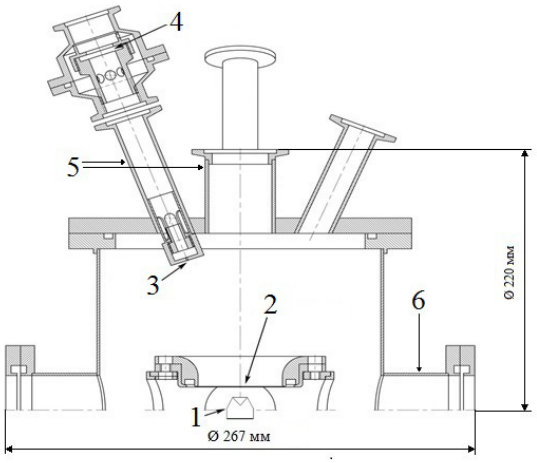

Рисунок 1. Вакуумная камера генератора «Кальмар» с диодным узлом: 1 – катод; 2 – анодная фольга; 3 – обскура; 4 – сцинтиллятор; 5 – патрубки, направленные на фокусное пятно электронного пучка; 6 – боковые патрубки с окнами

Приведены примеры экспериментов. Рассмотрим один из наиболее информативных, где в качестве детекторов времяпролётного спектрометра использовались четыре ВРД, три из которых были снабжены фильтрами из лавсана $C_{10}H_8O_4$ толщиной 4.8 мкм. На оси пролётной камеры на удалении

180 см от анода располагался ВРД3, под углом 3º на удалении 147 см – ВРД4. Осциллограммы этих детекторов, электрического тока и напряжения генератора представлены на рисунке 2.

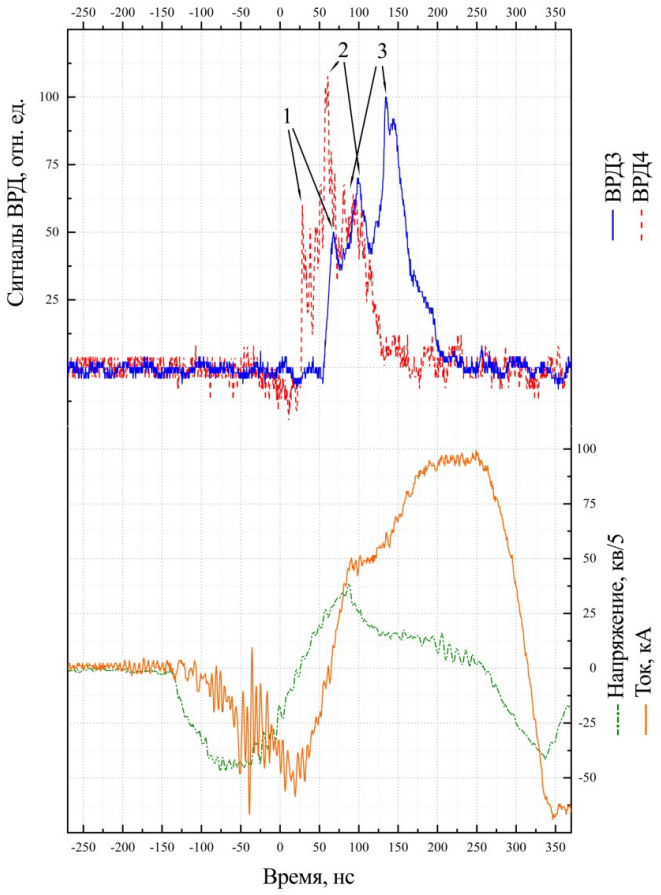

Рисунок 2. Осциллограммы осевых детекторов ВРД3 и ВРД4, электрического тока и напряжения в высоковольтном диоде генератора «Кальмар» в пуске №1. Цифрами со стрелками обозначена последовательность пиков, соответствующих различным группам ускоренных ионов

На сигнале с ВРД3 отчётливо просматривается три вершины; на более зашумлённом сигнале с ВРД4 они также видны (пики обозначены цифрами на рисунке 3.3). Скорости групп ионов оцениваются по соответствующим парам пиков. Задержка по первым пикам на ВРД составляет $\Delta t = 36$ нс, что соответствует скорости $V_1 = 0.92$ см/нс. В анодной плёнке присутствует четыре вида атомов, а в электрическом поле должны иметь преимущество в ускорении атомы с меньшей массой при остальных равных условиях. Исходя из этого,

первая группа атомов идентифицируется как протоны с энергией E_1 = 440 кэВ/нуклон.

По вторым пикам скорость и энергия осевых ионов оказываются равными V_2 = 0.78 см/нс, E_2 = 320 кэВ/нуклон. Эта вторая группа ионов не может быть протонами, поскольку они не способны пройти сквозь лавсановый фильтр из-за малой энергии. С измеренной скоростью могут двигаться: углерод с энергией 3.9 МэВ, кислород 5.1 МэВ, алюминий 8.7 МэВ. Эти ионы углерода и кислорода уже частично проходят сквозь лавсановый фильтр. Алюминий проходит почти полностью.

