

02,08

Измерение импеданса на промежуточной частоте для СИС-смесителя диапазона 1.1–1.4 мм

© Я.О. Водзяновский^{1,2,3}, К.И. Рудаков^{1,2}, И.В. Третьяков¹, Л.В. Филиппенко², В.П. Кошелец^{2,3}, С.А. Кузнецов^{4,5}, М.Ю. Архипов¹, А.В. Худченко¹

¹ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

⁴ Филиал Института физики полупроводников СО РАН «КТИПМ», Новосибирск, Россия

⁵ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: ya.vodzyanovskiy@lebedev.ru, khudchenko@asc.rssi.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Проведено экспериментальное измерение и численный расчет импеданса по тракту ПЧ для туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник в двухполосном смесителе диапазона 1.1–1.4 мм. Показано, что коэффициент отражения по мощности может варьироваться от –30 до –5 дБ в зависимости от рабочей точки. Предложен и апробирован экспериментальный метод определения импеданса СИС-смесителя.

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

DOI: 10.61011/FTT.2024.06.58236.1NN

1. Введение

Радиоастрономия играет ключевую роль в развитии сверхчувствительных смесителей для гетеродинных приемников, которые используются для обработки электромагнитного излучения в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. Туннельные переходы сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) [1] являются основой для смесителей (рис. 1), обладающих рекордными шумовыми характеристиками в этом диапазоне, близкими к квантовому пределу. Наиболее распространенными среди наземных приемников являются смесители с разделением боковых полос, состоящие из двух отдельных СИС-смесителей [2,3]. Чтобы приемник эффективно работал, необходимо обеспечить низкий уровень отражений у СИС-смесителей. Это важно как на входе смесителя на частоте принимаемого сигнала (ВЧ) [4,5], так и на выходе на промежуточной частоте (ПЧ, IF). В данной работе проведен теоретический расчет импеданса СИС-смесителя на выходе ПЧ, а также выполнено экспериментальное измерение уровня отражения с целью минимизации в будущем.

Задача эксперимента — измерение уровня отражения от СИС-смесителя по выходному каналу промежуточной частоты (ПЧ, IF), когда на смеситель подается напряжение смещения и приложен сигнал высокочастотного опорного генератора (LO). Измерения проведены в

диапазоне 2–12 GHz; этот диапазон определен полосой используемого криогенного ПЧ усилителя. Схема эксперимента представлена на рис. 2; СИС-смеситель помещен в криостат замкнутого цикла при температуре около 4 К. Сигнал высокочастотного опорного генератора (Generator LO) попадает в СИС-смеситель через разделитель пучка и рупор (Horn). Векторный анализатор цепей (ВАЦ, VNA), размещенный вне крио-

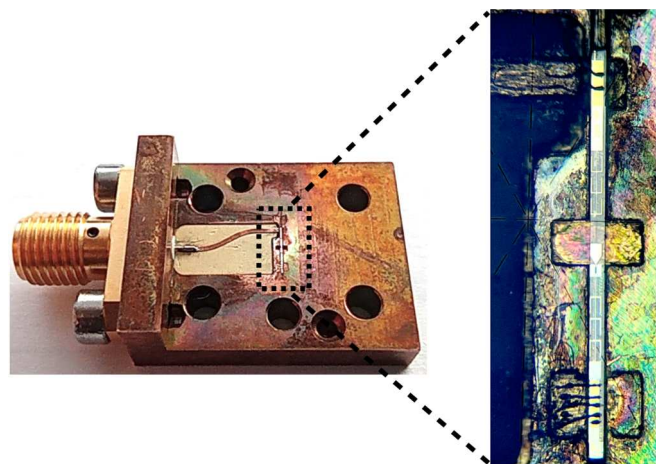


Рис. 1. Фотография Back piece с установленным чипом смесителя.

