

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРИЕМА И ГЕНЕРАЦИИ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ¹

Кошелец В.П., Киселев О.С., Торгашин М.Ю., Филиппенко Л.В.²

Superconducting integrated nanostructures for terahertz detection and generation

Проект основан на принципиально новом подходе — интеграции сверхпроводникового генератора субмм волн с квантовым смесителем на квази-частичной нелинейности туннельных СИС-переходов и планарной сверхпроводниковой антенной. В результате создан интегральный спектрометр ТГц диапазона с уникальными параметрами для мониторинга атмосферы Земли и лабораторный макет спектрометра ТГц диапазона для анализа газовых смесей.

Ключевые слова: сверхпроводниковая электроника, квантовые приемники и генераторы терагерцового диапазона, распределенные джозефсоновские переходы, интегральные сверхпроводниковые структуры.

The project is based on novel approach — integration of the superconducting submm wave local oscillator with quantum mixer utilizing quasi-particle nonlinearity of the tunnel SIS junction inserted in the planar superconducting antenna. As a result of these studies the superconducting integrated THz spectrometer for Earth atmosphere monitoring and a prototype of THz spectrometer for gas mixture analysis have been developed.

Keywords: superconducting electronics, terahertz range quantum receivers and oscillators, long Josephson junctions, integrated superconducting circuits.

Детектирование слабых сигналов в терагерцовом частотном диапазоне (это слово уже прочно вошло в научный обиход для обо-

значения частотного диапазона от 100 ГГц до 10 ТГц) — одна из областей, в которых первенство сверхпроводниковой электрони-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-02-12172 офи-м).

²  Валерий Павлович Кошелец, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: valery@hitech.cplire.ru.



Олег Сергеевич Киселев, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: kiselev@hitech.cplire.ru.



Михаил Юрьевич Торгашин, научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: mikhail@hitech.cplire.ru.



Людмила Викторовна Филиппенко, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: lyudmila@hitech.cplire.ru.

ки неоспоримо. На частотах до 1,4 ТГц наилучшей чувствительностью обладают супергетеродинные приемники со смесительными элементами на основе переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС), а в области более высоких частот — болометры на основе тонких сверхпроводящих пленок. Именно поэтому сверхпроводниковые приемники используются на большинстве радиотелескопов мира, а также в современных радиоастрономических спутниковых инструментах.

При когерентном приеме сигналов одним из важнейших элементов является гетеродин; его диапазон перестройки, спектральные характеристики и диапазон согласования со смесителем влияют на характеристики устройства в целом. Традиционными лабораторными источниками излучения терагерцового диапазона являются массивные генераторы на основе лампы обратной волны, либо сравнительно низкочастотные полупроводниковые аналоги (например, диод Ганна). Лишь в последние годы, за счет создания мощных полупроводниковых усилителей высокой частоты (порядка 100 ГГц) и использования многокаскадных умножителей, удалось «закрыть» терагерцовый диапазон полупроводниковыми источниками. Такие устройства достаточно компактны для применения в бортовых авиационных или космических системах. Тем не менее, диапазон перестройки полупроводниковых генераторов составляет не более 10–15 % от центральной частоты и они не могут быть интегрированы на одной микросхеме со смесителем, как сверхпроводниковый генератор. Поэтому сверхпроводниковые генераторы гетеродина (СГГ) на основе распределенных джозефсоновских переходов по сочетанию массогабаритных и частотных характеристик не имеют аналогов до сих пор.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в рамках предыдущих проектов (в том числе двух проектов РФФИ [1, 2]) была предложена и апробирована концепция сверхпроводникового интегрального приемника (СИП) [3, 4], которая основана на принципиально новом подходе — интеграции сверхпроводникового генератора гетеродина с квантовым смесителем на квазичастичной нелинейности туннельных СИС-переходов и сверхпроводни-

ковой антенной в одной микросхеме (рис. 1). Микросхема изготавливается на кремниевой подложке толщиной 0,5 мм методами современной микроэлектроники и содержит сверхпроводниковый смеситель, иммерсионную линзовую дипольную или щелевую антенну, сверхпроводниковый гетеродин и дополнительный смеситель для системы фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Размер схемы с контактными площадками составляет 4x4 мм.

