

ТУННЕЛЬНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ДЛЯ МАССИВОВ ТЕРАГЕРЦОВЫХ БОЛОМЕТРОВ

Артанов А.А.^{1,2}, Калашиников К.Д.^{1,2}, де Ланге Г.³, Кошелец В.П.¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук
artanov@hitech.cplire.ru, kalashnikov@hitech.cplire.ru, valery@hitech.cplire.ru,

² Московский физико-технический институт (государственный университет)

³ SRON Netherlands Institute for Space Research, г. Гронинген, Нидерланды

Исследовалась возможность использования туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) в системе мультиплексирования для смещения массивов детекторов на краю сверхпроводящего перехода и считывания принимаемого сигнала. Была экспериментально исследована работа СИС-преобразователя частоты при относительно низких рабочих частотах (менее 10 ГГц), исследованы различные режимы работы, потери преобразования в квазичастичном режиме составили 8 дБ, мощность насыщения по выходу составляет -58 дБм, показана возможность повышения одновременно нескольких частот входного сигнала. Также была продемонстрирована возможность использования СИС-перехода в режиме источника тока, управляемого внешним высокочастотным сигналом.

Болометры на краю сверхпроводящего перехода (англ. transition edge sensor, TES) зарекомендовали себя как надёжные и чувствительные детекторы мощности электромагнитного излучения, способные работать от терагерцового до гамма-излучения [1]. Сигнал с TES-болометров считывают про помощи СКВИД-усилителей (англ. Superconducting QUantum Interference Device, SQUID). Система с частотным разделением каналов позволила считывать сигнал с нескольких болометров при помощи одного СКВИДа, значительно уменьшив приток тепла в криостат за счёт сокращения количества проводов. Доктором Гертом де Ланге из Нидерландского Института Космических Исследований (SRON) было предложено добавить дополнительный уровень мультиплексирования [2], используя туннельные структуры «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» (СИС) в качестве источников тока и преобразователей частоты, что позволит ещё больше сократить количество проводов. Целью данной работы является исследование возможности использования СИС-переходов в режиме источника тока и преобразователя при относительно низких (<10 ГГц) частотах, которые будут использоваться в системе.

Источник тока на СИС-переходе

Внешний ВЧ сигнал влияет на ВАХ СИС-перехода таким образом, что если задать напряжение на переходе, близкое к щелевому, то изменяя мощность ВЧ сигнала можно управлять током через переход (рис.1). Это позволяет использовать СИС-переход как регулируемый источник тока, управляемый мощностью внешнего сигнала. Такое применение СИС-переход может найти в системе мультиплексированного смещения массива СКВИД-усилителей постоянным током.

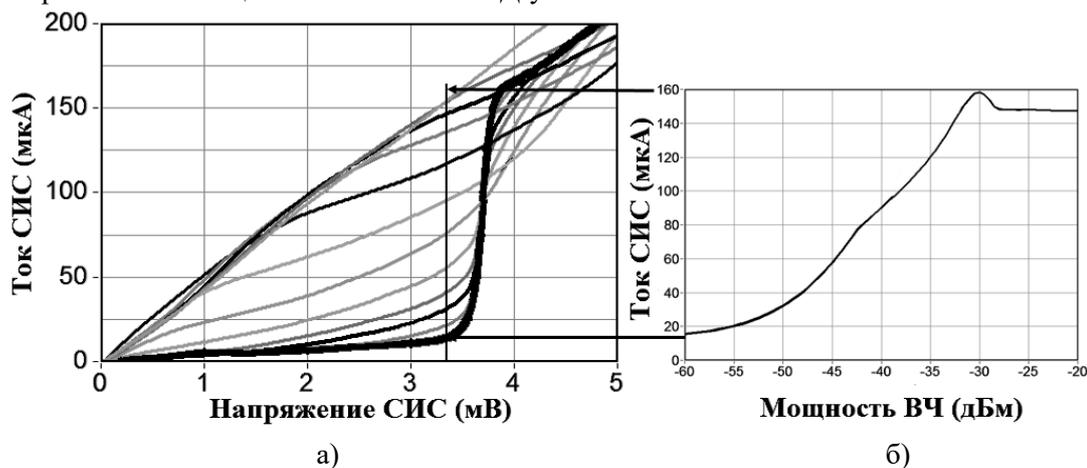


Рис. 1. Иллюстрация принципа работы источника тока на СИС-переходе.

