05

Спектр генерации массива джозефсоновских переходов в копланарной линии

© Ф.В. Хан,[1,2] Л.В. Филиппенко,[1] М.Ю. Фоминский,[1] А.Б. Ермаков,[1] А.П. Орлов,[1] В.П. Кошелец[1]

[1] Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
e-mail: khanfv@hitech.cplire.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.
В окончательной редакции 30 апреля 2025 г.
Принято к публикации 30 апреля 2025 г.

Исследованы спектральные характеристики излучения генератора на основе массива джозефсоновских переходов и оценена возможность его применения в качестве гетеродина в составе сверхпроводникового интегрального приемника. Массив представляет собой 350 последовательно соединенных переходов, встроенных в центральный электрод копланарной линии. Излучение от массива смешивается с возникающими на одиночном туннельном джозефсоновском переходе (гармонический смеситель) высшими гармониками синтезатора (частота 16−19 GHz). Сигнал на разностной частоте (до 800 MHz) выводится на коммерческий спектроанализатор. Естественная ширина линии генерации в лучшей точке составила менее 1 MHz при отношении сигнал-шум 26.3 dB. Оценки ширины линии в рамках модели, учитывающей шумы джозефсоновских переходов, а также тепловые и низкочастотные шумы, находятся в качественном соответствии с экспериментальными результатами. Также во всех точках, где ширина линии не превышает 15 MHz, удалось впервые реализовать режим фазовой автоподстройки частоты к стабильному внешнему синтезатору.

Ключевые слова: сверхпроводниковый интегральный приемник, гетеродин, джозефсоновский переход, копланарная линия, шумы, фазовая автоподстройка частоты.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61226.87-25

Введение

Устройства сверхпроводниковой электроники на основе туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) находят широкое применение в различных областях науки и техники. Так, основным элементом терагерцовых и субтерагерцовых гетеродинных приемных систем наземного [1,2] и космического базирования [3,4] на частотах до 1.2 THz является смеситель сигналов на основе туннельного СИС перехода. Шумовая температура таких устройств приближается к величине квантового предела: $T_n = hf/2k_B$, а преобразование исходного сигнала на промежуточную частоту происходит с усилением [5,6]. Здесь f — частота приходящего сигнала, а h и k_B — постоянные Планка и Больцмана соответственно. Данные эффекты оказываются возможны благодаря работе устройств при криогенных температурах и уникальной нелинейности СИС перехода вблизи щелевого напряжения V_g [7].

Для работы гетеродинных приемников, помимо смесительного элемента, также необходим генератор гетеродина. Часто для этого используются высокие гармоники излучения синтезатора, полученные на каскаде умножителей [8], однако предпочтительнее использовать генератор гетеродина, расположенный на одном чипе со смесителем и приемной антенной. Такой подход был реализован в сверхпроводниковом интегральном приемнике (СИП) [9]. В качестве гетеродина использовался сверхпроводниковый генератор на основе распределенного джозефсоновского перехода (РДП). СИП был апробирован в исследованиях по изучению состава атмосферы в аппарате TELIS [9], в спектроскопии газов [10], для изучения человеческого организма в терагерцовом диапазоне [11].

РДП представляет собой туннельный контакт СИС, изготавливаемый в одном цикле вместе с СИС смесителем. Размер РДП вдоль одного из направлений многократно превышает джозефсоновскую глубину $\lambda_J = \sqrt{\Phi_0/2\pi\mu_0 j_c d}$, где Φ_0 — квант магнитного потока, μ_0 — магнитная восприимчивость вакуума, j_c — плотность критического тока, $d = d_0 + \lambda_1 \coth(d_1/\lambda_1) + \lambda_2 \coth(d_2/\lambda_2)$ — эффективная толщина джозефсоновской линии передачи, d_0 — толщина туннельного барьера, а λ_1 и λ_2 — лондоновская глубина проникновения магнитного поля в верхний и нижний электроды, соответственно, а d_1 и d_2 — их толщины. При приложении магнитного поля в плоскости туннельного барьера РДП поле начинает проникать внутрь перехода в виде вихрей. При пропускании тока через переход вихри приходят в движение. Когда вихрь достигает края РДП, происходит излучение кванта энергии.

