



# **Сверхпроводниковые интегральные приемники терагерцового диапазона**

*В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков,  
К.В. Калашников, О.С. Киселев, Н.В. Кинев,  
А.А. Мухортова, Ю.С. Токпанов, М.Ю. Торгашин,  
Л.В. Филиппенко*

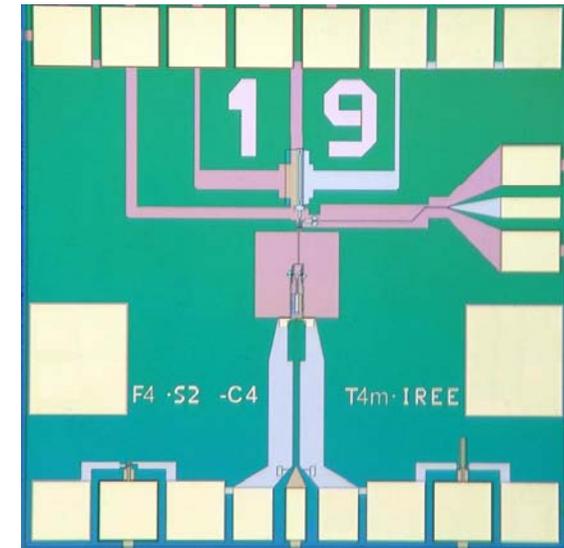
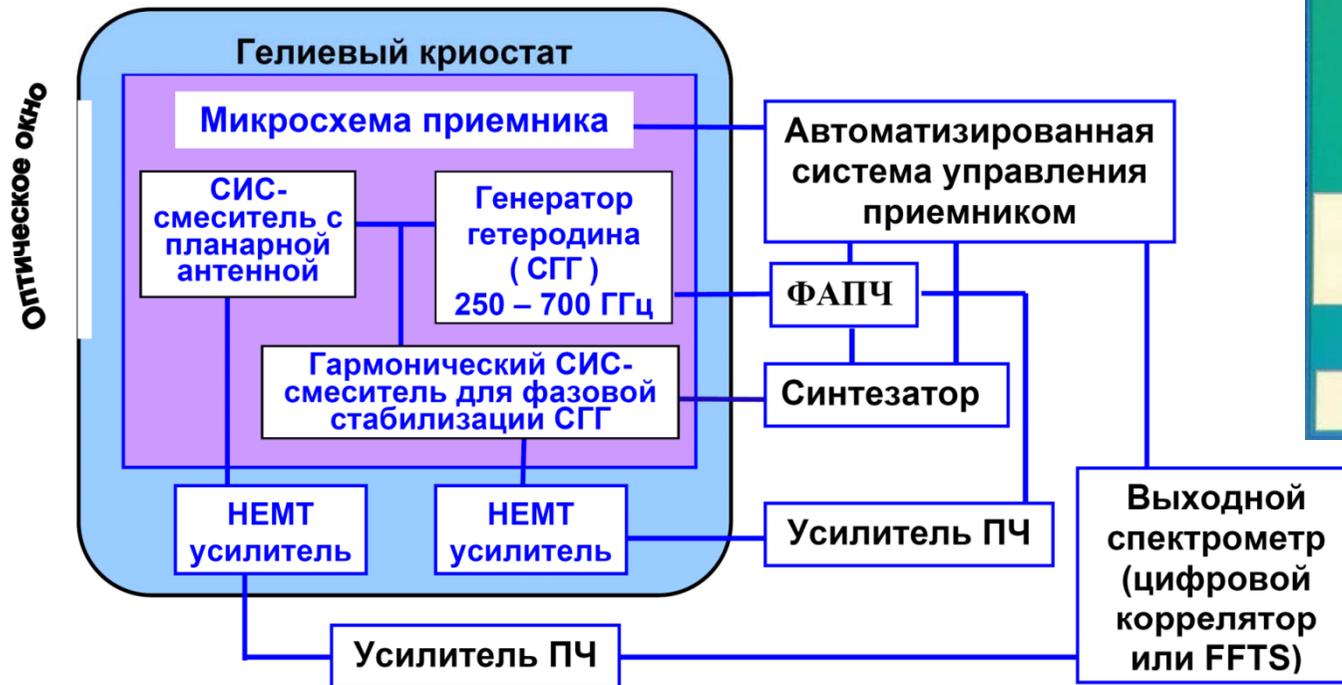
*Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН (Москва)*

