

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

На правах рукописи

Святодух Маргарита Игоревна

**Квантовая томография сверхпроводникового однофотонного
детектора**

РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

профессор

Гольцман Григорий Наумович

Москва – 2023

Оглавление

Введение	3
Актуальность исследования	3
Степень разработанности проблемы	4
Цель работы	5
Задачи исследования	5
Методы исследования	6
Научная новизна	6
Основные положения, выносимые на защиту	7
Личный вклад автора	7
Основные результаты работы	8
Апробация.....	17
Список опубликованных статей по теме диссертации.....	18
Список использованной литературы.....	19

Введение

Современное развитие квантовых технологий сформировало запрос на фотонные детекторы, не только имеющих однофотонную чувствительность, но также и способных с высокой точностью измерять количество фотонов в оптическом импульсе. Хотя для большинства приложений достаточно различать ноль, один, два и более двух фотонов [1], такое требование само по себе не тривиально. Одним из лучших кандидатов для задач связанных телекоммуникационным диапазоном длин волн является сверхпроводниковый однофотонный детектор (SSPD), который демонстрирует близкую к единице эффективность детектирования (DE) в этом диапазоне вместе с чрезвычайно низкой скоростью ложного (темнового) счета. Кроме того, они потенциально имеют очень высокую скорость работы (порядка нескольких ГГц) и низкий джиттер (суб-пикосекундный). В основе работы сверхпроводникового однофотонного детектора, способного измерять количество фотонов в импульсе, лежит поглощение нескольких фотонов, создающие горячие пятна, при этом количество созданных горячих пятен в сверхпроводнике, можно измерить, наблюдая за характеристиками измеренных импульсов.

Актуальность исследования

- Постоянное совершенствование характеристик детектора, реализованное по результатам исследований
- Углубление понимания механизма детектирования
- Существуют теоретические работы, предсказывающие размер горячего пятна и расстояние, на котором два горячих пятна, возникающих при поглощении двух фотонов будут взаимодействовать друг с другом. Но в настоящее время не представлены экспериментальные исследования, подтверждающие либо опровергающие это.

- Увеличение скорости генерации квантового ключа, за счет увеличения скорости счета сверхпроводникового однофотонного детектора.
- сверхпроводниковые однофотонные детекторы – единственные российские приборы квантовых технологий, определяющие мировой уровень.

Степень разработанности проблемы

Наиболее прямым методом измерения размера горячего пятна, а точнее длины взаимодействия двух горячих пятен, является квантовая томография сверхпроводникового однофотонного детектора [1].

Квантовая томография детектора позволяет полностью охарактеризовать отклик сверхпроводникового однофотонного детектора независимо от входного состояния, используя минимальный набор операторов.

в 2011 году [2] была введена модель, в которой длинная нанопроволока делилась на секции и детектирование происходило только тогда, когда два фотона поглощались в одной секции детектора. В результате можно вычислить вероятность обнаружения в многофотонном режиме детектирования, опираясь на однофотонный режим работы однофотонного детектора.

Применение методов квантовой томографии к сверхпроводниковому однофотонному детектору было предложено группой Ренема [3]. Метод был основан на нахождении вероятности того, что детектор сработает в ответ на N падающих на него фотонов. Эти вероятности определялись посредством освещения детектора известным набором когерентных состояний и измерением зависимости вероятности срабатывания детектора от входной мощности. Для генерации когерентных состояний обычно используется импульсный лазерный источник.

Позднее метод был применен к детектору, изготовленному из тонкой пленки NbN и получено значение 23 ± 2 нм, однако из-за неоднородной

геометрии устройства и необходимости учитывать отдельно линейные потери устройства, интерпретация результатов весьма неоднозначна. В этой работе эксперимент был основан на сравнении двухфотонного и однофотонного режимов детектирования, поэтому метод может быть применен только к чистым N-фотонным событиям. В большинстве случаев, нельзя определить, какое событие наблюдалось при срабатывании детектора - однофотонное или двухфотонное, можно только отметить «есть срабатывание» или «нет срабатывания».

в 2013 году Елезов и др. [4] исследовали режимы детектирования и предложили методику определения областей “чистых” режимов. При одном и том же токе смещения, в зависимости от падающей мощности, эффективность детектирования выше для режима, соответствующего большему числу фотонов. Были рассмотрены смешанные режимы детектирования и показано как можно определить внутреннюю квантовую эффективность n-фотонных режимов детектирования SSPD как функцию тока смещения.

Цель работы

Экспериментальное исследование размеров неравновесной области в токнесущей полоске, образующейся в результате поглощения фотона.

