

# ОГРАНИЧЕНИЕ ФОНОМ МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШУМУ ДЛЯ ПРИЕМНИКА ОДИНОЧНЫХ ИК ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ, СОПРЯЖЕННЫХ С ОДНОМОДОВЫМ ВОЛОКНОМ

К. В. Смирнов<sup>1,2,3</sup>, Ю. Б. Вахтомин<sup>1,2</sup>, А. В. Дивочий<sup>2</sup>, А. В. Антипов<sup>2</sup>, Г. Н. Гольцман<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет,

<sup>2</sup>ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Статья получена 20 апреля 2015 г.

**Аннотация.** Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования предельно достижимого минимального уровня ложных срабатываний и мощности эквивалентной шуму для приемника одиночных ИК фотонов, основанного на сверхпроводниковых детекторах, сопряженных со стандартным оптическим одномодовым волокном. Показано, что предельное значение ложных срабатываний определяется фоновой засветкой. Предложен эффективный способ фильтрации фонового излучения вне полосы работы приемника. Продемонстрировано, что при достигнутых значениях квантовой эффективности детекторов (35% для  $\lambda=1.55$  мкм и 45% для  $\lambda=1.3$  мкм) мощность эквивалентная шуму в основном определяется значением темновых срабатываний. Измеренная мощность эквивалентная шуму для приемника оптимизированного для  $\lambda=1.55$  мкм составила  $8.9 \cdot 10^{-19}$  Вт·Гц<sup>1/2</sup>, что менее чем на порядок величины превышает рассчитанное предельное значение, полученное при 100% квантовой эффективности детектора.

**Ключевые слова:** сверхпроводниковый однофотонный детектор, темновые отсчеты, мощность эквивалентная шуму, одномодовое оптическое волокно, фоновое излучение.

**Abstract.** We investigated the minimum level of the dark count rates and noise equivalent power of superconducting single photon detectors coupled to standard single mode optical fibers. We found that background radiation limits the minimum

level of the dark count rates. We also proposed the effective method for reducing background radiation out of the required spectral range of the detector. Measured noise equivalent power of detector reaches  $8.9 \cdot 10^{-19} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{1/2}$  at a wavelength of  $1.55 \mu\text{m}$  and quantum efficiency 35%.

**Keywords:** superconducting single photon detectors, dark counts, noise equivalent power, single mode fiber, background radiation.

## 1. Введение

С момента открытия эффекта детектирования одиночных фотонов видимого и инфракрасного (ИК) излучений сверхпроводниковыми наноструктурами [1], сверхпроводниковые детекторы (SSPD от англ. Superconducting single photon detectors) были востребованы во множестве применений [2-10]. Интерес к SSPD определяется, прежде всего, новыми характеристиками, не достижимыми с использованием традиционных лавинных фотодиодов и фотоумножителей. Сверхпроводниковые детекторы обладают несколькими рекордными параметрами: предельно низким уровнем темнового счета (до  $10^{-4}$  в случае полной экранировки детектора от внешнего излучения), высоким быстродействием (в несколько ГГц), пикосекундным временным разрешением (до 20 пс) [11-12]. Вместе с тем, опыт реализации практических приемных устройств одиночных фотонов на основе SSPD показывает [13-15], что одновременное достижение указанных предельных характеристик не всегда возможно. В частности, для достижения минимальной мощности эквивалентной шуму (NEP, от англ. Noise Equivalent Power), определяемой для квантовых детекторов как [16]:

$$NEP = \frac{h\nu}{QE} \sqrt{2D} \quad (1),$$

где  $h\nu$  - энергия падающего фотона,  $QE$  – квантовая эффективность детектора,  $D$  – частота ложных срабатываний/темновых отсчетов детектора, необходима одновременная реализация высокой квантовой эффективности и минимального уровня  $D$ . Целью представляемой работы являлось доказательство значительного влияния фоновой засветки на уровень темновых отсчетов и NEP

SSPD приемных систем, минимизация фоновой засветки и достижение предельно низкого NEP приемников на основе сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

## 2. Постановка эксперимента

В рамках настоящей работы нами были созданы и использовались детекторы в виде узких сверхпроводниковых полосок (ширина 100-120 нм), изготовленные из NbN пленки толщиной ~4 нм. Для лучшего согласования детектора с излучением сверхпроводниковые полоски были изготовлены в виде меандра площадью  $7 \times 7$  мкм<sup>2</sup> и плотностью заполнения ~0.5 (отношение площади поверхности сверхпроводниковой полоски к полной площади меандра). Детекторы были созданы с использованием разработанной технологии на основе прямой электронной литографии и плазмо-химического травления [17]. Детекторы были сопряжены со стандартным одномодовым волокном Corning SMF 28e и размещены во вставке в стандартный транспортный сосуд Дьюара с жидким гелием. Для уменьшения рабочей температуры детекторов до 1.7 К внутренний объем вставки был термически изолирован от окружения и соединен капилляром с объемом Дьюара. Температура поступающего по капилляру во вставку гелия понижалась путем откачки паров гелия из внутреннего объема вставки.

