

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 53.86

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2021 г. **П. Н. Дмитриев^a, А. Б. Ермаков^a, Н. В. Кинев^a, О. С. Киселев^{a, b},
Л. В. Филиппенко^a, М. Ю. Фоминский^a, В. П. Кошелец^{a, b, *}**

^aИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^bИнститут физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород, ГСП-105, 603950 Российская Федерация

*E-mail: valery@hitech.cplire.ru

Поступила в редакцию 28.04.2020 г.

После доработки 28.04.2020 г.

Принята к публикации 12.11.2020 г.

Разработаны, оптимизированы и исследованы сверхпроводниковые интегральные схемы, включающие гармонический смеситель с высоким номером гармоники на основе высококачественных туннельных переходов Nb–AlO_x–Nb и Nb–AlN–NbN. Приведены детали конструкции, методы изготовления и особенности работы сверхпроводниковых элементов и схем, предназначенных для детектирования и исследования терагерцового излучения криогенных интегральных генераторов. Зарегистрирован сигнал интегрального терагерцового генератора и оценена его мощность, а также измерен спектр излучения с разрешением порядка 1 Гц. Реализована синхронизация сверхпроводникового генератора на любой частоте в диапазоне 250...750 ГГц со спектральным качеством более 50%, а также измерены фазовые шумы генератора в режиме ФАПЧ.

DOI: 10.31857/S0033849421040033

ВВЕДЕНИЕ

Идея использовать сверхпроводниковые переходы в качестве интегральных детекторов терагерцового (ТГц) излучения, создаваемого находящимся на той же подложке генератором, представляется очень естественной; она была реализована во многих экспериментальных работах [1–5]. В первых работах воздействие излучения ТГц-генератора регистрировалось по изменению вольт-амперной характеристики (ВАХ) сверхпроводникового детекторного перехода; при этом возможно не только зафиксировать факт наличия излучения, но и в рамках существующих моделей оценить мощность сигнала. Более того, использование сверхпроводникового туннельного перехода в качестве смесителя позволяет измерить спектр интегрального генератора гетеродина [3, 5]. Применение гармонических смесителей в составе сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) [6] позволило создать практические устройства для мониторинга атмосферы [7] и измерения спектра излучения новых твердотельных генераторов ТГц-диапазона [8]. Однако детали конструкции и особенности работы этих принципиально важных элементов в составе интегрального приемника не были до настоящего времени достаточно подробно описаны. В данной

статье приводится детальное описание принципов работы интегральных гармонических детекторов и смесителей, обсуждаются различные конструкции и топологии таких элементов и устройств, а также результаты их применения в составе интегральных приемных систем и возможности их использования при создании вновь разрабатываемых сверхпроводниковых генераторов ТГц-диапазона.

1. КОНСТРУКЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

В качестве интегрального приемного элемента традиционно используется туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС), который, как правило, изготавливается одновременно с генератором ТГц-излучения. При разработке конструкции и выборе параметров интегрального сверхпроводникового смесителя следует учитывать несколько важных факторов. Во-первых, СИС-переход с толщиной барьера порядка 1 нм имеет высокую удельную емкость $C_{уд}$ (примерно 0.08 пФ/мкм²), это приводит к существенному шунтированию нелинейного сопротивления перехода $R_{Bq}(V)$ на высокой частоте. На частотах 300...700 ГГц актив-

