

Минобрнауки России
Федеральное государственное
бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук»
(ИПФ РАН)



УТВЕРЖДАЮ

Врио-директора ИПФ РАН
академик РАН

Р. Г. Денисов

«7» июля 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН) на диссертационную работу

Волчок Евгении Павловны

**«Конверсия плазменных волн в электромагнитные как метод генерации узкополосного
терагерцового излучения»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности по специальности 1.3.9. Физика плазмы в диссертационный совет 24.1.162.02
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной
физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук,

Актуальность работы:

Диссертационная работа Е. П. Волчок посвящена исследованию двух механизмов генерации электромагнитного излучения на плазменной частоте и её второй гармонике или в результате конверсии ленгмюровских колебаний плазмы на модуляции плотности, или как следствие нелинейного взаимодействия встречных плазменных волн. Электромагнитная эмиссия на гармониках плазменной частоты является одним из ключевых источников сведений о процессах, протекающих в лабораторной и космической плазме. Поэтому изучение конверсии плазменных колебаний в электромагнитные волны актуально с точки зрения понимания динамики пучково-плазменного и лазер-плазменного взаимодействия.

Не менее важна прикладная сторона вопроса. Поскольку частота излучения на гармониках плазменной частоты определяется плотностью плазмы, для характерных лабораторных значений плотности она попадает в субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны. Эти диапазоны востребованы во множестве приложений — от неразрушающего контроля и спектроскопии до высокочастотного ускорения и резонансного воздействия на состояние вещества, — однако компактных источников мощного узкополосного ТГц-излучения по-прежнему недостаточно: лазеры на свободных электронах дороги и малодоступны, а нелинейные кристаллы ограничены поглощением и порогом разрушения материала. Плазменные методы лишены ограничения, связанного с разрушением среды, и допускают перестройку частоты по плотности. В этой связи поиск эффективных механизмов генерации ТГц-излучения за счёт конверсии плазменных волн представляется своевременной и практически значимой задачей.

Научная новизна диссертационной работы:

Научная новизна работы определяется рядом впервые описанных физических эффектов, сопровождающих конверсию плазменных волн в излучение. Представлена теория

плазменной антенны для случая лазерного драйвера, описывающая генерацию электромагнитного излучения на первой гармонике плазменной частоты. Показано, что излучение на частоте плазменной отсечки, возбужденное коротким лазерным импульсом в тонком модулированном слое, выходит наружу диффузионным образом и при продолжительной накачке усиливается в ходе самого этого процесса, сохраняя при этом равномерную интенсивность вдоль оптической оси, несмотря на дифракцию драйвера. Построена теория эмиссии вблизи второй гармонике плазменной частоты по антенному механизму, в котором излучение рождается за счёт нелинейного взаимодействия неустойчивой пучковой волны с её длинноволновым сателлитом, возникающим при рассеянии на модуляции плотности. При моделировании столкновения встречных кильватерных волн обнаружено самосогласованное включение второго механизма: пондеромоторная сила взаимодействующих волн сама создаёт модуляцию ионной плотности, добавляя к механизму на встречных волнах механизм плазменной антенны. Наконец, продемонстрировано, что использование широкоапертурных волн с поперечной модуляцией амплитуды снимает энергетический предел схемы на встречных волнах, поскольку эффективность конверсии растёт с поперечным размером волны из-за более слабой дифракции широких импульсов.

Научная и практическая значимость полученных результатов:

Практическая значимость состоит прежде всего в том, что рассмотренные схемы позволяют получать узкополосные ТГц-импульсы с высокой амплитудой поля и допускают перестройку по частоте, а универсальность относительно типа драйвера (лазерный импульс или электронный пучок) делает их основой для перспективного источника терагерцового излучения. Особую ценность имеют рассчитанные автором оптимальные параметры демонстрационного эксперимента, который готовится в Институте лазерной физики СО РАН и может стать первым шагом к созданию такого источника. Кроме того, исследованные механизмы могут быть полезны для интерпретации лабораторных пучково-плазменных экспериментов и солнечной радиоэмиссии, а также для косвенной диагностики профиля плотности плазмы.

Обоснованность и достоверность полученных результатов:

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и обеспечивается несколькими факторами. В работе представлена аналитическая теория, построенная в рамках упрощённого приближения двухжидкостной магнитной гидродинамики, а её предсказания и оценки последовательно проверяются численным моделированием из первых принципов методом частиц в ячейках в двумерной декартовой, цилиндрической и трёхмерной декартовой геометриях. Предсказания теории и результаты моделирования внутренне непротиворечивы, согласуются между собой и не противоречат общепринятым физическим представлениям.

