

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

Диссертация Сафроненкова Даниила Алексеевича посвящена разработке и исследованию методов безэталонной калибровки отклика аналоговых детекторов с использованием параметрического рассеяния света — коррелированных состояний света - бифотонов. Коррелированные состояния света используются в различных областях физики и технологий: в метрологии, спектроскопии, квантовых вычислениях и квантовых коммуникациях, особенно в квантовой криптографии. Особенно актуальными такие состояния стали в последнее время в связи с развитием квантовых технологий.

Регистрация состояний света в различных приложениях реализуется при помощи детекторов излучения, которые в зависимости от задачи, могут работать в различных режимах. Обычно используются два режима работы детекторов — в режиме счета одиночных фотонов и аналоговом режиме. Все выше упомянутые использования детекторов требует знания квантовой эффективности детекторов. Метод калибровки с использованием эталонного детектора часто практически невозможен. По этой причине нужна разработка методов безэталонной калибровки детекторов, работающих в разных режимах. Мало разработанными остаются методы безэталонной калибровки детекторов в *аналоговом режиме*.

Таким образом, требуются адекватные методы безэталонной калибровки квантовых эффективностей детекторов, работающих в различных режимах, что определяет **актуальность выбранной темы исследований**.

Идея безэталонной калибровки детекторов, работающих *в счетном режиме*, была предложена еще в 80-ые годы Д.Н.Клышко. С формальной точки зрения, для определения двух неизвестных величин -- квантовых эффективностей пары детекторов, требуется пара уравнений, в которые входят

квантовые эффективности данных детекторов. Измерение фотоотклика одного из детекторов и совместно коррелированных отсчетов пары детекторов, дает возможность определить без эталонного детектора квантовую эффективность. Коррелированные отсчеты пары детекторов достигаются по схеме совпадения при измерении запутанного квантового состояния, возникающего при параметрической конверсии вниз по энергии – спонтанном параметрическом рассеянии.

Диссертационная работа состоит из Введения, 4-х глав, Заключение и списка литературы.

Во Введении приведен краткий обзор существующих подходов и сформулированы задачи исследования.

В первой главе приведен подробный анализ характеристик детекторов, которые могут быть измерены корреляционными методами с помощью квантовых состояний, получаемых в спонтанном параметрическом рассеянии. Рассмотрены методы безэталонной калибровки детекторов методом измерения корреляционной функции второго порядка.

Во второй главе диссертантом описана реализованная им схема безэталонной калибровки детекторов, работающих в счетном режиме. Выбор однофотонных детекторов необходим в качестве первого шага для “обкатки” методики и для дальнейшего ее развития и использования для калибровки аналоговых детекторов.

Поскольку методы калибровки детекторов в счетном режиме достаточно хорошо развиты, то параметры однофотонных детекторов могут быть независимо измерены с помощью традиционной техники счета фотонов, то сравнение результатов позволяет проверить адекватность результатов, полученных на данной экспериментальной схеме, и дают гарантию правильности выбранной методики.

Далее диссертантом были проведены корреляционные измерения по схеме совпадений для случая, когда один из однофотонных детекторов работает в аналоговом режиме. Были проанализированы статистические распределения

измеренных показаний и определены средние значения токов каждого детектора.

Следующий раздел диссертации посвящен измерению корреляционной функции второго порядка, когда оба однофотонных детектора работают в аналоговом режиме. В этом режиме для достоверности результатов необходимо контролировать шумовую составляющую в измерении токового отклика. Данному вопросу было уделено специальное внимание, для этого была произведена модификация экспериментальной установки. Благодаря этому удалось исключить основную часть шумовых показаний каждого детектора, а также уменьшить шумовую часть в их корреляции при измерении токов.

Сравнение полученных корреляционных функций, которые были зарегистрированы в случае аналоговой и счетной экспериментальными установками, с учетом разницы в числах мод, позволило связать корреляционную функцию второго порядка для измерений отклика детекторов в аналоговом и счетном режимах, и тем самым определить квантовую эффективность.

Третья глава диссертации посвящена статистическому анализу токовых показаний аналоговых детекторов.

Диссертантом исследованы различные методы обработки распределений выходных токов аналоговых ФЭУ. Были получены показания детекторов при различных мощностях накачки и различных длинах волн излучения, генерируемого при параметрическом рассеянии. Поскольку в любой системе регистрации и детекторе неизбежно присутствуют электронные шумы, которые дают вклад в показания системы даже в отсутствие падающего излучения, то приходится прибегать к модельным соображениям относительно статистических свойств шума. Было показано, что статистика шума в случае измеренных гистограмм может хорошо аппроксимироваться суммой двух гауссовских распределений. Выяснилось, что среднее число фотоэлектронов увеличивается пропорционально мощности накачки, а оцененные параметры детектора — средний ток и дисперсия шумового тока практически не

изменяются, что подтверждает справедливость сделанных приближений и выбора вида аппроксимирующих функций.

