

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники

КУРСОВАЯ РАБОТА

Интерфейсные схемы сверхпроводниковых  
квантовых вычислителей

Выполнил студент 207 группы

Носков Егор Александрович

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Н. В. Кленов

“Работа допущена к защите”

---

Заведующий кафедрой атомной физики,  
физики плазмы и микроэлектроники  
профессор Рахимов Александр Турсунович

## Содержание

1) Введение.....	3
2) Актуальность.....	4
3) Глава 1. Матричная структура SNSPD (Счётчика фотонов)...	5
1. Архитектура и характеристики.....	5
2. Изготовление матриц детекторов.....	9
4) Глава 2. SFQ-схема для считывания импульсов на детекторе.....	10
5) Результаты и выводы.....	13
6) Литература.....	14

## Введение

На сегодняшний день квантовая физика во многом становится инженерной наукой: по всему миру уже осваивают технологии создания систем, допускающих адресное управление, как состояниями отдельных квантовых объектов, так и связей между ними. Идет экспериментальное исследование границ применимости теорий, разработанных для описания явлений микромира. В повседневную реальность все активнее входят квантовые эффекты, проявляющиеся в системах с макроскопически большим количеством частиц.

Примером макрообъектов, проявляющих квантовые свойства, являются сверхпроводники. Устройства на их основе широко используются во многих сферах человеческой деятельности: от изучения солнечного и космического излучения до проведения квантовых вычислений и обеспечения высокоскоростной связи со спутниками. [1]

Однако для того, чтобы извлекать информацию из квантовых объектов, требуется интерфейс связи между технологиями в квантовом режиме и классическом. В качестве примера такого устройства в данной работе будет рассмотрен Детектор Одиночных Фотонов на основе Сверхпроводящей Нанопроволоки (SNSPD). Этот прибор позволяет регистрировать одиночные фотоны инфракрасного диапазона, засекая импульсы напряжения, порождаемые вследствие разрушения области сверхпроводимости, а также способен извлекать их характеристики: энергию и количество. Но поскольку импульс напряжения составляет всего несколько мВ и имеет длительность в несколько десятков пикосекунд — требуется особая считывающая интерфейсная схема, чтобы считать и обработать импульс.

## Актуальность

Существует компактная архитектура многопиксельной матрицы SNSPD, имеющая четырехквадрантную геометрию (4-QD) с четырьмя выходными каналами. Эта конфигурация детектора эффективно устраняет недостатки обычной конфигурации, такие как большая временная задержка и перегрев нанопроволоки, а также объединяет важные функции, необходимые для связи в дальнем космосе, включая высокую эффективность обнаружения, повышенную скорость счета, способность определения количества фотонов и способность определения местоположения источника излучения. Эти преимущества объединены в компактном дизайне, оптимизированном для высокоскоростной и энергоэффективной оптической связи в свободном пространстве. Между тем, существует специализированный метод обработки сигналов для эффективного извлечения информации о фотонах из считываемых импульсов. Детектор имеет эффективность обнаружения 91,6%, а минимизированные временные джиттеры детектора составляют 78 пс (один фотон) и 21 пс (шесть фотонов). А вместо использования одного нанопровода в каждом квадранте детектора используется последовательная сборка, которая увеличивает общую скорость счета фотонов до 1,6 Гбит/с и дает возможность определения числа входящих фотонов от 1 до 24. Учитывая, что используется всего четыре выходных канала, эта архитектура намного компактнее обычных высокоскоростных многопиксельных SNSPD. [3]

Итак, целью данной работы является рассмотреть и проанализировать примеры квантово-классических интерфейсов, позволяющих рассматривать квантовые свойства объектов с классической точки зрения. Будет приведён обзор матричной структуры детектора, а также описание принципа работы RSFQ-схемы, позволяющей считывать и обрабатывать возникающие импульсы напряжения для выделения информации из фотонов.

