02,08

Подавление ступеней Фиске в распределенном джозефсоновском переходе

© А.А. Атепалихин[1,2], Ф.В. Хан[1,2], Л.В. Филиппенко[1], В.П. Кошелец[1]

[1] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., Россия

E-mail: atepalikhin@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 6 марта 2025 г.
В окончательной редакции 6 марта 2025 г.
Принята к публикации 5 мая 2025 г.

Апробирован метод подавления ступеней Фиске на вольтамперной характеристике распределенного джозефсоновского перехода при помощи согласованной нагрузки на его неизлучающем конце. Согласованная нагрузка представляет собой четырехступенчатый чебышевский трансформатор из отрезков микрополосковых линий, верхний электрод которых выполнен из нормального металла. В качестве материала выбран молибден толщиной около 100 nm, который является нормальным металлом при температуре кипения жидкого гелия. Показано, что подавление ступеней Фиске обеспечивает непрерывную перестройку частоты генератора при произвольном токе смещения, включая рабочие точки в резонансном режиме, а сглаживание ступеней приводит к расширению частотного диапазона работы генератора. С помощью предложенной модификации удалось сгладить ступени Фиске на вольтамперной характеристике распределенного джозефсоновского перехода и увеличить диапазон напряжений, в которых возможна генерация сигнала необходимой мощности.

Ключевые слова: сверхпроводниковая электроника, распределённый джозефсоновский переход, генератор субмиллиметрового диапазона частот, подавление ступеней Фиске.

DOI: 10.61011/FTT.2025.07.61181.21HH-25

1. Введение

Сверхпроводниковые устройства на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) являются основным элементом сверхпроводниковых сверхчувствительных приемников, которые используются во многих областях физики, наземной и космической радиоастрономии [1–5], биологии, спектроскопии и метрологии. Туннельный СИС-переход используется в сверхпроводниковом гетеродинном приемнике в качестве смесительного элемента. Уровень шума в сверхпроводниковых гетеродинных приемниках приближается к величине квантового предела, являющегося фундаментальным ограничением для приемников данного типа [6–10]. Если же на одном чипе вместе со смесителем разместить приемную антенну и генератор гетеродина, то получится сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) [11], функциональность которого будет намного выше, чем у приемника с внешним гетеродином [12]. Сверхпроводниковый интегральный приемник был неоднократно апробирован в вышеупомянутых задачах.

Распределенный джозефсоновский переход (РДП) традиционно используется в качестве генератора терагерцового и субтерагерцового сигнала, в том числе и в качестве генератора гетеродина в СИП. Магнитное поле, направленное в плоскости перехода, проникает внутрь его в виде вихрей (вихрей Джозефсона), каждый из которых несет квант магнитного потока. При пропускании тока смещения через РДП джозефсоновские вихри приходят в движение. При достижении вихрем края РДП возникает одноквантовый импульс напряжения и происходит излучение электромагнитной волны [13]. Таким образом происходит генерация сигнала, частота которого связана с напряжением на переходе через соотношение Джозефсона [14]: $hf = 2\,\mathrm{eV}$.

РДП имеет два рабочих диапазона, которые отличаются характером движения флаксонов. При напряжениях $V < V_g/3$, где V_g — щелевое напряжение туннельного перехода, наблюдается так называемый резонансный режим генерации. В этом режиме часть электромагнитного излучения, генерируемого РДП, отражается от излучающего конца перехода и достигает его противоположной стороны. Это приводит к возникновению внутри перехода стоячих электромагнитных волн, которые проявляются на ВАХ как участки квазипостоянного напряжения, следующими с определенным периодом по напряжению; такую структуру называют ступенями Фиске [15]. Стабильная генерация сигнала в данном режиме возможна исключительно на данных ступенях. Это приводит к ограничению диапазона частот, в котором можно подобрать необходимую рабочую точку на заданной частоте для стабильной генерации сигнала. Как следствие, плавная перестройка частоты в данном режиме работы РДП оказывается возможна только при

подборе положения ступени при определенной комбинации приложенного магнитного поля и тока через РДП.

При напряжениях $V > V_g/3$ возникает т. н. эффект „самонакачки“ [11,16], в результате которого коэффициент затухания волн в линии резко возрастает. В данном режиме ВАХ РДП достаточно гладкие, и плавная перестройка рабочей частоты оказывается возможна.

Целью данной работы является исследование возможности подавления ступеней Фиске в РДП путем добавления согласованной нагрузки на его неизлучающий конец для реализации непрерывной перестройки частоты при напряжениях $V < V_g/3$. Экспериментальные исследования проводились на образцах, включающих в себя непосредственно исследуемый РДП, детектор излучаемого сигнала СВЧ на основе сосредоточенного СИС-контакта, а также интегральную согласующую структуру для передачи сигнала от генератора к детектору; все элементы, кроме согласованной нагрузки являются сверхпроводниковыми и располагаются на одной подложке [17].

