

Прототип волноводного СИС смесителя на 345 GHz

© К.И. Рудаков,^{1,2} А.В. Худченко,^{1,2} В.П. Кошелец^{1,2}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия

² Астрокосмический центр ФИАН,
117810 Москва, Россия
e-mail: rudakov@asc.rssi.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2024 г.

В окончательной редакции 27 мая 2024 г.

Принято к публикации 27 мая 2024 г.

Приемники на основе туннельного перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) являются самыми чувствительными гетеродинными системами для детектирования волн субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. Представлены результаты численного моделирования и предварительный дизайн СИС смесителей на частоту 345 GHz. Оценена чувствительность разработанных дизайнов к основным технологическим отклонениям размеров и параметров. Разрабатываемый приемный элемент–прототип имеет потенциал быть использованным в будущем на борту космической обсерватории „Миллиметрон“ в составе прибора для наблюдений в режиме радиоинтерферометра Земля–Космос

Ключевые слова: сверхпроводниковые устройства, туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник, приемные системы sub-THz диапазона.

DOI: 10.61011/JTF.2024.07.58347.176-24

Введение

Разработка сверхчувствительных приемников sub-mm/mm-диапазона является в настоящее время одним из наиболее интенсивно и успешно развиваемых направлений сверхпроводниковой электроники.

В астрономии спектральные линии космической пыли, атмосфер планет, межзвездного вещества и других внеземных тел являются основным источником информации о химико-физических процессах образования звезд и планет. Миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн представляют особый интерес для астрономических наблюдений, здесь сосредоточены спектральные линии многих газов и химических соединений, находящихся в условиях „глубокого космоса“, а также пик излучения межзвездной пыли и сложных органических соединений. Это обусловлено возбуждением вращательных и колебательных степеней свободы сложных и простых молекул звездного и межзвездного вещества, которые находятся в THz-диапазоне (например, H₂O, CH, HCl, NH, OH, имеют линии поглощения в sub-THz/THz-диапазонах частот). Этот диапазон соответствует максимуму равновесного излучения для очень холодных (единицы кельвин) объектов, которые значительно удалены от нас и их излучение на Земле слабое.

Приемные системы на основе туннельного перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) являются самыми чувствительными гетеродинными системами sub-mm/mm-диапазона и используются на всех современных sub-mm/mm-астрономических обсерваториях, например ALMA (Atacama Large Millimeter Array),

расположенной в пустыне [1], APEX (Atacama Pathfinder Experiment), NOEMA (Northern Extended Millimeter Array) [2–7]. Низкая рабочая температура и высокая нелинейность электрических характеристик туннельного перехода позволяют добиться низких шумовых температур приемных элементов, что сокращает время единичных наблюдений и повышает эффективность обсерватории. Шумовая температура смесителя в двухполосном режиме (DSB) ограничена квантовой величиной $hf/(2k_B)$ [8], где h и k_B — постоянные Планка и Больцмана соответственно.

В Российской Федерации разрабатывается космическая обсерватория „Миллиметрон“, способная работать в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) Земля–Космос [9,10]. Ее задача — изучить метрику сверхмассивных черных дыр, окружающую среду вблизи них [11], и потенциально подойти к вопросу о существовании червоточин. Космическая обсерватория „Millimetron“ будет работать на гало-орбите вокруг точки Лагранжа L2 системы Солнце–Земля. Гало-орбита — это квазистабильная орбита, расположенная в окрестности точки L2 в плоскости, перпендикулярной эклиптике. При совместной работе программы ЕНТ и Millimetron ожидаемое разрешение съемки на частоте 230 GHz может достигать $\Delta\theta \sim 5 \mu\text{as}$ [11]. VLBI-приемники „Millimetron“ будут использоваться для интерферометрических наблюдений между „Millimetron“ и наземными станциями. Для эффективной работы VLBI-приборы „Миллиметрона“ разделены на частотные диапазоны, совпадающие с частотами ALMA и других наземных станций. В настоящее время в Российской Фе-

дерации ведется активный поиск подходящей площадки для субмиллиметрового телескопа [12–14].

СИС приемник на частоту 345 GHz рассматривается как основной кандидат для создания самого высокочастотного РСДБ канала. Планируется его совместное использование с каналами 230 GHz [15,16] и 86 GHz для наблюдения тени черной дыры. Выбор похожих частотных диапазонов для развития проекта Event Horizon Telescope (ЕНТ) [17] подтверждают научную целесообразность создания в РФ высокочувствительного приемника для выбранного частотного диапазона.

Был выполнен расчет и проектирование криогенного двухполосного (Double Sideband, DSB) смесителя для приемника на основе туннельного перехода СИС для частоты 345 GHz. Конечной целью этой разработки является создание полноценного приемника с разделением полос, концептуально схожего с приемником для ALMA диапазон 9 [18] при использовании DSB-смесителя, по конструкции, аналогичного разработке для диапазона 211–275 GHz [19–21]. Это будет сборка на основе односторонних (т.е. волноводный зонд и вся микросхема расположены только с одной стороны относительно центра волновода) или двухсторонних сверхпроводниковых смесителей в волноводном блоке с высокочастотным волноводным гибридом.