На рисунке 2 изображена принципиальная схема эксперимента для демонстрации принципа работы системы. Каждому переходу соответствует один узкополосный фильтр, который пропускает сигнал определённой частоты с генератора ВЧ, и не пропускает сигналы других частот. Таким образом, задавая сигналы конкретных частот, можно управлять каждым СИС-переходом в отдельности.

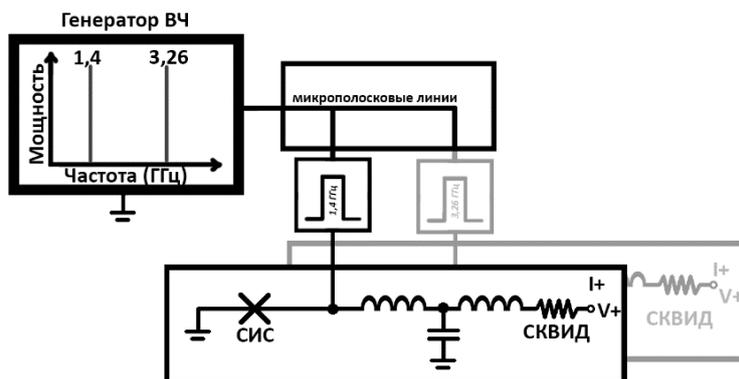


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для демонстрации работы СИС-перехода в режиме источника тока, управляемого внешним ВЧ сигналом.

При проведении эксперимента использовались два туннельных перехода Nb-AlO_x-Nb, целевое напряжение 2,8 мВ, сопротивление в нормальном состоянии R_n=3 Ом, площадь S=1 мкм. Реальный СКВИД при проведении эксперимента не использовался, место его установки закорочено. На обоих переходах задаётся напряжение, близкое к щелевому - 2,58 мВ. Подавая ВЧ-сигналы с частотой, соответствующей фильтрам (1,4 Гц и 3,23 ГГц), мы можем управлять током через один из переходов; при этом ток через другой переход остаётся неизменным (рис. 3).

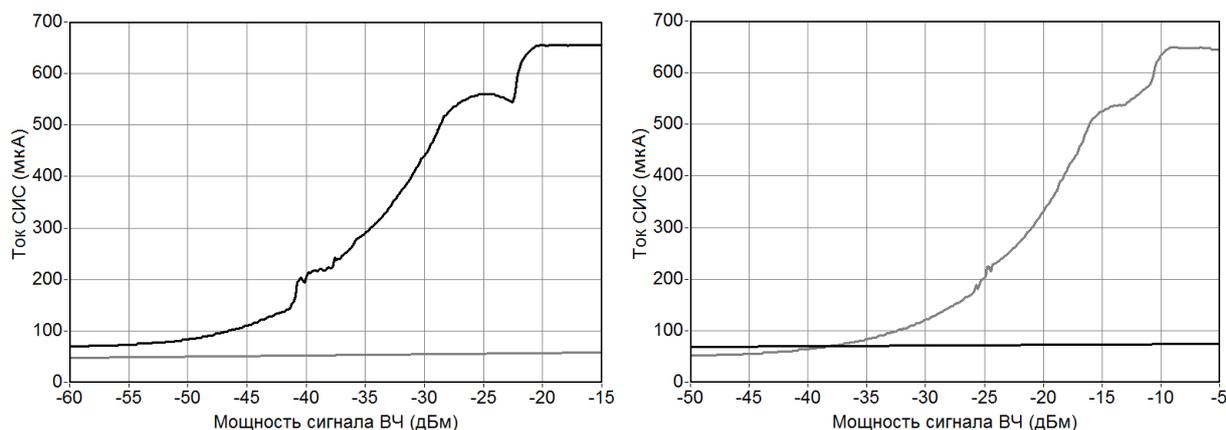


Рис. 3. Зависимость тока через оба перехода от мощности внешнего ВЧ-сигнала с частотой 1,4 ГГц (слева) и 3,26 ГГц (справа)