По третьим пикам скорость и энергия осевых ионов оказываются равными V_3 = 0.66 см/нс, E_3 = 226 кэВ/нуклон. С измеренной скоростью могут двигаться: углерод с энергией 2.7 МэВ и кислорода 3.6 МэВ, энергия которых не позволяет пройти фильтр, и алюминий с энергией 6.1 МэВ, ~ 60% которого уже проникает через фильтр.

В данном эксперименте по измеренной скорости ионов и их проникающей способности установлено, что самые тяжёлые из присутствующих, ионы алюминия, приобретают максимальную энергию 6.1 МэВ.

В следующем пуске в качестве детекторов времяпролётного спектрометра также использовались четыре ВРД, из которых только ВРД2 был снабжен фильтром из алюминия толщиной 10 мкм. На оси пролётной камеры на удалении 180 см от анода располагался ВРД3, под углом 3º на удалении 147 см – ВРД2. Осциллограммы этих детекторов представлены на рисунке 3.

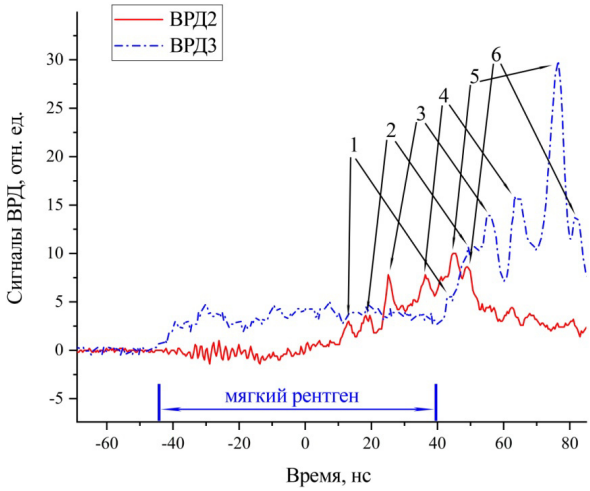

Рисунок 3. Осциллограммы детекторов ВРД2 и ВРД3. Цифрами со стрелками обозначена последовательность пиков, соответствующих различным группам ускоренных ионов. Горизонтальной стрелкой показан интервал сигнала ВРД3, соответствующий мягкому рентгеновскому излучению

На сигналах обоих ВРД отчётливо просматривается несколько вершин, пики обозначены цифрами на рисунке 3. Оценим скорости групп ионов для каждого из пиков. Задержка по первым пикам на ВРД составляет $\Delta t_1 = 28$ нс, что соответствует скорости $V_1 = 1.2$ см/нс. Задержки по остальным пяти пикам отличаются от Δt_1 не более, чем на 2 нс, что соответствует скорости $V_i = 1.2 \pm 0.1$ см/нс.

Энергии возможных ионов, соответствующие $V_i = 1.2 \pm 0.1$ см/нс, составляют: $E_p = 730 \pm 100$ кэВ, $E_C = 8.6 \pm 1.2$ МэВ, $E_O = 11.6 \pm 1.7$ МэВ, $E_{Al} = 19.7 \pm 2.8$ МэВ. Средний пробег 10-микрон в алюминиевой фольге имеют следующие ионы: протоны с энергией 760 кэВ, углерод с энергией 12 МэВ, кислород с энергией 16.5 МэВ, алюминий с энергией 27 МэВ. Из всех имеющихся видов ионов только протоны имеют достаточную энергию, чтобы хотя бы частично преодолеть поставленный фильтр.

В результате экспериментов по ускорению ионов на импульсном ускорителе РЭП «Кальмар» были измерены потоки ионов и установлено, что в высоковольтном диоде ускорителя создаются условия для ускорения ионов всех сортов атомов, составляющих анодную нагрузку. Такие условия могут

создаваться как на фронте основного импульса мощности генератора при наличии заметного предымпульса, так и в конце рабочего полупериода при низком уровне предымпульса. Установлено, что максимальную энергию 6.1 МэВ приобретают самые тяжёлые из присутствующих частиц – ионы алюминия. Протоны набирали максимальную энергию ~ 800 кэВ. Энергия отдельных ионов, идущих в направлении ~ 20º, оказалась меньше примерно на 15%, чем энергия осевых ионов.

Значение энергии, переносимое ионами, оцененное при помощи тепловизионной регистрации воздействия ионного пучка на пластину-мишень, в экспериментах составляло от 0.07 до 0.35 Дж, а угловая расходимость пучков – от 1.2° до 2.2°. Полное количество ускоренных ионов в пересчёте на 1 МэВ-ные составило ~10^{12} частиц в пуске.

