



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики»

Московский институт электроники и математики

Департамент электронной инженерии



«Квантовая томография сверхпроводникового однофотонного детектора»

Подготовила:

Святодух (Полякова) Маргарита Игоревна

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор, заведующий Базовой кафедрой
квантовой оптики и телекоммуникаций ЗАО "Сконтел"

Гольцман Григорий Наумович

Москва, 2023

Первая демонстрация детектирования одиночных фотонов сверхпроводящей нанополоской с током, близким к критическому

Quantum detection by current carrying superconducting film

Alex D. Semenov ^{*,1}, Gregory N. Gol'tsman, Alexander A. Korneev

Department of Physics, State Pedagogical University of Moscow, 11989 Moscow, Russian Federation

Received 18 July 2000; received in revised form 9 October 2000; accepted 11 October 2000

PHYSICA

www.elsevier.nl/locate/physc

Single and double spot counts

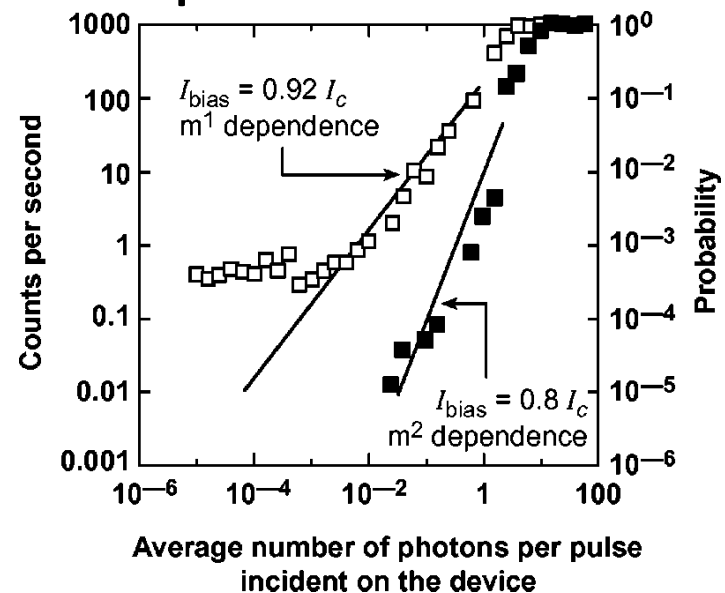


FIG. 3. Number of counts per second recorded by the NbN SPD versus the average number of photons per pulse incident upon the device, for two different bias current levels is shown. The solid lines correspond to the Eq. 4 theoretical predictions. The incident photon wavelength was 0.81 μm .

Picosecond superconducting single-photon optical detector

APPLIED PHYSICS LETTERS

VOLUME 79, NUMBER 6

6 AUGUST 2001

G. N. Gol'tsman,^{a)} O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, and A. Dzardanov

Department of Physics, Moscow State Pedagogical University, Moscow 119435, Russia

C. Williams and Roman Sobolewski^{b)}

Department of Electrical and Computer Engineering and Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, Rochester, New York 14627-0231

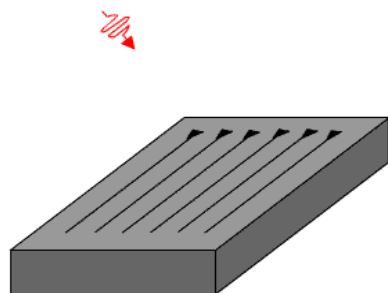


FIG. 1. Schematics of the supercurrent-assisted hotspot formation mechanism in an ultrathin and narrow superconducting strip, kept at temperature far below T_C are shown. The arrows indicate direction of the supercurrent flow.

Основные характеристики детектора

Темновые отсчеты

Ложные срабатывания - т.е. срабатывания, которые происходят в отсутствие излучения, поступающего на детектор

фоновое излучение

электрические шумы считывающей электроники

собственные внутренние эффекты SSPD.

Эффективность детектирования

Количество срабатываний (электрических импульсов), сверхпроводникового однофотонного детектора, полученных поглощении N фотонов

Эффективность оптического согласования

$$\eta_{\text{coupling}}$$

фотон должен попасть на детектор

Эффективность поглощения

$$\eta_{\text{absorption}}$$

фотон должен поглотиться полоской сверхпроводника

Внутренняя квантовая эффективность детектора

$$\eta_{\text{IQE}}$$

вероятность генерации электрического импульса

$$\eta = \eta_{\text{coupling}} \cdot \eta_{\text{absorption}} \cdot \eta_{\text{IQE}}$$

Джиттер

Определяет временное разрешение однофотонного детектора.

Геометрический джиттер

связан с положением, в котором поглощается фотон.

Более длинные детекторы обладают более высоким джиттером.

Шумовой джиттер

включает в себя отношение сигнал-шум отклика детектора.

Для высокого отношения сигнал / шум детектора, джиттер имеет более низкое значение

Собственный джиттер

связан с механизмом детектирования фотона

Спектральный диапазон

Коэффициент диффузии и время термализации

Ширина сверхпроводниковой щели

Уменьшение ширины сверхпроводниковой щели → уменьшение энергии для подавления сверхпроводимости нанопроволоки

Ширина сверхпроводящей полоски

Детекторы одиночных фотонов



Фотоумножители(PMT)



Однофотонные лавинные
фотодиоды(SPAD)



Сверхпроводниковый
однофотонный
детектор(SNSPD)



Transition-edge sensor (TES)

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

Практическая значимость

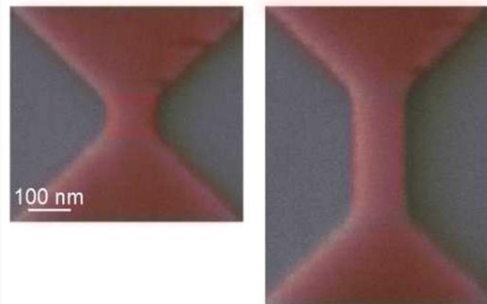
- Компания ООО «Сконтел» в течение 10 лет была монополистом, а теперь является одним из мировых лидеров в производстве сверхпроводниковых однофотонных детекторов, которые находят многочисленные применения в областях квантовой криптографии, квантовых вычислений, медицине, биологии и др.
- Достижение предельных значений основных характеристик сверхпроводящих детекторов: квантовой эффективности, количества темновых отсчетов, джиттера и мертвого времени и др.
- Развитие области сверхпроводниковых однофотонных детекторов, способных различать число фотонов при помощи одного детектирующего элемента.

Различные геометрии SSPD для томографии и измерения длины взаимодействия горячих пятен

Цель состоит в том, чтобы извлечь длину взаимодействия горячих пятен, измеряя квадратичный вклад в вероятность фотосчета в зависимости от среднего числа фотонов в импульсе лазера.

Существует всего несколько работ, реализующие метод квантовой томографии сверхпроводникового однофотонного детектора

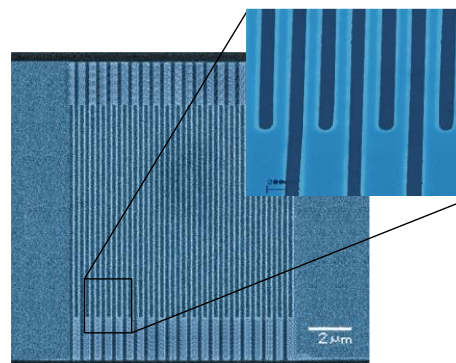
Метод квантовой томографии для SSPD представлен Ренема и др. в 2012 г. [Renema J. J. et al. Modified detector tomography technique applied to a superconducting multiphoton nanodetector //Optics express. – 2012. – Т. 20. – №. 3. – С. 2806-2813.](#)



[Renema et al., Applied Physics Letters, 110\(23\), 233103 \(2017\).](#)

Длина нанопроволоки от 100 до 400 нм, сравнима с шириной

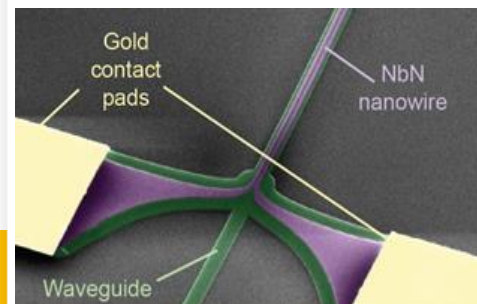
Неравномерное распределение тока и отсутствие насыщения эффективности детектирования затрудняет интерпретацию



