



Сравнение отечественных детекторов одиночных фотонов от QRate с аналогами от ID Quantique

С. Н. Мосенцов¹, А. В. Лосев², В. В. Заводиленко²,
А. А. Филяев², И. Д. Павлов¹, Н. В. Буров¹

¹ АО «ЛЛС», Санкт-Петербург, Россия

² ООО «КуРэйт», Москва, Россия

Статья посвящена сравнению характеристик детекторов одиночных фотонов производителей QRate (Россия) и ID Quantique (Швейцария). В работе исследованы их квантовые эффективности, частоты темнового счета и вероятности послеимпульсов. Результаты тестирования показали взаимозаменяемость детекторов, несоответствие зарубежных детекторов заявленным характеристикам и продемонстрировали потенциал отечественной разработки.

Ключевые слова: детектор одиночных фотонов, квантовые технологии, ID Quantique, QRate, российское производство

Статья получена: 21.01.2023

Статья принята: 14.02.2023

ВВЕДЕНИЕ

Российская компания QRate, разработчик и поставщик комплексных аппаратно-программных решений для обеспечения информационной безопасности с помощью квантовых технологий, совместно со специалистами АО «ЛЛС» на базе своей научно-исследовательской лаборатории провела тестирование детекторов одиночных фотонов (ДОФ) собственного производства и производства ID Quantique (Швейцария).

На все ДОФ подавались когерентные состояния со статистикой 0,1 фотон/импульс. Т.е. в среднем на 10 приходящих на ДОФ световых импульсов

Comparison of Domestic Single Photon Detectors by QRate With the Analogues by ID Quantique

S. N. Mosentsov¹, A. V. Losev², V. V. Zavadilenko², A. A. Filyaev¹,
I. D. Pavlov², N. V. Burov¹

¹ LLS SC, Saint-Petersburg, Russia

² QRate LLC, Moscow, Russia

The article is devoted to the comparison of specifications of the single photon detectors manufactured by QRate (Russia) and ID Quantique (Switzerland). Their quantum efficiencies, dark count rates, and afterpulse probabilities have been examined in this work. The test results have showed the interchangeability of detectors and non-compliance of foreign detectors with the declared specifications and demonstrated the potential capacities of domestic development.

Keywords: single photon detector, quantum technologies, ID Quantique, QRate, Russian production

Article received: 21.01.2023

Article accepted: 14.02.2023

INTRODUCTION

The Russian company QRate, a developer and supplier of comprehensive hardware and software solutions for information security using the quantum technologies, together with specialists from LLS SC, have tested the own-produced single photon detectors (SPDs) and those made by ID Quantique (Switzerland) in its own research laboratory.

All SPDs were provided with the coherent states with the statistic value of 0.1 photon/pulse. On average, 10 light pulses received by the SPD correspond to one pulse with 1 photon and nine pulses without any photons. The SPDs under study are designed in such a way that, by using the electronic avalanche gain effect, they generate

приходился один импульс с 1 фотоном и девять импульсов без фотонов. Исследуемые ДОФ сконструированы таким образом, чтобы за счет использования эффекта лавинного электронного умножения генерировать на выходе токовый импульс при поглощении даже одного фотона фоточувствительной областью детектора.

Целями исследования являлись сравнительная характеристика отечественных ДОФ с зарубежными аналогами и изучение реальных характеристик зарубежных ДОФ.

В тестах принимало участие четыре модели детекторов:

- две модели **QRate**:
QRATE-SPD-GEN1-FR и QRATE-SPD-GEN2-FR;
- две модели **ID Quantique**:
IDQube-NIR-FR-MMF-LN и ID230.

УСТРОЙСТВО СИСТЕМЫ И АЛГОРИТМ РАБОТЫ

Тестирование детекторов одиночных фотонов производили с помощью специального автоматизированного измерительного стенда, специально разработанного для измерения эксплуатационных параметров ДОФ. Стенд включает в себя:

a current pulse at the output when even a single photon is absorbed by the photosensitive detector area.

The objectives of study included a comparative description of domestic SPDs and foreign analogues and examination of the real specifications of foreign SPDs.

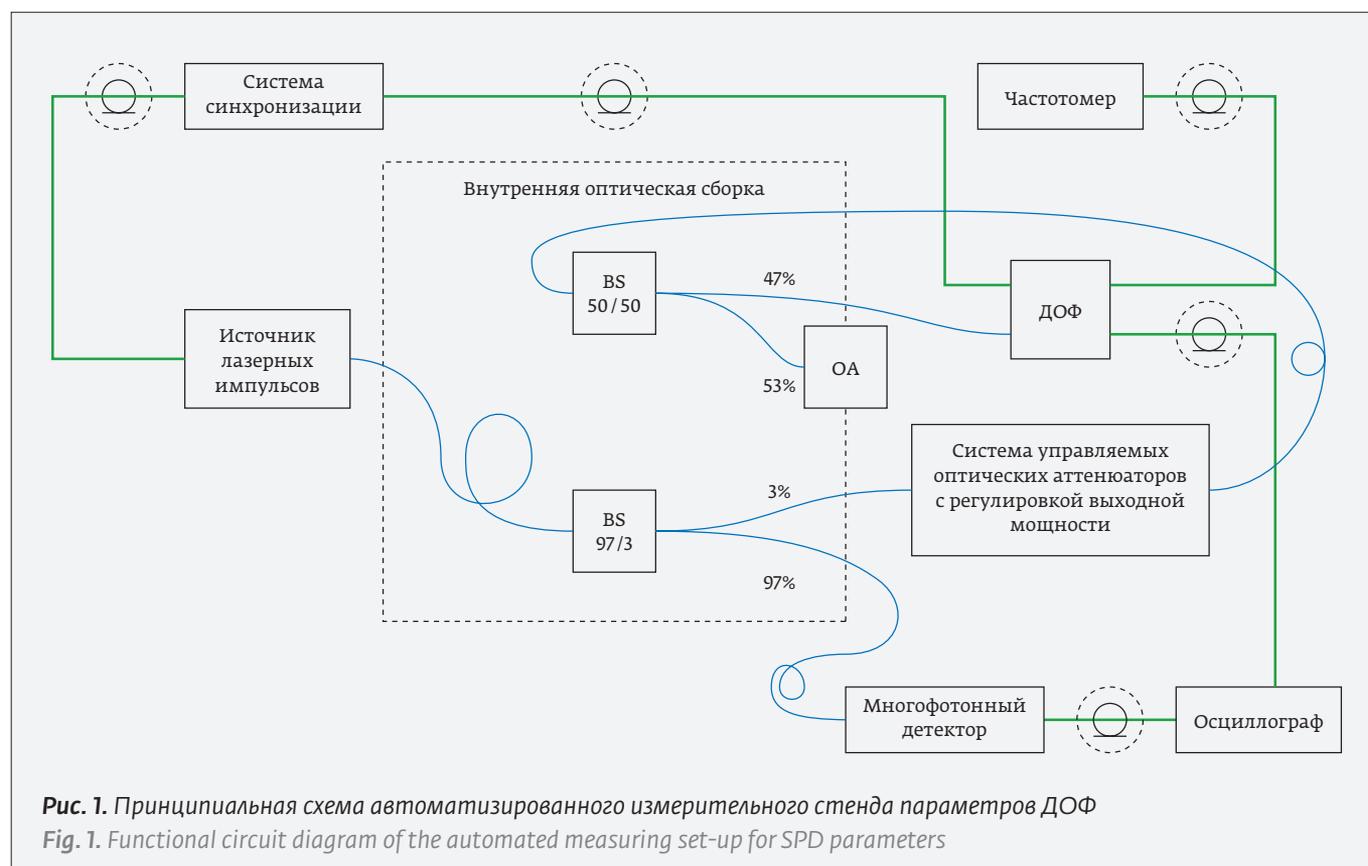
Four models of detectors were used in the tests:

- two **QRate** models:
QRATE-SPD-GEN1-FR and QRATE-SPD-GEN2-FR;
- two **ID Quantique** models:
IDQube-NIR-FR-MMF-LN and ID230.

SYSTEM DESIGN AND OPERATION ALGORITHM

The single photon detectors were tested using a special automated measuring set-up, specially designed to measure the SPD operating parameters. The set-up included the following:

- synchronization system;
- laser pulse source;
- beam splitter system (BS);
- system of controlled optical attenuators with the adjustable output power;
- tested SPD;
- frequency counter;
- oscilloscope.



- систему синхронизации,
- источник лазерных импульсов,
- систему светоделителей (BS),
- систему управляемых оптических аттенюаторов с регулируемой выходной мощностью,
- испытываемый ДОФ,
- частотомер,
- осциллограф.

В конструкции стенда предусмотрен дополнительный оптический адаптер (ОА) для организации параллельных измерений двух ДОФ. Все компоненты этой системы управляются ПО, созданным в среде LabVIEW.

The set-up design provides for an additional optical adapter (OA) for arranging parallel measurements for two SPDs. All components of this system are controlled by the software developed in the LabVIEW environment.

A functional circuit diagram of an automated measuring set-up for the SPD operational parameters is shown in Fig. 1. Thick black links indicate the contact of two devices using the HF coaxial cables, thin ones indicate the optical fibers. Fig. 2 shows the individual units of the automated measuring set-up for the SPD operational parameters.

The laser pulses and strobe electrical signals are generated in the same frequency grid, and the phase

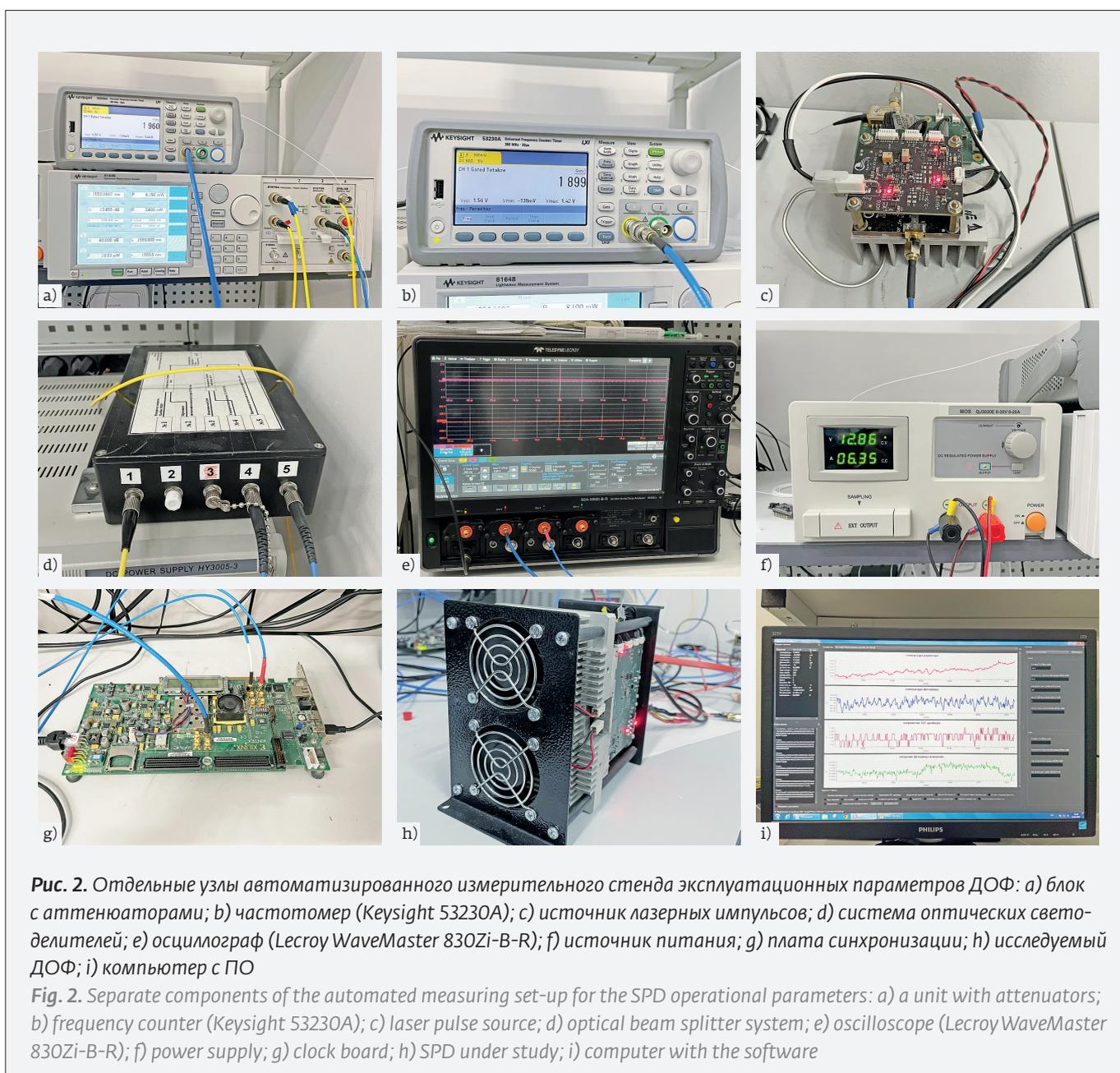


Рис. 2. Отдельные узлы автоматизированного измерительного стенда эксплуатационных параметров ДОФ: а) блок с аттенюаторами; б) частотомер (Keysight 53230A); в) источник лазерных импульсов; д) система оптических светоделителей; е) осциллограф (Lecroy WaveMaster 830Zi-B-R); ф) источник питания; г) плата синхронизации; h) исследуемый ДОФ; и) компьютер с ПО

Fig. 2. Separate components of the automated measuring set-up for the SPD operational parameters: а) a unit with attenuators; б) frequency counter (Keysight 53230A); в) laser pulse source; д) optical beam splitter system; е) oscilloscope (Lecroy WaveMaster 830Zi-B-R); ф) power supply; г) clock board; h) SPD under study; и) computer with the software

Принципиальная схема автоматизированного измерительного стенда эксплуатационных параметров ДОФ показана на рис. 1. Утолщенные черные связи обозначают контакт двух устройств с использованием ВЧ-коаксиальных кабелей, тонкие – оптические волокна. На рис. 2 представлены отдельные узлы автоматизированного измерительного стенда эксплуатационных параметров ДОФ.

