

Сверхпроводниковые интегральные приемники ТГц диапазона: разработка и применения

В.П. Кошелец¹, П.Н. Дмитриев¹, А.Б. Ермаков¹, К.В. Калашников¹, О.С. Киселев¹,
Н.В. Кинев¹, Ю.С. Токпанов¹, М.Ю. Торгашин¹, Л.В. Филиппенко¹, А.В. Худченко¹,
В.Л. Вакс², С.И. Приползин²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, ул. Моховая, 11, корп. 7, Москва, Россия.

² Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород, Россия.

e-mail: valery@hitech.cplire.ru

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была разработана и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) терагерцового диапазона [1, 2]. 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 (ГС) 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.

Сверхпроводниковый интегральный приемник

Принципиальная блок-схема приёмника для измерения спектрального распределения внешнего электромагнитного сигнала показана на рис. 1, а фото центральной части микросхемы приёмника на рис. 2. На фотографии центральной части видны СГГ размером $400 \times 16 \text{ мкм}^2$, двойная дипольная антенна, СИС-смеситель с двумя переходами и ГС площадью примерно 1 мкм^2 . Для изготовления микросхем приемника была оптимизирована технология изготовления наноструктур Nb-AlOx-Nb и Nb-AlN-NbN с толщиной туннельного барьера порядка 1 нм (плотность туннельного тока до 70 кА/см^2).

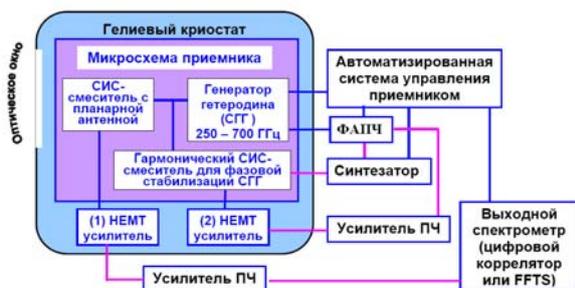


Рис. 1. Блок-схема сверхпроводникового интегрального приёмника.

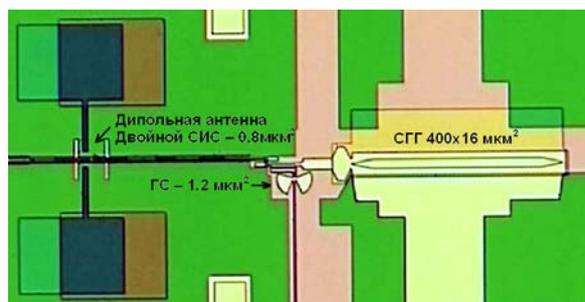


Рис. 2. Фотография центральной части микросхемы сверхпроводникового интегрального приёмника.

Микросхема интегрального приёмника устанавливается на поверхности кремниевой линзы, закреплённой в специальном криогенном блоке, который обеспечивает охлаждение микросхемы вместе с окружающими её элементами и крепление платы с фильтрами. По этой плате передаются радиочастотные сигналы от микросхемы и задаются токи питания. Поскольку СГГ чувствителен к магнитному полю криогенный блок СИП размещался внутри экрана, который представляет собой два концентрических цилиндра. Внешний экран изготовлен из криопермаллоя, внутренний – из меди, покрытой слоем свинца толщиной 100 мкм, переходящим в сверхпроводящее состояние. Криогенный блок с платой и микросхемой приёмника помещается в вакуумный объем криостата и охлаждается жидким гелием с помощью специальных хладопроводов. Таким образом, рабочая температура СИП и всех элементов, помещённых в криостат, составляет порядка 4,2К.

СИП для мониторинга атмосферы Земли

Совместно с Институтом космических исследований Голландии создан бортовой спектрометр для мониторинга атмосферы Земли (международный проект Terahertz Limb Sounder, TELIS). Ниже кратко описаны основные характеристики СИП для проекта TELIS [3]. Шумовая температура интегрального приемника определялась из отношения сигналов на выходе приемника (Y-фактор), измеренных в режиме переключения горячей и холодной нагрузок (см. рис. 3). Лучшее значение температуры составляет порядка 120 К на частотах около 610 ГГц и 500 ГГц, а в области 570 ГГц наблюдается широкий пик, частично связанный с наличием линии поглощения воды, а также со свойствами настроечной структуры, интегриро-

ванной со смесителем. Однако, ни одна из исследуемых в рамках проекта TELIS частот не попала в данный интервал, поэтому эта особенность шумовой температуры не повлияла на качество измерений. Стоит отметить, что величина шумовой температуры приёмника практически не зависит от тока смещения через СГГ, что даёт возможность в некотором диапазоне изменять этот ток в поисках рабочей точки с минимальной шириной линии генерации.

