

## Определение параметров СИС-смесителя на промежуточной частоте

© Я.О. Водзяновский<sup>1,2</sup>, А.В. Худченко<sup>1,3</sup>, В.П. Кошелец<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup> Астрономический центр Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

E-mail: yaromir@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Проведено сравнение теоретического и экспериментального уровня отражения сигнала на промежуточной частоте от СИС-смесителя, когда тот находится в рабочем состоянии, а именно при поданном напряжении смещения и при приложенном сигнале высокочастотного опорного генератора. Показано, что коэффициент отражения по мощности может варьироваться от  $-20$  до  $-3$  дБ в зависимости от рабочей точки. Предложен и апробирован экспериментальный метод определения импеданса подводящей линии СИС-смесителя.

**Ключевые слова:** туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник, промежуточная частота, субмиллиметровый СИС-смеситель.

DOI: 10.21883/FTT.2022.10.53078.42НН

### 1. Введение

Радиоастрономия является основным двигателем развития сверхчувствительных смесителей для гетеродинных приемников электромагнитного излучения миллиметровых и субмиллиметровых 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). Настоящая 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. Теория

Величина отражений от СИС-смесителя по тракту ПЧ, характеризующая параметром  $S_{11}$  [6], может быть

определена, если известен выходной импеданс ПЧ СИС-смесителя  $Z_{IF}$  и импеданс подводящей линии тракта ПЧ  $Z_L$ :

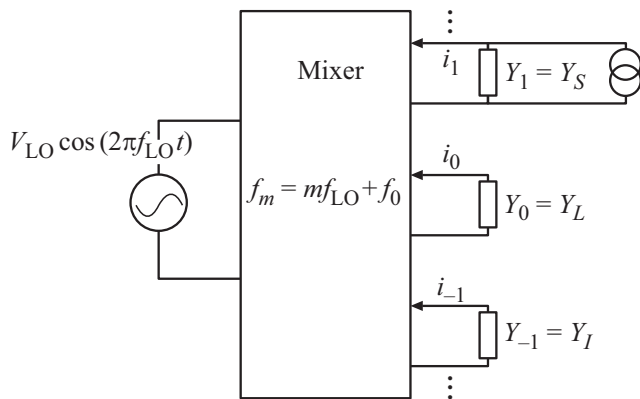
$$S_{11IF} = \frac{Z_{IF} - Z_L}{Z_{IF} + Z_L}. \quad (1)$$

Для расчета  $Z_{IF}$  мы используем 3-частотное приближение к теории квантового смешения Такера [1]. Рассмотрены сигналы на частотах  $f_m = mf_{LO} + f_0$ , где  $m = 0, \pm 1$ ;  $f_{\pm 1}$  — верхняя и нижняя полосы;  $f_{LO}$  — частота опорного генератора;  $f_0$  — промежуточная частота. Полагаем, что более высокие гармоники шунтируются емкостью СИС-смесителя, составляющей в нашем случае порядка 100 фФ.

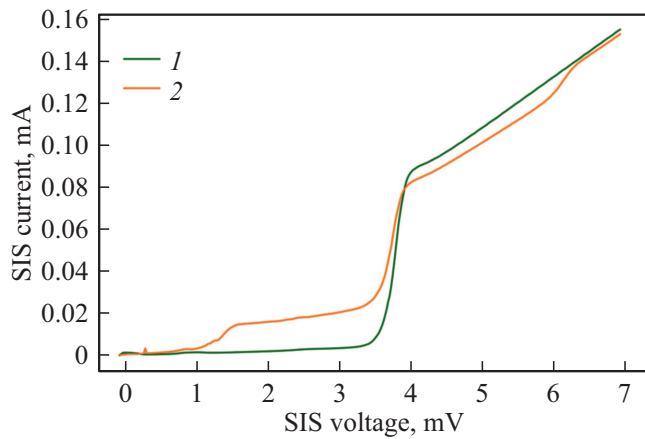
Принимая во внимание взаимодействие портов смесителя (рис. 1), компоненты напряжений и токов слабых сигналов линейно связаны матрицей проводимости  $i_m = \sum_{m'} Y'_{mm'} v_{m'}$ :

