

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

Леонтьев Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦОВЫХ БИФОТОННЫХ ПОЛЕЙ**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научный руководитель**

**Китаева Галия Хасановна**

доктор физико-математических наук,  
доцент

**Официальные оппоненты**

**Мишина Елена Дмитриевна**

доктор физико-математических наук,  
профессор, ФГБОУ ВО «МИРЭА –  
Российский технологический  
университет», заведующий лабораторией

**Сазонов Сергей Владимирович**

доктор физико-математических наук,  
профессор, Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский  
институт», начальник отдела

**Авосопянц Грант Владимирович**

кандидат физико-математических наук,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»,  
Центр квантовых технологий физического  
факультета, научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «7» декабря 2023 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

E-mail: [diss.sov.31@physics.msu.ru](mailto:diss.sov.31@physics.msu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.4/2645>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета МГУ.013.4,  
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Терагерцовое излучение (или ТГц-излучение) относится к электромагнитному спектру с частотами, лежащими между инфракрасным излучением и радиоволнами. В последние десятилетия наблюдается колоссальный прогресс в области терагерцовой (ТГц) науки и технологий [1,2]. Использование терагерцового излучения наблюдается во многих областях, таких как биологические и медицинские исследования [3,4], ТГц спектроскопия, диагностика и обнаружение [5,6]. Применение данного типа излучения также развивает информационные технологии. Например, передача информации в современном мире в основном происходит по технологии 4G, то есть с частотой 2.6 ГГц. Однако на подходе массовое использование стандарта 5G [7], который будет работать на частотах достигающих 90 ГГц (0.09 ТГц), то есть частотах относящихся к субтерагерцовому диапазону. Также ещё в 2012 году был предложен ТГц канал связи, передающий информацию на частоте  $>100$  ГГц (0.1 ТГц) со скоростью передачи данных 10 Гбит/с [8]. Источником ТГц сигнала был InP транзистор с высокоподвижными электронами. Такое увеличение частоты передачи данных приводит к увеличению пропускной способности канала связи более чем на порядок.

Широкий горизонт использования ТГц излучения в различных областях, как научных, так и прикладных, требует создания адекватных приборов для генерации и детектирования волн этого диапазона. В Главе 1 будет дан обзор применяемых в настоящее время детекторов и генераторов ТГц излучения. Однако, несмотря на большое разнообразие существующих ТГц источников, все они являются источниками излучения с классической статистикой. Источников ТГц поля с ярко выраженными квантовыми свойствами (в частности, полей с нефлуктуирующим числом фотонов, генераторов сжатого ТГц излучения и т.д.) на данный момент практически не существует. А приемники, работающие в режиме счета ТГц фотонов, существуют только в качестве сложно эксплуатируемых лабораторных устройств [9]. Такие “квантовые особенности” излучения активно изучаются в квантовой оптике - дисциплине, исследующей квантовые свойства электромагнитного излучения [10]. Развитие данной дисциплины обусловлено использованием квантовых свойств излучения в криптографии [11-13], квантовой обработке информации [14], метрологических задачах [15]. От решения актуальных задач создания и исследования квантового ТГц излучения будет зависеть будущее развитие некоторых дисциплин и методов с приставкой “квантовая”: теория информации, зондирование, метрология в ТГц области спектра и т. д.

Первыми шагами в этом направлении стали научные исследования последних лет, выполненные на стыке квантовой оптики и терагерцовой науки. Проведены пионерские работы в области квантового зондирования на терагерцовых частотах (“quantum sensing”) [16], определения спектральной чувствительности нелинейно – оптических детекторов ТГц излучения по спектрам спонтанного параметрического рассеяния света [17]. Во всех этих работах происходила генерация оптико – терагерцовых бифотонов – квантово-коррелированных пар оптических и ТГц фотонов, возникающих в процессе спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света. Однако регистрировались только оптические компоненты бифотонных пар, степень корреляции оптических и терагерцовых фотонов не измерялась, не проводилось разделения классических и неклассических корреляций в оптической и терагерцовой части бифотонного излучения. Процесс СПР – один из основных источников бифотонного поля. Другим возможным примером использования бифотонов является процесс восстановления пространственного изображения объекта в холостом канале СПР, снабженном единственным однопиксельным пучковым детектором, по пространственно-разрешенным измерениям в сигнальном канале СПР [18, 19]. Данный процесс называется фантомной визуализацией (“Ghost imaging”). Для восстановления фантомного изображения с минимумом искажений желательно использовать сопряженные между собой сигнальные и холостые моды. Одним из экспериментальных высокочувствительных способов, показывающих точность сопряжения сигнальной и холостой угловых мод, является измерение величины кросскорреляций. В частности, нормированная корреляционная функция бифотонов также является примером количественной меры, определяющей степень неклассичности бифотонного поля – физической системы, широко используемой как в квантовой фантомной визуализации, так и в реализации многих других квантово-оптических технологий. Большое число работ посвящено измерению корреляций бифотонного поля СПР в случае, когда пара фотонов, составляющих бифотон, имеет близкие значения частот, обычно принадлежащих оптическому диапазону [20, 21]. Хорошо развита экспериментальная техника счета фотонов при регистрации оптических неклассических полей.

**Степень разработанности.** Однако работ, посвященных экспериментальному исследованию корреляционных свойств оптико – терагерцовых бифотонов, ранее не проводилось. Вплоть до начала данной работы, параметры неклассичности бифотонных полей с терагерцовой

составляющей не измерялись. Во многом это связано с тем, что в ТГц области счетчиков ТГц фотонов практически нет в широком использовании и прямой перенос квантово-оптических технологий в ТГц область невозможен. Дальнейшее исследование и использование оптико – терагерцовых бифотонных полей требует создания новой экспериментальной базы, основанной на применении аналоговых методов для регистрации квантовых свойств бифотонных полей.

Таким образом, исследование квантовых статистических свойств оптико-терагерцовых бифотонных полей и способов их регистрации является актуальной задачей для развития квантово-оптических технологий в терагерцовом диапазоне частот.

**Целью диссертационной работы** являлось определение условий наблюдения и прямого измерения квантовых корреляций оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света.

Для достижения названной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести теоретическое исследование влияния многомодового характера детектируемых полей, тепловых флуктуаций равновесного поля и поглощения нелинейного кристалла на терагерцовых частотах на величину корреляционной функции оптико-терагерцовых бифотонов.

2. На примере терагерцового болометра сверхпроводникового типа, а также оптических приемных модулей на основе ФЭУ или лавинного фотодетектора, исследовать статистические параметры аналогового отклика детекторов терагерцового и оптического излучения и их связь с числами дискретных фотоотчетов.

3. Разработать экспериментальную установку по генерации и детектированию оптико-терагерцовых бифотонных полей, а также алгоритм статистической обработки показаний оптического и терагерцового детекторов, необходимых для определения корреляционных параметров бифотонов.

4. Экспериментально осуществить прямые измерения корреляционной функции оптико-терагерцовых бифотонов.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются оптико – терагерцовые бифотоны, предметом исследования являются корреляции оптико – терагерцовых бифотонов.

### **Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:**

1. Разработана теоретическая модель, впервые описывающая статистические моменты оптико – терагерцовых бифотонных полей с учетом многомодового характера детектируемого излучения, тепловых флуктуаций поля и поглощения волн на терагерцовых частотах.

