

УДК 621.382.2

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕЗАСТРУКТУРЫ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ *Н. В. Кинев*¹, *Л. В. Филиппенко*¹, *М. Ю. Ли*², *Д. Юань*², *Х. Б. Ван*², *В. П. Кошелец*¹¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, Россия² Нанкинский университет, г. Нанкин, Китай

В работе представлены экспериментальные результаты исследования спектров излучения генератора на основе мезаструктуры из высокотемпературного сверхпроводникового кристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Изучены режимы работы генератора, получено терагерцовое излучение в диапазоне 450–750 ГГц и измерена лоренцева форма спектральной линии. Установлено, что наименьшая ширина линии генерации составляла 6 МГц. Продемонстрирована возможность фазовой стабилизации излучения генератора.

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия уделяется повышенное внимание перестраиваемым генераторам терагерцового диапазона частот. Особенно они востребованы в астрофизике и радиоастрономии [1, 2], также представляют интерес для медицинской диагностики [3–5] и систем безопасности [5, 6].

Сложность разработки таких устройств обусловлена так называемой «терагерцовой щелью» — достаточно широкой областью частот, в которой становятся малоэффективными либо совсем неэффективными физические процессы, хорошо работающие как в более низкочастотном радиодиапазоне, так и в более высокочастотном инфракрасном диапазоне. Более того, с развитием науки и техники требования к терагерцовым генераторам всё время повышаются. Основными из них являются высокая стабильность сигнала, достаточная мощность для той или иной задачи, а также наличие определённых спектральных характеристик, которые обуславливают частотное разрешение супергетеродинных приёмников, когда терагерцовый генератор используется в качестве гетеродина.

Одним из наиболее перспективных типов генераторов, предложенных сравнительно недавно, являются устройства на основе высокотемпературных сверхпроводниковых купратов [7–9]. Основными преимуществами таких генераторов является их компактность, маленький вес и размер (по сравнению, например, с лампами обратной волны или лабораторными газовыми лазерами), что особенно важно для космических и радиоастрономических приложений, а также относительно низкая стоимость и простота изготовления. Кроме того, такие генераторы могут быть интегрированы в единое устройство со смесителем в цепи обратной связи для реализации фазовой стабилизации сигнала [10]. Такое составное устройство может работать как мощный высокостабильный гетеродин для терагерцовых приёмников и спектрометров нового поколения, способных покрыть большую часть «терагерцовой щели».

Наиболее перспективным представителем таких веществ, используемых в качестве основы для создания генераторов, является кристалл $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO). Несмотря на то, что джозефсоновская структура внутри такого материала на кристаллическом уровне была обнаружена более 20 лет назад [11], бурное исследование генераторов на его основе началось лишь недавно. Начало ему положила работа [12], в которой было экспериментально обнаружено сравнительно мощное электромагнитное излучение этого кристалла в терагерцовой области частот.

За последние 5 лет было опубликовано более 2000 работ в ведущих мировых научных изданиях по разработке и исследованию таких генераторов, как экспериментальных [13–16], так и теоретических [17–19]. Несмотря на огромный интерес, проявляемый к данному направлению криогенной электроники большим количеством научных групп во всём мире, лишь недавно авторы данной статьи измерили спектральные характеристики BSCCO-генератора с точностью, превышающей его автономную ширину линии генерации [20]. До этого все известные спектральные измерения излучения таких структур проводились при помощи фурье-спектрометров с разрешением хуже 1 ГГц (см., например, [21]).

В данной работе представлены результаты пионерских исследований спектральных характеристик генераторов на основе мезаструктур из монокристалла BSCCO, проведённых сотрудниками Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН совместно с коллегами из Нанкинского университета (г. Нанкин, Китай). Образцы генераторов были изготовлены на технологической платформе Института материаловедения в г. Цукуба (Япония). Конструкция генератора и экспериментальная установка для его исследования описаны в разделе 1. В разделе 2 приведены его вольт-амперные характеристики и описаны режимы его работы. Результаты исследования работы генератора на терагерцовых частотах и его спектральные характеристики представлены в разделе 3. Возможности стабилизации частоты и мощности генератора при помощи системы фазовой автоподстройки частоты обсуждаются в разделе 4. Выводы работы представлены в разделе 5.

1. КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

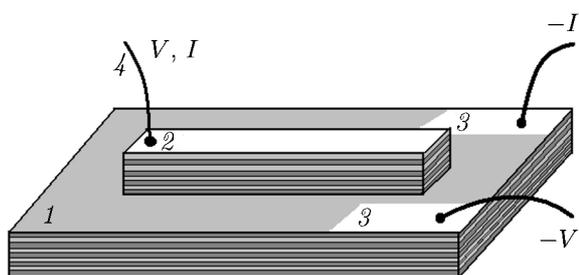


Рис. 1. Схематичное изображение генератора на основе высокотемпературной сверхпроводящей мезаструктуры: 1 — монокристалл $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$; 2 — меза с размерами 330×50 мкм; 3 — контактные площадки, выполненные из золота; 4 — проволоки для соединения с измерительным контуром

Генератор на основе высокотемпературного сверхпроводящего купрата $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ представляет собой монокристаллическую структуру, выполненную в форме мезы (слоистой структуры), полученной путём травления кристалла фокусированным ионным пучком аргона [15]. В таком материале на кристаллическом уровне имеется система последовательно соединённых джозефсоновских переходов. Сверхпроводимость в таких структурах обусловлена «парными» слоями (бислоями) CuO_2 с толщиной порядка 0,3 нм. Эти бислои разделены изолирующими слоями SrO и Bi_2O_3 , которые выступают в качестве барьеров, что естественным образом формирует в кристаллической решётке ячейки в виде джозефсоновских структур [7, 22]. Толщина ячейки (т. е. период кристаллической решётки) составляет 1,533 нм. Таким образом, кристалл с такой структурой, имеющий форму мезы с толщиной порядка 1,5 мкм содержит массив из $N \approx 1000$ последовательно соединённых идентичных джозефсоновских переходов. При приложении к такой структуре напряжения порядка 1 В (при этом напряжение на каждом переходе составляет величину порядка $1,0 \div 1,5$ мВ) на выходе имеется электромагнитный сигнал в терагерцовом диапазоне частот. На сегодняшний день достигнут уровень его мощности до десятков мкВт [23]. Характерные размеры мезаструктуры составляют порядка $100 \div 400$ мкм в длину и $30 \div 100$ мкм в ширину.

Исследуемый генератор на основе BSCCO-структуры и схема подключения к блокам смеще-