В четвертой главе описываются результаты, полученные в ходе экспериментов на сильноточном генераторе «Катран», который выдает РЭП с максимальной энергией электронов до 300 кэВ, током до 150 кА и длительностью импульса на полувысоте 60 нс.

Вакуумная камера, представленная на рисунке 4, откачивалась до остаточного давления $P < 10^{-4}$ торр. Электронный пучок генерировался в вакуумном высоковольтном диоде с электронной автоэмиссией, в котором анодом обычно служила прозрачная для релятивистских электронов 10-ти микронная алюминиевая фольга. Осевой патрубок служил для одновременного размещения как времяпролетного спектрометра с четырьмя ВРД, снабжёнными разными фильтрами, так и мишени, которая фотографировалась тепловизором через поворотное зеркало перед боковым патрубком камеры. Для поворота инфракрасного излучения в вакуумной камере использовалось зеркало, представленное тонкой алюминиевой фольгой с коэффициентом отражения близким к 100%. В наклонных патрубках располагались два ВРД для определения температуры плазмы и камера-обскура с регистрирующей оптической системой. В третьем наклонном патрубке были установлены танталовый диск со щелью и сцинтиллятор для регистрации рентгеновского

автографа электронного пучка на анодной фольге с временным разрешением при помощи световой электронно-оптической камеры К008.

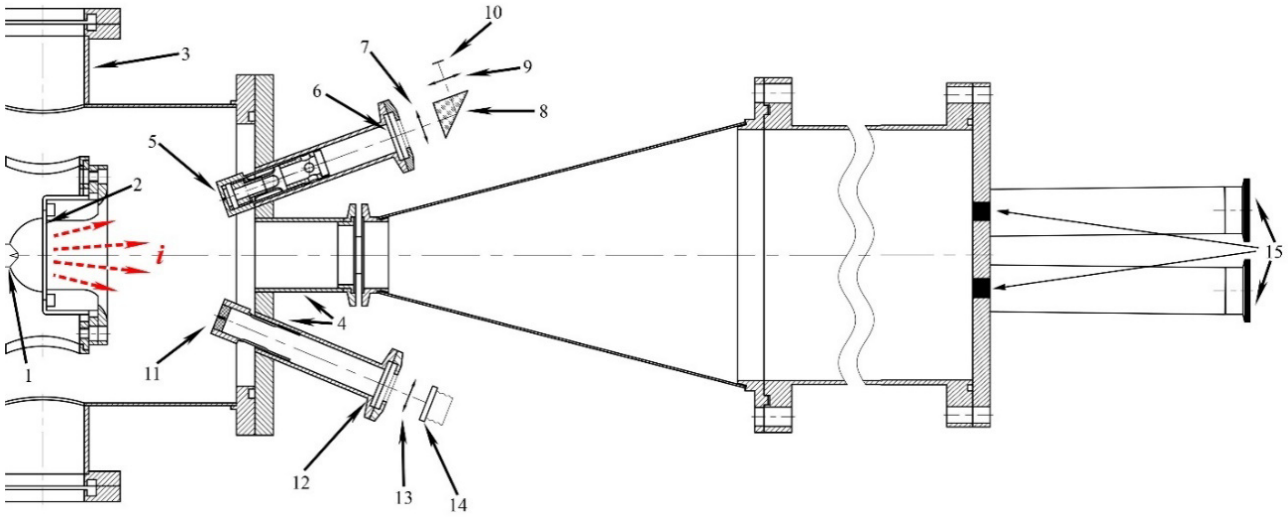

Рисунок 4. Схема вакуумной камеры генератора «Катран» с диодным узлом: 1 – катод; 2 – анодная фольга; 3 – боковые диагностические окна; 4 – патрубки, направленные на фокусное пятно электронного пучка; 5 – обскура; 6, 12 – сцинтиллятор; 7, 9, 13 – объективы; 8 – поворотная призма; 10 – чувствительная матрица фотоаппарата; 11 – первая щель; 14 – торец световода с регулярным расположением волокон; 15 – вакуумные рентгеновские диоды

Далее приводятся экспериментальные результаты, полученные на установке «Катран». На рисунке 5 собраны вместе сориентированные и масштабированные друг относительно друга полученные в одном из пусков изображения: сделанные обскурой, щелевой развёрткой и осциллограммы, синхронизованные со щелевой развёрткой. Моменты прихода ионов на один из детекторов отмечены штрихами над осциллограммой, полученной с ВРД. Дистанция, на которой происходит ускорение ионов, составляет несколько миллиметров. Эти моменты набора скорости трёх сгустков ионов отмечены тремя штрихами над осциллограммой тока генератора. Непосредственно в эти моменты времени щелевая развёртка зарегистрировала фокусировку РЭП, продолжавшуюся единицы наносекунд и демонстрирующую кратковременность существования условий для ускорения ионов, и малую длину дистанции, на которой происходит ускорение. В данном эксперименте зарегистрированы ионы алюминия с энергиями 5.75 и 6.35 МэВ

соответственно, поскольку более лёгкие ($Z < 10$) ионы, имеющие измеренную скорость и присутствующие в поверхностном слое алюминиевой фольги-анода, не проникают сквозь лавсан толщиной 4.8 мкм, размещённый в качестве фильтра перед ВРД.

