

ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛЫХ УРОВНЕЙ

А. С. МИКРЮКОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия, e-mail: anzio64@gmail.ru

Представлен обзор современного состояния развития методов и средств измерений мощности лазерного излучения малых уровней. Показано, что создание приемников-счетчиков фотонов является наиболее перспективным способом для расчета внутренней квантовой эффективности кремниевых фотодиодов, а также единственным, позволяющим осуществить независимую связь единицы ватт с фундаментальными физическими постоянными.

Ключевые слова: *малые уровни мощности, счет фотонов, трап-детектор, квантовая эффективность.*

An overview of the current state of development of methods and instruments of low power levels measurement is presented. It is shown that the creation of photon receivers-counters is the most promising method for calculation of silicon photodiodes internal quantum efficiency and the only method allowing to establish the independent connection of watt unit with the basic physical constants.

Key words: *low power levels, photons count, trap detector, quantum efficiency.*

В течение длительного периода основным измерительным преобразователем при воспроизведении единицы мощности светового излучения был тепловой приемник [1], допускающий погрешность 0,1 %. В конце XX в. в диапазоне мощностей излучения от 1 нВт до 1 мВт с помощью криогенного радиометра была достигнута погрешность измерения порядка 0,01 % [2]. Почти одновременно с ним появились самокалибрующиеся фотодиоды [3], у которых можно было независимо определять внутреннюю квантовую эффективность с погрешностью 0,04 %. Однако

вскоре выяснилось, что при самокалибровке поверхность фотодиодов деградирует [4], что ограничило использование данного метода. Поэтому в настоящее время они поверяются с помощью криогенного радиометра.

Данный метод позволил добиться погрешности измерения мощности лазерного излучения 0,02 % [2]. Влияние неизвестной внешней квантовой эффективности удалось свести к минимуму за счет построения фотодиодов по схеме трап-детектора [5].

Развитие численного моделирования привело к созданию одномерной [6] и трехмерной [7] численных моделей полупроводниковых структур, а развитие электроники, особенно прецизионных трансимпедансных [8] и интегрирующих усилителей [8, 9] позволило существенно снизить уровень шумов трап-детекторов и расширить диапазон измеряемых мощностей.

Появление квантовой оптики и квантовой теории информации повлекло за собой развитие измерительной техники малых уровней, в частности, разработку единичных лавинных фотодиодов и создание матриц на их основе. Использование параметрической генерации света дало возможность самокалибровать лавинные фотодиоды в гейгеровском режиме с погрешностью 0,2 % [10].

Для обеспечения корректного динамического диапазона работы лавинных фотодиодов были разработаны ослабители мощности лазерного излучения. Исследование явлений квантовой оптики потребовало создания источников единичных фотонов Фоковского излучения с квантовой статистикой, принципиально отличающейся от статистики когерентного излучения. Большинство таких источников не гарантирует, что испускаемое излучение находится в однофотонном состоянии, поэтому необходимы приемники, разрешающие число падающих фотонов. Такие приемники TES были созданы на основе микрокалориметров [11]. На рис. 1 представлена шкала, где показаны основные типы приемников и области их применения.

Все разработки привели к созданию системы средств измерений (СИ), независимой от вещественных эталонов и основанной только на фундаментальных физических константах. Наиболее перспективным направлением стало воспроизведение единицы мощности лазерного излучения как преобразование «фотон → электрон».

Самокалибрующиеся кремниевые фотодиоды

В начале 80-х годов XX в. была создана технология изготовления фотодиодов с внутренней квантовой эффективностью, близкой к

