

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРИЁМНИК: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Н. В. Кинев¹, П. Н. Дмитриев¹, Л. В. Филиппенко¹, О. С. Киселев¹, Е. Г. Домрачева²,
Е. А. Собакинская², В. Л. Вакс², Х. Б. Ванг³, В. П. Кошелец¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва,
Моховая 11-7

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022, Нижний
Новгород, просп. Гагарина, 23

³Нанкинский университет, 210000, г. Нанкин, Китай

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 г.

Аннотация. Сверхпроводниковый интегральный приёмник (СИП) ТГц диапазона волн разработан в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и за последние несколько лет нашёл массу практических и научных применений. В работе представлены последние достижения по разработке и применению СИП. В настоящий момент СИП работает в диапазоне 400-750 ГГц, обладает спектральным разрешением порядка 0,1 МГц и наилучшей шумовой температурой около 120 К, что составляет лишь несколько квантовых пределов. За последние годы приёмник нашёл своё применение в лабораторном высокочувствительном анализе газовых смесей, в исследовании спектральных характеристик излучения твердотельных сверхпроводниковых генераторов на основе высокотемпературных сверхпроводников $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, а также продемонстрировал возможность использования для шумовой спектроскопии высокого разрешения.

Ключевые слова: супергетеродинный приёмник, терагерцовые частоты, интегральные приёмные системы, СИС-смеситель, лабораторная спектроскопия, спектроскопия газов

Abstract. In this paper, the latest achievements in development and applications of the superconducting integrated receiver (SIR) are presented. SIR is developed at the

Kotel'nikov Institute of Radio engineering and Electronics of RAS and found many practical applications during last years. For the moment, the frequency range of receiver operation is 450 – 700 GHz, spectral resolution is about 0.1 MHz, and the best noise temperature is about 120 K, which equals a few quantum limits. During recent several years the SIR was implemented in different setups for laboratory high sensitive analysis of gas compounds, for research of spectral properties of the superconducting oscillators based on high- T_c crystals $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ with very high resolution. SIR also demonstrated applicability for noise THz spectroscopy of high resolution.

Keywords: heterodyne receiver, terahertz frequency range, integrated receiving systems, SIS mixer, lab spectroscopy, spectroscopy of gases

1. Введение

В течение последних 10 лет в рамках международного проекта TELIS (Terahertz Limb Sounder) по исследованию атмосферы совместно с Институтом космических исследований Нидерландов (Space Institute for Space Research, Groningen, Netherlands) был разработан высокочувствительный супергетеродинный сверхпроводниковый приёмник на основе туннельных переходов типа «сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник» (СИС) [1]. На настоящий момент проект TELIS успешно завершён, в рамках проекта были проведены три успешных запуска прибора на полигоне Esrange в Швеции и один на полигоне Timmins в Канаде, во время которых собрано большое количество научной информации, в т.ч. спектры излучения наиболее важных атмосферных газов (ClO , HCl , изотопы H_2O , NO_2 , O_3 , BrO и др.) в диапазоне высот 20 - 35 км [2-4]. На рис. 1, 2 приведены результаты одной из последних обработок данных по измерениям спектров атмосферных газов, полученным в результате запусков инструмента TELIS [5]. Под яркостной температурой линий следует понимать эквивалентную температуру абсолютно чёрного тела, излучающего с равной интенсивностью. Единицы относительной концентрации

в единице объёма ppmv и ppbv (англ. «parts per million» и «parts per billion») соответствуют млн⁻¹ и млрд⁻¹ соответственно.

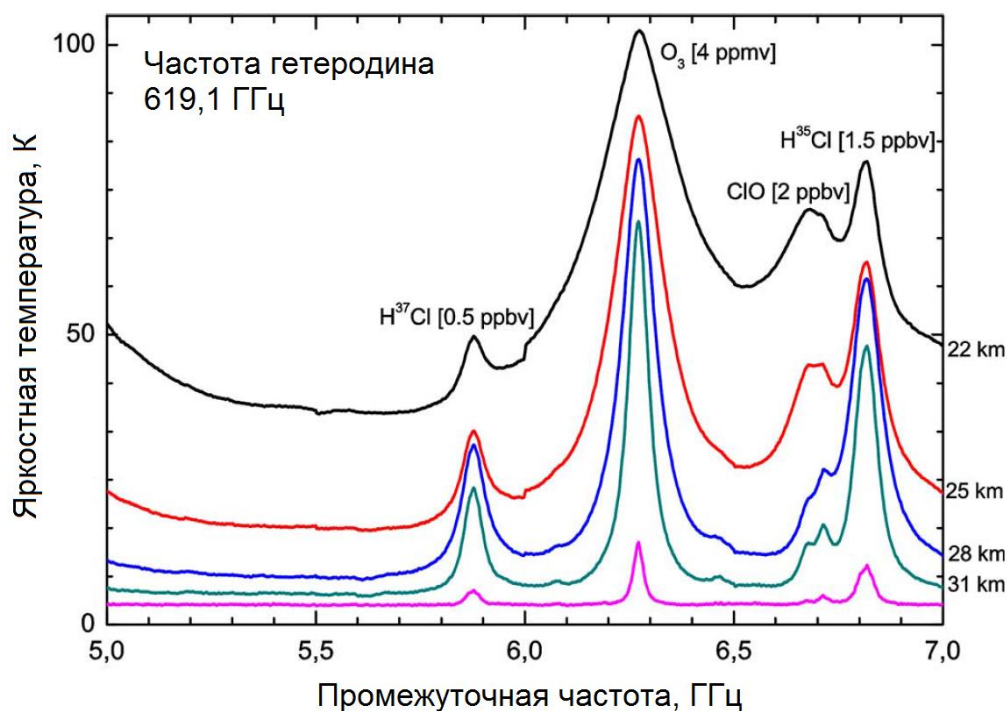


Рис.1. Зависимости яркостной температуры от промежуточной частоты для двух изотопов HCl, озона и ClO, измеренные для наблюдаемых высот от 22 до 31 км и под углом 6° над горизонтом. Частота гетеродина 619,1 ГГц. Отмечены примерные относительные концентрации соответствующих газов [5].