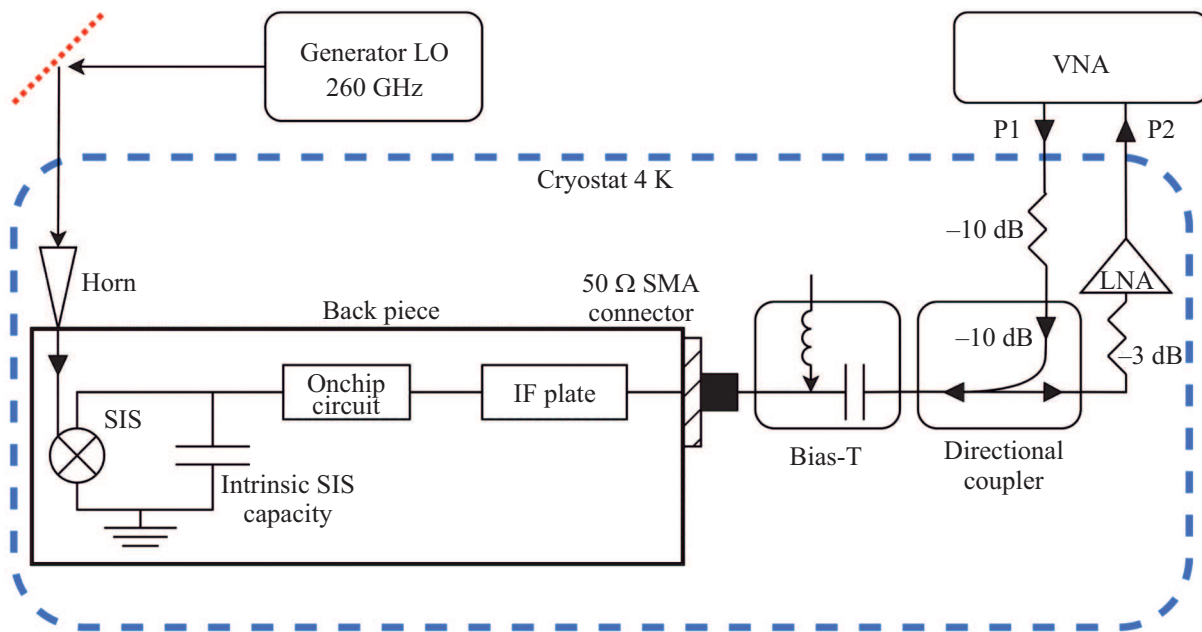


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению отражения от СИС-смесителя по выходу ПЧ.

стата, генерирует тестовый сигнал диапазона 2–12 GHz на порте (П1, P1), который, проходя через аттенуатор –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-T), 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 (P2, P2) ВАЦ. Фактически, измеряемым параметром является отношение сигналов ВАЦ на портах П1 и P2, а точнее его спектр.

2. Калибровка

Необходимым этапом в эксперименте является калибровка ВАЦ, чтобы повысить точность измерений. Мы используем стандартную однопортовую калибровку, подробности изложены в работе [6], в основе которой лежит определение 3-х параметров цепи: D — прямые утечки в цепи, R — внутренние отражения, M — рассогласование

$$S_{11} = \frac{S_{11m} - D}{R + M(S_{11m} - D)}, \quad (1)$$

где S_{11} — фактический коэффициент отражения, а S_{11m} — измеренный коэффициент отражения.

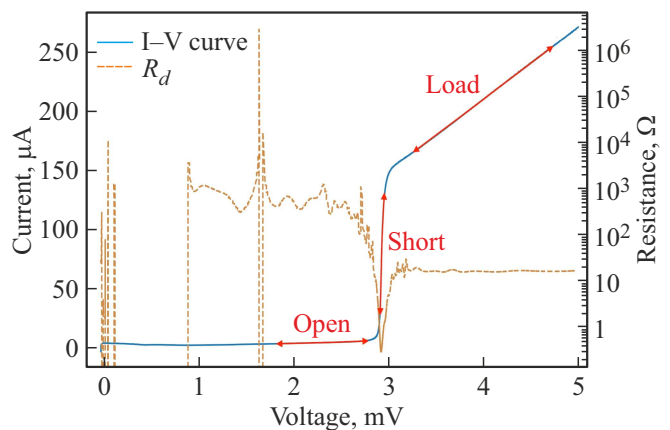


Рис. 3. Автономная Вольт-амперная характеристика СИС-смесителя (I–V curve) синяя сплошная линия; соответствующее дифференциальное сопротивление (R_d) показано оранжевой штриховой линией.

В калибровочных измерениях при 4 К сам СИС-переход используется как калибратор [7]. На рис. 3 проиллюстрировано, какие напряжения смещения используются для калибровки. В таблице приводятся напряжения смещения, дифференциальные сопротивления и коэффициенты отражения, используемые в калибровке.