2. Резонансные ступени на ВАХ РДП, выбор рабочей точки

Схематичное изображение участка РДП без нагрузочных элементов представлено на рис. 1. Структура данного типа, так называемый „overlap“ [11], представляет собой резонатор, для распространяющихся по ней волн.

Резонанс наблюдается, когда на длине РДП укладывается целое число полуволн n: $\lambda_n = 2L/n$, где L — длина РДП. Резонансные частоты $f_n = nc_{sw}/2L$, где c_{sw} — скорость распространения электромагнитных волн в переходе, или скорость Свайхарта. Эти моды взаимодействуют с джозефсоновским током, и когда частота джозефсоновского тока совпадает с частотой резонансных мод, на вольт-амперных характеристиках перехода появляются ступени джозефсоновского тока при напряжениях $V_n = n\hbar\pi c_{sw}/4eL$, называемые ступенями Фиске. На ступенях дифференциальное сопротивление мало, а следовательно, и ширина линии будет достаточно узкой [18]. При этом в пространстве между ступенями дифференциальное сопротивление очень большое, и зачастую выбор рабочих точек оказывается практически невозможен. Таким образом, на вольтамперных характеристиках РДП в этом диапазоне напряжений наблюдается ярко выраженная резонансная структура, что и делает реализацию плавной перестройки частоты невозможной при постоянном токе смещения [19].

В эксперименте ступени Фиске не вертикальны, а немного наклонены. При изменении магнитного поля происходят „перескоки“ между ступенями. Движение вихрей в переходе управляется током смещения I_B, а их плотность задается магнитным полем, которое зависит от тока в управляющей линии I_{CL}, расположенной рядом с РДП. Таким образом, положения рабочих точек зависят как от тока смещения I_B, так и от

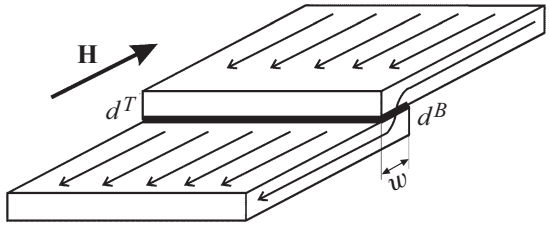

Рис. 1. Устройство РДП, используемого в качестве генератора.

магнитного поля, создаваемого током в управляющей линии I_{CL}. Для получения информации о наличии рабочих точек на определенных частотах, на которых возможна стабильная генерация сигнала необходимой мощности, вместо непосредственного поиска линии генерации удобнее проводить измерения зависимости дифференциального сопротивления от напряжения, которое связано с частотой по формуле Джозефсона. Снимается серия зависимостей напряжения на РДП от величины тока смещения I_B при фиксированных значениях тока в линии управления I_{CL}. При дифференцировании этой кривой получается зависимость дифференциального сопротивления от напряжения $R_D(\mathrm{V_{РДП}})$. На ступенях Фиске дифференциальное сопротивление $R_D = dV/dI$ мало, что способствует генерации сигнала, так как ширина линии излучения пропорциональна R_D^2. Однако, выбор рабочей точки между ступенями оказывается практически невозможным (рис. 2); даже при наличии рабочей точки между ступенями линия генерации будет очень широкой, и не получится реализовать ни фазовую, ни частотную стабилизацию. Это означает, что для генерации сигнала на соответствующей частоте необходимо задать другую величину I_{CL}, при котором рабочая точка на этой частоте существует. Если же такое значение I_{CL} найдется в области малых I_B, мощность генерируемого сигнала будет недостаточной для работы РДП в качестве генератора гетеродина в составе интегрального приемника. Следует отметить, что для РДП с высокой плотностью туннельного тока реализация излучения на краях ступеней Фиске также является практически невозможной из-за перехода в режим хаотической генерации, обусловленной сжатием флаксонов при движении со скоростью, близкой к скорости Свайхарта. Как следствие, в резонансном режиме излучения РДП не обладает возможностью непрерывной перестройки частоты.