$$Y'_{mm'}(V_{gap}, R_N, f_{LO}, \alpha, V_0) = \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_S & Y_{10} & Y_{1-1} \\ Y_{01} & Y_{00} + Y_L & Y_{0-1} \\ Y_{-11} & Y_{-10} & Y_{-1-1} + Y_I \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $V_{gap}$  — напряжение смещения туннельного скачка тока,  $R_N$  — дифференциальное сопротивление вольт-амперной характеристики (ВАХ) в нормальном состоянии,  $\alpha = eV_{LO}/hf_{LO}$  — безразмерный параметр накачки, пропорциональный напряжению опорного генератора  $V_{LO}$ ,  $V_0$  — напряжение смещения СИС-смесителя.



**Рис. 1.** Эквивалентная схема гетеродинного смесителя, с приложенным сигналом опорного генератора частоты  $f_{LO}$ , принимаемым сигналом частоты  $f_m$  и сигналом ПЧ  $f_0$ .



**Рис. 2.** ВАХ автономная (1, зеленая кривая) и с приложенным сигналом опорного генератора (2, оранжевая кривая).

У каждого порта есть своя канальная проводимость:  $Y_1 = Y_S$  — нагрузка порта с принимаемым сигналом,  $Y_0 = Y_L$  — нагрузка порта ПЧ,  $Y_{-1} = Y_I$  — нагрузка порта нижней полосы.

Для идеального двухполосного смесителя импедансы верхней и нижней полос равны:  $Y_1 = Y_{-1}$ . В нашем случае  $Y_{\pm 1}$  — результат преобразования проводимости опорного генератора несколькими микрополосковыми линиями.

Воспользовавшись результатом [1], получим  $Y_{mm'} = G_{mm'} + iB_{mm'}$ , где

$$G_{mm'} = \frac{e}{2\hbar\omega_{m'}} \sum_{n,n'=-\infty}^{\infty} J_n(\alpha)J_{n'}(\alpha)\delta_{m-m',n'-n} \times \left\{ \left[ I_{DC}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e} + \frac{\hbar\omega_{m'}}{e}\right) - I_{DC}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e}\right) \right] + \left[ I_{DC}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e}\right) - I_{DC}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e} - \frac{\hbar\omega_{m'}}{e}\right) \right] \right\},$$

$$B_{mm'} = \frac{e}{2\hbar\omega_{m'}} \sum_{n,n'=-\infty}^{\infty} J_n(\alpha)J_{n'}(\alpha)\delta_{m-m',n'-n} \times \left\{ \left[ I_{KK}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e} + \frac{\hbar\omega_{m'}}{e}\right) - I_{KK}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e}\right) \right] - \left[ I_{KK}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e}\right) - I_{KK}\left(V_0 + \frac{n'\hbar\omega}{e} - \frac{\hbar\omega_{m'}}{e}\right) \right] \right\},$$

где  $I_{DC}(V_0)$  — зависимость туннельного тока СИС-смесителя от его напряжения;  $I_{KK}(V_0)$  — зависимость соотношения Крамерса–Кронига тока  $I_{DC}$  от напряжения СИС-смесителя  $V_0$ ;  $J_n(\alpha)$  — функция Бесселя порядка  $n$  от параметра накачки  $\alpha$ .