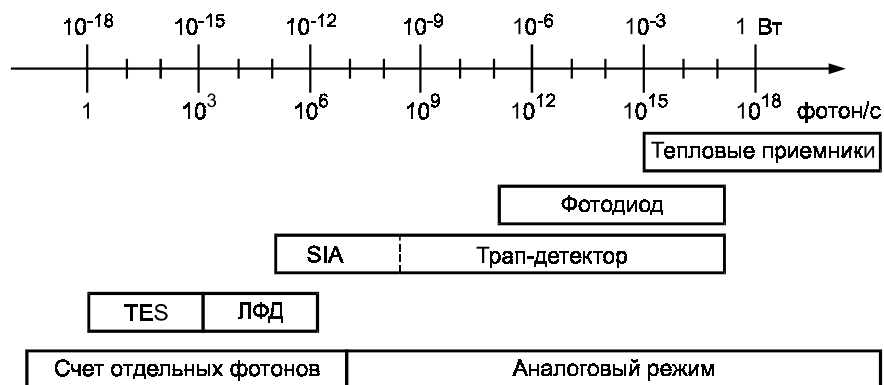


Рис. 1. Шкала уровней мощности

единице, и разработаны методики их калибровки. Это позволило получить достаточно точные результаты [3] и стало довольно простым способом по сравнению с традиционной тепловой радиометрией [1]. Для фотодиодов принципиальными потерями при трансформации фотона в электрон являются потери фотонов при отражении от поверхности и второстепенных носителей при их рекомбинации. Рекомбинационные потери происходят в трех областях: на границе раздела сред Si-SiO₂; во фронтальной области между границей раздела и началом области обеднения; в объеме, расположенном за обедненной областью.

Рекомбинационные потери в первой области могут быть измерены методом приложения напряжения смещения к поверхности окисла, во второй они малы и ими можно пренебречь за исключением коротких длин волн, а в третьей – могут быть исключены с помощью приложения обратного напряжения смещения, что расширяет обедненную область [3].

У кремниевого фотодиода с инверсионным слоем рекомбинационные потери на поверхности раздела и во фронтальном объеме пренебрежимо малы [12]. В таких фотодиодах переход в кремнии индуцируется положительными зарядами, замороженными в SiO₂. Вспомогательные носители (дырки) отталкиваются от границы раздела SiO₂-Si замороженными положительными зарядами и удаляются через контакт полем внутри обедненной области прежде, чем происходит заметная рекомбинация.

Для коротковолновых фотонов, поглощающихся во фронтальной области, существенные потери в инверсионном слое фотодиода происходят только при отражении от поверхности. Приложение обратного напряжения смещения к слою окисла позволяет значительно уменьшить поверхностную рекомбинацию носителей. В [13] описано простое устройство (трап-детектор), построенное из нескольких фотодиодов с инверсионным слоем, исключаяющим потери за счет отражения. Его внешняя квантовая эффективность составляет $0,999 \pm 0,002$ в области длин волн 400 – 700 нм. В работе [13] рассмотрены некоторые улучшения устройств на основе фотодиодов с инверсионным слоем и возможность создания устройств со 100 %-м квантовым выходом на основе более широко используемых *p-n*-кремниевых фотодиодов.

Трап-детекторы

В [5] описан полупроводниковый трап-детектор, соответствующий всем требованиям идеального приемника для измерения оптического излучения. Он имеет однородную зонную характеристику, обладает линейностью, стабильностью и прогнозируемой относительной спектральной чувствительностью.

Трап-детектор является почти идеальным радиометрическим стандартом для передачи абсолютной радиометрической шкалы от криогенного радиометра с погрешностью менее 0,02 % во всем видимом диапазоне спектра.

Фотодиоды *n-on-p* кремниевые с инверсионным слоем UDT UV1001 применялись во всех четырехэлементных (модель QED-100) и трехэлементных (модель QED-200) трап-детекторах отражательного типа [14]. Погрешность измерения мощности излучения составила 0,03 % в диапазоне 440 – 460 нм, при этом они работали в фотовольтаическом режиме [15]. Позже, в трап детекторе QED-150, имеющем конструкцию схожую с моделью QED-200, были применены кремниевые фотодиоды *p-on-n* Hamamatsu S-1337. Их называли «квантово-плоскими», так как внешняя квантовая эффективность (EQE) в диапазоне 550 – 860 нм представляла собой константу с точностью 0,1 %. Спектральная чувствительность этих детекторов (в А/Вт) пропорциональна их EQE, длине волны и коэффициенту пропорциональности – e/hc . Трап-детекторы, собранные из элементов S1337 с постоянной относительной спектральной чувствительностью, калибровали с помощью QED-200 в диапазоне 440 – 460 нм или с помощью криогенного радиометра. Так как спектральная зависимость внутренней

