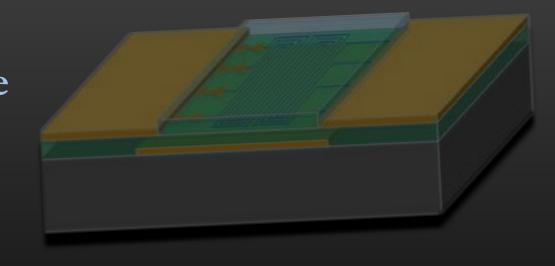
«Многоэлементные сверхпроводниковые однофотонные детекторы ИК диапазона»



«Multi-element superconducting single-photon detectors for IR range»

Мошкова Мария Александровна,

Научный руководитель: **Смирнов Константин Владимирович,** д.ф.-м.н., профессор кафедры МИЭМ департамента электронной инженерии НИУ «ВШЭ»

### Актуальность

- □Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SSPD) к настоящему моменту по своим характеристикам превосходят свои аналоги лавинные фотодиоды и фотоэлектронные умножители. Однако новые возможности использования однофотонных детекторов ограничены их малой активной областью. Возможность определения числа фотонов, содержавшихся в одном оптическом импульсе также позволит значительно расширить направления применения SSPD.
- □Получение высокоэффективного многоэлементного детектора с приближающейся к 100% эффективностью позволит реализовать в нем все преимущества SSPD, сочетающиеся с возможностью различения количества фотонов в оптическом импульсе. Детекторы с разрешением числа фотонов (PNR детекторы) имеют значимые преимущества в квантовой криптографии повышение скорости выработки ключа и защита от атак с разделением фотонов; являются необходимым элементом для Линейно-Оптических Квантовых вычислений (LOQC); способны восстанавливать статистику фотонного источника и пр.
- □Увеличение активной области SSPD до размеров светопроводящего канала многомодовых волокон будет являться существенным развитием таких приемных устройств, открывающим многие перспективные применения для квантовой коммуникации в воздушном и космическом пространстве, в LIDAR технологиях, биомедицине и пр.

| Применение  | SSPD         | PNR SSPD   |
|---|--------------|--|
| Квантовые вычисления                              | $\checkmark$ | √<br>+ Высокая скорость вычислений<br>+ Сокращение числа ошибок                                    |
| Коррелированный счет фотонов                      | $\sqrt{}$    | √<br>+ Высокая скорость счёта<br>+ Сокращение числа ошибок   |
| Квантовая криптография                            | $\checkmark$ | √<br>+ Высокая скорость передачи ключа<br>+ Сокращение числа ошибок<br>+ Повышение качества защиты |
| Анализ дефектов CMOS                              | $\sqrt{}$    | √<br>+ Высокая скорость счёта  |
| Флуоресцентная спектроскопия<br>одиночных молекул | $\sqrt{}$    | √<br>+ Высокая скорость счёта  |
| Восстановление статистики фотонных источников     | X            |  |
| Космическая связь в свободном пространстве        | X            | √<br>(с увеличенной входной апертурой)   |
| LIDAR технологии                                  | X            | √<br>(с увеличенной входной апертурой)   |

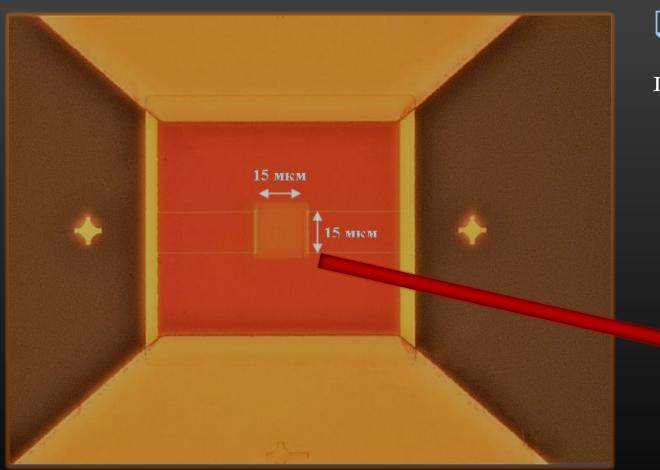
### Цель работы

□Разработка и постановка технологии создания высокоэффективных многоэлементных сверхпроводниковых детекторов, способных к разрешению числа фотонов в коротком импульсе излучения ближнего инфракрасного диапазона и однофотонного приемника с увеличенной входной апертурой, реализация технологии, исследование основных характеристик многоэлементных SSPD и демонстрация возможности их использования.

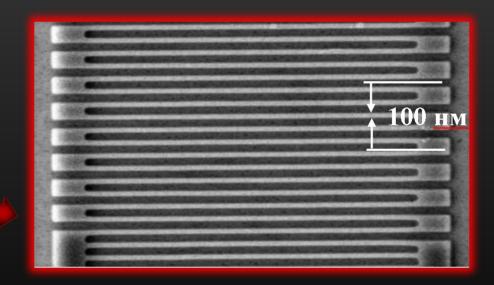
#### Задачи

- □Разработка и реализация новых топологий многоэлементных детекторов и изготовление устройств, способных к разрешению числа фотонов;
- Разработка технологии создания, топологий и изготовление сверхпроводниковых однофотонных детекторов с увеличенной входной апертурой;
- □Проведение экспериментальных исследований параметров взаимодействия одиночных фотонов ИК диапазона с новыми многоэлементными детекторами и детекторами с увеличенной входной апертурой:
  - измерение временной стабильности возникновения сигнала (джиттер),
  - исследование максимальной скорости счета,
  - изучение скорости темновых отсчетов,
  - измерение квантовой эффективности,
  - исследование вероятности каскадного переключения секций (cascade switching);
- □ Анализ полученных результатов; сравнение полученных характеристик многоэлементных детекторов с характеристиками одноэлементных SSPD.