Тогда в нашем случае импеданс по ПЧ

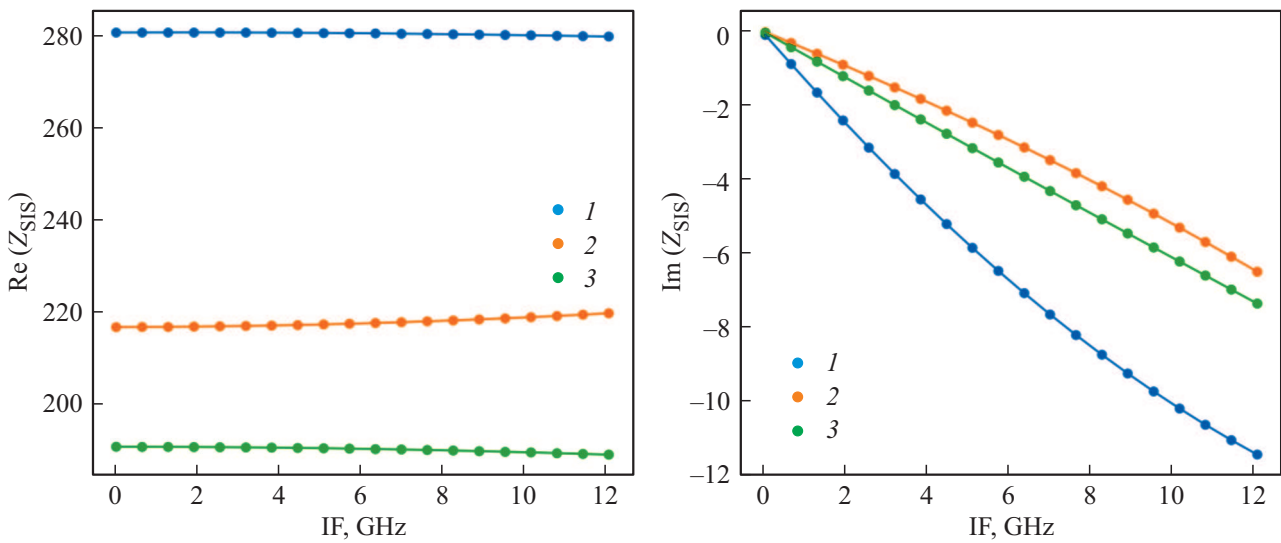
$$Z_{IF} = \| Y_{mm'} + Y_m\delta_{mm'} \|_{00}^{-1}. \tag{3}$$

На рис. 2 продемонстрирована измеренная ВАХ СИС-перехода, которая является зависимостью  $I_{DC}(V_0)$  и определяет  $I_{KK}$ . Автономная кривая показана зеленой линией, при этом, оранжевой кривой показана ВАХ для случая, когда приложен внешний сигнал генератора частотой 600 GHz.

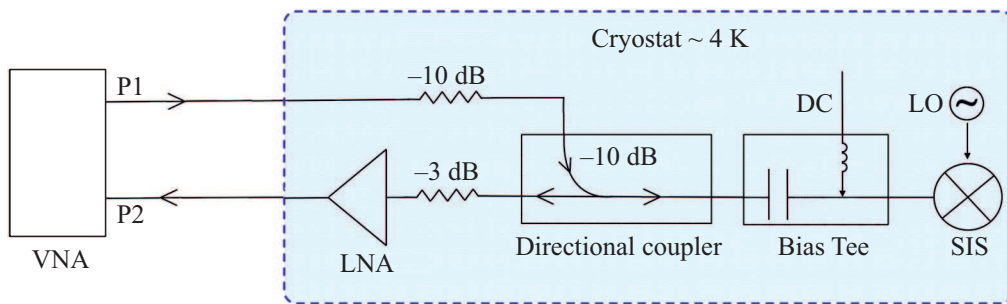
На рис. 3 приведен результат теоретического расчета импеданса с использованием ВАХ (рис. 2) в диапазоне ПЧ 0.1–12 GHz при различных напряжениях на СИС-переходе: 2.8, 3, 3.2 mV, причем импеданс подводящей линии полагается  $\sim 50 \Omega$ . Можно заключить, что действительная часть изменяется незначительно с промежуточной частотой, в отличие от мнимой части. Также видно, что импеданс сильно зависит от напряжения на СИС-переходе.

