

*На правах рукописи*

**ТИМОФЕЕВ Игорь Валериевич**

**ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ПРИ КОЛЛЕКТИВНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ  
С ПЛАЗМОЙ**

**01.04.08 - физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук**

**НОВОСИБИРСК – 2018**

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

#### НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

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

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОСТЮКОВ Игорь Юрьевич – доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН», г. Нижний Новгород, ведущий научный сотрудник.

КУЗНЕЦОВ Алексей Алексеевич – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, заведующий лабораторией.

ОРЕШКИН Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, главный научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва.

Защита диссертации состоится « 19 » сентября 2018 г. в « 10:00 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « 14 » июня 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук



П. А. Багрянский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Генерация ЭМ излучения в ТГц диапазоне частот (0.3-30 ТГц) и его многочисленные приложения составляют сегодня одну из наиболее динамично развивающихся областей научного знания. В литературе эту часть спектра принято называть ТГц провалом („THz gap“), поскольку ни приборы вакуумной электроники, хорошо зарекомендовавшие себя в СВЧ области, ни лазерные методы генерации излучения, работающие на инфракрасных и оптических частотах, не могут эффективно применяться в этом спектральном диапазоне. Между тем терагерцовая область представляет огромный интерес для различных приложений. В этой части спектра лежат вращательные уровни молекул в газах и колебания кристаллических решёток в твёрдом теле. Если ТГц поля достигают достаточно больших значений ( $> 1$  МВ/см), то открывается возможность нелинейного воздействия на различные колебательные степени свободы в конденсированных средах (спиновые волны, фононы, магноны, экситоны) [1]. Новая физика, связанная с управлением неравновесными процессами в твёрдом теле, инициация поверхностных химических реакций, безопасность, локация и масса других приложений требуют создания мощных источников терагерцового излучения, допускающих возможность перестройки как центральной частоты, так и ширины спектральной линии.

Высокая активность по созданию мощных источников ТГц излучения сегодня наблюдается как в лазерном, так и ускорительном сообществах. Большой прогресс был достигнут недавно в генерации пикосекундных ТГц импульсов, состоящих из аperiодического всплеска электрического поля с амплитудой 1-100 МВ/см. Создание узкополосного источника ТГц излучения с полями такого же масштаба представляет собой гораздо более сложную задачу. Практически безальтернативными источниками мощных ТГц импульсов с перестраиваемой частотой и узкой спектральной линией являются лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Характерная мощность и полная энергия ТГц импульсов на этих ускорительных установках составляет 1 МВт и десятки мкДж. На наш взгляд, наиболее перспективный путь продвижения к гигаваттному уровню мощности ТГц излучения состоит в использовании схем коллективного взаимодействия килоамперных электронных пучков с плазмой. Поскольку плазма может излучать на гармониках плазменной частоты, частота излучения в этих схемах может легко варьироваться за счёт изменения плотности плазмы,

а отсутствие необходимости ускорять электронные пучки до ультрарелятивистских энергий делает генерирующую схему гораздо более компактной, чем ЛСЭ.

Многолетние пучково-плазменные эксперименты на открытой ловушке ГОЛ-3 в ИЯФ СО РАН показали возможность эффективной релаксации мульти-ГВт электронных пучков в плотной плазме за счёт возбуждения в ней высокого уровня турбулентности [2], а эксперименты по инжекции в газ тонкого электронного пучка, поперечные размеры которого сравнимы с длиной волны излучения, позволили обнаружить режим, при котором доля конвертируемой в излучение мощности пучка достигала 1% [3]. Такая необычно высокая для турбулентной плазмы эффективность излучения в комбинации с возможностью использования больших абсолютных значений мощности, присущих килоамперным пучкам, и стала основным стимулом для представленных в этой работе теоретических и численных исследований по поиску наиболее эффективных схем генерации гигаваттных ТГц импульсов.

Таким образом, **цель диссертационной работы** - дать теоретическую интерпретацию явлений, наблюдаемых в лабораторных экспериментах по генерации суб-ТГц излучения в системе плазма-пучок на открытой ловушке ГОЛ-3, и на основе выявленных механизмов предложить новые схемы генерации ТГц излучения гигаваттного уровня мощности. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- определить инкремент неустойчивости релятивистского электронного пучка в замагниченной плазме для произвольных функций распределения частиц в произвольном магнитном поле;
- выявить основные особенности возбуждения плазменной турбулентности килоамперными электронными пучками;
- вычислить мощность генерации суб-ТГц излучения в турбулентном режиме и сравнить полученные результаты с данными лабораторных экспериментов на установках ГОЛ-3 и ГОЛ-ПЭТ;
- предложить новые схемы генерации ЭМ излучения, допускающие прямое участие резонансных с электронным пучком плазменных колебаний в процессах эмиссии ТГц волн;
- исследовать причину высокой эффективности излучения в тонкой пучково-плазменной системе и оценить реализуемость выявленного механизма генерации ТГц волн в схемах с лазерным возбуждением плазменных колебаний.

## **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертационной работе результаты получены автором лично или при его активном участии.

