


Приборы и техника физического эксперимента

Научная статья

УДК 535.14

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19110>

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОГО ДЖИТТЕРА НИЗКОШУМЯЩЕГО ДЕТЕКТОРА ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ

**А. А. Анисимов, А. А. Белов, А. С. Козлов, О. И. Котов, П. А. Кринский
А. В. Медведев, А. В. Петров, С. В. Розов, Н. А. Ушаков** 

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 n.ushakoff@spbstu.ru

Аннотация. В статье представлена методика измерения временного джиттера детектора одиночных фотонов, не требующая быстродействующей электроники и коротких оптических импульсов. Предложенная методика предполагает экспериментальное измерение временных задержек срабатывания детектора одиночных фотонов на короткие слабые оптические импульсы переменной длительности, подаваемые на его вход. При этом длительность оптических импульсов может превышать величину измеряемого джиттера. Представлены также результаты измерения временного джиттера низкошумящего детектора одиночных фотонов, использующего лавинный фотодиод производства компании RMY Electronics, проведено сравнение с коммерчески доступным детектором ID Quantique IDQube-NIR-GAT-MMF-LN. Проведенные экспериментальные исследования доказали успешность предложенной методики измерения временного джиттера.

Ключевые слова: детектор одиночных фотонов, лавинный фотодиод, квантовое распределение ключа, временной джиттер

Финансирование: Исследования проведены при финансовой поддержке Открытого акционерного общества «Российские железные дороги» в рамках договора № 1301/ОКЭ-ДКСС/22/1/1/.

Для цитирования: Анисимов А. А., Белов А. А., Козлов А. С., Котов О. И., Кринский П. А., Медведев А. В., Петров А. В., Розов С. В., Ушаков Н. А. Измерение временного джиттера низкошумящего детектора одиночных фотонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 1. С. 121–132. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19110>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19110>

MEASUREMENT OF THE TIMING JITTER OF A LOW-NOISE SINGLE PHOTON DETECTOR

**A. A. Anisimov, A. A. Belov, A. S. Kozlov, O. I. Kotov, P. A. Krinskiy,
A. V. Medvedev, A. V. Petrov, S. V. Rozov, N. A. Ushakov** 

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 n.ushakoff@spbstu.ru

Abstract. The article puts forward a technique for measuring the time jitter of a single photon detector (SPD). The proposed method does not require high-speed electronics and

short optical pulses. The procedure involves experimental measurement of the time delays of the SPD response to short weak optical pulses of variable duration applied to its input. In this case, the optical pulse duration may exceed the measured jitter value. The results of measuring the time jitter of a low-noise SPD using an avalanche photodiode (manufactured by RMY Electronics) have been presented and compared with a commercially available ID Quantique IDQube-NIR-GAT-MMF-LN detector. Our experimental studies have proved the success of the proposed time jitter measurement technique.

Keywords: single photon detector, avalanche photodiode, quantum key distribution, timing jitter

Funding: The reported study was funded by Joint Stock Company “Russian Railways” within the framework of Contract No. 1301/OKE-DKSS/22/1/1/.

For citation: Anisimov A. A., Belov A. A., Kozlov A. S., Kotov O. I., Krinskiy P. A., Medvedev A. V., Petrov A. V., Rozov S. V., Ushakov N. A., Measurement of the timing jitter of a low-noise single photon detector, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (1) (2026) 121–132. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19110>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Многие современные технологии базируются на измерении крайне слабых световых полей. Сюда можно отнести системы квантового распределения ключа, лидары, волоконно-оптические датчики, основанные на рассеянии излучения, оптические квантовые компьютеры и ряд других прорывных поисковых направлений. Активное внедрение этих технологий требует создания эффективных детекторов одиночных фотонов (*англ.* Single Photon Detector (SPD)) с низким уровнем шумов. В начале развития квантовых технологий [1, 2] в качестве детекторов SPDs использовались фотоэлектронные умножители, однако из-за стремления обеспечить работу на длинах волн ближнего ИК-диапазона, имеющих меньшее затухание в оптических волокнах, и ввиду малой эффективности фотоэлектронных умножителей в данном спектральном диапазоне, неизбежно последовал переход на полупроводниковые лавинные фотодетекторы (*англ.* Avalanche PhotoDetector (APD)) [3], имеющие высокую надежность и технологичность изготовления, а также обеспечивающие конкурентные характеристики.

Наиболее важными характеристиками SPDs выступают квантовая эффективность, частота темновых отсчетов и вероятность послелавинных срабатываний. Хотя наилучшие показатели на настоящий момент достигаются для SPDs на основе сверхпроводников [4], практическое применение таких детекторов в разработанных системах сопряжено со значительными трудностями из-за необходимости использования сложного криогенного оборудования. Поэтому на настоящий момент большое внимание уделяется улучшению характеристик SPDs на основе APDs.

