

**Схема регистрации выходного сигнала на базе микроволнового рефлектометра для сверхпроводникового счетчика одиночных фотонов***А.С. Шураков<sup>1,2</sup>, П.В. Михалев<sup>1,2</sup>, А.А. Корнеев<sup>1,2</sup>, Г.Н. Гольцман<sup>2,3</sup>*<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

В данной работе мы представляем результаты разработки схемы регистрации выходного сигнала сверхпроводникового счетчика одиночных фотонов (SSPD) при помощи микроволновой рефлектометрии. Используемые в работе SSPD устройства были изготовлены из тонкой пленки NbN, осажденной на подложку из высокоомного Si. Зондирующий СВЧ сигнал НГ малой амплитуды был использован для регистрации отклика SSPD детектора на сигнальное излучение инфракрасного диапазона. Мы использовали светодиод с максимумом спектрального распределения около 1,26 мкм и шириной спектра излучения 0,08 мкм в качестве сигнального источника. Эффективность детектирования и спектр выходного сигнала SSPD детектора были изучены как функция параметров зондирующего СВЧ сигнала.

К настоящему моменту сверхпроводниковые счетчики одиночных фотонов нашли широкое применение в квантовой оптике при изучении свойств однофотонных источников, в квантовой криптографии, медицине и других областях науки и техники. В отличие от своих конкурентов - лавинных фотодиодов и фотоумножителей - SSPD сочетают высокую квантовую эффективность (до 93 %) [1], низкие темновые отсчеты и высокое временное разрешение ~16 пс [2]. Использование матрицы подобных устройств позволяет существенно расширить список потенциально решаемых задач: матрица SSPD может быть использована в системе высокоскоростной телекоммуникации [3], а также для получения изображений и спектров при интеграции с конфокальным микроскопом и дифракционным спектрометром соответственно. В настоящий момент существует несколько предложенных вариантов реализации мультиплексирования матриц SSPD [4-6], однако существующие разработки оставляют поле для дальнейшей оптимизации методов и технических решений. В данной работе мы представляем один из возможных вариантов - метод регистрации отклика SSPD детектора по средством микроволновой рефлектометрии, который уже был ранее апробирован нами на детекторе на основе эффекта электронного разогрева в сверхпроводниковых пленках в нормальном состоянии [7].

Используемые в процессе выполнения работ сверхпроводниковые счетчики одиночных фотонов были изготовлены из тонкой пленки нитрида ниобия, осажденной методом магнетронного распыления на постоянном токе на подложку из высокоомного кремния. По итогам структурирования пленок NbN средствами электронной литографии и плазмохимического травления сверхпроводниковым структурам была придана форма меандра с шириной полосы 110 нм, зазором между полосками 90 нм и размером в плане  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>. SSPD устройства обладали критической температурой около 10,2 К с шириной перехода 0,6 К, критическим током ~25 мкА и нормальным сопротивлением в диапазоне 460 - 500 кОм.

Для охлаждения SSPD детекторов мы использовали систему, состоящую из криогенной вставки и наполненного жидким гелием сосуда Дьюара (рис. 1). Детектор крепился на холодном пальце вставки, что обеспечивало его охлаждение до температуры ~4,2 К. Выход SSPD был соединен с направленным ответвителем на связанных полосках, необходимым для ввода зондирующего СВЧ излучения малой мощности с синтезатора частоты. Отклик детектора в сочетании с отраженным зондирующим сигналом далее проходил через высокочастотное плечо широкополосного адаптера смещения и подавался на усилительную цепочку комнатной температуры.

В силу природы формирования отклика SSPD в момент регистрации подаваемого через оптоволокно ИК излучения переключается из сверхпроводящего состояния в нормальное: в нормальном состоянии выходной импеданс детектора складывается из нормального сопротивления,  $R_n$ , и кинетической индуктивности,  $L_k$ ; в то время как в сверхпроводящем состоянии присутствует лишь  $L_k$ . Изменение импеданса транслируется в изменение коэффициента отражения детектора. Таким образом, отраженный от детектора зондирующий СВЧ сигнал меняет свою амплитуду.