**Научная новизна** работы заключается в том, что

- впервые получены решения дисперсионного уравнения для неустойчивости электронного пучка в замагниченной плазме в рамках наиболее общей линейной теории, основанной на релятивистском кинетическом уравнении Власова (решена задача Клеммоу-Догерти);
- исследовано влияние магнитного поля на процесс передачи энергии между модами, имеющими общие захваченные частицы, на нелинейной стадии пучковой неустойчивости;
- впервые проведён анализ влияния интенсивного релятивистского хвоста надтепловых электронов на инкремент модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны;
- предложена теоретическая модель генерации ЭМ излучения в турбулентной плазме вблизи второй гармоники плазменной частоты, с помощью которой удалось объяснить мощность и характер поляризации излучения, экспериментально наблюдаемого на открытой ловушке ГОЛ-3;
- в механизме плазменной антенны обнаружен новый режим прозрачности, позволяющий сохранять высокую эффективность генерации ЭМ излучения даже в относительно толстой пучково-плазменной системе, поперечные размеры которой превышают длину волны излучения;
- обнаружен эффект усиления ЭМ эмиссии в системе встречных электронных пучков за счёт появления прямого трёхволнового взаимодействия между самыми неустойчивыми пучковыми модами;
- предложен новый метод генерации узкополосного ТГц излучения во встречных кильватерных полях фемтосекундных лазерных импульсов.

## **Научная и практическая значимость работы**

С помощью представленных в работе теоретических и численных исследований сделан существенный шаг в понимании сложных физических процессов, происходящих в турбулентной замагниченной плазме под действием килоамперного электронного пучка. Полученные результаты

не только позволяют объяснить уже обнаруженные в экспериментах на ГОЛ-3 эффекты, но и указывают путь дальнейшего повышения эффективности излучения в этих экспериментах. Одним из наиболее значимых результатов этой работы является предложение новой схемы генерации мощного ТГц излучения в тонкой пучково-плазменной системе за счёт механизма плазменной антенны. Теория и численные PIC расчёты предсказывают, что данный механизм позволяет конвертировать в излучение до 10% мощности инжектируемого электронного пучка. При этом для генерации излучения с частотой 1 ТГц пучок электронов необходимо фокусировать в пятно с диаметром 1-2 мм, что вполне достижимо для мультитераваттных пучков, производимых на линейных индукционных ускорителях в ИЯФ СО РАН. Другой результат, который может иметь большое практическое значение, получен в схеме столкновения двух лазерных импульсов. Обнаруженный нами механизм генерации узкополосного ТГц излучения встречными кильватерными волнами при использовании лазерных систем петаваттного класса способен обеспечить продвижение в ранее недоступную область параметров (1 ГВт, 10 мДж), которая сегодня представляет интерес для фундаментальных исследований, связанных с манипуляцией различными неравновесными состояниями в материи. Экспериментальная проверка этого эффекта запланирована в ИЛФ СО РАН на лазере тераваттного уровня мощности.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Линейный анализ неустойчивости горячего релятивистского электронного пучка в неравновесной замагниченной плазме с интенсивным хвостом надтепловых электронов (решение задачи Клеммоу-Догерти).
- Двумерные эффекты во взаимодействии линейно неустойчивых колебаний системы плазма-пучок через общие захваченные частицы.
- Решение дисперсионного уравнения модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны в сильнонеравновесной плазме с медленно спадающим хвостом надтепловых электронов с учётом релятивистских и кинетических эффектов.
- Теоретическая модель генерации ЭМ волн на удвоенной плазменной частоте в сильнотурбулентной плазме, характерной для экспериментов на открытой ловушке ГОЛ-3.
- Режим прозрачности в механизме пучково-плазменной антенны.
- Эффект усиления генерации излучения на второй гармонике плазменной частоты за счёт прямого трёхволнового взаимодействия са-

мых неустойчивых колебаний, раскачиваемых в плазме встречными электронными пучками.

- Метод генерации узкополосного терагерцового излучения во встречных кильватерных волнах фемтосекундных лазерных импульсов.

### **Апробация работы**

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на научных семинарах ИЯФ СО РАН и ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск, 2012, 2013, 2014, 2016), на Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, 2013, 2015), на 10-ом Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (г. Нижний Новгород, 2016), на 11-ой Международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (г. Новосибирск, 2016). Результаты диссертации опубликованы также в российских и зарубежных научных журналах, список которых приведен в перечне опубликованных автором работ.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация содержит 201 страницу и библиографический список из 172 работ.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается краткий обзор существующих методов генерации терагерцового излучения, обосновывается актуальность исследований и формулируются задачи, решению которых посвящена работа.

Вычисление мощности эмиссии ЭМ волн из плазмы в процессе инжекции в неё электронного пучка представляет собой весьма сложную задачу, решение которой в общем случае напрямую связано с определением сценария возбуждения плазменной турбулентности. Несмотря на обилие этих сценариев, общим местом в предлагаемых ранее моделях слабой и сильной турбулентности было предположение о линейном характере взаимодействия частиц пучка с резонансными волнами, согласно которому мощность их накачки была пропорциональна их энергии и определялась линейным инкрементом пучковой неустойчивости ( $P = 2GW_R$ ). Однако уже в ранних работах по численному моделированию коллективного пучково-плазменного взаимодействия были обнаружены эффекты захвата частиц пучка резонансными волнами, приводящие к нелинейному взаимодействию отдельных неустойчивых мод. Такое взаимодействие

