

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.016.03
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г. И.
БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК, подведомственного Федеральному агентству научных организаций,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 19.09.2018 № 4

О присуждении **ТИМОФЕЕВУ ИГОРЮ ВАЛЕРИЕВИЧУ** ученой
степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Генерация терагерцового излучения при коллективных
взаимодействиях электронных и лазерных пучков с плазмой» по
специальности **01.04.08 – физика плазмы** принята к защите 24.05.2018 г.,
протокол № 2 диссертационным советом Д 003.016.03 на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им.
Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России,
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11, созданного
приказом Минобрнауки России № 385/нк от 27. 04. 2017 г.

Соискатель, Тимофеев Игорь Валерьевич 1980 года рождения, в 2003 г.
окончил физический факультет Новосибирского государственного университета, в
настоящее время работает старшим научным сотрудником лаборатории 9-0
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук, ФАНО России.

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук «Нелинейная динамика мощного электронного пучка в
процессе развития плазменной турбулентности» защитил в 2010 году в
диссертационном совете, созданном на базе Института ядерной физики им. Г.И.
Будкера СО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории 9-0 Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук, ФАНО России.

Научный консультант – доктор физико-математических наук ЛОТОВ
Константин Владимирович, главный научный сотрудник лаборатории 9-0
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии
наук, ФАНО России.

Официальные оппоненты:

1. **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;

2. КУЗНЕЦОВ Алексей Алексеевич – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт солнечно-земной физики СО РАН**, г. Иркутск, заведующий лабораторией;
3. ОРЕШКИН Владимир Иванович - доктор физико-математических наук, с.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт сильноточной электроники СО РАН**, г. Томск, главный научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук**, г. Москва, в своем **положительном заключении**, подписанном доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Отделения квантовой радиофизики ФИАН Брантовым Андреем Владимировичем, указала, что 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 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.

Соискатель имеет 37 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 12 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 12 работ.

Научные работы соискателя опубликованы в высокорейтинговых англоязычных научных журналах по физике плазмы и терагерцовому излучению “Physics of Plasmas”, “Plasma Physics and Controlled Fusion” и “Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves”, а также включают в себя обзорную статью на русском языке в журнале “Вестник НГУ. Серия: Физика”. Авторский вклад соискателя является определяющим. В 9 из 12 работ Тимофеев И.В. является первым автором, а 3 работы опубликованы без соавторов. Общий объем опубликованных работ составляет более 100 журнальных страниц. Ключевые идеи диссертации изложены 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. 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.

4. 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.
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. 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.
7. Timofeev I.V., Volchok E.P., Annenkov V.V. Theory of a beam-driven plasma antenna // Physics of Plasmas, 2016, v. 23, p. 083119.
8. 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.

На диссертацию поступили отзывы оппонентов, в которых подтверждается актуальность выбранной темы и подчёркивается, что плазменно-пучковое взаимодействие в присутствии внешнего магнитного поля представляет собой очень сложный объект исследования. Даже начальная линейная стадия взаимодействия изобилует многочисленными режимами и особенностями, поэтому исследование ее далеко от завершения. Если же говорить о нелинейной стадии взаимодействия, то строгий анализ ее, стартующий из первых принципов, возможен, видимо, лишь с помощью численных моделей. В этом случае большую роль для понимания происходящих в плазме процессов, а также для интерпретации и предсказания результатов экспериментов играют полуфеноменологические модели. Построение таких моделей представляет собой очень трудоемкое занятие, близкое, в некотором смысле, к искусству, поскольку оно требует анализа многочисленных упрощенных теоретических моделей, экспериментальных данных и результатов численного моделирования, а также обобщения результатов анализа, формулирования адекватных гипотез и положений, лежащих в основе разрабатываемой модели. По мнению оппонентов, в рамках своей диссертационной работы соискателю, проявившему изобретательность и творческий подход, удалось построить несколько таких моделей, добившись при этом неплохого согласия с экспериментом.

Оппоненты отмечают также, что представленные в диссертации результаты являются новыми и представляют собой значительный шаг в развитии теории плазменной турбулентности и пучково-плазменного взаимодействия. Научная и практическая значимость диссертации заключается в создании базы для дальнейших работ по усовершенствованию плазменных генераторов терагерцового излучения; предложены конкретные параметры и схемы таких установок, обеспечивающих максимальную эффективность. Полученные результаты также могут быть использованы в задачах диагностики турбулентной плазмы по ее излучению.