### Введение Сверхпроводниковые однофотонные детекторы



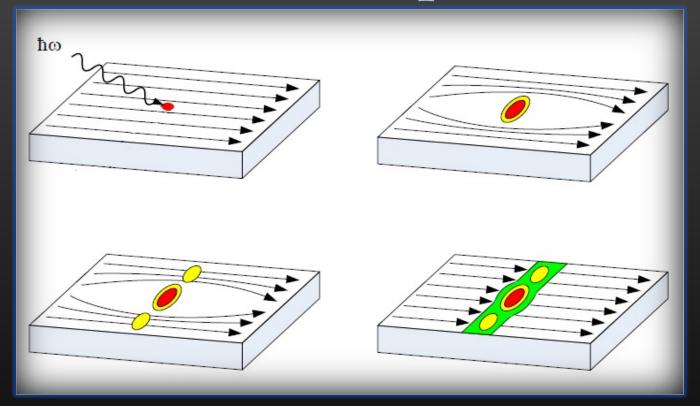
□Полоска из сверхпроводника (NbN) шириной ≈100 нм, толщиной ≈6 нм



Изображение чувствительной области SSPD, полученное с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Изображение SSPD детектора, полученное с использованием оптического микроскопа

# Принцип работы сверхпроводниковых однофотонных детекторов

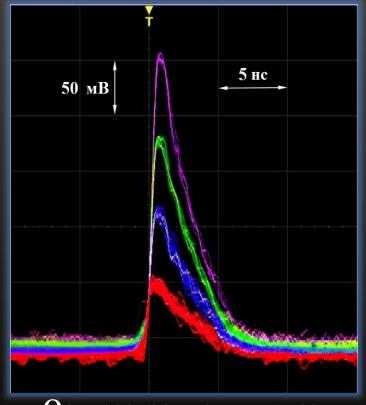


Механизм возникновения резистивной области, перекрывающей сечение сверхпроводниковой полоски при поглощении сверхпроводниковой структурой одиночного фотона

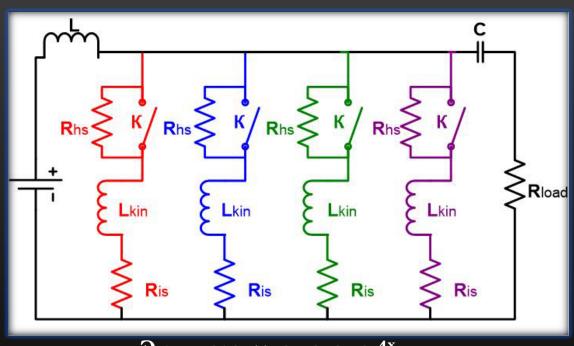
<sup>[1]</sup> A. Semenov, G. Gol'tsman, A. Korneev Quantum detection by current carrying superconducting film // Physica C. – 2001. – V. 351. – P. 349-356.

### 1. Многоэлементный сверхпроводниковый однофотонный детектор

Принцип действия детекторов с разрешением числа фотонов:



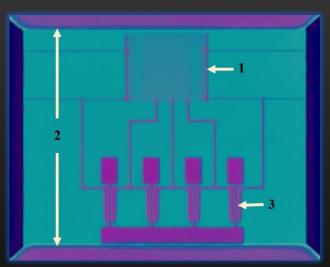
Осциллограмма импульса напряжения 4<sup>х</sup> секционного PNR детектора



Эквивалентная схема 4<sup>x</sup> секционного PNR детектора [1]

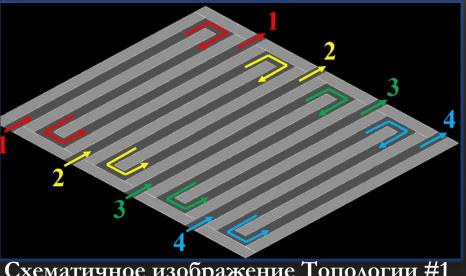
<sup>[1]</sup> Divochiy, A. et al. Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths, *Nature Photonics*, 2(5), 302, 2008

### Топология детекторов с разрешением числа фотонов



Общий вид PNR SSPD:

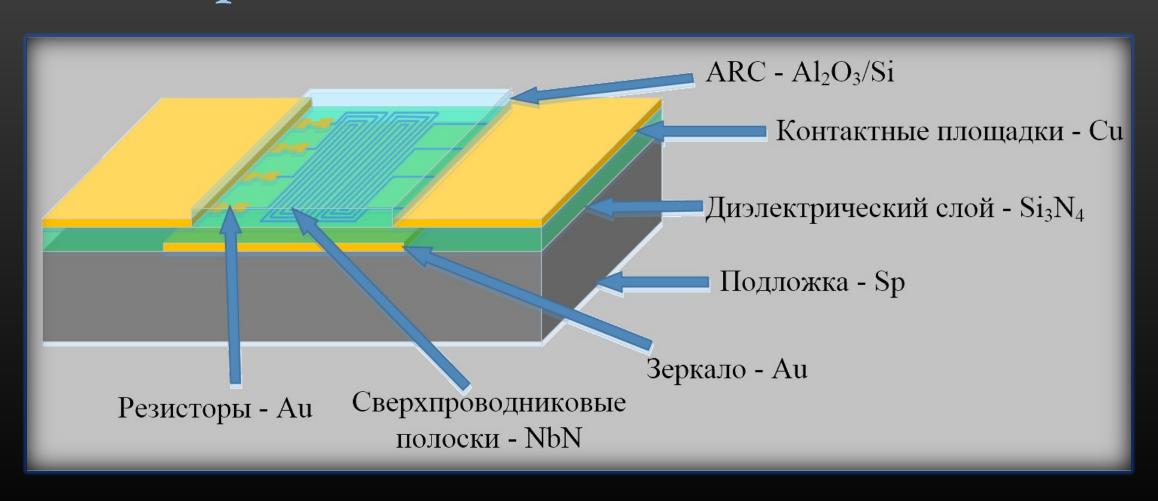
- 1. Чувствительная область PNR детектора;
- 2. Контактные площадки;
- 3. Резисторы.



