

Интегральные сверхпроводниковые приемники субмм волн

Кошелец В.П., Шитов С.В., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н.,

Ермаков А.Б., Соболев А.С., Торгашин М.Ю.

Институт радиотехники и электроники РАН

В статье дан обзор последних достижений в области создания криогенных приемных устройств субмм и терагерцового диапазонов длин волн на основе туннельных переходов сверхпроводник – изолятор - сверхпроводник (СИС). Особое внимание уделено описанию разработок сверхпроводниковых интегральных приемных (СИП) устройств со сверхпроводниковым генератором гетеродина. В статье описана микросхема приемника, в которой интегрированы квантовый смеситель на основе квазичастичной нелинейности СИС - перехода, планарная сверхпроводниковая приемная антенна и криогенный генератор гетеродина. При подаче лишь постоянного питания от батарей эта микросхема работает как супергетеродинный приемник в субмм диапазоне волн, не требуя никакого дополнительного СВЧ оборудования. Такие приемники незаменимы для радиоастрономии, систем космической спецсвязи, а также мониторинга окружающей среды, осуществляемого с борта спутников, аэростатов или специальных самолетов.

Разработан и испытан интегральный спектрометр, в котором частота ФФО синхронизирована широкополосной системой ФАПЧ. Для такого спектрометра на частоте 365 ГГц было продемонстрировано частотное разрешение лучше 10 кГц. Описан интегральный спектрометр диапазона 500 - 650 ГГц, предназначенный для исследований атмосферы Земли в режиме наклонного зондирования с борта высотного аэростата - проект Terahertz Limb Sounder (TELIS); первый полет запланирован на 2005 год.

Integrated Superconducting Submm Wave Receivers

V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev,

A.N. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin

Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Science

The review of the last achievements in the field of cryogenic submm wave receivers based on tunnel junction Superconductor-Isolator-Superconductor (SIS) is presented in the paper. The main attention was paid to novel Superconducting Integrated Receiver (SIR) with on-chip superconducting local oscillator. The single-chip microcircuit of the receiver, which integrates quantum mixer based on nonlinearity of quasiparticle current in SIS junction, planar quasioptical antenna and superconducting local oscillator, is described. Such microcircuit, being dc powered only by batteries, operates as a heterodyne submillimeter wave receivers without any additional microwave equipment. Lightweight and compact ultra sensitive submm SIRs with low power consumption are very attractive for radio-astronomical research, space communication systems and distant monitoring of the Earth atmosphere from satellites, balloons and special aircrafts.

A breadboard of a superconducting integrated spectrometer with a phase-locked FFO has been developed and tested showing that the frequency resolution of the full receiver is as low as 10 kHz at 364 GHz. This study provides an important input for future development of a balloon-based 500-650 GHz integrated receiver for international project named Terahertz Limb Sounder (TELIS). This integrated spectrometer will be used for monitoring of the Earth atmosphere; the first fly is scheduled on 2005.

1. Сверхпроводниковые приемные устройства для радиоастрономии и мониторинга атмосферы.

Благодаря успехам в области сверхпроводниковой электроники были созданы сверхчувствительные приемные системы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн с рекордными параметрами. Смесители на основе нелинейности туннельного тока квазичастиц в переходах сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (СИС), безусловно, являются наиболее чувствительными приемными элементами во всем миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне волн (от 100 до 1000 ГГц) [1 - 8]. Предельная чувствительность таких устройств ограничена только квантовым пределом hf/k , причем в настоящее время шумовая температура практических устройств лишь в 3-5 раз превосходит этот предел [3 - 8] (см рис. 1). Так, например, шумовая температура лучших СИС приемников на частоте порядка 500 ГГц составляет 60-100 К, что на порядок меньше чем у приемников на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ).

Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными природой элементов и криогенной рабочей температурой. При воздействии на СИС переход высокочастотной накачки (гетеродина) происходит туннелирование нормальных электронов (квазичастиц), стимулированное СВЧ фотонами [1]. Этот квантовый процесс позволяет получать преобразование частоты вниз с усилением и шумами, ограниченными лишь квантовыми флуктуациями. СИС смесители на основе ниобия ($Nb-AlO_x-Nb$) признаны на сегодня наиболее эффективными гетеродинными детекторами для радиоастрономии при изучении спектров межзвездного излучения в диапазоне частот 100-1000 ГГц.

Поскольку время накопления для приема сверхслабых сигналов и обнаружения сверхмалых концентраций веществ пропорционально квадрату шумовой температуры используемого приемника, СИС - приемники позволяют значительно сократить время наблюдения, что чрезвычайно важно для современных дорогостоящих комплексов. В настоящее время СИС - приемники используются в качестве штатных устройств на большинстве радиотелескопов (см. Таблицу 1). Еще более перспективным представляется использование СИС-приемников в космических и авиационных системах бортового базирования (Таблица 2), где предельная чувствительность является принципиально важной.

Таблица 1 «Некоторые СИС - приемники наземного базирования»

Submillimeter facilities by Paolo G. Calisse

(http://oldnewt.phys.unsw.edu.au/~pcalisse/submm_facilities.html)

	Название	Организация, (место- положение)	Год	Диаметр антенны, м	Высота, м	Диапазон, ГГц	Тип приемника
ALMA	Atacama Large Millimeter Array	ESO/ NRAO (Chile)	2010	12 (всего 64 антенны)	5 000	35 - 850	СИС для $f > 150$ ГГц
APEX	Atacama Pathfinder EXperiment	Max-Planck Institute (Chile)	2003	12	5 000	200-1000	СИС приемники
AST/ RO	Antarctic Submillimeter Telescope	(South Pole, Antarctica)	1995	1.7 план - 10	2 900	150-820	СИС приемники
CSO	Caltech Submm Array	Mauna Kea (Hawaii, US)	1988	10.4	4 092		СИС приемники
JCMT	James Clerk Maxwell Telescope	Mauna Kea (Hawaii, US)		15	4 092		СИС приемники
SMA	Submillimeter Array	Mauna Kea (Hawaii, US)	2002	6 (8 антенн)	4 080	180-900	СИС приемники
SEST	Swedish-ESO Submm Telescope	La Silla (Chile)	1987	15	2 400	70-365	СИС приемники
	Nobeyama Observatory	Mt. Fuji (Japan)	1998	1.2	3 724	250-700	СИС приемники

Таблица 2 «Некоторые СИС - приемники бортового базирования»

	Название	Организация	Год	Диаметр, м	Высота, м	Диапазон, ГГц	Тип приемника
SOFIA	Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy	NASA, DLR	2005	2.5	15 000	1 000 – 60 000	ИК детекторы
SOFIA - CASIMIR	Caltech Airborne Submm Interstellar Medium Investigations Receiver	JPL, Cal Tech	2005	2.5	15 000	500-2000	СИС, НЕВ
Herschel - HIFI	Heterodyne Instrument for Herschel	ESA	2007	3.5	1.5E9	480–1250 > 1400	СИС НЕВ
	Space Infrared Telescope Facility	JPL Cal Tech	2003	1.7 (10)		1 600 – 100 000	ИК детекторы

Следует отметить, что охлаждение до температуры жидкого гелия не является серьезной технической проблемой и успешно решается как для наземных, так и для бортовых систем. При этом используются как системы замкнутого цикла, так и заливные криостаты. В качестве примера в Таблице 3 приведены основные технические характеристики спутника Herschel, который создается Европейским Космическим Агентством и будет запущен в 2007 году. Он включает в себя системы прямого детектирования и гетеродинные приемники, в таблице 4 приведены основные параметры гетеродинного инструмента «HIFI».

Таблица 3 «Технические характеристики спутника Herschel»

Диаметр телескопа	3.5 м
Точность обработки поверхности зеркала	10 мкм
Температура зеркала	70 К
Минимальная температура приемников	0.3 К
Объем жидкого гелия для охлаждения	Около 10 м ³
Расчетное время работы на орбите	Более 3 лет
Высота	9 м
Масса	3 300 кг
Скорость передачи научных данных	100 кбит/с
Суммарное энергопотребление	1 кВт
Запуск ракетой «Ариан-5»	15 февраля 2007 г.

Таблица 4 «Параметры гетеродинного инструмента HIFI- Hershel»

№№	Диапазон частот (ТГц)	Тип смесительного элемента	Тип настроечной (согласующей) структуры	Шумовая температура (К)	Тип приемной и волноведущей структуры
1	480 – 640	СИС Nb-AlO _x -Nb	Микрополосок Nb над Nb	80 - 120	Скалярный рупор и волновод
2	640 – 800	СИС NbTiN-AlO _x -Nb	Микрополосок Al над NbTiN	120 - 170	Скалярный рупор и волновод
3	800 – 960	СИС NbTiN-AlO _x -Nb	Микрополосок Al над NbTiN	170 - 220	Скалярный рупор и волновод
4	960 – 1120	СИС NbTiN-AlO _x -Nb	Микрополосок Al над NbTiN	220 - 270	Скалярный рупор и волновод
5	1120– 1250	СИС NbTiN-AlN-NbTi	Микрополосок Al над NbTiN	270 - 580	Линза и двойная щелевая антенна
6L	1410– 1703	NbN НЕВ phonon cooled	Копланарная линия из алюминия	580 - 750	Линза и двойная щелевая антенна
6H	1703– 1910	NbN НЕВ phonon cooled	Копланарная линия из алюминия	750 - 770	Линза и двойная щелевая антенна

Из Таблицы 4 видно, что СИС смесители на квазичастичной нелинейности выбраны в качестве приемных элементов вплоть до частоты 1.25 ТГц, поскольку являются наиболее чувствительными. При дальнейшем повышении частоты (выше двойной щелевой частоты используемых сверхпроводников) наиболее перспективными представляются смесители на горячих электронах - Hot Electron Bolometers (НЕВ), механизм преобразования которых не имеет резкой частотной границы; этим структурам посвящена отдельная статья в данном сборнике [9].

2. Интегральные сверхпроводниковые приемники

В последние годы были созданы предпосылки для разработки сложных сверхпроводниковых устройств, позволяющих не только принимать сверхслабые сигналы, но производить их цифровую обработку. В ИРЭ РАН была предложен и экспериментально апробирован принципиально новый подход к использованию современных достижений сверхпроводниковой электроники - интеграция сверхпроводниковых элементов с целью создания семейства полностью сверхпроводниковых приемников мм и субмм волн с шумовой температурой близкой к квантовому пределу. Такой интегральный приемник [10, 11] объединит нескольких планарных сверхпроводниковых компонентов: СИС-смеситель с квазиоптической антенной, криогенный генератор гетеродина, усилитель промежуточной частоты, а также устройство для оцифровки сигнала и его обработки в реальном масштабе времени. Интегральные приемники незаменимы для пассивной и активной радиолокации, радиоастрономии, систем космической спецсвязи, а также мониторинга окружающей среды, осуществляемого с борта спутников или специальных самолетов. В настоящее время реализован первый этап этой программы и создан однокристалльный интегральный приемник субмм волн, где в одной микросхеме соединены СИС – смеситель с приемной антенной и криогенный генератор гетеродина на основе распределенного туннельного перехода, работающего в режиме вязкого течения джозефсоновских вихрей (Flux Flow Oscillator - ФФО).

Сверхпроводниковые генераторы на основе распределенных джозефсоновских переходов (ФФО) были успешно испытаны в качестве интегрального источника гетеродина в диапазоне частот от 100 до 700 ГГц, обеспечивая достаточную мощность для накачки СИС смесителя (порядка 1 мкВт на частоте 500ГГц). Как частота, так и мощность ФФО могут

меняться в широких пределах без каких-либо механических перестроек. Недавно (впервые для генераторов на эффекте Джозефсона) была экспериментально доказана возможность фазовой синхронизации ФФО к опорному синтезатору.

Перечислим основные преимущества интегральных приемников мм и субмм волн (в дополнение к уже упомянутой предельно низкой шумовой температуре СИС-смесителей).

1) Поскольку для частот принимаемого излучения выше 300 ГГц наблюдается существенное поглощение сигнала парами воды в атмосфере, все субмиллиметровые приемники и радиотелескопы располагаются на значительной высоте или устанавливаются на борту специальных самолетов и спутников. При этом большие габариты, вес и цена генераторов гетеродина в субмм диапазоне длин волн являются основным фактором, ограничивающим широкое использование субмм приемников. Применение сверхпроводникового генератора гетеродина позволяет интегрировать его с СИС смесителем и разместить в том же криостате, не приводя к дополнительному увеличению габаритов, веса, и потребляемой мощности.

2) Малые габариты интегрального приемника позволяют естественным образом построить на его основе многоэлементный матричный приемник, не увеличивая существенно размеры и вес всей приемной системы. Возможно несколько вариантов построения такого приемника:

а) все элементы приемника настроены на одну частоту и их выходные сигналы суммируются, давая интегральную информацию об объекте. При этом существенно сокращается время накопления сигнала;

б) элементы настроены на разные частоты, что позволяет получать характеристики исследуемого объекта в разных диапазонах спектра;

в) все элементы работают на одной частоте но сигнал каждого анализируется отдельно, что позволяет получать одновременно несколько точек в изображении объекта в субмм диапазоне длин волн.

2.1. Конструкция и реализация интегрального супергетеродинного приемника мм и субмм волн.

С помощью оригинальных программ расчета и анализа была разработана конструкция микросхемы интегрального приемника. На одном чипе размером $4 \times 4 \times 0,5 \text{ мм}^3$ были интегрированы двойная дипольная антенна, СИС смеситель с системой подавления джозефсоновских шумов и ФФО с согласующими элементами. Фотография центральной части интегральной схемы приемника представлена на рис. 2; на рис. 3 показан увеличенный вид приемной планарной антенны и СИС смесителя. СИС переход размещен в центре двойной дипольной антенны, рассчитанной на центральную частоту 500 ГГц; на эту же частоту была настроена микрополосковая структура для компенсации емкости туннельного перехода. Симметрия антенны позволила использовать с обеих сторон одинаковые подводы к смесителю с копланарными фильтрами для предотвращения утечки принимаемого сигнала. Левые фильтры (рис. 2) использовались для подсоединения СИС смесителя на постоянном токе и промежуточной частоте (ПЧ). Правые подводы использовались для подключения сверхпроводникового генератора гетеродина на основе распределенного джозефсоновского перехода.

При проектировании интегрального сверхпроводникового приемника должны быть решены по крайней мере две принципиальных проблемы. Первая связана с согласованием СИС смесителя со сверхпроводниковым генератором гетеродина. При оптимальном согласовании заметная часть принимаемой мощности полезного сигнала будет уходить в тракт гетеродина. С другой стороны, мощность ФФО ограничена, что не позволяет использовать слишком большое затухание. В данной конструкции приемника развязка между смесителем и гетеродином

была выбрана порядка - 7 дБ, она реализована за счет специально рассчитанного рассогласования импедансов подводящей линии и смесителя. При этом удавалось в частотном диапазоне более 50 ГГц достигать требуемый уровень накачки СИС смесителя. Избежать потерь мощности гетеродина позволяет использование балансного смесителя, однако при этом требуются обеспечить объединение ПЧ сигналов от двух смесителей, работающих в противофазе.

Другой проблемой является необходимость задания существенно различных магнитных полей для работы СИС смесителя и ФФО. Для подавления джозефсоновского шума в туннельном переходе нужно полностью подавлять его критический ток; необходимое для этого поле превосходит на 2 порядка уровень, требуемый для работы ФФО. Эта проблема была решена благодаря разработке двух отдельных сверхпроводящих шин управления, создающих локальные магнитные поля для СИС и ФФО. Экспериментально была продемонстрирована возможность полного подавления джозефсоновского шума в интегральном СИС-смесителе, при развязке по полю между этими линиями лучше 10^{-4} .

Интегральные микросхемы приемника изготавливались в ИРЭ РАН на подложке из кристаллического кремния на основе высококачественных переходов Nb-AlO_x-Nb. СИС смеситель и ФФО изготавливались в едином вакуумном цикле на основе туннельных переходов с плотностью критического тока 5 - 8 кА/см², что соответствует удельному сопротивлению барьера $R_n * S = 40 - 25 \text{ Ом} * \text{мкм}^2$ и джозефсоновской глубине проникновения около 4 мкм. СИС переходы имели площадь 1 - 1,5 мкм², распределенный джозефсоновский переход (ФФО) имел длину около 500 мкм и ширину 3-5 мкм.