Используемый численный код опирается на известные и многократно проверенные алгоритмы расчёта эволюции частиц, полей и токов и протестирован на базовых задачах с общеизвестными решениями. Результаты диссертации докладывались на 4 международных и 2 российских конференциях, вошли в отчёты по научно-исследовательским проектам в рамках грантов РФФИ, РНФ и фонда «БАЗИС» и опубликованы в 6 научных статьях в международных и российских журналах (журналах из перечня ВАК Минобрнауки России).

Содержание диссертации и её завершенность:

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложена на 142 страницах, содержит 44 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 116 наименований. Во

введении обоснована актуальность темы, дан обзор современного состояния исследований по генерации электромагнитного излучения из плазмы, сформулированы цель и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена генерации излучения на первой гармонике плазменной частоты в модулированной плазме. Теория плазменной антенны обобщается на случай, когда плазменная волна возбуждается коротким дифрагирующим лазерным импульсом. Показано, что распространение кильватерной волны по тонкому слою плазмы с периодической продольной модуляцией плотности приводит к интенсивной электромагнитной эмиссии на частоте ω_p , причём, несмотря на дифракцию драйвера, интенсивность излучения остаётся однородной в направлении вдоль оптической оси на масштабе нескольких длин Рэлея. Установлено, что излучение на частоте отсечки способно диффузионным образом покидать относительно тонкий плазменный слой ($L_x < 20 c/\omega_p$), увеличивая при этом свою амплитуду. Согласно полученным оценкам, излучение обладает узкой спектральной линией (около 5 %) и эффективностью оптико-терагерцового преобразования на уровне 0,3 %. Численное моделирование демонстрирует хорошее согласие с аналитической теорией.

Вторая глава развивает антенный механизм применительно к излучению на второй гармонике плазменной частоты при пучковой накачке. Построена теоретическая модель генерации $2\omega_p$ -излучения при инъекции электронного пучка в замагниченную плазму с периодической продольной неоднородностью плотности. Электромагнитная эмиссия возникает вследствие нелинейного взаимодействия наиболее неустойчивой пучковой моды с её сателлитом, образующимся при рассеянии исходной волны на модуляции плотности. Полученные зависимости мощности излучения от ширины плазменного столба и периода модуляции согласуются с результатами моделирования. Показано, что при оптимальных параметрах эффективность достигает нескольких процентов от мощности пучка, что объясняет высокий уровень эмиссии, зарегистрированный в экспериментах на установке ГОЛ-3, и открывает возможность получения узкополосного ТГц-излучения гигаваттного уровня при использовании мультигигаваттных пучков.

Третья глава посвящена генерации излучения на второй гармонике плазменной частоты встречными плазменными волнами, а также подготовке демонстрационного эксперимента. Механизм излучения основан на рассеянии встречных кильватерных волн с несовпадающими поперечными профилями на возмущениях плотности, создаваемых каждой из волн. С помощью аналитического описания и полномасштабного аксиально-симметричного кинетического моделирования определены оптимальные параметры proof-of-principle эксперимента, готовящегося в Институте лазерной физики СО РАН (тераваттная лазерная система, 830 нм, около 39 фс, суммарная энергия до 0,2 Дж; встречные импульсы 184 и 16 мДж, фокусировка в сверхзвуковую гелиевую струю плотностью $(1,2-1,3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в пятна радиусами 18 и 6,3 мкм, относительная задержка 2–2,5 пс, угол сведения $\sim 5^\circ$). Исследованы влияние динамики подвижных ионов и процессов ионизации, эффекты перекрытия лазерных импульсов, определена оптимальная временная задержка. Кроме того, получено угловое распределение интенсивности излучения в дальней зоне. Ожидаемая частота излучения составляет 28 ТГц при эффективности преобразования около 0.02 %.

Четвёртая глава посвящена нелинейному взаимодействию встречных профилированных плазменных волн большой ширины $\sim 10-30 c/\omega_p$. Переход к такой постановке задачи позволяет масштабировать механизм на встречных волн с отличающимися поперечными профилями на высокоэнергетичные лазерные системы петаваттного класса.

