

На правах рукописи

СКЛЯРОВ Владислав Фатыхович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ИЗ ПЛАЗМЫ
ПРИ КОЛЛЕКТИВНОЙ РЕЛАКСАЦИИ
ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3**

01.04.08 – физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Бурдаков Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Водопьянов Александр Валентинович – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, заведующий лабораторией.

Шапиро Давид Абрамович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электротехники СО РАН, г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

Защита диссертации состоится « 25 » _____ декабря _____ 2017 г. в « 17:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Российской академии наук.

Автореферат разослан « 18 » _____ октября _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П. А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Исследование генерации электромагнитного излучения из плазмы с сильно-анизотропной функцией распределения электронов является одной из краеугольных задач современной физики плазмы, имеющей важные приложения к построению физических моделей солнечных процессов, а также проблемы управляемого термоядерного синтеза. Наличие сильно-анизотропной функции распределения частиц плазмы относится к случаю существования в плазме отдельного коллектива частиц с большой энергией, что соответствует инжекции пучков частиц (*например, электронов*) в плазму. Так, для задач термоядерного синтеза использование электронных пучков предполагается с целью нагрева плазмы до термоядерных температур. Более того, инжекция электронных пучков в плазму может быть использована для управления некоторыми видами неустойчивостей, в частности, для стабилизации винтовой неустойчивости.

Для задач управляемого термоядерного синтеза, одним из возможных способов нагрева плазмы в открытых ловушках (предложенных в 1952 г. Будкером Г. И. и независимо Постом Р.) предлагается инжекция мощных электронных пучков. Эксперименты по данному направлению проводились с начала 60-х годов в СССР, в США и Японии – с 70-х годов. Также, начиная с 70-х годов, данная задача начала активно разрабатываться в Институте ядерной физики АН СССР (на установках, например, Ц-3, ИНАР, ГОЛ-М, ГОЛ-3). При этом нагрев плазмы происходит из-за раскочки плазменных волн за счёт пучковых неустойчивостей, которые впоследствии передают свою энергию частицам плазмы за счёт бесстолкновительного затухания Ландау. Поскольку при таком процессе в плазме имеется большое число плазменных волн, то возникают условия для генерации электромагнитного излучения. Также во время интенсивного нагрева плазмы наблюдается аномальное увеличение сопротивления плазмы и подавление продольной теплопроводности.

Задача о взаимодействии электронного пучка с плазмой является и одной из основополагающих всей современной радиоастрономии, начавшейся, по-видимому, с первых измерений радиоизлучения Солнца, выполненных Рёбером Г., Сэутвортом Г. К. и Хейемом Дж. С. в начале 1940-х годов. При этом в работе Хейя было отмечено интенсивное излучение, изменяющееся со временем, что было отождествлено с появлением солнечной вспышки в момент наблюдения. По этой причине анализ электромагнитного излучения, выходящего из плазмы, является одним из методов исследования процессов, происходящих в плазме во время интенсивной солнечной активности. Гипотеза, объясняющая солнечные всплески в радиодиапазоне, связанные с солнечными пятнами и другими явлениями, происходящими во время вспышек на Солнце, была впервые

выдвинута Шкловским И. С. (1946 г.) и Мартиным Д. Ф. (1947 г.). В рамках данной гипотезы излучение рассматривалось как следствие плазменных колебаний в короне, возникающих при прохождении через корону потоков быстрых частиц, которые впоследствии вызывают электромагнитное излучение из плазмы. Теория генерации электромагнитного излучения из плазмы за счёт нелинейных волновых процессов была впоследствии разработана Гинзбургом В. Л. и Железняковым В. В. (*в слабых магнитных полях и при достаточно малых амплитудах волн*). Согласно данной теории излучение вблизи плазменной частоты возникает за счёт рассеяния плазменных (*ленгмюровских*) волн на флуктуациях плотности плазмы, возникающих при развитии модуляционной неустойчивости или из-за наличия ионного звука в плазме; генерация излучения на удвоенной плазменной частоте связывается с нелинейным слиянием двух ленгмюровских волн в электромагнитную волну. Последний процесс аналогичен процессу комбинационного (*рамановского*) рассеяния на флуктуациях электронов, которые сами связаны с ленгмюровскими колебаниями плазмы. При наличии сильного внешнего поля и амплитудах плазменных волн (т. н. *развитая плазменная турбулентность*), сравнимых с тепловым движением частиц, что зачастую встречается в природе (и экспериментах), картина взаимодействия плазменных волн сильно усложняется и к настоящему времени законченной теории сильной плазменной турбулентности не существует. Поэтому для установления режима плазменной турбулентности проводится сравнение наблюдений на плазменной и удвоенной плазменной частотах со спектрами излучения, получающимися в результате численного моделирования самосогласованной задачи, см., например, [1].