приводило к корреляции их фаз, благодаря чему нарастающие плазменные колебания вместо спектра случайных мод формировали когерентные волновые пакеты. Особенно сильно эти эффекты проявляются для относительно плотных пучков, неустойчивость которых развивается в гидродинамическом режиме. Существенный шаг в понимании роли эффектов захвата в общем сценарии коллективного взаимодействия плазмы с такими пучками был сделан в теоретической работе [4], где на основе предположения о насыщении мощности накачки на уровне, соответствующем порогу захвата, удалось объяснить целый ряд экспериментальных зависимостей на установке ГОЛ-3. Это предположение главным образом означало, что мощность, которую пучок накачивает в резонансные колебания, определяется только нелинейной динамикой пучка в их поле и не зависит от деталей спектра плазменной турбулентности. Первые расчёты непрерывной инжекции релятивистского электронного пучка в плазму методом частиц в ячейках (particle in cell, PIC) при характерных для открытых ловушек параметрах [5] действительно показали регулярную нелинейную динамику пучка в поле возбуждаемых колебаний даже в состоянии развитой турбулентности и доказали существование режима с постоянной мощностью накачки, величина которой не зависит от эволюционирующего во времени турбулентного состояния плазмы.

Поскольку эффекты взаимодействия неустойчивых мод через общие захваченные частицы были обнаружены в одномерных численных расчётах, оставалось неясным, сохраняются ли указанные корреляционные эффекты в общем случае широкого и многомерного спектра плазменных колебаний. Кроме того, характерной особенностью экспериментов с релятивистскими пучками в открытых ловушках является формирование сильнонеравновесного распределения плазменных электронов. В связи с этим отдельного исследования требует вопрос о влиянии медленно спадающего хвоста быстрых электронов как на линейную стадию пучковой неустойчивости, так и на ключевой турбулентный процесс, связанный с развитием модуляционной неустойчивости. Ответам на эти вопросы посвящены первые две главы диссертации.

Содержание **первой главы** составляет линейный анализ неустойчивости электронного пучка в плазме. Информация о величине инкремента и направлении распространения самых неустойчивых колебаний важна не только для оценки мощности, которая может накачиваться пучком в плазменную турбулентность, но и для реализации новых схем эффективной генерации ЭМ излучения. В частности, управляемая раскачка плазменных колебаний под определённым углом к магнитному полю позволяет найти режимы оптимальной линейной конверсии этих колебаний на

градиентах плотности плазмы, а также удовлетворить условию прямого трёхволнового взаимодействия в системе со встречными пучками. В интересующих нас режимах положение самой неустойчивой моды в пространстве волновых чисел определяется борьбой сразу трёх эффектов: релятивистской анизотропии массы пучковых электронов, значительными тепловыми разбросами плазмы и пучка и умеренно сильным магнитным полем. Проблема анализа всего спектра пучковой неустойчивости в замагниченной плазме в рамках наиболее общей линейной теории, основанной на релятивистском кинетическом уравнении Власова, упоминается в литературе как сложнейшая задача Клеммоу-Догерти ("Clemmow-Dougherty's daunting task")[6]. Сложность задачи состоит в том, что в той спектральной области, где поперечное волновое число неустойчивых колебаний уже нельзя считать малым по сравнению с обратным ларморовским радиусом частиц, традиционное выражение для тензора диэлектрической проницаемости, содержащее бесконечные ряды произведений функций Бесселя

$$S(a, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_n^2(z)}{a - n}, \quad (1)$$

становится весьма неудобным даже для численного анализа в силу медленной сходимости этих рядов. Решить задачу Клеммоу-Догерти в наиболее общей постановке для произвольных релятивистских функций распределения плазмы и пучка по импульсам удалось только в данной диссертационной работе, когда вместо медленно сходящихся рядов с бесконечным числом членов было предложено использовать интеграл по периоду вращения частиц во внешнем магнитном поле

$$S(a, z) = \frac{i}{(e^{-2i\pi a} - 1)} \int_0^{2\pi} e^{-ia\varphi} J_0\left(2z \sin \frac{\varphi}{2}\right) d\varphi. \quad (2)$$

Это, в частности, позволило впервые определить влияние интенсивных хвостов надтепловых электронов в плазме, характерных для пучково-плазменных экспериментов в открытых ловушках, на раскачку самых неустойчивых мод. Показано, что в отличие от максвелловской плазмы, в которой нерелятивистские тепловые разбросы плазменных электронов способны стабилизировать только косые неустойчивости релятивистского пучка, появление интенсивного надтеплого хвоста заметно уменьшает инкремент раскачки и самых неустойчивых продольных мод, что ограничивает время эффективного взаимодействия электронов пучка с плазмой.

