

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРИЁМНИК: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

***Н.В. Кинев<sup>1</sup>, П.Н. Дмитриев<sup>1</sup>, Л.В. Филиппенко<sup>1</sup>, О.С. Киселев<sup>1</sup>, К.В. Калашиников<sup>1</sup>, Е.Г. Домрачева<sup>2</sup>,  
Е. Собакинская<sup>2</sup>, В.Л. Вакс<sup>2</sup>, Н.В. Wang<sup>3</sup> и В.П. Кошелец<sup>1</sup>***

*<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
[nickolay@hitech.cplire.ru](mailto:nickolay@hitech.cplire.ru)*

*<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
<sup>3</sup>Nanjing University, Nanjing, China*

*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  $Vt_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ , а также продемонстрировал возможность использования для шумовой спектроскопии высокого разрешения.*

### 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<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, BrO и др.) в диапазоне высот 20 - 35 км [2-4].

### 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 [5-6]. Упрощённая блок-схема СИП представлена на рис. 1. Генератор гетеродина и СИС-смесители выполнены на основе высококачественных трёхслойных структур Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb либо Nb/AlN/NbN с толщиной барьера ~1 нм и плотностью критического тока до 10 кА/см<sup>2</sup>. 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 мкм<sup>2</sup>. 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.

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 оконечного 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.

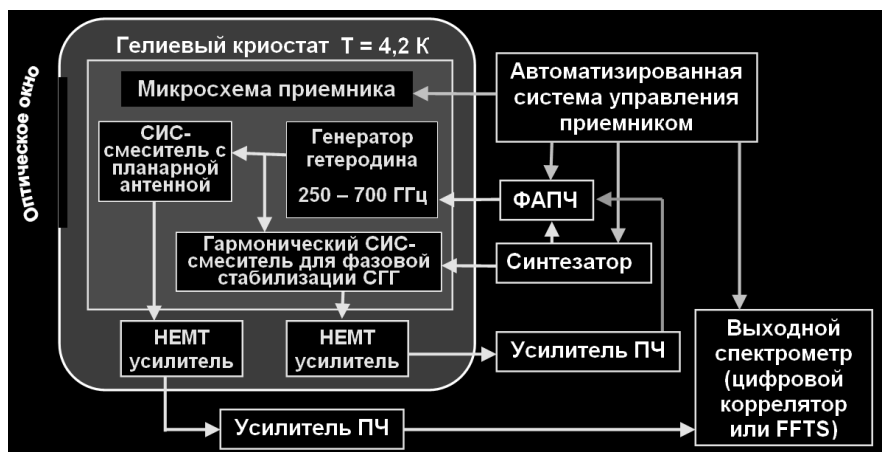


Рис. 1. Блок-схема сверхпроводящего интегрального приёмника.

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. 2, наилучшее значение составляет около 120 К на частотах 497 ГГц и 601 ГГц [3].

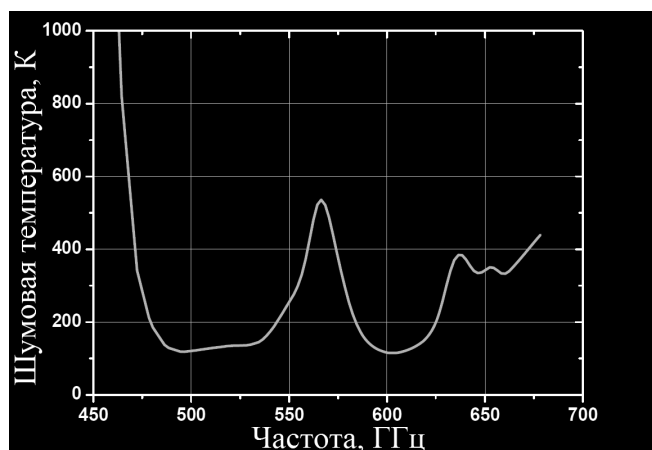


Рис.2. Зависимость шумовой температуры СИП от рабочей частоты, измеренной в режиме DSB при помощи лабораторной методики измерения величины  $Y$ -factor в диапазоне ПЧ 4-8 ГГц [3].