Ранее соавторами работы была реализована процедура поиска рабочих точек на фиксированной частоте для РДП в составе сверхпроводникового интегрального приемника [11]. Однако, даже с этой процедурой не на всех частотах удается найти рабочие точки с достаточной мощностью генерации. Кроме того, положение рабочих точек сильно изменяется от одного термоциклирования к другому, и из-за этого после каждого термоцикли-

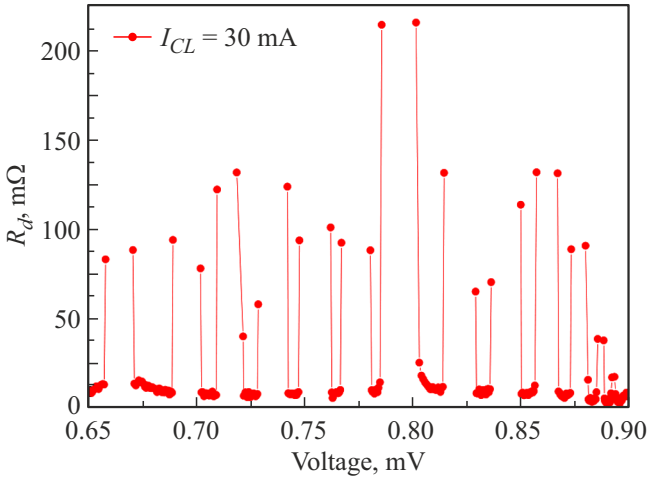

Рис. 2. Зависимость дифференциального сопротивления от напряжения для генератора без нагрузочных элементов при токе $I_{CL} = 30$ mA. В явном виде наблюдаются области, в которых рабочие точки отсутствуют. При этих напряжениях для данного значения тока I_{CL} генерация невозможна.

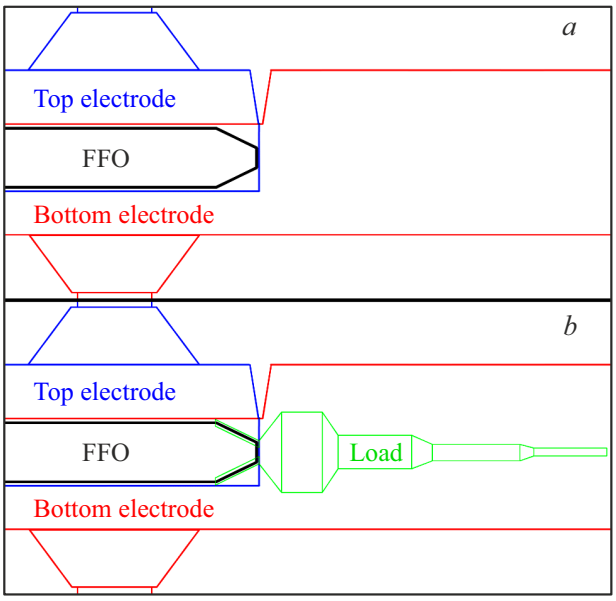

Рис. 3. Схематичное изображение неизлучающего конца РДП, вид сверху. *a* — РДП в традиционной геометрии; *b* — РДП с добавление согласованной нагрузки. Top electrode, bottom electrode — верхний и нижний электроды соответственно (см. рис. 1). FFO — распределенный джозефсоновский переход. Load — согласованная нагрузка из молибдена.

рования процедуру поиска рабочих точек необходимо производить заново.

Для обеспечения возможности непрерывной перестройки частоты без потери мощности необходимо реализовать сглаживание ступеней Фиске, которое увеличит значение дифференциального сопротивления на них и, следовательно, приведет к уширению линии генерации, но при этом позволит расширить диапазон существования рабочих точек. Данная задача может быть решена путем уменьшения амплитуды стоячих волн в переходе.

В работе [19] подробно описывается подход к решению, основанному на повышении параметра затухания вблизи неизлучающего конца перехода, а также предложенные модификации и полученные результаты. При этом повышенному затуханию подвержена также и бегущая в сторону детектора волна, что приводит к уменьшению мощности генерации. Для сохранения мощности генерации желательно использовать подход, при котором воздействие осуществляется исключительно на стоячие волны, амплитуды которых влияют на величину ступеней Фиске. Это возможно реализовать путем уменьшения коэффициента отражения от неизлучающего конца РДП. Согласованная нагрузка в виде чебышевского трансформатора способна поглощать часть излучения, дошедшего до края перехода. Данное решение соответствует всем вышеуказанным требованиям.

В представленной работе были спроектированы и изготовлены два типа образцов интегральных структур: со стандартным РДП без поглотителя, а также идентичный ему образец с добавлением поглотителя в виде согласованного чебышевского трансформатора из молибдена толщиной порядка 100 nm на неизлучающем конце РДП. Параметры трансформатора подбирались в соответствии с результатами численных расчетов. Схематичное изображение стандартного РДП и РДП с модификацией представлены на рис. 3.