Наличие электронного пучка в плазме также приводит к генерации интенсивного электромагнитного излучения, что было отмечено в большом количестве экспериментальных работ [2 – 7]. При этом интенсивность и спектр излучения изменялись в зависимости от внешних параметров системы. К сожалению, в данных работах не рассматривались вопросы о поляризации и динамике излучения. Следует отметить, что особенностью соответствующих экспериментов было то, что плазма находилась в слабом магнитном поле ($\omega_H \ll \omega_p$), в связи с чем, влияние магнитного поля на дисперсию волн в плазме считалось несущественным. В то же время для целей управляемого термоядерного синтеза, предполагается удерживать плазму в сильных внешних магнитных полях. Также в астрофизических задачах нельзя пренебрегать влиянием магнитного поля вблизи оснований магнитных арок (для солнечных радиовсплесков III-го типа), а также некоторых областей магнитосферы. Однако, следует отметить, что одним из ключевых отличий астрофизических наблюдений от лабораторных экспериментов является размер электронного пучка по сравнению с размерами плазменного шнура. Несмотря на то, что в экспериментах *длина*

пучка много больше длины плазменных волн, создаваемый пучком градиент плотности значительно выше, чем в астрофизических приложениях. В настоящий момент, к сожалению, нет данных о том, находится ли плазма в корональной арке в сильно-турбулентном режиме или нет. В то время, как пучково-плазменная система в экспериментах, при релаксации мощных электронных пучков, заведомо находится в режиме сильной ленгмюровской турбулентности.

Помимо термоядерных и астрофизических приложений задача о пучково-плазменном взаимодействии также может представлять собой интерес с позиции создания высокоэффективного генератора электромагнитного излучения. Первые работы по данному направлению начались, по-видимому, с конца 50-х – начала 60-х годов в Институте радиоэлектроники АН СССР. В настоящее время т. н. плазменная СВЧ-электроника, основанная на резонансном усилении шумов в плазме, разрабатывается в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН (г. Москва), а также в Институте сильноточной электроники СО РАН (г. Томск). Последовательная теория данных устройств была изложена в [8 – 11].

Исходя из вышеизложенного тематика диссертационной работы, направленной на изучение эмиссии электромагнитных волн при коллективной релаксации электронного пучка в плазме и определения перспективности создания специализированных генераторов электромагнитного излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия представляется актуальной.

Основной целью данной работы является исследование процесса генерации электромагнитного излучения при коллективной релаксации электронных пучков в плазме, удерживаемой во внешнем магнитном поле на установке ГОЛ-3, а также развитие диагностики коллективного взаимодействия электронного пучка с плазмой методами субмиллиметровой радиометрии.

Для достижения данной цели в рамках работы предполагалось решение следующих основных **задач**:

1. Создание комплекса абсолютно калибруемых радиометрических диагностик для регистрации электромагнитного излучения в широком диапазоне частот (от 100 до 500 ГГц). Разработка методик юстировки, калибровки и обработки данных радиометрических диагностик.
2. Проведение экспериментальных исследований процесса генерации электромагнитного излучения в условиях интенсивной релаксации

мощного релятивистского электронного пучка ($\gamma_L \approx 3$) в плотной плазме ($n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$), удерживаемой во внешнем магнитном поле. Получение информации об абсолютной мощности, спектре, поляризации и временной структуре излучения, а также области источника излучения.

3. Проведение экспериментов по регистрации субмиллиметрового излучения при инжекции 100-кэВ электронного пучка в плазму ($n_e \approx 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Получение информации об абсолютной мощности и спектре излучения. Определение зависимости параметров регистрируемого излучения от внешних параметров эксперимента (тока пучка, величины ведущего поля и т. п.). Поиск наиболее оптимальных условий для генерации излучения с целью определения перспективности создания генератора электромагнитного излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия.

