

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

На правах рукописи

Золотов Филипп Игоревич

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ОДНОФОТОННЫЙ
ДЕТЕКТОР СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА НА
ОСНОВЕ ПЛЕНОК НИТРИДА НИОБИЯ**

Резюме

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
профессор, д. ф.-м. н.
Гольцман Григорий Наумович

Москва — 2022

Актуальность темы

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SSPD¹) — современный класс однофотонных детекторов, работающий в видимом и ИК диапазонах и достигающий превосходных характеристик: $>90\%$ системной квантовой эффективности и частоты ложных срабатываний $<100\text{ с}^{-1}$ одновременно с временным разрешением порядка 30 пс и скоростью счета около 50 МГц [1]. Эти характеристики являются ключевыми для успешного внедрения этих устройств во множестве практических применений в области квантовых технологий [2]. Первая демонстрация работы SSPD состоялась в 2001 в Московском педагогическом государственном университете (МПГУ) [3]. Продемонстрированные еще тогда возможности этих устройств сделали их сильным кандидатом на замену привычным детекторам фотонов. Учитывая спектральные ограничения лавинных фотодиодов, а также низкое быстродействие фотоумножителей, сверхпроводниковые однофотонные детекторы являются единственной универсальной альтернативой, одновременно соответствующей всем возможным требованиям к детекторам одиночных фотонов на телекоммуникационных длинах волн [4]. Более того, в работах [5; 6] было показано, что частота их ложных срабатываний может снижаться до показателей $<0.1\text{ Гц}$, а фоточувствительность может наблюдаться и в среднем ИК-диапазоне, хоть и при квантовой эффективности детектирования одиночных фотонов порядка 1 % [7–10].

Перечисленные преимущества SSPD привлекли к себе внимание в контексте реализации каналов оптической связи — как волоконной, так и в открытом пространстве. Например, в работе [11] была показана возможность передачи квантового ключа в криптографической системе со сверхпроводниковым однофотонным детектором. А в работе [12] было дано подробное описание системы связи Земля-Луна с использованием массива SSPD детекторов, обеспечивших скорость передачи данных до 622 Мбит/с. Среди иных значимых практических применений SSPD можно выделить проект PICA (Picosecond Imaging Circuit Analysis), который в 2004 продемонстрировал возможность создания системы тестирования полупроводниковых микросхем на предмет их дефектов [13; 14]. Также в работе [15] была показана система SSPD LIDAR (Laser Imaging,

¹От англ. *superconducting single-photon detectors*. Также в литературе встречаются и расширенные аббревиатуры, например SNSPD (*superconducting nanowire single-photon detector*), SMSPD (*superconducting microwire single photon-detector*), WSSPD (*waveguide superconducting single-photon detector*) и др., учитывающие модификацию детектора — детектор на основе нано-, микрополоски, интегрированный в волновод и т.д.

Detection, And Ranging), работающая на длине волны 2.3 мкм и потенциально имеющая разрешение по глубине порядка 1 мм [16].

Чувствительным элементом в SSPD является сверхпроводящая пленка толщиной около 4 – 10 нм, структурированная в длинную полосу, которая формирует сенсель детектора. Прототипы матриц на основе SSPD с сотнями элементов были представлены в работах [17; 18], демонстрирующих два разных подхода к реализации таких устройств на основе двух различных материалов сверхпроводящих пленок. Важно заметить, что при всем многообразии материалов, в которых было продемонстрировано наличие сверхпроводящего состояния [19], сравнительно небольшое число подходит по своим параметрам для изготовления SSPD. Важнейшую роль в сверхпроводящих пленках, применяемых для изготовления сверхпроводниковых однофотонных детекторов, играют явления разогрева, диффузии и релаксации электронов, а также их характерные времена [20]. В настоящее время основными категориями сверхпроводящих пленок, используемых для создания сверхпроводниковых однофотонных детекторов являются *грязные* и *разупорядоченные* материалы. В этих категориях можно выделить две основные группы: поликристаллические пленки нитридов переходных металлов (NbN, NbTiN, TiN, TaN, VN) и аморфные пленки на основе соединений с кремнием (WSi, MoSi). Помимо структуры, другой важной отличительной особенностью всех перечисленных материалов является температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c . У силицида вольфрама и нитрида ниобия, двух наиболее востребованных для изготовления SSPD материалов, критическая температура отличается примерно в три раза. При этом, в работе [21] было показано, что механизм возникновения фотоотклика у WSi и NbN SSPD одинаков с точки зрения возникающих явлений и их последовательности, но имеет различные характерные времена и масштабы, влияющие на быстродействие и эффективность устройств.