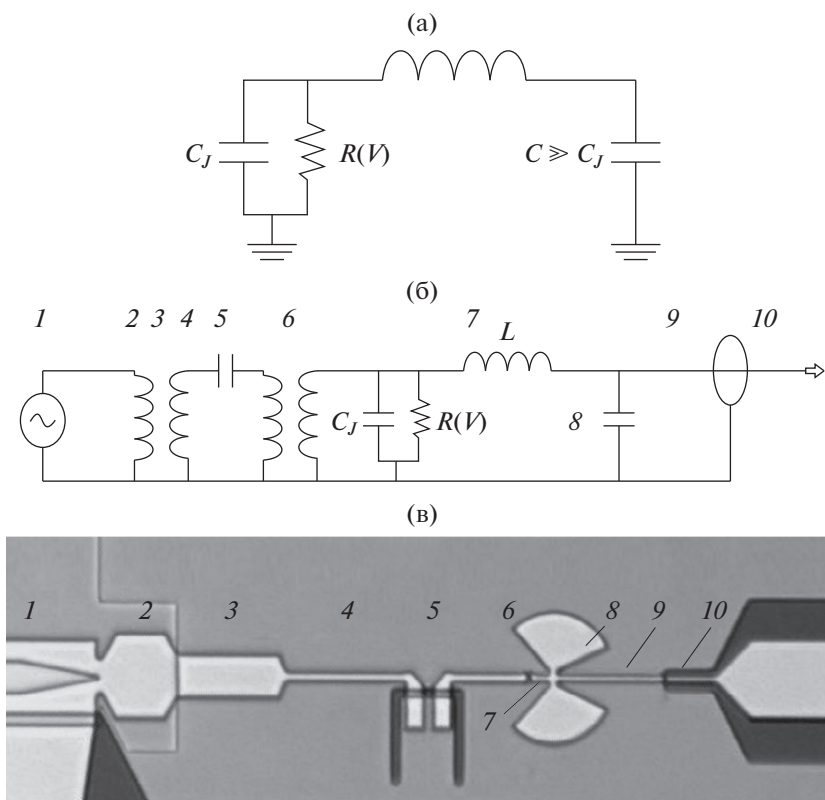


Рис. 1. Эквивалентная схема СИС-перехода с элементами для отстройки паразитной емкости на рабочей частоте (а); упрощенная схема интегральной структуры (б) и фото (в) интегральной структуры для исследования излучения генератора на основе распределенного джозефсоновского перехода: 1 – генератор на основе распределенного джозефсоновского перехода (показан только небольшой фрагмент перехода с сужением); 2–4 – секции трехступенчатого трансформатора импеданса; 5 – развязка по постоянному току; 6 – односекционный трансформатор импеданса; 7 – СИС-переход с индуктивной секцией для отстройки емкости СИС-перехода в рабочем диапазоне частот; 8 – радиальные секторы, образующие емкость для замыкания индуктивной по высокой частоте секции на нижний электрод; 9 – четвертьволновой отрезок микрополосковой линии для подключения СИС-перехода; 10 – выходная копланарная линия.

ная часть импеданса перехода порядка его нормального сопротивления R_N . Параметр γ , характеризующий степень шунтирования, может быть записан следующим образом:

$$\gamma = 2\pi f R_{вч} C_{уд} A, \tag{1}$$

где f – частота излучения, A – площадь перехода. Для нормального сопротивления СИС-перехода 25 Ом и площади 1 мкм² параметр $\gamma = 6.5$ на частоте 500 ГГц; это означает, что большая часть СВЧ-тока протекает через емкость перехода $C_J = C_{уд} A$. Паразитная емкость может быть “отстроена” на рабочей частоте путем подключения небольшой индуктивности, выполненной, как правило, в виде отрезка микрополосковой линии длиной в несколько микрометров. Индуктивность не должна шунтировать переход по постоянному току, для подсоединения индуктивности только по высокой частоте служит “блокировочная” емкость (рис. 1а), которая может быть реализована с помощью широкополосных радиальных замыкателей. Следует отметить, что диапазон отстройки Δf

составляет лишь небольшую часть от центральной частоты ($\Delta f \approx 2f/\gamma$), чем выше плотность тока перехода, тем ниже γ и тем шире рабочий диапазон смесителя.

Импеданс СИС структуры с отстроенной емкостью очень мал:

$$\text{Re}Z_{\text{СИС}} = R_{вч} / (1 + \gamma^2), \tag{2}$$

для согласования с другими элементами требуется использование трансформаторов импеданса. Кроме того, для обеспечения независимого питания генератора и смесителя требуется развязка этих элементов по постоянному току, которая не будет препятствовать прохождению сигнала высокой частоты от генератора к смесителю. Следует также учесть, что выходной импеданс генератора составляет доли ома, что делает необходимым использование многосекционного трансформатора импеданса для согласования со схемой развязки и подключения к смесителю.