Целями настоящего проекта были расширение рабочего диапазона микросхем за счет использования новых материалов, отработка новых методов изготовления (в том числе электронной литографии) для получения структур субмикронных размеров, что совместно с повышением плотности тока туннельных переходов позволяет расширить частотный диапазон СИС-смесителя. Параллельно велись работы по оптимизации конструкции сверхпроводникового интегрального приемника в составе аэростатного спектрометра «ТЕЛИС», предназначенного для исследования верхних слоев атмосферы, а также работы по созданию лабораторного макета спектрометра для анализа газовых смесей и исследование его возможностей для неинвазивной медицинской диагностики.

Технология изготовления

Важнейшим элементом сверхпроводниковой микроэлектроники является джозефсоновский переход (сравнимым по значимости полупроводниковым аналогом является $p-n$ переход). Характеристики джозефсоновских переходов, наличие воспроизводимой технологии изготовления с малым разбросом параметров на подложке, а также устойчивость переходов к воздействию окружающей среды определяют качество, быстродействие и область применимости сверхпроводниковых устройств в целом. В отличие от устройств, работающих при комнатной температуре, сверхпроводниковые тонкопленочные устройства должны выдерживать более тяжелые окружающие условия, возникающие в связи с циклическими переходами от комнатной температуры к рабочей гелиевой температуре. Проблемы, связанные со свойствами материалов, включают в себя адгезию пленок на подложках и на предваритель-

но осажденных пленках, механическую прочность, внутренние напряжения, химическую стабильность, рекристаллизацию, приводящую к деформациям, способность образовывать интерметаллические соединения, взаимную растворимость материалов, образующих структуру и т.д. Для получения переходов с заданными параметрами необходим выбор материалов с определенными электрофизическими характеристиками.

В настоящее время основными элементами сверхпроводниковой электроники являются туннельные структуры сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник на основе ниобия и его соединений. Пленки из этих материалов обладают высокой механической прочностью, химической стабильностью, устойчивостью структуры к термоциклированию и хорошей адгезией, а также достаточно высокой критической температурой для работы при температуре жидкого гелия ($T = 4,2$ К). Критическая температура пленки ниобия и его нитрида, составляет 9,2 К и 16 К соответственно. Туннельный барьер формируется путем окисления или нитридации тонкой пленки алюминия (5–7 нм), которая сплошным слоем покрывает поверхность ниобия и позволяет получать сверхтонкие туннельные слои (толщиной порядка 1 нм). Возможность создания туннельных переходов с высокой плотностью тока и чрезвычайно малой утечкой, не меняющих свои характеристики в течении многих лет, является важнейшим фактором, обеспечившим широкое распространение и практическое применение переходов на основе ниобия.

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН ранее была отработана технология изготовления многослойных схем на основе структур Nb-Al-Ox-Nb методом селективного травления и анодирования ниобия SNEAP (от англ. Selective Niobium Etching and Anodization Process) [5]. Был разработан целый ряд новых технологических процессов и методик изготовления сверхпроводниковых туннельных переходов с рекордными параметрами. Переходы с высокой плотностью тока J_c позволяют повысить рабочую частоту СИС-приемников и расширить их полосу. Однако, существует предел повышения прозрачности барьера для СИС-переходов на основе окиси алюминия. Это предел составляет величину порядка 10–15 кА/см², при дальнейшем увеличении плотности тока наступает резкая деградация качества переходов. Для

того, чтобы преодолеть это ограничение, была разработана технология изготовления туннельных СИС-переходов Nb/Al-AlN/Nb с экстремально высокой прозрачностью туннельного барьера путем нитридизации поверхности Al в плазменном RF-разряде (J_c до 100 кА/см²) с приемлемыми значениями параметра качества R_j/R_n [6].

