

07;12

Сверхпроводниковый NbN однофотонный детектор, интегрированный с четвертьволновым резонатором

© Н.Н. Манова, Ю.П. Корнеева, А.А. Корнеев, В. Слыш (W. Slysz),
Б.М. Воронов, Г.Н. Гольцман

Московский педагогический государственный университет, Москва,
Россия
Institute of Electron Technology, Warsaw, Poland
E-mail: nadya@rplab.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2011 г.

Исследована спектральная зависимость квантовой эффективности сверхпроводниковых NbN однофотонных детекторов, интегрированных с оптическими четвертьволновыми резонаторами с использованием диэлектриков Si_3N_4 , SiO_2 , SiO.

Для многих научных и технических задач, включая телекоммуникационные и оптические системы, квантовую криптографию и исследования однофотонных источников, необходимы быстрые детекторы, обладающие однофотонной чувствительностью в ИК-диапазоне длин волн. Чувствительность существующих кремниевых лавинных фотодиодов ограничивается шириной запрещенной зоны кремния и резко падает на длинах волн, больших $1.1 \mu\text{m}$, делая их непригодными для использования на телекоммуникационных длинах волн 1.3 и $1.55 \mu\text{m}$. Коммерчески доступные лавинные фотодиоды на основе InGaAs чувствительны к ИК-излучению вплоть до длины волны $1.8 \mu\text{m}$, имеют скорость счета порядка 10 MHz [1], хотя в [2] сообщается о возможности увеличения скорости счета до 2 GHz . Поскольку лавинные фотодиоды имеют высокий уровень ложных срабатываний (10^3 s^{-1}), их, как правило, используют в узком временном окне длительностью порядка 1 ns , что оказывается неудобным для ряда применений. Альтернативой полупроводниковым однофотонным детекторам стали сверхпроводниковые детекторы. Квантовая эффективность вольфрамовых детекторов на сверхпроводящих переходах (TES) достигает 90% на длине волны

1.55 μm , рабочий диапазон длин волн простирается до 5 μm [3]. Но эти приборы очень медленные (максимальная скорость счета 20 kHz), легко насыщаются тепловым фоновым излучением, и для их практического использования требуется охлаждение до 100 mK и сложная схема стабилизации температуры. В 2001 году в [4] был предложен сверхпроводниковый однофотонный детектор (Superconducting single photon detector, SSPD), принцип действия которого основан на возникновении резистивной области в тонкой сверхпроводящей полоске нитрида ниобия при поглощении ею фотона. SSPD демонстрирует гигагерцовую скорость счета и однофотонную чувствительность до 5.6 μm [5]. Квантовая эффективность (отношение числа зарегистрированных фотонов к числу падающих) лучших детекторов достигает 30% на длине волны 1.3 μm и 10% на 1.55 μm при температуре 2 K и уровне ложных срабатываний 10 s^{-1} . Благодаря своим характеристикам SSPD уже нашел применение в решении многих научных задач [6–9], однако дальнейшее расширение области практического использования SSPD связано с необходимостью увеличения квантовой эффективности детектора.

Квантовая эффективность SSPD ограничена коэффициентом поглощения тонкой пленки нитрида ниобия, величина которого не превышает 30% [10]. В работе [11] был предложен способ увеличения поглощения тонких металлических пленок путем интегрирования их с оптическим четвертьволновым резонатором. Первые попытки изготовить резонаторы для SSPD были представлены в работах [12–14].

В данной работе мы представляем систематическое исследование квантовой эффективности SSPD, интегрированных с оптическими четвертьволновыми резонаторами, выполненными на основе диэлектриков Si_3N_4 , SiO_2 , SiO .

В нашем SSPD полоска нитрида ниобия имеет длину 500 μm , ширину 100 nm и толщину 3.5 nm, формируется на сапфировой подложке в форме меандра, покрывающего площадь $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$. Технология изготовления SSPD подробно описана в [15]. Оптический резонатор для сверхпроводникового NbN однофотонного детектора в этой работе оптимизировался на телекоммуникационную длину волны 1.55 μm и состоял из слоя диэлектрика толщиной $\lambda/4$ и металлического зеркала. Диэлектрик и металл наносились сверху рабочего элемента детектора. Диэлектрики SiO_2 , SiO осаждались методом электронно-лучевого испарения в установке Evatec BAK501 со скоростью 10 nm/s, Si_3N_4 осаждался из газовой фазы. Толщина диэлектриков подбиралась из