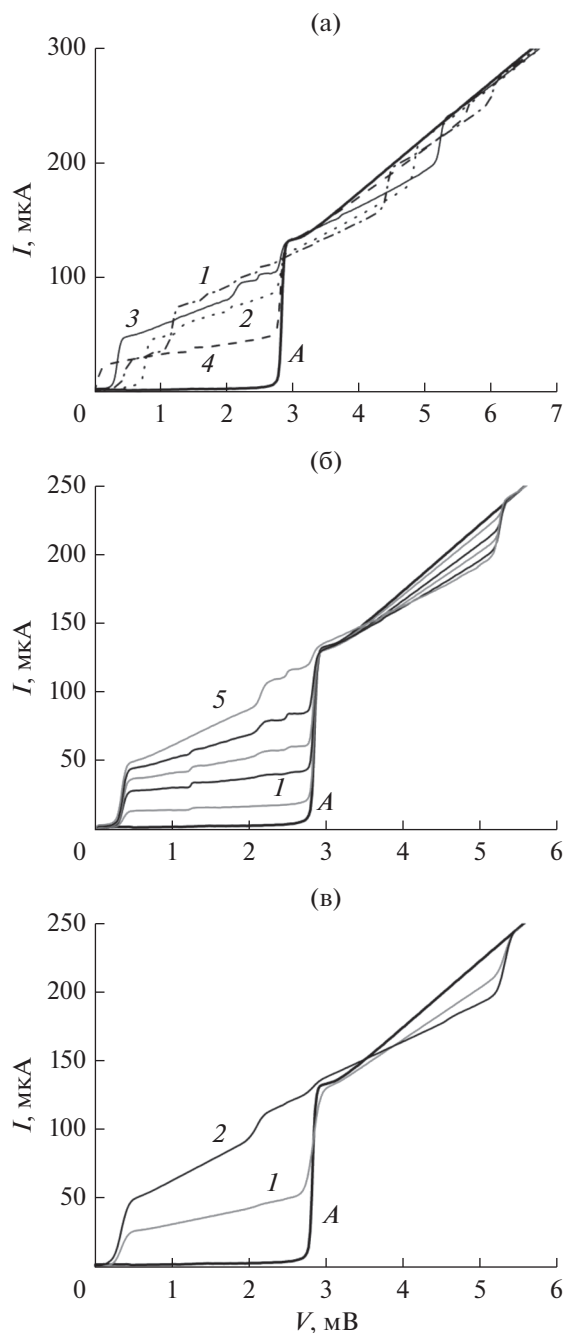


Рис. 2. ВАХ туннельного перехода $\text{Nb}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ (а) площадью 1.4 мкм^2 при воздействии мощности СГГ на частотах 400 (1), 500 (2), 600 (3) и 700 ГГц (4); ВАХ СИС-перехода при различных значениях мощности СГГ на частоте 600 ГГц (б); модельные ВАХ при $\alpha = 0$, 1 (1) и 2 (2). Кривой А на всех рисунках показана автономная ВАХ.

На рис. 1б представлена упрощенная схема структуры для исследования излучения генератора ТГц-излучения, а на рис. 1в — фотография экспериментальной интегральной структуры с сверхпроводниковым генератором гетеродина (СГГ) на

основе распределенного джозефсоновского перехода. На рис. 1в представлен конкретный вариант СГГ, однако схема может быть использована для исследования любого другого криогенного тонкопленочного генератора. В работе приведены результаты исследования интегральных схем, изготовленных на основе туннельных структур $\text{Nb}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ и $\text{Nb}-\text{AlN}-\text{NbN}$. Технология изготовления сверхпроводниковых интегральных структур на основе высококачественных туннельных переходов была разработана и оптимизирована в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [9–11]; эта технология была апробирована при изготовлении малошумящих приемных устройств ТГц-диапазона для радиоастрономии и интегральных приемников для мониторинга атмосферы и лабораторных применений [7, 12–14]. Основные элементы согласующих схем выполнены в виде отрезков микрополосковых линий на основе пленок ниобия; в качестве изолятора был использован слой двуокиси кремния SiO_2 толщиной 400 нм (в первой секция трансформатора толщина SiO_2 составила 200 нм).

Вольтамперная характеристика (ВАХ) смешительного туннельного перехода $\text{Nb}-\text{AlO}_x-\text{Nb}$ площадью 1.4 мкм^2 показана на рис. 2а (кривая А). Нормальное сопротивление перехода составляет 20 Ом, отношение сопротивления под щелью к нормальному сопротивлению (параметр качества) около 30, величина суммарной энергетической щели $V_{\text{щ}} = 2.8 \text{ мВ}$. Емкость туннельного перехода отстроена в широкой полосе частот, это позволяет регистрировать излучение от 400 до 700 ГГц (см. рис. 2а). На рисунке хорошо видны квазичастичные ступени тока, обусловленные стимулированным туннелированием электронов под действием фотонов. Ступени “растут” от щелевой особенности, их положение определяется выражением

$$V = V_{\text{щ}} \pm hf/e, \quad (3)$$

где h — постоянная планка, f — частота излучения, e — заряд электрона. Измеряя ток накачки при напряжении на ступени, можно оценить мощность излучения, дошедшую до детектора (рис. 2б). Оценить мощность, выделившуюся в переходе, можно путем сравнения эксперимента с расчетами в рамках теории Тукера и Фелдмана [15], для расчета была использована модельная ВАХ (см., например, [16]). Модельная ВАХ полностью совпадает с экспериментальной зависимостью (ср. кривые А на рис. 2в и 2а). На рис. 2в показаны также расчетные кривые для двух значений высокочастотного напряжения $V_{\text{вч}}$ для частоты накачки 600 ГГц. Для описания квазичастичных ступеней тока основным параметром является нормированное значение высокочастотного напряжения