Исследование деталей механизма работы сверхпроводникового однофотонного детектора с точки зрения размеров «горячего» пятна и взаимодействия двух горячих пятен.

Создание сверхпроводниковых однофотонных детекторов, способных различать число фотонов, при помощи единичного детектирующего элемента.

Задачи исследования

1. Разработать конфигурацию сверхпроводникового однофотонного детектора, позволяющую реализовать метод квантовой томографии детектора.

2. Изготовить образец, состоящий из узкой полоски, вписанной в меандр. Такая конфигурация выбрана для лучшего согласования излучения с одномодовым оптическим волокном.
3. Изготовить детектор, соответствующий требованиям метода квантовой томографии детектора, для определения длины взаимодействия двух горячих пятен.
4. Экспериментально реализовать метод квантовой томографии детектора.
5. Выявить паразитный вклад схемы смещения в истинные значения длины взаимодействия двух горячих пятен, образованных поглощением фотонов.

Методы исследования

- Квантовая томография детектора: Возбуждение двух горячих пятен в сверхпроводящей полоске детектора при поглощении фотонов и изменение ширины полоски до значений, близких к длине взаимодействия двух горячих пятен, образованных при поглощении фотонов.
- Расстояние между горячими пятнами, возникающими при поглощении фотонов, зависит от среднего числа фотонов в импульсе лазера
- Необходимо исключить из детектирования процесс обнаружения одного фотона. При уменьшении тока и увеличении интенсивности света (количество фотонов на единицу площади увеличивается), вероятность срабатывания детектора при поглощении 2-х и более фотонов увеличивается.

Научная новизна

1. Разработана новая конфигурация детектора необходимая для правильного исследования взаимодействия двух горячих пятен, образованных поглощением фотонов: «узкая полоска в меандре»

2. Выявлен паразитный систематический вклад в истинные значения длины взаимодействия двух горячих пятен, образованных поглощением фотонов
3. Усовершенствован метод измерений для нахождения длины взаимодействия двух горячих пятен в сверхпроводниковом однофотонном детекторе
4. В детекторах, изготовленных из сверхпроводящей пленки NbN и MoSi определена максимальная длина взаимодействия двух горячих пятен, которая соответствует ширине сверхпроводящей полоски.
5. Определен Предел ширины полоски, на котором два горячих пятна, образованных поглощением двух фотонов перестанут воздействовать друг на друга.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Максимальное расстояние, на котором взаимодействуют два горячих пятна, образованных поглощением двух фотонов в детекторе на длине волны 1550нм близко к ширине токонесущей полоски детектора.
2. Дополнительный паразитный вклад в квадратичные отсчеты связан с электрической схемой смещения и обнаруживается по его зависимости от частоты следования импульсов лазера
3. Максимальное расстояние взаимодействия горячих пятен, возникающих при поглощении фотонов в детекторе на одномодовом оптическом волноводе, такое же, как в волоконном одномодовом детекторе- порядка 100нм

Личный вклад автора

- Участие в постановке задачи
- Разработка дизайна сверхпроводникового однофотонного детектора, позволяющего реализовать методику квантовой томографии.

- Участие в технологических этапах изготовления сверхпроводниковых однофотонных детекторов – процессе фотолитографии, электронно-лучевой литографии, плазмохимического травления и термического осаждения.
- Характеризация полученных сверхпроводниковых однофотонных детекторов, при помощи сканирующей электронной микроскопии.
- Разработка экспериментальной установки для реализации методики квантовой томографии с изготовленными сверхпроводниковыми однофотонными детекторами.
- Проведение обработки полученных экспериментальных данных, для нахождения длины взаимодействия двух горячих пятен.
- Выступление на ряде конференций
- Подготовка текста публикаций

Основные результаты работы

В главе 1 диссертации представлен обзор литературы, показывающий основные направления развития сверхпроводникового однофотонного детектора. Данная глава состоит из пяти частей – механизмы детектирования, метрики, сверхпроводниковые материалы, методики оптического согласования и методика квантовой томографии сверхпроводникового однофотонного детектора.

В данной главе диссертации приводятся базовые механизмы детектирования одиночных фотонов, генерации ложных срабатываний и влияние различных факторов (энергии фотона, качество нанополоски) на спектральный диапазон работы сверхпроводникового однофотонного детектора. Вводятся основные метрики, используемые для оценки качества работы SSPD – квантовая эффективность, темновые отсчеты, джиттер и спектральный диапазон. Для каждой из характеристик SSPD представлены передовые результаты, полученные различными международными группами. Далее в главе 1 диссертации представлен обзор различных

сверхпроводниковых материалов, используемых для создания SSPD. Показаны различные методики нанесения сверхпроводников на подложку, а также указаны основные свойства материалов, влияющие на характеристики SSPD. Также в главе 1 диссертации приводятся основные методики оптического согласования SSPD с внешним излучением. В заключительной части продемонстрированы основные результаты полученные по тематике исследования диссертации.

Для применения метода квантовой томографии сверхпроводникового однофотонного детектора разработана специальная конфигурация детектора. Так, для достоверного извлечения длины взаимодействия двух горячих пятен, необходимы узкие и относительно короткие детекторы, но такая конфигурация будет приводить к проблемам перехода детектора обратно в сверхпроводящее состояние. Для того, чтобы эта проблема не возникала, к чувствительному элементу детектора добавлена дополнительная индуктивность, реализованная в виде меандра. Схематическое изображение типичного образца, использованного в рамках диссертационного исследования представлено на рисунке 1.

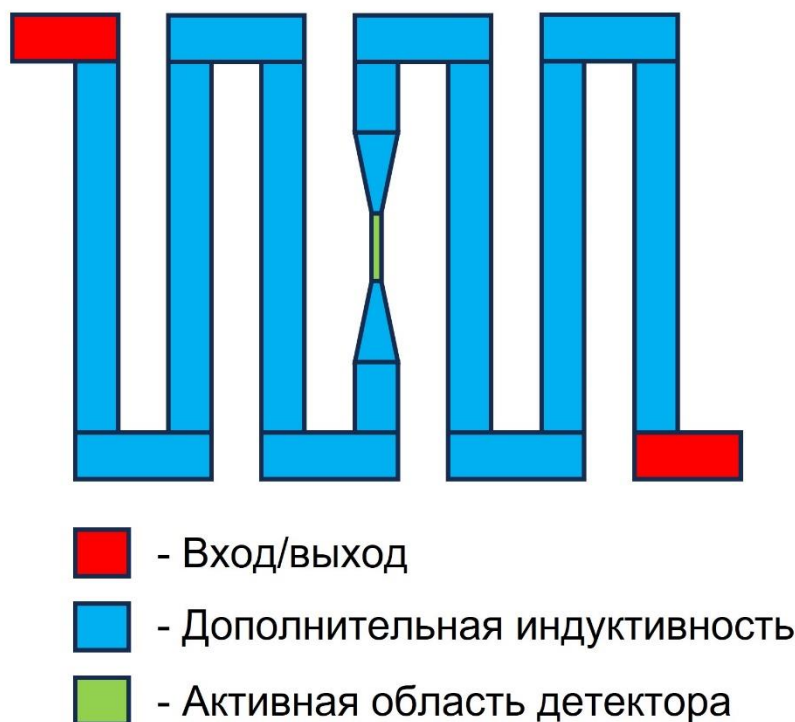


Рисунок 1 — схематичное изображение сверхпроводникового однофотонного детектора, использованного в рамках диссертационного исследования.

Глава 2 диссертации состоит из пяти частей, каждая из которых описывает технологические процессы, в которых участвовал автор диссертационного исследования. Краткая схема технологического процесса изготовления сверхпроводниковых однофотонных детекторов, представлена на рисунке 2. На данной схеме отмечены следующие этапы: а) чистка подложек перед нанесением реактивным магнетронным распылением сверхпроводникового нитрида ниобия. б) реактивное магнетронное распыление нитрида ниобия, в) нанесение знаков совмещения, г) нанесение контактных площадок, д) задание топологии сверхпроводникового однофотонного детектора. Типичная микрофотография, полученная в сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), представлена на рисунке 3.