2. Концепция СИП и достигнутые характеристики

Ключевая идея интегрального приёмника состоит в том, что на одной микросхеме интегрированы все ключевые элементы супергетеродинного ТГц приёмника: гетеродин на основе распределённого джозефсоновского СИС-перехода, интегрированный с планарной дипольной антенной СИС-смеситель, обладающий квантовым уровнем шумов, а также дополнительный гармонический СИС-смеситель для стабилизации излучения гетеродина при помощи внешней системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в цепи обратной связи [6-7]. Упрощённая блок-схема СИП представлена на рис. 3.

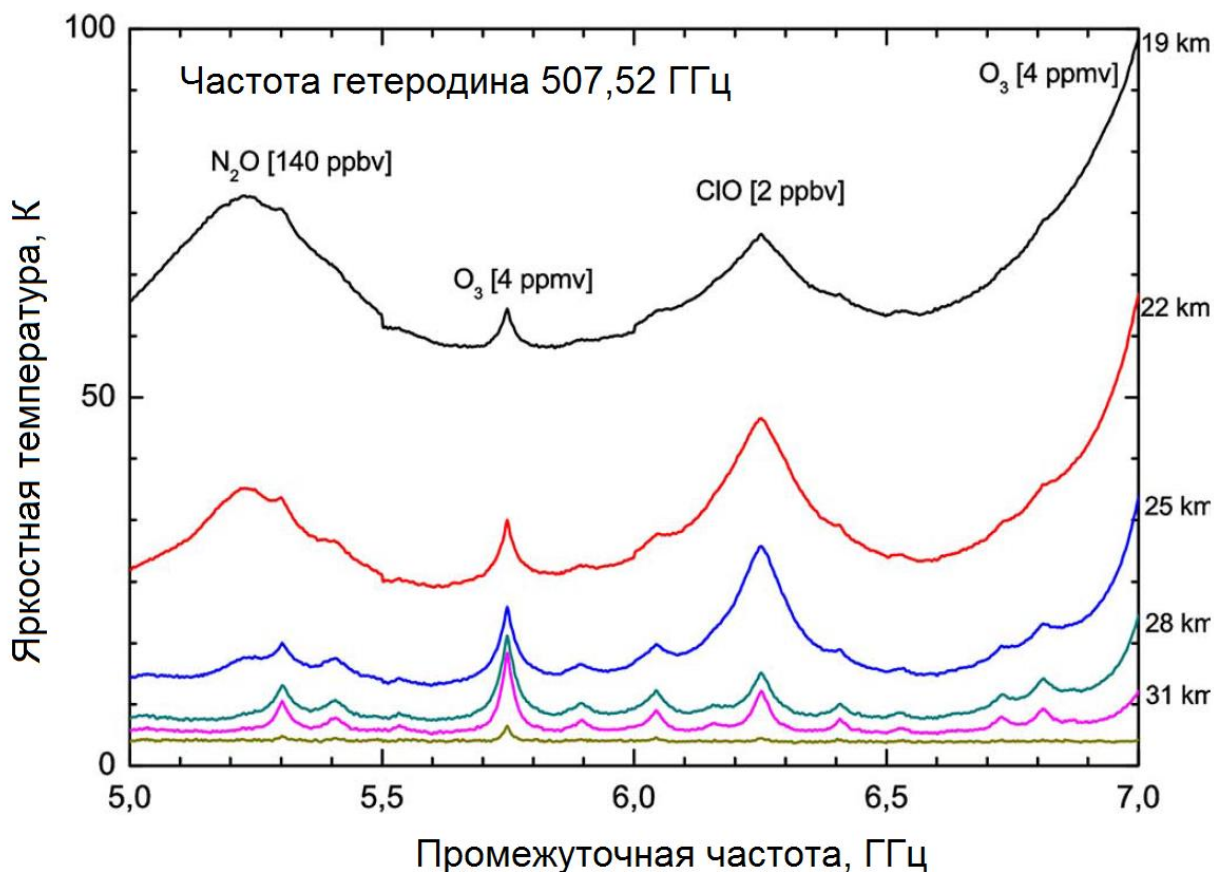


Рис.2. Зависимости яркостной температуры от промежуточной частоты для озона, ClO и N₂O, измеренные для наблюдаемых высот от 19 до 31 км и под углом 6° над горизонтом. Частота гетеродина 507,52 ГГц. Отмечены примерные относительные концентрации соответствующих газов [5].