# Глава 1. Матричная структура SNSPD.

## 1.1 Архитектура и характеристики:

Итак, начнём с принципа работы детектора одиночных фотонов. При попадании одного или нескольких фотонов на сверхпроводящий материал, находящийся в условиях температуры ниже точки сверхпроводимости, происходит локальное образование горячей области и разрушение сверхпроводящего состояния путём возникновения электронной лавины, а следовательно и возникновение ненулевого сопротивления. А ввиду поддержания в системе постоянного тока чуть ниже критического, в момент попадания фотона происходит импульс напряжения. [2]

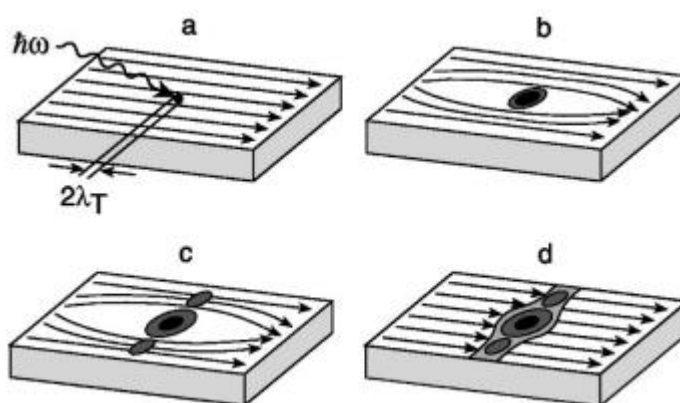


Рис.1 Схема механизма образования горячих областей при попадании фотона в ультратонкую пластинку сверхпроводника при температуре значительно ниже критической. Стрелки указывают направление течения сверхтока [2]

Он очень мал по величине и длительности: несколько милиВольт и десятки пикосекунд соответственно. Считать и обработать такой сигнал — отдельная проблема, но сначала разберёмся со структурой самого детектора.

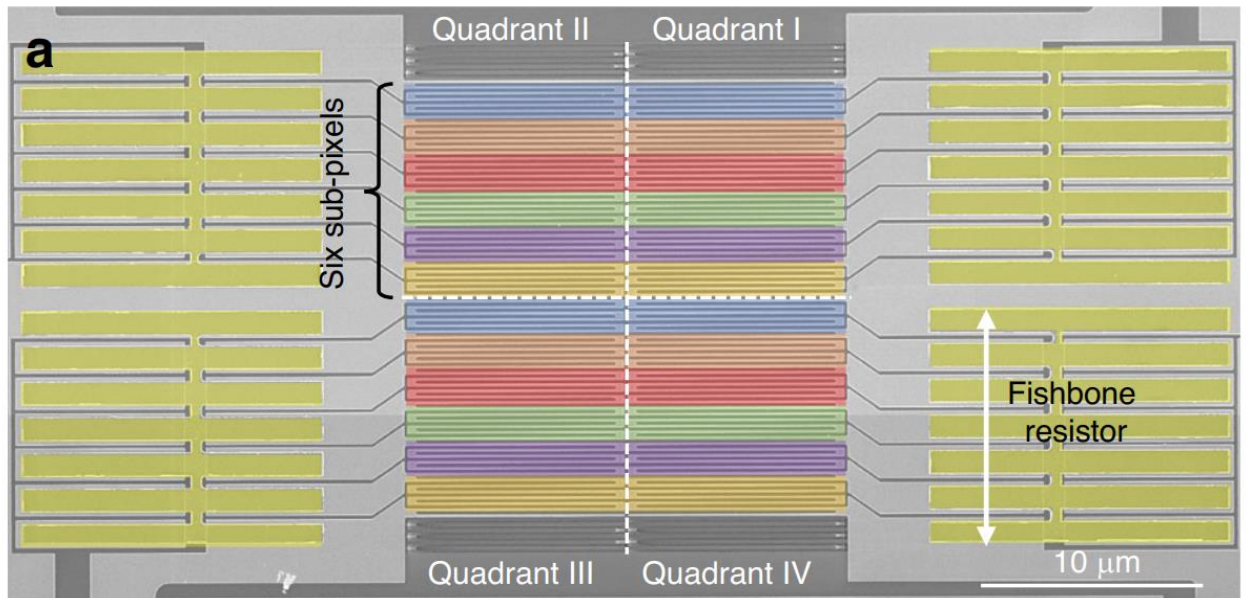


Рис.2а Изображение детектора, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа [3]

На Рис.1а показано изображение устройства, сделанное сканирующим электронным микроскопом. Это матрица  $2 \times 2$  обеспечивает возможность определения местоположения источника излучения, работая как четырёхквadrантный счётчик фотонов (4-QD счётчик). В каждом квадранте нанопроволока разделена на шесть пикселей, называемых суб-пикселями. Каждый суб-пиксель шунтируется резистором, выполненным в форме «рыбьего скелета», как показано на Рис.1а. По сравнению с полосковым резистором, резистор такой формы ускоряет тепловое охлаждение, предотвращая защелкивание нанопроволоки при высокой скорости счёта.