1. Дизайн и расчет

Для достижения низкой шумовой температуры приемного элемента на основе туннельного перехода требуется обеспечить хорошее согласование импеданса СИС с волноводом на высоких частотах и с входным импедансом усилителя на промежуточных частотах (ПЧ, IF), обеспечить низкий уровень потерь СВЧ сигнала в подводящих волноводных и микрополосковых трактах, а также обеспечить высокий коэффициент преобразования высокочастотного (ВЧ, HF) спектра на ПЧ. Туннельные переходы на основе Nb–AlO_x–Nb имеют высокую нелинейность электрических параметров и позволяют достичь эффективного преобразования спектра высоких частот в спектр промежуточных частот.

В качестве подводящего тракта был выбран прямоугольный волновод размером 300 × 600 μm, заканчивающийся волноводной вертикальной закороткой. Образец располагается ортогонально к широкой стороне волновода, как изображено на рис. 1, на расстоянии 130 μm от волноводного замыкателя (торец волновода, заканчивающийся сплошным слоем металла). Чип смесителя располагается в собственном волноводном канале размерами 170 × 170 μm и представляет собой планарную структуру на основе сверхпроводящей пленки Nb, в которую включен СИС переход. В качестве смесительного элемента выбран туннельный СИС переход на основе оксида алюминия (Nb–AlO_x–NbN) площадью 1 μm² с плотностью туннельного тока ~ 9 kA/cm² и параметром качества, определяемым соотношением $R_j/R_n > 30$, где

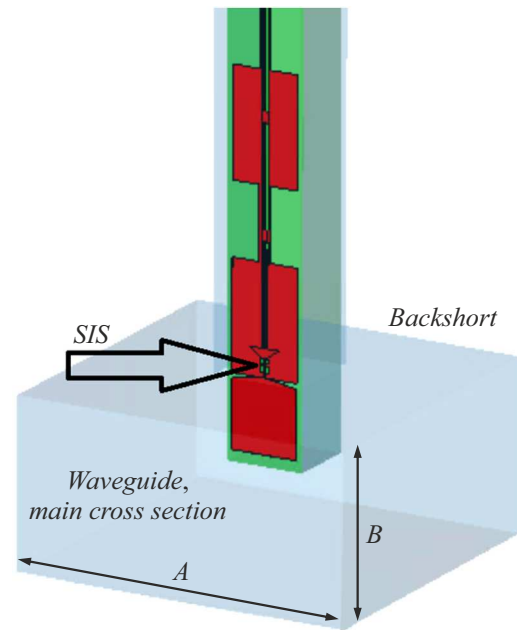


Рис. 1. Трехмерный вид прототипа смесительного элемента на основе одностороннего дизайна, т.е. волноводный зонд и вся микросхема расположены только с одной стороны относительно центра волновода. Стрелкой выделено местоположение туннельного перехода. $B \times A = 300 \times 600 \mu\text{m}$.

R_j — подщелевое сопротивление, R_n — сопротивление на нормальном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) туннельного СИС перехода.

В качестве материала чипа была выбрана подложка из плавленого аморфного кварца толщиной 125 μm, что позволит избежать дополнительной полировки. Для упрощения расчетов приемный элемент был спроектирован как одномодовый, что потребовало выбрать размеры основного волновода так, что первая собственная мода имеет частоты порядка 250 GHz, а вторая — 500 GHz. При конструировании изображенной на рис. 1 схемы размещения требуется не только хорошо согласовать входное излучение в главном канале волновода, но и снизить его утечку по волноводному каналу образца, который является диэлектрическим волноводом. Для уменьшения утечки были выбраны подложки из кварца с диэлектрической проницаемостью 3.8 вместо кремния с диэлектрической проницаемостью 12; также выбран размер волновода, обеспечивающий частоту первой собственной моды значительно выше 350 GHz. Для предотвращения утечки по металлизированной структуре чипа предусмотрены заграждающие фильтры. На рис. 2 и 3 представлены различные варианты таких фильтров, порты ввода/вывода излучения располагаются в торцах волновода.

Фильтры типа 1 (изображены на рис. 2) более удобны при разводке линий многослойной структуры, однако обеспечивают меньшее, хотя и достаточное для работы смесителя, заграждение. Фильтры типа 2 (рис. 3)

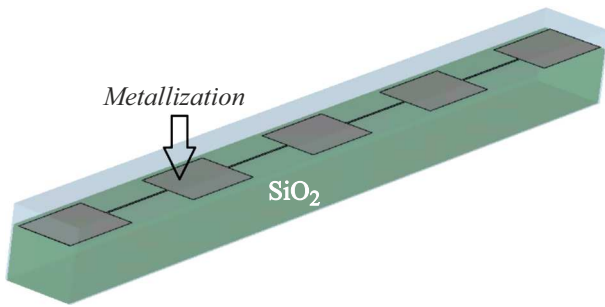


Рис. 2. Трехмерный вид модели прототипа заграждающих фильтров в слое Nb. Фильтры нанесены на кварцевую подложку и располагаются в волноводном канале (тип 1).

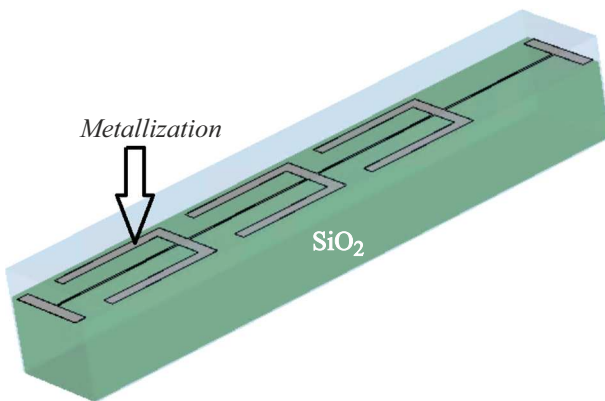


Рис. 3. Трехмерный вид модели прототипа заграждающих фильтров в слое Nb. Фильтры нанесены на кварцевую подложку и располагаются в волноводном канале.