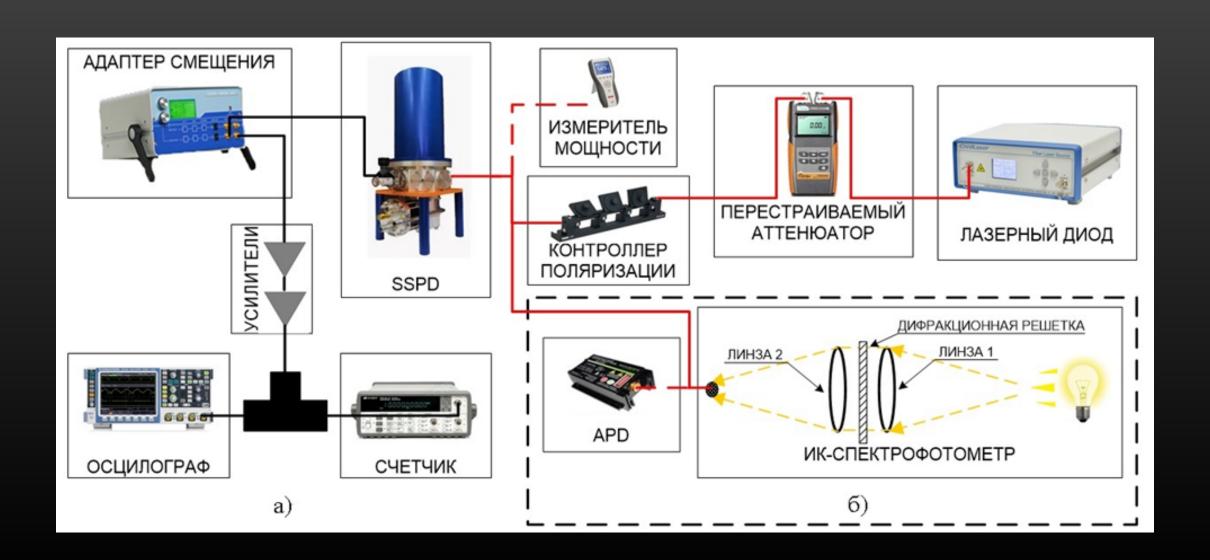
Схематичное изображение Топологии #1



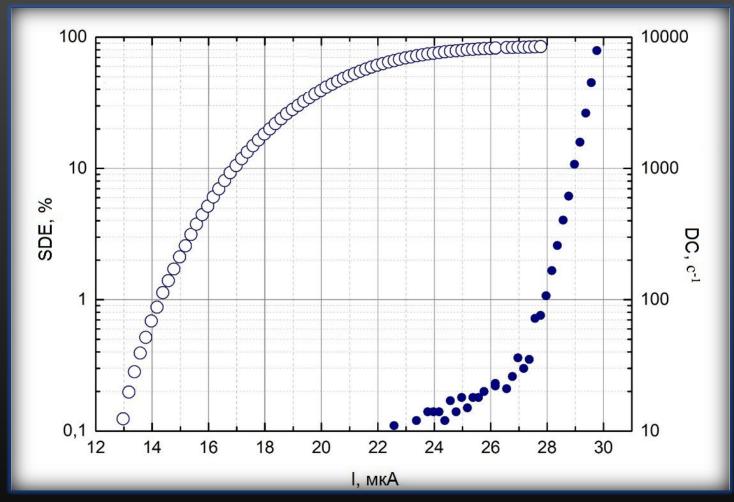
### Структура детекторов с разрешением числа фотонов



### Определения квантовой эффективности



### Системная квантовая эффективность



Зависимость SDE и темновых отсчетов от тока смещения для образца площадью 15х15 мкм<sup>2</sup> с топологией #2

# Демонстрация практической работы многоэлементного сверхпроводникового однофотонного детектора

$$M_{\mathfrak{I}}(n) = \sum_{i=n}^{k,k\geq n} N_{\mathfrak{I}}(i) \Big|_{, \text{ fac}}$$

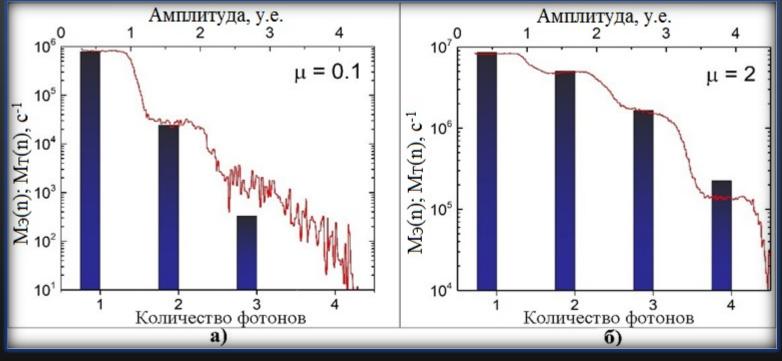
 $N_{\mathfrak{P}}(i)$  - количество одновременных срабатываний п секций детектора, k – количество секций в детекторе (4)

$$N_{\mathrm{T}}(n) = f \cdot \sum_{n \geq m} [p_0(\mu, m) \cdot P(m, n)]$$
, fae

f- частота повторения оптических импульсов,  $\mu$ - среднее число фотонов в импульсе,

m – количество фотонов в импульсе (m=0,1,2,...)