Помимо шумовых параметров, важной характеристикой SPD является временная разрешающая способность, характеризуемая временным джиттером сигнала отклика на протектированный оптический импульс. Возможность измерения времени прихода одиночного фотона с разрешением порядка 100 – 200 пс востребована в системах квантового распределения ключа с кодированием кубитов при помощи спутанных временных отрезков (*англ.* time-bin entanglement), а также в лидарах и квантовых оптических датчиках. В первую очередь на временную разрешающую способность влияют собственные характеристики фотодиода, такие как время нарастания лавины, определяемое профилем легирования и геометрическими размерами, а также собственная емкость, зависящая также от конфигурации диода. Кроме того, как показано в статьях [5, 6], при повышении напряжения смещения на фотодиоде, временной джиттер снижается ввиду ускорения нарастания лавины в большем электрическом поле. Наряду с этим при понижении температуры диода увеличивается время жизни свободных носителей заряда, что увеличивает джиттер и снижает временную разрешающую способность.

Измерение характеристик SPD – это важная и нетривиальная задача, типовые методы требуют использования сложного лабораторного измерительного оборудования [7, 8].

В данной работе предложен метод измерения временного джиттера детектора одиночных фотонов (SPD) со сниженными требованиями к быстродействию измерительного оборудования.

Проведенный теоретический анализ показал, что оценку джиттера можно выполнять при длительности оптических импульсов, превышающих величину джиттера в 2-3 раза. Предложенный подход экспериментально проверен на изготовленном низкошумящем SPD, а также на коммерчески доступном детекторе ID Quantique IDQube-NIR-GAT-MMF-LN.

Описание реализованного детектора одиночных фотонов

Реализованный детектор одиночных фотонов (рис. 1) состоит из следующих компонентов: герметичного корпуса, системы охлаждения, источника питания, формирователя импульсов и платы питания и управления. Все элементы размещены на металлической пластине.

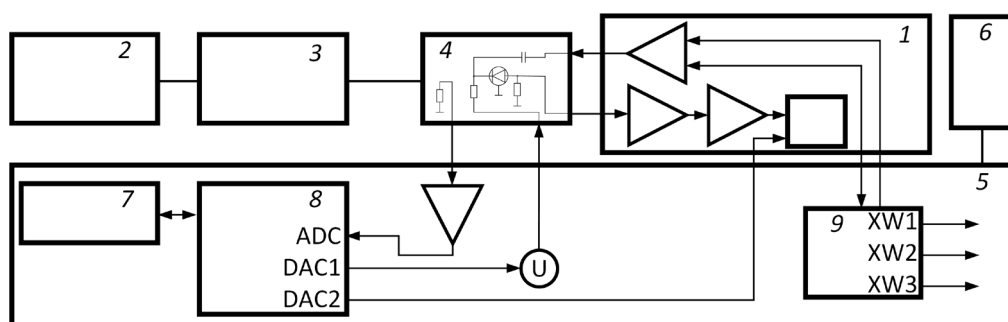


Рис. 1. Функциональная схема макета низкошумящего детектора одиночных фотонов:
 1, 4, 5 – макеты платы формирователя импульсов, плат интерфейса, питания и управления, соответственно;
 2, 6 – источники питания (24 и 12 В, соответственно); 3 – микрокриогенная система MKC500;
 7 – интерфейс USB; 8 – микроконтроллер; 9 – программируемая логическая интегральная схема

Схема работает следующим образом: на лавинный фотодетектор (APD) подается напряжение, превышающее напряжение пробоя. После поглощения фотона возникает лавинный пробой, который вызывает падение напряжения на нагрузочном резисторе. Этот сигнал поступает на двухкаскадный усилитель и далее на быстродействующий компаратор. К выходу компаратора подключена ключевая схема, обеспечивающая подавление пробоя за счет снижения напряжения смещения на APD. Цепь обратной связи в схеме компаратора обеспечивает длительность импульса подавления около 50 нс. Далее с программируемой логической интегральной схемой (EPLD) поступает импульс, удерживающий напряжение на APD ниже напряжения пробоя в течение времени релаксации. Линии связи с APD выполнены в виде микрополосковых линий с волновым сопротивлением 50 Ом.

Установка рабочей точки APD обеспечивается цифроаналоговым преобразователем (англ. Digit-to-Analog Converter (DAC)) микроконтроллера, который выставляет напряжение смещения. Это значение устанавливается для заданной температуры (так как абсолютное значение напряжения пробоя уменьшается с понижением температуры) и заданной квантовой эффективности. Температура APD определяется измерительным преобразователем с датчиком стандарта Pt1000 и оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (далее – ADC) микроконтроллера. Также на входы ADC подаются питающие напряжения и сигнал, пропорциональный среднему току APD для контроля исправности.