**Вторая глава** посвящена изучению тех особенностей возбуждения плазменной турбулентности, которые возникают при непрерывной инжекции сильноточных электронных пучков в плазму. Как было установлено в одномерных PIC расчётах [5], основной особенностью турбулентного сценария в этих условиях является переход в режим с постоянной мощностью накачки, при котором уровень насыщения резонансных с пучком мод определяется нелинейной динамикой пучка в их поле и не зависит от плазменных нелинейностей. С помощью двумерного PIC моделирования нелинейной стадии пучковой неустойчивости показано, что нарастание широкого двумерного спектра линейно неустойчивых колебаний не приводит к разрушению корреляционных эффектов, связанных с захватом пучка (рис. 1). Установлено, что обмен энергией между мо-

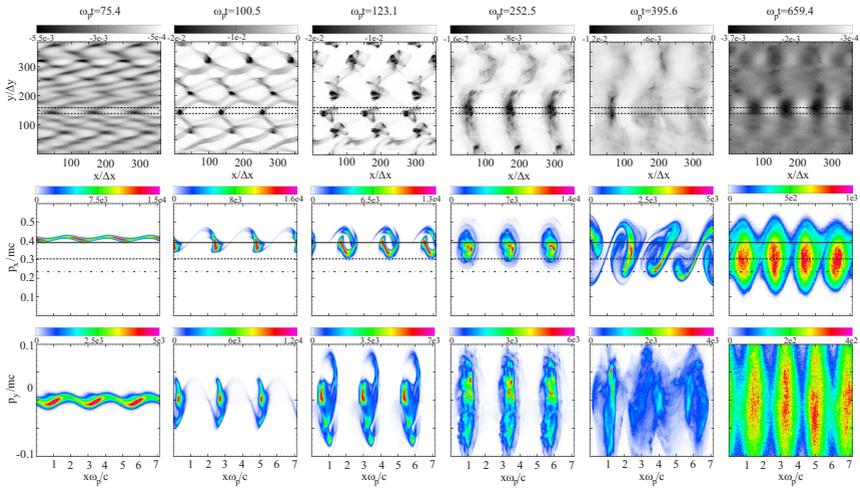


Рис. 1. Эволюция пространственной плотности пучка (верхний ряд) и его фазовых плоскостей  $(x, p_x)$  (средний ряд) и  $(x, p_y)$  (нижний ряд) на нелинейной стадии пучково-плазменного взаимодействия в изотропной плазме при нарастания большого числа мод с близкими значениями инкремента. На карте плотности пучка выделена область, усреднением по которой получены фазовые плоскости  $(x, p_x)$  и  $(x, p_y)$ .

дами, взаимодействующими через общие захваченные частицы, зависит от величины магнитного поля и идет по следующим правилам. (i) Взаимодействие различных мод оказывается более эффективным, если моды имеют одинаковое продольное волновое число, и (ii) энергия в процессе нелинейного взаимодействия между модами передается волнам с мень-

шей фазовой скоростью. Наблюдаемое в расчётах изменение направления перекачки энергии с ростом магнитного поля связано с тем, что в слабом поле неустойчивая пучковая ветвь пересекается с ветвью верхнегибридных колебаний, которые при одинаковом  $k_{\parallel}$  имеют нарастающую с ростом  $k_{\perp}$  фазовую скорость, а в сильном поле — с ветвью вистлеров, фазовая скорость которых падает. Отсутствие более медленных косых колебаний с тем же самым значением  $k_{\parallel}$ , что и у наиболее неустойчивой моды, в первом случае приводит к перекачке энергии в продольные колебания с большими  $k_{\parallel}$  благодаря механизму sideband неустойчивостей. Во втором же случае такие более медленные колебания появляются, что способствует эффективной перекачке энергии в косые вистлеры.

Совокупность экспериментальных данных, полученных на установке ГОЛ-3, а также PIC моделирование сценария установления плазменной турбулентности при характерных для этой установки параметрах [5] говорят о том, что наиболее адекватной для описания этих экспериментов представляется модель сильной турбулентности верхнегибридных колебаний. Большая часть волновой энергии в этой модели предполагается равномерно распределенной в длинноволновой области спектра, размер которой определяется характерным волновым числом модуляционной неустойчивости. Эти незапертые в коллапсирующие каверны колебания способны давать основной вклад в генерацию ЭМ излучения вблизи гармоник плазменной частоты либо за счёт слабонелинейных процессов слияния, либо посредством рассеяния на флуктуациях плотности плазмы. Таким образом, для последующих расчётов мощности ЭМ эмиссии необходимо определить характерные размеры длинноволновой области источника в  $k$ -пространстве и энергосодержание этой части спектра. Оценку энергии турбулентности мы получаем из уравнений баланса мощности между различными участками турбулентного спектра, учитывая эффект насыщения мощности накачки на постоянном уровне за счёт появления пучковых нелинейностей.

Ключевую роль в этих оценках играют инкремент и характерное волновое число модуляционной неустойчивости. Простые аналитические выражения для них были получены только для случая максвелловской плазмы. Чтобы понять, насколько эти выражения применимы к характерной для экспериментов неравновесной плазме с интенсивными хвостами надтепловых электронов, в которой понятие температуры теряет свой прежний смысл, мы исследуем развитие модуляционной неустойчивости на основе дисперсионного уравнения, полученного из релятивистской кинетической теории. Полученные решения показывают, что появление надтеплового хвоста лишь сужает спектр неустойчивости, оставляя неизмен-

ными как максимальный инкремент, так и его положение в пространстве волновых чисел.