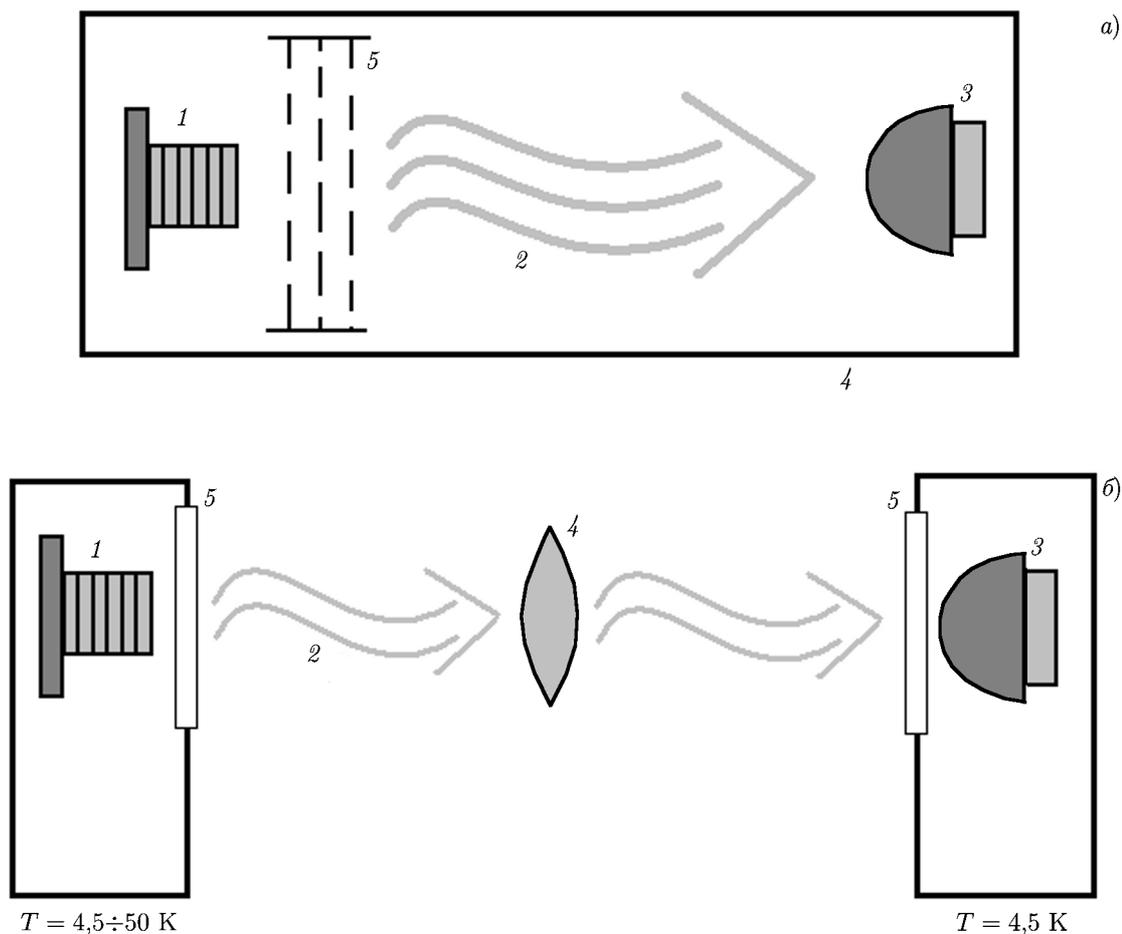


Рис. 2. Схемы установок для исследования спектральных характеристик генератора на основе кристалла $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$. Генератор 1 излучает терагерцовый сигнал 2, который регистрируется сверхпроводниковым интегральным приёмником 3, установленном на линзу. Панель (а) — расположение генератора и приёмника в едином криостате внутри магнитного экрана 4, при этом между устройствами установлено несколько (от одного до трёх) тепловых инфракрасных фильтров 5 из материала «Gortex». Панель (б) — расположение генератора и приёмника в различных криостатах; для сужения диаграммы направленности использована собирающая линза 4, на криостатах установлены окна 5

ния и измерения изображены на рис. 1. Исследование его работы проводилось в режиме задания тока смещения через структуру. Чтобы максимально снизить внешние флуктуации в системе задания тока и измерения напряжения, использован блок с аккумуляторными батареями, обладающими низким уровнем собственных шумов. Это позволяет избежать технических низкочастотных шумов, например сетевых наводок с частотой 50 Гц. Для возможности задания и контроля температуры генератора на держателе образца были смонтированы нагреватель и датчик температуры. Таким образом, в системе имелась возможность регулировать температуру в достаточно широких пределах: от 4,5 К (температура жидкого гелия) до величины порядка 100 К. При этом критическая температура перехода высокотемпературного сверхпроводника в нормальное состояние T_c составляет около 95 К.

Исследование спектральных характеристик генератора проводилось при помощи созданного в Институте радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН высокочувствительно-

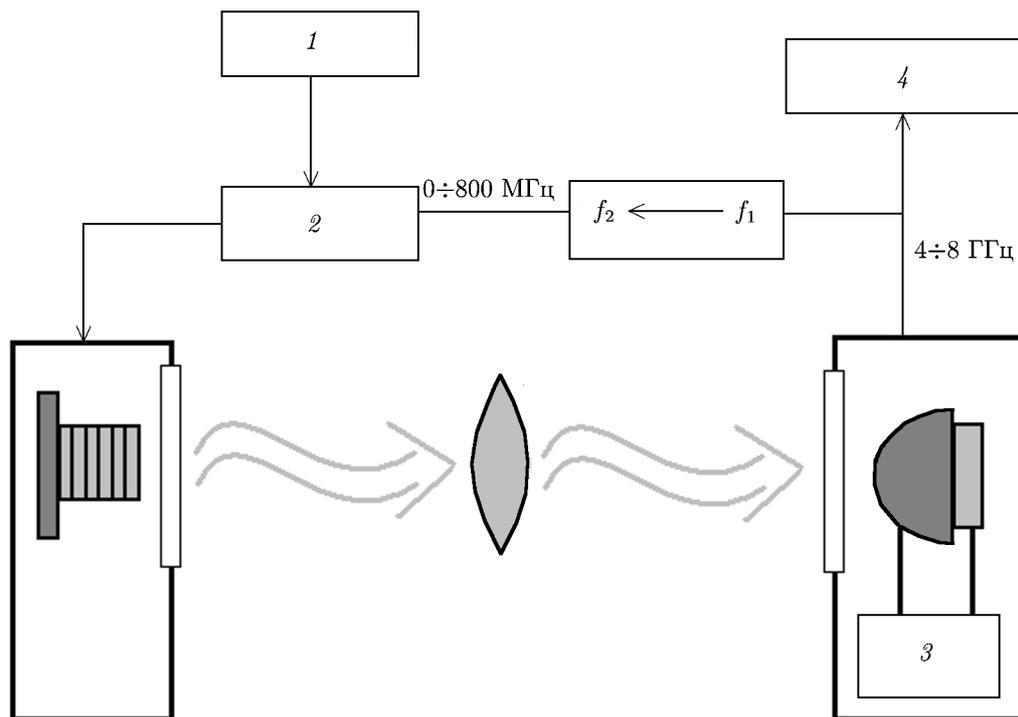


Рис. 3. Схема экспериментальной установки с использованием синхронизации BSCCO-генератора по опорному сигналу с частотой 400 МГц при помощи неохлаждаемой системы фазовой автоподстройки частоты. Гетеродин интегрального приёмника синхронизирован при помощи независимой системы фазовой автоподстройки частоты с опорным сигналом на частоте 400 МГц. 1 — опорный сигнал на частоте 400 МГц, 2 — неохлаждаемая система фазовой автоподстройки частоты, 3 — независимая система фазовой автоподстройки частоты, 4 — спектроанализатор

го супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника (СИП) на основе квази-частичной нелинейности перехода типа сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (СИС-перехода), выступающего в качестве смесителя [24–26]. Такой приёмник предназначен для спектрального исследования электромагнитного излучения в области частот $450 \div 700$ ГГц и успешно применяется как для измерения профилей спектральных линий излучения и поглощения молекул газа, так и для спектрального исследования любого внешнего терагерцового генератора, излучающего в рабочем диапазоне частот приёмника. Наилучшая шумовая температура супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника составляет 120 К, а его спектральное разрешение лучше 0,1 МГц, что на несколько порядков превосходит разрешение современных фурье-спектрометров терагерцового диапазона частот.