$$\alpha = eV_{\text{вч}}/hf. \quad (4)$$

На рисунке показаны расчетные ВАХ при двух значениях α 1 и 2; отметим, что первое значение соответствует оптимальному уровню накачки для работы малошумящих СИС-смесителей. Видно, что расчетные зависимости достаточно хорошо описывают экспериментальные кривые (рис. 2б), небольшие отклонения связаны с необходимостью учитывать влияние внешней электродинамической системы, которое зависит от частоты. На экспериментальных кривых при напряжениях примерно 1.2 и 2.4 мВ видны джозефсоновские ступени тока ($V_{Дж} = nhf/2e$), эти ступени позволяют достаточно точно определить частоту излучения в случае неполного подавления критического тока.

Для точной оценки выделившейся в переходе мощности необходимо знать величину действительной части высокочастотного импеданса СИС-перехода $Re Z_{ВЧ}$. Эта величина может быть вычислена в рамках модели [15], однако в реальной ситуации необходимо учитывать импеданс внешней электродинамической системы. Для оценки мощности сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ) необходимо также учитывать его согласование с приемным элементом. Эти расчеты требуют учета особенностей поведения сверхпроводниковых пленок на высокой частоте и знание параметров всех структур. На рис. 3а представлены результаты расчета согласования СГГ с СИС-переходом θ для трех значений площади перехода. На рис. 3б показана зависимость тока накачки СИС-перехода, измеренная при напряжении 2.5 мВ, в зависимости от частоты СГГ. Ток накачки СИС-перехода характеризует мощность принятого ВЧ-сигнала, что в свою очередь определяется согласованием элементов схемы. Видно, что экспериментальная зависимость достаточно хорошо соответствует расчету, провал на частоте 550 ГГц, по-видимому, вызван резонансами в структуре, которые не были учтены в модели, а также неполным соответствием экспериментальных параметров структуры значениям, используемых в модели. Следует отметить, что в расчете была использована модель идеального проводника и не учитывалось возрастание потерь в пленках ниобия на частотах выше энергетической щели (порядка 720 ГГц). Превышение экспериментальных значений тока накачки над результатами модели при частотах ниже 400 ГГц обусловлено тем фактом, что излучение СГГ содержит вторую и третью гармоники. При основной частоте СГГ 300 ГГц, на которой согласование невелико, вторая гармоника на частоте 600 ГГц хорошо согласована, что приводит к накачке смесителя, которая фиксируется как воздействие на основной частоте 300 ГГц. Таким образом, правильно спроектированная схема на основе сверхпроводникового перехода позволяет

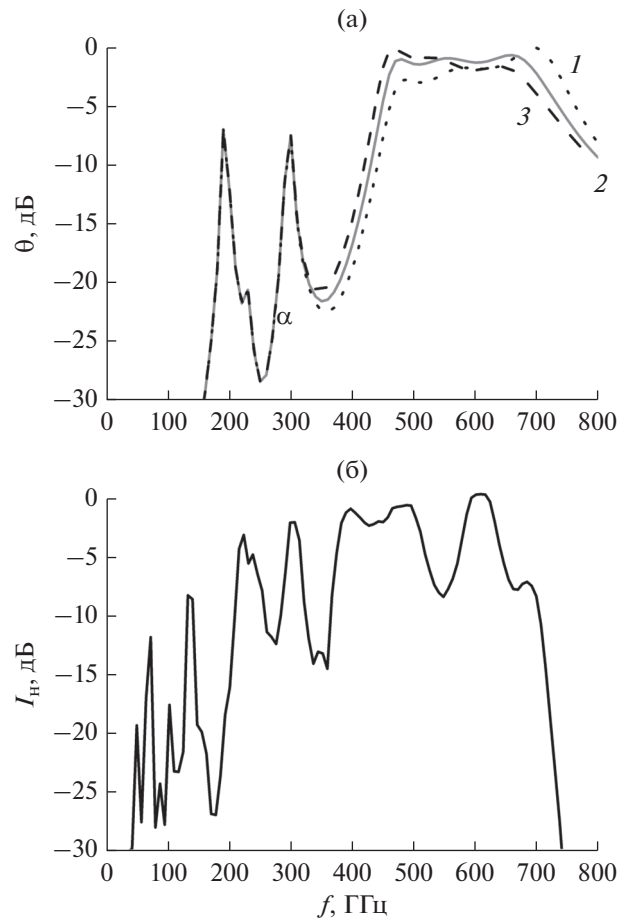


Рис. 3. Рассчитанные импедансы СГГ и СИС-перехода θ в зависимости от частоты (а) для схемы, представленной на рис. 1, при $A = 1.1$ (1), 1.4 (2), 1.7 (3); экспериментальная зависимость тока накачки СИС-перехода I_n (б) при напряжении 2.5 мВ от частоты СГГ (ток накачки нормирован на максимальное значение при частоте 600 ГГц).