Дальнейшее улучшение параметров туннельных структур было достигнуто в результате разработки технологии изготовления схем на основе трехслойных структур Nb-AlN-NbN, напряжение щели у которых составляет 3,7 мВ, а плотность критического тока может достигать 70 кА/см². Отношение подщелевого сопротивления к нормальному, R_j/R_n , даже при больших плотностях тока превышает 20, что свидетельствует о высоком качестве туннельного барьера, полученного методом нитридизации тонкой пленки алюминия в высокочастотном плазменном разряде [7]. Разработана технология изготовления интегральных схем на основе туннельных переходов Nb-AlN-NbN с разводкой из ниобия, что позволяет использовать преимущества переходов Nb-AlN-NbN в схемах с топологией, рассчитанной и апробированной ранее для структур из ниобия.

Оптимизирована технология получения сверхпроводниковых интегральных микросхем на основе пленок ниобия и нитрида ниобия с использованием методов прецизионной литографии, плазмохимического травления и т.д.). С помощью этой технологии изготовлены схемы для исследования ширины линии сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ), микросхемы интегрального спектрометра субмм волн, ряд других уникальных элементов и схем. Начаты работы по формированию туннельных структур субмикронных размеров методами электронно-лучевой литографии. Отработаны основные технологические режимы работы с программным обеспечением литографа, проведен подбор режимов засветки и проявления электронного резиста (Shipley SAL-601 — негативный, Shipley UV5 DUV — позитивный, ZEP520A), что позволило формировать элементы интегральных схем с характерными размерами до 100x100 мкм [8]. Возможность такого уменьшения площади СИС смесителей и существенное повышение плотности туннельного тока необходимы для повышения рабочей частоты приемных устройств, т.к. большая соб-



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

ственная емкость туннельных переходов шунтирует полезный сигнал.

Использование СВЧ линий передач из ниобия на частотах выше 700 ГГц приводит к резкому (неприемлемо высокому) росту потерь, т.к. энергия квантов электромагнитного излучения на этих частотах превышает величину энергетической щели в спектре квазичастичных возбуждений сверхпроводника. Это ограничивает, в первую очередь, предельную частоту гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода, поэтому для повышения рабочей частоты сверхпроводящих схем разрабатываются структуры на основе нитрида ниобия (NbN) и нитрида ниобий титана (NbTiN).

Сверхпроводниковый генератор гетеродина

На рис. 1 представлена фотография центральной части микросхемы приемника с двойной щелевой антенной. Излучение сверхпроводникового гетеродина через согласующую схему (трансформатор импеданса) передается в микрополосковую линию с импедансом около 20 Ом, а затем при помощи специального делителя мощности (который также разделяет смесители и генератор по постоянному току смещения) распределяется между двумя СИС смесителями. В ходе проекта было исследовано несколько конструкций СВЧ развязки (и цепей согласования), оптимизирована конструкция и топология сверхпроводникового генератора гетеродина (СГГ) на основе распределенного джозефсоновского перехода, что позволило уменьшить ширину спектральной линии СГГ.

Спектральная характеристика СГГ имеет лоренцевскую форму, типичная полуширина которой составляет от сотен килогерц до десятков мегагерц (рис. 2а), в зависимости от конструкции СГГ и выбора рабочей точки. Применение генераторов с широкой автономной линией в качестве гетеродина в приемниках с высоким спектральным разрешением требует использования широкополосной системы автоподстройки частоты гетеродина. Для формирования сигнала промежуточной частоты системы ФАПЧ (400 МГц) в схему приемника добавлен гармонический СИС смеситель. Полоса системы ФАПЧ составляет порядка 10 МГц, что позволяет при ширине автономной линии СГГ до 5 МГц обеспечить спектральное качество (отношение мощности в спектральном пике СГГ с ФАПЧ к полной мощности СГГ) выше 50 %. Спектральная характеристика стабилизированного СГГ, измеренная относительно опорного синтезатора при разрешении спектроанализатора 1 Гц, представлена на рис. 2б.