Лазерные импульсы и стробирующие электрические сигналы генерируются в одинаковой частотной сетке, а фазовый сдвиг между ними контролируется системой синхронизации. Система синхронизации представляет собой программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), используемую в качестве генератора опорной частоты для высокочастотного драйвера лазера и ДОФ. Относительную фазу между лазерными импульсами и синусоидальными стробирующими импульсами ДОФ можно варьировать для достижения максимально возможной скорости счета при неизменных прочих параметрах. Сам лазерный источник является лазерным диодом с центральной длиной волны 1550,12 нм, смонтированным на драйверную плату (рис. 3) и настраиваемым через консольную строку на компьютере.

Оптические импульсы с источника поступают на вход светоделителя, где расщепляются на две компоненты с интенсивностью в соотношении 97/3. Светоделитель используется для того, чтобы с помощью детектирования части мощности, падающей на многофотонный детектор, иметь возможность управлять формой, длительностью и частотой повторения лазерных импульсов в слабомощном оптическом плече. На вход системы из двух последовательно соединенных управляемых аттенюаторов поступает свет значительно меньшей интенсивности. Поскольку мощность светового излучения, прошедшего через первый аттенюатор, может быть измерена, а второй аттенюатор имеет фиксированный коэффициент ослабления, выходную мощность лазерных импульсов можно регулировать и поддерживать равной примерно 0,1 фотона в импульсе. Такой сигнал и попадает на вход ДОФ.

Выходной электрический сигнал с ДОФ поступает одновременно на частотомер и осциллограф посредством делителя электрической мощности. Из показаний частотомера определяются эффективность детектирования фотонов, квантовая эффективность (PDE или QE) и частота темно-

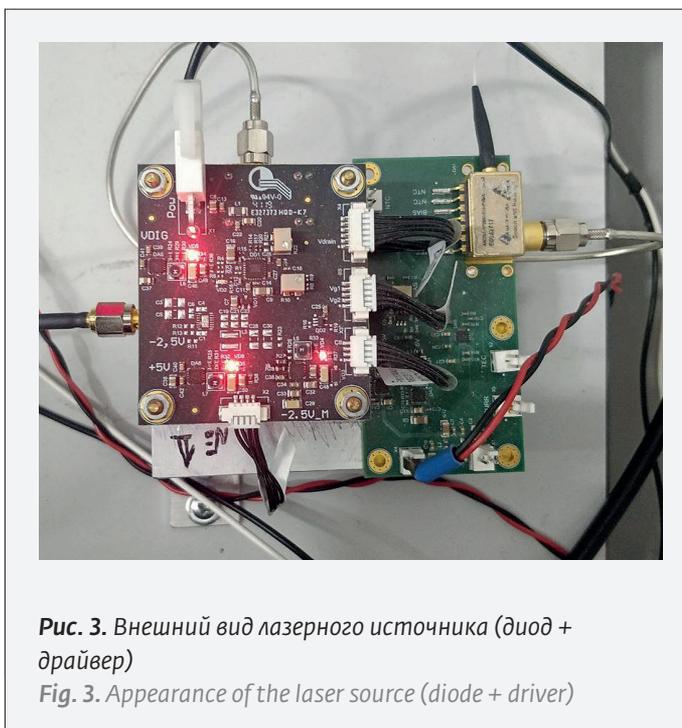


Рис. 3. Внешний вид лазерного источника (диод + драйвер)
 Fig. 3. Appearance of the laser source (diode + driver)

shift between them is controlled by a synchronization system. The synchronization system is a field-programmable gate array (FPGA) used as a reference frequency generator for the high-frequency laser driver and SPD. The relative phase between the laser pulses and the sinusoidal strobe SPD pulses can be varied to achieve the highest possible count rate with the unchanged other parameters. The laser source is a laser diode with a central wavelength of 1550.12 nm, mounted on a driver board (Fig. 3) and configured using the console line on a computer.

Optical pulses from the source are sent to the beam splitter input, where they are split into two components with an intensity in the ratio 97/3. The beam splitter is used in order to be able to control the shape, duration and repetition rate of laser pulses in a low-power optical arm by detecting a part of the power incident on a multiphoton detector. At the input of two series-connected controlled attenuators incident light of much lower intensity. Since the power of light transmitted through the first attenuator can be measured, and the second attenuator has a fixed attenuation ratio, then the output power of laser pulses can be controlled and maintained at about 0.1 photon per pulse. Such a signal enters the SPD input.

The output electrical signal from the SPD is fed simultaneously to the frequency counter and the oscilloscope through an electric power divider. The photon detection efficiency, quantum efficiency (PDE or QE), and dark count rate (DCR) are determined based on the

вого счета (DCR). На осциллографе отображается гистограмма количества срабатываний во времени, по которой определяются мертвое время (DT) и вероятность послеимпульсов (AP).

КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ

В начале работы источник лазерного излучения нуждается в калибровке. Частота следования оптических импульсов, а также их длительность фиксируются с помощью осциллографа и многофотонного детектора посредством подключения оптического выхода лазера к детектору, который, в свою очередь, подключен к осциллографу (рис. 4).