Мелкомасштабная поперечная модуляция плазменной волны с периодом, равным длине излучаемой волны, может создаваться парой интерферирующих лазерных импульсов, распространяющихся под небольшим углом друг к другу. Показано, что в условиях такого резонанса эффективность конверсии растёт с увеличением поперечного размера возбуждаемой волны вследствие более слабой дифракции широких импульсов. Результаты моделирования подтверждают возможность генерации излучения с узкой спектральной линией (около 2%) и эффективностью преобразования порядка 1%, что делает предложенный метод основой для получения узкополосных ТГц-импульсов мощностью в сотни гигаватт и энергией в десятки джоулей.

В заключении обобщены основные результаты работы и сформулированы выводы по обоим исследованным механизмам генерации электромагнитного излучения.

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Личный вклад автора:

Все результаты, на основе которых сформулированы защищаемые положения и выводы диссертации, получены автором лично.

Замечания и пожелания:

Содержание диссертации характеризуется логичностью, внутренней согласованностью и достаточной полнотой изложения, а полученные результаты обладают научной новизной, практической значимостью. Тем не менее, к работе может быть высказан ряд замечаний:

1. В работе рассматривается исключительно случай бесстолкновительной плазмы, при этом границы применимости такого приближения не обсуждаются так же, как не обсуждается возможная роль столкновений.
2. В работе рассматривается высвечивание электромагнитной волны терагерцового диапазона из плазменных слоёв с резкими границами. При этом не обсуждается ни вопрос, насколько приближение резкой границы применимо, ни возможное влияние размытости границ в реалистичной ситуации, ни критерия резкости.
3. В разделе 1.4 обсуждается возможность создания периодической модуляции плотности в плазме путём возбуждения стоячей звуковой волны. Однако в обсуждаемых условиях, вероятно, стоит ожидать близости электронной и ионной температур и, как следствие, сильного затухания ионного звука. Не помешает ли это реализации данной идеи на практике?
4. В работе практически отсутствует сравнение предлагаемых методов генерации терагерцового излучения с другими подходами. В частности, с черенковской генерацией в замагниченной плазме.

Однако отмеченные недостатки не снижают важности и достоверности полученных в диссертации Е. П. Волчок результатов.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Замечаний к автореферату не предъявляется.

Заключение семинара Отделения нелинейной динамики и оптики ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» по диссертации Е. П. Волчок на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук:

Диссертация Евгении Павловны Волчок «Конверсия плазменных волн в электромагнитные как метод генерации узкополосного терагерцового излучения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9.

Физика плазмы является завершённой научно-квалификационной работой, в которой теоретически и численно исследуются два механизма конверсии плазменных волн в терагерцовое излучение и найдены режимы их эффективной генерации, востребованные для создания компактного перестраиваемого источника мощного ТГц-излучения.

Диссертационная работа Е. П. Волчок «Конверсия плазменных волн в электромагнитные как метод генерации узкополосного терагерцового излучения» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Отзыв составил:

Коржиманов Артем Владимирович

Заместитель заведующего отделом по научной работе ИПФ РАН

Кандидат физико-математических наук

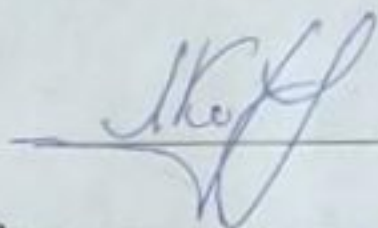
Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,

адрес: 603951, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

тел: +7 (831) 436-62-02

эл. почта: artem.korzhimanov@ipfran.ru

«7» июля 2026 г.



А. В. Коржиманов

Материал диссертации Е. П. Волчок «Конверсия плазменных волн в электромагнитные как метод генерации узкополосного терагерцового излучения» рассмотрен на семинаре Отделения нелинейной динамики и оптики ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» 11 июня 2026 г.

Руководитель отделения НДиО

Стародубцев Михаил Викторович

Доктор физико-математических наук

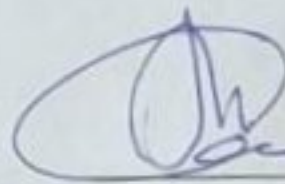
Специальность 01.04.08 «Физика плазмы»,

адрес: 603951, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

тел: +7 (831) 436-57-36

эл. почта: mstar@ipfran.ru

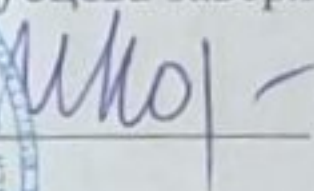
«7» июля 2026 г.



М. В. Стародубцев

Подпись А. В. Коржиманова и М. В. Стародубцева заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН



И. В. Корюкин