квантовой эффективности IQE типовых фотодиодов S1337 может быть смоделирована с очень высокой точностью [15, 16], то спектральная чувствительность типовых отражающих трап-детекторов на фотодиодах S1337 может быть интерполирована в диапазоне 406 – 920 нм с относительной погрешностью 0,03 %, как если бы она была измерена в двух или более точках. Здесь IQE – отношение количества собранных электронов к количеству фотонов, поглощенных детектором после потерь из-за поверхностной рекомбинации, $EQE = (1 - \rho)IQE$, где ρ – коэффициент отражения.

Основные требования к трап-детектору: однородная зонная характеристика; достаточно большое отношение сигнал–шум для обеспечения средней шумовой мощности не более $5 \cdot 10^{-15}$ Вт; линейность (коэффициент линейности не ниже 0,01 %); небольшая постоянная времени, существенно меньше, чем у тепловых приемников; стабильная спектральная чувствительность в течение нескольких лет и заранее известная, предпочтительно линейная, спектральная чувствительность.

Решение задачи создания приемника, близкого к идеальному, было предложено Залевски и Дуда, показавшими, что определенные типы фотодиодов с инверсионным слоем обладают близкой к единице внутренней квантовой эффективностью IQE в видимой части спектра [13]. Таким образом, относительная спектральная чувствительность этого типа фотодиода зависит только от длины волны и коэффициента отражения его поверхности. Эти параметры либо известны, либо легко могут быть измерены.

В [13] указано, что практически можно исключить влияние коэффициента отражения на выходной сигнал, сконструировав приемник из четырех отдельных фотодиодов, расположенных так, чтобы излучение, отраженное от каждого фотодиода падало на последующий. Это устройство (QED-100, QED-200) имеет предсказуемую спектральную чувствительность прямо пропорциональную длине волны, поскольку все падающее излучение из-за многократных переотражений почти полностью поглощается фотодиодами. Однако эти устройства достигают максимальной погрешности $< 0,05$ % только в ограниченном спектральном диапазоне 50 нм в синей части спектра [13]. Для расширения диапазона приемники, в отличие от других трап-детекторов, требуют напряжения смещения до 100 В. Высокое напряжение увеличивает шум устройства и значительно ограничивает динамический диапазон. В [5] описан приемник, использующий расположение фотодиодов, подобное

приемнику QED-200 с фотодиодами Hamamatsu S1337 PN вместо фотодиодов с инверсионным слоем.

Основные характеристики трап-детекторов

Относительная спектральная чувствительность

$$R(\lambda) = \frac{(1-\rho)\epsilon_i \lambda e}{hc}, \text{ IQE} = 0,99 \pm 0,07 \%$$

Спектральный диапазон 550 – 860 нм

Однородность чувствительности по площади приемника

. 0,02 % в области ± 2 мм от центра

Линейность $< 0,1\%$ в динамическом диапазоне 10^8 Вт [17]

Стабильность 0,02 и 0,3 % за 1 и 4 года, соответственно

Эквивалентная мощность шума $5 \cdot 10^{-15}$ Вт

Погрешность в результате угловой разбюстировки . . . 0,05 % в пределах 4°

Квантовая эффективность трап-детектора. В [5] рассмотрено, что трап-детектор имеет внешнюю квантовую эффективность, близкую к единице. Однако, даже после корректировки спектральной чувствительности, потери на отражение составляют около 0,2 % и зависят от длины волны излучения, что вносит дополнительную погрешность в спектральную чувствительность.

