



## ХАРАКТЕРИСТИКИ InGaAs/InP ОДНОФОТОННЫХ ЛАВИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА КОРЕЙСКОЙ ФИРМЫ WOORIRO

С. В. Алферов<sup>1</sup>, К. А. Бальгин<sup>2,3</sup>, А. В. Борисова<sup>1</sup>,  
А. Г. Втюрина<sup>2</sup>, А. Н. Климов<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>ОАО "ИнфоТеКС", Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова, Москва, Россия

В статье представлены результаты тестирования новых однофотонных лавинных фотодетекторов (SPAD) производителя Wooriro (Корея). Были измерены: квантовая эффективность, скорость темного счета и вероятность послеимпульсов. Сравнение исследуемых детекторов с закрепившимися на рынке детекторами производства фирмы Princeton Lightwave (США) позволяет сделать вывод о применимости однофотонных лавинных фотодетекторов (ЛФД) Wooriro в системах квантового распределения ключей (QKD).

### ВВЕДЕНИЕ

Однофотонные детекторы (SPD) все чаще используются в таких областях, как квантовое распределение ключей (QKD) [1, 2], позитронно-эмиссионная томография [3], оптическая рефлектометрия [4] и биомедицинские исследования [5]. В настоящее время известны различные устройства и методы детектирования единичных фотонов, например, фотоэлектронные умножители, однофотонные лавинные фотодиоды (SPAD, ЛФД) [6], детекторы на основе генерации суммарных частот (ап-конверсии) [7], сверхпроводящие тонкопленочные наноструктуры (SSPD) [8] и SPD на квантовых точках и полупроводниковых дефектах [9]. Приведенные классы устройств различаются по конструктивным особенностям, по спектральному диапазону чувствительности, по квантовой эффективности

## CHARACTERISTICS OF InGaAs/InP SINGLE-PHOTON AVALANCHE DETECTORS BY WOORIRO (KOREA)

S. V. Alferov<sup>1</sup>, K. A. Balygin<sup>2,3</sup>, A. V. Borisova<sup>1</sup>,  
A. G. Vtyurina<sup>2</sup>, A. N. Klimov<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>JSC "InfoTeCS", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Physical Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>4</sup>A.M. Prokhorov Institute of General Physics, RAS, Moscow, Russia

The article presents the results of testing new single-photon avalanche photodetectors (SPAD) produced by Wooriro (Korea). Quantum efficiency, dark count rate, and afterpulsing probability were measured. A comparison of the detectors under study with the well-established Princeton Lightwave (USA) detectors allows us to conclude that Wooriro SPADs are applicable in quantum key distribution (QKD) systems.

### INTRODUCTION

Single-photon detectors (SPD) are increasingly used in such areas as quantum key distribution (QKD) [1, 2], positron emission tomography [3], optical reflectometry [4], and biomedical research [5]. Currently, various devices and methods for detecting single photons are known, for example, photomultipliers, single photon avalanche photodiodes (SPAD) [6], detectors based on the sum-frequency generation (up-conversion) [7], superconducting thin-film nanostructures (SSPD) [8] and SPD based on quantum dots and semiconductor defects [9]. The given classes of devices differ in design features, in the spectral range of sensitivity, in quantum efficiency and in the ability to distinguish single photons.

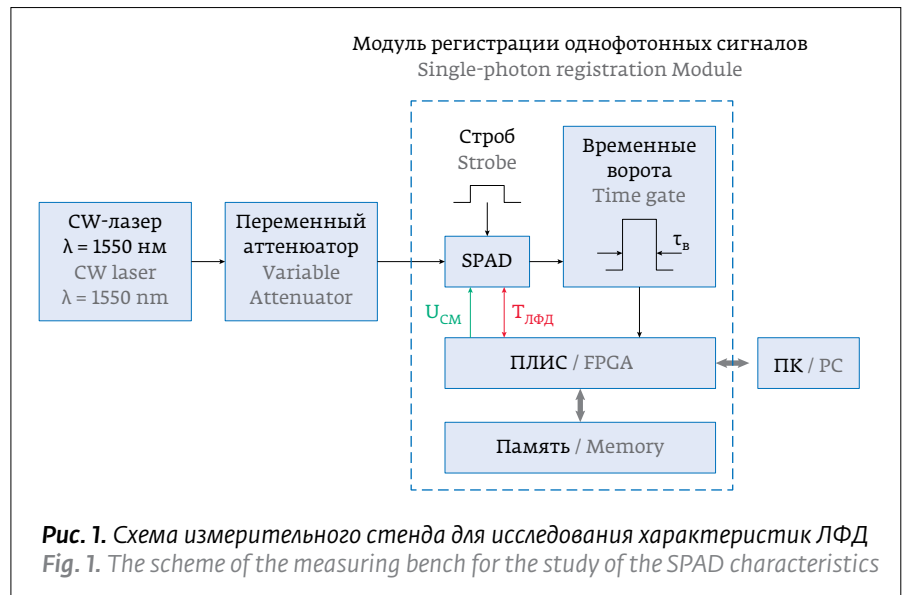
Recently, extensive and high-speed QKD systems have stimulated the development of high-speed single-photon detectors of the near IR range. For use in the field of quantum cryptography, SPD must have high detection efficiency, high signal-to-noise ratio, low dead time, low jitter and the ability to distinguish the number of photons is desirable as well [10]. Suitable candidates are superconducting single-photon detectors SSPD, detectors based on up-conversion and single-photon

и способности различать одиночные фотоны.