3. Измерения

Набор ВАХ СИС-смесителя, приложении сигнала опорного генератора частотами 234, 255, 262 GHz в „рабочем“ режиме, показаны на рис. 4. Диапазон „рабочего“

Напряжения смещения, дифференциальные сопротивления и коэффициенты отражения, используемые в калибровке

	Напряжение смещения, mV	Дифференциальное сопротивление, Ω	Коэффициент отражения, dB
Открытая цепь	2	450	-1.94
Закороченная цепь	2.912	0.33	-0.117
Нагруженная цепь	4	16	-5.81

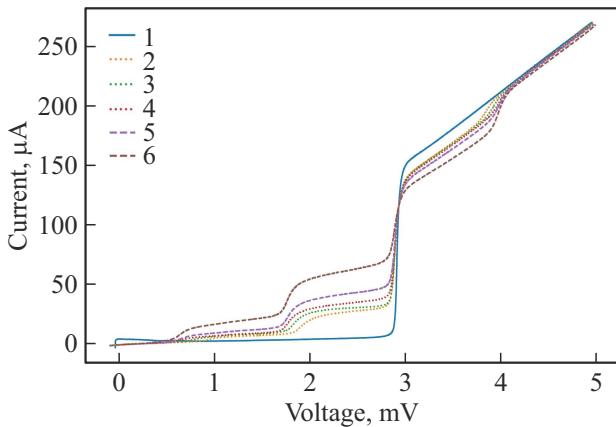


Рис. 4. ВАХ СИС-смесителя: автономная сплошная синяя кривая № 1; при приложенном сигнале LO на частотах 234, 252, 266 GHz для первого уровня накачки пунктирные кривые № 2, 3, 4 соответственно; при приложенном сигнале LO на частоте 266 GHz при втором и третьем уровнях накачки штриховые линии № 5, 6 соответственно.

напряжения смещения лежит приблизительно в интервале 1.8–2.6 mV. Эта область напряжений соответствует так называемой квазиэластичной ступени, вызванной приложением к СИС-переходу сигнала гетеродина. Для регулировки мощности опорного генератора использовался квазиоптический аттенюатор на основе субволновой поляризационной решетки из 1-мерных алюминиевых проводников (ширина/латеральный период: 4/8 μm), изготовленной фотолитографически на поверхности несущей полипропиленовой пленки толщиной 4 μm [8].

Изменение уровня отражений при варьировании напряжения смещения СИС-смесителя продемонстрировано на рис. 5. Здесь приведены результаты измерений отражения при ПЧ 2, 4, 6, 8, 12 GHz. Можно заметить, что при напряжении 2.7 mV уровень отражения значительно снижается. Этот пик поглощения можно объяснить тем, что импеданс СИС-смесителя становится почти равным импедансу подводящей линии ПЧ исходя из формулы [9]:

$$S_{11,if} = \frac{Z_{IF} - Z_L}{Z_{IF} + Z_L}. \quad (2)$$

Важно отметить, что уровень отражения в минимуме определяется модулем разности мнимых компонент импедансов СИС-смесителя и подводящей линии. В дополнение можно увидеть зависимость пика поглощения от

выбранной частоты, чем больше частоте, тем больше уровень отражения.

Детальнее зависимость уровня отражения от частоты изображена на рис. 6, где приведены экспериментальные частотные зависимости S_{11} при различных напряжениях на СИС-смесителе. Из приведенных результатов видно,

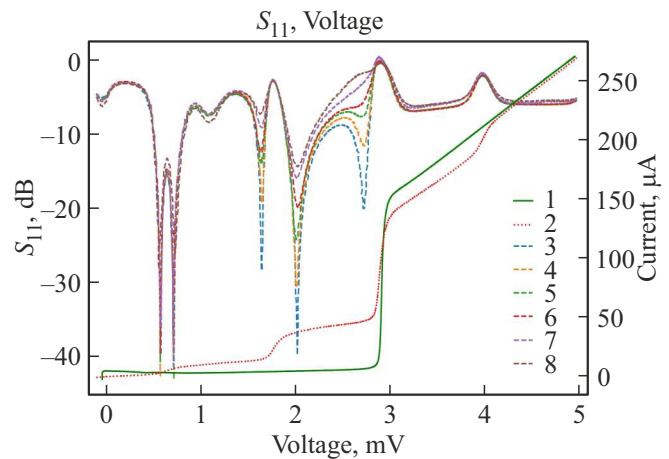


Рис. 5. ВАХ СИС-смесителя: автономная № 1 зеленая кривая, нагруженная сигналом опорного генератора 266 GHz № 2 красная пунктирная. Результаты измерений отражения пунктирные кривые № 3, 4, 5, 6, 7, 8 для ПЧ 2, 4, 6, 8, 10, 12 GHz соответственно.

