

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Сафроненкова Даниила Алексеевича на тему: «Безэталонная калибровка отклика аналоговых детекторов в поле параметрического рассеяния света» по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа Сафроненкова Даниила Алексеевича посвящена измерению эффективности неоднотонных детекторов излучения с помощью модифицированного метода Клышко.

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью разработки методов абсолютной калибровки аналоговых детекторов оптического излучения без использования эталонных источников или заранее прокалиброванных приборов, что особенно важно в спектральных диапазонах, где отсутствуют однофотонные детекторы. Традиционные методы калибровки требуют сложных и уязвимых цепочек передачи стандартов, что ограничивает их точность и применимость. Подход, развиваемый в диссертационной работе, основан на использовании квантовых корреляций бифотонных полей, возникающих при параметрическом рассеянии света, и позволяет одновременно измерять как корреляционные характеристики излучения, так и параметры самих детекторов — включая квантовую эффективность и спектральную чувствительность — даже при высоких интенсивностях света. Это открывает новые возможности для применения аналоговых детекторов в квантовой метрологии, физической оптике и терагерцовой фотонике, обеспечивая высокую точность измерений в широком диапазоне частот.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 131 стр.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описаны ее научная новизна, сформулированы цель работы и решаемые в ней задачи,

описаны объект и предмет исследования, его методология; сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации является обзорной. В ней рассматриваются физические основы спонтанного параметрического рассеяния света (СПР), формирование квантово-коррелированных пар фотонов и методы измерения корреляционной функции второго порядка. Особое внимание уделено применению однофотонных и аналоговых детекторов, а также известным методам калибровки их квантовой эффективности, включая метод Клышко. Обсуждаются ограничения традиционных подходов и обосновывается необходимость разработки новых, безэталонных методов калибровки аналоговых детекторов, особенно в спектральных диапазонах, где отсутствуют однофотонные детекторы.

Во второй главе диссертации описаны первичные эксперименты с использованием однофотонных лавинных фотодиодов (ЛФД) и аналоговых фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в схемах совпадений при спонтанном параметрическом рассеянии света (СПР). Методика включала регистрацию двухфотонных корреляций и определение квантовой эффективности детекторов на основе анализа совпадений и статистических характеристик сигналов, что позволило получить значения корреляционной функции второго порядка $g^{(2)}$ и квантовой эффективности. Для случая аналоговых детекторов в обоих каналах, автору удалось добиться корректных значений $g^{(2)}$ благодаря добавления в схему регистрации зарядовых усилителей. Указанные эксперименты имели важное методическое значение для дальнейшей работы.

В третьей главе диссертации исследуются статистические распределения сигналов аналоговых детекторов при параметрическом рассеянии света. Рассматриваются различные модели аппроксимации этих распределений, включая гауссовы и экспоненциальные функции. Предложена математическая модель, описывающая сигнал детектора как свёртку элементарных откликов с пуассоновским распределением их числа и шумовой составляющей, распределенной по гауссову закону. Показано, что при малых

оптических сигналах доминирует шум, а с увеличением мощности накачки проявляется экспоненциальный хвост, связанный с событиями поглощения фотонов. Продемонстрирована применимость предложенных моделей для анализа экспериментальных данных и определения параметров детекторов, таких как средний элементарный ток и его дисперсия. Также обсуждается выбор наиболее подходящей модели в зависимости от условий измерения, в том числе при высоких мощностях накачки.

В четвертой главе диссертации представлены экспериментальные методы безэталоной калибровки квантовой эффективности ФЭУ в поле параметрического рассеяния света. Описаны измерения корреляций между сигналами в сигнальном и холостом каналах, а также анализ статистических характеристик шума и фототока. Предложен метод определения квантовой эффективности на основе сравнения измеренных значений корреляционной функции $g^{(2)}$ с теоретическими моделями. Показано, что разработанные подходы позволяют точно измерять эффективность даже при высоких интенсивностях света ($\sim 10^8$ фотонов/с), где традиционные методы неприменимы. Результаты подтверждены серией экспериментов и согласуются с теоретическими оценками, демонстрируя возможность широкого применения этих методов в квантовой метрологии и физической оптике.

В заключении сформулированы основные выводы из диссертационной работы.

Положения, выносимые диссертантом на защиту, и сформулированные в диссертации научные выводы и рекомендации, являются новыми, полностью обоснованными и достоверными.

К диссертации есть следующие замечания.

1. Экспоненциальная функция распределения амплитуд отклика ФЭУ вводится чисто эмпирически, как лучше описывающая эксперимент. Не обсуждаются физические причины, по которым экспоненциальная зависимость может реализовываться для ФЭУ. Представляется

очевидным, что, при достаточно большом количестве независимых однофотонных импульсов тока, функция распределения тока должна быть гауссовой. Является ли причиной негуассовости наличие корреляции между элементарными импульсами тока? Может ли экспоненциальная функция распределения быть получена в рамках модельных представлений о работе ФЭУ?

2. Если, как следует из вышесказанного, функция распределения однофотонных импульсов тока не является универсальной и зависит от физического механизма отклика аналогового детектора, то каковы перспективы применения предлагаемого автором метода к аналоговым детекторам произвольного типа? Можно ли будет, при достаточном развитии предлагаемой автором методики, рассматривать калибруемый детектор как “черный ящик”?
3. В диссертации есть некоторое количество опечаток. Так, на стр. 24 сказано, что “сверхпроводящие однофотонные детекторы на нанопроволоке... представляют собой меандр... изготовленный из нитей шириной ≥ 5 нм и длиной ≥ 100 нм” (в действительности - толщиной ≥ 5 нм и шириной ≥ 100 нм). На стр. 48 есть дефектное предложение “количество мод детектирования было значительно больше t_{gate}/t_{cc} , чем в случае счетного режима регистрации”.

Вместе с тем, указанные замечания нисколько 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. Диссертация 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 Сафроненков Даниил Алексеевич, безусловно, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
Старший научный сотрудник Лаборатории квантовых детекторов ФГБОУ ВО
Московский педагогический государственный университет (МПГУ)

Семенов Александр Владимирович

03 июня 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +74992461202, e-mail: av.semenov@mpgu.su
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.03 – Радиофизика

Адрес места работы:

119435, Москва, ул. М. Пироговская, д.1, стр. 1
Лаборатория квантовых детекторов МПГУ
Тел.: +7 (499) 245-03-10; e-mail: mail@mpgu.su