

Прогресс технологии RFTES-детекторов

А. В. Меренков¹, Т. М. Ким¹, В. И. Чичков¹, Л. С. Соломатов¹, Н. Ю. Руденко¹,
С. В. Шитов^{1,2,*}

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский пр., 4, Москва, 119049

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, ул. Моховая, 11/7, Москва, 125009

*Sergey3e@gmail.com

В работе рассмотрено современное состояние исследований и разработок, связанных с созданием и оптимизацией прямых детекторов терагерцового диапазона аттоваттной чувствительности на основе отечественной технологии высокочастотного разогрева сверхпроводящего абсорбера током резонатора (RFTES). Проводится сравнение с известными сверхпроводящими детекторами, обсуждаются конкурентные преимущества и перспективы RFTES-детекторов для применения в интегральных схемах, включая многоэлементные изображающие матрицы, активные интегральные детекторы и источники термодинамического шума.

Введение

При разработке новой технологии детектирования и визуализации сверхслабых терагерцовых сигналов, которую мы назвали Radio Frequency Transition Edge Sensor (RFTES), ставилась цель создать детектор, синтезирующий лучшие свойства таких зрелых технологий, как TES, MKID и HEDD. Базовый принцип работы аналогичен технологии TES, где регистрируется разогрев сверхпроводящей пленки вблизи ее критической температуры. Принцип частотной селекции каналов приема является базовым в радиотехнике, и в технологии MKID осуществляется с помощью планарных сверхпроводящих резонаторов (рис. 1). Из технологии HEDD «заимствована» активация сверхпроводящего перехода пленочного микромостика путем разогрева слабо связанной с решеткой электронной подсистемы (электронного газа). Фундаментальным преимуществом RFTES-технологии можно назвать предельно высокую чувствительность наряду с высокой стабильностью и быстродействием, для получения которых не требуется сквид-усилитель, а также удобство интеграции таких детекторов в изображающие FDM-матрицы с частотами считывания ~ 1 ГГц. Поскольку в области сверхпроводящего перехода доминирует активный нелинейный СВЧ-импеданс, пиксели RFTES-матрицы (рис. 2), в отличие от матрицы MKID, не меняют резонансную частоту и мало чувствительны к нестабильности опорного генератора, что делает их управление проще. В добавок диапазон частот принимаемых сигналов RFTES простирается от единиц ГГц до ИК, а рабочие температуры могут быть повышены до 400 мК.

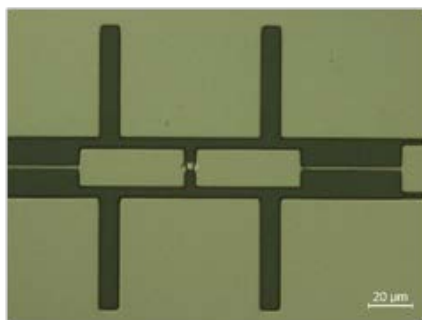


Рис. 1. Фотография чипа RFTES-детектора. На вставке с увеличением показана терагерцовая двухщелевая антенна с мостиком из гафния в центре. Четвертьволновой резонатор из ниобия на частоту 1,5 ГГц свернут для компактности

Эти черты RFTES благоприятствуют более широкому применению RFTES-детекторов как универсальных сенсоров, в том числе для фундаментальных исследований терагерцовых космических излучений, в частности с борта космических обсерваторий.



Рис. 2. Изображающая матрица RFTES-детекторов

Результаты

На площадке НИТУ МИСИС создан и продемонстрирован ряд экспериментальных образцов RFTES, чувствительность которых хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями для рекордных на сегодня HEDD-детекторов с электронным газом, а особенности описываются оригинальными математическими моделями, учитывающими эффект аномального скин-эффекта в тонких пленках сверхпроводящего гафния и электротермическую обратную связь в цепях опорного сигнала СВЧ. Используемые материаловедческие подходы позволили продемонстрировать тонкие (50–80 нм) неупорядоченные пленки гафния с критической температурой в диапазоне 200–400 мК; мостики из такого материала технологически совместимы с микрорезонаторами из ниобия $Q \sim 10\,000$, проявляя нелинейность, аналогичную сверхпроводящему переходу. Критическим этапом исследования стала демонстрация высокочастотного разогрева мостика током опорного сигнала ~ 1 ГГц и плавного подавления сверхпроводимости. Расчеты подтвердили, что снижение крутизны сверхпроводящего перехода, dR/dT , не играет существенной роли. Измерения теплопроводности методом замещения теплового стока мощностью опорного сигнала при сохранении высокой добротности позволили убедиться, что электронная подсистема проявляет свойства электронного газа в диапазоне температур 100–

400 мК, а время отклика составляет ~ 3 мкс. Оптическая чувствительность экспериментальных детекторов была исследована методом чернотельного излучателя в диапазоне частот 550–750 ГГц [1], составила $NEP \sim 10^{-17}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ и практически совпала с теоретическими предсказаниями, что делает целесообразными исследование в направлении получения рекордных чувствительностей, $NEP \sim 10^{-20}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, а технологию RFTES интересной темой в области сверхпроводящих наносистем.

