

## Исследование WSi и NbN сверхпроводниковых однофотонных детекторов в ближнем инфракрасном диапазоне

\*\*\*А.В.Антипов, \*\*В.А.Селезнёв, \* \*\*Ю.Б.Вахтомин, \*\*П.В. Морозов, \*\*\*Е.И. Малеванная,  
\*\*\*Д.Д. Васильев, \*\*\*К.М. Моисеев, \* \*\*\*К.В. Смирнов

\*Москва, МПГУ, ул. Пироговская, д. 1, стр. 1;

\*\*Москва, ООО «Сверхпроводниковые нанотехнологии», ул. Россолимо 5/22-1;

\*\*\*Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1;

\*\*\*\*Москва, НИУ ВШЭ, ул. Мясницкая, д. 20

e-mail: andrei.antipov@gmail.com, seleznev@scontel.ru, vachtomin@scontel.ru,

Ipavelmorozov@gmail.com, d.d.vasiliev@bmstu.ru, k.moiseev@bmstu.ru, smirnov@scontel.ru

Проведены исследования спектральных характеристик сверхпроводниковых однофотонных детекторов на основе ультратонких плёнок WSi и NbN с поверхностным сопротивлением от 300 до 500 Ом/кв. и шириной нанопроводов от 80 до 100 нм в диапазоне длин волн от 1300 до 2500 нм. WSi структуры с наиболее узкой шириной нанопроводов продемонстрировали наилучшие характеристики для регистрации одиночных фотонов в более длинноволновой части спектра. Разница в нормированном числе отсчётов для таких структур достигла одного порядка на длине волны 2500 нм в сравнении со структурами на основе NbN ультратонких плёнок.

*Investigation of WSi and NbN superconducting single-photon detectors in mid-IR range. A.V. Antipov, V.A. Seleznev, Y.B. Vakhomin, P.V. Morozov, E.I. Malevannaya, D.D. Vasilev, K.M. Moiseev, K.V. Smirnov. Spectral characteristics of WSi and NbN superconducting single-photon detectors with different surface resistance and width of nanowire strips have been investigated in the wavelength range of 1.3-2.5  $\mu\text{m}$ . WSi structures with narrower strips demonstrated better performance for detection of single photons in a longer wavelength range. The difference in normalized photon count rate for such structures reaches one order of magnitude higher in comparison with structures based on NbN thin films at 2.5  $\mu\text{m}$ .*

### Ведение

В настоящее время сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SNSPD) нашли широкое применение в тех областях, где необходимо детектирование одиночных фотонов в видимом и ближнем ИК-диапазоне 0,4-1,5 мкм [1-9]. Однако, при переходе в диапазон более длинных волн 1,5-4,0 мкм квантовая эффективность таких детекторов существенно падает [10], что делает их фактически не востребованными не только в сфере практических применений, но и в различного рода научных исследованиях. В соответствии с моделью «горячего пятна» [11] принцип работы однофотонного детектора основан на поглощении фотона узкой  $\sim 100$  нм и тонкой  $\sim 4$  нм сверхпроводниковой полоской с образованием резистивной области. Для работы детектора в длинноволновой области спектра с более низкими энергиями фотонов необходимо уменьшать ширину сверхпроводниковой полоски до 20-50 нм [10], что ведёт к уменьшению её поперечного сечения, и, как следствие, к снижению энергии фотонов необходимых для разрушения сверхпроводимости по всему сечению сверхпроводника. Однако данный подход имеет свои ограничения в связи с технологическими особенностями изготовления таких структур. Так, на более узких полосках существенную роль начинает играть её неровность края, которая уже при достижении 5% даёт значительное снижение квантовой эффективности на порядок величины. Кроме того, заужение ширины полоски ведёт к уменьшению эффективной площади детектора, выполненного в форме меандра размером  $10 \times 10$  мкм<sup>2</sup>. Для увеличения квантовой эффективности необходимо увеличивать плотность заполнения меандром активной площади детектора [12], что неизбежно ведёт к увеличению общей длины сверхпроводниковой полоски и тем самым к увеличению её кинетической индуктивности, которая ограничивает быстродействие детектора [13]. Изготовление такой структуры вызывает дополнительные технологические трудности, поскольку необходимо предъявлять ещё более

высокие требования к качеству длинной и узкой сверхпроводниковой полоски, что может существенно снизить процент выхода годных образцов. Другим недостатком при изготовлении узких сверхпроводниковых полосок является снижение критического тока таких сверхпроводниковых структур, которое влечёт уменьшение амплитуды регистрируемого сигнала и, как следствие, уменьшает отношение сигнал/шум, что ведёт к существенному ухудшению джиттера детектора.

