

**Физический  
институт  
имени  
П.Н.Лебедева**  
Российской академии наук  
**Ф И А Н**

119991, ГСП-1, Москва,  
Ленинский проспект, 53, ФИАН  
Телефоны: (499) 135 1429  
              (499) 135 4264  
Телефакс: (499) 135 7880  
<http://www.lebedev.ru>  
postmaster@lcbcdcv.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Физический институт им.



П.Н.Лебедева Российской академии наук

Д.Ф-м.н., чл.-корр. РАН Колачевский Н.Н.

25 июля 2018 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Тимофеева Игоря Валерьевича

«Генерация терагерцового излучения при коллективных взаимодействиях электронных и  
лазерных пучков с плазмой»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по  
специальности 01.04.08 «Физика плазмы»

Диссертационная работа Тимофеева И.В. посвящена теоретическому изучению генерации электромагнитного излучения в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот в процессе взаимодействия пучков релятивистских электронов или короткого лазерного импульса с плазмой.

**Актуальность исследований**, представленных в диссертации, определяется, прежде всего, стремительным прогрессом в области терагерцовой физики, связанным в определенной мере и с открытием и исследованием новых мощных плазменных источников излучения в терагерцовой области частот. Такие источники открывают перспективы для исследований и создания новых технологий, относящихся к различным областям, начиная от аппаратуры для медицинской диагностики, новых методов биологических и химических исследований, систем контроля качества, систем "близкой" связи и заканчивая системами безопасности для мониторинга опасных веществ или

сканирования различных объектов в реальном времени. За последние пять-восемь лет число публикаций, относящихся к физике электромагнитных волн в терагерцовой частотной области, увеличилось почти в два раза и превысило 2 тысячи публикуемых статей индексируемых системой SCOPUS в год. Несмотря на бурное развитие этой области исследований и обширный спектр возможных и реализованных применений, в физике терагерцового излучения все еще остается целый ряд нерешенных вопросов, связанных в первую очередь с созданием компактных мощных источников излучения. Именно на решение этих проблем и направлена данная диссертационная работа, ставящая своей целью дать теоретическое описание физической картины и объяснение генерации терагерцового излучения в системе плазма-пучок, наблюдавшейся в экспериментах на открытой ловушке ГОЛ-3, а также предложить новые плазменные схемы эффективных источников гигаваттных ТГц импульсов.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения.

Во **Введении** представлен обзор литературы по различным методам получения ТГц излучения, обоснована актуальность работы, приведены цели и задачи исследования, а также краткое содержание диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассмотрено решение линейной задачи о развитии неустойчивости электронного пучка в плазме во внешнем магнитном поле. За счет оригинального интегрального представления медленно сходящегося ряда функций Бесселя, автору удалось найти точное решение для тензора диэлектрической проницаемости сложной системы пучок-плазма во внешнем магнитном поле для произвольных релятивистских функций распределения плазмы и пучка электронов. Это позволило оценить влияние конечной температуры плазмы с неравновесным распределением (в частности, со степенным хвостом надтепловых электронов) на эффективность развития пучковой неустойчивости и возбуждения турбулентности. Показано, что наличие теплового хвоста горячих электронов приводит к заметному снижению инкремента нарастания наиболее опасной продольной двухпотоковой неустойчивости, что существенно уменьшает эффективность турбулентного нагрева плазмы. В то же время, учет теплового разброса в максвелловской равновесной плазме приводит к стабилизации только косых неустойчивостей. Стоит отметить, что описанные результаты не могут быть получены с помощью гидродинамического подхода, а требуют точного решения кинетического уравнения.

В **главе 2** изучаются особенности спектра плазменной турбулентности, возникающей при непрерывном впрыске мощного электронного пучка в плазму. С

использованием двухмерных численных расчетов, выполненных методом «частица-в-ячейке», проведен детальный анализ развития и насыщения пучковой неустойчивости в замагниченной плазме. Показано, что раскачка двухпотоковой, косой и филаментационной неустойчивостей приводят к разбиению пучка на локализованные в пространстве сгустки и формированию нелинейной квазистационарной волны, которая разрушается вследствие развития модуляционной неустойчивости. Обсуждается, как осуществляется перекачка энергии между различными модами в зависимости от величины магнитного поля. С использованием модели сильной легмюровской турбулентности проведена оценка энергосодержания основной излучающей области турбулентного спектра.