Детектор смещался электрическим током, близким к критическому току нарушения сверхпроводимости при данной температуре и имел выходную копланарную линию для возможности анализа возникающих сигналов. При поглощении фотона и возникновении импульса напряжения, последний подавался на широкополосный усилитель и далее на счетчик электрических импульсов (Agilent 53131A) или осциллограф (Rohde&Schwarz RTM 1054) для непосредственного наблюдения импульсов.

Квантовая эффективность приемной системы  $\eta$  определялась нами как отношение числа импульсов напряжения возникающих на детекторе, к числу фотонов поступающих на оптический вход одномодового волокна:

$$\eta = \frac{N_{reg}}{N_{inc}} \quad (2),$$

где значение  $N_{\text{reg}}$  измерялось нами счетчиком импульсов, а число фотонов  $N_{\text{inc}}$  рассчитывалось на основе измерения мощности в одномодовом волокне (измеритель мощности PD300-IRG для the Ophir Optronics) и дальнейшей калиброванной аттенюации излучения. Под темновыми отсчетами мы понимаем срабатывание SSPD детектора (возникновение импульса напряжения) в случае, когда мощность излучения, подаваемая на входное оптическое волокно, равна нулю. Все измерения квантовой эффективности и уровня темновых отсчетов приемной системы были проведены при рабочей температуре 1.7 К. Для измерения спектральных зависимостей оптического одномодового волокна был использован оптический анализатор спектра HP 71452B.

### 3. Полученные результаты и обсуждение

Во многих исследованиях SSPD приемников, как правило, приводятся зависимости квантовой эффективности и темновых отсчетов от тока смещения детектора [18-20]. Типичные зависимости, полученные нами в эксперименте с детектором, сопряженным со стандартным одномодовым волокном Corning SMF 28e XB, приведены на рис. 1а,б. Обращает на себя внимание характерное изменение зависимости темновых отсчетов от тока смещения при токе  $\sim 17$  мкА – при токах, меньших 17 мкА темновые отсчеты начинают слабо зависеть от тока смещения, фактически повторяя зависимость квантовой эффективности. Этот факт позволяет заключить, что в соответствии с (1) минимальное значение NEP для представленного детектора достигается в точке со смещением  $\sim 17$  мкА, а также предположить, что при токах меньших 17 мкА темновые отсчеты не являются темновыми отсчетами, обусловленными их внутренними механизмами возникновения, а определяются счетом фотонов теплового фона поступающего на детектор.

Для оценки количества фотонов фонового излучения поступающего на сверхпроводниковый детектор и его спектрального состава будем считать, что: а) тепловое излучение соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой 300 К; б) числовая апертура входной оптики при реализации оптического согласования детектора с излучением составляет  $NA=0.14$ , что

действительно близко к распространенным схемам оптического согласования детектора с излучением в свободном пространстве [21] и с использованием оптоволоконной техники [2]. Используя в этом случае распределение Планка для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела:

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{hc} \frac{1}{e^{\lambda kT} - 1} \lambda^5 \quad (3)$$

можно получить спектральную плотность фотонов, попадающих на детектор с площадью активной области  $S = \pi d^2/4$ :