Критическая температура пленок может заметно влиять на функциональность детекторов. SSPD на основе WSi требуют охлаждения до рабочих температур 300 – 700 мК, в то время как NbN SSPD работают при температурах 0.9 – 2.5 К, обеспечиваемых компактными рефрижераторами замкнутого цикла, что упрощает внедрение последних в экспериментальные схемы и готовые решения. Однако, низкое значение T_c может играть на руку при разработке устройств для среднего ИК-диапазона — малые энергии фотонов будут производить более вероятное нарушение сверхпроводящего состояния в системе с

меньшим значением щели $\Delta = 1.76k_B T_c$. Тем самым, с одной стороны, материалы с низкой величиной щели упрощают продвижение устройств вглубь ИК-диапазона, а с другой — усложняют и удорожают применение таких систем на практике. Однако, решающим фактором для большинства практических применений помимо квантовой эффективности является быстродействие. В силу времени термализации электронов в пленках WSi, а также низким рабочим током детекторов на их основе, WSi SSPD не обладают ни высоким временным разрешением, ни высокой скоростью счета при том факте, что их чувствительность в среднем ИК-диапазоне достаточно высока [22]. Именно данный факт обуславливает безоговорочное преимущество пленок нитрида ниобия в качестве основы для изготовления практических быстрых и эффективных однофотонных детекторов.

Продвижение однофотонных детекторов в длинноволновую область ИК-диапазона сегодня является важной научной задачей, решение которой может дать существенный прогресс в создании и совершенствовании коммуникационных систем в открытом пространстве, технологии LIDAR, а также методик медицинской визуализации [23—25]. В случае SSPD, расширение рабочего диапазона является одним из основных направлений развития данной технологии, поскольку проблема резкого падения квантовой эффективности в среднем ИК-диапазоне остается нерешенной. При уменьшении энергии фотонов вероятность срабатывания сверхпроводникового однофотонного детектора заметно снижается вплоть до отметок в единицы процентов и ниже [8; 9]. При этом, решение данной проблемы не должно существенным образом затрагивать быстродействие сверхпроводниковых однофотонных детекторов, представляющее большую практическую значимость [16; 26]. Потому необходимо исследовать возможность использования сверхпроводящих пленок нитрида ниобия, демонстрирующих превосходство перед аморфными пленками силицида вольфрама с точки зрения быстродействия, в качестве материала для изготовления SSPD с увеличенной квантовой эффективностью детектирования на длинах волн среднего ИК-диапазона [2; 21]. Увеличение квантовой эффективности SSPD, согласно модели, представленной в работах [27—30], определяется особенностями используемого в детекторе материала сверхпроводящей пленки, такими как поверхностное сопротивление в нормальном состоянии (R_s), критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние (T_c), коэффициент диффузии квазичастиц (D). Экспериментальное исследование влияния перечисленных

характеристик на квантовую эффективность возможно путем подстройки параметров процесса получения пленок и предварительно было изучено для NbN SSPD в работах [31; 32]. Недостатком указанных исследований являлся узкий диапазон варьирования параметров процесса и свойств пленок (в частности поверхностного сопротивления), что вероятно повлияло на низкие величины квантовой эффективности в приводимых результатах.