Научная новизна. В экспериментах по релаксации релятивистского ($\gamma_L \approx 3$) электронного пучка ($j_e \approx 2 \text{ кА} / \text{см}^2$) в плотной плазме ($n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$), удерживаемой во внешнем магнитном поле ($B \approx 3,2 \div 4,8 \text{ Тл}$) экспериментально установлено наличие эмиссии электромагнитного излучения в диапазоне от 50 до 550 ГГц. Установлено, что источником излучения является область в плазме, занятая электронным пучком; генерация излучения происходит на стадии интенсивного нагрева плазмы, причём чем выше темп нагрева плазмы, тем больше регистрируемая мощность излучения (срыв генерации излучения может наблюдаться ещё во время инжекции электронного пучка). Временная структура излучения представляет собой последовательность кратковременных ($\tau \approx 2 \div 5 \text{ нс}$) всплесков излучения, частота появления которых уменьшается с увеличением диамагнитного давления плазмы.

Теоретическая и практическая значимость. В рамках проведённой работы получена экспериментальная информация о свойствах электромагнитного излучения в диапазоне субмиллиметровых длин волн (от 50 до 550 ГГц), образующегося в следствие релаксации мощного электронного пучка ($\gamma_L \approx 3$, $j_e \approx 2 \text{ кА} / \text{см}^2$) в плазме $n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$, удерживаемой во внешнем магнитном поле ($B \approx 3,2 \div 4,8 \text{ Тл}$), а также в режиме работы со 100-кэВ пучком при инжекции в плазму с плотностью $n_e \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Данные результаты могут быть использованы как для последующих экспериментальных исследований, так и для верификации теоретических моделей в указанных диапазонах параметров эксперимента.

Поскольку в экспериментах по релаксации 100-кэВ пучка в плазме получена высокая степень конверсии энергии электронов пучка в

электромагнитное излучение, то полученные результаты могут быть использованы при создании мощных генераторов электромагнитного излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия.

Также в рамках выполнения диссертационной работы был создан комплекс радиометрических диагностик на квазиоптических элементах (8-канальный полихроматор и двухканальный поляриметр), позволяющий определять параметры электромагнитного излучения в диапазоне от 50 до 550 ГГц; отработаны методики юстировки и калибровки диагностического комплекса.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование процесса генерации электромагнитного излучения при пучково-плазменном взаимодействии проводилось на установке ГОЛ-3, позволяющей изменять параметры эксперимента в широких пределах. Определение внешних параметров эксперимента при этом осуществлялось при помощи всего диагностического комплекса установки ГОЛ-3, частично освещённого в главе 2.

Для непосредственной характеристики электромагнитного излучения, выходящего из плазмы, был создан комплекс радиометрических диагностик на квазиоптических элементах. Данный комплекс подробно описан в главе 3. При этом обработка экспериментальных результатов описана в главе 4.

Использование совокупности экспериментальных данных со всех диагностик позволило проследить закономерности влияния внешних параметров экспериментов на процесс генерации излучения и его свойства.

На защиту выносятся следующие **положения**:

- Создан абсолютно калиброванный комплекс радиометрических диагностик на квазиоптических элементах для регистрации субмиллиметрового электромагнитного излучения в диапазоне от 50 до 550 ГГц в экспериментах по пучково-плазменному взаимодействию на установке ГОЛ-3.
- Интенсивный нагрев микросекундным релятивистским ($\gamma_L \approx 3$) электронным пучком ($j_e \approx 2 \text{ кА} / \text{см}^2$) плотной плазмы ($n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$), удерживаемой в магнитном поле ($B \approx 3,2 \div 4,8 \text{ Тл}$), сопровождается эмиссией электромагнитного излучения в частотных диапазонах в окрестности верхнегибридной плазменной частоты ($125 \div 300 \text{ ГГц}$) и её удвоенного значения ($250 \div 600 \text{ ГГц}$). Наиболее вероятным механизмом генерации в области верхнегибридной частоты является прямая конверсия

плазменной волны на флуктуациях плотности плазмы, а в области удвоенной верхнегибридной частоты – нелинейное слияние двух плазменных волн.