2. Разработана методика сбора и обработки статистических данных о флуктуациях токовых показаний детекторов оптического и терагерцового излучения в условиях регистрации сигнального и холостого излучения спонтанного параметрического рассеяния света, позволяющая определять числа дискретных фото-отсчетов детекторов в единицу времени.

3. Впервые разработана и успешно реализована схема экспериментальной установки по генерации, детектированию и измерению корреляционной функции оптико – терагерцовых бифотонов.

4. Впервые продемонстрирована возможность прямых измерений квантовых корреляций полей оптических и терагерцовых частот, генерируемых в процессе спонтанного параметрического рассеяния света в сильно частотно-невырожденном режиме.

### **Методология диссертационного исследования:**

При выполнении теоретических расчетов применялись методы матриц рассеяния и обобщенного нелинейного закона Клышко-Кирхгофа. При выполнении экспериментальных исследований применялись методы физической оптики, включая терагерцовую оптику, методы измерения частотно-угловых и корреляционных характеристик спонтанного параметрического рассеяния света, методы цифровой обработки сигналов детекторов электромагнитного излучения оптического и терагерцового диапазонов.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Применение нелинейного обобщенного закона Клышко-Кирхгофа позволяет одновременно учесть влияние многомодового состава поля, поглощения излучения и равновесных тепловых флуктуаций на холостых частотах на корреляционную функцию второго порядка бифотонов  $g^{(2)}$ , генерируемых при частотно – невырожденном СПР света и предсказать наличие максимума зависимости при уменьшении частоты холостого излучения в терагерцовом диапазоне. Максимум возникает как результат встречных процессов роста за счет уменьшения коэффициента параметрического усиления и числа поперечных мод излучения, и одновременного падения величины  $g^{(2)}$ ,

обусловленного усилением влияния тепловых флуктуаций поля на меньших частотах. Снижение коэффициента поглощения нелинейного кристалла при уменьшении частоты оказывает значительно меньшее влияние на спектральную зависимость  $g^{(2)}$ .

2. Анализ гистограмм токовых показаний ФЭУ и сверхпроводникового ТГц болометра при регистрации спонтанного параметрического рассеяния, проведенный в предположении о Гауссовом распределении элементарных фототоков, возникающих на выходе детектора при регистрации дискретных фото-отсчетов, позволяет определить среднее число данных фото-отсчетов за время регистрации показаний и исследовать характер его зависимости от числа падающих фотонов.

3. Увеличение частоты излучения лазерной накачки при спонтанном параметрическом рассеянии света позволяет наблюдать более высокие предельные уровни оптико-терагерцовых корреляций в схемах с одинаковыми шумовыми характеристиками терагерцового детектора. Метод пороговой дискриминации показаний аналоговых детекторов терагерцового и оптического трактов открывает возможность детектировать наличие неклассических оптико-терагерцовых корреляций за счет включения корреляционных функций высших порядков.

4. Разработанная экспериментальная схема регистрации и обработки набора статистических данных единовременных токовых показаний сверхпроводникового ТГц болометра и однофотонного фотоприемника на основе ЛФД, регистрирующих терагерцовую и оптическую части излучения СПР в области частот холостых волн 1 ТГц, генерируемого в охлажденном до температуры 4.8К кристалле  $Mg:LiNbO_3$  под действием наносекундных импульсов лазерной накачки с длиной волны 523 нм, позволяет проводить прямые измерения корреляционной функции интенсивностей оптико-терагерцового бифотонного поля.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, были получены при определяющем участии автора – дизайн, компоновка и юстировка оптических и электронных трактов экспериментальных установок совместно с К.А.Кузнецовым [A1 – A3], получение экспериментальных ([A1 – A3] совместно с К.А.Кузнецовым) и аналитических результатов ([A2, A4, A5] совместно с Г.Х. Китаевой) ([A2, A4] совместно с П.А. Прудковским), проведение численных расчетов (A1 –

единолично). Постановка задач и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

**Достоверность** результатов экспериментальных исследований обеспечивается использованием сертифицированных приборов и средств измерения, контрольными измерениями, высокой воспроизводимостью результатов измерений. Достоверность теоретических результатов обеспечивается использованием апробированных методов теоретической физики, обоснованностью выбранных моделей. Положения и выводы диссертации прошли апробацию на российских и международных научных конференциях. Полученные результаты не противоречат существующим литературным данным. Достоверность результатов диссертационной работы также подтверждается публикацией результатов исследований в ведущих рецензируемых научных изданиях.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Полученные в диссертационной работе результаты создают основу для реализации квантово-оптических технологий в ТГц диапазоне частот электромагнитного излучения. В частности, для решения следующих практических задач:

1. Разработка методов безэталоной калибровки квантовой эффективности, определения ампер-ваттной чувствительности и других параметров отклика ТГц детекторов.
2. Создание источников одиночных фотонов ТГц диапазона.
3. Развитие методов построения изображений скрытых объектов в терагерцовых лучах.

#### **Апробация результатов диссертационной работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на трех профильных международных научных конференциях:

1. 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2021, Ченгду (Сычуань), Китай, 29 августа – 3 сентября 2021 г.
2. 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2020, Буффало, США, 8 ноября – 13 ноября 2020 г.
3. 19th International Conference on Laser Optics “ICLO 2020”, Санкт-Петербург, Россия, 02 ноября - 06 ноября 2020 г.



**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 10 печатных работах в изданиях, Из них 5 работ – статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus и RSCI.:

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы, защищаемые положения, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сообщается о методологической базе исследования и личном вкладе автора, приведен список основных публикаций по теме диссертации и конференций, на которых проводилась ее апробация.

В **первой главе** изложена основная часть обзора литературы по теме диссертации. В разделах 1.1 и 1.2 приводится краткое описание наиболее распространенных методов и устройств, разработанных к настоящему времени для генерации и детектирования излучения терагерцовых частот. По теме генерации ТГц волн основное внимание уделено методам лазерной генерации, лазерно-индуцированной генерации в фотопроводящих антеннах и нелинейно-оптических кристаллах. Проведен сравнительный анализ принципов работы и параметров детекторов на основе ячейки Голея, пироэлектрического приемника, термопары и различного вида болометрических устройств. В разделе 1.3 обсуждаются определения и критерии неклассического света, как общего вида, так и применительно к бифотонному излучению, генерируемому при спонтанном параметрическом рассеянии. В Разделе 1.4 дано краткое описание основных свойств бифотонных полей и методов характеризации их квантовых параметров с помощью нормированной корреляционной функции второго порядка. Приводится обзор проведенных ранее исследований свойств оптико-терагерцовых бифотонных полей, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света в сильно частотно-невырожденном режиме.

