

**Минобрнауки России**

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**им. Г.И. Будкера**

Сибирского отделения Российской академии наук  
**(ИЯФ СО РАН)**

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: [inp@inp.nsk.su](mailto:inp@inp.nsk.su)

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Института ядерной физики им.

Г.И. Будкера СО РАН

Академик РАН

Логачев Павел Владимирович



» июня 2022 года

от 02.06.2022 № 15311 – 45/6214.1-1168

на \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**ОТЗЫВ**

ведущей организации

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 теоретическому изучению процессов резонансного поглощения, а также генерации высших гармоник лазерного излучения при его взаимодействии с неоднородной плазмой в режиме, когда электрическое поле плазменных колебаний вблизи критической поверхности становится релятивистски сильным.

**Актуальность исследования** обусловлена тем, что в современных концепциях лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) уже давно ведутся эксперименты с интенсивными лазерными полями, способными резонансно усиливать плазменные колебания до столь высоких амплитуд, что динамика электронов в них оказывается релятивистской. При этом существующие попытки теоретического описания сильно нелинейных режимов зачастую дают противоречивые выводы относительно поведения коэффициента резонансного поглощения с изменением угла и интенсивности падающего излучения. Современные же методы численного моделирования, включающие в себя метод частиц в ячейках, являются

настолько ресурсозатратными, что пока не позволяют установить всеобъемлющую картину явления и предсказать зависимости эффективности поглощения от различных управляющих параметров лазер-плазменной системы. Таким образом, задачу построения аналитической теории резонансного поглощения интенсивного лазерного излучения в плазме с учётом релятивистской нелинейности в динамике электронов следует признать весьма своевременной и актуальной.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 148 страницах, содержит 36 рисунков и 3 таблицы и ссылается на 152 библиографических источника.

Во введении обоснована актуальность исследования, проведён обширный обзор литературы, посвящённой тематикам резонансного поглощения, генерации квазистатического электрического поля вблизи плазменного резонанса, а также генерации высших гармоник лазерного излучения. Формулируются цели и задачи исследования, приводятся положения, выносимые на защиту, обосновывается научная новизна, достоверность работы, а также её практическая значимость, отмечается личный вклад автора, апробация работы на конференциях и семинарах, а также публикации автора в научных изданиях по теме диссертации.

В первой главе формулируются основные уравнения теоретической модели, которая предполагает использование холодной гидродинамики для электронов с учётом двух видов нелинейности - конвективной и релятивистской. Описываются основные шаги получения аналитических решений исходных уравнений на основе метода ренорм-групповых симметрий, позволяющего не ограничиваться теорией возмущений и рассматривать сильно нелинейные режимы взаимодействия электромагнитного излучения с неоднородной плазмой.

Во второй главе показано, что исходная система уравнений допускает два вида решений, отвечающих стационарному и нестационарному режиму возбуждения плазменных колебаний вблизи критической поверхности. В стационарном режиме, в котором опрокидывание носит пороговый характер, получены пространственно-временные распределения электрического поля и показано, что релятивистские эффекты существенно обогащают его спектральный состав высшими гармониками и приводят к уширению плазменного резонанса в сильно нелинейном случае.

В третьей главе построена релятивистская нелинейная теория резонансного поглощения для малых и больших углов падения лазерного излучения на плазму. Показано,

что нелинейные релятивистские эффекты приводят к уменьшению коэффициента поглощения с ростом лазерной интенсивности и сдвигу его максимума в область малых углов падения.

Четвёртая глава посвящена вычислению эффективности генерации высших гармоник лазерного излучения на основе нелинейных токов, которые создаются релятивистски сильными полями вблизи плазменного резонанса. Обнаружено, что вблизи границы опрокидывания резонансно-усиленных плазменных колебаний учёт релятивизма приводит к формированию медленно спадающих (с номером гармоники) спектров излучаемых электромагнитных волн.

### **Научная новизна исследования**

В диссертационной работе Метельского И.И. впервые исследовано влияние релятивистской нелинейности электронной динамики на структуру электрического поля плазменных колебаний, которые возбуждаются падающей электромагнитной волной вблизи плазменного резонанса. Это позволило построить аналитическую теорию резонансного поглощения и генерации гармоник лазерного излучения в той области параметров, которая интересна для современных экспериментов по ЛТС, но выходит за пределы применимости уже существующих теоретических моделей.

### **Достоверность полученных результатов**

Обоснованием достоверности полученных результатов является хорошее количественное согласие теоретических предсказаний для спектра высших гармоник с данными лабораторных экспериментов, проводимых на CO<sub>2</sub> лазере с интенсивностью до 10<sup>15</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

### **Научная и практическая значимость**

Полученные аналитические зависимости коэффициента резонансного поглощения падающего на плазму лазерного излучения, а также спектрально-угловые характеристики вторичных электромагнитных волн от различных параметров лазер-плазменной системы важны не только для интерпретации данных и развития диагностик в современных экспериментах в области лазерного термоядерного синтеза, но и для проверки адекватности particle-in-cell кодов для описания сильно нелинейных процессов лазер-плазменного взаимодействия.