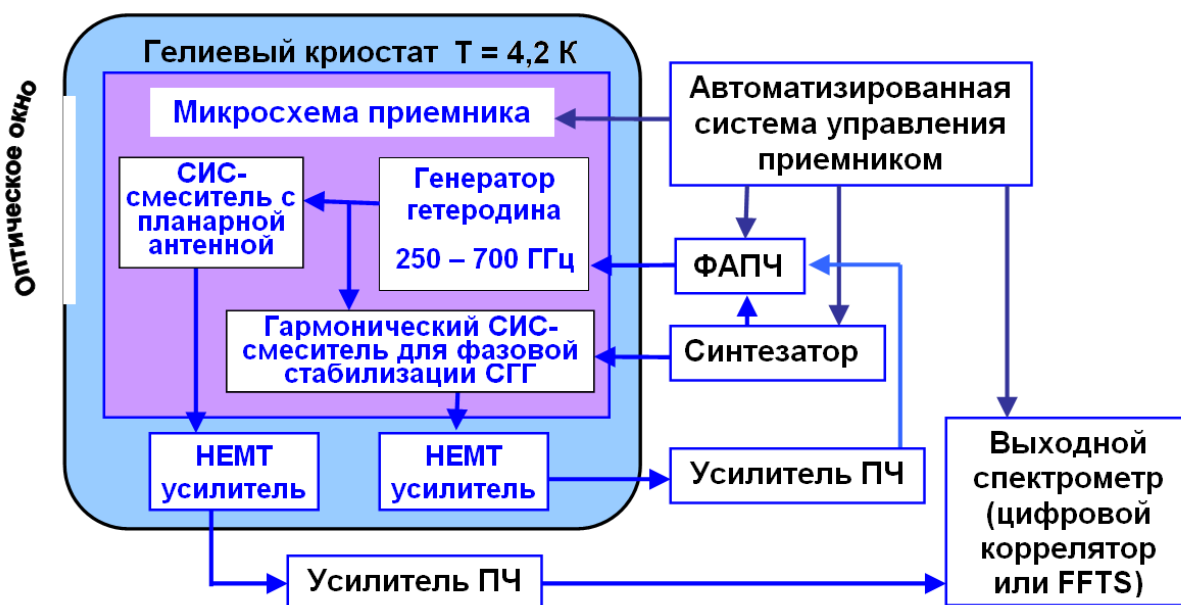


Рис. 3. Блок-схема сверхпроводящего интегрального приёмника.

Генератор гетеродина и СИС-смесители выполнены на основе высококачественных трёхслойных структур Nb/AlO_x/Nb либо Nb/AlN/NbN с толщиной барьера ~1 нм и плотностью критического тока до 10 кА/см². Центральная микросхема размером 4 мм x 4 мм x 0,5 мм изготовлена на подложке из кремния методами магнетронного напыления и электронно-лучевой литографии, характерные размеры СИС-смесителя составляют порядка 0,8 x 0,8 мкм². Микросхема СИП устанавливается на плоской поверхности кремниевой эллиптической собирающей линзы для фокусировки входного излучения на дипольной квазиоптической антенне. Для охлаждения микросхемы приёмника и НЕМТ-усилителей на основе транзисторов на электронах высокой подвижности (англ. *HEMT*, от «*high electron mobility transistor*») используется заливной криостат с жидким гелием, рабочая температура прибора с учётом тепловыделения и внешнего притока тепла составляет порядка 4,5 К. Опционально для охлаждения используется система замкнутого цикла на основе криогенного рефрижератора, охлаждающая до близкого значения рабочей температуры. Недостатком системы замкнутого цикла являются заметные температурные флуктуации в процессе охлаждения и поддержания температуры, приводящие к флуктуациям электрофизических параметров, в т.ч. частоты гетеродина.

Выходной сигнал интегрального приёмника на промежуточной частоте (ПЧ) лежит в диапазоне 4 - 8 ГГц, который определяется характеристиками ПЧ-тракта, в частности, диапазоном усиления НЕМТ-усилителей. В качестве окончательного прибора в лабораторных условиях используется коммерческий полупроводниковый спектроанализатор, который анализирует выходной сигнал ПЧ. Для стабилизации гетеродина (частотной и фазовой) используется петля обратной связи с системой ФАПЧ, которая использует выходной сигнал ПЧ гармонического смесителя в диапазоне 0-1 ГГц. В качестве опорного сигнала для гармонического смесителя используется сигнал внешнего синтезатора на частоте 19-21 ГГц, при этом номер смешиваемой гармоники лежит в диапазоне 20-35.

Чувствительность СИП определяется путём измерения его эквивалентной шумовой температуры при помощи стандартной лабораторной методики измерения величины Y -factor – отношения мощности сигналов промежуточной частоты в режиме подачи на детектор «теплой» и «холодной» нагрузок, 300 К и 77 К соответственно. Зависимость шумовой температуры, измеренной в режиме DSB (англ. *double sideband*, двухполосный режим приёма), представлена на рис. 4, наилучшее значение составляет около 120 К на частотах 497 ГГц и 601 ГГц [3].

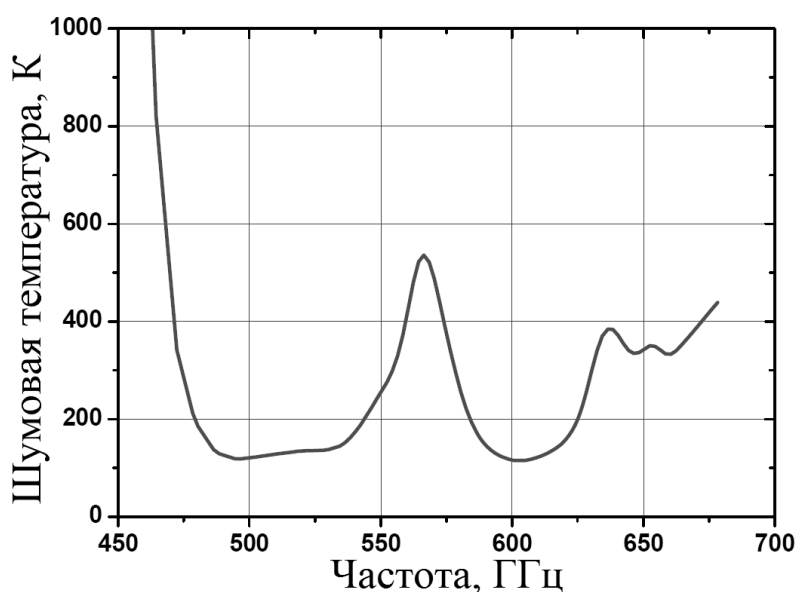


Рис.4. Зависимость шумовой температуры СИП от рабочей частоты, измеренной в режиме DSB при помощи лабораторной методики измерения величины Y -factor в диапазоне ПЧ 4-8 ГГц [3].

Спектральное разрешение СИП оценивалось при помощи исследования линий излучения внешнего ТГц генератора на основе лампы обратной волны (ЛОВ) с умножителем на квантовых полупроводниковых сверхрешётках (КПСР) с собственной шириной линии порядка 50 кГц и независимой системой ФАПЧ; наименьший шаг задания частоты ЛОВ составляет 40 кГц. На рис. 5 представлена серия измеренных линий излучения ЛОВ с шагом в 80 кГц на частоте вблизи 600 ГГц. Из рисунка видно, что любые две соседние линии достаточно хорошо различимы как отдельные линии, таким образом,

спектральное разрешение СИП при исследовании данных линий составляет порядка 0,1 МГц. Следует отметить, что полученное спектральное разрешение определяется автономной шириной линии исследуемого источника, следовательно, при исследовании более узких линий спектральное разрешение составит ещё меньшую величину.