Рабочая частота сверхпроводникового генератора на основе РДП перестраивается в широком диапазоне до

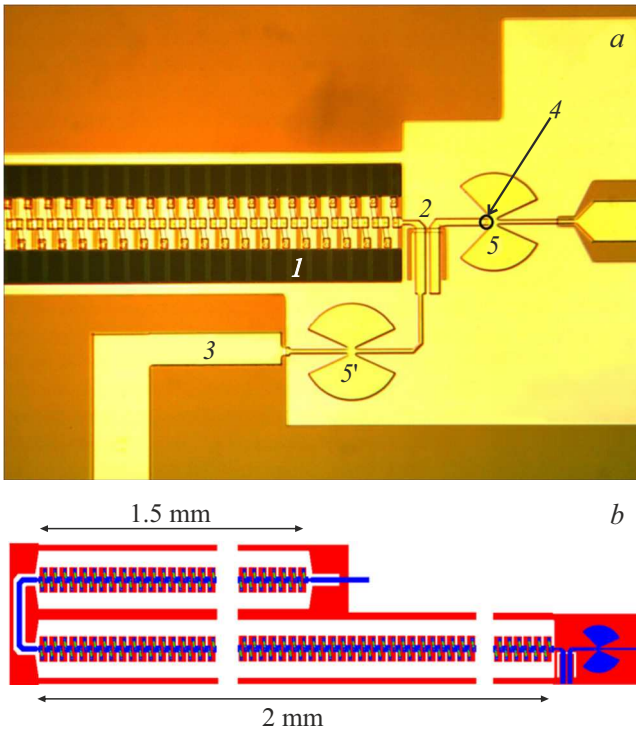

Рис. 1. *a* — изображение массива и СИС детектора с трансформатором импеданса: *1* — массив джозефсоновских переходов; *2* — разрыв по постоянному току между массивом и смесителем на СИС переходе; *3* — линия питания массива по постоянному току; *4* — гармонический СИС смеситель; *5* — радиальный замыкатель для отстройки емкости СИС перехода; *5′* — для предотвращения ухода мощности массива в линию его подключения по постоянному току (3); *b* — чертеж массива, состоящего из 350 переходов.

700 GHz (щелевая частота ниобия). На более высоких частотах генерация в РДП оказывается практически невозможна из-за сильного поглощения в ниобиевом электроде.

При напряжениях, меньших $V_g/3$, РДП работает в резонансном режиме[12]. Из-за образования стоячих волн внутри РДП на его вольт-амперной характеристике (ВАХ) появляются ступени тока, называемые ступенями Фиске[13]. Автономная ширина линии генерации в рабочих точках на ступенях имеет величину порядка 1 MHz, а между ступенями превышает 10 MHz. Для работы системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) необходимо, чтобы ширина линии генерации была менее 15 MHz, поэтому выбор рабочих точек при напряжениях между ступенями оказывается затруднителен. Положением ступеней можно управлять при помощи внешнего магнитного поля, поэтому для обеспечения режима непрерывной перестройки частоты генерации РДП перед проведением измерений выполняется процедура поиска рабочих точек при различных величинах магнитного поля и тока через РДП. Кроме того, положение рабочих точек меняется при термоциклировании образца, поэтому после термоциклирования процедуру поиска рабочих точек потребуется выполнять заново.

При напряжениях больше $V_g/3$ РДП работает в режиме вязкостного течения вихрей („flux-flow“). В данном режиме из-за эффекта самонакачки резко возрастает поглощение волн, распространяющихся по РДП, и ступени Фиске отсутствуют. При этом ширина линии генерации достаточна для реализации ФАПЧ [9].

В качестве альтернативных источников сигнала гетеродина для сверхпроводникового интегрального приемника можно использовать массивы джозефсоновских туннельных переходов. Массивы также могут быть изготовлены в одном технологическом процессе вместе со смесителем и приемной антенной, частоты генерации массивов также лежат в терагерцовом и субтерагерцовом диапазонах. Мощность выходного сигнала при подключении к массиву согласованной нагрузки линейно увеличивается с количеством переходов N и может достигать десятков микроватт [14–16]. Ширина линии генерации при этом уменьшается обратно пропорционально N, и при автономной генерации имеет характерное значение сотен килогерц. Также массивы джозефсоновских переходов, изготовленных по хорошо отработанным технологиям Nb-Al/AlN-NbN и Nb-Al/AlO_x-Nb, могут работать на частотах до 900 GHz, что было продемонстрировано в работе [17].

В недавней статье [18] авторами настоящей работы была предложена новая топология массивов джозефсоновских переходов и проведено предварительное исследование характеристик образцов на постоянном токе. В настоящей работе проводится исследование спектральных характеристик экспериментальных образцов и возникающих при генерации особенностей. В разд. 1 приводится описание экспериментальных образцов. В разд. 2 рассказывается о методике проведения измерений. Полученные результаты обсуждаются в разд. 3.

1. Экспериментальные образцы

Исследуемые структуры изготавливались по технологическому процессу, включающему в себя несколько стадий магнетронного напыления, масочной электронной литографии и ионно-плазменного травления. Переходы Nb-Al/AlN-NbN с плотностью туннельного тока 13 kA/cm^2 сформированы при помощи магнетронного напыления ниобия с последующим напылением алюминия и нитридизацией. Электроды сформированы литографией „под взрыв“ (lift-off), позволяющей добиться уходов размеров менее 0.5 μm. Детали технологического процесса можно найти, например, в [19].