### 3. 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 GHz; этот диапазон определен полосой используемого криогенного ПЧ-усилителя. Схема эксперимента представлена на рис. 4; СИС-смеситель помещен в криостат замкнутого цикла при температуре около 4К. Высокочастотный опорный генератор (LO) интегрирован с СИС-смесителем на одном чипе и представляет собой распределенный джозефсоновский переход (РДП) с вязким течением магнитных вихрей. Векторный анализатор цепей (ВАЦ, VNA), размещенный вне криостата, генерирует на порте P1 тестовый сигнал диапазона 4–8 GHz, который, проходя через аттенюатор –10 dB, поступает в направленный ответвитель (directional coupler), который направляет его на СИС-смеситель с коэффициентом связи около –10 dB. Далее сигнал проходит специальный инжектор (bias tee), позволяющий беспрепятственно проходить ПЧ-сигналу, задавая при этом напряжение на СИС-смесителе по постоянному току



**Рис. 3.** Действительная (слева) и мнимая (справа) части расчетного импеданса СИС-смесителя от ПЧ при разных напряжениях на СИС-смесителе; 1 — 2.8, 2 — 3, 3 — 3.2 mV.



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

через большую индуктивность. Отражившись 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 P2 ВАЦ. Фактически, измеряемым параметром является отношение сигналов ВАЦ на портах P1 и P2, а точнее, его спектр.

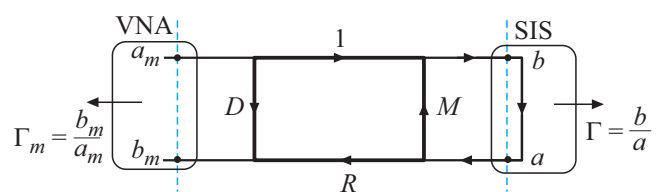
#### 4. Калибровка

Важным этапом в эксперименте является калибровка ВАЦ, чтобы повысить точность измерений. Мы используем стандартную однопортовую калибровку (рис. 5), в основе которой лежит определение 3-х параметров цепи:  $D$  — прямые утечки в цепи,  $R$  — внутренние отражения,  $M$  — рассогласование. Путем несложных преобразований можно явно выразить фактический коэффициент отражения  $\Gamma$  через измеряемую величину  $\Gamma_m$  и 3 калибровочных параметра  $D, R, M$ :

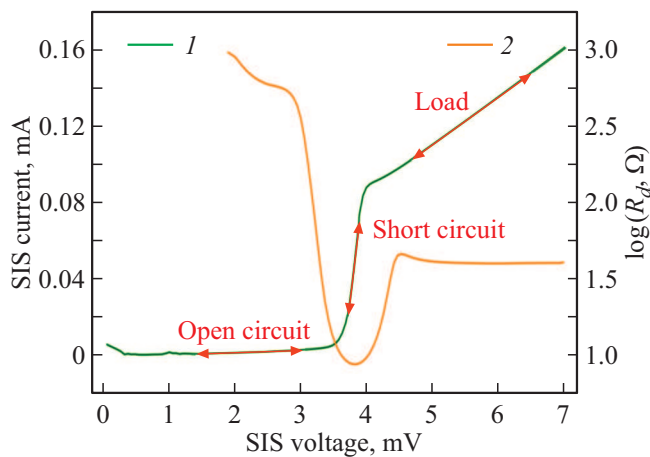
$$\Gamma = \frac{\Gamma_m - D}{R + M(\Gamma_m - D)}. \quad (4)$$

Коэффициенты  $D, R, M$  могут быть определены по трем калибровочным измерениям, путем составления и решения системы из трех уравнений (4), где коэффициент отражения  $\Gamma$  вычисляется теоретически по формуле (1), а величина  $\Gamma_m$  непосредственно измеряется векторным анализатором цепей.

В калибровочных измерениях при 4К 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 смеще-



**Рис. 5.** Схема однопортовой калибровки.



**Рис. 6.** Автономная вольт-амперная характеристика СИС-смесителя, зеленая линия 1; соответствующее дифференциальное сопротивление  $R_d$  показано оранжевой линией 2.