**В третьей главе** полученная модель турбулентного спектра используется для вычисления мощности генерации ЭМ волн вблизи первой и второй гармоник плазменной частоты. Эти расчёты обобщают предложенную в работе [7] процедуру на случай произвольного магнитного поля. Мы предполагаем, что длинноволновая область источника равномерно заселена колебаниями верхнегибридной ветви, а основными эмиссионными процессами являются их рассеяние на флуктуациях плотности плазмы и нелинейное слияние с образованием ЭМ волны на суммарной частоте. Несмотря на малую долю волновой энергии, которая содержится в кавернах, её локальная плотность на финальных стадиях коллапса может достигать весьма высоких значений, что приводит к дополнительной генерации коротких всплеск излучения. Характерная длительность этих всплеск, отчётливо наблюдаемых в экспериментах, может служить дополнительным тестом на адекватность выбранной модели турбулент-

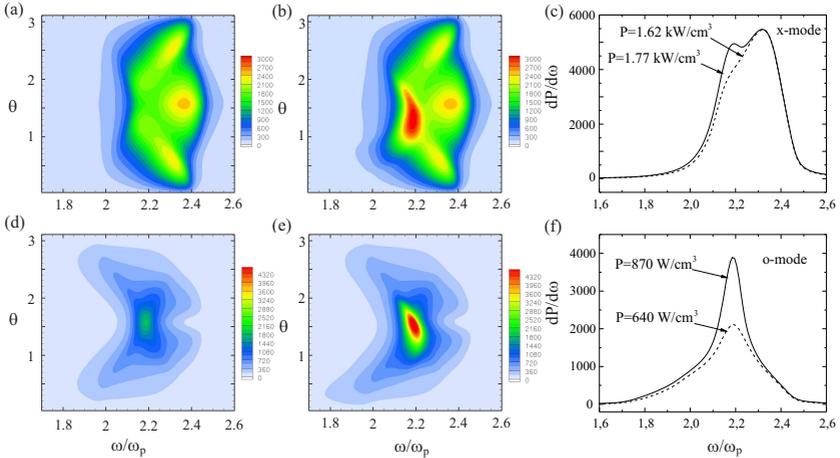


Рис. 2. Полученное в теории угловое распределение мощности ЭМ эмиссии  $dP/d\omega d\theta$  необыкновенной  $x$ -моды вблизи  $2\omega_p$  без учёта резонансных с пучком волн (a) и в их присутствии (b).  $dP/d\omega d\theta$  для обыкновенной  $o$ -моды при изотропном спектре турбулентности (d) и в присутствии анизотропной популяции резонансных колебаний (e). Мощность ЭМ эмиссии  $dP/d\omega$  необыкновенной (c) и обыкновенной (f) волн (изотропный спектр – пунктирная линия, в присутствии резонансных волн – сплошная линия).

ности. Сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными данными, полученными на установке ГОЛ-3, показало согласие не только в уровне мощности излучения в окрестности удвоенной плазменной частоты  $2\omega_p$ , но и в характере его поляризации (рис. 2). При этом длительность наблюдаемых вспышек удалось связать с характерным временем коллапса каверн. Далее предложенная теоретическая модель применяется для оценки максимальной мощности излучения, которую можно достичь в терагерцовом диапазоне частот при использовании сильноточных релятивистских электронных пучков, имеющих на установке ГОЛ-3.

**Четвёртая глава** посвящена исследованию способов повышения эффективности эмиссии ТГц волн из плазмы при её коллективном взаимодействии с электронными пучками. Очевидно, что для усиления относительной роли излучения в общем энергобалансе пучково-плазменной системы, необходимо предотвратить сток энергии из весьма узкой спектральной области, непосредственно накачиваемой пучком, в нерезонансную часть турбулентного спектра. Достичь этой цели можно за счёт создания специальных условий для непосредственного участия самых интенсивных резонансных волн в процессах генерации ЭМ излучения. В плазме, ширина которой значительно превышает длину волны излучения, в качестве таких процессов могут выступать либо линейная конверсия мод на специально ориентированных градиентах плотности плазмы, либо прямое трёхволновое взаимодействие наиболее неустойчивых колебаний в системе встречных пучков. В первом случае мы определяем оптимальную ориентацию градиента плотности плазмы по отношению к ведущему магнитному полю, при которой доминирующая в системе медленная необыкновенная волна при отражении от критической поверхности почти полностью конвертируется в выходящую из плазмы обыкновенную моду. Во втором случае мы находим параметры симметричных пучков и плазмы, при которых косые встречные колебания, нарастающие с максимальным инкрементом, способны удовлетворить условию трёхволнового взаимодействия с ЭМ волной, и проверяем реализуемость эффекта усиления ЭМ эмиссии с помощью двумерных PIC расчётов.

Ещё один режим повышенной генерации ЭМ волн появляется при переходе к малым поперечным размерам системы, сравнимым с длиной возбуждаемых в плазме колебаний. В экспериментах на ГОЛ-3 [3,8] такой режим продемонстрировал высокую эффективность преобразования мощности пучка в мощность излучения (на уровне 1%), а последующие теоретические и численные исследования [9,10,11] позволили выявить специфичный для такой системы механизм генерации ЭМ волн, получивший название механизма плазменной антенны. Было показано,

что в процессе развития модуляционной неустойчивости доминирующей резонансной волны в тонкой плазме нарастает квази-регулярная продольная модуляция плотности ионов, которая приводит к возбуждению сверхсветового сателлита первичной волны, попадающего на плазменной границе в резонанс с вакуумными ЭМ волнами. Генерируемое излучение в этом случае лежит чуть ниже плазменной частоты  $\omega_p$ , поэтому способно эффективно накачиваться плазменными токами только на глубине скин-слоя. В данной работе мы показываем, что при определённых углах эмиссии замагниченная плазма становится прозрачной для такого излучения, а высокая эффективность его генерации (5-10%) может достигаться даже в относительно толстой плазме, поперечные размеры которой превышают длину волны излучения. Наличие эффекта усиления излучения внутри окон прозрачности в условиях непрерывной инжекции электронного пучка в плазму подтверждается PIC расчётами.

