

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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»

В диссертационной работе И. И. Метельского теоретически исследуется сильно нелинейный режим взаимодействия интенсивного лазерного излучения с неоднородной плазмой в условиях, когда релятивистская нелинейность, связанная с зависимостью массы электрона от его скорости, может оказать важное влияние на характеристики лазерно-плазменного взаимодействия. Несомненно, данный вопрос имеет как фундаментальный интерес, позволяющий по-новому взглянуть на основополагающие нелинейные эффекты взаимодействия интенсивных электромагнитных волн с плазмой, так и прикладное значение, важность которого определяется эффективностью воздействия мощного лазерного излучения на плазменные мишени, в частности, в проблеме управляемого лазерного термоядерного синтеза. В последнем случае влияние релятивистской нелинейности на процесс резонансного поглощения мощного лазерного излучения в термоядерной водородной плазме может привести к дополнительным ограничениям в эффективности диссипации лазерной энергии, что имеет также и предсказательную силу для оценки важности механизма резонансного поглощения в нагреве термоядерной плазмы. Считаю, что диссертационная работа И. И. Метельского актуальна и находится на острие современных исследований взаимодействия интенсивных лазерных полей с плазмой.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями Положения о присуждении ученых степеней. Содержательная часть работы состоит из введения, четырех глав и заключения. Имеется также приложение, в которое вынесены поясняющие материалы по используемым теоретическим методам анализа.

Во *введении* дается достаточно исчерпывающий обзор современной литературы по исследованию взаимодействия электромагнитных волн с неоднородной плазмой, ее резонансному поглощению и генерации гармоник лазерного излучения в отраженном сигнале, а также по теории нелинейных плазменных колебаний. Обосновывается актуальность исследований, формулируются основные цели и задачи диссертации, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена выводу исходных уравнений по взаимодействию p -поляризованной электромагнитной волны с неоднородной плазмой, полагая, что в условиях плазменного резонанса амплитуды возбуждаемых колебаний могут стать релятивистски сильными. В этом случае учет зависимости массы осциллирующего электрона от его скорости становится необходимым для построения полной картины нелинейного взаимодействия сильных полей с плазмой. В этой главе также описана ключевая идея ренормгруппового метода, используемого в дальнейшем для анализа исходных нелинейных уравнений.

Вторая глава посвящена достаточно подробному анализу нелинейных плазменных колебаний, возбуждаемых в окрестности критической плотности неоднородной плазмы. Здесь наряду с гидродинамической нелинейностью проведен учет релятивистской нелинейности, то есть учет релятивистского эффекта зависимости массы от скорости на возбуждаемые плазменные колебания. Найдены типы решений и определена их

пространственно-временная структура. Показано, что имеется два класса нелинейных решений и дан их достаточно подробный анализ.

В *третьей главе* рассматривается уже непосредственно задача взаимодействия падающей p -поляризованной электромагнитной волны с неоднородной плазмой, у которой есть точка плазменного резонанса. Используя найденные в предыдущей главе решения, описывающие сильно нелинейные плазменные колебания, в том числе и релятивистски сильные, определяется связь амплитуды магнитного поля в критической точке с амплитудой поля падающей волны, и тем самым строится полная картина нелинейного взаимодействия падающего излучения с плазмой, определяется как амплитуда отраженной волны, так и эффективность резонансного поглощения. Здесь также весьма подробно исследуется возможность генерации квазистатического поля в окрестности плазменного резонанса и проведено сравнение слабо и сильно нелинейного случаев.

Четвертая глава посвящена аналитической теории генерации гармоник в отраженном сигнале. Найденные во второй главе нелинейные решения позволяют сформулировать задачу о излучении из плазмы в вакуум электромагнитных волн на гармониках падающей волны. В главе сформулированы исходные уравнения, дан их аналитический анализ и многие физические зависимости представлены в графическом виде, удобном для практических выводов и сравнения с экспериментальными данными. Здесь также представлен анализ экспериментальных данных по генерации высших гармоник с медленно спадающими зависимостями интенсивностей соответствующих гармоник от их номеров, что не находило ранее удовлетворительного объяснения. Автор предлагает свою версию объяснения на основе развитой им модели и показывает весьма удовлетворительное согласие.

В заключении перечислены основные результаты работы.

На мой взгляд, настоящая диссертационная работа представляет собой весьма цельное, достаточно законченное в рамках поставленных задач научное исследование и представляет собой хороший образец классической диссертации по теории плазмы. Здесь достаточно четко поставлены задачи и применены весьма изящные методы теоретической физики. Так, в работе применен оригинальный теоретико-групповой подход, позволивший найти аналитические решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих структуру электрического поля релятивистского плазменного резонанса в произвольном порядке нелинейности продольного движения электронов плазмы. Помимо этого конкретного результата указанный подход представляет интерес и в общем методическом плане как перспективный способ построения аналитических решений нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих различные физические процессы в условиях сильной нелинейности.

Результаты работ опубликованы в 7 статьях в научных рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, включая такие известные журналы как Physics of Plasmas и ЖЭТФ, а также хорошо представлены на многих международных и российских конференциях. Научная новизна, надежность проведенных исследований и полученные результаты не вызывают сомнений, научные положения, выводы и заключения, сформулированные в диссертации, на мой взгляд, в значительной мере обоснованы. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов теоретического анализа, а также прямым сравнением полученных теоретических результатов с экспериментальными данными.

