



Сверхпроводниковые интегральные приемники терагерцового диапазона

*Лаборатория сверхпроводниковых устройств
для приема и обработки информации*

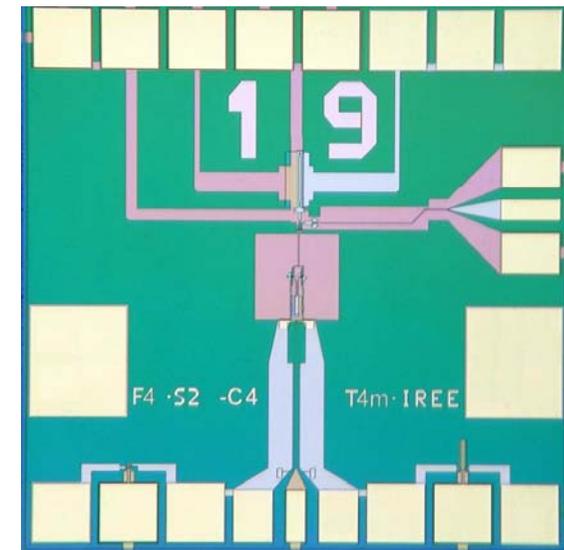
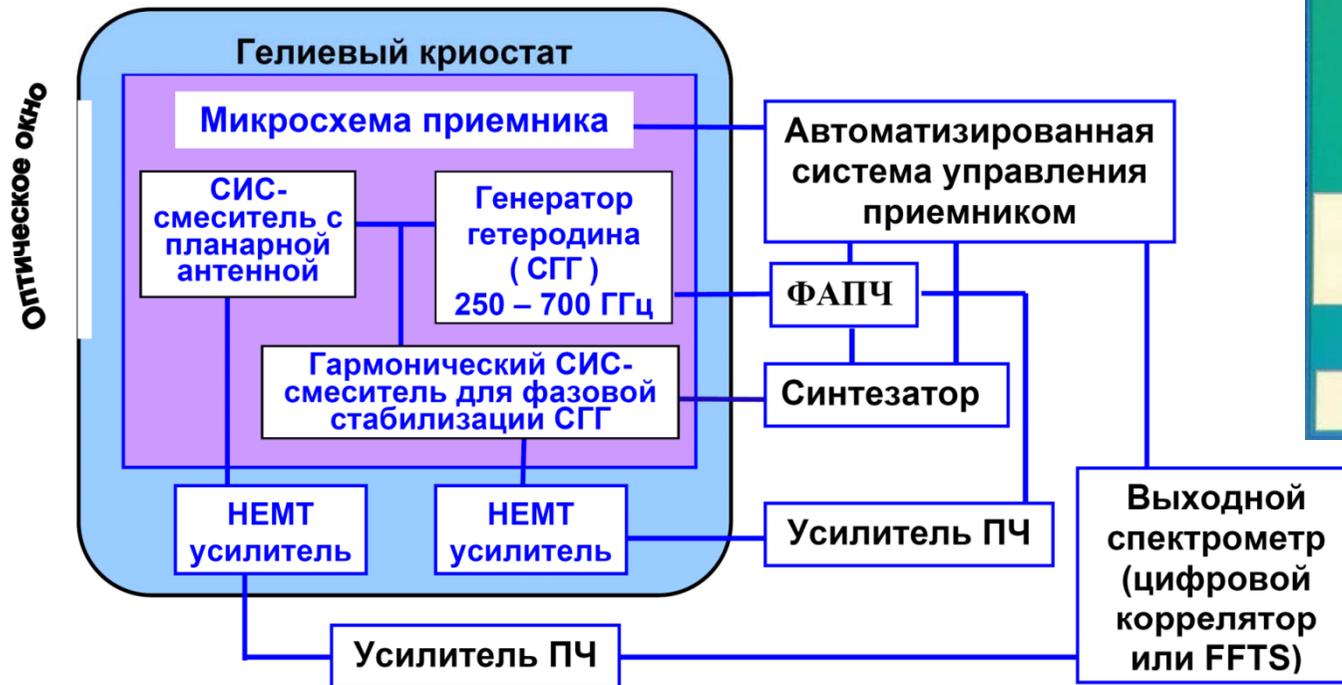
*Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН (Москва)*

Сверхпроводниковые интегральные приемники терагерцового диапазона

- Сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП)
- Сверхпроводниковый генератор гетеродина для СИП
- Проект **TErahertz Limb Sounder (TELIS)**
- Результаты проекта **TELIS**
- Другие применения **СИП**
- Заключение



Сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП)



Микросхема СИП



$\text{Nb-AIO}_x\text{-Nb}$ или Nb-AlN-NbN

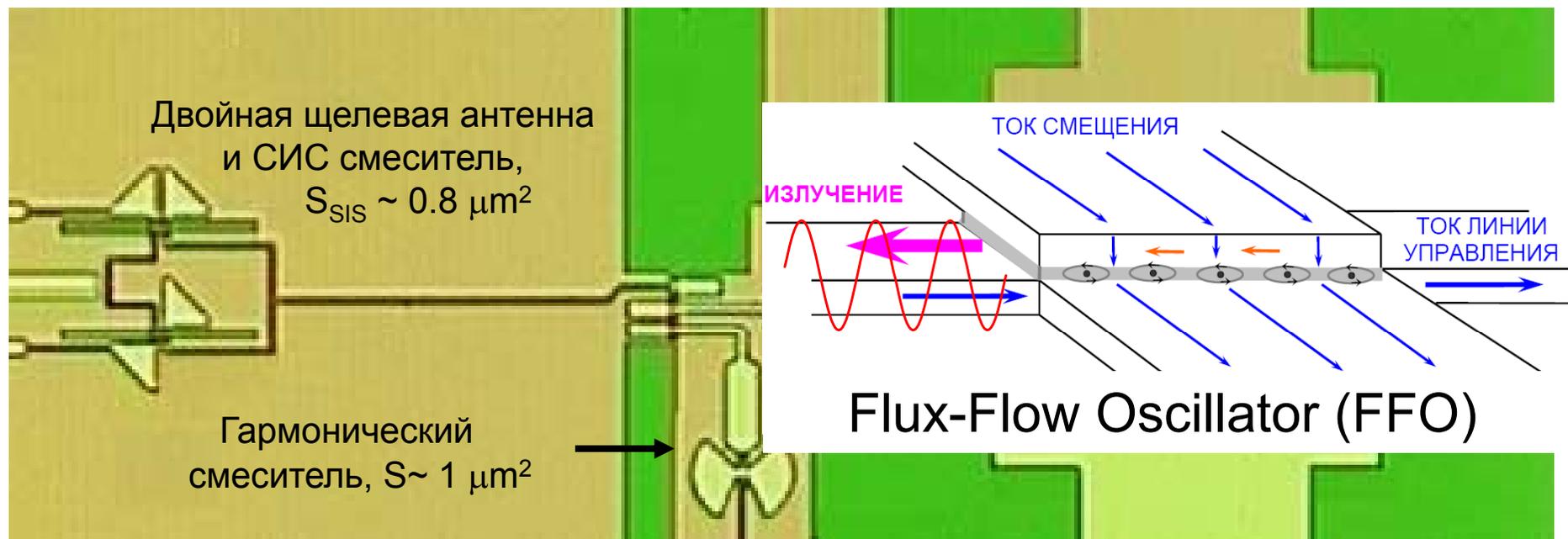
Плотность критического тока: $J_c = 3 - 8 \text{ кА/см}^2$;

Толщина туннельного барьера: $\sim 1 \text{ нм}$;

Площадь СИС перехода: $\sim 1 \text{ мкм}^2$



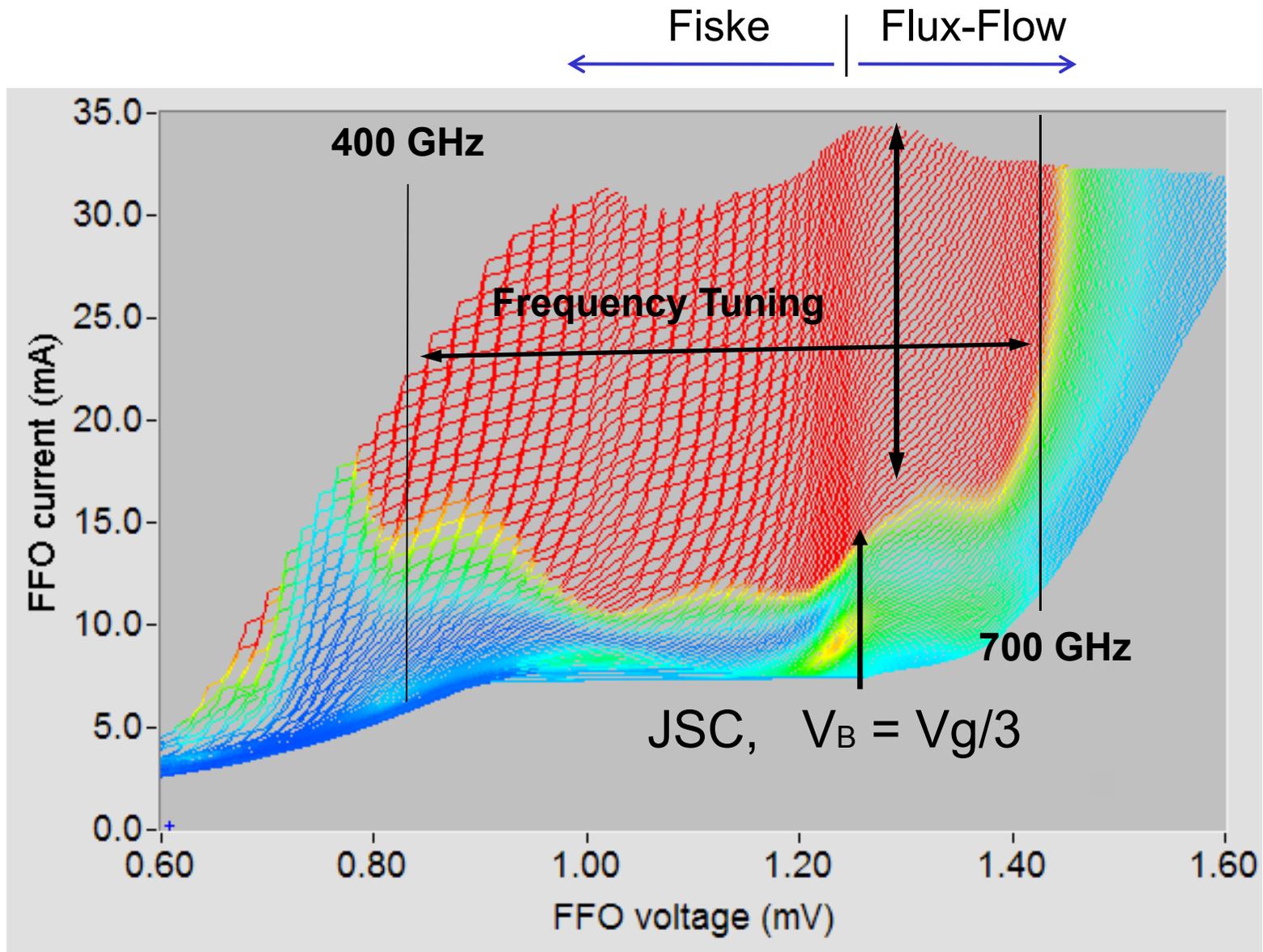
Центральная часть микросхемы интегрального приемника



