

Содержание

1	Введение	2
2	Литобзор	2
3	Теория	2
4	Постановка эксперимента	3
4.1	Калибровка	4
5	Результаты	5
6	Заключение	6

1 Введение

Радиоастрономия является основным двигателем развития сверхчувствительных смесителей для гетеродинных приемников электромагнитного излучения миллиметровых и суб-миллиметровых длин волн. Смесители на основе туннельного перехода сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС) [1] имеют рекордные шумовые характеристики в этом диапазоне, близкие к квантовому пределу. Среди наземных приемников наибольшее распространение получили смесители с разделением боковых полос, которые имеют в составе два одиночных СИС-смесителя [2] [3].

Для эффективной работы приемника, а именно для достижения предельной чувствительности и для высокого качества разделения боковых полос, принципиально важно иметь СИС-смесители с низким уровнем отражения. Низкий уровень отражений нужен как по входу смесителя, т.е. на частоте принимаемого сигнала, на высокой частоте (ВЧ) [4] [5], так и по выходу, т.е. на промежуточной частоте (ПЧ, IF). В тракте ПЧ такая необходимость обусловлена возникновением стоячих волн между самим СИС-смесителем и криогенным малошумящим усилителем, так как последний имеет достаточно высокий уровень отражения до ~ -6 дБ.

Данная работа посвящена определению уровня отражений от СИС-смесителя в рабочем режиме с целью минимизации этого уровня в будущем. Для решения поставленной задачи проведен теоретический расчет уровня отражения от СИС-смесителя по выходному тракту ПЧ, а также собрана экспериментальная схема, и проведено непосредственное измерение отраженного сигнала.

2 Литобзор

На данный момент достаточно много научных статей, посвященных изучению криогенных приемников на основе туннельного перехода СИС и их различных характеристик. Однако, на настоящий момент нет опубликованных материалов и результатов экспериментов с прямым измерением импеданса по промежуточной частоте от СИС-смесителя.

3 Теория

Величина отражений от СИС-смесителя по ПЧ тракту, характеризуемая параметром [6], может быть определена, если известен выходной импеданс ПЧ СИС-смесителя и импеданс подводящей линии тракта ПЧ (1) Для расчета мы используем 3х частотное приближение к теории квантового смешения Такера [1]. Рассмотрены сигналы на частотах , где ; - верхняя и нижняя полосы; - частота опорного генератора; - промежуточная частота. Полагаем, что более высокие гармоники шунтируются емкостью СИС-смесителя, составляющей в нашем случае порядка 100 фФ. Принимая во внимание взаимодействие

портов смесителя, компоненты напряжений и токов слабых сигналов линейно связаны матрицей проводимости : (2) где - напряжение смещения туннельного скачка тока, - нормальное дифференциальное сопротивление Вольт-амперной характеристики (ВАХ), - безразмерный параметр накачки, пропорциональный напряжению опорного генератора , - напряжение смещения СИС-смесителя. У каждого порта есть своя канальная проводимость: - нагрузка порта с принимаемым сигналом, - нагрузка порта ПЧ, - нагрузка порта нижней полосы. Рис. 1. Эквивалентная схема гетеродинного смесителя, с приложенным сигналом опорного генератора частоты , принимаемым сигналом частоты и сигналом ПЧ . Для идеального двухполосного смесителя импедансы верхней и нижней полос равны . В нашем случае - результат преобразования проводимости опорного генератора несколькими микрополосковыми линиями. Воспользовавшись результатом [1], получим , где

Где - зависимость туннельного тока СИС-смесителя от его напряжения; - зависимость соотношения Крамерса-Кронига тока от напряжения СИС-смесителя ; - функция Бесселя порядка от параметра накачки . Тогда, в нашем случае импеданс по ПЧ: (3) На рис. 2 продемонстрирована измеренная ВАХ СИС-перехода, которая является зависимостью и определяет . Автономная кривая показана зеленой линией, при этом, оранжевой кривой показана ВАХ для случая, когда приложен внешний сигнал генератора частотой 600 ГГц.

