

## Сверхпроводниковые интегральные приемники ТГц диапазона

В.П. Кошелец<sup>1</sup>, А.А. Артанов<sup>1,2</sup>, П.Н. Дмитриев<sup>1</sup>, А.Б. Ермаков<sup>1</sup>, К.В. Калашиников<sup>1,2</sup>,  
О.С. Киселев<sup>1</sup>, Н.В. Кинев<sup>1</sup>, М.Е. Парамонов<sup>1</sup>, К.И. Рудаков<sup>1,2</sup>, М.Ю. Торгашин<sup>1</sup>,  
Л.В. Филиппенко<sup>1</sup>

1. Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

2. Московский физико-технический институт (государственный университет),  
г. Москва-Долгопрудный

*В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была разработана и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) терагерцового диапазона. СИП представляет собой однокристалльную микросхему на основе туннельных наноструктур. Микросхема СИП включает в себя смеситель на основе туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС) с планарной сверхпроводниковой приемной антенной, сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) и гармонический смеситель для фазовой синхронизации частоты гетеродина. При подаче лишь постоянного смещения от батарей и сигнала опорного синтезатора такая микросхема работает как супергетеродинный приемник с квантовой чувствительностью. Легкие и компактные сверхчувствительные интегральные спектрометры терагерцового диапазона с малым энергопотреблением очень привлекательны как для радиоастрономии и дистанционного мониторинга земной атмосферы, так и для медицинских приложений. Применение методов нанотехнологии и интеграция отдельных элементов в единое устройство позволило создать прибор с уникальным набором параметров, которые не могут быть достигнуты на основе традиционных подходов и технологий.*

### Сверхпроводниковый интегральный приёмник

Концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) [1, 2], которая основана на принципиально новом подходе — интеграции сверхпроводникового генератора гетеродина с квантовым смесителем на квазичастичной нелинейности туннельных СИС-переходов и сверхпроводниковой антенной в одной микросхеме. Принципиальная схема СИП, включающая систему фазовой стабилизации частоты СГГ, изображена на рисунке 1. На СИС-смеситель через приемную дипольную антенну поступает входной сигнал от исследуемого источника и подается сигнал гетеродина от СГГ. После перемножения этих сигналов, сигнал промежуточной частоты (ПЧ) поступает сначала на «холодный» НЕМТ усилитель, расположенный внутри криостата, а затем на «теплые» усилители ПЧ, находящиеся вне криостата. Так формируется сигнал на выходе приемника. Автономная линия излучения СГГ недостаточно стабильна, а её спектр имеет лоренцевскую форму с полушириной линии от единиц до десятков мегагерц, поэтому для стабилизации частоты СГГ и сужения его спектра используется второй смеситель, работающий в гармоническом режиме, и система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Часть мощности СГГ ответвляется на гармонический СИС – смеситель (ГС), в котором смешивается с высокой гармоникой опорного синтезатора (19 - 21 ГГц), давая сигнал второго канала промежуточной частоты. Этот сигнал проходит через собственную цепочку усилителей и используется системой фазовой автоподстройки частоты. ФАПЧ имеет две параллельные цепи: система частотной стабилизации и система фазовой синхронизации, которые имеют различные полосы захвата и удержания. Фотография центральной части микросхемы СИП на основе туннельных переходов Nb-AlN-NbN показана на рис. 2.

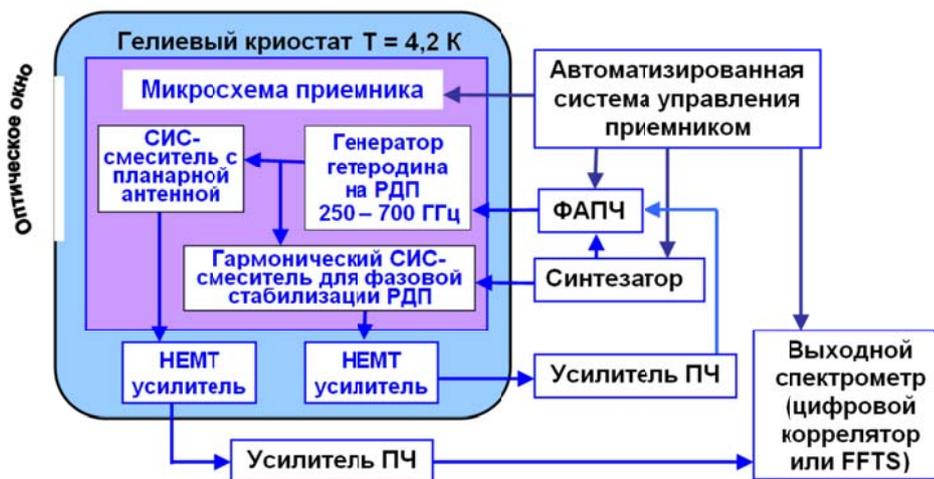


Рис. 1. Принципиальная схема сверхпроводникового интегрального приёмника.

