

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Савилова Андрея Владимировича

на диссертационную работу

Самцова Дениса Алексеевича

**«Исследование генерации потока терагерцового излучения
мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП
в замагниченном плазменном столбе»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Диссертационная работа Самцова Д.А. посвящена решению проблемы создания мощных источников электромагнитного излучения Г диапазона (110-300 ГГц). Основу диссертации составляют уникальные экспериментальные исследования генерации направленных потоков ТГц излучения при релаксации сильноточного РЭП в плазме, выполненные на установке ГОЛ-ПЭТ в ИЯФ СО РАН. Измерены характеристики излучения, генерируемого при инжекции РЭП с плотностью тока несколько кА/см² в плазму с характерной плотностью $4 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Измерен спектральный состав, зарегистрированы рекордные для данного частотного диапазона энергосодержание и мощность в генерируемых импульсах излучения. Выявлены зависимости эффективности генерации и мощности излучения от распределения плотности плазмы.

Актуальность работы

Благодаря своим уникальным особенностям излучение с длиной волны масштаба менее одного миллиметра представляет большой интерес для множества прикладных и научно-исследовательских задач. Например, в вопросах воздействия на материалы, исследовании быстропротекающих процессов и структуры различных веществ. Продолжающийся рост интереса к данному спектральному диапазону и исторически возникший недостаток мощных источников излучения ТГц диапазона в полной мере обосновывают актуальность выбранного направления исследований.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа Самцова Д.А. состоит из введения, четырёх разделов и заключения. Работа изложена на 129 страницах, содержит 50 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 86 наименований.

Во введении обосновывается актуальность научной проблемы, решаемой в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель и задачи исследования. Обсуждается научная новизна, практическая и теоретическая значимость представляемой работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора.

Первый раздел посвящён подробному описанию экспериментальной установки ГОЛ-ПЭТ и комплексу использованных диагностик. Изложены характерные особенности основных узлов установки, характеристики используемых диагностик, приведено описание алгоритма их работы. Подробно описаны использованные подходы к измерению параметров рабочего электронного пучка и ТГц излучения. Особенно сильное впечатление произвела на меня описанная в данной главе методика измерения спектрального состава выходного СВЧ излучения, работающая в очень широкой полосе суб-терагерцовых частот.

Во втором разделе сформулированы требования к параметрам создаваемой плазмы, при которых возможна эффективная генерация излучения. Приведено детальное описание использованной системы создания плазмы на основе дугового разряда. Описаны исследования плазмы с точки зрения возможности получения требуемых распределений величины плотности. Исследованы условия инжекции и релаксации РЭП с током масштаба 10 кА в плазму. Представлены результаты измерений радиального распределения плотности. Обоснована возможность использования выбранной системы создания плазмы для достижения требуемых распределений плотности плазмы и проведения экспериментов по генерации ТГц излучения.

Третий раздел посвящён исследованию релятивистского электронного пучка. Подробно описана серия экспериментов, в которой проведены измерения углового распределения электронов РЭП по питч-углам. Исследована зависимость среднеквадратичного углового разброса РЭП, инжектируемого в плазму для генерации ТГц, от величины ведущего магнитного поля в диоде. На установке ГОЛ-ПЭТ выполнены оценки длины релаксации РЭП в плазме, используя полученные результаты измерений параметров РЭП и плотности плазмы.

В четвёртом разделе описаны исследования генерации направленного потока ТГц излучения в пучково-плазменной системе. Основное внимание уделено выявлению зависимости мощности излучения от распределения плотности плазмы и определению оптимальных условий генерации

излучения. Автором рассмотрены несколько вариантов распределения плотности плазмы. Для каждого из рассмотренных вариантов распределения плотности плазмы проведены измерения спектральной плотности мощности. Проведено сопоставление полученных результатов измерений спектрального состава, уровня мощности и пространственного распределения мощности в потоке излучения с существующими теоретическими моделями и результатами соответствующих численных расчетов. Для варианта распределения плотности плазмы с устойчивым формированием радиальных градиентов и резким понижением плотности на торце плазмы проведены измерения пространственного распределения мощности и энергосодержания в потоке излучения и представлены результаты этих измерений.