Согласованная нагрузка в виде чебышевского трансформатора является естественным решением для задачи согласования импедансов РДП и внешней среды. Причем, ввиду затухания электромагнитных волн в микрополосковой линии с верхним электродом из нормального металла согласуются импедансы РДП и последней секции трансформатора. Трансформатор импеданса с чебышевской (а не максимально плоской) характеристикой позволяет добиться наибольшего согласования между элементами при заданной длине. В литературе упоминаются плавные переходы [20], которые позволяют получить лучшее согласование. Такой подход будет исследован в будущем.

3. Моделирование в Ansys HFSS

Расчет согласованной нагрузки для уменьшения коэффициента отражения от неизлучающего конца РДП, а, следовательно, и сглаживания ступеней Фиске на его ВАХ проводился в программе Ansys HFSS [21].

Ansys HFSS предоставляет возможность численного моделирования структур и определения их параметров, таких как постоянные распространения и затухания, а также волновой импеданс линий передачи, путем расчета электромагнитных полей в каждой точке структуры. Однако в Ansys HFSS отсутствует встроенный модуль, позволяющий учитывать сверхпроводниковые свойства

материалов. Поэтому для расчета джозефсоновской микрополосковой линии передачи, которой по сути является РДП, в модели на границе объектов, находящихся в сверхпроводящем состоянии, задавались граничные условия специального вида [17,22]. Данные граничные условия были рассчитаны по выражениям из теории Маттиса-Бардина [23]. Более сложные модели, учитывающие конечное время свободного пробега квазичастиц, вносят несущественные отличия для пленок, изготовленных методом магнетронного напыления, ввиду малости длины свободного пробега.

Такие граничные условия позволяют учитывать не только потери, которые присутствуют в сверхпроводящих пленках на высоких частотах и резко увеличиваются за щелевой частотой, но и проникновение магнитного поля в сверхпроводники, и как следствие, изменение постоянной распространения и волнового импеданса, которые, согласно более простым аналитическим моделям, имеют следующий вид [24]:

$$Z' = Z_0\sqrt{1+\lambda_1/H+\lambda_2/H},$$

$$\gamma' = \gamma_0\sqrt{1+\lambda_1/H+\lambda_2/H},$$

где Z_0, γ_0 — волновой импеданс и постоянная распространения в идеальной микрополосковой линии; λ_1 и λ_2 — лондоновская глубина проникновения магнитного поля в нижний и верхний электроды; H — толщина диэлектрика. Более строгая аналитическая модель для Z' и γ' в микрополосковой линии описывается в работе [25].

Толщина туннельного слоя в РДП имеет величину порядка 1 nm, однако при проведении процедуры разбиения структуры на тетраэдры в HFSS длина разбиения не может быть менее 5 nm. В связи с этим, для проведения корректного описания моделируемой линии, в HFSS моделировалась структура с шириной и длиной, примерно в $\sqrt{5}$ раз большей, чем на образце. Это изменение сделано с тем, чтобы обеспечить такие же значения волнового импеданса и постоянной распространения, что и в исходной структуре.

Процесс возбуждения электромагнитных волн в моделируемой структуре в Ansys HFSS был осуществлен при помощи волноводного порта. Такой выбор порта позволяет избежать отражений на границе между портом и структурой. Изображение моделируемой структуры с модифицированными размерами и волноводным портом показано на рис. 4.

Результат расчета коэффициента S_{11} (отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны) для волноводного порта представлен на рис. 5. В диапазоне от 200 до 500 GHz отношение амплитуд отраженного сигнала к исходному не превышает −3.5 dB. Следует отметить, что характерное значение импеданса джозефсоновской линии передачи, которую представляет собой РДП, составляет около 0.3 Ω. Волновой импеданс первого каскада чебышевского трансформатора из микрополосковых линий, ширина которого 76 μm, примерно равен 1.5 Ω, что приводит к большому

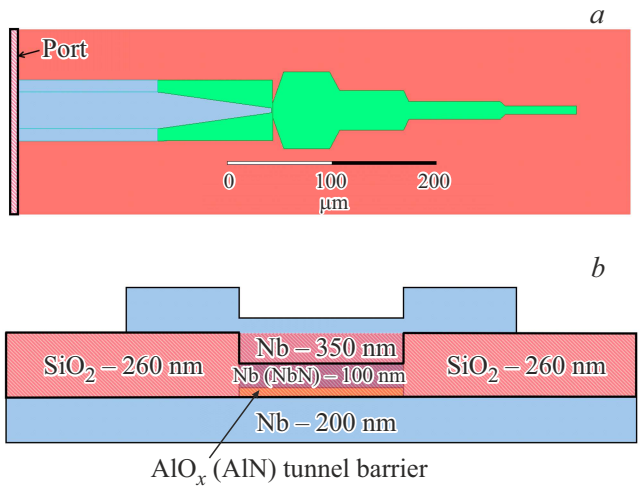

Рис. 4. Изображение моделируемой структуры в Ansys HFSS сверху (*a*) и спереди (*b*). Красным цветом со штриховкой показано расположение волнового порта.