Для спектральных измерений важно, чтобы шумовая температура приемника была равномерна во всем диапазоне промежуточной частоты (ПЧ). Для этих целей были разработаны и включены в конструкцию микросхемы СИП элементы, согласующие СИС-смеситель с трактом ПЧ в широкой полосе, что позволило увеличить ширину полосы ПЧ-тракта до 4 ГГц и добиться хорошей равномерности амплитудно-частотной характеристики тракта в диапазоне 4–8 ГГц.

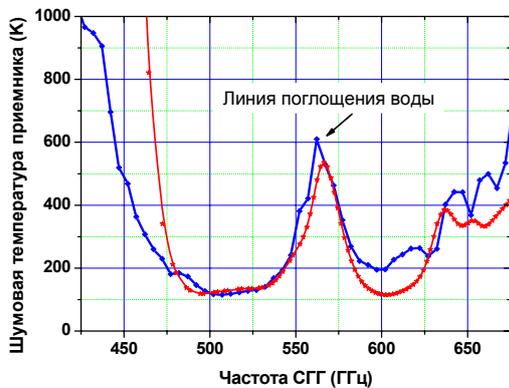


Рис. 3. Шумовая температура интегрального приёмника, измеренная в полосе промежуточных частот (ПЧ) 4–8 ГГц в зависимости от частоты СГГ для двух различных микросхем СИП.

Частота генерации сверхпроводникового генератора гетеродина однозначно связана с напряжением на генераторе при помощи соотношения Джозефсона. В автономном режиме стабильность СГГ определяется низкочастотными наводками и медленными дрейфами в системе питания, а в режиме частотной стабилизации данные отклонения компенсируются за счет цепи обратной связи и спектр излучения СГГ с высокой степенью точности имеет лоренцеву форму [4] (кривая 1 на рис. 4). При включении системы фазовой синхронизации спектр излучения СГГ принимает вид, представленный на рис. 4 (кривая 2).

Одной из наиболее важных характеристик спектра фазово-синхронизированного СГГ является процент мощности, сосредоточенной в центральном пике – спектральное качество (СК); остальная же часть мощности даёт вклад напрямую в фазовые шумы приемника. Чем уже ширина линии частотно синхронизированного СГГ δf , тем большая часть мощности попадает в полосу синхронизации системы ФАПЧ (порядка 10 МГц для проекта TELIS). Для СГГ в составе интегрального приёмника в диапазоне частот 500–700 ГГц в режиме частотной стабилизации достигнута ширина линии

от 9 до 2 МГц, что позволяет с помощью системы ФАПЧ в режиме фазовой синхронизации получить от 35 до 90 % мощности в центральном пике. 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 320–720 ГГц и шириной линии излучения менее 5 МГц. Это позволяет реализовывать спектральное качество сверхпроводникового генератора гетеродина в режиме ФАПЧ более 70 % во всем диапазоне 320–720 ГГц (при соответствующем выборе типа структуры и ее топологии) – см. рис. 5.

Для исследования таких сложных сверхпроводниковых структур как СИП и для управления его работой во время полета была создана многофункциональная автоматизированная система IRTECON (Integrated Receiver Test and Control). Была разработана комплексная методика определения основных характеристик СИП, процедуры поиска и многомерных оптимизаций его рабочих режимов для каждой выбранной частоты, а также устойчивые алгоритмы восстановления рабочих параметров СИП как для резонансного режима (ступени Фиске), так и для режима вязкого течения вихрей. Вся информация записывается в базу данных и используется для выставления рабочих режимов приемника в реальных измерениях.