Для экспериментального исследования интегрального приемника [11 - 14] смесительный блок был смонтирован в вакуумном объеме гелиевого

криостата с оптическим окном. Интегральная микросхема приемника с дополнительным контр-рефлектором устанавливалась на эллиптической линзе из кремния с просветляющим покрытием. Преобразованный сигнал подавался на охлаждаемый НЕМТ усилитель (полоса 1,1 - 1,7 ГГц, $T_{ш} = 3$ К). Экспериментальное тестирование приемника проводилось совместно с лабораторией космических исследований Нидерландов (SRON, Groningen). На рисунках 4(а) и (б) представлены фотографии модуля интегрального приемника. На рис 4(б) хорошо видна микросхема приемника, соединенная с измерительной платой с помощью ультразвуковой сварки.

Для интегрального приемника с внутренним гетеродином – ФФО на частоте 500 ГГц реализованы следующие параметры: диапазон перестройки более 70 ГГц, минимальная шумовая температура – порядка 100 К (см рис. 5). Была измерена диаграмма направленности интегрального приемника (рис. 6). Эта диаграмма измерялась путем перемещения источника излучения перед криостатом. Полученные параметры (ширина основного максимума 4 градуса, уровень боковых лепестков не более -17 дБ) полностью удовлетворяют требованиям радиоастрономических наблюдений.

Совместно с Лабораторией космических исследований Голландии была разработана [13 – 15] концепция построения многоэлементного матричного приемника миллиметровых волн на основе СИС-смесителя и интегрального генератора гетеродина на основе ФФО. После анализа различных схем построения была выбрана концепция на основе отдельных эллиптических линз; такая конструкция напоминает мушиный глаз и поэтому называется "fly's eye" (см. рис. 7). В качестве отдельного элемента такого матричного приемника использовался модуль интегрального приемника, показанный на рис. 4.

2.2. Линия излучения сверхпроводникового ФФО, методы ее стабилизация

Для проведения спектральных измерений чрезвычайно важным является частотное разрешение приемника. Это разрешение, определяемое мгновенной шириной линии излучения генератора гетеродина и его долговременной стабильностью, должно быть лучше чем 10^{-6} от центральной частоты приемника.

Для измерения ширины линии излучения ФФО использовались специально спроектированные микросхемы (рис. 8), в которых интегрированы ФФО, СИС-смеситель и высокочастотные согласующие структуры. Экспериментальная схема включала в себя смеситель с двумя СИС - переходами, площадью порядка 1 мкм^2 и настроечной структурой для компенсации их емкости на рабочей частоте; трехступенчатый трансформатор импеданса и распределенный джозефсоновский переход – ФФО в качестве исследуемого устройства. Параметры всех СВЧ структур были оптимизированы с помощью специально разработанных программ для диапазона частот 300 - 650 ГГц. Сигнал от ФФО смешивался в СИС детекторе с m -ой гармоникой опорного генератора, давая сигнал промежуточной частоты $f_{IF} = \pm (f_{\text{ФФО}} - m f_{\text{ref}})$. Чтобы предотвратить просачивание сигнала синтезатора и его наиболее мощных низких гармоник в сторону ФФО, был использован фильтр, пропускающий сигналы только с частотой, выше 200 ГГц. Два DC блока были включены в микрополосковую линию для развязки ФФО и СИС смесителя по постоянному току f_{IF} . Этот метод был успешно использован для измерения ширины линии ФФО в широком частотном диапазоне от 150 до 700 ГГц.

Для осуществления частотной синхронизации ФФО к опорному синтезатору применялся частотный детектор. Управляющий выход

детектора использовался для тонкой подстройки частоты ФФО путем изменения тока питания или магнитного поля (за счет изменения тока в линии управления). Обратная связь работала в относительно узкой полосе порядка 100 кГц, ограниченной низкочастотными фильтрами. Детальные измерения формы линии продемонстрировали (см. рис. 9), что ФФО в режиме стабилизации частоты имеет лоренцевскую форму линии генерации [16, 17]. Этот факт свидетельствует о том, что линия ФФО определяется широкополосными (тепловыми и дробовыми) флуктуациями.

Экспериментально показано, что ширина линии излучения длинного джозефсоновского перехода приближенно описывается феноменологической формулой: $\delta f = (2\pi/\Phi_0^2)(R_d^B + K*R_d^H)^2 S_i(0)$, где $R_d^B = \partial V_{FFO}/\partial I_B$ и $R_d^H = \partial V_{FFO}/\partial I_H$ - дифференциальные сопротивления по току смещения и току, создающему магнитное поле соответственно, $S_i(0)$ -спектральная плотность токовых флуктуаций при нулевой частоте, K – эмпирический коэффициент порядка единицы [18]. Эта модель позволяет оценивать ширину линии генерации ФФО во всем рабочем диапазоне.

С помощью широкополосной адаптивной системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), разработанной в ИФМ РАН, Н. Новгород, экспериментально продемонстрирована возможность сужения линии генерации джозефсоновского осциллятора по сравнению с автономной шириной, определяемой тепловыми флуктуациями и дробовым шумом [19 - 21]. Впервые для джозефсоновского генератора в диапазоне частот 200 - 700 ГГц реализован режим ФАПЧ (рис. 10)

Эти результаты доказывают, что с помощью электронной системы ФАПЧ возможно управлять (и существенно снижать) ширину линии джозефсоновского генератора (при условии, что полоса петли обратной связи системы превышает автономную ширину линии ФФО). Спектральная ширина линии синхронизированного ФФО намного меньше,

чем у автономного генератора. Не менее важно, что частота ФФО с системой ФАПЧ может перестраиваться в широких пределах. Были измерены фазовые шумы ФФО в зависимости от отстройки частоты по отношению к несущей и от частоты излучения ФФО (см. рис. 11). Измеренная величина фазовых шумов (порядка -70 dBc/Hz) позволяет использовать приемник с ФФО для спектральных измерений в субмм диапазоне длин волн с высоким частотным разрешением в радиоастрономии и аэрономии (для мониторинга атмосферы).

2.3. Интегральный спектрометр с ФФО в режиме ФАПЧ.

Обнадеживающие результаты синхронизации ФФО были положены в основу концепции интегрального приемника с петлей ФАПЧ [22 - 24]. Согласно этой концепции сигнал ФФО распределяется между двумя СИС-смесителями, один из них используется как приемный квазичастичный элемент, в то время как второй работает в режиме гармонического смесителя. Была спроектирована и изготовлена микросхема приемника на частоту 350 ГГц, которая включает квазиоптический СИС-смеситель, ФФО с петлей ФАПЧ, гармонический СИС-смеситель, а также (в качестве возможного дополнительного варианта) джозефсоновский умножитель в качестве источника накачки для гармонического смесителя (см рис. 12). В этой схеме ФФО синхронизируется 35-ой гармоникой синтезатора на частоте 10 ГГц, с использованием специально разработанной системы ФАПЧ с полосой петли обратной связи более 10 МГц.

Для демонстрации спектрального разрешения интегрального приемника с системой ФАПЧ гетеродина было проведено измерение спектра стабильного источника сигнала на частоте 365 ГГц. В качестве источника сигнала был использован гармонический умножитель ($n = 34$), питаемый синтезатором (рис. 13). Полученные данные доказывают, что разрешение приемника с системой ФАПЧ лучше 10 кГц, что удовлетворяет

всем известным практическим применениям. С помощью этого приемника были измерены спектры поглощения SO₂ при различных давлениях газа в кювете (рис. 14). В настоящее время совместно с Институтом космических исследований Голландии (г. Гронинген) ведутся работы по созданию бортового спектрометра для мониторинга атмосферы с помощью специального аэростата, первый запуск которого намечен на 2005 год (проект TELIS) [25 - 27]. Ожидаемые параметры сверхпроводникового спектрометра приведены в Таблице 5.

Таблица 5. Параметры интегрального спектрометра для проекта TELIS

##	Описание	Ожидаемые параметры
1	Входной диапазон частот, ГГц	500 - 650
2	Минимальная шумовая температура в двухполосном режиме (DSB), К	200
3	Выходной диапазон промежуточных частот, ГГц	4 - 8
4	Спектральное разрешение (ширина спектрального канала), МГц	1
5	Вклад в соседний спектральный канал шумов гетеродина (ФФО с системой ФАПЧ) – динамический диапазон спектрометра, дБ	-20
6	Вклад в спектральный канал шумов гетеродина (ФФО с системой ФАПЧ при отстройке 4-6 ГГц, К	20
7	Шаг гетеродина по частоте, МГц	< 300
8	Выделяемая мощность на ступени 4.2 К (включая усилители ПЧ), мВт	100
9	Рабочая температура, К	< 4.5

Заключение.