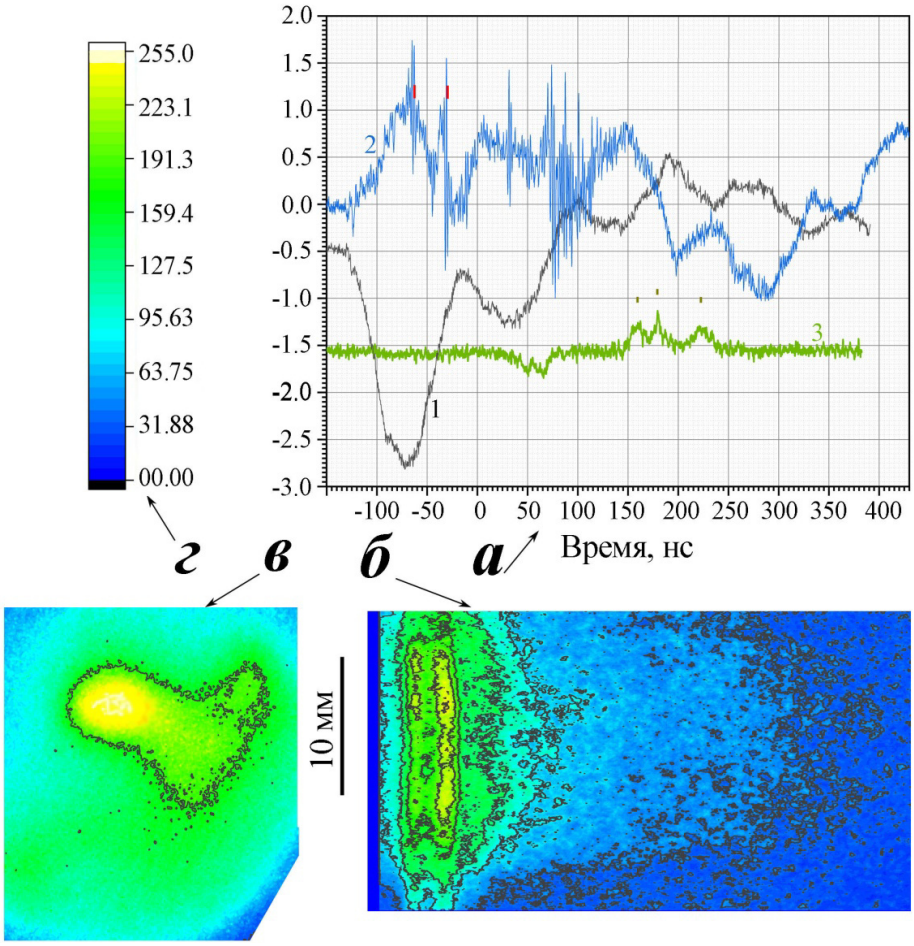

Рисунок 5. Сводные результаты пуска: *а* – осциллограммы напряжения (1, кВ/100, предымпульс 50 кВ), электрического тока (2, инвертирован, кА/50) и детектора ВРД (3, нулевая линия смещена); *б* – линейная щелевая развёртка, синхронизованная с осциллограммами; *в* – полученное камерой-обскурой рентгеновское изображение экспонируемой электронным пучком анодной фольги, масштабированное и сориентированное вдоль щелевой развёртки; *г* – шкала освещённости на обоих (*б* и *в*) изображениях

Вычисленные значения плотности тока в фокусном пятне на анодной фольге в первый момент времени равны $\sigma_1 = 17$ кА/см^2, а во второй – $\sigma_2 = 14.5$ кА/см^2. Проведено сравнение полученных плотностей тока с оценками, сделанными по интегральному изображению обскуры. Интегральное по времени значение

площади на половинном уровне освещённости фокусного пятна равно 0.97 см^2. Если традиционно считать, что половина тока идёт через эту площадь, то средняя плотность тока в момент первого ускорения составила $\sigma_1 = 28$ кА/см^2, а во второй момент – $\sigma_2 = 19.3$ кА/см^2. Оба эти значения получаются существенно завышенные из-за того, что в эксперименте большая часть тока РЭП проходит вне фокусного пятна. Если проинтегрировать освещённость по этой площади на половинном уровне, а также по всему изображению сцинтиллятора, и взять их отношение, то доля полного тока в фокусном пятне получится равной 0.15. Плотности тока в два рассматриваемых момента составят $\sigma_1 = 8.5$ кА/см^2 и $\sigma_2 = 5.9$кА/см^2. Она оказывается в рассматриваемом эксперименте в 2–2.5 раза меньше плотности тока, полученной с использованием щелевой развёртки.