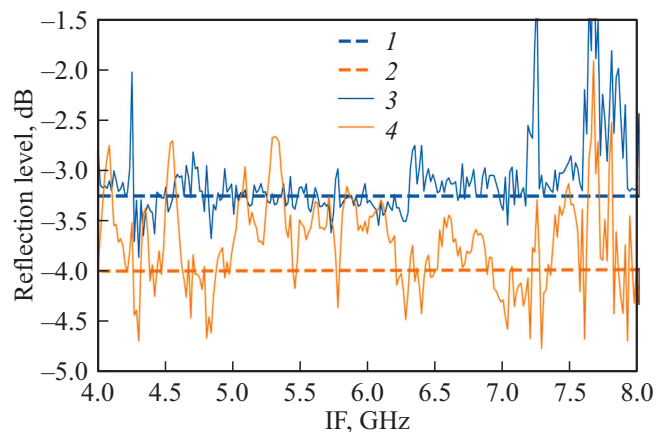
ния используются для калибровки: 1) при напряжении смещения в 2 мВ дифференциальное сопротивление становится порядка 1000  $\Omega$ , что близко к ситуации „открытой цепи“, так как импеданс подводящей линии близок к величине 50  $\Omega$ ; 2) при напряжении смещения 3.8 мВ, т. е. посередине туннельного скачка тока, его дифференциальное сопротивление составляет около 3  $\Omega$ , что приблизительно соответствует калибровке „короткое замыкание“; 3) при напряжении смещения 5–7 мВ дифференциальное сопротивление становится  $\sim 41 \Omega$ , что близко к ситуации „нагруженной линии“.

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.

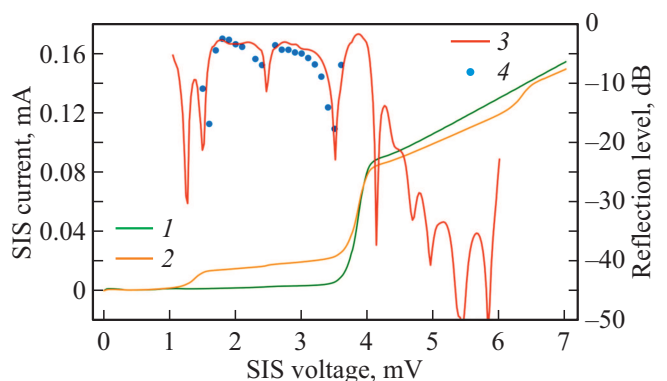
## 5. Результаты

ВАХ СИС-смесителя, при приложении сигнала опорного генератора частотой  $\sim 600$  GHz в „рабочем“ режиме, показана на рис. 2 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 GHz уровень отражения почти не меняется с частотой, что хорошо согласуется и с теоретическими предсказаниями.

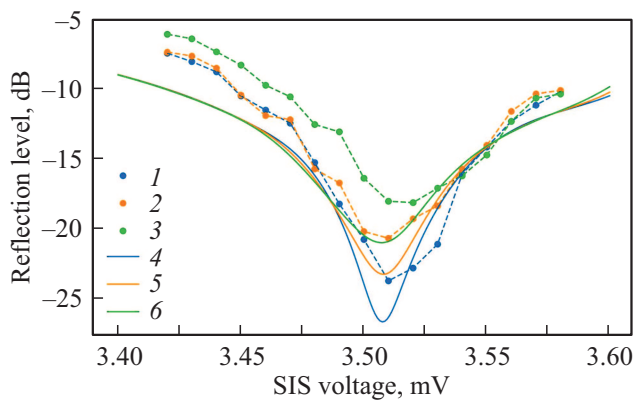
Изменение уровня отражений при варьировании напряжения смещения СИС-смесителя продемонстрировано на рис. 8. Здесь приведены результаты измерений и расчета отражения для середины диапазона ПЧ, а именно при частоте 6 GHz. Синие точки — экспериментальные данные, красная сплошная кривая — теоретический расчет. Уровень отражения в среднем составляет около 4 dB. При напряжении около 2 мВ имеет место искажение ВАХ, вызванное краем джоузефсоновской 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



**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; 2, 4 — 2.6 мВ.



**Рис. 8.** ВАХ СИС-смесителя: автономная (зеленая кривая 1), нагруженная сигналом опорного генератора (оранжевая кривая 2). Теоретический расчет отражения (красная кривая 3). Результаты измерений отражения (синие точки 4). ПЧ равна 6 GHz.