**Вторая глава** посвящена теоретическому исследованию корреляционных параметров оптико-терагерцовых бифотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света. В Разделе 2.1 последовательно проведен расчет матрицы рассеяния нелинейного кристалла, заполненного излучением сфокусированной лазерной накачки. Элементы матрицы описывают

преобразование операторов входных полей плоских мод сигнальных и холостых частот в кристалле в условиях многомодовой накачки с Гауссовым профилем пространственного распределения амплитуды напряженности поля. Определение элементов необходимо для последующего применения обобщённого нелинейного закона Клышко-Кирхгофа, позволяющего определить вторые моменты выходных полей параметрического рассеяния в условиях, когда поглощением кристалла и присутствием тепловых флуктуаций поля на холостых (в данном случае, терагерцовых) частотах нельзя пренебречь. Выражения для таких моментов, включая средние числа фотонов в сигнальных (оптических) и холостых модах, а также среднее от произведения операторов уничтожения сигнальных и холостых фотонов, получены в следующем Разделе 2. Здесь же приведен пример численного расчета угловых распределений интегральной спектральной плотности чисел сигнальных и холостых фотонов, проделанного на основании полученных выражений для случая параметрического рассеяния в кристалле  $\text{Mg:LiNbO}_3$  при комнатной температуре, для частот холостых фотонов 0.1 ТГц (Рис. 1а, 1с) и 1 ТГц (Рис. 1б, 1д).

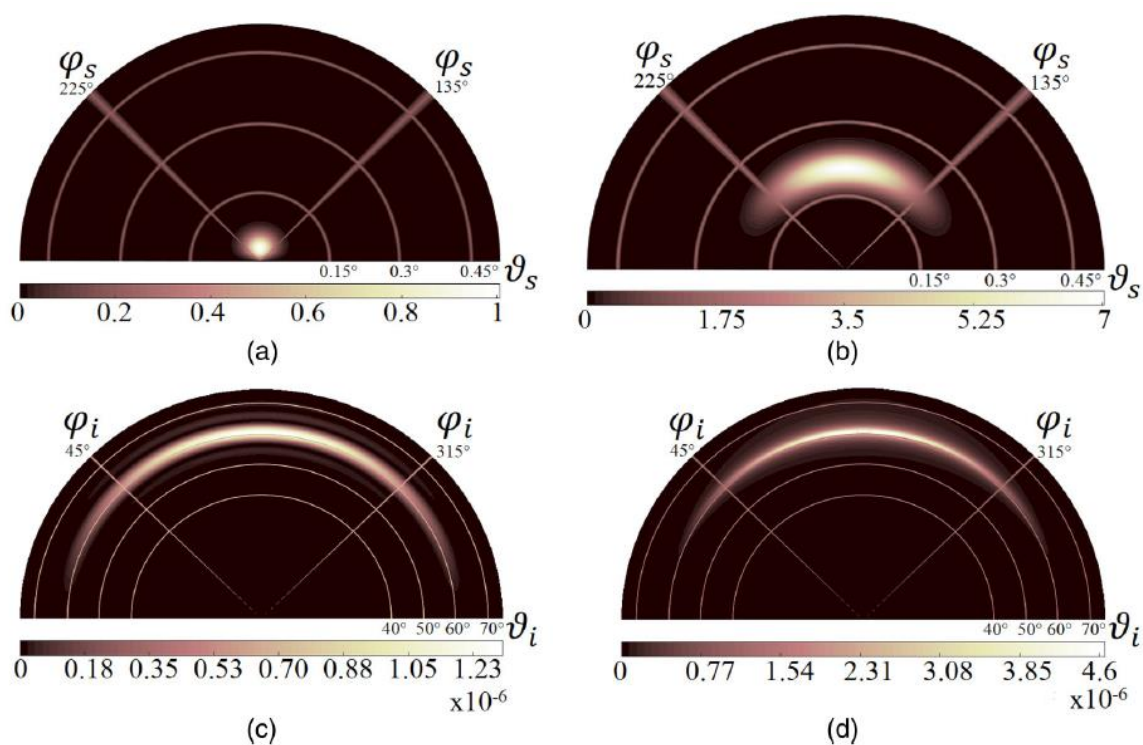


Рис.1. Угловые распределения спектральной плотности сигнальных [(a), (b)] и холостых [(c), (d)] фотонов, генерируемых при СПР типа 0 в кристалле  $\text{Mg:LiNbO}_3$  при комнатной температуре.

В Разделе 2.3 получено общее аналитическое выражение для расчета квантового вклада в корреляционную функцию  $g^{(2)}$  бифотонного поля, генерируемого при частотно-невырожденном процессе СПР, с учетом многомодового характера нелинейно-оптического взаимодействия ( $M_{\parallel}$  - число продольных мод,  $m_{\perp s}$  и  $m_{\perp i}$  - угловые плотности поперечных мод на фиксированных сигнальной и холостой частотах), наличия равновесного теплового излучения (со средним числом фотонов в моде  $\langle N_T \rangle$ ) и поглощения нелинейного кристалла на холостых частотах:

$$g_q^{(2)} \equiv g^{(2)} - 1 = \frac{1}{\tilde{G}M_{\parallel}} \cdot \frac{\int_{\Delta\Omega_s} d\Omega_s \int_{\Delta\Omega_i} d\Omega_i |F_{is}|^2}{\left( m_{\perp i} \int_{\Delta\Omega_s} d\Omega_s \int_{\Delta\Omega_i} d\Omega_i \kappa_{i's} |F_{i's}|^2 \right) \cdot \left( \Theta + m_{\perp s} \int_{\Delta\Omega_i} d\Omega_i \int_{\Delta\Omega_s} d\Omega_s |F_{is'}|^2 \right)}. \quad (1)$$

Здесь функции  $F_{is}$  описывают амплитуды бифотона при наличии поглощения холостых волн в кристалле, интегрирования ведутся по телесным углам, соответствующим детектируемым ( $\Omega_i, \Omega_s$ ) модам и модам, параметрически связанным с ними ( $\Omega_s', \Omega_i'$ );  $\tilde{G}$  - коэффициент параметрического усиления (по

числу фотонов). Параметр  $\Theta \equiv \frac{\Delta\Omega_i \mathcal{S}}{\tilde{G}\pi w_p^2} \cdot \frac{\langle N_T \rangle}{1 + \langle N_T \rangle}$  определяет деструктивный вклад

тепловых флуктуаций в корреляционную функцию.

Полученное соотношение (1) положено в основу анализа зависимости квантовой части корреляционной функции  $g_q^{(2)}$  от температуры кристалла и частоты холостых фотонов в терагерцовом диапазоне. Результаты расчетов приведены в Разделе 2.4. Показано, что влияние тепловых флуктуаций равновесного поля на терагерцовых частотах вносит больший вклад в падение величины квантовых корреляций функции  $g_q^{(2)}$ , чем эффекты поглощения фотонов на этих частотах (Рис.2).