Различие внутренней квантовой эффективности фотодиода EG&G UV444В и трап-детектора на его основе было объяснено J. Geist, наличием заряда на стыке Si-SiO₂ антиотражающего покрытия [3]. Подобный механизм потерь присущ и фотодиодам S1337. Для их измерения использовалась капля воды на передней поверхности фотодиода в качестве прозрачного электрода, к которой прикладывали небольшое напряжение для удаления паразитных зарядов [3]. Таким образом, было доказано, что точное определение спектральной чувствительности фотодиода возможно.

Результаты, приведенные в [3, 12] означают, что фотодиод Hamamatsu S1337 предпочтительнее для использования в трап-детекторе, и способен независимо измерять мощность излучения с погрешностью 0,05 %.

Отражающие трап-детекторы. Трап-детектор, состоящий из трех фотодиодов Hamamatsu S1337-1010, схематично показан на рис. 2, а. Такое расположение фотодиодов уменьшает чувствительность к поляризации падающего излучения. В [5] описаны измеренные коэффициенты отражения десяти трап-детекторов, их среднее квадратическое отклонение коэффициента отражения меньше 0,05 %.

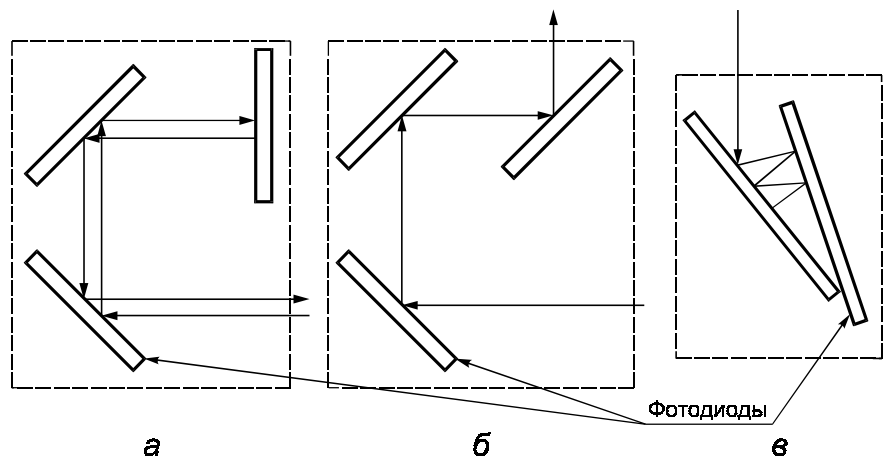


Рис. 2. Схемы трехэлементного отражательного (а), пропускающего (б) и рупорного трап-детекторов (в)

Отражательные потери трап-детекторов на фотодиодах S-1337 увеличиваются с 0,21 % на 920 нм до 1 % на 406 нм [13]. В [18] рассмотрены отношения чувствительностей трап-детекторов, собранных из фотодиодов S-1337 и из фотодиодов с инверсионным слоем (QED-150). Результаты измерений менялись от 1,0005 до 1,0085 при 920 и 406 нм, соответственно, что говорит об изменении коэффициента отражения в синей части спектра на несколько десятков процентов. Он зависит и от толщины оксидной пленки конкретного фотодиода. На отражательном трап-детекторе с фотодиодами S1337 была измерена неоднородность пространственной чувствительности, равная 0,03 %.

Следовательно, трап-детекторы отражательного типа должны быть усовершенствованы и использованы для передачи единицы с суммарной стандартной неопределенностью 0,01 – 0,03 %.

Пропускающие (туннельные) трап-детекторы. Туннельный трап-детектор [18] показан на рис. 2, б. Его шестиэлементная версия имеет независимую от поляризации чувствительность [19], низкие отражательные потери и улучшенную пространственную однородность. Для расширения спектрального диапазона передачи единицы мощности необходима физическая модель внутренней квантовой эффективности фотодиодов S1337.

В [18] была проанализирована угловая чувствительность трап-детектора пропускающего типа с шестью фотодиодами одинакового размера и диаметром апертуры 3,5 мм. Поле зрения прибора оказалось около 4° и отклонение от косинусной функции в этом диапазоне составило 0,1 %.