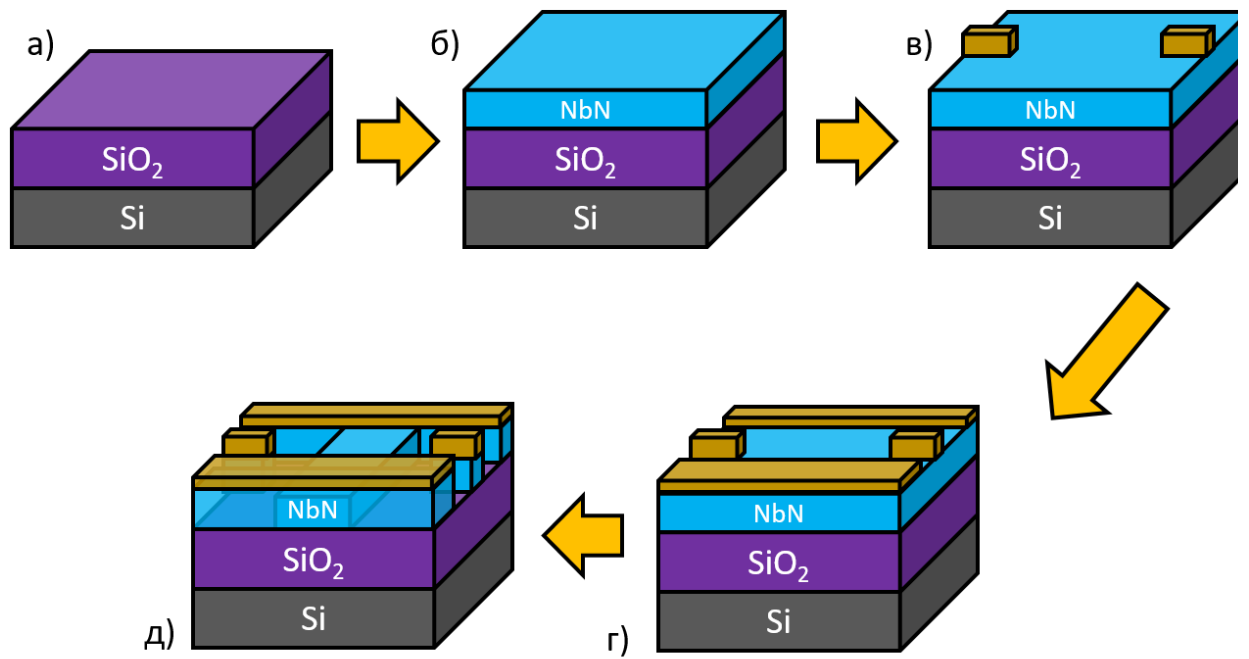


Рисунок 2 — Технологический процесс изготовления сверхпроводникового однофотонного детектора.

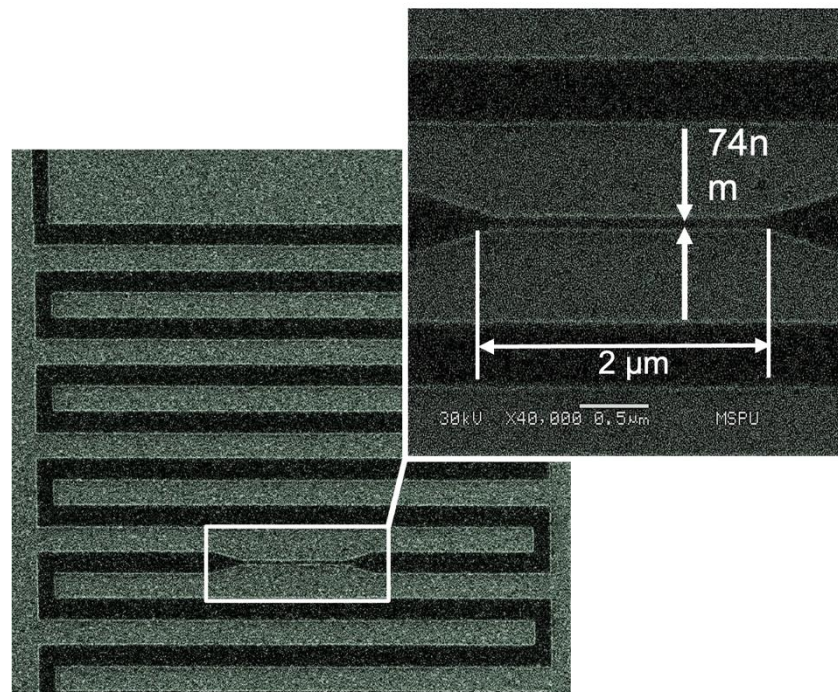


Рисунок 3 — Изображение детектора, использованного в рамках диссертационного исследования, полученное с помощью СЭМ

В главе 3 диссертации представлен метод квантовой томографии сверхпроводникового однофотонного детектора, позволяющий определять двухпятенную эффективность детектирования и извлекать длину взаимодействия двух горячих пятен (s), образованных от поглощения фотонов при стопроцентной внутренней эффективности детектирования. Также в главе представлен метод, позволяющий определить паразитный вклад, связанный со схемой смещения и показан способ исключить этот вклад в последующей обработке экспериментальных данных. Из анализа данных для интегрированного с волноводом сверхпроводникового однофотонного детектора найдена длина взаимодействия двух горячих пятен, равная ширине сверхпроводящей полосы.