Проведен линейный анализ собственных колебаний немаксвелловской релятивистской плазмы, позволивший оценить вклад надтепловых горячих электронов в частоты и затухание плазменных и ионно-звуковых колебаний. Изучен инкремент нарастания и характерные волновые числа модуляционной неустойчивости плазменной волны, необходимые для определения энергии основной области турбулентного спектра и ее характерного размера в Фурье-пространстве.

В главе 3 на основе полученного спектра турбулентной замагниченной плазмы вычисляется мощность генерации электромагнитного излучения вблизи плазменной частоты и ее второй гармоники. Проведенное сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными на установке ГОЛ-3, позволяет объяснить качественные особенности электромагнитного излучения плазмы вблизи второй гармоники плазменной частоты, приводя к хорошему согласию в уровне мощности излучения и в характере его поляризации. Изучена зависимость спектральных характеристик и мощности излучения от плотности плазмы и установлена область плазменных параметров, позволяющая получать терагерцовое излучение с мощностью в десятки мегаватт в современных лабораторных пучково-плазменных экспериментах.

Режимы возможного повышения электромагнитного излучения, генерируемого в плазме с электронным пучком, являются предметом изучения 4 главы диссертации. Автором проведено исследование влияния градиентов плотности на генерацию электромагнитного излучения и определена оптимальная ориентация градиента плотности по отношению к магнитному полю. Также найдены параметры симметричных встречных электронных пучков и фоновой плазмы, приводящие к увеличению мощности терагерцового излучения. Полученные теоретические результаты подтверждены проведенными двухмерными численными расчетами. Еще один режим увеличения энергии излучения из плазмы с электронным пучком связан с уменьшением поперечных

размеров системы до длины волны возбуждаемых в плазме колебаний. При этом, наиболее эффективное генерация ТГц излучения происходит в случае продольной модуляции плотности, при которой реализуется режим пучково-плазменной антенны. Построенная теоретическая модель и проведенные численные расчеты предсказывают повышение конверсии мощности пучка в мощность излучения до 10%.

**5 глава** диссертации посвящена генерации электромагнитного излучения при столкновении двух кильватерных волн, возбуждаемых встречными короткими лазерными импульсами. Построена простая аналитическая модель, позволяющая рассчитать поле излучения в зависимости от пространственного распределения кильватерных волн. С использованием зависимости амплитуды и структуры кильватерной волны от параметров короткого лазерного импульса проведены оценки мощности, полной энергии и эффективности генерации терагерцового излучения, которая достигает величин  $> 10^4$ . Показана возможность изменения частоты генерируемого излучения в зависимости от плотности плазмы. Теоретические предсказания проверены с помощью двумерных численных расчетов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты вошедших в диссертацию исследований.

**Диссертационная работа** хорошо структурирована, все главы логично связаны друг с другом и соответствуют поставленной цели научной работы.

Наиболее важные **результаты** диссертации заключаются в следующем:

1. Впервые с помощью решения линейного кинетического уравнения рассчитаны значения диэлектрического тензора для системы электронный пучок - замагниченная плазма для произвольных функций распределения пучка и плазмы, с использованием которых проведен анализ линейной стадии пучковой неустойчивости в неравновесной плазме с хвостом надтепловых электронов.
2. На основе численного моделирования и простых теоретических оценок восстановлена физическая картина развития и насыщения пучковой неустойчивости при постоянной инжекции релятивистского электронного пучка в плазму во внешнем магнитном поле. Детально исследовано перераспределение энергии между различными модами возникающего турбулентного спектра и предложена теоретическая модель для описания излучения турбулентной плазмы, позволяющая объяснить экспериментальные результаты по генерации терагерцовых импульсов, полученных на открытой ловушке ГОЛ-3, и оценить максимальную достижимую мощность излучения в подобных экспериментальных условиях.
3. Предсказывается возможность увеличения мощности терагерцового излучения при

инжекции электронного пучка в специально подготовленную плазму с необходимым профилем плотности и при столкновении в плазме двух электронных пучков.

4. Предложена новая плазменная схема генерации узкополосного (с разбросом по частоте порядка 1%) терагерцового излучения встречными кильватерными волнами, возбуждаемыми короткими лазерными импульсами. Показана возможность получения терагерцовых импульсов с энергией в десятки мДж при использовании лазера петаваттной мощности.