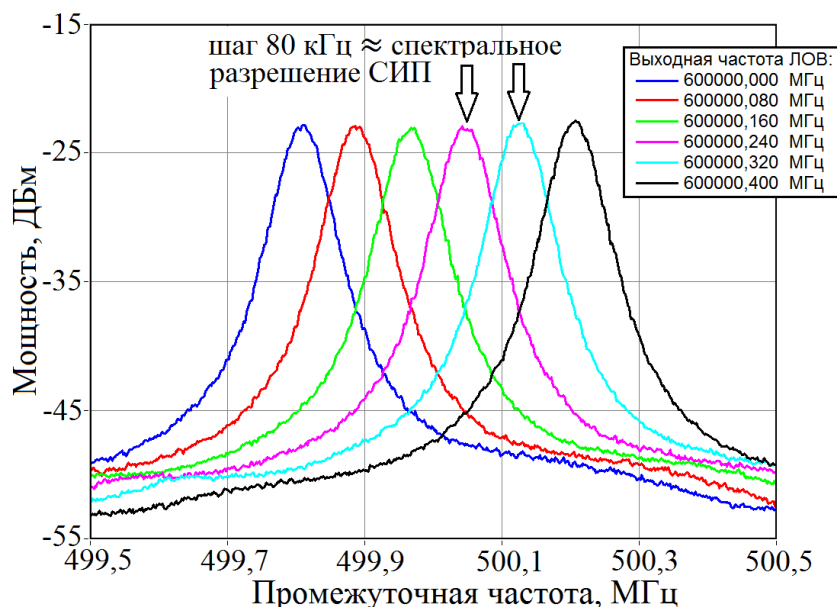


Рис. 5. Спектры шести линий направленного ТГц источника на основе ЛОВ, записанных с шагом по частоте 80 кГц и демонстрирующих спектральное разрешение СИП, крайние линии отстоят друг от друга по частоте на 400 кГц. Измерение спектров производилось в диапазоне ПЧ 0-1 ГГц.

3. Лабораторная спектроскопия газовых смесей

Приёмник изначально разрабатывался как прибор для спектроскопии атмосферных газов, следовательно, идеологически он пригоден для исследования газов и в лабораторных условиях. Принципиальное отличие методов измерения в атмосфере и в лаборатории состоит в наличии активного ТГц источника: в случае с атмосферой непосредственный ТГц источник отсутствует, а линии излучения газов измеряются на фоне слабого («холодного») излучения неба; в лаборатории измеряются линии поглощения на фоне излучения мощного направленного ТГц источника. Так, на основе СИП был разработан спектрометр для исследования газовых смесей [8],

принципиальная схема которого приведена на рис. 6. Для повышения чувствительности спектрометра и точности измерений используется система частотной модуляции ЛОВ частотой 0,2-1,5 МГц и девиацией частоты до 5 МГц. Выходной сигнал ПЧ СИС-смесителя 4-8 ГГц понижается до диапазона 0 - 1 ГГц при помощи полупроводникового смесителя и внешнего опорного синтезатора ~5,5 ГГц и поступает на детектор СВЧ излучения. Сигнал на детекторе считывается измерительной платой компьютера, которая производит измерение и накопление сигнала. Более детально принцип регистрации линий поглощения при помощи СИП и ТГц источника с системой частотной модуляции описан в работе [9].

В качестве тестовых образцов газовых смесей использованы как вещества в газообразном состоянии в баллонах под давлением, так и жидкости при атмосферном давлении, помещаемые в пробирку. Часть веществ находились в чистом состоянии, часть – в виде смесей: например, формалин, являющийся раствором формальдегида, метанола и воды, при этом был зарегистрирован каждый компонент смеси. Образец газа (смеси) напускается в измерительную ячейку и откачивается до значений давления в широком диапазоне от ~1 мБар до 10^{-5} мБар при помощи откачного стенда с турбомолекулярным насосом. В результате проведённых исследований были успешно зарегистрированы линии поглощения более чем десяти веществ, имеющих линии поглощения в диапазоне 450-700 ГГц: H_2O , H_2O_2 , CO , NO , NH_3 , H_2CO , OCS , CH_3OH , CH_3CHO , CH_3COCH_3 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$. Измерения проводились в широком диапазоне давлений газов при неизменной относительной концентрации веществ. На рис.7 приведён пример зарегистрированных линий поглощения двух веществ – перекиси водорода и ацетальдегида – при двух значениях давления – высоком и предельно различимом.

Таким образом, была продемонстрирована возможность эффективной идентификации наличия газов в тестовой смеси. Прибор для анализа газов и газовых смесей методом спектроскопии в ТГц диапазоне может быть востребован для целого ряда применений, например, медицинская диагностика

выдыхаемого воздуха, обнаружение взрывчатых и ядовитых веществ, мониторинг сложных технологических процессов на производстве.