измерять сигнал СГГ ТГц-диапазона, оценивать его частоту и мощность.

2. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ГАРМОНИЧЕСКИЙ СМЕСИТЕЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СГГ И ЕГО ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Описанную выше интегральную структуру можно использовать не только для детектирования сигнала СГГ, но и для измерения спектра его излучения, а также для стабилизации частоты СГГ [5, 17–21]. Схема такого эксперимента представлена на рис. 4. Основным элементом является туннельный СИС-переход, который используется как гармонический смеситель с высоким номером гармоники [22–24]. Сигнал от опорного синтезатора (10) $f_{снт}$ с частотой порядка 20 ГГц через направленный ответвитель 1 подается на СИС-пере-

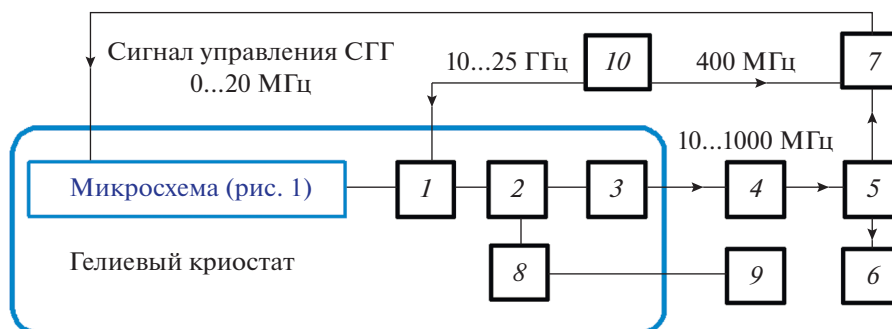


Рис. 4. Блок-схема системы для измерения спектров излучения СГГ и его фазовой синхронизации: 1 – направленный ответвитель для ввода опорного сигнала диапазона 10...25 ГГц, 2 – объединитель сигналов ПЧ и постоянного тока, 3 – криогенный НЕМТ-усилитель диапазона 10...1000 МГц, 4 – дополнительный усилитель, 5 – разветвитель, 6 – спектроанализатор, 7 – система фазовой автоподстройки частоты с частотным детектором, 8 – криогенные фильтры для гармонического смесителя, 9 – блок задания смещения и измерения для гармонического смесителя, 10 – синтезатор.

ход, в котором “ n ” гармоника сигнала синтезатора смешивается с сигналом СГГ с частотой $f_{\text{СГГ}}$. Разностный сигнал на промежуточной частоте $f_{\text{пч}}$ (порядка 1 ГГц)

$$f_{\text{пч}} = \pm(f_{\text{СГГ}} - nf_{\text{синт}}) \quad (5)$$

подается на криогенный усилитель 3 на основе НЕМТ (high electron mobility transistor) (шумовая температура приблизительно 5 К, усиление 30 дБ), выводится из криостата и попадает на дополнительный усилитель 4 (регулируемое усиление 40...60 дБ). Далее преобразованный сигнал разветвляется на спектроанализатор 6 для записи спектров и на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с дополнительным частотным детектором 7. Частотный детектор с полосой регулирования порядка 10 кГц стабилизирует частоту, устраняя низкочастотные наводки и дрейфы температуры (см. рис. 5а). На рисунке показана зависимость выходного сигнала ПЧ $P_{\text{пч}}$ от частоты; видна автономная линия излучения СГГ на основе распределенного туннельного перехода Nb–AlO_x–Nb, ширина линии $\delta f = 1$ МГц определяется разрешением спектроанализатора, отношение сигнал/шум равно 45 дБ. Реальная ширина линии 0.5 МГц (см. рис. 5б), где та же линия измерена с разрешением 100 кГц. При использовании системы ФАПЧ входящий сигнал сравнивается с опорным сигналом 400 МГц от синтезатора, сигнал фазовой ошибки подается на СГГ для стабилизации его частоты. Результат представлен на рис. 5в; отношение сигнала в центральном пике к полной мощности, так называемое спектральное качество (СК), составляет 97.5%. Полоса регулирования системы ФАПЧ около 17 МГц, она определяется длиной кабелей от гармонического смесителя до ФАПЧ и обратно к СГГ. Следует отметить, что соотношение этой величины и автономной ширины линии генерации СГГ определяет итоговое СК: чем больше ширина линии, тем меньшее значение СК может быть получено [25].