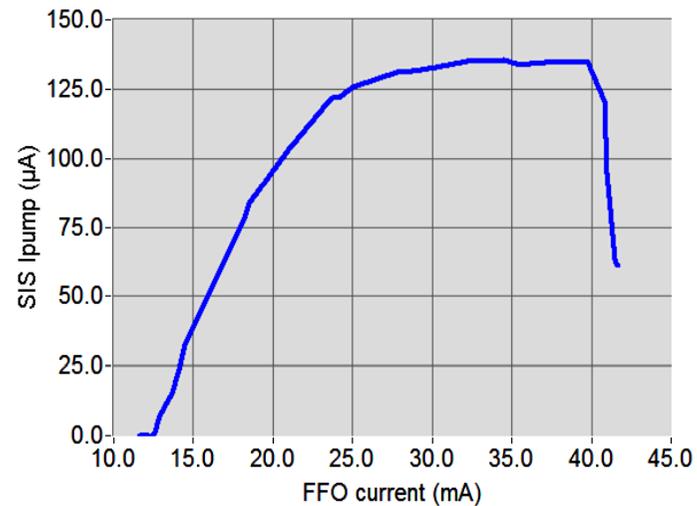
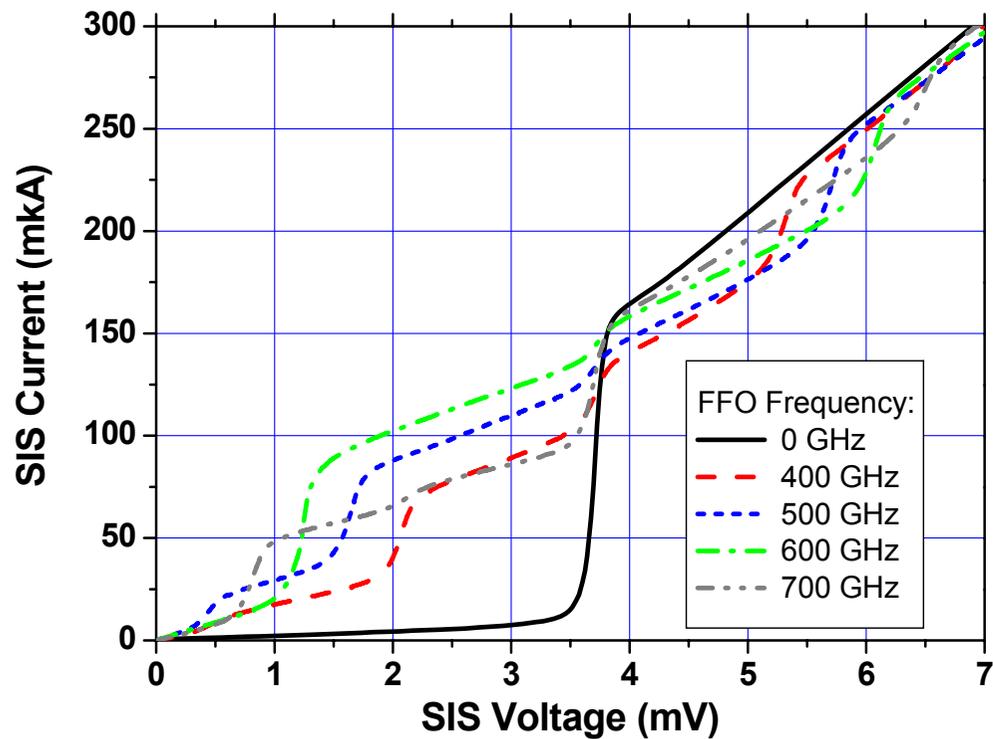
Nb-AlO_x-Nb; Nb-AlN-NbN; $J_c = 5 - 8 \text{ kA/cm}^2$

Optionally: SIS – $J_c = 8 \text{ kA/cm}^2$; FFO + HM = 4 kA/cm^2

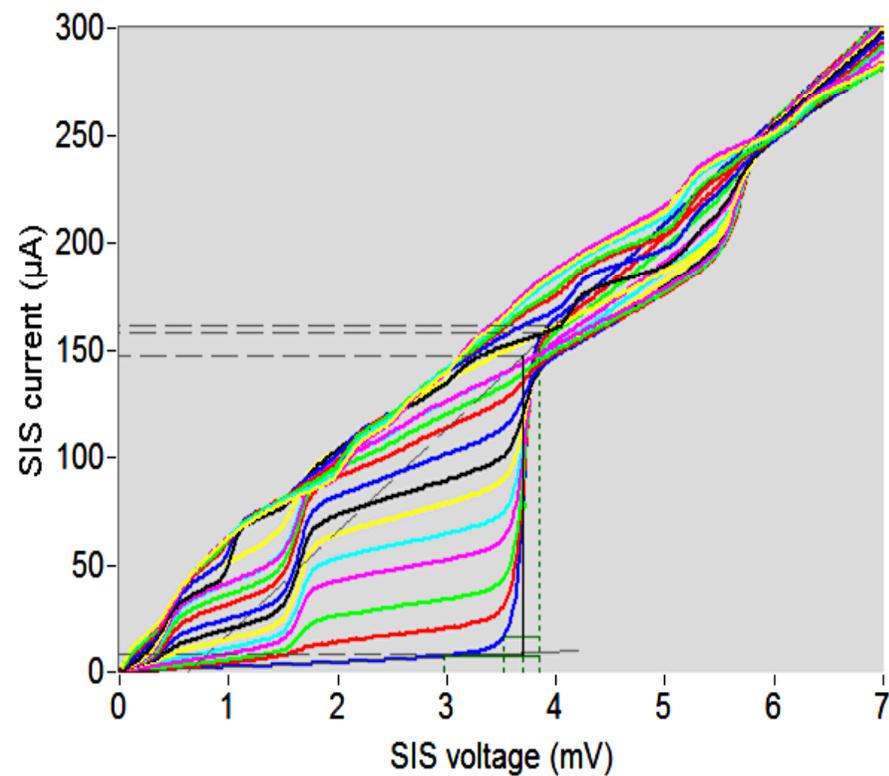
Сверхпроводниковый генератор гетеродина



Перестройка СГГ по частоте и мощности



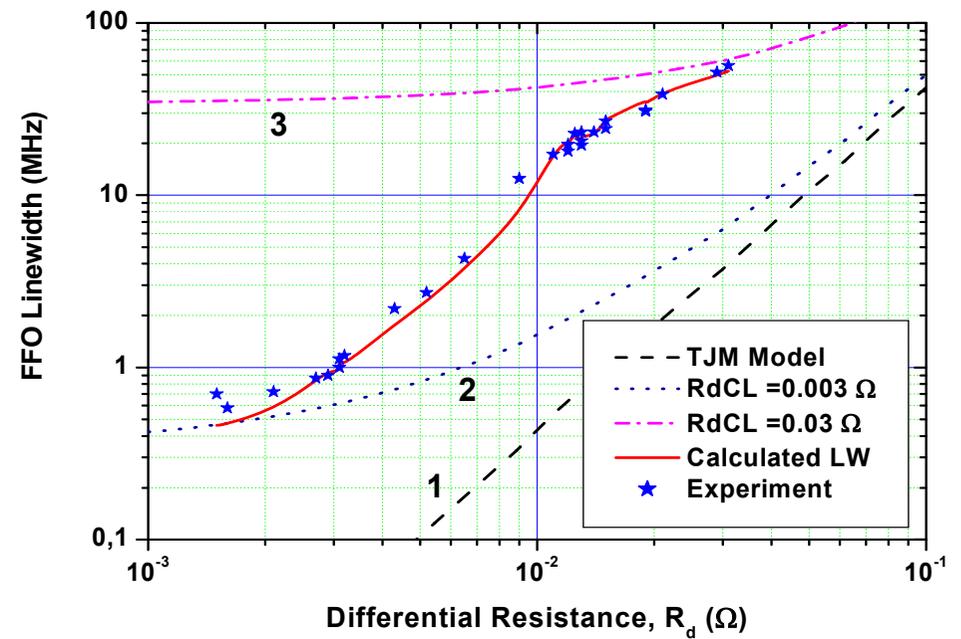
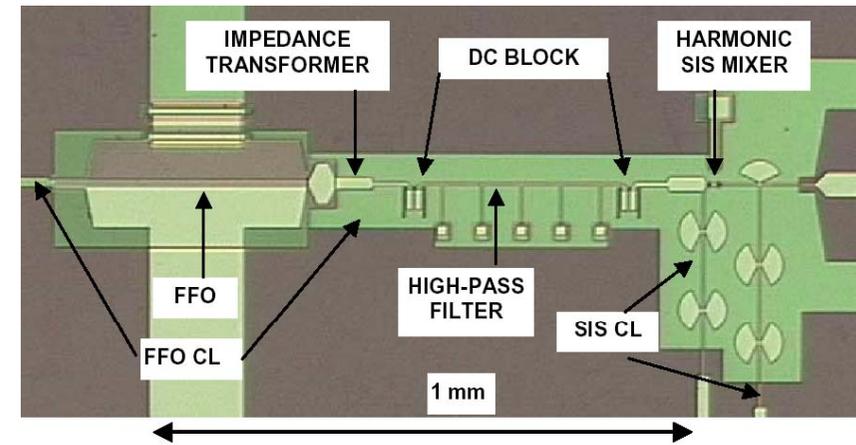
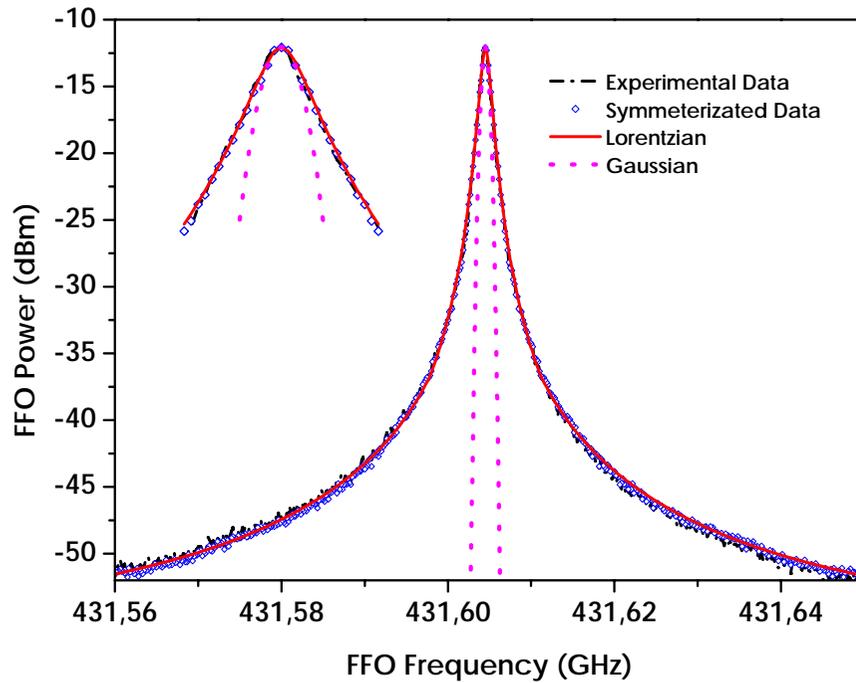
Частота СГГ = 500 ГГц



19 ноября 2012

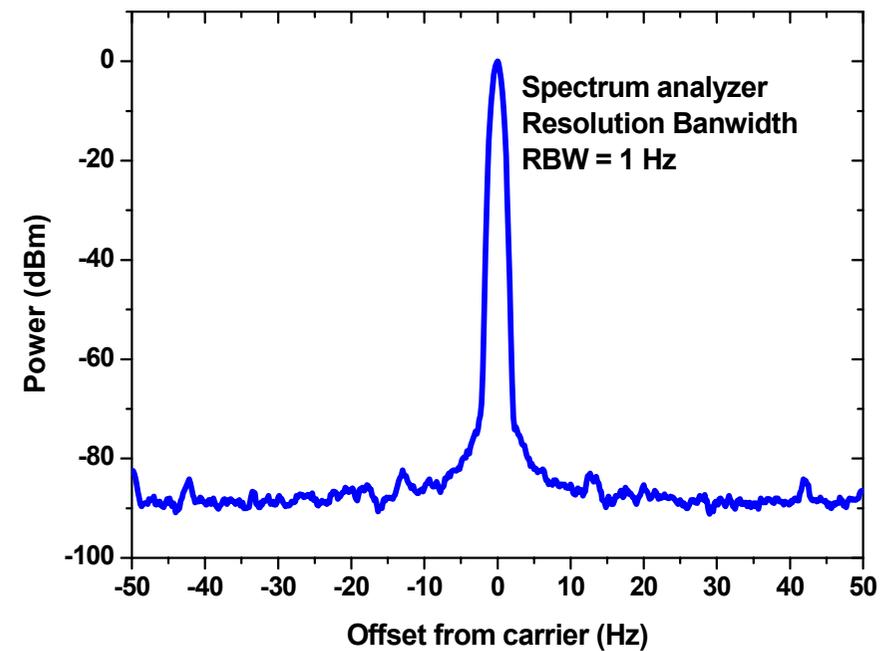
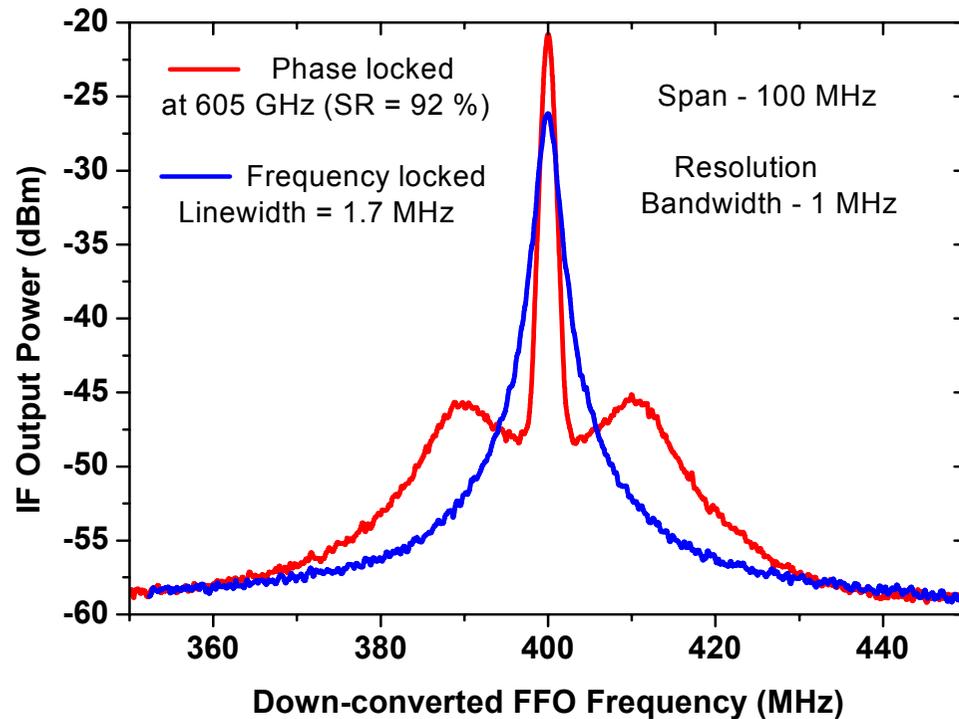