# 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  $\text{Nb-AlN-NbN}$

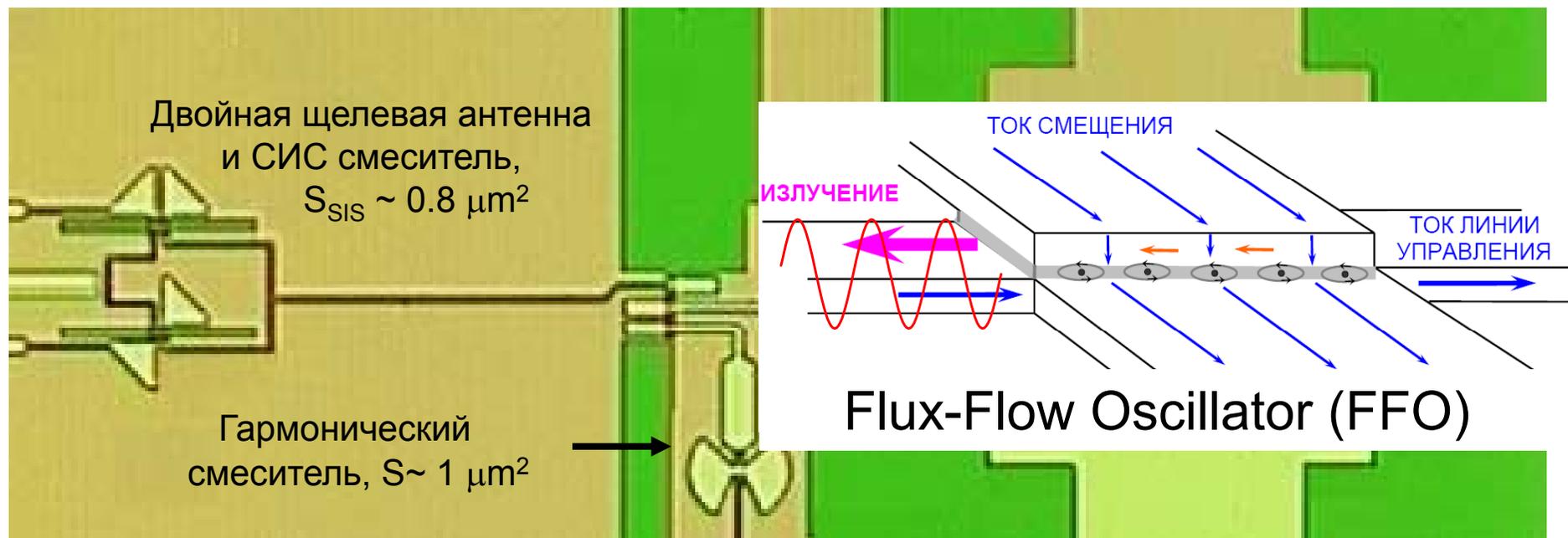
Плотность критического тока:  $J_c = 3 - 8 \text{ кА/см}^2$ ;