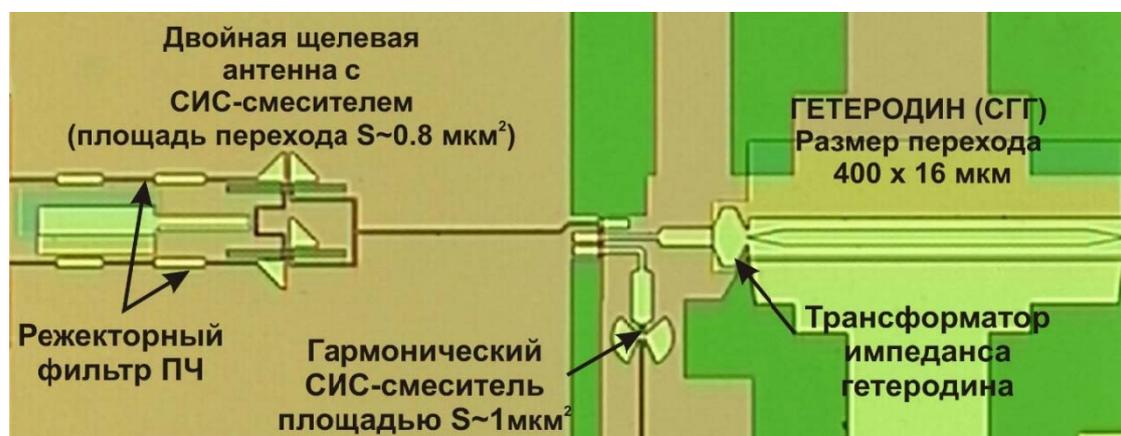
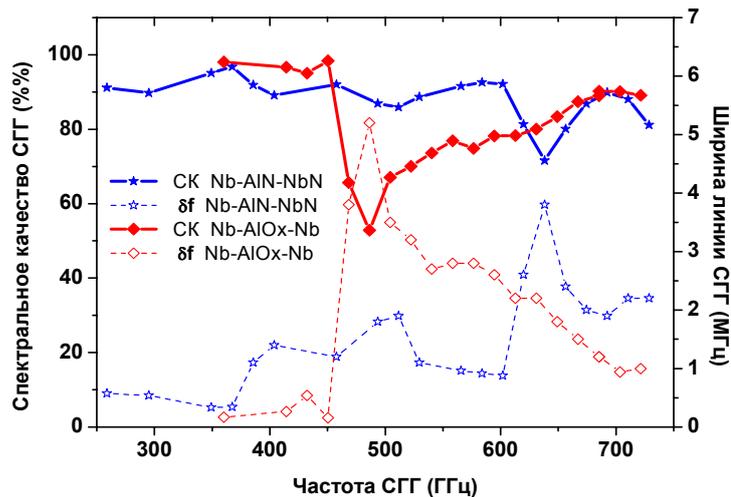


Рис. 2. Фотография центральной части микросхемы интегрального приемника (показана область  $1,2 \times 0,5 \text{ мм}^2$ ).

### Сверхпроводниковый генератор гетеродина

Одним из ключевых элементов СИП является сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ), который размещается на одной микросхеме со смесительным элементом. СГГ представляет собой распределенный джозефсоновский СИС-переход, в котором приложенное магнитное поле и ток смещения создают однонаправленный поток квантов магнитного потока (флаксонов). Таким образом, частота генерации управляется независимым заданием тока смещения и тока линии управления, создающей локальное магнитное поле через переход. Для успешной работы СИП очень важно иметь возможность непрерывной перестройки частоты генерации СГГ. Кроме того, чем более узкая линия генерации гетеродина, тем лучшим спектральным разрешением обладает приёмник, т.е. тем более точное восстановление спектра принимаемого излучения может быть получено. Процент мощности, сосредоточенный в центральном пике (спектральное качество), напрямую зависит от характеристик используемой системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). При использовании специально созданной полупроводниковой системы ФАПЧ спектральное качество СГГ составляет порядка 90% (при автономной ширине линии СГГ порядка 1 МГц).