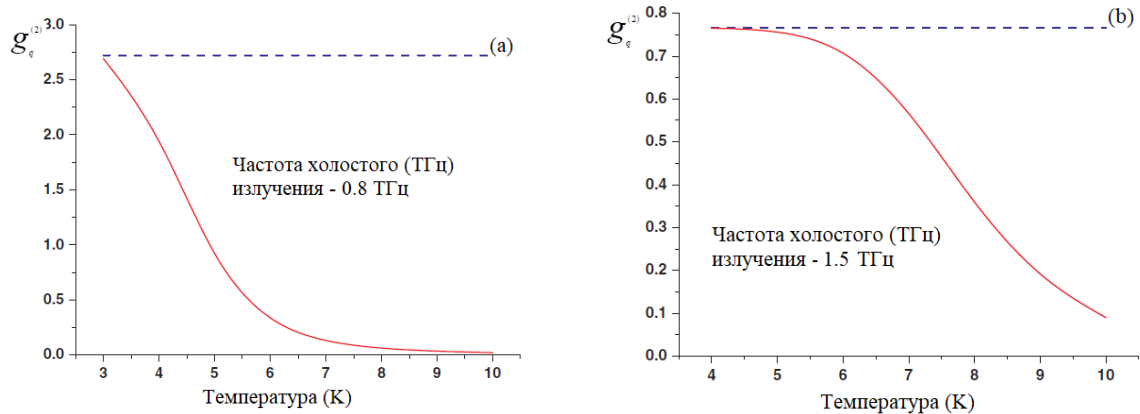


Рис.2. Температурные зависимости  $g_q^{(2)}$ , рассчитанные с учетом (красная сплошная линия) и без учета (синяя пунктирная линия) тепловых флуктуаций  $\Theta$  на холостой частоте 0.8 THz (a) и 1.5 THz (b) для взаимодействия типа 0 в кристалле Mg:LiNbO<sub>3</sub> длиной  $L=1$  см, число продольных детектируемых мод  $M_{\parallel}=400$ , длина волны накачки 523.3 nm, радиус накачки  $w_p=300$   $\mu\text{m}$ , интенсивность 44 kW/cm<sup>2</sup>.

Обнаружено, что зависимость  $g_q^{(2)}$  от частоты холостого излучения СПР в терагерцовом диапазоне имеет максимум (Рис.3), возникающий в результате роста  $g_q^{(2)}$ , вызванного снижением коэффициента параметрического усиления и числа поперечных мод излучения при уменьшении частоты, а также встречного эффекта уменьшения  $g_q^{(2)}$ , обусловленного усилением влияния тепловых флуктуаций поля на меньших частотах.

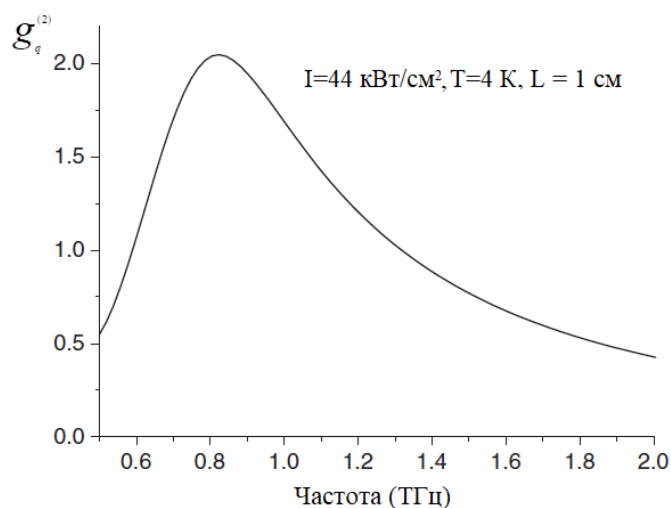


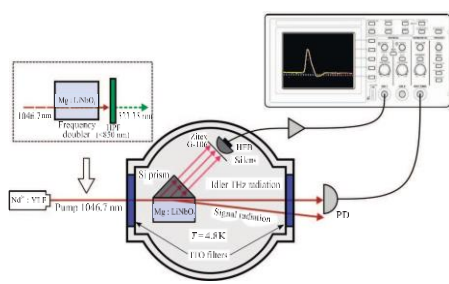
Рис.3. Зависимость  $g_q^{(2)}$  от частоты холостого излучения. Температура кристалла 4 К, длина 1 см, интенсивность накачки 44kW/cm<sup>2</sup>.

В Разделе 2.5 проведена численная оценка оптимальных апертур детекторов для регистрации нормированной корреляционной функции второго порядка. На

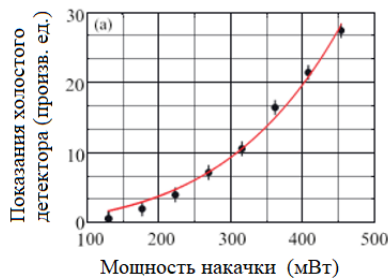
основании анализа параметра Федорова для угловых характеристик оптико-терагерцового бифотонного поля показано, что число эффективных пространственных азимутальных мод линейно растет с терагерцовой частотой холостого излучения, тогда как число эффективных полярных мод практически не меняется и близко к 1. Величина  $g_q^{(2)}$  может быть увеличена за счет уменьшения азимутальных угловых апертур детекторов холостого и сигнального излучения СПР до значений, соответствующих одномодовому детектированию. Дальнейшее уменьшение полярных угловых апертур также должно приводить к росту  $g_q^{(2)}$ , связанному со снижением негативного влияния тепловых флуктуаций.

В третьей главе описаны эксперименты по генерации, регистрации и исследованию статистических свойств оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии света.

В Разделе 3.1 обсуждаются экспериментальные условия, необходимые для регистрации максимально высоких отношений сигнал/шум при детектировании терагерцовых фотонов в режиме слабого усиления, когда корреляции в бифотонном поле максимальны, но числа регистрируемых фотонов малы и показания ТГц детектора могут быть близки к шумовым. Предложен подход, позволяющий с помощью одного и того же детектора с ограниченным динамическим диапазоном регистрировать терагерцовое излучение параметрического рассеяния света в различных интервалах изменения коэффициента параметрического усиления. Этот подход основан на изменении длины волны оптической накачки. Для подтверждения выдвинутой идеи исследованы зависимости показаний сверхпроводникового ТГц болометра от мощности лазерной накачки при параметрическом рассеянии в кристалле  $Mg:LiNbO_3$  в условиях различных длин волн накачки – на частотах первой и второй гармоники твердотельного наносекундного  $Nd^{3+}:YLF$ - лазера (Рис.4). Показано, что переход на вторую гармонику излучения лазера накачки позволяет уменьшить величину коэффициента параметрического усиления без существенной потери в величине регистрируемых сигналов на терагерцовой частоте. Это создает предпосылки для наблюдения более высокого уровня оптико-терагерцовых корреляций в экспериментальной схеме со сверхпроводниковым терагерцовым болометром.



(a)



(б)



(в)

Рис.4 (а): Схема экспериментальной установки для генерации оптико-терагерцовых бифотонов и регистрации мощности холостого излучения терагерцовой частоты при ПР в двух режимах, на длинах волн накачки  $\lambda_p = 1046.7$  нм и  $\lambda_p = 523.35$  нм. (б)-(в): Зависимости мощности холостого излучения от мощности оптической накачки. Точки – экспериментальные значения, измеренные при длинах волн накачки– 1046.7 нм (б) и  $\lambda_p = 523.35$  нм (в). Линии – результаты аппроксимации.

В Разделе 3.2 описана экспериментальная установка, которая применялась в диссертации для измерения токовых показаний детекторов оптического (сигнального) и терагерцового (холостого) излучения параметрического рассеяния в кристалле  $Mg:LiNbO_3$  (Рис.5), а также процедура первичной обработки получаемых статистических наборов данных. Обсуждается предложенная методика измерения гистограмм статистических распределений токовых показаний детекторов терагерцового и оптического излучения в условиях малого и контролируемого числа падающих фотонов. Такая возможность появляется в установке параметрического рассеяния света, где пропорциональное изменение скорости потоков фотонов достигается путем изменения мощности излучения накачки нелинейного кристалла. Методика экспериментально реализована при получении гистограмм сверхпроводникового терагерцового болометра, оптических фотоприемников на основе аналогового ФЭУ и однофотонного ЛФД.

