



# Обзор сверхпроводниковых микростриповых однофотонных детекторов

В. А. Желтиков, Д. Д. Платонов, С. Хыдырова,  
К. М. Моисеев, Д. Д. Васильев  
Московский государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана, Москва

В работе описаны актуальные модели детектирования и текущее состояние развития техники однофотонных детекторов. Проведен анализ материалов изготовления ультратонких пленок для детекторов, структура которых создана на основе полосок микрометровой ширины (SMSPD), и составлены рекомендации для улучшения их рабочих характеристик. Для снижения скорости темного счета (DCR), возрастания эффективности детектирования системы (SDE), быстродействия (CR) и увеличения активной площади необходимо использовать SMSPD из рентгеноаморфных материалов типа  $\alpha$ -Mn с низким коэффициентом диффузии, обладающих топологией, созданной на основе брэгговских отражающих структур (DBR), с высоким коэффициентом заполнения и уширением полосы элементов на повороте.

**Ключевые слова:** однофотонные детекторы, рентгеноаморфные материалы, коэффициент диффузии, квантовая эффективность, скорость счета, плотность тока, топология меандра

Статья получена: 23.08.2022  
Статья принята: 15.09.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (Superconducting Nanowire Single Photon Detector – SNSPD), благодаря своим высоким характеристикам, являются предпочтительными [1] для применения в различных областях науки и техники,

# Review of Superconducting Microstrip Single-photon Detectors

V. A. Zheltikov, D. D. Platonov, S. Khydyrova, K. M. Moiseev,  
D. D. Vasilev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

This paper reviews the state-of-the-art of superconducting microstrip single-photon detectors and provides their comparison with the nanostrip detectors. The article describes the actual detection models required for understanding the SMSPD operating principles. We have analyzed the manufacturing materials of ultrathin films designed for SMSPD demonstrating the prospects for the use of X-ray amorphous materials with  $\alpha$ -Mn structure. As a result of methods study to improve the detector specifications, we have provided the following recommendations: to reduce DCR and increase SDE, CR and active area, it is necessary to use the SMSPDs based on the X-ray amorphous materials with a low diffusion coefficient, a topology with a high filling factor and the strip spreading at the turn based on a DBR structure.

**Keywords:** single-photon detectors, X-ray amorphous materials, diffusion coefficient, quantum efficiency, count rate, current density, meander topology

Received on: 23.08.2022  
Accepted on: 15.09.2022

## INTRODUCTION

Due to their high-performance capabilities, the superconducting nanowire single-photon detectors (SNSPDs) are beneficial [1] for applications in various fields of science and technology, such as space communications, LIDAR systems, and quantum technologies. An obstacle to the mainstream use of SNSPDs at this stage



таких как космическая связь, LIDAR-системы и квантовые технологии. Препятствием для массового использования SNSPD на данном этапе развития техники стал малый размер чувствительного элемента (ширина линии порядка 100 нм, площадь меандра порядка  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ ) и низкий уровень сигнала (порядка 0,1 мВ) [2]. Это приводит к сложностям как в технологии изготовления, для которой используется дорогое оборудование электронно-лучевой литографии, так и в технике измерений, где необходимо применять мощные усилители сигнала и линзованное волокно (lensed fiber) для фокусировки изображения в малую рабочую область детектора. Для создания SNSPD в основном применяют кристаллические материалы (NbN, NbTiN и т.д.) [3], это часто приводит к снижению выхода годных.

Основным параметром детектора является квантовая эффективность (QE, отношение числа зарегистрированных фотонов к числу выпущенных фотонов), которая делится на собственную эффективность поглощения пленки IDE и эффективность детектирования системы SDE. Немаловажными параметрами являются скорость темнового счета (число ложных срабатываний детектора в секунду, DCR), быстродействие (скорость счета, CR) и площадь детектирования. Устройства работают при низких температурах менее 10К, так как такие температуры необходимы для перехода чувствительного элемента (ультратонкой пленки) в сверхпроводящее состояние. Инфраструктурой для работы устройств являются криостаты, стоимость которых растет на порядки при переходе от температур 4,2К к температурам около 1К. Однако при уменьшении рабочей температуры увеличивается QE и уменьшается DCR [4]. По этой причине большинство коммерческих детекторов работают при температурах менее 2,4 К [5]. Для снижения стоимости устройств в их конструкции необходимо применять материалы с критическими температурами более 4,2 К.

### МОДЕЛИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Для работы детектор охлаждают до температур ниже 10К и пропускают ток смещения, чтобы энергии фотона было достаточно для локального разрушения сверхпроводимости. Когда полоска переходит в резистивное состояние, на осциллографе наблюдается импульс напряжения, что свидетельствует о регистрации фотона. С 2001 года распространена модель горячего пятна (предложена Г. Н. Гольцманом и др. [6]), согласно которой детекторы с шириной полоски больше некоторого критического рамера (порядка 200 нм) не смо-

of technological expansion has become the small size of the detecting element (the line width is about 100 nm, the meander area is about  $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^2$ ) and the low signal level (about 0.1 mV) [2]. This leads to the difficulties both in the manufacturing technology that is based on the expensive electron beam lithography equipment, and in the measurement procedures, where it is necessary to use the powerful signal amplifiers and lensed fiber for image focusing into a small detector working area. To manufacture SNSPDs, the crystalline materials (NbN, NbTiN, etc.) are mainly used [3] that often leads to a decreased yield ratio.

The main detector parameter is the quantum efficiency (QE, the ratio of the number of registered photons to the number of emitted photons) that is divided by the intrinsic absorption efficiency of the IDE film and the detection efficiency of the SDE system. The important parameters are the dark count rate (number of false detections per second, DCR), count rate (CR), and detection area. The devices are operated at low temperatures less than 10 K, since such temperatures are required for transition of the detecting element (ultrathin film) to the superconducting state. The infrastructure for the device operation includes the cryostats, the cost of which is increased by orders of magnitude when moving from the temperatures of 4.2 K to the temperatures of about 1 K. However, the decreased operating temperature leads to the increased QE and reduced DCR [4]. For this reason, most commercial detectors are used at the temperatures below 2.4 K [5]. To reduce the cost of devices, it is necessary to use materials with the critical temperatures above 4.2 K in their design.

