

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

Диссертационная работа Леонтьева Андрея Александровича посвящена комплексному теоретическому и экспериментальному исследованию корреляций оптических и терагерцовых фотонов, возникающих в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в сильно невырожденном по частоте режиме. Диссертационная работа актуальна, поскольку в ней впервые исследуются корреляции между оптическими и терагерцовыми фотонами, то есть фотонами, частоты которых различаются на два порядка. До настоящего времени исследовались корреляции оптических бифотонов, причем этой тематике посвящено большое количество известных работ. Поскольку большинство методик генерации терагерцового излучения основано на взаимодействии лазерного (оптического) излучения с веществом, учет оптико-терагерцовых бифотонных полей может привести к дальнейшему развитию как методов терагерцовой визуализации (imaging) и терагерцового зондирования (sensing), так и способов передачи и обработки информации с использованием терагерцового излучения (6G networks).

Диссертационная работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок, 2 таблицы и состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка литературы.

**В первой главе** рассмотрены различные методы генерации и детектирования терагерцового излучения. Особый упор делается на лазерные методы генерации и детектирования с помощью нелинейно-оптических кристаллов и полупроводниковых антенн. Среди нелазерных методов регистрации особое внимание уделено сверхпроводящим болометрам. Именно эти методики используются в экспериментальной части диссертационной работы. Далее в этой же главе содержится обзор основных сведений из квантовой оптики, позволяющих разделить случаи неклассических и классических корреляций. Например, рассмотрены случаи субпуассоновской и сверхпуассоновской статистики света. В конце главы содержится обзор экспериментальных работ, посвященных исследованию корреляций оптико-оптических бифотонов, генерируемых в процессе спонтанного параметрического рассеяния света, а также более прикладным областям,



таким как квантовая визуализация, квантовое зондирование и спектроскопия спонтанного параметрического рассеяния света.

**Во второй главе** содержится теоретическое исследование оптико – терагерцовых бифотонов. На основании обобщенного закона Клышко – Кирхгофа выведена формула для корреляционной функции второго порядка по интенсивности в случае импульсной гауссовой накачки с учетом поглощения терагерцового излучения в нелинейно-оптическом кристалле. На основании выведенной формулы получены следующие результаты, которые наиболее важны для экспериментальной регистрации корреляций. Показано, что отношение теплового равновесного вклада к квантовому растет при увеличении частоты с ростом температуры. На основании данного расчета выделены области терагерцовых частот и температур, при которых рекомендуется экспериментально регистрировать корреляции между оптическими и терагерцовыми фотонами для уменьшения вклада тепловых равновесных флуктуаций, вносящих деструктивный вклад в величину корреляций. Далее следует отметить, что корреляционная функция второго порядка по интенсивности в зависимости от частоты имеет максимум при фиксированной температуре. Численно рассмотрен случай зависимости величины корреляций от апертуры терагерцового детектора. На основе приведенных расчетов можно осуществить выбор оптимального режима регистрации корреляций оптических и терагерцовых фотонов.

**Во третьей главе** следует выделить два блока экспериментальных исследований. Первый блок посвящен экспериментальной работе по переходу от режима параметрического усиления к режиму спонтанного параметрического усиления в случае регистрации в аналоговом режиме. В частности, подробно описана оригинальная экспериментальная установка для регистрации терагерцового излучения с помощью сверхпроводящего болометра. Показано, что переход на вторую гармонику накачки позволяет перейти в режим спонтанного усиления без потери в величине регистрируемых сигналов. Вторая часть экспериментальной работы посвящена исследованию отклика сверхпроводящего болометра, регистрирующего терагерцовое излучение, а также токовых показаний фотоэлектронного умножителя, регистрирующего оптическое излучение и показания лавинного фотодиода. Все вышеуказанные методы регистрации имеют аналоговый характер. Для болометра и фотоэлектронного умножителя, на основании модели гауссового распределения токовых показаний при пуассоновской статистике фотоотчетов, проведена аппроксимация статистического распределения токовых показаний выше указанных детекторов. Данная аппроксимация позволила автору получить зависимость



количества фотоотчетов от мощности накачки. Данная зависимость согласуется с зависимостью, полученной с помощью формулы, известной из ранее проведенных исследований спонтанного параметрического рассеяния света. Данная часть исследования дает толчок для дальнейших исследований, которые могут быть связаны с калибровкой терагерцовых и оптических детекторов в аналоговом режиме. В конце главы приведены графики токовых показаний лавинного фотодиода в случае включенной и выключенной накачки. Данные графики показывают область влияния приборных шумов, что позволяет в дальнейшем исключить их влияния при регистрации корреляций.