$$p_0(\mu,m)=rac{\mu^m\cdot e^{-\mu}}{m!}$$
 - статистика Пуассона

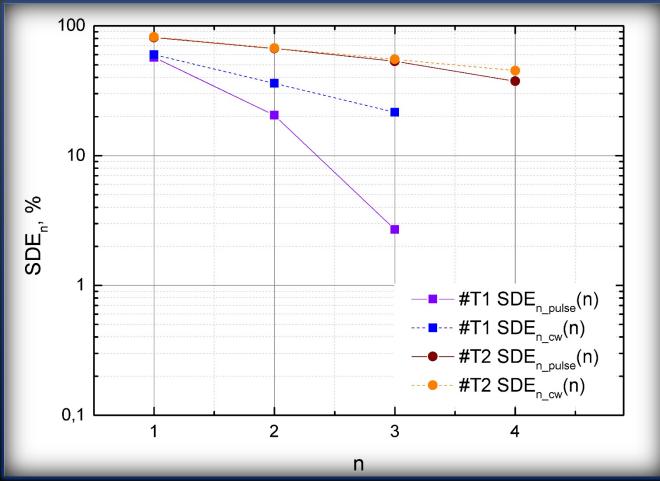


Зависимости отсчетов от уровня триггера для образца #T1:  $M_9(n)$  (сплошная кривая),  $M_T(n)$  (бары) для  $\mu$  = 0.1 и  $\mu$ = 2.

P(m,n)- вероятность одновременного срабатывания п секций детектора при падении на детектор m фотонов, которую можно определить как:

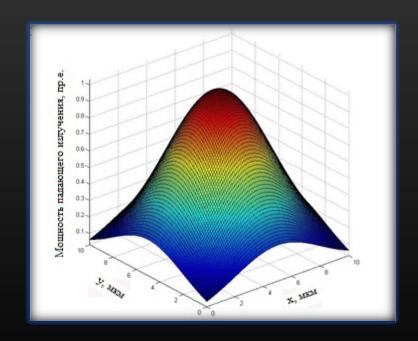
$$P(m,n) = \sum_{m_1, m_2, \dots, m_k} \frac{m!}{\left(\prod_{i=1}^k m_i!\right) \cdot \left(m - \sum_{i=1}^k m_i\right)!} \cdot \left(\prod_{i=1}^k \eta^{m_i}\right) \cdot (1 - k \cdot \eta)^{m_{k+1}}$$

# Эффективность многофотонного срабатывания



Зависимость SDEn\_cw(n) и SDEn\_pulse(n) для топологий Т1 и Т2

$$SDE_{n\_cw} = SDE_{1\_cw}^n$$



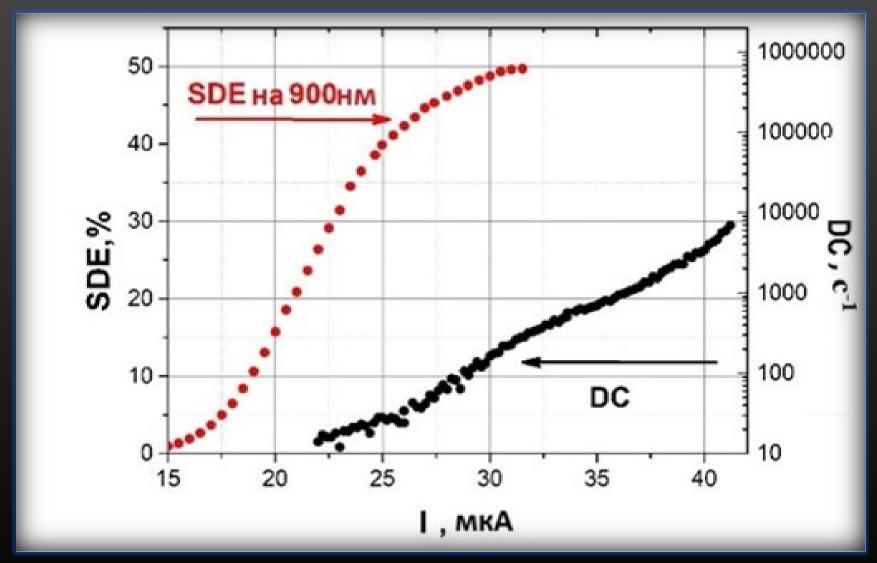
Пространственное распределение излучения (распределение Гаусса) в одномодовом волокне

# 2. Детекторы с увеличенной входной апертурой

Проблемы при создании детекторов большой площади:

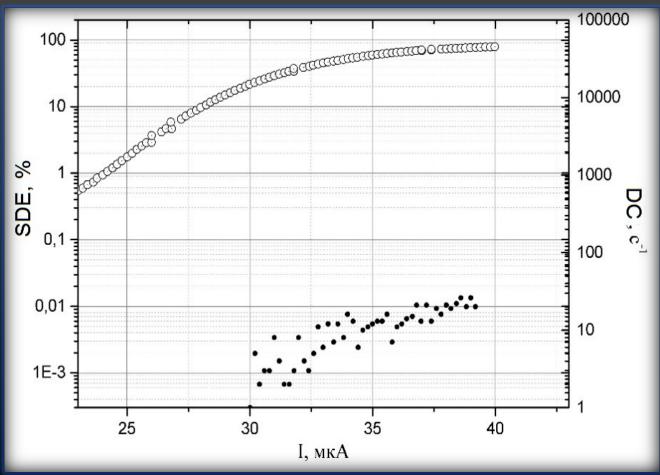
- При увеличении длины сверхпроводящей полоски, пропорционально увеличивается кинетическая индуктивность детекторов (L<sub>k</sub>), что определяет:
  - рост времени восстановления сверхпроводимости (мертвого времени) и следовательно, резко ограничивает максимальную скорость счета детектора,
  - значительное ухудшение временного разрешения (джиттера) детектора;
- □Значительный рост фонового излучения поступающего на приемник и, следовательно, уровня ложных срабатываний детектора;
- При увеличении длины сверхпроводниковой полоски растет вероятность ее локального нарушения, что ограничивает эффективность детектора.