Таким образом, через один коаксиальный кабель мы можем управлять током через 2 СИС-устройства; увеличение количества управляемых СИС-устройств или приложение нескольких высокочастотных сигналов одновременно не должно сказаться на результатах эксперимента.

СИС-преобразователь частоты.

Для проведения эксперимента был изготовлен измерительный зонд (рис 4), который позволяет проводить измерения при гелиевой температуре непосредственно в транспортном сосуде Дьюара. Он представляет собой металлическую трубку, на нижний конец которой прикрепляется экранированная головка с образцом, погружаемым в жидкий гелий. Внутри трубки помещаются кабели для смещения СИС и коаксиальный кабель для подачи ВЧ сигнала на образец СИС.

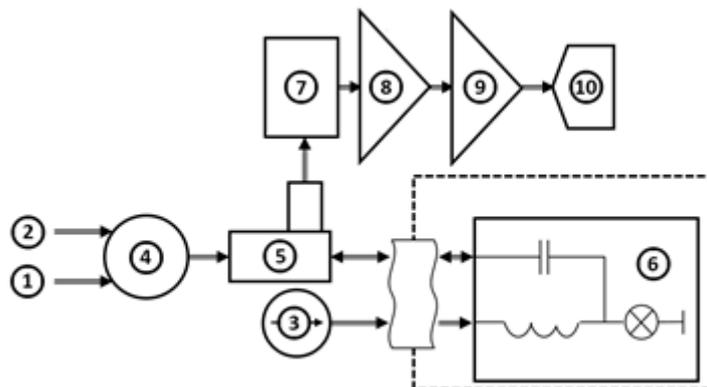


Рис. 4. Схема измерительного зонда. 1 и 2 – входные сигналы (исследуемый и гетеродинный); 3 – блок смещения образца постоянным током; 4 – сумматор мощности; 5 – направленный ответвитель; 6 – исследуемый образец, погружённый в жидкий гелий; 7 – узкополосный ЖИГ-фильтр; 8 – усилитель при 77К; 9 – усилитель при 300К; 10 – анализатор спектра.

При измерениях использовался образец Nb-AlN-NbN со следующими параметрами: $V_g = 3,7$ мВ, $R_n S = 43$ Ом/мкм², $R_n = 21,4$ Ом, $R_j/R_n = 14$, $S = 2$ мкм².

Было проведено исследование зависимости потерь преобразования от напряжения на СИС и мощности гетеродинного сигнала в режимах с подавлением критического тока внешним магнитным полем – квазичастичный режим (рис.5б), и без подавления – джозефсоновский режим (рис.5а).