FFO Spectrum and Linewidth

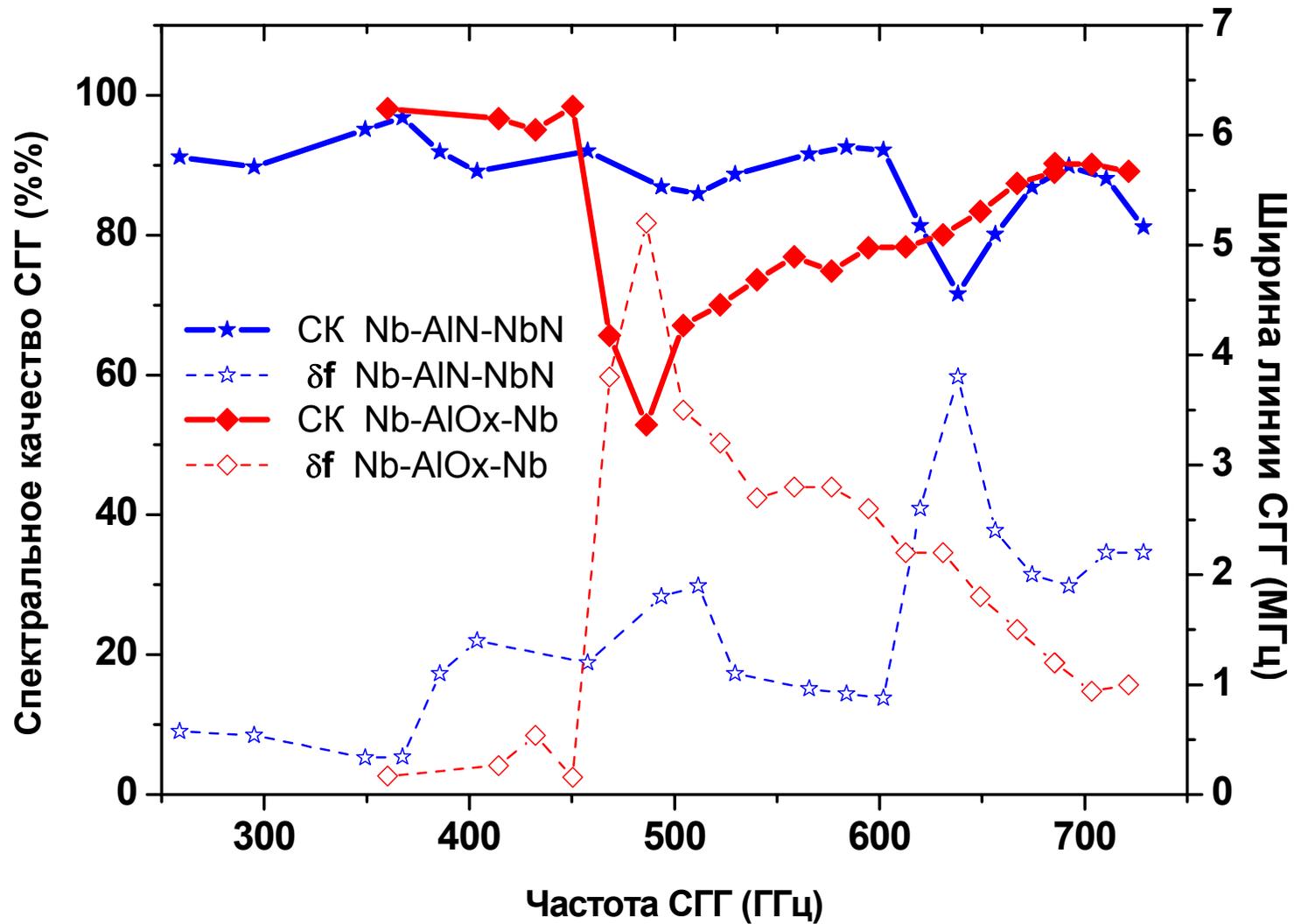


$$\Delta f = (Rd_B + K * Rd_{CL})^2 \left(\frac{2e}{h} \right)^2 \left[\frac{e * I_{qp}}{2\pi} \coth\left(\frac{eV}{2kT}\right) + \frac{e * I_s}{\pi} \coth\left(\frac{eV}{kT}\right) \right]$$

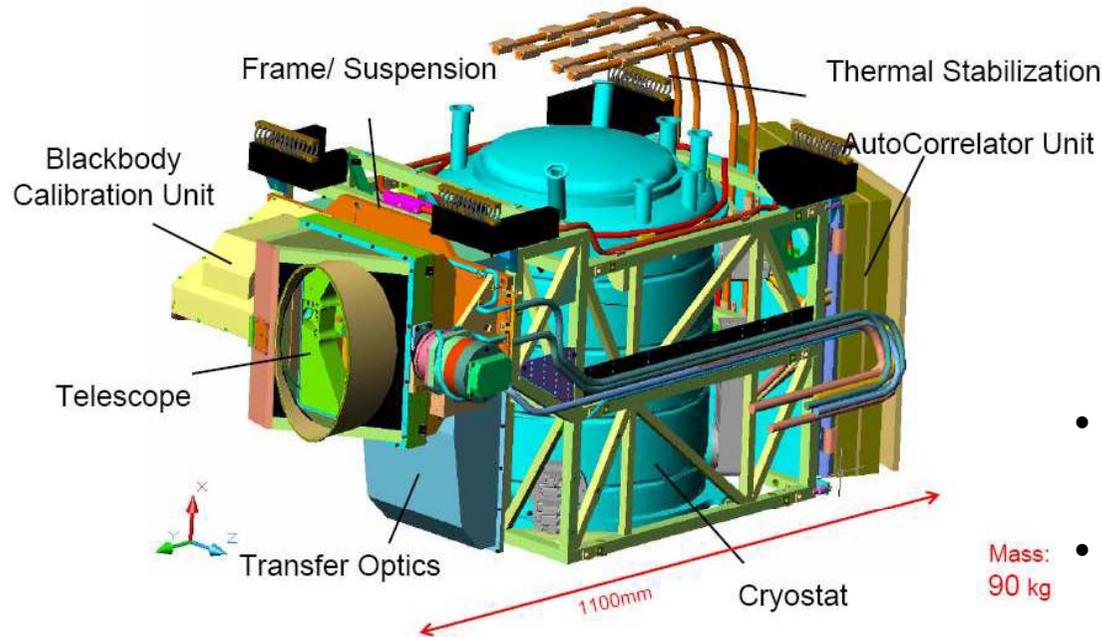
Спектр Nb-AlN-NbN СГГ в режиме ФАПЧ (частота 605 ГГц; LW = 1.7 МГц; SR = 92 %)



Зависимость ширины линии излучения СГГ и спектрального качества в режиме ФАПЧ от частоты



TELIS (Terahertz Limb Sounder)



TELIS

Измерение спектров
ClO, BrO, O₃, HCl, HOCl, etc;
- физика и химия атмосферы;
разрушение озонового слоя;
транспорт тепла; климат

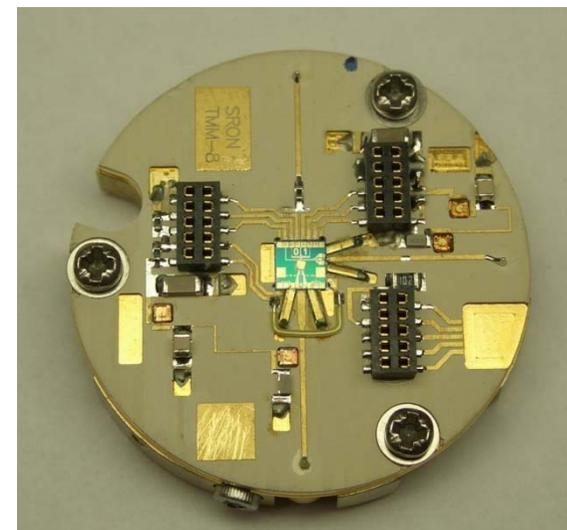
- Апробация новых технологий приемников ТГц диапазона
- Поверка оборудования для новых космических проектов; уточнение спутниковых данных
- Три сверхпроводниковых гетеродинных приемника:
 - 500 GHz by RAL
 - **450-650 GHz by SRON-IREE**
 - 1.8 THz by DLR (PI)



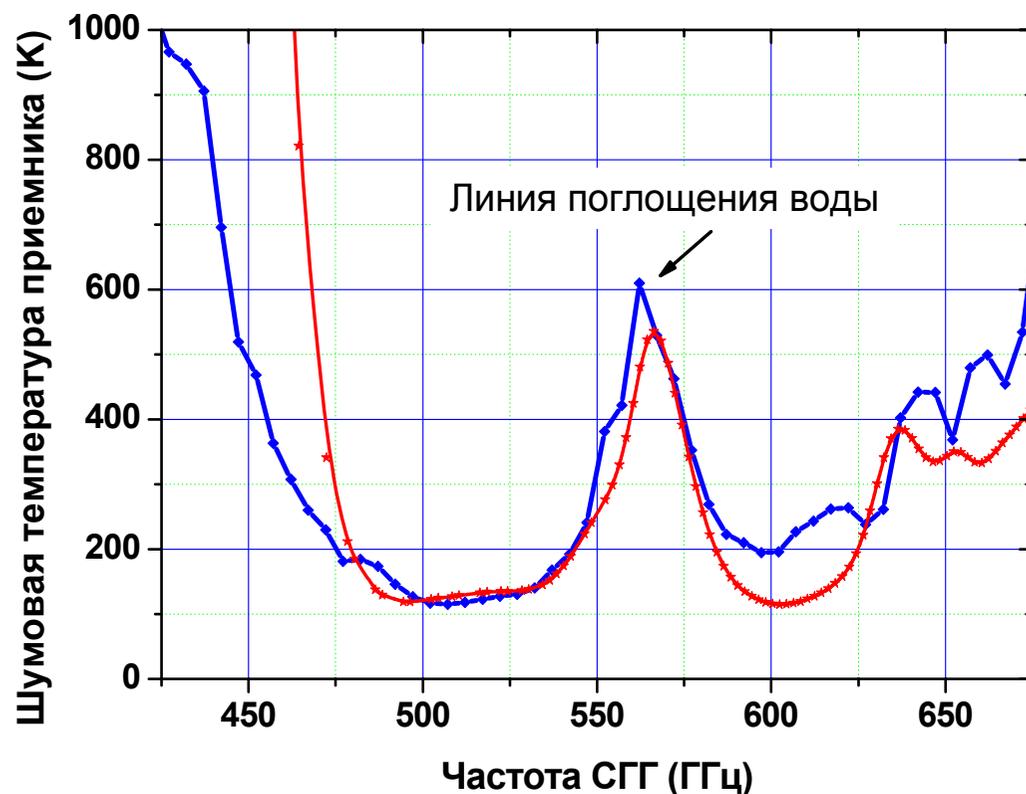


Основные параметры спектрометра

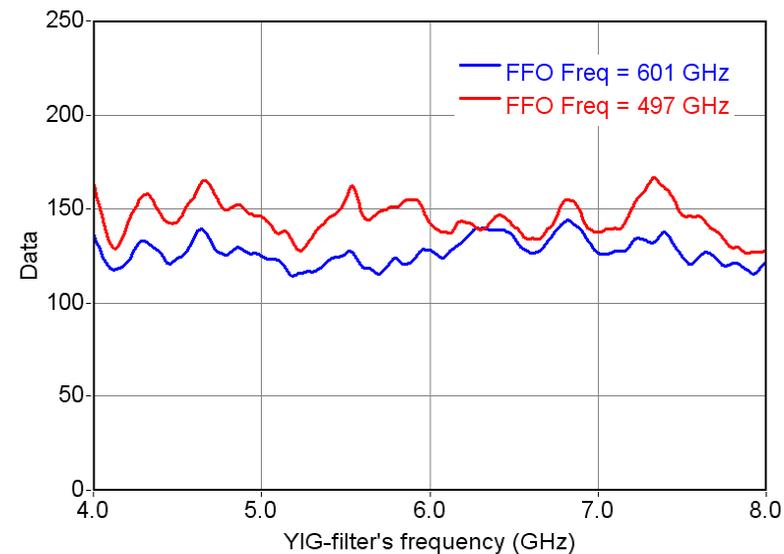
Входной диапазон частот	450 – 700 ГГц
Шумовая температура	120 К
Диапазон ПЧ	4-8 ГГц
Шаг гетеродина по частоте	< 300 МГц
Спектральное разрешение	< 1 МГц
Выделяемая мощность	< 30 мВт
Рабочая температура	< 4.5 К