В заключении диссертационной работы представлены основные выводы и результаты исследований.

Автореферат, отвечающий всем требованиям ВАК, достаточно полно отражает содержание диссертационной работы.

Научная новизна

Исследована уникальная схема генерации излучения с частотой 150-300 ГГц на основе пучково-плазменной системы. Экспериментально установлены зависимости мощности и спектрального состава в потоке ТГц излучения от распределения плотности предварительной плазмы по радиусу замагниченного плазменного столба и наличия резкой границы на его торце.

Научная и практическая значимость

Значимость полученных результатов не вызывает сомнений. Подтверждена возможность использования пучково-плазменной системы для генерации мощных направленных потоков ТГц излучения с параметрами, приемлемыми для ряда практических приложений. В экспериментах получены весьма впечатляющие уровни мощности в микросекундном импульсе ТГц излучения. Собранный набор экспериментальных данных и установленных закономерностей эмиссии излучения представляет интерес для проверки и развития теоретических моделей, описывающих генерацию излучения в пучково-плазменной системе.

Обоснованность и достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается обобщением и сопоставлением многочисленных экспериментальных результатов. Для

полученных закономерностей предложено объяснение на основе современных теоретических моделей процессов генерации электромагнитного излучения на плазменной частоте.

Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается апробацией результатов, представленных в качестве докладов на 3-х Международных конференциях и опубликованных в 4-х рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Вопросы и замечания по содержанию диссертации

1. Мне кажется, автору следовало бы как-то осторожнее в выносимом на защиту положении №1 (стр. 14 диссертации) утверждение о рекордности уровня мощности 8 МВт в полосе частот 0,1-0,6 ТГц (там, кстати, ошибочно указаны ГГц вместо ТГц). Если говорить о т.н. W-диапазоне частот (около 100 ГГц), то тут уровень около 10 МВт выглядит хотя и впечатляюще, но не рекордно. Аналогичные или даже более высокие уровни мощности достижимы в некоторых релятивистских черенковских генераторах (см. например, N.Yu. Peskov et al, IEEE Electron Device Letters, 2023, vol. 44, no. 10 p. 1756), а также в релятивистских электронных циклотронных источниках. При этом высокие мощности «сосредоточены» в весьма узкополосных (по частоте) волновых сигналах, а не в широком спектре частот, как это имеет место в диссертации. В терагерцовом частотном диапазоне упомянутый выше уровень пиковой мощности вполне достижим для ЛСЭ (хотя и в коротких импульсах, см. например, работы по развитию терагерцового источника PIZ в DESY).

2. На стр. 21 упоминается «гофрировка» магнитного поля с периодом около 20 см. Правильно ли я понимаю, что тут имеются в виду перепады магнитного поля, необходимые для создания многопробочной плазменной ловушки? Кроме того, наверное, такая «гофрировка» должна была бы привести к возникновению периодической зависимости каких-то параметров плазменного столба от продольной (направленной вдоль столба) координаты. Если это так, то влияет ли как-то такая периодичность на характеристики излучения? В диссертации я не нашел ответов на эти вопросы.

3. В разделе 1.2.2 при обсуждении результатов обработки экспериментальных данных по измерению углового разброса электронов в рабочем пучке следовало бы четко сказать, что упоминаемые тут весьма

«вскользь» три способа обработки результатов – это именно те три способа, которые описаны в предыдущем разделе 1.2.1. Об этом в явном виде сказано только в мелких надписях на рис. 1.13, но не в тексте данного раздела.