более компактны, обеспечивают высокое заграждение, но значительно менее удобны при проектировании многоэлементных структур. Это обусловило использование различных типов фильтров в работах [20,21]. На рис. 4 показаны результаты численного моделирования фильтров, изготавливаемых в металлизации нижнего слоя Nb.

Для ввода СВЧ излучения из волновода в планарный чип используется квазитреугольный волноводный зонд, который в дальнейшем для краткости называется „пробой“. Такой тип пробы позволяет согласовать высокий входной импеданс в волноводе (сотни Ω) с низким импедансом микроструктур (десятки Ω) на чипе. На рис. 5 показано распределение импеданса пробы от частоты, который составляет примерно $20 - i25 \Omega$.

На рис. 1 изображен общий вид приемного элемента, и его расположение в волноводе, а на рис. 6 приведена увеличенная часть в окрестности туннельного перехода. Оптимальное согласование импеданса туннельного СИС перехода и импеданса волновода обеспечивает пробой, трансформаторами импеданса на основе микрополосковой линии и несимметричной копланарной линии передачи без экрана. Линии передачи, расположенные между туннельным переходом и волноводной пробой, работают как трансформаторы. Другая несимметричная

линия передачи между трапециевидным замыкателем СВЧ и туннельным переходом рассматривается как сосредоточенная настроечная индуктивность для отстройки емкости СИС переходом на рабочей частоте. СИС переход имеет значительную емкость (порядка $80 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$), которая способна зашунтировать входной ВЧ сигнал без дополнительной отстройки. Использование трапециевидного замыкателя в рассмотренном дизайне предпочтительнее радиального замыкателя для согласования с фильтром низких частот (ФНЧ).

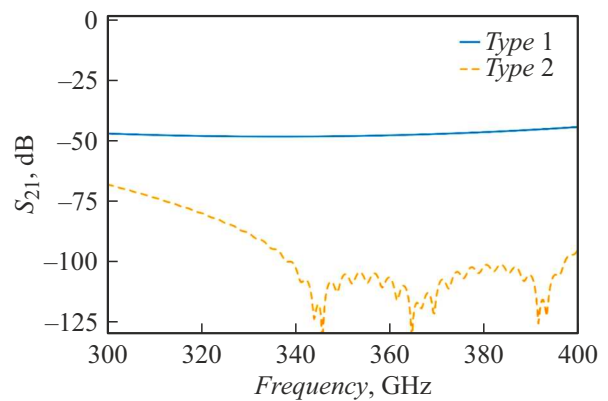


Рис. 4. Численно рассчитанный параметр S_{21} для прототипов заграждающих фильтров Type 1 и Type 2 в нижнем слое металлизации (Nb). В качестве требуемого уровня пропускания был выбран -35 dB .

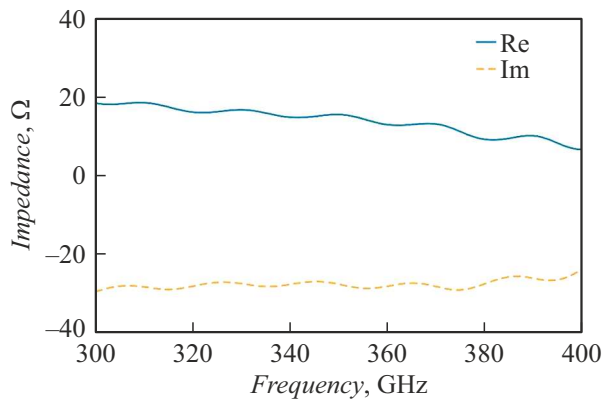


Рис. 5. Зависимость действительной и мнимой части импеданса квазитреугольной волноводной пробы от частоты.

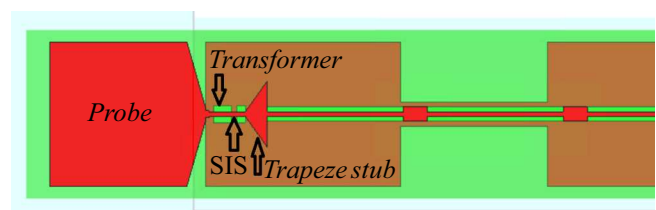


Рис. 6. Схема рассчитываемой структуры. СИС переход обозначен стрелкой. Граница волновода проходит между пробоем и заграждающим фильтром.

Варьируемые параметры дизайнов $d1$ и $d2$, иллюстрирующие рис. 1 и 2

Параметры	Дизайн $d1$	Дизайн $d2$
Ширина трансформатора, μm	6	5.2
Длина трансформатора, μm	21	19
Высота трапеции-замыкателя, μm	27	24
Длина волноводного зонда, μm	120	102
Угол волноводного зонда	148°	132°

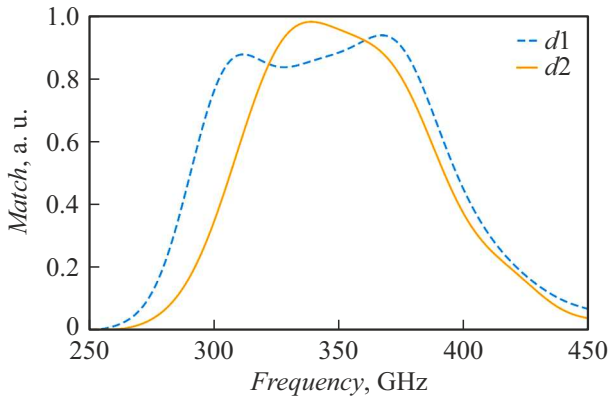


Рис. 7. Зависимость согласования СИС перехода и волноводного ввода по мощности для двух дизайнов ($d1$ и $d2$).