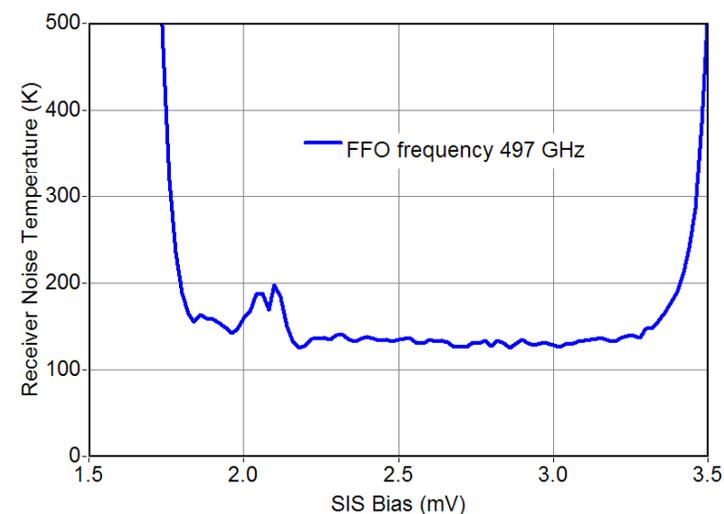
Шумовая температура (Тш) интегрального приемника



Тш полетного варианта приемника,
измеренная во всей полосе ПЧ 4-8 ГГц
для двух дизайнов микросхемы СИП



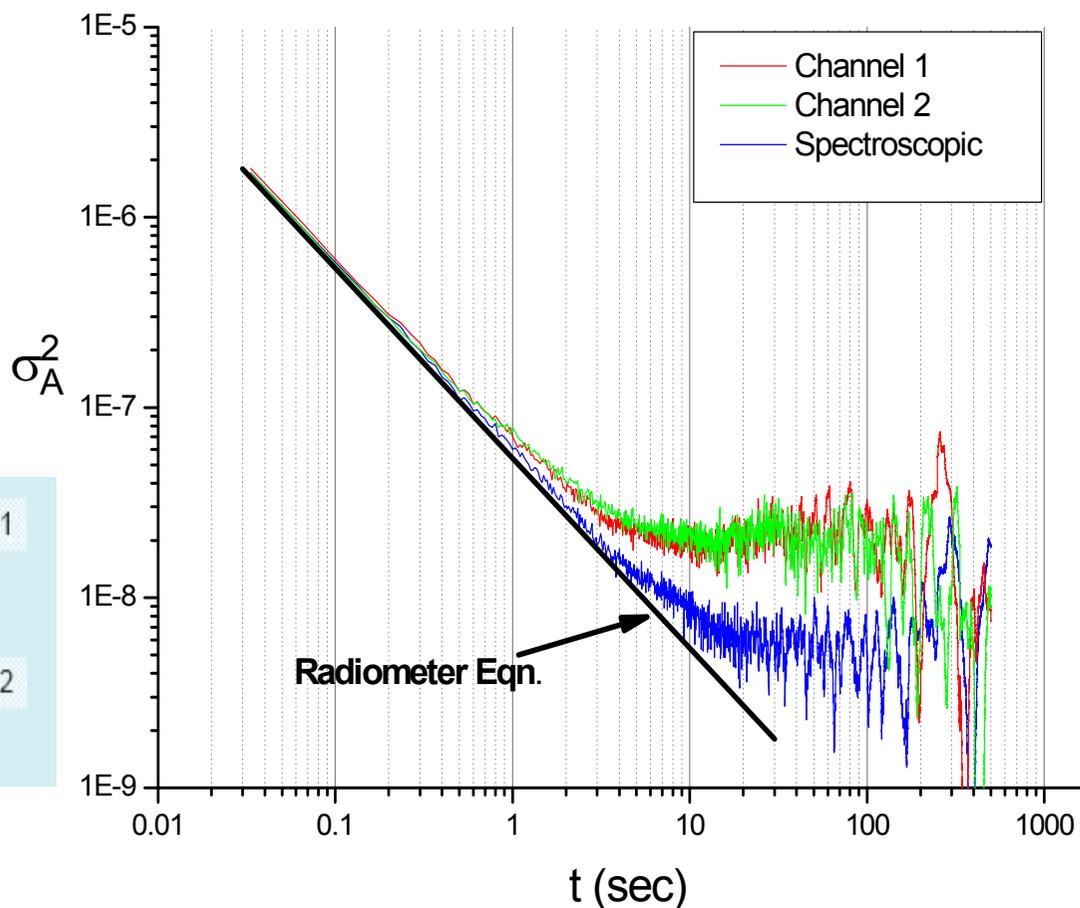
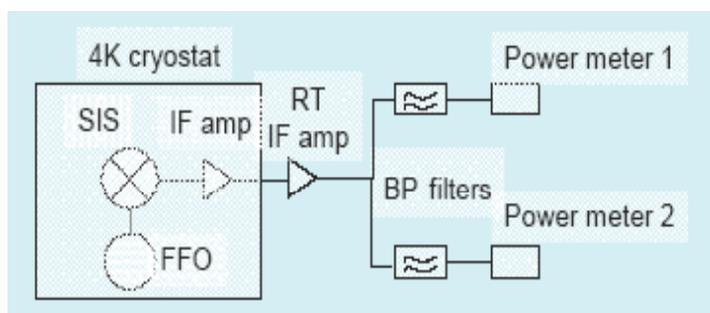
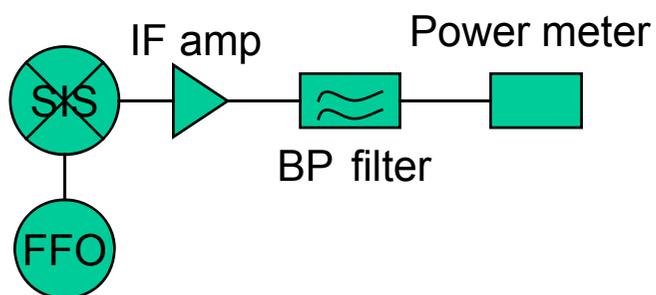
Тш в полосе ПЧ, измеренная для
частоты гетеродина 497 и 601 ГГц



Тш от напряжения на СИС-смесителе,
измеренная на частоте 497 ГГц

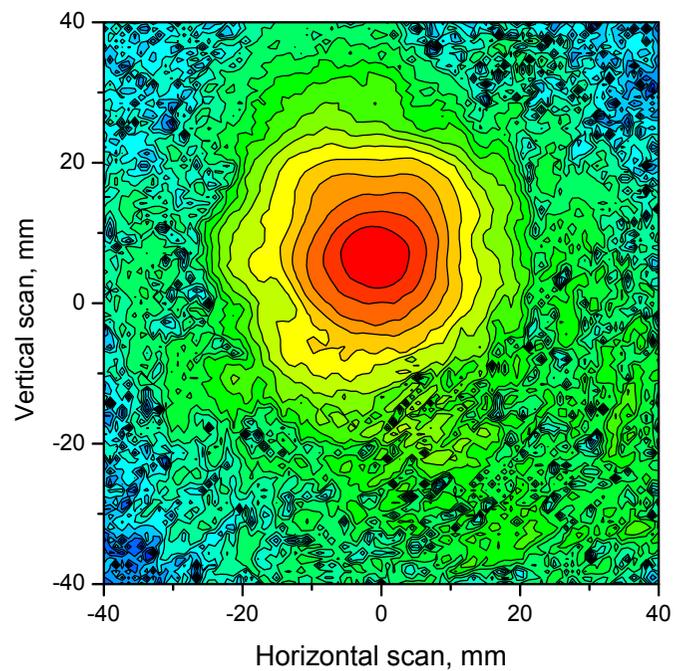


Стабильность интегрального спектрометра

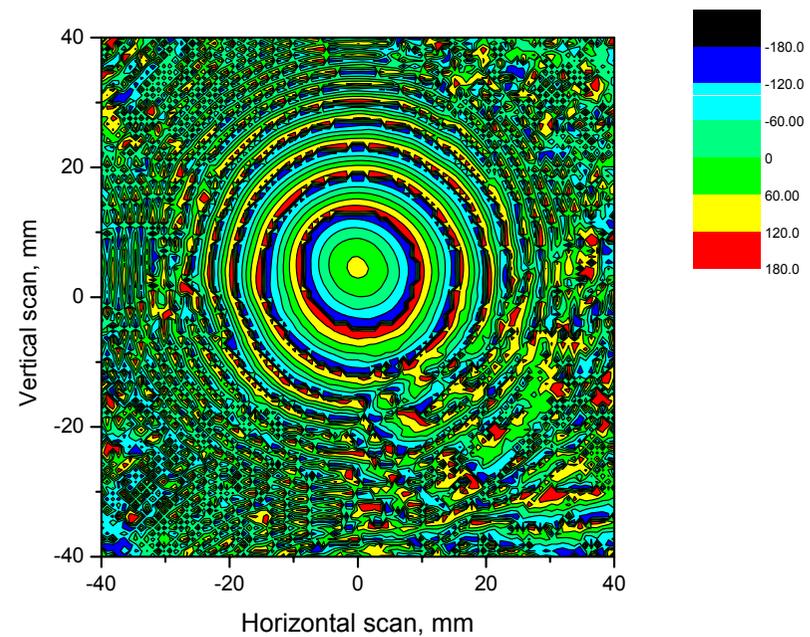
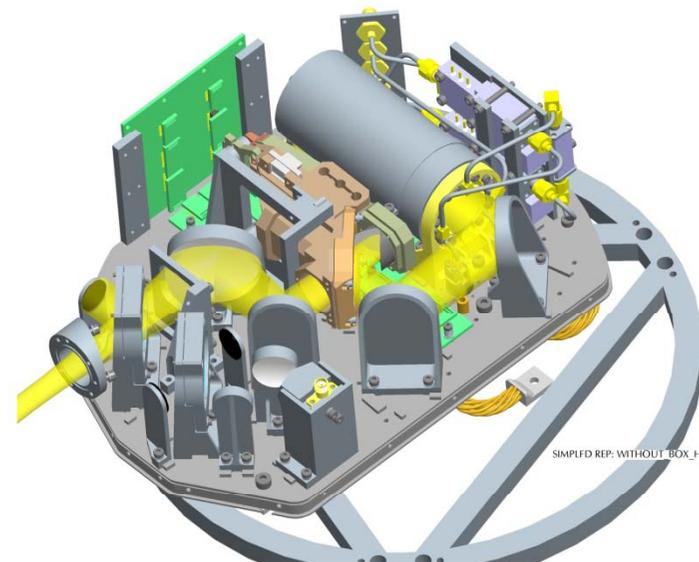


Стабильность СИСП (Allan Variance), СГГ синхронизирован системой ФАПЧ на частоте 600 ГГц. Красная и зеленые кривые показывают стабильность индивидуальных каналов, синяя – спектроскопическую стабильность