$$\rho_{ph} = \frac{\pi d^2 NA^2 \lambda u_{\lambda}}{16h} \quad (4).$$

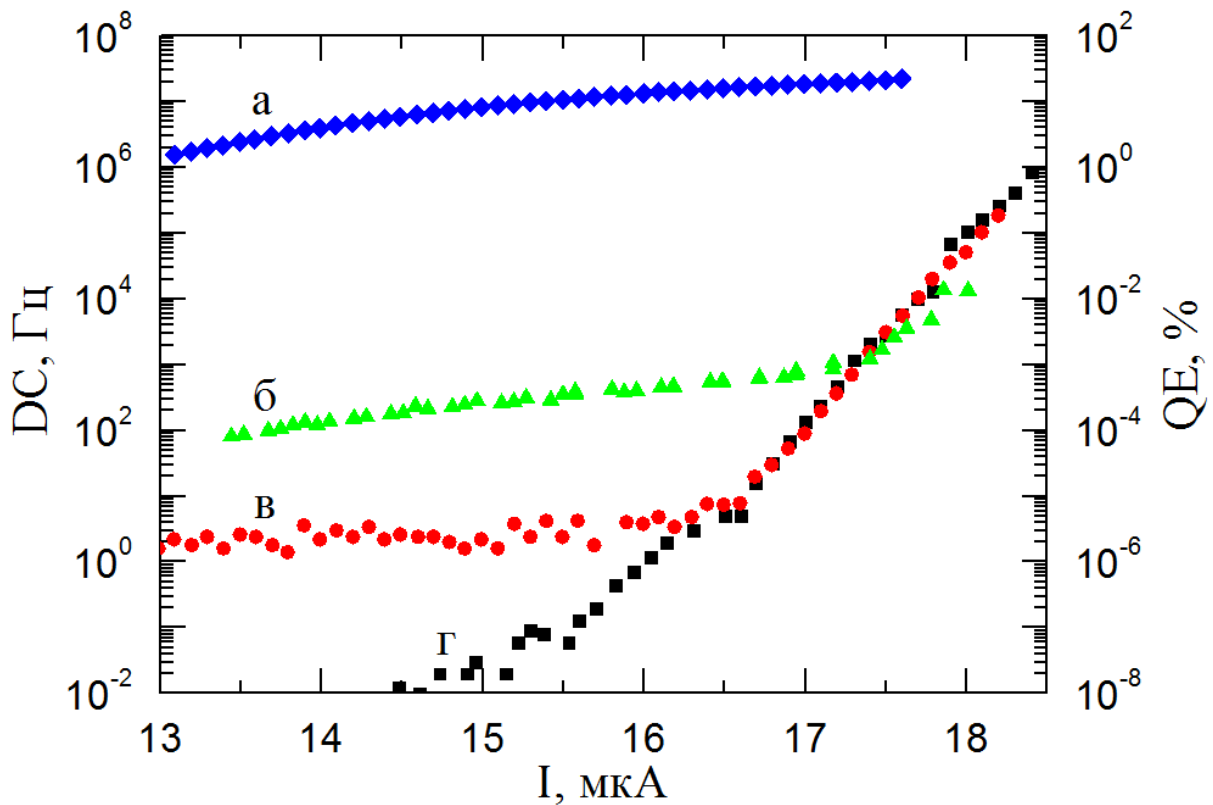


Рис. 1. Зависимость квантовой эффективности QE (а) и темновых отсчетов DC детектора, сопряженного с одномодовым волокном Corning SMF 28e XB, от тока смещения в случае: (б) прямого волокна, (в) диаметр изгибов охлажденной части волокна 21 мм, (г) диаметр изгибов охлажденной части волокна 12 мм.

Введя следующие обозначения:  $t(\lambda)$  – спектральная зависимость пропускания оптического ввода излучения,  $\eta(\lambda)$  – спектральная зависимость квантовой эффективности SSPD детектора, т.е. спектральная зависимость вероятности возникновения импульса напряжения на детекторе при попадании на активную область детектора фотона, можно получить выражение для зависимости темновых срабатываний детектора в единицу времени и в спектральном диапазоне от длины волны  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ :

$$\text{—————} \tag{5},$$

а также спектральную плотность темновых отсчетов приемника на основе SSPD:

$$\text{—————} \tag{6}.$$

Принимая во внимание, что типичную спектральную зависимость квантовой эффективности NbN SSPD на длинах волн меньших 1.5 мкм в первом приближении можно принимать постоянной, а на длинах волн более 1.5 мкм можно считать близкой к степенной функции длины волны  $\lambda^{-\alpha}$  [22]:

$$\tag{7},$$

а также принимая для идеализированного входного канала  $t(\lambda) = 1$ , можно построить зависимость спектральной плотности темновых отсчетов приемника на основе SSPD ( $\rho_{DC}$ ) (рис. 2 а), а также рассчитать количество темновых срабатываний SSPD детектора в единицу времени ( $N_{ph}$ ) при интегрировании  $\rho_{DC}$  для  $0 < \lambda < \infty$ .