Помимо изменения параметров уже применяемых в области SSPD материалов сверхпроводниковых пленок, актуален также и поиск новых материалов. Одним из таких материалов может являться нитрид ванадия, имеющий схожую с нитридом ниобия поликристаллическую структуру и сравнительно высокое по сравнению с силицидом вольфрама значение критической температуры, достигающее 9.1 К [33; 34]. Схожий коэффициент диффузии материала при более низком значении щели указывает на возможное преимущество нитрида ванадия перед нитридом ниобия [35]. Эта гипотеза требует экспериментального исследования и сравнения выходных характеристик NbN и VN SSPD.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что хотя сверхпроводниковые однофотонные детекторы и обладают потенциалом для расширения диапазона работы в область среднего-ИК, в настоящее время это возможно только за счет потери либо их квантовой эффективности, либо быстродействия. Поэтому **целью** данной работы является исследование возможности разработки детекторов одиночных фотонов, одновременно демонстрирующих высокую скорость счета, временное разрешение и квантовую эффективность на длинах волн от видимого и до среднего ИК-диапазона (0.7 – 3 мкм). Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать взаимосвязь между квантовой эффективностью SSPD и степенью разупорядоченности исходных сверхпроводниковых пленок NbN.
2. Изучить процесс реактивного магнетронного распыления с целью выявления взаимосвязи между основными параметрами процесса нанесения пленок NbN (времени нанесения, температуры подложки, рабочего давления, концентрации азота в газовой смеси, тока магнетрона), характеристиками получаемых сверхтонких пленок (R_s, T_c) и характеристиками SSPD (квантовой эффективностью, скоростью счета, джиттером).

3. Исследовать причины, влияющие на воспроизводимость процесса получения сверхтонких пленок NbN методом реактивного магнетронного распыления.
4. В диапазоне длин волн 1.3 – 3 мкм исследовать токовые зависимости спектральной квантовой эффективности сверхпроводниковых однофотонных детекторов, изготовленных из пленок нитрида ниобия с различным поверхностным сопротивлением.
5. Получить сверхпроводниковые пленки нитрида ниобия, позволяющие изготавливать SSPD с высокими значениями квантовой эффективности $\geq 80\%$ на длине волны 1.3 мкм и $\geq 50\%$ на длинах волн 2 – 3 мкм при температуре 2.2 К.
6. Исследовать возможность применения отработанного процесса нанесения для получения пленок нитрида ванадия (VN) с целью их применения в сверхпроводниковых однофотонных детекторах.
7. Изучить квантовую эффективность детекторов, изготовленных из получаемых пленок VN и NbN, имеющих различные значения поверхностного сопротивления и критической температуры.

Научная новизна полученных результатов:

1. Разработана методика увеличения квантовой эффективности сверхпроводникового однофотонного детектора, которая отличается от известных применением разупорядоченных пленок нитрида ниобия и позволяющая одновременно сохранять высокое быстродействие устройств.
2. Впервые получен однофотонный детектор, демонстрирующий высокую величину квантовой эффективности детектирования в среднем ИК-диапазоне в 41 % и одновременно обладающий высоким быстродействием, обусловленным низким мертвым временем в 20 нс и временным разрешением в 59 пс.
3. Впервые продемонстрирована статистика, включающая более чем 800 нанесенных пленок нитрида ниобия и 120 пленок нитрида ванадия, демонстрирующая взаимосвязь их поверхностного сопротивления в нормальном состоянии и критической температуры перехода в сверхпроводящее состояние в широком диапазоне их значений (0.02– 6.1 кОм/квadrat и 14 – 1.7 К соответственно).

4. Впервые получены разупорядоченные пленки нитрида ниобия, сохраняющие высокую критическую температуру в 7.8 К при поверхностном сопротивлении в нормальном состоянии равном 1.2 кОм/квадрат.
5. Исследованы зависимости квантовой эффективности от тока смещения VN и NbN SSPD, изготовленных из пленок с различными значениями поверхностного сопротивления. Получено систематическое улучшение квантовой эффективности детекторов при увеличении поверхностного сопротивления исходных пленок.
6. SSPD на основе разупорядоченной пленки NbN с поверхностным сопротивлением 0.8 кОм/квадрат ($T_c = 8.1$ К), интегрированные в оптический резонатор, достигают системной квантовой эффективности 94 % на длине волны 1.3 мкм при рабочей температуре 2.2 К, ширине полосы 100 нм и токе смещения $0.85I_c$. Временное разрешение составило 52 пс, а мертвое время 11 нс.
7. SSPD на основе разупорядоченной пленки NbN с поверхностным сопротивлением 1.2 кОм/квадрат ($T_c = 7.8$ К), интегрированные в оптический резонатор, достигают системной квантовой эффективности 92 % на длине волны 1.55 мкм при рабочей температуре 2.2 К, ширине полосы 100 нм и токе смещения $0.85I_c$. Временное разрешение составило 59 пс. При температуре 2.8 К внутренняя квантовая эффективность детектора на основе данной пленки составила 74 и 41 % на длинах волн 2 и 3 мкм соответственно.