На рис. 5 изображена осциллограмма оптического импульса лазерного источника. По ней можно определить, что параметр FWHM равен примерно 40 пс. По рис. 6 хорошо видно, что частота следования лазерных импульсов равна 100 кГц. Зная эту частоту, можно выставить требуемую оптическую мощность при помощи аттенюатора таким образом, чтобы учитыва-



Рис. 4. Подключенный к осциллографу многофотонный детектор

Fig. 4. Multiphoton detector connected to the oscilloscope

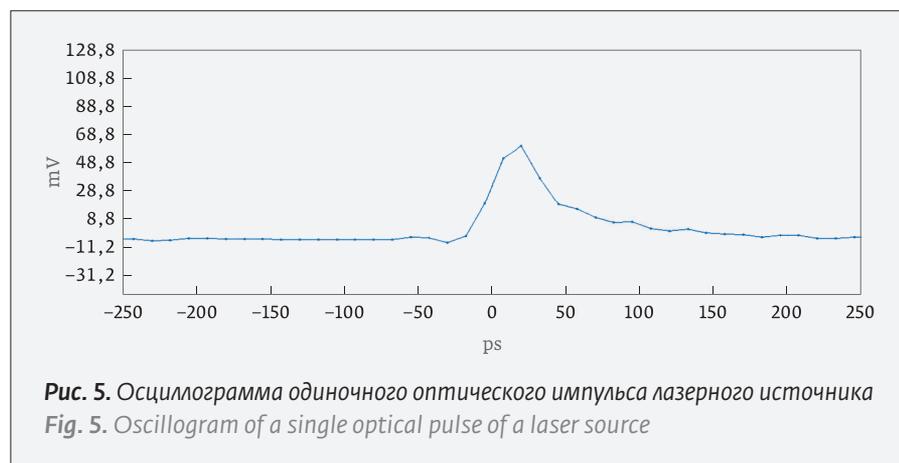


Рис. 5. Осциллограмма одиночного оптического импульса лазерного источника

Fig. 5. Oscillogram of a single optical pulse of a laser source

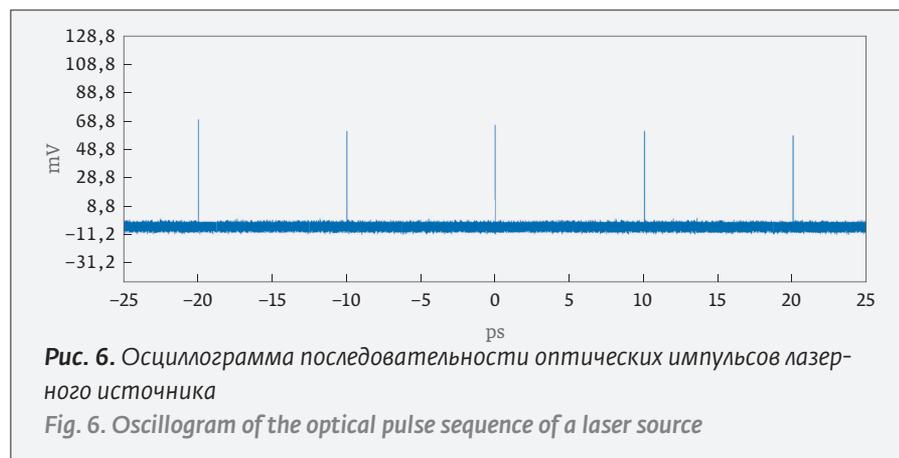


Рис. 6. Осциллограмма последовательности оптических импульсов лазерного источника

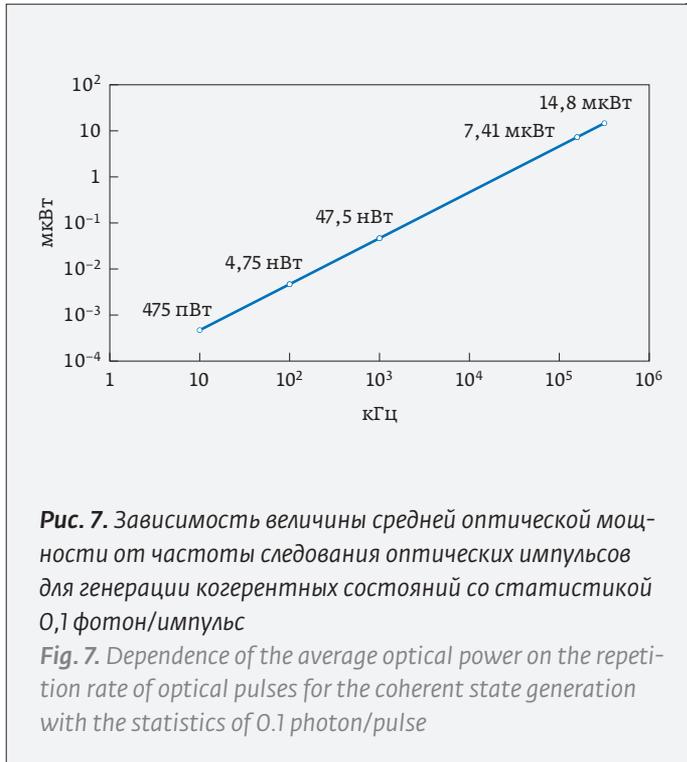
Fig. 6. Oscillogram of the optical pulse sequence of a laser source

frequency counter readings. The oscilloscope displays a histogram of the number of operations over time that determines the dead time (DT) and the after-pulse probability (AP).

SYSTEM CALIBRATION

The laser source needs to be calibrated at the commencement of operation. The repetition rate of optical pulses, as well as their duration, are recorded using an oscilloscope and a multiphoton detector by connecting the laser optical output to the detector that in turn is connected to the oscilloscope (Fig. 4).

Fig. 5 shows the oscillogram of the laser source's optical pulse. It can be used to determine that the FWHM parameter is approximately 40 ps. Fig. 6 clearly shows that the repetition rate of laser pulses is 100 kHz. If this rate is known, it is possible to set the required optical power using an attenuator in such a way that all losses in the fiber-optic line are considered and, as a result, the detector receive such



лись все потери в волоконно-оптической линии и по итогу в детектор входила такая оптическая мощность, которая соответствовала бы генерации когерентных состояний со статистикой 0,1 фотон/импульс. Зависимость средней оптической мощности от частоты следования оптических импульсов для такой генерации представлена на рис. 7. В качестве опорных точек были взяты частоты 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц, 156,25 МГц и 312,5 МГц. Выбор последних двух частот обусловлен работой детекторов QRate на данных частотах.

После калибровки источник лазерных импульсов подключается непосредственно к исследуемому ДОФ. Во всех дальнейших замерах была установлена частота 100 кГц и соответствующая средняя мощность 4,75 нВт на входе в детектор.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения были проведены для всех четырех детекторов. Результаты тестирования фотодетекторов были сведены в таблицы, а типичное изображение гистограммы накопления отсчетов представлено на рис. 8.

optical power that would correspond to the generation of coherent states with the statistics of 0.1 photon/pulse. Dependence of the average optical power on the repetition rate of optical pulses for such generation is shown in Fig. 7. The frequencies of 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 156.25 MHz and 312.5 MHz are used as the reference points. Selection of the last two frequencies is due to the QRate detector operation at these frequencies.