Изображение одного из исследуемых образцов показано на рис. 1, *a*. Массив представляет собой N последовательно соединенных туннельных СИС переходов, встроенных в центральный электрод копланарной линии.

Для обеспечения безгистерезисного хода ВАХ массива каждый переход шунтирован тонкопленочным резистором из молибдена, находящегося при температуре кипения жидкого гелия 4.2 K в нормальном состоянии. Синхронизации между переходами в массиве удается достичь благодаря распространяющимся по копланарной линии волнам. На рис. 1, *b* показан чертеж всего массива с характерными размерами.

Для уменьшения оттока мощности, генерируемой массивом, в линию питания по постоянному току *3* на расстоянии $3\lambda/4$ от разрыва по постоянному току *2* расположен радиальный замыкатель *5′*. Другой радиальный замыкатель *5* нужен для отстройки емкости туннельного СИС перехода *4*, используемого в схеме для смешения сигнала от массива с гармониками синтезатора, на высокой частоте. Основная частота синтезатора f_{synth} лежит в интервале от 16 до 19 GHz. Разрыв в виде щелевой антенны необходим для независимого подключения массива и одиночного СИС перехода по постоянному току.

2. Методика проведения измерений

Исследуемый образец крепится на держатель измерительной головки и помещается в заливной гелиевый криостат. Электрический контакт площадок образца с подводящими питание ножками в держателе реализуется при помощи серебряной пасты. Для обеспечения хорошего теплового контакта между кремниевой подложкой образца и поверхностью медного держателя между ними реализуется восковая прослойка. Для равномерного контакта по всей площади соприкосновения, а также для активации серебряной пасты образец помещается в печь при температуре 50 °C.

Сигнал, полученный при смешении излучения массива с высокими гармониками синтезатора, имеет частоту от 0 до 800 MHz. Он подается на усилители, после чего одна часть сигнала выводится на экран спектроанализатора, а другая подается на фазовый детектор, управляющий напряжением на массиве. Сигнал ошибки от фазового детектора подается на массив через резистор сопротивлением 50 Ω, находящийся рядом с чипом в криостате. Фазовый детектор смещает рабочую точку массива таким образом, чтобы нивелировать отличие по частоте и фазе между сигналом на разностной частоте и опорным частотой 400 MHz. За счет этого происходит внешняя фазовая синхронизация при условии, что ширина линии генерации менее 15 MHz. Данная частота определяется временем задержки в петле фазовой синхронизации.

Схематическое изображение всех компонентов измерительного стенда показано на рис. 2.

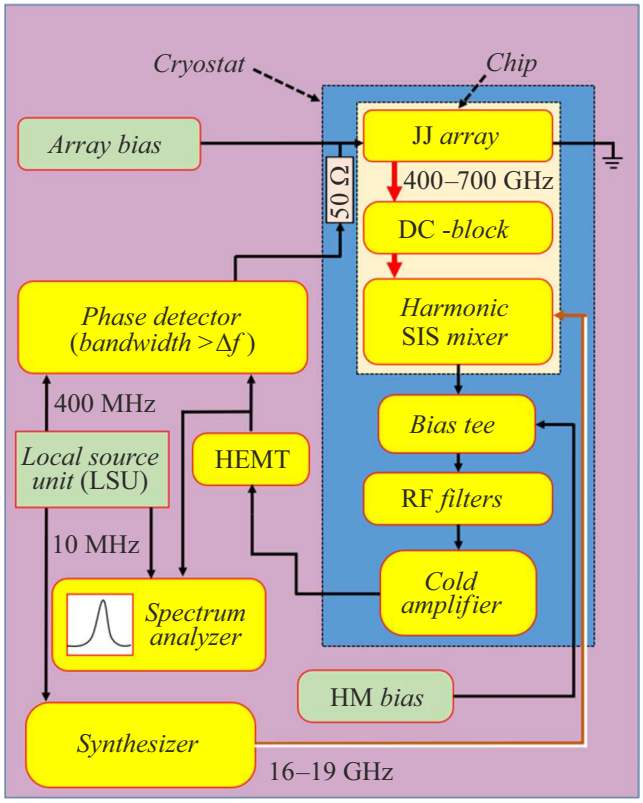

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования линии генерации массива джозефсоновских переходов.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Предварительные измерения на постоянном токе

Под действием переменного электромагнитного поля, действующего на СИС переход, повышается вероятность туннелирования квазичастиц при напряжениях, меньших V_g. Данный эффект называется туннелированием под действием фотонов (англ., photon-assisted tunneling). На ВАХ при этом появляется серия так называемых квазичастичных ступеней тока при напряжениях $V = V_g - nhf/e$, где n — количество поглощенных одним электроном фотонов частотой f, а e — заряд электрона. Из-за неподавленного критического тока при напряжениях $V = phf/2e$ на ВАХ также возникают и ступени Шапиро, где p — целое число. ВАХ СИС перехода при воздействии сигнала массива показана на рис. 3.