Неожиданным результатом работы по поиску эффективных режимов ЭМ эмиссии из плазмы стало обнаружение нового способа генерации ТГц излучения во встречных кильватерных волнах (**глава 5**), который может быть легко реализован путём инжекции в газ встречных лазерных импульсов. Исследования механизма плазменной антенны показали, что при определённых периодах модуляции плотности плазмы лобовое слияние первичной и отражённой волн приводит к генерации излучения вблизи удвоенной плазменной частоты. Поскольку плазма прозрачна для такого излучения, в его генерации может участвовать весь объём плазменного канала. Это снимает ограничения по возможной толщине плазмы, которые возникают для  $\omega_p$ -излучения из-за эффекта плазменной экранировки. Очевидно, что для повышения эффективности этого нелинейного процесса амплитуды встречных взаимодействующих волн должны выбираться как можно более высокими. Плазменные волны большой амплитуды можно, в частности, возбуждать короткими лазерными импульсами. Благодаря тому, что взаимодействие этих регулярных волн может идти в однородной плазме, излучение на второй гармонике плазменной частоты в этой схеме имеет весьма узкую спектральную линию  $\sim 1\%$ . В отличие от механизма плазменной антенны генерация излучения в этом случае становится возможной лишь тогда, когда встречные плазменные волны имеют различные поперечные профили. При равных фазовых скоростях, привязанных к групповой скорости лазеров, и одинаковой поперечной структуре встречных волн сверхсветовые токи, возникающие из-за рассеяния одной волны на возмущениях электронной плотности другой волны, полностью компенсируют друг друга. Именно это обстоятельство не позволило обнаружить данный механизм излучения в работе

[12], где встречные лазерные импульсы имели единый фокус. В этой главе мы предлагаем аналитическую теорию генерации ЭМ волн во встречных кильватерных волнах и находим оптимальные схемы перекрытия кильватерных следов для дифрагирующих лазерных драйверов. Показано, что при использовании петаваттных лазеров предлагаемая генерирующая схема позволяет производить рекордные ГВт, мульти-мДж терагерцовые импульсы с эффективностью  $> 10^{-4}$ . При этом центральная частота этого излучения может легко перестраиваться за счёт синхронного изменения плотности плазмы и длительности лазерного пучка, а шириной его частотного спектра можно управлять путём изменения уровня нелинейности кильватерных волн. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается PIC расчётами (рис. 3).