4. В разделе 2.2 на некоторых рисунках разным кривым поставлены в соответствие некие разные, совершенно беспорядочные пятизначные номера, которые для «свежего» читателя выглядят весьма загадочно, поскольку сами по себе никакой информации не несут, а в подписях к рисункам об этих номерах ничего не сказано. Так, на рис. 2.5-2.7 фигурируют графики с номерами 12962, 12972 и 12988, и читателю нужно догадаться, что это – номера выстрелов из таблицы 2.3, которая была пару страниц назад. А на рис. 2.11 мы видим уже шесть столь же длинных и беспорядочных номеров, которые описываются только на следующей странице, в таблице 2.4. Понятно, разумеется, что это все – номера из некоего журнала экспериментальных данных автора диссертации, но для читателя диссертации, наверное, следовало бы заменить эти длинные номера на какие-то более удобные обозначения.

5. В разделе 3 после 9 страниц, заполненных описательным текстом и рисунками, вдруг появляются первые формулы. Тут не хватает пояснений и ссылок, объясняющих читателю, откуда эти формулы взялись. Скажем, какой источник формулы (3.1) для инкремента неустойчивости? Это пространственный инкремент или временной? И что дает читателю информация о том, что в экспериментах он составлял 2×10^5 безразмерных единиц? Это – обратные секунды, обратные сантиметры, или это каким-то образом обезразмеренный инкремент?

6. В разделах 3 и 4 упоминается, что рабочая плазма помещена в магнитное поле величиной 4 Тл. С точки зрения электронов это, видимо, ведущее (т.е. направленное в направлении их поступательного движения) поле. Тут следует заметить, что при таком магнитном поле и энергиях электронов рабочего пучка 0,5-1 МэВ частота 100 ГГц, например, соответствует электронному циклотронному излучению гиротронного типа (то есть без доплеровского сдвига) на второй-третьей циклотронных гармониках. Заметим, что для релятивистских электронов излучение и на более высоких гармониках может быть весьма эффективно. Если учесть при этом, что полученных в экспериментах уровни мощности выходного

излучения соответствуют низким (насколько я понимаю - менее 1%) эффективным отбора волной энергии электронов, а частотный спектр излучения весьма широк, то можно ли гарантировать, что хотя бы на каких-то из этих частот излучение электронов имело именно плазменно-пучковый, а не циклотронный характер? В диссертации этот вопрос не прояснен.

7. Вообще, мне лично не хватает присутствия в этой диссертации утверждений следующего типа: «при таком-то ускоряющем напряжении и таком-то токе электронного пучка может быть достигнута такая-то пиковая мощность импульса выходного излучения при таком-то КПД электронно-волнового взаимодействия». Конечно, при некотором навыке читатель и сам мог бы для себя сформулировать предложения такого типа, однако как правило, текст диссертации написан так, что это сделать затруднительно. В качестве примера приведу текст в конце стр. 81, где автор приводит результаты теоретических оценок, говорится, что мощность излучения 30-100 МВт может быть достигнута при энергии частиц 1 МэВ и плотности тока $1,5 \text{ кА/см}^2$. И что может сказать читатель об эффективности процесса генерации излучения, зная не полный ток в пучке, а только его плотность? Я понимаю, что автор имел в виду, наверное, плотность тока с вполне определенного коллектора, однако все же для свежего читателя утверждение такого рода выглядит «физически» незаконченным.

Отмеченные недостатки кажутся вполне естественными для большой оригинальной научной работы и не снижают научной и практической ценности этой работы.

Заключение

Диссертационная работа Самцова Дениса Алексеевича «Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе» представляет собой важное, интересное и профессионально выполненное исследование, соответствующее статусу научно-квалификационного труда. Выводы и заключения по результатам проведённых исследований обоснованы. Диссертационная работа Самцова Д.А. соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной

степени кандидата наук, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Я, Савилов Андрей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Самцова Дениса Алексеевича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Савилов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника, доцент, заведующий лабораторией коротковолновых СВЧ-генераторов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46

Раб. телефон: +7 (831) 416-48-18

E-mail: saviлов@appl.sci-nnov.ru

Савилов Андрей Владимирович

«01» ноября 2023 г.

Подпись Савилова А.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН



И.В. Корюкин