

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

В.П. Кошелец¹, О.С. Киселев¹, Н.В. Кинев¹, М.Ю. Торгашин¹, А.В. Худченко¹,
В.Л. Вакс², С.И. Приползин²

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

²*Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород*

valery@hitech.cplire.ru

В докладе описана конструкция сверхпроводникового интегрального спектрометра субмм диапазона и приведены результаты его применения для анализа газовых смесей. Продемонстрирована возможность использования интегрального спектрометра для неинвазивной медицинской диагностики.

Одним из наиболее интересных и перспективных методов неинвазивной медицинской диагностики является анализ выдыхаемого воздуха. В последнее время анализ выдыхаемого воздуха стал использоваться для диагностики все расширяющегося круга заболеваний. Присутствие в выдыхаемом воздухе аномальных химических соединений помогает ранней диагностике многих заболеваний, позволяет судить о наличии того или иного патологического процесса в организме на основании измерений концентрации веществ-маркеров. Такой выдох представляет собой многокомпонентную газовую смесь, большинство компонент которой имеют линии поглощения в субмм диапазоне и, таким образом, могут быть однозначно идентифицированы. Основная проблема анализа состоит в необходимости обнаружения микроконцентраций молекул маркеров в многокомпонентной газовой смеси. Для решения этой задачи требуются приемники и спектрометры субмм диапазона длин волн с предельной чувствительностью.

В ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН была разработана и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального спектрометра (СИСП) субмм волн (см. рис. 1). СИСП представляет собой однокристалльную СВЧ микросхему, которая 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 [1, 2]. 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.

Совместно с Институтом космических исследований Голландии создан бортовой спектрометр для мониторинга атмосферы Земли (международный проект Terahertz Limb Sounder, TELIS) [2, 3]. В марте 2009 г. и в январе 2010 г. на полигоне «Esrangle» (Швеция) проведены успешные запуски на высотном аэростате бортового интегрального спектрометра с микросхемой нового поколения. 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. 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, измерено изменение распределения газов в диапазоне высот 12 - 36 км.

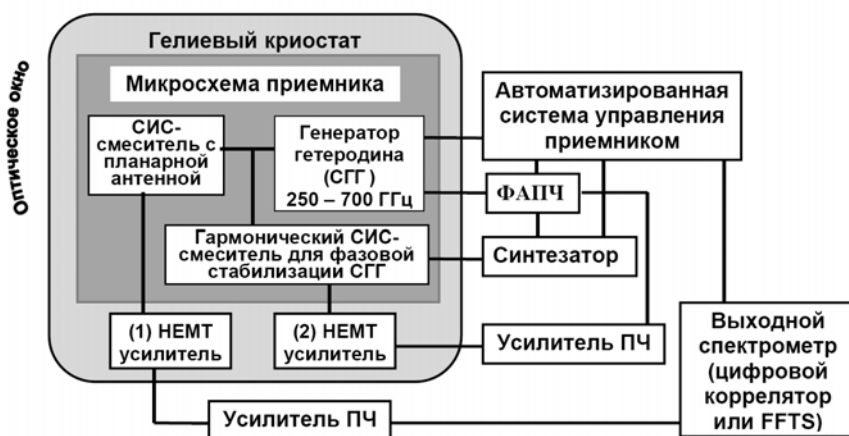


Рис. 1. Блок-схема сверхпроводникового интегрального спектрометра.

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 стеклянную трубу диаметром 10 см и длиной 60 см с плоскими оптически прозрачными окнами в торцах. Большой диаметр ячейки позволял значительно уменьшить влияние молекул газа, осажденных на стенках ячейки, на общий результат измерений. Диаметр пучка излучения, проходящего через центральную ось ячейки, не превышал 3 см. Продукты газообмена со стенками ячейки не попадали в этот пучок. Измерения проводились 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} мол. долей. Для более точной калибровки необходимо изготавливать прецизионные калибровочные смеси, проверяя их с помощью других методов. Запись линии поглощения NH_3 в выдыхаемом воздухе приведена на рис. 2. 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 (не хуже 1 ppb) при спектральном разрешении, ограниченном лишь эффектом Доплера.

Таким образом, уникальная комбинация параметров СИСП - диапазон входных частот 480 - 630 ГГц, шумовая температура в большей части диапазона менее 200 К, частотное разрешение лучше 1 МГц - позволяют регистрировать спектральные линии вращательных переходов большинства простых органических и неорганических соединений, присутствующих в выдохе человека. По сравнению с разработанными к настоящему времени системами с близкими параметрами предлагаемый спектрометр имеет значительно больший диапазон входных частот, значительно меньшие габариты и энергопотребление. Проведены измерения спектров газов в лабораторной кювете. 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. Первые измерения субТГц спектров газов показали не только высокую селективность и быстроту анализа, но и значительную чувствительность. Так, например, удалось определить концентрацию молекул аммиака с чувствительностью порядка 10^{-9} (1 ppb), которая может быть улучшена при оптимизации сверхпроводникового спектрометра и всей установки. Прибор может быть востребован для радиоастрономических и атмосферных исследований, для неинвазивной диагностики в медицине, а также для метрологических измерений.

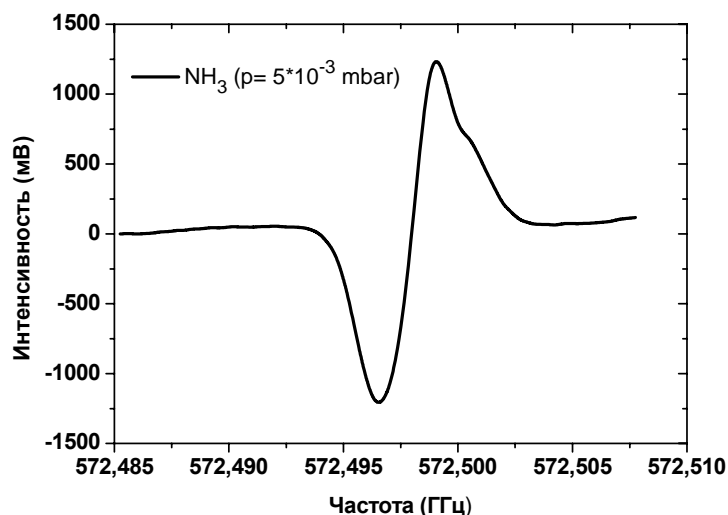


Рис. 2. Запись линии поглощения NH_3 на частоте 572 ГГц в образце выдыхаемого воздуха.

Работа выполнена при финансовой поддержке корпорации «Русский сверхпроводник», РФФИ (проекты 09-02-00246, 09-02-12172-офи_м, 09-02-97039-р_поволжье_а, 09-02-97085-р_поволжье_а, 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.

1. V. P. Koshelets and S. V. Shitov, “Integrated Superconducting Receivers,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 13, pp. R53-R69 (2000).
2. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, et al, “Integrated Submillimeter Receiver for TELIS”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 17, pp 336-342 (2007).
3. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, 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).

SUPERCONDUCTING INTEGRATED SPECTROMETER FOR NOV-INVASIVE MEDICAL SURVEY

V.P. Koshelets¹, O.S. Kiselev¹, N.V. Kinev¹, M.Yu. Torgashin¹, A.V. Khudchenko¹,
V.L. Vaks², S.I. Pripolzin²

¹The Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russia

²Institute for Physics of Microstructures, Nizhny Novgorod, Russia

Design of the submm wave superconducting integrated spectrometer is presented in the report along with results on application of this spectrometer for gas mixture analysis. A possibility of application of the integrated spectrometer for non-invasive medical survey is demonstrated.