

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Андреева Александра Алексеевича на диссертацию Метельского Игоря Игоревича «Релятивистски-нелинейное резонансное поглощение и генерация высших гармоник интенсивного лазерного излучения в неоднородной плазме», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Диссертационная работа Метельского И. И. посвящена построению аналитических теорий релятивистски-нелинейного резонансного поглощения (РП) и генерации высших гармоник (ГВГ) интенсивного лазерного излучения при релятивистском плазменном резонансе в неоднородной плазме. Современные эксперименты по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) с прямым облучением и дополнительным поджигом, отвечают большим масштабам неоднородности плазмы и требуют суб-релятивистских лазерных интенсивностей. При таких условиях в окрестности критической плотности плазмы возможно проявление сильных нелинейных эффектов, поэтому возникает необходимость значительного усовершенствования теории поглощения интенсивного лазерного излучения в этой области плазмы, где имеет место явление релятивистски-нелинейного плазменного резонанса. Такой сильный нелинейный резонанс оказывает значительное влияние на процесс поглощения, а значит задача построения теории РП в условиях релятивистского плазменного резонанса является весьма актуальной. Процесс образование быстрых электронов при РП заслуживает внимания как нежелательный эффект в контексте ЛТС, поскольку обеспечивает предварительный прогрев мишени, препятствующий ее оптимальному сжатию, а значит и дальнейшей инициации термоядерной реакции. Поэтому исследование возбуждаемого в окрестности критической плотности плазмы квазистатического электрического поля, представляет практический интерес и может служить основой для теоретической интерпретации наблюдаемой генерации быстрых электронов. Генерация гармоник (ГГ) лазерного излучения – еще один важный процесс, развивающийся в условиях плазменного резонанса, привлекает интерес исследователей с точки зрения диагностики параметров короны лазерной плазмы по спектральному составу вторичного излучения. Однако вопрос о влиянии на ГГ релятивистских эффектов динамики электронной компоненты плазмы, при условии эффективного резонансного поглощения, остался не вполне выясненным. В диссертационной работе поставлена и решена задача построения нелинейной теории генерации гармоник при релятивистском плазменном резонансе, что имеет практический интерес для ЛТС экспериментов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 148 страниц, включая 36 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 152 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность исследований, дается обзор литературы, сформулированы цели диссертационной работы, положения, выносимые на защиту и научная новизна. Приведены информация об апробации работы, списки публикаций и докладов на конференциях по теме диссертации.

Первая глава посвящена общей постановке задачи о релятивистском плазменном резонансе в неоднородной плазме, формулировке и аналитическому решению нелинейных уравнений в частных производных первого порядка, связывающих электрическое поле и скорость электронов в окрестности критической плотности плазмы в условиях сильной релятивистской нелинейности продольного движения электронов. При построении решения используется оригинальный метод ренормгрупповых симметрий, позволяющий находить аналитические решения дифференциальных уравнений в условиях сильной нелинейности вне рамок теории возмущений. Обсуждаются основные допущения, лежащие в основе предложенной математической модели, и условия её применимости.

Во **второй главе** подробно исследуются резонансно-усиленные релятивистские плазменные колебания, которые описываются полученными в первой главе решениями уравнений на электрическое поле и скорость электронов вблизи критической плотности. Проанализировано условие опрокидывания сильно нелинейных стационарных плазменных колебаний, выявлены роли релятивистской и нерелятивистской нелинейностей в определении границ применимости гидродинамической модели стационарного плазменного резонанса. Здесь же показано формальное существование нестационарных нелинейных колебаний. Для стационарного режима плазменного резонанса изучены пространственно-временные и спектральные свойства резонансно-усиленного электрического поля, спектр которого обогащается высшими гармониками за счет фазовой модуляции релятивистских плазменных колебаний вблизи критической плотности. Продемонстрировано увеличение ширины нелинейного плазменного резонанса в условиях сильной нелинейности.

В **третьей главе** развита аналитическая теория релятивистски-нелинейного резонансного поглощения. При больших и малых углах падения лазерного излучения на плазму найдены выражения для коэффициента нелинейного резонансного поглощения, а также для амплитуды магнитного поля в точке плазменного резонанса с учетом релятивистской нелинейности плазменных колебаний. Продемонстрирован эффект насыщения резонансной амплитуды и вытекающее из него подавление нелинейного резонансного поглощения, т. е. уменьшение коэффициента поглощения с ростом плотности потока лазерного излучения. Доказано, что эти эффекты имеют место исключительно при учете релятивистской нелинейности движения электронов. На языке управляющих физических параметров лазерно-плазменной системы подробно исследована область применимости гидродинамической модели. В заключительной части третьей главы выдвигается предположение о смещении максимума кривой нелинейного резонансного поглощения в область меньших углов падения лазерного излучения на плазму с ростом интенсивности поля лазерной накачки.