Для корректного измерения характеристик SPD был проведен комплексный анализ процесса формирования отсчетов. В частности, при измерении джиттера SPD, целесообразно минимизировать все срабатывания, кроме целевых. При наличии полезного светового сигнала на входе детектора, срабатывания происходят за счет следующих механизмов:

целевые срабатывания на фотоны, поглощаемые APD (вероятность срабатывания на каждый поглощенный фотон равна квантовой эффективности детектора);

темновые срабатывания, происходящие за счет внутренних тепловых флуктуаций в APD;

послелавинные срабатывания (вызываемые как целевыми, так и темновыми срабатываниями).

Для упрощения методик измерения характеристик SPDs можно принять во внимание следующий ряд соотношений. Как было отмечено выше, при продлении мертвого времени, более эффективно происходит рассасывание свободных носителей заряда; в результате послелавинные срабатывания вносят меньший вклад в общее количество отсчетов. В связи с этим, при оценке джиттера и частоты темновых отсчетов целесообразно выбирать режим работы с настолько продолжительным мертвым временем, что послелавинные срабатывания будут вносить пренебрежимо малый вклад в общее количество отсчетов.

Измерение временного джиттера детектора одиночных фотонов

Традиционно измерение временного джиттера фотоприемных устройств производится путем подачи на их вход коротких оптических импульсов и многократного измерения задержки между моментами генерации импульса и моментами обнаружения отклика детектора. Однако при высоком временном разрешении тестируемого приемника реализация такого прямого метода может оказаться затруднительной ввиду необходимости использования коротких лазерных импульсов с высокой экстинкцией и высокой скважностью. Например, при значении измеряемого джиттера 100 пс длительность самого импульса должна быть не более 10 пс. Для однозначного корректного прямого контроля формы таких импульсов требуются фотоприемники и осциллографы с полосой частот, приближающейся к 100 ГГц, что накладывает серьезные ограничения на возможность тестирования быстродействующих SPDs простыми прямыми методами.

Будем считать, что импульс, поглощаемый детектором, содержит один фотон, вероятность обнаружения которого в заданный момент времени τ прямо пропорциональна огибающей импульса $p(\tau)$.

Тогда соответствующее квантовое состояние можно записать в форме

$$|p\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) d\tau |1\rangle. \quad (1)$$

В свою очередь, момент времени срабатывания детектора t_D можно записать следующим образом:

$$t_D = \tau + t_{ji} + t_H + t_{MEAS}, \quad (2)$$

где t_H – случайная задержка, вносимая прочим измерительным оборудованием (генератор электрических импульсов, устройство измерения временных задержек); t_{ji} – случайная задержка срабатывания SPD; t_{MEAS} – ошибка оценки времени регистрации сигнала срабатывания детектора.

Если принять, что все случайные факторы, влияющие на разброс значений t_H , t_{ji} и τ , независимы, то дисперсию времен срабатывания детектора (σ_D)² можно выразить как сумму дисперсий величин t_{ji} , t_H и τ . Таким образом, если определять временной джиттер SPD как среднеквадратическое отклонение величины t_{ji} , то джиттер можно найти экспериментально, через многократные измерения задержки срабатывания детектора относительно времени генерации однофотонного импульса, путем нахождения среднеквадратического отклонения и пересчета по следующей формуле:

$$\sigma_{ji} \approx \sqrt{\sigma_D^2 - \sigma_H^2 - \sigma_P^2 - \sigma_{MEAS}^2}, \quad (3)$$

где σ_H , σ_{MEAS} – среднеквадратические отклонения временной задержки, вносимой измерительным оборудованием, и оценки времени регистрации сигнала срабатывания детектора t_{MEAS} , соответственно; σ_P – среднеквадратическая длительность однофотонного импульса, определяемая формулой

$$\sigma_H^2 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} (t-t_0)^2 p(t) dt, \quad (4)$$

$$t_0 = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot p(t) dt, \quad (5)$$

где

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) dt. \quad (6)$$

Эти теоретические выводы можно подтвердить результатами численного моделирования. В нашем исследовании такое моделирование было проведено следующим образом: время нахождения фотона внутри импульса, а также времена задержек, вносимых самим детектором одиночных фотонов и остальным оборудованием, моделировались как случайные величины. Для времени нахождения фотона внутри импульса использовалось сглаженное равномерное распределение.

Последнее было получено в виде суммы двух независимых случайных величин:

величина с равномерным распределением шириной 200 пс,

величина с нормальным распределением при нулевом среднем среднеквадратическом отклонении, равном 20 пс.

Для временных же задержек, вносимых SPD и остальным измерительным оборудованием, использовались нормальные распределения.

Всего было сгенерировано 10 тыс. реализаций случайных величин. Гистограммы времен нахождения фотона внутри импульса, временных задержек в оборудовании, задержек срабатывания детектора одиночных фотонов и результирующих времен срабатывания SPD приведены на рис. 2.

В описанном выше численном эксперименте среднеквадратические отклонения случайных величин t_{jit} , t_H и τ составляли 50, 5 и 61 пс, соответственно. Было найдено среднеквадратическое отклонение суммы этих величин, что составило 78,8 пс. Соответственно, если найти среднеквадратическое отклонение времен срабатывания SPD, а также знать форму оптического импульса и джиттер используемых приборов σ_H , то можно найти временной джиттер SPD по формуле (3).