### Системная квантовая эффективность

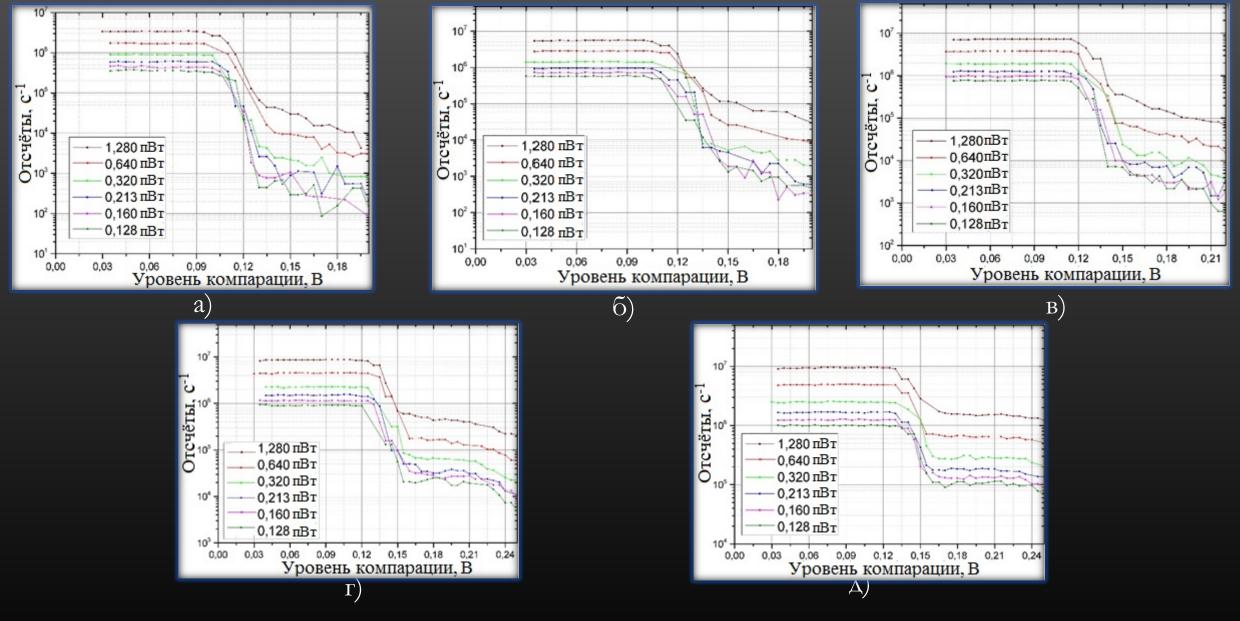


Зависимости SDE и DCR от тока смещения PNR детектора площадью 40x40 мкм², сопряженного с многомодовым волокном

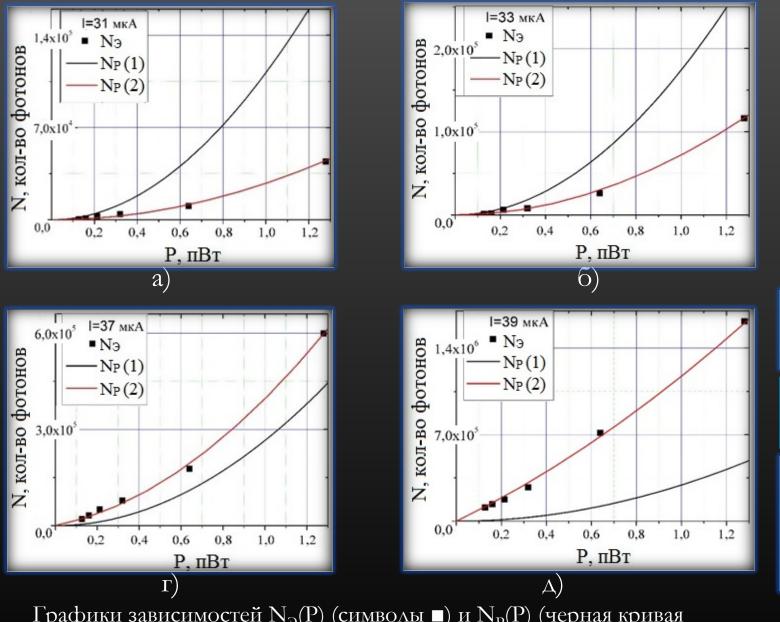
# 3. Исследование каскадного переключения



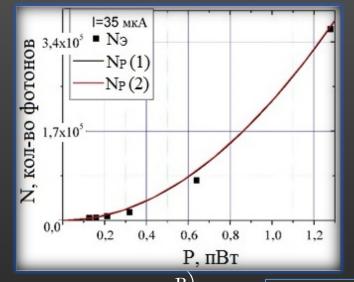
Зависимости SDE и DCR от тока смещения PNR детектора площадью 15х15 мкм<sup>2</sup>



Графики зависимостей отсчетов PNR SSPD при разных мощностях излучения и разном токе смещения детектора  $I_b$  от уровня компарации счетчика: а)  $I_b$ =31 мкA; б)  $I_b$ =33 мкA; в)  $I_b$ =35 мкA; г)  $I_b$ =37 мкA; д)  $I_b$ =39 мкA.