В данной работе были апробированы две схемы расположения генератора и приёмника относительно друг друга. В первом случае генератор располагался в криостате супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника в непосредственной близости со смесительным блоком последнего (рис. 2а). Во втором случае генератор и приёмник были размещены в независимых криостатах. При этом излучение из одной криогенной установки в другую направлялось через квазиоптические окна из материала «Mylar» (рис. 2б). Интегральный приёмник работает при температуре около 4,5 К, в то время как оптимальная температура BSCCO-генератора составляет $40 \div 50$ К. Расположение устройств в непосредственной близости приводит к перегреву и существенному ухудшению рабочих характеристик гетеродина и делает работу супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника в своей обычной рабочей полосе частот

невозможной, даже несмотря на наличие нескольких тепловых экранов из материала «Gortex». Поэтому наиболее успешные исследования были проведены при расположении устройств в независимых криостатах. Спектральные линии излучения генератора регистрируются с помощью супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника и выводятся на экран спектроанализатора в диапазоне промежуточных частот $4 \div 8$ ГГц. Спектроанализатор позволяет проводить усреднение сигнала, считывание его компьютером и другие необходимые цифровые операции для анализа и обработки спектров.

Для частотной и фазовой стабилизации генератора была использована неохлаждаемая система фазовой автоподстройки частоты, сигнал на которую подавался с СИС-смесителя интегрального приёмника. При этом частота опорного сигнала составляла 400 МГц, а гетеродин приёмника был стабилизирован при помощи независимой системы фазовой автоподстройки частоты. Выходной сигнал с СИС-смесителя в диапазоне промежуточных частот $4 \div 8$ ГГц был перенесён в диапазон $0 \div 800$ МГц при помощи преобразователя частоты и опорного сигнала на частоте 3,6 ГГц. Схема такой установки изображена на рис. 3. Таким образом, СИС-смеситель не только регистрировал спектр излучения BSCCO-генератора, но и являлся элементом в цепи обратной связи для его стабилизации.

2. ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ

Вольт-амперные характеристики генератора при различной температуре приведены на рис. 4. Скачок на ветвь вольт-амперной характеристики, соответствующую резистивному состоянию, происходил при токах смещения порядка 25 мА, при этом форма характеристики имеет типичный для туннельных переходов гистерезис. На вольт-амперной характеристике имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Он обусловлен нагревом образца и изменением не только щелевого напряжения на переходах, но и количества переходов, находящихся в сверхпроводящем состоянии, вследствие возникновения области так называемого «горячего пятна» [21]. Следует также отметить, что рис. 4 демонстрирует общий вид вольт-амперной характеристики такого генератора при измерении тока в широком диапазоне. В действительности полная картина является более сложной, поскольку положение рабочей точки зачастую может зависеть от того, по какому пути (в плоскости переменных сила тока I и напряжения V) происходил переход в данную точку. Такая особенность вольт-амперной характеристики обусловлена системой, состоящей из большого числа переходов, которые находятся в сверхпроводящем состоянии на различных участках характеристики и поэтому дают вклад в общее напряжение мезаструктуры.

Измерение мощности излучения демонстрирует два режима работы BSCCO-генератора [13, 21]: при значениях тока выше максимума по напряжению (режим «больших токов») и ниже этого максимума (режим «малых токов»). Впервые обнаружено излучение в режиме «малых токов». Поэтому предполагалось, что в этом режиме на ветви вольт-амперной характеристики с положительным дифференциальным сопротивлением R_d спектральные характеристики лучше, чем на ветви с отрицательным R_d . Авторами данной работы впервые показано [20], что данное предположение ошибочно и генератор обладает гораздо лучшими спектральными характеристиками в режиме «больших токов». Этот вопрос более подробно освещён в следующем разделе.