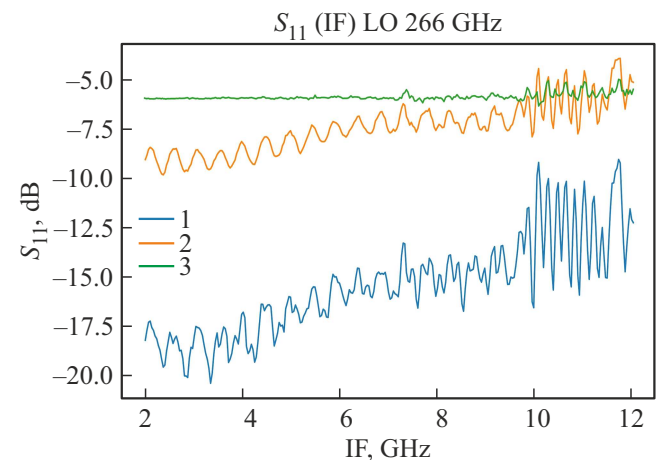


Рис. 6. Определенный экспериментально уровень отражения от СИС-смесителя в „рабочем режиме“ при приложенном сигнале LO 266 GHz. Напряжения СИС-смесителя № 1–2.1 mV, № 2–2.4 mV, № 3–4.5 mV.

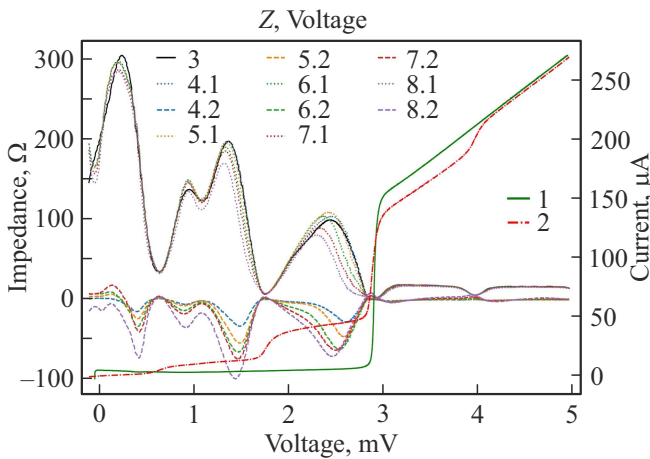


Рис. 7. ВАХ СИС-смесителя автономная и в „рабочем режиме“ при приложенном сигнале LO 266 GHz № 1 сплошная зеленая и № 2 штрих пунктирная красная кривые соответственно. Дифференциальное сопротивление № 3 черная сплошная кривая. Определенный экспериментально импеданс СИС-смесителя в „рабочем режиме“ при диапазонах ПЧ 2–4, 4–6, 6–8, 8–10, 10–12 GHz для кривых № 4.x, 5.x, 6.x, 7.x, 8.x соответственно, где пунктирные кривые — действительная, а штриховые кривые — мнимая части импеданса.

при напряжении смещения 4.5 mV в диапазоне ПЧ 2–12 GHz уровень отражения почти не меняется с частотой, однако для напряжений смещения 2.1 и 2.4 mV мы явно видим частотную зависимость.

На рис. 7 приведены измеренный импеданс СИС-смесителя от напряжения при различных напряжениях смещения и частотных отрезках. Для ПЧ 2–4, 4–6, 6–8, 8–10, 10–12 GHz пунктирные кривые № 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1 — действительная часть импеданса, а штриховые кривые № 4.2, 5.2, 6.2, 7.2, 8.2 — мнимая часть импеданса.