На рис. 2 приведены осциллограммы отклика SSPD детектора на сигнальное излучение длины волны 1,26 мкм, аппроксимированные функцией вида  $V_{out}(t) = V_0 \cdot e^{-t \frac{R_n + 50\Omega}{L_k}}$ , где  $V_0$  - амплитуда импульса напряжения на выходе SSPD в момент его переключения из сверхпроводящего состояния в нормальное [8]. Кривые были получены при токе смещения образца  $I_{bias} = 21,9$  мкА, что составляет около 88 % по отношению к его критическому току. Как видно из рис. 2, изменение мощности зондирующего СВЧ излучения,  $P_{MW}$ , в диапазоне от 10 до 100 нВт не приводит к изменению времен нарастания и релаксации импульса напряжения на выходе детектора, а амплитуда гармонической составляющей в выходном сигнале значительно меньше, чем  $V_0$ . Частота зондирующего сигнала была выбрана вблизи значения 0,9 ГГц, чтобы, с одной стороны, находится в пределах полосы усиления комнатной усилительной цепочки, а, с другой стороны, чтобы во время релаксации импульса напряжения укладывалось несколько периодов СВЧ сигнала.

Для измерения эффективности детектирования SSPD выходной сигнал детектора подавался на многофункциональный счетчик. Мы использовали стандартную методику измерения, в рамках которой были экспериментально получены зависимости количества темновых,  $N_d$ , и световых,  $N_l$ , переключений SSPD от рабочего тока смещения в диапазоне 18 - 24 мкА при отсутствии и подаче на детектор зондирующего СВЧ сигнала малой амплитуды (рис. 3). Уровень компарации счетчика был установлен вблизи 60 мВ, чтобы исключить влияние эффекта зарядки-разрядки проходной емкости в адаптере смещения при изменении числа регистрируемых отсчетов в единицу времени. Переменная гармоническая составляющая, соответствующая отраженному от SSPD зондирующему СВЧ сигналу, также не вносила вклад в количество измеряемых отсчетов в силу выбранного уровня компарации счетчика. Из рис. 3 видно, что наличие мощности зондирующего СВЧ излучения приводит к увеличению темновых и световых отсчетов детектора. Экспериментальная зависимость темновых отсчетов SSPD от  $P_{MW}$  при фиксированном значении тока смещения детектора представлена на рис. 4. В данной рабочей точке, где  $I_{bias} = 21,9$  мкА, SSPD обладает собственными темновыми отсчетами  $\sim 10$  с<sup>-1</sup>, таким образом, при мощностях  $P_{MW} \leq 20$  нВт вклада наведенных зондирующим сигналом темновых отсчетов в системные характеристики детектора практически не наблюдается.

Относительная эффективность детектирования,  $DE_{rel}$ , SSPD может быть рассчитана по формуле  $DE_{rel} = \frac{N_l - N_d}{N_{lmax}}$ . Как следует из рис. 5, подача на детектор зондирующего СВЧ сигнала малой мощности, соответствующего  $P_{MW} = 100$  нВт, не приводит к ухудшению его эффективности детектирования. Данное значение мощности было выбрано, в том числе, для обеспечения необходимого соотношения сигнал-шум при регистрации отклика детектора методом микроволновой рефлектометрии.

В наших измерениях приемная часть СВЧ рефлектометра состояла из двух основных компонентов: квадратичного СВЧ детектора и синхронного детектора, опорный сигнал которого использовался для амплитудной модуляции (АМ) выходной мощности светодиода, соединенного с оптическим входом SSPD при помощи оптоволокна. В работе мы использовали слабый источник сигнала НГ в виде светодиода с максимумом спектрального распределения около 1,26 мкм и шириной спектра излучения 0,08 мкм, сигнальная ИК мощность не превышала 0,1 пВт. Вероятность регистрации фотонов SSPD детектором в каждый момент времени подчиняется закону распределения Пуассона  $P(n) = \frac{\mu^n \cdot e^{-\mu}}{n!}$ , где  $\mu$  - среднее число падающих на образец в единицу времени фотонов,  $n$  - число регистрируемых фотонов. Таким образом, формирование отклика SSPD детектора на сигнальное излучение является процессом стохастическим. Однако, в рамках наших измерений выходная мощность ИК источника была амплитудно-модулирована опорным сигналом синхронного детектора (рис. 1), что привело к появлению периодичности во временной зависимости числа световых отсчетов SSPD в единицу времени. Таким образом, АМ сигнальное излучение приводит к АМ выходному импедансу детектора, что транслируется в модуляцию его коэффициента отражения. В результате формируется АМ отклик детектора на сигнальное ИК излучение на частоте (несущей) зондирующего СВЧ сигнала. Экспериментальная зависимость данного отклика от числа отсчетов SSPD в единицу времени приведена на рис. 6. Зависимость носит линейный характер. Измерения были произведены в диапазоне отсчетов детектора от 1 до 150000 с<sup>-1</sup> в рамках однофотонного режима работы SSPD.