### DETECTION MODELS

For operation, the detector is cooled to the temperatures below 10 K and a bias current is passed to ensure that the photon energy is sufficient for local superconductivity destruction. When the strip goes into a resistive state, a potential pulse is observed on the oscilloscope that indicates the photon registration. Since 2001, the hot spot model has been widespread (proposed by G. N. Goltsman et al. [6]), according to which the detectors with a strip width greater than a certain critical dimension (about 200 nm) are not able to detect a photon. In 2017, D. Yu. Vodolazov proposed a vortex detection model [7], according to which the detection mechanism consists of three stages: at first, a photon is absorbed with a hot spot generation; then there is a penetration into the strip of a vortex-antivortex pair – dissipative motion of magnetic vortices to the strip edge under the influence of the Lorentz force; and finally, the strip section is heated to the

гут зарегистрировать фотон. В 2017 году Д. Ю. Водолазовым предложена вихревая модель детектирования [7], согласно которой механизм детектирования состоит из трех этапов: сначала происходит поглощение фотона с образованием горячего пятна; далее возникает проникновение в полосу пары вихрь-антивихрь – диссипативное движение магнитных вихрей к краю полоски под действием силы Лоренца; и наконец, идет разогрев сечения полоски до нормального состояния с возникновением импульса напряжения (рис. 1).

После предложения данной модели детектирования стал возможен переход к детекторам с характерным размером порядка 1 мкм, что упростило технологию изготовления устройств. В 2018 году реализован первый детектор на основе полосок микрометровой ширины (superconducting microwire single photon detector, SMSPD) [8]. Такие устройства имеют высокий уровень сигнала порядка 0,1 В, что позволяет измерять отклик детектора без использования мощных усилителей.

### АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ SMSPD

Из вихревой модели детектирования вытекают требования к материалам для SMSPD: низкий коэффициент диффузии  $D < 0,5 \text{ см}^2/\text{с}$  и малая энергетическая щель  $\Delta < 1 \text{ мэВ}$  [2]. Из экономических соображений следует необходимость высокой критической температуры  $T_c > 4,2 \text{ К}$  и рентгеноаморфной структуры, которая нечувствительна к дефектам подложки и обеспечивает большой выход годных по сравнению с детекторами на основе кристаллических материалов [9].

На сегодняшний день для создания коммерчески доступных SNSPD используют кристаллические материалы (NbN, NbTiN и др.) [3]. В исследовательских центрах используют рентгеноаморфные материалы, детекторы, на основе которых демонстрируют высокую эффективность (SDE 93% при использовании WSi [10]). Структура элементарной ячейки данных пленок мало исследована, тем не менее для SNSPD на базе  $\text{Mo}_x\text{Si}_{(1-x)}$  в [11] указано, что сформированная пленка является аморфной и разупорядоченной, но обладает структурой, схожей в ближнем порядке с кристаллической решеткой типа A15 или  $\beta$ -W. Также структура A15 характерна для кристаллических соединений  $\text{A}_3\text{B}$ , применяемых в SNSPD рентгеноаморфных

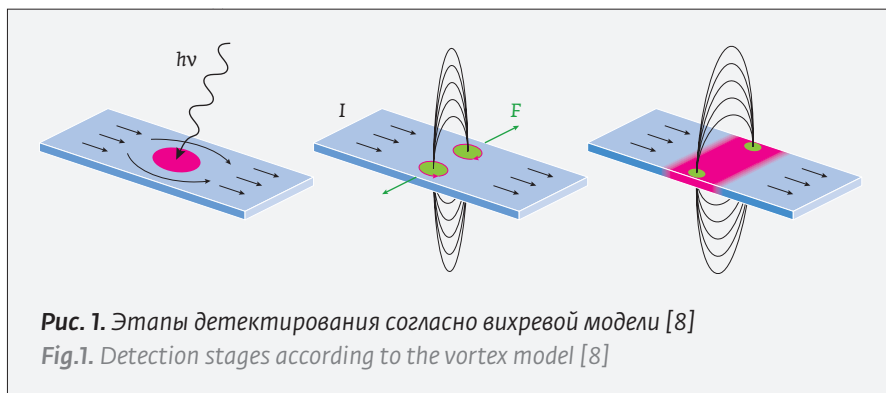


Рис. 1. Этапы детектирования согласно вихревой модели [8]  
Fig.1. Detection stages according to the vortex model [8]

normal state with the occurrence of a potential pulse (Fig. 1).

After proposal of this detection model, it became possible to use the detectors with a typical size of about 1  $\mu\text{m}$  that simplified the device manufacturing technology. In 2018, the first superconducting microwire single photon detector (SMSPD) was produced [8]. Such devices have a high signal level of about 0.1 V that makes it possible to measure the detector response without the use of powerful amplifiers.

### MATERIAL ANALYSIS FOR SMSPD

The vortex detection model leads to the requirements for the SMSPD materials: a low diffusion coefficient  $D < 0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$  and a small energy gap  $\Delta < 1 \text{ meV}$  [2]. The economic considerations imply the need for a high critical temperature  $T_c > 4.2 \text{ K}$  and an X-ray amorphous structure that is insensitive to the substrate defects and provides a higher yield ratio compared to the detectors based on crystalline materials [9].

At present, the crystalline materials (NbN, NbTiN, etc.) are used to produce the commercially available SNSPDs [3]. The research centers apply the X-ray amorphous materials, detectors, on the basis of which they demonstrate high efficiency (SDE 93% when using WSi [10]). The structure of the low-level cells of such films has been underinvestigated, however, it is indicated in [11] for the SNSPDs based on  $\text{Mo}_x\text{Si}_{(1-x)}$  that the formed film is amorphous and disordered, but has a structure similar in the short-range order to the crystal lattice of the A15, or  $\beta$ -W type. The A15 structure is also typical for the  $\text{A}_3\text{B}$  crystalline compounds of X-ray amorphous materials used in SNSPDs:  $\text{Mo}_3\text{Ge}$ ,  $\text{Mo}_3\text{Re}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Si}$  [12, 13], as well as for tungsten and transition metal silicides and, presumably, for  $\text{W}_3\text{Si}$  [14]. However, these materials in the amorphous state have either low  $T_c$  or high  $D$  and  $\Delta$  (see the table) and do not meet the requirements set for the detector production based on the microstrips. In 2020, the experts demonstrated the