Представленный график демонстрирует, что в случае согласования детектора в свободном пространстве с широкополосной входной оптикой и несмотря на то, что квантовая эффективность сверхпроводникового детектора сравнительно быстро спадает с увеличением длины волны, влияние фоновой засветки в среднем ИК диапазоне вследствие значительного роста  $\rho_{DC}$ , также значительно. Максимальная спектральная плотность темновых отсчетов SSPD приемника с  $t(\lambda) = 1$  приходится на длины волн 6-8 мкм. Расчет  $N_{ph}$  показывает,

что абсолютные значения темновых отсчетов приемника приближаются к значениям в  $10^7$  отсчетов в секунду.

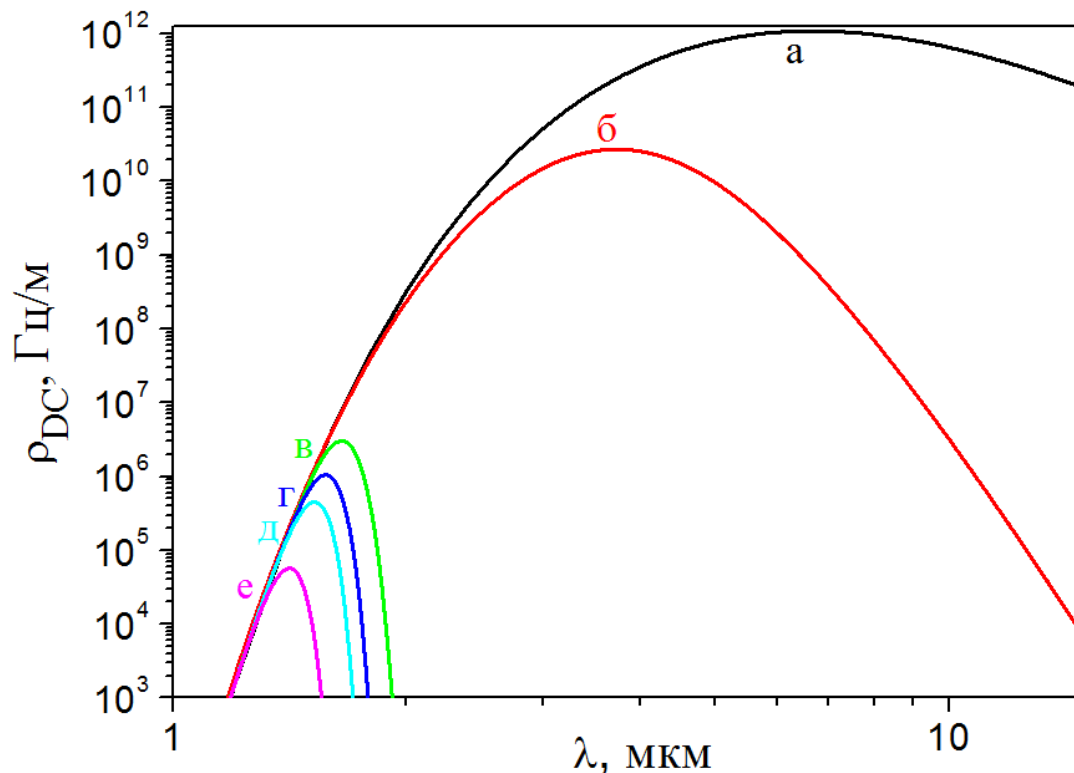


Рис. 2 Зависимости спектральной плотности темновых отсчетов SSPD детектора от длины волны в случае а) использования оптического ввода излучения с  $t(\lambda) = 1$ , б) стандартного одномодового кварцевого волокна (Corning SMF 28e), оптимизированного для телекоммуникационных длин волн и для разных диаметров изгиба волокна Corning SMF-28e: 21 мм (в), 18 мм (г), 16 мм (д) и 12 мм (е).

Как правило, приемники одиночных фотонов на основе SSPD используются в спектральном диапазоне 0.6 - 2 мкм, что связано со значительным уменьшением квантовой эффективности SSPD для длин волн превышающих 2 мкм и со сложностью согласования детектора с излучением в этом спектральном диапазоне. Таким образом, при реализации практических приемных систем ближнего ИК диапазона и для достижения минимального уровня темновых срабатываний приемника (или для уменьшения фоновой засветки) возможно ограничение полосы приема приемника фотонов, путем

создания охлаждаемых фильтров для среднего ИК излучения. В случае использования приемника фотонов, согласованного с излучением в свободном пространстве, такие фильтры могут быть изготовлены в виде узкополосных высокочастотных интерференционных фильтров (при необходимости детектирования фотонов в узком спектральном диапазоне) или high-pass фильтров, путем подбора материалов с соответствующей частотной зависимостью коэффициента пропускания. Вместе с тем, большинство

приемных систем одиночных фотонов, использующихся в настоящее время, для оптического согласования и передачи излучения на детектор используют стандартное одномодовое оптическое волокно. В этом случае, при расчете минимально достижимого уровня фоновой засветки необходимо учитывать спектральную характеристику пропускания самого волокна.