Рис.1с-f показывают эквивалентную схему детектора и результаты симуляции работы проволоки, полученные с помощью модели SPICE. [4]

Как показано на рис.1с  $I_B$  – это ток смещения,  $I_f$  и  $I_u$  – это токи через активированный и неактивированный суб-пиксели соответственно, а  $I_o$  – выходной ток.  $R_n$  - сопротивление нормального состояния суб-пиксиля,  $L_k$  – кинетическая индуктивность каждого суб-пикселя,  $R_p$  – шунтированное сопротивление.

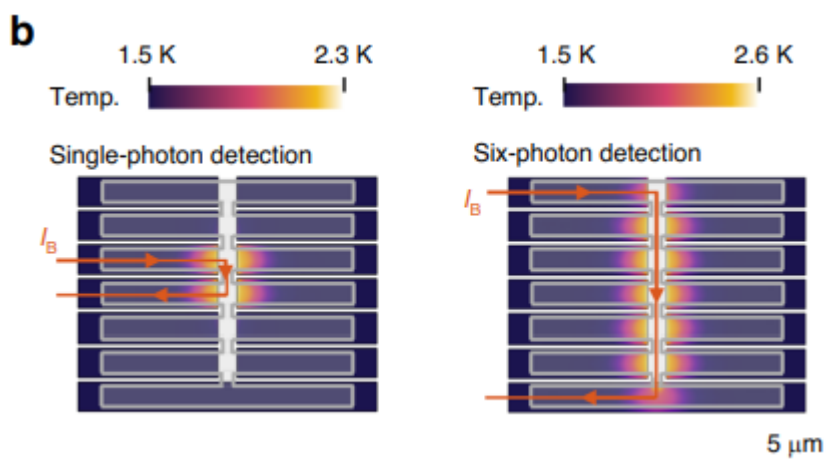


Рис2b Симуляция распределения температуры на поверхности нитрида ниобия, шунтированного «рыбьим скелетом» при активации одного субпикселя и шести соответственно [4]