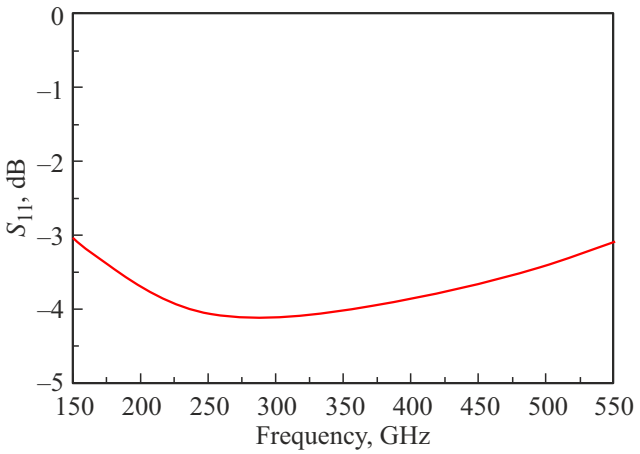

Рис. 5. Отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей волны, полученное для структуры, рассчитанной в Ansys HFSS.

рассогласованию импедансов и большому коэффициенту отражения. Дальнейшее увеличение ширины первой секции трансформатора невозможно из-за возбуждения поперечных мод.

Тем не менее, уменьшение амплитуды волны при отражении от неизлучающего края РДП даже на 3.5 dB позволило добиться существенного подавления ступеней Фиске в эксперименте в части рабочего диапазона и уменьшения пространства между ступенями.

4. Описание исследуемых образцов

Джозефсоновские переходы (СИС-детектор и РДП) изготовлены на основе туннельных структур Nb-AlO$_x$-Nb. Технология изготовления сверхпроводниковых элементов на основе высококачественных джозефсо-

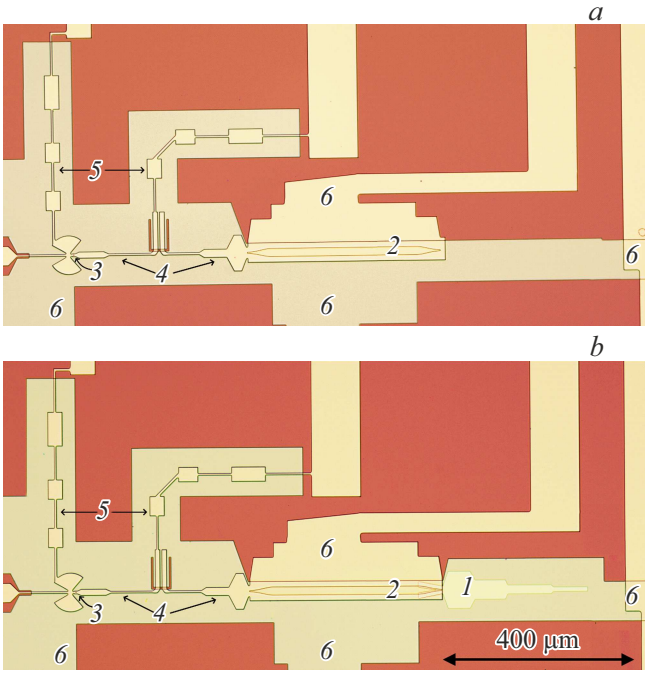

Рис. 6. Микрофотографии образцов: *a* — без поглотителя, *b* — с поглотителем.

новских переходов была разработана и оптимизирована в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [26]; эта технология была апробирована при изготовлении малошумящих приемных устройств для задач радиоастрономии ТГц-диапазона и интегральных приемников для мониторинга атмосферы и лабораторных применений [27,28]. Трансформаторы импеданса интегральной согласующей структуры выполнены в виде отрезков микрополосковых линий на основе пленок ниобия с изолятором из двуокиси кремния SiO_2 толщиной 250 nm. Значение R_nS джозефсоновских переходов составляет примерно $30\,\Omega\cdot\mu\text{m}^2$.

Микрофотографии двух исследуемых образцов представлены на рис. 6. Отличия между образцом на рис. 6, *a* и образцом на рис. 6, *b* заключается лишь в наличии согласованной нагрузки на неизлучающем конце РДП у второго образца. Фотографии сделаны в оптическом микроскопе.

На фотографиях видны ключевые компоненты исследуемых образцов: согласованная нагрузка из молибдена (1), генератор на основе РДП (2), СИС-детектор (3), элементы интегральной согласующей структуры (4), линия подавления критического тока СИС-детектора (5), подводящие электроды (6). Все компоненты расположены на единой подложке из кремния.