Приведенные результаты демонстрируют, что интегральные приемные системы полностью апробированы на частотах вплоть до 700 ГГц, и подошли к стадии практической реализации. Для продвижения частоты интегральных приемников в область выше 700 ГГц (целевая частота ниобия) уже созданы и испытываются структуры на основе СИС-переходов с новыми типами туннельных барьеров (AlN, MgO), с использованием пленок NbN в качестве материала электрода.

Рисунки

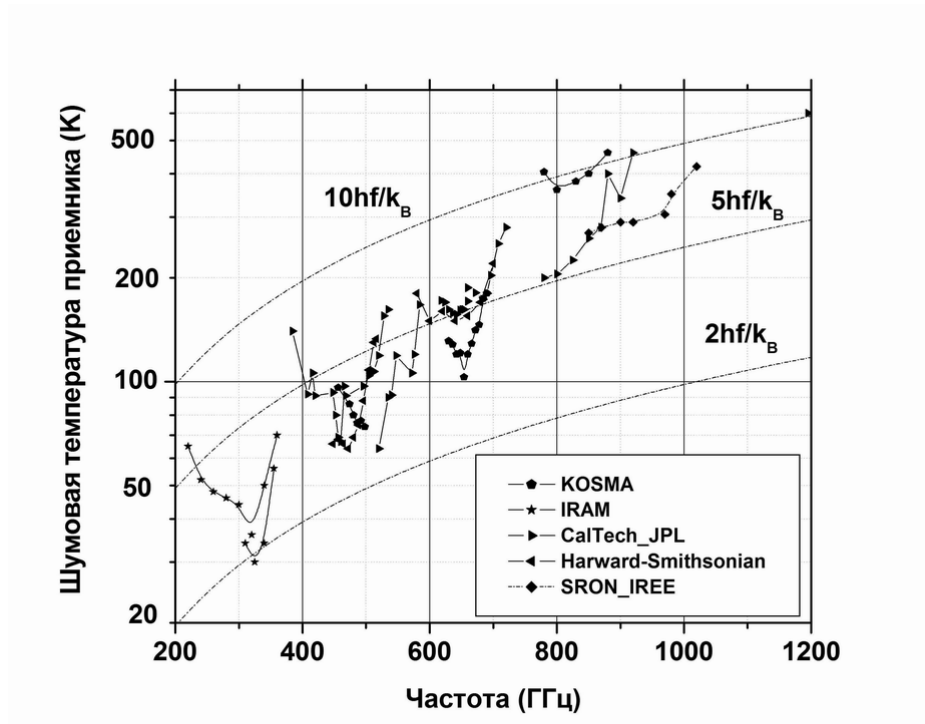


Рис. 1. Частотная зависимость шумовой температуры СИС-приемников, созданных в различных научных центрах.

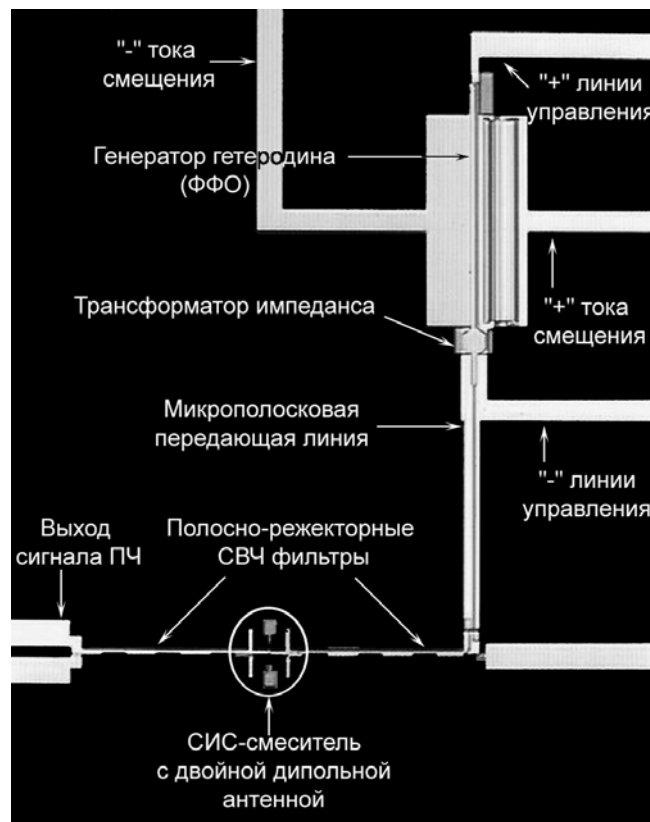


Рис. 2. Микрофотография центральной части микросхемы интегрального приемника.

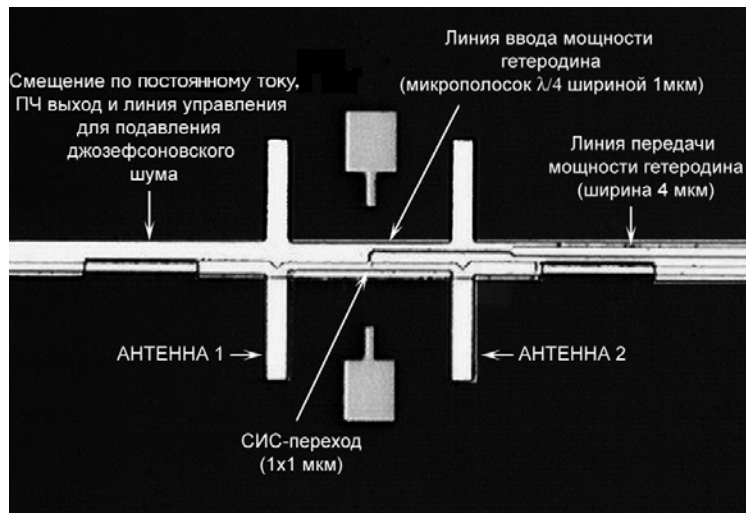


Рис. 3. Микрофотография двойной дипольной антенны с включенным в нее СИС-смесителем.

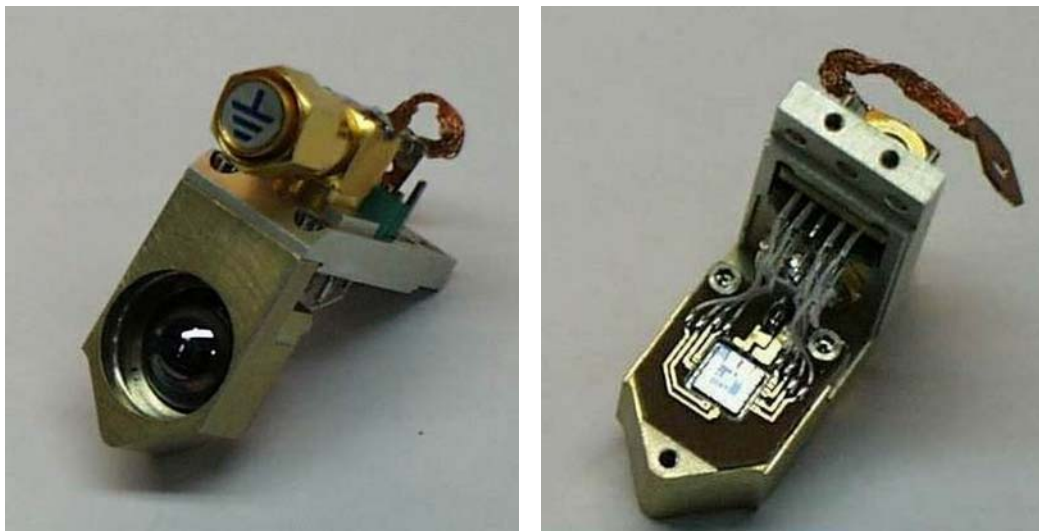


Рис. 4. Модуль интегрального приемника с кремниевой линзой.