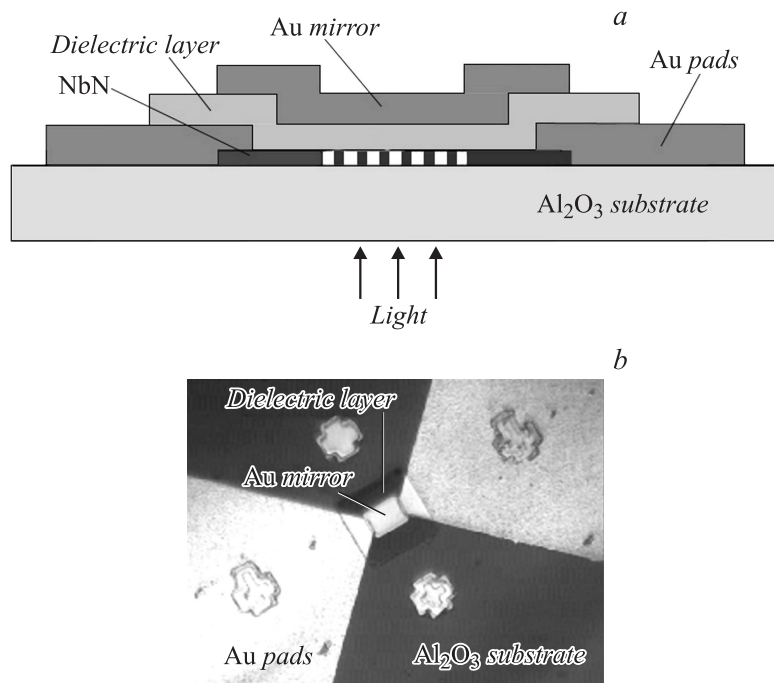


Рис. 1. *a* — схематическое изображение поперечного сечения SSPD, интегрированного с оптическим резонатором; *b* — изображение SSPD, интегрированного с оптическим резонатором, полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

расчета максимума поглощения на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ и показателя преломления n . Толщина Si_3N_4 составила 192 nm , SiO_2 — 268 nm , SiO — 221 nm . Металлическое зеркало было изготовлено из пленки золота толщиной $150\text{--}300 \text{ nm}$, методом электронно-лучевого испарения со скоростью 0.5 nm/s . При использовании SiO и SiO_2 оба составляющих слоя резонатора формировались методом обратной электронной литографии; в случае использования Si_3N_4 — методом прямой электронной литографии, что упростило технологию изготовления резонаторов и увеличило выход годных структур. Схематическое изображение поперечного сечения SSPD, интегрированного с оптическим четвертьволновым

резонатором, и его изображение, полученное с помощью растрового электронного микроскопа, представлены на рис. 1. Отметим также, что после нанесения резонатора критическая температура детектора падала не более чем на 1 К, что свидетельствует об отсутствии повреждений пленки нитрида ниобия в процессе изготовления резонатора.

Поскольку измерение квантовой эффективности перед нанесением резонатора приводит к загрязнению поверхности детектора и существенному ухудшению характеристик резонатора, квантовая эффективность детектора до нанесения резонатора не измерялась. Вместо этого измерялись спектральные зависимости квантовой эффективности SSPD, интегрированных с оптическим четвертьволновым резонатором, и сравнивались со спектральной зависимостью квантовой эффективности аналогичных SSPD без резонатора. Измерения проводились в диапазоне длин волн от 0.7 до 1.8 μm , в качестве источника излучения использовался спектрометр ИКС-31. Образец охлаждался в гелиевом криостате до температуры 5 К, входное окно криостата совмещалось с выходной щелью спектрометра. Выходная мощность спектрометра измерялась с помощью оптико-акустического преобразователя. Поскольку точное определение числа фотонов, падающих на детектор, в такой постановке эксперимента затруднительно, мы измеряли относительную квантовую эффективность, определяемую формулой:

$$\eta_{(\lambda)} = \frac{hcN}{\lambda U(\lambda)},$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, N — число зарегистрированных фотонов в единицу времени, λ — длина волны, $U(\lambda)$ — напряжение на оптико-акустическом преобразователе ОАП-7, пропорциональное выходной мощности спектрометра. На рис. 2, *a* представлены спектральные зависимости квантовой эффективности SSPD без резонатора и SSPD, интегрированного с резонатором на основе SiO_2 . Из графиков хорошо видно изменение спектральной зависимости квантовой эффективности детектора с резонатором в сравнении со спектральной зависимостью квантовой эффективности детектора без резонатора, последняя является типичной для всех SSPD. Ярко выраженный минимум квантовой эффективности детектора с резонатором на длине волны 0.89 μm свидетельствует о деструктивной интерференции в пленке нитрида ниобия.

