

## Отзыв научного руководителя

на диссертационную работу Метельского Игоря Игоревича «Релятивистски-нелинейное резонансное поглощение и генерация высших гармоник интенсивного лазерного излучения в неоднородной плазме», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Метельский Игорь Игоревич занимается научной работой в Отделении квантовой радиофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ОКРФ ФИАН) с 2013 года по настоящее время. В 2012 году он окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» и в 2013 году поступил в аспирантуру ФИАН, где выполнял диссертационную работу под моим руководством, успешно закончив аспирантуру в 2017 году. В настоящее время И. И. Метельский работает в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника в Секторе лазерно-плазменной физики высоких энергий ФИАН и в должности старшего научного сотрудника ФГУП «ВНИИА», Росатом.

Диссертационная работа Метельского Игоря Игоревича посвящена теоретическому исследованию нелинейного резонансного поглощения и генерации высших гармоник лазерного излучения при релятивистском плазменном резонансе в неоднородной плазме, и является законченной самостоятельной научно-исследовательской работой. Развитая теория описывает процессы резонансного поглощения и генерации гармоник в неоднородной плазме для лазерных интенсивностей  $I_0$  вплоть до  $I_0 \lambda^2 = 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> × мкм<sup>2</sup> ( $\lambda$  – длина волны лазерного света в мкм). Тема проведенного исследования, безусловно, является актуальной. В ходе выполнения диссертационной работы, с использованием метода ренормгрупповых симметрий и в рамках гидродинамической модели, впервые разработана аналитическая теория релятивистского плазменного резонанса в неоднородной плазме, которая позволила описать релятивистскую динамику электронов и нелинейную структуру электрического поля вблизи критической плотности плазмы. Исследованы пространственно-временные свойства поля плазменного резонанса и процесс опрокидывания релятивистских резонансно-усиленных плазменных колебаний, которым определяется граница применимости гидродинамической модели. Продемонстрировано проявление релятивистской нелинейности динамики электронов плазмы в виде фазовой модуляции электронных колебаний, и подробно изучено влияние этой модуляции на формирование структуры плазменного резонанса, а также на процесс опрокидывания стационарных плазменных колебаний. С использованием найденной нелинейной структуры плазменного резонанса в качестве источника генерации вторичного излучения впервые построены самосогласованные аналитические теории резонансного поглощения и генерации высших гармоник, а также разработана модель генерации квазистатического электрического поля с учетом как нерелятивистской, так и релятивистской нелинейностей движения электронов в окрестности критической плотности плазмы. Найден коэффициент нелинейного резонансного поглощения, который является функцией четырех управляющих параметров лазерно-плазменной системы – лазерной интенсивности, масштаба неоднородности плазмы, ее температуры и угла падения лазерного излучения на плазму. Сравнение с результатами линейной теории резонансного поглощения показало, что учет релятивистской нелинейности приводит к подавлению резонансного поглощения, т. е. к уменьшению коэффициента поглощения с ростом лазерной интенсивности, а также к сдвигу его максимума в область малых углов падения лазерного излучения на плазму. Исследована пространственная структура квазистатического электрического поля, генерируемого вблизи критической плотности, и показано, что на границе применимости теории возможна генерация

электростатического поля амплитудой в несколько МВ/см. В рамках разработанной аналитической теории генерации гармоник подробно исследованы спектральные характеристики вторичного излучения из плазмы, проведено сравнение с теорией возмущений и сильно нелинейной нерелятивистской теорией. Показано, что гармоники высшего порядка генерируются наиболее эффективно вблизи порога опрокидывания резонансно-усиленных плазменных колебаний, при этом формируются энергетические спектры, затухающие по степенному закону. Выводы построенной в диссертации теории генерации высших гармоник нашли подтверждение в экспериментах по генерации гармоник  $\text{CO}_2$  –лазерного излучения интенсивностью  $I_0 = 10^{14} \div 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>. Получено хорошее количественное согласие рассчитанных степенных спектров высших гармоник с экспериментально обнаруженными медленно убывающими спектрами вторичного излучения из лазерной плазмы.

Метельский Игорь Игоревич на «отлично» справился с решением всех поставленных перед ним задач, досконально разобравшись в физике нелинейного плазменного резонанса. Он регулярно принимал участие во всероссийских и международных конференциях, выступал с научными докладами на семинарах и опубликовал законченный цикл статей, который лег в основу диссертационной работы. Уровень исследований И. И. Метельского свидетельствует о его высокой подготовке, умении работать с научной литературой, способности критически анализировать результаты мировых исследований и, самое главное, о формировании высококвалифицированного специалиста в области лазерной физики высоких энергий. Выдвигаемые на защиту научные положения соответствуют полученным результатам.

Основные результаты диссертации прошли апробацию на семинарах ОКРФ ФИАН и многочисленных всероссийских и международных конференциях. По материалам диссертации было опубликовано 7 научных статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science/Scopus.

Считаю, что диссертационная работа «Релятивистски-нелинейное резонансное поглощение и генерация высших гармоник интенсивного лазерного излучения в неоднородной плазме», выполненная Метельским Игорем Игоревичем, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а Метельский Игорь Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Научный руководитель  
высококвалифицированный главный научный сотрудник,  
и.о. заведующего Сектором лазерно-плазменной физики высоких энергий  
Отделения квантовой радиофизики им. Н. Г. Басова  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)  
д.ф.-м.н., профессор  
Быченков Валерий Юрьевич

«15» марта 2022г.

ФИАН, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53  
Тел.: +7(499) 132-69-06  
эл. адрес:  
[bychenk@sci.lebedev.ru](mailto:bychenk@sci.lebedev.ru)

Подпись Быченкова Валерия Юрьевича заверяю.  
Ученый секретарь ФИАН,  
Колобов Андрей Владимирович



«15» марта 2022г.