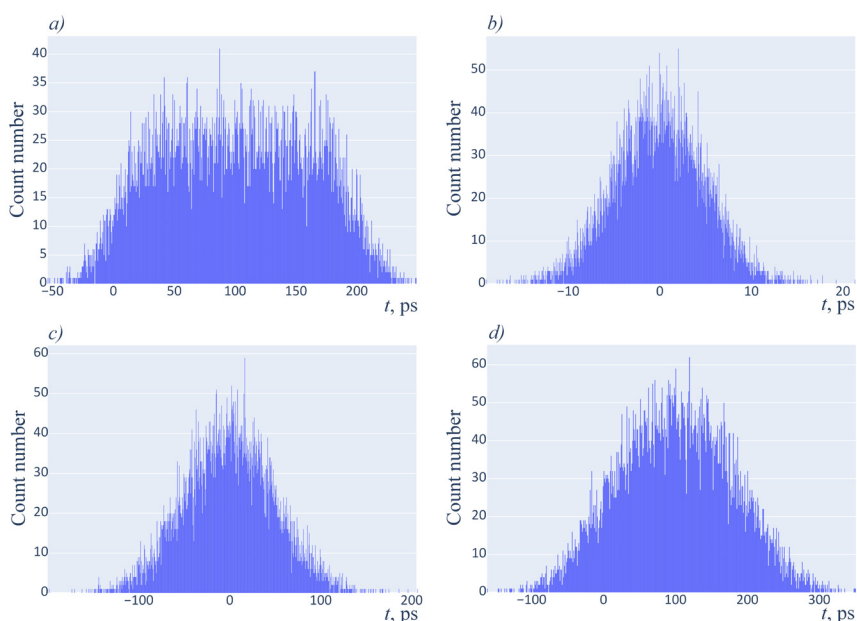


Рис. 2. Гистограммы времен нахождения фотона внутри импульса (a), временных задержек в оборудовании (b), задержек срабатывания SPD (c) и результирующих времен срабатывания SPD (d)

Для приведенного выше примера оцененное значение $\sigma_{jit} = 49,9$ пс хорошо соответствует значению, заложенному в численную модель.

Таким образом, нами предложен способ нахождения временного джиттера SPD, не требующий быстродействующего измерительного оборудования. Для применения разработанного способа необходимо предварительно оценить джиттер временных задержек, вносимых вспомогательным измерительным оборудованием. Также, очевидно, необходимо располагать информацией о форме световых импульсов, используемых для получения однофотонных состояний. Здесь необходимо отметить, что среднеквадратические отклонения временных задержек, входящие в формулу (3), принципиально отличаются от времен нарастания импульсных характеристик соответствующих приборов и зависят как от шумов регистрируемых сигналов, так и от принципов работы устройств.

При проведении измерений важно выбирать такие значения параметров измерительного оборудования, которые бы обеспечивали возможность достижения требуемой точности измерений (обеспечивали бы приемлемое значение величины σ_{MEAS}). С этой целью целесообразно воспользоваться фундаментальными соотношениями, описывающими достижимую разрешающую способность нахождения времени прихода некоторого сигнала. Оценку таких ограничений можно сделать на основе соотношения Рао – Крамера. В работе [9] были получены соотношения Рао – Крамера для нижней границы дисперсии оценки времени прихода склона импульса, описываемого функцией atan (арктангенс). Эта функция с хорошей точностью соответствует нарастающим склонам импульсов лавины, наблюдаемым в детекторах одиночных фотонов, и может быть успешно использована в данной работе. Согласно статье [9], нижняя граница среднеквадратического отклонения оценки времени прихода импульса записывается в виде

$$\sigma_{MEAS} = \sqrt{\frac{3 \cosh^3(t_L) t_{dur}}{\sinh(t_L) [2 \cosh^2(t_L) + 1]} f_s \cdot \text{SNR}}, \quad (7)$$

где t_{dur} – длительность линейного участка нарастающего склона импульса, время прихода которого измеряется; t_L – длительность отрезка склона, по которой оценивается время прихода, нормированное на t_{dur} ; f_s – частота дискретизации сигнала; SNR – отношение сигнал/шум, определенное как отношение квадрата половины амплитуды импульса, время прихода которого измеряется, к дисперсии аддитивного шума.