Длина взаимодействия двух горячих пятен связана с двухпятенной эффективностью как $s = L \eta_2(I)$. Для того, чтобы найти $\eta_2(I)$ необходимо сначала рассчитать среднее число поглощенных фотонов M , умножив среднее число падающих фотонов на эффективность детектирования в области насыщения, предполагая, что каждый поглощенный фотон в этой области производит срабатывание. Затем полученные зависимости $P(M)$ аппроксимируются полиномом второго порядка

$$P(M) = \eta_0 + \eta_1 M + \frac{1}{2} a_2 M^2 \quad (1)$$

В этом выражении η_0 – это вероятность возникновения темнового отсчета.

$$a_2 = \eta_2 + a_2^{stat} + a_2^{bias}$$

$$a_2^{stat} = -(\eta_1)^2, \quad a_2^{bias} = 2I\Phi\eta_1\left(\frac{d\eta_1}{dI}\right)$$

$\Phi = f\tau$ - произведение частоты повторения лазерных импульсов f на длительность ответного импульса сверхпроводникового однофотонного детектора τ , η_1 - однопятенная эффективность детектирования, η_2 - двухпятенная эффективность детектирования

Затем эта процедура аппроксимации повторяется для различных значений тока, до тех пор, пока вклад η_1 не преобладает над квадратичным вкладом. В этом случае извлечение коэффициента a_2 становится невозможным из-за статистической дисперсии результатов измерений. Пример аппроксимации экспериментальных данных приведен на рисунке 4.

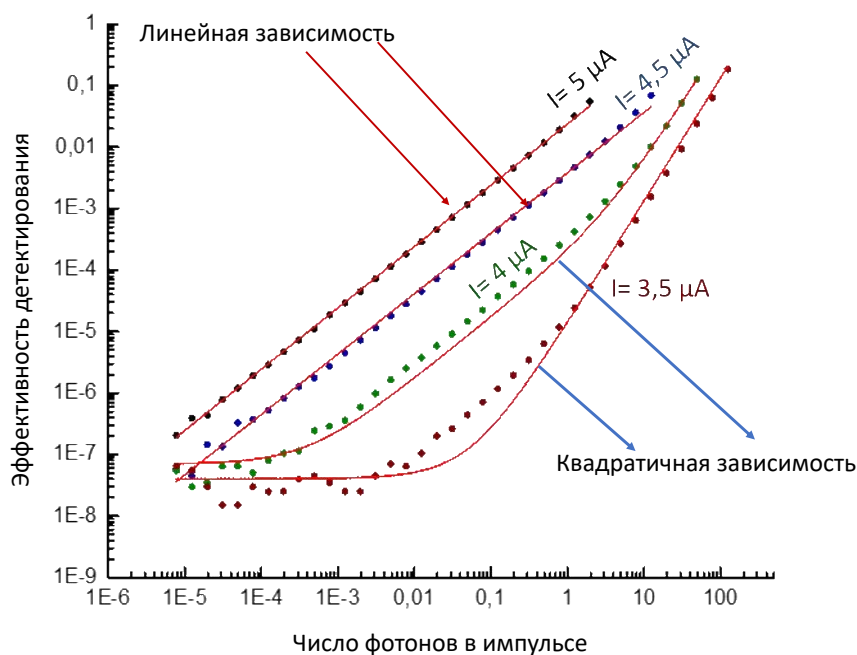


Рисунок 4 — Аппроксимация экспериментальных данных полиномом второго порядка для извлечения двухпятенной эффективности детектирования

Для того, чтобы получить зависимость двухпятенной эффективности от тока, необходимо с помощью аппроксимации данных формулой (1) извлечь коэффициент a_2 и вычесть систематические ошибки a_2^{stat} и a_2^{bias} . Если значение произведения частоты повторения лазерных импульсов на длительность ответного импульса сверхпроводникового однофотонного детектора точно определено, то для нахождения паразитного вклада, возникающего от тока смещения и определяемого коэффициентом

a_2^{bias} необходимо варьировать частоту повторения лазера f . Пример отделения паразитных данных от истинного значения $\eta_2(I)$ изображено на рисунке 5.

