

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Емелиной Анны Сергеевны
«Генерация гармоник высокого порядка лазерного излучения
среднего ИК диапазона в газах»,
представленной на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

К настоящему времени исследование нелинейного взаимодействия интенсивного лазерного излучения с атомами и молекулами определяет одно из наиболее активно исследуемых направлений лазерной физики. Несмотря на более чем полувековую историю, исследования в данном направлении остаются актуальными и востребованными. Актуальность и востребованность теоретических и экспериментальных результатов, в первую очередь, вызваны широчайшим кругом практических приложений нелинейных явлений, возникающих в результате непертурбативного взаимодействия лазерного излучения с веществом. К таким нелинейным явлениям относят нелинейную ионизацию мишени под действием лазерного излучения (включая многоэлектронную ионизацию), генерацию гармоник, тормозное излучение и рассеяние электронов на атомных мишенях в лазерном поле, диссоциация молекул (стимулированная лазерным импульсом), лазерно-индуцированная перезарядка и т.д.

Несмотря на широкий спектр исследуемых в сильном лазерном поле нелинейных процессов, особое место занимает генерация высоких гармоник (ГВГ). ГВГ представляет собой нелинейный процесс преобразования низкочастотного поля накачки во вторичное излучение с частотами значительно превышающим характерную частоту поля накачки. Отмечу, что исторически введенный в нелинейной оптике термин «генерация высоких гармоник» следует понимать в более широком смысле, т.е. как генерацию мишенью вторичного излучения на любых частотах отличных от частоты поля накачки. Такое «лексикологическое» расширение термина было продиктовано принципиально новыми результатами, полученными при исследовании генерации вторичного излучения предельно короткими лазерными импульсами (с длительностью в несколько осцилляций поля). Действительно, в этом случае, спектр генерируемого излучения сплошной и не содержит четко выраженной гребенчатой структуры (на частотах кратных частоте поле накачки), свойственной для строго периодического (квазипериодического) поля. Практическая значимость ГВГ необычайно широка. Во-первых, процесс ГВГ может быть использован для создания компактных источников когерентного излучения в широком диапазоне длин волн (от ультрафиолета до жесткого рентгена). Конкретная область

применимости таких источников определяется медико-биологическими задачами, задачами дефектоскопии, задачами исследования строения твердых тел и наночастиц. Во-вторых, в силу существенной широкополосности спектра ГВГ, последний используется для создания последовательности или изолированных сверхкоротких лазерных импульсов аттосекундной длительности, применяемых для контроля и регистрации сверхбыстрых процессов в атомных и молекулярных мишенях. В-третьих, процесс ГВГ может быть утилизирован в части альтернативных методов спектроскопии, позволяющих исследовать электронно-коррелированную динамику мишени, атомную или молекулярную структуру.

Теоретическое описание ГВГ, как и любого другого нелинейного процесса в сильном лазерном поле, сопряжено с рядом трудностей, вызванных одновременным учетом взаимодействия электрона с атомным остовом (включая многоэлектронные эффекты, вызванные электронно-коррелированной динамикой) и непертурбативного взаимодействия с интенсивным лазерным полем. Несомненно, такой одновременный учет двух взаимодействий возможен в рамках численного решения нестационарного уравнения Шредингера, однако полученные результаты существенно ограничены параметрами лазерного поля при которых наблюдается сходимость численного алгоритма. Более того, так как численные результаты получены для конкретной атомной/молекулярной мишени и заданных параметрах лазерного поля, то их физическая интерпретация существенна затруднена без дополнительного привлечения аналитических моделей. Таким образом, для качественного понимания процесса ГВГ принципиально важным моментом является развитие аналитических моделей и подходов, позволяющих более четко и ясно понять физику ГВГ в различных режимах нелинейного взаимодействия лазерного излучения с атомными и молекулярными системами. Именно этому важному и актуальному вопросу посвящена диссертация Емелиной Анны Сергеевны.

В диссертации Емелиной А.Н. рассматривается дальнейшее развитие модели Левенштейна (см. ссылку [53] в диссертации) для ГВГ в части учета эффектов истощения основного состояния, вызванных ионизацией мишени лазерным полем, учета эффектов от магнитной составляющей электромагнитного поля и учета пространственной симметрии начального состояния. Указанные выше эффекты становятся существенными как при увеличении пиковой интенсивности поля, так и при уменьшении несущей частоты лазерного импульса. Действительно, процессу ГВГ всегда сопутствует лазерно-индуцированный ионизационный распад начального состояния, который истощает населенность начального состояния. С другой стороны, процесс ГВГ, в соответствии с трёхшаговой моделью Коркума (см. ссылки [21,53] в диссертационной работе), сам инициирован ионизацией. Таким образом, ГВГ определяется двумя конкурирующими

ионизационными процессами – непосредственно ионизацией, определяющей первый этап в формировании гармоник и увеличивающий выход гармоник с ростом интенсивности, и процессом истощения начального состояния, подавляющего выход гармоник с ростом интенсивности поля. Несмотря на то, что эффект истощения начального состояния отмечался ранее в литературе по ГВГ, систематического исследования влияния эффекта истощения начального состояния на генерацию гармоник не проводилось.