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

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



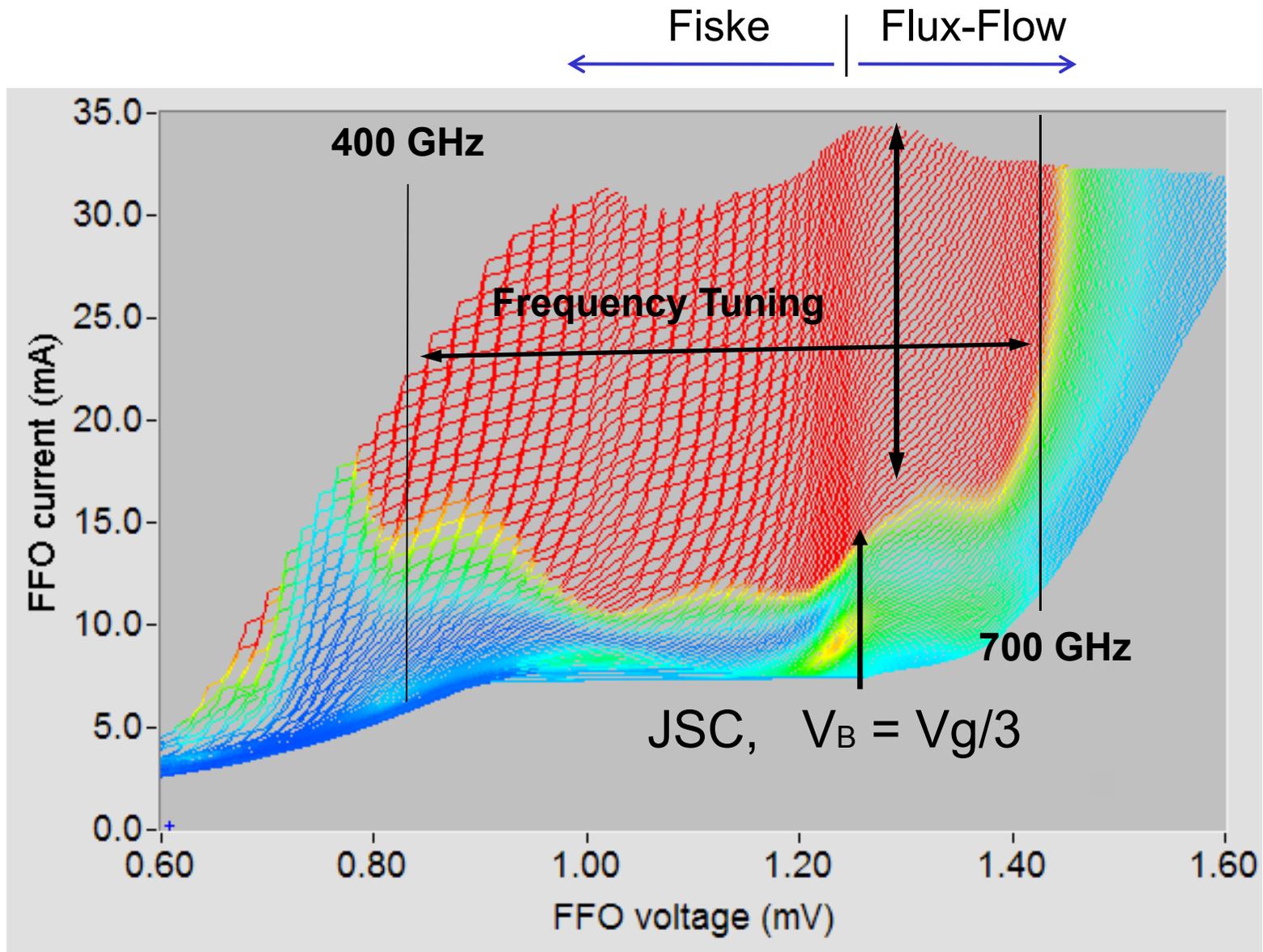
## Центральная часть микросхемы интегрального приемника



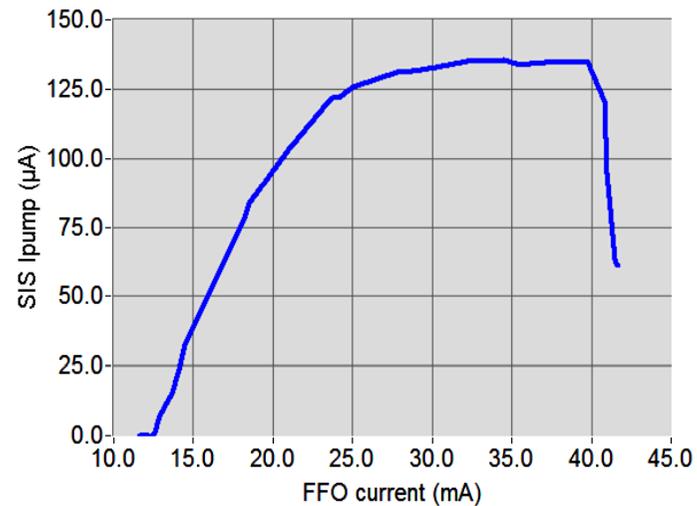
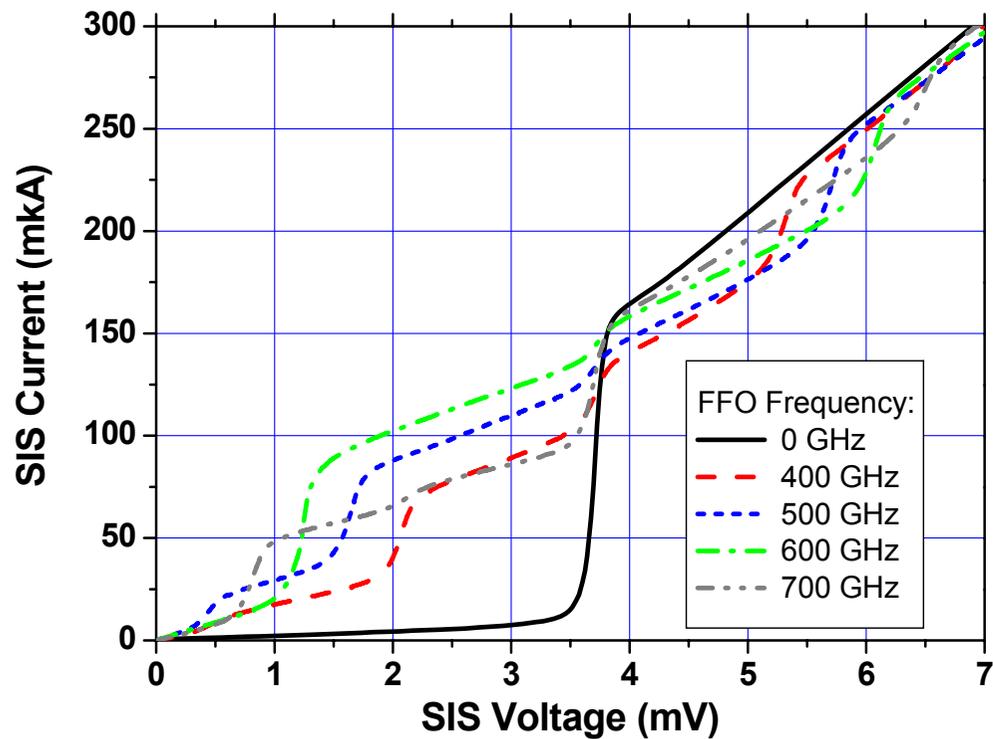
Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb; Nb-AlN-NbN;  $J_c = 5 - 8 \text{ kA/cm}^2$