[Elezov et al., Journal of Optical Technology, 80\(7\), 435-438 \(2013\).](#)

Общая длина меандрированной нанопроволоки 500 мкм

Слишком низкий вклад квадратичных фотоотсчетов



[Polyakova et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 29\(5\), 2201205 \(2019\)](#)

Количество поглощенных фотонов точно известно (из-за 100% внутренней эффективности детектирования и 100% поглощения)

Общая длина 80-280 мкм

Объект исследования

- Сверхпроводниковый однофотонный детектор
- Ультратонкие пленки из NbN и MoSi

$$R_{s_{\text{NbN}}} = 1283 \text{ Ом}/\square, 1308 \text{ Ом}/\square, 630 \text{ Ом}/\square, 480 \text{ Ом}/\square)$$

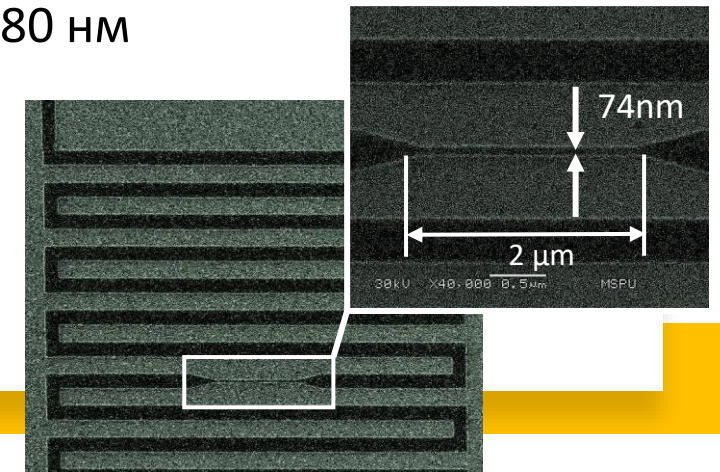
$$R_{s_{\text{MoSi}}} = 600 \text{ Ом}/\square$$

R_s – сопротивление квадрата пленки

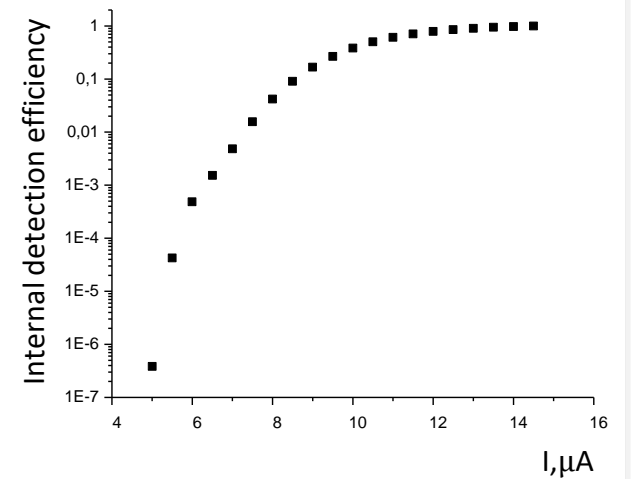
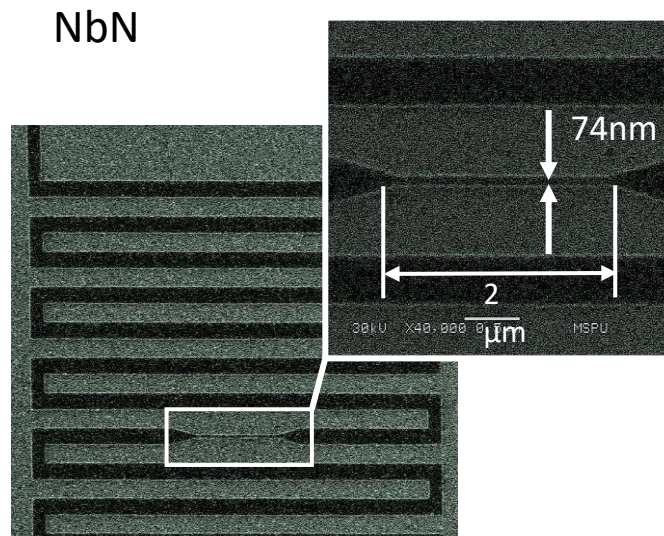
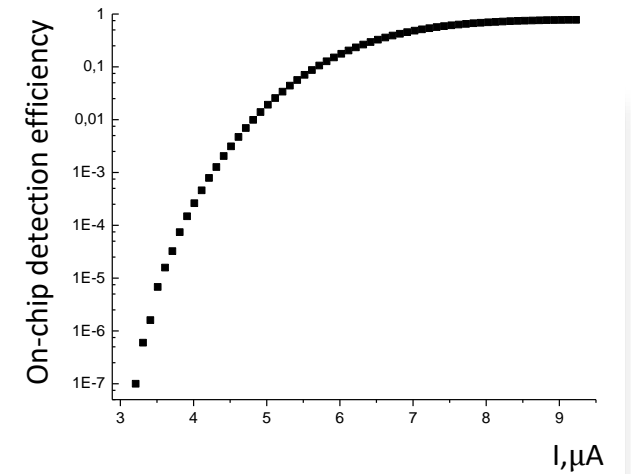
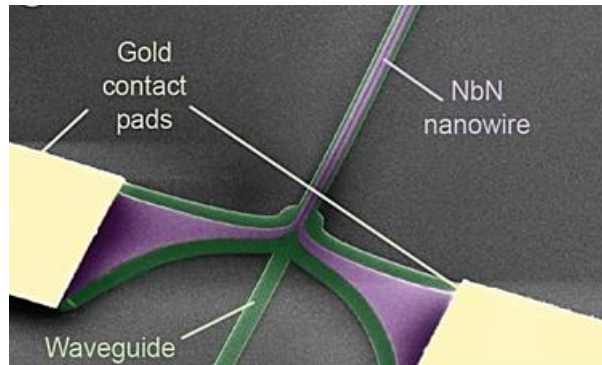
- Узкие и короткие полоски

ширина – от 70 до 380 нм

длина 1, 2 мкм



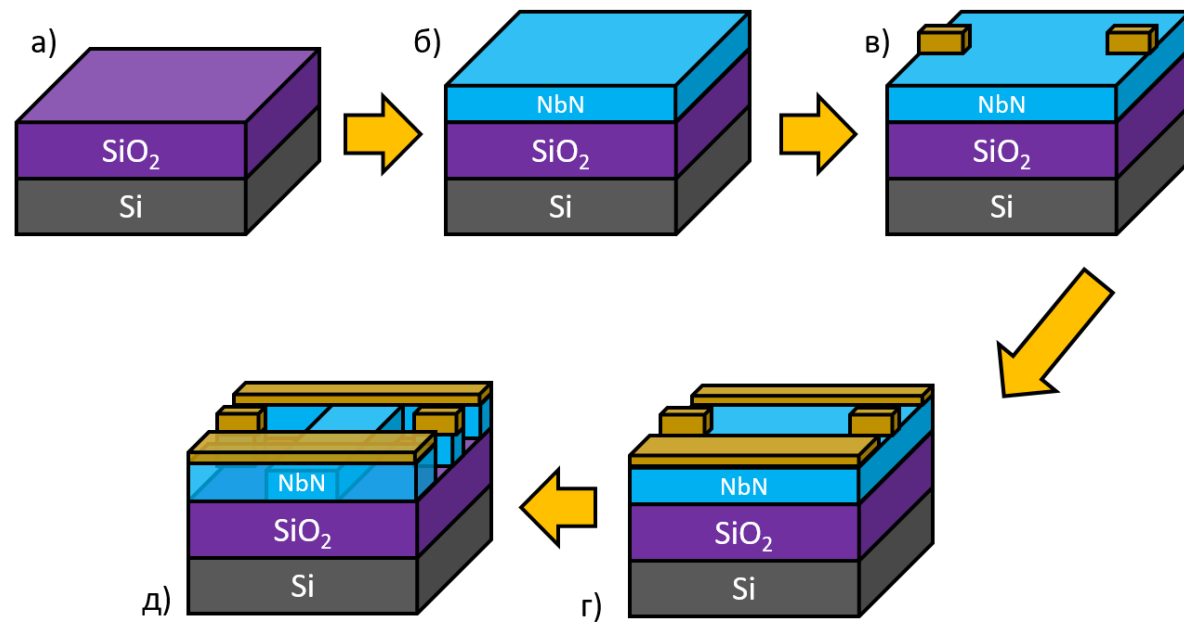
Исследуемые детекторы



- Количество поглощенных фотонов точно известно (из-за 100% внутренней эффективности)
- Небольшая длина (1 -2 мкм)
- Равномерное поглощение