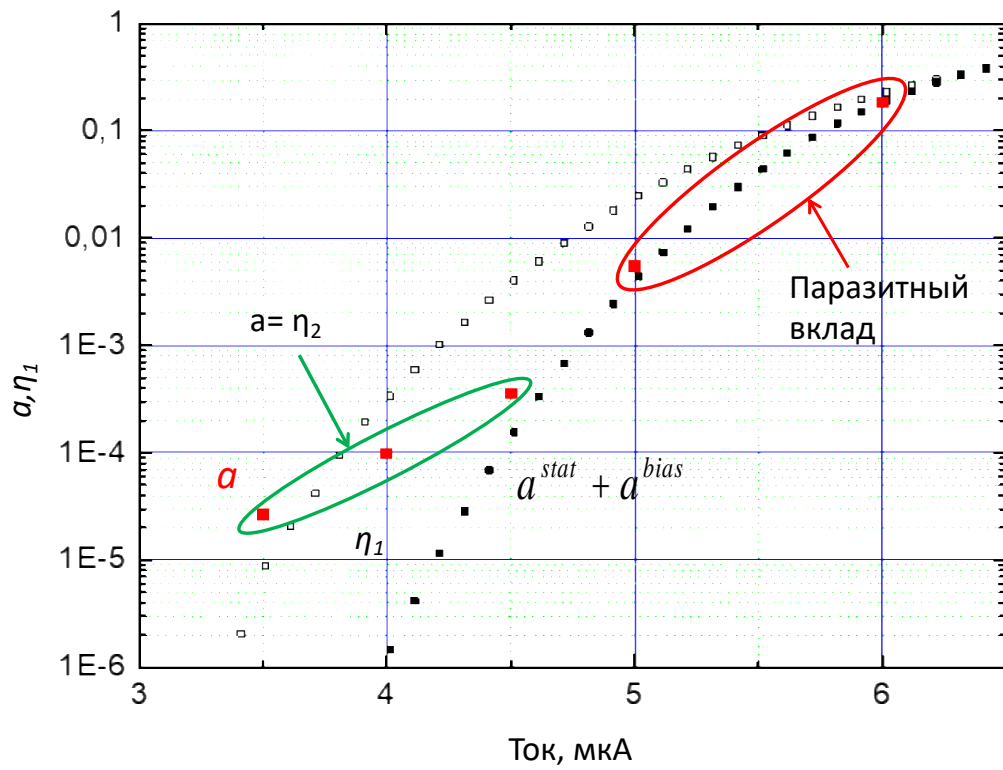


Рисунок 5 — Иллюстрация паразитного вклада от схемы смещения

В этой главе метод применен к сверхпроводниковому однофотонному детектору, интегрированному с волноводом. Результаты представлены на рисунке 6.

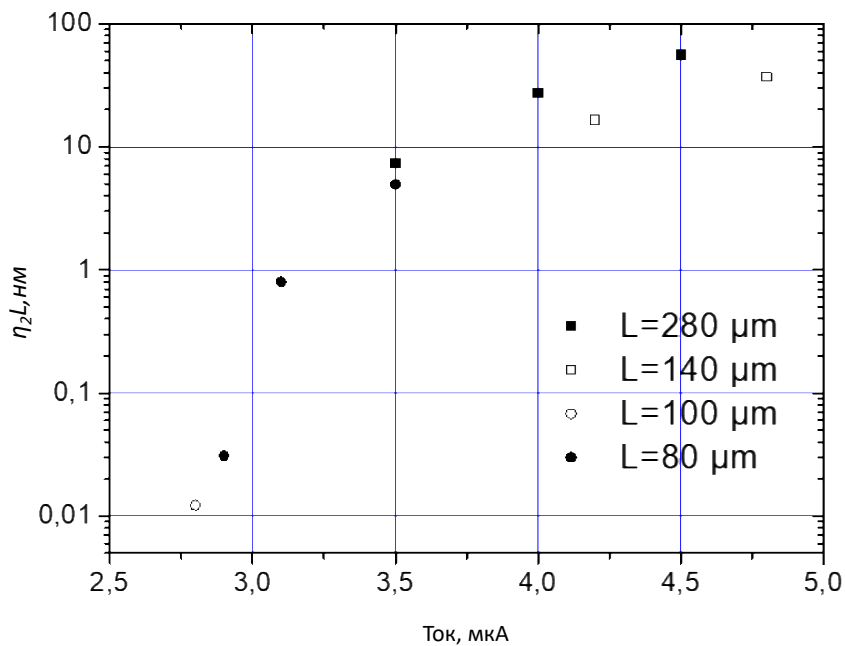


Рисунок 6 - Результаты применения метода квантовой томографии сверхпроводникового однофотонного детектора к SSPD на волноводе

Для каждого измерения была проверена систематическая ошибка, связанная со схемой смещения, паразитные данные были удалены из рассмотрения.

В главе 4 диссертации представлены результаты квантовой томографии сверхпроводникового однофотонного детектора микронной длины. Высокая внутренняя квантовая эффективность рассматриваемых детекторов позволяет извлечь одно- и двухпятенную эффективность детектирования из зависимости скорости счета от мощности падающего на детектор излучения и определить длину взаимодействия двух горячих пятен. Экспериментально исследованы детекторы, изготовленные из пленок NbN с разным поверхностным сопротивлением и пленки, изготовленные из MoSi. Были рассмотрены детекторы с различной шириной сверхпроводящей полоски. Результаты измерений представлены на рисунке 7 и 8.