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

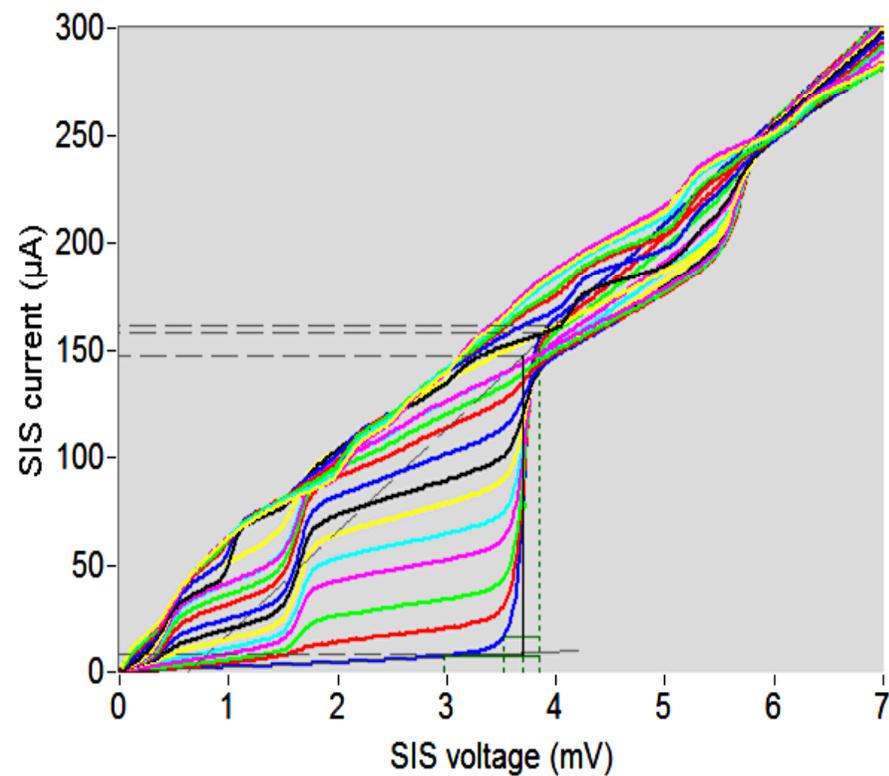
# Сверхпроводниковый генератор гетеродина