На рис. 8 изображены зависимости действительной и мнимой части импеданса от промежуточной частоты в сравнении с дифференциальным сопротивлением при напряжениях смещения 2.2, 2.5, 4.5 mV. Можно заметить, что мнимая часть импеданса уменьшается с частотой, тем самым увеличивая уровень отражения. Однако при напряжении смещения 4.5 mV мы не видим частотной зависимости и мнимая часть импеданса близка к 0 Ω.

На рис. 9 изображена зависимость шумовой температуры от ПЧ, можно заметить, что после ~ 8 GHz идет заметный рост T_n , что непосредственно связано с ростом по модулю мнимой части импеданса СИС-смесителя и уровня отражения.

Отражение от СИС-приемника характеризуется параметром S_{11} , который выражается через собственный импеданс СИС-перехода Z_{IF} и импеданс подводящей линии Z_L через формулу (2).

Импеданс СИС-перехода можно вычислить используя трехчастотное приближение к теории квантового смеше-

ния [1], итоговая формула

$$Z_{IF} = \|Y_{mm'} + Y_m \delta_{mm'}\|_{11}^{-1}, \quad (3)$$

где $Y_{mm'}$ — 3×3 матрица проводимости, связывающая компоненты токов и напряжений в смесителе, Y_m — вектор импедансов подводящей линии по высокой частоте, $\delta_{mm'}$ — символ Кронекера, Z_{IF} — центральный элемент с индексами (1,1) вычисленной обратной матрицы.

На рис. 10 изображено сравнение дифференциального сопротивления (синяя штрихпунктирная кривая № 1), экспериментального (оранжевая штриховая № 2 — действительного; зеленая пунктирная № 3 — мнимого) и теоретического (красная сплошная № 4 — действительного; коричневая сплошная № 5 — мнимого) импедансов от частоты.

На рис. 11 изображено сравнение экспериментального и теоретического импедансов от напряжения смещения. Экспериментальный импеданс усреднен

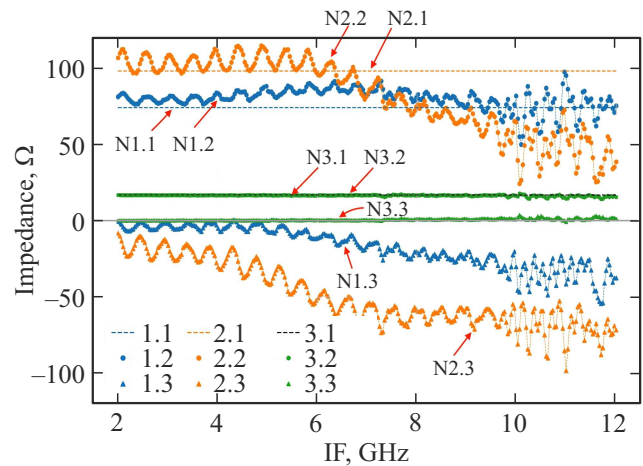


Рис. 8. Частотная зависимость импеданса СИС-смесителя; Кривые № 1.x, 2.x, 3.x для напряжений смещения 2.2, 2.4, 4.5 mV соответственно; Кривые № x.1 — дифференциальное сопротивление, № x.2 — действительная часть импеданса, № x.3 — мнимая часть импеданса.

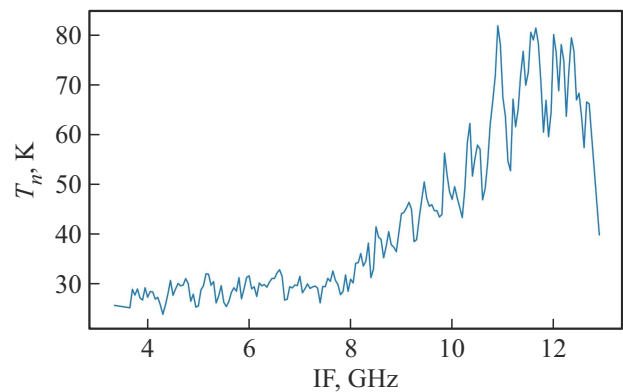


Рис. 9. Зависимость шумовой температуры от ПЧ при приложенном сигнале LO 267 GHz [10].

