

## ОТЗЫВ

официального оппонента Попова Александра Михайловича  
на диссертационную работу Емелиной Анны Сергеевны  
«Генерация гармоник высокого порядка лазерного излучения среднего ИК  
диапазона в газах», представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертация А.С. Емелиной посвящена теоретическому исследованию особенностей процесса генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) лазерного излучения среднего ИК диапазона в газах. Актуальность данного исследования обусловлена недавним прогрессом в создании мощных фемтосекундных лазерных источников среднего ИК диапазона с центральными длинами волн до 4 мкм. Использование таких источников позволяет значительно расширить плато в спектре генерируемых гармоник, что в свою очередь открывает возможности для получения (суб)аттосекундных импульсов. Полноценные численные расчёты для описания ГГВП с использованием длинноволновых источников становятся трудноосуществимыми из-за большого объёма требуемых вычислительных ресурсов, в связи с чем возникает необходимость аналитической теории, позволяющей адекватно описывать процесс ГГВП длинноволнового излучения. В работе А.С. Емелиной развит теоретический подход, позволяющий в рамках приближения сильного поля (SFA - strong field approximation) описывать процесс ГГВП излучения среднего ИК диапазона. В основе развитого подхода лежит теория Левенштейна, широко используемая для описания процесса ГГВП в поле излучения видимого и ближнего ИК диапазона. В данной работе эта теория модифицирована с целью учёта ряда факторов, играющих важную роль в условиях, рассматриваемых в диссертации. В частности, учтены такие факторы, ограничивающие эффективность генерации гармоник, как влияние магнитного поля лазерного импульса и опустошение связанных атомарных состояний. Кроме того, осуществлено расширение рассматриваемой теории на случай произвольного исходного квантового состояния атомарной системы, что позволяет приблизить описание к условиям реального эксперимента.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы из 100 наименований.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются ее цели, приводятся данные о структуре и объеме диссертации, обсуждаются научная новизна, практическая значимость и степень достоверности полученных результатов, излагаются основные защищаемые положения, приводятся

сведения об апробации результатов и их публикации, дается краткий обзор литературы по затрагиваемым в диссертации вопросам.

В первой главе решается задача развития аналитического подхода к описанию процесса ГГВП, позволяющего учесть влияние магнитного поля лазерного импульса и опустошение связанных атомарных состояний. На этой основе далее проводится детальное исследование предельных возможностей получения высокоэнергетичных фотонов при ионизации различных атомарных сред излучением ближнего и среднего ИК диапазонов. Выявлена относительная роль исследованных ограничивающих факторов в различных диапазонах интенсивностей и длин волн падающего излучения. Продемонстрированы изменения спектрального профиля генерируемого излучения высоких гармоник в зависимости от длины волны лазерного излучения и на основе частотно-временного анализа сигнала гармоник дано объяснение этих изменений как следствия изменения относительных вкладов различных электронных траекторий в генерируемый сигнал. Показаны возможности генерации гармоник с энергиями фотонов более 10 кэВ как в нейтральных, так и в ионизированных газах, что на порядок величины превышает достигнутые к настоящему времени значения энергий, и найдены оптимальные условия преобразования лазерного излучения в поток фотонов с такими энергиями.

Вторая глава посвящена исследованию влияния магнитного поля лазерного импульса на предельные возможности обсуждавшегося ранее в литературе механизма формирования субаттосекундных рентгеновских волновых форм при ГГВП на заднем фронте ультракороткого импульса лазерного излучения среднего ИК диапазона. В рамках подхода, развитого в первой главе, показано, что в определенном диапазоне параметров лазерного импульса магнитный дрейф электрона не только не разрушает механизм формирования субаттосекундных биений, но и выполняет полезную в данном случае роль спектрального фильтра, обеспечивающего достижение высокого контраста генерируемых биений. Продемонстрированы также дополнительные возможности оптимизации рассматриваемого процесса путем изменения фазы заполнения лазерного импульса относительно его огибающей. В результате указаны возможности значительного сокращения временных масштабов получаемых рентгеновских волновых форм по сравнению с приведенными в литературе данными теоретических исследований.