материалов:  $\text{Mo}_3\text{Ge}$ ,  $\text{Mo}_3\text{Re}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Si}$  [12, 13], а также для вольфрама и силицидов переходных металлов и, предположительно, для  $\text{W}_3\text{Si}$  [14]. Однако данные материалы в аморфном состоянии имеют либо низкую  $T_c$ , либо высокий  $D$  и  $\Delta$  (см. таблица) и не соответствуют поставленным требованиям для реализации детекторов на основе микрополосок. В 2020 году специалисты продемонстрировали детектирование SMSPD на основе рентгеноаморфного  $\text{NbRe}$  [15], который имеет структуру типа  $\alpha\text{-Mn}$  [16] (стехиометрическое соединение  $\text{A}_5\text{B}_{24}$ ). Такие материалы мало исследованы и являются более перспективными для применения в SMSPD, так как превосходят материалы со структурой типа  $\beta\text{-W}$  по необходимым параметрам (см. табл.). Для изготовления SMSPD предлагается использовать ранее неисследованный материал чувствительного элемента  $\text{Zr}_5\text{Re}_{24}$ , который имеет высокую критическую температуру 4,9 К при толщине 8 нм, малую энергетическую щель 0,93 мэВ и коэффициент диффузии  $0,46 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Помимо рентгеноаморфных материалов, для создания SMSPD также традиционно используют кристаллический материал  $\text{NbN}$  [9, 25]. Он обладает более высокой критической температурой и соответственно меньшей кинетической индуктивностью, за счет чего детекторы имеют высокую скорость счета CR, но небольшую внутреннюю эффективность IDE. В 2021 году для SMSPD предложена технология изготовления путем облучения кристаллического  $\text{NbN}$  ионами гелия [25]. Такое решение привело к несверхпроводящим включениям в пленке, которые являются центрами проникновения магнитных вихрей, разрушающих сверхпроводимость при попадании фотона. Такие пленки имеют более низкую критическую температуру, чем необлученные пленки (6,4 и 7,1 К соответственно), что приводит к уменьшению энергетической щели (т.е. тока смещения, достаточного для детектирования) и увеличению QE. Приведенный метод изготовления, а также использование структуры для отражения фотонов заданной длины волны (distributed Bragg reflector, DBR) позволило повысить QE с 30 до 92,2% [25].

Однако детектор, изготовленный по такой технологии, обладает рядом недостатков. В первую очередь это использование кристаллического материала, что вызывает повышенные требования к процессу нанесения и контроля пленки. Также минусом является необходимость ионной бомбардировки – дорогой и сложной технологической операции. Это приводит к малому выходу годных и высокой стоимости устройства.

SMSPD detection based on X-ray amorphous  $\text{NbRe}$  [15] that had a structure of the  $\alpha\text{-Mn}$  type [16] (stoichiometric compound  $\text{A}_5\text{B}_{24}$ ). Such materials have been understudied. They are more promising for use in SMSPD, since they are superior to the materials with a  $\beta\text{-W}$  type structure in terms of the required parameters (see the table). For the SMSPD manufacture, it is proposed to use the previously unexplored  $\text{Zr}_5\text{Re}_{24}$  detecting element material that has a high critical temperature of 4.9 K at a thickness of 8 nm, a small energy gap of 0.93 meV, and a diffusion coefficient of  $0.46 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

In addition to the X-ray amorphous materials, the  $\text{NbN}$  crystalline material is also traditionally used to produce SMSPD [9, 25]. It has a higher critical temperature and, accordingly, a lower kinetic inductance, due to which the detectors have a high count rate (CR), but a small intrinsic efficiency IDE. In 2021, a manufacturing technology was proposed for SMSPD by irradiating crystalline  $\text{NbN}$  with the helium ions [25]. This solution led to the non-superconducting inclusions in the film being the centers of penetration of magnetic vortices that destroy superconductivity due to the photon ingress. Such films have a lower critical temperature than the non-irradiated films (6.4 and 7.1 K, respectively) leading to the decreased energy gap (i. e., a bias current sufficient for detection) and the increased QE. The given manufacturing method, as well as the use of a structure for reflecting photons of a given wavelength (distributed Bragg reflector, DBR), have made it possible to increase QE from 30 to 92.2% [25].

However, a detector manufactured according to this technology has a number of disadvantages. First of all, this is the use of a crystalline material that causes increased requirements for the film deposition and control process. Moreover, there is also the need for ion bombardment that is an expensive and comprehensive process operation. This leads to a low yield ratio and high cost of the device.

### SMSPD PERFORMANCE UPGRADE METHODS

At present, the SNSPD detectors have the following record-setting parameters: SDE=99.5% [27], DCR=10 Hz [4], detection area:  $0.07 \text{ mm}^2$  [28], while the latest SMSPD demonstrate the following: SDE=96% [29], DCR=200 Hz [25] and detection area:  $2.25 \times 2.25 \text{ mm}^2$  [30]. Such similar specifications are explained by the fact that the SMSPDs, although they appeared only in 2017, have already managed to run along the same development path as the SNSPDs since 2001 until the present time.



## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК SMSPD

Сейчас детекторы SNSPD имеют следующие рекордные параметры: SDE=99,5% [27], DCR=10 Гц [4], площадь детектирования 0,07 мм<sup>2</sup> [28], тогда как последние SMSPD демонстрируют SDE=96% [29], DCR=200 Гц [25] и площадь детектирования 2,25×2,25 мм<sup>2</sup> [30]. Такие схожие характеристики объясняются тем, что SMSPD, хоть и появились лишь в 2017 году, уже успели пройти тот же путь развития, что и SNSPD – с 2001 года по настоящее время.

Нерешенной задачей на сегодняшний день является комплексное увеличение параметров SMSPD [5]. Современные детекторы чаще всего показывают рекордное значение лишь одного параметра (например, CR), тогда как остальные характеристики (QE, DCR) имеют низкие значения.

Высокую эффективность детектирования показывают детекторы на основе пленок, имеющих хорошую однородность. Это объясняется тем, что такие пленки способны пропускать токи смещения, близкие к критическому току, что и лежит в основе принципа детектирования SMSPD. В этом плане хорошо себя зарекомендовали пленки из аморфных материалов, таких как MoSi и WSi: детекторы на базе этих материалов показывают высокую эффективность SDE=93% [10], сравнительно низкий DCR=1 кГц [31], а также скорость счета CR=10 МГц [32].

