

02,12

Моделирование двухфотонных событий в сверхпроводящей полоске для различной длины тепловой связи

© Е.В. Щетинина^{1,2}, М.А. Дрязгов^{2,3}, Ю.П. Корнеева², А.А. Корнеев^{2,3}, М.А. Тархов²

¹ Национальный исследовательский университет „МЭИ“,
Москва, Россия

² Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
Москва, Россия

E-mail: ShchetininaYV@mpei.ru

Поступила в Редакцию 17 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 17 апреля 2023 г.

Принята к публикации 11 мая 2023 г.

Представлены результаты исследования эволюции двух горячих пятен, образованных одновременным поглощением двух фотонов. Оценивались время жизни нормальных доменов и максимальное сопротивление сверхпроводящей полоски в зависимости от расстояния между поглощенными фотонами. Минимальное расстояние между краями распределения температур горячих пятен, приводящее к потере термической связи, равно 28 nm, что согласуется с экспериментальными данными. Была оценена возможность различения двухфотонных событий для различных схем считывания.

Ключевые слова: сверхпроводимость, SSPD, горячее пятно, полоска NbN.

DOI: 10.21883/FTT.2023.07.55836.42H

1. Введение

Сверхпроводящий однофотонный детектор (superconducting single photon detector, SSPD) чувствителен к излучению от рентгеновского до среднего инфракрасного (ИК) диапазонов. Принцип его работы основан на локальном нарушении сверхпроводимости за счет поглощения фотона. SSPD сочетает в себе низкую скорость темнового счета (ниже 1 Hz), высокую скорость счета одиночных фотонов (выше 1 GHz) и высокую квантовую эффективность (99.5%) [1]. Такие детекторы используются в квантовой криптографии [2], при анализе отказов интегральных схем [3], а также рассматриваются в других областях, таких как астрономия [4], времяпролетная спектроскопия [5], системы оптической связи в дальнем космосе [6]. На сегодняшний день однофотонный детектор на основе сверхпроводящей нанополоски является самым быстрым однофотонным детектором для подсчета фотонов [7]. В последние годы ведутся исследования SSPD в области детектирования и разрешения многофотонных событий [8].

Одним из минусов SSPD является их неспособность различать число фотонов в оптическом импульсе. Различение однофотонных и двухфотонных событий позволит значительно расширить область применения детекторов в таких областях, как квантовая оптика [9], метрология [10] и флуоресцентная микроскопия [11], где требуется обнаружение сверхслабого света, а также обеспечение безопасности систем квантовой криптографии [12].

С помощью электротермической модели были исследованы времена жизни нормальных доменов, сопротив-

ление сверхпроводящей полоски и форма фтоотклика напряжения в зависимости от расстояния между поглощенными фотонами. Было получено минимальное расстояние между краями распределения температур горячих пятен, приводящее к потере термической связи доменов [13–14]. Была оценена возможность различения однофотонных и описанных двухфотонных событий с помощью известных схем считывания.

2. Моделирование и результаты

Поглощение фотона приводит к образованию нормальной области в сверхпроводящей полоске, зависящей от энергии фотона, и к срыву квантовых вихрей. Вихрь и антивихрь под действием силы Лоренца движутся к краям полоски, перпендикулярно току смещения детектора, образуя перетяжку с нормальным состоянием сверхпроводящей пленки. Для NbN ширина перетяжки примерно равна 20 nm, а время образования сравнимо с временем электрон-электронного взаимодействия [15]. За время образования нормальной перетяжки ток в сверхпроводящей полоске не изменяется из-за кинетической индуктивности детектора, и горячие области не взаимодействуют из-за большого времени фонон-фононного взаимодействия. Это позволяет считать образование двух нормальных областей независимыми друг от друга при условии одновременного поглощения фотонов.