Приведен расчет температуры плазмы двумя способами. Первый по двум ВРД один из которых с фильтром, а другой без фильтра, по отношению их сигналов и предположения, что излучает абсолютно чёрное тело, вычисленная температура составила 2.5 ± 0.5 эВ. При расчете температуры по сигналу с ВРД и площади нагрева, полученной из изображения с камеры обскуры, она составила 1.4 ± 0.3 эВ. При обоих полученных значениях температуры плазмы среди ускоряемых ионов алюминия преобладают ионы с зарядом равным 1.

Для определения места, где происходит ускорение ионов (в высоковольтном диоде от катода к аноду или за анодной фольгой в сторону виртуального катода), и для соотнесения полученных результатов с существующими моделями были проведены эксперименты со специальным латунным коллиматором, расположенным на удалении f от анодной фольги, как показано на рисунке 6. Цилиндрические отверстия диаметром 2.2 мм в коллиматоре располагались на удалении 3 мм друг от друга по обеим прямоугольным координатам. Размеры коллиматора выбраны таким образом, чтобы помешать распространению электронного пучка за фольгу и, тем самым, либо устранить образование виртуального катода за фольгой, либо ограничить дистанцию, на которой виртуальный катод мог ускорять ионы. Поскольку ранее проведённые

эксперименты показали, что угловая расходимость ионного пучка составляет ~ 2º, то коллиматор данной геометрии позволяет пропускать узконаправленные ускоренные ионы к детекторам.

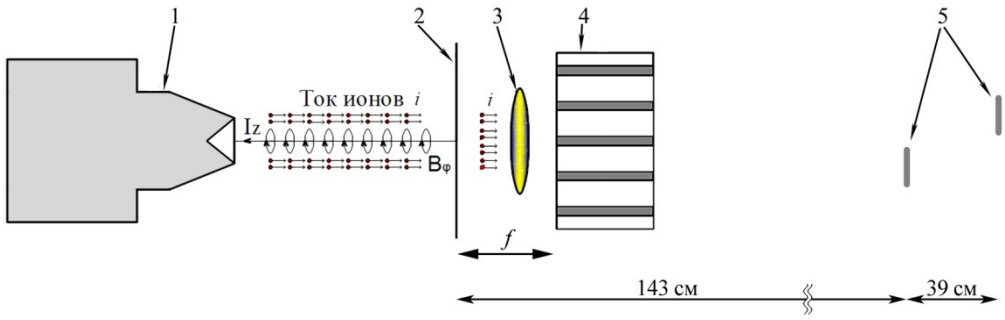

Рисунок 6. Схема эксперимента с использованием коллиматора: 1 – катод; 2 – анодная фольга; 3 – виртуальный катод; 4 – коллиматор; 5 – ВРД

В проведённых 15-ти последовательных пусков генератора, где коллиматор расположен вплотную к аноду ($f = 0$), анод был представлен алюминиевыми фольгами различной толщины 10 и 5–7 мкм. Во всех пусках уверенно наблюдались ускоренные ионы. Медианные значения E_{median} зарегистрированной датчиками энергии ионов в серии шести последовательных пусков с фольгой, имеющей толщину 10 мкм, и в серии из девяти пусков с фольгой меньшей толщины составляют 200 и 470 кэВ/нуклон соответственно. Медианные значения энергии ионов для пусков с фольгой толщиной менее 10 мкм существенно больше, что свидетельствует о том, что ускорение происходит исключительно в зазоре высоковольтного диода, а в фольге происходит торможение полученных ионов. Причём потери энергии ионов соответствуют толщине фольги. В этих двух сериях медианные значения пересчитанной энергии ускоренных ионов, ещё не прошедших сквозь анодную фольгу, составляют 860 и 850 кэВ/нуклон соответственно. Эти значения практически одинаковые, т.е. параметры пусков были достаточно стабильными, и сравнение двух серий представляется корректным.

Механизм ускорения ионов самым непосредственным образом связан с характером протекания электрического тока в высоковольтном диоде.

Характерными во всех пусках являются показанные на рисунке 7б колебания на осциллограмме тока, текущего через диод при генерации РЭП. Данные колебания свидетельствуют о развитии неустойчивости тока и появляются в высоковольтном диоде вне зависимости от того, используется ли в качестве анода трёхмиллиметровая стальная пластина, или пятимикронная алюминиевая фольга. Эти колебания не являются какими-то дефектами регистрации сигналов, что понятно по осциллограмме на рисунке 7а, которая записана в эксперименте на короткозамкнутую нагрузку. Объяснением появления осцилляций тока может служить резкое изменение импеданса высоковольтного диода, что, наиболее вероятно, связано с развитием перетяжки или разрывом токового канала. Период этих колебаний составляет $T \approx 2$ нс. На рисунке 7б показан сигнал черенковского детектора, регистрирующего жёсткое рентгеновское излучение с $h\nu > 200$ кэВ, на котором также заметна модуляция сигнала на ~ 20% по амплитуде.