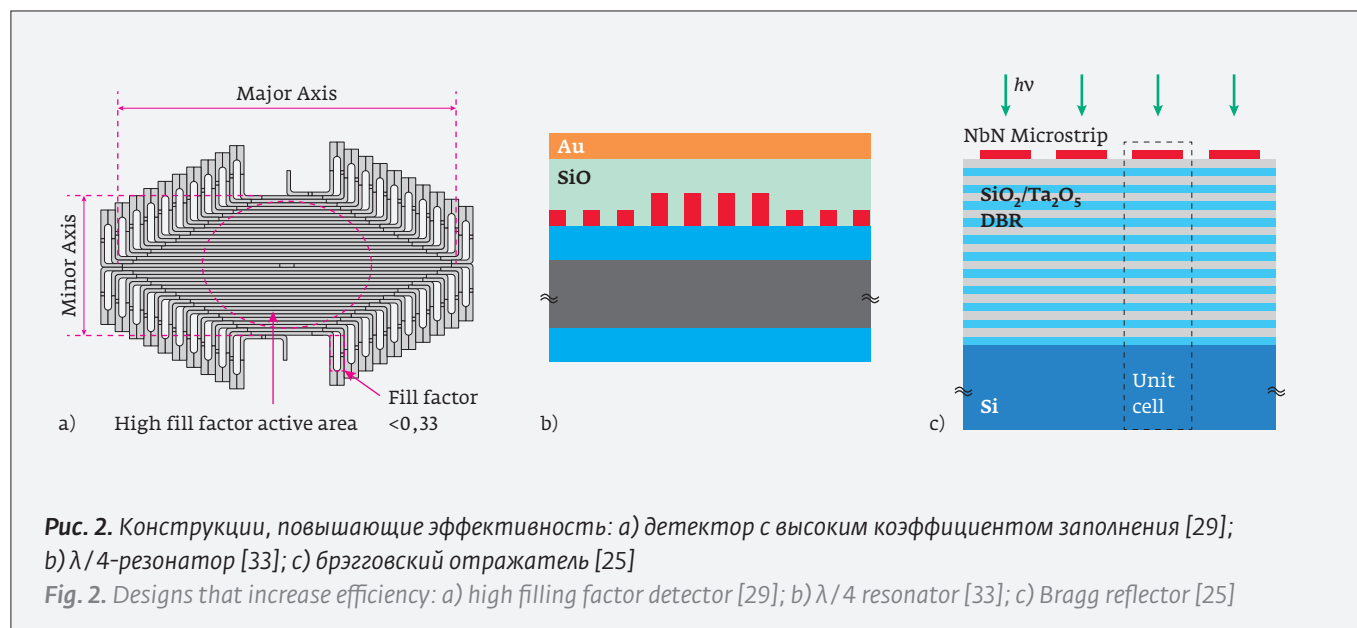
Помимо материалов, которые позволяют пропускать большие токи смещения, для повышения QE используют топологии с высоким коэффициентом заполнения, т.е. отношением ширины полосы

к периоду. The current remaining challenge is a comprehensive increase in the SMSPD parameters [5]. Modern detectors most often demonstrate a record-setting value of only one parameter (for example, CR), while other specifications (QE, DCR) have low values.

The high detection efficiency is provided by the film-based detectors with good uniformity. This is explained by the fact that such films are capable of passing bias currents close to the critical current that lied at the bottom of the SMSPD detection principle. In this regard, the films made of amorphous materials such as MoSi and WSi have shown good results: the detectors based on these materials demonstrate high efficiency SDE = 93% [10], relatively low DCR = 1 kHz [31], and count rate CR = 10 MHz [32].

In addition to the materials that allow high bias currents to be passed, the topologies with a high filling factor, i. e. the ratio of the stripe width to the structure period (Fig. 2a), are used to increase QE. In [29] published in 2022, the researchers proposed a new meander design in the form of a candelabra-style with a filling factor of 0.91 in the active region. This solution makes it possible to increase the probability of a photon hitting the superconducting strip rather than the gap region. Thus, the detector efficiency using the DBR structure is 96% [29].

Another way to increase the detection efficiency is to increase the probability of a photon absorption by a meander. For this purpose, a quarter-wave resonator (Fig. 2b) or a DBR structure (Fig. 2c) is added to the structure when producing both types of detectors. A quarter-wave resonator is an optical cavity made of a dielectric material (usually SiO





к периоду структуры (рис. 2а). В работе [29] 2022 года исследователи предложили новую конструкцию меандра в форме канделябра, обладающую коэффициентом заполнения 0,91 в активной области. Такое решение позволяет повысить вероятность попадания фотона на сверхпроводящую полосу, а не в область зазора. Таким образом, эффективность детектора с использованием DBR структуры равна 96% [29].

Еще один из способов повысить эффективность детектирования – увеличить вероятность поглощения фотона меандром. Для этого при изготовлении обоих типов детекторов в конструкцию добавляют четвертьволновой резонатор (рис. 2б) или DBR-структуру (рис. 2с). Четвертьволновой резонатор представляет собой оптическую полость из диэлектрика (обычно используют SiO, благодаря его высокой прозрачности для ИК-излучения) и отражающее покрытие, которое выполняют из золота или титана [33]. Излучение, которое не было поглощено детектором, отражается от зеркала и начинает резонировать в оптической полости, таким образом повышается вероятность поглощения фотона после его первоначального попадания в область зазора меандра. DBR-структура представляет собой несколько слоев материалов с разными показателями преломления, например SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Толщина выбирается в зависимости от длины волны, на которой будет работать детектор, а количество слоев влияет на вероятность отражения. Конструкция с таким отражателем также повышает вероятность поглощения фотона меандром, что приводит к увеличению SDE [25]. Иногда применяются конструкции, объединяющие оба эти элемента. Хотя технология их создания более сложная, однако в таком случае вероятность поглощения фотона близка к 100% [34].

В целях уменьшения DCR научными группами предлагаются новые топологии детекторов, увеличивающие равномерность плотности тока при работе устройства. Это связано с тем, что при больших токах смещения, необходимых для работы SMSPD, возрастает число флуктуаций, способных разрушить сверхпроводимость в отсутствие фотона (то есть увеличить DCR). Наибольшая плотность тока наблюдается на поворотах меандра из-за того, что электронам энергетически выгоднее пройти поворот по наиболее короткому пути – внутреннему радиусу (ток течет по пути наименьшего сопротивления).