Использование туннельного СИС перехода площадью $1\mu\text{m}^2$ позволяет, в принципе, согласовать элементы чипа, используя только микрополосковые линии; однако применение гибридных структур, состоящих из микрополосковых и копланарных линий, дает возможность снизить паразитную емкость и тем самым расширить полосу ПЧ. В верхнем слое Nb также размещены заграждающие фильтры, но из-за геометрических ограничений они были встроены в копланарную несимметричную линию (рис. 6), их уровень пропускания составляет порядка -30 dB .

При проектировании прототипа приемного элемента требовалось обеспечить узкополосную АЧХ с высоким уровнем согласования в окрестности 345 GHz . Были спроектированы два дизайна ($d1$ и $d2$), отличающиеся размерами элементов трансформаторов, настроечных элементов и пробы (см. таблицу), теоретическая АЧХ которых изображена на рис. 7. Дизайн 2 более узкополосный, но обеспечивает лучшее согласование на целевой частоте, в дальнейшем в настоящей работе будем рассматривать только дизайн $d2$.

СИС переход — это квантовый прибор, электрические характеристики которого зависят от частоты. Его импеданс в диапазоне ПЧ в разы выше, чем импеданс на ВЧ, и может составлять сотни Ω [8]. В сочетании с высокой емкостью самого туннельного перехода и емкостью настроечных структур это приводит к существенному сужению полосы согласования СИС перехода с 50-

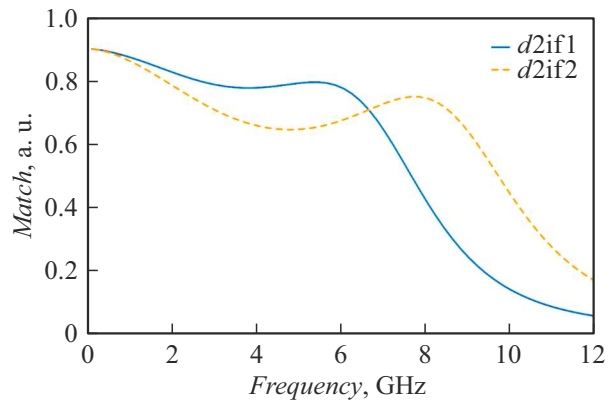


Рис. 8. Зависимость согласования СИС перехода и вывода для усилителя по мощности для дизайна смесителя $d2$ и двух настроечных выходных трансформаторов ($d2if1$ и $d2if2$) в полосе ПЧ.

омным входом усилителя. Для расширения полосы ПЧ в расчет был добавлен LC-трансформатор, располагающийся на внешней РСВ плате в непосредственной близости от образца. На рис. 8 изображены АЧХ приемного элемента на ПЧ. Другим способом расширить полосу ПЧ является принципиальное изменение характеристик туннельного перехода. Известно, что СИС структуры на основе переходов Nb–AlN–Nb позволяют реализовать большую плотность тока и более широкую полосу ПЧ, однако приемные элементы на их основе имеют меньший коэффициент преобразования спектра ВЧ в ПЧ [21,22].

2. Анализ влияния вероятных отклонений основных параметров и размеров

При изготовлении приемных элементов, а также механической оснастки возможны незначительные отклонения размеров волноводных элементов и параметров приемных структур. При изготовлении планарной структуры требуется совместить различные технологические маски слоев, что может приводить к отклонению положения туннельного перехода относительно слоев металлизации. Влияние таких отклонений на ВЧ АЧХ представлено на рис. 9.

В процессе формирования СИС происходят небольшие отклонения площади туннельного перехода; линейный уход размера СИС примерно на $\sim 0.1\mu\text{m}$ приводит к изменению площади СИС перехода на 20%, влияние таких отклонений показано на рис. 10.

Волноводный блок с каналом для образца содержит глубокие и тонкие элементы, изготавливаемые фрезеровкой, оценки влияния отклонений при изготовлении заданных каналов на АЧХ приведены на рис. 11, 12.

Установка образцов в волноводный канал производится под микроскопом тонкой иглой. При таком процессе

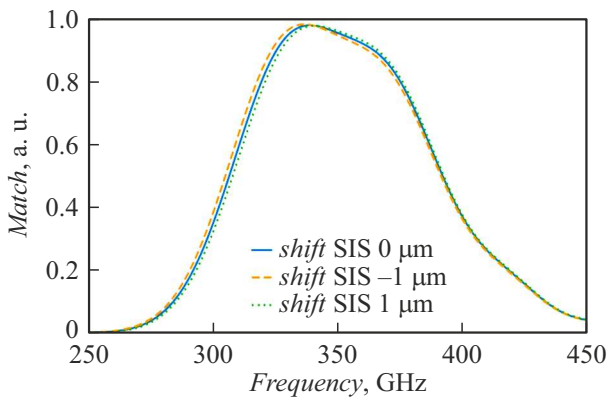


Рис. 9. Зависимость согласования СИС перехода и волноводного ввода по мощности при сдвиге СИС перехода на $1 \mu\text{m}$.