Расчет  $t(\lambda)$  одномодового волокна с диаметром светопроводящей сердцевины 9 мкм ( $a$ ) был нами выполнен с учетом типичной зависимости потерь кварцевого волокна [23], а также с учетом изменения модового поля излучения ( $S_{MDF}$  – площадь модового поля,  $w$  – радиус модового поля,  $a$  – радиус кора волокна) при увеличении длины волны. Используя уравнение Marcuse [24]:

$$\frac{w}{a} \approx 0.65 + \frac{1.619}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6}, \quad (8)$$

где

$$V = \frac{2\pi NA}{\lambda} \quad (9)$$

есть нормализованная частота, для расчета  $t(\lambda)$  на основе типичной зависимости пропускания кварцевого волокна необходимо ввести дополнительный нормировочный множитель:

$$\theta(\lambda) = \frac{S_{meandr}}{S_{MFD}} = \frac{S_{meandr}}{\pi w^2}, \quad (10)$$

где  $S_{meandr}$  – активная площадь SSPD детектора.

Отметим, что в интервале длин волн 1-2 мкм модовое поле сосредоточено практически в пределах активного элемента детектора и функцию  $\theta(\lambda)$  можно



считать близкой к единице. При дальнейшем увеличении длины волны поле начинает быстро расширяться, существенно выходя за границы меандра.

Учет зависимостей  $t(\lambda)$  и  $\theta(\lambda)$  для стандартного одномодового волокна (Corning SMF 28e) позволяет в соответствии с (3) и (4) рассчитать спектральную зависимость  $\rho_{DC}$  и  $N_{ph}$  для SSPD приемника с оптоволоконным вводом излучения. Полученная зависимость представлена на рис. 2 б) и демонстрирует, что одномодовое волокно является эффективным фильтром для излучения с длинами волн, превышающими 2-3 мкм. Интегрирование полученной зависимости по  $\lambda$  позволяет рассчитать минимальный уровень темновых срабатываний детектора, составляющий  $\sim 10^4$  отсчетов в секунду. На наш взгляд, встречающиеся в литературе отклонения от указанного значения темновых отсчетов SSPD сопряженного со стандартным одномодовым волокном при измерениях различных групп авторов определяется, различной длиной оптоволоконного ввода излучения (принятая в расчетах длина волокна составила 3 м), а также возможным охлаждением части оптоволоконка при охлаждении SSPD детекторов.

Для дальнейшего уменьшения уровня темновых отсчетов приемной системы нами было использовано свойство оптических волокон изменять спектральную характеристику пропускания при наличии на волокне изгибов определенного радиуса. На рис. 3 представлены несколько спектральных зависимостей пропускания для волокна Corning SMF 28e XB, полученные для различных диаметров намотки волокна ( $\infty$ -6 мм). Для всех диаметров намотки количество витков было неизменным и равным 10.

Рисунок демонстрирует, что используемое нами волокно с изгибами определенного радиуса может быть использовано в качестве high-pass фильтра для фонового излучения комнатной температуры в случае охлаждения изогнутой части волокна до температур меньших 300 К. В наших экспериментах, изогнутая часть волокна была охлаждена нами до температур  $\sim 10$ -40 К, что соответствует уменьшению излучения черного тела с такой температурой по сравнению с источником фонового излучения при  $T=300$  К

более, чем в  $10^4$  раз, что позволяет, фактически, не учитывать влияние фоновой засветки.

Рисунок 3 также демонстрирует, что длину волны отсечки пропускания волокна можно регулировать, путем изменения диаметра изгиба волокна, оптимальное значение которого может быть определено из требований к полосе работы приемника одиночных фотонов. Рассчитанные зависимости спектральной плотности темновых отсчетов приемника на основе SSPD ( $\rho_{DC}$ )