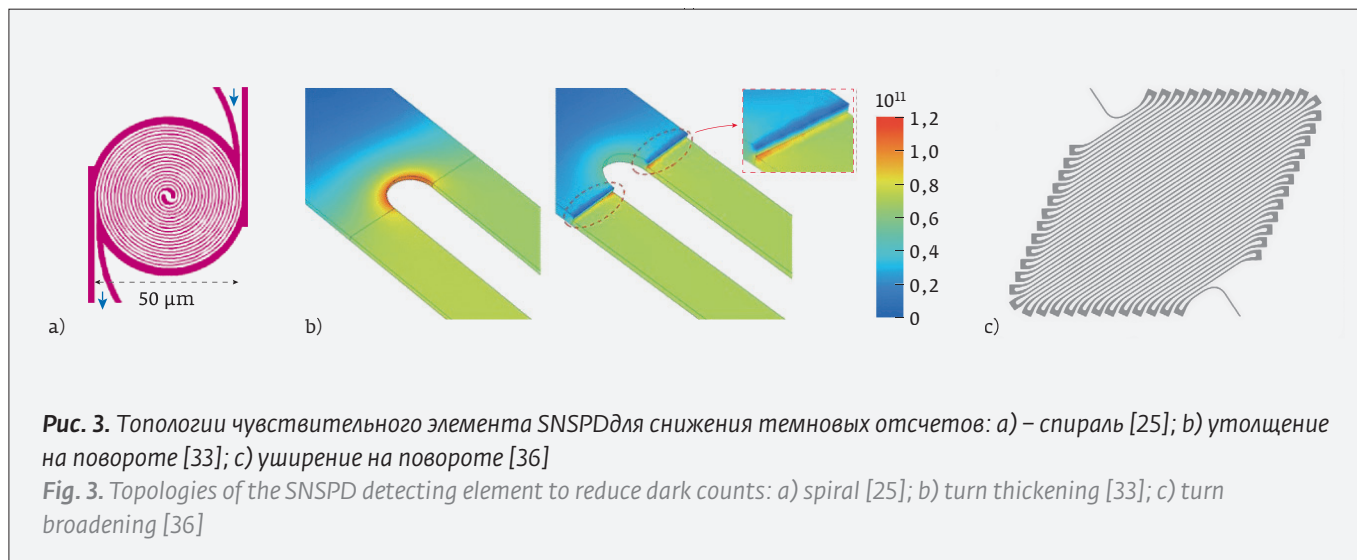
Многие научные группы используют в своих работах спираль (рис. 3а) в качестве топологии детектора, так как плавное постоянное закручи-

due to its high transparency for IR radiation) and a reflective coating made of gold or titanium [33]. The radiation that has not been absorbed by the detector is reflected from the mirror and begins to resonate in the optical cavity, thus increasing the photon absorption probability upon its entering the meander gap region. The DBR structure consists of several layers of materials with various refractive indices, such as SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The thickness is selected depending on the wavelength at which the detector will be operated, and the number of layers affects the reflection probability. Moreover, the structure with such a reflector increases the probability of photon absorption by the meander that leads to the increased SDE [25]. Sometimes it is possible to use the structures combining both elements. Although their manufacturing method is more comprehensive, however, in this case, the photon absorption probability is close to 100% [34].

In order to reduce DCR, the scientific teams propose new detector topologies that increase the current density uniformity during the device operation period. This is due to the fact that at high bias currents required for the SMSPD operation, the number of fluctuations that can destroy superconductivity in the absence of a photon (that is, increase DCR) is increased. The highest current density is observed at the meander turns due to the fact that it is energetically more profitable for the electrons to negotiate the turn along the shortest path that is the inner radius (the current is passed along the path of least resistance).

Many scientific teams use a spiral (Fig. 3a) in their work as a detector topology, since the smooth constant spiral involution provides a uniform current distribution over the strip [25, 26]. In 2021, there was a proposal to use thickenings at the meander turns (Fig. 3b) that reduced the current distribution unevenness by 20% leading to the decreased DCR [33, 35]. The main disadvantage of the described technology is the labor-intensive manufacturing process, since thickening requires an additional lithography process, as a result of which the strip edge is rough and reduces QE. In 2022, a «single-layer» topology with the turn broadening was proposed (Fig. 3c), corresponding to the standard SNSPD manufacturing process [36].

Figure 4 compares the main topologies of the SNSPD meander in terms of the uneven current density distribution [36]. Compared to the standard one (meander), the new geometries (spiral, meander with the turn thickening or broadening) increase the current uniformity at the turns from 67 to 98%,



вание спирали обеспечивает равномерное распределение тока по полоске [25, 26]. В 2021 году предложено использовать утолщения на поворотах меандра (рис. 3б), которые снижают неравномерность распределения тока на 20%, что приводит к снижению DCR [33, 35]. Главный недостаток описанной технологии – трудоемкий процесс изготовления, так как утолщение требует дополнительного процесса литографии, вследствие чего край полоски получается шероховатым, что уменьшает QE. В 2022 году предложена «однослойная» топология с уширением на повороте (рис. 3с), соответствующая стандартному процессу изготовления SNSPD [36].

На рис. 4 дано сравнение основных топологий меандров SNSPD по неравномерности распределения плотности тока [36]. По сравнению со стандартной (меандр) новые геометрии (спираль, меандр с утолщением или уширением на повороте) увеличивают равномерность тока на поворотах с 67 до 98%, снижая DCR и повышая эффективность детектора.

Скорость счета детектора – это количество фотонов в секунду, которое может зарегистрировать детектор. На этот параметр влияет время восстановления детектора, то есть время, за которое он перейдет из нормального в сверхпроводящее состояние и снова будет

while reducing DCR and increasing the detector efficiency.

The detector’s count rate is the number of photons per second to be recorded by the detector. This parameter is affected by the detector’s recovery time, that is, the time during which it changes from the normal to the superconducting state and is ready for the repeated photon detection. To reduce it, the materials with a low kinetic inductance and a high critical temperature are used, giving preference to the crystalline films (NbN, NbTiN) [3]. However, the X-ray amorphous films with a low diffusion coefficient (for example, MoSi at  $D = 0.47 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) show good results with  $\text{CR}=10 \text{ MHz}$  [32]. We assume that the high count rate is related to a short recovery time