Используемая электротермическая модель основана на решении двух дифференциальных уравнений, одно из которых описывает эволюцию горячего пятна, дру-

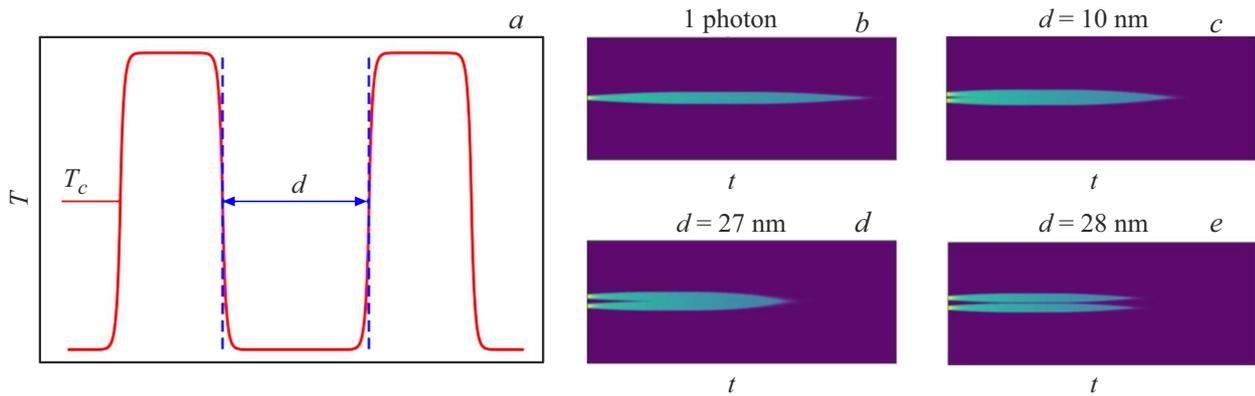


Рис. 1. (a) Начальный температурный профиль нормальных доменов; (b–e) тепловые карты эволюции нормальных доменов во времени для разных d , значения температуры показаны с использованием цветов.

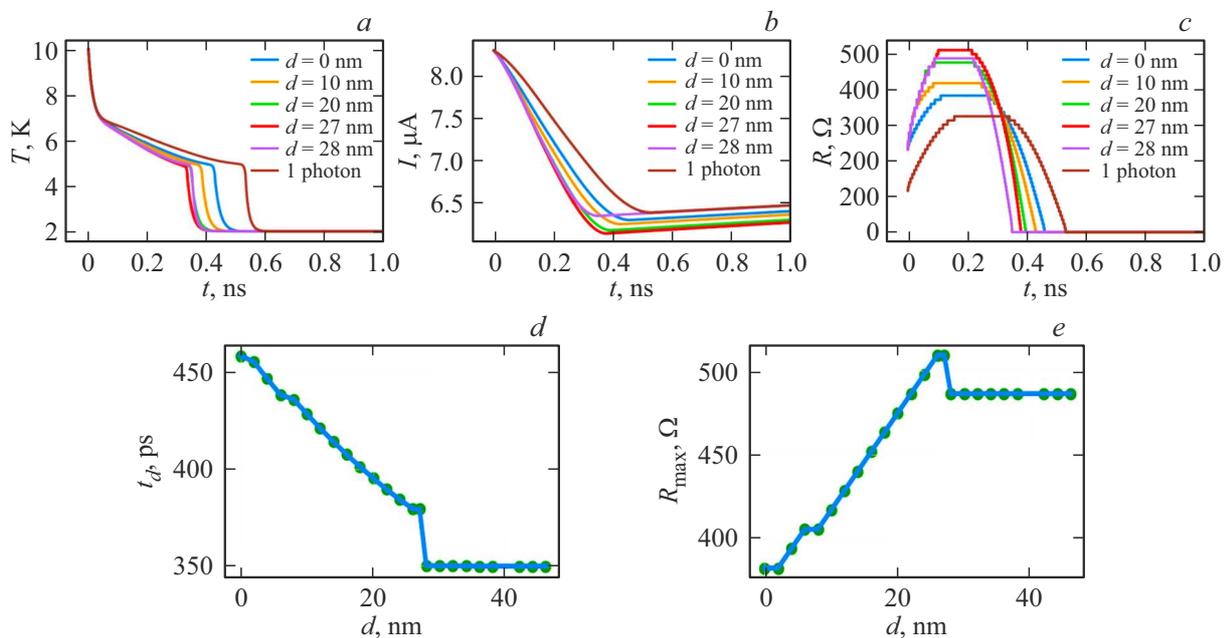


Рис. 2. Зависимость (a) температуры в центре нормального домена, (b) тока в сверхпроводящей полоске и (c) сопротивления сверхпроводящей полоски от времени для различной величины d . Зависимость (d) времени жизни нормального домена t_d и (e) максимального сопротивления сверхпроводящей полоски R_{\max} от d .