Как видно на рис. 3, амплитуда регистрируемого импульса составила 50 мВ, среднеквадратическое отклонение аддитивного шума, измеренное в отсутствие

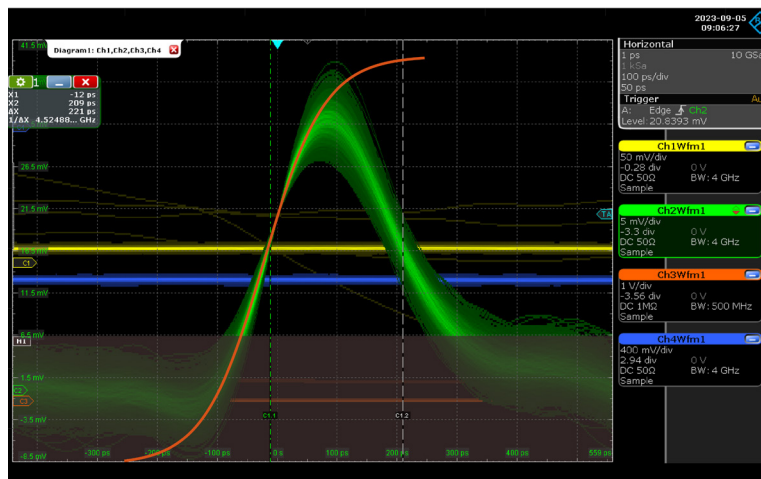


Рис. 3. Пример экспериментально измеренных форм лазерного импульса длительностью 220 пс: Горизонтальная ось – это шкала времени (масштаб 100 пс/дел.), вертикальная – шкала напряжения (5 мВ/дел.). Представлены сигналы фотоприемника, регистрировавшего лазерные импульсы (зеленые кривые) и аппроксимация функцией atan (арктангенс) нарастающего склона сигналов фотоприемника (красная кривая). Вертикальные пунктирные линии ограничивают длительность импульса по уровню, равному полувысоте максимума

полезного сигнала, составило около 0,8 мВ, что соответствует отношению сигнал/шум, равному 1000. Для сигнала срабатывания SPD перепад напряжения на склоне составляет 1,6 В, а среднеквадратическое отклонение аддитивного шума в отсутствие срабатываний – 40 мВ, что соответствует отношению сигнал/шум (SNR), равному 1600. Для реалистичного значения параметра $t_{dur} = 1$ нс (такое значение времени нарастания можно ожидать при рабочей полосе применяемого осциллографа 1 ГГц), значения величин следующие: $t_f = 1,145$ (оптимальное значение), $f_s = 10$ ГГц, $SNR = 10^3$, неопределенность $\sigma_{MEAS} = 8,3$ пс, что существенно ниже ожидаемого джиттера SPD.

Критерием применимости предложенной методики является малость величин σ_{MEAS} и σ_H , по сравнению с длительностью импульсов τ и измеряемой величиной σ_{jit} :

$$(\sigma_{MEAS})^2 + (\sigma_H)^2 \ll \tau^2 \sim (\sigma_{jit})^2. \quad (8)$$

Экспериментальное исследование джиттера низкошумящего детектора одиночных фотонов

Предложенная методика оценки временного джиттера SPD была экспериментально протестирована на примере коммерческого детектора одиночных фотонов ID Quantique IDQube-NIR-GAT-MMF-LN и разработанного в нашей лаборатории низкошумящего SPD (см. раздел «Описание реализованного детектора одиночных фотонов»). Температура лавинного фотодиода (APD) составляла -90°C , мертвое время – 100 мкс, квантовая эффективность – 25%. Для создания лазерных импульсов длительностью от 200 до 600 пс применяли лазер «Нолатех DFB-1550-AX» с длиной волны $\lambda = 1550$ нм, работающий в режиме переключаемого усиления [10]. Пиковая мощность излучения составляла около 450 мкВт, (см. схему на рис. 4).

Чтобы получить излучение субфотонной интенсивности, эмиссия лазера ослаблялась с использованием комплекта переменных аттенюаторов с суммарным ослаблением около 67 дБ. Часть лазерного излучения подавалась на быстродействующий фотоприемник Thorlabs SIR5 с частотой среза 2 ГГц. Выходные электрические сигналы фотоприемника использовались в качестве начала отсчета при измерении времени срабатывания SPD. Для определения временной задержки импульсов от фотоприемника и от SPD применялся осциллограф Rohde & Schwarz RTO2044 с полосой частот 4 ГГц и частотой дискретизации 10 ГГц.

Чтобы обосновать наше допущение о пренебрежимо малом количестве нецелевых отсчетов, вначале были сняты зависимости частоты отсчетов SPD в отсутствие подачи на вход оптического сигнала от значения мертвого времени при квантовой эффективности 10%. Если принять вероятность послелавинных срабатываний близкой к нулю при высоких значениях мертвого времени, то частоту темновых срабатываний можно считать равной уровню асимптоты для зависимости частоты срабатываний от мертвого времени.