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. 3 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.

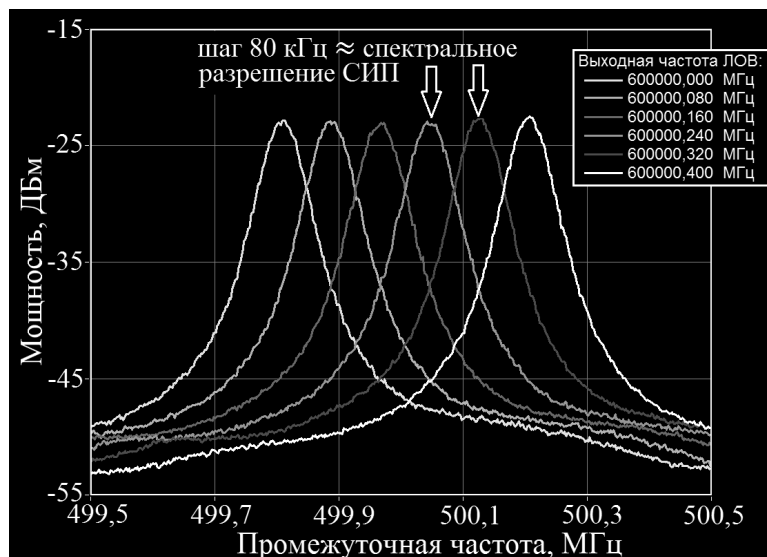


Рис. 3. Спектры шести линий направленного ТГц источника на основе ЛОВ, записанных с шагом частоте 80 кГц и демонстрирующих спектральное разрешение СИП, крайние линии отстоят друг от друга по частоте на 400 кГц. Измерение спектров производилось в диапазоне ПЧ 0-1 ГГц.

### 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 [7], принципиальная схема которого приведена на рис. 4. 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 [8].

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:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{OCS}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ,  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_5$ . Измерения проводились в широком диапазоне давлений газов при неизменной относительной концентрации веществ. На рис.5 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. 4. Принципиальная схема лабораторного спектрометра для исследования линий поглощения газовых смесей в ТГц диапазоне на основе СИП.