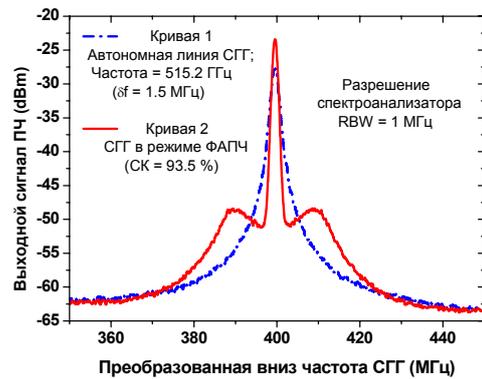


Рис. 4. Спектры излучения СГГ, измеренные в режимах частотной стабилизации (кривая 1) и фазовой синхронизации (кривая 2) на частоте 512 ГГц.

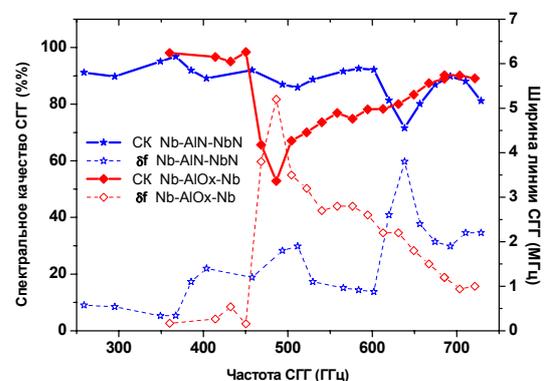


Рис. 5. Ширина линии излучения и спектральное качество сверхпроводникового генератора гетеродина на основе трёхслойных структур из Nb/AlOx/Nb и Nb/AlN/NbN, от частоты СГГ (СК измерено в режиме ФАПЧ).

Разработан ряд уникальных алгоритмов для оптимизации всех рабочих параметров, перестройки частоты сверхпроводникового генератора гетеродина, мониторинга состояния и поддержания оптимальных режимов работы СИП. Созданные алгоритмы легли в основу системы удаленного управления интегральным приемником, находящимся на борту высотного аэростата, которая учитывает малую пропускную способность радиоканала земля-аэростат, а также использовались при создании лабораторной установки для неинвазивной медицинской диагностики.

В марте 2009 г. и в январе 2010 г. на полигоне «Esrange» (Швеция) проведены успешные запуски на высотном аэростате бортового интегрального спектрометра для мониторинга атмосферы Земли (проект TELIS). Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура минус 90°C) и позволил собрать большое количество научной информации, подтверждающей высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора. Научными задачами запуска являлись измерение изотопов воды и исследование каталитического разрушения озонового слоя химическими соединениями хлора и брома. Весной в арктических районах радикалы ClO в заметных концентрациях становятся активными. Эти радикалы имеют относительно малое время жизни, для их образования необходимо солнечное излучение. Это приводит к ежедневным циклическим изменениям их концентрации. На рис. 6 показаны спектры ClO, которые были измерены во время восхода Солнца. Бром ещё более активен, чем хлор, но он содержится в гораздо меньших концентрациях. Во время полета были зарегистрированы линии радикала BrO, интенсивность которых составила всего лишь 0.3 К; для выделения этих линий из общего шума потребовалось большое время интегрирования. Инструмент после посадки на парашюте прошел пост-полетную калибровку и подготовлен к новому полету, намеченному на февраль 2011 года.

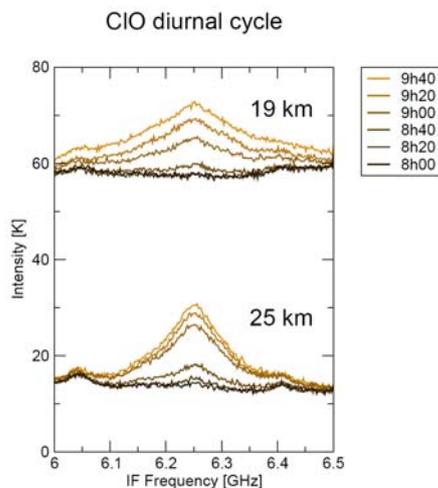


Рис. 6. Спектры, показывающие рост концентрации ClO после восхода солнца (частота СГГ = 495 ГГц). Измерения проводились для нескольких направлений зондирования (соответствующих разным высотам), на графике приведены данные для высот 19 и 25 км.