Продвижению в более длинноволновую область работы однофотонных детекторов может способствовать исследование материалов с более низкой температурой сверхпроводящего перехода  $T_c$ , которая, в свою очередь, влечёт уменьшение энергетической щели. Среди таких материалов можно выделить WSi, VN [14, 15]. Возможность достижения высокой квантовой эффективности для детекторов на основе WSi обусловлена особенностями конкретного материала. WSi имеет неструктурированную, аморфную природу, и не предъявляет высоких требований к качеству подложки в сравнении с детекторами на основе NbN, эффективность которых зависит от кристаллической фазы NbN [16] или дефектов на поверхности подложки. Другим направлением увеличения квантовой эффективности детекторов является уменьшение толщины сверхпроводниковой пленки или изготовление пленки с более разупорядоченной структурой [17]. Это направление не требует повышения разрешения электронной литографии при создании сверхпроводниковых структур, и поэтому является более технологичным. Таким образом, для продвижения в более длинноволновую область детектирования одиночных фотонов, представляется целесообразным провести исследование поглощения излучения сверхпроводниковыми плёнками на основе различных материалов WSi и NbN, варьируя как степень разупорядоченности таких плёнок, так и геометрические параметры структур на их основе, обеспечивающих высокую квантовую эффективность детекторов при сохранении низкого уровня темновых счётов и джиттера.

#### **Технология изготовления SNSPD и методика измерения**

Тонкие сверхпроводниковые плёнки NbN и WSi были осаждены на сапфировую и кремниевую подложки методом реактивного магнетронного распыления на установках AJA International Orion-8 [18] и VUP-11M [19, 20] соответственно. Толщина плёнок составила 7 нм, поверхностное сопротивление варьировалось от 300 до 500 Ом/квadrat. Ширина нанопроводов составила от 80 до 100 нм. Рабочая область детектора была выполнена в форме меандра размером  $15 \times 15 \text{ мкм}^2$  с коэффициентом заполнения 0,5–0,6 (отношение площади, занимаемой меандром, к полной площади детектора). Критическая температура  $T_c$  составила от 8 до 10 К для NbN плёнок и от 2,7 до 3,3 К для WSi плёнок. Сверхпроводниковые провода были сформированы с помощью электронной литографии и последующего плазмохимического травления в смеси газов  $\text{SF}_6$  и аргона. Золотые контактные площадки были сформированы методом взрывной литографии и резистивного испарения. Удаление сверхпроводниковой плёнки с поверхности подложки за исключением рабочей области и контактных площадок проводилось методом фотолитографии с последующим плазмохимическим травлением. Подложка разрезалась на отдельные чипы с помощью скрайбера.

Для определения относительного числа отсчётов использовалась стандартная [21] методика для измерения мощности входного излучения на определённой длине волны и числа импульсов напряжения, возникающих на детекторе при поглощении одиночных фотонов. Излучение с инфракрасного спектрометра заводилось на детектор через многомодовое оптическое волокно. Выходная мощность из волокна на разных длинах волн калибровалась с помощью инфракрасного InAs детектора (Hamamatsu P10090-21). Спектральный диапазон измерений был ограничен шириной пропускания многомодового волокна и составил 2500 нм в длинноволновой части спектра. Образцы охлаждались до температуры 1,7 К методом откачки паров гелия из теплоизолированной вставки. Электрический сигнал с детектора выводился через CuNi коаксиальный кабель и герметичные SMA разъёмы. Они же использовались и для смещения детектора током. Следует отметить, что для сравнения спектральных характеристик образцов на основе разных материалов были выбраны плёнки с как можно более близкими значениями поверхностного сопротивления.

### Результаты и обсуждение

Мы исследовали относительную спектральную квантовую эффективность детекторов на основе сверхпроводниковых WSi и NbN ультратонких плёнок с разным поверхностным сопротивлением. На рис. 1 показано относительное число отсчётов от длины волны падающего излучения для WSi и NbN структур с разной шириной нанопроводов. Ток смещения для всех образцов составлял  $0,9I_c$ , где  $I_c$  критический ток сверхпроводниковой плёнки. Мы также нормализовали все зависимости на длину волны 1300 нм с целью более наглядного их представления. Так, можно видеть, что NbN структура с наиболее узкой шириной нанопровода 80 нм и наиболее низким значением поверхностного сопротивления  $R_s=340$  Ом обнаружила значительное экспоненциальное уменьшение числа отсчётов на два порядка величины с увеличением длины волны с 1300 нм до 2500 нм. Однако NbN структура с почти такой же шириной нанопровода 84 нм и большим поверхностным сопротивлением  $R_s=487$  Ом показала снижение числа отсчётов на один порядок величины.