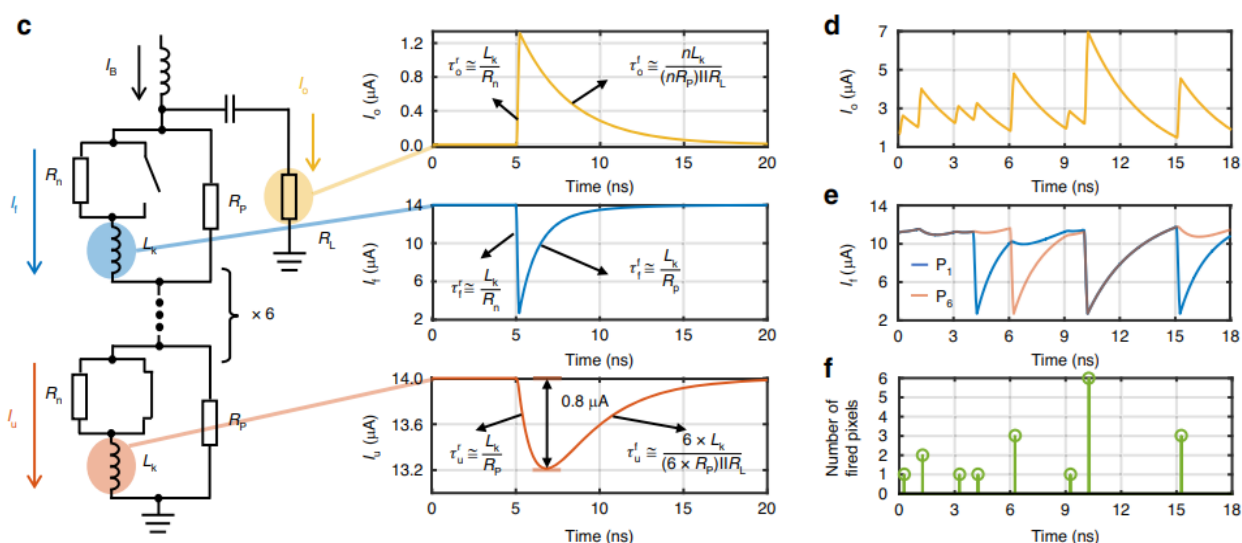


Рис.2 с — эквивалентная схема последовательного детектора с симуляциями тока на разных участках, d – переходный выходной ток при высокой скорости счёта, e – соответствующие переходные токи на суб-пикселях 1 и 6, f – количество активированных пикселей, извлеченное из выходного импульса детектора. [4]

Когда срабатывает один суб-пиксель, его время восстановления:

$\tau_f^f \cong L_k / R_p$ . Поскольку каждый суб-пиксель шунтируется резистором, когда происходит срабатывание - ток смещения всё равно может идти к остальным пикселям через резистор. Таким образом, шесть субпикселей могут обнаруживать фотоны почти последовательно. Примечательно, что, хотя выходной импульс по-прежнему имеет спадающий фронт, ограниченный общей индуктивностью, он не демонстрирует медленной скорости счета для всех суб-пикселей. Как показано на рис.1d,e, когда несколько фотонов последовательно падают на разные субпиксели, их выходные токи накапливаются, в то время как неактивированные субпиксели все еще

остаются в состоянии ожидания с немного уменьшенным током смещения.

По сравнению с матрицей SNSPD, в которой пиксели питаются и считываются отдельными схемами, в последовательной матрице SNSPD все пиксели питаются и считываются по общей линии, что обеспечивает компактную конструкцию приемника и снижает тепловые потери криостата. Однако существует конфликт между амплитудой импульса  $V_{amp}$  и количеством суб-пикселей  $n$ . Амплитуда импульсов однофотонного обнаружения может быть определена по формуле[3]:

$$V_{amp} = (I_B - I_{min}) \cdot \frac{R_p}{\left(1 + n \cdot \frac{R_p}{R_L}\right)}$$

Здесь  $I_{min}$  – минимальный ток, при котором ток через активированный нанопровод падает,  $R_L$  – выходное сопротивление. Уменьшение амплитуды импульса приводит к уменьшению отношения сигнал/шум, тем самым снижая точность определения временного джиттера и числа фотонов. Хотя субпиксели подключены последовательно, возникают лишь незначительные перекрестные помехи по току из-за шунтирования активированного пикселя, как показано на рис.1с

Также в исследовании [3] была охарактеризована общая скорость счета всего детектора, результаты представлены на рис.2. Поскольку каждый квадрант может выдавать величину импульса, пропорциональную числу падающих фотонов, а когерентный лазерный импульс имеет распределение Пуассона для числа испускаемых фотонов, существует две метрики, характеризующие скорость счета: скорость счета фотонов  $CR_{phn}$  и скорость счёта импульсов  $CR_{pls}$ . Первая подсчитывает только количество выходных импульсов, в то время как вторая подсчитывает количество фотонов, представленных каждым выходным импульсом.



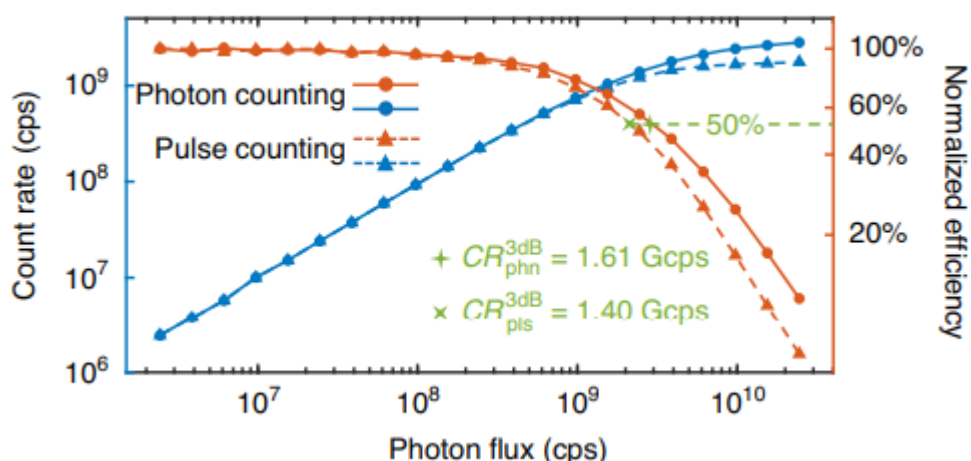


Рис.3 Слева по оси у нанесены зависимости скорости счета фотонов и импульсов всего детектора (синие кривые) от потока падающих фотонов. Справа по оси у нанесены соответствующие нормальные значения эффективности обнаружения (красные кривые) [3]