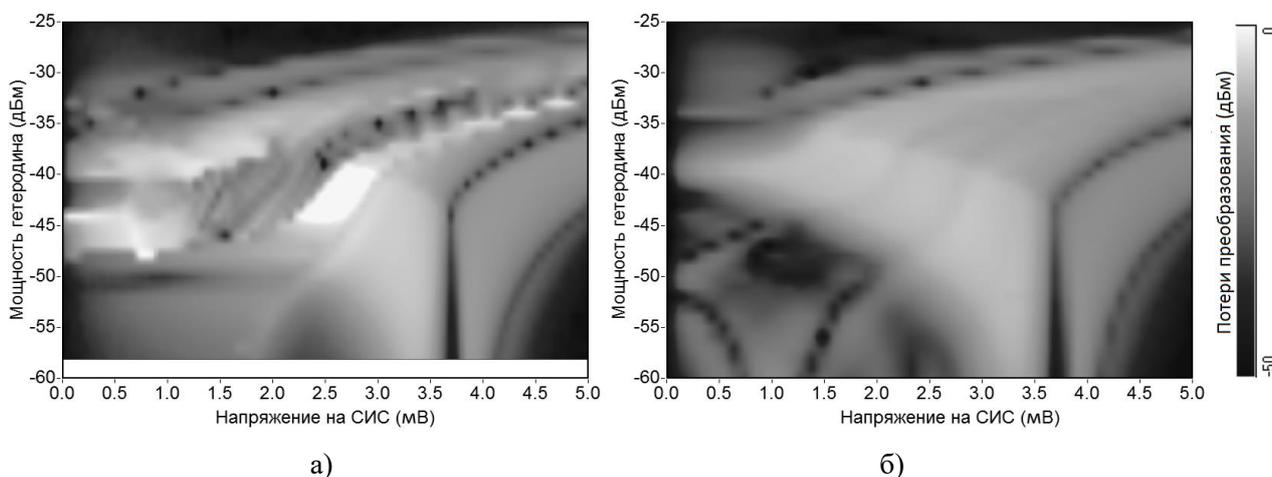


Рис. 5. Экспериментально измеренные зависимости потерь преобразования от мощности сигнала гетеродина и напряжения на СИС, 5а – без подавления критического тока, 5б – с подавлением.

На рисунке 6 представлена зависимость потерь преобразования от напряжения на СИС при мощности гетеродина -40 дБ. Квазичастичный режим в данном случае позволяет задавать любое напряжение на участке от 1 мВ до 3 мВ, при этом потери преобразования составляют 9 ± 1 дБ.

В джозефсоновском режиме потери преобразования значительно меньше, чем в квазичастичном режиме, в некоторых случаях даже реализуется преобразование с усилением. Кроме того, не требуется приложение внешнего магнитного поля, как в случае квазичастичного режима. В то же время, джозефсоновская генерация может быть источником дополнительных шумов [3], что может быть решающим при выборе режима. Кроме того, джозефсоновский режим реализуется в достаточно узкой области по напряжению на переходе и мощности гетеродина.

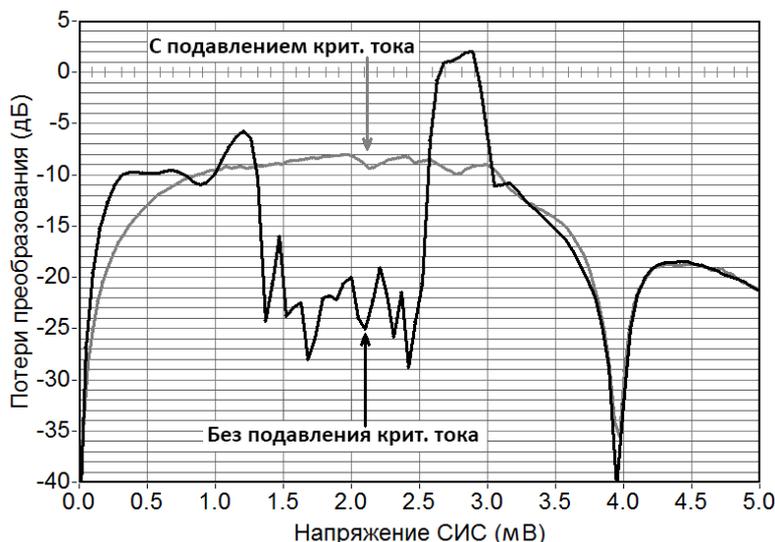


Рис 6: Экспериментально измеренная зависимость потерь преобразования от напряжения на переходе при мощности гетеродинного сигнала -40 дБм.

На рисунке 7 показана зависимость мощности сигнала ПЧ от мощности сигнала ВЧ, напряжение смещения на переходе 1,6 мВ, мощность сигнала гетеродина -40 дБм. Потери преобразования в данной точке составляют 8 дБ, а мощность насыщения по выходу составляет -58 дБм.