В последнее время протяженные и высокоскоростные системы QKD стимулировали развитие высокоскоростных однофотонных детекторов ближнего ИК-диапазона. Для применения в задачах квантовой криптографии SPD должны обладать высокой эффективностью детектирования, высоким отношением сигнал/шум, малым мертвым временем, низким джиттером и способностью различать количество фотонов [10]. Подходящими кандидатами являются сверхпроводящие однофотонные детекторы SSPD, детекторы на основе ап-конверсии и однофотонные ЛФД. Однако использование SSPD требует обеспечения криогенных температур (4К), а детекторы на основе ап-конверсии обладают паразитным нелинейным шумом.

С другой стороны, InGaAs/InP однофотонные лавинные диоды имеют высокую эффективность детектирования фотонов (PDE) и низкую скорость темного счета (DCR) в ближнем ИК-диапазоне длин волн от 1,0 до 1,7 мкм и не требуют охлаждения до криогенных температур [11, 12]. Однако возникновение послеимпульсов (afterpulsing) значительно ограничивает производительность инфракрасных ЛФД, особенно в высокоскоростных системах. Кроме того, стоимость однофотонных лавинных фотодиодов в настоящее время еще достаточно высока. Таким образом, в силу наибольших перспектив практического применения однофотонных ЛФД исследование их характеристик является актуальной задачей.

Настоящая работа посвящена измерению характеристик однофотонных ЛФД и поиску оптимальных параметров их работы. Для исследований взяты существующие на рынке лавинные фотодетекторы для счета одиночных фотонов двух производителей: WPACBGMACNN Wooriro (Корея) и PGA-016u-1550TFZ Princeton Lightwave (США). Регистрировались их квантовые эффективности при разных напряжениях смещения, а затем характеристики скорости темного счета и вероятности послеимпульсов в зависимости от квантовой



APDs. However, the use of SSPD requires cryogenic temperatures (4K), and detectors based on up-conversion have spurious non-linear noise.

In contrary, InGaAs/InP single-photon avalanche diodes exhibit high photon detection efficiency and low dark count rate (DCR) in the near IR wavelength range from 1.0 to 1.7 microns and do not require cooling to cryogenic temperatures [11, 12]. However, the occurrence of afterpulsing significantly limits the InGaAs/InP SPAD performance, especially in high-speed systems. In addition, the cost of SPADs of that kind is currently still quite high. Nevertheless, in the field of QKD it is often the only prospect for the practical application of single-photon APD, hence the study of their characteristics is an actual task.

Main characteristics for two models of single-photon APDs: WPACBGMACNN, produced by Wooriro (Korea) and PGA-016u-1550TFZ by Princeton Lightwave (USA) were measured in this work. First, their quantum efficiencies were obtained for different bias voltages, and then the dark count rate and the afterpulsing probability dependence on the quantum efficiency at different temperatures were recorded.

More exactly, the following characteristics were measured at temperatures:  $t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -60 \text{ }^\circ\text{C}$ :

1. Dependences of quantum efficiency on bias voltage;
2. Dependences of the dark count rate on the quantum efficiency;
3. Dependences of the afterpulsing probability on the quantum efficiency for different pulse repetition frequencies.

эффективности при различных температурах. По результатам исследований проведено сравнение моделей ЛФД. Приведенные характеристики можно использовать при выборе оптимальных параметров работы ЛФД для конкретных применений.

Далее описывается схема и результаты измерений следующих характеристик:

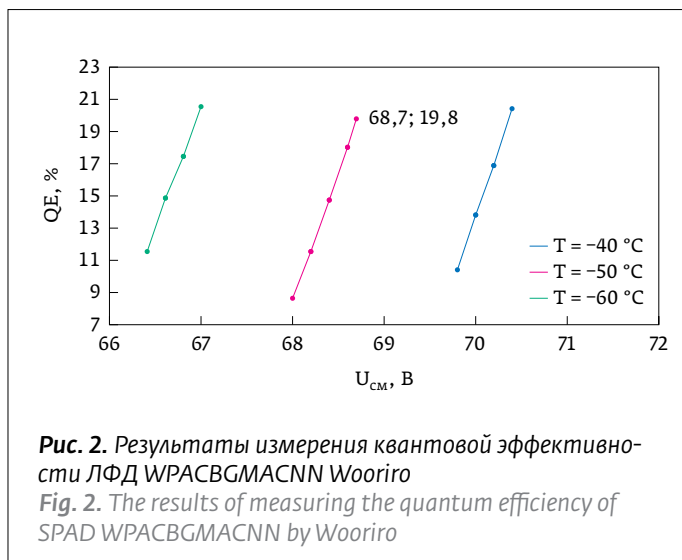
1. Зависимость квантовой эффективности от изменения напряжения смещения при температурах:  $t = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -50\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -60\text{ }^\circ\text{C}$ ;
2. Зависимость скорости темнового счета от значения квантовой эффективности при температурах:  $t = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -50\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -60\text{ }^\circ\text{C}$ ;
3. Зависимость вероятности послеимпульсов от квантовой эффективности для различных частот следования импульсов при температурах:  $t = -40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -50\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t = -60\text{ }^\circ\text{C}$ .

### СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Традиционным подходом к измерению характеристик однофотонных ЛФД является метод замещения, основанный на сравнении показаний эталонного устройства с тестируемым. В случае исследования и калибровки однофотонных детекторов лазерное излучение, мощность которого измерена калиброванным фотодетектором и затем ослаблена калиброванным attenuатором до уровня одиночных фотонов, регистрируется тестируемым лавинным фотодиодом.

Функциональная схема измерений представлена на рис. 1. Основными ее элементами являются DFB-лазер непрерывной генерации (CW-лазер) на длине волны 1550 нм, управляемый attenuатор с максимальным ослаблением 60 дБ и непосредственно модуль регистрации однофотонных сигналов, попадающих во временные ворота. В состав последнего входит исследуемый лавинный фотодиод (SPAD). Подробное описание принципа работы модуля регистрации однофотонных сигналов представлено в статье [13].

Лазер и attenuатор предназначены для формирования квазиоднофотонного излучения. В качестве CW-лазера использовался лазерный источник Thorlabs S1FC1550PM, излучение которого затем ослаблялось переменным attenuатором Exfo FVA-3100, максимальные вносимые потери которого составляют 60 дБ, а минимальные – 0,07 дБ. Мощность излучения лазера подбиралась таким образом, чтобы за интервал



**Рис. 2.** Результаты измерения квантовой эффективности ЛФД WPACBGMACNN Wooriro

**Fig. 2.** The results of measuring the quantum efficiency of SPAD WPACBGMACNN by Wooriro

According to the research results, named SPAD models were compared. The data obtained can be used when choosing the optimal parameters of the SPAD for specific applications.

### EXPERIMENTAL DETAILS

The traditional approach to measuring the characteristics of single-photon APDs is the substitution method, based on a comparison of the readings of the reference device with the test device. In the case of the study and calibration of single-photon detectors, laser radiation power is measured by a calibrated photo detector and then attenuated by a calibrated attenuator to the level of single photons, which are recorded by the avalanche photodiode under test.

The measurement scheme is presented in Fig. 1. Its main elements are: a continuous-wave DFB laser at a wavelength of 1550 nm (Thorlabs S1FC1550PM), a precise attenuator with 0.07–60 dB attenuation range (Exfo FVA-3100) and the self-made SPAD registration module. A detailed description and the principle of operation of the single-photon registration module is presented in article [13].

The laser radiation power was chosen in such a way that over the time interval equal to the duration of the time gate  $\tau_g$ , an average number of photons  $\mu = 0.1$  would fall on the SPAD.

The duration of the time gate during all measurements was  $\tau_g = 1$  ns, therefore, the required power at sensitive area of the SPAD should be:

$$P_{\text{АТТ}} = \frac{\mu h\nu}{\tau_B} = 1,28 \cdot 10^{-11} \text{ W.} \quad (1)$$

времени, равный длительности временных ворот  $\tau_b$ , на ЛФД падал в среднем  $\mu = 0,1$  фотон.

Длительность временных ворот на протяжении всех измерений составляла  $\tau_b = 1$  нс, следовательно, требуемая мощность падающего на ЛФД излучения должна составлять:

$$P_{\text{ATT}} = \frac{\mu h\nu}{\tau_b} = 1,28 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – среднее число фотонов, попадающих во временные ворота,  $h\nu$  – энергия одного фотона. Атенуатор был отрегулирован на максимальное ослабление излучения, то есть на 60 дБ, следовательно, мощность лазера должна составлять:

$$P_{\text{laser}} = P_{\text{ATT}} \cdot 10^6 = 12,8 \text{ мкВт}. \quad (2)$$

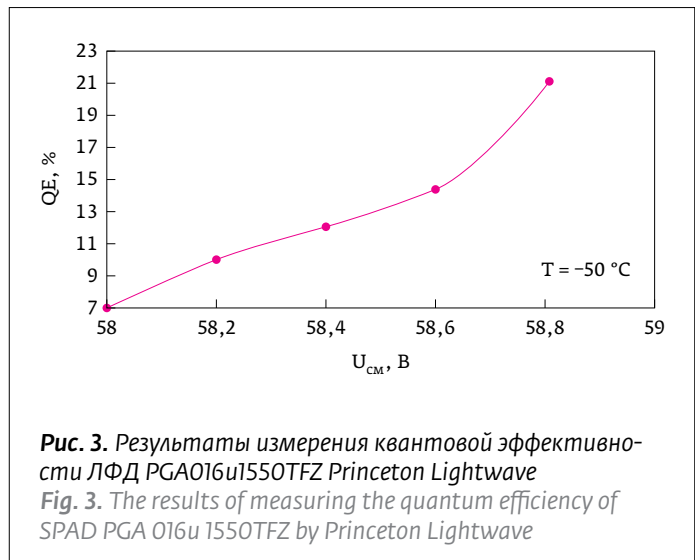
Модуль регистрации однофотонных сигналов позволяет управлять следующими параметрами (в скобках указаны значения, устанавливаемые для проведения эксперимента):

- напряжением смещения ЛФД –  $U_{\text{см}}$ , В;
- длительностью временных ворот ( $\tau_b = 1$  нс);
- температурой ЛФД ( $-40$  °С,  $-50$  °С,  $-60$  °С);
- длительностью мертвого времени (10 нс);
- частотой импульсов стробирования;
- порогом срабатывания дискриминатора (70,2 мВ).