Шумовой порог СВЧ рефлектометра составил  $\sim 0,3$  мкВ, что соответствует регистрации 90 фотонов в единицу времени. Энергетическое разрешение может быть в дальнейшем улучшено при использовании интегрированного с SSPD на чипе полоскового преобразователя импеданса и малошумящего усилительного каскада, в частности, криогенного усилителя на основе транзистора с

высокой подвижностью электронов. Частотное разделение элементов матричного приемника в рамках схемы микроволновой рефлектометрии возможно при наличии СВЧ фильтров, способствующих попаданию зондирующего сигнала определенной частоты в соответствующий элемент матрицы и препятствующих его утечке в остальные элементы.

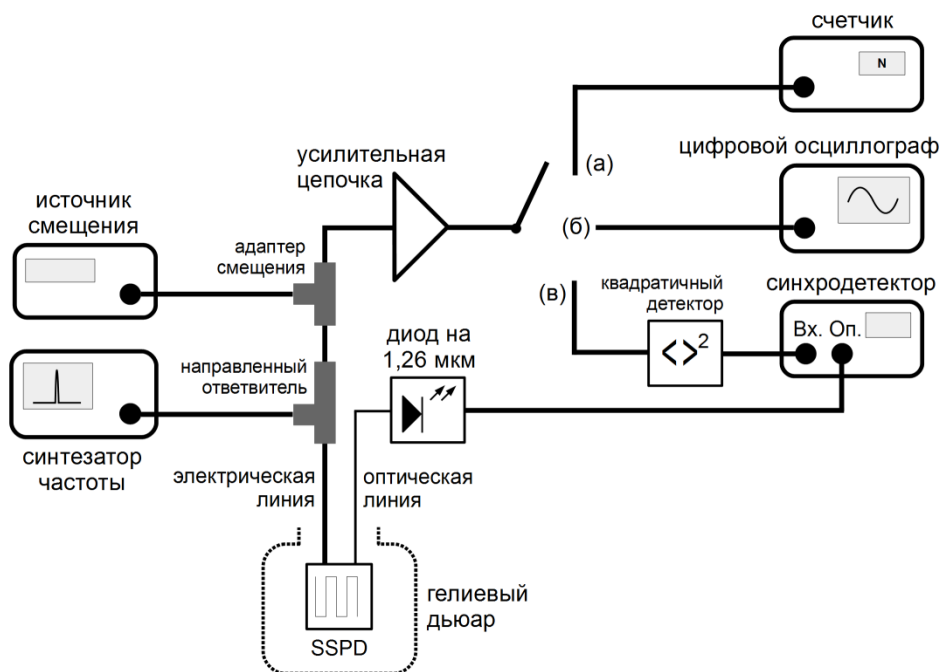


Рис. 1. Экспериментальная установка. Позиция ключа определяет способ регистрации выходного сигнала приемной системы следующим образом: а) прямое измерение числа отсчетов на выходе SSPD, б) получение осциллограммы выходного сигнала, в) измерение числа отсчетов на выходе SSPD при помощи микроволнового рефлектометра.

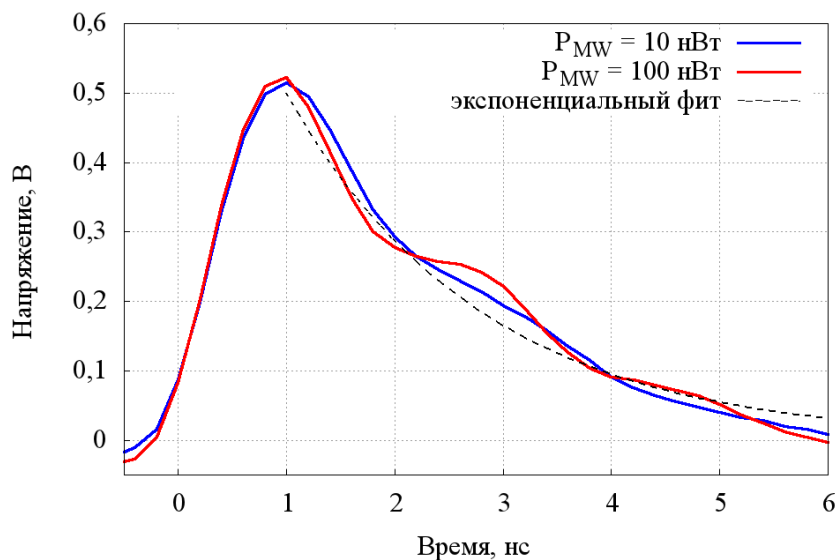


Рис. 2. Осциллограммы выходного сигнала SSPD детектора, полученные при подаче на детектор зондирующего СВЧ излучения различной мощности.