Графики зависимостей  $N_{\ni}(P)$  (символы ■) и  $N_{p}(P)$  (черная кривая – (5), красная кривая – (6)) при токе смещения детектора: а)  $I_{b}$ =31 мкA; б)  $I_{b}$ =33 мкA; в)  $I_{b}$ =35 мкA; г)  $I_{b}$ =37 мкA; д)  $I_{b}$ =39 мкA.



$$N_{P}(1) = \frac{3}{4}SDE \frac{1 - e^{-\frac{\tau_{d}}{\tau}}}{\tau}$$

$$N_{\Phi} = \frac{P_{\Pi}}{\tau} = \frac{1 - e^{-\frac{\tau_d}{\tau}}}{\tau}$$

$$\tau = \frac{hc/\lambda}{P}$$

$$P_{\Pi} = 1 - e^{-\frac{\tau_d}{\tau}}$$

$$SDE_{\rm c} = \frac{SQE}{4}$$

$$N_{\rm P}(2) = 3SDE_{\rm c} \frac{1 - e^{-\frac{\tau d}{\tau}}}{\tau} + N_{\rm KH} =$$

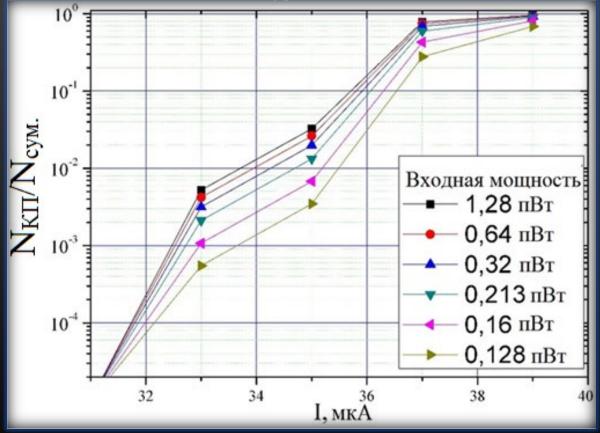
$$= SDE_{\rm c} \frac{\lambda}{hc} \left(1 - e^{-\frac{P\tau_d}{hc/\lambda}}\right) P + AP$$

т - среднее время между приходом двух последовательных фотонов,

 ${f P}_{\Pi}$  – вероятность возникновения хотя бы одного фотона в течение времени  ${f au}_d$ ,

 $N_{\Phi}$  – количество фотонов, попавших на детектор за время  $\tau_{d}$ 

Вероятность возникновения каскадного переключения для сверхпроводникового однофотонного детектора



Зависимости  $N_{\text{КП}}/N_{\text{сум.}}$  от тока смещения детектора при различной мощности

### Характеристики многоэлементных детекторов

| Характеристика                   | PNR 15х15 мкм² (одномодовое волокно) | PNR 40х40 мкм² (многомодовое волокно) |
|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Квантовая эффективность (SDE)    | 86%                                  | 47%                                   |
| Скорость темновых отсчетов (DCR) | -35 с <sup>-1</sup>                  | ~100 c <sup>-1</sup>                  |
| Мертвое время                    | <2 нс                                | <30 нс                                |
| Джиттер                          | 90,7 пс                              | 130 пс                                |
| Ложные срабатывания              | <0,1%                                | <2%                                   |

#### Заключение

- □Разработан и создан высокоэффективный PNR SSPD, сопряженный с одномодовым волокном, обладающий квантовой эффективностью 86% и способный различать до 4<sup>ех</sup> фотонов в коротком импульсе излучения.
- Определена и реализована технология создания высокоэффективных SSPD детекторов, сопряженных с многомодовым волокном. Лучшее значение квантовой эффективности составило 47%.
- □Проведены исследования основных характеристик PNR SSPD, а именно: скорости темновых отсчетов, джиттера, мертвого времени, каскадного переключения.

#### Положения, выносимые на защиту

- Многоэлементный сверхпроводниковый однофотонный детектор, созданный на основе пленки NbN способен различать количество фотонов (до 4) в импульсе излучения ближнего инфракрасного диапазона длительностью менее мертвого времени детектора и обладает следующими характеристиками приведенными к входу излучения стандартному одномодовому волокну: системная квантовая эффективность на длине волны 1550 нм ~86%; скорость темновых отсчетов 35 с<sup>-1</sup>, мертвое время 30 нс, джиттер 90,7 пс, вероятность каскадного переключения 0,1 %.
- Для создания высокоэффективного многоэлементного сверхпроводникового однофотонного детектора с волоконным вводом излучения путем создания параллельно соединенных сверхпроводниковых полосок, каждая из которых является отдельной секцией детектора, необходимо реализовать равномерное распределение каждой секции детектора по всей его чувствительной области.
- Вероятность каскадного переключения сверхпроводниковых NbN однофотонных детекторов, способных различать количество фотонов в импульсе излучения ближнего инфракрасного диапазона определяется током смещения детектора и мощностью детектируемого излучения. Вероятность каскадного переключения детектора растет с увеличением мощности детектируемого излучения и при приближении тока смещения детектора к критическому току нарушения сверхпроводимости (I<sub>c</sub>).
- □ Топологию многоэлементных сверхпроводниковых однофотонных детекторов, способных различать количество фотонов в импульсе излучения ближнего инфракрасного диапазона возможно использовать для создания высокоэффективных сверхпроводниковых однофотонных детекторов с увеличенной входной апертурой.
- Характеристики NbN однофотонного детектора с увеличенной входной апертурой, сопряженного со стандартным многомодовым волокном (диаметром светопроводящей сердцевины 50 мкм) и приведенные ко входу волокна составили: системная квантовая эффективность на длине волны 1550 нм ~47%; скорость темновых отсчетов 100 с<sup>-1</sup>, мертвое время 2 нс, джиттер 130 пс, вероятность каскадного переключения <2 %.