Было показано, что у СГГ на основе структур Nb-AlN-NbN вольт-амперные кривые в резонансном режиме (область ступеней Фиске) являются слегка наклонными из-за поверхностных потерь в нитриде ниобия, поэтому при правильном выборе токов питания и управления возможна реализация непрерывной перестройки частоты даже в резонансном режиме, в диапазоне 300-600 ГГц. Таким образом, полный диапазон непрерывной перестройки для СГГ из Nb-AlN-NbN составляет 300–750 ГГц; по результатам данной разработки получен патент РФ [9]. В диапазоне

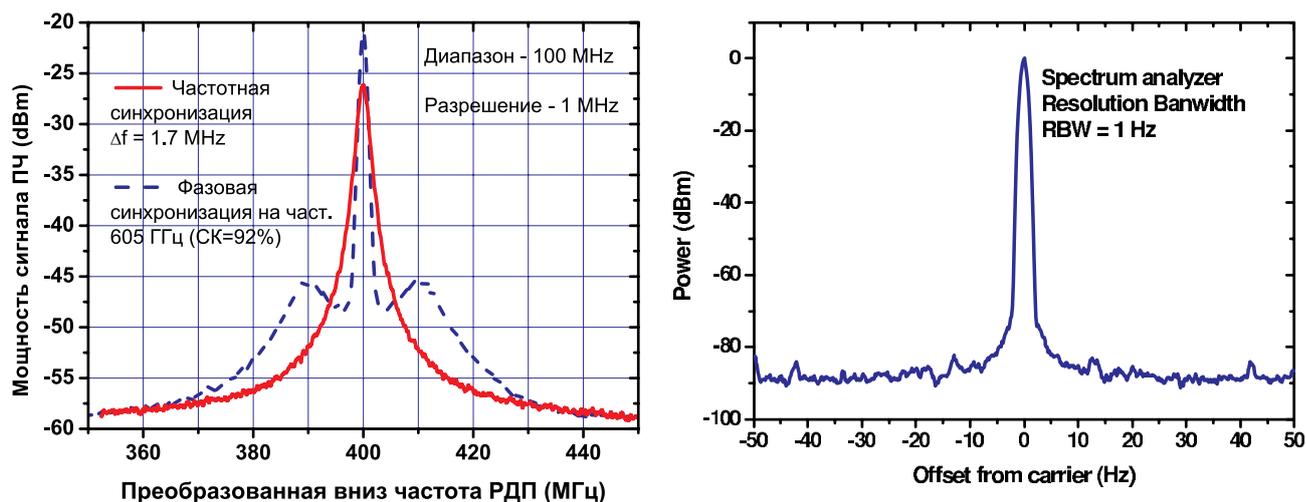


Рис. 2. Спектральные характеристики СГГ, измеренные относительно опорного синтезатора : а) полоса 100 МГц, разрешение 1 МГц, б) СГГ в режиме фазовой стабилизации; полоса анализатора 100 Гц, разрешение 1 Гц.

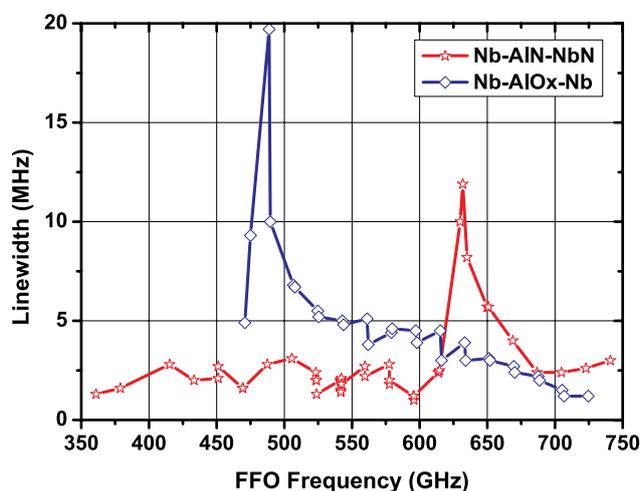


Рис. 3. Зависимость автономной ширины спектральной линии от частоты для СГГ на основе переходов Nb-AlOx-Nb (кривая с ромбами) и Nb-AlN-NbN (кривая со звездочками).

350–630 ГГц ширина автономной линии генерации составляет от 0,5 до 7 МГц (рис. 3), как следствие, в режиме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) реализовано спектральное качество СГГ от 93 % до 35 % соответственно. Все это позволяет обеспечить гораздо более широкий диапазон непрерывного частотного покрытия по сравнению с переходами на основе ниобия. Возможность гарантировать узкую спектральную линию СГГ в частотном диапазоне около 500 ГГц определило выбор в пользу микросхем на основе Nb-AlN-NbN в качестве приемника для одного из спектральных каналов совместного международного проекта «Телис».

«TELIS» – спектрометр для исследования атмосферы

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН принимал активное участие в разработке и запусках бортового спектрометра «TELIS» для высотного лимбового зондирования атмосферы. Проект выполняется в рамках совместной программы ведущих научно-исследовательских институтов Германии (DLR), Нидерландов (SRON) и Англии (RAL). Инструмент имеет три частотных канала: 500 ГГц, 480–630 ГГц и 1,8 ТГц. Разработкой второго частотного канала (480–630 ГГц) занимался Институт космических исследований Нидерландов (SRON). В качестве чувствительного элемента была выбрана микросхема интегрального приемника, разработанная и изготовленная в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Коллектив исполнителей проекта принимал активное участие в разработке и тестировании электроники и алгоритмов управления спектрометром. Реализован частотный диапазон 480–630 ГГц, шумовая температура 120 К (DSB), полоса промежуточных частот 4–8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц [10, 11]. В качестве оконечного спектрометра использовался цифровой автокоррелятор с полосой 2 ГГц.

В 2009–2011 гг. на полигоне Esrange (Швеция) прошли успешные запуски спектрометра TELIS на борту высотного аэростата совместно со спектрометром MIPAS-B (рис. 4). Инструмент продемонстрировал возможность работы в экстремальных условиях (температура минус 90 °С) и позволил собрать большое количество



Рис. 4. Запуск Фурье-спектрометра MIPAS-B и инструмента TELIS на полигоне космического центра Esrange, Швеция. Объем аэростата: 400 000 м³; вес полезной нагрузки около 1 000 кг.

научной информации, подтверждающее высокое спектральное разрешение и чувствительность прибора. Было записано несколько сотен лимбовых сканов; зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы Земли. В ходе полета на высотном аэростате зарегистрированы спектры соединений хлора, брома и других примесей, ответственных за разрушение озонового слоя в атмосфере Земли; в течение полета измерялись суточные вариации различных компонентов атмосферы. Исследованы дневные циклы концентрации монооксида хлора (рис. 5), образующейся в процессе каталитического разложения озона под воздействием хлорфторуглеродов. В диапазоне высот 12–36 км были получены также спектры изотопов различных веществ, в том числе изотопов воды и соляной кислоты (HCl) (рис. 6). Впервые в терагерцовом диапазоне были зарегистрированы спектры ВгО, интенсивность сигнала в этом случае составила всего лишь 0,3 К [12].

Лабораторные применения сверхпроводниковых спектрометров

Сейчас во всем мире активно ведутся разработки устройств субТГц и ТГц частотных диапазонов для задач медицины и биологии. Связано это, прежде всего, с тем, что в этом диапазоне лежат наиболее сильные линии поглощения многих веществ (например, вода, аммиак, спирты). В терагерцовом диапазоне находятся частоты колебаний больших групп атомов, образующих молекулу и колебания водородных

связей многих органических веществ, представляющих интерес для биологии и медицины (белки, молекулы ДНК). Кроме того, ТГц излучение не является ионизирующим и, следовательно, опасным для биологических объектов, как часто используемое рентгенов-

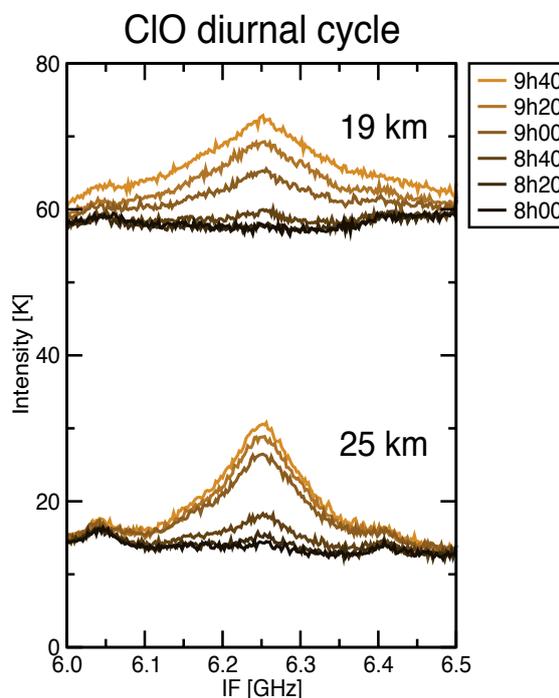


Рис. 5. Спектры, измеренные инструментом TELIS (высота аэростата 34 км, частота СГГ 507,3 ГГц). Показан рост концентрации ClO после восхода солнца. Измерения проводились при двух положениях телескопа, соответствующих высоте наблюдения 19 км и 25 км.

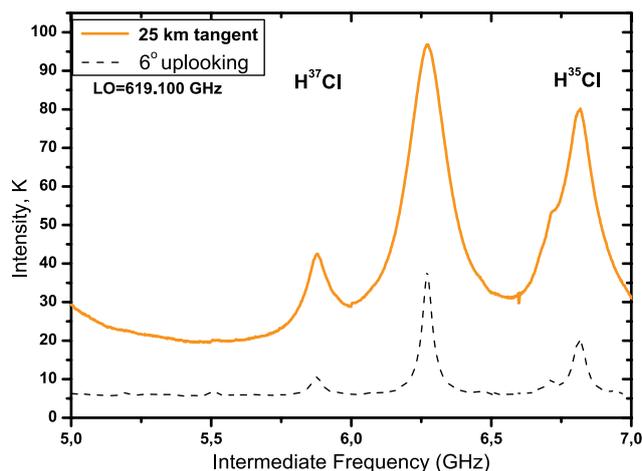


Рис. 6. Спектры, измеренные инструментом TELIS. Показаны спектральные линии двух изотопов HCl (частота СГГ=619,1 ГГц); приведены данные для двух направлений сканирования (25 км и для телескопа, поднятого на 6 градусов вверх).

ское, что дает возможность использовать его *in vivo*. Все эти факторы позволяют применять ТГц спектрометры для медицинских исследований. В частности, спектроскопический анализ выдыхаемого воздуха в ТГц диапазоне может быть эффективным неинвазивным диагностическим средством. Он позволяет

на основе измерения концентрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе 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 наблюдается оксид азота, NO и другие соединения). Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн позволяет реализовать предельную чувствительность (ограниченную лишь квантовыми флуктуациями), высокое спектральное разрешение и малое энергопотребление; такой набор параметров недостижим при использовании традиционных технологий. По сравнению с разработанными к настоящему времени системами с близкими параметрами предлагаемый интегральный спектрометр имеет значительно больший диапазон входных частот (за счет уникально широкой перестройки частоты сверхпроводникового генератора гетеродина), значительно меньшие габариты и энергопотребление, а также возможность однозначной идентификации маркеров заболеваний.