Рис. 2. ВАХ автономная (№1 зеленая кривая) и с приложенным сигналом опорного генератора (№2 оранжевая кривая). На рис.3 приведен результат теоретического расчета импеданса с использованием ВАХ (рис.2) в диапазоне ПЧ 0.1-12 ГГц при различных напряжениях на СИС-переходе: 2.8, 3, 3.2 мВ, причем импеданс подводящей линии полагается Ом. Можно заключить, что действительная часть изменяется незначительно с промежуточной частотой, в отличие от мнимой части. Также видно, что импеданс сильно зависит от напряжения на СИС-переходе.

Рис. 3. Действительная (слева) и мнимая (справа) части расчетного импеданса СИС-смесителя от ПЧ при разных напряжениях на СИС-смесителе; №1 – 2.8 мВ, №2 – 3 мВ, №3 – 3.2 мВ.

4 Постановка эксперимента

Задача эксперимента - измерение уровня отражения от СИС-смесителя по выходному каналу ПЧ, когда на смеситель подается напряжение смещения и приложен сигнал высокочастотного опорного генератора. Измерения проведены в диапазоне 4–8 ГГц; этот диапазон определен полосой используемого криогенного ПЧ усилителя. Схема эксперимента представлена на Рис. 4; СИС-смеситель помещен в криостат замкнутого цикла при температуре около 4 К. Высокочастотный опорный генератор (ЛО) интегрирован с СИС-смесителем на одном чипе и представляет собой распределенный джозефсоновский

переход с вязким течением магнитных вихрей (ФФО). Векторный анализатор цепей (ВАЦ, VNA), размещенный вне криостата, генерирует тестовый сигнал диапазона 4–8 ГГц на порте (П1, Р1), который, проходя через аттенуатор -10 дБ, поступает в направленный ответвитель (Directional coupler), который направляет его на СИС-смеситель с коэффициентом связи около -10 дБ. Далее сигнал проходит специальный инжектор (Bias Tee), позволяющий беспрепятственно проходить ПЧ сигналу, задавая при этом напряжение на СИС-смесителе по постоянному току через большую индуктивность. Отразившись от СИС-смесителя, основная часть сигнала проходит напрямую через направленный ответвитель и поступает на вход криогенного малошумящего усилителя (LNA), который усиливает этот сигнал и направляет его на приемный порт (П2, Р2) ВАЦ. Фактически, измеряемым параметром является отношение сигналов ВАЦ на портах П1 и П2, а точнее его спектр.

Рис. 4. Схема эксперимента по измерению отражения от СИС-смесителя по выходу ПЧ

4.1 Калибровка

Важным этапом в эксперименте является калибровка ВАЦ, чтобы повысить точность измерений. Мы используем стандартную однопортовую калибровку (Рис. 5), в основе которой лежит определение 3х параметров цепи: D - прямые утечки в цепи, R - внутренние отражения, M - рассогласование. Путем несложных преобразований, можно явно выразить фактический коэффициент отражения через измеряемую величину и 3 калибровочных параметра D, R, M. (4) Коэффициенты D, R, M могут быть определены по трем калибровочным измерениям, путем составления и решения системы из трех уравнений (4), где коэффициент отражения вычисляется теоретически по формуле (1), а величина непосредственно измеряется векторным анализатором цепей.