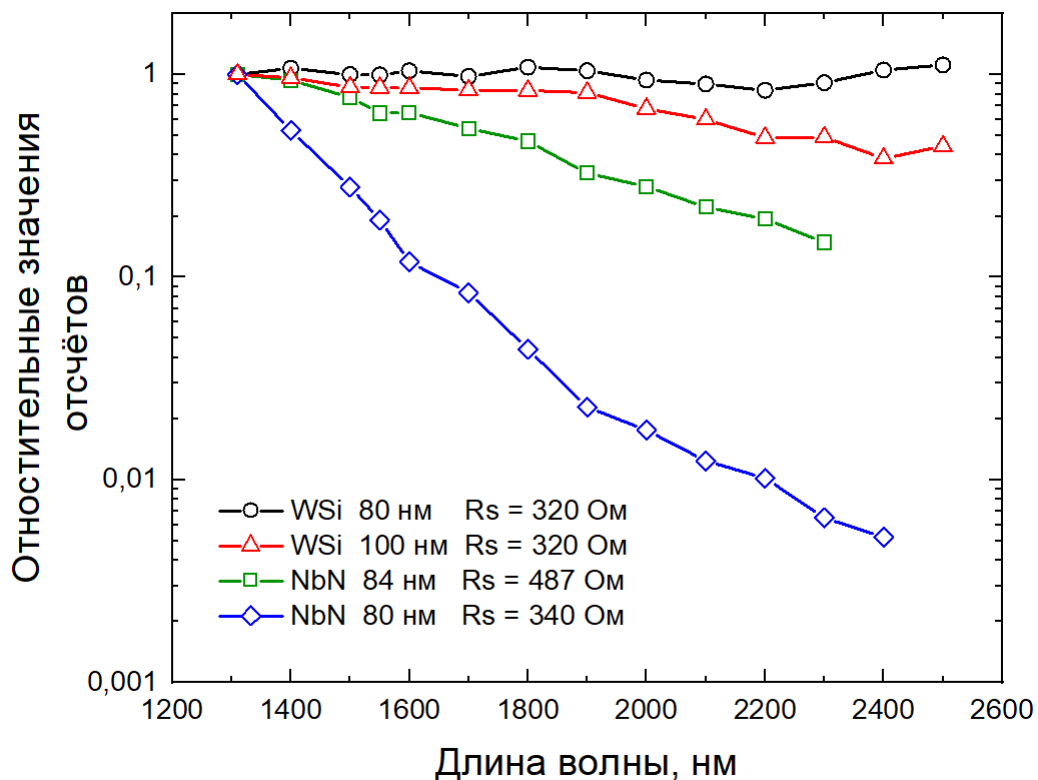


Рис. 1. Зависимость относительного числа отсчетов от длины волны падающего излучения для NbN и WSi структур с различным поверхностным сопротивлением и шириной нанопроводов. Ток смещения составил  $0,9I_c$ . Число отсчетов нормализовано на длину волны 1300 нм.

Такое поведение числа отсчетов для образцов с разным поверхностным сопротивлением представляется ожидаемым, поскольку коэффициент поглощения должен быть выше у более высокоомной сверхпроводниковой плёнки. WSi структуры показывают более слабые зависимости числа отсчетов в сравнении со структурами на основе NbN пленок. Так, число отсчетов для WSi структуры с шириной нанопровода 100 нм уменьшается в два раза (рис. 1-2). Однако структура с шириной нанопровода 80 нм обнаруживает флуктуации отсчетов в пределах 20%. WSi структура с наиболее узким нанопроводом даёт наибольшее поглощение, которое сохраняется почти неизменным в пределах длин во 1300-2500 нм.

Таким образом, полученные результаты показывают, что возможно значительное улучшение характеристик однофотонных детекторов в более длинноволновой области спектра для практических применений путём выбора WSi структуры с наиболее узкой шириной нанопровода и наиболее высоким значением поверхностного сопротивления плёнки. Однако

детекторы на основе WSi плёнок имеют несколько существенных недостатков в сравнении с NbN плёнками. Критическая температура сверхпроводниковых WSi плёнок составляет около 3 К, что ниже температуры жидкого гелия 4.2 К. Также они имеют низкое значение критического тока  $I_c = 9$  мкА при 1.7 К. Всё это требует привлечения дополнительного криогенного оборудования для достижения более низких температур, а также низкошумящих усилителей для получения приемлемого соотношения сигнал-шум.