При частоте повторения импульсов лазера 1 ГГц и изменении интенсивности потока падающих фотонов, при сильных затуханиях среднее число фотонов в импульсе  $\mu$  намного меньше единицы. Следовательно, падающие фотоны представляют собой почти однофотонные события, а  $CR_{phn}$  почти равен  $CR_{pls}$ . По мере увеличения числа многофотонных событий,  $CR_{phn}$  становится выше, чем  $CR_{pls}$ . Когда эффективность детектирования фотонов и импульсов падает на 3 дБ, соответствующие скорости счета составляют  $CR_{phn}^{3dB} = 1,61$  Гсч/с и  $CR_{pls}^{3dB} = 1,40$  Гсч/с, как показано на рис.2.

Таким образом, детектор позволяет с высокой эффективностью определять частоту падающих фотонов (при частотах до 1.5 ГГц), но и оценивать эффективность подсчёта при более высоких частотах.

## 1.2 Изготовление матриц детекторов

В одном из приведённых исследований [3] предложен вариант изготовления проволоки детектора из плёнки нитрида ниобия NbN толщиной 5нм. Причина выбора состоит в том, что нитрид ниобия обладает более низкой кинетической индуктивностью и быстрее термически охлаждается по сравнению с другими аморфными плёнками, как силицид вольфрама WSi или силицид молибдена MoSi. [5]

Сама матрица же матрица занимала площадь  $20\text{мкм} \times 20\text{мкм}$ , а нанопровода составляли  $60\text{мкм}$  в длину и  $90\text{нм}$  в толщину, что давало каждому

суб-пикселю индуктивность  $L_k = 50$  нГн. Шунтированное сопротивление составляло  $R_p = 50$  Ом, что увеличивало время восстановления каждого суб-пикселя до 1 нс, что лишь немногим больше времени, позволяющего установить максимальную скорость счёта. Также шунтирующие резисторы были помещены как можно ближе к краям нанопроволоки, чтобы избежать паразитирующей индуктивности соединительных проводов.

Говоря о некоторых предварительных этапах обработки сигнала, 4-QD структура матрицы имеет 4 выходных канала. Выходной импульс  $r_n(t)$  является суперпозицией сигнала  $s_n(t)$  и шума  $g_n(t)$ , что может быть выражено следующим выражением:

$$r_n(t) = s_n(t) + g_n(t)$$

Импульс обнаружения фотонов  $s_n(t)$  же может быть выражен как двойная экспонента:

$$s_n(t) = A \cdot (e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}})$$

Здесь  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - времена нарастания и спада импульса соответственно.

Сложность, связанная с обработкой и кодированием подобных сигналов, представляет собой серьезную проблему при технической реализации устройства. Весь процесс может быть выполнен на программируемой пользователем плате с быстрыми аналого-цифровыми преобразователями для оцифровки и обработки импульсов обнаружения в режиме реального времени. Об одной из схем, позволяющей проводить считывание и обработку сигнала детектора, пойдёт речь в следующей главе.

## **Глава 2. SFQ-схема для считывания импульсов на детекторе**

Для начала разберём принцип работы SFQ-схем. Название происходит от single flux quantum – сверхпроводниковой одноквантовой логики. В отличие от полупроводниковых схем, логическими элементами здесь являются не

транзисторы, а джозефсоновские переходы — тонкие диэлектрические наслоения между двумя сверхпроводниками, через которые протекает туннельный ток. Джозефсоновский переход является нелинейным элементом, что позволяет использовать его в специфических задач, например для измерения очень малых по величине магнитных полей.