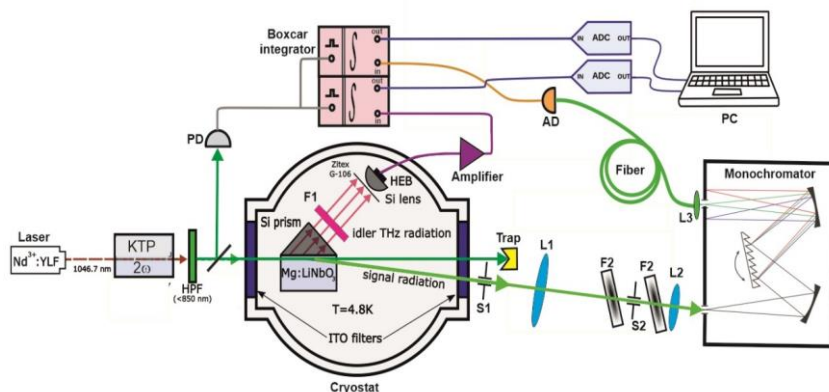


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для измерения токовых показаний детекторов сигнального и холостого излучения.

В Разделе 3.3 предложена модель для анализа статистических распределений токовых показаний  $I$  аналогового детектора

$$P(I) = e^{-\langle n \rangle} \sum_n \frac{\langle n \rangle^n}{n! \delta \sqrt{2\pi n}} e^{-\frac{(I - n \langle I \rangle)^2}{2n\delta^2}}, \quad (2)$$

в основе которой лежит предположение о Гауссовом распределении фототоков, формирующихся при регистрации отдельного фотоотсчета

$P_1(I) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(I - \langle I \rangle)^2}{2\delta^2}\right]$ , и учет пуассоновской статистики распределения чисел элементарных фотоотсчетов  $n$ .

В двух следующих разделах главы приводятся результаты статистического анализа показаний сверхпроводникового терагерцового болометра (Раздел 3.4) и оптических детекторов на основе аналогового ФЭУ и однофотонного ЛФД (Раздел 3.5).

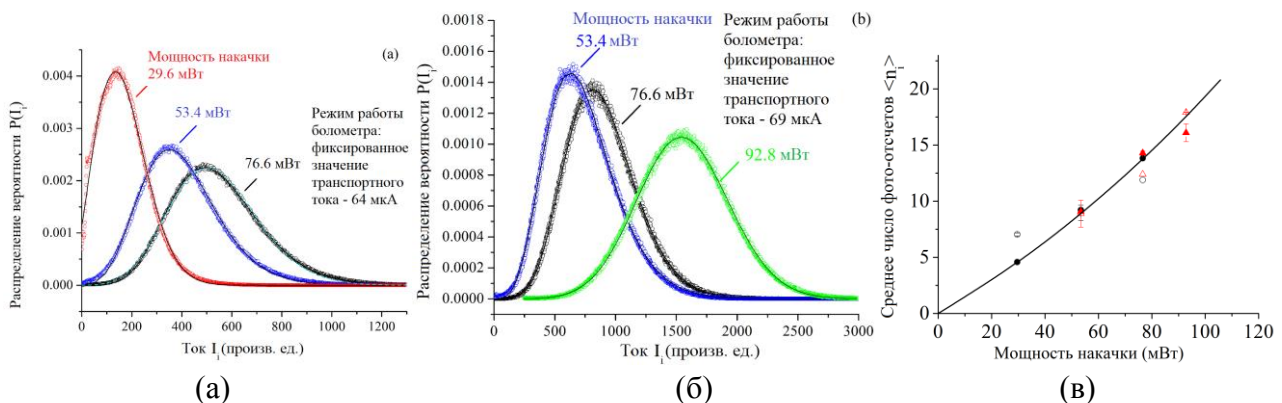


Рис.6. (а)-(б): Гистограммы  $P(I)$  при различных мощностях лазерной накачки и двух режимах работы ТГц болометра. (в): Среднее число отсчетов  $\langle n_i \rangle$ , полученное в результате моделирования, в зависимости от мощности лазерного излучения. Сплошная кривая - теоретическая зависимость числа фото-отсчетов, полученная с учетом единственного масштабирующего множителя.

Применение предложенной в диссертации модели при численной аппроксимации экспериментальных гистограммам сверхпроводникового терагерцового болометра (Рис.6) и аналогового ФЭУ позволило оценить величины средних чисел однофотонных отсчетов болометра и средних чисел фотоэлектронов, эмитируемых фотокатодом ФЭУ при поглощении единичных фотонов. Зависимости полученных средних чисел от мощности излучения накачки в схеме параметрического рассеяния хорошо согласуются с теоретическими зависимостями чисел фотонов, падающих на сигнальный и

холостой детекторы. Сравнительный анализ гистограмм распределений токовых показаний аналогового ФЭУ и ЛФД (Рис.7) показал, что использование однофотонного ЛФД для измерения корреляционной функции оптико-терагерцового поля СПР  $g^{(2)}$  предпочтительнее не только в счетном, но и в аналоговом режиме регистрации. Это объясняется возможностью более простой и однозначной дискриминации шумовых показаний аналогового детектора на основе счетного ЛФД.

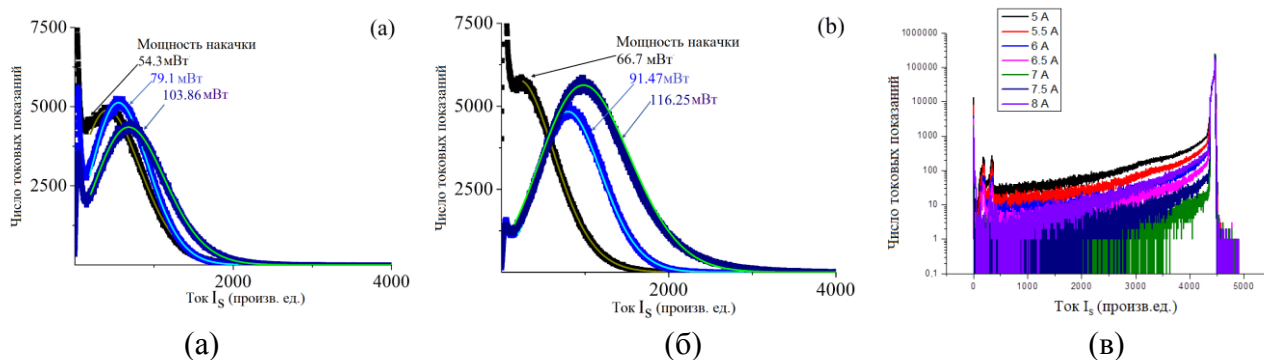


Рис.7. Гистограммы статистических распределений токовых показаний детекторов сигнального излучения, а)-(б): ФЭУ, (в): однофотонного ЛФД, при различных мощностях лазерной накачки.