### **Оценка работы**

На основании рассмотрения материалов диссертации, автореферата и выступления диссертанта на научном семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН ведущая

организация считает, что диссертационная работа Метельского Игоря Игоревича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит существенный вклад в развитие теории нелинейного плазменного резонанса, возникающего при взаимодействии мощных потоков электромагнитного излучения с неоднородной плазмой. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19 «Лазерная физика». Автореферат в достаточной мере и правильно отражает содержание работы, её результаты и выводы. Тема диссертации является актуальной, а полученные в ней результаты – новыми и оригинальными. Полученные результаты докладывались на всероссийских и международных научных конференциях и опубликованы в 7 рецензируемых статьях в ведущих российских и международных журналах.

### **Замечания по работе**

1. Во введении необходимость построения теории резонансного поглощения и генерации гармоник лазерного излучения при его падении на слабо неоднородную плазму в режиме возбуждения релятивистски сильных плазменных полей обосновывается тем, что аналогичный режим достигается в современных экспериментах по ЛТС, однако в диссертации приводится сравнение теории только с экспериментами на CO<sub>2</sub> лазере 40-летней давности.
2. Как замечено в диссертации, влияние релятивистских эффектов на резонансное поглощение лазерного излучения в плазме уже изучалось ранее с помощью численного моделирования методом частиц в ячейках (например, в работе [39]). Достоверность полученных в диссертации теоретических результатов была бы более обоснованной, если бы диссертант провёл не качественное, а количественное сравнение своей теории с результатами этих численных расчётов.
3. На странице 32 при упоминании экспериментов по генерации гармоник на CO<sub>2</sub> лазере даются ссылки на работы [22,23], не связанные с этой тематикой.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа «Релятивистски-нелинейное резонансное поглощение и генерация высших гармоник интенсивного лазерного излучения в неоднородной плазме» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации (№ 842 от 24 сентября 2013 г.), а её автор,

Метельский Игорь Игоревич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 Лазерная физика.

Доклад Метельского И.И. по материалам диссертации был заслушан на семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН 5 апреля 2022 г. Отзыв подготовлен главным научным сотрудником ИЯФ СО РАН, доктором физико-математических наук Тимофеевым Игорем Валериевичем и одобрен на заседании семинара.

Главный научный сотрудник  
лаборатории 9-1 ИЯФ СО РАН,

доктор физ.-мат. наук

Тимофеев Игорь Валериевич

тел.: +79134750178

email: [timofeev@ngs.ru](mailto:timofeev@ngs.ru)

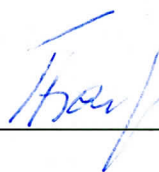


\\Тимофеев И.В.\\

Заместитель директора по научной  
работе, заведующий лаб. 9-1 ИЯФ СО РАН,

доктор физ.-мат. наук

Багрянский Пётр Андреевич



\\Багрянский П.А.\\

« 1 » июня 2022 года

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН по теме диссертации И.И. Метельского за последние пять лет

1. I.V. Timofeev, V.V. Annenkov, E.P. Volchok. Generation of high-field narrowband terahertz radiation by counterpropagating plasma wakefields // *Physics of Plasmas*, 2017, v. 24, p. 103106
2. A.P. Shkurinov, A.S. Sinko, P.M. Solyankin, A.V. Borodin, M.N. Esaulkov, V.V. Annenkov, I.A. Kotelnikov, I.V. Timofeev, Xi-Cheng Zhang. Impact of the dipole contribution on the terahertz emission of air-based plasma induced by tightly focused femtosecond laser pulses // *Physical Review E*. 2017, v.95. p.043209.
3. R. Spitsyn, I.V. Timofeev, I. A. Sosedkin, K. Lotov. Characterization of wavebreaking time and dissipation of weakly nonlinear wakefields due to ion motion // *Physics of Plasmas*. 2018, v.25. p. 103103.
4. E.P. Volchok, I.V. Timofeev, V.V. Annenkov. Coherent terahertz emission from a plasma layer due to linear conversion of laser wakefields on pre-modulated ion density // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2019, v.61. p. 125006.
5. I.V. Timofeev, E.A. Berendeev, E. V.V. Annenkov, E.P. Volchok. Simulations of electromagnetic emission from colliding laser wakefields // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2020, v.62. 10.1088/1361-6587/ab74e6.
6. I.V. Timofeev, E.A. Berendeev, V.V. Annenkov, E.P. Volchok, V.I. Trunov. Optimal synchronization of laser pulses in THz generation scheme with colliding plasma wakes // *Physics of plasmas*, 2021, v.28, p. 013103.
7. V.V. Annenkov, E.P. Volchok, I.V. Timofeev. Electromagnetic Emission due to nonlinear interaction of laser wakefields colliding in plasma at an oblique angle// *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2021, v. 63, p. 045001.