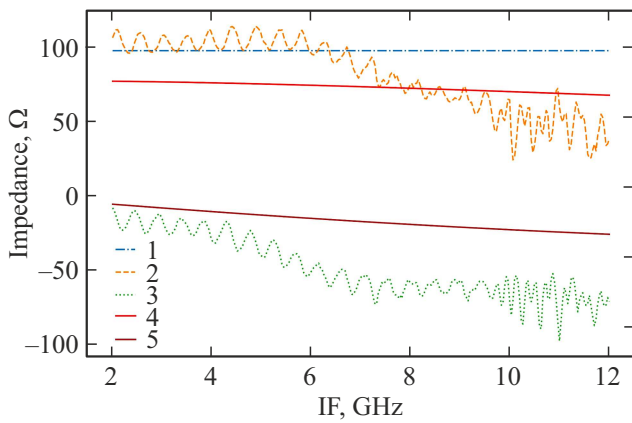


Рис. 10. Частотная зависимость импеданса СИС-смесителя: № 1 — дифференциальное сопротивление, № 2 — действительный экспериментальный импеданс, № 3 — мнимый экспериментальный импеданс, № 4 — действительный теоретический импеданс, № 5 — мнимый теоретический импеданс.

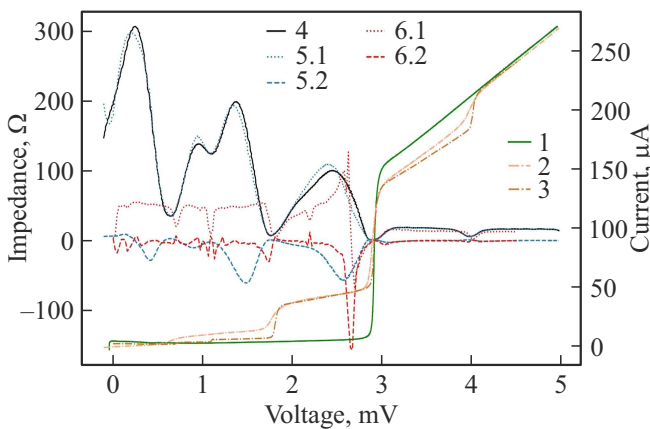


Рис. 11. ВАХ СИС-смесителя: № 1 зеленая сплошная — автономная, № 2 розовая штрихпунктирная — рабочая экспериментальная, № 3 штрихпунктирная оранжевая — рабочая теоретическая. Зависимость импеданса СИС-смесителя от напряжения: № 4 черная сплошная — дифференциальное сопротивление, № 5.1 пунктирная синяя — действительный экспериментальный импеданс, № 5.2 штриховая синяя — мнимый экспериментальный импеданс, № 6.1 пунктирная красная — действительный теоретический импеданс, № 6.2 штриховая красная — мнимый теоретический импеданс.

в окне ПЧ 5–7 GHz, теоретический импеданс посчитан для ПЧ 6 GHz.

4. Заключение

В работе предложен метод, который комбинирует экспериментальное и теоретическое определение параметров СИС-перехода, таких как импеданс и уровень отражения. Этот метод позволяет изучать взаимосвязь между уровнем отражений от СИС-смесителя на ПЧ

выходе и напряжением смещения, а также мощностью опорного сигнала. Определение параметров СИС-перехода в сочетании с моделированием элементов ПЧ-канала позволит в будущем расчет с высокой точностью ПЧ-характеристик самого смесителя, а также всего приемника, созданного на его основе.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 23-79-00061 (<https://rscf.ru/project/23-79-00061/>). Технология изготовления туннельных переходов была отработана в ИПЭ 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, Terahertz Waves (IRMMW-THz)* (2019). P. 1–2.
- [6] Я.О. Водзяновский, А.В. Худченко, В.П. Кошелец. *ФТТ* **64**, 10, 1385 (2022)
- [7] P. Serres, A. Navarrini, Y. Bortolotti, O. Garnier. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **5**, 1, 27 (2015).
- [8] A.A. Mamrashev, N.A. Nikolaev, S.A. Kuznetsov, A.V. Gelfand. *AIP Conf. Proc.* **2300**, 020083 (2020). DOI: 10.1063/5.0031931
- [9] 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.
- [10] К.И. Рудаков, П.Н. Дмитриев, А.М. Барышев, А.В. Худченко, Р. Хеспер, В.П. Кошелец. *Изв. вузов. Радиофизика LXII*. Вып. 7–8, 613 (2019).

Редактор Т.Н. Василевская