Диаграмма направленности СИП для ТЕЛИС

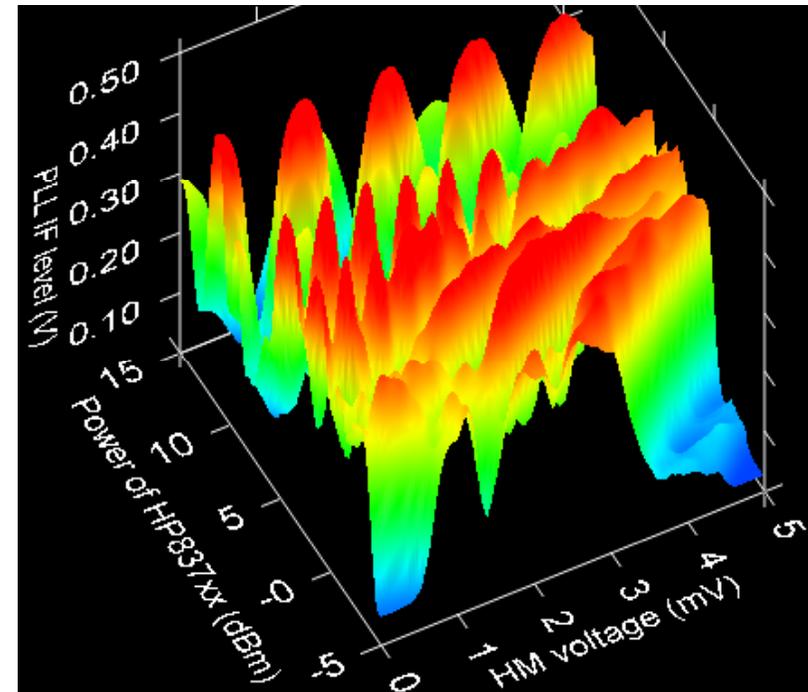
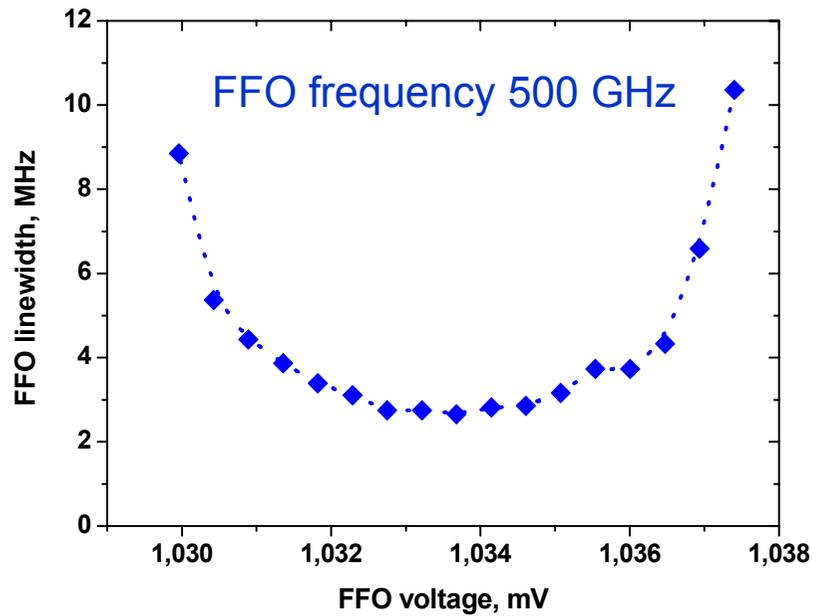
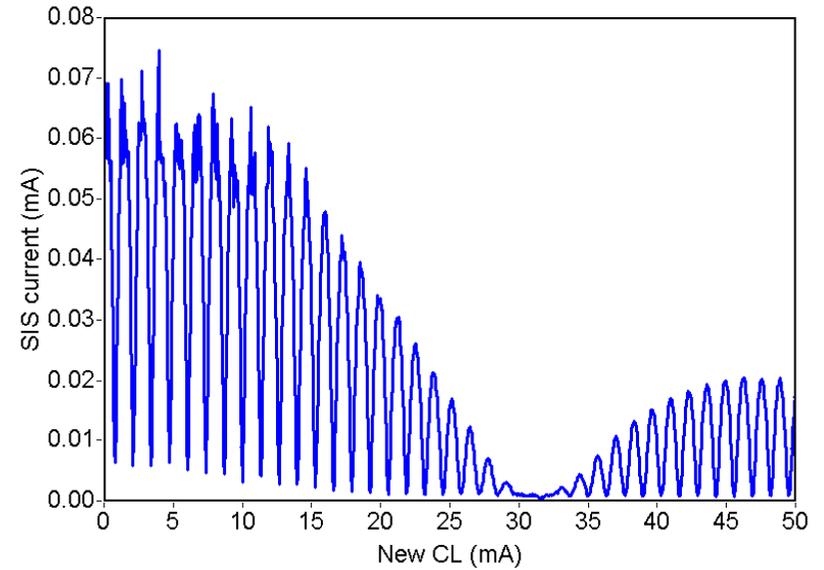
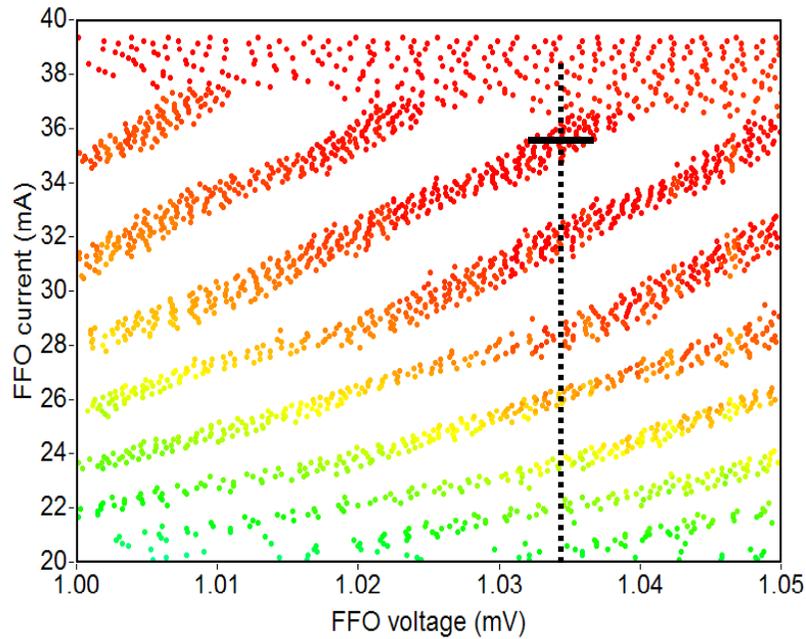


Амплитуда



Фаза

СИП для TELIS – дистанционное управление



**Esrange
Space Center ,
Kiruna, Sweden,
67.5°N, 21.1°E;
March 2009;
January 2010;
March 2011**





TELIS (Terahertz Limb Sounder)



TELIS-MIPAS at Esrange, Sweden;

March 2009; January 2010; March 2011

Balloon size: 400 000 m³; Payload weight: 1 200 kg

Altitude: 40 km (max); Duration: 12 hours





TELIS (Terahertz Limb Sounder)

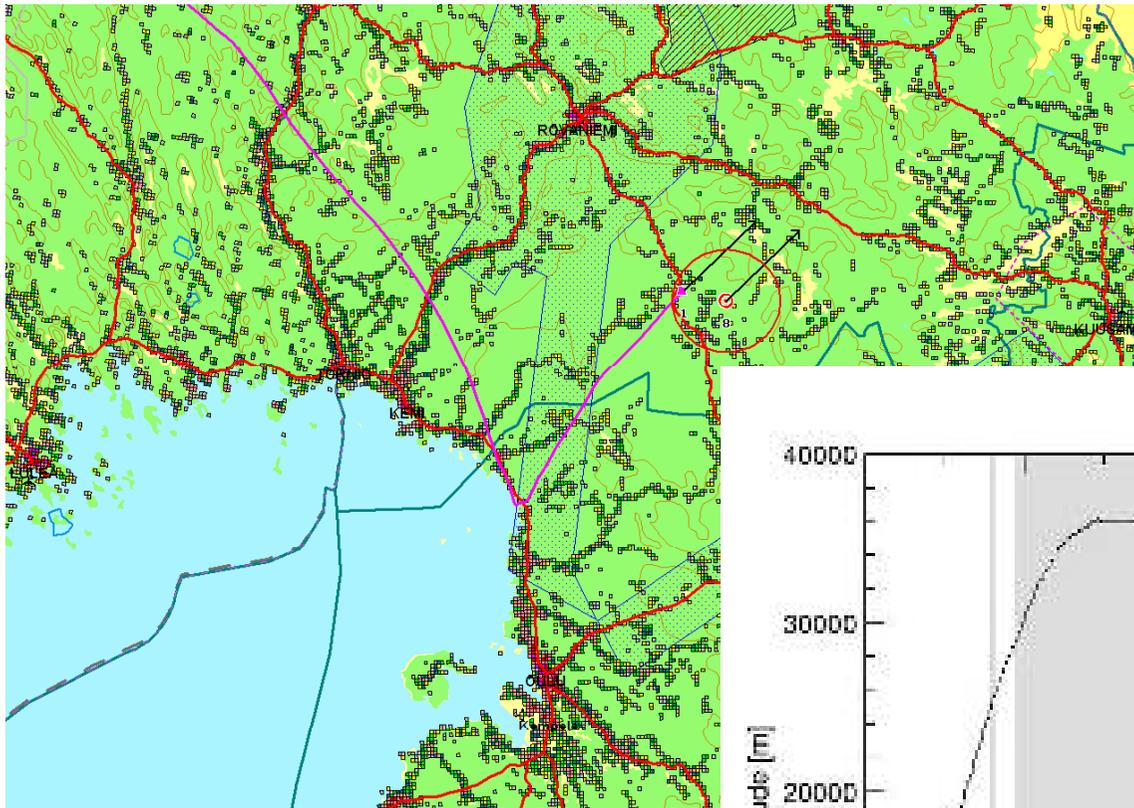
Международный проект по разработке трехканального аэростатного спектрометра наклонного зондирования

Три запуска аэростата TELIS-MIPAS на полигоне Esrange, Швеция;
Март 2009 г., Январь 2010, Март 2011 г.

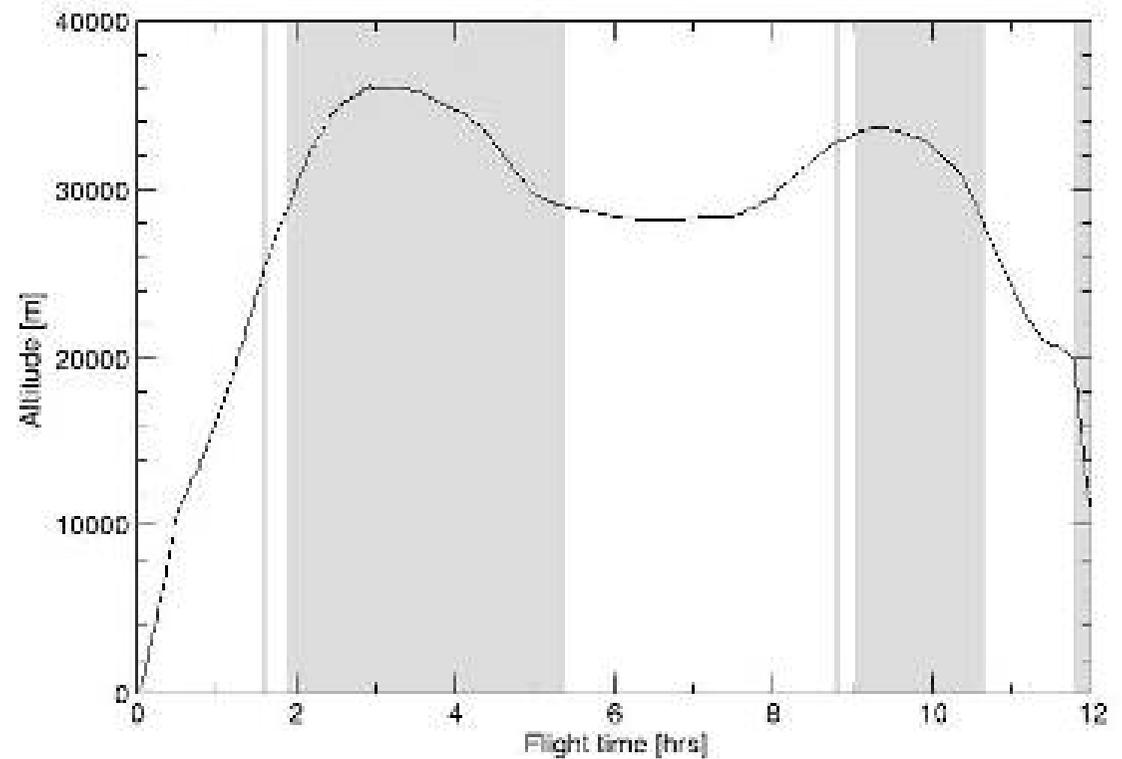
Объем аэростата: 400 000 м³; вес полезной нагрузки: 1 200 кг