5. Результаты эксперимента

Сравнение серий ВАХ образцов с РДП без поглотителя и с поглотителем при различных токах управления магнитным полем представлены на рис. 7, 8. При измерении зависимости напряжения на РДП от тока смещения $V_{\text{РДП}}(I_{\text{B}})$ задается определенное значение управляющего тока I_{CL}. На ВАХ РДП наблюдается резкое изменение значений дифференциального сопротивления R_D как в структуре с согласованной нагрузкой, так и без нее.

Цветом показан уровень накачки СИС-детектора I_{pump}. Эта величина однозначно связана с мощностью, поглощаемой СИС-детектором, соотношениями из модели Такера-Фелдмана [29]. Для работы РДП в качестве гетеродина в составе сверхпроводникового интегрального приемника необходимо, чтобы в рабочей точке была возможность стабильной генерации сигнала, и при этом ток накачки СИС-детектора составлял не менее 25 % от скачка тока на щели I_g. ВАХ СИС-детектора представлена на рис. 8.

На рис. 7, *a* отчетливо видны резкие ступени в диапазоне напряжений до 0.9 mV.

На рис. 9 представлены участки серий ВАХ с наиболее ярко выраженными ступенями Фиске, частотный диапазон: 314–435 GHz.

Сравнение дифференциальных сопротивлений РДП без нагрузочных элементов и с добавлением согласованной нагрузки представлено на рис. 10. Для получения этих данных измерялись зависимости $V_{\text{РДП}}(I_B)$ при фиксированных I_{CL}.

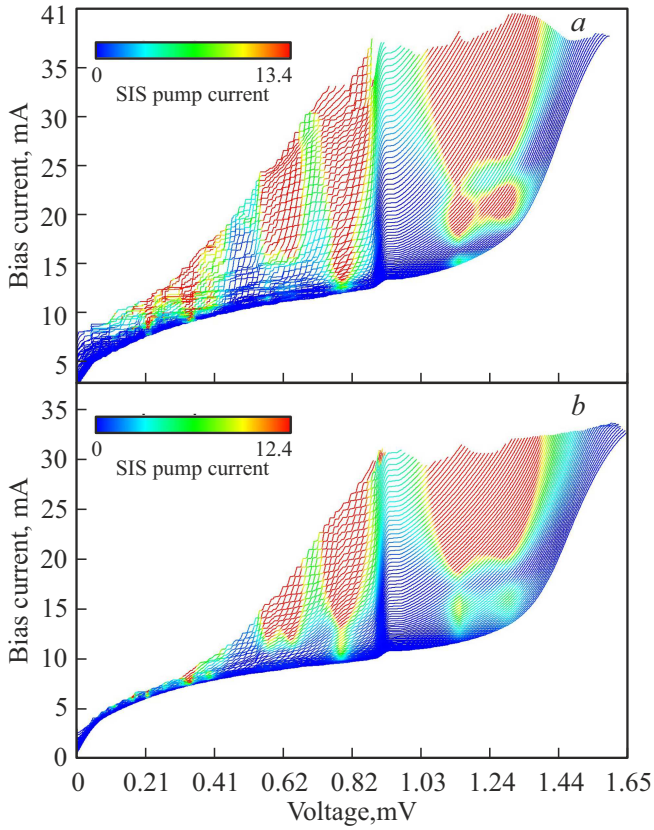

Рис. 7. Семейство вольтамперных характеристик РДП: *a* — без поглотителя, *b* — с поглотителем.

Для количественного представления результата сравнивается процентное отношение суммарной ширины областей, в которых рабочие точки отсутствуют, к общей ширине выбранного диапазона. Для генератора

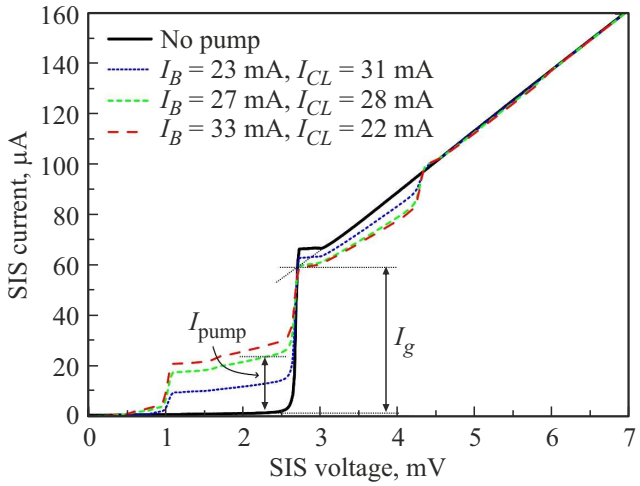

Рис. 8. Вольтамперная характеристика СИС-детектора под воздействием сигнала частоты 400 GHz в нескольких рабочих точках. I_{pump} — величина тока накачки, I_g — величина скачка тока на щели.