гое описывает изменение тока через сверхпроводящую полоску [16]. Как показывают исследования, для репрезентативных результатов достаточно решения термодинамического уравнения в одномерном случае [17].

Исследуемый образец представляет собой полоску NbN размером $0.1 \times 10 \mu\text{m}$, толщиной 4.8 nm, изготовленную методами электронной литографии и плазмохимического травления. Критическая температура сверхпроводника $T_c = 10 \text{ K}$, температура ванны с жидким гелием при пониженном давлении, то есть температура подложки, $T_{\text{sub}} = 2 \text{ K}$, кинетическая индуктивность одного квадрата пленки $L_h = 100 \text{ pH}/\square$, сопротивление квадрата пленки $R_s = 579 \Omega/\square$, критический ток $I_c = 10 \mu\text{A}$. Волновое сопротивление коаксиальной линии, параллельной детектору, $Z_0 = 50 \Omega$.

Моделирование начинается с момента образования в сверхпроводящей полоске нормального домена. Начальные условия для численного решения: ток в сверхпроводнике близок к критическому $I_{\text{bias}} = 0.9I_c$, нормальный домен шириной 20 nm имеют профиль температуры, показанный на рис. 1, a, остальная часть полоски имеет температуру, равную температуре подложки. Уравнение теплопроводности решалось в одномерном случае для области $0.1 \times 0.6 \mu\text{m}$, что оказалось достаточным, так как ширина нормального домена значительно меньше длины выбранной области.

На рис. 1, a показан варьируемый в данном исследовании параметр d — расстояние между границами образовавшихся нормальных доменов. На рис. 1, b–e демонстрируются тепловые карты эволюции размеров

и температуры нормальных доменов во времени для различной величины d . Результаты моделирования для исследуемых характеристик сверхпроводящего детектора показаны на рис. 2, для сравнения приводятся также результаты моделирования однофотонного поглощения.

Из рис. 2, *a* заметно, что время жизни нормального домена уменьшается при увеличении d . Это объясняется увеличением сопротивления (рис. 2, *c*), что приводит к уменьшению тока (рис. 2, *b*) в сверхпроводящей полоске и соответствующему уменьшению джоулева нагрева. Также важно отметить, что при $d = 28$ nm форма температурного профиля приближается к постоянному виду и не меняется, начиная с $d = 30$ nm, как показано на рис. 2, *a*.

При анализе зависимостей времени жизни нормального домена и максимального сопротивления сверхпроводящей полоски от расстояния между границами образовавшихся нормальных доменов, показанных на рис. 2, *d, e*, виден резкий переход от $d = 27$ nm к $d = 28$ nm. Это объясняется потерей термической связи между доменами, как показано на рис. 1, *d, e*. При наличии термической связи между доменами, диффузия тепла происходит только в одном направлении, что увеличивает время их жизни. Также увеличение размеров нормальной области в случае наличия термической связи увеличивает общее сопротивление сверхпроводящей полоски.

Выявленная длина тепловой связи между горячими пятнами в 28 nm близка к полученной в 2012 году в работе Ренема и др. в 23 ± 2 nm [13]. Авторы с помощью детекторной томографии и метода учета линейных потерь получили полную статистику отклика детектора NbN с дополнительным намеренным сужением для регистрации различий в количестве поглощенным фотонах.

В работе 2019 г. Поляковой и др. длина тепловой связи равна 17 ± 2 nm [14]. Она была подсчитана с помощью применения метода детекторной томографии для получения набора зависимостей вероятности счета от среднего числа фотонов в лазерном импульсе.