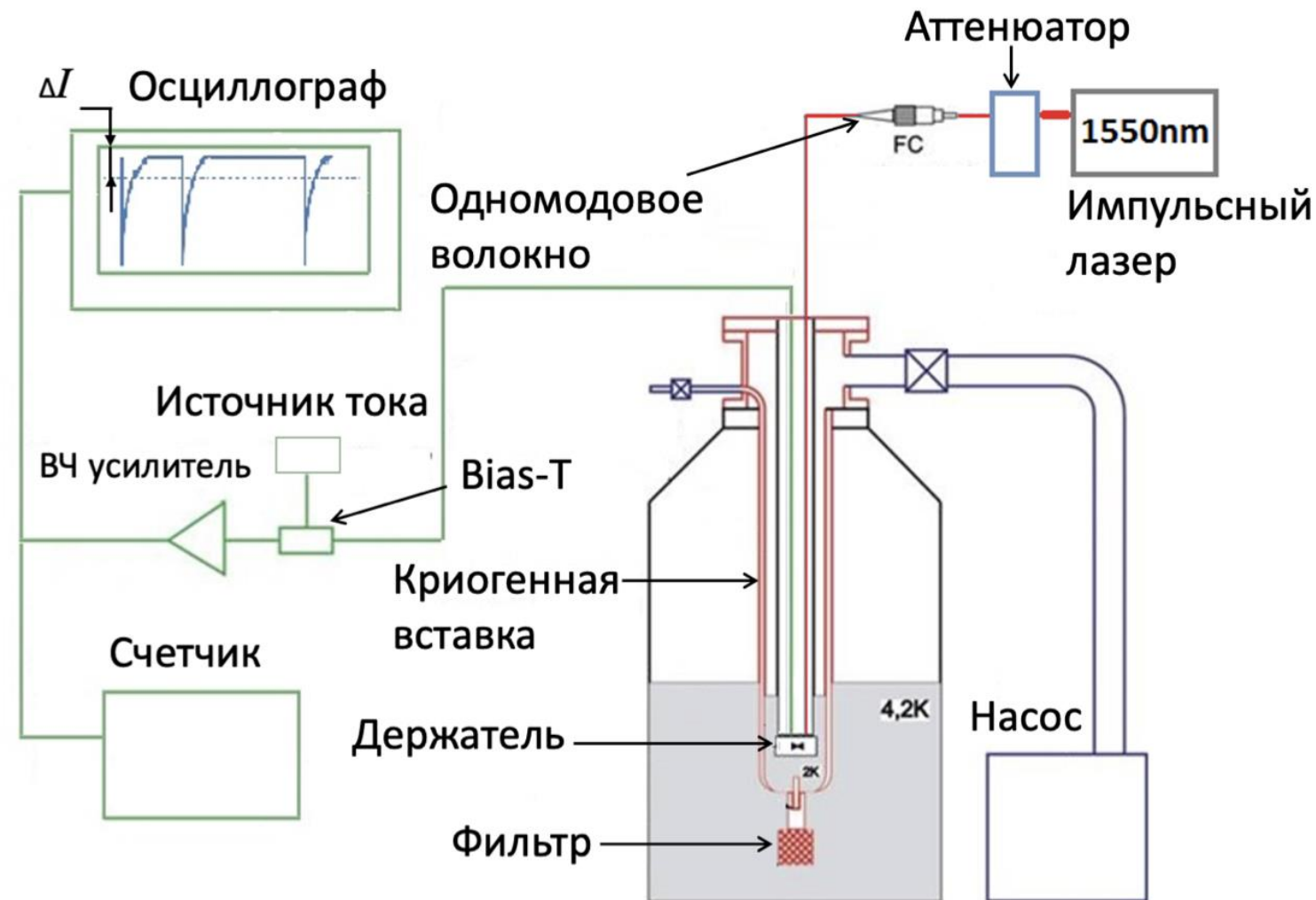
Технология изготовления образцов

- 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



Эксперимент

Для квантовой томографии сверхпроводящего однофотонного детектора, помимо классической схемы, принципиально наличие импульсного лазера с длиной импульса порядка 1пс и прецизионного аттенюатора для изменения мощности лазерного излучения

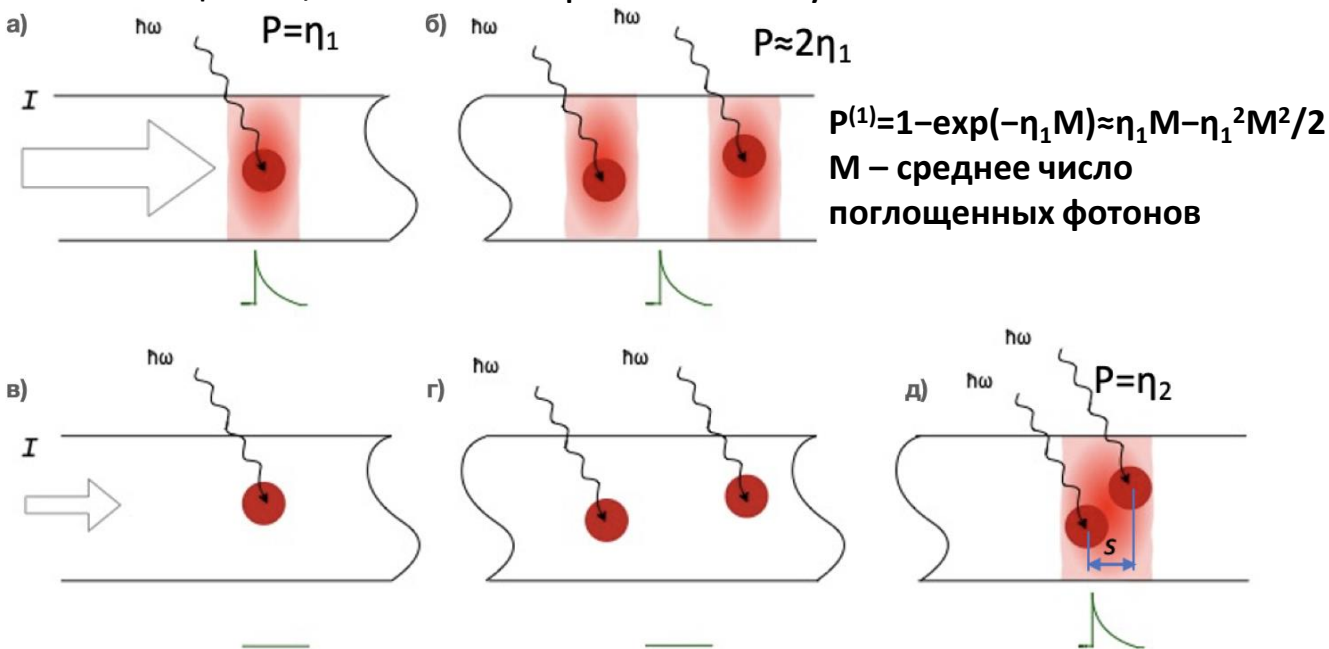


Основная идея

В случае маленького тока, только два фотона, поглощенных на определенном расстоянии друг от друга (длина взаимодействия двух горячих пятен) приводят к срабатыванию детектора

При большом токе, поглощение как одного, так и двух фотонов приведет к срабатыванию детектора