Flight trajectory (January 2010)



Flight profile



19 ноября 2012

Таблица частот и измеряемых веществ, выбранных для проекта TELIS

##	Частота СГГ, ГГц	Измеряемые вещества (High priority)
1	495.04	H ₂ ¹⁸ O
2	496.88	HDO
3	505.6	BrO ($\Delta T = 0.3$ K !!)
4	507.28	ClO
5	515.25	O ₂ /pointing /pressure
6	519.25	BrO ($\Delta T = 0.3$ K !!)
7	607.78	O ₃ isotopes
8	619.1	HCl (HOCl, ClO)

Спектры, измеренные при сканировании телескопа

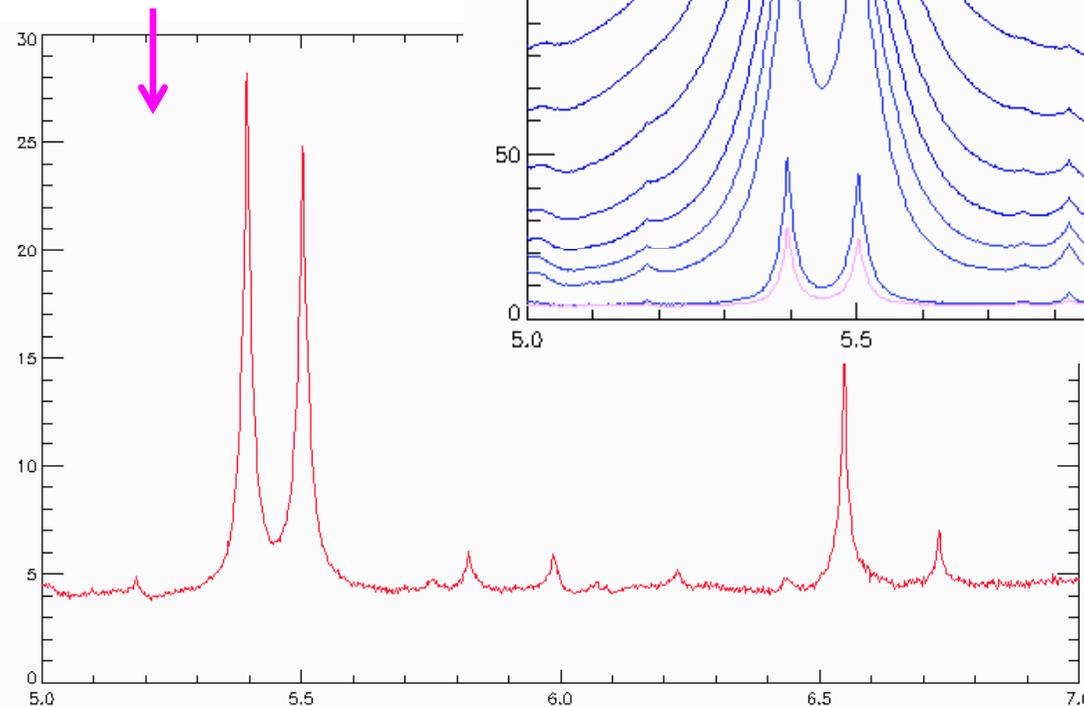
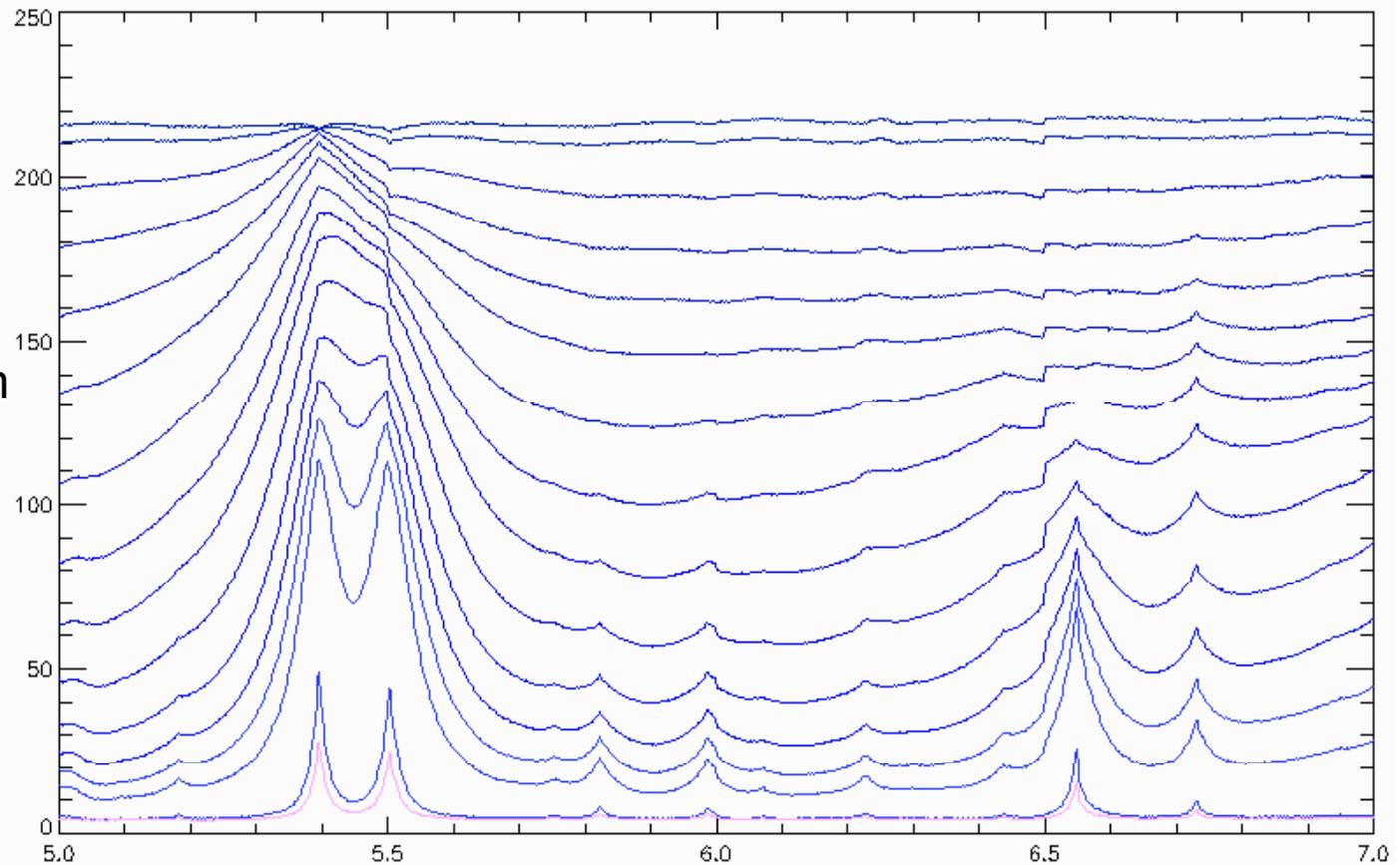
FFO Freq = 495 GHz

Orbit – 30 km;

Increment – 1.5 km,

Tangent: 10.5 – 30 km

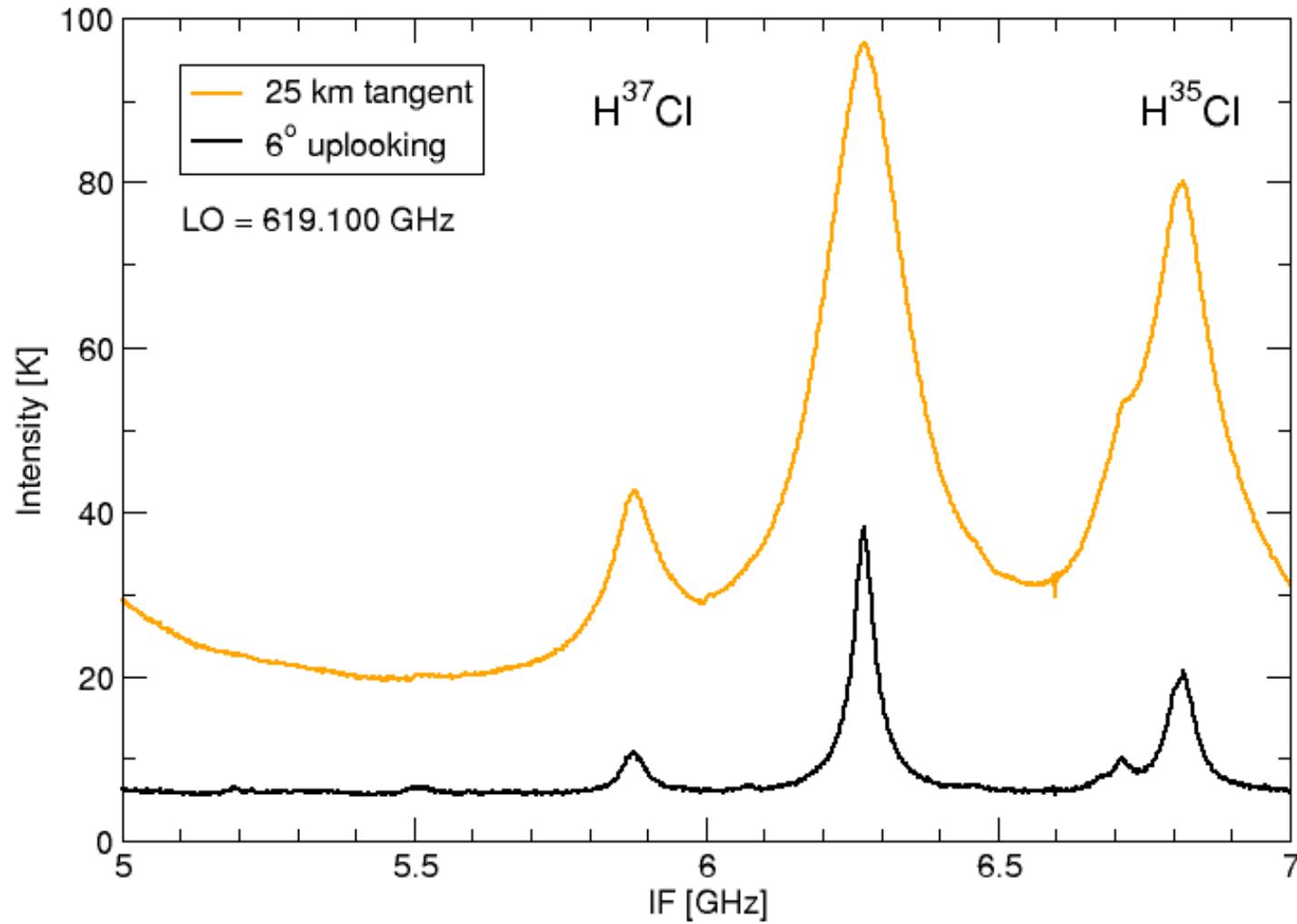
45 degrees up



Выходная частота, ГГц

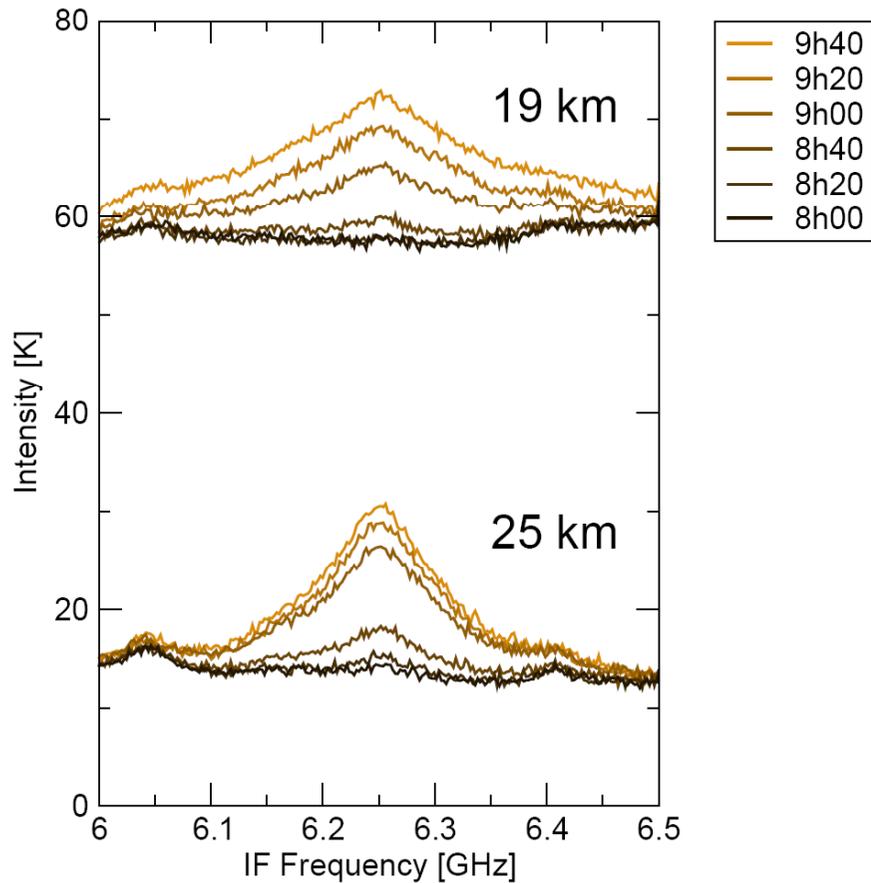
Выходная частота ПЧ, ГГц

SIR for isotope spectral analysis (January 2010)