Теоретические результаты, представленные в диссертации, являются **новыми**, полностью соответствуют специальности "физика плазмы" и обладают существенной **научной и практической ценностью**. С научной точки зрения безусловным достижением представленной работы, относящимся к одной из фундаментальных вопросов физики плазмы, является проведенный анализ развития пучковой неустойчивости в системе электронной пучок - замагниченная плазма как на линейной (вычисление инкремента нарастания неустойчивости для произвольных функций распределения), так и нелинейной стадиях (детальное исследования эволюции турбулентности с описанием возникающего спектра турбулентности и оценкой характерных волновых чисел), и построенная на основе этого анализа модель генерации излучения, позволившая объяснить экспериментальные результаты. С практической точки зрения автором предложено несколько эффективных схем генерации терагерцового излучения, имеющего широкий спектр применений.

По диссертации могут быть сделаны следующие **замечания**:

1. Одна из основных целей проведенных исследований состоит в предложении эффективных методов получения терагерцового излучения. Автором предложено несколько теоретических схем с использованием как электронных пучков, так и коротких лазерных импульсов. Было бы полезно провести сравнительный анализ изученных методов генерации излучения, с указанием преимуществ и недостатков каждой из предложенных схем, в том числе с обсуждением возможности их использования для практических применений.
2. Из текста диссертации не понятна физическая интерпретация роли ионов в процессе развития нелинейной стадии турбулентности, хотя отношение масс (электрона к иону) появляется в оценке уровня насыщения плотности волновой энергии.
3. Основные расчетные результаты диссертации получены на основе двухмерного моделирования. В связи с этим встает вопрос о возможности использования предсказанных количественных оценок для реальной трехмерной геометрии. Например,

при распространении мощных кратких лазерных пучков в плазме наблюдается их самофокусировка, которая не может быть правильно рассчитана в двухмерной геометрии, и не учитывалась в аналитической модели (глава 5). Кроме того, возможно, геометрические эффекты будут важны и при распространении в плазме электронного пучка.

4. В диссертационной работе не описывается процесс возбуждения кильватерных волн короткими лазерными импульсами (глава 5). Автором без вывода и соответствующих ссылок приводится зависимость амплитуды кильватерной волны от амплитуды лазерного импульса (см. 5.15) и делается утверждение, что линейная теория работает до безразмерной амплитуды поля лазерного импульса  $a_0=0.7$ . Не совсем ясно, как эти утверждения соотносятся с общепринятой теорией лазерного кильватерного ускорения см. обзор E. Esarey, C. B. Schroeder, and W. P. Leeman, Rev. Mod. Phys., Vol. 81, P. 1229 (2009) (ср. 5.51 и формулу (35) из обзора).

5. В модели генерации терагерцового излучения встречными кильватерными полями не оценивается насколько существенно взаимодействие лазерного импульса со встречной кильватерной волной (колеблющимися электронами).

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертационной работы, оценивая которую в целом, следует отметить, что она выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует определяющий личный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем. Полученные Тимофеевым И. В. результаты, относящиеся к теме диссертации, опубликованы в статьях в ведущих мировых рецензируемых журналах, причем часть статей опубликована без соавторов, докладывались на российских и международных конференциях и известны научной общественности. **Достоверность** результатов диссертации и сделанных автором выводов обеспечивается использованием современных методов аналитического и численного анализа, выводом основных моделей, используемых в диссертации, из фундаментальных физических уравнений, проведенным сравнением с экспериментальными данными.

Для использования полученных в работе результатов с материалами диссертации рекомендуется ознакомить следующие организации: Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики (Снежинск), Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (Саров), Институт прикладной физики РАН (Нижний Новгород), Физический факультет МГУ (Москва), Институт общей физики РАН (Москва), Объединенный институт высоких температур РАН (Москва).

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Тимофеева И. В. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики плазмы, позволяющее значительно улучшить понимание физики генерации электромагнитного излучения из плазмы с электронными пучками и использовать предложенные перспективные схемы получения источников терагерцового излучения, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 - физика плазмы.

Результаты диссертационной работы были представлены Тимофеевым И. В. и обсуждались на семинаре Отделения квантовой радиофизики ФИАН.

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Учёного совета Отделения квантовой радиофизики (ОКРФ)

22 июня 2018 г. протокол № 83

Председатель Ученого совета ОКРФ

д.ф.м.н., профессор

/А. А. Ионин/

Ученый секретарь ОКРФ

к.ф.м.н., в.н.с.

/А. Е. Дракин/

Отзыв составлен д. ф.-м. н., Брантовым А.В.

Ведущий научный сотрудник ОКРФ ФИАН,

д.ф.м.н. по специальности 01.04.21-лазерная плазма

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53

тел. (499) 1326906 e-mail: brantov@sci.lebedev.ru

/А. В. Брантов/