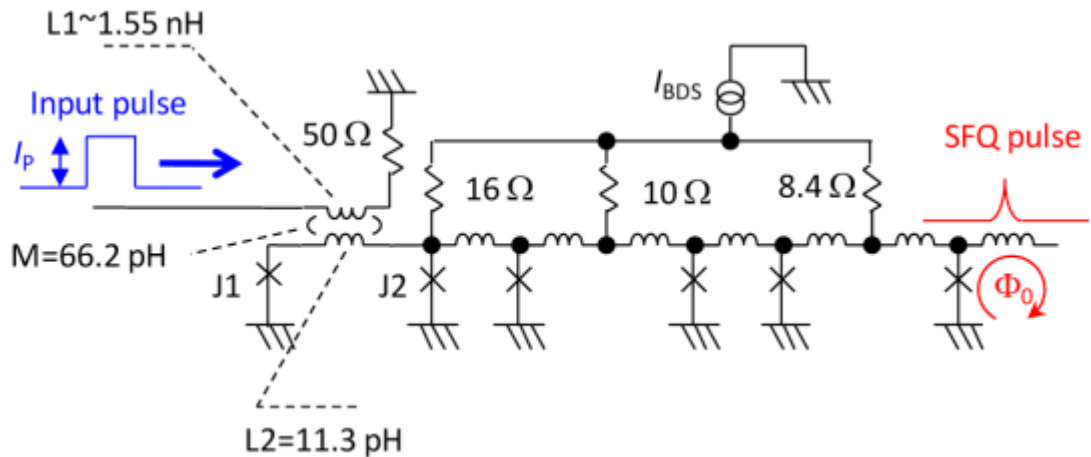


Рис.4 Эквивалентная схема SFQ-конвертера [6]

На рисунке 1 показана эквивалентная схема SFQ-преобразователя. Его работа заключается в следующем. Сначала джозефсоновский переход J2 переключается на нарастающем фронте входного импульса, генерируя SFQ-импульс, распространяющийся вправо. В то же время в сверхпроводящем контуре содержится еще один SFQ-конвертер, включающий элемент индуктивности L2, который генерирует ток, циркулирующий против часовой стрелки в контуре L2, и предотвращает двойное переключение J2 даже на пиковом уровне входного импульса. При падении фронта входного импульса сохраненный SFQ-импульс в контуре L2 аннулируется переключением J1, и схема возвращается в исходное состояние. Таким образом, входной импульс преобразуется в одиночный SFQ-импульс. Именно это свойство схемы в совокупности с высокой чувствительностью позволяет успешно применять её при работе с детектором одиночных фотонов.

Говоря о чувствительности, от схемы требуется достаточно низкий временной джиттер — то есть достаточно низкая временная неопределённость

сигнала. В исследовании [6] приводятся следующие данные об этом.