Результаты исследований показали, что его угловая зависимость чувствительности имеет форму косинусной функции с погрешностью меньше, чем 0,02 %, в угловом диапазоне 5° , что значительно облегчает его юстировку.

Рупорные трап-детекторы. В [20] исследовался трап-детектор, разработанный с целью максимизации внутренней квантовой эффективности и минимизации темнового тока. Он был построен с использованием ВІВ-фотодиодов, т. е. фотодиодов с заблокированной примесной зоной для улучшения чувствительности в ИК-диапазоне. Такие трап-детекторы используются для передачи единицы мощности в NIST. Квантовая эффективность ВІВ-фотодиодов составляет около 60 %, а потери на отражение – 30 %. По сравнению с обычными ВІВ-фотодиодами, в описанном устройстве применялись фотодиоды с более толстым ИК-чувствительным слоем, позволившим избежать интерференции, для увеличения внутренней квантовой эффективности путем увеличения внутреннего поглощения в этом слое. Кроме того, подобный слой обладал низкой плотностью дефектов для уменьшения темнового тока. Для минимизации потерь и увеличения внутренней квантовой эффективности слой находился на поверхности ВІВ-фотодиодов под прозрачным контактом. Создание из ВІВ-фотодиодов конструкции типа трап-детектора позволило собрать практически все отраженное излучение, тем самым увеличивая внешнюю квантовую эффективность ВІВ-приемника. На рис. 2, в показана схема трап-детектора, разработанного для измерения пучка диаметром 0,75 мм. Измерения низкотемпературного отражения и пропускания кремниевого ИК-слоя, легированного мышьяком, привели к тому, что поглощение излучения на длинах волн 4 и 10 мкм составили 64 и 99 %, соответственно.

Методы независимой калибровки кремниевых фотодиодов

В настоящее время хорошо известны два метода, позволяющие с высокой точностью определять внутреннюю квантовую эффективность высококачественных кремниевых фотодиодов. Первый метод – самокалибровка, второй – численное моделирование работы кремниевого

фотодиода с расчетом его внутренней квантовой эффективности. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки.

В последние годы появились фотодиоды, обладающие внутренней квантовой эффективностью, близкой к 0,999, для которых было создано множество математических моделей, описывающих их работу [15]. В частности, были разработаны высокоточные модели таких прецизионных фотодиодов, как Hamamatsu S1337 [6], учитывающие практически все процессы, протекающие в полупроводниках: объемную, поверхностную и Оже-рекомбинации, образование экситонов, профили легирования, сужение запрещенной зоны, подвижности носителей и др.

Подобный фотодиод с известным значением квантовой эффективности, близким к единице, выполняет практически прямое преобразование фотона в электронно-дырочную пару [21]. Данное обстоятельство помогает осуществлять привязку мощности лазерного излучения к значениям фундаментальных физических констант и проводить независимую аттестацию фотодиода. Величина фототока в общем случае пропорциональна количеству попавших на него фотонов в единицу времени [21].

Такой принцип работы фотодиода можно характеризовать как счет фотонов. Часто этот термин воспринимают в узком смысле, т. е. как регистрацию отдельных фотонов. В то же время регистрация тока фотодиода, т. е. потока свободных носителей, возникающих в фотодиоде под действием излучения, с учетом поправки на квантовый выход представляет собой тот же самый счет фотонов.

По физическому смыслу процесс прямого преобразования фотон $\rightarrow$ электрон + дырка ($\gamma^0 \rightarrow e^- + h^+$) в фотоприемниках в наибольшей степени нововведениям в системе СИ.

Сравнение принципа работы такого фотодиода со счетчиком отдельных фотонов приведено в таблице.