Ток смещения, близкий к критическому



Ток заметно меньше критического

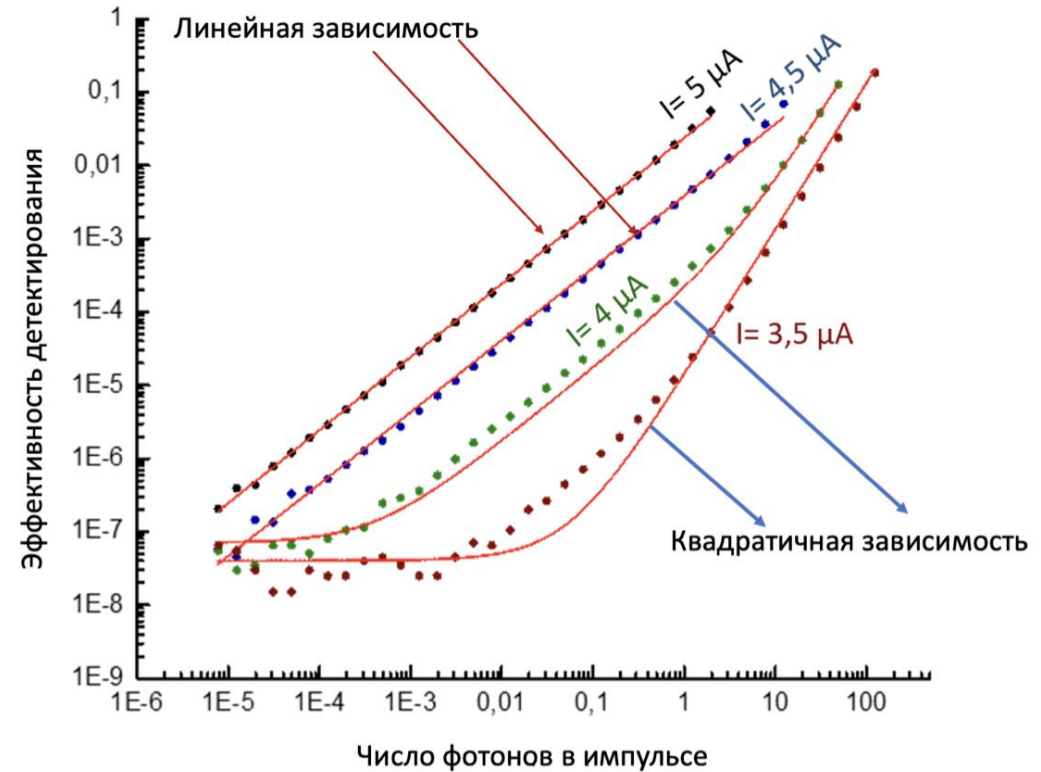
s - длина взаимодействия двух горячих пятен
 L - длина полоски детектора
 η_2^{\max} - эффективность детектирования двух фотонов

$$\eta_2^{\max} = s/L$$

Экспериментальные результаты

На рисунке, при токе 5μА и 4,5μА линейная зависимость в вероятности от среднего числа фотонов, что соответствует поглощению одного фотона.

При уменьшении тока и увеличении интенсивности падающего излучения, будет наблюдаться квадратичная зависимость, что соответствует поглощению двух фотонов. Это хорошо видно из кривых соответствующих токам смещения 4 μА и 3,5 μА.



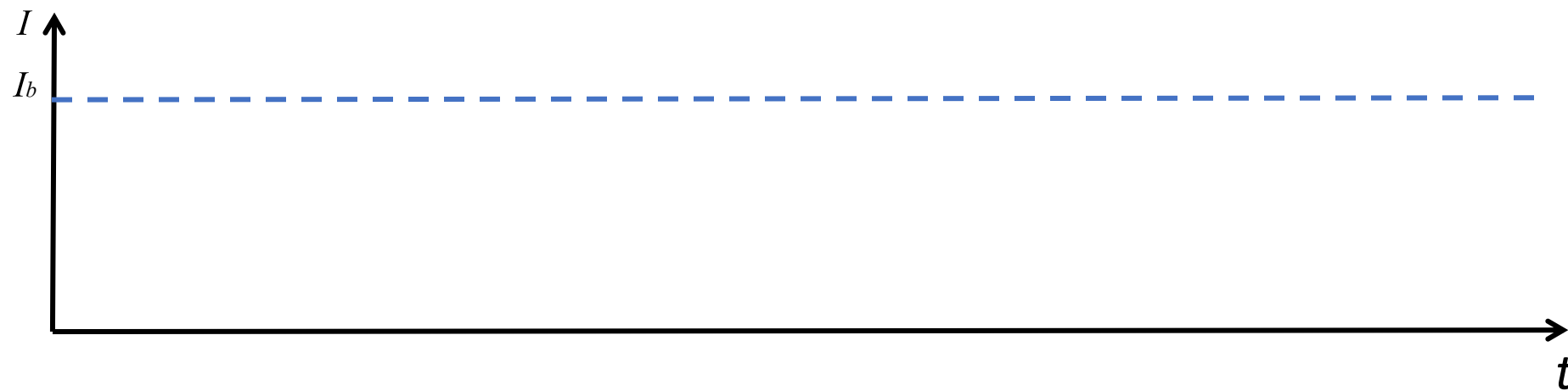
Аппроксимируем зависимость формулой:

$$P = a_0 + \eta_1 M + a M^2 / 2$$

Извлекаем η_1

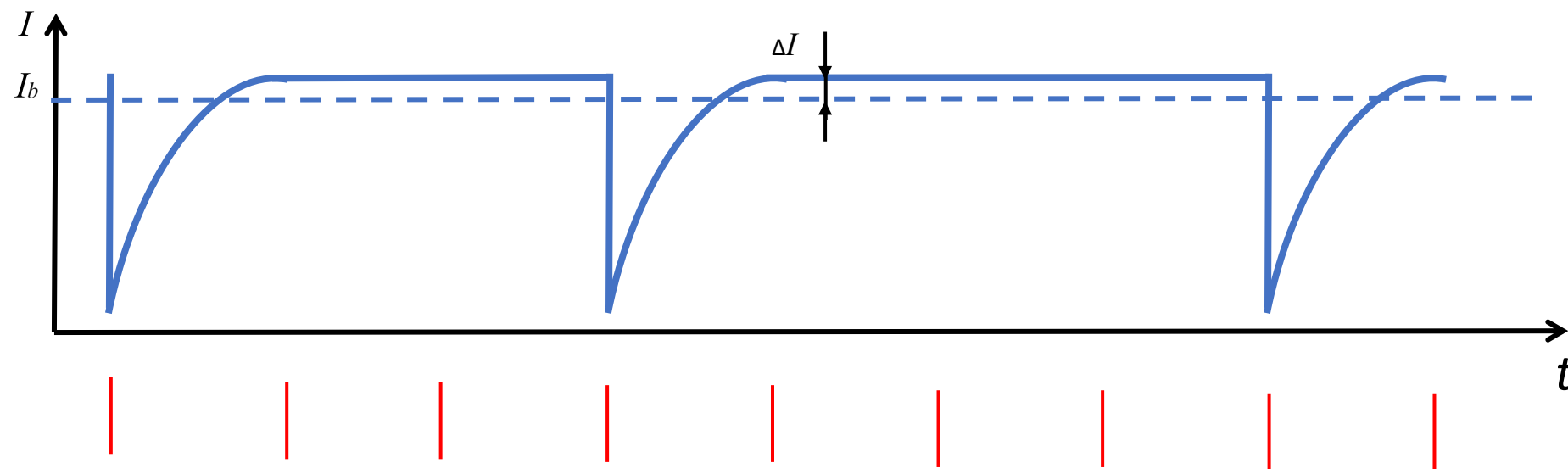
$$a = \eta_2 - \eta_1^2 + a_2^{\text{bias}}$$

Паразитный вклад от схемы смещения (a_2^{bias})