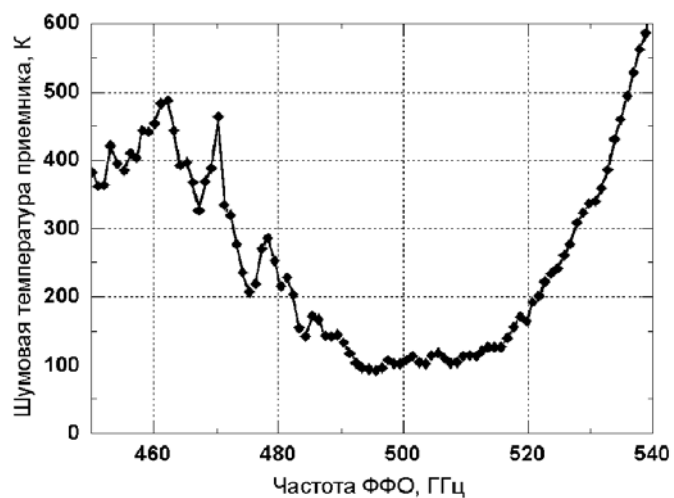


Рис. 5 Шумовая температура интегрального приемника в двухполосном режиме для балансной конструкции СИС-смесителя.

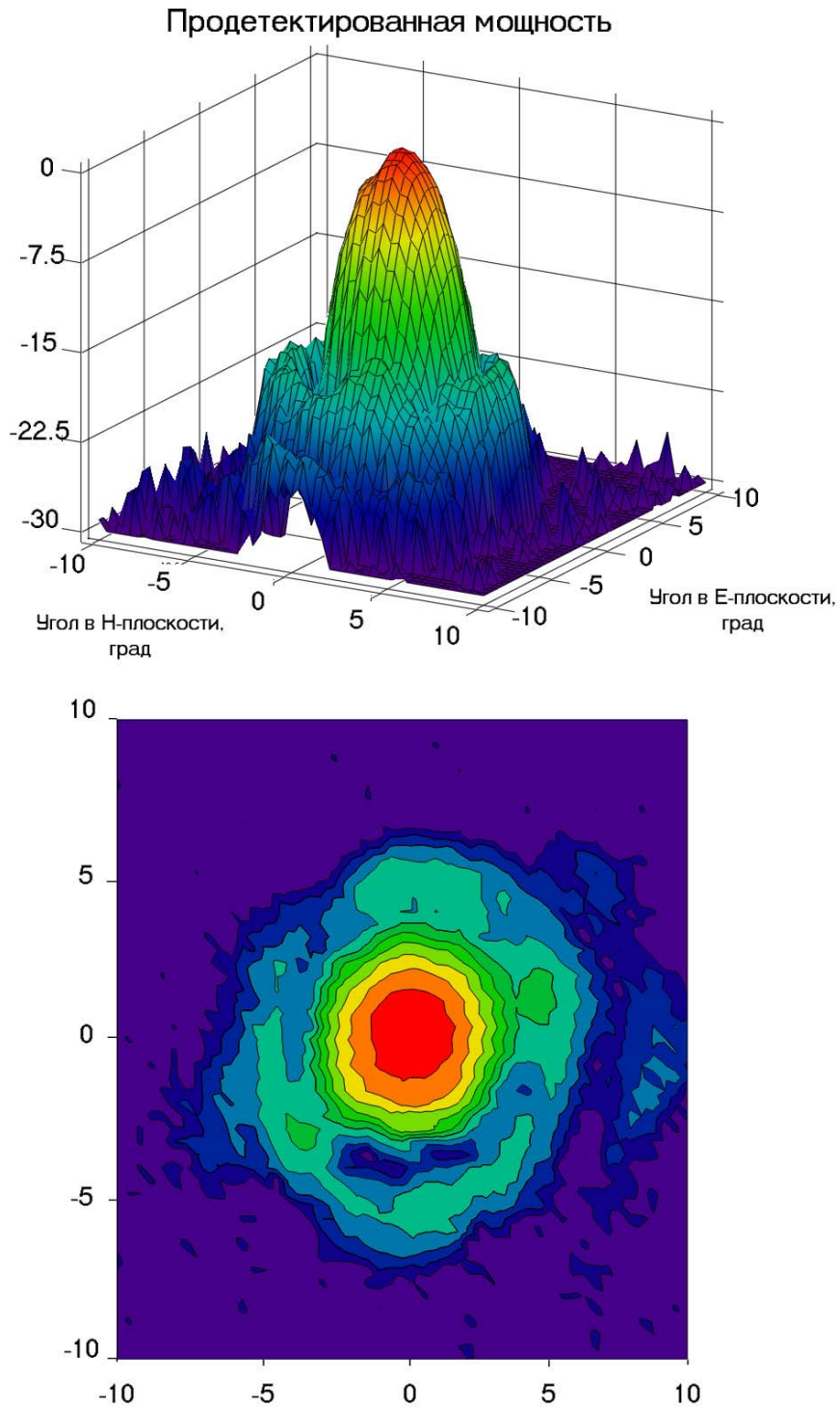


Рис. 6. Трехмерная и двумерная диаграммы направленности интегрального приемника. По осям X и Y отложено угловое отклонение от оптической оси приемника. На верхнем рисунке по оси Z показана измеренная интенсивность сигнала в дБ, на нижнем рисунке измеренный сигнал представлен контурами равной интенсивности (расстояние между контурами – 2 дБ)



Рис. 7. Многоэлементный матричный приемник (число отдельных элементов $n = 9$) диапазона 500 ГГц с интегральным сверхпроводниковым генератором гетеродина.

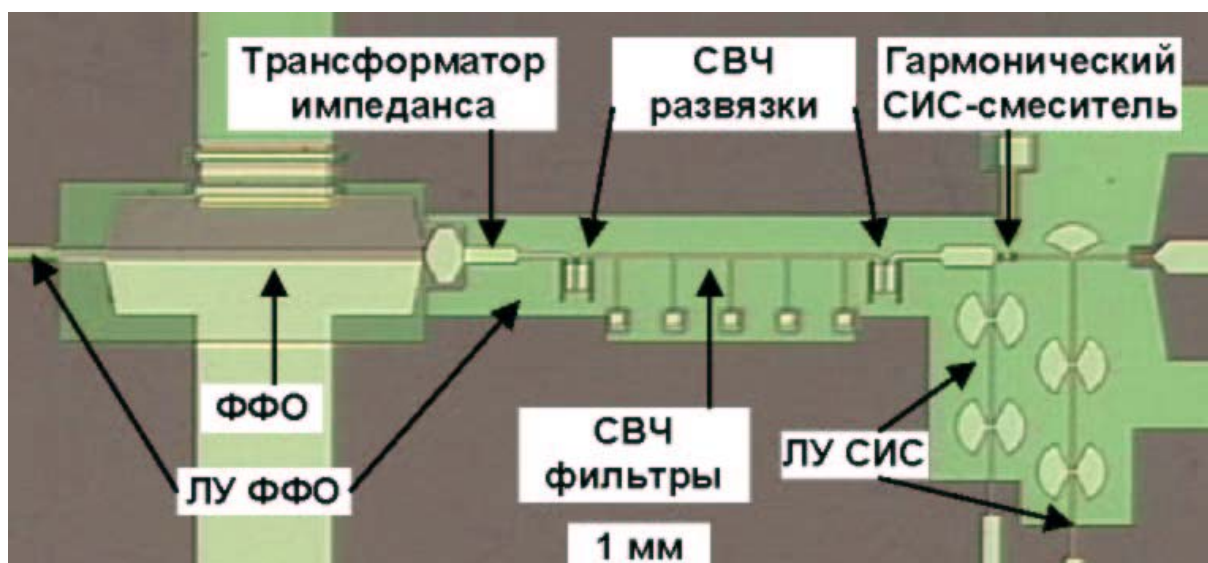


Рис. 8. Микрофотография центральной части микросхемы для измерения ширины линии излучения ФФО.