- Установлено, что источником излучения являются локальные области пространства, располагающиеся внутри области плазмы, занятой электронным пучком. Обнаружена и исследована мелкомасштабная (< 10 нс) временная структура эмиссии электромагнитного излучения. Область генерации излучения может быть связана с возникновением в плазме динамических провалов плотности.
- Регистрируемая мощность излучения коррелирует с темпом нагрева плазмы. При этом и интенсивная генерация субмиллиметрового излучения и нагрев плазмы могут прекращаться ещё во время инжекции электронного пучка.
- Удельная спектральная плотность мощности излучения (при $n_e \approx (1 \div 2) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\bar{B} = 4,2 \text{ Тл}$, $\gamma_L = 3$) в области верхнегибридной частоты составляет $\mathcal{P}_{\Omega, \nu, \nu}(\nu_{\text{ВГ}}) \approx 5 \text{ Вт} / (\text{ср} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{ГГц})$ с шириной полосы $\sim 50 \text{ ГГц}$, а в окрестности удвоенной верхнегибридной частоты – $\mathcal{P}_{\Omega, \nu, \nu}(2\nu_{\text{ВГ}}) \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} / (\text{ср} \cdot \text{см}^3 \cdot \text{ГГц})$ с шириной полосы $\sim 100 \text{ ГГц}$.
- При релаксации электронного пучка ($\gamma_L \approx 1,2$) в плазме ($n_e \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$), потери энергии электронного пучка на эмиссию излучения в окрестности верхнегибридной частоты достигают 4 % от полной энергии пучка (при $I \approx 25 \div 30 \text{ А}$, $B \approx 1 \text{ Тл}$) и составляют величину $\sim 0,5 \text{ кВт} / (\text{ср} \cdot \text{см}^3)$.

Личный вклад автора и апробация полученных результатов. Все основные результаты по теме исследования получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в создании диагностического комплекса, планировании, подготовке и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, проведении расчётов, подготовке публикаций. Материалы диссертационной работы опубликованы в 15 публикациях в реферируемых изданиях [13 – 27], а также докладывались на 6 российских и 28 международных научных конференциях, из них более чем на 17 конференциях за последние 5 лет.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, а также одного приложения. Работа выполнена на 151 листе и содержит 75 рисунков и 1 таблицу. Библиографический список включает в себя 247 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведён обзор работ, посвященных основным физическим процессам, протекающим в плазме, которые могут приводить к генерации электромагнитного излучения вблизи плазменной частоты, а также её удвоенного значения. Основное внимание уделено процессам нелинейного взаимодействия плазменных волн с образованием электромагнитной волны. Поскольку в экспериментах генерация излучения происходит из плазмы, удерживаемой в магнитном поле, то необходимо учитывать поправки, связанные с влиянием магнитного поля на дисперсионное уравнение (*уширение спектра излучения и смещение в область более высоких частот*). Также на интерпретацию экспериментальных данных может оказывать существенное влияние распространение излучения через магнитоактивную плазму. При распространении излучения через плазму во многих случаях необходимо учитывать эффекты поглощения излучения, а также, при исследовании поляризационных свойств излучения, поворот поляризации вследствие анизотропии показателя преломления плазмы (*эффект Фарадея*). Поскольку в экспериментах, рассматриваемых в пятой главе, характерная плотность плазмы имеет величину $n_e \approx (10^{14} \div 10^{15}) \text{ см}^{-3}$, магнитное поле – $B \approx (3,2 \div 4,8) \text{ Тл}$, а температура плазмы – $T_e \approx (0,1 \div 2) \text{ кэВ}$, и затухание излучения на частотах выше ленгмюровской в плазме очень мало (длина пробега составляет $\sim 10^2 \div 10^3 \text{ см}$ [12]), то эффектами затухания на масштабах $\sim 10 \text{ см}$ можно пренебречь. С другой стороны, при выполнении определённых резонансных условий может наблюдаться резкое увеличение интенсивности электромагнитного излучения, проходящего через плазму (*мазерное усиление*). В случае мазерного усиления наблюдаемый спектр излучения должен быть достаточно узким, чтобы длина когерентности была сравнима с длиной густка излучения ($\lambda^2 / \Delta\lambda \sim \ell$). Во всех выражениях, присутствующих в тексте диссертации, выбрана система единиц измерений СГС, в то время как для численных величин используется система SI, исключениями являются температура, для которой используется внесистемная единица – электронвольт (эВ).