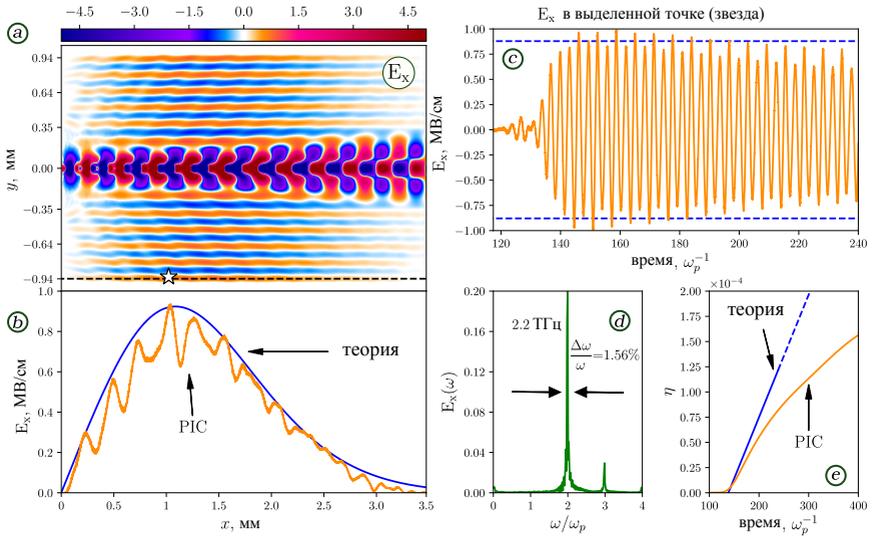


Рис. 3. PIC моделирование схемы со встречными лазерными пучками, амплитуды которых в перьях достигают значений  $a_{1,2} = 0.7$ . Два 500 фс импульса  $\text{CO}_2$  лазера инжектируются слева и справа в однородный слой плазмы с плотностью  $1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . (a) Карта продольного электрического поля  $E_x(x, y)$  в момент  $\omega_p t = 177.5$ . (b) Профиль поля излучения, измеренный вдоль чёрной штриховой линии. (c) Эволюция поля излучения  $E_x$  в точке, помеченной белой звездой (штриховые линии показывают теоретически предсказанную амплитуду). (d) Частотный спектр излучения. (e) Зависимость от времени полной поглощённой в стенках энергии излучения, нормированной на полную энергию лазеров.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Впервые решена задача вычисления инкремента неустойчивости горячего релятивистского электронного пучка в горячей замагниченной плазме в рамках наиболее общей линейной теории, основанной на релятивистском кинетическом уравнении Власова (задача Клеммоу-Догерти). Линейный анализ всего спектра пучковой неустойчивости показал, что стабилизирующее влияние нерелятивистских тепловых разбросов плазменных электронов на доминирующую продольную неустойчивость релятивистского электронного пучка в замагниченной плазме существенно зависит от характера распределения этих электронов по импульсам. Рост электронной температуры плазмы при сохранении максвелловского характера распределения способен стабилизировать только косые неустойчивости, а появление медленно спадающего хвоста  $f \propto p^{-5}$ , характерного для лабораторных экспериментов на открытых ловушках, приводит к ослаблению неустойчивости во всём пространстве волновых чисел.
2. С помощью двумерного электромагнитного PIC кода проведено моделирование нелинейной стадии взаимодействия электронного пучка малой плотности с плазмой. Исследованы особенности формирования когерентных структур в фазовом пространстве пучка в условиях возбуждения широкого спектра колебаний, а также изучено влияние внешнего магнитного поля на сценарий их нелинейной эволюции. В изотропной плазме в условиях доминирования косых неустойчивостей обнаружен нелинейный механизм раскачки филаментационных возмущений, а также идентифицированы механизмы нарастания вторичных „side-band“ неустойчивостей, возникающих в системе после формирования квазистационарной нелинейной БГК волны. Показано, что в слабом магнитном поле поток энергии из первоначально неустойчивых волн идет на возбуждение более коротковолновых преимущественно продольных колебаний верхнегибридной ветви, а в сильном поле на возбуждение вистлеров с косым распространением.
3. Установлено, что формирование в плазме интенсивного хвоста надтепловых электронов приводит к сужению спектра модуляционной

неустойчивости ленгмюровской волны, но не влияет на инкремент и волновое число наиболее неустойчивого возмущения.

4. Предложена теоретическая модель, позволяющая вычислять мощность генерации ЭМ волн в окрестности удвоенной плазменной частоты за счёт процессов слияния верхнегибридных колебаний из длинноволновой области сильнотурбулентного спектра в режиме с постоянной мощностью пучковой накачки. Показано, что эта теория даёт правильные оценки для уровня мощности, ширины частотного спектра, поляризации, а также длительности отдельных вспышек суб-ТГц излучения, наблюдаемого в экспериментах на открытой ловушке ГОЛ-3. В рамках этой же модели удаётся на качественном уровне объяснить наблюдаемый в этих экспериментах эффект изменения направления излучения с увеличением плотности плазмы.
5. Получены оценки максимально достижимой мощности генерации электромагнитного излучения вблизи второй гармоники плазменной частоты в турбулентной системе плазма-пучок. Показано, что плотность мощности терагерцового излучения в экспериментальных условиях установки ГОЛ-3 может достигать величины  $1 \text{ МВт/см}^3$ .
6. Найдены параметры пучково-плазменной системы и соответствующая им ориентация макроскопического градиента плотности плазмы, при которых самые неустойчивые колебания системы удовлетворяют условию полной линейной конверсии в электромагнитную О-моду.
7. Проведено обобщение теории пучково-плазменной антенны на случай произвольного угла эмиссии и предсказана возможность эффективной генерации ЭМ излучения в режиме, когда замагниченная плазма оказывается полностью прозрачной для ЭМ волн на плазменной частоте. PIC моделирование непрерывной инъекции электронного пучка в предварительно модулированный по плотности плазменный канал показало, что наличие окон прозрачности позволяет достигать высокой эффективности генерации ТГц излучения на уровне 5-10% даже в относительно толстой плазме, поперечные размеры которой превышают длину волны излучения. Благодаря возможности работы на малой глубине модуляции, обнаруженный режим представляется привлекательным для создания источника узкополосного ТГц излучения гигаваттного уровня мощности.

8. Обнаружен эффект усиления генерации ЭМ волн в плазме со встречными электронными пучками. Показано, что выполнение условия трёхволнового взаимодействия для самых неустойчивых косых волн позволяет в 5 раз повысить эффективность излучения на удвоенной плазменной частоте по сравнению со случаем, когда в этих взаимодействиях могут участвовать не самые быстрые колебания системы.
9. Обнаружено, что нелинейное взаимодействие встречных кильватерных волн, возбуждаемых в плазме короткими лазерными импульсами, приводит к эффективной генерации электромагнитного излучения на второй гармонике плазменной частоты. С помощью аналитической теории и PIC моделирования показано, что это явление может быть привлекательным для генерации перестраиваемого по частоте (0.4 – 40 THz) терагерцового излучения с узкой шириной спектральной линии ( $\sim 1\%$ ) и высокими значениями электрического поля ( $\sim 10$  MV/cm). Для существующих лазеров петаваттного уровня этот нелинейный процесс открывает путь к генерации ГВт, мульти-мДж импульсов, не доступных для других ныне известных генерирующих схем.