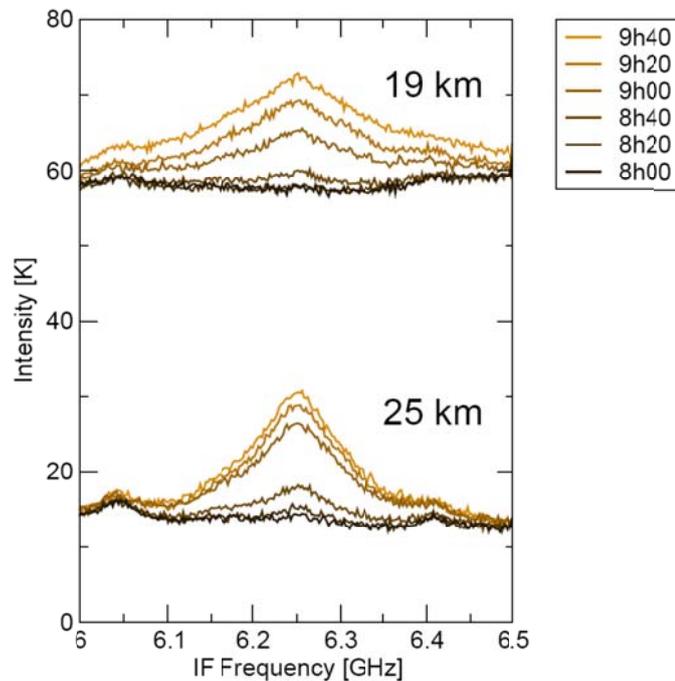
Проведенные нами исследования показали, что на основе трёхслойных структур из Nb/AlOx/Nb и Nb/AlN/NbN возможно создание сверхпроводниковых генераторов гетеродина с непрерывной перестройкой частоты в диапазоне 250 – 750 ГГц и шириной линии излучения менее 4 МГц. Это позволяет реализовывать спектральное качество сверхпроводникового генератора гетеродина в режиме ФАПЧ более 70 % во всем диапазоне (при соответствующем выборе типа структуры и ее топологии). Продемонстрирована возможность получения фазовых шумов порядка  $-90$  dBc при отстройке от несущей частоты более 100 кГц.



**Рис. 3.** Ширина линии генерации и спектральное качество сверхпроводниковых генераторов гетеродина на основе трёхслойных структур из Nb/AlOx/Nb и Nb/AlN/NbN от частоты СГГ (СК измерено в режиме ФАПЧ).

### Спектрометры терагерцового диапазона

Совместно с Институтом космических исследований Голландии создан бортовой спектрометр для мониторинга атмосферы Земли (международный проект Terahertz Limb Sounder, TELIS). Реализован частотный диапазон 480 – 650 ГГц, шумовая температура 120 К (DSB), полоса ПЧ 4 – 8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц [3, 4]. На полигоне «Esrang» (Швеция) было проведено три успешных запуска бортового интегрального спектрометра на высотном аэростате. Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура минус 70°C) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающей высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора. В ходе полета на высотном аэростате зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы Земли, в том числе соединений хлора, брома и других примесей, ответственных за разрушение озонового слоя в атмосфере Земли. Исследованы дневные циклы концентрации монооксида хлора (рис. 4), образующейся в процессе каталитического разложения озона под воздействием хлорфторуглеродов [5]. В диапазоне высот 12–36 км были получены также спектры изотопов различных веществ (в том числе изотопов воды и соляной кислоты). Впервые в терагерцовом диапазоне были зарегистрированы спектры ВгО, интенсивность сигнала в этом случае составила всего лишь 0.3 К.

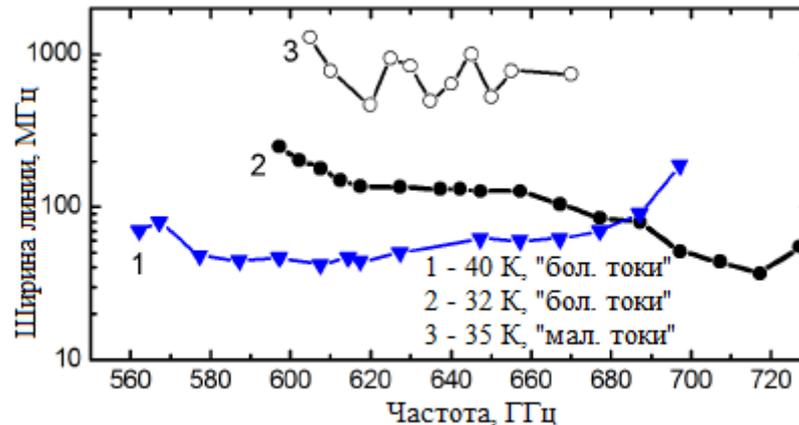


**Рис. 4.** Спектры, измеренные инструментом TELIS (высота аэростата 34 км, частота СГГ 507.3 ГГц). Показан рост концентрации  $\text{ClO}$  после восхода солнца. Измерения проводились при двух положениях телескопа, соответствующих высоте наблюдения 19 км и 25 км.