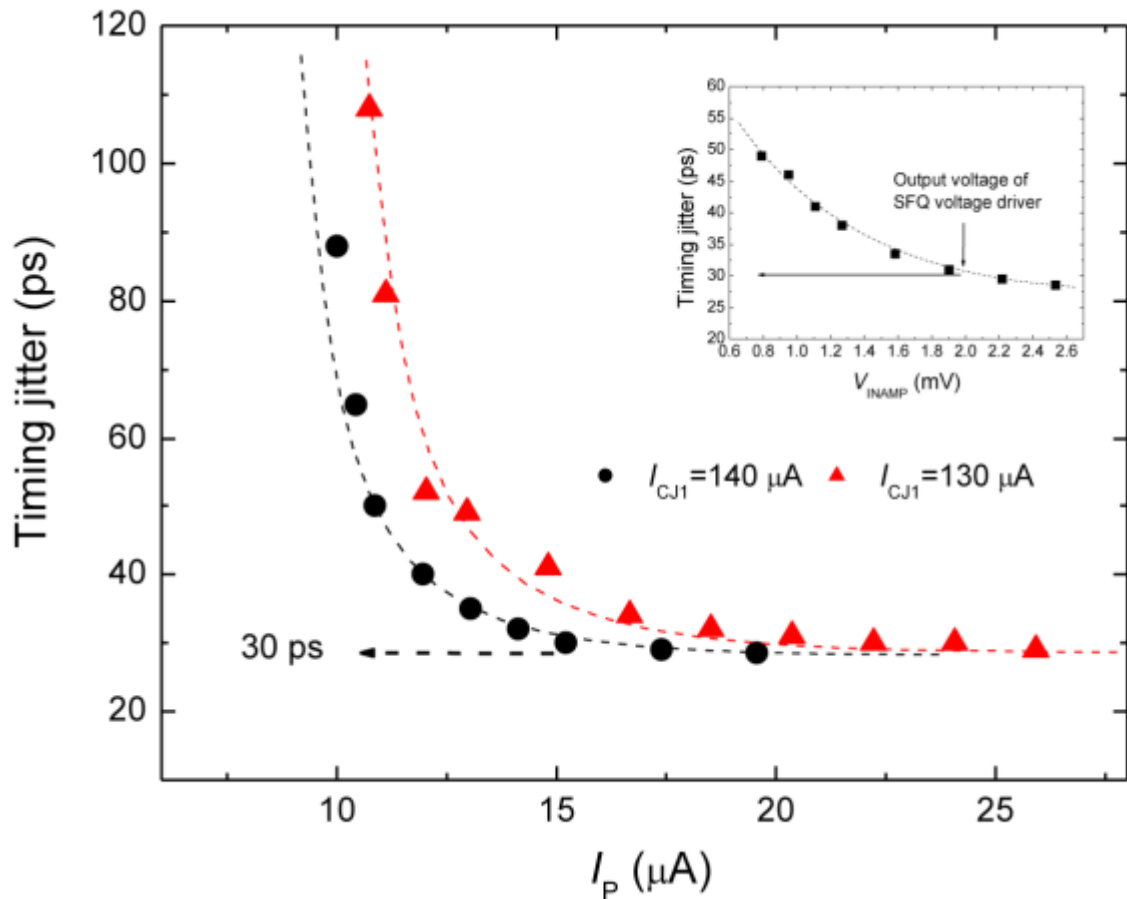


Рис.5 Зависимость джиттера от входного тока при токах на джозефсоновском контакте  $J_1$  130 и 140 мкА [6]

На рисунке 4 показана зависимость временного джиттера от входного тока. Джиттер синхронизации уменьшается по мере того, как ток возрастает и достигает минимального значения около 30 пс при достаточно большом его показателе. Чтобы определить причину существования этого остаточного джиттера длительностью 30 пс, можно исключить схему считывания SFQ и измерить джиттер системы. Результат показан на вставке к рис. 4. С другой стороны, наблюдается быстрое увеличение джиттера при значении  $I_p = 15$  мкА для тока  $I_{J1} = 140$  мкА и  $I_p = 20$  мкА для тока  $I_{J1} = 150$  мкА. Это указывает на то, что при входных токах, превышающих 20 мкА, в первом режиме схема отлично подходит для работы с счётчиком фотонов, характерный выходной ток

которого составляет порядка 20 мкА, что вызывает джиттер около 60 пс.