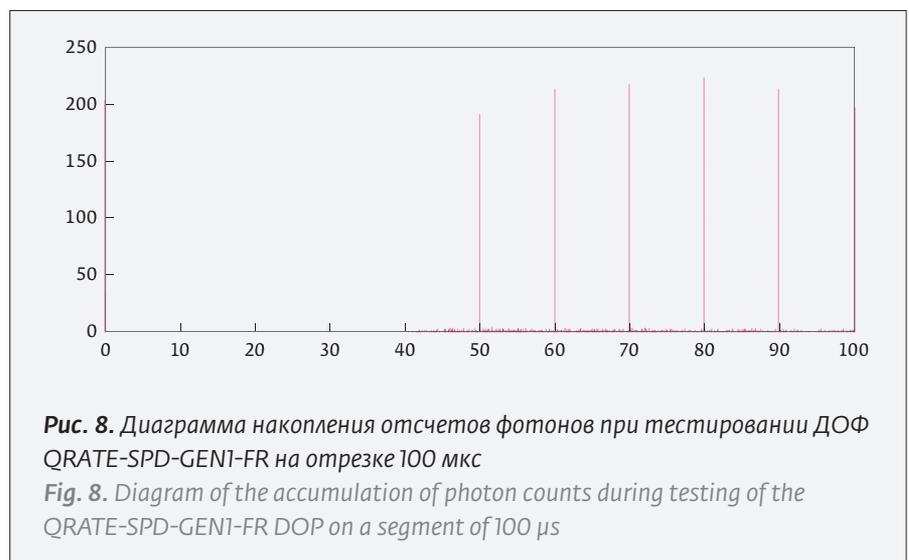
After calibration, the source of laser pulses is connected directly to the SPD under study. During all further measurements, the frequency is set to 100 kHz and the relevant average power is 4.75 nW at the detector input.

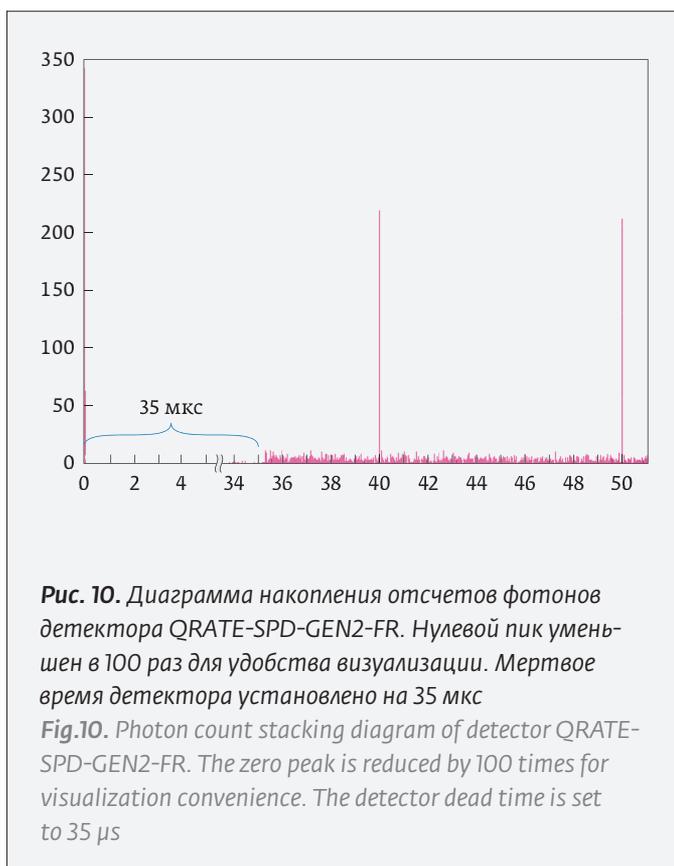
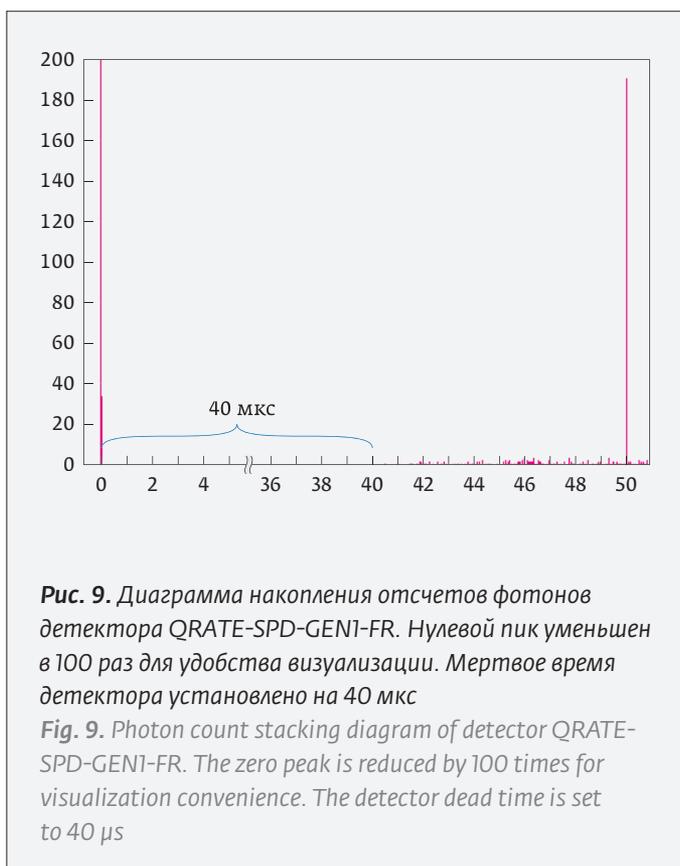
MEASUREMENT RESULTS

The measurements were taken for all four detectors. The test results for the photodetectors were summarized in the tables, and a typical image of the count stacked column chart is shown in Fig. 8.

To adjust the overall scale and visibility of the entire data series, the first peak on this and all subsequent column charts was reduced by 100 times. The column chart in Fig. 9 clearly demonstrates that the dead time in the detector (in this case, it is the test result of QRATE-SPD-GEN1-FR) is 40 μs.

The time-dependent stacking and presentation of counts were performed both for measuring the dead time duration and for calculating the afterpulse probability. To calculate the afterpulse probability, we took the number of signal photon counts in the zero peak and the number of counts occurred between the first and second pulse peaks. A hundred times the ratio of the number of counts in this range to the number of counts in the zero peak provides an approximate value of the afterpulse probability.





Для подстройки общего масштаба и наглядности представления всего ряда данных первый пик в этой и всех последующих гистограммах был уменьшен в 100 раз. Из гистограммы на рис. 9 хорошо видно, что мертвое время в детекторе (в данном случае это результат тестирования QRATE-SPD-GEN1-FR) составляет 40 мкс.