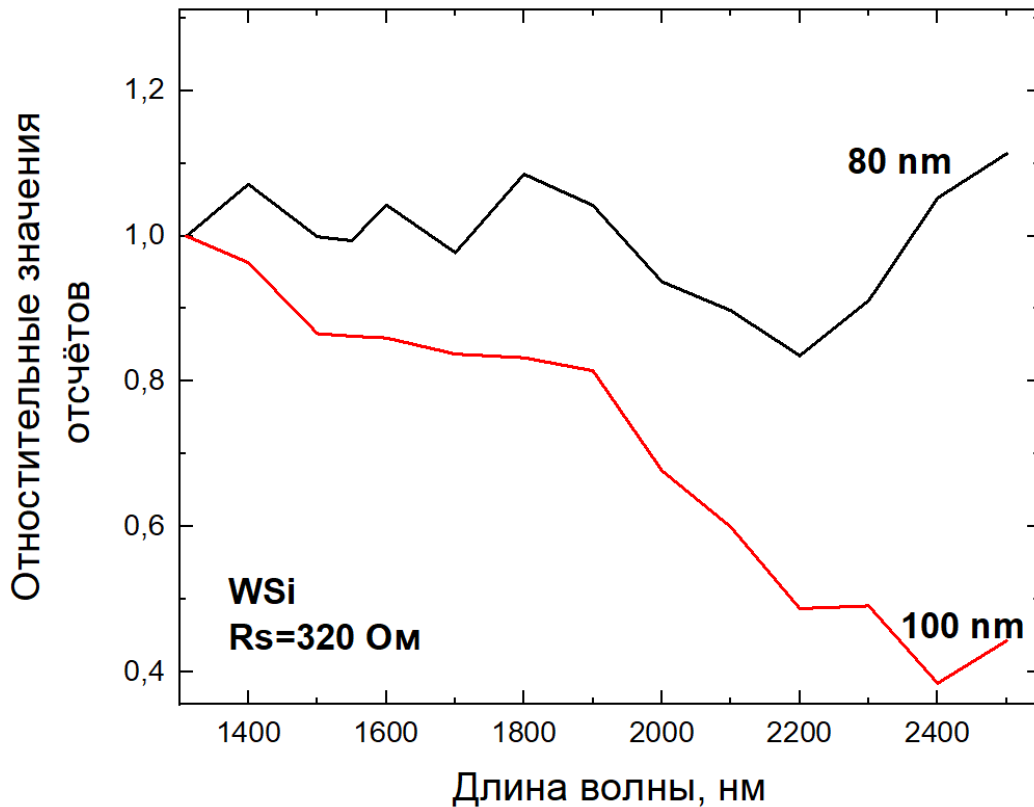


Рис. 2. Зависимость относительного числа отсчётов от длины волны падающего излучения для WSi структуры с поверхностным сопротивлением  $R_s = 320$  Ом и шириной нанопроводов 80 нм and 100 нм. Ток смещения составил  $0,9I_c$ . Число отсчётов нормализовано на длину волны 1300 нм.

### Заключение

Мы исследовали спектральные характеристики WSi и NbN сверхпроводниковых однофотонных детекторов с поверхностным сопротивлением от 300 до 500 Ом/квadrat и шириной нанопроводов от 80 до 100 нм в диапазоне длин волн 1300-2500 нм. WSi структуры с поверхностным сопротивлением  $R_s = 320$  Ом и шириной нанопровода 80 нм демонстрируют лучшие характеристики для детектирования одиночных фотонов в более длинноволновой области спектра. Сверхпроводниковые однофотонные детекторы на основе NbN и WSi ультратонких плёнок обнаруживают значительную разницу в квантовой эффективности в длинноволновом диапазоне, которая достигает одного порядка величины на длине волны 2500 нм. Однако достижение наилучшего режима работы сверхпроводниковых WSi структур требует более глубокого охлаждения в сравнении с NbN структурами вследствие их более низких критических температур.

### Благодарности

Данная работа была поддержана в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) № 18-12-00364.