Зависимость тока накачки СИС перехода от частоты показана на рис. 4. Изрезанность характеристики, как будет показано далее, скорее всего, обусловлена захватом частоты генерации массива при синхронизации переходов вблизи резонансной моды копланарной линии, в которую встроен массив. На практике для эффективного преобразования сигнала генератора на разностную частоту с последующей возможностью частотной и фазо-

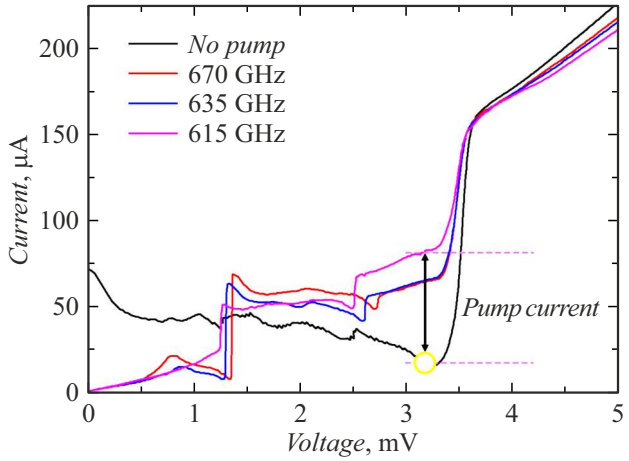

Рис. 3. ВАХ СИС смесителя при накачке от генератора. Рабочая точка около 3.1 mV обозначена кругом.

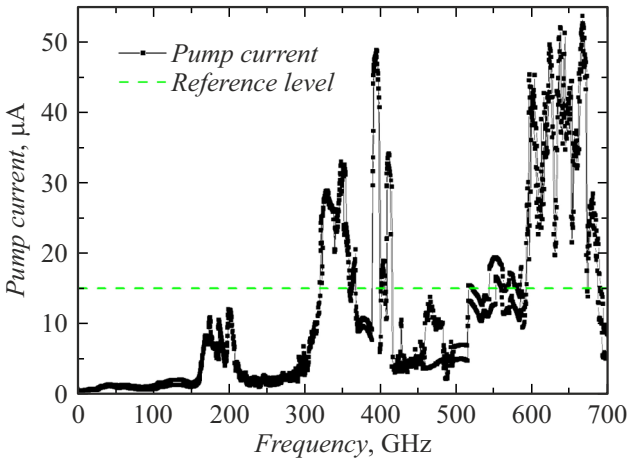

Рис. 4. Зависимость тока накачки от частоты для исследуемого образца из 350 переходов. Максимальная мощность, определенная из аппроксимации ВАХ выражениями из модели Такера-Фелдмана, составила примерно $0.12\,\mu$W. Точки сняты при проходе ВАХ в прямом и обратном направлениях. Зеленым штрихом показан уровень тока накачки, соответствующий 10 % от скачка тока на щели.

вой стабилизации линии генерации достаточно выходной мощности сигнала, индуцирующей на ВАХ СИС смесителя ток накачки, равный, по крайней мере, десятой части скачка тока на щели [20]. Стоит отметить, что для работы смесителя в составе гетеродинного приемника требуется мощность сигнала гетеродина, создающая ток накачки более 25 % от скачка тока на щели. Из рис. 4 видно, что достаточная для работы частотной и фазовой стабилизации мощность генерации может быть получена в полосе частот от 400 до 700 GHz, обусловленной характеристикой передачи схемы согласования между массивом и СИС смесителем. Максимальная мощность генерации по оценке при аппроксимации ВАХ СИС смесителя теоретическими выражениями из модели Такера-Фелдмана [5] получилась равной $0.12\,\mu$W.

3.2. Измерение спектров генерации и реализация режима ФАПЧ

На рис. 5 показан спектр излучения массива в рабочей точке на частоте 681 GHz. Сигнал выводился на экран спектроанализатора после преобразования сигнала на разностную частоту f_{IF}. Ширина линии генерации в автономном режиме оказалась равной примерно 2 MHz при отношении сигнал-шум 27 dB. В лучших точках ширина линии генерации менее 1 MHz. Данные получены в режиме частотной стабилизации линии при 100 усреднениях. Стоит отметить, что амплитуда сигнала на промежуточной частоте зависит также от рабочей точки СИС смесителя и мощности синтезатора. Кривые на рис. 5 получены при подборе оптимальных значений данных параметров.

Красной сплошной кривой показан спектр генерации при включенном режиме фазовой стабилизации частоты. Насколько известно авторам работы, генерация массива джозефсоновских переходов в режиме ФАПЧ к стабильному внешнему синтезатору реализована впервые. Спектральное качество линии в данной точке превышает 80 %.

На рис. 6 показан участок ВАХ массива при включенной системе ФАПЧ и без нее. Ширина области синхронизации по току примерно равна 0.4 mA, что составляет 10 % от величины тока в рабочей точке. Данные свидетельствуют о высокой эффективности работы системы ФАПЧ.