Величина относительных фазовых шумов СГГ в режиме ФАПЧ Ψ в зависимости от величины отстройки Δf от центральной частоты f представлена на рис. 6 (кривая 1). Эти шумы были измерены относительно опорного синтезатора; для того чтобы получить значения абсолютных фазовых шумов, необходимо добавить шумы опорного синтезатора (кривая 2), умноженные на квадрат номера гармоники ($n = 20$); величина абсолютных фазовых шумов представлена кривой 4.

Следует отметить, что разработанная методика позволяет проводить измерения спектра излучения генератора и обеспечивать режим ФАПЧ даже при небольшом уровне мощности СГГ, достигающей до гармонического смесителя. На рис. 7 представлены ток гармонического смесителя, индуцированного СГГ на частоте 670 ГГц (без подачи сигнала синтезатора), и величины итогового СК в зависимости от тока смещения СГГ (эта величина определяет мощность, излучаемую СГГ). Из рисунка видно, что предельное значение СК (определяемого параметрами СГГ) может быть реализовано уже при небольшой мощности входящего сигнала (ток смещения СГГ 14 мА). Эта мощность вызывает лишь небольшой индуцированный ток на гармоническом смесителе (4% от максимального тока накачки). Кроме того, в СИС-переходе сосуществуют два режима преобразования. Первый режим, который в настоящее время повсеместно используется, – квазичастичный, основанный на эффекте стимулированного туннелирования электронов под действием фотонов [15, 22], при этом критический ток подавляется внешним магнитным полем, и поэтому удается получать шумовые температуры, близкие к квантовому пределу hf/k_B [7, 14, 15]. Второй режим – джозефсоновский, с использованием нелинейности сверхпроводящего тока, позволяет получать меньшие потери преобразования, но характеризуется большим уровнем шума. Исследованию и сравнению этих двух режимов посвящены работы

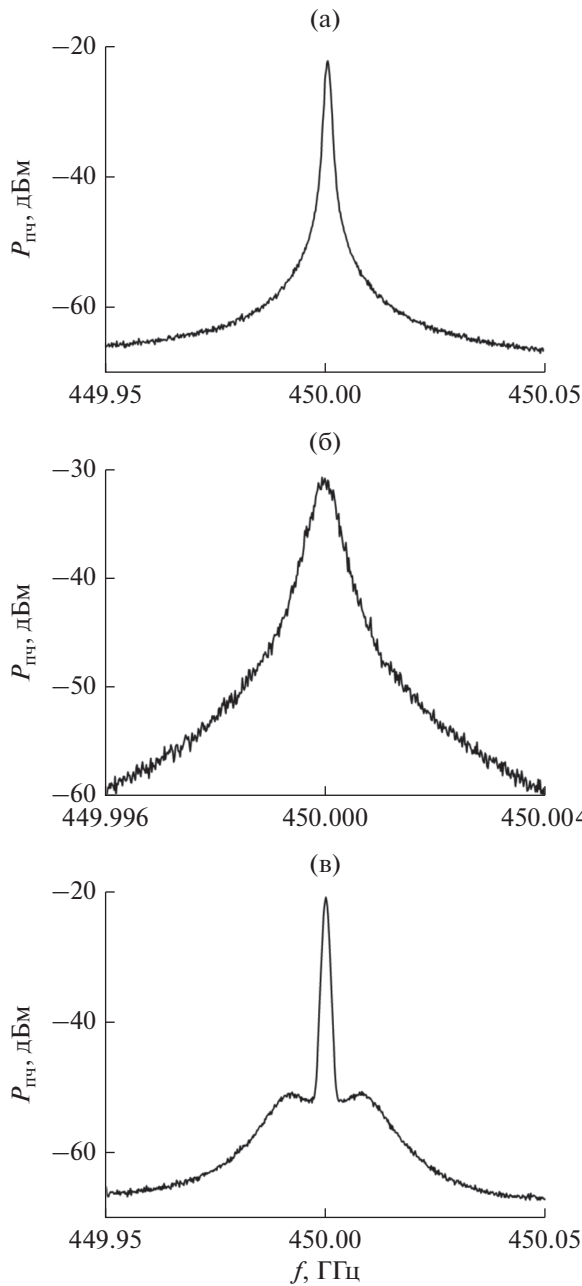


Рис. 5. Спектр излучения СГГ на частоте 450 ГГц, измеренный с помощью гармонического смесителя: в режиме частотной стабилизации при полосе разрешения спектроанализатора 1 (а) и 100 МГц (б) и в режиме фазовой стабилизации при разрешении 1 МГц (в).

[23, 24]. В них показано, что при работе в режиме джозефсоновского смесителя с высоким номером гармоники, присутствие мощного сигнала гетеродина позволяет реализовывать близкие значения отношения сигнал/шум для обоих случаев, при этом выходной сигнал джозефсоновского смесителя на 1...2 порядка превосходит сигнал квазичастичного, что важно для эффективной работы системы ФАПЧ.