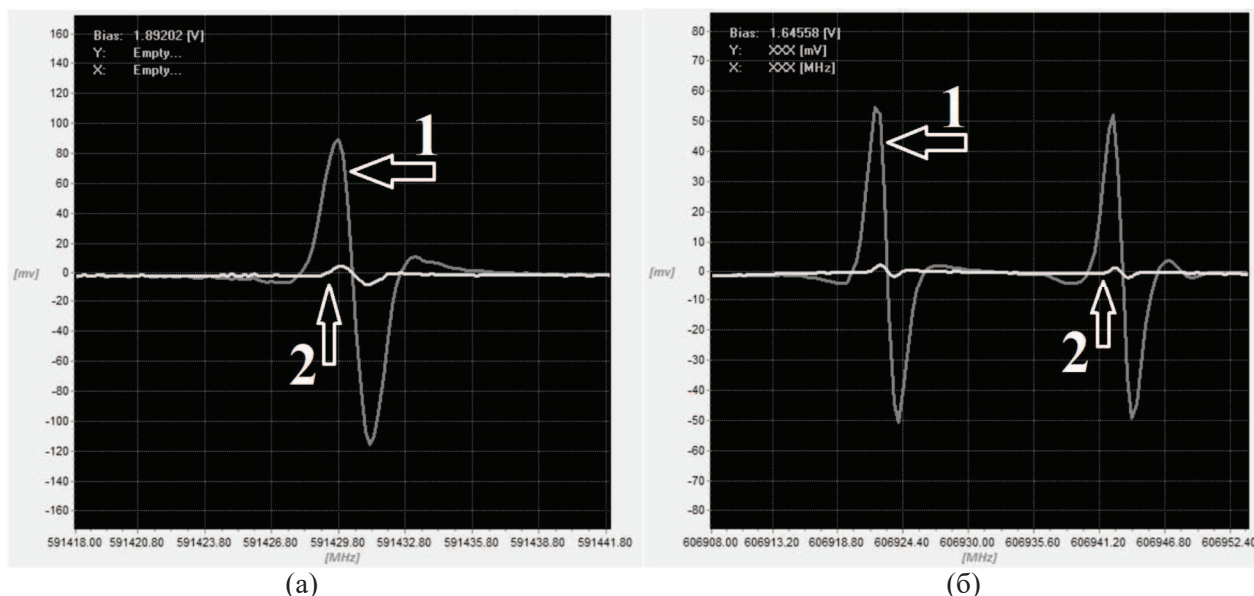


Рис. 5. Зарегистрированные линии поглощения веществ: (а) перекись водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  на частоте 591,43062 ГГц при давлениях 0,12 мБар (кривая 1) и 0,01 мБар (кривая 2); (б) ацетальдегид  $\text{CH}_3\text{CHO}$  на частотах 606,9219737 ГГц и 606,9421216 ГГц при давлениях 0,1 мБар (кривая 1) и  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$  мБар (кривая 2).

#### 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  $\sim 10$  МГц до нескольких ГГц, что практически эквивалентно широкополосному шуму. Экспериментальная установка и результаты исследований более детально представлены в работах [9-10].

С использованием BSCCO-генератора и СИП был поставлен эксперимент по измерению линии поглощения мощной линии аммиака. Экспериментальная установка схожа с установкой на рис.4, однако, вместо узкополосного направленного источника на основе ЛОВ использован достаточно широкополосный BSCCO-генератор. Таким образом, была продемонстрирована возможность использования широкополосных источников шума для спектроскопии молекул газов [11].

### 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 14-02-91335 ННИО\_а).

### ЛИТЕРАТУРА

- 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 Trans. on Appl. Supercond, vol. 15, pp. 960-963. 2005.
1. 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, and J. Landgraf. "HCl and ClO in activated Arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra". // Atmos. Meas. Tech., 5, 487-500. 2012.
  2. 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, and V.P. Koshelets. "Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder". // Supercond. Sci. Technol. vol. 23, No 4, 045016. 2010.
  3. 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), стр. 78-79. 2015.
  4. 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 Trans. on Appl. Supercond. vol. 7, pp. 2905–2908. 1997.
  5. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, "Integrated Superconducting Receivers". // Superconductor Science and Technology, vol. 13, pp. R53-R69. 2000.
  6. N.V. Kinev, L.V. Filippenko, K.V. Kalashnikov, O.S. Kiselev, V.L. Vaks, E.G. Domracheva and V.P. Koshelets. "Superconducting integrated terahertz receiver for spectral analysis of gas compounds". // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 741, No 1, 012169. 2016.
  7. В.Л. Вакс, В.Ю. Балакирев, А.Н. Панин, С.И. Приползин, В.П. Кошелец, О.С. Киселев. Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра диапазона 500–700 ГГц со сверхпроводниковым интегральным приемником. // Физика твердого тела, том 52, вып. 11, с. 2100-2103.
  8. 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 Bi2Sr2CaCu2O8 intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime" // Phys. Rev. B 86, 060505. 2012.
  9. Н.В. Кинев, Л.В. Филиппенко, М.Ю. Ли, Д. Юань, Х.Б. Ван и В.П. Кошелец. «Спектральные характеристики генератора терагерцового излучения на основе меза-структуры Bi2Sr2CaCu2O8+δ» // Известия ВУЗов. Радиофизика. Том LVI, №8-9, стр. 647-656. 2013.
  10. Sobakinskaya E.A., Pankratov A.L., Vaks V.L. Dynamics of a quantum two-level system under the action of phase-diffusion field // Physics Letters A, v. 376, p. 265 – 269, 2012.