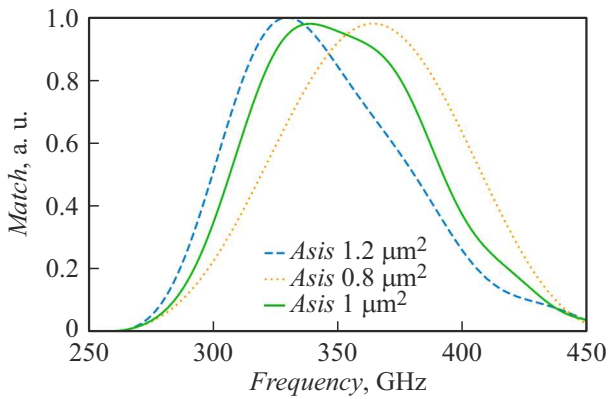


Рис. 10. Зависимость согласования СИС перехода и волноводного ввода по мощности при отклонении от номинальной площади на 20%.

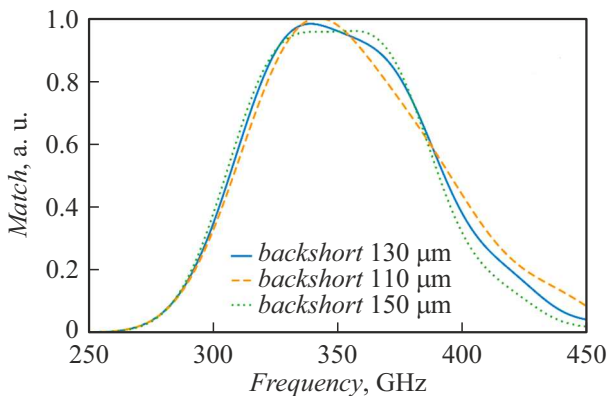


Рис. 11. Зависимость согласования СИС перехода и волноводного ввода по мощности при сдвиге волноводного замыкателя на $20 \mu\text{m}$.

возможны смещения образца вглубь или вовне основного волновода. Оценка таких отклонений приведена на рис. 13.

Таким образом, небольшие отклонения размеров смесительной камеры и смещения образца не сильно влия-

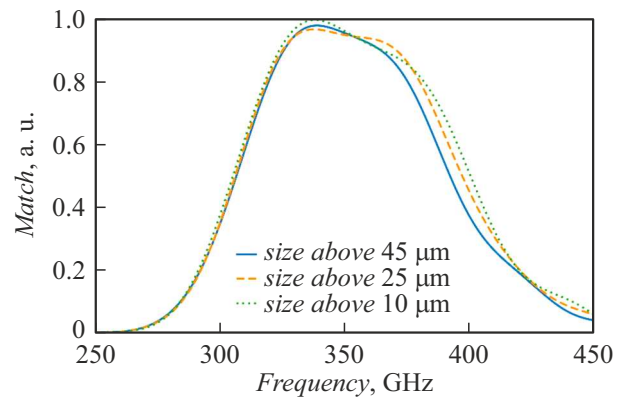


Рис. 12. Зависимость согласования СИС перехода и волноводного ввода по мощности для дизайна $d2$ при размещении образца в более мелком волноводном канале из-за ошибки фрезерования. Расчетный зазор между верхней поверхностью образца и крышкой волноводного блока $45 \mu\text{m}$.

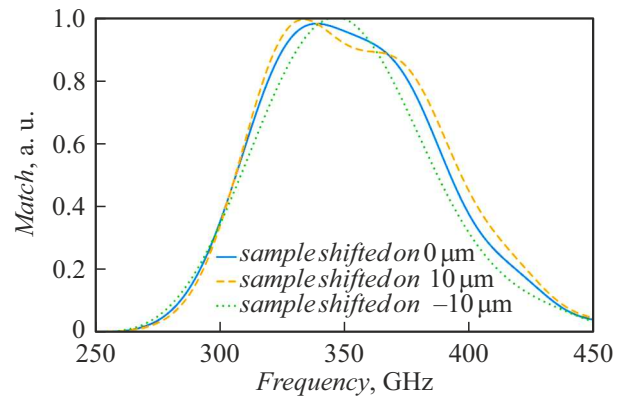


Рис. 13. Зависимость согласования СИС перехода и волноводного ввода по мощности для дизайна T2 для отклонения позиционирования образца относительно длинной стенки волновода.

ют на работу смесителя; наиболее сильно влияют отклонения площади СИС перехода. Поэтому при изготовлении структур мы закладываем изготовление нескольких вариантов переходов, диаметры которых отличаются на $0.1 \mu\text{m}$.

3. Стабильность двухполосного смесителя (DSB)

Для получения критерия устойчивости DSB-смесителя в рабочем диапазоне $300\text{--}370 \text{ GHz}$ была использована теория смешивания Такера [8,23] в пределе низких частот f_{IF} ($f_{IF}/f_{HF} \rightarrow 0$). Свойства смесителя рассчитываются в трехпортовом приближении, т.е. предполагается, что токи, генерируемые на частотах $f_m = f_{IF} + m f_{IF}$, $|m| \geq 2$, замыкаются геометрической емкостью перехода. Выходной адмиттанс Y_{IF} смесителя