На рис. 3 представлены импульсы напряжений однофотонного детектора, снимаемые с коаксиальной линии, при различной величине d . Хорошо заметно, что при увеличении расстояния между нормальными доменами, амплитуда фотоотклика возрастает, из-за роста сопротивления сверхпроводящей полоски (рис. 2, *e*). При потере термической связи амплитуда фотоотклика значительно убывает и становится слабо отличимой от однофотонного детектирования. Также стоит отметить, что время нарастания переднего фронта фотоотклика уменьшается при увеличении расстояния между нормальными доменами. Эти зависимости могут быть использованы на практике, чтобы различать двухфотонные события с различным расстоянием между образовавшимися нормальными доменами от однофотонных. Однако, прямое измерение обнаруженных зависимостей ограничено используемыми в эксперименте усилителями: тепловые шумы усилителей, работающих при комнатной температуре, превышают разницу амплитуд, а полоса

усиления ограничивает дифференцирование передних фронтов фотоотклика.

Предложенный в 2020 г. метод согласования импеданса коаксиальной линии и сопротивления нормального домена позволяет различать однофотонные (согласованные) и двухфотонные (несогласованные) события [18]. Но, как показано на рис. 2, *c, f*, сопротивление двух нормальных доменов с тепловой связью и без нее значительно отличаются друг от друга и от сопротивления одного нормального домена, что не позволит эффективно использовать представленный метод.

Другой способ различения числа фотонов по фотоотклику сверхпроводящего детектора был предложен

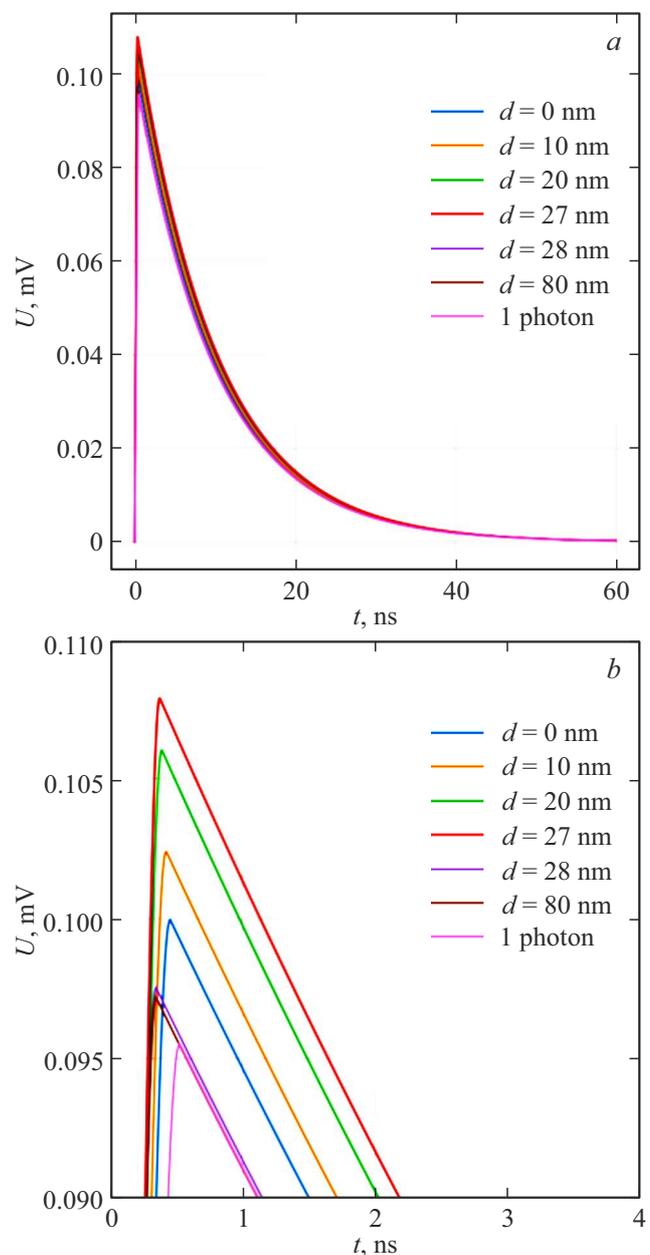


Рис. 3. (а) Фотоотклики детектора для различной величины d ; (б) Область вблизи амплитуд фотооткликов.

в 2021 г. Он основан на использовании высокочастотного контура, снимающего сигнал с высокими показателями сигнал/шум, с последующей их программной обработкой путем сопоставления с ранее полученными опорными импульсами [19]. Данное решение является более предпочтительным и позволяет обеспечить различение фотонов с тепловой связью и без, однако система обработки требует предварительной калибровки.

3. Заключение

Согласно электротермической модели, время жизни домена уменьшается с увеличением расстояния между краями домена, и не изменяется после потери термической связи между доменами.

В результате моделирования была получена длина связи между горячими пятнами в 28 nm, которая согласуется с экспериментальными данными.

Сделан вывод, что импульсы напряжения при двухфотонном и однофотонном событиях, принимаемые измерительным оборудованием, являются неразличимыми без использования дополнительных методов детектирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Chang. „Detecting Single Photons with Superconducting Nanowires“. Delft University of Technology (2021). 144 с.
- [2] H. Takesue, S.W. Nam, Q. Zhang, R. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, Y. Yamamoto. *Nature Photon.* **1**, 343 (2007).
- [3] J. Zhang, N. Boiadjeva, G. Chulkova, H. Deslandes, G.N. Gol'tsman, A. Korneev, P. Kouminov, M. Leibowitz, W. Lo, R. Malinsky, O. Okunev, A. Pearlman, W. Slysz, A. Verevkin, K. Wilsher, C. Tsao, R. Sobolewski. *Electron. Lett.* **39**, 1086 (2003).
- [4] E. L. Coarer, S. Blaize, P. Benech, I. Stéfanon, A. Morand, G. L'erondel, G. Leblond, P. Kern, J. Fédéli, P. Royer. *Nature Photon.* **1**, 473 (2007).
- [5] K. Suzuki, S. Miki, S. Shiki, Y. Kobayashi, K. Chiba, Z. Wang, M. Ohkubo. *Physica C* **468** (2008).
- [6] L.J. Deutsch. *Nat. Astronomy* **4**, 9, 907 (2020).
- [7] R. Cheng, Y. Zhou, S. Wang, M. Shen, T. Taher, H. Tang. *Nat. Photon.* **17**, 112 (2022).
- [8] Iman Esmacil Zadeh, J. Chang, Johannes W.N. Los, Samuel Gyger, Ali W. Elshaari, Stephan Steinhauer, Sander N. Dorenbos, Val Zwiller. *Appl. Phys. Lett.* **118**, 190502 (2021).
- [9] R.H. Hadfield. *Nat. Photon.* **3**, 696 (2009).
- [10] M. Shangguan, H. Xia, C. Wang, J. Qiu, S. Lin, X. Dou, Q. Zhang, J.W. Pan. *Opt. Lett.* **42**, 3541 (2017).
- [11] K. Morimoto, A. Ardelean, M.L. Wu, A.C. Ulku, I.M. Antolovic, C. Bruschini, E. Charbon. *Optica* **7**, 346 (2020).
- [12] A.J. Miller, S.W. Nam, J.M. Martinis, A.V. Sergienko. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4, 791 (2003).
- [13] J.J. Renema, G. Frucci, Z. Zhou, F. Mattioli, A. Gaggero, R. Leoni, M.J.A. de Dood, A. Fiore, M.P. van Exter. *Opt. Exp.* **20**, 3, 2806 (2012).
- [14] M.I. Polyakova, I.N. Florya, A.V. Semenov, A.A. Korneev, G.N. Goltsman. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1410**, 012166 (2019).
- [15] A.N. Zotova, D.Y. Vodolazov. *Phys. Rev. B* **85**, 024509 (2012).
- [16] K.W. Yang, A.J. Kerman, E.A. Dauler, V. Anant, K.M. Rosfjord, K.K. Berggren. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17**, 581 (2007).
- [17] M. Dryazgov, A. Semenov, N. Manova, Y. Korneeva, A. Korneev. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1695**, 012195 (2020).
- [18] D. Zhu, M. Colangelo, C. Chen, B.A. Korzh, F.N. Wong, M.D. Shaw, K.K. Berggren. *Nano Lett.* **20**, 3858 (2020).
- [19] M. Endo, T. Sonoyama, M. Matsuyama, F. Okamoto, S. Miki, M. Yabuno, F. China, H. Terai, A. Furusawa. *Opt. Exp.* **29**, 8, 11728 (2021).

Редактор Д.В. Жуманов