05

Перспективы сенсорики с применением технологии RFTES для сверхпроводящих квантовых цепей

© С.В. Шитов,[1,2] Н.Ю. Руденко,[1] В.И. Чичков[1]

[1]Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“,
119049 Москва, Россия
[2]Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
e-mail: Sergey3e@gmail.com

Поступило в Редакцию 15 мая 2025 г.
В окончательной редакции 15 мая 2025 г.
Принято к публикации 15 мая 2025 г.

Рассмотрены перспективы продвижения отечественной технологии RFTES, использующей принцип высокочастотного разогрева сверхпроводящего абсорбера в СВЧ резонаторе, для дисперсионного считывания состояния сверхпроводящих кубитов в диапазоне частот 1−8 GHz. Проведен анализ совместимости технологии и схемотехники кубита и RFTES-детектора, необходимые для интеграции таких детекторов на одном чипе, а также необходимые уровни чувствительности и подавления обратного воздействия детектора на кубит. Исследование показало, что имеющийся уровень RFTES-технологии уже сейчас близок к реализации дисперсионного считывания сверхпроводящего резонатора с добротностью $Q = 1000$, который содержит менее 10 фотонов частоты 7 GHz, с длительностью измерения около 10 μs. При этом возможно подавление обратного воздействия детектора на ~ 140 dB на частоте накачки детектора и на ~ 90 dB на частоте возбуждения кубита, что может удовлетворять условиям их совместимости в пределах единой микросхемы.

Ключевые слова: прямой детектор, RFTES-детектор, сверхпроводящий кубит, дисперсионное считывание, сверхпроводящий резонатор, сверхпроводящий фазовый переход, сверхпроводящий микромостик, пленка гафния, горячий электронный газ, сверхпроводимость на СВЧ.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61231.103-25

Введение

Новая отечественная технология сверхпроводящих детекторов, RFTES (от англ. Radio Frequency Transition Edge Sensor) была впервые предложена в 2011 г. и разрабатывается, в первую очередь, для использования в субмиллиметровой астрономии [1]. Исходя из теоретических оценок и полученных экспериментальных данных, сегодня можно сделать вывод, что такие тепловые детекторы могут обладать рекордными характеристиками при физических температурах в диапазоне 300−500 mK [2], достижимых с помощью современных сорбционных рефрижераторов замкнутого цикла. Отечественное астрономическое сообщество, насколько это известно авторам, заинтересовано в таких сенсорах, но не обладает в настоящее время инфраструктурой для использования детекторов при столь низких температурах, и требуется время для серьезного технологического перехода, что объективно задерживает процесс внедрения. Однако бурно развивающаяся область квантовых вычислений на основе сверхпроводящей платформы уже давно использует технологии глубокого охлаждения на основе рефрижераторов растворения He^3/He^4, позволяющих проводить эксперименты в диапазоне температур от, примерно, 1 K вниз до 10−30 mK, что зависит от конкретной тепловой нагрузки, которая, как правило, не превышает 100 μW. Именно на таком оборудовании испытывались перспективные конструкции RFTES-детекторов [3].

Экспериментальные исследования сверхпроводящих квантовых битов, проводимые в передовых лабораториях мира, привели к идее использования сверхчувствительных детекторов СВЧ для определения смены состояния кубита, посредством регистрации энергии импульса, возникающего при сдвиге частоты сверхпроводящего резонатора, слабо связанного с кубитом [4,5]. Изменение состояния кубита при переходе в комплиментарное состояние регистрируется на частотах, типично, 5−8 GHz в виде вариации амплитуды тока в колебательном контуре, частью которого является двухуровневая система (например, сквид). Детальные исследования RFTES-детекторов с тонкими пленками гафния (Hf) вблизи их критической температуры показали, что этот материал также годится для регистрации сигналов на сравнительно низких (коммуникационных) частотах, например, 1−10 GHz, что не работает для ближайших детекторов-конкурентов — MKID-детекторов [6]. Для использования RFTES-детекторов на коммуникационных частотах были разработаны и запатентованы несколько схемотехнических решений, включая чернотельные калибраторы гигагерцового и терагерцового сигнала [7–9], а также проведен ряд лабораторных экспериментов с использованием решений, представленных схематически