В **четвертой главе** построена аналитическая теория генерации высших гармоник при релятивистском плазменном резонансе. В случае не малых углов падения лазерного излучения на плазму найден коэффициент преобразования в гармонику с номером $n \geq 2$. Исследовано влияние сильной, в том числе релятивистской нелинейности на структуру спектров вторичного излучения из плазмы. Показано, что вблизи границы опрокидывания резонансных плазменных колебаний возможно формирование спектров, в которых интенсивности гармоник с ростом их номера спадают по степенному закону.

Проведено сравнение с результатами нелинейной нерелятивистской теории генерации гармоник, а также с результатами, полученными в рамках теории возмущений.

В **заключении** приведены выводы и основные результаты работы.

Защищаемые положения, выводы и рекомендации являются обоснованными. Основные результаты исследований имеют высокую степень новизны. Так была впервые

разработана последовательная аналитическая теория релятивистского плазменного резонанса в неоднородной плазме с использованием метода ренормгрупповых симметрий. Впервые построена самосогласованная теория релятивистски-нелинейного резонансного поглощения, учитывающая перенормировку нелинейной амплитуды резонансного поля, а также построена аналитическая теория генерации высших гармоник с учетом релятивистской нелинейности в окрестности критической плотности неоднородной плазмы.

Результаты работы являются достоверными. Для теоретических моделей обозначены диапазоны их применимости, а также произведена проверка выполнения данных условий.

Выводы построенной в диссертации теории генерации высших гармоник подтверждаются экспериментами по генерации гармоник CO_2 лазерного излучения. Получено хорошее согласие рассчитанных спектров высших гармоник с экспериментально обнаруженными. Также достоверность результатов подтверждается их качественным согласием с теоретическими результатами, полученными другими авторами. Результаты работы были представлены на многочисленных всероссийских и международных конференциях, также опубликованы в 7 статьях в рецензируемых научных журналах индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Тем не менее по рецензируемой работе имеются следующие замечания:

1. Недостаточно полно рассмотрен вопрос о возможности использования гидродинамической модели плазмы без учета кинетических эффектов, в частности «поглощения Брюнеля».
2. Поскольку одним из примеров обсуждаемых в диссертации характерной энергии быстрых электронов является относительно небольшая величина (30 кэВ) следовало бы более отчетливо обосновать необходимость использования релятивистской модели.
3. Несомненный интерес представляло бы сравнение результатов разработанной теории с численным моделированием с помощью кинетического (PIC) кода какой либо задачи.
4. Следовало бы указать условия применимости используемой длительности лазерного импульса с учетом динамики формирования плазменного резонанса

Сделанные замечания не являются принципиальными, не снижают научной значимости результатов представленных в диссертации и не сказываются на общей положительной оценке работы.

Автореферат достоверно отражает структуру и содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа «Релятивистски-нелинейное резонансное поглощение и генерация высших гармоник интенсивного лазерного излучения в неоднородной плазме»

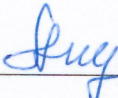
подтверждает научную квалификацию Метельского И. И. и полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, Метельский Игорь Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

профессор кафедры общей физики, физического факультета

Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ)

 Андреев Александр Алексеевич


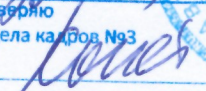
«30» мая 2022 г.

Почтовый адрес: 199034 Санкт Петербург, Университетская наб. 7-9, физ.-фак., СПбГУ

Телефон: +7 9110365203

E-mail: alexanderandreev72@yahoo.com

Подпись доктора физико-математических наук,
профессора Андреева Александра Алексеевича
заверяю

Личную подпись

заверяю
И.О. начальника отдела кадров №3
И.И. Константинова

21.06.2022



Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.htm>

Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей

Список основных публикаций А. А. Андреева по теме защищаемой диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет:

1. S.Mishra, A.Andreev, M.Kalashnikov "Contrast enhancement of few cycle laser pulses with reflections from overdense plasma" Vol. 25, No. 10 | 15 May 2017 | OPTICS EXPRESS 11637
2. Z.Lecz, A.Andreev "Enhancement of high harmonic generation by multiple reflection of ultrashort pulses" JOSA B **35**, pp. A49-A55 (2018)
3. M. Cerchez, M. Swantusch, M. Toncian, X. M. Zhu, R. Prasad, T. Toncian, Ch. Rodel, O. Jackel, G. G. Paulus, A. A. Andreev, and O. Willi "Enhanced energy absorption of high intensity laser pulses by targets of modulated surface" Appl. Phys. Lett., **112**, 221103 (2018)
4. A.A. Andreev et al. "Controlling energy distribution of fast ions and X-ray emission via target reliefs in ultrafast and relativistic laser plasma interaction" Phys. of Plasmas **26**, 113110, (2019)
5. G. G. Scott, G. F. H. Indorf, M. A. Ennen, P. Forestier-Colleoni, S. J. Hawkes, L. Scaife, M. Sedov, D. R. Symes, C. Thornton, F. Beg, T. Ma, P. McKenna, A. A. Andreev, U. Teubner, and D. Neely "Kinematics of femtosecond laser-generated plasma expansion: Determination of sub-micron density gradient and collisionality evolution of over-critical laser plasmas" Phys. of Plasmas **28**, 093109 (2021)