Литература

1. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, A. Korneev, V. Seleznev, N. Kaurova, O. Minaeva, G. Goltsman, K. G. Lagoudakis, M. Benkhaoul, F. Levy, and A. Fiore, *Nat. Photonics* **2**, 302 (2008).
2. Korneev, Yu. Korneeva, I. Florya, B. Voronov, and G. Goltsman, *Physics Procedia* **36**, 72 (2012).
3. M. Sclafani, M. Marksteiner, F. Keir, A. Divochiy, A. Korneev, A. Semenov, G. Goltsman, and M. Arndt, *Nanotechnology* **23**, 065501 (2012).
4. V. Kovalyuk, W. Hartmann, O. Kahl, N. Kaurova, A. Korneev, G. Goltsman, and W. H. P. Pernice, *Opt. Express* **21**, 22683 (2013).
5. J. J. Renema, G. Frucci, Z. Zhou, F. Mattioli, A. Gaggero, R. Leoni, M. J. A. de Dood, A. Fiore, and M. P. van Exter, *Opt. Express* **20**, 2806 (2012).
6. J. J. Renema, G. Frucci, M. J. A. de Dood, R. Gill, A. Fiore, and M. P. van Exter, *Phys. Rev. A* **86**, 062113 (2012).
7. R. Hosten, R. Braive, M. Larqué, K.-H. Lee, A. Talneau, L. Le Gratiet, I. Robert-Philip, I. Sagnes, and A. Beveratos, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 123101 (2009).
8. T R. Hosten, A. Michon, G. Beaudoin, N. Gogneau, G. Patriache, J.-Y. Marzin, I. Robert-Philip, I. Sagnes, and A. Beveratos, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 073106 (2008).
9. M. Halder, A. Beveratos, N. Gisin, V. Scarani, C. Simon, and H. Zbinden, *Nat. Phys.* **3**, 692 - 695 (2007).
10. Marsili, F., Bellei, F., Najafi, F., Dane, A. E., Dauler, E. A., Molnar, R. J., & Berggren, K. K. (2012). Efficient Single Photon Detection from 500 nm to 5  $\mu$ m Wavelength. *Nano Letters*, **12**(9), 4799–4804. [11] GN Gol'tsman, K Smirnov, P Kouminov, B Voronov, N Kaurova, V Drakinsky, J Zhang, A Verevkin, Roman Sobolewski 2003 *IEEE Transactions on*. **13** (2) pp192-195.
11. Li, H., Zhang, L., You, L., Yang, X., Zhang, W., Liu, X., ... Xie, X. (2015). Large-sensitive-area superconducting nanowire single-photon detector at 850 nm with high detection efficiency. *Optics Express*, **23**(13), 17301.
12. Kerman, A. J., Dauler, E. A., Keicher, W. E., Yang, J. K. W., Berggren, K. K., Gol'tsman, G., & Voronov, B. (2006). Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters. *Applied Physics Letters*, **88**(11), 111116.
13. Baek, B., Lita, A. E., Verma, V., & Nam, S. W. (2011). Superconducting a-WxSi1-x nanowire single-photon detector with saturated internal quantum efficiency from visible to 1850 nm. *Applied Physics Letters*, **98**(25), 251105.
14. P. Zolotov, A. Divochiy, Y. Vakhtomin, V. Seleznev, P. Morozov, K. Smirnov, Superconducting Single-photon Detectors Made of Ultra-thin VN Films, *PhIO-2018, VII International Conference on Photonics and Information Optics, Volume 2018*.
15. Gao, J. R., Hajenius, M., Tichelaar, F. D., Klapwijk, T. M., Voronov, B., Grishin, E., ... Mehregany, M. (2007). Monocrystalline NbN nanofilms on a 3C-SiC/Si substrate. *Applied Physics Letters*, **91**(6), 062504.
16. K. Smirnov, A. Divochiy, Y. Vakhtomin, P. Morozov, P. Zolotov, A. Antipov, V. Seleznev, *Supercond. Sci. Technol.* **2018**, **31**, 035011.
17. Smirnov K, Divochiy A, Vakhtomin Y, Morozov P, Zolotov P, Antipov A, Seleznev V. *2018 Superconductor Science and Technology* **31**(3) 035011.
18. Seleznev V, Divochiy A, Vakhtomin Y B, Morozov P, Zolotov P, Vasil'ev D, Moiseev K, Malevannaya E and Smirnov K Superconducting detector of IR singlephotons based on thin WSi films *J. Phys.: Conf. Ser.* **737** 012032 (2016).
19. Vasilev, D. D., Malevannaya, E. I., & Moiseev, K. M. Vacuum coating system for deposition of superconducting W x Si(1-x) ultrathin films used in single photon detectors. *Journal of Physics: Conference Series*, **872**, 012027(2017).
20. Smirnov, K., Vachtomin, Y., Divochiy, A., Antipov, A., & Goltsman, G. Dependence of dark count rates in superconducting single photon detectors on the filtering effect of standard single mode optical fibers. *Applied Physics Express*, **8**(2), 022501(2015).