Далее был исследован случай, когда в качестве накачки используется импульсный пикосекундный лазер, что значительно меняет длительность освещения ФЭУ, но при этом длительность строба интегратора остается прежней, а именно 500 нс. Задачей данного исследования было определение поведения распределений элементарных импульсов ФЭУ в таком режиме облучения.

Был проведен анализ экспериментальных данных с использованием экспоненциального распределения амплитуд элементарных токовых импульсов.

В результате показано, что использование экспоненциального распределения как в случае освещения кристалл импульсным лазером (относительная ошибка определения равна 2.4%), так и в случае освещения непрерывным излучением (2.6%) дает наилучшее согласие с экспериментальными данными. Для распределения Гаусса относительная ошибка определения среднего элементарного тока равна 3.8%, а в случае использования в пикосекундном режиме распределения Гаусса 4.5%. Таким образом, экспоненциальное распределение демонстрирует наилучшее согласие, как в случае импульсного излучения, так и в случае непрерывного излучения.

При помощи экспериментального инструментария, разработанного и обкатанного диссертантом, в четвертой главе разработаны и проведены измерения эффективности аналоговых детекторов безэталонная калибровка эффективности аналоговых детекторов, не способных работать в режиме счета фотонов.

Приведены результаты экспериментов с применением новых методик для калибровки эффективности ФЭУ, основанных на использовании квантовых свойств параметрического рассеяния света комбинированным методом Клышко в режиме СПР.

Кратко, метод состоит из трех измерений: 1) производится анализ статистических измерений, полученных с помощью аналогового и однофотонного детектора, и определяются параметры экспериментальных гистограмм аналогового детектора при разных мощностях излучения; 2) производится измерение бифотонной корреляционной функции на установке СПР однофотонными детекторами в режиме счета фотонов с последующим временным масштабированием корреляционной функции для соответствия условий получения экспериментальных гистограмм; 3) производится непосредственный расчет эффективности из полученных в первых двух пунктах

Далее, проведено измерение эффективности аналогового ФЭУ модифицированным методом Клышко без применения однофотонных фотоприемников. Было проведено измерение эффективности аналогового ФЭУ, используя только аналоговые детекторы как для измерения бифотонной корреляционной функции, так и для измерения статистических гистограмм аналоговых ФЭУ. Из анализа гистограмм были получены значения корреляционной функции второго порядка, из которых была получена эффективность ФЭУ, расположенного в сигнальном канале.

Таким образом, в четвертой главе диссертантом предложены и экспериментально продемонстрированы варианты модификации метода Клышко, адаптированные для калибровки эффективности аналоговых детекторов, которые не требуют применения эталонных источников излучения и основаны на определении числа падающих фотонов через измерение корреляционной функции параметрического рассеяния света второго порядка поля с помощью, как системы счета фотонов (метод работает только в режиме спонтанного параметрического рассеяния), так и непосредственно самих калибруемых детекторов (метод принципиально работает в любом режиме параметрического рассеяния). Проведена успешная верификация метода путем его сравнения с результатами другими методами.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

По мере чтения диссертации возникли следующие вопросы:

1) В третьей главе диссертации на рисунке 3.15 показаны значения различных NRF. Суть этого исследования понятна: NRF применяется для выбора одной из двух аппроксимаций статистических данных. Нет сомнения, что такое исследование может быть использовано для выбора адекватной модели аппроксимации. Однако возникает вопрос: почему значения NRF получились такими высокими?

2) В разделе 2.4 рассматриваются различные методы дискриминации показаний аналоговых детекторов. В частности, на рисунке 2.11 представлен график, который соответствует дискриминации малоамплитудных токовых показаний ФЭУ. Возникает вопрос: при каких значениях мощности накачки и времени набора данных удастся получить истинные значения корреляционной функции, совпадающие с таковыми в счетном режиме, с погрешностью, адекватной и соразмерной погрешности, характерной для этого режима?

Исходя из выше сказанного, считаю, что выбранная тема исследований является актуальной, результаты работы являются обоснованными и достоверными, и новыми.

Содержание автореферата Сафроненкова Д.А. соответствует содержанию диссертации, результаты диссертации своевременно опубликованы и неоднократно докладывались на конференциях.

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 Сафроненков Даниил Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

Главный научный сотрудник, зав. лабораторией спектроскопии поверхности полупроводников ФГБУН Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН)

Молотков Сергей Николаевич

21 мая 2025 г.

Контактные данные:

тел.: +7(496)5221982, e-mail: molotkov@issp.ac.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

142432, г. Черноголовка, Московская обл. ул. Академика Осипьяна, д. 2, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН)

Тел.: +7(496) 522 8160; e-mail: adm@issp.ac.ru

Подпись сотрудника Молоткова Сергея Николаевича удостоверяю:

руководитель/кадровый работник ИФТТ РАН

Ученый секретарь ИФТТ РАН

к.ф.-м.н Терещенко А.Н.

21 мая 2025 г.