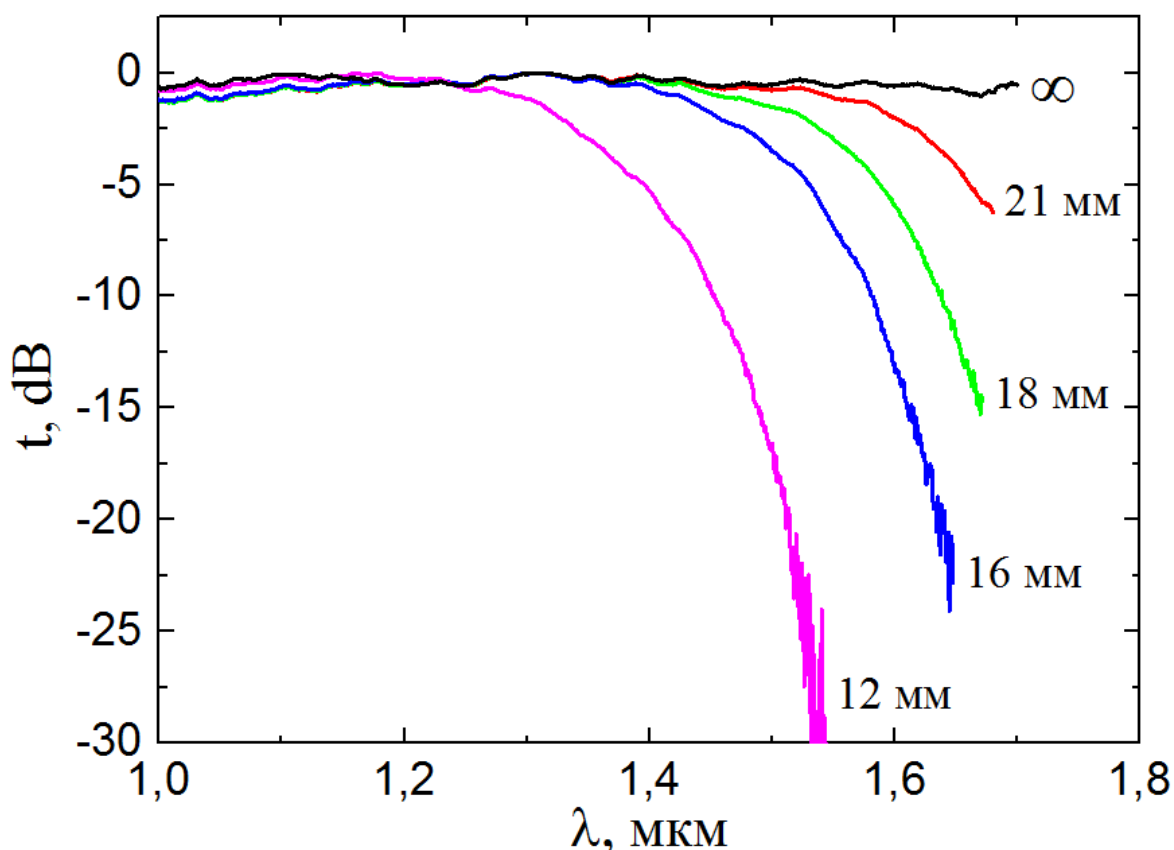


Рис. 3. Спектральные зависимости пропускания волокна Corning SMF 28e XB для разных диаметров изгиба: 21 мм, 18 мм, 16 мм и 12 мм.

для различных диаметров изгибов охлажденного волокна представлены на рис. 2 в,г,д,е. Рисунок демонстрирует, что максимум спектральной плотности темновых отсчетов SSPD детектора с уменьшением диаметра изгиба волокна уменьшается и сдвигается в область более коротких длин волн.

Расчет  $N_{ph}$  показывает, что абсолютные значения темновых отсчетов приемника составляют 0.7, 0.2, 0.08, 0.009 отсчетов в секунду для радиусов

изгибов в 21 мм, 18 мм, 16 мм, 12 мм соответственно. Рассчитанные значения темновых отсчетов приемной SSPD системы подтверждаются прямыми измерениями, проведенными нами для систем с диаметром изгиба охлажденной части волокна 12 мм и 21 мм (рис. 1 в,г). Представленный рисунок демонстрирует, что использование изгибов в охлажденной части волокна позволяет достичь значительно меньших значений темновых отсчетов детектора в точке резкой смены характера зависимости темновых отсчетов от тока смещения детектора, а именно,  $\sim 3$  отсчетов в секунду для волокна, имеющего изгибы диаметром 21 мм и 0.01 отсчетов в секунду для волокна, имеющего 12 мм диаметр изгибов его охлажденной части. Полученные значения находятся в хорошем согласии, со значениями, полученными из теоретических оценок.