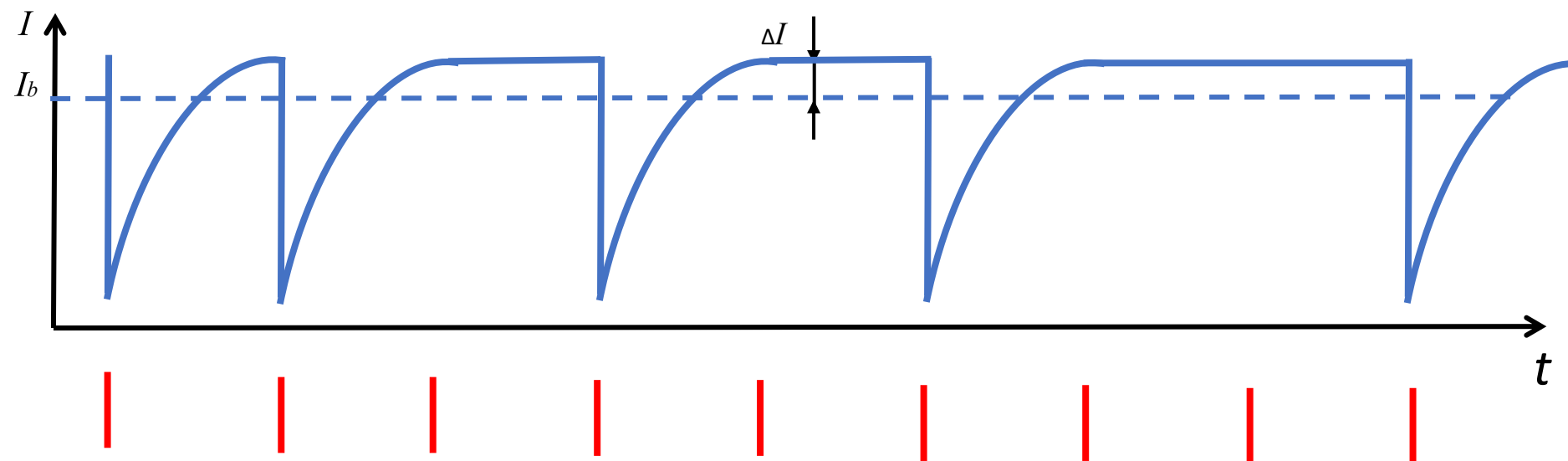
No laser pulses

Паразитный вклад от схемы смещения (a_2^{bias})



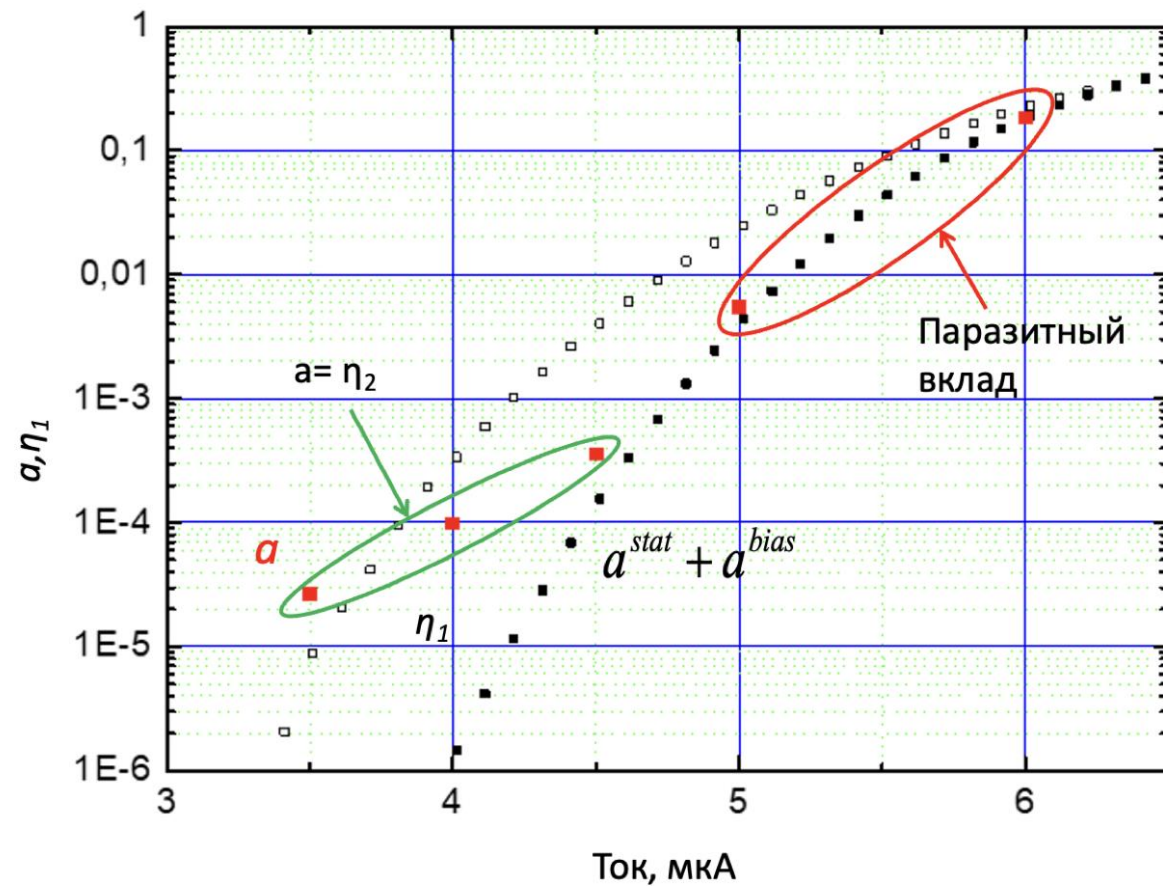
Laser pulses

Паразитный вклад от схемы смещения (a_2^{bias})



Laser pulses with greater power

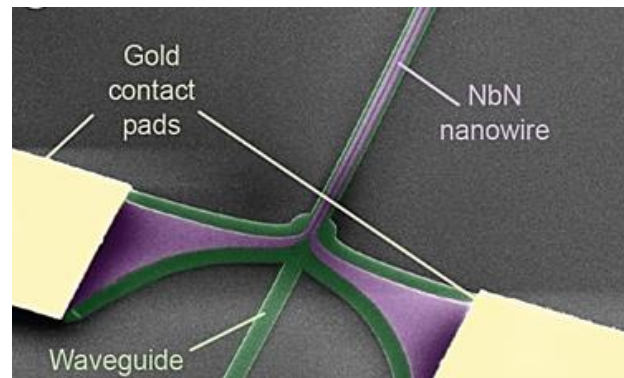
Определение паразитного вклада



Паразитный вклад

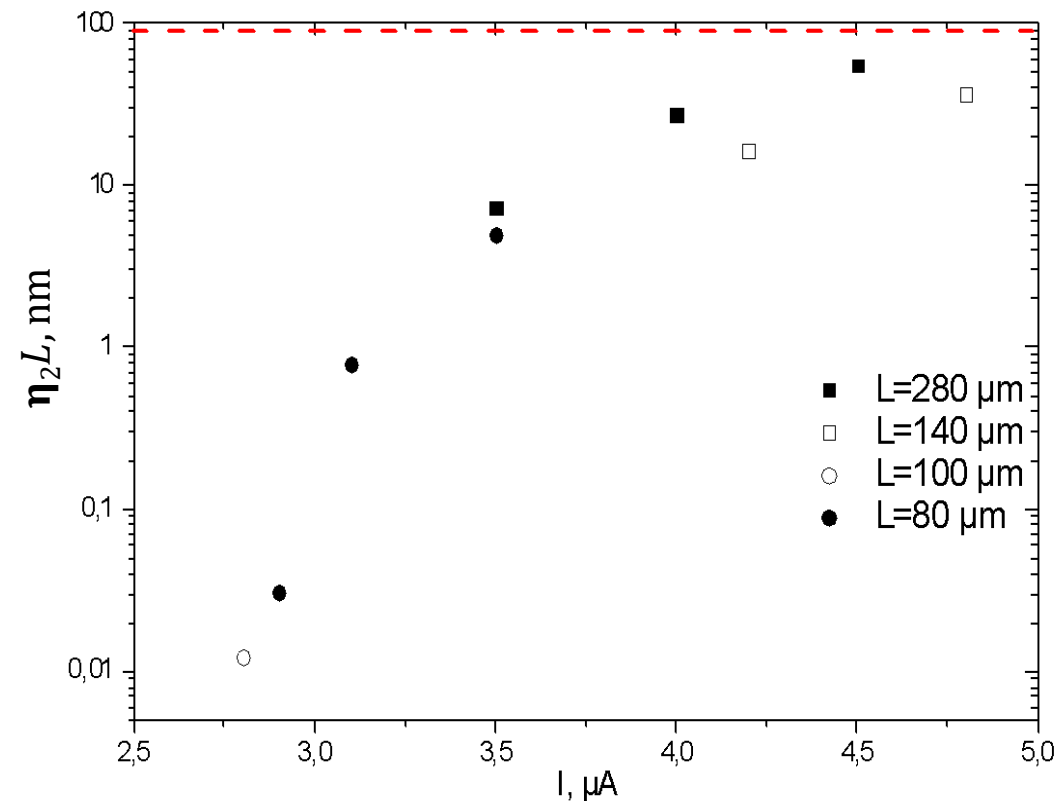
$$a^{stat} + a^{bias} = -(\eta_1)^2 + 2I\eta_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial I} \varphi$$