Перспективные применения

Проведенная модификация детектора, в частности, замена короткого микромостика на тонкий подслоя гафния с сужением, дала неожиданный и интересный результат. Возник эффект сильной кинетической индуктивности и так называемый мягкий нелинейный резонанс, позволяющий реализовать частотную характеристику с уникальной крутизной и, как следствие, с большим коэффициентом преобразования мощности входного сигнала на частоту несущей (рис. 3).

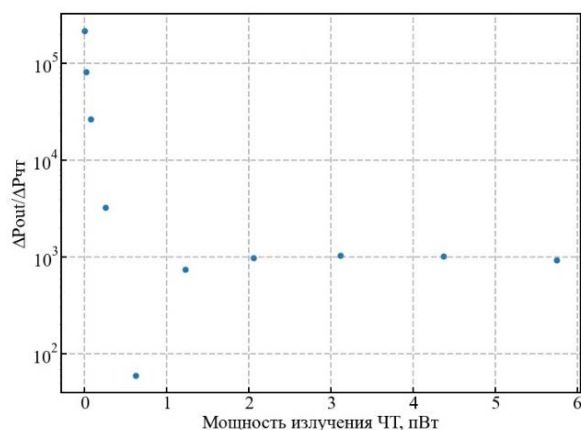


Рис. 3. Преобразование входного сигнала от черного тела (усиление) в RFTES-детекторе с сильным эффектом кинетической индуктивности

Еще одной интересной задачей с применением RFTES является интеграция двух детекторов в балансную конфигурацию [3]. Баланс поглощения двух микромостиков в резонаторе позволяет регистрировать только разностный сигнал, приходящий в двух близких направлениях. Дальнейшие перспективы видятся в создании активного детектора, описанного концептуально в работах [4] и [5]. Здесь скивд постоянного тока интегрирован в резонатор так, что достигается его согласование с резонатором, амплитуду которого контролирует RFTES-детектор. Таким образом мы получаем эффект помехозащищенного параметрического усиления выходного сигнала детектора и достигаем квантовой чувствительности всего устройства. Наконец, разогретый СВЧ-мощностью мостик может служить чернотельным излучателем на ТГц-частотах [2].

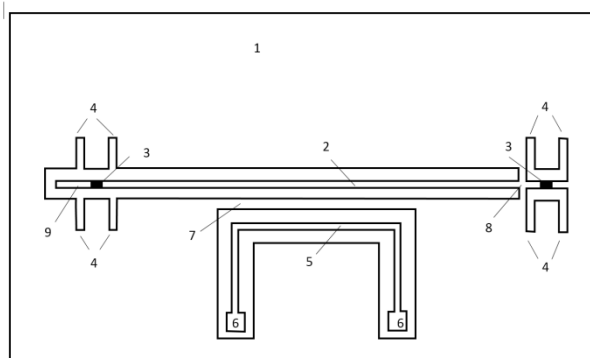


Рис. 4. Дифференциальный RFTES-детектор. На подложке 1 расположен резонатор 2, нагруженный двумя мостиками 3, концевой емкостью 9 и индуктором 8. Терагерцовые антенны 4, линия возбуждения 5 с контактами 6 и магнитная связь 7 обеспечивают смещение мостиков к T_c

Выводы

Результаты проведенных исследований прошли серьезную апробацию и легли в основу двух кандидатских диссертаций, защищенных в 2023 году. Перспективными устройствами на основе RFTES-технологии являются изображающие матрицы, термодинамические излучатели для их калибровки, а также новые интегральные устройства, как-то: дифференциальный детектор и активный детектор с встроенным параметрическим усилителем. Все эти темы и статус их разработки планируются к представлению на данной конференции в виде отдельных стендовых докладов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта «Квантовый интернет» №К2-2022-029 и программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Литература

1. А. В. Меренков, Т. М. Ким, В. И. Чичков, С. В. Калинин, С. В. Шитов // Физика твердого тела. 2022. V. 64(10). P. 1404. DOI:10.21883/FTT.2022.10.53081.50HH.
2. Т. М. Ким, А. В. Меренков, Ан. Б. Ермаков, Л. С. Соломатов, В. И. Чичков, С. В. Шитов. Устройства и методы измерения параметров RFTES-болметра // Журнал технической физики. 2023. Т. 7. С. 995 DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55759.117-23. In English : T. M. Kim, A. V. Merenkov, An. B. Ermakov, L. S. Solomatonov, V. I. Chichkov, S. V. Shitov. Devices and methods for measuring parameters of RFTES bolometers // Technical Physics. 2023. Vol. 68, no. 7. P. 928. <https://journals.ioffe.ru/articles/56640>.
3. С. В. Шитов. Дифференциальный сверхпроводящий детектор : патент РФ на изобретение №2801920 от 28 декабря 2022.
4. С. В. Шитов. Активный сверхпроводящий терагерцовый детектор // Журнал технической физики. 2023. Т. 7. С. 988. DOI:10.21883/JTF.2023.07.55758.116-23.
5. С. В. Шитов. Активный сверхпроводящий детектор : патент РФ на изобретение №2801961 с приоритетом от 28 декабря 2022.