Нахождение для каждого диаметра изгиба волокна длины волны, на которой происходит 3 dB аттенюация излучения ( $\lambda_c$ ), позволяет построить зависимость минимального уровня темновых отсчетов приемной системы одиночных фотонов, сопряженной с одномодовым волокном и NEP идеального сверхпроводникового приемника, как функцию длины волны, предполагая, что: а) идеальный приемник одиночных фотонов имеет 100% квантовую эффективность, б) полоса приемника одиночных фотонов для которого определяется минимальный уровень темновых отсчетов и NEP на определенной длине волны ограничена этой длинной волны. Полученные зависимости в диапазоне  $\lambda=1.15-1.7$  мкм представлены на рис. 4. Отметим, что предлагаемый способ фильтрации фонового излучения может привести к поломке волокна при диаметрах изгибов менее 6 мм, что соответствует  $\lambda_c=1.15$  мкм. Также на рис. 4 представлены полученные нами в эксперименте лучшие значения минимального уровня темновых отсчетов и NEP для приемника, оптимизированного для регистрации фотонов с  $\lambda_c < 1.6$  мкм ( $d=21$  мм). Значение уровня темновых отсчетов составило 3 отсчета в секунду, NEP ( $\lambda_c=1.55$  мкм)  $= 8.9 \cdot 10^{-19}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup>, NEP ( $\lambda_c=1.31$  мкм)  $= 8.4 \cdot 10^{-19}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup>. Отличие примерно на порядок величины NEP реального и идеального приемников на длине волны

1.55 мкм связано с различием их квантовой эффективности (35% и 100 % соответственно), а также увеличением полосы приема одиночных фотонов реальным приемником до 1.6 мкм. Несмотря на повышение квантовой эффективности реального приемника на длине волны 1.31 мкм до 44 % отличие в NEP реального и идеального приемника составляет более, чем 20 раз, что

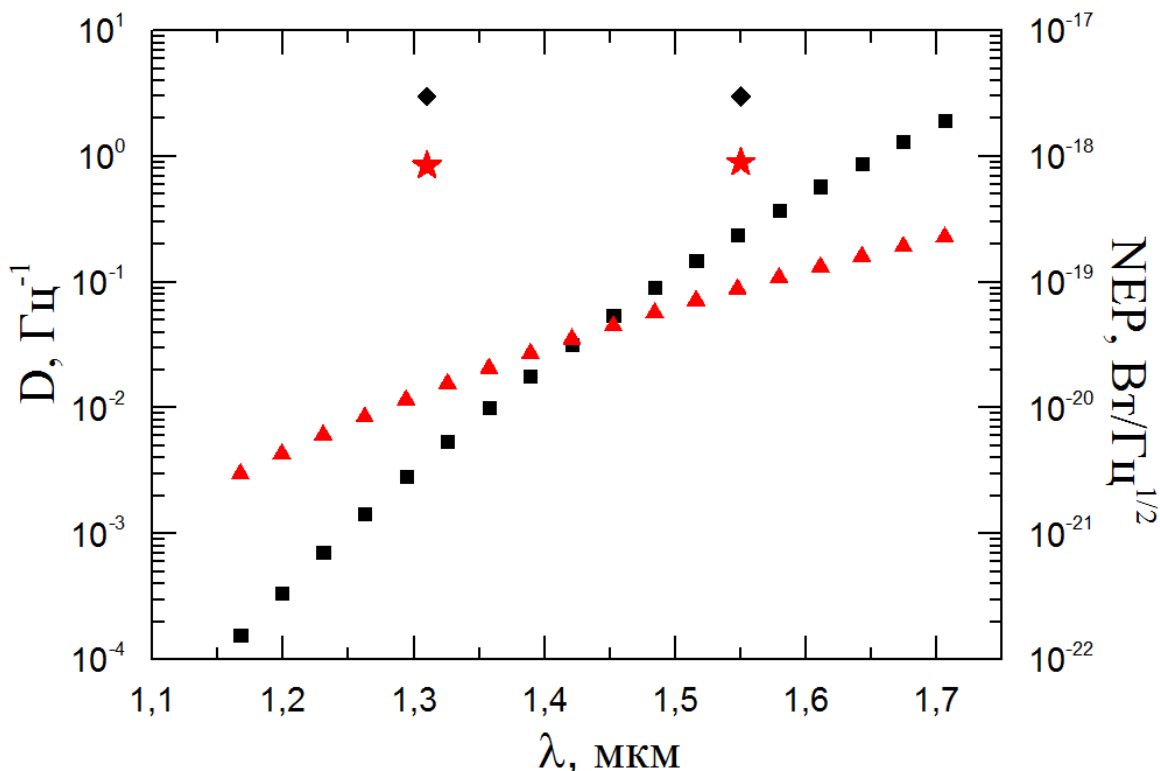


Рис. 4. Зависимости минимально достижимого расчетного уровня темновых отсчетов DC (квадраты) и NEP (треугольники) от  $\lambda$ , а также экспериментальные значения минимального уровня темновых отсчетов DC (ромбы) и NEP (звездочки) приемника одиночных ИК фотонов.