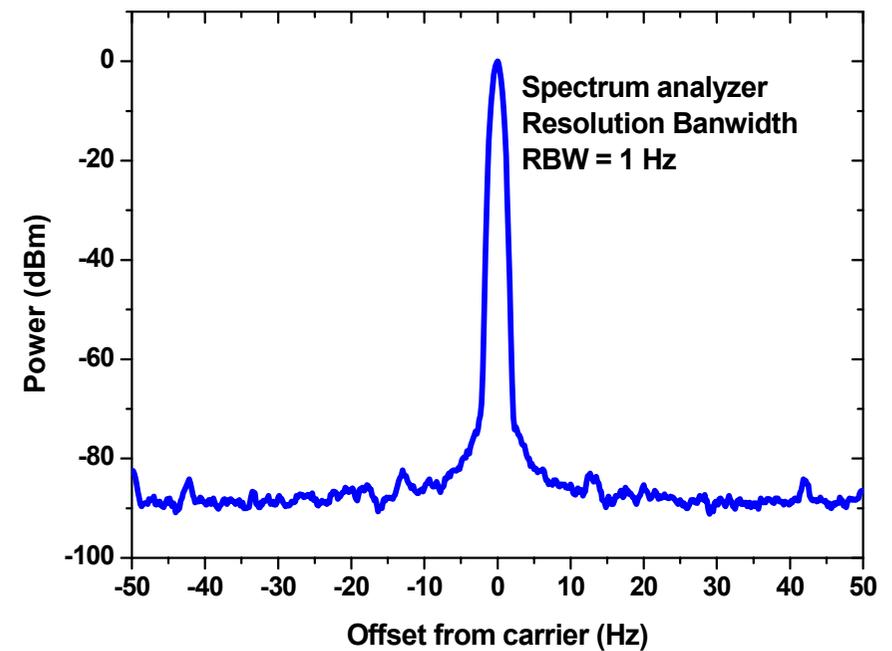
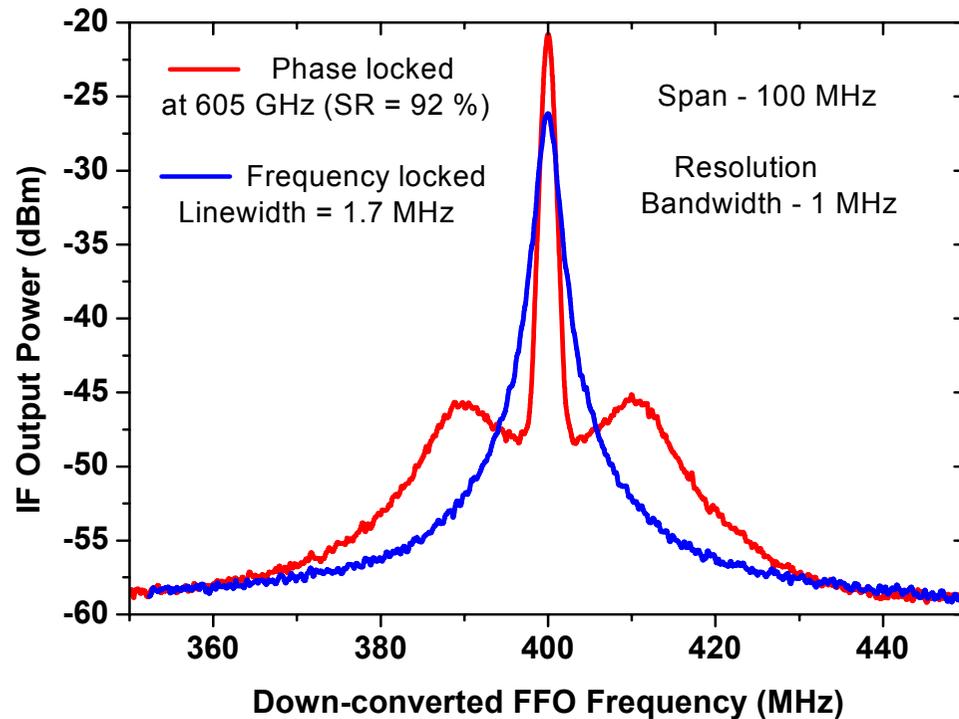
# Перестройка СГГ по частоте и мощности