Таким образом, на чувствительную площадку попадает непрерывное лазерное излучение с плотностью потока фотонов 0,1 фотон/нс, ЛФД работает в режиме стробирования: длительность импульса строга составляет 2 нс, а частота следования импульсов имеет возможность регулирования. При этом регистрируются только фотоны, попавшие во временные ворота. После регистрации очередного фотона стробирующие импульсы на ЛФД не подаются в течение 10 нс.

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность детектирования – это отношение количества зарегистрированных событий к количеству падающих фотонов. Эффективность детектирования может быть измерена путем отправки одиночных фотонов с известной частотой повторения и измерения количества срабатываний модуля регистрации. В данной



**Рис. 3.** Результаты измерения квантовой эффективности ЛФД PGA016u1550TFZ Princeton Lightwave  
**Fig. 3.** The results of measuring the quantum efficiency of SPAD PGA 016u 1550TFZ by Princeton Lightwave

where  $\mu$  is the average number of photons entering the time gate;  $h\nu$  is the energy of a single photon. The attenuator was adjusted to the maximum attenuation of radiation, i. e., 60 dB, therefore, the laser output power should be:

$$P_{\text{laser}} = P_{\text{ATT}} \cdot 10^6 = 12,8 \text{ }\mu\text{W}. \quad (2)$$

Thus, the APD sensitive area is illuminated with a continuous laser radiation of 0.1 photons/ns.

The single-photon registration module allows one to control the following parameters (in brackets the values set for the experiment):

- SPAD bias voltage  $U_{\text{bias}}$ , V;
- time gate duration ( $\tau_b = 1$  ns);
- SPAD temperature ( $-40$  °С,  $-50$  °С,  $-60$  °С);
- dead time duration (10 ns);
- gating pulses frequency;
- discriminator response threshold (70.2 mV).

The SPAD operates in a gating mode as described in [13] with adjustable gate repetition frequency. The only photons that have arrived at the time gate could be registered. The gating pulses are not fed to the SPAD for 10 ns (dead time) after photon or dark count registration (SPAD click).

### MEASUREMENT OF DETECTION EFFICIENCY AND QUANTUM EFFICIENCY

Detection efficiency is the ratio of the number of recorded events to the number of incident photons. Detection efficiency can be measured by sending single photons with a known repetition rate and measuring the number of responses of the recording module. In this work, we study the SPAD modules that are not able to distinguish the number of photons in a

работе исследуются модули ЛФД, не способные различать количество фотонов в импульсе, то есть одинаково реагирующие срабатыванием на любое число падающих фотонов, отличное от нуля. Так как процесс регистрации срабатываний детектора относится к испытаниям Бернулли, а статистика распределения фотонов в импульсе описывается пуассоновским распределением, то, согласно статье [14], случайный процесс детектирования фотона также описывается пуассоновским распределением. В этом случае вероятность детектирования фотона ЛФД связана с квантовой эффективностью следующей формулой:

$$P_{\text{det}} = 1 - e^{-\mu\eta}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – среднее число фотонов в импульсе,  $\eta$  – квантовая эффективность ЛФД.

Таким образом, измерив частоту срабатываний детектора (счетность)  $p_i$ , которая при большом числе посланных импульсов стремится к вероятности детектирования, можно по формуле (3) рассчитать квантовую эффективность.

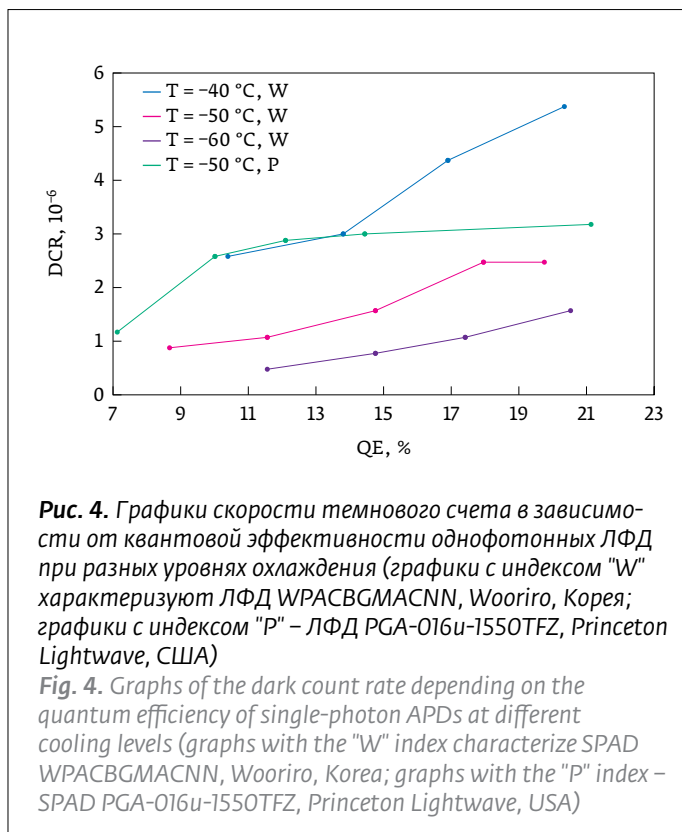
При измерениях вероятности детектирования необходимо учитывать вклад темнового шума и эффекта послеимпульсов. Эти помехи удобно характеризовать вероятностью темнового отсчета  $P_{\text{dark}}$  и вероятностью возникновения послеимпульса  $P_{\text{ap}}$  соответственно. Все три величины связаны выражением:

$$P_{\text{det}} = \frac{(P_i - P_{\text{dark}})}{1 + P_{\text{ap}}}, \quad (4)$$

где  $p_i$  – текущая счетность фотодетектора (отношение количества срабатываний к количеству посланных строб-импульсов).