Обработанные экспериментальные данные для длины взаимодействия двух горячих пятен в сверхпроводниковом однофотонном детекторе на оптическом волноводе

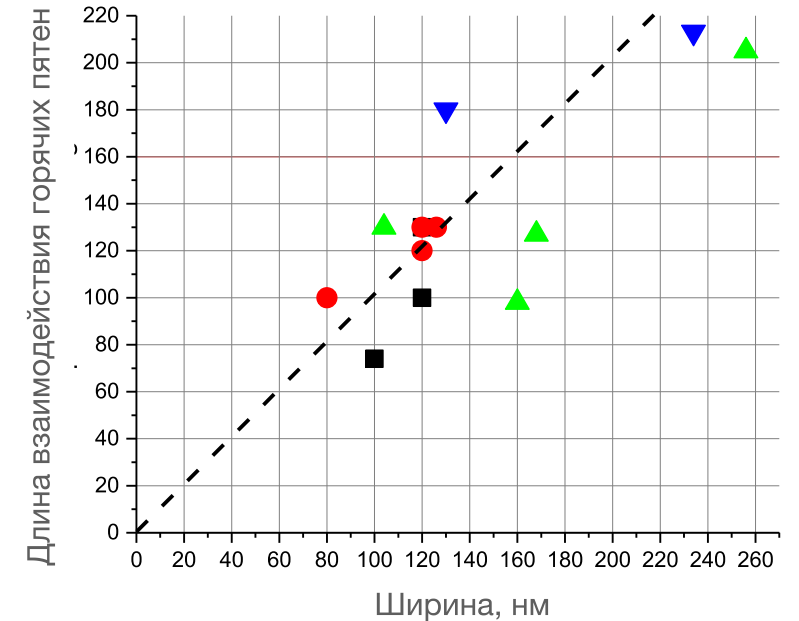
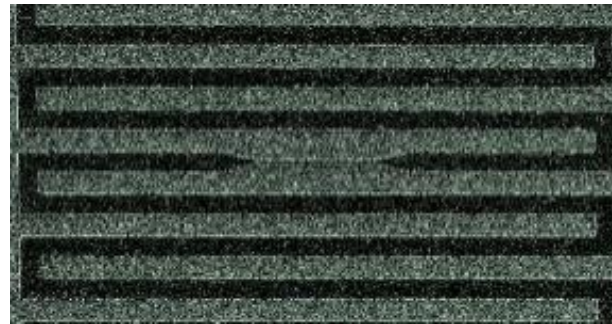
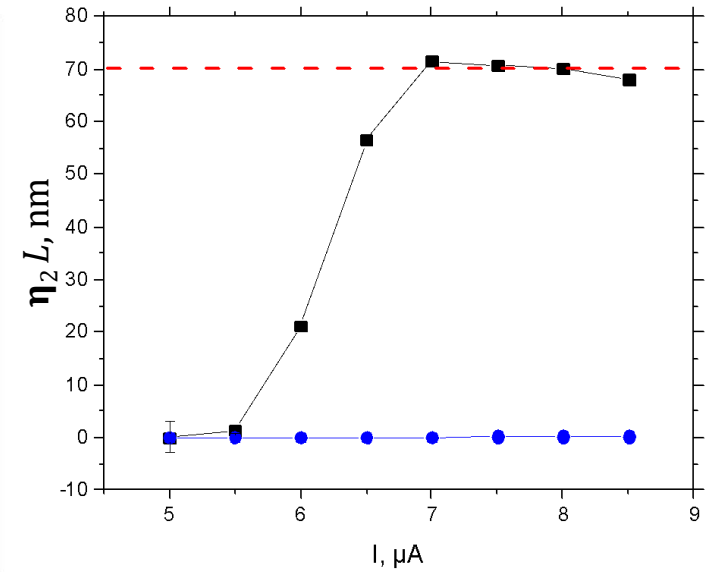
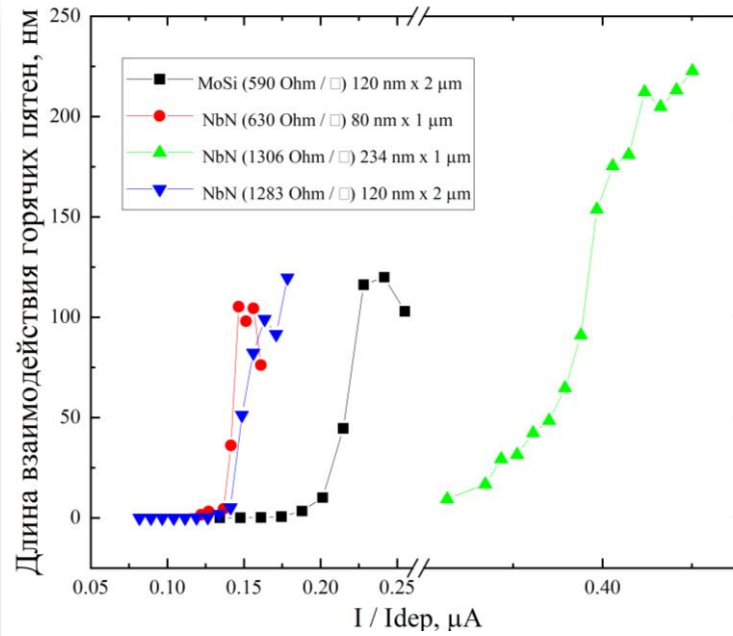


Сверхпроводниковый однофотонный детектор на оптическом волноводе

$$\eta_2^{\max} = s/L$$



Длина взаимодействия двух горячих пятен для узкой полоски, вписанной в меандр



Материал	Ширина (нм)	Длина (мкм)	$R_s(\Omega/\square)$	T_c	I_{dep} (мкА)
NbN	104	1	1283	6.3	8.74
NbN	168	1	1283	6.3	14.12
NbN	160	1	1283	6.3	13.45
NbN	256	1	1283	6.3	21.52
NbN	126	2	630	8	32.26
NbN	80	1	630	8	20.48
NbN	120	1	630	8	30.73
NbN	120	2	630	8	30.73
MoSi	150	5	590	3.6	11.36
MoSi	120	5	590	3.6	9.09
MoSi	120	2	590	3.6	9.09
NbN	234	1	1308	6	17.72
NbN	130	1	1308	6	9.84

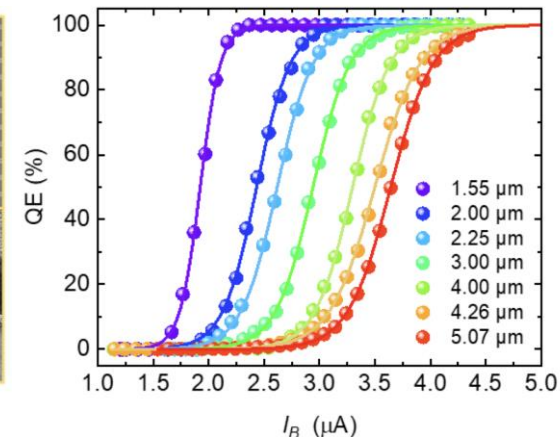
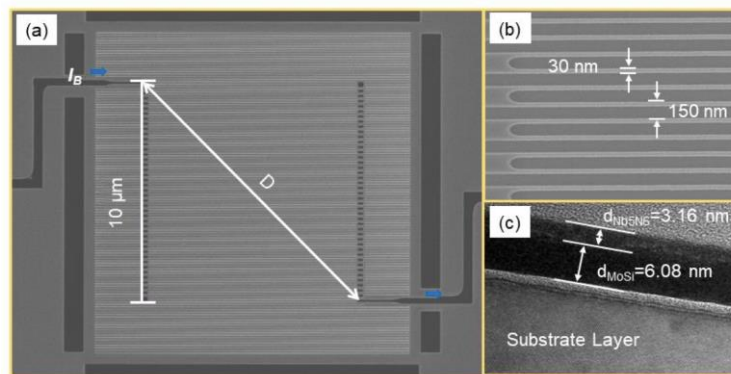
Основные результаты

- 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 полосы.
- Для томографии сверхпроводникового однофотонного детектора требуются короткие полосы. 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 .