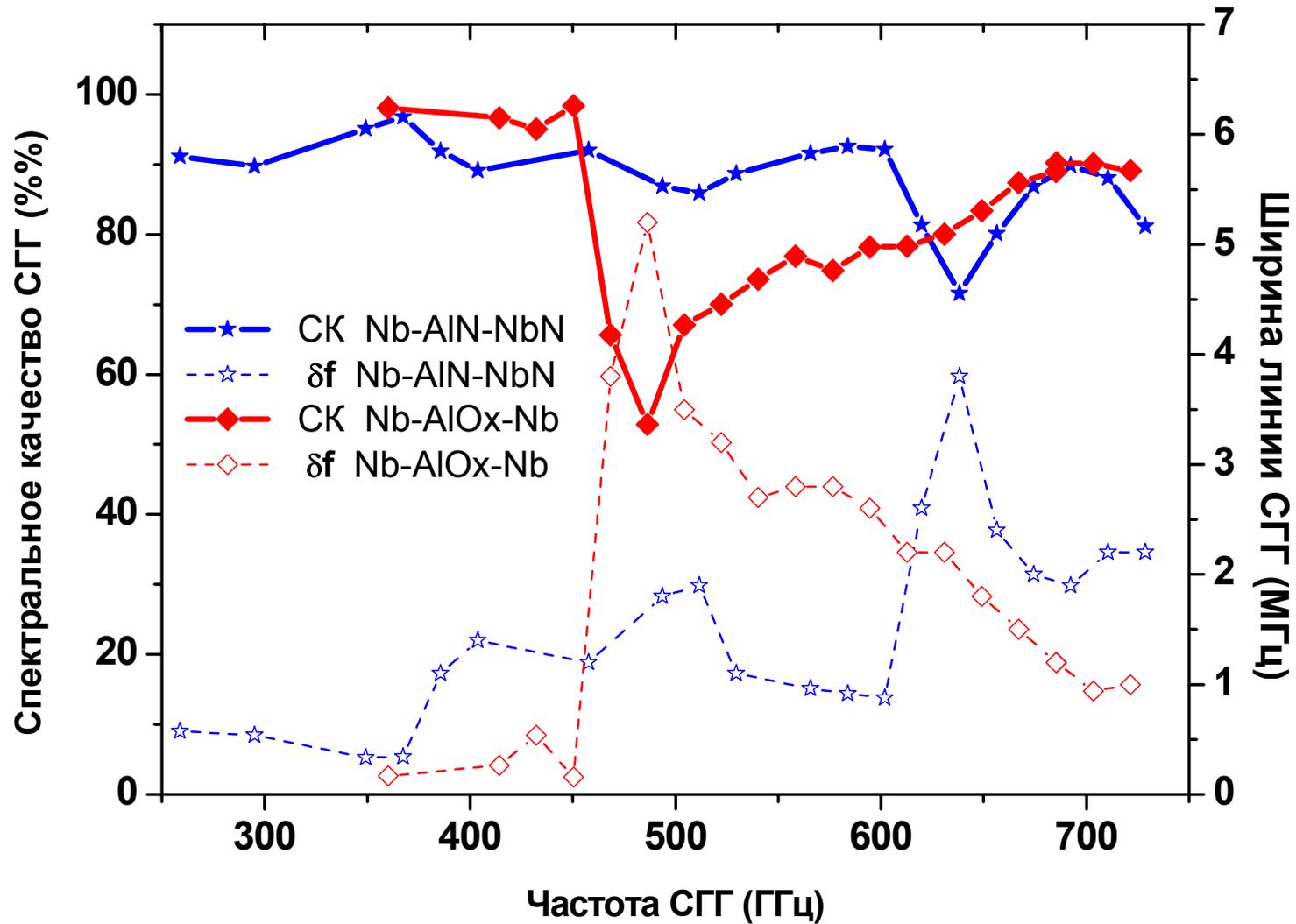
Частота СГГ = 500 ГГц



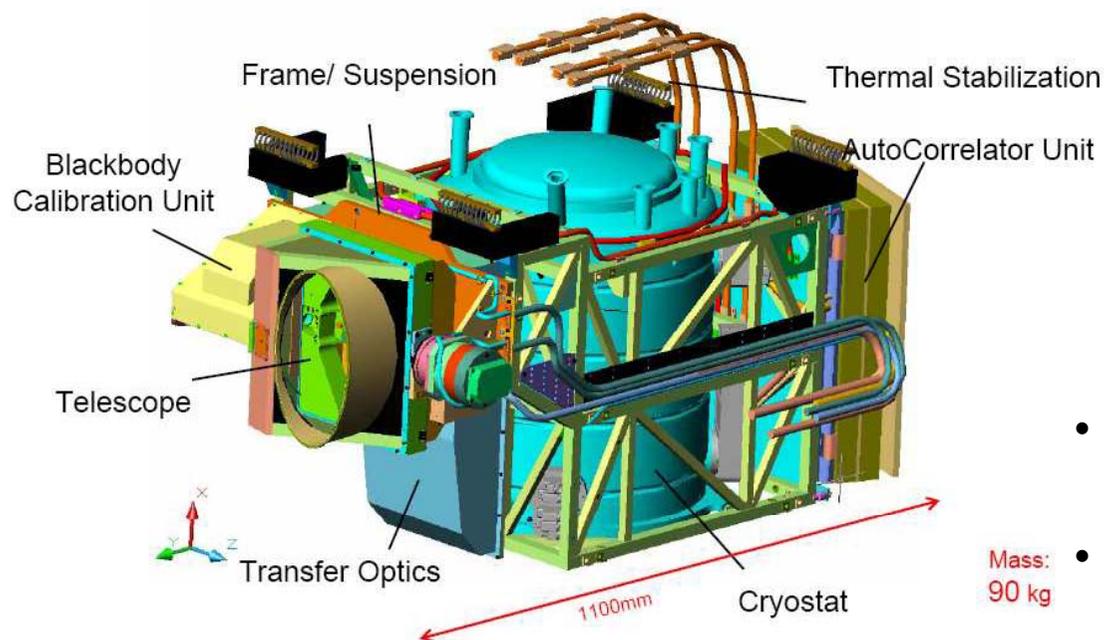
# Спектр Nb-AlN-NbN СГГ в режиме ФАПЧ (частота 605 ГГц; LW = 1.7 МГц; SR = 92 %)



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



# TELIS (Terahertz Limb Sounder)



## TELIS

Измерение спектров  
ClO, BrO, O<sub>3</sub>, HCl, HOCl, etc;  
- физика и химия атмосферы;  