Криогенная система ФАПЧ для СИП

Чем шире полоса синхронизации (BandWidth - BW) ФАПЧ, тем большая часть мощности СГГ может быть синхронизована. Оценки показывают, что для расширения частотного диапазона СИП до 1 ТГц за счет использования СГГ на основе пленок NbN либо NbTiN (что может приводить к уширению линии СГГ) и для использования СИП в интерферометрии, где требуется высокая фазовая стабильность гетеродина, необходима система ФАПЧ с $BW > 50$ МГц. Для повышения СК и уменьшения фазовых шумов СГГ создана и испытана сверхширокополосная криогенная система фазовой автоподстройки частоты (КриоФАПЧ) [5]. Ключевым элементом КриоФАПЧ является новый элемент сверхпроводниковой электроники – криогенный фазовый детектор, основанный на туннельном СИС-переходе. Все элементы петли КриоФАПЧ помещены в криостат вместе с генератором гетеродина и работают при температуре 4.2 К. Это позволило существенно уменьшить задержки в петле ФАПЧ и реализовать полосу синхронизации 40 МГц, что более чем в 3 раза превосходит предельные значения для традиционной полупроводниковой системы ФАПЧ.

Из рисунка 7 видно, что рост BW приводит к расширению частотного диапазона, в котором фазовые шумы фазосинхронизованного СГГ ниже уровня СГГ в автономном режиме генерации, и уменьшает общую долю этих шумов. Для СГГ с шириной линии 2 МГц данная КриоФАПЧ способна синхронизировать 94% мощности СГГ в то время как полупроводниковая комнатная ФАПЧ дает лишь 82%. При ширине линии генерации около 11 МГц КриоФАПЧ позволяет получить СК = 63 %, а для комнатной ФАПЧ СК = 20 %. Для повышения стабильности работы КриоФАПЧ используется петлевой интегрирующий фильтр, что делает ее системой 2-го порядка. Использование фильтра также существенно снижает уровень фазовых шумов СГГ на частотах отстройки от несущей менее 100 кГц.

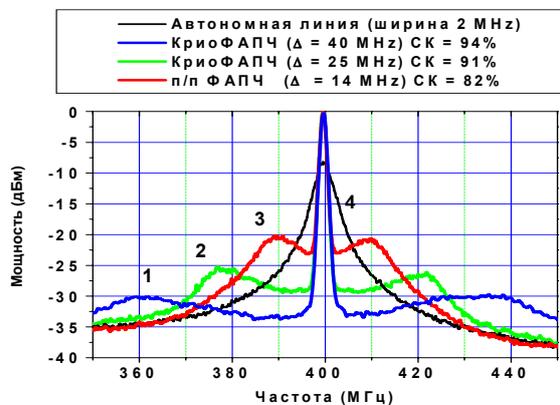


Рис. 7. Преобразованные вниз по частоте спектры СГГ: кривые «1» - «2» - СГГ синхронизован криогенными системами ФАПЧ; кривая «3» - СГГ синхронизован комнатной системой ФАПЧ; кривая «4» - автономная частотно-стабилизированная линия СГГ ($\delta f = 2$ МГц).

На основе сверхпроводникового интегрального спектрометра в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН была создана установка для спектрального анализа газовой смеси и определения изотопного состава. Был разработан измерительный стенд, включающий газовую кювету и систему напуска и откачки образцов газов и газовых смесей. Ячейка представляла собой цилиндр диаметром 10 см и длиной 60 см с плоскими окнами в торцах, прозрачными для субмм излучения. Измерения проводились как в стационарном режиме, так и в режиме непрерывной прокачки исследуемого газа при установившемся давлении в ячейке $\sim 2 - 20 \cdot 10^{-3}$ мБар.