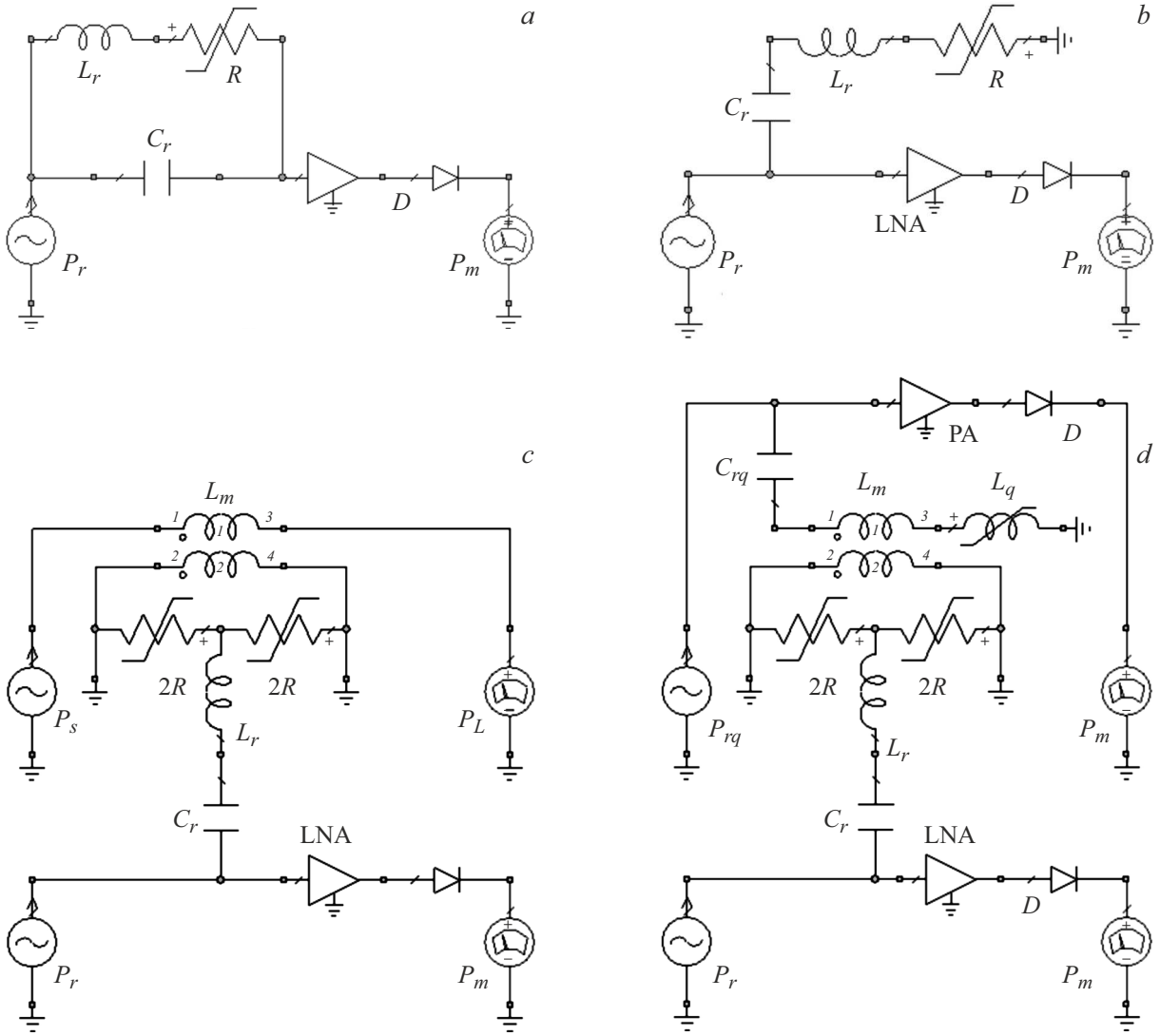

Рис. 1. Эквивалентные (концептуальные) схемы различных типов RFTES-детекторов, которые включают в себя источник несущей P_r, буферный усилитель LNA и регистрирующую систему, состоящую из прямого детектора D и измерителя мощности/напряжения P_m: *a* — RFTES-детектор *C*-типа, в котором поглотитель с активным нелинейным импедансом R (мостик) меняет добротность резонатора (L_r, C_r) и образует фильтр-пробку с управляемым пропусканием [1-3]; *b* — поглотитель R управляет добротностью резонатора, шунтирующего линию, что аналогично MKID; *c* — детектор проходящей СВЧ мощности с балансным включением двух мостиков в шунтирующий резонатор [10]: P_s — источник измеряемого сигнала, P_L — измеритель мощности в нагрузке (Load), L_m — индуктор взаимной связи линии сигнала и детектора; *d* — детектор проходящей мощности СВЧ, интегрированный в резонатор кубита (данное исследование): P_{rq} — источник возбуждения кубита, L_q и C_{rq} — нелинейная индуктивность и емкость резонатора с квантовым объектом (качественная модель), PA — параметрический усилитель.

на рис. 1, *a*, *b*. Свойства структур с рис. 1, *c*, *d* будут рассмотрены в настоящей работе.

1. Методы и подходы

Рассмотрим упрощенную модель сверхпроводящего кубита, которую представим в виде нелинейного индуктора, L_q, как показано на рис. 1, *d*, связанного с резонатором так, что резонатор заметно меняет свою частоту при изменении состояния кубита. Импульс, происходящий в процессе этого сдвига, должен регистрировать RFTES-детектор. В приведенном ниже исследовании большинство деталей конструкции реального кубита и его резонатора предполагаются не имеющими существенного значения для общего вывода. Однако ряд важных параметров, существенных для процесса детектирования с помощью схем, представленных на рис. 1, *c*, *d*, будут проанализированы до уровня численных оценок.

Известно, что резонатор кубита связывают с линией возбуждения кубита, в которую подается сигнал P_r на некой фиксированной частоте F (рис. 1). Положим, что электродинамические цепи, включающие ли-