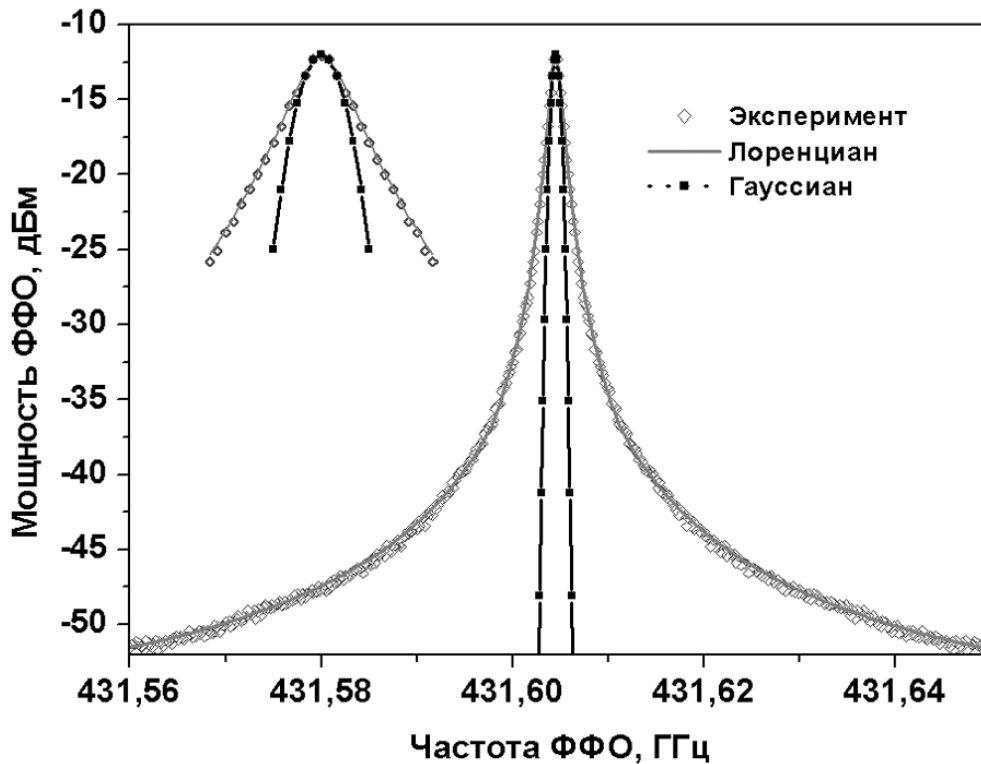


Рис. 9. Спектр излучения ФФО при частотной стабилизации излучения. На рисунке показаны также теоретические зависимости для Лоренцева и Гауссова распределений.

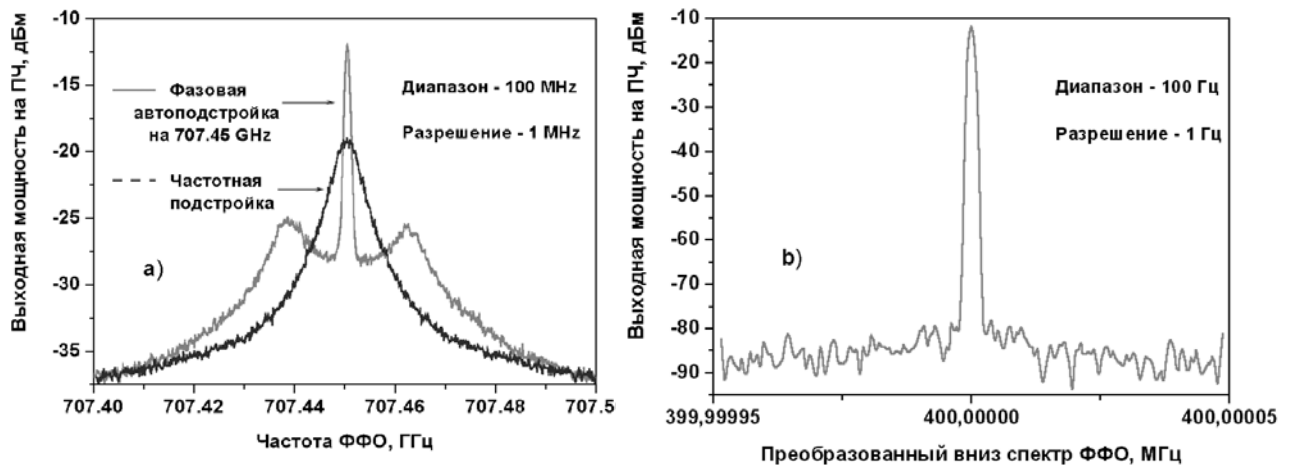


Рис. 10. (а) - Спектр излучения ФФО в режиме частотной и фазовой стабилизации частоты ФФО. (б) - Преобразованная вниз по частоте линия излучения ФФО в режиме ФАПЧ, измеренная при разрешении спектроанализатора 1 Гц.

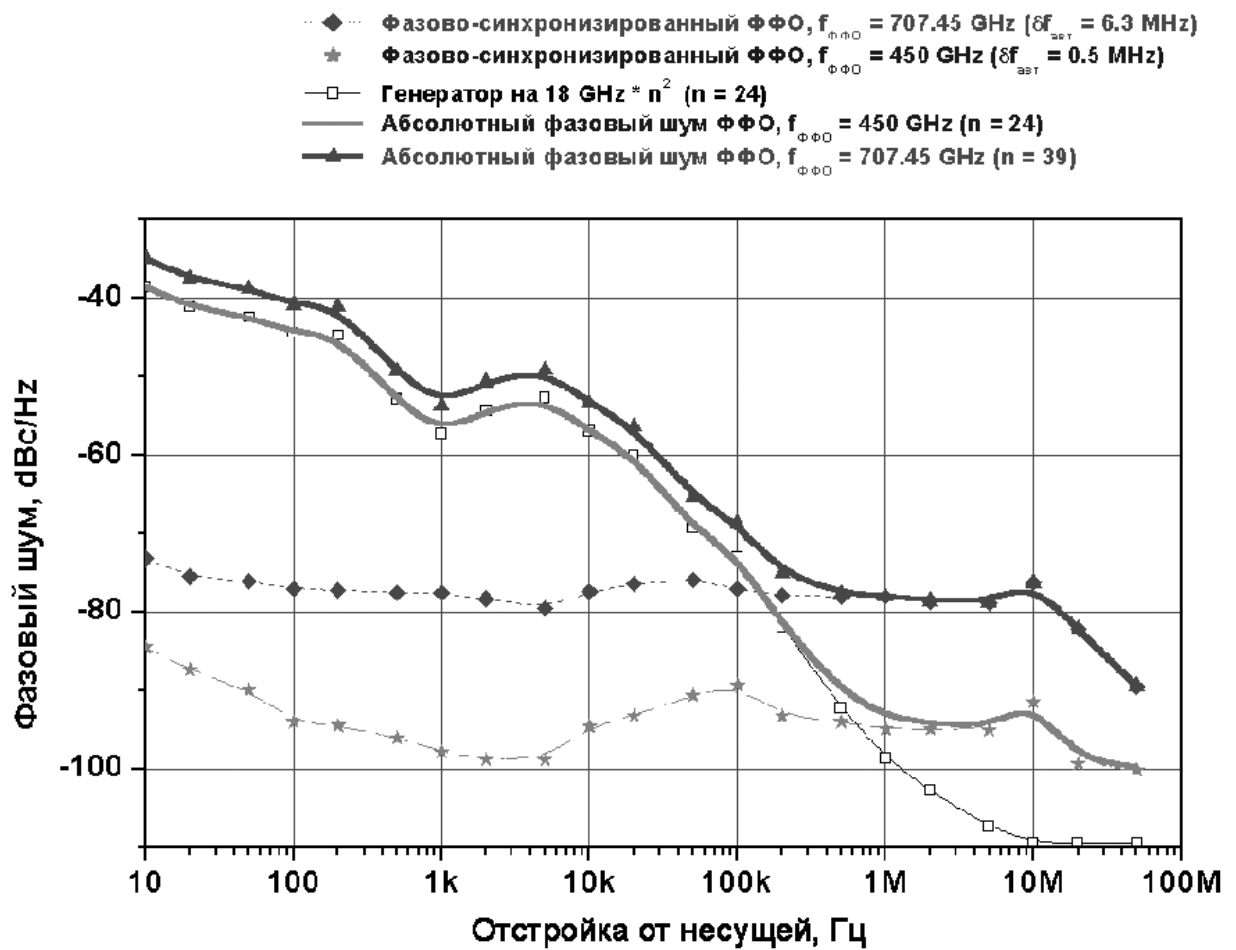


Рис. 11. Фазовые шумы ФФО в зависимости от отстройки частоты от несущей (для двух рабочих частот ФФО: 450 и 707,45 ГГц). На рисунке также показаны фазовые шумы используемого синтезатора и абсолютный фазовый шум ФФО с учетом вклада шумов синтезатора и гармонического умножителя (сплошная линия).