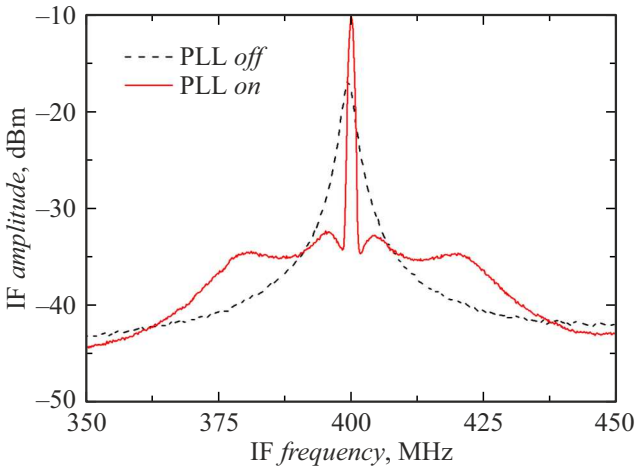

Рис. 5. Вид спектра на частоте 681 GHz. Ширина линии в режиме свободной генерации (черная кривая) 2.2 MHz, отношение сигнал/шум 27 dB. В режиме внешней фазовой стабилизации (красная кривая) спектральное качество более 80 %.

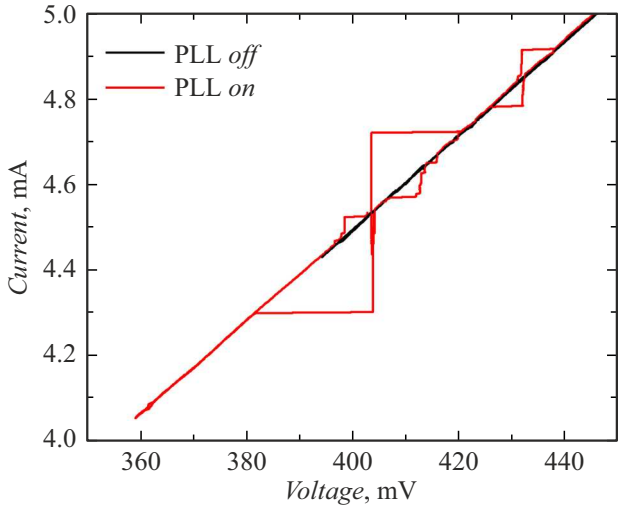

Рис. 6. Участок ВАХ массива при работающей системе ФАПЧ (красная кривая) и в автономном режиме (черная).

3.3. Внутренний захват частоты

Для сравнения ширины линии в эксперименте с теоретическим значением, полученным из дифференциального сопротивления, была проведена серия измерений спектров излучения массива в диапазоне от 480 до 500 mV. Интервал между измерениями по напряжению составлял примерно 0.25 mV.

Процедура измерений в каждой точке состоит из нескольких действий. Сначала путем задания тока выбирается рабочая точка в некоторой области на ВАХ массива. Далее подбирается частота синтезатора так, чтобы сигнал на разностной частоте, полученный при смешении излучения массива с гармоникой синтезатора, находился в окрестности 400 MHz. После этого определяется номер гармоники: при смешении сигнала массива с i-й гармоникой изменение частоты синтезатора на 10 MHz приведет к сдвигу разностной частоты на i^*10 MHz. Стоит отметить, что сдвиг разностной частоты может происходить как вправо, так и влево относительно синтезатора. Это обусловливается тем, в верхней ($f_{array} > i f_{synth}$) или нижней ($f_{array} < i f_{synth}$) полосе (англ. upper, USB, и lower sideband (LSB), соответственно) производится измерение спектра. В рамках данной серии измерений работа проводилась только в нижней полосе на 32-й гармонике. После этого подбирались такая мощность сигнала синтезатора и напряжение на гармоническом СИС смесителе, чтобы обеспечить наибольший сигнал промежуточной частоты (ПЧ). Эти параметры подбирались только один раз и далее в пределах серии измерений оставались неизменными.

При измерениях в каждой точке после изменения тока смещения через массив снова подбиралась частота синтезатора так, чтобы установить сигнал на разностной частоте на 400 MHz. При этом система частотной стабилизации настроена таким образом, чтобы удерживать линию вблизи разностной частоты около 400 MHz. Подстройкой частоты синтезатора мы добивались того, чтобы при включении частотной стабилизации не изменялась рабочая точка. После этого включалась система частотной стабилизации сигнала, и запускалось усреднение по 100 измерениям. Затем система частотной стабилизации выключалась, массив переводился в новую рабочую точку, и процедура повторялась. Система частотной стабилизации с полосой регулирования 10 kHz не меняет форму линии и ее ширину.