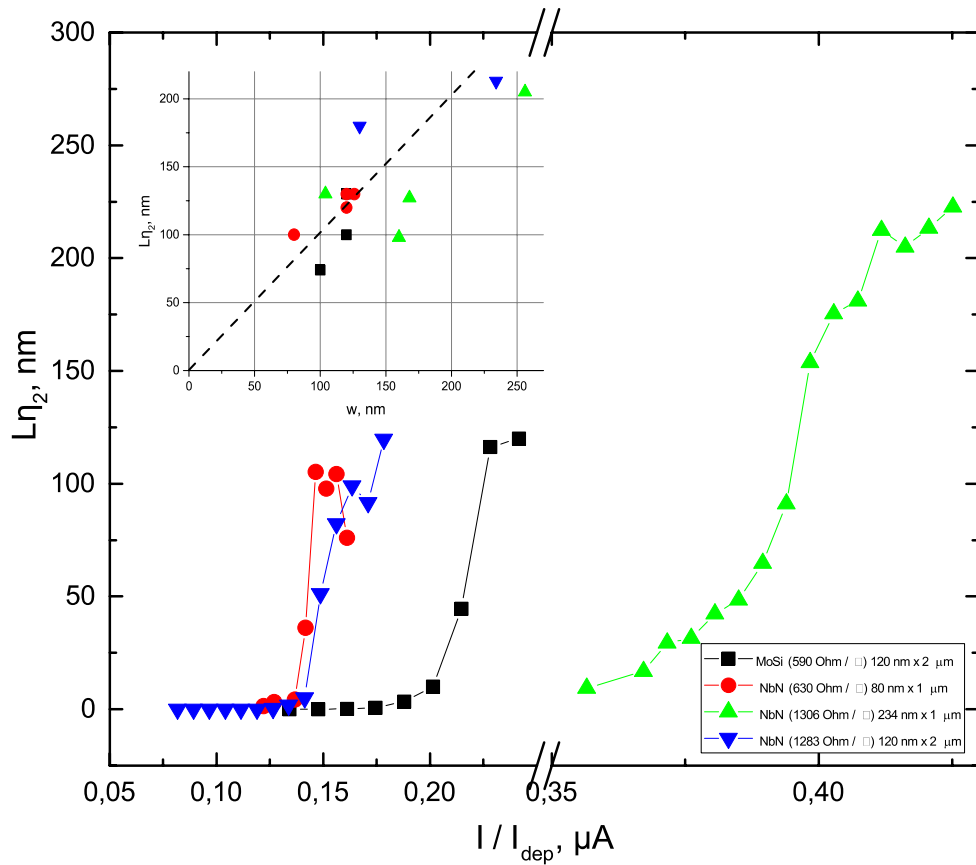


Рисунок 7 — Сравнение длины взаимодействия горячих пятен в детекторах изготовленных из высокоомных пленок NbN, стандартных пленок NbN и MoSi