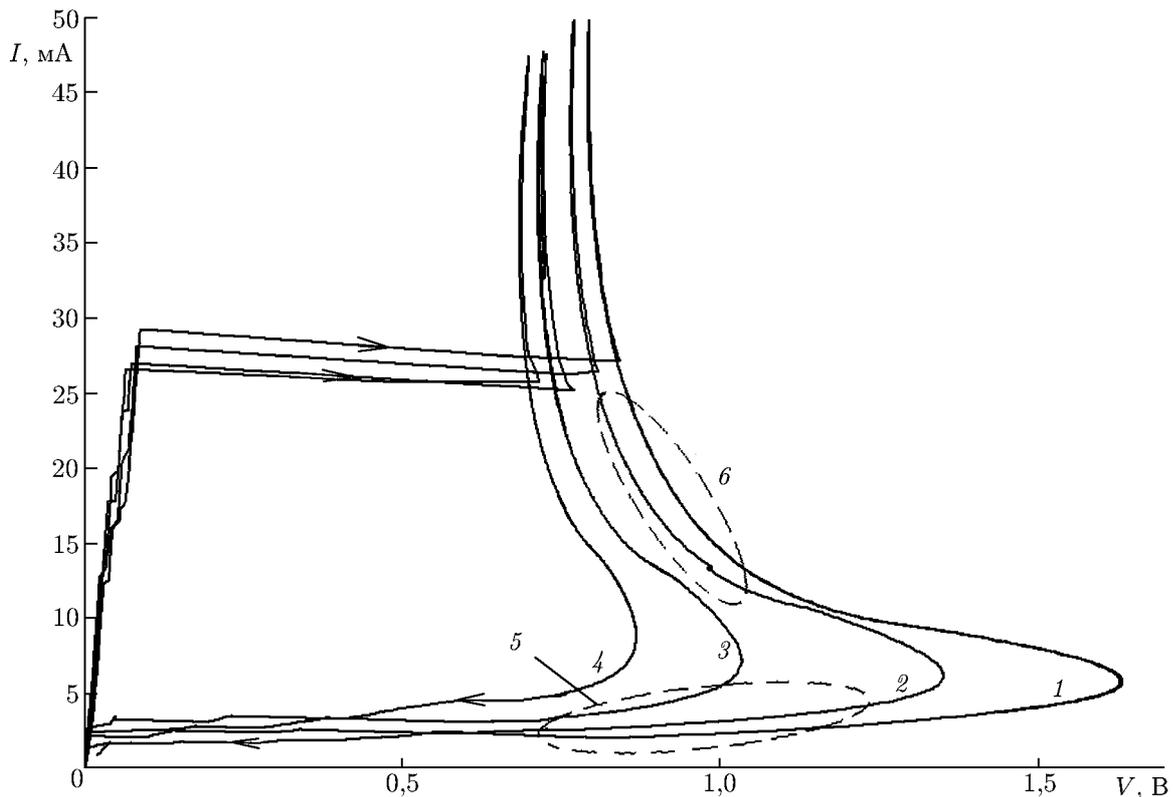


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики генератора, измеренные при различной температуре: кривая 1 отвечает $T = 4,5$ К, 2 – 17 К, 3 – 32 К, 4 – 42 К, 5 – режим «малых токов», 6 – режим «больших токов». Стрелками показано направление изменения тока вдоль кривых. Штриховыми контурами обозначены режимы работы генератора

3. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА

Характерной особенностью определения частоты f_n генератора (по сравнению с единичным джозефсоновским излучателем) является то, что напряжение смещения на мезаструктуре делится между N переходами:

$$f_n = \frac{2e}{h} V_n = \frac{2e}{h} \frac{V_{\text{bias}}}{N}, \quad N \neq \text{const.} \tag{1}$$

Здесь V_n – напряжение на единичном переходе в массиве, V_{bias} – общее напряжение на мезаструктуре, e – элементарный заряд, h – постоянная Планка. Левая часть выражения (1) есть не что иное, как соотношение Джозефсона. При этом частота генератора f_n может быть с высокой точностью определена экспериментально при измерении спектральных характеристик с помощью супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника по формуле

$$f_n = f_{\text{РДП}} \pm f_{\text{ПЧ}}^{\text{СИС}}, \tag{2}$$

где частота $f_{\text{ПЧ}}^{\text{СИС}}$ определяется положением линии генерации на экране спектроанализатора и лежит в диапазоне выходного сигнала промежуточных частот СИС-смесителя 4–8 ГГц, а знак в правой части (2) зависит от того, в какой полосе промежуточных частот (смещённой вверх или вниз относительно частоты гетеродина) проводится измерение. В случае, когда частота генератора f_n известна, выражение (1) может быть использовано для вычисления количества переходов N , участвующих в джозефсоновской генерации.