**Четвертая глава** посвящена экспериментам по прямому измерению корреляционных функций оптико-терагерцовых бифотонных полей  $g^{(2)}$ . Величины  $g^{(2)}$  определялись для частот холостых фотонов в области 1 ТГц при различных значениях мощности накачки. Вычисления производились по формуле

$$g^{(2)} \equiv \frac{\langle N_s N_i \rangle}{\langle N_s \rangle \langle N_i \rangle} = \frac{\langle I_s I_i \rangle}{\langle I_s \rangle \langle I_i \rangle} \quad (3)$$

на основании измерения средних токов детекторов сигнального  $I_s$  и холостого  $I_i$  излучения и их произведения. Обсуждается общая схема экспериментальной установки (Рис.5) и анализируются две процедуры предварительной дискриминации ряда специфических аналоговых показаний детекторов оптического и терагерцового тракта, нацеленные на минимизацию влияния детекторных шумов.

В Разделе 4.1 описана процедура, для которой требуется использование в сигнальном тракте оптического детектора однофотонного типа в аналоговом режиме регистрации показаний. По результатам предварительной обработки гистограмм однофотонного детектора возможны определение уровня его



шумового сигнала и последующая дискриминация (“обнуление”) показаний аналогового терагерцового болометра, измененных одновременно с шумовыми показаниями оптического детектора. В качестве такого детектора применялся фотоприемник на основе лавинного фотодиода. Сообщается о результатах впервые проведенных прямых измерений величины корреляционной функции второго порядка  $g^{(2)}$  оптических и терагерцовых фотонов, генерируемых при параметрическом рассеянии света. Продемонстрировано согласие измеренных и теоретически предсказываемых зависимостей  $g^{(2)}$  от мощности излучения накачки (Рис.8), свидетельствующее о правомерности выбранного подхода к дискриминации шумовых показаний при измерении корреляционной функции второго порядка.

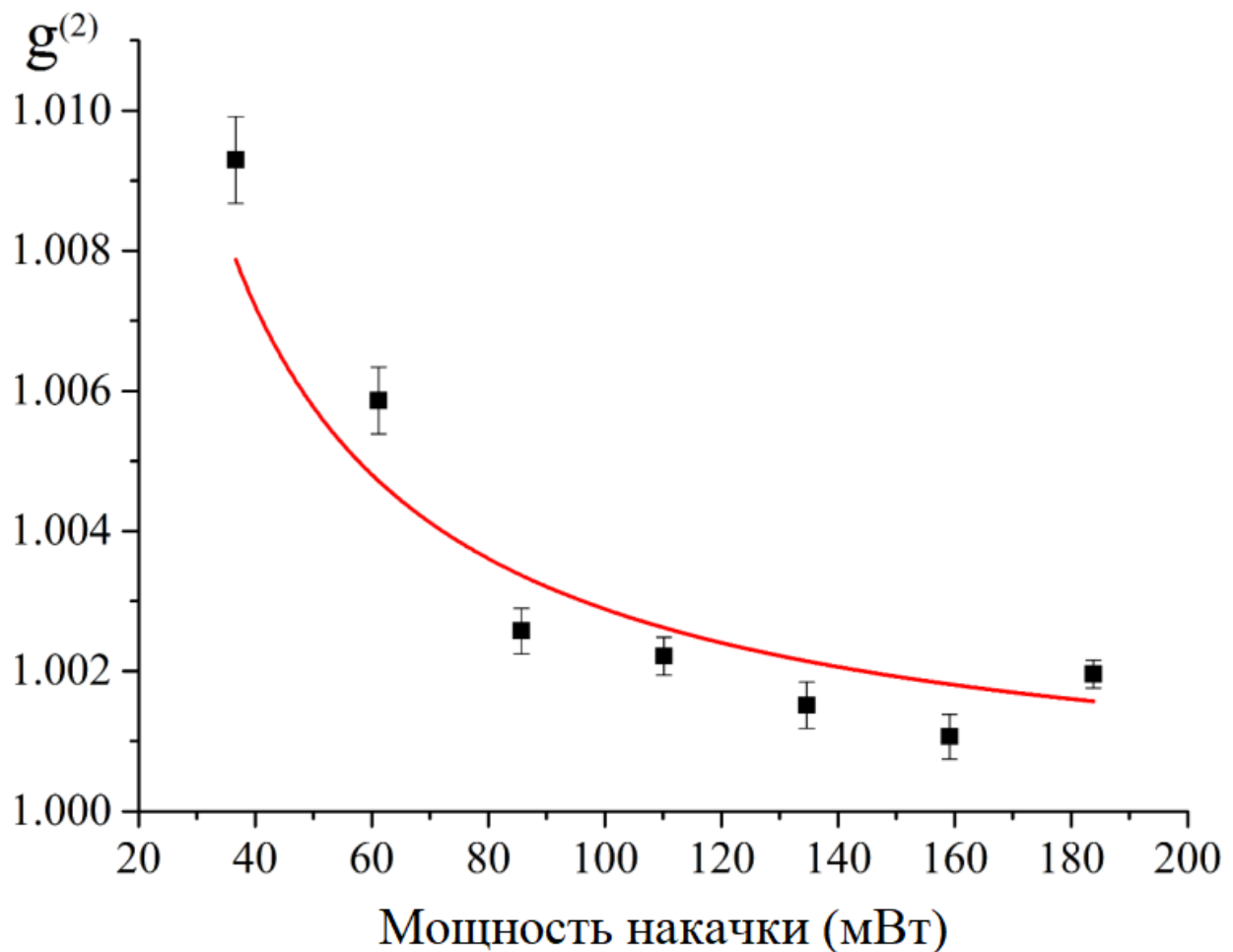


Рис.8. Зависимости нормированной корреляционной функции второго порядка по интенсивности  $g^{(2)}$  от средней мощности излучения накачки. Точки - измеренные значения и их среднестатистический разброс, кривая – результат теоретической аппроксимации.

В Разделе 4.2 приводятся описание и результаты применения метода пороговой дискриминации показаний двух аналоговых детекторов

терагерцового и оптического трактов. Суть метода состоит в исключении показаний детекторов, не превышающих некоторые заранее установленные пороги. Как показали исследования, выполненные при использовании аналогового ФЭУ в качестве детектора сигнального излучения, чем выше задаваемые значения пороговых токов, тем более высокая величина эффективной корреляционной функции может быть зарегистрирована (Рис.9).