нию возбуждения/считывания, являются внешней нагрузкой резонатора и, таким образом, определяют его нагруженную добротность. Эквивалентная схема такой системы представлена на рис. *1*, *b*, с точностью до замены нелинейного резистора на нелинейный индуктор (например, на сквид), что придает схемотехническое сходство кубиту и детектору. Вблизи частоты резонатора происходит частичное отражение значительной части волны, бегущей по линии возбуждения, что приводит к уменьшению коэффициента пропускания линии от источника возбуждения P_r к усилителю LNA и позволяет измерить добротность такой системы. Изменение состояния кубита ведет к изменению реактивной компоненты импеданса системы „сквид-резонатор“. Следствием этого является изменение амплитуды и фазы тока в резонаторе, так как собственная частота резонатора меняется относительно фиксированной частоты возбуждения. Эволюцию системы можно описать качественно в виде движения по склону резонансного провала (по частотной зависимости коэффициента пропускания S21 линии возбуждения). Изменение собственной частоты резонатора при фиксированной частоте накачки приводит к изменению запасенной в резонаторе энергии. Резонатор либо отдает энергию в линию возбуждения, либо получает, в зависимости от того, уменьшается или увеличивается амплитуда колебаний. В „классическом“ случае линию возбуждения подключают к чувствительному буферному усилителю LNA, который постоянно абсорбирует поток энергии накачки/возбуждения и усиливает вариации такого потока. Смена состояния кубита регистрируется как изменение потока накачки из-за абсорбции и отражения такого потока резонатором. Заметим, что в силу эквивалентности обоих согласованных портов линии возбуждения, половина „сигнала“, отданного резонатором в линию, поглощается в направлении источника возбуждения, а вторая половина — в сторону буферного усилителя LNA, подключенного к выходу линии возбуждения. Таким образом, для проходной линии возбуждения эффективность отдачи сигнала кубита в усилитель не может быть более 50 %. Существуют решения на основе линии накачки с одним портом, работающим на отражение, что позволяет избежать указанных выше потерь, но в такой системе так же, как в [5], требуется использовать невзаимное устройство (СВЧ циркулятор), что исключает интегральную реализацию всего устройства.

В квантовом процессоре к одной линии возбуждения подключают, как правило, сразу несколько кубитов, имеющих резонаторы на отличающихся друг от друга частотах. При этом гипотетический параметрический усилитель (PA, рис. 1, *d*), обслуживающий такой массив по общей линии, должен быть достаточно широкополосным. Известно, что существующие PA обладают небольшой мощностью насыщения, что несет с собой ряд рисков: риск нелинейного преобразования накачки большого числа кубитов в комбинации с широкополосным шумом на частоты возбуждения соседних кубитов, а также риск воздействия на кубиты паразитным сигналом накачки PA близкой или более высокой, чем частота возбуждения кубита. Аргументы, изложенные выше, приводят к нескольким выводам. Первый, что PA не является идеальным решением для большого квантового процессора. Второй вывод — для системы кубит-резонатор не существует запрета на существование еще одной или нескольких линий сигнала, которые в сумме отбирают от резонатора такую же энергию, как единственная „классическая“ линия возбуждения, нагруженная согласованным усилителем.

Попробуем плавно трансформировать „классическую“ систему: представим, что мы делаем связь линии возбуждения с резонатором пренебрежимо малой, но достаточной, чтобы обеспечить правильное возбуждение кубита, имея в своем распоряжении „достаточно мощный“ генератор возбуждения. При таком условии линия возбуждения не влияет на кубит, а правильно сконструированная „дополнительная“ линия связи с резонатором возьмет на себя отбор мощности, эквивалентной „классическому“ случаю, описанному выше. Именно так, на основе детектора проходящей мощности [10], показанного на рис. 1, *c*, сформирована схема считывания кубита, представленная на рис. 1, *d*. Такой детектор призван регистрировать изменение амплитуды тока в резонаторе. При этом пропадает ограничение „50 %“ на передачу мощности из резонатора в детектор для случая проходной линии возбуждения. Это не главное, но все же заметное преимущество новой схемы, которая позволяет получить выигрыш сигнал/шум в два раза по сравнению с таким же детектором, установленным на выходе „классической“ линии считывания, как, например, в работе [2]. Можно показать, что динамический диапазон тока в высокодобротном резонаторе на несколько порядков шире, чем в линии возбуждения, что также улучшает соотношение сигнал/шум для детектора, включенного в цепь тока резонатора.

Дисперсионное считывание с измерением фазы предполагает, что два состояния кубита так различаются частотой резонатора, что они лежат по разные стороны (выше и ниже) фиксированной частоты опроса. Это приводит к изменению фазы тока на максимально возможное значение, близкое к 180°, что можно измерить линейным фазо-чувствительным усилителем (например, PA). На практике для измерения фазы используется эффект интерференции стабильного по фазе опорного сигнала и измеряемого сигнала. При этом амплитудный шум измеряемого сигнала неизбежно превращается в шум фазовый, т. е. пороги обнаружения сигнала при измерениях фазы и амплитуды не являются независимыми. Понятно, что для теплового детектора, не чувствительного к фазе принимаемого сигнала, возникает ограничение. Такой детектор не может различить два состояния резонатора, равноотстоящие вверх и вниз от частоты опроса, так как токи резонатора для таких состояний могут мало отличаться друг от друга. Таким образом, режим кубита с тепловым детектором должен

быть выбран так, чтобы амплитуды тока в резонаторе для двух состояний кубита отличались существенно: оба состояния должны лежать на одном склоне $S21(F)$; в идеале одно из состояний должно лежать на „дне“ (в локальном минимуме) характеристики $S21(F)$.