разрушение озонового слоя;  
транспорт тепла; климат

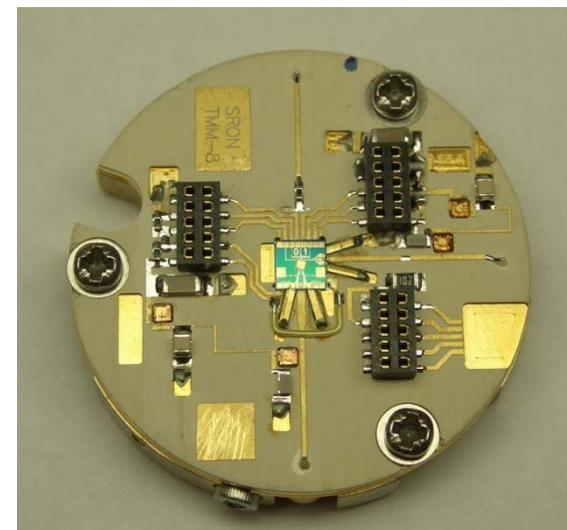
- Апробация новых технологий приемников ТГц диапазона
- Поверка оборудования для новых космических проектов; уточнение спутниковых данных
- Три сверхпроводниковых гетеродинных приемника:
  - 500 GHz by RAL
  - **450-650 GHz by SRON-IREE**
  - 1.8 THz by DLR (PI)