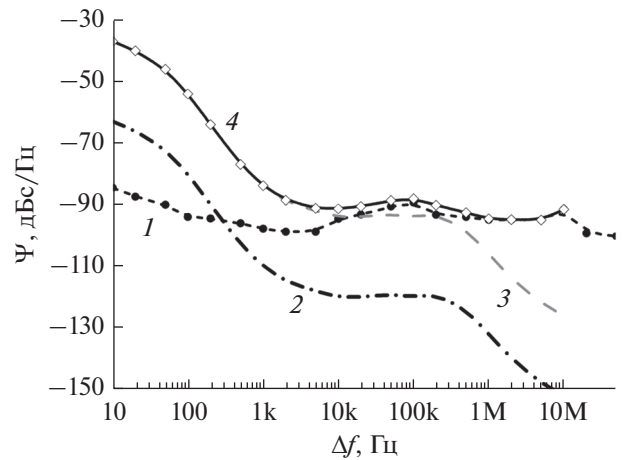


Рис. 6. Фазовый шум СГГ Ψ на частоте 450 ГГц в зависимости от величины отстройки Δf от несущей частоты f (кривая 1), фазовый шум опорного синтезатора на основной частоте 22.48 ГГц (кривая 2) и на 20 гармонике (кривая 3), а также полный (абсолютный) фазовый шум такого генератора в режиме ФАПЧ с учетом вклада шумов синтезатора (кривая 4).

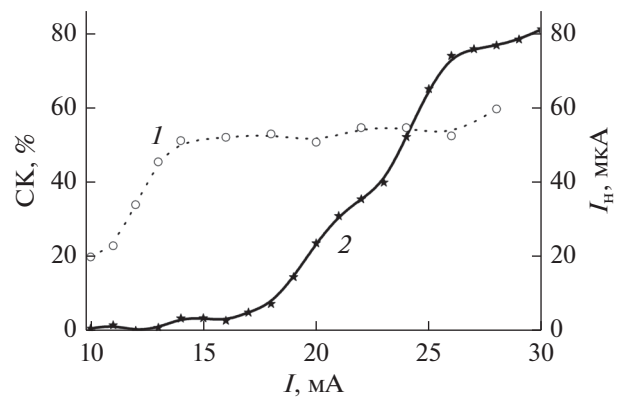


Рис. 7. Спектральное качество СГГ в режиме ФАПЧ на частоте 670 ГГц (кривая 1) и соответствующий ток накачки гармонического смесителя в зависимости от тока питания генератора (кривая 2).

Разработанная методика и использование “смешанного” режима преобразования (без подавления джозефсоновского тока) позволяют проводить измерения линии излучения криогенных генераторов в очень широком диапазоне частоты с использованием только одного интегрального гармонического смесителя. Пример таких измерений на частотах от 250 до 750 ГГц для двух типов СГГ представлен на рис. 8, где сравниваются результаты для лучших реализаций генераторов на основе распределенных переходов Nb–AlO_x–Nb и Nb–AlN–NbN [25]. Вследствие эффекта джозефсоновской самонакачки [26] на напряжениях $V_{ш}/3$ в СГГ резко возрастает затухание, что приводит к уширению линии δf и снижению спектрального качества в переходной области напряжений чуть выше $V_{ш}/3$. Для переходов Nb–AlO_x–Nb переход

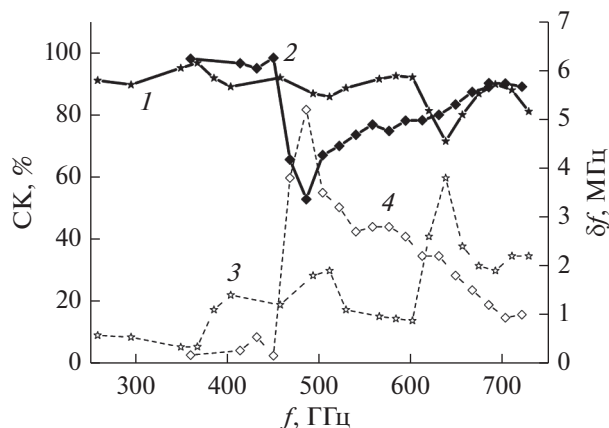


Рис. 8. Ширина автономной линии излучения СГГ δf (3, 4) и результирующее спектральное качество (СК) СГГ в режиме ФАПЧ (1, 2) в зависимости от частоты генератора: для СГГ на основе структур Nb–AlN–NbN (1, 3) и Nb–AlO_x–Nb (2, 4).

