

УДК 538.945

ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА С РАЗРЕШЕНИЕМ ЧИСЛА ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ПОЛОСОК МИКРОННОЙ ШИРИНЫ

© 2022 г. М. А. Дрязгов^{1, *}, Ю. П. Корнеева², А. А. Корнеев^{1, 3}

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук”, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский педагогический государственный университет”, Москва, Россия

*E-mail: mdryazgov@hse.ru

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

После доработки 07.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Выполнен теоретический анализ работы сверхпроводникового детектора с разрешением числа фотонов на основе полосок микронной ширины с использованием электротермической модели. Рассмотрены конфигурации последовательного и параллельного соединения секций детектора. Выявлено, что последовательное соединение секций для полосок микронной ширины более оптимально с точки зрения количества одновременно регистрируемых фотонов и амплитуды отклика сверхпроводникового детектора.

DOI: 10.31857/S0367676522060102

Развитие квантовых технологий требует знания о количестве фотонов в регистрируемом оптическом импульсе [1]. Это необходимо при исследовании однофотонных источников [2], для работы лазерных радаров (лидаров) [3], для изучения флуоресценции [4] и так далее. Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (от англ. superconducting single photon detector – SSPD) [5], известные уже два десятилетия [6], отлично зарекомендовали себя для регистрации одиночных фотонов с эффективностью до 98% [7] и мертвым временем в несколько наносекунд. Их принцип работы основан на локальном нарушении сверхпроводимости в полоске с током при поглощении фотона [8], что приводит к появлению импульса напряжения.

Высокие эффективность и быстродействие SSPD позволило им стать основным инструментом для регистрации одиночных фотонов в целом ряде приложений, а также способствовало поиску способов их использования для определения числа фотонов в импульсе излучения. Наиболее распространенные подходы – это соединение нескольких детекторов последовательно [9, 10] или параллельно [11]. В обоих случаях амплитуда регистрируемого импульса напряже-

ния будет зависеть от количества детекторов, одновременно перешедших в нормальное состояние. Обе схемы соединения позволяют различать число фотонов в оптическом импульсе при условии, что каждый отдельный детектор поглощает один фотон.

Схемы соединения отдельных SSPD в детектор с разрешением числа фотонов PNR-SSPD (от англ. photon number resolving – PNR) показаны на рис. 1. Сопротивления $R_{n1} - R_{nk}$ условно обозначают сопротивления нормальных доменов, образующихся в отдельных SSPD при регистрации фотонов, Z_0 – импеданс СВЧ-линии съема сигнала (коаксиального кабеля), R_p – сопротивление дополнительных резисторов. При параллельном соединении SSPD резисторы R_p предотвращают шунтирование “сработавшего” SSPD после поглощения фотона “не сработавшими”, обеспечивая перераспределение части тока в СВЧ-линию, а также восстановление токов во всех SSPD. При последовательном соединении SSPD резисторы R_p шунтируют сопротивления нормальных доменов, делая общее сопротивление сравнимым с импедансом СВЧ-линии, а также обеспечивают условия самопроизвольного остывания нормаль-

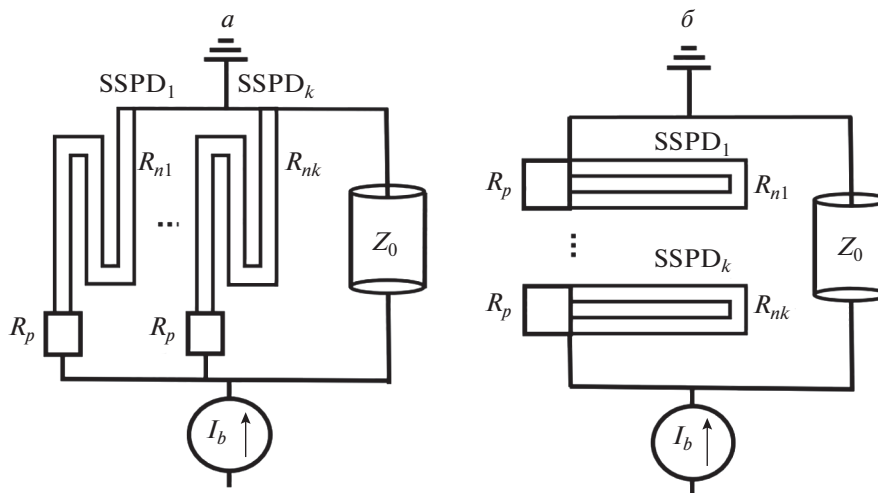


Рис. 1. Эквивалентные электрические схемы PNR-SSPD: параллельное (а) и последовательное соединение секций (б). Расшифровку обозначений см. в тексте.

ного домена и восстановления сверхпроводимости. Далее по тексту один SSPD с соответствующим ему резистором мы будем называть “секцией” PNR-SSPD.

Для анализа работы детектора мы модифицировали электротермическую модель [12] работы SSPD на основе полосок микронной ширины [13]. Модель основывается на численном решении дифференциальных уравнений, описывающих эволюцию нормального домена в сверхпроводящей полоске и распределение тока в электрической цепи:

$$\frac{\partial cT}{\partial t} = J^2 \rho + k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha}{d} (T - T_{sub}), \quad (1)$$

$$L \frac{dI}{dt} = IR_n - (I_b - I) Z_0. \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает изменение локальной температуры: c – теплоемкость сверхпроводника, J – плотность тока в сверхпроводящей полоске, ρ – удельное сопротивление сверхпроводника в нормальном состоянии, k – теплопроводность сверхпроводника, α – теплопроводность между сверхпроводником и подложкой, d – толщина слоя сверхпроводника, T_{sub} – температура термостата (подложки). Уравнение (2) описывает изменение тока, протекающего через сверхпроводящую полоску: L – кинетическая индуктивность, R_n – сопротивление нормального участка сверхпроводника, I_b – ток смещения, заданный источником, Z_0 – импеданс коаксиальной линии.

Уравнение для тока было дополнено системой линейных уравнений согласно первому и второму

правилам Кирхгофа для всех узлов и контуров, входящих в PNR-SSPD:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + \dots + I_n + I_0 = I_b, \\ I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0, \\ I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0, \\ \dots \\ I_i R_i - I_0 Z_0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь: $I_1 \dots I_i$ – токи в $1 \dots i$ секции соответственно, I_0 – ток через коаксиальную линию, $R_1 \dots R_i$ – сопротивление секции: для параллельного соединения секций $R_i = R_n + R_p$, для последовательного $R_i = R_n R_p / (R_n + R_p)$.

Моделирование позволяет получать временные зависимости температуры нормального домена, его сопротивления, значения токов в каждом элементе электрической цепи, временные зависимости импульсов напряжения в коаксиальной линии, а также определять число секций, значения резисторов R_p и токов детектора, при которых сверхпроводимость будет самопроизвольно восстанавливаться в зависимости от количества одновременно работавших секций.

При моделировании общая площадь детектирующей части PNR-SSPD была ограничена размерами $60 \times 60 \text{ мкм}^2$, что соответствует размерам светопроводящей сердцевины многомодового оптоволокна. Ширина сверхпроводящей полоски из NbN $w = 1 \text{ мкм}$, зазор между полосками 1 мкм . То есть общая длина сверхпроводящей полоски ограничена – при разном количестве секций она равномерно делилась между ними. Число секций мы варьировали от 1 до 10 и для параллельного, и для последовательного соединения. Дополни-

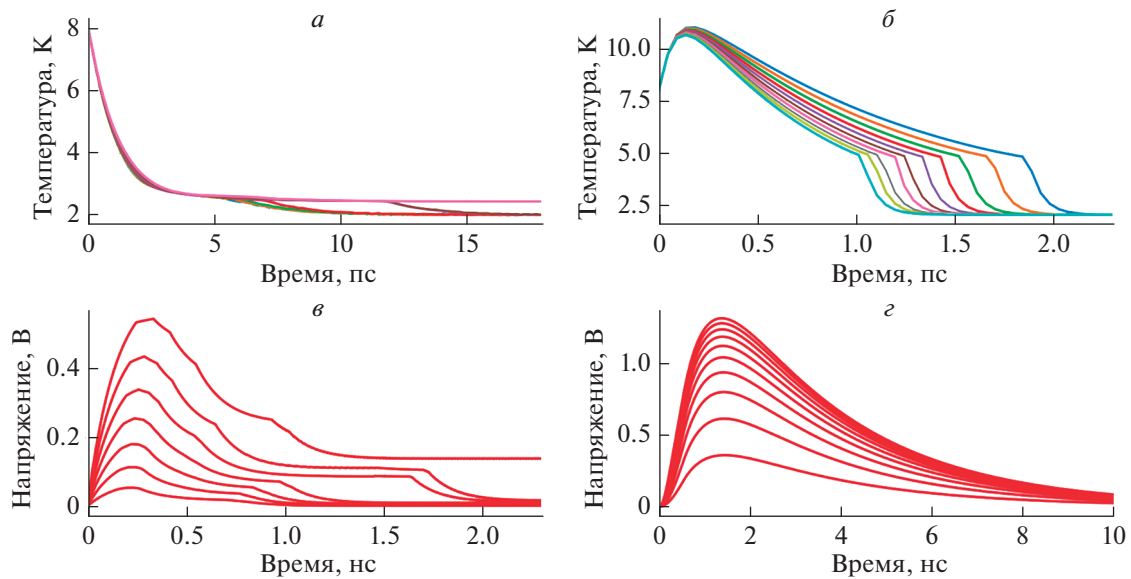


Рис. 2. Сравнение PNR-SSPD с параллельно и последовательно соединенными секциями. Динамика температуры в месте поглощения фотона в случае параллельного (а) соединения и последовательного соединения секций (б). Импульсы напряжения от детектора с 10 параллельными (в) и 10 последовательными секциями (з).

тельные резисторы в обоих случаях выбраны равными $R_p = 30$ Ом. Как будет показано ниже, для параллельного соединения секций такой номинал R_p обеспечивает максимальное число регистрируемых фотонов, а для последовательного это некий разумный компромисс между амплитудой импульсов и разницей амплитуд импульсов, возникающих при детектировании различного числа фотонов (5 и более). Импеданс коаксиальной линии $Z_0 = 50$ Ом. Толщина слоя сверхпроводника $d = 5$ нм, критический ток одной полоски $I_c = 100$ мкА, ток смещения $I_b = 0.8 I_c$. Характеристики пленки: сопротивление квадрата пленки в нормальном состоянии $R_s = 600$ Ом/квадрат, кинетическая индуктивность $L_s = 120$ пГн/квадрат и критическая температура $T_c = 9$ К. Температура термостата (фактически, подложки) соответствовала температуре в криорефрижераторе на основе машины замкнутого цикла RDK-101 компании Sumitomo $T_{sub} = 2.5$ К. Используемые параметры для сверхпроводящих пленок NbN взяты из экспериментальных работ, например [14].

На рис. 2а и 2б показаны зависимости температуры в том месте полоски, где был поглощен фотон, от времени для параллельного и последовательного соединений при различном числе “сработавших” секций, соответственно. На рис. 2в и 2г показаны зависимости напряжений на PNR-SSPD целиком для различного числа “сработавших” секций. В случае параллельного соединения при переходе в нормальное состояние одной секции, сумма то-

ков, протекающих через все секции детектора, меняется незначительно, так как частично ток перераспределяется по сверхпроводящим секциям, а часть тока уходит в коаксиальную линию, вызывая там импульс напряжения (рис. 2в). При увеличении числа секций, перешедших в нормальное состояние, изменение тока и амплитуда импульса напряжения увеличивается. Однако, при срабатывании 7 параллельных секций из 10, ток не возвращается к своему первоначальному значению, то есть сверхпроводящее состояние не восстанавливается. Этот эффект “залипания” детектора связан с быстрым восстановлением тока в полоске из-за низкой кинетической индуктивности секции [13, 14] и характерен для параллельно соединенных сверхпроводящих полосок и полосок микронной ширины. Последовательное соединение не имеет тенденций к залипанию (рис. 2б и 2г), так как динамика восстановления тока определяется индуктивностью всего детектора.

Стоит отметить, что для PNR-SSPD с параллельным соединением секций свойственно лавинообразное срабатывание. Так, при переходе в нормальное состояние большего количества секций, ток, при перераспределении по несработавшим секциям, может превысить в них критическое значение, переводя их в нормальное состояние. В то время как детектор с последовательным соединением секций не имеет проблем с лавинообразным срабатыванием, так как весь детектор представляет собой одну сверхпроводящую полоску – при переходе в нормальное состояние одной секции, ток одновременно убывает во всей полоске.

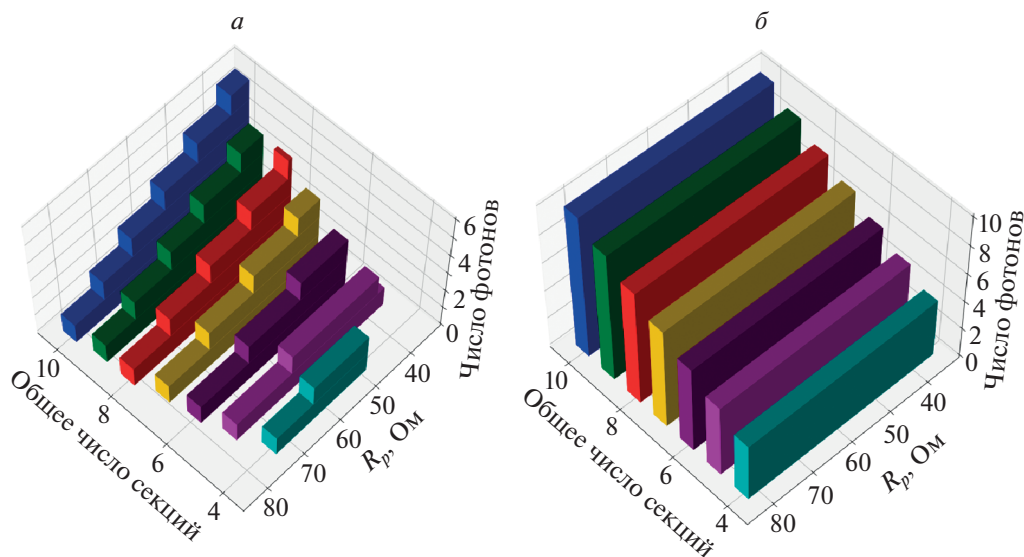


Рис. 3. Зависимость числа секций, не вызывающих лавинообразное срабатывание для PNR-SSPD с параллельным (а) и последовательным соединением секций (б) от общего количества секций и величины R_p .

Положительной особенностью детектора с параллельным соединением секций является меньшая длительность возникающего импульса напряжения, даже по сравнению с классическими, односекционными SSPD, вследствие уменьшения кинетической индуктивности (рис. 2в). Однако PNR-SSPD с последовательным соединением секций позволяет получать импульсы большей амплитуды, которые легче детектировать и различать (рис. 2г).

Быстродействие PNR-SSPD с параллельным соединением секций привлекательно для практических применений, что заставляет искать другие способы увеличения количества детектирующих секций, срабатывание которых не приводит к лавинообразному переключению. Один из способов – это подбор величины дополнительных сопротивлений R_p . Однако такой подбор сильно ограничен импедансом коаксиальной линии Z_0 и сопротивлением нормального домена R_n . Если R_p будет больше Z_0 , то при переходе сверхпроводящей полоски в нормальное состояние, сопротивление секции изменится незначительно в сравнении импедансом линии, тогда уменьшение тока будет недостаточно для остывания горячего пятна из-за джоулева нагрева, и сверхпроводящее состояние не восстановится. Если же R_p будет меньше R_n , то ток будет большей частью перераспределяться в другие секции детектора, вызывая их срабатывание, а также уменьшая амплитуду импульса напряжения.

Мы исследовали зависимость количества детектируемых фотонов (то есть количество срабатывающих секций без залипания и лавинообразного срабатывания) от общего числа секций и величины резистора R_p для параллельного и последовательного соединений (рис. 3). Количество секций варьировалось от 4 (минимальное, когда параллельный PNR мог различать больше 1 фотона, то есть даже 2 фотона вызывают лавинообразное переключение всех секций) до 10. Величины R_p варьировались от 5 до 100 Ом.

Как показано на рис. 3а, количество детектируемых фотонов для PNR-SSPD с параллельным соединением секций увеличивалось при увеличении общего числа секций и при приближении значения R_p к оптимальному (около 30 Ом), однако, в любом случае не превышало 7. В отличие от параллельного соединения, количество детектируемых фотонов в PNR-SSPD с последовательным соединением не зависит от величины R_p и всегда равно количеству секций (рис. 3б). Однако от величины R_p зависят амплитуды импульсов напряжения и разница амплитуд между соседними импульсами, соответствующими разному числу зарегистрированных фотонов. На рис. 4 рассмотрены два последовательных PNR-детектора, состоящих из 10 секций с величинами $R_p = 5$ Ом (рис. 4а) и $R_p = 50$ Ом (рис. 4б). Большое различие в R_p использовано для наглядной демонстрации эффекта. Рисунок демонстрирует, что максимальная амплитуда импульсов напряжения уве-

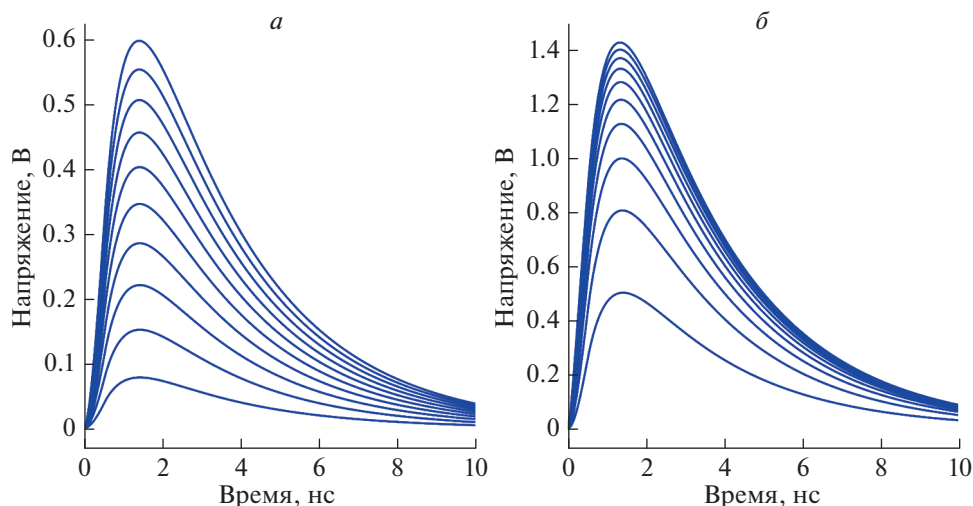


Рис. 4. Сравнение импульсов напряжения PNR-SSPD с 10 последовательными секциями и дополнительными резисторами величиной $R_p = 5$ (а), 50 Ом (б).

личивается с увеличением R_p . Это связано с тем, что большая часть перераспределяемого тока протекает через коаксиальную линию, а меньшая через дополнительный резистор. Также заметно уменьшение разницы максимальных напряжений соседних импульсов при регистрации 5 и более фотонов в случае, когда значение R_p сопоставимо с импедансом коаксиальной линии. Это объясняется тем, что при срабатывании большого числа секций, общее сопротивление SSPD с резисторами становится много больше Z_0 и согласование с СВЧ-линией ухудшается.

В итоге мы теоретически исследовали две конфигурации PNR-SSPD с последовательным и параллельным соединениями секций с помощью разработанной электротермической модели. Мы считаем, что для реализации детектора с разрешением числа фотонов на основе сверхпроводниковых полосок микронной ширины более перспективно последовательное соединение секций с параллельными резисторами: такие детекторы имеют большую амплитуду импульсов фотоотклика, а число различаемых фотонов может быть равно числу секций детектора. Представленные конфигурации PNR-SSPD легко масштабируются, что позволяет без изменения концепции изготавливать детекторы большей площади и с большим количеством секций.

Авторы выражают благодарность сотруднику ООО «Сверхпроводниковые нанотехнологии» А.В. Дивочему за полезные обсуждения. Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00287).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cattaneo M., Paris M., Olivares S. // Phys. Rev. A. 2018. V. 98. Art. No. 012333.
2. Hwang W. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91. Art. No. 057901.
3. Priedhorsky W., Smith R., Ho C. // Appl. Opt. 1996. V. 35. P. 441.
4. Hillesheim L., Müller J. // Biophys. J. 2005. V. 89. P. 3491.
5. You L. // Nanophotonics. 2020. V. 9. P. 2673.
6. Gol'tsman G., Okunev O., Chulkova G. et al. // Appl. Phys. Lett. 2001 V. 78. P. 705.
7. Reddy D., Nerem R., Nam S. et al. // Optica. 2020. V. 7. Art. No. 1649.
8. Engel A., Renema J., Il'in K. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28. Art. No. 114003.
9. Mattioli F., Zhou Z., Gaggero A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28. Art. No. 104001.
10. Zhou Z., Jahanmirinejad S., Mattioli F. et al. // Opt. Express. 2014. V. 22. Art. No. 3475.
11. Divochiy A., Marsili F., Bitauld D. et al. // Nature Photon. 2008. V. 2. P. 302.
12. Yang J., Kerman A., Dauler E. et al. // Appl. Supercond. 2007. V. 17. P. 581.
13. Dryazgov M., Semenov A., Manova N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1695. Art. No. 012195.
14. Korneeva Yu., Manova N., Dryazgov M. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2021. V. 34. Art. No. 084001.
15. Korneeva Yu., Vodolazov D., Semenov A. et al. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 9. Art. No. 064037.

Electrothermal model of a superconducting detector with photon number resolution based on micron width strips

М. А. Dryazgov^{a, *}, Yu. P. Korneeva^b, А. А. Korneev^{a, b}

^a *National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia*

^b *Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 115487 Russia*

^c *Moscow State Pedagogical University, Moscow, 119435 Russia*

**e-mail: mdryazgov@hse.ru*

We study micron-wide superconducting photon number resolving detectors using an electrothermal model. Configurations of serial and parallel connection of detector sections are considered, their advantages and disadvantages are revealed. We have found that a series connection of sections for micron-wide strips is more favorable in terms of the response amplitude and the number of resolved photons.