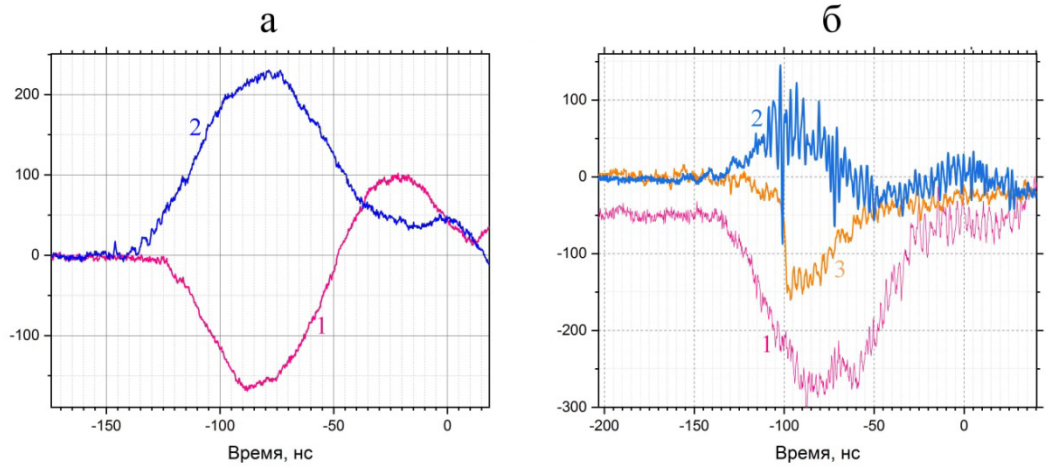

Рисунок 7. Типичные осциллограммы напряжения на передающей линии генератора (*1*, кВ), тока высоковольтного диода (*2*, кА) и сигнала черенковского детектора (*3*, отн. ед.) рентгеновского излучения ($h\nu > 200$ кэВ) в пуске с короткозамкнутым диодом (а) и в рабочем пуске с РЭП (б)

Во второй части экспериментов при отодвигании коллиматора от анодной фольги возникают условия для появления виртуального катода и ускорения ионов в заанодном пространстве. На рисунке 8 показаны средняя энергия E_{mean}

и медианное значение E_{median} энергии ускоренных ионов в зависимости от удаления коллиматора от анодной фольги.

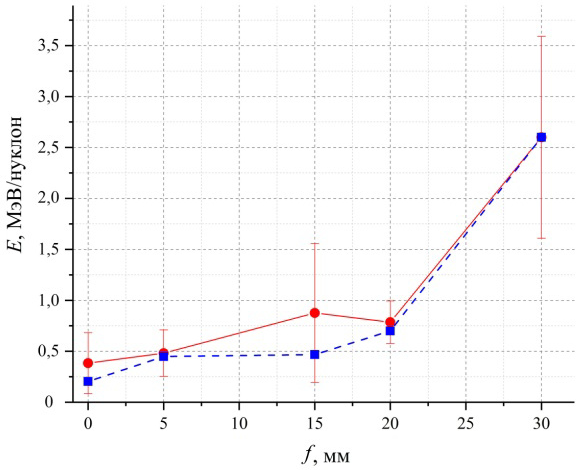

Рисунок 8. Зависимость средней энергии E_{mean} (—) и медианного значения E_{median} (---) энергии ускоренных ионов от удаления f коллиматора от анодной фольги

Как видно на графике, при удалении коллиматора от анодной фольги энергия сгустков ионов монотонно возрастает, и при смещении коллиматора на 30 мм энергия наблюдаемых протонов достигала E_p = 1.5–3.5 МэВ, что соответствует энергиям, полученным в экспериментах без использования коллиматора. Исходя из перечисленного, видно, что вне высоковольтного диода за анодной фольгой к ускорению ионов подключается один из механизмов, связанных с ВК и упомянутых во введении.

Эксперименты на установке «Катран» показали, что ускорение ионов происходит в двух местах: внутри высоковольтного диода генератора и снаружи за тонкой анодной фольгой. Опираясь на известные теории [6–9], объясняющие ускорение ионов в условиях близких к нашим экспериментам, были определены наиболее вероятные физические процессы, приводящие к ускорению ионов в проведённых экспериментах.

В катод-анодном зазоре диода генератора при электрическом токе, превосходящем альфвеновский, происходит пинчевание или разрыв токового канала. Это приводит к практическому прерыванию тока проводимости и появлению сильного вихревого электрического поля, попутного осевому

движению электронов и многократно превосходящего первоначальное поле генератора. Далее могут осуществляться два механизма ускорения ионов. В первом – плотный сгусток электронов, образовавшийся на оси в процессе пинчевания и движимый сильным вихревым полем, прорывается к аноду, увлекая за собой сгусток ионов [9]. Во втором – ионы ускоряются к аноду в следующей фазе нарастания тока электронов, когда вихревое поле изменяет свой знак. Процесс ускорения повторяется многократно в течение одного пуска генератора с частотой, доходящей до частоты модуляции тока ≈ 0.5 ГГц [8].