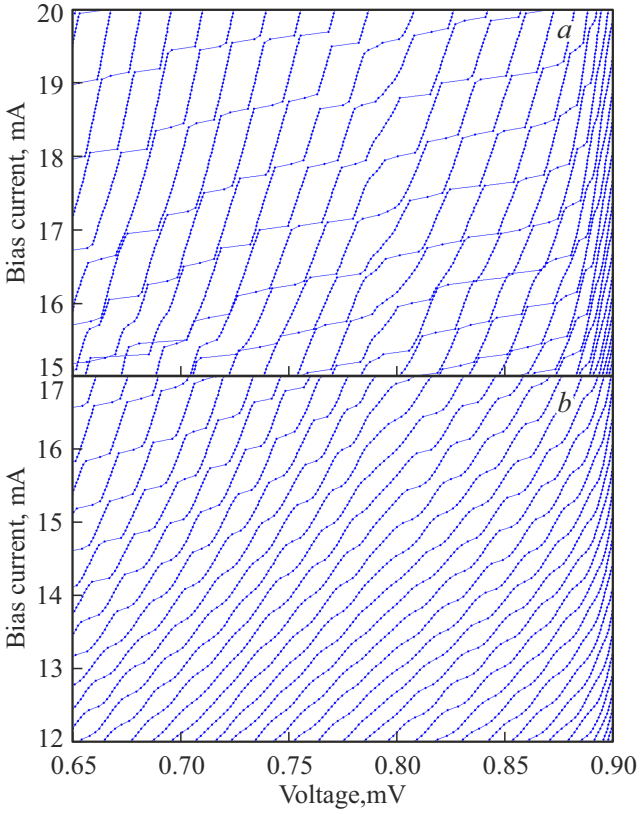

Рис. 9. Семейство вольтамперных характеристик РДП: *a* — без поглотителя, *b* — с поглотителем. Выведены все измеренные точки. Информация о накачке СИС-детектора не отображена для удобочитаемости.

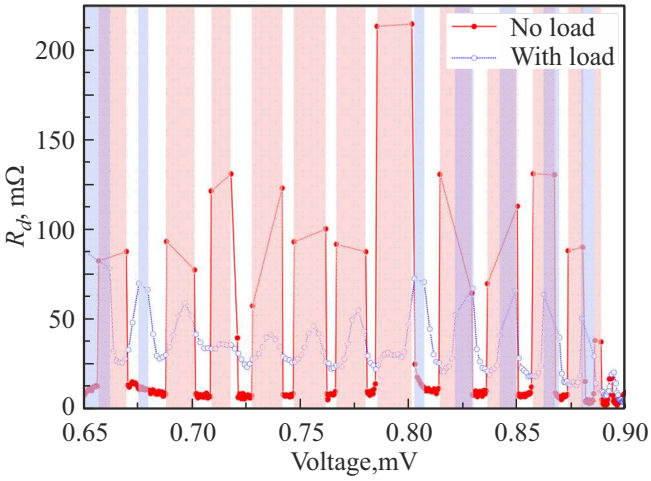

Рис. 10. Зависимость дифференциального сопротивления от частоты для РДП без нагрузочных элементов (сплошные точки) и РДП с согласованной нагрузкой (пустые точки) при токе $I_{CL} = 30$ mA.

без добавления согласованной нагрузки (см. рис. 10, сплошные точки) это значение составляет более 49 %. Для генератора с добавлением согласованной нагрузки (см. рис. 10, пунктирные точки) области отсутствия рабочих точек занимают лишь 19 % выделенного диапазона. Таким образом, диапазон, в котором возможна стабильная генерация сигнала при токе линии управления $I_{CL} = 30$ mA был увеличен на 30 %.

В результате зависимость дифференциального сопротивления от частоты для образцов с добавленным поглотителем имеет существенно менее изрезанный характер, а области скачков (отсутствия рабочих точек) либо заметно сузились, либо исчезли.

Для проведения исследований и изготовления образцов было использовано оборудование УНУ #352529 „Криоинтеграл“.

6. Заключение

С помощью добавления на неизлучающий конец РДП согласованной нагрузки в виде чебышевского трансформатора из молибдена толщиной порядка 100 nm удалось сгладить ступени Фиске на ВАХ РДП. Это увеличило диапазон напряжений, при которых возможна генерация сигнала необходимой мощности. Сравнение зависимостей дифференциальных сопротивлений от частоты для образцов, отличающихся лишь наличием поглотителя на неизлучающем конце перехода, показало потенциал использования подобных поглотителей в совершенствовании генераторов субтерагерцового диапазона на основе РДП.