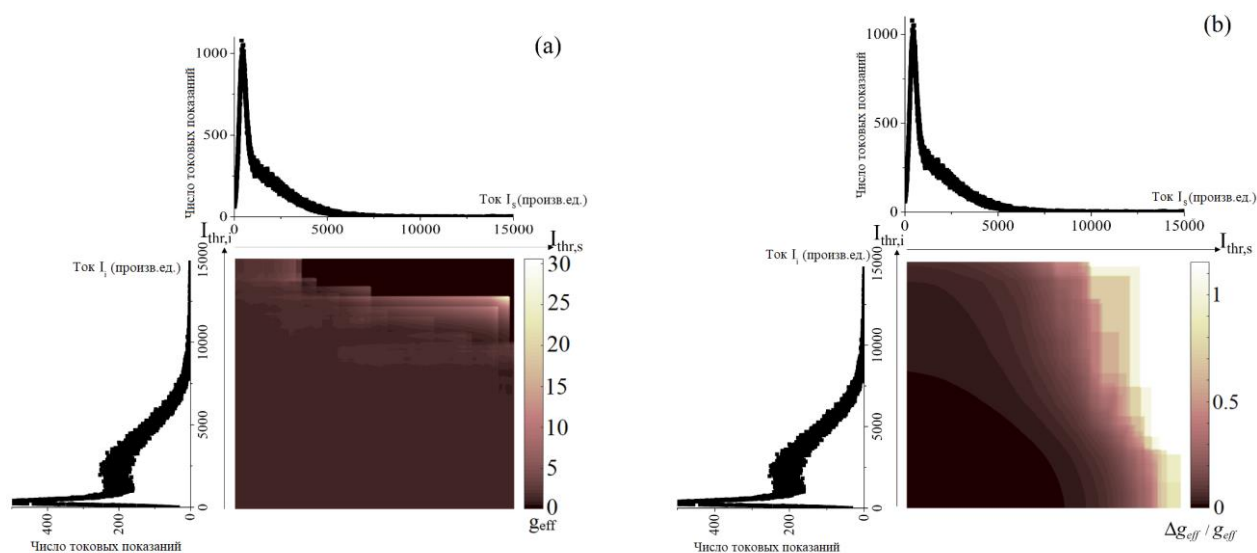


Рис. 9. График функции эффективной нормированной корреляционной функции  $g_{eff}$  (a) и относительной ошибки ее измерения  $\Delta g_{eff} / g_{eff}$  (b) от порогов дискриминации токовых показаний детекторов в сигнальном и холостом каналах. Мощность накачки 86 мВт.

Приводится анализ данного метода пороговой дискриминации, показывающий что метод позволяет однозначно детектировать наличие неклассических оптико-терагерцовых корреляций за счет включения корреляционных функций высших порядков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Основные результаты** диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1) С применением нелинейного обобщенного закона Клышко-Кирхгофа получено выражение для корреляционной функции  $g^{(2)}$  бифотонов в случае частотно – невырожденного СПР при учете многомодового состава поля с учетом поглощения излучения на холостых частотах и влияния шумового планковского излучения.

2) Методом численного анализа общего выражения для  $g^{(2)}$  показано, что влияние тепловых флуктуаций равновесного поля на частотах терагерцового диапазона вносит больший вклад в падение корреляционной функции, чем эффекты поглощения фотонов на этих частотах. Также обнаружено, что зависимость оптико-терагерцовой корреляционной функции  $g^{(2)}$  от частоты холостого излучения спонтанного параметрического рассеяния в терагерцовом диапазоне имеет максимум, возникающий в результате роста  $g^{(2)}$ , вызванного снижением коэффициента параметрического усиления и числа поперечных мод излучения при уменьшении частоты, а также встречного эффекта уменьшения корреляционной функции, обусловленного усилением влияния тепловых флуктуаций поля на меньших частотах.

3) Теоретический анализ параметра Федорова для угловых характеристик оптико-терагерцовых бифотонов показал, что число эффективных пространственных азимутальных мод линейно растет с ТГц частотой холостого излучения, тогда как число эффективных полярных мод практически не меняется и близко к 1. Величина  $g^{(2)}$  может быть увеличена за счет уменьшения азимутальных угловых апертур детекторов холостого и сигнального излучения СПР до одномодового режима детектирования. Дальнейшее уменьшение полярных угловых апертур также должно приводить к росту корреляционной функции, связанному со снижением деструктивного влияния тепловых флуктуаций.

4) Проведена оптимизация экспериментальной схемы регистрации сигнальных (оптических) и холостых (ТГц) фотонов, генерируемых при спонтанном параметрическом рассеянии. В ходе экспериментов установлено, что переход на 2-ю гармонику излучения накачки позволяет уменьшить коэффициент параметрического усиления без существенной потери в величине регистрируемых сигналов на терагерцовой частоте и создает условия для наблюдения более высокого значения  $g^{(2)}$  в эксперименте с теми же шумовыми характеристиками терагерцового детектора.

5) Разработана методика измерения гистограмм статистических распределений токовых показаний детекторов терагерцового и оптического излучения, основанная на использовании установки частотно-невырожденного параметрического рассеяния в качестве источника контролируемого числа падающих фотонов. Методика экспериментально реализована при получении

гистограмм сверхпроводникового терагерцового болометра, оптических фотоприемников на основе аналогового ФЭУ и однофотонного ЛФД.

6) Предложена модель, описывающая распределение токовых показаний ФЭУ и ТГц болометра. Модель предполагает Гауссово распределение фототоков, возникающих при регистрации фото-отсчетов, величина которых имеет пуассоновское распределение. Правильность модели подтверждается согласованием зависимостей от мощности накачки средних чисел элементарных фото-отсчетов детекторов и чисел фотонов, генерируемых при СПР.

7) Впервые, на специально разработанной экспериментальной установке с однофотонным детектором в оптическом тракте, проведены прямые измерения величины  $g^{(2)}$  для оптико – терагерцовых бифотонов, генерируемых при параметрическом рассеянии света. Продемонстрировано согласие измеренных и теоретически предсказываемых зависимостей  $g^{(2)}$  от мощности излучения накачки. Предложен также метод пороговой дискриминации показаний аналоговых детекторов терагерцового и оптического трактов, позволяющий однозначно детектировать наличие неклассических оптико-терагерцовых корреляций за счет включения корреляционных функций высших порядков.

### Список цитируемой литературы

- [1] Kitaeva G. K. Terahertz generation by means of optical lasers // Laser Physics Letters. — 2008. — Vol. 5, no. 8. — P. 559–576.
- [2] R. A. Lewis. A review of terahertz detectors // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2019. — Vol. 52, no. 43. — P. 433001.
- [3] N. Laman, S. Sree Harsha, D. Grischkowsky, et. al. High-resolution waveguide THz spectroscopy of biological molecules // Biophysical Journal. — 2008. — Vol. 94, no. 3. — P. 1010–1020.
- [4] Y. Zhang, Ch. Wang, B. Huai, et.al. Continuous-Wave THz Imaging for Biomedical Samples // Appl. Sci.— 2021. — Vol. 11. — P. 71.
- [5] M. Hangyo, M. Tani & T. Nagashima, Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Solids: A Review // International Journal of Infrared and Millimeter Waves.— 2005. — Vol. 26. — P. 1661–1690.
- [6] R. M. Smith, M. A. Arnold. Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Solid Samples: Principles, Applications, and Challenges // Applied Spectroscopy Reviews. — 2011. — Vol. 46, no. 8. — P. 636-679.