#### Личный вклад

- □Разработка новых топологий, разработка и реализация технологии изготовления многоэлементных SSPD, способных к разрешению фотонов и детекторов с увеличенной входной апертурой;
- □Проведение измерений и исследование характеристик, созданных многоэлементных SSPD;
- □Обработка и проведение анализа полученных экспериментальных данных;
- Подготовка публикаций по результатам исследований.

#### Методология исследования:

- Метод прецизионного магнетронного осаждения ультратонких (до 3.5 нм) пленок NbN, основанный на реактивном распылении Nb мишени в атмосфере газов Ar и N₂ при нагреве подложек до температур 800°С и контроле степени разупорядоченности получаемых пленок.
   Методы современной тонкопленочной нанотехнологии, включающие фото- и электронную литографии,
- Методы современной тонкопленочной нанотехнологии, включающие фото- и электронную литографии, электронно-лучевое и термическое испарения материалов, плазмохимическое и химическое травления. Использованные технологические подходы позволили изготовить структуры с характерными планарными размерами в десятки нанометров.
- □ Современные методы достижения низких температур, основанные на использовании жидкого гелия (и откачку его паров) и криогенных машин гелиевого уровня, обеспечивающих температуры исследования вплоть до 1.6 К.
- Методы эффективного оптического согласования сверхпроводниковых наноструктур однофотонных детекторов с излучением ближнего инфракрасного диапазона с длинами волн в диапазоне 700-1600 нм (создание антиотражающих и просветляющих покрытий и резонаторов, прецизионное совмещение структур с одномодовыми и многомодовыми оптическими волокнами).
- Методы исследования основных характеристик однофотонных детекторов ближнего инфракрасного диапазона квантовой эффективности, уровня темновых отсчетов, временного разрешения, мертвого времени.
- Методы, в том числе, разработанные в рамках диссертационного исследования по изучению однофотонных детекторов, способных различать количество фотонов в импульсе излучения ближнего инфракрасного диапазона длительностью менее мертвого времени детектора, и связанные с измерением вероятности каскадного переключения отдельных секций такого детектора, измерением вероятности срабатывания детектора при одновременном поглощении нескольких фотонов.

### Конференции

□ Участие в конференции «SPIE Optics + Optoelectronics Digital Forum» с публикацией доклада «High-efficiency multielement superconducting single-photon detector» 19-23 апреля 2021 год 🗖 Участие в ежегодной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В.Арменского с докладом "Изучение каскадного переключения сверхпроводниковых однофотонных детекторов с разрешением числа фотонов», 10-17 марта 2021 (Москва) □ Участие в XXIV Международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» с публикацией доклада «Влияние каскадного переключения на работу сверхпроводниковых однофотонных детекторов с разрешением числа фотонов», 10-13 марта 2020 год (Нижний Новгород) □ Участие в ежегодной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В.Арменского с докладом "Сверхпроводниковые детекторы с увеличенной активной областью", 25 февраля – 3 марта 2020 (Москва) □ Участие в 6-ой международной школе-конференции "Saint-Petersburg OPEN 2019" по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям с постерным докладом «Large active area superconducting single photon detector», 22-25 апреля 2019 (Санкт-Петербург) □ Участие в ежегодной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В.Арменского с докладом «Оценка статистики распределения фотонов с использованием многоэлементного сверхпроводникового однофотонного детектора», 18-28 февраля 2019 (Москва) □ Участие в VIII Международной конференция по фотонике и информационной оптике с постерным докладом «Восстановление статистики распределения фотонов с использованием PNR SSPD детектора», 23-25 января 2019 (Москва) □ Участие в XXII Международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» с постерным докладом «High-efficiency NbN single-photon detectors with photon number resolution functionalit», 12-15 марта 2018 (Нижний Новгород) □ Участие в VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике «Высокоэффективные NBN однофотонные детекторы с разрешением числа фотонов», 24-26 января 2018 (Москва)

### Публикации

Superconductivity. 2017. Vol. 27. No. 4 (Q3/Q2) doi

□ Публикация в журнале, входящем в международную систему цитирования (Web of Science/Scopus): M. A. Moshkova, P. V. Morozov, A. V. Antipov, Yu. B. Vakhtomin, K. V. Smirnov High-efficiency multi-element superconducting single-photon detector // Quantum Optics and Photon Counting 2021, Proc. SPIE 11771, 1177107 doi □ Публикация в журнале, входящем в международную систему цитирования (Web of Science/Scopus): Sidorova M., Semenov A., Hübers H., Ilin K., Siegel M., Charaev I., Moshkova M., Kaurova N., Goltsman G., Zhang X., Schilling A. Electron energy relaxation in disordered superconducting NbN films // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. 2020. Vol. 102 (Q2/Q1) doi □ Публикация в журнале, входящем в международную систему цитирования (Web of Science/Scopus): Smirnov K., Moshkova M., Antipov A., Morozov P., Vakhtomin Y. The Cascade Switching of the Photon Number Resolving Superconducting Single-Photon Detectors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2020. Vol. 31. No. 2. P. 1-4, (Q3/Q2) doi□ Публикация статьи в журнале, входящем в международную систему цитирования (Web of Science/Scopus): Moshkova M., Divochiy A., Morozov P., Vakhtomin Y., Antipov A., Zolotov P., Seleznev V., Ahmetov M., Smirnov K. High-performance superconducting photon-number-resolving detectors with 86% system efficiency at telecom range // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. 2019. Vol. 36. No. 3. P. B20-B25 (Q2) doi □ Публикация статьи в журнале, входящем в международную систему цитирования (Scopus): Moshkova M., Morozov P., Divochiy A., Vakhtomin Y., Smirnov K. Large active area superconducting single photon detector // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1410. No. 1. P. 012139 (Q4) doi □ Публикация статьи в журнале, входящем в международную систему цитирования (Web of Science/Scopus): Zolotov P., Divochiy A., Vakhtomin Y., Moshkova M., Morozov P., Seleznev V., Smirnov K. Photon-number-resolving SSPDs with system detection efficiency over 50% at telecom range // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1936. No. 1. P. 020019-1-020019-6 doi □ Публикация статьи в журнале, входящем в международную систему цитирования (Web of Science/Scopus): Korneeva Y., Florya I., Vdovichev S., Moshkova M., Simonov N., Kaurova N., Korneev A., Goltsman G. Comparison of Hot Spot Formation in NbN and MoN Thin Superconducting Films After Photon Absorption // IEEE Transactions on Applied