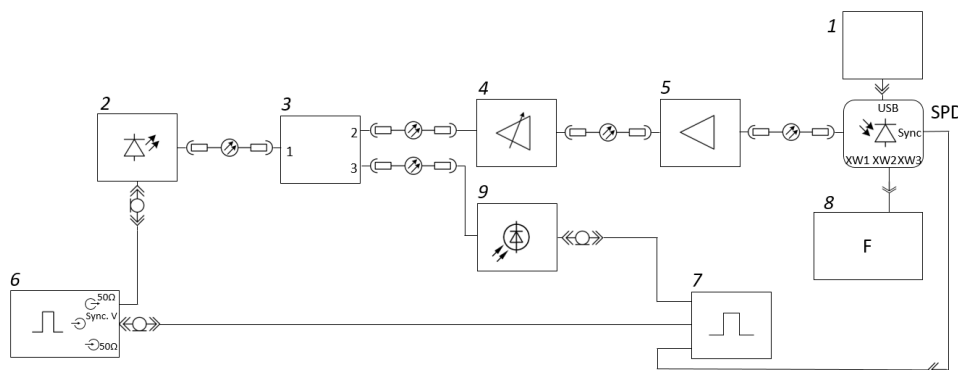


Рис. 4. Схема для измерения временного разрешения SPD:

- 1 – персональный компьютер; 2 – лазер DFB-1550-AX; 3 – волоконный X-разветвитель (50:50); 4, 5 – переменные аттенюаторы 0 – 40 дБ и 0 – 70 дБ, соответственно;
- 6 – генератор импульсов Г5-78; 7 – осциллограф Rohde & Schwarz RTO2044;
- 8 – частотомер ЧЗ-54; 9 – фотодетектор Thorlabs SIR5

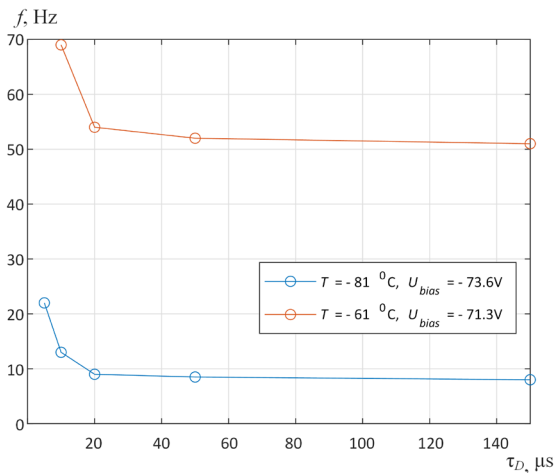


Рис. 5. Экспериментальные зависимости частоты темновых отсчетов от мертвого времени для двух режимов работы схемы

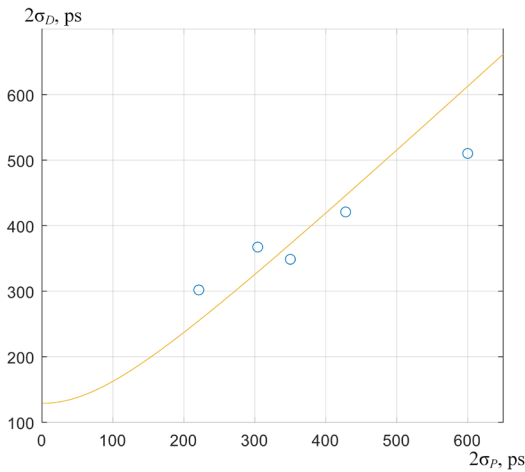


Рис. 6. Экспериментальная зависимость ширины гистограммы значений времени срабатывания SPD от длительности лазерного импульса (кружки) и ее аппроксимация выражением (3) (линия) методом наименьших квадратов

не 0,5 от максимального с удвоенной среднеквадратической длительностью импульса, рассчитанной по формуле (5); это совпадение обусловлено отличием формы лазерного импульса от гауссовой. В итоге величину джиттера σ_{jit} определяли аппроксимацией экспериментальной зависимости $2\sigma_D(2\sigma_p)$, показанной на рис. 6, методом наименьших квадратов. В результате аппроксимации было получено значение джиттера SPD $2\sigma_{jit} = 128$ пс.

Примеры выходных сигналов низкошумящего SPD и гистограммы их временных задержек относительно лазерных импульсов длительностью 220 пс приведены на рис. 7. Необходимо отметить, что оценка ширины гистограммы на рис. 7 сделана на уровне 0,500, тогда как для определения джиттера используется ширина на уровне 0,605. Эта разница приводит к различию значений, показанных на рис. 6 и 7.

Аналогичные измерения были проведены для коммерчески доступного детектора ID Quantique IDQube-NIR-GAT-MMF-LN. Для него измеренное значение джиттера при квантовой эффективности 25% составило 140 пс (паспортное значение – менее 150 пс). Полученный результат доказывает успешность предложенной методики.

Результаты экспериментальных измерений представлены на рис. 5. Из этой зависимости частота темновых отсчетов оценивается на уровне от 10 до 50 Гц, что есть крайне низкая величина, для которой можно использовать предположения, относящиеся к режиму работы с продолжительным мертвым временем (см. раздел «Описание реализованного детектора одиночных фотонов»).