Уменьшение несущей частоты лазерного импульса и (или) увеличение интенсивности поля непосредственно приводят к увеличению характерного импульса электрона в лазерном поле (пропорционального напряженности поля и обратно пропорционального частоте). Несмотря на то, что с уменьшением частоты вероятность выхода гармоник достаточно быстро падает, импульс электрона может принимать значения соизмеримые с mc и в этом случае вклад от магнитной составляющей электромагнитного поля может быть существенным. Отмечу, что вопрос о влиянии магнитной компоненты электромагнитного поля на процесс ГВГ предельно плохо исследован как экспериментально, так и теоретически.

Третий, на мой взгляд, важный вопрос, рассматриваемый в диссертации, связан с влиянием пространственной симметрией начального состояния на генерацию гармоник в двухчастотном лазерном поле компоненты которого линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. Особую значимость исследуемого вопроса предаёт сравнение модельных теоретических расчетов с экспериментальными результатами. Вышеизложенное определяет актуальность тематики диссертации и рассматриваемых в ней задач.

Диссертация состоит из Введения, трёх глав, Заключения и списка цитируемой литературы, включающего 100 источников. Диссертационная работа изложена на 123 страницах и проиллюстрирована 45 рисунками.

В Введении обосновывается актуальность диссертации, формулируются цель и задачи работы, обосновывается научная новизна и практическая ценность диссертации, формулируются основные положения, выносимые на защиту и приводится литературный обзор основных публикаций по генерации высоких гармоник.

Первая глава диссертации посвящена модификации известной модели Левенштейна. Данная модификация состоит в учете в амплитуде генерации гармоник двух эффектов – эффекта истощения начального состояния (раздел 1.2) и эффекта влияния магнитной составляющей электромагнитного поля (раздел 1.3). Эффект истощения начального состояния учитывается в рамках адиабатического приближения, а эффекты магнитного поля рассматриваются с квазиклассической точностью. В разделе 1.4

проводится анализ спектров ГВГ с учетом двух вышеотмеченных эффектов для интенсивных лазерных полей с несущей частотой, соответствующей длинам волн в диапазоне 0.8-3.9 мкм и 8-10 мкм. Показан существенный вклад, обсуждаемых эффектов в формирование спектров ГВГ. В разделе 1.4 сформулированы основные результаты первой главы.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию генерации электромагнитных всплесков зептосекундной длительности, получаемых в результате взаимодействия лазерного поля с несущей частотой в диапазоне среднего ИК с атомными мишенями. Исследование выполняется в рамках модифицированной модели Левенштейна, развитой в первой главе диссертации. В разделе 2.1 формулируется постановка задачи. Влияние магнитной составляющей электромагнитного поля на формирование волновых форм зептосекундной длительности обсуждается в разделе 2.2. В разделах 2.3 и 2.4 приводятся численные расчеты для длин волн 10 мкм и 16 мкм и дается общий анализ формирования всплесков сверхкороткой длительности. Качественный анализ эффектов распространения волновых форм в среде дается в разделе 2.5. Общие выводы по второй главе диссертации сформулированы в разделе 2.6.

В третьей главе диссертации рассматривается влияние пространственной симметрии начального состояния на процесс генерации высоких гармоник положительно заряженными ионами золота, серебра, цинка в двухчастотном лазерном поле с линейно поляризованными компонентами во взаимно перпендикулярных направлениях. В разделах 3.1 и 3.2. обсуждаются постановка задачи и экспериментальные результаты, полученные в группе Р.А. Ганеева. В разделе 3.3 проводится непосредственный анализ ГВГ от симметрии начального состояния на уровне нелинейного отклика одиночного иона. В разделе 3.4 приводится качественное и количественное описание ГВГ в нелинейной протяженной газовой среде. В разделе 3.5. сформулированы основные результаты третьей главы.

В заключении (раздел «Основные результаты») приведены основные результаты представленной диссертации.

Оценивая диссертационную работу Емелиной А.С. в целом, можно сказать, что выполнено полноценное научное исследование, в рамках которого получен целый ряд оригинальных результатов, к которым я могу отнести: модификацию модели Левенштейна в части учета эффектов истощения начального состояния и влияния магнитной составляющей на ГВГ; влияние симметрии начального состояния на генерацию гармоник в двухчастотном поле; учета эффектов распространения излучения в среде. Работа выполнена на хорошем уровне, а ее результаты опубликованы в

рецензируемых изданиях (Physical Review A, Journal of the Optical Society of America B, Optics Express, Квантовая электроника), индексируемых базой Web of Science. Полученные оригинальные результаты несомненно будут востребованы в исследовании процесса ГВГ в интенсивном низкочастотном лазерном поле, что указывают на их научную ценность. Достоинствами работы можно считать самосогласованное развитие модели Левенштейна для генерации гармоник и ее применение к задачам генерации сверхкоротких волновых форм зептосекундной длительности и описанию экспериментальных результатов по ГВГ в двухчастотном лазерном поле. По результатам диссертационной работы можно сказать, что Емелина А.С. является квалифицированным специалистом в области генерации высших гармоник. Ее общая эрудиция в вопросах физики нелинейного взаимодействия лазерного излучения с атомами и молекулами позволяет решать широкий круг задач включая задачи нелинейной ионизации атомных и молекулярных мишеней, распространения сверхкоротких лазерных импульсов в среде и т.д.

