

НОВЫЕ МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ШУМА НА СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ким Т.М. (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, Россия)

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Шитов С.В. (Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, Россия, Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия)

Введение. Разработка, исследование и аттестация сенсоров при сверхнизких температурах, таких как, например, новые сверхпроводящие болометры [1] терагерцового диапазона частот или параметрические усилители гигагерцового диапазона для квантовых вычислений [2] неразрывно связаны с решением проблем тепловыделения и термостабилизации на уровне лучше ± 1 мК. Главными задачами аттестации являются измерение собственных шумов сенсора и его быстродействия путем сравнения с калиброванными генераторами шума (ГШ). Измерительный шум описывается уравнениями термодинамики и характеризуется температурой виртуального черного тела, которое создает такое же воздействие. Известные традиционные методы термостатированного губчатого поглотителя, а также методы постоянного [3] и быстрого импульсного [4] разогрева твердотельного поглотителя учитывают концепцию «серого» тела, характеризующегося коэффициентом поглощения, и обладают мощностью разогрева ~ 1 мВт, что превышает мощность охлаждения типичного криостата растворения ~ 100 мкВт при температурах ~ 100 мК. Значительная тепловая инерция массивного чернотельного источника, приводящая к трудно устранимым дрейфам рабочей температуры, и некорректность определения коэффициента черноты принципиально снижают точность измерений и являются фундаментальными проблемами метода термодинамических излучателей.

Концепция, разработка и экспериментальное исследование. В качестве решения вышеописанных проблем было впервые предложено и разработано устройство, в котором объединены генератор термодинамического шума на основе сверхпроводящего микромостика в резистивном состоянии и генератор дробового шума на основе сверхпроводящего туннельного перехода типа СИС [5]. Такое устройство позволяет генерировать тестовые сигналы сверхмалого уровня в непосредственной близости от исследуемого сенсора, не влияя на тепловой режим измерительной системы [6]. Оба ГШ интегрированы на одном чипе и включены последовательно в копланарный волновод; включение любого из них производится постоянным током. Интенсивность дробового шума слабо зависит от температуры и определяется туннельным током сверхпроводящего перехода. Источник термодинамического шума является фидером двуцелевой терагерцовой антенны, излучающей в диапазоне частот 550–750 ГГц. Из первых принципов электродинамики и термодинамики следует, что уровень шума, излучаемого антенной, определяется согласованием антенны с мостиком и описывается формулой Планка. Шумовой сигнал поступает на вход сенсора (детектора или усилителя), где можно сравнить интенсивность двух ГШ. Такая калибровка (сравнение) возможна в общем диапазоне частот, выбор которого обусловлен периферической электроникой (1–2 ГГц в нашем случае). Предложенная комбинация двух ГШ позволяет использовать устройство в гигагерцовом ($\sim 10^9$ Гц) и терагерцовом ($\sim 10^{12}$ Гц) диапазонах частот. Традиционно для быстрой модуляции ~ 10 кГц применяются электронные модуляторы, что возможно в рамках описанного метода.

Экспериментальное исследование и апробация разработанного устройства проводилось при температуре 50 мК и позволили обнаружить ряд проблем в ключевых узлах измерительной системы для исследования квантовых цепей. Было выявлено серьезное влияние потерь системы коммутации кабелей в криостате растворения, а также проблема

заземления СВЧ цепи, препятствующая широкополосному пропусканию сигналов. Была выявлена также известная проблема влияния оконечного регистратора сигналов, вызванная недостаточным коэффициентом усиления (менее 73 дБ). Использовался образец СИС перехода из алюминия $R_n \approx 30$ Ом с напряжением щели 340 мкВ, что соответствует минимуму шумовой температуры 1,97 К и рассеиваемой мощности 4 нВт на ступени криостата растворения 10 мК. При разогреве терагерцового излучателя (мостика) до 2 К рассеиваемая мощность составит лишь 3 нВт, а до 9 К – 3 мкВт, что также приемлемо для криостата растворения при температуре 100 мК.

Переходным вариантом чернотельного излучателя является резистивная пленка, нанесенная на тонкую диэлектрическую подложку с высокой теплопроводностью и временем температурной релаксации ~ 1 с, которая была успешно использована в эксперименте с уникальным болометром с электронным газом [7]. На момент эксперимента коэффициент черноты полупрозрачной пленки Ni-Fe-Cr был оценен лишь приблизительно, что вносило неопределенность в полученный результат. Анализ электродинамической модели в диапазоне частот антенны 550–750 ГГц выявил низкий и неравномерный коэффициент черноты, 10–30 %, что объясняется эффектом стоячих волн в диэлектрической подложке.

Выводы. Предложенная концепция источника терагерцового шума с внутренней калибровкой дробовым шумом, а также экспериментальные и численные исследования планарных термодинамических излучателей на основе тонких пленок, позволяют в ближайшее время ожидать серьезный прогресс в метрологии сверхчувствительных электродинамических цепей. Малое тепловыделение и электронная модуляция позволяют реализовать такие источники шума в составе единой планарной структуры, например, в микросхеме для калибровки изображающей терагерцовой матрицы [8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального государственного бюджетного учреждения «Российский фонд фундаментальных исследований» в рамках научного проекта № 20-37-90094.

Список использованных источников

1. Merenkov A.V., Chichkov V.I., Ermakov A.B., Ustinov A.V., Shitov S.V. Superconducting RFTES Detector at Milli-Kelvin Temperatures. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 28, Issue 7, 2018. DOI: 10.1109/TASC.2018.2827981
2. Byeong Ho Eom, Peter K. Day, Henry G. Leduc, Jonas Zmuidzinas. A Wideband, Low-Noise Superconducting Amplifier with High Dynamic Range. arXiv:1201.2392
3. A. V. Uvarov, S. V. Shitov, A. N. Vystavkin, *Measurement Techniques*, 53 (9), 1047 (2010). DOI:10.1007/s11018-010-9617-4
4. Ph. Abbon, A. Delbart, M. Fesquet, et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 575 (3), 412–420 (2007). DOI: 10.1016/j.nima.2007.02.094
5. Hirofumi Inoue, Takashi Noguchi and Korato Kohno. SIS junction as a microwave noise source // *Journal of Physics: Conference Series* – 2010 – V. 234 042014 – P. 1-7.
6. Ким Т. М., Шитов С. В. Сверхпроводящий источник шума для сверхнизких температур. // *Письма в Журнал Технической Физики*. – 2021. – 24. – с. 13–16. DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897
7. Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинин С. В., Шитов С. В. Сверхпроводящий болометрический детектор с высокочастотным считыванием при температуре 400 мК. // *Физика твердого тела*. – 2022. – 64. – 10. – с. 1404–1411
8. Merenkov A. V., Shitov S. V., Chichkov V. I., Ermakov A. B., Kim T. M., Ustinov A. V. A Superconducting Resonator with a Hafnium Microbridge at Temperatures of 50–350 mK *Technical Physics Letters*, 2018 Vol. 44, No. 7, pp. 581–584.