**Рис. 9.** Уровень отражения в „яме“. Точки (1, 2, 3) — экспериментальный уровень отражения для ПЧ 4, 6, 8 GHz соответственно; Сплошные кривые (4, 5, 6) — теоретический расчет уровня отражения для ПЧ 4, 6, 8 GHz соответственно.

компоненте импеданса подводящей линии  $R_{d_{sis}} = \text{Re}(Z_L)$ . Вычислив импеданс СИС-смесителя по формуле (3), мы сможем экспериментально определить импеданс подводящей линии  $Z_L$ . В данном случае мы наблюдаем, что  $Z_L$  с высокой степенью точности составляет  $50.3 + i \cdot 1.8 \Omega$ . 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 достоверность 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  $2 \Omega$ . Таким образом, предложен и апробирован способ нахождения импеданса подводящей линии с использованием особенностей ВАХ СИС-смесителя.

В целом, можно заключить, что уровень отражения достаточно высокий и составляет в среднем около  $-4.5 \text{ dB}$  в „рабочем“ диапазоне, что вынуждает нас использовать специальные вентили в канале ПЧ в СИС-приемниках для минимизации стоячих волн в тракте ПЧ.

## 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 GHz и выше, а также при варьировании мощности опорного генератора в широком диапазоне.

## Благодарности

Выражаем признательность нашему коллеге Ф.В. Хану за помощь в вычислении параметров внешней цепи СИС-смесителя.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-52-80023 БРИКС\_Т). Туннельные переходы были изготовлены в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках государственного задания. Для изготовления и исследования образцов было использовано оборудование УНУ № 352529 „Криоинтеграл“, развитие которой поддержано грантом МНВО РФ, соглашение № 075-15-2021-667.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] J.R. Tucker, M.J. Feldman. *Rev. Mod. Phys.* **57**, 4, 1055 (1985). DOI: 10.1103/RevModPhys.57.1055
- [2] V. Belitsky, M. Bylund, V. Desmaris, A. Ermakov, S.E. Ferm, M. Fredrixon, S. Krause, I. Lapkin, D. Meledin, A. Pavolotsky, H. Rashid. *Astronomy Astrophys.* **611**, A98 (2018).
- [3] J.Y. Chenu, A. Navarrini, Y. Bortolotti, G. Butin, A.L. Fontana, S. Mahieu, D. Maier, F. Mattiocco, P. Serres, M. Berton, O. Garnier, Q. Moutote, M. Parioleau, B. Pissard, J. Reverdy. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **6**, 2, 223 (2016).
- [4] R. Hesper, A. Khudchenko, A.M. Baryshev, J. Barkhof, F.P. Mena. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **7**, 6, 686 (2017).
- [5] A. Khudchenko, R. Hesper, J. Barkhof, F.P. Mena, A.M. Baryshev. In: *IEEE 2019 44th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (2019). P. 1–2.
- [6] J.W. Kooi. *Advanced Receivers for Submillimeter and Far Infrared Astronomy*. Print Partners Ipskamp B.V., Enschede, The Netherlands (2008). ISBN 978-90-367-3653-4.
- [7] P. Serres, A. Navarrini, Y. Bortolotti, O. Garnier. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **5**, 1, 27 (2015).
- [8] A.M. Barichev. *Superconductor-Insulator-Superconductor THz Mixer Integrated with a Superconducting Flux-Flow Oscillator*. PhD thesis, Delft University of Technology (2005). ISBN 90-9019220-4.
- [9] T.M. Shen. *IEEE J. Quantum Electron.* **17**, 7, 1151 (1981).

Редактор Е.В. Толстякова