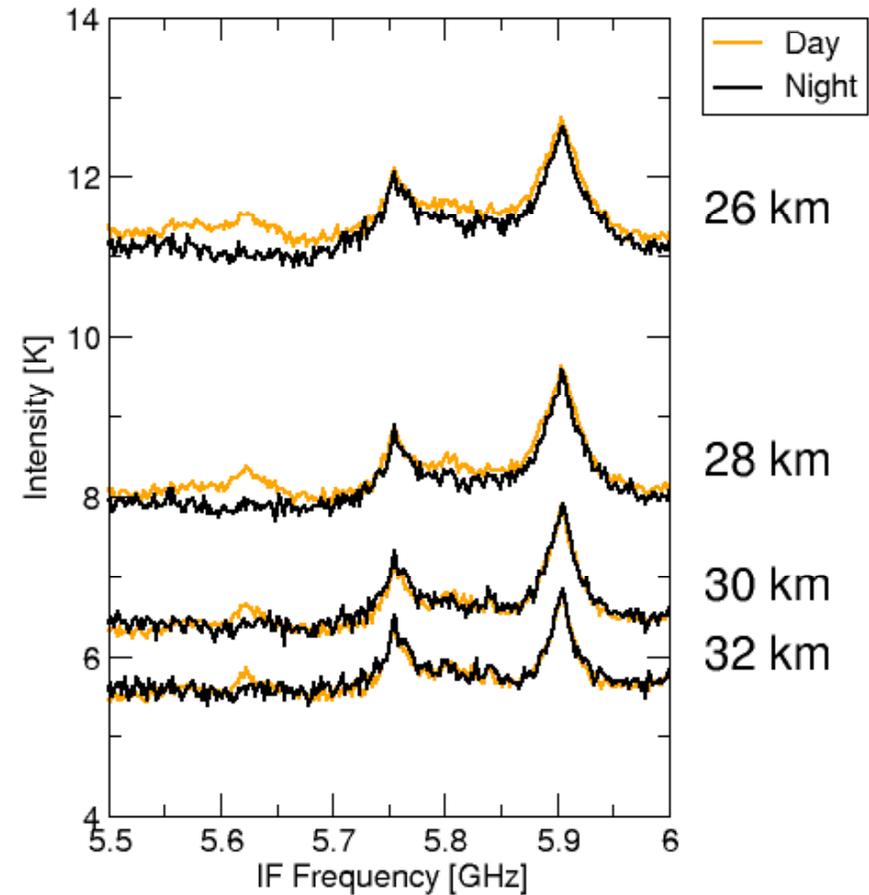
Спектры, показывающие рост концентрации ClO и BrO после восхода солнца (f СГГ = 495 ГГц и 519,3 ГГц).

ClO diurnal cycle



BrO

30 times averaged



Future SIR applications

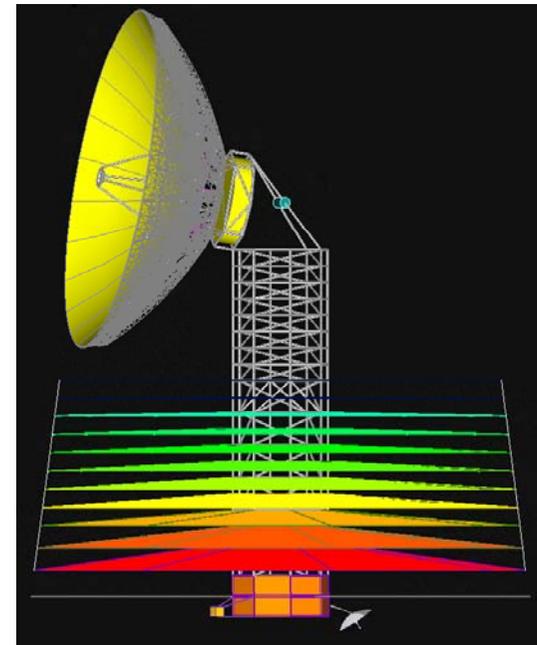
New balloon missions



High-altitude airplanes



Space project "Millimetron"

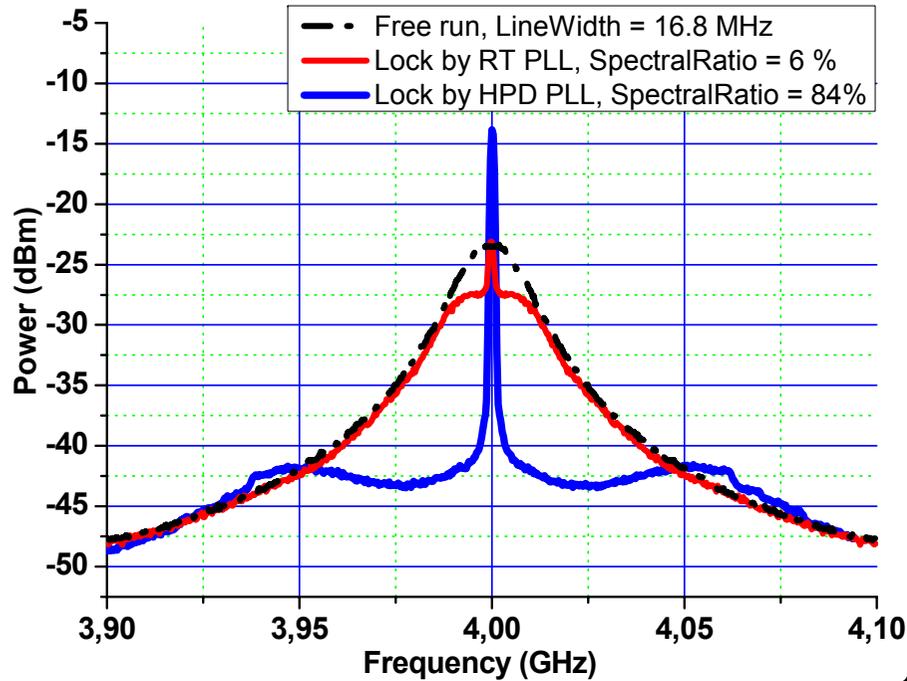


Ground-space
interferometer



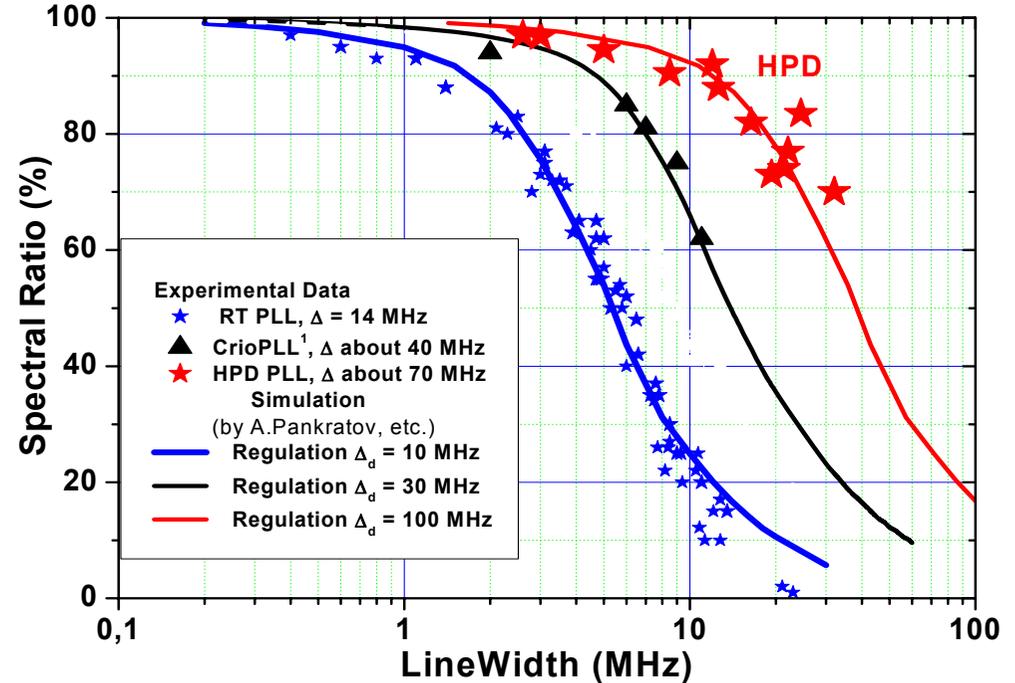
Cryogenic Phase Detector

(new application of the SIS junction)



Regulation bandwidth > 70 MHz
(compare to 10 MHz for regular PLL)

SR = 90% for FFO LW 12 MHz
against
10% for traditional PLL





СИП для медицинской диагностики



Основные достоинства СИП для медицины

- Низкий (квантовый) уровень собственных шумов спектрометра => возможность детектирования сверхмалых концентраций веществ – маркеров => диагностика заболеваний на ранних стадиях;
- Однозначность идентификации веществ - маркеров благодаря высокому спектральному разрешению (< 1 МГц);
- Широкая рабочая полоса частот – регистрация большого числа соединений – маркеров одним прибором.

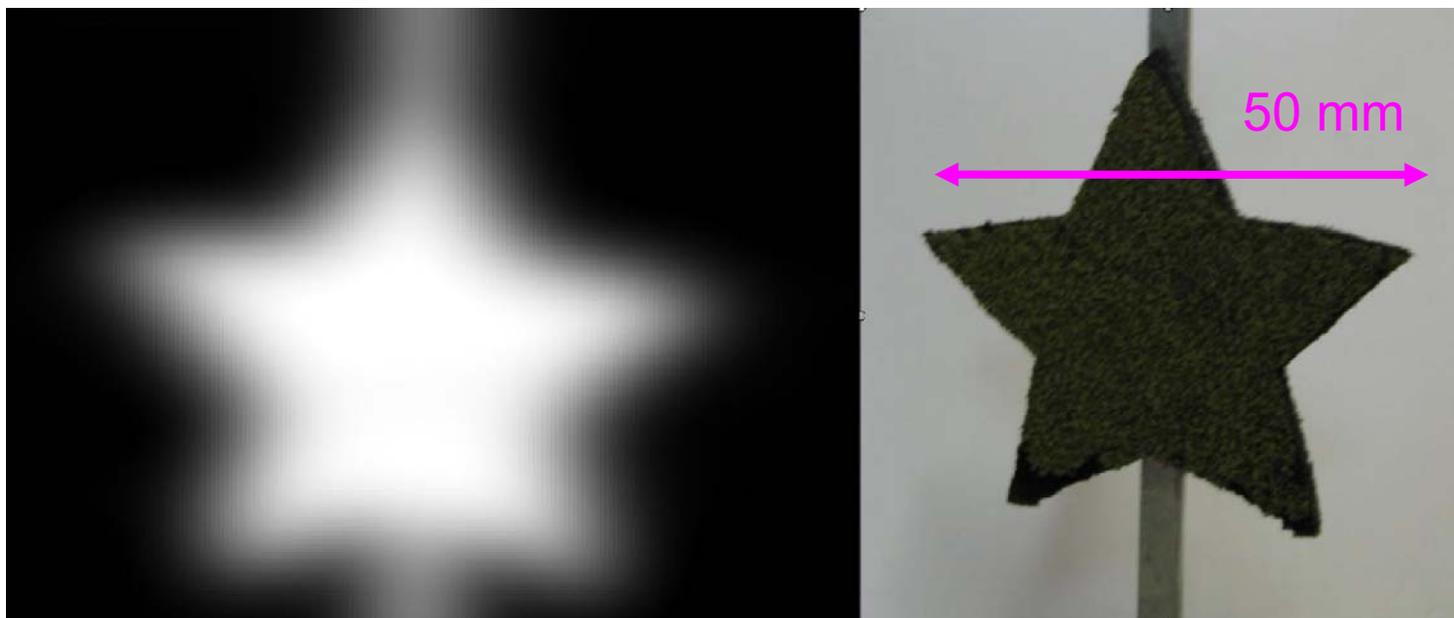
Фото лабораторной установки
для спектрального анализа
выдыхаемого воздуха