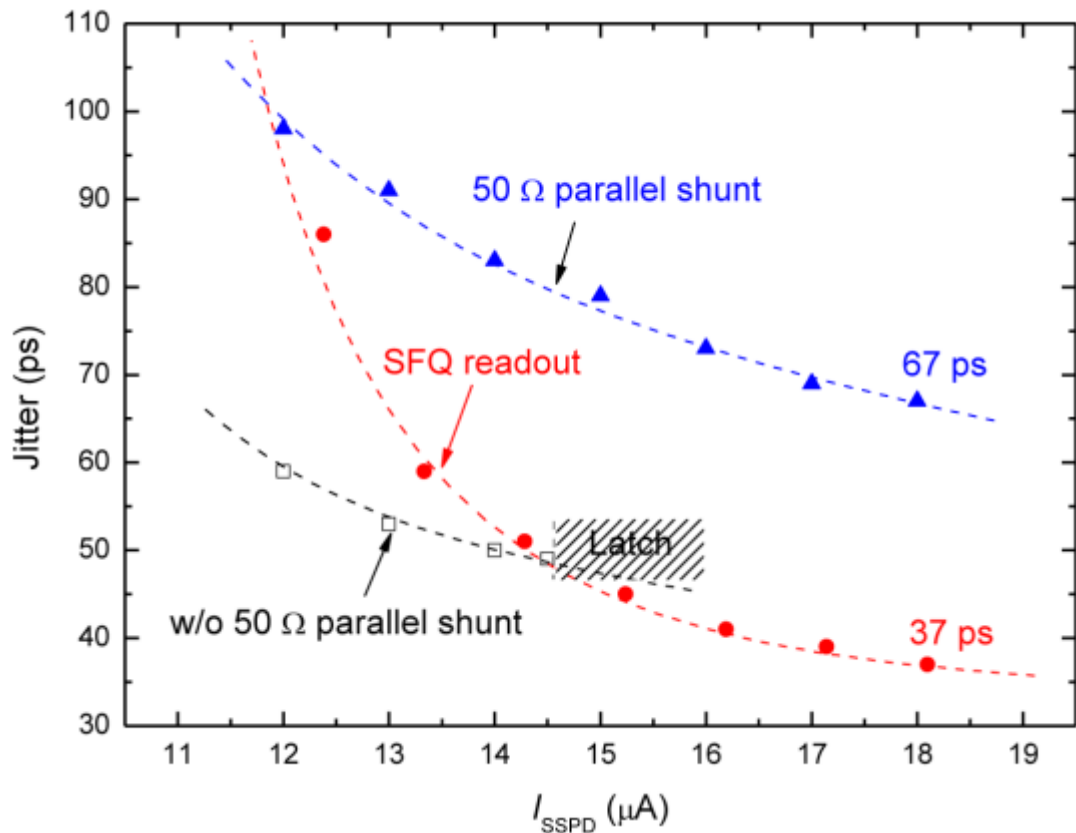


Рис.6 Зависимость полуширины джиттера SSPD (счётчика одиночных фотонов) от выходного тока при считывании шунтированным сопротивлением 50 Ом, без него и с помощью SFQ-схемы [6]

На рис. 5 также представлена зависимость джиттера при считывании со счётчика фотонов SSPD с помощью шунтированного сопротивления, без него, а также с помощью обозреваемой схемы. Подытоживая, можно сказать, что схема, основанная на джозефсоновских переходах, отлично подходит для таких специфических задач, ввиду высокой чувствительности и сравнительно малой неопределенности в измерении.

## Результаты и Выводы

В ходе работы был дан качественный обзор архитектуры и принципа работы детектора одиночных фотонов на основе сверхпроводящей нанопроволоки (SNSPD), а также приведён обзор SFQ-схемы для считывания

и обработки сигнала прибора.

Характеристики описанной в Главе 1 технологии, по результатам многих исследований [3][7], могут помочь решить некоторые проблемы лазерной связи Земли с космосом, а также позволят вести эффективное наблюдение за космическим излучением. Принцип считывающей схемы же позволит сравнительно простыми средствами извлекать информацию из фотонов, представляя собой, по сути, применение квантово-классического интерфейса.

В дальнейшем автор надеется продолжить работу в этом направлении на более глубоком уровне — с погружением в теорию и эксперимент. К примеру, рассмотрением иных возможностей реализации квантово-классических интерфейсных схем.

## Литература

[1] Н.В. Кленов, А.Е. Щеголев и др., Физические основы функционирования макроскопических квантовых устройств, Москва, 2021

[2] G. N. Gol'tsman, O. Okunev, Picosecond superconducting single-photon optical detector, Department of Physics, Moscow State Pedagogical University, Moscow 119435, Russia

[3] Hao, H., Zhao, QY., Huang, YH. *et al.* A compact multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector array supporting gigabit space-to-ground communications. *Light Sci Appl* **13**, 25 (2024)

[4] Berggren, K. K. et al. A superconducting nanowire can be modeled by using SPICE. *Supercond. Sci. Technol.* **31**, 055010 (2018).

[5] Marsili, F. et al. Hotspot relaxation dynamics in a current-carrying superconductor. *Phys. Rev. B* **93**, 094518 (2016)

[6] Hirotaka Terai. Taro Yamashita et al. Low-jitter single flux quantum signal readout from superconducting single photon detector, 27 August 2012 / Vol. 20, No. 18/ OPTICS EXPRESS 20123

[7] Grein, M. E. et al. An optical receiver for the Lunar Laser Communication Demonstration based on photon-counting superconducting nanowires. *Proc. SPIE* **9492**, Advanced Photon Counting Techniques IX. (SPIE, Baltimore, 2015) 949208.