SIS определяется по формуле

$$Y_{IF} = \frac{1}{Z_{00}} - Y_L, \quad (1)$$

где Z — обратная величина дополненной матрицы Y (см. подробнее [8,23]), а Y_L — адмиттанс нагрузочной цепи ПЧ. Хотя из формулы это не очевидно, но Y_{IF} зависит от адмиттансов портов ВПЧ (верхняя полоса частот ПЧ) и НПЧ (нижняя полоса частот ПЧ), соответственно Y_{UIF} и Y_{LUF} ; от условий работы накаченного СИС, выходного импеданса для верхней Z_S и нижней полос частот Z_I зависит его значение. Здесь и далее подстрочные индексы S и I используются для явного обозначения того, что полоса частот может быть либо ВПЧ (USB), либо НПЧ (LSB). В пределе $f_{IF} \rightarrow 0$; можно показать, что в режиме „идеального“ DSB-смесителя [23,24], где

$$Z_S = Z_I \operatorname{Im}[Y_{IF}] = 0.$$

$\operatorname{Re}[Y_{IF}]$ может стать отрицательным в зависимости от мощности СВЧ накачки туннельного СИС перехода гетеродином и от значения Z_S . В этом случае Y_{IF} является наклоном ВАХ „накачанного“ СИС перехода при постоянной мощности накачки гетеродином в режиме задания постоянного напряжения смещения. В произведенных расчетах мы предполагали работу смесителя в режиме DSB с $\operatorname{Im}[Y_{IF}] = 0$.

Области с отрицательным наклоном на ВАХ СИС, вызванные воздействием внешнего сигнала гетеродина, характерны для смесителей, работающих в квантовом режиме; напротив, для резистивных, так называемых классических смесителей, всегда выполняется условие $\operatorname{Re}[Y_{IF}] > 0$. Любое устройство с отрицательным дифференциальным сопротивлением потенциально нестабильно. В СИС смесителе такая нестабильность может привести к возникновению колебаний в трактах ПЧ, ВЧ или цепи задания рабочей точки СИС. В этом случае работа с таким смесителем все еще возможна, но необходимо тщательно выбирать нагрузочное сопротивление ПЧ таким образом, чтобы $\operatorname{Re}[Y_{IF}] + \operatorname{Re}[Y_L] > 0$, что является условием для работы без колебаний [25]. Существует более строгое альтернативное требование: $Z_S = Z_I^*$; $\operatorname{Re}[Y_{IF}] > 0$ для каждой оптимальной рабочей точки на ВАХ при заданном оптимальном Z_S , которое было использовано для проектирования приемного однополосного элемента-смесителя; выбор оптимальных условий работы требует анализа влияния многих параметров, и был подробно рассмотрен Л. Д’Аддарио [25].

В расчете мы выбрали рабочую точку в середине фотонной ступени и уровень накачки $\alpha = 1$, так как обычно на ней шумовые температуры СИС смесителей минимальны для экспериментально измеренной ВАХ тестового СИС перехода с малой утечкой. Выполняя вышеуказанные условия для каждого импеданса структур, в которые должен быть встроен СИС, и применяя трехпортовое приближение квантовой теории смешения, мы получили ограничения на проектирование дизайна;

импеданс структуры, которую „видит“ СИС, должен быть немного меньше сопротивления СИС на нормальной ветви ВАХ и быть преимущественно емкостным. Согласно [25], получаемые ограничения более строгие для SSB, чем для DSB, а так как проектируемый смеситель должен в будущем стабильно работать и в SSB-режиме, мы вынуждены рассмотреть SSB-применение как критерий стабильности дизайна.

4. Стабильность однополосного смесителя (SSB)

Используя рассмотренные ранее результаты Таккера и Фельдмана в пределе низких частот f_{IF} ($f_{IF}/f_{HF} \rightarrow 0$) для смесителя, работающего в диапазоне частот 300–370 GHz, мы указали критерий устойчивости. Свойства смесителя рассчитаны в трехпортовом приближении. В SSB-смесителе, где Y_S и Y_I различны, действительная часть комплексного выходного адмиттанса ПЧ (Y_{IF}) может принимать отрицательные значения. Для стабильной работы в этом случае необходимо тщательно подобрать нагрузочный импеданс ПЧ Y_L таким образом, чтобы $\operatorname{Re}[Y_{IF}] + \operatorname{Re}[Y_L] > 0$, что является условием для работы без возникновения колебаний.

Для этого правила существует альтернатива с большим „запасом прочности“, для обеспечения стабильной работы можно проектировать SSB-смеситель, на основе СИС туннельного перехода путем выбора Z_I , выбора напряжений смещения в режиме задания постоянного напряжения и мощности СВЧ накачки таким образом, чтобы $\operatorname{Re}[Y_{IF}] > 0$ для значения Z_S , обеспечивающего оптимальные характеристики приемника [25]. Для расчета требуется ряд предположений. Мы полагаем, что эти оптимальные условия достигаются для напряжения смещения на половине первой фотонной ступени под действием СВЧ сигнала гетеродина с мощностью, соответствующей уровню накачки $\alpha = 1$. Более того, мы предположили, что Z_I является реактивным ($Z_I = j \times X$ с произвольным реактивным сопротивлением X), что нижняя полоса частот полностью отражена; что Z_S соответствует нормальному сопротивлению перехода R_n , $Z_S = R_n$. Применив трехчастотное приближение к квантовой теории смешивания, используя ту же ВАХ СИС, что была использована в разд. 3, получили ограничения, накладываемые на Z_I так, чтобы $\operatorname{Re}[Y_{IF}] > 0$ на частоте 345 GHz. Полученные значения Z_I , нормированные на сопротивление на нормальной ветви ВАХ (R_n), попадают в диапазон

$$-j \cdot 4.86 \leq \frac{Z_I}{R_n} \leq +j \cdot 0.16 \quad (2)$$

и не зависят от значения R_n . Таким образом, было получено условие для импеданса в НПЧ Z_I . Мы полагаем, оно должно выполняться SSB-смесителем для обеспечения стабильной работы на частоте 345 GHz.