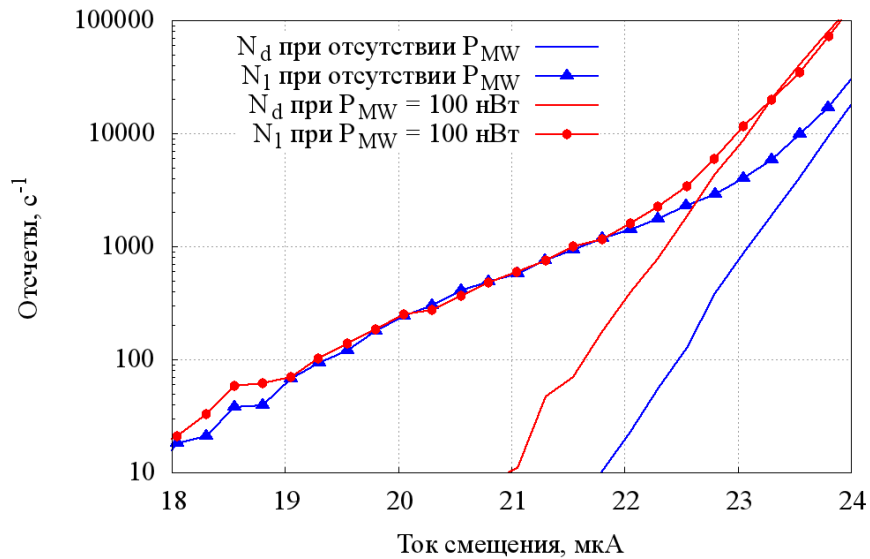


Рис. 3. Зависимость темновых и световых отсчетов SSPD от тока смещения в случае отсутствия и наличия зондирующего СВЧ сигнала малой амплитуды.

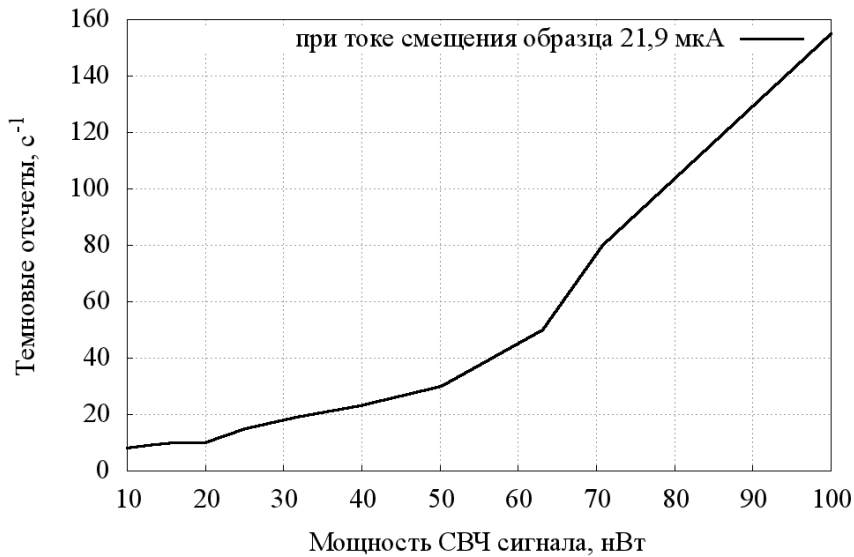


Рис. 4. Темновые отсчеты SSPD детектора как функция мощности зондирующего СВЧ излучения.