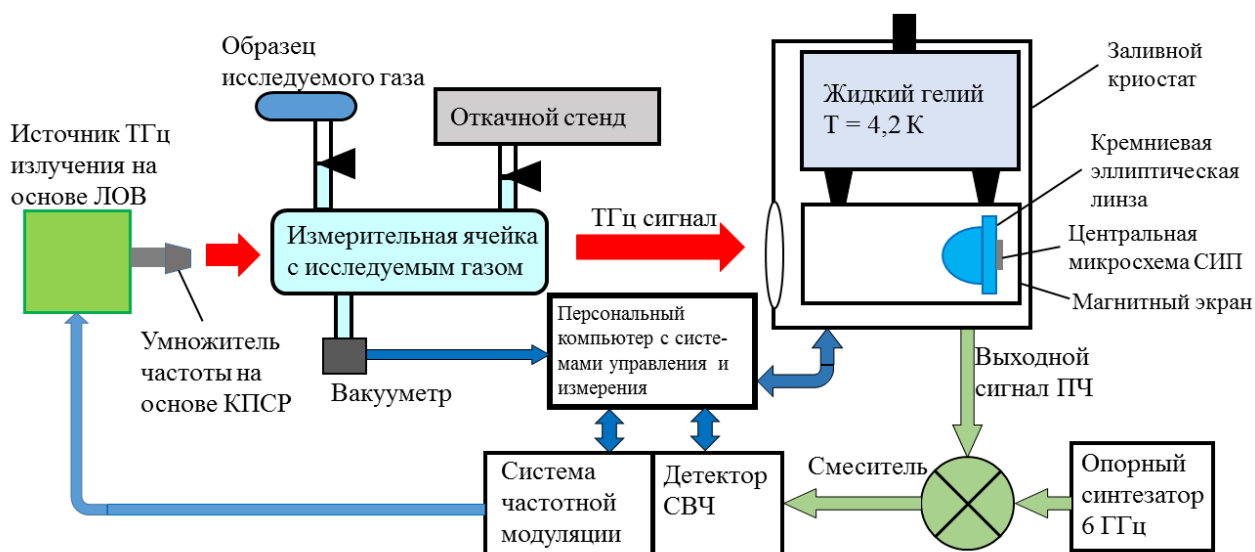


Рис. 6. Принципиальная схема лабораторного спектрометра для исследования линий поглощения газовых смесей в ТГц диапазоне на основе СИП.

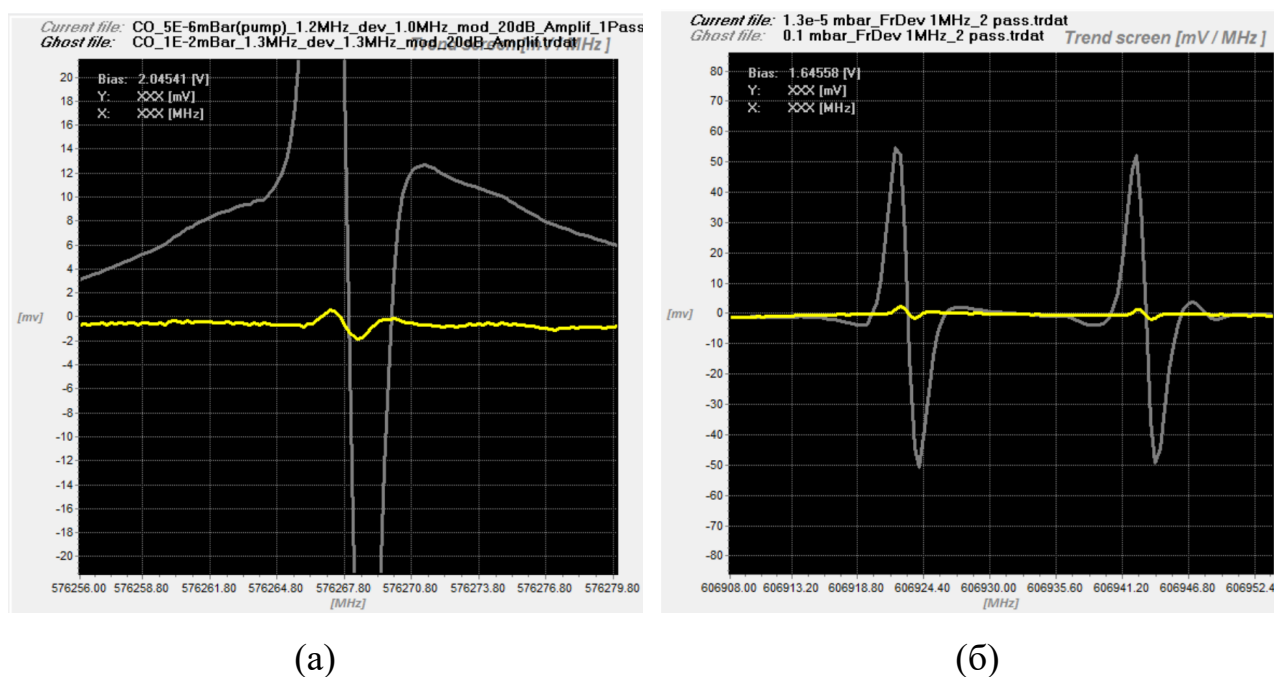


Рис. 7. Зарегистрированные линии поглощения веществ: (а) оксид углерода CO на частоте 576,2679305 ГГц при давлениях 0,01 мБар (серая кривая) и $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ мБар по показаниям вакуумметра откачной станции (жёлтая кривая); (б) ацетальдегид CH_3CHO на частотах 606,9219737 ГГц и 606,9421216 ГГц при давлениях 0,1 мБар (серая кривая) и $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ мБар (жёлтая кривая).

4. Исследование ТГц излучения структур на основе $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

При помощи СИП впервые были исследованы спектральные характеристики излучения генераторов на основе высокотемпературного сверхпроводникового купрата $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (BSCCO) с точностью, на порядки превышающей спектральное разрешение широко используемых Фурье-спектрометров. Монокристалл BSCCO в виде меза-структуры (англ. «*mesa*» - стопка, плоская гора) толщиной порядка 1,5 мкм представляет собой массив из последовательно соединенных джозефсоновских переходов количеством $N \approx 1000$. Впервые показано, что форма линии излучения BSCCO-генераторов является лоренцевой. Исследованы различные режимы генерации таких структур, ширина линии в зависимости от режимов работы составила величину от ~ 10 МГц до нескольких ГГц, что практически эквивалентно широкополосному шуму. Экспериментальная установка и результаты исследований описаны в работах [10-11].