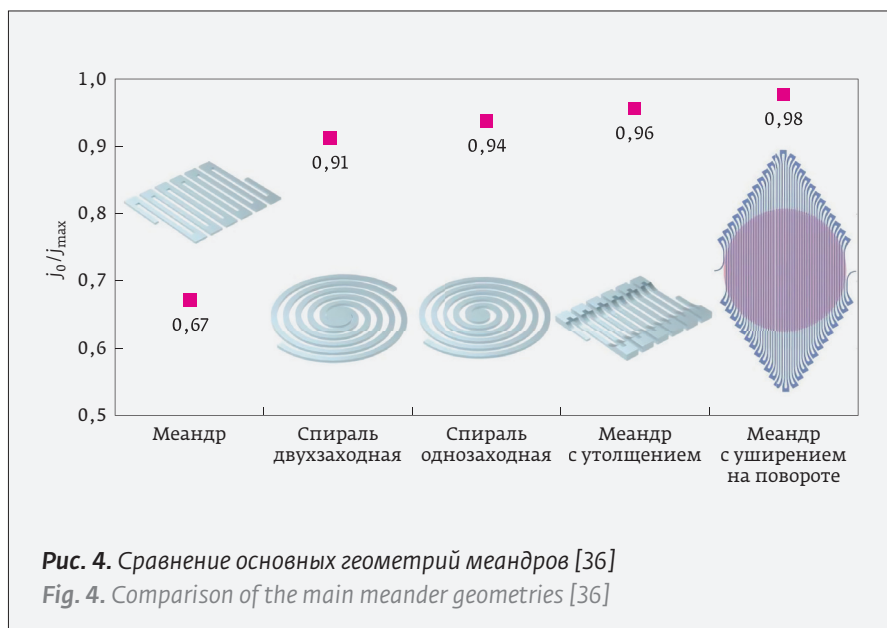


Табл. Параметры рентгеноаморфных соединений для SMSPD

Table. Parameters of X-ray amorphous compounds for SMSPD

Тип рентгеноаморфной структуры Type of X-ray amorphous structure									
$\beta$ -w					$\alpha$ -Mn				
Материал Material	Толщина, нм Thickness, nm	$T_c$ , К $T_c$ , K	$\Delta$ , мэВ $\Delta$ , meV	$D$ , см <sup>2</sup> /с $D$ , cm <sup>2</sup> /s	Материал Material	Толщина, нм Thickness, nm	$T_c$ , К $T_c$ , K	$\Delta$ , мэВ $\Delta$ , meV	$D$ , см <sup>2</sup> /с $D$ , cm <sup>2</sup> /s
Mo <sub>3</sub> Si [11, 17]	5	4,9	1,14	0,47	Nb <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> [15, 18]	8	6,0	1,08	0,56
W <sub>3</sub> Si [17, 19]	6	4,3	0,76	0,68	Mo <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> [20]	5	3,4	0,78	0,75
Mo <sub>3</sub> Ge [19, 21]	6	4,5	1,10	1,02	W <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> [19]	5	4,1	1,29	0,78
Nb <sub>3</sub> Si [11]	10	2,0	0,47	0,56	Mo <sub>5</sub> Ru <sub>24</sub> [20]	6	2,8	0,69	0,52
Nb <sub>3</sub> Ge [22, 23]	16	3,0	0,73	0,24	Zr <sub>5</sub> Re <sub>24</sub> [24]	8	4,9	0,93	0,46

готов регистрировать фотон. Для его уменьшения используют материалы с малой кинетической индуктивностью и высокой критической температурой, отдавая предпочтение кристаллическим пленкам (NbN, NbTiN) [3]. Однако и рентгеноаморфные пленки, обладающие малым коэффициентом диффузии (например MoSi при  $D=0,47$  см<sup>2</sup>/с), показывают хорошие результаты CR=10 МГц [32]. Мы предполагаем, что высокая скорость счета связана с малым временем восстановления из-за слабого электрон-электронного взаимодействия в пленке и быстрого отвода тепла в подложку. Также для уменьшения кинетической индуктивности необходимо использовать топологии с минимальной длиной меандра. Лучшим решением для увеличения CR является микромостик (рис. 5а) [37, 38].

Главным достоинством SMSPD по сравнению с SNSPD является возможность увеличения активной площади детектора без увеличения длины меандра. Большая активная площадь необходима для таких задач, как поиск темной материи или обнаружения нейтронов и макромолекул [30]. Обычно при изготовлении SNSPD большой площади сильно возрастает длина меандра, что влечет за собой рост кинетической индуктивности и снижение CR-детектора. Поэтому стандартная площадь SNSPD составляет около 10×10 мкм<sup>2</sup>, максимальная – порядка 265×265 мкм<sup>2</sup> (рис. 5б) при CR=10 МГц [28]. При стандартной активной площади детектор нуждается в точном совмещении с одномодовым оптоволокном. SMSPD, благодаря ширине полосы порядка 2 мкм, имеет площадь

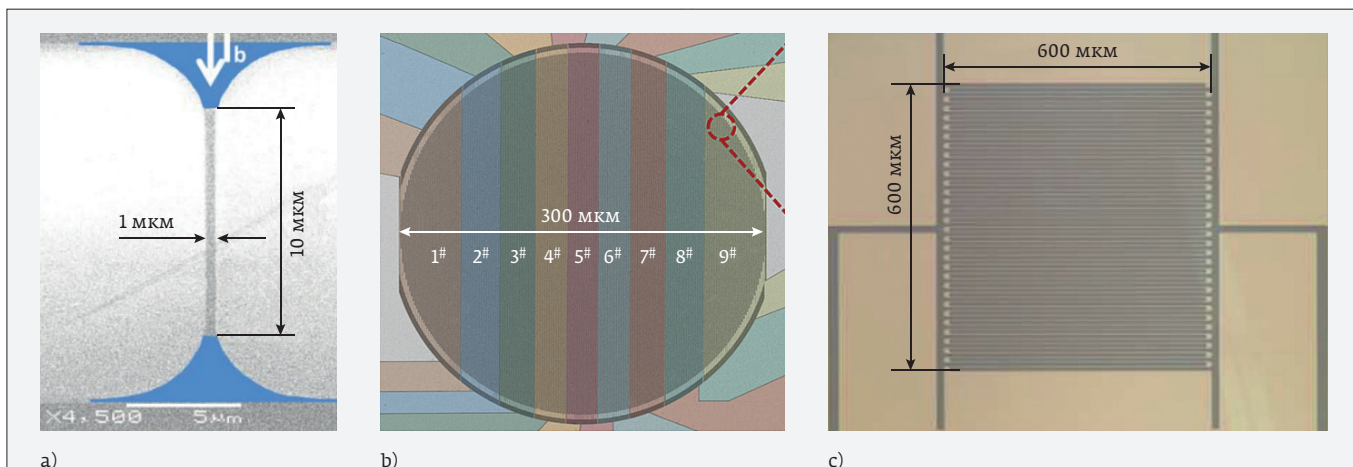
due to the weak electron-electron interaction in the film and the rapid heat removal to the substrate. Moreover, to reduce the kinetic inductance, it is necessary to use the topologies with a minimum meander length. The best solution for the increased CR is a microbridge (Fig. 5a) [37, 38].