В заанодной области проявляется другой механизм ускорения ионов. За границей анодной плазмы в вакууме образуется виртуальный катод, и в области катод-анод-виртуальный катод возникают осциллирующие электроны. Сгустки ионов из анодной плазмы ускоряются в сторону виртуального катода. Этот вытягиваемый из анода нейтрализующий ионный поток приводит к расширению «облака» осциллирующих электронов и перемещению виртуального катода, в свою очередь увлекающего за собой ионы в процессе непрерывного ускорения [7]. Ускорение ионов до высоких энергий связано с более длительным (≈ 2 нс), чем процессы ускорения в катод-анодном промежутке, движением виртуального катода на длину порядка нескольких межэлектродных зазоров между анодной фольгой и виртуальным катодом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан экспериментальный подход и созданы диагностические системы, позволяющие устанавливать: энергию отдельных групп ионов по измерению скорости их движения на известной базе; полную энергию ионного пучка и её угловое распределение по нагреву тонкой мишени попадающим на неё сгустком ионов; температуру анодной плазмы и заряд ускоренных ионов по интенсивности вакуумного ультрафиолетового излучения; усредненную по времени площадь анодной фольги, на которую воздействует электронный пучок.

2. Впервые для наблюдения за плотностью тока РЭП на анодной фольге с высоким временным разрешением и сопоставления его с моментом ускорения конкретного сгустка ионов была разработана оригинальная диагностика с использованием щелевой развертки на основе электронно-оптической камеры К008.

3. Установлено, что в вакууме ($P < 10^{-4}$ торр) за прозрачным для релятивистских электронов анодом высоковольтного диода генератора создаются условия для ускорения ионов всех сортов атомов, составляющих анодную нагрузку. Температура плазмы, образовавшейся из анодной фольги, составляла ~ 2 эВ.

4. В экспериментах на генераторе «Кальмар» (напряжение в импульсе 250 кВ, ток 40 кА, длительность импульса 150 нс) максимальную энергию 6.1 МэВ приобретали самые тяжелые из присутствовавших частиц – ионы алюминия. Протоны набирали максимальную энергию ~ 800 кэВ. Энергия отдельных ионов, идущих в осевом направлении, оказалась больше примерно на 15%, чем энергия ионов в направлении ~ 20° от оси. Значение энергии, переносимое сгустком ионов, доходило до 0.35 Дж, а угловая расходимость пучков составляла 1-2°. Полное количество ускоренных ионов в пересчете на 1 МэВ-ные составило ~ 10^{12} частиц в пуске.

5. В экспериментах на генераторе РЭП «Катран» при напряжении 300 кэВ на уровне токов, доходящих до 125 кА, ионы алюминия ускорялись до энергии 28 МэВ, а протоны набирали максимальную энергию ~ 4 МэВ. Полученные ионы алюминия обладают достаточной энергией для проникновения в сталь на ~ 5 мкм, что позволяет придать ей важные технологические свойства, например, увеличить износостойкость режущего инструмента.

6. Подтверждены полученные ранее другими исследователями [5,6] результаты по ускорению ионов в геометрии высоковольтного диода с тонкой анодной фольгой, связанные с: плазменными условиями, необходимыми для генерации ионов; многочисленностью сгустков ионов, генерируемых за один пуск генератора; продолжительностью ускорения одного сгустка ионов;

угловой расходимостью ионного пучка. Полученные параметры ионов, находящиеся на уровне лучших мировых достижений, говорят о высокой эффективности и стабильности ускорения в экспериментах, проведённых на генераторах «Кальмар» и «Катран» при использовании тонкой фольги в качестве анода.

7. Впервые было установлено, что ускорение ионов в одном эксперименте происходит в двух областях. Ускорение сопровождается осцилляциями тока с частотой ~ 0.5 ГГц и повторяется многократно в течение одного пуска генератора. Одно ускорение происходит от катода к аноду в высоковольтном диоде, а другое – за анодной фольгой в сторону виртуального катода. Эти процессы ассоциируются с разными механизмами ускорения ионов. В катод-анодном зазоре диода генератора происходит пинчевание или разрыв токового канала, что приводит к появлению сильного вихревого электрического поля. Ускорение ионов осуществляется либо в фазе нарастания тока электронов, когда вихревое поле изменяет знак полного поля; либо при движении под действием сильного амбиполярного поля плотного сгустка электронов, образовавшегося на оси в процессе пинчевания и увлекающего за собой ионы. В заанодной области ускорение ионов до высоких энергий связано с движением виртуального катода и определяется дистанцией, на которой происходит ускорение.