В каждой точке проводились измерения тока и напряжения на массиве, а также частоты синтезатора и непосредственно спектра на разностной частоте. Амплитуда генерации джозефсоновских генераторов вблизи основной частоты имеет характерный вид кривой Лоренца. Поэтому каждый спектр при обработке был аппроксимирован функцией (1), из которой были получены положение центра и ширина линии генерации:

$$A = \frac{A_0}{(f - f_{0,IF})^2 + (\delta f)^2}, \tag{1}$$

где $f_{0,IF}$ — положение центра генерации на разностной частоте, δf — ширина линии.

Следует отметить, что подключение системы ФАПЧ добавляет параллельно с массивом сопротивление около 100 Ω. При этом сопротивление самого массива из 350 переходов — примерно 400 Ω. Из-за этого ВАХ отличается от измерений, проведенных на постоянном токе в погружном криогенном зонде. Дополнительное сопротивление необходимо будет учитывать для корректного расчета дифференциального сопротивления массива.

Для проверки применимости формулы Джозефсона к описанию связи между частотой генерации и напряжением на массиве частота, определенная по спектроанализатору переводилась в напряжение по формуле

$$V_s = \frac{h}{2e}(i f_{synth} - f_{0,IF}). \tag{2}$$

Знак „–“ перед промежуточной частотой $f_{0,IF}$ обусловлен работой в нижней полосе (LSB).

Участок ВАХ массива, измеренной на постоянном токе (черные точки), а также ВАХ, восстановленная из спектральных измерений (красные), показаны на рис. 7. Как можно видеть, ВАХ, измеренные двумя способами, заметно различаются.

В ходе измерений и номер гармоники, и рабочая полоса (sideband) оставались неизменными. Скорее всего, расхождение вызвано внутренним захватом частоты генерации массива в случае, когда частота генерации достаточно близка к частоте резонансной моды в копланарной линии [16]. Расстояние между резонансными модами можно рассчитать по формуле

$$\Delta f = \frac{v}{2L} \sim \frac{c}{2L}\sqrt{\frac{2}{\varepsilon + 1}}, \tag{3}$$

где v — скорость распространения волны в копланарной линии, c — скорость света в вакууме, L — длина участка, на котором образуются стоячие волны, $\varepsilon = 11.7$ —

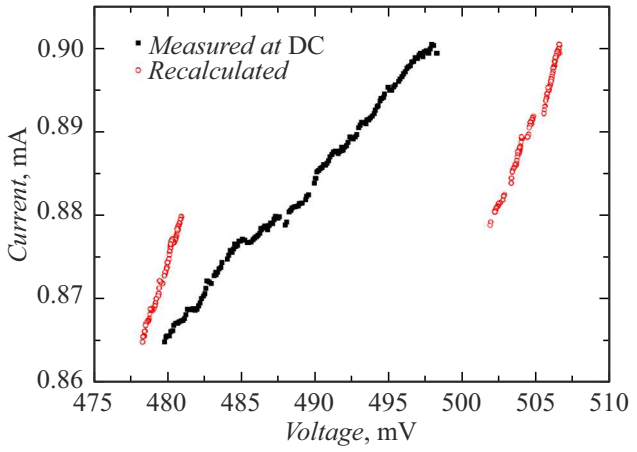

Рис. 7. Участок ВАХ массива, измеренный на постоянном токе и восстановленный из измерений спектра по формуле Джозефсона в расчете на $N = 350$ переходов. Виден внутренний захват частоты генерации.

диэлектрическая проницаемость кремниевой подложки, на которой изготовлен образец.

Расстояние между участками ВАХ, восстановленными по формуле Джозефсона, как можно видеть из рис. 7, составляет примерно 19 mV, что соответствует частоте 27 GHz. Расчет по формуле (3) при длине копланарной линии $L = 2$ mm дал величину 30 GHz, что с учетом дисперсии диэлектрической проницаемости в копланарной линии [21] совпадает с измеренным значением.

Следует отметить, что массив из 350 переходов состоит из двух секций — 200 и 150 переходов длиной 2 и 1.5 mm соответственно, разделенных поворотом на 180° (рис. 1, *b*). Участок схемы с гармоническим смесителем подсоединен к секции с 200 переходами, и резонансные частоты определяются именно длиной данной секции.

Также на восстановленной ВАХ были обнаружены четыре дополнительных участка, между которыми обнаруживается скачок по частоте, и генерация не может быть измерена. Причем ширина линии генерации на этих участках увеличивается от середины к краям. Причина возникновения данной „тонкой структуры“ является предметом дальнейшего исследования.

3.4. Сравнение ширины линии генерации с теоретическими моделями

Сравнение полученных экспериментально значений ширины линии генерации с расчетами показано на рис. 8. Черные точки с планками погрешностей соответствуют экспериментальным значениям, а красные круги — теоретическим.

