

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Толкачёва Антона Игоревича
«Оптимизация эффективности нелинейной генерации второго порядка
в поверхностных слоях сферических и цилиндрических частиц»,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

1. Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите

Диссертационная работа Толкачёва А.И. посвящена теоретическому исследованию явлений генерации второй гармоники и генерации суммарной частоты, происходящих в тонких поверхностных слоях диэлектрических частиц, имеющих характерные размеры от нано- до микрометров. В диссертации основное внимание удалено анализу (с использованием численного и аналитического моделирования) различных способов увеличения энергетических характеристик генерируемого излучения. Таким образом, диссертационная работа соответствует отрасли «Физико-математические науки». Область исследований, представленных в диссертации, соответствует пункту 4 (нелинейная оптика) раздела III паспорта специальности 01.04.05 – оптика.

2. Актуальность темы диссертации

Соискателем представлены варианты генерации излучения удвоенной частоты в поверхностных слоях осесимметричных диэлектрических частиц, моделирующие излучение второго порядка оптически нелинейными молекулами (красителями), адсорбированными на поверхностях монодисперсных субмикронных частиц, составляющих коллоидный раствор. Такие системы широко исследуются в микробиологии, фармакологии и коллоидной химии. Сложность нелинейно-оптических экспериментов заключается в низком коэффициенте преобразования энергии из излучения накачки во вторую гармонику, и, как следствие, в необходимости использования высокомощных лазерных установок и чувствительных фотодатчиков.

Представленная работа посвящена методам увеличения мощности излучения второй гармоники с помощью управления состоянием поляризации пучков накачки и угла схождения между ними. Предлагается также альтернативный метод повышения эффективности — создание периодических линейных структур из исследуемых частиц, где усиление сигнала происходит благодаря интерференционным эффектам (что активно используется в фотонике). Методы оптимизации и результаты, полученные в диссертации, могут быть также применяться в исследованиях полидисперсных систем, таких как аэрозоли, которые начали изучаться с использованием явления генерации второй гармоники с 2010-х годов. Актуальность проведенного исследования подтверждается тем, что работа выполнена в рамках четырех государственных программ научных исследований и двух грантов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации и научных положений, выносимых на защиту

Наиболее принципиальными и новыми результатами, полученными Толкачёвым А.И. в ходе диссертационного исследования, являются следующие:

– Установлены условия максимизации энергетических характеристик излучения второй гармоники, генерируемой в нелинейно-оптических поверхностных слоях сферических частиц, когда электромагнитные колебания в указанных слоях возбуждаются одним пучком накачки.

– Сформулированы условия получения максимальной интенсивности второй гармоники, генерируемой в поверхностных слоях цилиндрических частиц, образующих линейную структуру, с учетом дисперсионных свойств окружающей среды.

– Предложен принцип для создания схемы экспериментальной установки, основанный на использовании двух и более когерентных пучков накачки, в соответствии с которой становится возможной генерация излучения второй гармоники большей мощности по сравнению со случаем, когда используется только один пучок накачки. С использованием численных методов обоснована эффективность использования данной схемы на примере генерации второго порядка в поверхностном слое сферической частицы, облучаемого двумя когерентными пучками.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Для анализа явления генерации второй гармоники в диссертации применяется модель Рэлея–Ганса–Дебая, которая широко используется при описании линейного и нелинейного рассеяния света на оптически мягких частицах. Достоверность результатов, получаемых в рамках данной модели, подтверждается хорошим согласием с результатами экспериментов. Выводы, полученные соискателем, для ряда предельных случаев размеров частиц и поляризации возбуждающего пучка согласуются с выводами, полученными другими авторами, на что указывается в тексте диссертации ссылками на соответствующие работы.