### Спасибо за внимание

### Таблица сравнения детекторов различающих число фотонов на длине волны 1550 нм

| Детектор | Т, К | SDE, % | DCR, c <sup>-1</sup> | Мертвое<br>время, нс | Джиттер, пс | Ссылки |
|----------|------|--------|----------------------|----------------------|-------------|--------|
| 4-PNR    | 2    | 86     | 35                   | 2                    | 90          | [1]    |
| TES      | 0.1  | 95     | 500                  | 200                  | 25000       | [2-4]  |
| PMT      | 200  | 2      | 5000                 | 100                  | 367         | [5]    |
| SPAD     | 173  | 25     | 100                  | 200                  | 55          | [6-8]  |

[1] M. Moshkova, A. Divochiy, P. Morozov, Yu. Vakhtomin, A. Antipov, P. Zolotov, V. Seleznev, M. Ahmetov and K. Smirnov, "High-performance superconducting photon-number-resolving detectors with 86% system efficiency at telecom range," JOSA B, 36(3), B20-B25 (2019)

- [2] A.J. Miller, S.W. Nam, J.M. Martinis and A. Sergienko, "Demonstration of a low-noise near-infrared photon counter with multiphoton discrimination," Appl. Phys. Lett. 83(4), 791-793 (2003)
- [3] A. E. Lita, A. J. Miller, and S. W. Nam, "Counting near-infrared single-photons with 95% efficiency," Opt. Express 16(5), 3032-3040 (2008)
- [4] R. Hadfield and G. Johansson, "Superconducting Devices in Quantum Optics," Springer, 43 (2016)
- [5] Thermoelectric cooled NIR-PMT Hamamatsu #H12397-75
- [6] B. E. Kardynal, Z. L. Yuan and A. J. Shields, "An avalanche-photodiode-based photon-number-resolving detector," Nature Photonics 2, 425–428 (2008)
- [7] M. J. Fitch et al., "Photon-number resolution using time-multiplexed single-photon detectors," Phys. Rev. A 68, 043814 (2003)
- [8] A.R. Dixon, Z.L. Yuan, J.F. Dynes, A.W. Sharpe and A.J. Shields, "Gigahertz decoy quantum key distribution with 1 Mbit/s secure key rate," Opt. Express 16, 18790–18797 (2008)

### Предельные характеристики SSPD

- Квантовая эффективность: 94 % [1]
- Джиттер: **17,8 пс** [2]
- Темновые отсчеты: 0.1 Гц [3]
- Спектральный диапазон: 0,5 ÷ 2.5 мкм [4]
- Мертвое время: 4-5 нс [5]
- [1] Smirnov K., Divochiy A., Vakhtomin Y., Morozov P., Zolotov P., Antipov A., Seleznev V. NbN single-photon detectors with saturated dependence of quantum efficiency // Superconductor Science and Technology. 2018. Vol. 31. No. 3. P. 1-7
- [2] Shcheslavskiy V., Morozov P., Divochiy A., Vakhtomin Y., Smirnov K., Becker W. <u>Ultrafast time measurements by time-correlated single photon counting coupled with superconducting single photon detector</u> // Review of Scientific Instruments. 2016. Vol. 87. No. 5. P. 053117-1-053117-5.
- [3] Smirnov K., Vachtomin Y., Divochiy A., Antipov A. Dependence of dark count rates in superconducting single photon detectors on the filtering effect of standard single mode optical fibers // Applied Physics Express. 2015. Vol. 8. No. 2
- [4] Vorobyov V., Kazakov A., Soshenko V., Korneev A., Shalaginov M., Bolshedvorskii S., Sorokin V., Divochiy A., Vakhtomin Y., Smirnov K., Voronov B., Shalaev V., Akimov A., Goltsman G. Superconducting detector for visible and near-infrared quantum emitters [Invited] // Optical Materials Express. 2017. Vol. 7. No. 2. P. 513-526.
- [5] Sidorova M., Divochiy A., Vakhomin Y., Smirnov K. <u>Ultrafast superconducting single-photon detector with a reduced active area coupled to a tapered lensed single-mode fiber</u> // Journal of Nanophotonics. 2015. Vol. 9. P. 093051-1-093051-7.

### Исследование каскадного переключения

Таблица параметров SDE<sub>C</sub> и A

| Ток                     | 31 мкА | 33 мкА | 35 мкА | 37 мкА              | 39 мкА              |
|-------------------------|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| смещения                |        |        |        |                     |                     |
| $SDE_C$                 | 0.018  | 0.047  | 0.147  | 0.173               | 0.207               |
| 3·SDE <sub>С</sub> (или | 0.054  | 0.141  | 0.441  | 0.519               | 0.621               |
| вероятност              |        |        |        |                     |                     |
| ь                       |        |        |        |                     |                     |
| детектиров              |        |        |        |                     |                     |
| ания 2-го               |        |        |        |                     |                     |
| фотона)                 |        |        |        |                     |                     |
| А, 1/пВт                | 0      | 50     | 1000   | 1.3·10 <sup>5</sup> | 8.8·10 <sup>5</sup> |

$$SDE_{\rm C} = \frac{1}{4} \cdot SDE = \frac{1}{4} \cdot 0.6 = 0.15$$