Практически любая высокочастотная технология на основе микрочипов выигрывает, если позволяет объединить несколько чипов в одно целое. Ряд работ в области сверхпроводимости подтверждает, что это верно и для случая сверхпроводящих микросхем. Упомянутые выше реализации считывания кубита тепловыми детекторами были выполнены на раздельных чипах кубита и детектора. Считывание сигнала производилось по „классической“ схеме — в линии возбуждения [5]. Ясно, что детектор, построенный по такой схеме, не может выделить сигнал нужного кубита из нескольких кубитов, возбуждаемых по общей линии на разных частотах, и упомянутые исследования являются не более чем демонстратором принципиальной возможности считывания кубита тепловым детектором. Ограничения на параметры демонстратора [5] были вызваны, в том числе, необходимостью подавления обратного воздействия на кубит от накачки детектора, для чего использовались ферритовые вентили/циркуляторы и узкополосные фильтры. Очевидно, такая система непригодна для интеграции в виде компактной микросхемы.

2. Интеграция кубита и детектора: обратное воздействие

Изучая литературу, можно прийти к заключению, что RFTES-технология по ряду признаков полностью совместима с процессом изготовления сверхпроводящих кубитов, что благоприятно для их интеграции на одном чипе. Однако необходим анализ некоторых важных факторов: обратного действия накачки RFTES-детектора на кубит и возможность агрегации нескольких кубитов в единую систему. В описании устройства „Сверхпроводящий СВЧ детектор проходящей мощности“ [10] (далее СДПМ), выполненного по технологии RFTES, иллюстрируется принцип измерения тока в копланарном волноводе с малыми вносимыми потерями $\sim 10^{-3}$. Концептуальная схема СДПМ представлена на рис. 1, *c*. Ясно, что такой детектор может быть применен для измерения тока в копланарном резонаторе в качестве нагрузки, обеспечивая добротность $Q = 10^3$, и этот резонатор может быть связан с кубитом, как показано на рис. 1, *d*.

Конструкция микросхемы, объединяющая СДПМ и кубит, представлена концептуально на рис. 2: справа расположен СДПМ, в центре — кубит *1*, включенный в резонатор *2*, который возбуждается линией *3* через участок связи *4* на частоте ~ 7 GHz (см. пример ниже). Резонатор СДПМ *5* возбуждается линией *6* через участок связи *7* и разогревает мостики *8* к рабочей температуре на частоте ~ 1.5 GHz (в нашем примере ниже). Вспомогательный резонатор *9*, который может

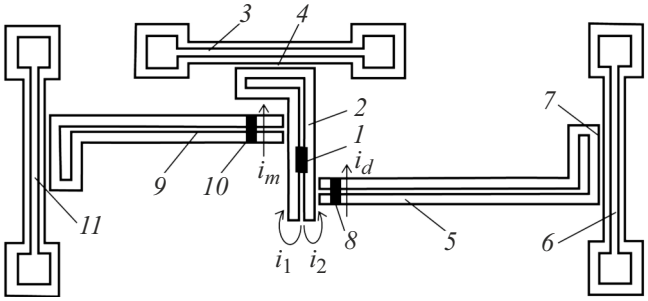

Рис. 2. Иллюстрация устройства считывания и модуляции состояния резонатора с эффектом подавления накачки детектора (концепция). Цифровые обозначения комментируются в тексте.

выполнять роль „выключателя“/демпфера резонатора кубита, что достигается за счет порогового переключения мостиков 10 в резистивное состояние, может работать на частоте, не кратной 7 и 1.5 GHz, например, на частоте 1.8 GHz. Принцип работы такой схемы основан на исчезающе слабом взаимодействии двух в идеале ортогональных мод копланарного волновода: основной симметричной моды, представленной на рис. 2 токами i_1 и i_2 в резонаторе кубита *2*, и щелевой моды, на которой резонатор *2* воздействует на мостики *8* и *10* в резонаторах *5* и *9* соответственно. Помеха со стороны СДПМ (обратное воздействие), очевидно, состоит в просачивании мощности разогрева поглотителя RFTES в цепь резонатора кубита. В СДПМ подавление такого воздействия на кубит осуществляется за счет балансного включения двух RFTES-мостиков *8*. При этом токи резонатора кубита i_d и i_m могут разогревать мостики *8* и *10*, как показано на рис. 2, что позволяет детектировать состояние резонатора кубита.

Такая система подавления не является идеальной по нескольким причинам. Ток, передающийся в резонатор кубита, зависит от:

1) одинаковости геометрических и электрических параметров цепей, представленных двумя мостиками и шунтирующими их индукторами;

2) пространственного фазового сдвига этих цепей вдоль направления распространений волны в резонаторе кубита; по этой же причине разогрев мостиков током кубита не является строго одинаковым: амплитуда тока в распределенном (четвертьволновом) резонаторе кубита меняется вдоль резонатора, и любое физическое расстояние между цепями приводит к амплитудным поправкам.

Все перечисленные выше факторы можно автоматически учесть, используя электромагнитное моделирование, основанное на предполагаемой геометрии устройства.

Для верификации предложенных подходов была разработана и оптимизирована электромагнитная модель узла, выполняющего функции, аналогичные схематически представленным на рис. 2. Расчет параметров схемы проводился в среде электромагнитного моделирования Cadence AWRDE. В модели измерялись коэффициенты