Закономерности нелинейной генерации, обнаруженные для предельного случая малых линейных размеров частиц по сравнению с длиной волны возбуждающего излучения, обоснованы как аналитически, так и численно. Достоверность выражений, полученных для описания генерации излучения удвоенной частоты в поверхностном слое сферической частицы, возбуждаемой двумя когерентными пучками, подтверждена при рассмотрении следующих частных случаев: а) при сонаправленных волновых векторах исходных волн и б) при интенсивности одного из пучков, пренебрежимо малой по сравнению с интенсивностью другого. Таким образом, результаты и выводы, полученные в диссертации, являются достоверными и обоснованными.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Результаты диссертационного исследования характеризуются высокой степенью научной и практической значимости. В диссертационной работе впервые найдены оптимальные условия генерации и параметры пучков возбуждающего излучения, при которых энергетические характеристики генерируемого излучения второй гармоники достигают максимума. На практике эти условия могут найти применение при планировании экспериментальных исследований для определения свойств и состава поверхностных слоёв диэлектрических нано- и микрочастиц в коллоидных растворах и аэрозолях с использованием нелинейной оптической генерации.

Экономический эффект данных результатов проявляется в том, что можно смягчить требования к мощности источников возбуждающего излучения. Это позволяет расширить список подходящих лазерных установок для проведения экспериментальных исследований — включить в него менее мощные, и, следовательно, менее дорогостоящие оптические квантовые генераторы.

Социальная значимость результатов диссертации подтверждается их внедрением в учебный процесс учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 31 работе, удовлетворяющей п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь. Из них 8 статей (7 из которых опубликованы в переводных изданиях), 17 материалов конференций и 6 тезисов докладов. Опубликованные материалы полностью отражают результаты, изложенные в диссертационной работе.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК

Диссертационная работа Толкачёва А.И. состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, аналитического обзора литературы, двух глав, в которых содержатся оригинальные результаты, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Объем диссертации составляет 156 страниц. Список использованных источников содержит 132 наименования в подразделе библиографический список и 31 наименование в списке публикаций соискателя.

Представленный материал уместно разбит по главам, результаты исследований расположены последовательно и лаконично представлены с использованием иллюстративного материала и таблиц. Диссертация написана строгим научным языком с использованием соответствующей терминологии.

Оформление диссертационной работы и автореферата соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Республики Беларусь. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует

Приведенный в диссертации аналитический обзор литературы, позволяет заключить, что соискатель хорошо ориентируется в современном состоянии нелинейной оптики. По полученным им результатам, представленным в опубликованных работах и диссертации, можно утверждать, что автор в совершенстве владеет методами математической физики и численными методами, способен самостоятельно ставить задачи и получать их решения. Таким образом, научная квалификация Толкачёва А.И. соответствует степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

9. Замечания по диссертации

Имеется ряд замечаний по диссертации:

– В диссертационной работе основные результаты по генерации второй гармоники (ГВГ) и генерации суммарной частоты (ГСЧ) в тонких сферических и цилиндрических слоях были получены с использованием приближенной теории рассеяния Рэлея-Ганса-Дебая. Эта теория применялась в том числе и в случае больших радиусов рассеивающих частиц, когда величина $k_\omega a$ достигала нескольких десятков (см., например, рис. 3.8 б) и в) для показателей асимметрии). Насколько это правомерно и не следует ли здесь использовать более точные теории рассеяния?

– Из содержания главы 3 следует, что термин ГВГ-СЧ применяется в случае совпадения частот источников. Вопрос терминологический — насколько будет применим этот термин при незначительной расстройке частот источников?

– Большое внимание в диссертации уделяется анализу явлений ГВГ и ГВГ-СЧ в случаях «чистой» анизотропии нелинейной восприимчивости материалов, характеризуемой вкладом лишь одного из слагаемых в выражении (2.10) для тензора $\chi^{(2)}$ (исключением является «смешанная» анизотропия малахитового зеленого). Насколько распространены естественные и искусственные нелинейные материалы с определенными типами «чистой» анизотропии, и насколько актуален указанный анализ с этой точки зрения?

– Хотя в подразделе 2.5.2 на стр. 66 заявляется об анализе выражения (2.79) для *общего* случая тензора нелинейной диэлектрической восприимчивости, далее все же рассматриваются упомянутые выше случаи «чистой» анизотропии.