Тщательность проведения теоретических расчетов и численного моделирования, сопоставление их результатов с результатами экспериментов позволяют считать полученные результаты обоснованными и достоверными. Оценивая диссертационную работу, оппоненты отмечают, что она выполнена на

высоком научном уровне и демонстрирует важный вклад соискателя в разработку обсуждаемых проблем. Полученные Тимофеевым И.В. результаты составляют содержание 12 статей в рецензируемых журналах, докладывались на многих российских и международных конференциях, известны научной общественности.

Сформулированы также и некоторые критические замечания:

1. В разделе 2.2 инкремент неустойчивости вычисляется с использованием упрощенного аналитического представления для тензора диэлектрической проницаемости. Однако при этом не используется метод, представленный в главе 1, который позволил бы определить параметры плазменных волн гораздо более точно (и, в частности, оценить применимость гидродинамического приближения).
2. В диссертационной работе для исследования сложных плазменных явлений используется двухмерная численная модель. Представляется, что следует более подробно обсудить применимость моделей низкой размерности к описанию процессов в реальных системах.
3. Результаты для дисперсионных соотношений плазменных колебаний и модуляционной неустойчивости в немаксвелловской плазме получены для конкретного модельного распределения электронов по энергии. Хотелось бы в диссертационной работе увидеть обсуждение, насколько сильно полученные результаты зависят от вида распределения, и, в частности, от показателя степени, описывающего убывание спектра надтепловых электронов.
4. Выводы о высокой эффективности преобразования мощности пучка в мощность излучения в механизме плазменной антенны получены в численных расчётах при весьма специфических условиях, когда электронный пучок инжектируется в плазменный канал с резкими границами и предварительно созданной мелкомасштабной модуляцией плотности. Вызывает вопрос возможность реализации такого канала в лабораторном эксперименте.
5. В главе 5 для генерации терагерцового излучения предложена схема на основе распространяющихся навстречу друг другу мощных лазерных импульсов. Экспериментаторы не очень любят такие схемы, поскольку они чреваты повреждением оптических элементов. Будет ли работать подобная схема, если между прямыми, вдоль которых распространяются импульсы, существует небольшой угол?
6. Численное моделирование столкновения лазерных импульсов в главе 5 даёт представление о генерируемых электромагнитных полях только вблизи источника. Излучением же обычно называют те поля, которые достигли дальней зоны. Нет ли также ошибки в теории, которая вычисляет поток электромагнитной энергии через границу плазмы в непосредственной близости от источника?
7. Несмотря на имеющиеся ссылки на наблюдения и теорию солнечных радиовсплесков метрового диапазона, в диссертации полностью проигнорировано явление, имеющее более близкое отношение к рассматриваемым задачам – субтерагерцовые ($\sim 0.1\text{--}1$ ГГц) всплески в солнечных вспышках (см., например, Fleishman & Kontar, *Astrophysical Journal Letters*, 709, L127, 2010; Krucker et al., *Astronomy & Astrophysics*

Review, 21, 58, 2013). Природа этих всплесков пока не установлена (предложено около десятка различных моделей), но генерация излучения в турбулентной плазме на первой или второй гармониках плазменной частоты рассматривается как возможный механизм. Таким образом, сравнение солнечных наблюдений с результатами лабораторного эксперимента и с развитой в диссертации теорией могло бы быть полезным для всех этих областей исследования.

Однако все оппоненты единогласно отмечают, что высказанные замечания не умаляют достоинств диссертационной работы, не ставят под сомнение полученные в ней результаты и выносимые на защиту положения и не снижают её научную значимость.

На автореферат диссертации поступили также дополнительные отзывы от главного научного сотрудника Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доктора физико-математических наук **Дудниковой Галины Ильиничны** и заведующего лабораторией фотоники Института автоматики и электрометрии СО РАН, доктора физико-математических наук, профессора **Шапиро Давида Абрамовича**. В отзывах даётся положительная оценка диссертационной работы и отмечается, что она является важным шагом в развитии теории пучково-плазменного взаимодействия и методов генерации высокочастотного электромагнитного излучения коллективной природы, а совокупность результатов, полученных на сочетании как высокого уровня аналитических, так и численных методов, относится к разряду научных достижений. Отмечены также незначительные недостатки, затрудняющие чтение автореферата:

1. На Рис. 1 на фазовой плоскости пучка (x, p_x) приведены сплошная, пунктирная и штрихпунктирная линии, но нет указаний чему они соответствуют. На этом же рисунке значения координат оси x выражены в разных единицах.
2. Поскольку результаты численного моделирования получены применительно к условиям лабораторных экспериментов, то такие характерные параметры пучково-плазменной среды как плотность пучка и плазмы, значение магнитного поля, релятивистский параметр желательно было бы привести не только для параметров PIC моделирования схемы со встречными лазерными пучками (Рис. 3).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается известностью их достижений в соответствующей отрасли науки (физика плазмы, пучково-плазменное и лазер-плазменное взаимодействие), их компетентностью, наличием публикаций по теме защищаемой диссертации и способностью определить научную и практическую ценность защищаемой диссертации, а также дать рекомендации по использованию полученных в ней результатов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработан** новый подход к теоретическому описанию плазменной турбулентности, возбуждаемой сильноточным электронным пучком, и дана

непротиворечивая интерпретация физических процессов, ответственных за электромагнитную эмиссию из замагниченной плазмы в пучково-плазменных экспериментах на установке ГОЛ-3,

- **предложены** новые методы генерации перестраиваемого по частоте терагерцового излучения высокой мощности в тонкой пучково-плазменной системе по механизму плазменной антенны, а также в системах со встречными электронными и лазерными пучками за счёт трёхволнового взаимодействия самых неустойчивых пучковых мод и лобового столкновения кильватерных волн,
- **доказана** перспективность обнаруженных механизмов электромагнитной эмиссии для генерации терагерцового излучения гигаваттного уровня мощности и установлены новые закономерности, объясняющие высокую эффективность конверсии мощности пучка в мощность излучения в тонкой пучково-плазменной системе,
- **введен** новый термин “пучково-плазменная антенна” для описания нового механизма электромагнитной эмиссии из тонкой плазмы с продольно модулированной плотностью, сравнимой по размерам с длиной волны излучения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **получен** новый вид диэлектрического тензора пучково-плазменной системы, позволивший существенно упростить численное решение дисперсионного уравнения пучковой неустойчивости для произвольных магнитных полей и произвольных релятивистских распределений частиц (решена задача Клеммоу-Догерти);
- **получено** дисперсионное уравнение модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны в сильнонеравновесной плазме с интенсивным хвостом надтепловых электронов;
- **проведено обобщение** теории генерации электромагнитного излучения вблизи гармоник плазменной частоты в сильнотурбулентной плазме с постоянной пучковой накачкой на случай произвольного магнитного поля;
- **построена** теория пучково-плазменной антенны;
- **построена** аналитическая теория генерации электромагнитного излучения на удвоенной плазменной частоте при лобовом столкновении лазерных кильватерных волн.

Применительно к проблематике диссертации результативно использованы численные модели, основанные на методе частиц в ячейках. С их помощью **изучены** особенности нелинейного взаимодействия неустойчивых пучковых мод через общие захваченные частицы, **обнаружен** эффект увеличения эффективности электромагнитной эмиссии вблизи удвоенной плазменной частоты за счёт трёхволновых взаимодействий самых неустойчивых мод, раскачиваемых встречными электронными пучками, а также подтверждены выводы и **определенны** пределы применимости предлагаемых теоретических моделей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны новые способы генерации узкополосного терагерцового излучения, способные достичь гигаваттного уровня мощности и рекордных значений полной энергии (десятки мДж), и представлены рекомендации по созданию на их основе терагерцовых источников с перестраиваемыми частотой и шириной линии;
- определены условия достижения высокой эффективности конверсии мощности пучка в мощность излучения в тонкой пучково-плазменной системе за счёт механизма плазменной антенны и предложена идея реализации такой схемы на килоамперных электронных пучках с малым эмиттансом, способных сжиматься в миллиметровые размеры.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- теоретические модели выводятся из фундаментальных физических уравнений, их выводы согласуются с экспериментальными данными, подтверждаются результатами численного моделирования методом частиц в ячейках, а в предельных случаях воспроизводят известные результаты;
- использован современный численный PIC код, протестированный на различных физических эффектах;
- идеи и упрощающие гипотезы базируются на данных лабораторных экспериментов и результатах PIC моделирования;

Личный вклад соискателя состоит в формулировании идей и построении упрощённых теоретических моделей, проведении численных расчётов, анализе данных экспериментальных исследований и подготовке публикаций.

На заседании 19.09.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить **Тимофееву Игорю Валериевичу** ученню степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 16, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета Д 003 016 03,
д. ф.-м. н.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003 016 03,
д. ф.-м. н.

20. 09. 2018 г.

/ А. А. Иванов /

П. А. Багрянский /