Созданные в ходе выполнения проекта сверхчувствительные спектрометры субтерагерцового диапазона открывают принципиально новые возможности по их применению в медицине для неинвазивной диагностики путем анализа выдыхаемого воздуха. Спектроскопический анализ выдыхаемого воздуха в ТГц диапазоне позволяет на основе измерения концентрации веществ-маркеров диагностировать целый ряд серьезных заболеваний. К их числу относятся хронический гастрит или пептическая язва желудка (в качестве маркера используется аммиак), различные легочные и онкологические заболевания (в выдыхаемом воздухе наблюдаются оксиды азота и другие соединения). На базе интегрального спектрометра разработан и изготовлен макет измерительной криогенной установки для анализа выдыхаемого воздуха, включающий газовую кювету и систему напуска и откачки образцов газов и газовых смесей. Первые измерения показали не только высокую селективность, но и быстроту анализа, что позволяет проводить диагностику пациента в реальном масштабе времени.

Одним из наиболее перспективных типов генераторов, предложенных сравнительно недавно, являются генераторы на основе монокристаллической структуры из высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) купратов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (BSCCO), выполненной в форме мезы. Сверхпроводимость в таких структурах обусловлена «парными» слоями (би-слоями)  $\text{CuO}_2$  толщиной порядка 0,3 нм, разделенными изолирующими слоями  $\text{SrO}$  и  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , которые образуют джозефсоновскую структуру [6]. Толщина ячейки составляет 1,533 нм, кристалл из такой структуры в форме мезы толщиной порядка 1,5 мкм содержит массив из  $N \approx 1000$  последовательно соединенных

идентичных джозефсоновских переходов. При приложении к такой структуре напряжения  $\sim 1$  В (при этом напряжение на каждом переходе составляет порядка  $\sim 1-1,5$  мВ) на выходе имеется электромагнитный сигнал в ТГц диапазоне, на сегодняшний день достигнут уровень мощности до десятков мкВт [23]. С помощью СИП впервые измерены спектры излучения таких генераторов в субТГц диапазоне [6]. На рис. 5 представлен результат измерения ширины линии излучения при различных температурах и рабочих режимах, реализуемый частотный диапазон составил от 450 до  $\sim 750$  ГГц. Эксперименты с серией образцов BSCCO-генераторов при разных температурных режимах демонстрировали линию излучения до 6 МГц.



*Рис. 5. Зависимость ширины линии излучения генератора от частоты при различных температурах и в различных режимах работы на ВАХ.*

### Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МОНРФ и РФФИ.

### Литература

1. Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., et al, "First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz". Appl. Phys. Lett. 68, No 9, 1273 (1996).
2. Koshelets V P and Shitov S V. "Integrated Superconducting Receivers". Supercond. Sci. Technol. 13, R53 (2000).
3. de Lange G., Birk M., Boersma D., et al, "Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder", Supercond. Sci. Technol. vol. 23, No 4, 045016 (8pp), (2010).
4. Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., и др, «Сверхпроводниковый интегральный приёмник субмиллиметрового диапазона», Успехи современной радиоэлектроники, №5, стр. 75-81, (2010)
5. de Lange, A., Birk, M., de Lange, G., et al, «HCl and ClO in activated Arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS sub millimetre limb spectra», Atmos. Meas. Tech., 5, 487-500, (2012).
6. Mengyue Li, Jie Yuan, Nickolay Kinev., et al., "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 86, 060505(R) (2012).

## **Superconducting Integrated Terahertz Receivers**

*The concept of a superconducting integrated terahertz receiver (SIR) was developed and tested in the Kote'lnikov Institute of Radio-engineering and Electronics. The SIR comprises a low-noise SIS mixer with a planar superconducting antenna, a flux-flow oscillator (FFO) acting as a local oscillator (LO) and a second SIS harmonic mixer (HM) for the FFO phase locking on one chip. Providing only DC-bias and the reference signal this chip works as a super-heterodyne receiver with quantum sensitivity. Lightweight and compact supersensitive integrated terahertz spectrometers with low power consumption are very useful for many practical applications, such as radio-astronomy, remote monitoring of the Earth's atmosphere and some medical applications. Use of nano-technologies and integration of individual elements into a single chip allowed us to make a device with a unique set of parameters that can't be achieved by traditional approaches and technologies.*