При допущении, что на низких частотах вероятность послеимпульсов стремится к нулю [15] ( $P_{\text{ap}}|_{10\text{kHz}} \approx 0$ ), а квантовая эффективность не зависит от частоты импульсов стробирования, вероятность детектирования можно определить, зная счетность и вероятность темнового счета при одной низкой частоте. По этой причине для измерения квантовой эффективности в зависимости напряжения смещения частота стробирующих импульсов устанавливалась равной 10 кГц и вероятность детектирования рассчитывалась по формуле:

$$P_{\text{det}} = P_i|_{10\text{kHz}} - P_{\text{dark}}|_{10\text{kHz}}, \quad (5)$$



**Рис. 4.** Графики скорости темного счета в зависимости от квантовой эффективности однофотонных ЛФД при разных уровнях охлаждения (графики с индексом "W" характеризуют ЛФД WPACBGMACNN, Wooriro, Корея; графики с индексом "P" – ЛФД PGA-016u-1550TFZ, Princeton Lightwave, США)

**Fig. 4.** Graphs of the dark count rate depending on the quantum efficiency of single-photon APDs at different cooling levels (graphs with the "W" index characterize SPAD WPACBGMACNN, Wooriro, Korea; graphs with the "P" index – SPAD PGA-016u-1550TFZ, Princeton Lightwave, USA)

pulse, i. e., they react in the same way by one click on any number of incident photons other than zero. Since the registration process of detector clicks refers to Bernoulli's tests, and the statistics of the distribution of photons in a pulse is described by the Poisson distribution, according to [14], the random photon detection process is also described by the Poisson distribution. In this case, the probability of detecting a photon by SPAD is related to quantum efficiency by the following formula:

$$P_{\text{det}} = 1 - e^{-\mu\eta}, \quad (3)$$

where  $\mu$  is the average number of photons per pulse,  $\eta$  is the quantum efficiency of the SPAD.

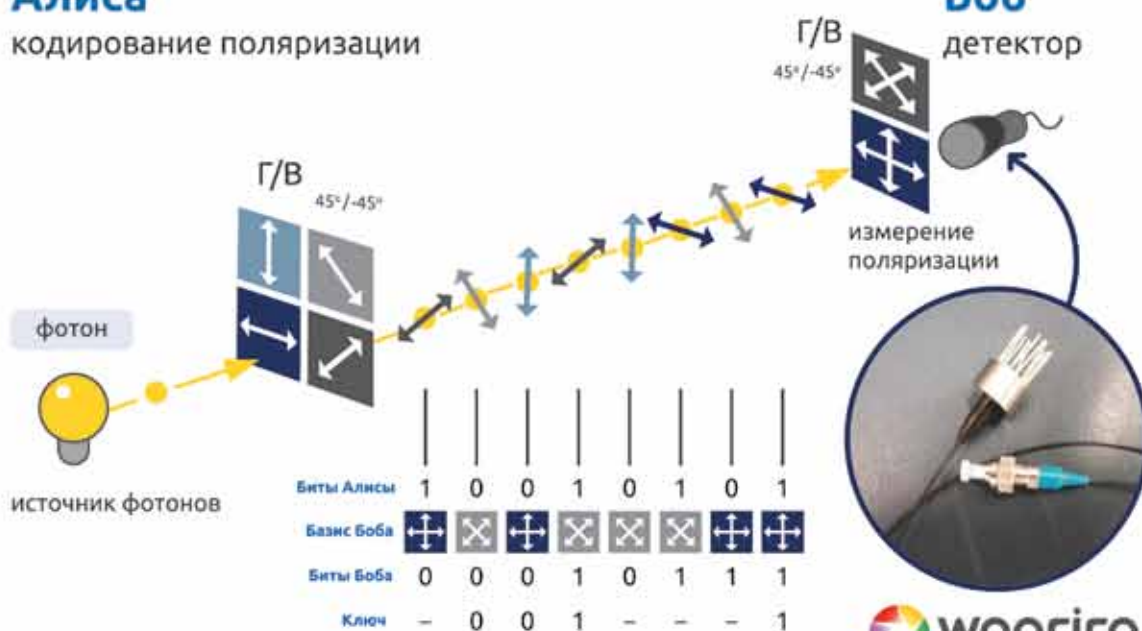
Thus, measuring the detector response (click) frequency  $p_i$ , which, with a large number of pulses sent, tends to the probability of detection, it is possible to calculate quantum efficiency using formula (3).

When measuring the probability of detection, it is necessary to consider the contribution of dark noise and the afterpulsing effect. It is convenient to characterize these undesired signals by the probability of the dark count  $P_{\text{dark}}$  and the probability of the occurrence of the afterpulsing  $P_{\text{ap}}$ , respectively. All three values are related by the expression:

## СХЕМА КВАНТОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

### Алиса

кодирование поляризации



\* Г/В - горизонтальная/вертикальная



(Корея) [www.woorigo.com](http://www.woorigo.com)

## Лавинный фотодиод для одиночных фотонов (SPAD) со встроенным термоэлектрическим преобразователем TEC

### Применение

- Квантовая криптография
- Оптическая временная рефлектометрия
- Лазерное устройство для измерения расстояний
- Фундаментальные исследования в квантовой физике

### Характеристики

- InGaAs / InP лавинный фотодиод
- Для длины волны от 1000 до 1600 нм
- Встроенный трехступенчатый TEC с термистором
- Тип корпуса TO-8 с 6 контактами





где  $p_{i|f}$  – частота отсчетов фотодетектора при частоте импульсов  $f$ , отсч./импульс. Результаты расчетов квантовой эффективности представлены на рис. 2 и рис. 3.

### ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕМНОГО СЧЕТА

Скорость темного счета (DCR) измеряется путем регистрации количества срабатываний детектора, попадающих во временные ворота, при отсутствии потока фотонов на фоточувствительную площадку ЛФД. Поэтому при данных измерениях вход модуля регистрации однофотонных сигналов закрывался черной заглушкой от попадания на него излучения.

Частота импульсов стробирования при измерении темного счета составляла 1 МГц, так как при данной частоте набирается статистика срабатываний по большому числу стробирующих импульсов, что увеличивает точность измерений, а влияние вероятности возникновения послеимпульсов, как будет показано позднее, минимально.

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, скорости темного счета ЛФД производства фирм Wooriro и Princeton Lightwave при температуре  $t = -50$  °C сопоставимы между собой и не превышают  $3,2 \cdot 10^{-6}$  отсч./импульс.

### ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПОСЛЕИМПУЛЬСОВ

Как отмечалось ранее, эффект появления послеимпульсов характеризуется вероятностью  $p_{ap}$ . Эта величина связана с текущей счетностью на

частоте  $f$ ,  $p_{i|f}$ , вероятностью детектирования  $p_{det}$  (см. форм. 3) и скоростью (вероятностью) темного счета  $p_{dark}$  (см. форм. 4) и может быть выражена из нее следующим образом:

$$p_{ap|f} = \frac{p_{i|f} - p_{dark}}{p_{det-1}} \tag{6}$$

Вероятность детектирования и скорость темного счета были измерены ранее, поэтому для того, чтобы измерить вероятность послеимпульсов в зависимости от длительности интервала времени после срабатывания детектора, необходимо измерить счетность однофотонного ЛФД при разных частотах следования стробирующих импульсов. Нами измерялась счетность на следующих частотах: 100 кГц; 1 МГц; 2,5 МГц; 5 МГц; 6,25 МГц; 7,5 МГц и 10 МГц.

$$p_{det} = \frac{(p_i - p_{dark})}{1 + p_{ap}} \tag{4}$$

where  $p_i$  is the current count of the photodetector (the ratio of the number of operations to the number of gate pulses).

Assuming that at low frequencies the probability of afterpulsing tends to zero [ $p_{ap|10kHz} \approx 0$ ], and quantum efficiency does not depend on the frequency of gating pulses, the probability of detection can be determined by knowing the SPAD counting and the probability of dark count at certain low frequency. For this reason, to measure the quantum efficiency depending on the bias voltage, the frequency of the gating pulses was set to 10 kHz and the detection probability was calculated using the formula:

$$p_{det} = p_{i|10kHz} - p_{dark|10kHz} \tag{5}$$

where  $p_{i|f}$  is the photodetector click frequency at a gate pulse frequency  $f$ , count/pulse. The results of quantum efficiency calculations are presented in Fig. 2 and Fig. 3.

### THE DARK COUNT RATE MEASURING

The dark count rate (DCR) is measured by recording the number of detector clicks, in the absence of a photon flux. Therefore, for these measurements, the optical input of the single-photon registration module was closed from the incident radiation with a black plug.

While DCR measuring the frequency of gating pulses was set to 1 MHz in order to improve the statistics and increase the measurement accuracy. As will be shown later, the afterpulsing influence on DCR value is negligible.

As could be seen from the graphs presented in Fig. 4, SPAD dark count rates produced by Wooriro and Princeton Lightwave SPADs at  $t = -50$  °C are comparable and do not exceed  $3.2 \cdot 10^{-6}$  count/pulse.

### MEASUREMENT OF AFTERPULSING PROBABILITY

As noted earlier, the afterpulsing effect is characterized by the probability  $p_{ap}$ . This value is related to the current SPAD counting at the frequency  $f$ ,  $p_{i|f}$ , the detection probability  $p_{det}$  (see formula 3) and the dark count probability  $p_{dark}$  (see formula 4) and can be expressed therefrom as follows:

$$p_{ap|f} = \frac{p_{i|f} - p_{dark}}{p_{det-1}} \tag{6}$$

The DCR probability was measured earlier, therefore, in order to measure the afterpulsing probability

Результаты исследования ЛФД WPACBGMACNN Woorigo при разных температурах показаны на рис. 5.

По совокупности характеристик, приведенных на рис. 5, можно определять оптимальные параметры работы однофотонных ЛФД для конкретных применений. При работе однофотонного фотодетектора в системах квантового распределения ключей наиболее важным является уровень темновых шумов, поскольку он определяет величину ошибки в квантовом ключе.

Примерные оптимальные параметры однофотонного ЛФД для применения в системах квантового распределения ключей: уровень темновых шумов  $2 \cdot 10^{-6}$  при квантовой эффективности 20%. Данным параметрам соответствуют следующие условия включения ЛФД WPACBGMACNN: температура ЛФД  $-50$  °C, напряжение смещения 68,8 В. В этом случае вероятность послеимпульсов составляет 8% при частоте стробирующих импульсов 10 МГц и менее 1% при частоте 1 МГц.