Для измерения джиттера SPD, на осциллографе был включен режим синхронизации по каналу 2 и построение горизонтальной гистограммы по каналу 3. Накопление значений для построения гистограммы создавалось в течение 60 с. Ширина гистограммы измерялась на уровне около 0,605 относительно ее максимального уровня, среднеквадратическое отклонение моментов времени σ_D (срабатывания SPD) определялось как полуширина гистограммы. Следует отметить, что ширина гистограммы нормального распределения на уровне 0,500 относительно максимального уровня (удобнее ее измерять экспериментально) соотносится с шириной на уровне 0,605 как

$$w_{0,500} = 1,167w_{0,605} = 2,334 \sigma_D.$$

Далее величина временного джиттера оценивалась по формуле (3). В качестве оценки джиттера использовалось удвоенное значение среднеквадратического отклонения $2\sigma_{jit}$ (σ_{jit} – задержка срабатываний, вызванных детектором). Для более точного определения временного джиттера, значения ширины гистограммы σ_D находили при разных значениях длительности лазерного импульса σ_p : 220, 300, 350, 600 и 1200 пс. Для всех измеренных значений длительности была проведена проверка совпадения ширины на уровне

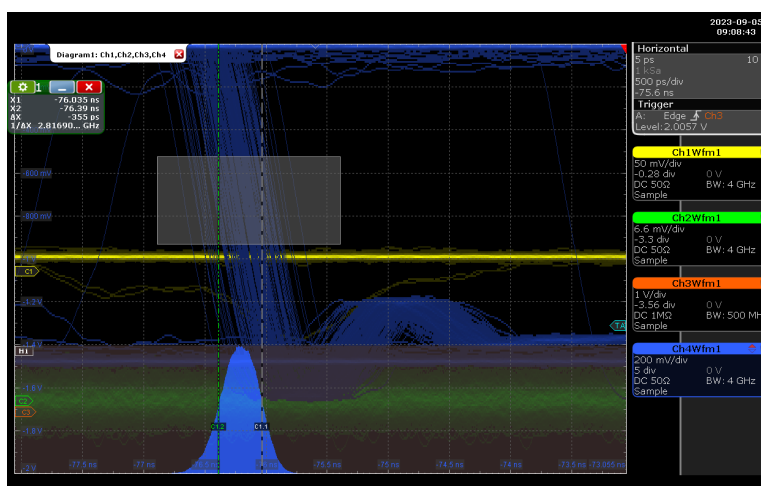


Рис. 7. Пример выходных сигналов SPD (верхняя часть) и гистограммы задержки времени срабатывания низкошумящего SPD относительно управляющего импульса длительностью 220 пс (нижняя часть). Горизонтальная ось – это шкала времени (масштаб 500 пс/дел.), вертикальная – шкала напряжения (200 мВ/дел.) Вертикальные пунктирные линии ограничивают ширину гистограммы по уровню, равному полувисоте максимума

Заключение

В работе предложен и обоснован метод измерения временного джиттера детекторов одиночных фотонов (SPD), не использующий быстродействующие электрооптические компоненты и измерительное оборудование. Экспериментально продемонстрировано измерение временного джиттера на уровне 100 пс с использованием зондирующих импульсов длительностью более 200 пс и осциллографа с полосой частот 4 ГГц. Теоретически показаны фундаментальные пределы разрешающей способности таких измерений.

Для реализованного низкошумящего детектора одиночных фотонов экспериментально измерено значение временного джиттера: оно составило 128 пс при охлаждении APD до температуры $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует лучшим известным мировым аналогам.

Следует отметить, что предложенная методика измерения временного джиттера может применяться для детекторов одиночных фотонов других типов, включая фотоумножители и сверхпроводниковые детекторы.

Основными условиями, которые налагаются на детекторы, – это значения параметра длительности зондирующих импульсов, которые должны быть сравнимы с измеряемой величиной джиттера, а также использование измерительного оборудования, удовлетворяющего условию (8), а именно – малость величин σ_{MEAS} и σ_H , по сравнению с длительностью импульсов τ и измеряемой величиной σ_{jitter} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bennett C. H., Bessette F., Brassard G., Salvail L., Smolin J. Experimental quantum cryptography // Journal of Cryptology. 1992. Vol. 5. No. 1. Pp. 3–28.
2. Hong C. K., Ou Z. Y., Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference // Physical Review Letters. 1987. Vol. 59. No.18. Pp. 2044–2046.
3. Marand C., Townsend P. D. Quantum key distribution over distances as long as 30 km // Optics Letters. 1995. Vol. 20. No. 16. Pp. 1695–1697.
4. Smirnov K., Divochiy A., Vakhtomin Y., Morozov P., Zolotov P., Antipov A., Seleznev V. NbN single-photon detectors with saturated dependence of quantum efficiency // Superconductor Science and Technology. 2018. Vol. 31. No. 3. P. 035011.
5. Amri E., Boso G., Korzh B., Zbinden H. Temporal jitter in free-running InGaAs/InP single-photon avalanche detectors // Optics Letters. 2018. Vol. 41. No. 24. Pp. 5728–5731.