При проектировании мы выбирали структуру согласующих элементов таким образом, чтобы оно выполнялось. Когда те же самые шаги моделирования были проведены в расширенном диапазоне 300–370 GHz, было обнаружено, что более низкая частота ограничивает границы оцениваемой области, в которой смесительный элемент будет стабильно работать:

$$-j \cdot 3.64 \leq \frac{Z_i}{R_n} \leq +j \cdot 0.13. \quad (3)$$

Заключение и выводы

Проведено проектирование и моделирование криогенного DSB-смесителя на основе туннельного перехода СВЧ для частоты 345 GHz. Спроектированы два типа фильтров, обеспечивающих уровень заграждения не хуже -45 dB в диапазоне 300–400 GHz; рассчитан импеданс спроектированной волноводной пробы, получены АЧХ для двух дизайнов смесительного элемента.

Проведена численная оценка влияния возможных отклонений размеров волноводных элементов и параметров приемных структур от оптимальных значений; рассчитаны АЧХ спроектированного прототипа с учетом возможных отклонений размеров и параметров. Показано, что наиболее критичным является уход площади СИС перехода; отклонение диаметра от расчетного на $0.1 \mu\text{m}$ приводит к сдвигу центральной частоты на 15–20 GHz.

Применены критерии стабильности для смесительных элементов, полученные из уравнений (2) и (3) значения, привели к существенным ограничениям при проектировании дизайна.

Конечной целью этой разработки является создание приемника с разделением полос.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории за их поддержку, обсуждения подходов к технологическому изготовлению образцов, а также благодарят Э. Тонга, А. Наваррини, А. Барышева, Д. Гаррета за интересные обсуждения на научных конференциях перед ковид-19.

Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538). Разработка методов проектирования сверхпроводниковых СВЧ схем. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-79-00061 (<https://rscf.ru/project/23-79-00061/>). Разработка дизайнов по технологическим параметрам, использование вычислительных ресурсов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Otarola, M. Holdaway, L.A. Nyman, S.J.E. Radford, B.J. Butler. *Atmospheric Transparency At Chajnantor: 1973-2003* <https://library.nrao.edu/public/memos/alma/main/memo512.pdf>
- [2] A. Wootten, A.R. Thompson. Proc. IEEE, **97** (8), 1463 (2009). DOI: 10.1109/JPROC.2009.2020572
- [3] *ALMA Observatory Website* <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma/>
- [4] A.M. Baryshev, R. Hesper, F.P. Mena, T.M. Klapwijk, T.A. van Kempen, M.R. Hogerheijde, B.D. Jackson, J. Adema, G.J. Gerlofsma, M.E. Bekema, J. Barkhof, L.H.R. de Haan-Stijkel, M. van den Bemt, A. Koops, K. Keizer, C. Pieters, J. Koops van het Jagt, H.H.A. Schaeffer, T. Zijlstra, M. Kroug, C.F.J. Lodewijk, K. Wielinga, W. Boland, M.W.M. de Graauw, E.F. van Dishoeck, H. Jager, W. Wild. *A&A*, **577**, A129 (2015). DOI: 10.1051/0004-6361/201425529
- [5] R. Güsten, R.S. Booth, C. Cesarsky, K.M. Menten, C. Agurto, M. Anciaux, F. Azagra, V. Belitsky, A. Belloche, P. Bergman, C. De Breuck, C. Comito, M. Dumke, C. Duran, W. Esch, J. Fluxa, A. Greve, H. Hafok, W. Häupl, L. Helldner, A. Henseler, S. Heyminck, L.E. Johansson, C. Kasemann, B. Klein, A. Korn, E. Kreysa, R. Kurz, I. Lapkin, S. Leurini, D. Lis, A. Lundgren, F. Mac-Auliffe, M. Martinez, J. Melnick, D. Morris, D. Muders, L.A. Nyman, M. Olberg, R. Olivares, M. Pantaleev, N. Patel, K. Pausch, S.D. Philipp, S. Philipps, T.K. Sridharan, E. Polehampton, V. Reveret, C. Risacher, M. Roa, P. Sauer, P. Schilke, J. Santana, G. Schneider, J. Sepulveda, G. Siringo, J. Spyromilio, K. Stenvers, F. van der Tak, D. Torres, L. Vanzi, V. Vassilev, A. Weiss, K. Willmeroth, A. Wunsch, F. Wyrowski. *APEX: the Atacama Pathfinder Experiment* (Proc. 6267, 2006). DOI: 10.1117/12.670798
- [6] D. Maier, J. Reverdy, L. Coutanson, D. Billon-Pierron, C. Boucher, A. Barbier. *Fully Integrated Sideband-Separating Mixers for the NOEMA receivers* <https://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/2014/2014080084.pdf>
- [7] P.T.P. Ho, J.M. Moran, K.Y. Lo. *ApJ*, **616** (1), L1 (2004). DOI: 10.1086/423245
- [8] J.R. Tucker, M.J. Feldman. *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 1055 (1985).
- [9] И.Д. Новиков, С.Ф. Лихачев, Ю.А. Щекинов, А.С. Андрианов, А.М. Барышев, А.И. Васюнин, Д.З. Вибе, Т. де Граау, А.Г. Дорошкевич, И.И. Зинченко, Н.С. Кардашев, В.И. Костенко, Т.И. Ларченкова, Л.Н. Лихачева, А.О. Ляховец, Д.И. Новиков, С.В. Пилипенко, А.Ф. Пунанова, А.Г. Рудницкий, А.В. Смирнов, В.И. Шематович. *УФН*, **191**, 404 (2021) [I.D. Novikov, S.F. Likhachev, Yu.A. Shchekinov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, A.I. Vasyunin, D.Z. Wiebe, Th. de Graauw, A.G. Doroshkevich, I.I. Zinchenko, N.S. Kardashev, V.I. Kostenko, T.I. Larchenkova, L.N. Likhacheva, A.O. Lyakhovets, D.I. Novikov, S.V. Pilipenko, A.F. Punanova, A.G. Rudnitsky, A.V. Smirnov, V.I. Shematovich. *Phys.-Usp.*, **64** (4), 386 (2021). DOI: 10.3367/UFNe.2020.12.038898]
- [10] *Millimetron Space Observatory Website*. <http://millimetron.ru/index.php/en/>