Накопление и гистограммирование отсчетов в зависимости от времени производилось как для измерения длительности мертвого времени, так и для расчета вероятности послеимпульсов. Для расчета вероятности послеимпульсов бралось значение количества сигнальных отсчетов фотонов в нулевом пике и количество отсчетов, произошедших между первым и вторым пиками импульсов. Стократное отношение количества отсчетов в этом диапазоне к количеству отсчетов в нулевом пике и дает примерное значение вероятности послеимпульсов.

Детектор QRATE-SPD-GEN1-FR

Для детектора QRATE-SPD-GEN1-FR были следующие предустановки и результаты вычислений (табл. 1).

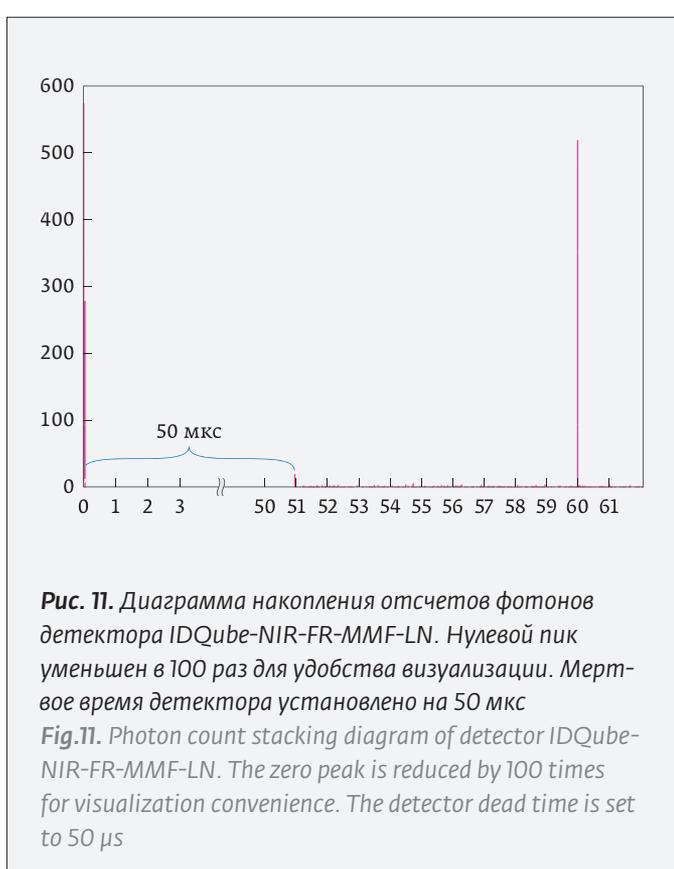




Таблица 1. Характеристики предустановки и результаты вычислений для детектора QRATE-SPD-GEN1-FR
Table 1. Preset specifications and calculation results for the QRATE-SPD-GEN1-FR detector

Программная предустановка Software preset	DCR, Гц DCR, Hz	Сигнальные отсчеты, Гц Signal counts, Hz	Расчет QE QE calculation
$t = -45\text{ }^\circ\text{C}$	380	1 500	$\frac{N - DCR}{100} \approx 11,2\%$
DT = 40 мкс			

Для расчета вероятности послеимпульсов (AP) была сделана экспозиция на протяжении 5 минут. За это время система накопила 23763 отсчетов фотонов в нулевом пике и 177 отсчетов между последующими импульсами. В соответствии с описанной выше формулой имеем:

$$AP = \frac{177}{23763} \cdot 100 \approx 0,74\%.$$

Детектор QRATE-SPD-GEN2-FR

Аналогично алгоритму расчета параметров для QRATE-SPD-GEN1-FR были получены следующие данные для QRATE-SPD-GEN2-FR (табл. 2).

Детектор IDQube-NIR-FR-MMF-LN

Для расширения оценки детекторов данные для ДОФ от ID Quantique снимались для разной QE. Также были сняты значения напряжения смещения для каждой квантовой эффективности (табл. 3).

На рис. 12 отражено изменение числа темновых и сигнальных отсчетов в зависимости от изменения квантовой эффективности. Ожидаемо уровень отсчетов растет пропорционально друг другу по мере увеличения квантовой эффективности. Однако при расчете реальной квантовой эффек-

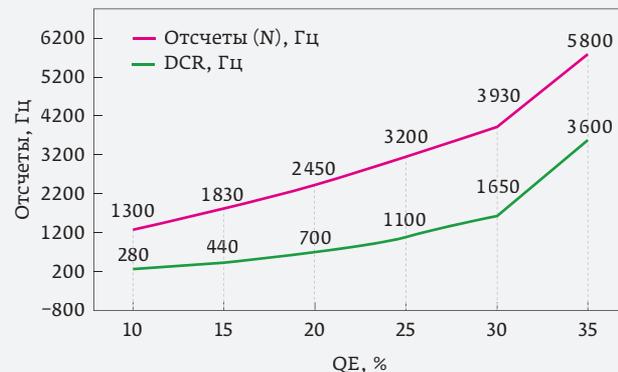


Рис. 12. Зависимость частоты темнового счета (DCR) и количества сигнальных отсчетов от величины квантовой эффективности на детекторе IDQube-NIR-FR-MMF-LN

Fig. 12. Dependence of the dark count rate (DCR) and the number of signal counts on the quantum efficiency value of detector IDQube-NIR-FR-MMF-LN



Рис. 13. Зависимость установленной и расчётной квантовой эффективности на детекторе IDQube-NIR-FR-MMF-LN от напряжения смещения встроенного лавинного фотодиода

Fig. 13. Dependence of the established and calculated quantum efficiency on the IDQube-NIR-FR-MMF-LN detector on the bias voltage of the built-in avalanche photodiode

Таблица 2. Характеристики предустановки и результаты вычислений для детектора QRATE-SPD-GEN2-FR
Table 2. Preset specifications and calculation results for the QRATE-SPD-GEN2-FR detector

Программная предустановка Software preset	DCR, Гц DCR, Hz	Сигнальные отсчеты, Гц Signal counts, Hz	Расчет QE QE calculation	Расчет AP AP calculation
$t = -45\text{ }^\circ\text{C}$	85	1 950	$\frac{N - DCR}{100} \approx 19\%$	$\frac{587}{32396} \cdot 100 \approx 1,8\%$
DT = 35 мкс				



Таблица 3. Результаты измерений напряжения смещения и расчет квантовой эффективности для детектора
Table 3. Bias voltage measurement results and quantum efficiency calculation for the detector

Установленная QE Determined QE	DT	$U_{см}, В$ $U_{см}, V$	DCR, Гц DCR, Hz	Сигнальные отсчеты, Гц Signal counts, Hz	Расчет QE QE calculation
10%	50 мкс	63,9	280	1 300	10,2%
15%		64,6	440	1 830	14,1%
20%		65,4	700	2 450	17,5%
25%		66,5	1 100	3 200	21%
30%		67,5	1 650	3 930	22,8%
35%		69,2	3 600	5 800	22%

тивности и ее сравнении с установленными значениями была выявлена деградация реального значения QE при приближении к максимально допустимым в ПО величинам (рис. 13).