Рис. 5. Схема однопортовой калибровки. В калибровочных измерениях при 4 К сам СИС-переход используется как калибратор [7]. Это позволяет избежать погрешностей, возникающих при калибровке при комнатной температуре и связанных с изменениями электрической длины и импеданса элементов цепи при охлаждении. СИС-смеситель находится в автономном состоянии, т.е. без приложения внешнего сигнала. На Рис. 6 проиллюстрировано, какие напряжения смещения используются для калибровки: 1) при напряжении смещения в 2 мВ дифференциальное сопротивление становится порядка 1000 Ом, что близко к ситуации «открытой цепи», т.к. импеданс подводящей линии близок к величине Ом; 2) при напряжении смещения 3.8 мВ, т.е. посередине туннельного скачка тока, его дифференциальное сопротивление составляет около 3 Ом, что приближенно соответствует калибровке «короткое замыкание»; 3) при напряжении смещения 5–7 мВ дифференциальное сопротивление становится Ом, что близко к ситуации «нагруженной линии». Рис. 6. Автономная Вольт-амперная характеристика СИС-смесителя №1 зеленая

линия; соответствующее дифференциальное сопротивление показано оранжевой линией №2. Этих трех калибровок достаточно, чтобы составить 3 уравнения используя (4) и тем самым определить коэффициенты D , R и M . Это позволяет учесть все отражения и утечки в цепи и корректно измерить отражение от СИС-смесителя в рабочем режиме. Стоит отметить, что в приведенной калибровке внутренняя емкость СИС-смесителя выступает как часть внешней цепи и ее влияние также нивелируется калибровкой.

5 Результаты

ВАХ СИС-смесителя, при приложении сигнала опорного генератора частотой ГГц в «рабочем» режиме, показана на рис.1 оранжевой кривой. Диапазон «рабочего» напряжения смещения лежит приблизительно в интервале 1.6–3.4 мВ. Эта область напряжений соответствует так называемой квазичастичной ступени, вызванной приложением к СИС-переходу сигнала гетеродина. На рис.7 приведены экспериментальные (непрерывные кривые) и теоретические (пунктирные кривые) частотные зависимости уровня отражения при различных напряжениях на СИС-смесителе. Из приведенных результатов видно, что в диапазоне 4–8 ГГц уровень отражения почти не меняется с частотой, что хорошо согласуется и с теоретическими предсказаниями.

Рис. 7. Рассчитанный теоретически (№ 1,2 пунктирные линии) и определенный экспериментально (№ 3,4 сплошные кривые) уровень отражения от СИС-перехода в «рабочем режиме»; Напряжения СИС-смесителя № 1,3 – 2 мВ, № 2,4 – 2.6 мВ. Изменение уровня отражений при варьировании напряжения смещения СИС-смесителя продемонстрировано на Рис.8. Здесь приведены результаты измерений и расчета отражения для середины диапазона ПЧ, а именно при частоте 6 ГГц. Синие точки - экспериментальные данные, красная сплошная кривая – теоретический расчет. Уровень отражения в среднем составляет около 4 дБ. При напряжении около 2 мВ имеет место искажение ВАХ вызванное краем джозефсоновской ступени, которая проявляется ввиду наличия неподавленного критического тока перехода. Это искажение вызывает аномалию в уровне отражения. Можно заметить, что при напряжении 3.5 мВ уровень отражения значительно снижается (детально на Рис.9). Этот пик поглощения можно объяснить тем, что импеданс СИС-смесителя становится почти равным импедансу подводящей линии ПЧ, формула (1). Точнее, в этой точке дифференциальное сопротивление СИС-смесителя становится равным действительной компоненте импеданса подводящей линии. Вычислив импеданс СИС-смесителя по формуле (3) мы сможем экспериментально определить импеданс подводящей линии. В данном случае, мы наблюдаем, что с высокой степенью точности составляет Ом. На Рис.9 приведено сравнение экспериментального уровня отражения и теоретического. Важно отметить, что уровень отражения в минимуме определяется модулем разности мнимых компонент импедансов СИС-смесителя и подводящей линии. Отличие глубины пика поглощения в измерении и в расчете позволяет проверить досто-

верность расчета, а также оценить величину комплексной части импеданса подводящей линии и за счет проведения измерений при различных частотах ПЧ. В нашем случае можно заключить, что мнимая часть импеданса подводящей линии не превышает 2 Ом. Таким образом, предложен и апробирован способ нахождения импеданса подводящей линии, используя особенности ВАХ СИС-смесителя. В целом, можно заключить, что уровень отражения достаточно высокий и составляет в среднем около -4.5дБ в «рабочем» диапазоне, что вынуждает нас использовать специальные вентили в канале ПЧ в СИС приемниках для минимизации стоячих волн в тракте ПЧ.