- [7] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, et al. Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project // IEEE Communications Magazine. — 2014. — Vol. 52, no. 5. — P. 26–35.
- [8] A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, et al. 120-GHz-band wireless link technologies for outdoor 10-gbit/s data transmission // IEEE transactions on microwave theory and techniques. — 2012. — Vol. 60, no. 3. — P. 881–895.
- [9] A. E. Yachmenev, R. A. Khabibullin and D. S. Ponomarev, Recent advances in THz detectors based on semiconductor structures with quantum confinement: a review // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2022. — Vol. 55, no. 19. — P. 193001.
- [10] V.V. Dodonov, ‘Nonclassical’ states in quantum optics: a ‘squeezed’ review of the first 75 years // J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt. — 2002. — Vol. 4, no. 3. — P. R1-R33.
- [11] N. Gisin, G. Ribordy, Wolfgang Tittel et al., Quantum cryptography, // Reviews of modern physics. — 2002. — Vol. 74. — P. 145.
- [12] S. Pirandola, U. L. Andersen, L. Banchi, et al. Advances in quantum cryptography // Advances Optics and Photonics. — 2020. — Vol. 12, no. 4. — P. 1012 – 1236.
- [13] D. J. Bernstein, T. Lange. Post-quantum cryptography // Nature. — 2017. — Vol. 549 no. 3. — P. 188–194.
- [14] S. Slussarenko, G. J. Pryde. Photonic quantum information processing: A concise review // Applied Physics Reviews. — 2019. — Vol. 6, no. 3. — P. 041303.
- [15] K. Bai, Z. Peng, H.-G. Luo, et al. Retrieving ideal precision in noisy quantum optical metrology // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Vol. 127. — P. 129902.
- [16] M. Kutas, B. Naase, P. Bickert, et al. Terahertz Quantum Sensing // Science Advances. — 2020. — Vol. 6, no. 1. — P. 8065.
- [17] Корниенко В.В., Китаева Г.Х., Наумова И.И., Тучак А.Н., Пенин А.Н., Якунин П.В. Определение спектральной чувствительности нелинейно-оптических детекторов терагерцового излучения по спектрам спонтанного параметрического рассеяния света // Оптика и спектроскопия. — 2014. — Т. 116, № 4. — С. 558–567.
- [18] B. I. Erkmen and J. H. Shapiro. Ghost imaging: from quantum to classical to computational // Advances in Optics and Photonics. — 2010. — Vol. 2, no. 4. — P. 405-450.
- [19] F. Madonini, F. Severini, F. Zappa et al. Single photon avalanche diode arrays for quantum imaging and microscopy, // Adv. Quantum Technol. — 2021. — Vol. 4. — P. 2100005 (1–26).

[20] A. Meda, E. Losero, N. Samantaray et. al. Photon-number correlation for quantum enhanced imaging and sensing // *Journal of Optics*. — 2017. — Vol. 19, no. 9. — P. 094002.

[21] S.P. Walborn, C.H. Monken, S. Pádua et.al. Spatial correlations in parametric down-conversion // *Physics Reports*. — 2010. — Vol. 495, no. 4-5. — P. 87–139.

### Список опубликованных работ

*Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и RSCI:*

[A1] Леонтьев А.А., Кузнецов К.А., Прудковский П.А., Сафроненков Д.А. Китаева Г.Х. Прямое измерение корреляционной функции оптико-терагерцовых бифотонов // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2021. — Т. 114, № 10. — С. 635–642. (Impact factor РИНЦ: 1.142)

**Личный вклад автора:** юстировка установки для наблюдения корреляций, измерение экспериментальных данных, получение гистограмм токовых показаний оптического и ТГц детекторов, вычисление нормированной корреляционной функции 2го порядка по интенсивности из обработанных экспериментальных токовых показаний, вычисление эффективной корреляции в зависимости от порога токовых показаний оптического и ТГц детекторов, аппроксимация экспериментальной зависимости  $g^{(2)}$  от величины накачки.

[A2] P. Prudkovskii, A. Leontyev, K. Kuznetsov, G. Kitaeva. Towards measuring terahertz photon statistics by a superconducting bolometer // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21, no. 15. — P. 4964 (1–10). (WoS Impact factor: 3.847)

**Личный вклад автора:** юстировка установки для наблюдения токовых показаний ТГц детектора на базе сверхпроводникового болометра на горячих электронах, получение гистограмм токовых показаний ТГц детекторов, частичная аппроксимация экспериментальных гистограмм моделью, учитывающей гауссов характер токовых показаний при регистрации фотоотсчетов с пуассоновским распределением.

[A3] В. Д. Султанов, К. А. Кузнецов, А. А. Леонтьев, Г. Х. Китаева. Генерация оптико-терагерцовых бифотонов и особенности детектирования терагерцовой части излучения при частотно-невырожденном параметрическом рассеянии света // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2020. — Т. 112, № 5. — С. 297–302. (WoS Impact factor: 1.142)

**Личный вклад автора:** юстировка установки для наблюдения токовых показаний ТГц детектора, измерение экспериментальных данных, получение зависимости ТГц сигнала от величины лазерной накачки.

[A4] Kitaeva G. K., Leontyev A. A., Prudkovskii P. A. Quantum correlation between optical and terahertz photons generated under multimode spontaneous parametric down-conversion // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. — 2020. — Vol. 101, no. 5. — P. 053810 (1–13). (WoS Impact factor: 3.14)

**Личный вклад автора:** вывод формулы для  $g^{(2)}$  без учета конечного времени детектирования измерительного прибора, численный анализ зависимости оптического сигнала СПР и ТГц сигнала СПР от полярных и азимутальных углов при различных частотах, численный анализ влияния тепловых флуктуаций и поглощения на ТГц частотах на величину  $g^{(2)}$ . Анализ относительного влияния квантового и теплового вкладов на величину ТГц части СПР излучения в зависимости от температуры и холостой частоты.

[A5] G. K. Kitaeva, V. V. Kornienko, A. A. Leontyev, A. V. Shepelev. Generation of optical signal and terahertz idler photons by spontaneous parametric down-conversion // *Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics*. — 2018. — Vol. 98, no. 6. — P. 063844 (1–12). (WoS Impact factor: 3.14)

**Личный вклад автора:** вычисление формального вида элементов матрицы рассеяния, численный анализ зависимости фактора потерь от частоты в общем случае и случаи точного фазового синхронизма, численный анализ угловой зависимости ТГц части СПР сигнала на различных ТГц частотах в случае точного фазового синхронизма.

*Публикации в сборниках трудов конференций, индексируемых в базах Web of Science и Scopus (иные публикации):*

[A6] Leontyev A.A., Kuznetsov K.A., Prudkovskii P.A., Kitaeva G.Kh. Direct measurement of the correlation function of optical-terahertz biphotons // 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) – 2021 – p. 9566997.

[A7] Leontyev A.A., Kuznetsov K.A., Prudkovskii P.A., Rudyak A.M., Kitaeva G.Kh. Generation and detection of highly correlated optical-terahertz biphotons // *Proc. SPIE* v. 11582 – 2020 – p. 115821F.

[A8] Leontyev A.A., Kuznetsov K.A., Rudyak A.M., Prudkovskii P.A., Kitaeva G.Kh. Quantum correlation of optical-terahertz biphotons generated via spontaneous

parametric down-conversion // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO) – 2020 – p. 9285914.

[A9] Leontyev A.A., Prudkovskii P.A., Kitaeva G.Kh. Theoretical study of quantum-correlated optical-terahertz biphotons // 45th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) – 2020 –p. 09370595.

[A10] Kuznetsov K.A., Leontyev A.A., Novikova T.I., Gaysarov A.A., Sultanov V.D., Rudyak A.M., Kitaeva G.Kh. Preparation of the Quantum Correlated Optical-Terahertz Biphotons // 44th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) – 2019 – p. 19149370.