происходит на частоте 450 ГГц, а для Nb–AlN–NbN – на 600 ГГц. Проведенные измерения позволили разработать и успешно испытать интегральные приемные устройства для практических приложений с требуемыми частотными характеристиками [6–8, 25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, приведено детальное описание принципов работы интегральных гармонических детекторов и смесителей, рассмотрены различные конструкции и топологии таких элементов, а также результаты их применения в составе интегральных приемных устройств. Показано, что на основе разработанного подхода возможно измерение спектра криогенных генераторов гетеродина в диапазоне 250...750 ГГц, а также обеспечивать режим их ФАПЧ со спектральным качеством от 50 до 98% во всем частотном диапазоне. Проведенные разработки позволили создать интегральные приемные устройства для мониторинга атмосферы Земли и лабораторных приложений [7, 8, 25]. Аналогичные подходы могут быть использованы для исследования вновь разрабатываемых сверхпроводниковых генераторов ТГц-диапазона [27], создаваемых для изучения новых стратегий взаимной синхронизации больших массивов джозефсоновских контактов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-42-04415). Туннельные переходы были изготовлены в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках государственного задания с использованием УНУ 352529.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 6. P. 3302.
2. Wan K.L., Jain A.K., Lukens J.E. // IEEE Trans. 1989. V. MAG-25. № 2. P. 1076.
3. Zhang Y.M., Winkler D., Claeson T. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. № 24. P. 3195.
4. Koshelets V.P., Shchukin A.V., Shitov S.V., Filippenko L.V. // IEEE Trans. 1993. V. AS-3. № 1. P. 2524.
5. Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. № 5. P. 699.
6. Koshelets V.P., Shitov S.V. // Superconductor Sci. Technol. 2000. V. 13. № 5. P. R53.
7. de Lange G., Boersma D., Dercksen J. et al. // Superconductor Sci. Technol. 2010. V. 23. № 4. P. 045016.
8. Li M., Yuan J., Kinev N. et al. // Phys. Rev. B. 2012. V. 86. № 6. P. 060505(R).
9. Koshelets V.P., Kovtonyuk S.A., Serpuchenko I.L. et al. // IEEE Trans. 1991. V. MAG-27. № 2. P. 3141.
10. Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al. // IEEE Trans. 2001. V. AS-11. № 1. P. 816.
11. Dmitriev P.N., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V. et al. // IEEE Trans. 2003. V. AS-13. № 2. P. 107.
12. Koshelets V.P., Ermakov A.B., Filippenko L.V. et al. // IEEE Trans. 2007. V. AS-17. № 2. P. 336.
13. Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Faley M.I. et al. // IEEE Trans. 2015. V. TST-5. № 4. P. 687.
14. Rudakov K.I., Dmitriev P.N., Baryshev A.M. et al. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 7–8. P. 613.
15. Tucker J.R., Feldman M.J. // Rev. Mod. Phys. 1985. V. 57. № 4. P. 1055.
16. Шитов С.В. Интегральные устройства на сверхпроводниковых туннельных переходах для приемников миллиметровых и субмиллиметровых волн: Дис. докт. физ.-мат. наук. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2003. 428 с.
17. Koshelets V.P., Shitov S.V., Dmitriev P.N. et al. // Physica C. 2002. V. 367. № 1–4. P. 249.
18. Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V. et al. // IEEE Trans. 1999. V. AS-9. № 2. P. 4133.
19. Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. № 1. P. 289.
20. Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V. et al. // J. Appl. Phys. 2019. V. 125. № 15. P. 151603.
21. Kinev N.V., Rudakov K.I., Filippenko L.V. et al. // IEEE Trans. 2019. V. TST-9. № 6. P. 557.
22. Калашиников К.В., Худченко А.В., Барышев А.М., Кошелец В.П. // РЭ. 2011. Т. 56. № 6. С. 751.
23. Калашиников К.В., Артанов А.А., Филипченко Л.В., Кошелец В.П. // ФТТ. 2016. Т. 58. № 11. С. 2117.
24. Kalashnikov K.V., Artanov A.A., de Lange G., Koshelets V.P. // IEEE Trans. 2018. V. AS-28. № 4. P. 2400105.
25. Dmitriev P.N., Filippenko L.V., Koshelets V.P. Josephson Junctions. History, Devices, and Applications / Eds. by E. Wolf, G. Arnold, M. Gurvitch, J. Zasadzinski. Boca Raton: CRC Press, 2017. P. 185.
26. Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V. et al. // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. № 9. P. 5572.
27. Galin M.A., Borodianskyi E.A., Kurin V.V. et al. // Phys. Rev. Appl. 2018. V. 9. № 5. P. 054032.