Во второй главе описывается экспериментальная установка ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН), на которой были проведены эксперименты по генерации электромагнитного излучения из плазмы во время интенсивной релаксации электронных пучков. Также проводится обзор по диагностикам основных параметров плазмы, которые использовались при анализе экспериментальных данных. Плотность плазмы регистрировалась при помощи двух независимых систем: для определения эволюции средней плотности плазмы использовался интерферометр Майкельсона, а для регистрации локального профиля плотности плазмы – томсоновское рассеяние лазерного излучения. Для измерения ухода быстрых электронов пучка на элементы конструкции установки, в нескольких точках по длине установки, измерялся уровень жёсткого рентгеновского излучения. Число

надтепловых электронов плазмы определяется исходя из величины мягкого рентгеновского излучения. Также использовался набор диамагнитных зондов, расположенных вдоль оси установки. Регистрация тока инжектируемого электронного пучка проводилась при помощи пояса Роговского, установленного перед входной катушкой ведущего магнитного поля в основной соленоид, а напряжение в ускоряющем зазоре (энергия электронов) – с помощью резистивного делителя.

В третьей главе описан комплекс радиометрических диагностик, при помощи которого были проведены измерения спектральной плотности мощности излучения в диапазоне частот, включающем в себя ленгмюровскую частоту, верхнегибридную, а также их удвоенные значения. В состав радиометрического комплекса входят 8-канальный полихроматор, позволяющий определить спектр анализируемого излучения в диапазоне частот от 100 до 550 ГГц; двухканальный поляриметр, дающий возможность проследить изменение двух взаимно-ортогональных компонент поляризации излучения; набор одиночных детекторов, позволяющих проводить обзорную (в широком диапазоне частот) регистрацию мощности эмиссии в разных точках по длине установки; а также широкополосный (от 50 ГГц до 3 ТГц) калориметр. В качестве детектирующего элемента во всех диагностиках (за исключением калориметра) используются диоды с барьером Шоттки, с временным разрешением лучше 2 нс. Данные детекторы были произведены НПО «Орион». Для разделения исходного потока излучения на несколько вторичных в полихроматоре и поляриметре используются сеточные поляризаторы. Спектральное разделение каналов регистрации осуществляется, в основном, за счёт установки перед детекторами квазиоптических сеточных фильтров на основе частотно-избирательных поверхностей с изотропной топологией (данные фильтры были разработаны Кузнецовым С. А. в ЛПТМИ НИЧ НГУ и описаны, например, в [17]). Для корректных метрологических измерений электрических сигналов с детекторов используется два набора АЦП: ADC200ME, разработанного группой Батракова А. М. в лаб. 6 ИЯФ СО РАН (с тактом 200 МГц), и ADC12500 – группой Хильченко А. Д. в сек. 9-15 (такт – 500 ГГц). Также в главе описана методика абсолютной калибровки диагностической аппаратуры.

Четвёртая глава посвящена методике обработки экспериментальных данных, которая включает в себя устранение ложных срабатываний детектирующей аппаратуры, а также восстановление распределения спектральной плотности излучения по измерениям в нескольких независимых спектральных диапазонах детекторами с известной аппаратной функцией. Восстановление спектра производится путём решения обратной задачи на поиск ядра системы уравнений Фредгольма I-го рода. Для решения данной задачи искомая функция разлагается по базисным функциям, в качестве которых выступает последовательность из «ступенек» Хёвсайда.

Ключевым отличием от итерационного метода, предложенного Танábой и Хуánгом, состоит в том, что размер «ступенек» Хевисайда не является фиксированным внешним параметром, а определяется исходя из минимизации функционала отклонения численно получаемой функции от экспериментально измеренной величины, таким образом метод становится авторегуляризационным. Для сокращения времени обработки экспериментальных данных также использовался метод восстановления спектра излучения по теореме о среднем. Также приводится сравнение с авторегуляризационным методом при различных параметрах решаемой задачи.

В пятой главе приводится описание экспериментов по наблюдению эмиссии электромагнитного излучения из плазмы во время коллективной релаксации электронного пучка. Отдельно рассматриваются эксперименты по релаксации релятивистского ($\gamma_L \approx 3$) и субрелятивистского ($\gamma_L \approx 1,2$) электронных пучков. В экспериментах с релятивистским пучком, экспериментально было установлено, что эмиссия электромагнитного излучения из плазмы происходит на стадии интенсивного нагрева плазмы. Излучение наблюдалось в частотном диапазоне вблизи верхнегибридной частоты, при этом излучение имеет поляризацию преимущественно вдоль магнитного поля (*степень поляризации излучения* $\Pi = |\mathcal{P}_\perp - \mathcal{P}_\parallel| / |\mathcal{P}_\perp + \mathcal{P}_\parallel| > 0,57$), а также её удвоенного значения (*поляризация преимущественно поперёк магнитного поля*, $\Pi > 0,7$). Наиболее вероятными механизмами генерации излучения являются: для излучения на первой гармонике – рассеяние плазменных волн на флуктуациях плотности плазмы (например, на ионно-звуковых волнах), а для генерации на удвоенной частоте – слияние двух плазменных волн в электромагнитную волну.