The main advantage of SMSPD compared to SNSPD is the possible increased of the detector's active area without increasing the meander length. A large active area is required for such tasks as the search for dark matter or the detection of neutrons and macromolecules [30]. Usually, the large-area of the produced SNSPD leads to the great increase in the meander length entailing an increase in the kinetic inductance and a decrease in the detector's CR. Therefore, the standard SNSPD area is about 10×10  $\mu\text{m}^2$ , the maximum area is about 265×265  $\mu\text{m}^2$  (Fig. 5b) at CR=10 MHz [28]. With a standard active area, the detector needs precise alignment with the single-mode optical fiber. The SMSPD, due to a stripe width of about 2  $\mu\text{m}$ , has an area of about 600 × 600  $\mu\text{m}^2$  (Fig. 5c) at CR=8 MHz [39], comparable to SNSPD. This result eliminates the need for precision detector-fiber alignment systems.

## CONCLUSION

At present, the superconducting single-photon detectors SNSPD are the most efficient photon detectors. Since 2001 they have been produced using the crystalline materials and meanders with a strip width of about 100 nm. However, after the discovery of the vortex detection model in 2017, it became possible to switch to the SMSPD detec-





**Рис. 5.** Конструкции с минимальной CR и максимальной активной площадью: а) микромостик [38]; б) SNSPD с большой активной областью [28]; в) SMSPD с большой активной областью [39]

**Fig. 5.** Designs with the minimum CR and maximum active area: а) microbridge [38]; б) SNSPD with a large active area [28]; в) SMSPD with large active area [39]

около  $600 \times 600$  мкм<sup>2</sup> (рис. 5с) при CR=8 МГц [39], сравнимой с SNSPD. Это избавляет от необходимости использования систем точного совмещения детектора с оптоволоком.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сверхпроводящие однофотонные детекторы SNSPD являются наиболее эффективными детекторами фотонов на сегодняшний день, а для их изготовления с 2001 года использовали кристаллические материалы и меандры с шириной полосы порядка 100 нм. Однако после открытия вихревой модели детектирования в 2017 году появилась возможность перехода к детекторам SMSPD из рентгеноаморфных материалов и с шириной полосы порядка 1 мкм, которые обладают меньшими требованиями к процессам осаждения пленки и литографии. Являясь новым этапом развития SNSPD, они ведут к уменьшению стоимости устройства при схожих (SDE, DCR) и лучших (CR, площадь детектирования) характеристиках.

По итогам литературного обзора чувствительный элемент SMSPD предлагается изготавливать из ранее не исследованного для SNSPD материала  $Zr_5Re_{24}$ , имеющего рентгеноаморфную структуру типа  $\alpha$ -Mn. Для повышения QE и снижения DCR рекомендуется использовать топологию с уширением на повороте, высоким коэффициентом заполнения и структурой DBR. Для увеличения CR возможно изготавливать детектор в виде микромостика, уменьшив до минимума кинетическую индуктивность.

tors made of X-ray amorphous materials and with a strip width of about 1  $\mu$ m that had lower requirements for film deposition and lithography. Being a new stage in the SNSPD development, they lead to a decrease in the cost of the device with the similar (SDE, DCR) and better (CR, detection area) specifications.

According to the results of the literature review, it is proposed to manufacture the detecting element of SMSPD from  $Zr_5Re_{24}$  material that has not been previously studied for SNSPD, and has an X-ray amorphous structure of the  $\alpha$ -Mn type. To improve QE and reduce DCR, it is recommended to use the topology with the turn broadening, high filling factor and DBR structure. To increase CR, it is possible to manufacture the detector in the form of a microbridge, reducing the kinetic inductance to a minimum level.

## AUTHORS

V. A. Zheltikov, 2nd year Master's student, zheltikov.vladimir@yandex.ru, Bauman Moscow State Technical University, Moscow.  
ORCID 0000-0001-7099-1039

D. D. Platonov, 4th year Bachelor's student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow.  
ORCID 0000-0003-0246-4290

S. Hydyrova, 2nd year Postgraduate's student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow.  
ORCID: 0000-0002-5510-0899