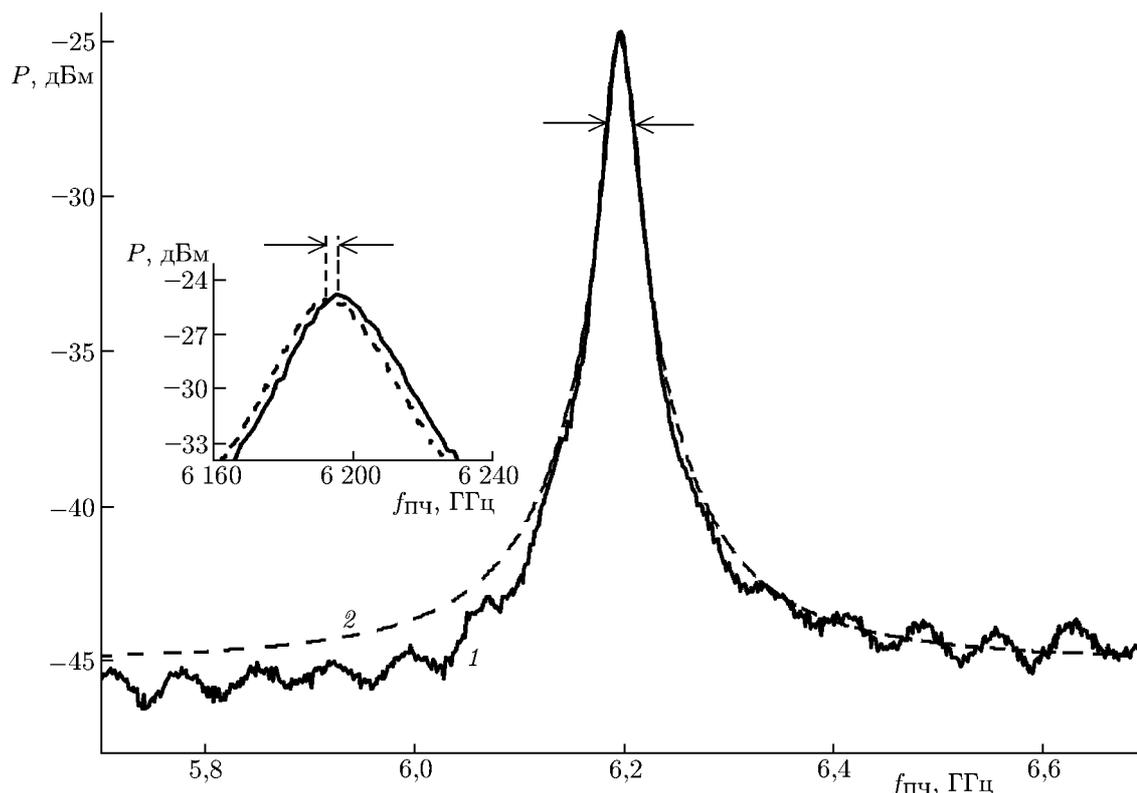


Рис. 5. Спектр излучения генератора, измеренный при помощи супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника с диапазоном промежуточных частот $4 \div 8$ ГГц (кривая 1) и кривая лоренцевой формы 2. Частота $f_0 = 611,95$ ГГц, рабочая температура 44 К, количество переходов $N \approx 570$, ширина линии 23 МГц. Измерения проводились в режиме «больших токов». Вставка слева демонстрирует смещение пика линии излучения вследствие свободного дрейфа системы в 3 МГц в течение 3 мин; P — мощность, $f_{пч}$ — промежуточная частота

На рис. 5 представлен характерный спектр излучения генератора (кривая 1) на частоте $f_0 = 611,95$ ГГц, измеренный при температуре $T = 44$ К в режиме «больших токов». Количество задействованных в генерации переходов равно $N \approx 570$. Ширина линии составила 23 МГц, а форма линии с высокой степенью точности является лоренцевой (кривая 2). Вставка слева на рис. 5 демонстрирует высокую стабильность линии генерации: за время ожидания в 3 мин вследствие дрейфа системы линия сместилась лишь на 3 МГц, т. е. на величину, которая на порядок меньше ширины линии.

На рис. 6 представлен результат измерения ширины линии излучения при различных температурах и рабочих режимах. При этом реализуемый частотный диапазон лежал от 450 до примерно 750 ГГц. Следует отметить, что верхняя граница этого диапазона (т. е. максимальная измеренная частота $f_{\max} = 736$ ГГц) определяется свойствами супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника, гетеродин которого работает до частоты порядка 750 ГГц, в то время как мощность BSCCO-генератора больше на более высоких частотах [23]. Эксперименты с серией образцов BSCCO-генераторов при разных температурных режимах демонстрировали ещё более узкую линию излучения с шириной до 6 МГц. Для достижения предельных возможностей ширины перестройки частоты супергетеродинного сверхпроводникового интегрального приёмника потребовалось располагать устройства в различных криостатах (как показано на рис. 2б) для исключения теплового влияния генератора и приёмника друг на друга. Большинство результатов было получено именно при такой конфигурации системы.