Аналогичные рассуждения некорректны для теплового приемника, поскольку излучение может иметь сложный неизвестный спектральный состав. В этом случае тепловой приемник, преобразуя энергию фотонов в тепловую энергию, регистрирует суммарную энергию всех фотонов

$$W = \frac{\kappa}{\Delta t} \sum_{i=1}^{N_\gamma} h\nu_i = \frac{\kappa}{\Delta t} \sum_{i=1}^{N_\gamma} \frac{ch}{\lambda_i},$$

Сравнение принципов работы кремниевого фотодиода и счетчика отдельных фотонов

Параметры	Фотодиод	Счетчик отдельных фотонов
Регистрируемый сигнал	Измерение фототока	Счет отдельных электрических импульсов
Способ преобразования фотонов	Фотон $\rightarrow$ электрон + дырка	Фотон $\rightarrow$ электрический импульс
Параметр, определяющий погрешность измерения	Квантовая эффективность фотодиода; погрешность измерителя фототока	Эффективность генерации однофотонных токовых импульсов; квантовая статистика излучения [21]
Значение погрешности	0,02 %	10 – 30 %
Динамический диапазон	5 нВт – 5 мВт	0 – 10^7 фотонов/с

где κ – коэффициент преобразования; h – постоянная Планка; ν_i – частота i -го фотона; c – скорость света; λ_i – длина волны i -го фотона; N_γ – количество фотонов, попавших на приемник за время Δt .

В то же время полупроводниковый приемник с квантовой эффективностью, близкой к единице, выполняет прямое преобразование $\gamma^0 \rightarrow e^- + h^+$, что соответствует числу полученных фотоэлектронов N_e

$$N_e = \gamma N_\gamma,$$

где γ – квантовая эффективность фотодиода.

С учетом того, что $dN_e/dt = J/e$, где J – сила фототока, e – заряд электрона, выходной сигнал пропорционален количеству поглощенных фотонов в единицу времени:

$$J = e\gamma \frac{d}{dt} N_\gamma.$$

Другими словами, тепловой приемник измеряет мощность падающего излучения, и принципиально не может измерить количество поглощенных фотонов, в то время как фотодиод измеряет количество поглощенных фотонов, но не способен мерить мощность излучения. При известном спектральном составе измерение мощности и счет фотонов возможны обоими приборами. В этом случае связь между мощностью излучения и силой фототока можно представить в виде

$$W = \frac{J ch}{e \gamma \lambda},$$

где λ – длина волны монохроматического излучения.

Математические модели полупроводниковых фотодиодов

Одна из наиболее известных программ для расчета процессов, происходящих в полупроводниковых структурах, и, в частности, измерительных фотодиодах и солнечных батареях – PC1D.

Ее численный метод использует одномерные полуклассические уравнения переноса двух носителей в полупроводниках. Эти уравнения выводятся из больцмановских уравнений переноса. Модель фотогенерации состоит из ряда сложных особенностей, включая поглощение света ловушками и свободными носителями.

Все математические модели кремниевых фотодиодов можно разделить на моделирующие оптические свойства кремния, позволяющие получить потери излучения за счет отражения и поглощения излучения в приповерхностном слое и моделирующие электрические процессы, протекающие внутри полупроводника.

В [22] рассмотрены оптические потери, состоящие из отражения от поверхности и поглощения в приповерхностном слое. Анализ проводится на основе теоретической модели и экспериментальных исследований.

В [23] описан приемник с предсказуемой квантовой эффективностью, представляющий собой совокупность двух кремниевых фотодиодов, изготовленных со специально заложенными в них параметрами. Его спектральная чувствительность рассчитана, исходя из чувствительности идеального приемника и потерь за счет внутренней рекомбинации носителей, а внутренняя квантовая эффективность – с помощью программы PC1D, обеспечивающей погрешность ее определения в 1 ppm.

Схемы электрического подключения трап-детекторов

В настоящее время не существует стандартов калибровки приемников на уровне нескольких фотонов. В [9] предложен стандарт для измерения квантовой эффективности приемника, передающейся от криогенного радиометра эталонному кремниевому трап-детектору. Такие трап-детекторы состоят из трех кремниевых фотодиодов.