Для модели IDQube-NIR-FR-MMF-LN расчет вероятности послеимпульсов производился по той же методике, что использовалась для ДОФ QRATE-SPD-GEN1-FR (рис. 14). Хорошо видно, что вероятность появления послеимпульсов также растет по мере

Таблица 4. Результаты расчета вероятности послеимпульсов для детектора IDQube-NIR-FR-MMF-LN

Table 4. Calculation results for afterpulse probability for the detector IDQube-NIR-FR-MMF-LN

Установленная QE Determined QE	Нулевые отсчеты, Гц Zero counts, Hz	Послеимпульсы Afterpulses	AP AP
10%	7 690	55	0,7%
15%	7 721	59	0,76%
20%	7 977	111	1,39%
25%	7 776	165	2,12%
30%	7 621	260	3,41%
35%	7 724	500	6,47%

Таблица 5. Результаты расчета квантовой эффективности для детектора ID230

Table 5. Quantum efficiency calculation results for the ID230 Detector

Установленная QE Determined QE	DCR, Гц DCR, Hz	Сигнальные отсчеты, Гц Signal counts, Hz	Расчет QE QE calculation
10%	6	370	3,6%
15%	22	1 350	13,3%
20%	38	1 855	18,7%
25%	80	2 280	22%

Таблица 6. Результаты расчета вероятности послеимпульсов для детектора ID230

Table 6. Calculation results for afterpulse probability for the ID230 detector

Установленная QE Determined QE	Нулевые отсчеты, шт. Zero counts, Hz	Послеимпульсы Afterpulses	AP
10%	7301	1	0,013%
15%	7815	24	0,3%
20%	7820	11	0,14%

Таблица 7. Сравнение параметров моделей детекторов одиночных фотонов производства компании QRATE
Table 7. Comparison of model parameters of the single photon detectors produced by QRATE

Модель Model	DCR, Гц DCR, Hz	Сигнальные отсчеты, Гц Signal counts, Hz	Расчетная QE Estimated QE	Расчетная AP Estimated AP
QRATE-SPD-GEN1-FR	380	1500	11.2%	0.74%
QRATE-SPD-GEN2-FR	85	1950	11%	1.8%



Таблица 8. Сравнение параметров моделей детекторов одиночных фотонов производства компаний QRATE и ID Quantique

Table 8. Comparison of model parameters of the single photon detectors produced by QRATE and ID Quantique

Модель Model	DCR, Гц DCR, Hz	Сигнальные отсчеты, Гц Signal counts, Hz	Расчетная AP Estimated AP
QRATE-SPD-GEN1-FR	380 @ QE = 11%	1500	0.74%
QRATE-SPD-GEN2-FR	85 @ QE = 19%	1950	1.8%
IDQube	440 @ QE = 15%	1300	0.7%
ID230	22 @ QE = 15%	1350	0.14%

увеличения значения квантовой эффективности (табл. 4).

Детектор ID230

В отличие от исследованных ранее детекторов, ДОФ ID230 имеет принципиально другую систему охлаждения, обеспечивающую более низкую температуру для фоточувствительного элемента (табл. 5, 6). Это сказывается на более хороших значениях темновых отсчетов (рис. 15) и намного более низких значениях вероятности послеимпульсов (рис. 16).

ВЫВОДЫ

По итогу проведенных исследований сделано заключение, что при равных условиях эксплуатации детекторы QRATE-SPD-GEN1-FR и QRATE-SPD-GEN2-FR имеют почти равные характеристики по квантовой эффективности, однако у QRATE-SPD-

Detector QRATE-SPD-GEN1-FR

There were the following presets and calculation results for the QRATE-SPD-GEN1-FR detector (Table 1).

To calculate the afterpulse probability (AP), an exposure was used for 5 minutes. During this period of time, the system accumulated 23,763 photon counts in the zero peak and 177 counts between the subsequent pulses. In accordance with the formula described above, we have the following:

Detector QRATE-SPD-GEN2-FR

Similar to the parameter calculation algorithm for QRATE-SPD-GEN1-FR, the following data were obtained for QRATE-SPD-GEN2-FR (Table 2).

Detector IDQube-NIR-FR-MMF-LN

To broaden the evaluation of the detectors, information relating to the SPDs made by ID Quantique were



Рис. 14. Зависимость вероятности возникновения послеимпульсов от установленной квантовой эффективности на детекторе IDQube-NIR-FR-MMF-LN.

Fig. 14. Dependence of the probability of occurrence of post-pulses on the established quantum efficiency on the IDQube-NIR-FR-MMF-LN detector.

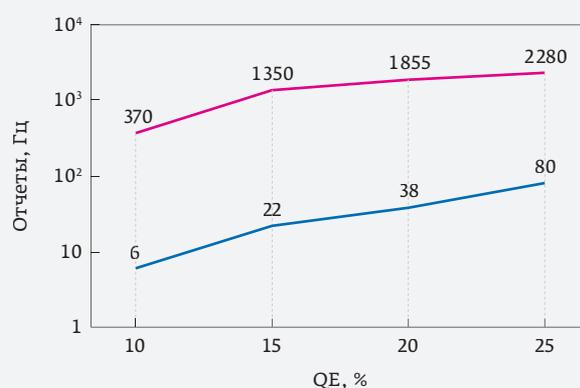
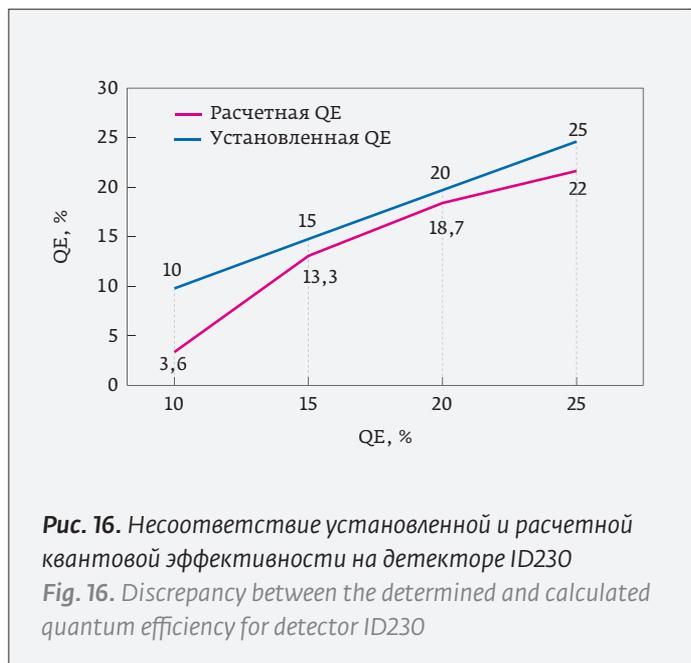


Рис. 15. Зависимость частоты темнового счёта (DCR) и количества сигнальных отсчетов от квантовой эффективности на детекторе ID230

Fig. 15. Dependence of the dark count rate (DCR) and the number of signal counts on the quantum efficiency of detector ID230



GEN2-FR наблюдаются более хорошие частоты темнового счета, что несомненно является проявлением усовершенствованной технологии изготовления детектора QRATE-SPD-GEN2-FR (табл. 7).