На базе интегрального спектрометра в ИРЭ РАН разработан и изготовлен макет измери-



Рис. 7. Фотография лабораторной установки для исследования спектров поглощения газов.

тельной криогенной установки для анализа выдыхаемого воздуха. Диапазон входных частот составляет 480–630 ГГц, шумовая температура на большей части диапазона составляет менее 200 К, разрешение лучше 1 МГц. Такие параметры позволяют регистрировать спектральные линии вращательных переходов большинства простых органических и неорганических соединений, присутствующих в выдохе человека. Был разработан измерительный стенд, включающий газовую кювету и систему напуска и откачки образцов газов и газовых смесей. В лабораторной кювете были проведены измерения газа OCS и NH_3 . 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 измере-

ния субТГц спектров выдоха человека показали не только высокую селективность и быстроту анализа, но и значительную чувствительность спектрометра.

В заключение авторы хотели бы отметить, что в выполнении проекта активное участие принимали наши коллеги, сотрудники ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и они являются полноправными соавторами полученных результатов: П.Н. Дмитриев (изготовление и исследование интегральных схем), А.Б. Ермаков (алгоритмы управления, программирование), Н.В. Кинев (экспериментальные исследования). В рамках проекта TELIS тесное сотрудничество осуществлялось со специалистами Института космических исследований Нидерландов (SRON): Р.А. Yagoubov, G. de Lange, A. de Lange, H. Golstein, R. Hoogeveen, B. van Kuik, L. de Jong, J. Dercksen, D. Boersma, E. de Vries.

Литература

1. «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм волн для радиоастрономии и мониторинга атмосферы», проект РФФИ № 03-02-16748-а (2003–2005).
2. «Разработка бортового сверхпроводникового спектрометра терагерцового диапазона для мониторинга атмосферы и радиоастрономии», проект РФФИ № 06-02-17206-а (2006–2008).
3. *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).
4. *Koshelets V. P. and Shitov S V.* “Integrated Superconducting Receivers”. *Supercond. Sci. Technol.* 13, R53 (2000).
5. *Filippenko L.V., Shitov S.V., Dmitriev P.N., et al*, “Integrated Superconducting Receiver: fabrication and yield”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, No 1, pp. 816–819, (2001).
6. *Dmitriev P.N., Lapitskaya I.L., Filippenko L.V., et al*, “High Quality Nb-based Integrated Circuits for High Frequency and Digital Applications”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 13, No 2, pp. 107–110, (2003).
7. *Torgashin M.Yu., Koshelets V.P., Dmitriev P.N., et al*, “Superconducting Integrated Receivers based on Nb-AlN-NbN circuits”, “*IEEE Trans. on Appl. Supercond.*”, vol. 17, pp.379– 382, (2007).
8. Проект РФФИ № 11-02-12213_офи-м «Генераторы и детекторы СВЧ излучения на основе сверхпроводниковых туннельных наноструктур».
9. Патент на изобретение № 22325003, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской федерации 20 мая 2008 года «Криогенный генератор гетеродина на основе распределенного туннельного перехода для интегрального спектрометра субмм волн с системой ФАПЧ», авторы Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Филиппенко Л.В., Торгашин М.Ю.
10. *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).
11. *Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., и др*, «Сверхпроводниковый интегральный приемник субмиллиметрового диапазона», *Успехи современной радиоэлектроники*, №5, стр. 75–81, (2010)
12. *de Lange, A., Birk, M., de Lange, G., et al*, «HCl and ClO in activated Arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra», *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 487–500, (2012).