Обычно трап-детектор подключается к трансимпедансному усилителю (TIA) [5] в диапазоне от нановатт до милливатт. Нижний уровень работы ограничивается шумами трап-детектора и TIA. Интегрирующий усилитель с переключением (SIA), описанный в [8] имеет более низкий шумовой эквивалент мощности (NEP) по сравнению с TIA. Трап-детектор, подключенный к SIA может регистрировать сигналы до 0,1 пВт, что примерно составляет $3 \cdot 10^5$ фотонов/с.

При использовании субфемтоамперного источника вклад шума в относительно большой ток 100 нА и выше в три раза меньше, чем для тока в 1 нА. Это увеличивает точность калибровки SIA в три раза по сравнению с TIA. Еще одним преимуществом при совместном использовании трап-детектора и SIA является малая погрешность измерения сигнала при высоких коэффициентах усиления.

Было проведено сравнение двух независимых методик измерения квантовой эффективности счетчиков фотонов. Первая основана на использовании комбинации трап-детектора и SIA, а вторая – на применении метода коррелирующих фотонов [24]. Результаты измерений обоими методами согласуются в пределах 0,2 %.

Лавинные фотодиоды

В [24] рассмотрены методы калибровки лавинных фотодиодов, а так же предложен новый метод, основанный на использовании корреляционной функции для определения относительной эффективности регистрации лавинных фотодиодов, т. е. характеристики приемника, показывающей вероятность успешной регистрации единичного фотона.

Эффективность регистрации единичных фотонов лавинным фотодиодом (SPAD) – один из важнейших параметров, характеризующих системы, предназначенные для измерения выхода фотонов от источников единичных фотонов. Большинство методов определения эффективности регистрации, разработанных на данный момент, основаны на двухфотонной корреляции, полученной с помощью параметрического преобразования частоты [10]. В работе описаны два различных метода определения относительной эффективности регистрации лавинных фотодиодов в гейгеровском режиме. Они используют неклассический источник света на основе единичных дефектных центров (азотной вакансии (NV)) в алмазных нанокристаллах и волоконный НВТ-

интерферометр. Первый метод заимствован из области оптоволоконных телекоммуникаций для аналоговых приемников и подробно описан в [25]. Относительная эффективность регистрации единичных фотонов определяется статистикой полученной с эталонного и поверяемого приемников.

Второй метод использует временную корреляционную функцию (TCSPC) вместо простого счета фотонов. Она измеряется в импульсном режиме для одного дефектного центра кристалла в качестве источника единичных фотонов. Полученная корреляционная функция содержит информацию об общей эффективности регистрации единичных фотонов, включающей полный оптический тракт. Выполнение двух таких измерений для различных поверяемых приемников позволяет определить относительную эффективность регистрации тестируемых приемников.

Были проведены исследования двух описанных методов и получена относительная эффективность регистрации $0,135 \pm 0,036$ для первого метода и $0,12 \pm 0,01$ для второго. Таким образом, второй метод на основе временной корреляционной функции точнее классического в 3 раза.

Перспективы развития методов счета фотонов

В [21] проанализированы этапы развития квантовой теории информации. Значительный потенциал, заложенный в этой теории, приводит к развитию однофотонных источников и приемников. Такие источники могут работать на различных эффектах от нелинейной оптики до атомных ансамблей. В разработке приемника используются полупроводниковые технологии, электроника, системы обработки сигналов, а так же новые криогенные системы, обеспечивающие высокую скорость и разрешающие число падающих фотонов. В частности, это позволяет с помощью фундаментальных физических констант создать новые метрологические стандарты для метрологии счета единичных фотонов.

Таким образом, для переопределения ватта через фундаментальные физические константы необходимо создание приемников, осуществляющих счет фотонов, а способ, основанный на расчете квантовой эффективности, является единственным, независимо связывающим единицу ватт с фундаментальными физическими постоянными.

На сегодняшний день наиболее перспективным направлением представляется развитие методов самокалибровки.