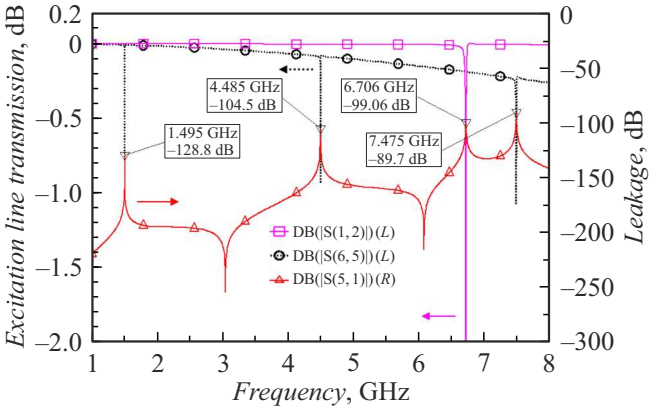

Рис. 3. Расчетные характеристики коэффициентов передачи для устройства дисперсионного считывания сверхпроводящего кубита с помощью интегрированного RFTES-детектора, представленного на рис. 2 (модулятор, элементы *9–11* не используется). Легенда: S(1,2) — коэффициент передачи между портами *1* и *2* линии *3* возбуждения кубита, S(6,5) — для портов линии накачки детектора *6*, S(5,1) — между портами кубита и детектора (между линиями *3* и *6*). Кривая, маркированная квадратами — характеристика линии возбуждения/считывания кубита, в окрестности резонанса 6.706 GHz она имеет провал шириной ~ 7 MHz ($Q \approx 1000$). Штриховая линия кривая (кружки) — характеристика линии возбуждения RFTES-детектора с четвертьволновым резонансом на частоте 1.495 GHz и более высокими резонансами на частотах 4.485 GHz (три четверти волны) и 7.475 GHz (пять четвертей волны). Маркеры привязаны к экстремумам кривой S(5,1) (треугольники). Видно, что изоляция паразитной утечки накачки из линии возбуждения резонатора детектора в цепь возбуждения кубита на частоте 1.495 GHz составляет почти -130 dB, а на частоте резонатора кубита 6.706 GHz изоляция цепи детектора составляет почти -100 dB.

прохождения по линиям возбуждения кубита и накачки детектора, а также коэффициент передачи сигнала из линии накачки детектора в линию возбуждения кубита.

На рис. 3 представлены рассчитанные характеристики описанной выше электромагнитной модели, состоящей из кубита и детектора, подтверждающие реализуемость устройства считывания с малыми перекрестными помехами. Резонансный провал в пропускании линии возбуждения или накачки означает область частот возбуждения соответствующего резонатора. Резонатор кубита был настроен на частоту около 7 MHz, а эквивалентный импеданс кубита, вносимый в резонатор, положен $10^{-5}\,\Omega$, что означает слабую связь линии возбуждения с кубитом, около 30 dB, и практически не влияет на результаты расчета. Полученные данные подтверждают, что коэффициент подавления помех из линии опроса детектора вблизи частоты резонатора кубита ~ 7 GHz превышает 90 dB, а на частоте детектора — 120 dB. В дополнение следует отметить, что все три линии, питающие кубит, детектор и модулятор, изображенные на рис. 2, *3*, *6*, *11*, могут быть соединены последовательно, и степень изоляция сигналов практически не деградирует, если они отстроены друг от друга на более чем на 30 MHz.

Условие баланса, препятствующее появлению помехи в цепи резонатора кубита, может быть нарушено из-за неточности выполнения структуры. Здесь следует учитывать, что баланс напряжений на мостиках и противонаправленные токи, инжектируемые в резонатор кубита, определяются, главным образом, балансом импеданса шунтирующих индукторов, что следует из схем с рис. 1, *c*, *d*. Импеданс индукторов мал, он более чем на порядок отличается от импеданса мостиков, а сами индукторы геометрически больше по размеру, и точность их выполнения также на порядок лучше точности выполнения мостиков. Расчет, проведенный с применением сосредоточенной эквивалентной схемы, в которой нет пространственных эффектов, показал, что для двух мостиков с импедансом, различающимся на 10 %, утечка мощности в резонатор кубита на частоте 1.5 GHz лежит на уровне -99 dB. Такое же подавление имеет место при различии индуктивности шунтов на 1 %, что говорит об определяющей роли симметрии индукторов, возможность реализации которых не вызывает сомнений. Таким образом, отклонение от номинала сопротивления мостиков играет на порядок меньшую роль, чем неустранимый пространственный разнос поглотителей, типично на расстояние 10 μm, с характерной утечкой 40 dB.

Существует еще несколько факторов, потенциально влияющих на возможность использования RFTES-детекторов для интеграции со сверхпроводящими кубитами. Это генерация тепла, чернотельное (термодинамическое) излучение поглотителя детектора в спектре чувствительности кубита, а также генерация квазичастиц сравнительно высоких энергий. Рассмотрим ниже все эти факторы.

В соответствии с законом сохранения энергии все абсорбированные на чипе сигналы, главным образом мощность подогрева детектора, а также активные потери накачки и управления кубита, превращаются в тепло, которое, в свою очередь, поглощается рефрижератором через теплопроводность чипа с кубитом. Это значит, что активная смена состояний кубита приведет к некому усредненному подогреву чипа, что можно рассматривать как некий стабильный параметр. Однако локальный разогрев может быть на порядки сильнее среднего по чипу. Оценка растекания тепла, проведенная аналогично работе [7] для подложки из сапфира, показывает, что от источника тепла в виде мостиков RFTES, разогреваемых мощностью $\sim 10^{-12}$ W, можно ожидать повышения температуры на расстоянии 10 μm всего на $\sim$ 3-10^{-6} K.