связано со значительным расширением полосы приема реального приемника и повышением его уровня темновых отсчетов.

#### 4. Заключение

В заключение отметим, что в настоящее время приемники на основе SSPD уже демонстрируют рекордную NEP по сравнению со всеми известными типами однофотонных детекторов ИК диапазона. Вместе с тем, результатом представленной работы является доказательство и реализация дальнейшего уменьшения NEP SSPD приемников, основанных на оптоволоконном вводе

излучения, путем фильтрации фонового излучения вне полосы работы приемника. Дальнейшее понижение NEP таких систем мы связываем с повышением квантовой эффективности сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ (контракт № 14.В25.31.0007, № 3.2655.2014/К), Российского квантового центра и гранта Президента РФ (№ 1918.2014.2). Авторы выражают благодарность Теун Кларwijk за высказанные ценные замечания и обсуждения.

### Литература

- 1) G.Gol'tsman, O.Okunev, G.Chulkova et al., Appl. Phys. Lett. **79**(6), 705-707 (2001).
- 2) A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld et al., Nature Photonics **2**, 302–306 (2008).
- 3) A. Korneev, Yu. Korneeva, I. Florya et al., Physics Procedia **36**, 72-76 (2012).
- 4) M. Sclafani, M. Marksteiner, F. Keir et al., Nanotechnology **23**, 065501 (2012).
- 5) V. Kovalyuk, W. Hartmann, O. Kahl et al., Optics Express 21(19), 22683-22692 (2013).
- 6) J. J. Renema, G. Frucci, Z. Zhou et al., Optics Express **20**(3), 2806-2813 (2012).
- 7) J. J. Renema, G. Frucci, M. J. A. de Dood et al., Phys. Rev. A **86**, 062113 (2012).
- 8) R. Hostein, R. Braive, M. Larqué et al., Appl. Phys. Lett. **94**, 123101 (2009).
- 9) T R. Hostein, A. Michon, G. Beaudoin et al., Appl. Phys. Lett. **93**, 073106 (2008).
- 10) M. Halder, A. Beveratos, N. Gisin et al., Nature Physics **3**, 692 - 695 (2007).
- 11) A. Korneev, P. Kouminov, V. Matvienko et al., Appl. Phys. Lett. **84**, 5338 (2004).
- 12) A. Verevkin, A. Pearlman, W. Slysz et al., Journal of Modern Optics **51**(9-10), 1447–1458 (2004).
- 13) Y. Liu, T. Chen, J. Wang et al., Optics Express **18**(8), 8587-8594 (2010).
- 14) S. Zaske, A. Lenhard, C. Kessler et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 147404 (2012).

- 15) L. Olislager, I. Mbodji, E. Woodhead et al., *New Journal of Physics* **14**, 043015 (2012)
- 16) G. Rieke, *Detection of Light. From the Ultraviolet to the Submillimeter.*, Cambridge: Cambridge University Press, 2nd edition, 356 (2003).
- 17) G. N. Gol'tsman, K. Smirnov, P. Kouminov et al., *IEEE Transactions On Applied Superconductivity* **13**(2), 192-195 (2003).
- 18) A. Korneev, A. Divochiy, Y. Vachtomin et al., *Proc. SPIE* **8072**, 807202 (2011).
- 19) G. Goltsman, A. Korneev, A. Divochiy et al., *Journal of Modern Optics*, Volume **56**(15), 1670 – 1680 (2009).
- 20) J Kitaygorsky, I Komissarov, A Jukna et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **17**(2), 275 (2007).
- 21) S. Somani, S. Kasapi, K. Wilsher et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **19**(6), 2766 - 2769 (2001).
- 22) G. Gol'tsman, O. Minaeva, A. Korneev et al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, 2 (2007)
- 23) A. Maity, *Optoelectronics and Optical Fiber Sensors*, Prentice-Hall of India Pvt. Ltd (2013).
- 24) D. Marcuse, *Bell Syst. Tech.* **56**(5), 703 (1977).