При увеличении величины ведущего магнитного поля происходило увеличение мощности эмиссии излучения: $\mathcal{P}(4 \text{ Тл}) / \mathcal{P}(2 \text{ Тл}) \sim 10$. Повидимому, рост мощности связан с увеличением инкремента раскачки волн.

На основании того, что временная структура эмиссии излучения представляет собой последовательность кратковременных всплесков излучения длительностью (2 ÷ 5) нс, происходящих в основном на стадии интенсивного нагрева плазмы, а источником электромагнитного излучения является область, занятая электронным пучком в плазме (при этом, наибольшая мощность излучения наблюдается в месте локального максимума диамагнетизма плазмы, то есть в области наиболее интенсивного взаимодействия пучка с плазмой), выдвигается гипотеза, что излучение в плазме образуется из локальных областей с пониженной плотностью. Во время релаксации электронного пучка одновременно с раскачкой плазменных волн в плазме возникает пространственная модуляция плотности (за счёт модуляционной неустойчивости). Области с изначально пониженной плотностью выступают в роли «потенциальных ям» для накопления

коротковолновых плазменных волн, которые приводят к увеличению электрического поля внутри ямы, и, как следствие, углублению ямы. Поскольку в таком динамическом провале плотности плазмы одновременно существует большое количество плазменных волн, то в данных областях может происходить интенсивная передача энергии от волн частицам плазмы за счёт затухания Ландау – происходит увеличение температуры плазмы. При увеличении температуры плазмы увеличивается и газокINETическое давление плазмы на области с пониженной плотностью. При увеличении газокINETического давления больше некоторого предельного значения динамические провалы плотности не могут долго существовать в плазме (время существования динамического провала меньше, чем время накопления плазменных волн). Соответственно должно происходить прекращение передачи энергии частицам плазмы.

Указанная гипотеза также вписывается в модель подавления продольной электронной теплопроводности. Поскольку в динамических провалах плотности присутствует интенсивное электрическое поле, то для налетающих на такую область частиц плазмы динамический провал представляет собой потенциальный барьер, от которого происходит отражение. Таким образом, наличие данных областей в плазме приводит к эффективному увеличению частоты столкновений частиц.

В экспериментах по инжекции слабoreлятивистского электронного пучка в плазму также наблюдалась интенсивная генерация электромагнитного излучения вблизи первой гармоники верхнегибридной частоты, а также в полосе несколько ниже второй гармоники. Следует отметить, что регистрация излучения проводилась в диапазоне частот от 75 до 450 ГГц, поэтому при магнитных полях ниже 2 Тл было зарегистрировано излучение только вблизи второй гармоники, при увеличении магнитного поля спектр излучения смещался сначала в область более низких частот (при $B = 2,1$ Тл), а затем переходит в область несколько выше верхнегибридной частоты (при $B = 2,5$ Тл). Объяснить такое поведение спектра излучения только на основе процессов рассеяния плазменных волн на флуктуациях плотности и слиянии двух плазменных волн в электромагнитную волну кажется весьма затруднительным.

Поскольку в данных экспериментах полоса генерации излучения является достаточно узкой (менее 10 ГГц), то длина когерентности излучения ($l \gtrsim 5$ см) становится сопоставима (и даже больше) области источника излучения. Если предположить, что раскачка плазменных волн при более высоких значениях магнитного поля происходит при больших углах, то в таком случае также вероятно реализация мазерного усиления излучения в плазме.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты, полученные в рамках данной работы:

- В экспериментах по релаксации релятивистского ($\gamma_L \approx 3$) электронного пучка ($j_e \approx 2 \text{ кА} / \text{см}^2$) в плотной плазме ($n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$), удерживаемой во внешнем магнитном поле ($B \approx 3,2 \div 4,8 \text{ Тл}$) экспериментально установлено наличие эмиссии электромагнитного излучения в диапазоне от 50 до 550 ГГц, обладающего следующими параметрами:
 - В спектре излучения имеется два выделенных локальных максимума: в окрестности верхнегибридной частоты ($\sim 5 \text{ Вт ср}^{-1} \text{ см}^{-3} \text{ ГГц}^{-1}$) и её удвоенного значения ($\sim 5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт ср}^{-1} \text{ см}^{-3} \text{ ГГц}^{-1}$).
 - Источником излучения является область в плазме, занятая электронным пучком; генерация излучения происходит на стадии интенсивного нагрева плазмы, причём чем выше темп нагрева плазмы, тем больше регистрируемая мощность излучения.
 - Временная структура эмиссии излучения представляет собой последовательность кратковременных ($\tau \approx 2 \div 5 \text{ нс}$) всплесков излучения. Если происходит инжекция электронного пучка диаметром $\sim 4,1 \text{ см}$, то количество всплесков излучения уменьшается со временем, в то время как при инжекции пучка диаметром $\sim 1,3 \text{ см}$ количество всплесков в течение генерации излучения из плазмы остаётся практически неизменным.
 - Излучение вблизи верхнегибридной частоты является преимущественно продольно-поляризованным (в момент максимума эмиссии $\Pi \geq 0,5$), в то время, как вблизи удвоенной верхнегибридной частоты – поперечно-поляризованным (в момент максимума эмиссии $\Pi \geq 0,7$). При этом степень поляризации изменяется в течение длительности генерации излучения.

Поскольку регистрируемое излучение вблизи верхнегибридной частоты является преимущественно продольно-поляризованным, то наиболее вероятным механизмом генерации излучения является рассеяние верхнегибридных плазменных волн на флуктуациях плотности плазмы. Излучение вблизи удвоенной верхнегибридной частоты, в таком случае, связывается с нелинейным слиянием двух верхнегибридных волн в электромагнитную волну.

- В экспериментах по релаксации слаборелятивистского ($\gamma_L \approx 1,2$) электронного пучка ($j_e \approx 0,1 \text{ кА} / \text{см}^2$) в плазме ($n_e \approx 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$), удерживаемой во внешнем магнитном поле ($B \approx 0,3 \div 4 \text{ Тл}$) установлено наличие эмиссии электромагнитного излучения вблизи верхнегибридной частоты и её удвоенного значения, обладающего следующими характеристиками:

- При ведущем магнитном поле $B \approx 1$ Тл, наибольшее значение плотности мощности излучения наблюдается при токах $I \approx 25 \div 30$ А и имеет величину $0,5$ кВт ср⁻¹ см⁻³). В данных условиях относительная часть мощности электронного пучка, теряемая на излучение электромагнитных волн, имеет значение $\sim 4\%$. При больших токах происходит резкий спад мощности и при токах $I \approx 150$ А плотность мощности имеет величину $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ кВт ср⁻¹ см⁻³.
- При поле $B \approx 2,3$ Тл зависимость от тока является более равномерной со средним значением плотности мощности $\sim 10^{-1}$ кВт ср⁻¹ см⁻³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Timofeev I. V., Terekhov A. V. Simulations of turbulent plasma heating by powerful electron beams // *Physics of Plasmas*. — 2010. — Vol. 17. — P. 083111.
2. Исследование спектра собственного электромагнитного излучения в системе «плазма-пучок» / Закатов Л. П. [и др.] // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 1971. — Т. 61, 3. — С. 1009-1015.
3. Benford G., Tzach D. Laboratory study of coherent curvature radiation as a pulsar emission mechanism // *Astrophysics and Space Science*. — 1981. — Vol. 80, 2. — P. 307-321.
4. Benford G., Smith D. F. Weak turbulence theory of intense beam microwave experiments // *Physics of Fluids*. — AIP Publishing, 1982. — Vol. 25, 8. — P. 1450-1455.
5. Kato K. G., Benford G., Tzach D. Detailed Spectra of High-Power Broadband Microwave Emission from Intense Electron-Beam-Plasma Interactions // *Physical Review Letters*. — 1983. — Vol. 50, 20. — P. 1587-1590.
6. Microwave radiation by a relativistic electron beam propagation through low-pressure air / Jordan S. [et al.] // *Physics of Fluids*. — 1985. — Vol. 28, 1. — P. 366-371.
7. Waves generated by pulsed electron beams / Neubert T. [et al.] // *Advances in Space Research*. — 1990. — Vol. 10. — P. 137-139.
8. Simpson J. E., Dunn D. A. Cold-Beam-Plasma Interaction Theory for Finite Transverse Dimensions and Finite Magnetic Fields // *Journal of Applied Physics*. — 1966. — Vol. 37. — P. 4201-4207.
9. Кондратенко А. Н., Куклин В. М. Основы плазменной электроники. — М. : Энергоатомиздат, 1988. — 320 с.
10. Богданевич Л. С., Кузелев М. В., Рухадзе А. А. Плазменная СВЧ электроника // *Успехи физических наук*. — 1981. — Т. 133, 1. — С. 3-32.