Исследование детекторов швейцарского производства от ID Quantique показало, что в ряде заявленных параметров есть некоторые, которые не соответствуют указанным паспортным данным. Это коснулось главным образом квантовой эффективности детекторов. Имеются значительные просадки на максимально допустимых ПО значениях QE.

Если сравнивать детекторы российского производства от QRate с детекторами от ID Quantique на одной квантовой эффективности (порядка 10–13%), то можно сказать, что детекторы QRate в основном равнозначны и взаимозаменяемы по отношению к моделям серии IDQube. Конечно, их нельзя сравнивать с моделью ID230, так как в последней используется иной подход к охлаждению, обеспечивающий иные характеристики детектора (табл. 8).

БЛАГОДАРНОСТИ

Инженеры компании АО «ЛЛС» благодарят коллег из компании QRate за предоставленную для проведения работы систему в своей исследовательской лаборатории, а также за большую помощь в обработке данных и подготовке материалов.

REFERENCES

1. Losev V. et al. Dead Time Duration and Active Reset Influence on the Afterpulse Probability of InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diodes. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. June 2022;58(3): 1–11. Art no. 4500111. Doi: 10.1109/JQE.2022.3171671.

obtained for various QEs. The bias voltage values for each quantum efficiency were also obtained (Table 3).

Figure 12 shows changes in the number of dark and signal counts depending on the changes in the quantum efficiency. As expected, the count level is increased proportionally to each other as the quantum efficiency is grown. However, when calculating the actual quantum efficiency and comparing it with the determined values, degradation of the actual QE value was found when approaching the maximum allowable values in the software (Fig. 13).

In relation to the IDQube-NIR-FR-MMF-LN model, the afterpulse probability was calculated using the same method as for the QRATE-SPD-GEN1-FR SPD (Fig. 14). It was confirmed that the afterpulse probability was also heightened as the quantum efficiency value was increased (Table 4).

Detector ID230

As opposed to the detectors studied earlier, the ID230 SPD has a fundamentally different cooling system that provides a much lower temperature for the photosensitive element (Tables 5, 6). This feature leads to the better values of dark counts (Fig. 15) and much lower values of the afterpulse probability (Fig. 16).

CONCLUSION

Based on the results of the studies, it has been concluded that, under equal operating conditions, the QRATE-SPD-GEN1-FR and QRATE-SPD-GEN2-FR detectors have almost equal specifications in terms of quantum efficiency, however, QRATE-SPD-GEN2-FR has better dark count rates that is undoubtedly a result of the improved production technology of the QRATE-SPD-GEN2-FR detector (Table 7).

The study of Swiss-made detectors made by ID Quantique has showed that the declared parameters include some specifications that do not correspond to the specified rated values. This phenomenon has affected mainly the quantum efficiency of the detectors. There are significant drawdowns at the maximum allowable QE values.

If we compare the Russian-made detectors by QRate with the detectors made by ID Quantique at the same quantum efficiency (about 10–13%), then it is possible to say that the QRate detectors are almost equivalent and interchangeable with the IDQube models. Obviously, they cannot be compared with the ID230 model, since the latter uses a different cooling approach that provides the exceptional detector specifications (Table 8).

ACKNOWLEDGEMENT

The engineers from LLS SC express their gratitude to their colleagues from QRate for providing the sys-



2. **Losev V., Zavodilenko V., Koziy A., Kurochkin Y., Gorbatshevich A.**
Dependence of Functional Parameters of Sine-Gated InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diodes on the Gating Parameters. *IEEE Photonics Journal*. April 2022; 14(2): 1–9. Art no. 6817109. Doi: 10.1109/JPHOT.2022.3148204.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- С. Н. Мосенцов, инженер по квантовым коммуникациям АО «ЛЛС», Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0003-2678-9663
- А. В. Лосев, начальник отдела разработки ООО «КурЭйт», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-6030-2532
- И. Д. Павлов, технический директор ООО «КурЭйт», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-8865-556X
- В. В. Заводиленко, ведущий инженер ООО «КурЭйт», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0002-3252-2984
- А. А. Филяев, инженер научного проекта ООО «КурЭйт», Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-7319-8001
- Н. В. Буров, генеральный директор АО «ЛЛС», Санкт-Петербург, Россия.

ВКЛАД АВТОРОВ

Статья подготовлена на основе работы всех членов авторского коллектива: С. Н. Мосенцов – сбор и анализ данных, написание и верстка статьи; А. В. Лосев – техническая консультация и разработка ДОФ; И. Д. Павлов – руководство проектом по разработке ДОФ; В. В. Заводиленко – разработка ДОФ; А. А. Филяев – сбор и анализ данных; Н. В. Буров – организация работы и обсуждение результатов.

tem for work in their research laboratory, as well as for their assistance in data processing and material preparation.

AUTHORS

- S. N. Mosentsov, quantum communications engineer, LLS SC, s.mosencov@lenasers.ru, Saint-Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0003-2678-9663
- A. V. Losev, head of development department, QRate LLC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-6030-2532
- I. D. Pavlov, technical director, QRate LLC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-8865-556X
- V. V. Zavodilenko, leading engineer, QRate LLC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0002-3252-2984
- A. A. Filyaev, scientific project engineer, QRate LLC, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-7319-8001
- N. V. Burov, director general, LLS SC, Saint-Petersburg, Russia.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

The article is prepared on the basis of work of all team members: S. N. Mosentsov – data collection and analysis, article preparation and layout; A. V. Losev – technical consultation and SPD development; I. D. Pavlov – project manager for the SPD development; V. V. Zavodilenko – SPD development; A. A. Filyaev – data collection and analysis; N. V. Burov – arrangement of work and discussion.



ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС
- КОНФЕРЕНЦИЯ «КРЕПЕЖ. КАЧЕСТВО И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»
- БИРЖА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ



18–20

АПРЕЛЯ
2023

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

+7 965 772 7759 | a.ilina@restec.ru | +7 929 106 2738 | v.zudina@restec.ru | ptfair.ru