С использованием спектрометра были проведены тестовые измерения спектров поглощения ряда молекул. В частности проводились измерения в образцах выдыхаемого воздуха, представляющего, с точки зрения спектроскопии, многокомпонентную газовую смесь, на частоте линии поглощения аммиака (572 ГГц). Для калибровки использовался 1% раствор аммиака, разбавленный дополнительно в пропорции 1/100. Таким образом, концентрация газа в калибровочном образце составляла 10^{-4} молярных долей. Для более точной калибровки необходимо изготавливать прецизионные калибровочные смеси, проверяя их с помощью других методов. Запись линии поглощения 0.01% раствора NH_3 приведена на рис. 8. Согласно проведенной калибровке можно с определенной точностью измерять концентрацию NH_3 в выдохе человека с целью последующей медицинской диагностики. Проведенные измерения вращательных спектров ряда основных молекул подтвердили высокую чувствительность прибора (порядка 1 ppb) при спектральном разрешении, ограниченном лишь эффектом Доплера. Продемонстрирован четкий отклик на частоте линии поглощения газа при давлениях до 10^{-3} мБар. Показано, что измерения с достаточной точностью могут быть выполнены в течение нескольких секунд, что позволяет проводить диагностику пациента в реальном масштабе времени.

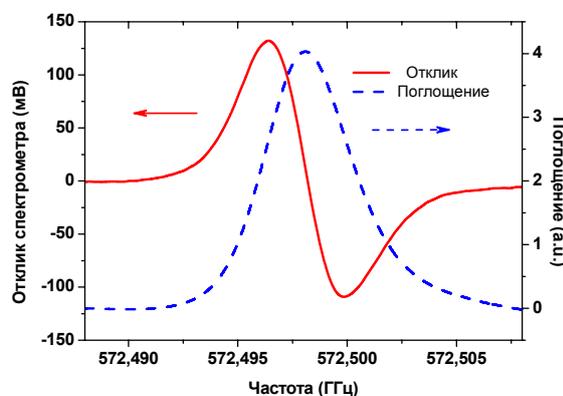


Рис. 8. Запись отклика спектрометра и восстановленная линия поглощения NH_3 на частоте 572 ГГц, измеренная в парах 0.01% раствора NH_3 .

Таким образом, создан и испытан сверхпроводниковый интегральный приемник. Реализован частотный диапазон 480 – 650 ГГц, шумовая температура 120 К (DSB), полоса ПЧ 4–8 ГГц, диаграмма направленности с боковыми лепестками < -17 dB, спектральное разрешение лучше 1 МГц. В ходе полета на высотном аэростате были измерены спектры различных газовых составляющих, в том числе ClO и BrO , ответственных за разрушение озонового слоя Земли, изучено их распределение в диапазоне высот 12 – 36 км во время восхода солнца; измерены спектры изотопов различных веществ (H_2O , HCl , и т.д.). Показано, что уникальная комбинация параметров СИП (широкий диапазон входных частот, предельно низкая шумовая температура и высокое частотное разрешение) позволяет регистрировать спектральные линии вращательных переходов большинства простых органических и неорганических соединений, присутствующих в выдохе человека. Первые измерения субТГц спектров газов продемонстрировали не только хорошую селективность и быстроту анализа, но и высокую чувствительность. По сравнению с разработанными к настоящему времени системами с близкими параметрами предлагаемый спектрометр имеет значительно больший диапазон входных частот, значительно меньшие габариты и энергопотребление и может быть востребован для радиоастрономических и атмосферных исследований, для неинвазивной диагностики в медицине и систем безопасности.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 09-02-00246, 09-02-12172-офи_м, 10-08-01124-а), Программы Президиума РАН «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов», а также гранта Президента России для ведущих научных школ НШ-5423.2010.2 и корпорации «Русский сверхпроводник».

Список литературы

1. *Koshelets, V.P.* First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz / V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, et al // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68, No. 9, P. 1273-1275.
2. *Koshelets, V.P.* Integrated Superconducting Receivers / V.P. Koshelets, S.V. Shitov // *Superconductor Science and Technology.* 2000. V. 14, P. R53-R69.
3. *de Lange, G.* Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder / Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, et al // *Superconductor Science and Technology.* 2010. V. 23, No 4, P. 045016 (8pp).
4. *Koshelets, V.P.* Radiation linewidth of flux flow oscillators / V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, et al // *Superconductor Science and Technology.* 2001. V. 14, P. 1040-1043.
5. *Khudchenko, A.V.* Cryogenic Phase Locking Loop System for Superconducting Integrated Receiver / A.V. Khudchenko, V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, et al // *Superconductor Science and Technology.* 2010. V. 22, P. 085012 (4pp).