На фоне определенно положительного мнения о выполненной диссертационной работе хотелось бы все же высказать некоторые замечания, касающиеся в первую очередь постановки физической задачи или же точнее по использованию полученных теоретических результатов для интерпретации реальной картины физического взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой. Первое, в задачах,

рассмотренных в диссертации ионы предполагаются замороженными и во внимание принимаются только электронные нелинейности, при этом в диссертации я не нашел упоминания на каких временах данное предположение работает или же о каких длительностях лазерных импульсов идет речь. Хорошо известно, что движение ионов может привести к образованию скачкообразного профиля плотности плазмы в области плазменного резонанса, тем самым подавляя сам резонанс и приводя к значительному снижению амплитуды плазменных колебаний. Второе, в третьей главе достаточно подробно рассматривается интересный эффект генерации квазистатического поля с акцентом на его знакопеременный характер в области плазменного резонанса. Мне кажется, данный эффект становится тривиальным, если вспомнить о наличии пондеромоторной (усредненной) силы, действующей на электроны в неоднородном переменном поле, каковым является высокочастотное поле в окрестности плазменного резонанса. Именно действие этой силы приводит первоначально к разделению зарядов и формированию квазистатического поля, под действием которого в последующем движение ионов может приводить к формированию скачкообразного профиля плотности плазмы. Третье, в четвертой главе проведено сравнение полученных результатов по генерации высоких гармоник с экспериментальными данными, полученными для достаточно длинных лазерных импульсов. Мне кажется, что роль движения ионов должна быть как-то оговорена или же приведены какие-либо оценки в пользу предлагаемого механизма.

В целом диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. (в ред. от 01.10.2018 г.), а содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации. В совокупности полученные результаты могут быть оценены как значительный вклад в развитие теоретических исследований по взаимодействию интенсивных электромагнитных полей с неоднородной плазмой, а их автор, Игорь Игоревич Метельский, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

кандидат физ.-мат. наук,

заведующий лабораторией Экстремальной нелинейной оптики

ИПФ РАН

Ким Аркадий Валентинович

12 мая 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН).

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

Тел.: +7(910)120-59-67

E-mail: arkady.kim@ipfran.ru

Подпись Кима А. В. заверяю
Ученый секретарь ИПФ РАН,
кандидат физ.-мат. наук



Корюкин И.В.
12 мая 2022 г.

Список основных публикаций официального оппонента А.В. Кима по теме диссертации И.И. Метельского за последние пять лет

1. A. V. Andrianov, N. A. Kalinin, E. A. Anashkina, O. N. Egorova, D. S. Lipatov, A. V. Kim, S. L. Semenov, A. G. Litvak, Selective excitation and amplification of peak-power-scalable out-of-phase supermode in Yb-doped multicore fiber, *Journal of Lightwave Technology*, 2020, vol. 38, P. 2464 – 2470.
2. E. S. Efimenko, A. V. Bashinov, A. A. Gonoskov, S. I. Bastrakov, A. A. Muraviev, I. B. Meyerov, A. V. Kim, A. M. Sergeev, Laser-driven plasma pinching in e^-e^+ cascade, *Phys. Rev. E* **99**, 031201(R) (2019).
3. E. A. Anashkina, M. Y. Koptev, A. V. Andrianov, V. V. Dorofeev, S. Singh, Lovkesh, G. Leuchs, A. V. Kim, Reconstruction of optical pulse intensity and phase based on SPM spectra measurements in microstructured tellurite fiber in telecommunication range, *Journal of Lightwave Technology*, 2019, vol. 37, № 17, P. 4375- 4381.
4. A.V. Bashinov, P. Kumar, A.V. Kim, Quantum electrodynamic cascade structure in a standing linearly polarised wave, *Quantum Electronics* **48** (9), 833 –842 (2018).
5. E. S. Efimenko, A. V. Bashinov, S. I. Bastrakov, A. A. Gonoskov, A. A. Muraviev, I. B. Meyerov, A. V. Kim, A. M. Sergeev, Extreme plasma states in laser-governed vacuum breakdown, *Sci. Rep.* **8**, 2329 (2018).
6. E. A. Anashkina, A. V. Andrianov, M. Y. Koptev, A. V. Kim, Complete field characterization of ultrashort pulses in fiber photonics, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, vol. 24, № 3, P. 8700107.
7. A. Gonoskov, A. Bashinov, S. Bastrakov, E. Efimenko, A. Ilderton, A. Kim, M. Marklund, I. Meyerov, A. Muraviev, A. Sergeev, Ultrabright GeV Photon Source via Controlled Electromagnetic Cascades in Laser-Dipole Waves, *Phys. Rev. X* **7**, 041003 (2017).
8. A.V. Bashinov, E.S. Efimenko, A.A. Gonoskov, A.V. Korzhimanov, A.A. Muraviev, A.V. Kim, A.M. Sergeev, Towards attosecond-scale highly directed GeV gamma-ray sources with multipetawattclass lasers, *J. Opt.* **19**, 114012 (2017).
9. Bashinov A.V., Kumar P., Kim A.V., Particle dynamics and spatial e^-e^+ density structures at QED cascading in circularly polarized standing waves, *Phys. Rev. A* **95**, 042127 (2017).
10. A.V. Andrianov, A.V. Kim, E.A. Khazanov, A method for measuring the amplitude and phase of ultrashort laser pulses using self-modulation in a Kerr medium and spectral interferometry, *Quantum Electronics* **47** (3), 236 –244 (2017).