K. M. Moiseev, Cand. of Tech. Sc., Docent, Bauman Moscow State Technical University, Moscow.  
ORCID 0000-0002-8753-7737

D. D. Vasilev, Cand. of Tech. Sc., Docent, Bauman Moscow State Technical University, Moscow.  
ORCID 0000-0003-2147-4216



## REFERENCES

- Natarajan C.M. et al.** Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications. *Superconductor Science and Technology*. 2012; 25(6): 063001. DOI: 10.1088/0953-2048/25/6/063001.
- Goltsman G. N., Semenov A. V.** Superconducting single-photon detector technology on the way to the mid- and far-infrared range. *Nanofizika i nanoelektronika. Trudy XXVI Mezhdunarodnogo simpoziuma*. 2022; 1: 643.
- Zadeh E. et al.** Superconducting nanowire single-photon detectors: A perspective on evolution, state-of-the-art, future developments, and applications. *Applied Physics Letters*. 2021; 118(19): 190502. DOI: 10.1063/5.0045990.
- Zhang W. J. et al.** NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2017; 60(12):1–10. DOI: 10.1007/s11433–017–9113–4.
- You L.** Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information. *Nanophotonics*. 2020; 9(9): 2673–2692. DOI: 10.1515/nanoph-2020–0186.
- Semenov A. D., Goltsman G. N., Korneev A. A.** Quantum detection by current carrying superconducting film. *Physica C: Superconductivity*. 2001; 351(4): 349–356. DOI: 10.1016/S0921–4534(00)01637–3.
- Vodolazov D. Y.** Single-photon detection by a dirty current-carrying superconducting strip based on the kinetic-equation approach. *Physical Review Applied*. 2017; 7(3): 034014. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.7.034014.
- Korneeva Y. P. et al.** Optical single-photon detection in micrometer-scale NbN bridges. *Physical Review Applied*. 2018; 9(6):064037. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.9.064037.
- Holzman I. et al.** Superconducting nanowires for single-photon detection: progress, challenges, and opportunities. *Adv. Q. Tech.* 2019; 2(3–4): 1800058. DOI: 10.1002/qute.201800058.
- Marsili F. et al.** Detecting single infrared photons with 93% system efficiency. *Nature Photonics*. 2013; 7(3): 210–214. DOI: 10.1038/nphoton.2013.13.
- Banerjee A. et al.** Characterisation of amorphous molybdenum silicide (MoSi) superconducting thin films and nanowires. *Superconductor Science and Technology*. 2017; 30(8): 084010. DOI: 10.1088/1361–6668/aa76d8
- Hydyrova S.** Ocenka perspektivnosti sverhprovodyashchego materiala dlya odnofotonnogo detektora. 13 Vserossiyskaya konferenciya molodyh uchenyh i specialistov (s mezhdunarodnym uchastiem) «Budushchee mashinostroeniya Rossii». – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2019; 1: 240–242.  
Хыдырова С. Оценка перспективности сверхпроводящего материала для одnofotonного детектора. 13 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России». – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2019; 1: 240–242.
- Haynes W. M.** *CRC handbook of chemistry and physics*. – CRC press. 2014; DOI: 10.1201/9781315380476.
- Hydyrova S. I et al.** Issledovanie struktury i elektricheskikh svoystv nanokompozitnyh plenok WxSi1-x. *Fizika tverdogo tela*. 2022; 64(9): 1176 DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52802.08HN.  
Хыдырова С. И др. Исследование структуры и электрических свойств нанокomпозитных пленок W<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>. *Физика твердого тела*. 2022; 64(9): 1176 DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52802.08HN.
- Cirillo C. et al.** Superconducting nanowire single photon detectors based on disordered NbRe films. *Appl. Phys. Lett.* 2020; 117(17): 172602. DOI: 10.1063/5.0021487
- Stolze K. et al.** High-entropy alloy superconductors on an α-Mn lattice. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018; 6 (39): 10441–10449. DOI: 10.1039/C8TC03337D.
- Bao H. et al.** Characterization of Superconducting NbN, WSi and MoSi Ultra-Thin Films in Magnetic Field. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2021; 31(5): 1–4 DOI: 10.1109/TASC.2021.3066881.
- Cirillo C. et al.** Superconducting properties of noncentrosymmetric Nb<sub>0.18</sub>Re<sub>0.82</sub> thin films probed by transport and tunneling experiments. *Physical Review B*. 2016; 94(10): 104512. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.104512.
- Lita A. E. et al.** Materials development for high efficiency superconducting nanowire single-photon detectors. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 2015; 1807: 1–6. DOI: 10.1557/opl.2015.544.
- Makise K. et al.** Estimations of superconducting fluctuation effects in amorphous MoRu and MoRe alloy thin films. *Materials Research Express*. 2018; 5(9): 096406. DOI: 10.1088/2053–1591/aad65c.
- Rogachev A. et al.** Magnetic-field enhancement of superconductivity in ultranarrow wires. *Physical review letters*. 2006; 97(13): 137001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.137001.
- Kokubo N., Aarts J., Kes P. H.** Hall-conductivity sign change and fluctuations in amorphous Nb<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> films. *Physical Review B*. 2001; 64(1): 014507. DOI: 10.1103/PhysRevB.64.014507.
- Samoilov A. V., Yeh N. C., Tsuei C. C.** Electron localization effects on the low-temperature high-field magnetoresistivity of three-dimensional amorphous superconductors. *Physical Review B*. 1998; 57(2): 1206 DOI: 10.1103/PhysRevB.57.1206.
- Dutta S. et al.** Superconductivity in amorphous Re<sub>x</sub>Zr (x≈ 6) thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 877: 160258. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.160258.
- Xu G. Z. et al.** Superconducting microstrip single-photon detector with system detection efficiency over 90% at 1550 nm. *Photonics Research*. 2021; 9(6): 958–967. DOI: 10.1364/PRJ.419514.
- Manova N. N. et al.** Superconducting photon counter for nanophotonics applications. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019; 1410(1): 012147. DOI: 10.1088/1742–6596/1410/1.
- Chang J. et al.** Detecting telecom single photons with 99.5–2.07+ 0.5% system detection efficiency and high time resolution. *APL Photonics*. 2021; 6(3): 036114. DOI: 10.1063/5.0039772.
- Zhang C. et al.** NbN superconducting nanowire single-photon detector with an active area of 300 μm-in-diameter. *AIP Advances*. 2019; 9(7): 075214. DOI: 10.1063/1.5095842.
- Reddy D. V. et al.** Broadband polarization insensitivity and high detection efficiency in high-fill-factor superconducting microwire single-photon detectors. *APL Photonics*. 2022; 7(5): 051302. DOI: 10.1063/5.0088007.
- Yang C. et al.** Large-area TaN superconducting microwire single photon detectors for X-ray detection. *Optics Express*. 2021; 29(14): 21400–21408. DOI: 10.1364/OE.422581.
- Charaev I. et al.** Large-area microwire MoSi single-photon detectors at 1550 nm wavelength. *Applied Physics Letters*. 2020; 116(24): 242603. DOI: 10.1063/5.0005439.
- Verma V. B. et al.** High-efficiency superconducting nanowire single-photon detectors fabricated from MoSi thin-films. *Optics express*. 2015; 23(26): 33792–33801. DOI: 10.1364/OE.23.033792.
- Xiong J. M. et al.** Reducing current crowding in meander superconducting strip single-photon detectors by thickening bends. *Superconductor Science and Technology*. 2022; 35(5): 055015. DOI: 10.1088/1361–6668/ac5fe4.
- Li H. et al.** Improving detection efficiency of superconducting nanowire single-photon detector using multilayer antireflection coating. *AIP advances*. 2018; 8(11): 115022. DOI: 10.1063/1.5034374.
- Baghdadi R. et al.** Enhancing the performance of superconducting nanowire-based detectors with high-filling factor by using variable thickness. *Superconductor Science and Technology*. 2021; 34(3): 035010. DOI: 10.1088/1361–6668/abdbab
- Stepanov I. A. et al.** Superconducting Single-photon detector design optimization. *International Conference on Laser Optics*. – IEEE. 2022; DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840026.
- Koziy A. A. et al.** Modern methods of detecting single photons and their application in quantum communications. *Quantum Electronics*. 2021; 51(8): 655. DOI: 10.1070/QEL17566.
- Manova N. N. et al.** Developing of NbN films for superconducting microstrip single-photon detector. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2020; 1695(1): 012116. DOI: 10.1088/1742–6596/1695/1/012116.
- Yang S. et al.** Large-area Superconducting Micro-wire Single-photon Detectors Prepared by Laser Direct Writing Lithography. *46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. – IEEE. 2021; 1–3. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567473.

## АВТОРЫ

- Желтиков Владимир Александрович, студент 2 курса магистратуры кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана; Москва. ORCID 0000–0001–7099–1039
- Платонов Данил Дмитриевич, студент 4 курса бакалавриата кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана; Москва. ORCID 0000–0003–0246–4290
- Хыдырова Селби, студент 2 курса аспирантуры кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана; Москва. ORCID: 0000–0002–5510–0899
- Моисеев Константин Михайлович, к. т. н., доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана; технический директор ООО «Джиэнтех»; Москва. ORCID 0000–0002–8753–7737
- Васильев Денис Дмитриевич, к. т. н., доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана; ведущий инженер ООО «Джиэнтех»; Москва. ORCID 0000–0003–2147–4216