Рис. 8. ВАХ СИС-смесителя: автономная (№ 1 зеленая кривая), нагруженная сигналом опорного генератора (№ 2 оранжевая кривая). Теоретический расчет отражения (№ 3 красная кривая). Результаты измерений отражения (№ 4 синие точки). ПЧ равна 6 ГГц.

Рис. 9. Уровень отражения в «яме». Точки (№ 1,2,3) - экспериментальный уровень отражения для ПЧ 4,6,8 ГГц соответственно; Сплошные кривые (№ 4,5,6) - теоретический расчет уровня отражения для ПЧ 4,6,8 ГГц соответственно.

6 Заключение

Представлен метод экспериментального и теоретического определения ПЧ параметров СИС-перехода. Это позволяет исследовать зависимость уровня отражений от СИС-смесителя по ПЧ выходу от напряжения смещения и от мощности опорного сигнала. Определение параметров самого СИС-перехода совмещенное с моделированием элементов ПЧ канала позволит в будущем рассчитать с высокой точностью ПЧ характеристики самого смесителя, а также всего приёмника сконструированного на его основе. Дополнительная калибровка по пику поглощения при варьировании напряжения смещения позволяет повысить точность измерений, которые хорошо совпадают с теоретическим расчетом. В дальнейшем планируется исследование ПЧ параметров на частотах 4-12 ГГц и выше, а также при варьировании мощности опорного генератора в широком диапазоне.

Список литературы

- [1] Tucker J. R. et al., Quantum limited detection in tunnel junction mixers. IEEE J. Quantum Electron., **QE-6**, 11, 1234 (1979).
- [2] Belitsky, V., Bylund, M., Desmaris, V., Ermakov, A., Ferm, S.E., Fredrixon, M., Krause, S., Lapkin, I., Meledin, D., Pavolotsky, A. and Rashid, H., ALMA Band 5 receiver cartridge- Design, performance, and commissioning. Astronomy & Astrophysics, 611, p.A98 (2018)

- [3] Chenu, J.Y., Navarrini, A., Bortolotti, Y., Butin, G., Fontana, A.L., Mahieu, S., Maier, D., Mattiocco, F., Serres, P., Berton, M. and Garnier, O., The front-end of the NOEMA interferometer. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 6(2), 223 (2016)
- [4] Hesper, R., Khudchenko, A., Baryshev, A.M., Barkhof, J. and Mena, F.P., A high-performance 650-GHz sideband-separating mixer—design and results. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(6), 686 (2017)
- [5] Khudchenko, A., Hesper, R., Barkhof, J., Mena, F.P. and Baryshev, A.M., September. Comprehensive Description of Sideband Ratio of 2SB SIS Receiver. In 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (pp. 1-2). IEEE. (2019)
- [6] Kooi J.W., *Advanced Receivers for Submillimeter and Far Infrared Astronomy*. Print Partners Ipskamp B.V., Enschede, The Netherlands, ISBN 978-90-367-3653-4 (2008)
- [7] Serres P. et al., The IF Output Impedance of SIS Mixers. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, **5**, 1, 27 (2015)
- [8] Barichev A.M., *Superconductor-Insulator-Superconductor THz Mixer Integrated with a Superconducting Flux-Flow Oscillator*. PhD thesis, Delft University of Technology, ISBN 90-9019220-4 (2005)
- [9] Shen T.M., Conversion gain in millimeter wave quasi-particle heterodyne mixers. *IEEE J. Quantum Electronics*, **17**, 7, 1151 (1981)