**В четвертой главе** приведены экспериментальные исследования корреляций оптических и терагерцовых фотонов. Впервые в мире автором получена зависимость нормированной корреляционной функции второго порядка оптико-терагерцового бифотонного поля по интенсивности от мощности накачки. Показано, что данный график обратно пропорционален квадрату коэффициента параметрического усиления, что соответствует случаю спонтанного параметрического рассеяния света. При регистрации корреляций использовался лавинный фотодиод, что позволило отсеять приборные шумы от однофотонного пика, тем самым правильно учесть влияние шумов. Далее приведены двумерные зависимости эффективной корреляционной функции от токовых показаний болометра и фотоэлектронного умножителя при различных мощностях накачки. В случае фотоэлектронного умножителя нельзя однозначно выделить область влияния шумов. Поэтому была проведена процедура пошаговой дискриминации шумов, что позволило увеличить величину корреляций.

**В заключение** диссертации были сделаны основные выводы диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе Леонтьева А.А., не вызывает сомнений. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием различных методов измерения параметров исследуемых структур, приводящих к идентичным результатам. Теоретические расчёты и экспериментальные результаты также согласуются между собой.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что полученные в диссертационной работе результаты создают основу для дальнейших работ в области квантовых оптико-терагерцовых разработок таких как, квантовая визуализация, квантовое зондирование и калибровка детекторов в терагерцовом диапазоне частот излучения.

**Научная новизна результатов работы:**



Разработан теоретический подход, основанный на обобщенном законе Клышко – Кирхгофа, позволивший получить аналитическое выражение для нормированной корреляционной функции второго порядка по интенсивности для оптико-терагерцового бифотонного поля в многомодовом случае с учетом поглощения нелинейным кристаллом на терагерцовых частотах. Создан метод экспериментальной обработки токовых показаний оптических и терагерцовых детекторов, работающих в аналоговом режиме, который позволяет определять количество элементарных фотоотсчетов, регистрируемых детекторами. Разработана и успешно реализована схема экспериментальной установки по генерации и детектированию оптико-терагерцовых бифотонных полей, в которой впервые осуществляется прямое измерение корреляционной функции бифотонов данного типа.

**По представленной диссертации можно сделать ряд вопросов и замечаний:**

1. При постановке задачи не обоснована необходимость проведения теоретического исследования влияния многомодового характера детектируемых полей на величину корреляционной функции.
2. Неясна особенность гистограмм токовых показаний ФЭУ именно при регистрации спонтанного параметрического рассеяния, как это отмечено во втором защищаемом положении; гистограммы выглядят как классические паспортные характеристики ФЭУ.
3. В чем преимущества оптико-терагерцового бифотона по сравнению с ТГц-ТГц бифотоном для задач терагерцовой сенсорики или визуализации?
4. В работе показано, как на основе детектирования холостого и сигнального фотонов определить корреляционную функцию оптико-терагерцового бифотона. Представляется, что для использования предложенной методики для применений в сенсорике или визуализации, необходимо решать обратную задачу, то есть по имеющейся информации об объекте в оптическом диапазоне, а также корреляционной функции получить информацию об объекте в терагерцовом диапазоне. Каким образом можно это сделать?
5. В работе имеются грамматические и синтаксические ошибки. На рисунках, относящихся к собственным результатам, обозначение осей представлено то на русском, то на английском языке.

Вышеуказанные замечания не снижают общий высокий уровень работы и не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертационная работа Леонтьева А.А. является законченным научным исследованием,

формирующим дальнейшее направление для исследований квантовых особенностей терагерцового излучения.

Содержание автореферата Леонтьева А.А. соответствует содержанию диссертации.

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, 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:**

\_\_\_\_\_ **Е.Д. Мишина**

Мишина Елена Дмитриевна, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Фемтосекундная оптика для нанотехнологий», кафедры наноэлектроники РТУ МИРЭА

тел.: +7(495)215-65-65, e-mail:  
доб. 3026

ФГБОУ ВО МИРЭА - Российский технологический университет  
119454 Россия, г. Москва, пл. проспект Вернадского, д. 78  
тел.: +7(495)215-65-65, доб. 3026, e-mail: [mirea@mirea.ru](mailto:mirea@mirea.ru).