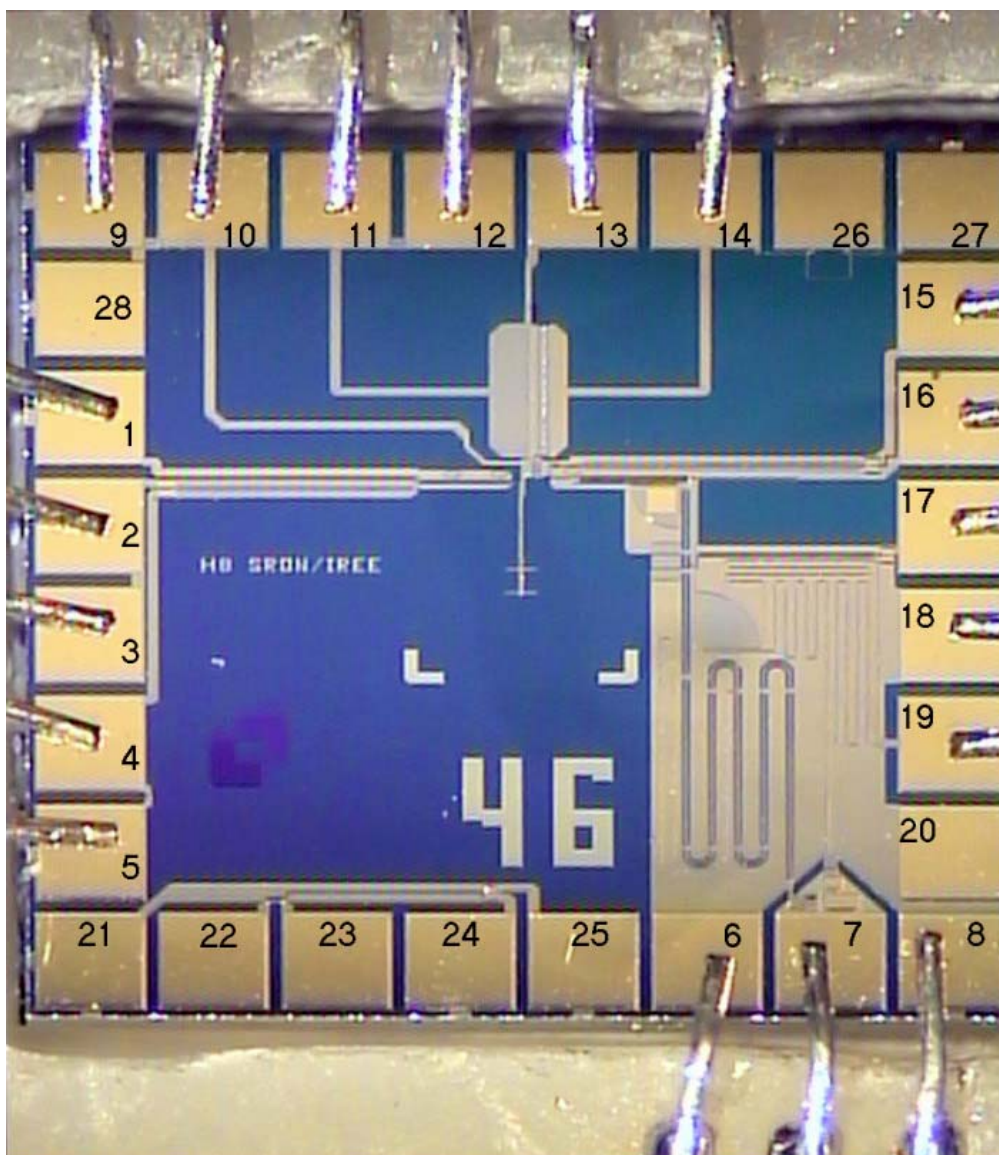


Рис. 12. Фотография микросхемы интегрального спектрометра с элементами стабилизации частоты ФФО (размер чипа $4 \times 4 \text{ мм}^2$). Цифрами на фотографии показаны контактные площадки: (1), (2) смещение СИС-смесителя и выход ПЧ; (3), (4) линия управления для подавления джозефсоновских шумов в СИС-смесителе; (5) смещение для питания балансного смесителя (дополнительный элемент); (6)-(8) вход опорного сигнала синтезатора и смещения для гармонического СИС-смесителя; (9), (11), (12), (14) задание тока и измерение напряжения ФФО; (10), (13) линия управления магнитным полем ФФО; (15)-(16) линия управления магнитным полем гармонического смесителя; (17)-(18) линия управления магнитным полем умножителя (дополнительный элемент); (19)-(20) смещение СИС-умножителя (дополнительный элемент); (21)-(27) тестовый переход; (28) дополнительное заземление (ФФО).

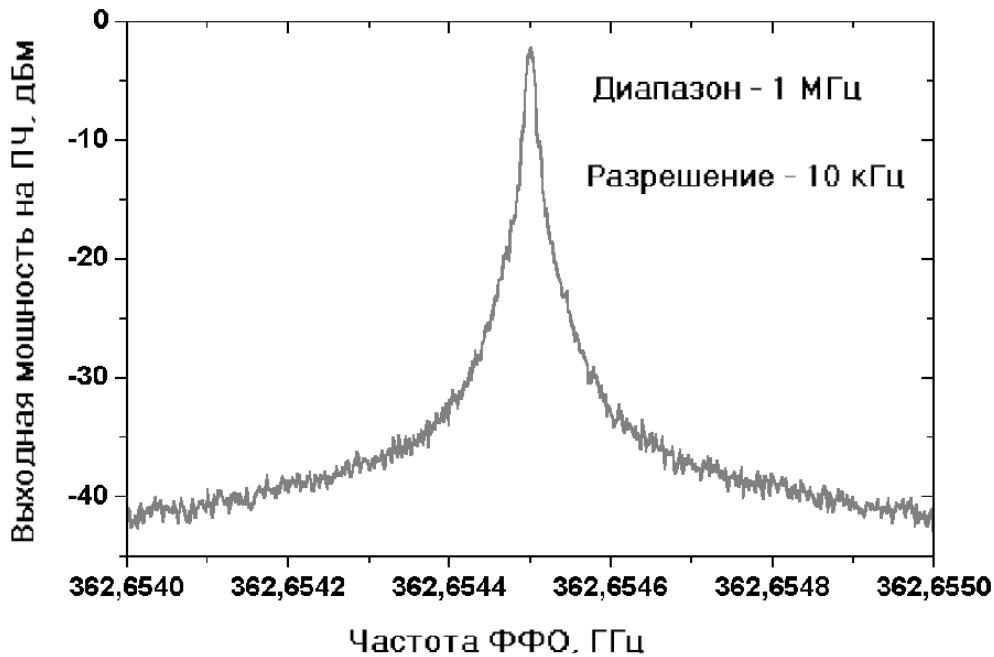


Рис. 13. Сигнал от синтезатора, умноженный по частоте с помощью полупроводникового гармонического умножителя и зарегистрированный интегральным спектрометром с ФФО в режиме ФАПЧ, работающим на частоте 364.0545 ГГц (ПЧ = 1.4 ГГц, нижняя боковая полоса).