Практическая значимость работы заключается в проведении систематического исследования корреляции между параметрами нанесения и свойствами сверхпроводниковых пленок NbN и VN, а также характеристиками детекторов на их основе; разработке воспроизводимого маршрута получения сверхтонких пленок NbN, подходящих для создания высокоэффективных детекторов фотонов видимого, ближнего и среднего ИК-диапазонов, работающих при температуре 2.2 К и сохраняющих одновременно с эффективностью свое быстродействие. Полученные результаты активно используются в системах детектирования, разрабатываемых и реализуемых компанией ООО «Сверхпроводниковые Нанотехнологии» (СКОНТЕЛ), что обосновывает успешный **результат внедрения**.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При нанесении на кремниевые и нитрид-кремниевые подложки методом реактивного магнетронного распыления сверхтонких пленок нитрида ниобия с поверхностным сопротивлением более 200 Ом/квадрат достижение наивысших значений критических температур перехода в сверхпроводящее состояние происходит при температурах нагрева подложки 300 – 600 °С, концентрации азота в газовой смеси 20 – 22 %, рабочем давлении аргона 3 мТорр и скорости роста пленки 0.7 Å/с.
2. Увеличение поверхностного сопротивления исходной пленки NbN с 0.3 до 1.2 кОм/квадрат (при сопутствующем изменении критической температуры с 10.7 до 7.8 К) ведет к приросту внутренней квантовой эффективности SSPD с 18 до 97 % на длине волны 1.5 мкм при рабочей температуре 2.2 К, ширине полоски 100 нм и токе смещения детектора $0.9I_c$.
3. Повышение поверхностного сопротивления исходных пленок NbN до 1.2 кОм/квадрат (при $T_c = 7.8$ К) способствует увеличению квантовой эффективности SSPD в среднем ИК-диапазоне, достигающей 41 % на длине волны 3 мкм при рабочей температуре 2.8 К, ширине полоски 100 нм и токе смещения детектора $0.9I_c$. Расчетное значение квантовой эффективности увеличивается до 90 % при охлаждении детектора до температуры 2.2 К.
4. SSPD на основе пленок нитрида ванадия с поверхностным сопротивлением 0.17 кОм/квадрат и критической температурой 5.5 К не достигают насыщения внутренней квантовой эффективности на длине волны 1.3 мкм при рабочей температуре 1.7 К, ширине полоски 100 нм и токе смещения детектора $0.9I_c$, и тем самым уступают в квантовой эффективности сверхпроводниковым однофотонным детекторам на основе пленок нитрида ниобия с поверхностным сопротивлением 0.7 кОм/квадрат и критической температурой 9.5 К.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием проверенных экспериментальных методик, применяющихся в лаборатории квантовых детекторов МПГУ и ООО «Сконтел», согласием полученных результатов с данными схожих более поздних исследований, проведенных в других лидирующих научных центрах, а также созданием приборов на основе предложенных

подходов к достижению высокой эффективности сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. «Микро-, нанотехнологии и их применения», г. Черноголовка, Московская область, Россия, 24-27 ноября 2014. Доклад «Исследование SSPD приемника, оптимизированного под работу в диапазоне длин волн от 700 до 1200 нм»;
2. Third International Conference on Quantum Technologies (ICQT 2015), Москва, Россия, 13-17 июля 2015 г. Доклад «Capability investigation of superconductive single-photon detectors optimized for 800 – 1200 nm spectrum range»;
3. 6-я Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Москва, Россия, 3-5 февраля 2016 г. Доклад «Разработка технологии создания резонаторных структур для увеличения квантовой эффективности NbN детекторов ИК-фотонов»;
4. Superconductors-based sensors and quantum technologies workshop, Москва, Россия, 18-21 апреля 2016 г. Доклад «High-efficiency single-photon detectors based on NbN films»;
5. Микро- нанотехнологии и их применение. г. Черноголовка, Московская область, Россия, 6-10 февраля 2017 г. Доклад «Сверхпроводниковый детектор ИК диапазона с возможностью определения числа фотонов в коротком импульсе излучения»;
6. 4th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint Petersburg OPEN 2017», Санкт-Петербург, Россия, 3–6 апреля, 2017 г. Доклад «Development of fast and high-effective single-photon detector for spectrum range up to 2.3 μm »;
7. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017», Москва, Россия, 10-14 апреля 2017 г. Доклад «Сверхпроводниковый детектор одиночных фотонов со входной полосой оптического излучения до 2.3 мкм»;
8. Fourth International Conference on Quantum Technologies ICQT 2017 Москва, Россия, 12–17 июля 2017 г. Доклад «Photon-Number-Resolving SSPDs with system detection efficiency over 60»;
9. VII Международная Конференция по Фотонике и Информационной Оптике, Москва, Россия, 24-26 января 2018. Доклад «Применение тонких