Зависимость ширины линии генерации квадратична по R_d, как это следует из флуктуационно-диссипационной теоремы. Точное значение коэффициента пропорциональности в случае одного перехода можно определить по формуле из модели Роговина-Скалапино [22]:

$$\delta f = \left(\frac{4\pi e}{h}\right)^2 R_d^2 S_I(0), \tag{4}$$

где $S_I(0)$ — спектральная плотность шума на нулевой частоте. Данная величина включает в себя несколько составляющих: шум непосредственно на переходах в массиве $S_{I,2}(0)$, низкочастотный шум, действующий на массив, $S_{I,1}(0)$ и тепловой шум, в частности, на шунтах $S_{I,0}(0)$. Полная спектральная плотность шума в формуле (4) получится в результате сложения всех составляющих.

$$S_{I,2}(0) = \frac{e}{2\pi}\left(I_{qp}\coth\left(\frac{eV_0}{2k_BT}\right) + 2I_p\coth\left(\frac{eV_0}{k_BT}\right)\right),$$

$$S_{I,0}(0) = \frac{e}{2\pi}I_{qp}\left(\frac{R_N}{R_d}\right)^2, \tag{5}$$

где I_{qp} и I_p — квазичастичный ток и ток куперовских пар соответственно; V_0 — напряжение на переходе в рабочей точке, T — температура в эксперименте, R_N — активное сопротивление шунтов. Квазичастичный ток в туннельном переходе при напряжениях до щелевого достаточно мал: отношение дифференциального сопротивления к нормальному более 20. Поэтому в рамках производимых оценок мы положили I_{qp} много меньшим I_p, который равен критическому току по порядку величины.

В случае массива из N переходов, как это было уже сказано ранее, ожидается, что величина δf будет в N раз меньше. Красные точки на рис. 8 получены при подстановке $S_I(0) = S_{I,2}(0)$. Экспериментальные и теоретические значения совпадают в пределах погрешностей эксперимента при значениях R_d, больших 0.1 Ω.

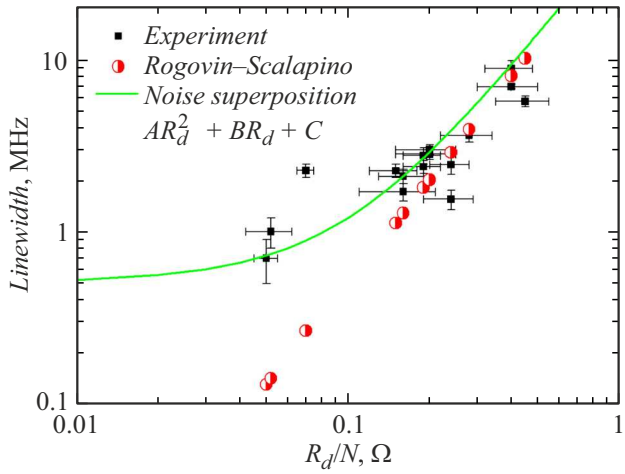

Рис. 8. Зависимость ширины линии генерации от дифференциального сопротивления в рабочих точках при различных напряжениях массива. Параметры зеленой кривой: $A = 50$, $B = 2$, $C = 0.5$.

При меньших значениях дифференциального сопротивления тепловые и низкочастотные шумы, присутствующие в системе, приводят к уширению линии. Качественно можно учесть вклад тепловых шумов, введя дополнительное слагаемое, не зависящее от R_d. А наличие низкочастотных флуктуаций, которые не получается подавить системой частотной стабилизации, приводит к появлению слагаемого, линейного по R_d. Функция вида $y(R_d) = A \cdot R_d^2 + B \cdot R_d + C$ показана на рис. 8 зеленой линией [23]. Здесь A, B и C — некоторые размерные параметры, связанные с соответствующими спектральными плотностями флуктуаций. Детальное теоретическое описание также будет представлено в дальнейшем.

Заключение

В работе были исследованы спектральные свойства сверхпроводникового генератора терагерцового диапазона на основе массива джозефсоновских переходов, встроенных в центральный электрод копланарной линии. Апробирована методика измерения спектров генерации массива при смешении сигнала массива с излучением, приходящим от синтезатора, на гармоническом смесителе. В лучших точках ширина линии генерации менее 1 MHz. Для значений дифференциального сопротивления в расчете на один переход, больших 0.1 Ω, экспериментальные значения ширины линии генерации совпадают в пределах погрешности с теоретически рассчитанными по формуле Роговина-Скалапино, нормированной на количество переходов в массиве. Различие при малых R_d может быть объяснено путем учета дополнительных тепловых и низкочастотных шумов в системе.

Впервые продемонстрирована возможность фазовой автоподстройки частоты генератора на основе массива джозефсоновских переходов к стабильному внешнему источнику. Спектральное качество сигнала в режиме ФАПЧ превышает 80 %. Область синхронизации по току при этом составляет более 10 % от величины тока в рабочей точке.