Список литературы

1. *Klir D., Jackson S.L., Shishlov A.V., Kokshenev V.A., Rezac K., Beresnyak A.R., Cherdizov R.K., Cikhardt J., Cikhardtova B., Dudkin G.N., Engelbrecht J.T., Fursov F.I., Krasa J., Kravarik J., Kubes P., Kurmaev N.E., Munzar V., Ratakhin N.A., Turek K., Varlachev V.A.* Ion acceleration and neutron production in hybrid gas-puff z-pinches on the GIT-12 and HAWK generators // Matter and Radiation at Extremes. – 2020. – Vol. 5, № 2. – P. 026401.
2. *Victor G., Pipon Y., Moncoffre N., Bérerd N., Esnouf C., Douillard T., Gentils A.* In situ TEM observations of ion irradiation damage in boron carbide // J. Eur. Ceram. Soc. – 2019. – Vol. 39, № 4. – P. 726-734.

3. *Guerra D.B., Müller S., Oliveira M.P., Fichtner P.F.P., Papaléo R.M.* Bi nanowires modified by 400 keV and 1 MeV Au ions // AIP Adv. – 2018. – Vol. 8, № 12. – P. 125103.
4. *Li Z., Chen F.* Ion beam modification of two-dimensional materials: Characterization, properties, and applications // Appl. Phys. Rev. – 2017. – Vol. 4, № 1. – P. 011103.
5. *Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д.* Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом // *УФН.* – 2002. – Т. 172, № 11. – С. 1225-1246.
6. *Быстрицкий В.М., Диденко А.Н.* Коллективное ускорение ионов в прямых релятивистских электронных пучках // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1983. – Т. 14, № 1. – С. 181-226.
7. *Chang C.R., Reiser M.* Computer-simulation studies of electron-beam propagation through plasma into vacuum // J. Appl. Phys. – 1987. – Vol. 61, № 3. – P. 899-906.
8. *Barengol'ts S.A., Mesyats G.A., Perel'shtein É.A.* Model of collective ion acceleration in a vacuum discharge based on the concept of a deep potential well // J. Exp. Theor. Phys. – 2000. – Vol. 91, № 6. – P. 1176-1182.
9. *Putnam S.D.* Model of Energetic Ion Production by Intense Electron Beams // Phys. Rev. Lett. – 1970. – Vol. 25, № 16. – P. 1129-1132.

Рецензированные публикации автора по теме диссертации

1. ***Белозеров О.С.**, Бакшаев Ю.Л., Данько С.А.* Диагностические методики в эксперименте по ускорению ионов в генераторах РЭП // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2018. – Т. 41, № 4. – С. 99-105.
2. ***Белозеров О.С.**, Бакшаев Ю.Л., Данько С.А.* Эксперименты по ускорению ионов в диоде генератора РЭП «Кальмар» // Физика плазмы. – 2019. – Т. 45, № 6. – С. 538-546.
3. ***Белозеров О.С.**, Данько С.А., Ананьев С.С.* Методика наблюдения за динамикой фокусировки электронного пучка в эксперименте по ускорению

ионов на генераторе РЭП // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2020. – Т. 43, № 2. – С. 80-86.

4. ***Белозеров О.С.**, Данько С.А., Хромов С.А.* К механизму ускорения ионов релятивистским электронным пучком // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2021. – Т. 44, № 1. – С. 136-144.

Публикации автора по теме диссертации в материалах конференций:

1. ***Белозеров О.С.**, Бакшаев Ю.Л., Данько С.А.* Диагностические методики и эксперимент по ускорению ионов в генераторе РЭП «Кальмар» // 5-я международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», Москва. – 2019. – С. 23.
2. ***Белозеров О.С.**, Бакшаев Ю.Л., Данько С.А.* Диагностические методики и эксперимент по ускорению ионов в генераторе РЭП «Кальмар» // 46-я международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород. – 2019. – С. 249.
3. ***Белозеров О.С.*** Диагностические методики в эксперименте по ускорению ионов в генераторе РЭП «Катран» // 16-я Курчатовская междисциплинарная молодёжная научная школа, Москва. – 2019. – С. 146.
4. ***Белозеров О.С.**, Бакшаев Ю.Л., Ананьев С.С., Хромов С.А., Данько С.А.* Зависимость эффективности ускорения ионов амбиполярным полем от плотности электронного тока на генераторе РЭП «Катран» // 47-я международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород. – 2020. – С. 207.
5. ***Белозеров О.С.**, Бакшаев Ю.Л., Хромов С.А., Данько С.А.* Механизм ускорения ионов в эксперименте на генераторе РЭП «Катран» // 48-я международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород. – 2021. – С. 190.
6. ***Белозеров О.С.**, Хромов С.А., Данько С.А.* Два механизма ускорения ионов в эксперименте на генераторе РЭП «Катран» // 7-я международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии», Москва. – 2021. – С. 205-207.