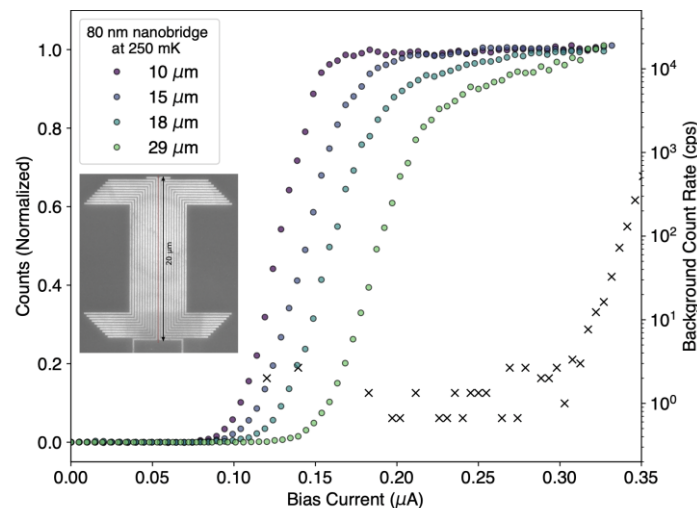


Спасибо за внимание!

Однофотонное детектирование в среднем ИК - диапазоне



Chen Q. et al. Mid-infrared single photon detector with superconductor Mo $_{80}$ Si $_{20}$ nanowire //arXiv preprint arXiv:2011.06699. – 2020.

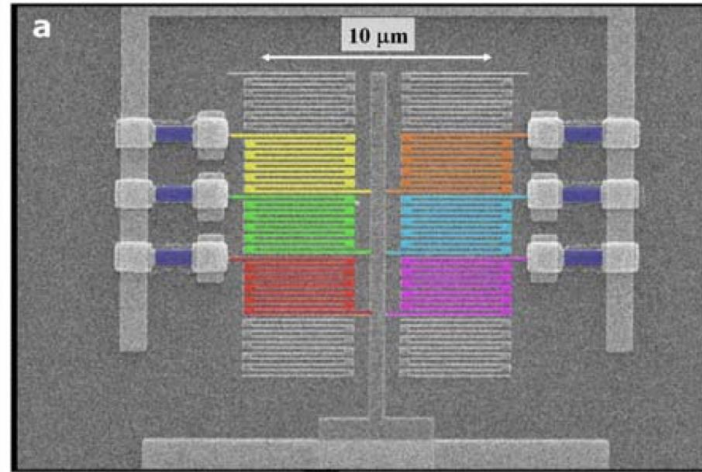


Taylor G. G. et al. Low-noise single-photon counting superconducting nanowire detectors at infrared wavelengths up to 29 μ m //arXiv preprint arXiv:2308.15631. – 2023.

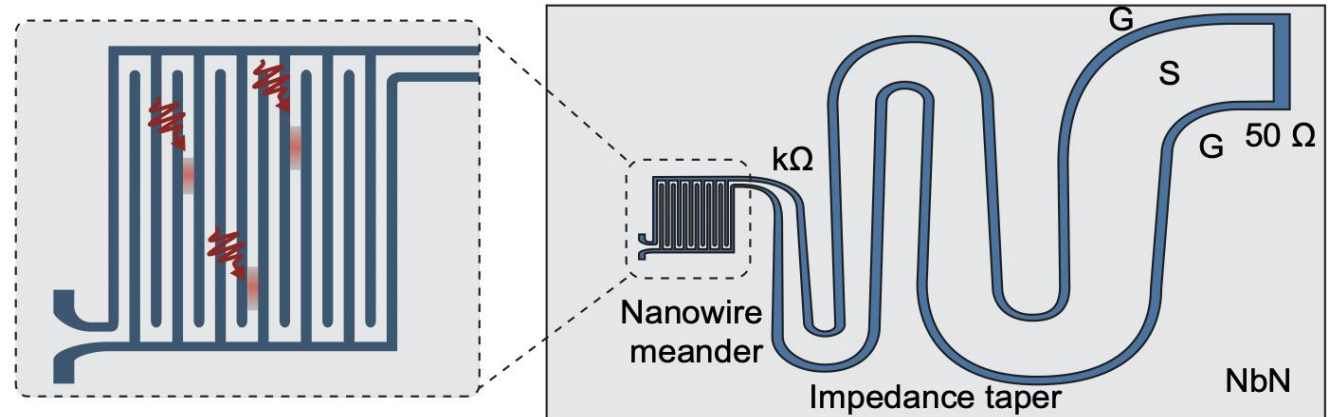
Основные применения:

1. Астрономические наблюдения
2. Спектроскопический анализ (газы, жидкости)
3. Биологические исследования

Photon Number Resolving



Divochiy A. et al.
Superconducting nanowire
photon-number-resolving
detector at
telecommunication
wavelengths //Nature
Photonics. – 2008. – T. 2. –
№. 5. – С. 302-306.

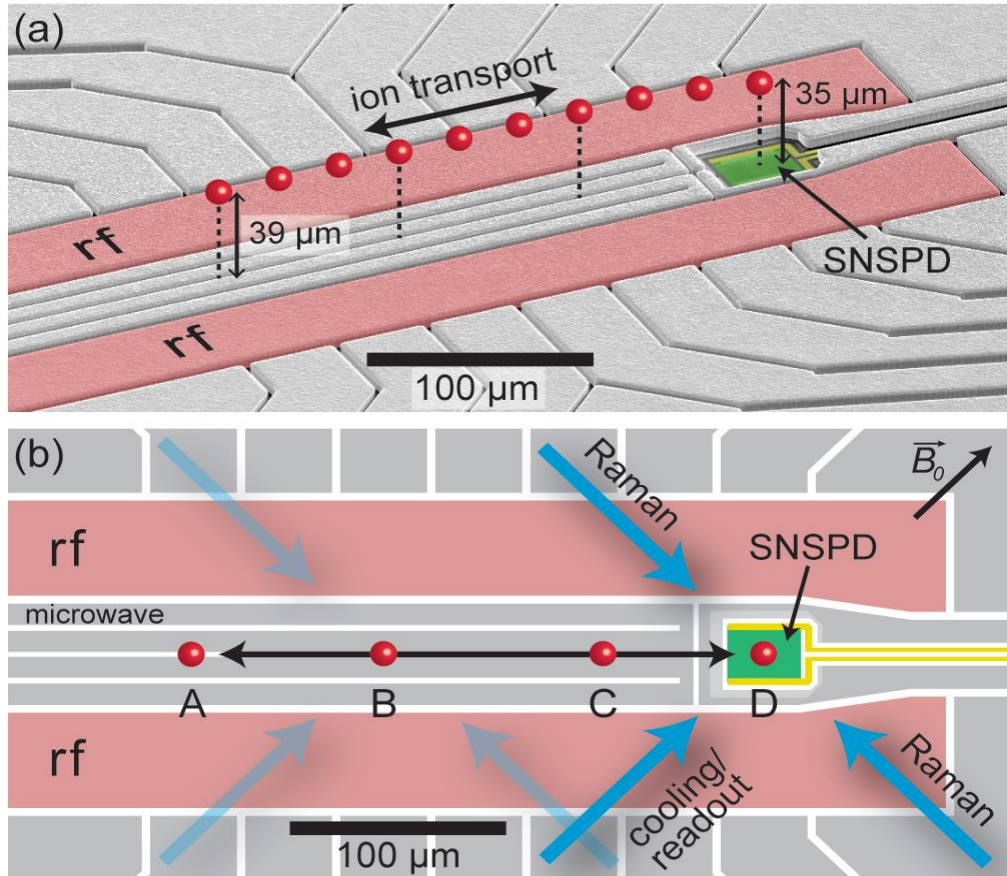


Zhu D. et al. Resolving photon numbers using a superconducting nanowire with impedance-matching taper //Nano Letters. – 2020. – T. 20. – №. 5. – С. 3858-3863.