Разогретый электронный газ в мостиках является сверхширокополосным черным (реально серым) телом и, естественно, создает термодинамический шум, интенсивность которого можно определить, на основе формулы Планка для спектрального среза в спектре черного

тела. Заметим, что шумовой ток во внешних по отношению к мостикам цепях может возбуждаться только в полосе резонаторов кубита и детектора. Допустим, что критическую температуру RFTES-поглотителя не удастся снизить с экспериментально полученного значения 400 mK. Этой температуре соответствует частота среза планковского спектра 8.3 GHz, а значит, все высшие моды четвертьволнового резонатора (21, 35 GHz... и т. д.) не вносят существенного вклада в джонсоновский шум мостиков, который составляет около 136 dBm, что, как будет показано ниже, почти на два порядка меньше мощности, дисперсионного импульса и на пять порядков меньше мощности, запасенной в резонаторе кубита.

Детектирование с применением физической модели электронного газа, реализованное в RFTES-детекторе [2,3], основано на том, что горячие электроны (квазичастицы) не могут диффундировать в подводящие электроды за счет присутствия андреевских зеркал, что особенно эффективно на низких частотах. Для экспериментальных детекторов было показано, что квазичастицы релаксируют исключительно внутри объема мостика, передавая тепло на фононы пленки мостика. Различие фононной температуры от температуры подложки определяется сопротивлением Капицы, которое на два порядка меньше теплового сопротивления релаксации электронного газа, а значит, отличие фононной температуры и температуры подложки пренебрежимо мало, и проблему блуждающих квазичастиц, на первый взгляд, также можно исключить.

Тем не менее известно, что даже единичные квазичастицы, воздействующие на джозефсоновский переход кубита, способны явиться препятствием к правильному считыванию. Заметим, что андреевский барьер — это чистый гальванический контакт двух металлов, и он не является изолятором, а значит может иметь дефекты на атомарном уровне и все же пропускать счетное количество квазичастиц. Одно из преимуществ технологии RFTES состоит в том, что андреевские зеркала не являются обязательными для СВЧ токов, и вместо них могут быть использованы диэлектрические прослойки между электродами и мостиками, что нивелирует вероятность утечки квазичастиц в электроды и в связанные с ними джозефсоновские контакты.

3. Требования к чувствительности считывающего RFTES-детектора

Параметром сравнения прямых детекторов принято считать NEP (Noise Equivalent Power). Главной компонентой NEP болометрического детектора является фононный шум, определяемый температурой абсорбера T и его теплопроводностью G: $\mathrm{NEP}_{phon} = (4kT^2G)^{0.5}$. В наших экспериментах по детектированию терагерцового излучения мощность подогрева детектора составляла около ~ 86 dBm (~ 2 pW) на чипе и около -90 dBm на поглотителе для мостика объемом $2 \times 2 \times 0.05\,\mu$m при $\mathrm{NEP} \approx 10^{-17} 5\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ и температуре 200–390 mK [3]. С точки зрения квантовой системы, мощность нагрева весьма велика. При использовании электронной литографии размер мостика несложно уменьшить до $0.2 \times 0.2 \times 0.05\,\mu$m, т. е. объем уменьшится в 100 раз и пропорционально уменьшится G. При этом NEP уменьшится до $\sim 10^{-18}\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, а мощность подогрева мостика G — до -110 dBm. При понижении температуры с 200 mK до 10–30 mK, что соответствует рабочей температуре кубитов, NEP будет снижаться $\propto T^{3.5-4}$ и упадет $< 10^{-19}\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$. Теплопроводность будет падать быстрее — $\propto T^{4-5}$, и мощность необходимого подогрева, согласно экспериментально апробированной модели, снизится до -150 dBm. Балансная схема [10], по нашим расчетам, подавляет эту мощность не менее, чем на 40 dB, т. е. в резонатор на частоте 7 GHz инжектируется „нежелательный“ сигнал на частоте 1.5 GHz мощностью порядка от -190 до -200 dBm ($10^{-23} - 10^{-22}$ W), и это на $2-3$ порядка меньше значения NEP предполагаемого уже улучшенного RFTES-детектора. Учитывая, что при быстром считывании порог обнаружения сигнала возрастет (ухудшится), как корень из частоты считывания, согласно известному соотношению $P_{det} = NEP \cdot \sqrt{\Delta f} \cdot \mathrm{SNR}$, для времени считывания $\tau = 1/(2\pi \cdot \Delta f) \approx 10\,\mu$s пороговая мощность детектора ($\mathrm{SNR} = 1$) составит $\sim 10^{-17}$ W для улучшенного детектора. Будем исходить из этого значения, и сравним его с усредненной во времени мощностью импульса, уходящего из системы „кубит-резонатор“ при дисперсионном сдвиге частоты кубита.

Предположим следующие условия: первое состояние соответствует максимальному току в резонаторе, что задается числом фотонов и добротностью резонатора, во втором состоянии сигнал, передаваемый от резонатора детектору, лежит около нуля — резонатор „ушел“ с частоты возбуждения, и амплитуда тока пренебрежимо мала. Неполный уход можно оценивать, вводя коэффициент порядка 0.1–0.5. Будем считать для определенности, что для считывания кубита выбрана рабочая частота резонатора $F = 7$ GHz, а эффективная добротность такого резонатора $Q = 1000$, и в резонаторе одновременно находятся немного, $N = 1 - 10$, фотонов накачки. Допустим для простоты, что при полном уходе с резонанса колебания в резонаторе затухают полностью, т. е. $\Delta N = 10$. Время затухания таких колебаний прямо пропорционально добротности резонатора и составляет для $F = 7$ GHz и $Q = 1000$ около $0.14\,\mu$s.