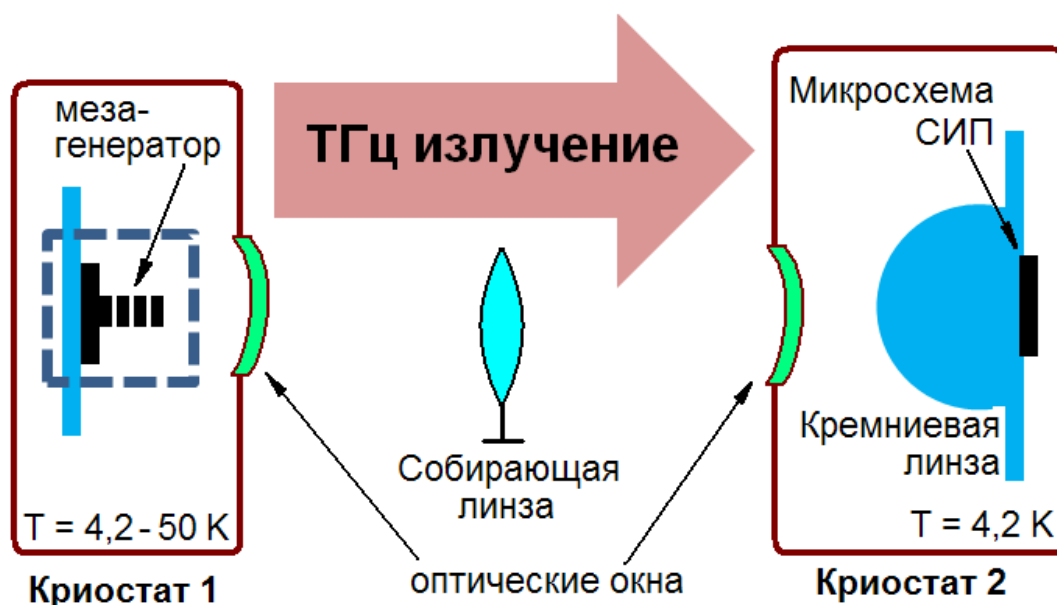


Рис. 8. Блок-схема экспериментальной установки для исследования спектров излучения генератора на основе меза-структуры BSCCO

Упрощённая схема установки показана на рис. 8. Поскольку оптимальным температурным режимом для генератора является область 40-50 К, а для работы СИП необходима температура порядка 4,2 К с хорошей

стабильностью, оказалось целесообразным разместить образцы генератора и приемника в разные криостаты, а для улучшения диаграммы направленности излучения установить дополнительную собирающую линзу.

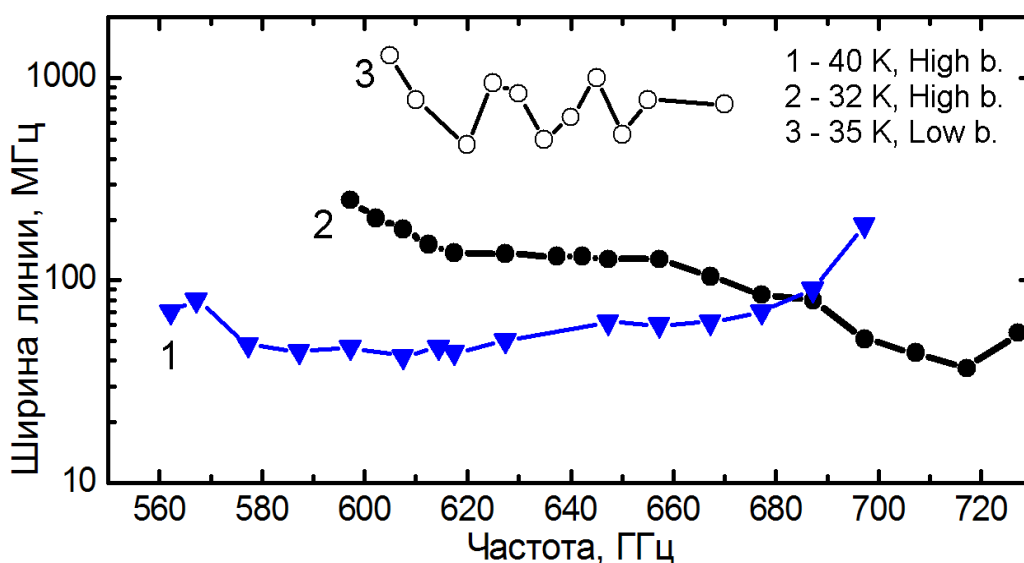


Рис. 9. Зависимость ширины линии излучения генератора на основе BSCCO от частоты при различных температурах и в различных режимах [11]:

- 1 – 40 К, режим high-bias;
- 2 – 32 К, режим high-bias;
- 3 – 35 К, режим low-bias.

Проведённые ранее в других работах исследования мощности излучения при помощи полупроводниковых болометров (на основе Si либо Ge) демонстрировали два режима работы генератора: при значениях тока выше «щелевого» напряжения структуры – режим «*high-bias*», и ниже – режим «*low-bias*». Проведенные в данной работе спектральные измерения при помощи СИП показали, что единственным эффективным рабочим режимом устройства в качестве генератора является лишь режим «*high-bias*», в то время как в режиме «*low-bias*» ширина излучения составляет от 1 ГГц, что автоматически исключает возможность использования такого генератора для большинства ТГц применений. На рис. 9 представлены результаты измерения спектральных характеристик одного из образцов генератора, рабочий диапазон составил 560 – 737 ГГц, а наилучшая линия имела ширину 23 МГц: на рис. 10 показан её спектр и наиболее близкая теоретическая кривая лоренцевой формы. Вставка

слева на рис. 10 демонстрирует высокую стабильность линии генерации: за время ожидания 3 минуты вследствие дрейфа системы линия сместилась лишь на 3 МГц, т.е. величину, порядком меньшую ширины линии. Эксперименты с другими образцами генератора демонстрировали ещё более узкую линию излучения – до 6 МГц, и широкий частотный диапазон – от 450 до 750 ГГц.