1. **Иванов В. С. и др.** Основы оптической радиометрии. М.: Физматлит, 2003. С. 544.
2. **Schrama C. A. e. a.** Comparison of monochromator-based and laser-based cryogenic radiometry // Metrologia. 1998. V. 35. P. 431 – 435.
3. **Geist J., Zalewski E. F., Schaefer A. R.** Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes // Appl. Opt. 1980. V. 19, N 22. P. 3795 – 3799.
4. **Key P. J., Fox N. P., Rastello M. L.** Oxide-Bias Measurements In the Silicon Photodiode Self-Calibration Technique // Metrologia. 1985. V. 21. P. 81.
5. **Fox N. P.** Trap Detectors and their Properties // Metrologia. 1991. V. 28. P. 197 – 202.
6. **Basore P. A., Clugson D. A.** [Электрон. версия]. <http://sourceforge.net/projects/pc1d> (дата обращения 15.01.2013).
7. **Synopsus** [Официальный сайт] <http://synopsys.com> (дата обращения 18.12.2012).
8. **Mountford J. e. a.** Development of a switched integrator amplifier for high-accuracy optical measurements // Appl. Opt. 2008. V. 47. P. 5821.
9. **Porrovecchio G. e. a.** A transfer standard for the low power / few photon regime – the trap detector plus switched integrator amplifier // Proc. 5th Single Photon Workshop. Germany: PTB, 2011. P. 110.
10. **Migdall A.** Correlated-Photon Metrology Without Absolute Standards // Phys. Today. 1999. P. 41 – 46.
11. **Rastello M. L.** Metrology towards quantum-based photon standards // Proc. 5th Single Photon Workshop. Germany: PTB, 2011. P. 109.
12. **Geist J., Liang E., Schaefer A. R. J.** Complete collection of minority carriers from the inversion layer in induced junction diodes // Appl. Phys. 1981. V. 52. P. 4879.
13. **Zalewski E. F., Hoyt C. C.** Comparison Between Cryogenic Radiometry and the Predicted Quantum Efficiency of pn Silicon Photodiode Light Traps // Metrologia. 1991. V. 28. P. 203 – 206.
14. **Pat. 4.498.012 USA.** 1985.
15. **Saito T.** Optical properties of semiconductor photodiodes/solar cells // Metrologia. 2012. V. 49. P. S118 – S123.
16. **Gentile T. R., Houston J. M., Cromer C. L.** Realization of a scale of absolute spectral response using the NIST high accuracy cryogenic radiometer // Appl. Opt. 1996. V. 35. P. 4392 – 4403.

17. **Schaefer A. R., Zalewski E. F., Geist J.** Silicon detector nonlinearity and related effects // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 1232 – 1236.
18. **Eppeldauer G. P., Lynch D. C.** Opto-Mechanical and Electronic Design of a Tunnel-Trap Si Radiometer // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2000. V. 105. N 6. P. 813 – 828.
19. **Goebel R., Yilmaz S., Pello R.** Polarization dependence of trap detectors // Metrologia. 1996. V. 33. P. 207 – 213.
20. **Carter A. C. e. a.** Absolute cryogenic radiometer and solid-state trap detectors for IR power scales down to 1 pW with 0,1 % uncertainty // Metrologia. 2009. V. 46. P. S146 – S150.
21. **Migdall A. e. a.** Single-Photon Tools, Techniques, and Prospects for Metrology // Proc. 5th Single Photon Workshop. Germany: PTB, 2011. P. 108.
22. **Geist J., Baltes H.** High accuracy modeling of photodiode quantum efficiency // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 18. P. 3929 – 3939.
23. **Gran J. e. a.** Simulations of a predictable quantum efficient detector with PC1D // Metrologia. 2012. V. 49. P. 130 – 134.
24. **Schmunk W. e. a.** Relative detection efficiency calibration of single photon avalanche photo detectors using non-classical light // Proc. 5th Single Photon Workshop. Germany: PTB, 2011. P. 111.
25. **Hofer H., Lopez M., Kück S.** Fiber-based power measurement for the optical telecommunication in a wide spectral range // Proc. Intern. Conf. New Develop. and Appl. Opt. Radiometry. Korea, Daejeon: KRISS, 2008. P. 105 – 106.

Дата принятия 12.10.2012 г.