- сверхпроводниковых пленок нитрида ванадия для изготовления счетчиков одиночных ИК фотонов»;
10. 5th International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2018, Санкт-Петербург, Россия, 2-5 апреля 2018 г. Доклад «Influence of sputtering parameters on the main characteristics of ultra-thin vanadium nitride films»;
 11. Ежегодная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В.Арменского, Москва, Россия, 18-28 февраля 2019 г. Доклад «Особенности осаждения разупорядоченных сверхтонких плёнок нитрида ванадия»;
 12. Interaction between Radiation and Quantum matter IRQ 2019, Москва, Россия, 2-5 июля 2019 г. Доклад «Vanadium nitride – a promising material for superconducting nanodevices»;
 13. 3rd International Symposium on “Single Photon based Quantum Technologies”, 15-17 сентября 2020 г., виртуальная. Доклад «Near-unity photon detection with ultra-low dark count rate at telecom c-band range»;
 14. Applied Superconductivity Conference 2020, 23 Октября - 7 ноября 2020 г., виртуальная. Доклад «A comparison of VN and NbN thin film properties towards optimal SNSPD efficiency».

Личный вклад. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованных работах, выполненных автором лично или в соавторстве с коллегами. Личный вклад автора включал постановку задач, нанесение пленок и последующее измерение их основных параметров, адаптацию процесса реактивного магнетронного распыления для получения пленок с высокими значениями поверхностных сопротивлений и критических температур, измерение спектральной эффективности изготавливаемых детекторов, участие в обсуждении и анализе полученных данных, а также подготовку научных статей. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично или при его непосредственном участии.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Полный объём диссертации составляет 115 стра-

ниц, включая 46 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 103 наименования.

Во введении сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования, обусловлена его актуальность и новизна, представлены защищаемые положения, описана практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор литературы по сверхпроводниковым однофотонным детекторам, описаны теоретические и экспериментальные работы, посвященные исследованию эффекта однофотонного детектирования в сверхпроводниковых наноструктурах; рассмотрены основные методики получения тонких пленок.

Во второй главе представлены маршруты нанесения тонких пленок и изготовления сверхпроводниковых однофотонных детекторов, описаны экспериментальные установки для их первичного тестирования.

Третья глава посвящена изучению влияния различных параметров процесса реактивного магнетронного распыления на параметры выходных пленок нитрида ниобия. Также в главе описано теоретическое и экспериментальное исследование возможности увеличения квантовой эффективности SSPD путем применения разупорядоченных пленок с различным значением поверхностного сопротивления и критической температуры.

В четвертой главе приведена методика эксперимента по изучению спектральной квантовой эффективности NbN SSPD. Продемонстрированы максимальные достигаемые значения системной квантовой эффективности изготовленных детекторов на телекоммуникационных длинах волн. Описано исследование квантовой эффективности на длинах волн, относящихся к ближнему и среднему ИК-диапазонам; показано существенное увеличение квантовой эффективности SSPD в среднем ИК-диапазоне при использовании исходных пленок с поверхностным сопротивлением более 1 кОм/квadrat.

В заключении приведены результаты работы и сделаны выводы проведенного исследования.

Приложения содержат вспомогательные данные по математическому описанию процесса реактивного магнетронного распыления пленок NbN, полученные на основе экспериментальных данных.