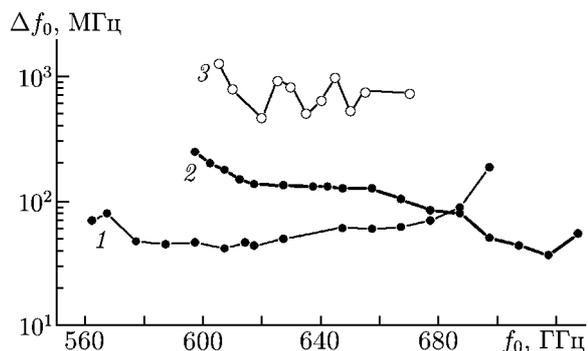


Рис. 6. Зависимость ширины линии излучения генератора Δf_0 от частоты f_0 при различных температурах и в различных режимах работы на вольт-амперной характеристике: кривая 1 отвечает $T = 40$ К, режим «больших токов», 2 — $T = 32$ К, режим «больших токов», 3 — $T = 35$ К, режим «малых токов»

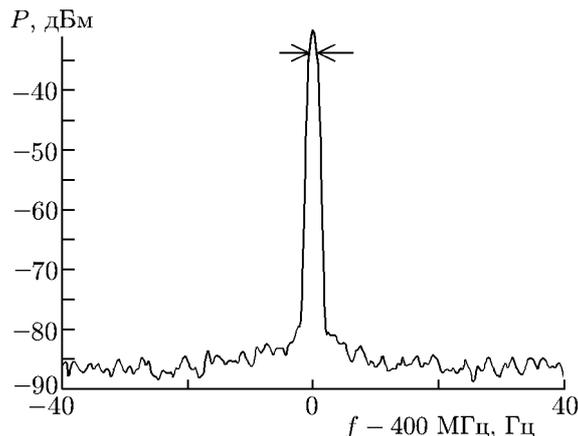


Рис. 7. Спектральные характеристики генератора, измеренные в режиме фазовой автоподстройки частоты к опорному сигналу на частоте 400 МГц при частоте излучения $f_0 = 557$ ГГц, рабочей температуре около 35 К и разрешении спектроанализатора 1 Гц. Ширина линии при применении системы стабилизации с фазовой автоподстройкой частоты была порядка 1 Гц

Важным является тот факт, что наиболее качественные спектральные характеристики (ширина линии 6–50 МГц) были зарегистрированы исключительно в режиме «больших токов». Режим «малых токов», напротив, демонстрирует достаточно широкие линии генерации более 500 МГц (см. кривую 3 на рис. 6). Вероятно, это связано с тем, что при малом токе отсутствует некоторый механизм синхронизации излучения, природа которого до конца не изучена. Авторы данной работы полагают, что условием синхронизации в серии проведённых измерений является наличие «горячего пятна» [13, 19], которое возникает только при большом токе смещения, или наличие достаточно добротного резонатора, электродинамически связанного с BSCCO-генератором. Таким образом, было показано, что единственно возможным режимом работы высокотемпературной сверхпроводниковой мезаструктуры в качестве терагерцового генератора является режим «больших токов».

4. ФАЗОВАЯ АВТОПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Стабильность сигнала является одним из ключевых факторов применимости того или иного генератора для решения конкретной практической задачи. В данной работе была проведена серия экспериментов по стабилизации генератора при помощи дополнительной неохлаждаемой системы фазовой автоподстройки частоты. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Для синхронизации использовался сигнал промежуточных частот интегрального приёмника, гетеродин которого работал в режиме фазовой автоподстройки частоты. При определённых условиях работы генератора, таких, как температура, частота и рабочая точка на вольт-амперной характеристике, была успешно реализована фазовая автоподстройка частоты генератора. Результат синхронизации по опорному сигналу представлен на рис. 7, измерение проведено при помощи спектроанализатора с максимальным частотным разрешением в 1 Гц. При данной автономной ширине линии (около 20 МГц) относительная спектральная мощность в центральном пике составила около 10%. Таким образом, была продемонстрирована принципиальная возможность стабилизировать BSCCO-генератор на основе большого массива джозефсоновских переходов, вы-

полненного в форме мезаструктуры из монокристалла. Возможность синхронизации частоты генератора во всём рабочем диапазоне требует тщательного изучения механизмов генерации в таких структурах. До сих пор точно неизвестны механизмы внутренней синхронизации системы из джозефсоновских переходов, а также факторы, определяющие спектральные характеристики генератора, т. е. ширину линии излучения и мощность. Всё это требует построения комплексной и адекватной теории, которая описывает физические механизмы, действующие в высокотемпературных сверхпроводящих генераторах на основе BSCCO.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объектом исследования данной работы является генератор терагерцового диапазона частот на основе высокотемпературной сверхпроводящей мезаструктуры $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, которая представляет собой массив из $N \approx 1000$ последовательных джозефсоновских переходов, образованных естественной структурой кристалла. Были проведены исследования спектральных характеристик такого генератора с точностью, во много раз превышающей автономную ширину его линии генерации. Реализована рабочая полоса частот генерации 450–750 ГГц, лоренцева форма спектральной линии с шириной от 6 до более чем 500 МГц и продемонстрирована высокая стабильность сигнала. Показано, что единственно возможным режимом работы такого генератора в качестве гетеродина является режим «больших токов» смещения, в то время как режим «малых токов» может найти своё применение для создания источника широкополосного терагерцового шума с шириной полосы от долей до нескольких гигагерц. Продемонстрирована принципиальная возможность фазовой стабилизации излучения BSCCO-генератора. Стабилизация частоты во всём рабочем диапазоне является на данный момент наиболее актуальной и перспективной задачей в разработке и исследовании таких устройств.