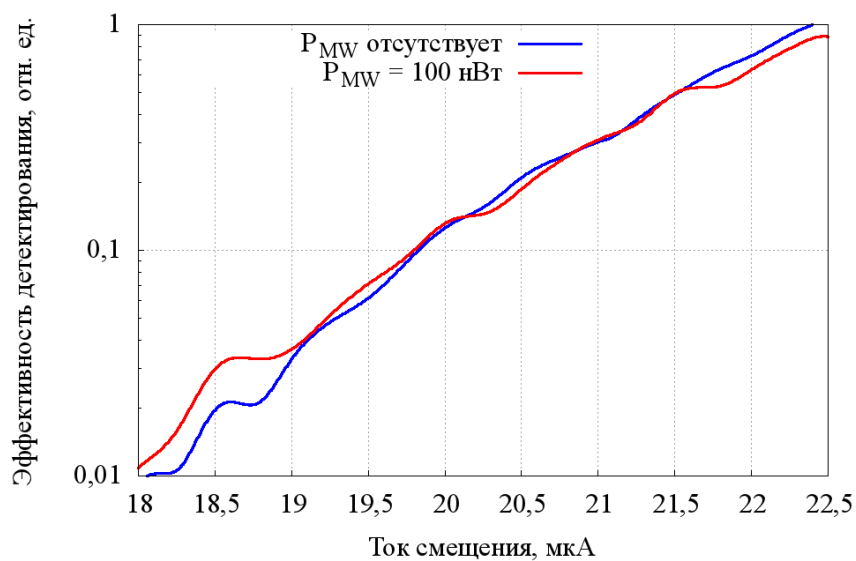


Рис. 5. Зависимость относительной эффективности детектирования SSPD от тока смещения в случае отсутствия и наличия зондирующего СВЧ сигнала малой амплитуды.

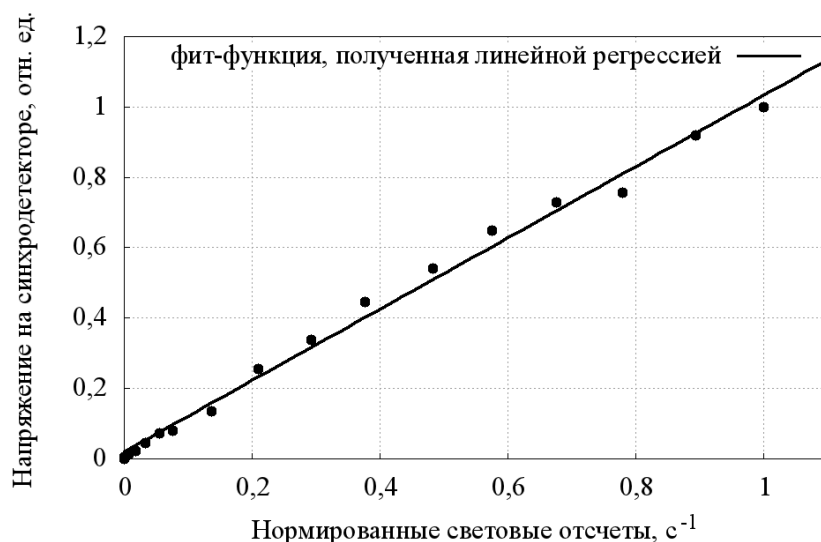


Рис. 6. Зависимость амплитуды напряжения на синхронном детекторе от числа импульсов на выходе SSPD. График нормирован по обеим осям.

Данная работа была осуществлена при финансовой поддержке РФФИ: договор №16-32-00416\16 от 01.02.2016.

#### Литература

1. *Marsili F. [et al.]* Detecting single infrared photons with 93% system efficiency // *Nat. Photonics* – 2013. – V. 7, N 3. – P. 210-214.
2. *Tarkhov M. [et al.]* Ultrafast reset time of superconducting single photon detectors // *APL* – 2008. – V. 92, N 24. – P. 241112-3.
3. *Grein M. E. [et al.]* An optical receiver for the Lunar Laser Communication Demonstration based on photon-counting superconducting nanowires // *Proc. SPIE* – 2015. – V. 9492. – P. 949208-6.
4. *Doerner S. [et al.]* Operation of superconducting nanowire single-photon detectors embedded in lumped-element resonant circuits // *IEEE Trans Appl Supercond* – 2016. – V. 26, N 3. – P. 1-5.
5. *Hofherr M.* Real-time imaging systems for superconducting nanowire single-photon detector arrays. Karlsruhe: KIT scientific publishing, 2014. 213 p.
6. *Zhao Q. [et al.]* Superconducting-nanowire single-photon-detector linear array // *APL* – 2013. – V. 103, N 14. – P. 142602.
7. *Shurakov A. [et al.]* A microwave reflection readout scheme for hot electron bolometric direct detector // *IEEE Trans Terahertz Sci and Technol* – 2015. – V. 5, N 1. – P. 81-84.
8. *Kerman A. J. [et al.]* Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters // *APL* – 2006. – V. 88, N 11. – P. 111116-3.