**Основные результаты диссертации опубликованы** в следующих работах:

1. Timofeev I.V. Second harmonic electromagnetic emission of a turbulent magnetized plasma driven by a powerful electron beam // *Physics of Plasmas*, 2012, v. 19, p. 044501.
2. Timofeev I.V. Two-dimensional simulations of nonlinear beam-plasma interaction in isotropic and magnetized plasmas // *Physics of Plasmas*, 2012, v. 19, p. 042108.
3. Arzhannikov A.V. and Timofeev I.V. Generation of powerful terahertz emission in a beam-driven strong plasma turbulence // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2012, v. 54, p. 105004.
4. Timofeev I.V. Modulational instability of a Langmuir wave in plasmas with energetic tails of superthermal electrons // *Physics of Plasmas*, 2013, v. 20, p. 012115.
5. Timofeev I.V. and Annenkov V.V. Exact kinetic theory for the instability of an electron beam in a hot magnetized plasma // *Physics of Plasmas*, 2013, v. 20, p. 092123.

6. Thumm M.K.A., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., Burdakov A.V., Ivanov I.A., Kalinin P.V., Kandaurov I.V., Kurkuchekov V.V., Kuznetsov S.A., Makarov M.A., Mekler K.I., Polosatkin S.V., Popov S.S., Postupaev V.V., Rovenskikh A.F., Sinitsky S.L., Sklyarov V.F., Stepanov V.D., Trunev Yu.A., Timofeev I.V., Vyacheslavov L.N. Generation of High-Power Sub-THz Waves in Magnetized Turbulent Electron Beam Plasmas // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, v. 35, p. 81.
7. Timofeev I.V. and Annenkov V.V. Efficient regime of electromagnetic emission in a plasma with counterstreaming electron beams // Physics of Plasmas, 2014, v. 21, p. 083109.
8. Timofeev I.V., Annenkov V.V. and Arzhannikov A.V. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions // Physics of Plasmas, 2015, v. 22, p. 113109.
9. Timofeev I.V., Volchok E.P., Annenkov V.V. Theory of a beam-driven plasma antenna // Physics of Plasmas, 2016, v. 23, p. 083119.
10. Аржанников А.В., Тимофеев И.В. Интенсивное пучково-плазменное взаимодействие как источник субмиллиметрового излучения // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2016, т.11, с. 78.
11. Timofeev I.V., Berendeev E.A., Dudnikova G.I. Simulations of a beam-driven plasma antenna in the regime of plasma transparency // Physics of Plasmas, 2017, v. 24, p. 093114.
12. Timofeev I.V., Annenkov V.V., Volchok E.P. Generation of high-field narrowband terahertz radiation by counterpropagating plasma wakefields // Physics of Plasmas, 2017, v. 24, p. 103106.

## Список литературы

- [1] Kampfrath T., Tanaka K., Nelson K.A. Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients // Nat. Photonics, 2013, v. 7, p. 680.
- [2] Аржанников А.В., Астрелин В.Т., Бурдаков А.В. и др. Прямое наблюдение аномально низкой продольной электронной теплопроводности во время коллективной релаксации сильнооточного релятивист-

- ского электронного пучка в плазме. // Письма в ЖЭТФ, 2003, т. 7, стр. 426.
- [3] Burdakov A.V., Arzhannikov A.V., Burmasov V.S. et al. Microwave generation during 100 keV electron beam relaxation in GOL-3 // Fusion Science and Technology, 2013, v. 63(1T), p. 286.
- [4] Timofeev I.V. and Lotov K.V. Relaxation of a relativistic electron beam in plasma in the trapping regime // Physics of Plasmas, 2006, V. 13, № 6, P. 062312.
- [5] Timofeev I.V., Terekhov A.V. Simulations of turbulent plasma heating by powerful electron beams // Physics of Plasmas, 2010, v. 17, p. 083111.
- [6] Bret A., Gremillet L. and Dieckmann M.E. Multidimensional electron beam-plasma instabilities in the relativistic regime // Phys. Plasmas, 2010, v. 17, p. 120501.
- [7] Кручина Е.Н., Сагдеев Р.З., Шапиро В.Д. Сильная ленгмюровская турбулентность как источник радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 32, с. 443.
- [8] Ivanov I.A., Arzhannikov A.V., Burdakov A.V. et al. MM-wave emission by magnetized plasma during sub-relativistic electron beam relaxation // Phys. Plasmas, 2015, v. 22, p. 122302.
- [9] Annenkov V.V., Volchok E.P., Timofeev I.V. Generation of high-power electromagnetic radiation by a beam-driven plasma antenna // Plasma Phys. Control. Fusion, 2016, v. 58, p. 045009.
- [10] Annenkov V.V., Timofeev I.V., Volchok E.P. Simulations of electromagnetic emissions produced in a thin plasma by a continuously injected electron beam // Phys. Plasmas, 2016, v. 23, p. 053101.
- [11] Annenkov V.V., Timofeev I.V., Volchok E.P. Particle-in-cell simulations of 100 keV electron beam interaction with a thin magnetized plasma // AIP Conference Proceedings, 2016, v. 1771, p. 070011.
- [12] Горбунов Л.М., Фролов А.А. Об излучении на удвоенной плазменной частоте из области взаимодействия двух коротких лазерных импульсов в разреженной плазме // ЖЭТФ, 2004, т. 125, вып. 3, с. 598.



**ТИМОФЕЕВ Игорь Валериевич**

**Генерация терагерцового излучения  
при коллективных взаимодействиях  
электронных и лазерных пучков с плазмой**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

---

Сдано в набор 26.03.2018 г.

Подписано к печати 27.03.2018 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 1,3 печ.л., 1,1 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 1

---

Обработано на IBM PC и отпечатано  
на ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,  
*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*