Ясно, что при условии пренебрежимо слабой связи резонатора кубита с линией возбуждения добротность кубита определяется не связью с линией возбуждения, как в „классическом“ случае, а связью резонатора кубита с поглотителями RFTES-детектора проходящей мощности [10], который демпфирует резонатор так же, как линия возбуждения, нагруженная LNA. Такая замена демпфера (поглотителя) колебаний физически не меняет процесса распределения энергии в системе „кубит-резонатор“, что обсуждалось выше. Будем использовать

для распределенного резонатора модель сосредоточенного колебательного LC-контура с потерями, что правомерно для высокодобротного случая. Примем, что внесенные в резонатор потери будут определяться активным импедансом включения детектора $R = 0.01\,\Omega$. Это значение близко к сопротивлению, вносимому поглотителем экспериментального RFTES с рабочим сопротивлением $R_{det} = 3\,\Omega$, шунтированным индуктором 100 pH на частоте 1.5 GHz; в нашей модели сопротивление R будет представлять собой сумму всех активных потерь в резонаторе. При заданных условиях характеристический импеданс резонатора составит $Z = 10\,\Omega$, а значения эквивалентных емкости и индуктивности резонатора будут $L = 0.23$ nH и $C = 2.3$ pF соответственно. Полную энергию, запасенную в резонаторе, можно записать, как $E = Z \cdot I^2/(2\omega)$, а реактивную мощность, представляющую собой перекачку энергии из электрического поля в магнитное за секунду, как $P = Z \cdot I^2/2$, где I — амплитуда тока в резонаторе, задаваемая линией возбуждения. Заметим, что, согласно модели сосредоточенного резонансного контура, весь ток I протекает через сопротивление детектора R. Среднее число фотонов можно вычислить так: $N = E/(F \cdot h)$, где h — постоянная Планка. Заданное значение $N = 10$ достигается для $E = 4.7 \cdot 10^{-23}$ J, а запасенная в резонаторе (реактивная) мощность при этом составит $P = 2$ pW при токе резонатора $I = 0.64\,\mu$A. Согласно закону сохранения энергии, активная мощность тока $P_{det} = R \cdot I^2$ и убыль реактивной мощности на частоте 7 GHz, рассчитанная как $P_{out} = P/Q$, должны совпадать, т. е. в детекторе превращается в тепло $P_{det} = 2 \cdot 10^{-15}$ W $= 2$ fW. Регистрация быстрых скачков этой мощности, источником которых является взаимодействие генератора возбуждения и кубита, и есть задача интегрированного детектора.

Из вышеприведенных оценок порога детектирования с $\tau \approx 10\,\mu$s следует, что, используя уже имеющиеся образцы RFTES-детекторов с $NEP = 1 \cdot 10^{-17}\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, можно в принципе зарегистрировать такой сигнал с пограничным SNR ≈ 1. Проведя оптимизацию RFTES по размеру и температуре до NEP $\sim 10^{-19}\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, получаем значение SNR ≈ 100 для $N = 10$ и SNR ≈ 10 при уходе из резонатора лишь одного фотона ($N = 1$).

Понятно, что увеличение времени накопления позволяет изменить порог детектирования (улучшить его), но время накопления не может быть слишком долгим. Оно определенно не может быть дольше времени жизни кубита и должно быть как можно короче для быстрых вычислений. С другой стороны, время измерения не может быть короче времени релаксации резонатора кубита к новому состоянию или времени отклика детектора. Для надежного считывания двух квазистатических состояний время операции с кубитом (процесс переключения $P_{out} \to 0 \to P_{out}$) должно быть дольше, чем время отклика детектора, типично $10\,\mu$s. Это означает, что наш детектор сможет работать, если время жизни кубита составляет не менее $100\,\mu$s.

Если исходить из того, что для достоверного считывания требуется SNR $= 6$, то для регистрации ступеньки $P_x(F) = 2 \cdot 10^{-15}$ W за время $10\,\mu$s необходимо использовать детектор с NEP $= 3 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ при полосе интегратора на выходе детектора 15 kHz. При этом можно реализовать примерно 50 000 отсчетов в секунду. Авторы выражают уверенность, что экспериментальные RFTES-детекторы могут преодолеть этот порог при понижении температуры и одновременном уменьшении объема поглотителя, чему уже есть экспериментальные подтверждения [3].

4. Агрегация нескольких кубитов и детекторов

В основу подхода к созданию процессора с большим числом кубитов можно положить наше предложение интегрировать каждый кубит со своим отдельным RFTES-детектором, который является нагрузкой резонатора кубита и работает на своей уникальной частоте, не совпадающей ни с частотой резонатора кубита, ни с частотами резонаторов других детекторов. Такой подход позволяет считывать массив кубитов, который управляется по общей линии возбуждения и снабжен набором RFTES-детекторов, управляемых также по своей отдельной линии возбуждения/считывания. При этом размерность массива детекторов совпадает с размерностью массива кубитов, а накачка ни одного из детекторов не взаимодействует ни с другими детекторами, ни с каким-либо из кубитов, как было описано выше. Таким образом, система кубитов с детекторным дисперсионным считыванием состояния может выглядеть как две линии, на одну из которых „нанизаны“ кубиты, а на другую — детекторы. Учитывая результаты расчета (рис. 3), можно заключить, что линии возбуждения всех детекторов и всех кубитов можно объединить в одну последовательную цепочку с условием, что все резонаторы в такой схеме настроены на уникальные частоты. Отметим, что RFTES-детекторы, работающие в кинетическом режиме [3], обладают существенным усилением, что может сделать ненужным буферный усилитель на ступени растворения, и сигнал с квантового процессора можно подавать сразу на LNA, размещенный на ступени 3 K.