Несмотря на высокий научный уровень представленной диссертации и полноту цитируемой литературы, я хотел бы сделать ряд замечаний уточняющего характера, указать ряд работ, которые, на мой взгляд, могли бы быть процитированы в диссертации, и отметить ряд стилистических неточностей, допущенных в диссертации.

1. Можно ли использовать модель Левенштейна, в которой отсутствует вклад от кулоновского взаимодействия, для напряженностей лазерного поля соответствующему надбарьерному развалу системы, т.е. для напряженностей $F > F_{BS} = \frac{I_p^2}{4Z}$, где I_p – потенциал ионизации, а Z – заряд атомного остова (используется атомная система единиц)?

2. В диссертации рассматривается безспиновая частица. Какие эффекты остаются за рамками такого приближения?

3. На рис. 1.4. спектр ГВГ с учетом истощения начального состояния и эффектов магнитного поля содержит серию платообразных структур. Можно ли связать отсечки этих платообразных со слиянием короткой и длинной замкнутых траекторий? Какова зависимость энергий отсечки от магнитного поля?

4. Генерируемый спектр высоких гармоник для рассматриваемых интенсивностей и длин волн лежит в области КэВ. Возникает вопрос о применимости дипольного приближения для генерируемой гармоники и точности дипольного матричного элемента (1.34).

5. Какова точность матричного элемента (3.2) применительно к реальным ионам серебра, золота и цинка?

Список литературы я бы дополнил рядом публикаций.

1. В части введения эффектов истощения стоило бы сослаться на работу Толстихина О.И. и соавторов [Y. Okajima, O. I. Tolstikhin, T. Morishita, Phys. Rev. A 85, 063406 (2012)], в которой показано (хоть и в рамках простой модели) как в задаче появляется фактор, описывающий истощение начального состояния.
2. В части проявления эффектов симметрии начального состояния было бы неплохо упомянуть работу [M.V. Frolov et al., Phys. Rev. A 75, 063408 (2007)] в которой проводилось сравнение спектров ГВГ для начальных состояний с s- и p- пространственными симметриями.
3. При описании генерации гармоник в двухчастотном поле с линейно поляризованными компонентами было бы нелишним процитировать работу [T.S. Sarantseva et al., J. Phys. B 46, 231001 (2013)].

В диссертации есть ряд стилистических неточностей.

1. Слово «квантовомеханический» пишется слитно, а не через дефис (стр. 7, 25, 27, 86).
2. На рис. 1.5 красная линия, по-видимому, соответствует результату «с опустошением, с магнитным полем», но никак не «без опустошения, без магнитного поля».
3. Подпись к рис. 1.2. стоило бы представить в иной форме, в настоящем варианте она вызывает недоумение. На графике, по-видимому, отложена зависимость населённости уровня от пиковой интенсивности импульса в момент его окончания.
4. Не понятна фраза на стр. 23 «Эта интенсивность лишь незначительно превышает порог ионизации атома гелия ...». Как интенсивность лазерного поля может превышать порог ионизации? Это две различные физические величины! Что диссертант имел ввиду?

Несмотря на сделанные замечания, я считаю, что они не снижают ценность и новизну полученных результатов, а также не являются существенными к основному содержанию работы. Указанные замечания не снижают моей положительной оценки диссертации Емелиной А.С., которая продемонстрировала хороший научный уровень при проведении научных исследований. Как было отмечено выше, результаты диссертации опубликованы в 4-х рецензируемых изданиях и прошли апробацию на международных и российских конференциях. Выносимые на защиту положения четко сформулированы и находят свое

подтверждение в представленной диссертации. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертация Емелиной А.С. представляет собой целостное, актуальное, законченное научное исследование, которое полностью удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор – Емелина Анна Сергеевна заслуживает присуждение учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Заведующий кафедрой теоретической
физики, главный научный сотрудник
«ФГБОУ ВО ВГУ», д. ф.-м.н.

Фролов Михаил Владимирович

394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская площадь, 1
Телефон: +7 (473) 220-87-56
Email: frolov@phys.vsu.ru

Подпись М.В. Фролова заверяю:

Учёный секретарь ВГУ, К.Э.Н.



Васильева К.Н.