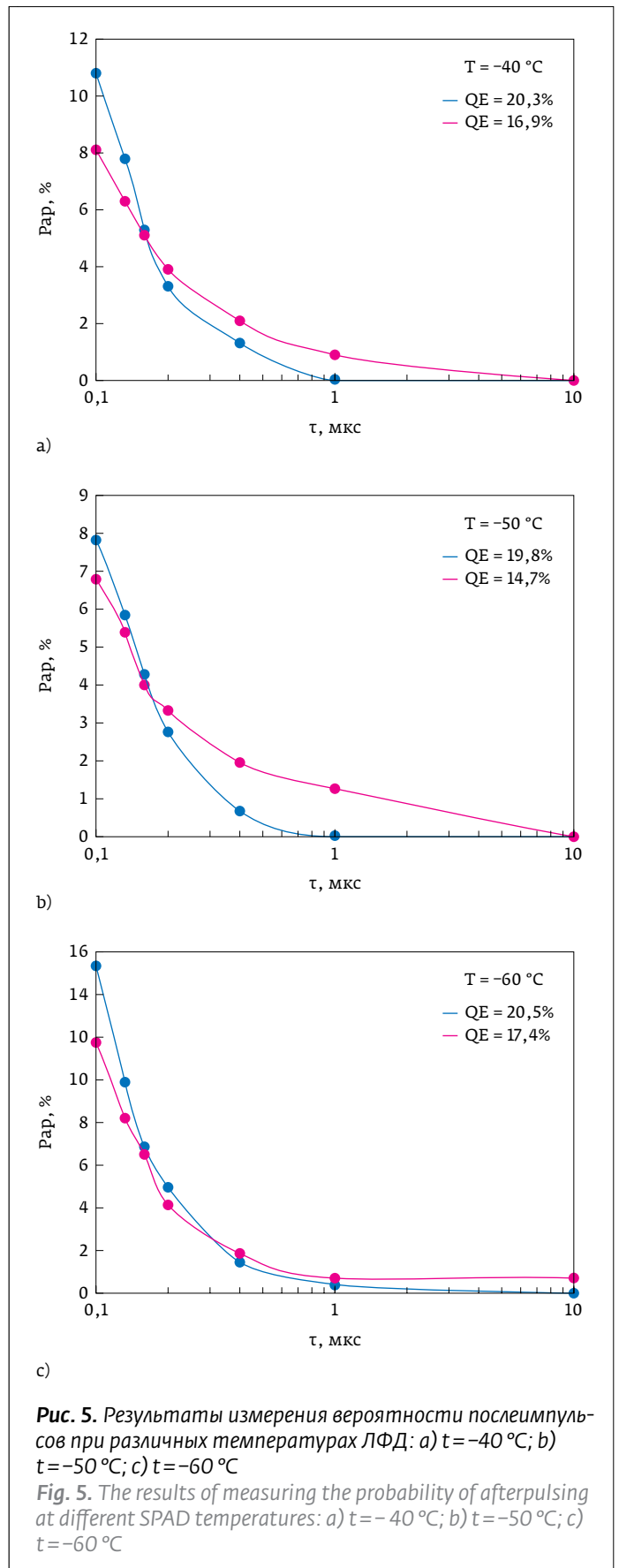
Стоит также отметить, что протестированный в данной работе ЛФД фирмы Woorigo по характеристике вероятности (скорости) темнового счета не уступает широко применяемым однофотонным детекторам производителя Princeton Lightwave.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были исследованы характеристики однофотонных лавинных фотодиодов производителя Woorigo. Результаты тестирования позволяют сделать вывод о применимости данных детекторов в различных сферах, в частности в системах квантового распределения ключей. По приведенным в статье характеристикам можно осуществлять выбор рабочих параметров ЛФД для решения различных задач. Сравнение ЛФД WPACBGMACNN Woorigo (Корея) с ЛФД PGA-016u-1550TFZ Princeton Lightwave (США) по скорости темнового счета и квантовой эффективности показало, что протестированный однофотонный детектор производителя Woorigo не уступает широко распространенным детекторам Princeton Lightwave.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследований по проекту Минобрнауки РФ (проект 03.G25.31.0254), в рамках которого была разработана схема измерений характеристик ЛФД.



**Рис. 5.** Результаты измерения вероятности послеимпульсов при различных температурах ЛФД: а)  $t = -40$  °C; б)  $t = -50$  °C; в)  $t = -60$  °C

**Fig. 5.** The results of measuring the probability of afterpulsing at different SPAD temperatures: а)  $t = -40$  °C; б)  $t = -50$  °C; в)  $t = -60$  °C