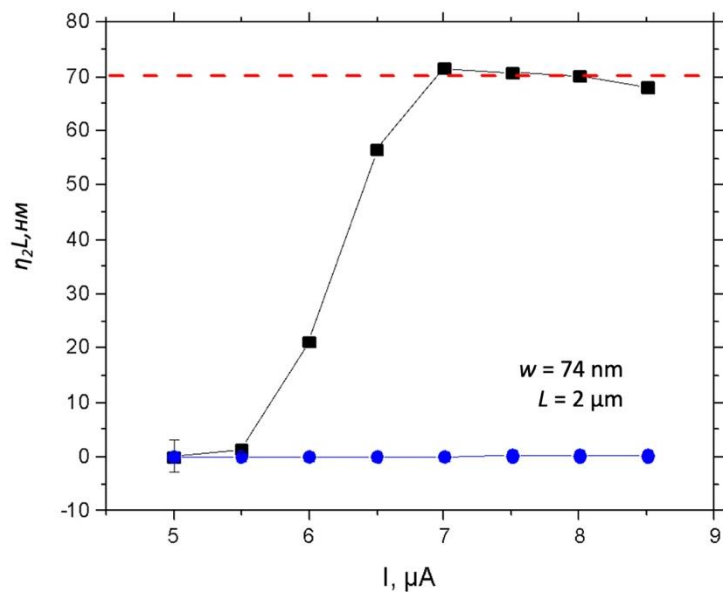


Рисунок 8 — Длина взаимодействия двух горячих пятен, для детектора, изготовленного из NbN. Длина 2мкм, ширина 70нм.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- Обнаружен квадратичный вклад в вероятность срабатывания детектора при поглощении фотона, даже для области, в которой превалирует отклик на один фотон, что позволяет определить уровень насыщения двухпятенной эффективности детектирования.
- Обнаружен дополнительный паразитный систематический вклад в значения длины взаимодействия горячих пятен. Он связан со схемой смещения детектора
- Продемонстрировано, как исключить этот вклад для получения результатов, относящихся только к длине взаимодействия двух горячих пятен.
- Для сверхпроводникового однофотонного детектора на оптическом волноводе, обнаружена систематическая монотонная зависимость длины взаимодействия двух горячих пятен от тока. Значение насыщения этой величины (т.е. s) близко к ширине полоски.
- Для томографии сверхпроводникового однофотонного детектора требуются короткие полоски. Так, например, полоска, длина 1 и 2 мкм проявляли уверенное насыщение коэффициента η_2 , тогда как детекторы, с общей длиной 140–280 мкм проявляют признаки насыщения.
- Обнаружено насыщение η_2 в зависимости от тока смещения для нанополосок, изготовленных из ультратонких пленок NbN и MoSi, с шириной, изменяющейся от 56 до 300 нм. Это позволяет извлечь максимальную длину взаимодействия горячих пятен s .

Апробация

1. 6-я международная школа-конференция по Оптоэлектронике, Фотонике и Наноструктурам «Saint Peterburg OPEN 2019», Санкт-Петербург,

- Россия, 22 -25 апреля 2019 г., доклад "Extracting hot-spot correlation length from SNSPD tomography data";
2. XXIV Международный симпозиум "Нанопфизика и нанопэлектроника», Нижний Новгород, Россия, 9 – 12 марта 2020г., доклад «Квантовая томография сворхпроводникового однофотонного детектора интегрированного с волноводом»;
 3. XXV симпозиум «Нанопфизика и нанопэлектроника», Нижний Новгород 9-12 марта 2021г., доклад «Длина взаимодействия горячих пятен для сворхпроводникового однофотонного детектора с близкой к единице квантовой эффективностью»;
 4. 7-я международная школа-конференция "SPBOpen 2020», Санкт Петербург, Россия, 27–30 апреля 2020г., доклад «Quantum detector tomography of superconducting single photon detector based on MoSi film»;
 5. EUCAS 14th European Conference on Applied Superconductivity, Глазго, Шотландия, 1-5 сентября, 2019г., доклад «Disordered superconducting NbN thin film as a material of choice for single-photon detectors for linear optical quantum computing»;
 6. EUCAS 15th European Conference on Applied Superconductivity, Москва, Россия, 1-5 сентября, 2021г., доклад « Quantum detector tomography on NbN single strip SNSPDs ».

Список опубликованных статей по теме диссертации

Все опубликованные статьи, отражающие основные результаты диссертации входят в международную систему цитирования Scopus:

1. Polyakova, M., Semenov, A. V., Kovalyuk, V., Ferrari, S., Pernice, W. H., & Gol'tsman, G. N. Protocol of measuring hot-spot correlation length for SNSPDs with near-unity detection efficiency //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2019. – Т. 29. – №. 5. – С. 1-5.М.
2. Polyakova, M. I., Florya, I. N., Semenov, A. V., Korneev, A. A., & Goltsman, G. N. Extracting hot-spot correlation length from SNSPD tomography data

- //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019 (Q4). – Т. 1410. – №. 1. – С. 012166.
3. Polyakova M. I., Korneev A. A., Semenov A. V. Comparison single-and double-spot detection efficiencies of SSPD based to MoSi and NbN films //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1695. – №. 1. – С. 012146.
 4. Polyakova, M., Sheveleva, E., Semenov, A., & Goltsman, G. Measuring Hot-Spot Interaction Length in Single-Strip SNSPD //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2022. – Т. 32. – №. 4. – С. 1-4.

Фамилия автора была изменена. Подтверждающие документы прилагаются

Список использованной литературы

1. J. S. Lundeen, A. Feito, H. Coldenstrodt-Ronge, K. L. Pregnell, C. Silberhorn, T. C. Ralph, I. A. Walmsley, Tomography of quantum detectors //Nature Physics. – 2009. – Т. 5. – №. 1. – С. 27-30.
2. Akhlaghi M. K., Majedi A. H., Lundeen J. S. Nonlinearity in single photon detection: modeling and quantum tomography //Optics express. – 2011. – Т. 19. – №. 22. – С. 21305-21312.
3. Renema J. J. et al. Modified detector tomography technique applied to a superconducting multiphoton nanodetector //Optics express. – 2012. – Т. 20. – №. 3. – С. 2806-2813.
4. Elezov M. S. et al. Investigating the detection regimes of a superconducting single-photon detector //Journal of Optical Technology. – 2013. – Т. 80. – №. 7. – С. 435-438.