Список публикаций автора

Список опубликованных статей, отражающих основные результаты диссертации и опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

- A1. Korneeva, Y.P., Manova, N.N., Dryazgov, M.A., Simonov, N.O., **Zolotov, P.I.** and Korneev, A.A., 2021. Influence of sheet resistance and strip width on the detection efficiency saturation in micron-wide superconducting strips and large-area meanders. *Superconductor Science and Technology*, 34(8), p.084001. **Q1. Авторский вклад 20 %.**
- A2. **Zolotov, P.**, Semenov, A., Divochiy, A. and Goltsman, G., 2021. A Comparison of VN and NbN Thin Films Towards Optimal SNSPD Efficiency. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(5), pp.1-4. **Q2. Авторский вклад 70 %.**
- A3. Moshkova, M., Divochiy, A., Morozov, P., Vakhtomin, Y., Antipov, A., **Zolotov, P.**, Seleznev, V., Ahmetov, M. and Smirnov, K., 2019. High-performance superconducting photon-number-resolving detectors with 86% system efficiency at telecom range. *JOSA B*, 36(3), pp.B20-B25. **Q2. Авторский вклад 20 %.**
- A4. Divochiy, A., Misiaszek, M., Vakhtomin, Y., Morozov, P., Smirnov, K., **Zolotov, P.** and Kolenderski, P., 2018. Single photon detection system for visible and infrared spectrum range. *Optics letters*, 43(24), pp.6085-6088. **Q1. Авторский вклад 20 %.**
- A5. Smirnov, K., Divochiy, A., Vakhtomin, Y., Morozov, P., **Zolotov, P.**, Antipov, A. and Seleznev, V., 2018. NbN single-photon detectors with saturated dependence of quantum efficiency. *Superconductor Science and Technology*, 31(3), p.035011. **Q1. Авторский вклад 30 %.**

Список литературы

1. Superconducting nanowire single-photon detectors: A perspective on evolution, state-of-the-art, future developments, and applications / I. Esmail Zadeh [и др.] // Applied Physics Letters. — 2021. — Т. 118, № 19. — С. 190502.
2. *Holzman, I.* Quantum materials for nanoscale quantum sensors: opportunities and challenges in superconducting nanowire single photon detectors / I. Holzman, Y. Ivry // arXiv preprint arXiv:1807.09060. — 2018.
3. Picosecond superconducting single-photon optical detector / G. Gol'tsman [и др.] // Applied physics letters. — 2001. — Т. 79, № 6. — С. 705—707.
4. *Hadfield, R. H.* Single-photon detectors for optical quantum information applications / R. H. Hadfield // Nature photonics. — 2009. — Т. 3, № 12. — С. 696—705.
5. Single-photon detection system for quantum optics applications / A. Korneev [и др.] // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. — 2007. — Т. 13, № 4. — С. 944—951.
6. Nano-structured superconducting single-photon detectors / G. Goltsman [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2004. — Т. 520, № 1—3. — С. 527—529.
7. Middle-infrared to visible-light ultrafast superconducting single-photon detectors / G. Gol'Tsman [и др.] // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2007. — Т. 17, № 2. — С. 246—251.
8. Spectral dependency of superconducting single photon detectors / L. Maingault [и др.]. — 2010.
9. Efficient single photon detection from 500 nm to 5 μm wavelength / F. Marsili [и др.] // Nano letters. — 2012. — Т. 12, № 9. — С. 4799—4804.
10. Single photon detection system for visible and infrared spectrum range / A. Divochiy [и др.] // Optics Letters. — 2018. — Т. 43, № 24. — С. 6085—6088.