11. Проблемы теории релятивистской плазменной СВЧ-электроники / Биро М. [и др.] // Успехи физических наук. — 1997. — Т. 167, 10. — С. 1025-1042.
12. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М. : Наука, 1967. — 2-е : 684 с.
13. Subterahertz Emission at Strong REB-Plasma Interaction in Multimirror Trap GOL-3 / Arzhannikov A. V., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2011. — Vol. 59, 1T. — P. 74-77.
14. Experiments with “Thin” Electron Beam at GOL-3 / Postupaev V. V., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2011. — Vol. 59, 1T. — P. 144-149.
15. Инфракрасный интерферометр для исследования субтермоядерной плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3 / Бурмасов В. С., ... , Скляров В. Ф. [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2012. — №2. — С. 120-123.
16. Generation of High Power THz Waves in Relativistic Electron Beam Plasma and Two-Sheet-Beam FEM / Thumm M. K. A., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Terahertz Science and Technology. — 2012. — Vol. 5, 1. — P. 18-39.
17. Диагностический комплекс для исследований генерации субтерагерцового излучения при пучково-плазменном взаимодействии на установке ГОЛ-3 / Аржанников А. В., ... , Скляров В. Ф. [и др.] // Физика плазмы. — 2012. — Т. 38, 6. — С. 496-505.
18. Megagrant Research Project: Laboratory of Advanced Research on Millimeter and Terahertz Radiation at Novosibirsk State University / Thumm M. K. A., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Knowledge Transfer. The new Core Responsibility of Higher Education Institutions Practice and Perspectives in Russia and Germany. (Gabriele Gorzka, Ed.), Series: OST-WEST-DIALOG 13. — Cassel : Cassel University Press GmbH, 2012. — ISBN 978-3-86219-412-4.
19. Generation of High-Power Sub-THz Waves in Magnetized Turbulent Electron Beam Plasmas / Thumm M. K. A., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. — 2014. — Vol. 35, 1. — P. 81-90.
20. Development of Extended Heating Pulse Operation Mode at GOL-3 / Burdakov A. V., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2013. — Vol. 63, 1T. — P. 29-34.
21. Experimental and Theoretical Investigations of High Power Sub-millimeter Wave Emission at Two-Stream Instability of High Current REB / Arzhannikov A. V., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2013. — Vol. 63, 1T. — P. 82-87.
22. Microwave Generation during 100 keV Electron Beam Relaxation in GOL-3 / Burdakov A. V., ... , Sklyarov V. F. [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2013. — Vol. 63, 1T. — P. 286-288.

23. Temporal structure of double plasma frequency emission of thin beam-heated plasma / Postupaev V. V., ..., Sklyarov V. F. [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2013. — Vol. 20, 9. — P. 092304.
24. Observation of spectral composition and polarization of sub-terahertz emission from dense plasma during relativistic electron beam–plasma interaction / Arzhannikov A. V., ..., Sklyarov V. F. [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2014. — Vol. 21, 8. — P. 082106.
25. Generation of high-power sub-THz Waves in magnetized turbulent electron beam plasmas / Thumm M. K. A., ..., Sklyarov V. F. [et al.] // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. — 2014. — Vol. 35, 1. — P. 81-90.
26. Two ways for high-power generation of subterahertz radiation by usage of strong relativistic electron beams / Arzhannikov A. V., ..., Sklyarov V. F. [et al.] // *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*. — 2015. — Vol. 5, 3. — P. 478-485.
27. MM-wave emission by magnetized plasma during sub-relativistic electron beam relaxation / Ivanov I. A., ..., Sklyarov V. F. [et al.] // *Physics of Plasmas*. — 2015. — Vol. 22, 12. — P. 122302.

СКЛЯРОВ Владислав Фатыхович

**Исследование эмиссии субмиллиметровых
электромагнитных волн из плазмы
при коллективной релаксации электронного пучка
в многопробочной ловушке ГОЛ-3**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 10.10.2017 г.

Подписано в печать 11.10.2017 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.0 усл. печ.л., 0.8 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 13

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11