– Почему асимметрия вправо-влево для малахитового зеленого оказывается неотрицательной для всего интервала углов γ (рис. 3.5 б)), хотя для каждого отдельного типа «чистой» анизотропии она неположительна?

– На стр. 52 отмечено, что полная мощность второй гармоники «обратно пропорциональна расстоянию от детектора до цилиндрической частицы». Как такое оказывается возможным, если излучение распространяется в непоглощающей среде, и предполагается сохранение полной энергии?

– Из табл. 3.6 и 3.7 следует, что при оптимизации максимальной плотности мощности и максимальной полной мощности оптимальной является левая круговая поляризация света второго источника. Почему не правая? Из содержания

раздела 3.7 неясно, в силу каких причин возникает такая «неравноправность» левой и правой круговых поляризаций.

– Так как запись первой из формул (2.1) отличается от общепринятой $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$, то в пояснениях к этим формулам следовало бы указать, что в слагаемое $\epsilon\mathbf{E}$ включен лишь линейный вклад поляризуемости, а нелинейный вклад включен в отдельное слагаемое $4\pi\mathbf{P}^{(2)}$.

– На стр. 36 не указано, что числовые значения компонент тензора $\chi^{(2)}$ для малахитового зеленого являются нормированными и безразмерными.

– На стр. 39 не дано определение параметра эллиптичности σ .

– В формулах (2.27) приведено выражение для $\cos\phi_{\max}$, а для величины θ_{\max} лишь указан интервал значений. Почему?

– В тексте диссертации имеются отдельные опечатки и стилистические погрешности. Например, в формуле (2.3) под знаком интеграла следует писать $P^{(2)}(\mathbf{x}', t)$ вместо $P^{(2)}(\mathbf{x}, t)$. На стр. 38 в тексте за табл. 2.1 речь идет не о модуле вектора рассеяния, а о модуле, умноженном на a ; в конце стр. 50 вместо термина «пренебрегая» следует написать «при пренебрежении», а на стр. 118 имеется описка «анизотропия типа анизотропии». В подписях к рис. 2.9 и 2.10 нужно указывать $N = 4$ вместо $N = 3$. Последние два абзаца на стр. 95 повторяются. Для читателя диссертационной работы было бы удобным, если бы строки табл. 3.1 были пронумерованы.

Вышеперечисленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы, написанной четким и ясным научным языком.

10. Заключение

Диссертационная работа «Оптимизация эффективности нелинейной генерации второго порядка в поверхностных слоях сферических и цилиндрических частиц», представленная Толкачёвым Антоном Игоревичем на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, является завершенной квалификационной работой, удовлетворяющей требованиям ВАК Республики Беларусь. Ее автор заслуживает искомой ученой степени за следующие новые научно обоснованные результаты:

– исследование влияния поляризации излучения возбуждающего пучка на энергетические характеристики излучения второй гармоники, генерируемой в поверхностных слоях сферических и цилиндрических частиц, и определение оптимальных параметров, при которых интенсивность излучения удвоенной частоты максимальна;

– разработанную концепцию линейной метаструктуры из эквидистантных цилиндрических частиц, при реализации которой становится возможным увеличение интенсивности второй гармоники в заданных направлениях;

– математическую формулировку модели генерации удвоенной частоты в поверхностных слоях диэлектрических частиц, основанную на использовании нескольких когерентных пучков возбуждающего излучения, позволяющую повысить эффективность преобразования энергии во вторую гармонику;

– разработку методов определения компонент тензора нелинейной восприимчивости молекулярных слоев, адсорбированных на поверхностях сферических частиц, образующих коллоидный раствор, с использованием принципиальной схемы, основанной на возбуждении генерации двумя когерентными пучками накачки.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой теоретической
физики и астрофизики Белорусского
государственного университета,
доктор физико-математических наук,
профессор

А.Н. Фурс

28.02.2023

Я, Фурс Александр Николаевич, даю согласие на размещение данного отзыва на официальном сайте Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины в глобальной компьютерной сети Интернет.

(подпись)

А.Н. Фурс

28.02.2023