11. Quantum key distribution over 300 / R. Ozhegov [и др.] // International Conference on Micro-and Nano-Electronics 2014. Т. 9440. — International Society for Optics, Photonics. 2014. — 94401F.
12. A superconducting photon-counting receiver for optical communication from the Moon / M. Grein [и др.] // SPIE Newsroom. — 2015. — Т. 9.
13. *Vallett, D.* Picosecond imaging circuit analysis, PICA / D. Vallett // Proc. Microelectronics Failure Analysis Desk Reference. — 2004. — С. 292—300.
14. *Stellari, F.* Testing of Ultra Low Voltage VLSI Chips using the Superconducting Single-Photon Detector (SSPD). / F. Stellari, P. Song // Microelectron. Reliab. — 2004. — Т. 44, № 9—11. — С. 1663—1668.
15. Photon counting LIDAR at 2.3 μm wavelength with superconducting nanowires / G. G. Taylor [и др.] // Optics Express. — 2019. — Т. 27, № 26. — С. 38147—38158.
16. Demonstration of sub-3 ps temporal resolution with a superconducting nanowire single-photon detector / B. Korzh [и др.] // Nature Photonics. — 2020. — Т. 14, № 4. — С. 250—255.
17. Single-photon imager based on a superconducting nanowire delay line / Q.-Y. Zhao [и др.] // Nature Photonics. — 2017. — Т. 11, № 4. — С. 247—251.
18. Kilopixel array of superconducting nanowire single-photon detectors / E. E. Wollman [и др.] // Optics express. — 2019. — Т. 27, № 24. — С. 35279—35289.
19. *Rogalla, H.* 100 years of superconductivity / H. Rogalla, P. H. Kes. — Taylor & Francis, 2011.
20. *Semenov, A. D.* Superconducting nanostrip single-photon detectors some fundamental aspects in detection mechanism, technology and performance / A. D. Semenov // Superconductor Science and Technology. — 2021. — Т. 34, № 5. — С. 054002.
21. *Gaudio, R.* Investigation of the detection process in nanowire superconducting single photon detectors : дис. . . . канд. / Gaudio R. — TUE, 2015.
22. Single-photon detection in the mid-infrared up to 10 μm wavelength using tungsten silicide superconducting nanowire detectors / V. Verma [и др.] // APL Photonics. — 2021. — Т. 6, № 5. — С. 056101.

23. Quantum cascade lasers and the Kruse model in free space optical communication / P. Corrigan [и др.] // Opt. Express. — 2009. — Март. — Т. 17, № 6. — С. 4355—4359. — URL: <http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-17-6-4355>.
24. Noninvasive, in vivo rodent brain optical coherence tomography at 2.1 microns / J. Zhu [и др.] // Optics letters. — 2019. — Т. 44, № 17. — С. 4147—4150.
25. Artificial neural network in predicting cancer based on infrared spectroscopy / Y. Cohen [и др.] // International Conference on Intelligent Decision Technologies. — Springer. 2020. — С. 141—153.
26. Ultrafast time measurements by time-correlated single photon counting coupled with superconducting single photon detector / V. Shcheslavskiy [и др.] // Review of scientific instruments. — 2016. — Т. 87, № 5. — С. 053117.
27. *Zotova, A.* Intrinsic detection efficiency of superconducting nanowire single photon detector in the modified hot spot model / A. Zotova, D. Y. Vodolazov // Superconductor Science and Technology. — 2014. — Т. 27, № 12. — С. 125001.
28. Vortex-assisted mechanism of photon counting in a superconducting nanowire single-photon detector revealed by external magnetic field / D. Y. Vodolazov [и др.] // Physical Review B. — 2015. — Т. 92, № 10. — С. 104503.
29. *Vodolazov, D. Y.* Single-photon detection by a dirty current-carrying superconducting strip based on the kinetic-equation approach / D. Y. Vodolazov // Physical Review Applied. — 2017. — Т. 7, № 3. — С. 034014.
30. *Wördenweber, R.* Superconductors at the Nanoscale: From Basic Research to Applications / R. Wördenweber. — de Gruyter, 2017.
31. Broadening of hot-spot response spectrum of superconducting NbN nanowire single-photon detector with reduced nitrogen content / D. Henrich [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2012. — Т. 112, № 7. — С. 074511.
32. High quality superconducting NbN thin films on GaAs / F. Marsili [и др.] // Superconductor Science and Technology. — 2009. — Т. 22, № 9. — С. 095013.
33. Superconducting and normal-state properties of vanadium nitride / B. Zhao [и др.] // Physical Review B. — 1984. — Т. 29, № 11. — С. 6198.

34. Properties of superconducting vanadium nitride sputtered films / J. Zasadzinski [и др.] // Physical Review B. — 1985. — Т. 32, № 5. — С. 2929.
35. Electron diffusivity measurements of VN superconducting single-photon detectors / N. Romanov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. Т. 1124. — IOP Publishing. 2018. — С. 051032.