Дальнейшие исследования данной модификации помогут улучшить полученные результаты и позволят приблизиться к обеспечению плавной перестройки частоты генерации сигнала во всем диапазоне распределенным

джозефсоновским переходом в резонансном режиме работы с минимальными потерями мощности излучения. Возможным направлением оптимизации подавления и сглаживания ступеней Фиске является объединение методов добавления согласованной нагрузки на неизлучающий конец РДП для понижения его параметра S_{11} и нанесения дополнительного поглотителя по краям РДП для повышения параметра затухания α внутри перехода. Это позволит полностью обеспечить плавную перестройку частоты без значительных потерь мощности излучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2024-538).

Список литературы

[1] ALMA: https://www.almaobservatory.org
[2] APEX: http://www.apex-telescope.org
[3] Dome: https://elt.eso.org/telescope/dome
[4] Herschel: http://herschel.esac.esa.int
[5] Миллиметрон: https://millimetron.ru
[6] S.C. Shi, T. Noguchi. IEICE Trans. Electron. **81**, *10*, 1584 (1998).
[7] W. McGrath, A. Raisanen, P. Richards, R. Harris, F. Lloyd. IEEE Trans. Magn. **21**, *2*, 212 (1985).
[8] A. Zorin. IEEE Trans. Magn. **21**, *2*, 939 (1985).
[9] S.V. Shitov, B.D. Jackson, A.M. Baryshev, A.V. Markov, N.N. Iosad, J.R. Gao, T.M. Klapwijk. Phys. C: Supercond. Appl. **372**, 374 (2002).
[10] С.В. Шитов. Интегральные устройства на сверхпроводниковых туннельных переходах для приемников миллиметровых и субмиллиметровых волн: дис. — Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, 2003.
[11] V.P. Koshelets, S.V. Shitov. Supercond. Sci. Technol. **13**, *5*, R53 (2000).
[12] J.V. Siles, R.H. Li, C. Lee, E. Schlecht, A. Maestrini, P. Bruneau, A. Peralta, J. Kloosterman, J. Kawamura, I. Mehdi. Proceedings of the 26th International Symposium on Space Terahertz Technology **1**, *3*, 40 (2015).
[13] К.К. Лихарев. Введение в динамику джозефсоновских переходов. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., М. (1985). 320 с.
[14] M. Tinkham. Introduction to superconductivity. Courier Corporation (2004).
[15] D.D. Coon., M.D. Fiske. Phys. Rev. **138**, *3*, A744 (1965).
[16] Ф.В. Хан, А.А. Атепалихин, Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец. Радиотехника и электроника **68**, *9*, 897 (2023).
[17] A.L. Pankratov, A.S. Sobolev, V.P. Koshelets, J. Mygind. Phys. Rev. B **75**, *18*, 184516 (2007).
[18] E.A. Matrozova, A.L. Pankratov, M.Yu. Levichev, V.L. Vaks. J. Appl. Phys. **110**, *5*, 053922 (2011).
[19] M.E. Paramonov, L.V. Filippenko, F.V. Khan, O.S. Kiselev, V.P. Koshelets. Appl. Sci. **12**, *17*, 8904 (2022).
[20] R.W. Klopfenstein. Proceedings of the IRE **44**, *1*, 31 (1956).
[21] Ansys HFSS (on-line): http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss
V. Belitsky, C. Risacher, M. Pantaleev, V. Vassilev. Int. J. Infrared Millim. Waves **27**, 809 (2006).
[22] D.C. Mattis, J. Bardeen. Phys. Rev. **11**, *2*, 412 (1958).
[23] R.L. Kautz. J. Appl. Phys. **49**, *1*, 308 (1978).
[24] G. Yassin, S. Withington. J. Phys. D: Appl. Phys. **28**, *9*, 1983 (1995).
[25] M.Y. Fominsky, L.V. Filippenko, A.M. Chekushkin, P.N. Dmitriev, V.P. Koshelets. Electronics **10**, *23*, 2944 (2021).
[26] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, M.I. Faley, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, A.A. Artanov, K.I. Rudakov, A. de Lange, G. de Lange, V.L. Vaks, M.Y. Li, H.B. Wang. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. **5**, 687 (2015).
[27] P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets. In: Josephson Junctions. History, Devices, and Applications / Eds E. Wolf, G. Arnold, M. Gurvitch, J. Zasadzinski. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. (2017). Ch. 7. P. 185–244.
[28] J.R. Tucker, M.J. Feldman. Rev. Mod. Phys. **57**, *4*, 1055 (1985).

Редактор А.Н. Смирнов