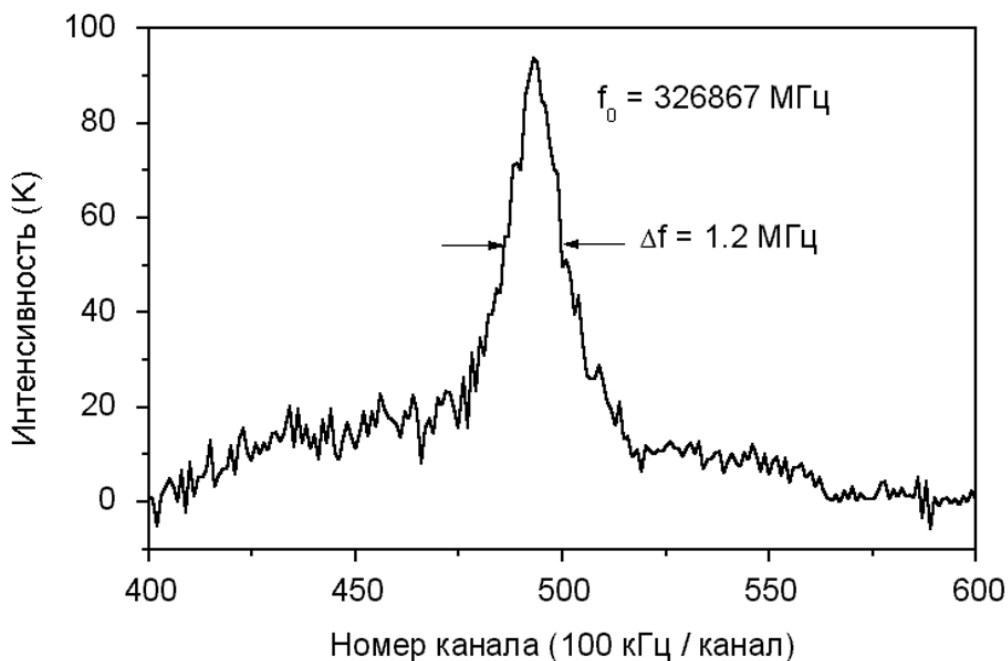


Рис. 14. Спектральная линия газа SO_2 при давлении 0.03 мБар, измеренная с помощью сверхпроводникового интегрального приемника с ФФО в режиме ФАПЧ. Данные обработаны с помощью акусто-оптического спектрометра (AOS).

Литература

1. Tucker, J.R., Feldman, M.J., Quantum detection at millimeter wavelengths, *Rev. of Mod. Phys.*, **4**, 1055-1113, (1985).
2. Blundel, R. & Tong, C.E., Submillimeter receivers for radio astronomy, *Proc. IEEE*, **80**, 1702-1720, (1992)
3. S. V. Shitov, V. P. Koshelets, S. A. Kovtonyuk, An. B. Ermakov, N. D. Whyborn and C.-O. Lindstrom, "Ultra-low-noise 100 GHz Receiver Based on Parallel Biased SIS Arrays," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 406-408, 1991.
4. A. Karpov, J. Blondell, M. Voss, K.H. Gundlach, Four photons sensitivity heterodyne detection of submillimeter radiation with superconducting tunnel junctions, *IEEE Trans on Appl. Superconductivity*, Vol. 5, N 2, pp. 3304-3307, 1995.
5. J. Zmuidzinas, and H. G. LeDuc, *Quasi-optical slot antenna SIS mixers*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. 40, pp. 1797-1804, 1992.
6. J. Zmuidzinas, N. G. Ugras, D. Miller, M. Gaidis, H. G. LeDuc, J. A. Stern. Low-noise slot antenna SIS mixers. *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. 5, No. 2, p. 3053, 1995.
7. M.C. Gaidis, H.G. Leduc, Mei Bin, D. Miller, J.A. Stern, and J. Zmuidzinas, Characterisation of Low Noise Quasi-Optical SIS Mixers for the Submillimeter Band, *IEEE Transactions of Microwave Theory and Techniques*, p. 1130-1139, 1996.
8. S.C. Shi and N. Noguchi. "Low-noise Superconducting Receivers for Millimeter and Submillimeter Wavelengths", *IEICE Trans. Electron.*, v. E81-C, pp. 1584-1594 (1998).
9. Г.Н. Гольцман и др. – статья в данном сборнике
10. 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", presented at ASC-96, Pittsburgh, USA, report ET-6, (1996). *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 7, pp 2905-2908, (1997).
11. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, "Integrated Superconducting Receivers", *Superconductor Science and Technology*, **vol 13**, pp. R53-R69, (2000)
12. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, H. Golstein, T. de Graauw, W. Luinge, H. Schaeffer, H. van de Stadt "First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz"; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 9, pp. 1273-1275 (February 1996).
13. S.V. Shitov, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.P. Koshelets, A.B. Baryshev, W. Luinge, Jian-Rong Gao, "Superconducting Chip Receiver for Imaging Applications", presented at ASC-98, Palm Desert, CA, USA, Report EMA-09, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **v.9**, No 2, pp. 3773-3776, (1999).
14. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, "A submm SIS receiver with an integrated superconducting LO", <http://www.mma.nrao.edu/memos/index.html>, Millimeter Array (MMA) Antenna Memos #279, November (1999).
15. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, A.M. Baryshev, L.V. Filippenko, W. Luinge, J.R. Gao, P. Lehtikoinen, "Study of a Quasioptical Superconducting Integrated Receiver for Imaging Applications at 400-700 GHz", *Proc. 8-th Int. Symp. on Space Terahertz Tech.*, Cambridge, USA, pp. 281-290, (1997)
16. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind, "Radiation linewidth of flux flow oscillators", *Extended Abstracts*

of the 8-th International Superconductive Conference ISEC'2001, pp. 207-208, Osaka, Japan, June 2001, *Superconductor Science and Technology*, v. 14, pp. 1040 - 1043, (2001).

17. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, V.V. Khodos, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind, "Towards a Phase-Locked Superconducting Integrated Receiver: Prospects and Limitations", *Physica C*, **367**, pp. 249 - 255, (2002).

18. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.N. Mashentsev, A.S. Sobolev, V.V. Khodos, A.L. Pankratov, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, and J. Mygind, "Linewidth of Josephson flux flow oscillators, *Physica C* (2002)

19. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, V.L. Vaks, J. Mygind, A.B. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, "Flux Flow Oscillators for Sub-mm Wave Integrated Receivers", presented at ASC-98, Palm Desert, CA, USA, Report EQB-04, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.9, No 2, pp. 4133-4136, (1999).

20. J. Mygind, V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, W. Luinge, N. Whyborn, "Phase Locking of 270-440 GHz Josephson Flux Flow Oscillators", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 12, pp. 720-722, (1999).

21. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, V.L. Vaks, J. Mygind, A.B. Baryshev, W. Luinge, N. Whyborn, "Phase Locking of 270-440 GHz Josephson Flux Flow Oscillator", *Rev. of Sci. Instr.*, v. 71, No 1, pp. 289-293, (2000).

22. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, V.L. Vaks, J. Mygind, A.B. Baryshev, W. Luinge, H. Golstein, "Flux Flow Oscillators for Sub-mm Wave Integrated Receivers", presented at ASC-98, Palm Desert, CA, USA, Report EQB-04, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.9, No 2, pp. 4133-4136, (1999).

23. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, A.M. Baryshev, W. Luinge, J.-R. Gao, "Concept Of A Superconducting Integrated Receiver With Phase-Lock Loop", *Proc. 10-th Int. Symp. on Space Terahertz Tech.*, Charlottesville, Virginia, USA, March (1999).

24. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, V.L. Vaks, A.M. Baryshev, W. Luinge, N.D. Whyborn, J.-R. Gao, "A Superconducting Integrated Receiver With Phase-Lock Loop", presented at EUCAS'99, report 6-100, Sitges, Spain, September (1999), *Proceeding of the Fourth European Conference of Applied Superconductivity. Inst. Phys. Conf. Ser. No 167, vol 2, pp. 647-650, (2000).*

25. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, P.A. Yagoubov, W.-J. Vreeling, P.R. Wesselius, V.V. Khodos, V.L. Vaks, "An Integrated Receiver with Phase-Locked Superconducting Oscillator", *Applied Superconductivity Conference ASC'2002, Houston, USA, August 2002, Report 2ED03, Will be published in "IEEE Trans. on Appl. Supercond."* (2003).

26. P.A. Yagoubov, A.N. Maurellis, R.W.M. Hooegeveen, U. Mair, M. Krocka, G. Wagner, M. Birk, H.-W. Hübers, H. Richter, A. Semenov, V. Koshelets, S. Shitov, B. Ellison, B. Kerridge, D. Matheson, R. Siddans and J. Reburn. "TELIS –a balloon borne TERahertz and submm Limb Sounder", *Abstract for the Fourteenth International Symposium Space TeraHertz Technology, Tucson, Arizona, USA, April 22-24, (2003).*

27. S.V. Shitov, V.P. Koshelets, P.A. Yagoubov, L.V. Filippenko, P.N. Dmitriev, O.V. Koryukin, A.B. Ermakov, and R.W.M. Hooegeveen. "SIR Chip for TELIS", *Abstract for the Fourteenth International Symposium Space TeraHertz Technology, Tucson, Arizona, USA, April 22-24, (2003).*