Проведённые исследования являются большим шагом на пути к практическому использованию BSCCO-генераторов и созданию комплексных приборов на их основе. В частности, одним из перспективных продолжений работ в данном направлении является создание интегральной структуры, объединяющей в едином устройстве BSCCO-генератор и гармонический СИС-смеситель, используемый в петле обратной связи с генератором для его синхронизации. Такой прибор будет работать как мощный высокостабильный генератор терагерцового диапазона частот и найдёт применение для мониторинга атмосферы, радиоастрономии, а также в других областях науки и техники, например медицине и системах безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suto K., Nishizawa J. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2005. V. 26, No. 7. P. 937.
2. Kooi J. W. *Advanced receivers for submillimeter and far infrared astronomy*: PhD thesis. Enschede: Print Partners Ipskamp B.V., 2008. 340 p.
3. Fischer B. M., Walther M., Jepsen P. U. // *Phys. Medicine Biology*. 2002. V. 47, No. 21. P. 3 807.
4. Humphreys K., Loughran J. P., Gradziel M., et al. // *Proc. 26th Annual Int. Conf. IEEE EMBS*, 2004, San Francisco, CA, USA. 2004. V. 1. P. 1 302.
5. Gerecht D., Gu D., Yngvesson S., et al. // *Joint 30th Int. Conf. Infrared Millimeter Waves*. 2005. V. 1. P. 9.
6. Federici J. F., Schulkin B., Huang F., et al. // *Sci. Technol.* 2005. V. 20. P. 266.
7. Shen K. M., Seamus Davis J. C. // *Materials Today*. 2008. V. 11, No. 9. P. 14.
8. http://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity#Cuprates.
9. Bulaevskii L. N., Koshelev A. E. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 99. Art. no. 057002.

10. An D. Y., Yuan J., Kinev N., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2013. V. 102. Art. no. 092601.
11. Kleiner R., Steinmeyer F., Kunkel G., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68, No. 15. P. 2394.
12. Ozyuzer L., Koshelev A. E., Kurter C., et al. // *Science*. 2007. V. 318. P. 1291.
13. Wang H. B., Guenon S., Yuan J., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 102. Art. no. 017006.
14. Minami H., Kakeya I., Yamaguchi H., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 95. Art. no. 232511.
15. Guenon S., Grunzweig M., Gross B., et al. // *Phys. Rev. B*. 2010. V. 82. Art. no. 214506.
16. Tsujimoto M., Yamamoto T., Delfanazari K., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. Art. no. 107006.
17. Lin S., Hu X. // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 100. Art. no. 247006.
18. Krasnov V. M. // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. Art. no. 227002.
19. Yurgens A. // *Phys. Rev. B*. 2011. V. 83. Art. no. 184501.
20. Li M. Y., Yuan J., Kinev N., et al. // *Phys. Rev. B*. 2012. V. 86. Art. no. 060505.
21. Wang H. B., Guenon S., Gross B., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. Art. no. 057002.
22. Kleiner R. // *Science*. 2007. V. 318. P. 1254.
23. Kashiwagi T., Tsujimoto M., Yamamoto T., et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. Art. no. 010113.
24. Koshelets V. P., Shitov S. // *Supercond. Sci. Technol.* 2000. V. 13. P. R53.
25. Кошелец В. П., Дмитриев П. Н., Ермаков А. Б. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 947.
26. Koshelets V. P., Ermakov A. B., Filippenko L. V., et al. // *Proc. SPIE*. 2010. V. 7854. Art. no. 78540J.

Поступила в редакцию 15 мая 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

**SPECTRAL PROPERTIES OF TERAHERTZ OSCILLATOR
BASED ON $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ MESASTRUCTURE**

N. V. Kinev, L. V. Filippenko, M. Y. Li, J. Yuan, H. B. Wang, and V. P. Koshelets

Experimental results of the study of the radiation spectra of an oscillator based on the mesastructure of the high-temperature $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ superconductor crystal are presented. Oscillator operation modes are studied, terahertz radiation in the range 450–750 GHz is obtained, and the Lorentz shape of the spectral line is measured. Minimum oscillating-line width was found to be 65 MHz. The possibility of the phase stabilization of the oscillator radiation is demonstrated.