Резюмируя, отметим, что, согласно разрабатываемой концепции, температуры детектора и кубита одинаковы, так как они интегрированы на одном чипе. Для имеющихся в настоящий момент RFTES-детекторов с электронным газом можно ожидать уменьшения NEP до $\sim 10^{-19}\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ лишь за счет за снижения температуры. Однако скорость счета увеличить не получится, так как в основе увеличения чувствительности, связанном с понижением температуры, лежит эффект замедления электрон-фононного взаимодействия, что делает релаксацию такого детектора (dead time) также более медленной. Для размещения большого числа кубитов на одной линии потребуется расширение диапазона частот

возбуждения или использование резонаторов с более узкой полосой (с большей добротностью). При росте добротности резонатора то же самое число фотонов в резонаторе означает меньший отток мощности, и это может затруднить регистрацию, а также может ограничить скорость отклика резонатора кубита на изменение состояния квантовой системы. Если считать малое число фотонов в резонаторе приоритетным фактором, то понижение температуры детекторов при размещении на том же чипе, ведущее к улучшению чувствительности (увеличению SNR), является позитивным трендом, и RFTES-детекторы выглядят вполне работоспособным сенсором для дисперсионного считывания сверхпроводящих кубитов.

Заключение

Проведенное исследование вселяет оптимизм, обусловленный тем, что имеющийся уровень RFTES-технологии позволяет направить усилия на реализацию дисперсионного считывания сверхпроводящего кубита. Продемонстрированные на сегодня характеристики RFTES-технологии подтверждают перспективность расширения ниши детекторов на основе пленок ниобия и гафния с электронным газом для применений в системах коммуникаций и квантовых вычислений в диапазоне частот принимаемых сигналов $1-1000\,\mathrm{GHz}$ и, возможно, шире. Высокая чувствительность экспериментальных прототипов в сочетании с быстродействием порядка $10\,\mu\mathrm{s}$ и технологически обоснованными подходами к повышению чувствительности до $\mathrm{NEP} = 10^{-20}\,\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$, а также запатентованные схемотехнические решения, позволяют уже сейчас приступить к проектированию многоканальных считывающих и управляющих цепей с частотной селекцией по общей линии СВЧ, в том числе для реализации квантовых процессоров на основе сверхпроводников. Имеющиеся наработки позволяют утверждать, что RFTES-детекторы вполне совместимы со сверхпроводящими кубитами не только по технологии изготовления, но и по принципу межблочной коммуникации и управления. Анализ показал, что сравнительно высокая электронная температура экспериментальных мостиков в рабочем режиме далека от критического воздействия на кубит. Тем не менее видится рациональным движение в сторону меньших значений критической температуры поглотителей — ближе к рабочей температуре кубита, а также в сторону уменьшения объема электронного газа. На сегодня изготовлены и испытаны первые образцы совместимых детекторов; испытания с кубитами запланированы на ближайшую перспективу.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке грантом РНФ № 24-29-20298 в части разработки и моделирования узла RFTES детектора проходящей мощности, и проектом „Квантовый интернет“ №К2-2022-029 в рамках Программы стратегического академического лидерства „Приоритет-2030“ в части теоретических оценок параметров считывания сверхпроводящих квантовых битов.

Благодарности

Авторы благодарят И.С. Беседина за полезную дискуссию.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] С.В. Шитов. Письма в ЖТФ, **37** (19), 88 (2011). DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897
[2] А.В. Меренков, Т.М. Ким, В.И. Чичков, С.В. Калинкин, С.В. Шитов. ФТТ, **64** (10), 1404 (2022). DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53081.50HHC
[3] В. Шитов, Т.М. Ким, Л. С. Соломатов, Н.Ю. Руденко, А.В. Меренков, А.Б. Ермаков, В.И. Чичков. ЖТФ, **94** (7), 1060 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58341.168-24
[4] J. Govenius, R.E. Lake, K.Y. Tan, M. Möttönen. Phys. Rev. Lett., **117**, 030802 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.030802
[5] A.M. Gunyhó, S. Kundu, J. Ma, W. Liu, S. Niemelä, G. Catto, V. Vadimov, V. Vesterinen, P. Singh, Q. Chen, M. Möttönen. Nature Electron., **7**, 288 (2024). DOI: 10.1038/s41928-024-01147-7
[6] P.K. Day, H.G. LeDuc, B.A. Mazin, A. Vayonakis, J. Zmuidzinas. Nature, **425**, 817 (2003). DOI: 10.1038/nature02037
[7] Т.М. Ким, С.В. Шитов. Письма в ЖТФ, **47** (24), 13 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897
[8] Т.М. Ким, А.В. Меренков, А.Б. Ермаков, Л.С. Соломатов, В.И. Чичков, С.В. Шитов. ЖТФ, **93** (7), 995 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55759.117-23
[9] С.В. Шитов. Патент RU 2 801 920 C1 Российская Федерация, МПК H01L 23/00 (2006.01). №2022134754: заявл. 28.12.2022: опубл. 18.08.2023
[10] С.В. Шитов, Н.Ю. Руденко, Э.Р. Хан. *Сверхпроводящий СВЧ детектор проходящей мощности* (Заявка на изобретение. Дата регистрации ФИПС: 07.02.2025)