- [11] S.F. Likhachev, A.G. Rudnitskiy, M.A. Shchurov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, S.V. Chernov, V.I. Kostenko. *Monthly Notices of the Royal Astronom. Society*, **511** (1), 668 (2022). DOI: 10.1093/mnras/stac079
- [12] I.I. Zinchenko, A.V. Lapinov, V.F. Vdovin, P.M. Zemlyanukha, T.A. Khabarova. *Appl. Sci.*, **13** (21), 11706 (2023). DOI: 10.3390/app132111706
- [13] V.B. Khaikin, V.B. Khaikin, A.Y. Shikhovtsev, A.P. Mironov, X. Qian. *Proceed. Sci.*, **425**, 1 (2022). DOI: 10.22323/1.425.0072
- [14] A.Yu. Shikhovtsev, V.B. Khaikin, A.P. Mironov, P.G. Kovadlo. *Atmos. Ocean Opt.*, **35** (2), 168 (2022). DOI: 10.1134/S1024856022020105
- [15] K.I. Rudakov, P.N. Dmitriev, A.M. Baryshev, A.V. Khudchenko, R. Hesper, V.P. Koshelets. *Radiophys. Quantum El.*, **62** (7–8), 547 (2019). DOI: 10.1007/s11141-020-10001-7
- [16] *ALMA Front End Development*
<https://zenodo.org/records/5547331>»
- [17] M.D. Johnson, K. Akiyama, L. Blackburn, K.L. Bouman, A.E. Broderick, V. Cardoso, R.P. Fender, Ch.M. Fromm, P. Galison, J.L. Gómez, D. Haggard, M.L. Lister, A.P. Lobanov, S. Markoff, R. Narayan, P. Natarajan, T. Nichols, D.W. Pesce, Z. Younsi, A. Chael, K. Chatterjee, R. Chaves, J. Doboszewski, R. Dodson, Sh.S. Doeleman, J. Elder, G. Fitzpatrick, K. Haworth, J. Houston, S. Issaoun, Yu.Y. Kovalev, A. Levis, R. Lico, A. Marcoci, N.C.M. Martens, N.M. Nagar, A. Oppenheimer, D.C.M. Palumbo, A. Ricarte, M.J. Rioja, F. Roelofs, A.C. Thresher, P. Tiede, J. Weintraub, M. Wielgus. arXiv:2304.11188 [kukastro-ph.HE]. DOI: 10.48550/ARXIV.2304.11188
- [18] R. Hesper, G. Gerlofsma, F.P. Mena, M.C. Spaans, A.M. Baryshev. *A Sideband-Separating Mixer Upgrade for Alma Band 9*. 20-th Intern. Symp. on Space Terahertz Technology (Charlottesville, 20–22 April 2009) <https://www.nrao.edu/meetings/isstt/papers/2009/2009257260.pdf>
- [19] K. Rudakov, P. Dmitriev, A. Baryshev, A. Khudchenko, R. Hesper, O. Kiselev, V. Koshelets. *Waveguide Receiver Design Prototypes for the 211–275 GHz and 790–950 GHz Frequency Ranges*. 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS, Montreal, QC: IEEE, 2017), p. 1–4. DOI: 10.23919/URSIGASS.2017.8104996
- [20] K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, L.V. Filippenko, M.E. Paramonov, R. Hesper, D. Aragão Ronsó da Costa Lima, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. *Appl. Sci.*, **11** (21), 10087 (2021). DOI: 10.3390/app112110087
- [21] K. Rudakov. *Development of Advanced Superconductor-Insulator-Superconductor Mixers for Terahertz Radio Astronomy* (University of Groningen, 2021), DOI: 10.33612/diss.174103493
- [22] *Band9 Upgrade Study Memo*
<https://www.eso.org/sci/facilities/alma/developmentstudies/Band9UpgradeStudyReport.pdf>
- [23] J.R. Tucker. *IEEE J. Quant. Electron.*, **15**, 1234 (1979).
- [24] S.-K. Pan, A.R. Kerr. *SIS Mixer Analysis with Non Zero Intermediate Frequencies, Seventh International Symposium on Space Terahertz Technology* (Charlottesville, March, 1996)
- [25] L. D’Addario. *IEEE Trans. Microwave Theory Techniques*, **36** (7), 1196 (1998).