Компания "ОЭС Спецпоставка" представляет весь спектр продукции Wooriro на территории РФ и предлагает наиболее выгодные условия поставки продукции, полную техническую поддержку, а также поставку образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Gisin N., Ribordy G., Tittel W., et al.** Quantum cryptography // *Rev. Mod. Phys.*, 2002, v.74: p.145–195.
2. **Zhou C. Y., Wu G., Chen X. L., et al.** Quantum key distribution in 50-km optic fibers // *Sci China, Ser G-Phys Mech Astron.*, 2004, v.47: 82–188.
3. **Spanoudaki V. C., Mann A. B., Otte A. N., et al.** Use of single photon counting detector arrays in combined PET / MR: Characterization of LYSO-SiPM detector modules and comparison with a LSO-APD detector // *J Instrum.*, 2007, v.2: 12002.
4. **Lacaita A., Francese P., Cova S., et al.** Single-photon optical-timedomain reflectometer at 1.3  $\mu\text{m}$  with 5-cm resolution and high sensitivity // *Opt Lett.*, 1993, v.18: 1110–1112.
5. **Suhling K., Siegel J., Phillips D., et al.** Imaging the environment of green fluorescent protein // *Biophys J.*, 2002, v.83: 3589–3595.
6. **Liang Y., Zeng H. P.** Single-photon detection and its applications // *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy.* – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 1218–1232.
7. **Gu X., Huang K., Li Y., et al.** Temporal and spectral control of single-photon frequency upconversion for pulsed radiation. *Appl Phys Lett.*, 2010, 96: 131111
8. **Li H J., Wang Y W., Wei L F., et al.** Experimental demonstrations of high-Q superconducting coplanar waveguide resonators. *Chin Sci. Bull.*, 2013, 58: 2413–2417
9. **Gansen E J., Rowe M A., Greene M B., et al.** Photon-numberdiscrimination detection using a quantumdot, optically gated, fieldeffect transistor. *Nat Photonics*, 2007, 1: 585–588
10. **Hu C., Zheng X., Campbell J. C., Onat B. M., Jiang X., Itzler M. A.** Characterization of an InGaAs / InP-based single-photon avalanche diode with gated-passive quenching with active reset circuit // *Journal of Modern Optics.* – 2011. – Т. 58. – № 3–4. – С. 201–209.
11. **Liu M., Hu C., Bai X., Guo X., Campbell J. C., Pan Z., Tashima M. M.** // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, v.13, p.887–894.
12. **Tosi A., Mora A. D., Zappa F., Cova S. J.** // *Mod. Opt.* 2009, v.56, p.299–308.
13. **Balygin K. A., Zaitsev V. I., Klimov A. I., Klimov A. N., Kulik S. P., Molotkov S. N.** A Single-Photon Detector Module // *Instruments and Experimental Techniques*, 2018, v.61, № 4, p.691–695. DOI: 10.1134 / S0020441218040139.
14. **Chunnilal C. J., Degiovanni I. P., Kück S., Müller I., Sinclair A. G.** Metrology of single-photon sources and detectors: a review // *Optical Engineering*, 2014, v.53, № 8, p. 081910. DOI: 10.1117 / 1. OE.53.8.081910.
15. **Kang Y., Lu H. X., Lo Y.-H., Bethune D. S., Risk W. P.** Dark count probability and quantum efficiency of avalanche photodiodes for single-photon detection // *Appl. Phys. Lett.*, 2003, v.83(14), p.2955–2957.

depending on the duration of the time interval after the APD click, it is necessary to measure the counting of single-photon APD at different gate pulses repetition frequencies. We measured the counting at the following frequencies: 0.1, 1.0, 2.5, 5.0, 6.25, 7.5 and 10 MHz. The results for WPACBGMACNN SPAD by Wooriro at different temperatures are shown in Fig. 5.

On the basis of the characteristics shown in Fig. 5, it is possible to determine the optimal operating parameters of single-photon APDs for specific applications. When a single-photon photodetector is used in QKD systems, the DCR value is the most important because it determines the error in the quantum key and eventually the communication fiber line length.

Examples of optimal parameters of a single-photon APD for use in quantum key distribution systems are: dark noise level  $2 \cdot 10^{-6}$  with quantum efficiency 20%. These parameters correspond to the following conditions for WPACBGMACNN SPAD: temperature is  $-50\text{ }^\circ\text{C}$ , bias voltage is 68.8 V. In this case, the probability of afterpulsing is 8% at a gate frequency of 10 MHz and less than 1% at a frequency of 1 MHz.

It is also worth noting that the SPAD by Wooriro, tested in this paper, is not inferior to the widely used single-photon detectors by Princeton Lightwave in terms of the dark count probability.

## CONCLUSIONS

In this work, the characteristics of single-photon avalanche photodiode by Wooriro were studied. The results allow us to conclude about the applicability of these detectors in various areas, in particular, in the systems of quantum key distribution. According to the characteristics given in the article, it is possible to choose the working parameters of the SPAD to meet various conditions. The dark count rate and quantum efficiency comparison of SPAD WPACBGMACNN by Wooriro (Korea) and SPAD PGA-016u-1550TFZ by Princeton Lightwave (USA) showed that the tested single-photon detector by Wooriro is not inferior to the commonly known Princeton Lightwave detectors.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for financial support of the studies in the framework of the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project 03.G25.31.0254), within which a scheme was developed for measuring the SPAD characteristics.

"OES Special Delivery" offers the entire range of Wooriro products in the territory of the Russian Federation and offers the most advantageous delivery terms of products, full technical support, and also delivery of samples.



МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



Главное событие отрасли  
в России и странах СНГ

# ФОТОНИКА

МИР  
ЛАЗЕРОВ  
И ОПТИКИ

**4–7 марта 2019**

При поддержке Министерства  
промышленности и торговли РФ

Под патронатом ТТП РФ



Реклама 12+



14-я международная  
специализированная выставка  
лазерной, оптической  
и оптоэлектронной техники

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

[www.photonics-expo.ru](http://www.photonics-expo.ru)



ЛАЗЕРНАЯ АССОЦИАЦИЯ

 ЭКСПОЦЕНТР