По измерениям спектра обнаружен захват частоты генерации, который обусловлен взаимодействием переходов с излучением в копланарной линии. Данный эффект проявляется в том, что при непрерывном изменении напряжения на массиве частота генерации изменяется непропорционально напряжению, а при превышении некоторого значения испытывает переключение с одной моды копланарной линии на другую. Также в пределах одной серии без перескока между модами наблюдалось несколько областей, между которыми излучения обнаружено не было, а внутри каждой области ширина линии увеличивалась от середины к краям. Данный вопрос будет изучаться в дальнейшем.

Для генератора гетеродина необходима возможность непрерывной перестройки частоты, поэтому с целью устранения данного эффекта проектируются образцы с согласованной нагрузкой на неизлучающем конце. Таким образом, сделан еще один шаг к созданию сверхпроводникового интегрального генератора гетеродина на основе массива джозефсоновских переходов.

Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538).

Благодарности

Изготовление образцов выполнено с использованием уникальной научной установки „Криоинтеграл“ (УНУ № 352529) Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] *ALMA Space observatory Website.* Available online: https://www.almaobservatory.org/
[2] *Apex Space Telescope Website.* Available online: http://www.apex-telescope.org/
[3] *Hershel Space Telescope Website.* Available online: https://www.herschel.caltech.edu/
[4] *Вебсайт космической обсерватории „Миллиметрон“.* Available online: https://millimetron.ru/
[5] J.R. Tucker, M.J. Feldman. Rev. Modern Phys., **57** (4), 1055 (1985). DOI: 10.1103/RevModPhys.57.1055
[6] A.R. Kerr, M.J. Feldman, S.-K. Pan, *Proceedings of the Eighth International Symposium on Space Terahertz Technology* (Cambridge, MA, USA, 1997)
[7] M. Tinkham *Introduction to Superconductivity*, 2nd edition (McGraw-Hill, 1996), p. 77.
[8] J.V. Siles, K.B. Cooper, C. Lee, R.H. Lin, G. Chattopadhyay, I. Mehdi. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **8** (6), 596 (2018).
[9] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, O.V. Koryukin, A.V. Khudchenko, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, O.M. Pylypenko. IEEE Trans. Appl. Supercond., **15** (2), 960 (2005). DOI: 10.1109/TASC.2005.850138
[10] N.V. Kinev, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. Sensors, **20** (24), 7267 (2020). DOI: 10.3390/s20247267
[11] K.A. Baksheeva, R.V. Ozhegov, G.N. Goltsman, N.V. Kinev, V.P. Koshelets, A. Kochnev, N. Betzalel, A. Puzenko, P.B. Ishai, Yu. Feldman. IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **11** (4), 381 (2021). DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3066099
[12] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, J. Mygind, A.V. Ustinov. Phys. Rev. B, **56** (9), 5572 (1997). DOI: 10.1103/PhysRevB.56.5572
[13] D.D. Coon, M.D. Fiske. Phys. Rev., **138** (3A), A744 (1965). DOI: 10.1103/PhysRev.138.A744
[14] A.K. Jain, K.K. Likharev, J.E. Lukens, J.E. Sauvageau. Phys. Reports, **109** (6), 309 (1984). DOI: 10.1016/0370-1573(84)90002-4

[15] M. Darula, T. Doderer, S. Beuven. Supercond. Sci. Technol., **12** (1), R1 (1999). DOI: 10.1088/0953-2048/12/1/001
[16] M.A. Galin, I.A. Shereshevsky, N.K. Vdovicheva, V.V. Kurin. Supercond. Sci. Technol., **34** (7), 075005 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/abfd0b
[17] A. Kawakami, Y. Uzawa, Z. Wang. IEEE Transactions Appl. Supercond., **9** (2), 4554 (1999). DOI: 10.1109/77.784039
[18] Ф.В. Хан, Л.В. Филиппенко, А.Б. Ермаков, М.Е. Парамонов, М.Ю. Фоминский, Н.В. Кинев, В.П. Кошелец, С.А. Никитов. УФН, **195** (6), 621(2025). DOI: 10.3367/UFNr.2024.12.039864
[19] L.V. Filippenko, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, V.P. Koshelets, J.R. Gao. IEEE Trans. Appl. Supercond., **11** (1), 816 (2001). DOI: 10.1109/77.919469
[20] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.V. Khodos, V.L. Vaks, A.M Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind. Physica C: Superconductivity, **367** (1), 249 (2002). DOI: 10.1016/S0921-4534(01)01046-2
[21] D. Mirshekar-Syahkal, J.B. Davies. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **27** (7), 694 (2003). DOI: 10.1109/TMTT.1979.1129703
[22] D. Rogovin, D.J. Scalapino. Annals Physics, **86** (1), 1 (1974). DOI: 10.1016/0003-4916(74)90430-8
[23] K.K. Likharev. *Dynamics of Josephson junctions and circuits.* (Gordon and Breach science publishers, NY., 1986), p. 98.