

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Леонтьева Андрея Александровича на тему: «Исследование статистических свойств оптико-терагерцовых бифотонных полей» по специальности 1.3.19. – Лазерная физика

Диссертационная работа А. А. Леонтьева посвящена определению условий наблюдения и прямого измерения квантовых корреляций оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света.

Изучение эффектов и явлений, имеющих отношение к терагерцовому диапазону частот электромагнитного излучения, на данный момент времени является одним из передовых направлений фундаментальной и прикладной науки. Многие научные исследования и разработки современных технологий терагерцового диапазона остаются еще слабо развитыми относительно электромагнитного излучения микроволнового и оптического диапазонов частот.

Использование терагерцового излучения требует создания подходящего инструментального оборудования для приготовления и детектирования волн этого диапазона. Большинство существующих на данный момент источников терагерцового излучения представляют собой источники с классической статистикой. И хотя некоторые классические излучения могут обладать такими же корреляционными свойствами, как и квантовые излучения (например, тепловое излучение и бифотонное), возможность реализации терагерцового излучения с квантовой статистикой видится естественным развитием квантовой оптики и квантовых вычислений. Проведенные А. А. Леонтьевым исследования позволили частично начать этот путь: были получены аналитические выражения для корреляционной функции терагерцового бифотонного излучения, просчитаны оценки

значений апертуры приемников излучения. Помимо этого предложены методы статистической обработки сигналов с болометра и ЛФД детектора, позволяющие в собранной впоследствии экспериментальной установке впервые напрямую измерить корреляционную функцию для оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при параметрическом рассеянии света. Проведенные исследования, безусловно, определяют **актуальность** диссертационной работы, как с научной, так и с практической точки зрения.

Диссертация А. А. Леонтьева состоит из введения, четырёх глав и заключения.

Во введении обосновывается выбор темы диссертационной работы и её актуальность, формулируются цели работы, приводятся выносимые на защиту положения, представлены данные по апробации вошедших в диссертацию результатов, описывается структура диссертации.

В первой главе приводится подробный обзор литературных источников, связанных с генерацией и детектированием источников терагерцового излучения. Рассматриваются конкретные способы генерации терагерцового излучения (на классической статистике), основанные на различных физических платформах. Подробно описаны методы детектирования терагерцового излучения, в частности, лазерно-индуцированное, оптическое детектирование, детектирование болометром, а также показаны их достоинства и недостатки. В рамках квантовой оптики кратко обсуждаются критерии неклассичности излучения и свойства бифотонных полей, получаемых в процессе спонтанного параметрического рассеяния света.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию корреляционных параметров оптико-терагерцовых бифотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света. На основе обобщенного закона Кирхгофа получено аналитическое выражение для корреляционной функции второго порядка, в которой можно отдельно выделить классическую часть, не зависящую коэффициента усиления, и квантовую

часть, включающую в себя зависимость от температуры кристалла и частот холостых фотонов в терагерцовом диапазоне. За счёт анализа параметра Фёдорова для угловых характеристик оптико-терагерцового бифотонного поля численно рассчитаны оценки оптимальных апертур детекторов для измерения корреляционной функции второго порядка.

В третьей главе представлено экспериментальное исследование статистических свойств оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых на основе спонтанного параметрического рассеяния света. Показано, что можно уменьшить величину коэффициента параметрического усиления без существенной потери в величине регистрируемых сигналов на терагерцовой частоте. Разработаны методики измерения токовых показаний детекторов терагерцового и оптического излучения в условиях малого и контролируемого числа падающих фотонов в установке параметрического рассеяния света.

Четвертая глава посвящена экспериментальному измерению величины корреляционной функции второго порядка для оптических и терагерцовых фотонов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

К наиболее **важным и значимым результатам**, определяющим новизну и оригинальность диссертационной работы А. А. Леонтьева, на мой взгляд, можно отнести следующие результаты:

1. Разработана теоретическая модель, описывающая статистические свойства терагерцовых бифотонных полей, с учётом неидеальностей данного вида излучения: поглощения волн на терагерцовых частотах, тепловых флуктуаций и многомодового характера излучения.
2. Разработана схема экспериментальной установки по генерации и измерению корреляционной функции оптико – терагерцовых бифотонов.

3. Впервые проведены прямые измерения корреляционной функции второго порядка для оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при параметрическом рассеянии света.

Практическая значимость теоретических и экспериментальных результатов, полученных в ходе определения условий наблюдения и прямого измерения квантовых корреляций оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света, заключается в дальнейшей реализации квантово-оптических технологий в терагерцовом диапазоне частот электромагнитного излучения.

Следует отметить комплексный подход к проведённым автором исследованиям. Леонтьев А. А. принимал участие в постановке задач исследования, в проведении теоретических расчётов по задачам диссертации, проведении оригинальных экспериментальных работ с использованием современного оборудования. Использование широкого спектра методов исследований позволило решить несколько принципиальных задач в области фундаментальной и прикладной квантовой оптики.

По диссертационной работе имеются **следующие замечания**:

1. Пункт 1.3 логично было бы дополнить еще одним операциональным критерием неклассичности света, а именно Q -параметром Манделя, также определяющимся через дисперсию и математическое ожидание числа фотонов.
2. Представленные на рисунке 4.1 экспериментальные результаты и теоретическая аппроксимация не очень хорошо согласуются друг с другом. В тоже время теоретическая кривая построена на известном выражении (4.3), которое не учитывает влияние неидеальностей экспериментальной установки. Не совсем понятно, почему для аппроксимации не использовалось общее выражение для квантовой «добавки» к корреляционной функции, полученное аналитически во второй главе диссертации (выражение (2.29)).

3. Несколько не ясна причина оценки погрешности измерения корреляционной функции (рисунок 4.1) исходя только из среднестатистического разброса полученных данных. На мой взгляд, можно было бы использовать выражение (2.29) для более корректной оценки ошибок.
4. Представленные в работе методы дискриминации шумового сигнала расписаны довольно подробно. С другой стороны, влияние мертвого времени ЛФД детектора на измерение корреляционной функции при увеличении мощности накачки рассмотрено поверхностно и не совсем очевидно.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. – лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Леонтьев Андрей Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, центр квантовых технологий Физического факультета,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова»

Авосопянц Грант Владимирович

Контактные данные:

тел.: , e-mail: avosopiants.gv@quantum.msu.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинские горы 1, стр. 35,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный университет имени М.
В. Ломоносова», Центр квантовых технологий Физического факультета

Тел.: 8 (495) 939-43-72; e-mail: avosopiants.gv@quantum.msu.ru

Подпись сотрудника центра квантовых технологий Физического факультета МГУ им.
М.В. Ломоносова Г.В. Авосопянца удостоверяю: