

Влияние внешнего переменного электрического поля на эффективность сверхпроводящего однофотонного детектора

© К.О. Седых,^{1,2} Е. Сулеймен,⁴ М.И. Святодух,^{1,2} А. Подлесный,⁴ В.В. Ковалюк,^{1,3} П.П. Ан,^{2,3} Н.С. Каурова,² И.Н. Флорья,^{2,3} К.Е. Лахманский,⁴ Г.Н. Гольцман^{1,4}

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, 109028 Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, 119991 Москва, Россия

³ Университет науки и технологий МИСиС, 119049 Москва, Россия

⁴ Российский квантовый центр, 121205 Москва, Россия
e-mail: kseniaolegovna98@gmail.com

Поступило в Редакцию 3 мая 2023 г.

В окончательной редакции 3 мая 2023 г.

Принято к публикации 3 мая 2023 г.

В работе исследован макет поверхностной ионной ловушки для масштабируемого квантового компьютера с радиочастотным электродом и сверхпроводящим однофотонным детектором, с рабочей температурой 4 К. Диапазон амплитуды радиочастотного сигнала варьировался от 10 до 800 мВ на частотах от 5 до 20 МГц. Исследован эффект влияния наведенного внешнего радиочастотного поля ловушки на скорость темновых и световых отчетов однофотонного детектора. Результаты работы имеют важное значение при конструировании поверхностных ионных ловушек с планарными однофотонными детекторами.

Ключевые слова: поверхностная ионная ловушка, сверхпроводящий однофотонный детектор, нитрид ниобия, масштабируемый квантовый компьютер на ионах.

DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55756.88-23

Введение

Крупномасштабный квантовый компьютер может эффективно решать задачи, которые неразрешимы с использованием классического компьютера [1]. Квантовая обработка информации требует согласованного манипулирования элементарными объектами, называемыми кубитами. Кубиты могут быть реализованы на основе различных физических квантовых систем, наиболее популярными из которых являются сверхпроводниковые схемы, фотоны, нейтральные атомы и захваченные одиночные ионы [2]. Одним из наиболее перспективных подходов являются ионные кубиты [3], в которых информация закодирована при помощи специфических энергетических уровней отдельных ионов, захваченных в сверхвысоком вакууме в системах, работающих либо при комнатной температуре, либо при температурах около 4 К.

Для первых экспериментов по манипуляции с ионными кубитами успешно использовались трехмерные радиочастотные ловушки Пауля, однако для перехода к масштабным квантовым вычислениям наиболее перспективно использование двумерных (поверхностных) ионных ловушек (ПЛ, поверхностная ловушка). В течение последних нескольких лет научными группами ведутся разработки таких ловушек, представляющих собой многообещающую масштабируемую архитектуру [4]. Ионная

ПЛ представляет собой микросхему с набором электродов постоянного тока и радиочастотных (RF) электродов на ее поверхности, создающих потенциальную яму для захвата ионов на некотором расстоянии от поверхности микросхемы.

По мере увеличения размера массива захваченных ионов, необходимо разрабатывать методы и технологии для сбора и обнаружения фотонов, испускаемых большим количеством отдельных ионов. Это должно быть сделано с высокой эффективностью, так как точное измерение состояния иона определяется числом фотонов, которое может быть собрано с иона и зарегистрировано за время измерения. Однофотонные детекторы, интегрированные в поверхностные ионные ловушки, могут быть эффективно использованы для достижения этой цели. Сверхпроводниковые однофотонные детекторы (SSPD, от англ. Superconducting single-photon detector) [5] обладают низким уровнем ложных срабатываний (< 10 Hz), высокой эффективностью ($> 85\%$) и могут быть использованы для высокоточного измерения квантового состояния захваченного иона на чипе без необходимости вывода излучения из криостата. Несмотря на успешную демонстрацию принципа работы, основной проблемой интеграции ионных ПЛ с SSPDs является влияние поля ловушки на характеристики детектора: подавление критического тока, уменьшение эффективности детектирования, а также увеличения скорости

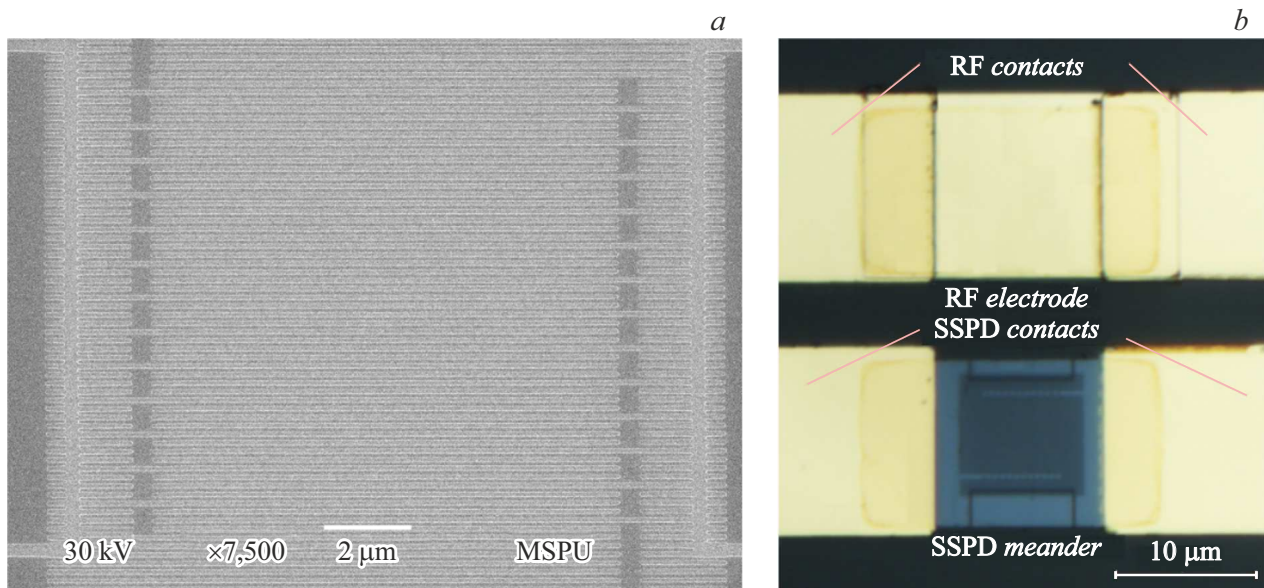


Рис. 1. Макет поверхностной ионной ловушки с SSPD; *a* — фотография нанополосок детектора SSPD в сканирующем электронном микроскопе, *b* — фотография макета поверхностной ионной ловушки с SSPD, включающего в себя контакты (SSPD contacts) и меандр (SSPD meander), контакты (RF contacts) и Ti/Au электрод (RF electrode), на который подается поле, моделирующее захват ионов.

темновых отчетов (при одном и том же рабочем токе), что может крайне негативно сказываться на скорости и точности считывания состояния захваченных ионов.

В работе [6] авторы использовали в качестве материала нанопроволоки SSPD аморфный сверхпроводник на основе соединения молибдена-кремния MoSi, обладающего низкой плотностью критического тока $\sim 1 \text{ MA/cm}^2$, что ограничило критический ток детектора величиной около $9 \mu\text{A}$. В настоящей работе для исследования влияния внешнего переменного электрического поля был выбран хорошо зарекомендовавший себя сверхпроводниковый материал — нитрид ниобия (NbN), который обладает плотностью критического тока $\sim 5 \text{ MA/cm}^2$, что позволит повысить критический ток образца до $30 \mu\text{A}$.

1. Технологический маршрут изготовления макета ПЛ с SSPD

Макет ПЛ, исследуемый в настоящей работе, представляет собой SSPD с расположенным рядом электродом из титана-золота (Ti/Au) (рис. 1). Технологический маршрут изготовления включал в себя следующие процессы: осаждение ультратонкой сверхпроводниковой пленки NbN, фотолитография знаков совмещения, электронная литография SSPD, электронная литография золотого RF электрода, фотолитография контактных площадок, фотолитография закрывшек и травление NbN.

На первых этапах изготовления макета поверхностной ионной ловушки необходимо напылить на образец тонкую пленку нитрида ниобия ($\sim 7 \text{ nm}$), с помощью фотолитографии нанести знаки совмещения, а затем проводить электронную литографию активной области SSPD [7].

На втором этапе проводился процесс формирования золотой перемычки — RF электрода ПЛ — с помощью дополнительной взрывной литографии. В качестве маски был использован двухслойный резист MMA A6/PMMA A3. Каждый слой наносился методом центрифугирования (6000 rpm, 60 s) и сушился на горячей плите (130°C , 60 s). Проявление резиста проходило в растворе воды (H_2O) и спирта (2-пропанол) в соотношении 8 : 1 в течение 20 s, реакция останавливалась в 2-пропанол. Слой Ti/Au, а также контактные площадки, напылялись аналогично процессу напыления знаков совмещения.

На третьем этапе проводилась фотолитография закрывшек и травление нитрида ниобия. Чтобы на конечном образце макета ПЛ с SSPD была только сверхпроводящая нанопроволока детектора в виде меандра, удалялись ненужные части нитрида ниобия. Для этого были сделаны специальные закрывшки — места, закрывающие активную область детектора — для последующего травления. Закрившки были сформированы методом фотолитографии. После засветки и проявления резиста в 7% растворе KOH сверхпроводник без закрывшек удалялся в атмосфере элегаза (SF_6) методом плазмохимического травления.

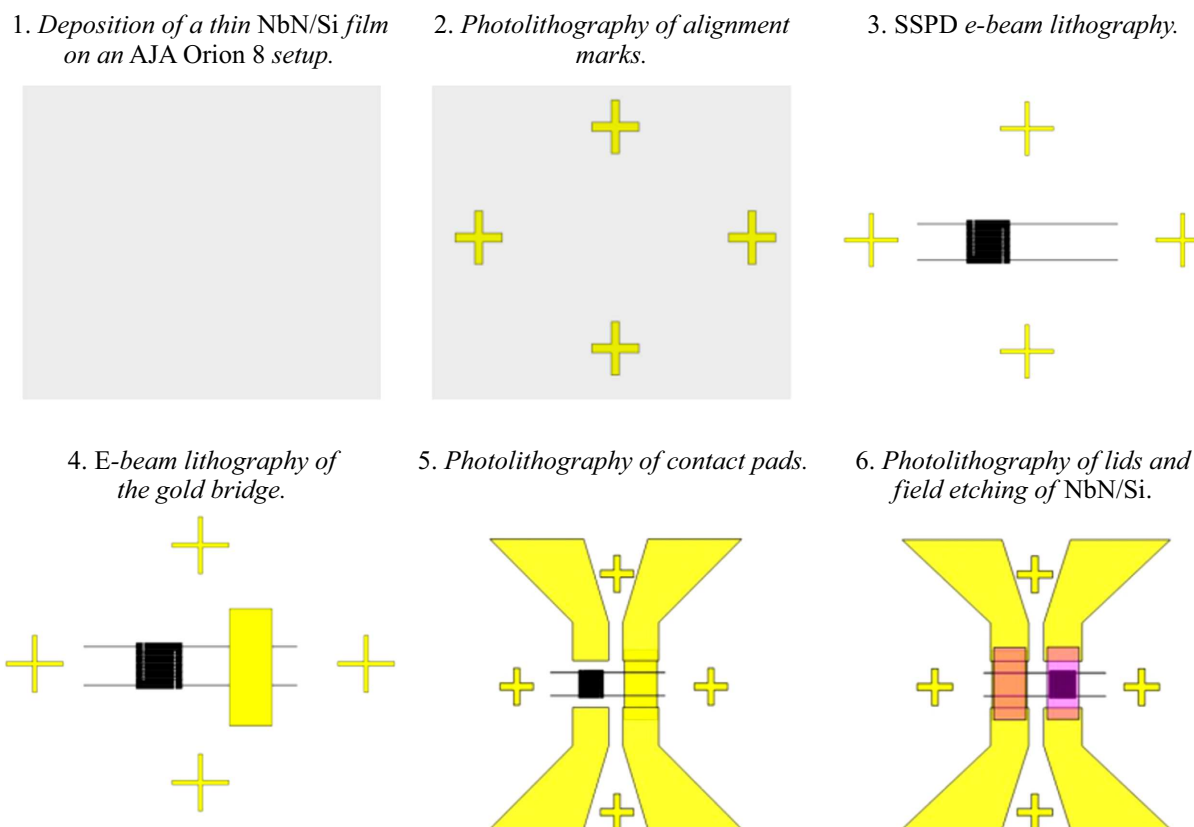


Рис. 2. Иллюстрация процесса изготовления ПЛ с SSPD: 1 — осаждение тонкой пленки NbN/Si на установке AJA Orion8, 2 — фотолитография знаков совмещения, 3 — электронная литография SSPD, 4 — электронная литография золотой перемычки, 5 — фотолитография контактных площадок, 6 — фотолитография крышек и травление NbN/Si по полю.

Схематическое изображение основных этапов изготовления ПЛ с SSPD представлено на рис. 2.

2. Описание экспериментальной установки и метода измерения

Схема экспериментальной установки для проведения исследования влияния внешнего электрического поля (моделирующего поле ПЛ) на эффективность сверхпроводникового однофотонного детектора при температуре около 3 К представлена на рис. 3. Установка включала в себя криостат с рефрижератором на основе замкнутого цикла, блок смещения детектора, счетчик импульсов, генератор сигналов внешнего RF-поля, термометр, осциллограф.

Образец ПЛ с SSPD размещается на холодной плате криостата с минимальной температурой 3 К. С помощью блока смещения, который включает в себя перестраиваемый источник тока, адаптер смещения (bias tee) и усилители, на детектор подавался ток, а с помощью счетчика импульсов записывалось число отсчетов, соответствующее каждому значению тока. На высокочастотный контакт подавалось внешнее электрическое поле с различными значениями амплитуд и частот с помощью RF-генератора и исследовалось влияние эффективности

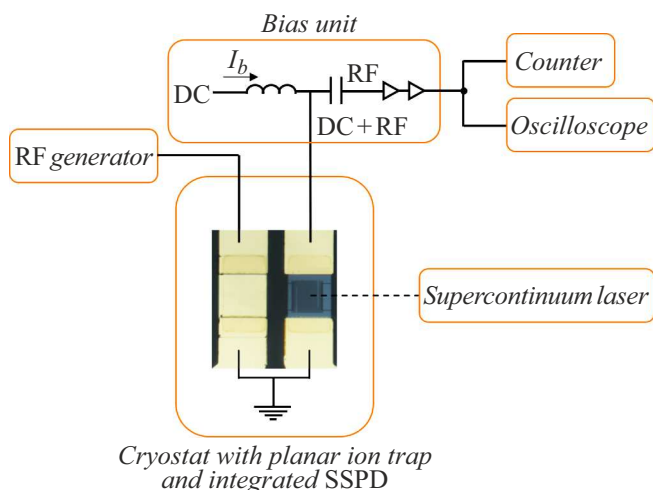


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. Черные линии — электрические коаксиальные кабели, пунктирные линии — оптическое волокно. Supercontinuum laser — суперконтинуум-лазер, RF generator — генератор внешнего поля, bias unit — блок смещения, counter — счетчик импульсов, oscilloscope — осциллограф, experimental sample — экспериментальный образец, cryostat with planar ion trap and SSPD model — криостат с макетом ПЛ и SSPD.

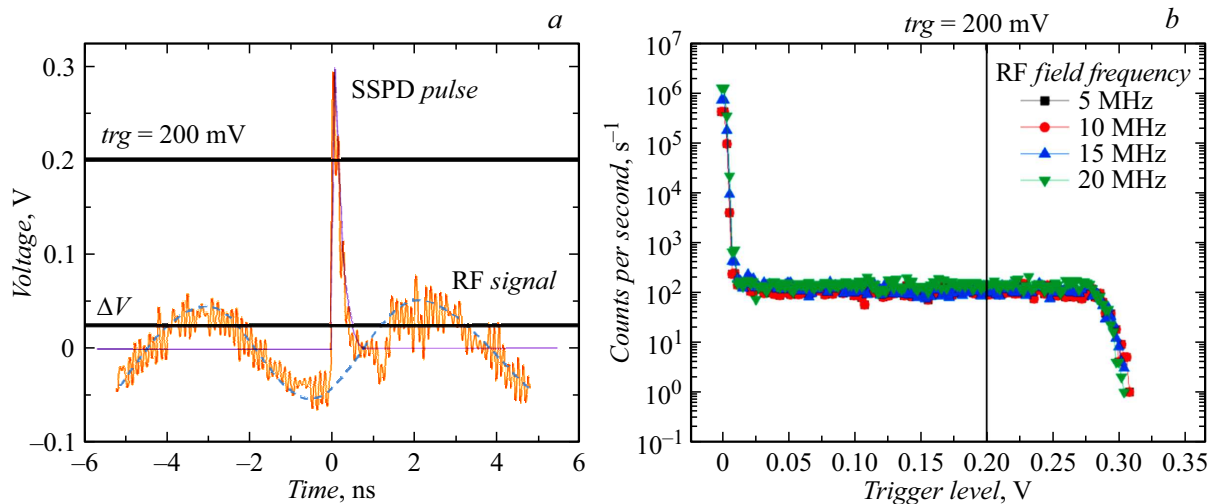


Рис. 4. Уровень компарации для измерения макета ПЛ. *a* — осциллограмма импульса детектора SSPD (SSPD pulse) с наведенным полем (синус, RF signal), *b* — измерение уровня триггера для измерения макета ПЛ для разных частот внешнего поля (5, 10, 15 и 20 MHz) с амплитудой 10 mV.

детектирования SSPD (при освещении лазера с длиной волны 600 nm) и скорости темнового счета с закрытым оптическим входом на корпусе криостата.

3. Влияние внешнего переменного электрического поля на SSPD

На рис. 4, *a* представлена осциллограмма сигнала с SSPD в ПЛ, которая включает в себя две составляющие: непосредственно импульс с детектора (обозначен фиолетовым цветом (в онлайн версии)) и наведенное внешнее поле (обозначено синим цветом (в онлайн версии) и пунктиром). На первом этапе исследования нами определялся оптимальный уровень триггера на счетчике импульсов. Для этого на образец подавался ток, соответствующий примерно 100 темновым отсчетам, и менялось значение триггера на счетчике импульсов от 0 до 300 mV (рис. 4, *b*). На графике зависимости числа отсчетов от уровня компарации были выделены три диапазона: диапазон 1 (до 12 mV), в котором отсчеты резко менялись с уровнем триггера импульса, диапазон 2 (от 16 до 280 mV) с практически неизменным значением отсчетов и диапазон 3 (> 280 mV) с уменьшающимся до нуля числом отсчетов детектора.

Уровень компарации (триггера), позволяющий отделить измерение сигнала от различных шумов и наводок, а также обособить внешнее RF-поле ПЛ, был выбран на уровне 200 mV для всей серии измерений (рис. 4, *b*).

На рис. 5 представлены зависимости скорости световых и темновых отсчетов SSPD от тока смещения при внешних полях ловушки с амплитудами 10–800 mV на частотах от 5 до 20 MHz. Из рисунка видно, что внешнее RF-поле значительно влияет на скорость темновых отсчетов за счет возникающих на фоне радиочастотного

сигнала паразитных токов в детекторе. При фиксированной частоте с увеличением амплитуды внешнего поля увеличивается значение возникающих RF-токов, способствуя выходу детектора из сверхпроводящего состояния при токах, меньших критического значения, определенного в случае выключенного внешнего поля. Однако если проследить за характером изменения кривых количества темновых отсчетов, сравнивая графики *a–d* на рис. 5 при фиксированной амплитуде внешнего поля, можно заметить, что с увеличением частоты растет амплитуда RF-токов в детекторе, что также приводит к выходу детектора из сверхпроводящего состояния при меньших токах. Вместе с увеличением темновых отсчетов и ограничением критического тока, световые отсчеты (а значит и эффективность детектирования) практически не меняются. Это связано с высокой внутренней эффективностью детектора из NbN, когда эффективность практически не зависит от тока смещения [7,8].

Качественно механизм воздействия внешнего электрического поля может быть описан на основе двух не противоречащих друг другу подходов. Первый подход связан с особенностями смещения детектора [5]. Детектор смещается током, близким к критическому на сверхпроводящей ветке вольт-амперной характеристики. Рабочая точка движется по нагрузочному сопротивлению со сверхпроводящей ветки в метастабильную область и обратно: для темновых отсчетов пропорционально термическим и квантовым флуктуациям [9], для световых — пропорционально потоку фотонов. Если значение тока смещения и наведенного тока больше, чем критический ток, то детектор попадает не в метастабильную область, из которой может вернуться назад, а в резистивную, и не возвращается при этом в сверхпроводящее состояние, переставая работать. Увеличение амплитуды и частоты

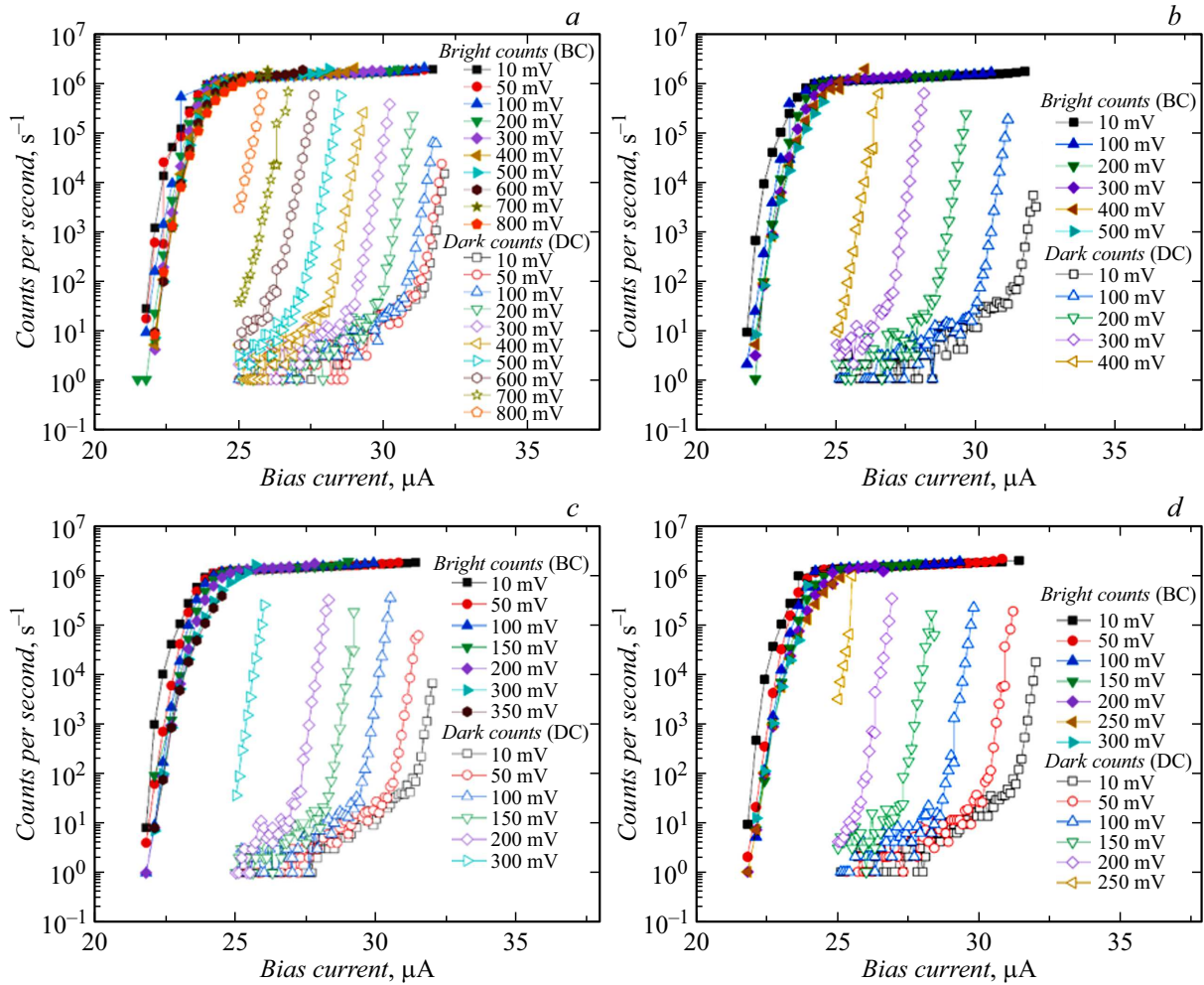


Рис. 5. Зависимость количества световых (BC) и темных (DC) отсчетов SSPD от тока смещения для различных амплитуд внешнего поля ловушки при разных частотах: *a* — 5, *b* — 10, *c* — 15, *d* — 20 MHz.

поля приводит к увеличению вероятности перехода в нормальное состояние.

Другой подход связан со схемой съема сигнала. Внешнее RF-поле приводит к возникновению наведенного поля и к зарядке конденсаторов в схеме съема сигнала (тройник смещения и усилитель на рис. 3). Действительное значение переменного напряжения ΔV (рис. 4, *a*) в линии зависит от формы и амплитуды внешнего RF-поля. Дополнительный ток, возникающий при разрядке конденсаторов через детектор (ΔI), добавляется к источнику тока (I_b), увеличивая ток смещения детектора I_b^* , ($I_b^* = I_b + \Delta I$), что приводит к преждевременному подавлению сверхпроводимости. При малых частотах влияние постоянной составляющей RF-поля мало, но увеличивается с увеличением амплитуды и частоты RF поля.

Последний подход применялся авторами работ [10–12] для объяснения уменьшения критического тока детектора и появления артефактов в зависимости отсчетов при счете фотонов $> 10^7$ cps (counts per second). В этом случае переменным сигналом, действующее значение которого заряжает конденсаторы

в схеме смещения, являлись непосредственно импульсы с детектора. Использование схемы смещения постоянного тока без конденсаторов в линии позволяло увеличить скорость счета детектора до двух раз [10].

На рис. 6 представлены трехмерные карты зависимости критического тока от различного значения амплитуд и частот наведенного внешнего поля. Данные карты позволяют оценить, при каких значениях может работать детектор, и найти оптимальные. Можно заметить, что при значении внешнего поля частотой 15 MHz и амплитудой 600 mV произвести измерения световых отсчетов SSPD не получится, так как в этом регионе (светлая область) детектор уже выходит из состояния сверхпроводимости. Аналогично — для темновых отсчетов.

Экспериментальные исследования показывают, что использование детектора с большей плотностью критического тока само по себе хоть и уменьшает воздействие внешнего электрического поля на скорость темновых отсчетов и позволяет свести к минимуму влияние поля на эффективность детектора, но все еще не является достаточным для использования таких детекторов при

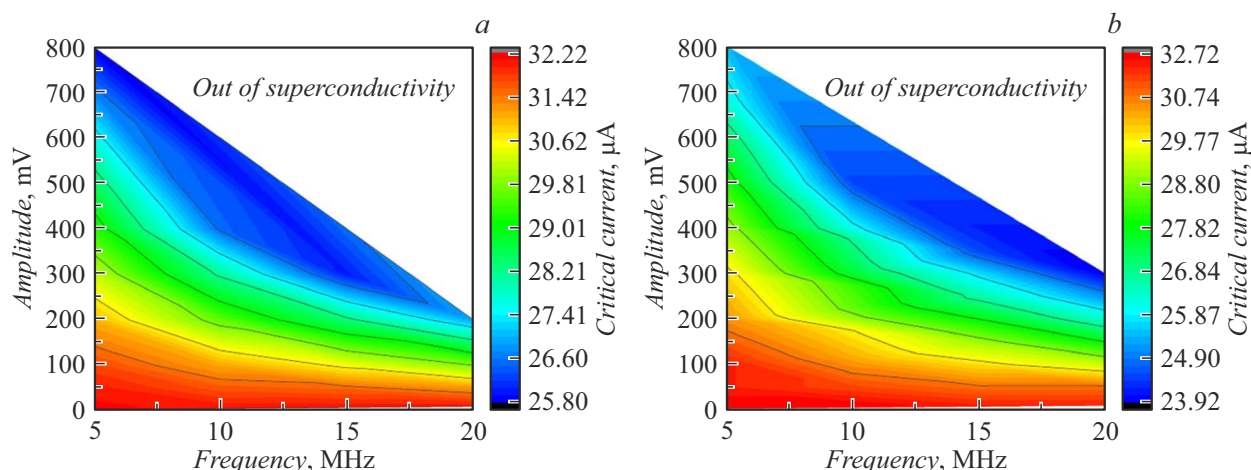


Рис. 6. Трехмерные карты зависимости критического тока от различных амплитуд и частот внешнего поля ловушки: *a* — темновые и *b* — световые отсчеты. Белые области — нет сверхпроводимости.

высоких значениях поля с амплитудой более 800 мВ. Дальнейшее увеличение рабочего диапазона детектора может быть связано как с фильтрацией сигнала на выходе от наведенного внешнего RF-поля (рис. 4, *a*), так и с экранированием активной области детектора.

Заключение

В работе выполнено исследование макета поверхностной ионной ловушки с NbN SSPD. В ходе исследования была измерена зависимость количества световых и темновых отсчетов детектора при включенном радиочастотном сигнале с различными амплитудами на частотах 5, 10, 15 и 20 МГц на длине волны 600 нм при температуре около 4 К. Полученные данные демонстрируют уменьшение критического тока однофотонного детектора с увеличением амплитуды и частоты радиочастотного сигнала. Также представлены трехмерные карты, позволяющие найти оптимальные значения частот и амплитуд внешнего поля для измерения влияния RF-поля на эффективность SSPD.

Благодарности

Авторы благодарят Семенова Александра Владимировича за дискуссию и полезный вклад в объяснение механизма воздействия внешнего электрического поля на характеристики детектора SSPD.

Финансирование

Работа поддержана ГК „Росатом“ в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021 и Договоры № P2185, P2178).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, J.L. O'Brien. *Nature*, **464**, 45 (2010). DOI: 10.1038/nature08812
- [2] J.M. Pino, J.M. Dreiling, C. Figgatt, J.P. Gaebler, S.A. Moses, M.S. Allman, C.H. Baldwin, M. Foss-Feig, D. Hayes, K. Mayer, C. Ryan-Anderson, B. Neyenhuis. *Nature*, **592**, 209 (2021). DOI: 10.1038/s41586-021-03318-4
- [3] J. Chiaverini, R.B. Blakestad, J. Britton, J.D. Jost, C. Langer, D. Leibfried, R. Ozeri, D.J. Wineland. *Quantum Inf. Comput.*, **5**, 419 (2005). DOI: 10.48550/arXiv.quant-ph/0501147
- [4] C.D. Bruzewicz, J. Chiaverini, R. McConnell, J.M. Sage. *Appl. Phys. Rev.*, **6** (2), 021314 (2019). DOI: 10.1063/1.5088164
- [5] G.N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, R. Sobolewski. *Appl. Phys. Lett.*, **79** (6), 705 (2001). DOI: 10.1063/1.1388868
- [6] S.L. Todaro, V.B. Verma, K.C. McCormick, D.T.C. Allcock, R.P. Mirin, D.J. Wineland, S.W. Nam, A.C. Wilson, D. Leibfried, D.H. Slichter. *Phys. Rev. Lett.*, **126** (1), 010501 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.010501
- [7] K. Smirnov, A. Divochiy, Yu. Vakhtomin, P. Morozov, P. Zolotov, A. Antipov, V. Seleznev. *Supercond. Sci. Technol.*, **31**, 035011 (2017). DOI: 10.1088/1361-6668/aaa7aa
- [8] O. Kahl, S. Ferrari, V. Kovalyuk, G.N. Goltzman, A. Korneev, W.H.P. Pernice. *Sci. Rep.*, **5**, 10941 (2015). DOI: 10.1038/srep10941
- [9] A. Murphy, A. Semenov, A. Korneev, Yu. Korneeva, G. Gol'tsman, A. Bezryadin. *Sci. Rep.*, **5**, 10174 (2015). DOI: 10.1038/srep10174
- [10] A.J. Kerman, D. Rosenberg, R.J. Molnar, E.A. Dauler. *J. Appl. Phys.*, **113**, 144511 (2013). DOI: 10.1063/1.4799397
- [11] V. Kovalyuk, S. Ferrari, O. Kahl, A. Semenov, M. Shcherbatenko, Yu. Lobanov, R. Ozhegov, A. Korneev, N. Kaurova, B. Voronov, W. Pernice, G. Gol'tsman. *Sci. Rep.*, **7** (4812), 1 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-05142-1
- [12] S. Ferrari, V. Kovalyuk, A. Vetter, Ch. Lee, C. Rockstuhl, A. Semenov, G. Gol'tsman, W. Pernice. *Appl. Phys. Lett.*, **115** (10), 101104 (2019). DOI: 10.1063/1.5113652