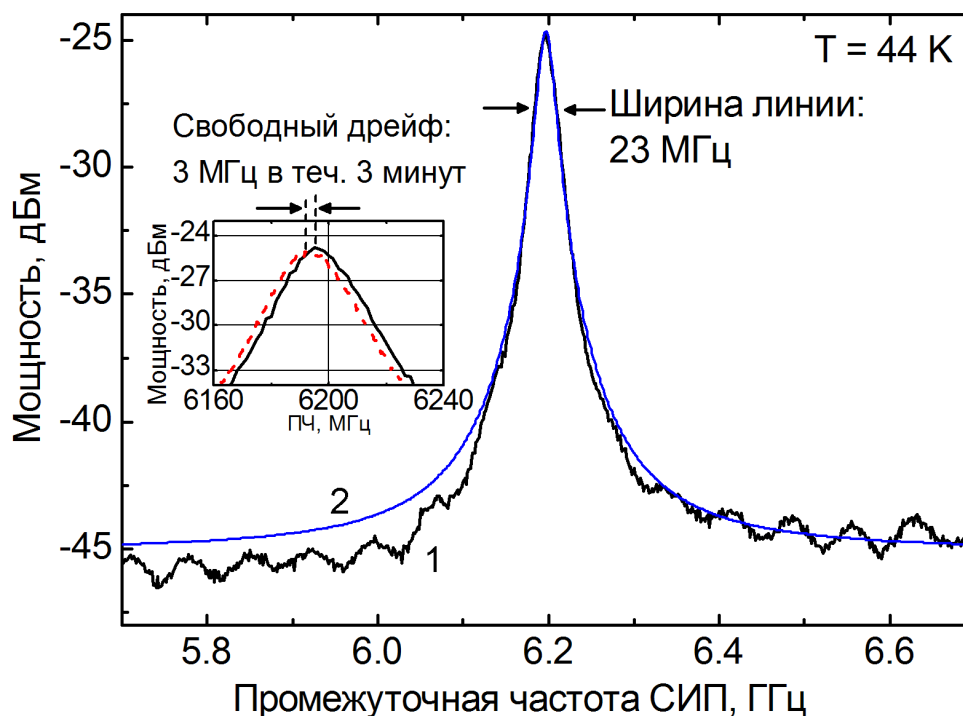


Рис. 10. Спектр излучения генератора на основе BSCCO, измеренный при помощи СИП с диапазоном промежуточных частот 4-8 ГГц (1) и кривая лоренцевой формы (2). Рабочая температура 44 К. Вставка слева демонстрирует смещение пика линии излучения вследствие свободного дрейфа системы [10].

С использованием BSCCO-генератора и СИП был поставлен эксперимент по измерению линии поглощения мощной линии аммиака. Упрощённая схема экспериментальной установка показана на рис.11, в отличие от установки для исследования линий поглощения газов на рис. 6, здесь вместо узкополосного направленного источника на основе ЛОВ использован достаточно широкополосный BSCCO-генератор. Кроме того, изменена и выходная измерительная часть установки: вместо быстродействующего детектора СВЧ использован массивный коммерческий спектроанализатор, показывающий измеряемый спектр на собственном экране в реальном времени. Измеренные

спектры по линии поглощения аммиака на частоте около 572,2 ГГц в диапазоне давления от 0,015 мБар до 10 мБар приведены на рис. 12. Таким образом, была продемонстрирована возможность использования широкополосных источников шума для спектроскопии молекул газов [12].

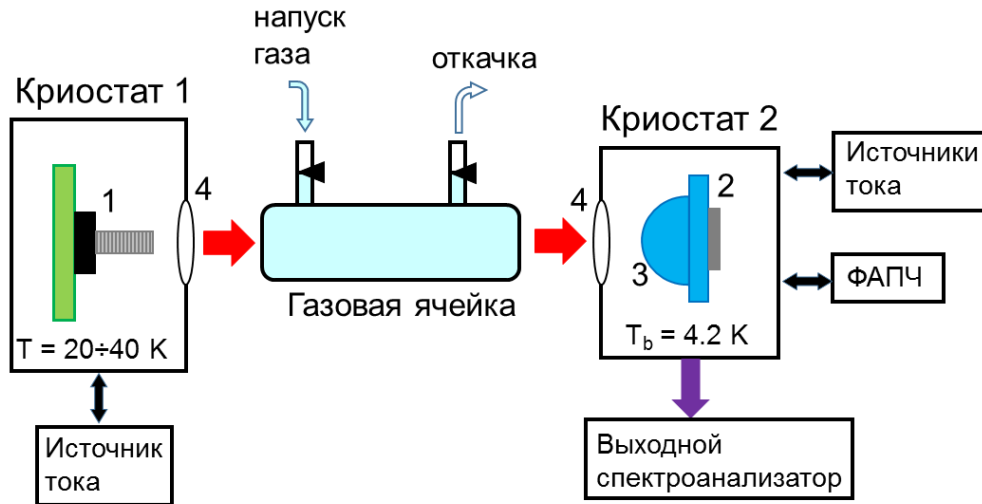


Рис. 11. Схема экспериментальной установки: 1 – генератор на основе BSCCO, 2 – микросхема СИП, установленная на 3 – кремниевую линзу, 4 – входное и выходное окна криостатов на основе Мулар. Красными стрелками показано ГГц излучение, детектируемое приёмником.