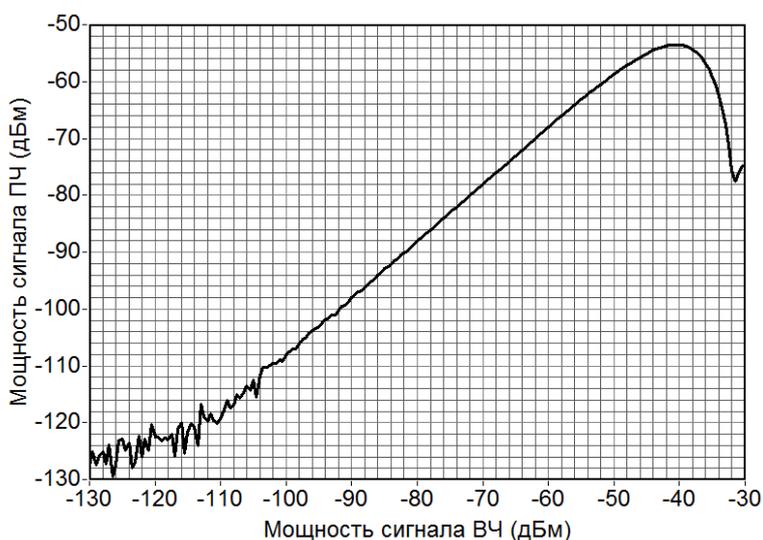


Рис 7: Зависимость мощности выходного сигнала ПЧ от мощности входного сигнала ВЧ. Мощность сигнала гетеродина -40 дБм, напряжение на переходе 1,67 мВ.

Для проверки возможности повышения частоты одновременно нескольких сигналов на одном смесителе на вход был подан сигнал частотой 223 МГц с амплитудной модуляцией 0,6 МГц, что равносильно подаче трёх сигналов ВЧ разной частоты. На рисунке 8 изображены спектры входного ВЧ сигнала и сигнала ПЧ в джозефсоновском и квазичастичном режимах. Видно, что уровень шума при работе в джозефсоновском режиме выше, чем в квазичастичном. Приведенные спектры подтверждают, что при работе в джозефсоновском режиме, когда мощность сигнала на выходе максимальна, мы измеряли именно мощность сигнала, а не шум в полосе. Наличие нескольких сигналов не сказывается на работе смесителя, потери преобразования соответствуют предыдущим экспериментам.