Третья глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию ГГВП в двухцветном лазерном поле со скрещенными поляризациями линейно поляризованных спектральных компонент. Показано, что использование двухцветного поля с ортогональными поляризациями первой и второй гармоник позволяет

значительно увеличить выход генерируемых высоких гармоник по сравнению со случаем одноцветного поля. Рассмотрение в данной главе проведено с использованием предложенного автором дальнейшего усовершенствования модели Левенштейна, позволяющего учитывать реальное исходное квантовое состояние атомарного электрона, взаимодействующего с электромагнитным полем. На основе развитой в данной главе теоретической модели А.С. Емелиной с соавторами дано теоретическое объяснение увеличения эффективности преобразования в рассмотренном случае как на уровне одночастичного отклика, так и в рамках макроскопического рассмотрения эволюции взаимодействующих волн в нелинейной среде. Проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными Р.А. Ганеевым с сотрудниками, и продемонстрировано хорошее согласие теоретических результатов с экспериментом. Полученные результаты отражены в совместной публикации с экспериментальной группой.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты, полученные в диссертации, несомненно являются оригинальными, обладают новизной и представляют значительный научный и практический интерес. Проведенные исследования расширяют имеющиеся представления о процессе ГГВП в газах, а также позволяют найти оптимальные условия для достижения максимально эффективного преобразования частот в различных диапазонах интенсивностей и длин волн лазерной накачки. Среди достоинств данной работы стоит отметить её цельность, состоящую, в частности, в том, что различные задачи успешно решены в рамках единого теоретического подхода, в развитии которого определяющая роль принадлежит соискателю. Ещё одним важным достоинством данной работы является то, что результаты третьей главы диссертации хорошо согласуются с экспериментальными данными. Следует также отметить хорошее и обстоятельное изложение как литературных данных, так и оригинальных результатов, полученных в рамках данной диссертационной работы. Всё вышеизложенное позволяет говорить об авторе диссертации как о сложившемся высококвалифицированном специалисте в области лазерной физики.

По работе имеются некоторые замечания.

1) При рассмотрении поляризационного отклика атома на сильное лазерное поле автор ограничивается полуклассической теорией, полагая, что величина отклика определяется квадратом модуля матричного элемента дипольного оператора, посчитанного на волновых функциях, описывающих эволюцию атома в сильном поле. Такой подход вызывает некоторые возражения, особенно в случае сильных полей, когда

существенно опустошение основного состояния (A.V. Bogatskaya, E.A. Volkova, V.Yu. Kharin, and A.M. Popov, "Polarization response in extreme nonlinear optics: when can the semiclassical approach be used?" Laser Phys. Lett. 13, 045301 (2016)). Альтернативный последовательный квантовоэлектродинамический подход развивается в (Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Spontaneous transitions in atomic system in the presence of high intensity laser field Europhysics Letters, 116, 14003 (2016); A.I. Magunov and V.V. Strelkov, "S-Matrix approach to the problem of high-harmonic generation in the field of intense laser wave," Phys. Wave Phenom. 25(1), 24 (2017)) и ряде других работ тех же авторов. Я полагаю, что было бы важным как-то обсудить результаты, полученные в диссертации, с учетом этих недавних работ.

2) При рассмотрении релятивистских эффектов, влияющих на процесс ионизации атома лазерным полем автор сосредоточил свое внимание на анализе магнитного дрейфа электрона. Между тем релятивистский характер движения электрона предполагает также необходимость учета пространственной неоднородности электрического поля в волне, а также наличие спин-орбитального взаимодействия. Видимо, автор полагает, что вклад отмеченных эффектов мал. Однако, полагаю, в тексте диссертации могли бы быть соответствующие оценки параметров малости.

3) В главе 3 не всегда четко указаны параметры двухцветных импульсов для которых проводились расчеты спектров ГВВП (см. рис.3.1, с.91)).

4) При изучении спектров гармоник, генерируемых в поле лазерного излучения среднего ИК диапазона частот удается добиться излучения квантов поля вплоть до 10 кэВ. Соответствующие длины волн уже порядка атомного размера. Однако из текста диссертации остается неясным, учитывалась ли в расчетах пространственная неоднородность поля волны на размере атома.

Отмеченные замечания не касаются принципиальных сторон проведенных в работе исследований и не снижают высокой оценки уровня проделанной диссертантом работы и значимости полученных результатов. В целом диссертация Емелиной А.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвященную актуальной области современной лазерной физики. Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации. Основные результаты и положения, выносимые на защиту, представляются обоснованными и достоверными. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах (Physical Review A, Optics Express, JOSA B, Квантовая электроника), докладывались на представительных российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам в области, к которой

относится данное исследование. Тематика и содержание диссертации полностью отвечают специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Считаю, что данная диссертационная работа полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор, Емелина Анна Сергеевна, несомненно заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Попов Александр Михайлович,  
доктор физико-математических наук, профессор

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)  
119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, 1  
Тел.: +7 (495) 939-49-54; email: [alexander.m.popov@gmail.com](mailto:alexander.m.popov@gmail.com)

Подпись Попова Александра Михайловича заверяю.

Зам. директора НИИЯФ МГУ,  
профессор



Саврин В.И.