6. Acerbi F., Anti M., Tosi A., Zappa F. Design criteria for InGaAs/InP single-photon avalanche diode // IEEE Photonics Journal. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 6800209.
7. Мосенцов С. Н., Лосев А. В., Заводиленко В. В., Филяев А. А., Павлов И. Д., Буров Н. В. Сравнение отечественных детекторов одиночных фотонов от QRate с аналогами от ID Quantique // Фотоника. 2023. Vol. 17. No. 2. Pp. 134–145.
8. Hadfield R. H. Single-photon detectors for optical quantum information applications // Nature Photonics. 2009. Vol. 3. No. 12. Pp. 696–705.
9. Ushakov N. A., Markvart A. A., Liokumovich L. B. Pulse wave velocity measurement with multiplexed fiber optic Fabry–Perot interferometric sensors // IEEE Sensors Journal. 2020. Vol. 20. No. 19. Pp. 11302–11312.
10. Wang Y., Chen G., Wang X. Characteristics of 1.55- μm gain-switched DFB laser diode // Proceedings of SPIE. 1998. Vol. 3547. Semiconductor Lasers III. 19 August. Event: Photonics China '98, Beijing, China. Pp. 4–7.

REFERENCES

1. Bennett C. H., Bessette F., Brassard G., et al., Experimental quantum cryptography, J. Cryptol. 5 (1) (1992) 3–28.
2. Hong C. K., Ou Z. Y., Mandel L., Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference, Phys. Rev. Lett. 59 (18) (1987) 2044–2046.
3. Marand C., Townsend P. D., Quantum key distribution over distances as long as 30 km, Opt. Lett. 20 (16) (1995) 1695–1697.
4. Smirnov K., Divochiy A., Vakhtomin Y., et al., NbN single-photon detectors with saturated dependence of quantum efficiency, Supercond. Sci. Technol. 31 (3) (2018) 035011.
5. Amri E., Boso G., Korzh B., Zbinden H., Temporal jitter in free-running InGaAs/InP single-photon avalanche detectors, Opt. Lett. 41 (24) (2018) 5728–5731.
6. Acerbi F., Anti M., Tosi A., Zappa F., Design criteria for InGaAs/InP single-photon avalanche diode, IEE Photonics J. 5 (2) (2013) 6800209.
7. Mosentsov S. N., Losev A. V., Zavodilenko V. V., et al., Comparison of domestic single photon detectors by QRate with the analogues by ID Quantique, Photonics Russia. 17 (2) (2023) 134–145 (in Russian).
8. Hadfield R. H., Single-photon detectors for optical quantum information applications, Nat. Photonics. 3 (12) (2009) 696–705.
9. Ushakov N. A., Markvart A. A., Liokumovich L. B., Pulse wave velocity measurement with multiplexed fiber optic Fabry–Perot interferometric sensors, IEEE Sens. J. 20 (19) (2020) 11302–11312.
10. Wang Y., Chen G., Wang X., Characteristics of 1.55- μm gain-switched DFB laser diode, Proc. SPIE. Vol. 3547. Semiconductor Lasers III, 19 Aug.; Photonics China '98, Beijing, China (1998) 4–7.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АНИСИМОВ Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
anisimov.spbstu@yandex.ru

БЕЛОВ Андрей Александрович – ведущий инженер Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
belov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-0617-4514

КОЗЛОВ Артемий Сергеевич – инженер Международного научно-образовательного центра “National Instruments – Политехник“, ассистент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
kozlov_as@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-1722-1964

КОТОВ Олег Иванович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
kotov@rphf.spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-8448-2024

КРИНСКИЙ Павел Александрович – инженер I категории Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
krinsky@mail.ru
ORCID: 0009-0003-4426-9503

МЕДВЕДЕВ Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
medvedev@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7083-9184

ПЕТРОВ Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
petrov.avl@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-5216-6588

РОЗОВ Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
svroz@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7305-4857

УШАКОВ Николай Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
n.ushakoff@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3480-2779

THE AUTHORS

ANISIMOV Andrey A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
anisimov.spbstu@yandex.ru

BELOV Andrey A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
belov@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-0617-4514

KOZLOV Artemy S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
kozlov_as@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-1722-1964

KOTOV Oleg I.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
kotov@rphf.spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-8448-2024

KRINSKIY Pavel A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
krinsky@mail.ru
ORCID: 0009-0003-4426-9503

MEDVEDEV Andrey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
medvedev@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-7083-9184

PETROV Aleksandr V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
petrov.av1@spbstu.ru
ORCID: 0000-0001-5216-6588

ROZOV Sergey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
svroz@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7305-4857

USHAKOV Nikolai A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
n.ushakoff@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-3480-2779

*Статья поступила в редакцию 12.10.2024. Одобрена после рецензирования 22.10.2025.
Принята 22.10.2025.*

Received 12.10.2024. Approved after reviewing 22.10.2025. Accepted 22.10.2025.