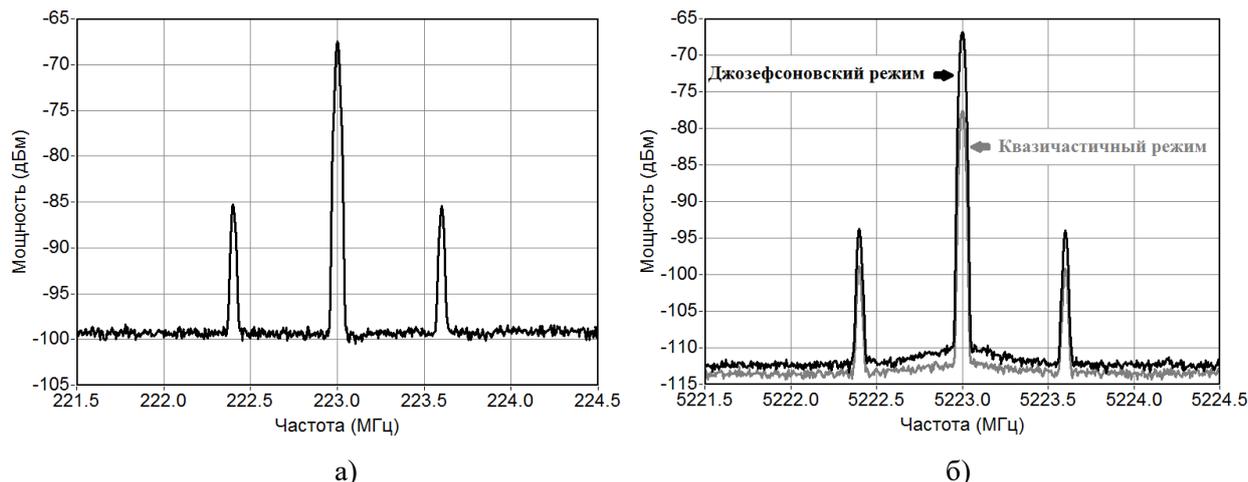


Рис. 8. Спектры входного сигнала ВЧ 223 МГц с амплитудной модуляцией 0,6 МГц (а) и выходного сигнала ПЧ (б). Мощность сигнала гетеродина -40 дБм, напряжение на переходе 1,6 мВ.

Используя упрощённую модель СИС-смесителя, описанную в работе [4], мы выполнили качественное сравнение данных, полученных в результате эксперимента и численного моделирования. Результаты представлены на рисунке 9. Экспериментальные и расчётные соответствуют друг другу, различия связаны с упрощениями, использованными в модели.

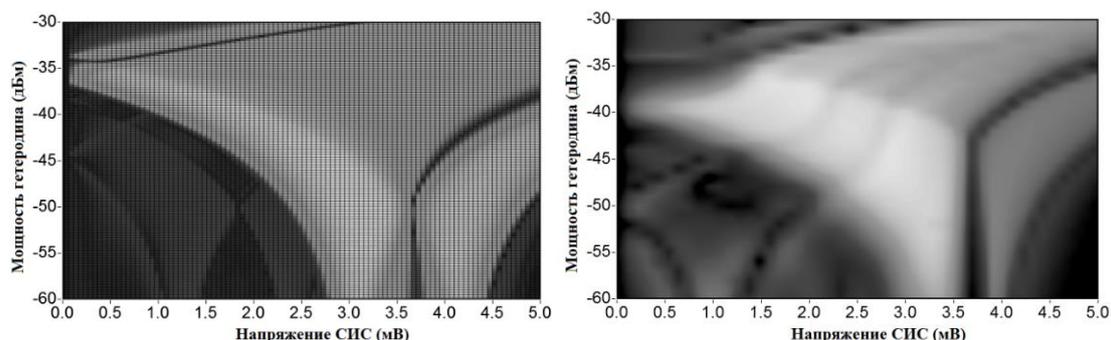


Рис 9: Зависимость мощности выходного сигнала ПЧ от мощности входного сигнала ВЧ сигнала ПЧ (б). Мощность сигнала гетеродина -40 дБм, напряжение на переходе 1,6 мВ.

Таким образом, была проведена демонстрация возможностей СИС-перехода для реализации криогенной системы мультиплексирования для считывания информации с TES. Полученные данные позволяют подтвердить работоспособность предложенного способа и приступить к разработке реальных прототипов криогенной системы мультиплексирования

Данная работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки РФ №14.607.21.0100 (идентификатор проекта RFMEFI60714X0100).

ЛИТЕРАТУРА

1. K.D. Irwin and G.C. Hilton., Transition-edge sensors // Cryogenic Particle Detection, ed. C. Enss, Springer, Germany, 2005.
2. G. de Lange, Feasibility of a frequency-multiplexed TES read-out using superconducting tunnel junctions // Journal of Low Temperature Physics, special issue LTD 15, 2014.
3. B.Leridon, P.Febvre, S.George, P.Feautrier, and W.R. McGrath, Experimental evidence of Josephson noise in superconductor-insulator-superconductor quasiparticle mixers // J. Appl. Phys., 1997.
4. К.В. Калашников, А.В. Худченко, А.М. Барышев, В.П. Кошелец, Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник // Радиотехника и Электроника, т. 56, № 6, стр. 751-759, 2011.