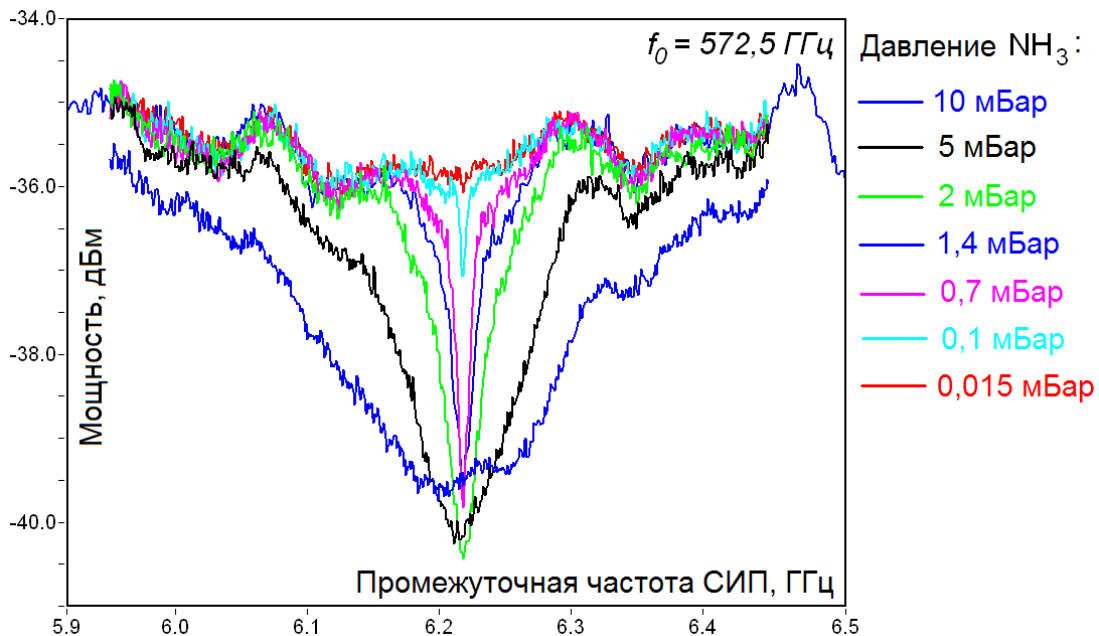


Рис. 12. Спектры линии поглощения аммиака NH_3 , измеренные при помощи генератора на основе BSCCO и СИП. Представлена зависимость спектров поглощения от давления газа.

5. Заключение

Сверхпроводниковый интегральный приёмник на основе СИС-переходов является высокочувствительным прибором с высоким разрешением, что позволило ему найти массу практических применений. Прибор обладает широким рабочим диапазоном частот – от 450 до 700 ГГц, шумовой температурой на уровне нескольких квантовых пределов hf/k (120 К на частоте 600 ГГц), спектральным разрешением лучше 0,1 МГц. На сегодняшний день интегральный приёмник успешно применён для спектроскопии газов атмосферы Земли (проект TELIS), для лабораторной спектроскопии газовых смесей с использованием направленного ТГц источника, для исследований спектральных характеристик ТГц генераторов на основе меза-структур BSCCO, для шумовой спектроскопии.

Литература

1. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M. Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko. Superconducting Integrated Receiver for TELIS. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, vol. 15, pp. 960-963.
2. A. de Lange, M. Birk, G. de Lange, F. Friedl-Vallon, O. Kiselev, V. Koshelets, G. Maucher, H. Oelhaf, A. Selig, P. Vogt, G. Wagner, J. Landgraf. HCl and ClO in activated Arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, Vol. 5, pp. 487-500.
3. G.de Lange, D. Boersma, J. Dercksen, P. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, H. Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, L. de Jong, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, B. van Kuik, A. de Lange, J. van Rantwijk, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, Ed de Vries, P.A. Yagoubov, V.P. Koshelets. Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder. *Superconductor Science and Technology*, 2010, Vol. 23, No 4, 045016.

4. Киселев О.С., Кошелец В.П. "Сверхпроводниковый интегральный приемник в составе инструмента TELIS – описание и результаты исследования атмосферы в субтерагерцовом диапазоне". // Сборник докладов на III Всероссийской микроволновой конференции (25-27 ноября 2015г., Москва), 2015, стр. 78-79.

5. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Michael I. Faley, Lyudmila V. Filippenko, Konstantin V. Kalashnikov, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Anton A. Artanov, Kirill I. Rudakov, Arno de Lange, G. de Lange, Vladimir L. Vaks, M. Y. Li, Huabing Wang. Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, Vol. 5, No. 4, pp 687-694.

6. V. P. Koshelets, S. V. Shitov, L. V. Filippenko, A. M. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, H. van de Stadt, J.-R. Gao, T. de Graauw. An Integrated 500 GHz Receiver with Superconducting Local Oscillator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1997, Vol. 7, pp. 2905–2908.

7. V.P. Koshelets, S.V. Shitov. Integrated Superconducting Receivers. *Superconductor Science and Technology*, 2000, Vol. 13, pp. R53-R69.

8. N.V. Kinev, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, O.S. Kiselev, V.L. Vaks, E.G. Domracheva, V.P. Koshelets. Superconducting integrated terahertz receiver for spectral analysis of gas compounds. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, No 1, 012169.

9. V. L. Vaks, V. Yu. Balakirev, A. N. Panin, S. I. Pripolzin, V. P. Koshelets, O. S. Kiselev. Development of the Physical Principles of the Design and Implementation of a 500–700 GHz Spectrometer with a Superconducting Integrated Receiver. *Physics of the Solid State*, 2010, Vol. 52, No. 11, pp. 2241–2245.

10. M. Li, J. Yuan, N. Kinev, J. Li, B. Gross, S. Guenon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V.P. Koshelets, H.B. Wang, P. Wu. Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime. *Physical Review B*, 2012, Vol. 86, 060505.

11. N.V. Kinev, L.V. Filippenko, M.Y. Li, J. Yuan, H.B. Wang, V.P. Koshelets. Spectral Properties of a Terahertz Oscillator Based on the $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Mesostructure. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, Vol. 56, Iss. 8-9, pp 582-590.

12. E. Sobakinskaya, V.L. Vaks, N. Kinev, M. Ji, M.Y. Li, H.B. Wang, V.P. Koshelets. High-resolution terahertz spectroscopy with a noise radiation source based on high-Tc superconductors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, Vol. 50, No. 3, 035305 (7pp).

Ссылка на статью:

Сверхпроводниковый интегральный приёмник: современные достижения и новые применения. Н. В. Кинев, П. Н. Дмитриев, Л. В. Филиппенко, О. С. Киселев, Е. Г. Домрачева, Е. А. Собакинская, В. Л. Вакс, Х. Б. Ванг, В. П. Кошелец. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/12/text.pdf>