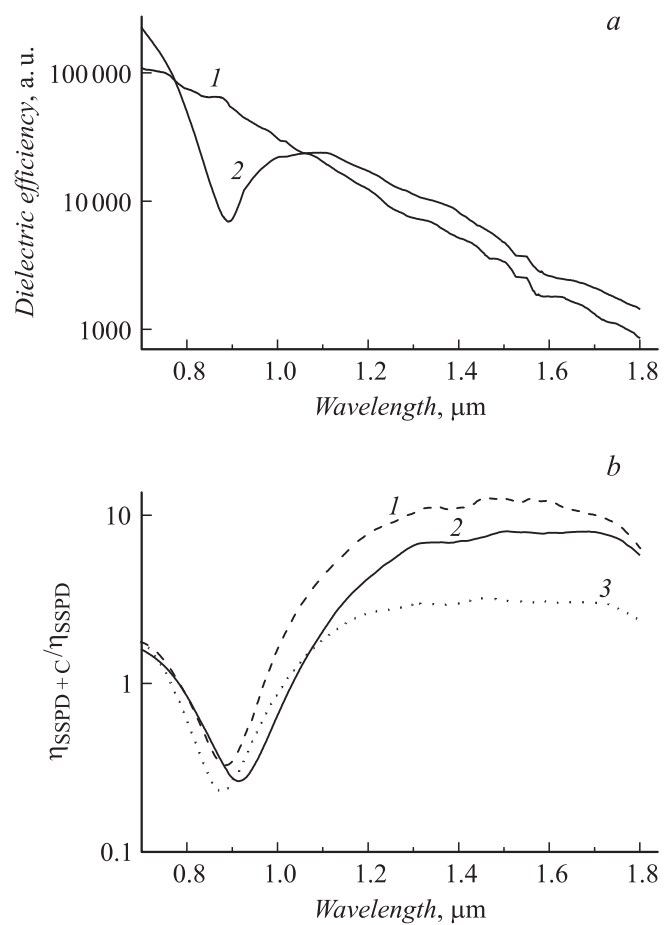


Рис. 2. *a* — спектральная зависимость квантовой эффективности SSPD (1) и SSPD, интегрированного с резонатором на основе SiO_2 (2); *b* — отношение спектральной зависимости квантовой эффективности SSPD, интегрированного с резонатором $\eta_{\text{SSPD}+\text{C}}$ (резонаторы выполнены с использованием SiO (1), Si_3N_4 (2), SiO_2 (3)) к типичной спектральной зависимости квантовой эффективности SSPD η_{SSPD} .

На рис. 2, *b* приведены отношения спектральных зависимостей квантовой эффективности детекторов с резонаторами $\eta_{\text{SSPD+C}}$ на основе Si_3N_4 , SiO_2 , SiO к типичной спектральной зависимости квантовой эффективности SSPD без резонатора η_{SSPD} . Для SSPD с резонатором это отношение на длине волны $1.55 \mu\text{m}$ превосходит значение на длине волны минимума для SiO в 50, для Si_3N_4 в 30 и для SiO_2 в 15 раз. Мы также оценили добротность резонаторов: она составила 2.4 для резонатора с использованием SiO , 1.87 для резонатора с использованием Si_3N_4 и 1.7 для резонатора на основе SiO_2 . Из этих соотношений видно, что максимальное увеличение эффективности достигается при использовании в качестве диэлектрика монооксида кремния. Это, по всей видимости, можно объяснить лучшим контактом диэлектрика с материалом зеркала.

Таким образом, в данной работе изучена квантовая эффективность сверхпроводниковых NbN однофотонных детекторов, интегрированных с резонаторами, на основе диэлектриков Si_3N_4 , SiO_2 , SiO . Показано, что наиболее перспективным является SiO , как обеспечивающий наибольшее увеличение квантовой эффективности на длине волны $1.55 \mu\text{m}$.

Работа была выполнена в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (ШК № П1921, ГК № 02.740.11.0228).

Список литературы

- [1] *Bethnune D.S., Navarro M., Risk W.P.* // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. P. 1640.
- [2] *Yuan Z.L., Sharpe A.W., Dynes J.F., Dixon A.R., Shields A.J.* // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 071101.
- [3] *Lita A., Miller A., Nam S.* // *Optics Express.* 2008. V. 16 (5). P. 3032.
- [4] *Goltsman G., Okunev O., Chulkova G. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 79. P. 705.
- [5] *Tarkov M. et al.* // *Proc. of 17th Int. Symp. on Space Terahertz Technol.* 2006. P. 119–122.
- [6] *Hadfield R., Habif J., Schlafer J., Schwall R., Nam S.W.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 241129.
- [7] *Stevens M., Hadfield R., Schwall R., Nam S.W., Mirin R., Gupta J.* // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 031109.
- [8] *Chen J., Altepeter J., Medic M., Lee K.F., Gokden B., Hadfield R., Nam S.W., Kumar P.* // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100 (13). P. 133603.

- [9] *Halder M., Beveratos A., Gisin N., Scarani V., Simon C., Zbinden H.* // Nature Physics. 2007. V. 3. P. 692.
- [10] *Born M., Wolf E.* // Principals of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light. 1999. P. 752–758.
- [11] *Rosenberg D., Nam S.W., Miller A.J., Salminen A., Grossman E., Schwall R.E., Martinis J.M.* // Nuclear instruments and Methods in Physics Research A. 2004. V. 520 (1). P. 537–540.
- [12] *Vikas Anant, Andrew J. Kerman, Eric A. et al.* // Optics Express. 2008. V. 16. N 14. P. 10750.
- [13] *Kristine M. Rosfjord, Joel K.W. Yang, Eric A. Dauler et al.* // Optics Express. 2006. V. 14. N 2. P. 527.
- [14] *Milostnaya I., Korneev A. et al.* // J. Physics: Confernce Series. 2006. V. 43. P. 1334–1337.
- [15] *Gol'tsman G.N., Smirnov K., Kouminov P., Voronov B., Kaurova N., Drakinsky V., Zhang J., Verevkin A., Sobolewski R.* // IEEE Trans., Appl. Supercond. 2003. V. 13. P. 192.