Основные применения:

1. Квантовые коммуникации
2. Квантовые вычисления

Ионные ловушки



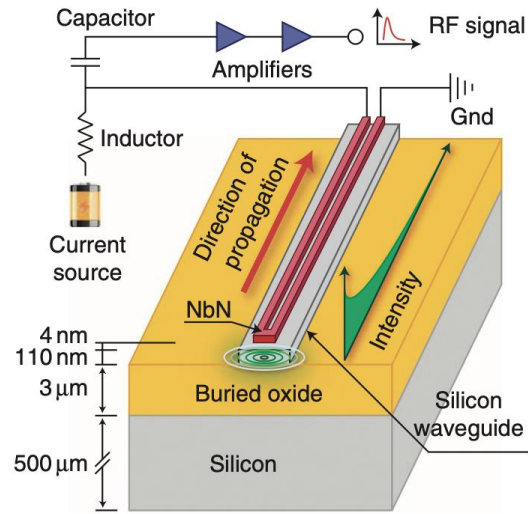
S. L. Todaro, V. B. Verma, K. C. McCormick, D. T. C. Allcock, R. P. Mirin, D. J. Wineland, S. W. Nam, A. C. Wilson, D. Leibfried, and D. H. Slichter

"State readout of a trapped Ion Qubit using a Trap-Integrated Superconducting Photon Detector", Physical Review Letters, 126 (1), 2021

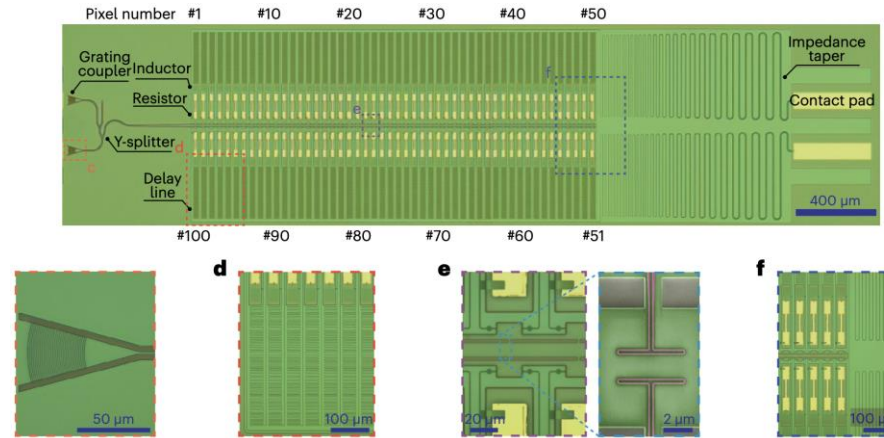
Основные применения:

1. Квантовые коммуникации
2. Квантовые вычисления
3. Атомные часы

Волноводные SNSPD



Pernice W. H. P. et al. High-speed and high-efficiency travelling wave single-photon detectors embedded in nanophotonic circuits //Nature communications. – 2012. – T. 3. – №. 1. – C. 1325.

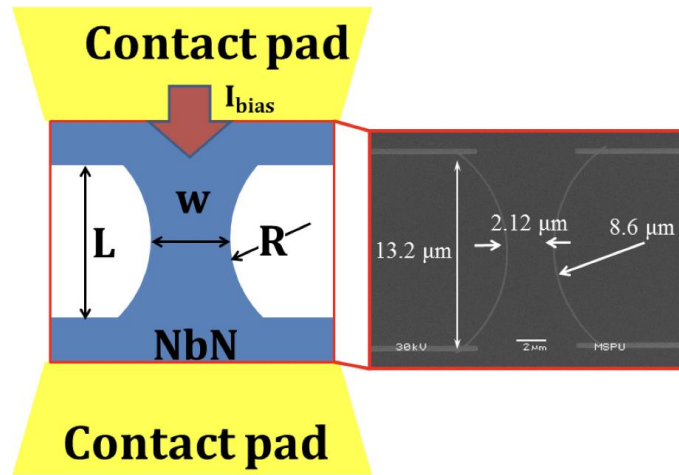


Cheng R. et al. A 100-pixel photon-number-resolving detector unveiling photon statistics //Nature Photonics. – 2023. – T. 17. – №. 1. – C. 112-119.

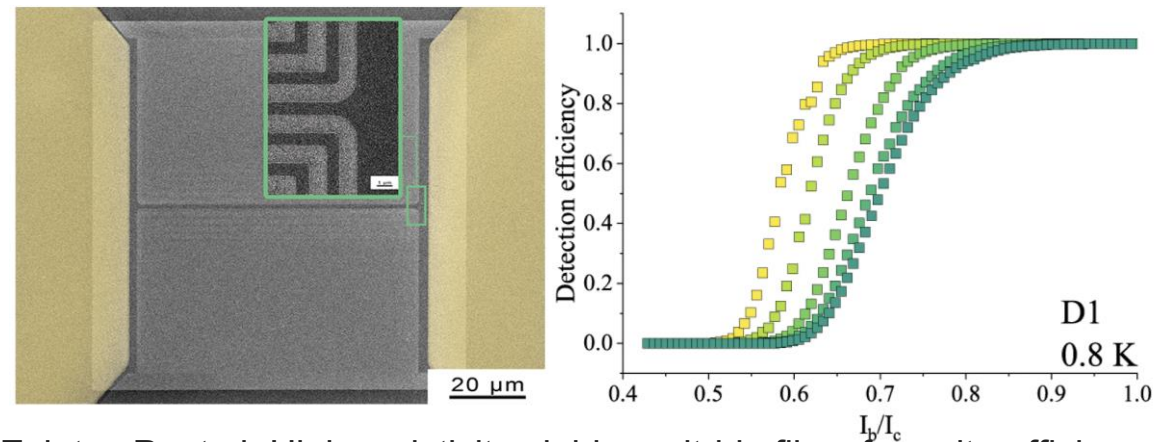
Основные применения:

1. Квантовые коммуникации
2. Квантовые вычисления
3. Спектроскопический анализ (газы, жидкости)
4. Биологические исследования

SMSPD



Korneeva Y. P. et al. Optical single-photon detection in micrometer-scale NbN bridges //Physical Review Applied. – 2018. – T. 9. – №. 6. – С. 064037.



Zolotov P. et al. High-resistivity niobium nitride films for unity-efficiency SMSPDs at telecom wavelengths and beyond //arXiv preprint arXiv:2301.00400. – 2023.

Основные применения:

1. Сверхбыстрые однофотонные детекторы
2. Детекторы огромной площади

Сравнение

	Темновые отсчеты	Эффективность детектирования	Джиттер	Спектральный диапазон
Сверхпроводниковый однофотонный детектор на основе аморфной пленки (MoSi)	0.01 с ⁻¹	98% (1550) 50% (2-10мкм)	10.3пс (1550нм) 76 пс (1550нм) 150 пс (1550нм)	0.3 -10 мкм
Сверхпроводниковый однофотонный детектор на основе поликристаллической пленки (NbN)	0.1 с ⁻¹	98% (1590) 99% (1350) 70% (2000)	4.4 пс (1550нм) 14.3 пс (2000 нм)	UV -4 мкм
TES	0.06	98% (800нм)	25нс (805нм) 4.1нс (1550нм)	<4 мкм