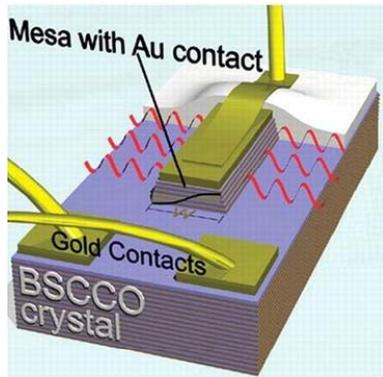
MSPU

Пассивная система построения терагерцового изображения

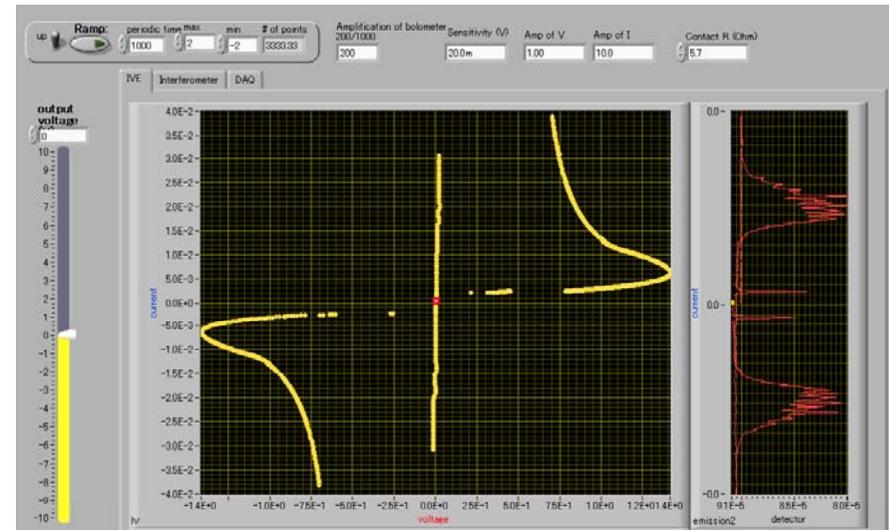


- One pixel receiver with mechanical scanning (NETD ~ 13 mK; Spatial resolution ~ 2 mm)
- Next step: linear array of SIRs

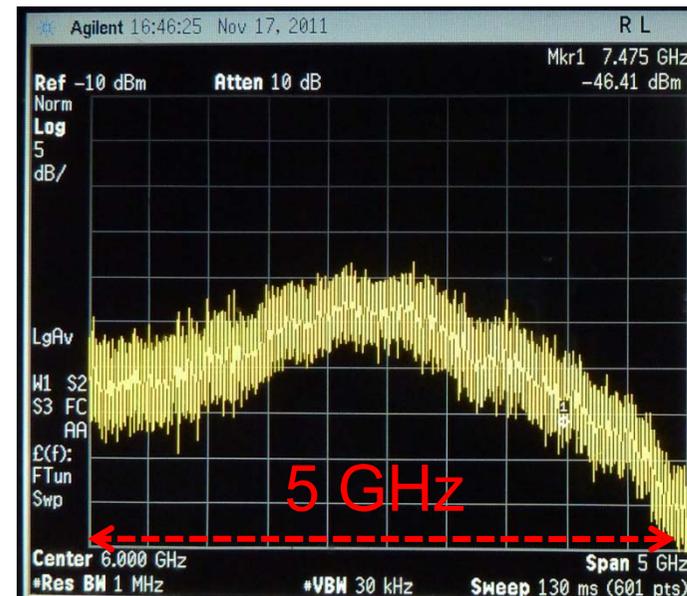
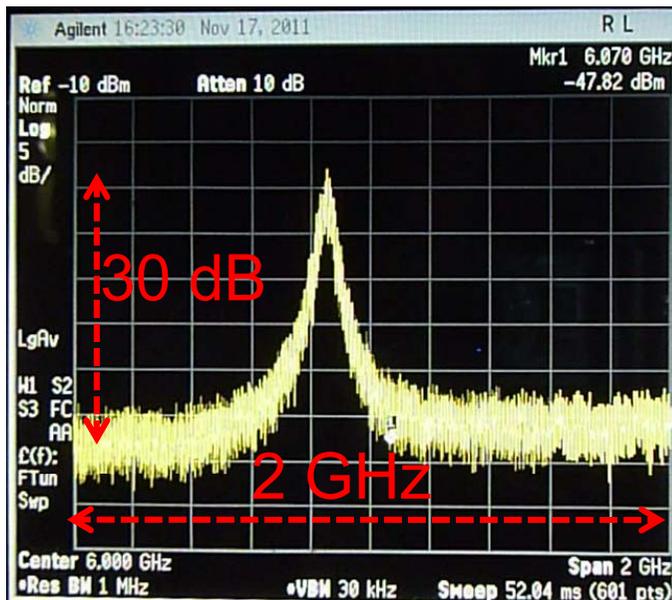
Спектры излучения из BSCCO mesa, измеренные СИП



Huabing Wang
Tsukuba, Japan
Nanjing, China

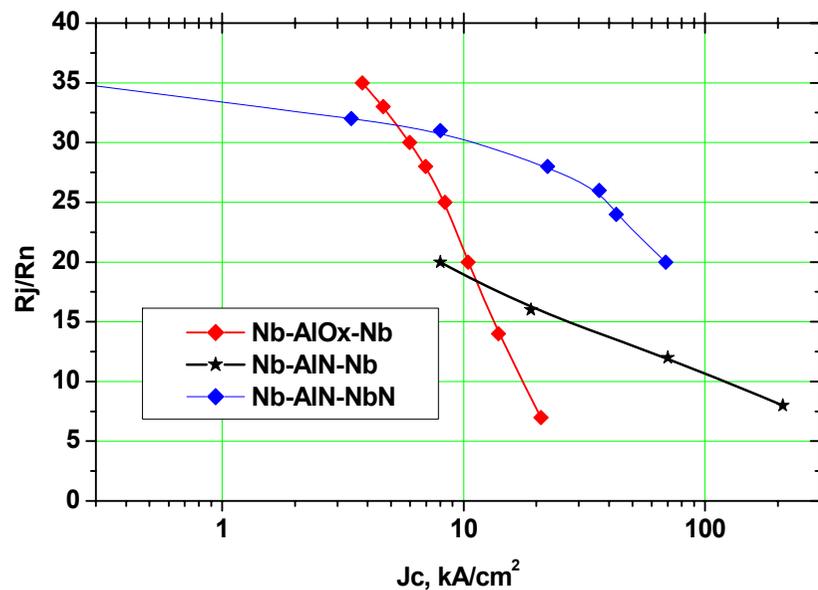


Linewidth: down to **25 MHz**
Frequency range at 4.2 K: **584 ~ 736 GHz**





Laboratory of Superconducting Devices for Signal Detection and Processing



Nb-AlN-NbN
Nb-AlOx-Nb;
 $J_c = 1 - 100 \text{ kA/cm}^2$
 $S = 0.1 - 1000 \text{ mkm}^2$

Ultra-High Resolution E- Beam Lithography

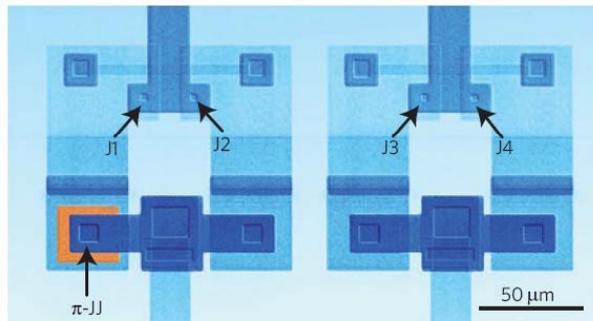
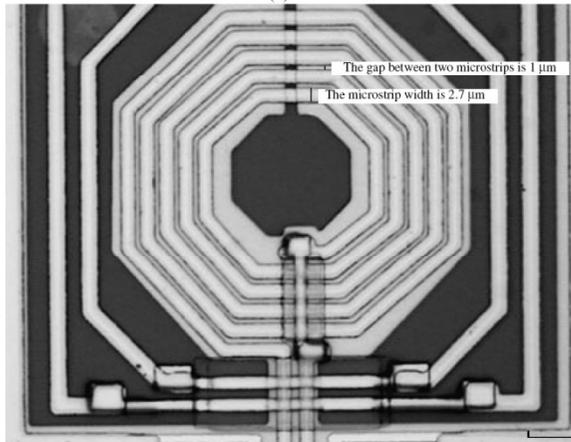


19 ноября 2012

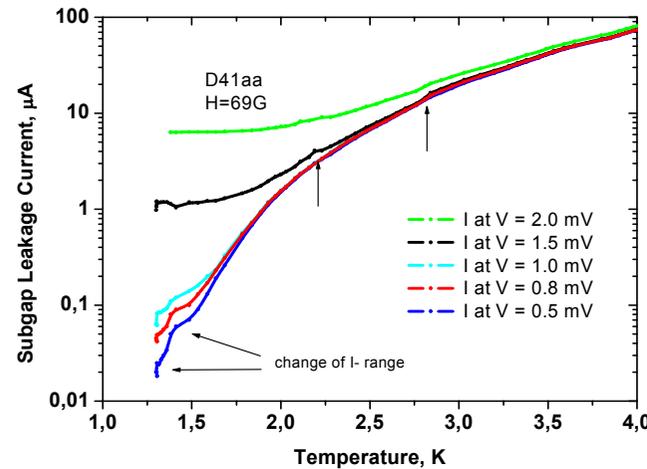
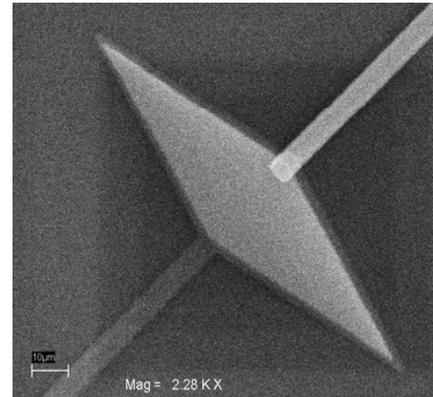
НОЦ-2012

30

Superconducting Electronics: SQUIDs, STJ X-ray Detectors, new physics



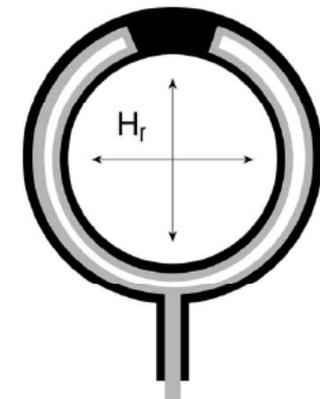
*Journal of Communications
Technology and Electronics, 2006;
Nature Physics, vol 6, August 2010.*



*Nuclear Instruments and Methods, 2004, 2006;
Instruments and Experimental Techniques, 2006;
Journal of Physics: Conference Series, 2006
J. Low Temp. Phys. 2008 ;
Low Temperature Detectors (LTD-7)*

Can superconducting
rings provide clues to
the early development
of the Universe?

*Phys. Rev. Lett. 96, 2006; 2008;
Phys. Rev. B, 2006, 2008, 2009, 2010;
IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2007;
J. Appl. Phys. 2007; 2009;
Superconductor Science and
Technology, 2009;
Phys. Rev. B (Rapid Communications),
2009*



Заключение

- Разработана и реализована концепция сверхпроводникового интегрального спектрометра (СИСП) субмм диапазона длин волн для мониторинга атмосферы и медицинской диагностики;
- Оптимизирована конструкция и топология СГГ; в диапазоне 300 – 700 ГГц реализована непрерывная перестройка частоты ССГ, в режиме фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) получено спектральное качество более 70%.
- На полигоне «Esrange» (Швеция) проведены успешные запуски сверхпроводникового спектрометра на высотном аэростате. Реализован частотный диапазон 450 – 700 ГГц, шумовая температура 120 К, полоса ПЧ 4 –8 ГГц, спектральное разрешение лучше 1 МГц. Были измерены спектры различных газовых составляющих, в том числе ClO и BrO , ответственных за разрушение озонового слоя Земли.
- На базе бортового интегрального спектрометра разработана лабораторная система для спектрального анализа газовой смеси (неинвазивная медицинская диагностика, определение изотопного состава газов) и приема излучения из новых типов сверхпроводниковых генераторов. Начата разработка систем безопасности на основе СИСП.