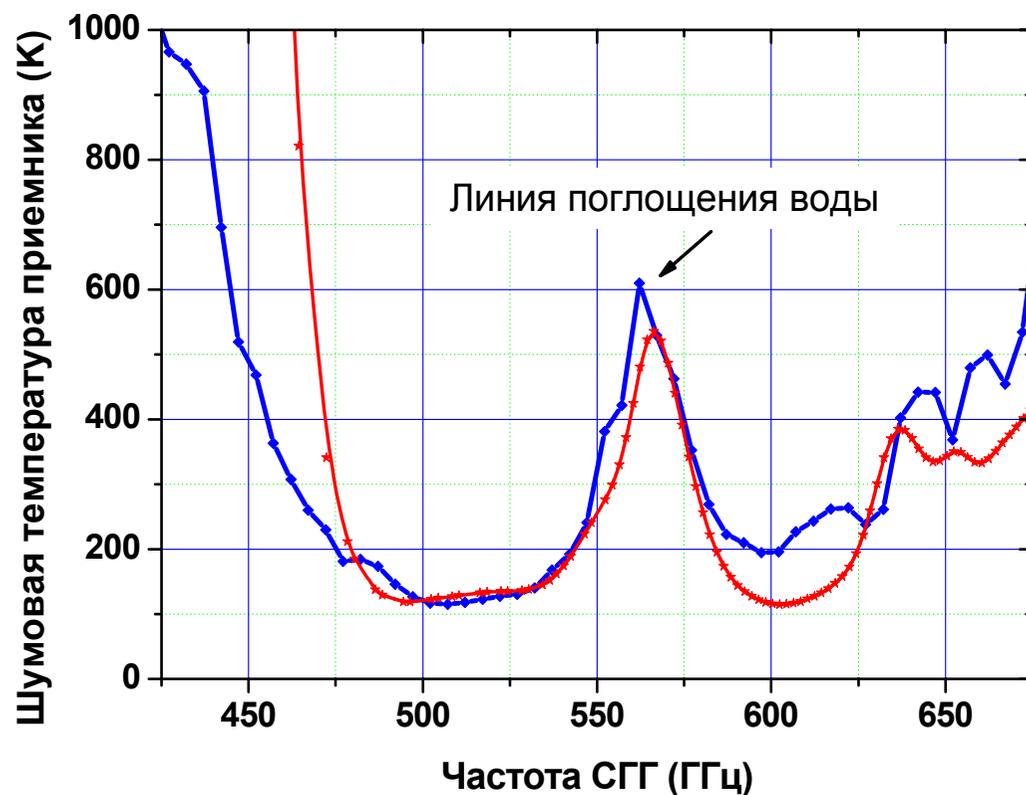


## Основные параметры спектрометра

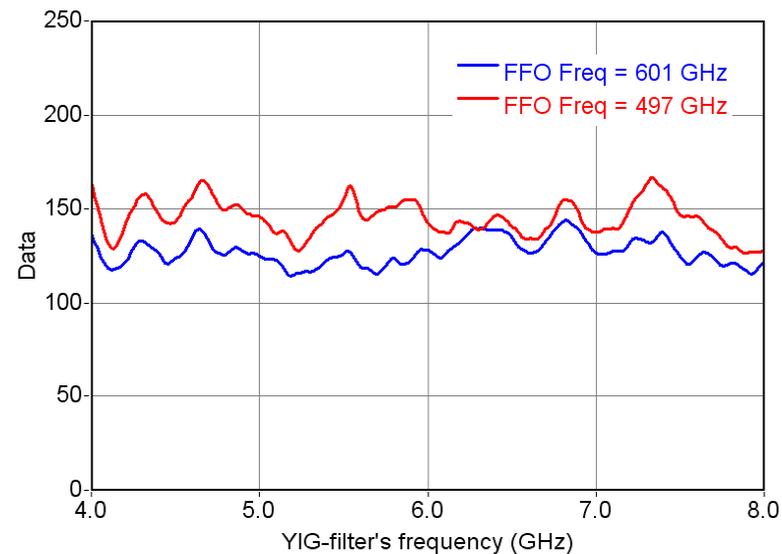
Входной диапазон частот	450 – 700 ГГц
Шумовая температура	120 К
Диапазон ПЧ	4-8 ГГц
Шаг гетеродина по частоте	< 300 МГц
Спектральное разрешение	< 1 МГц
Выделяемая мощность	< 30 мВт
Рабочая температура	< 4.5 К



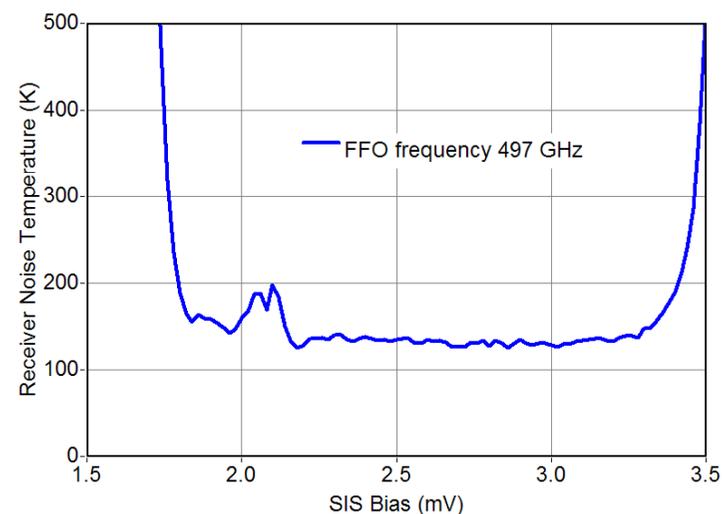
# Шумовая температура (Тш) интегрального приемника



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



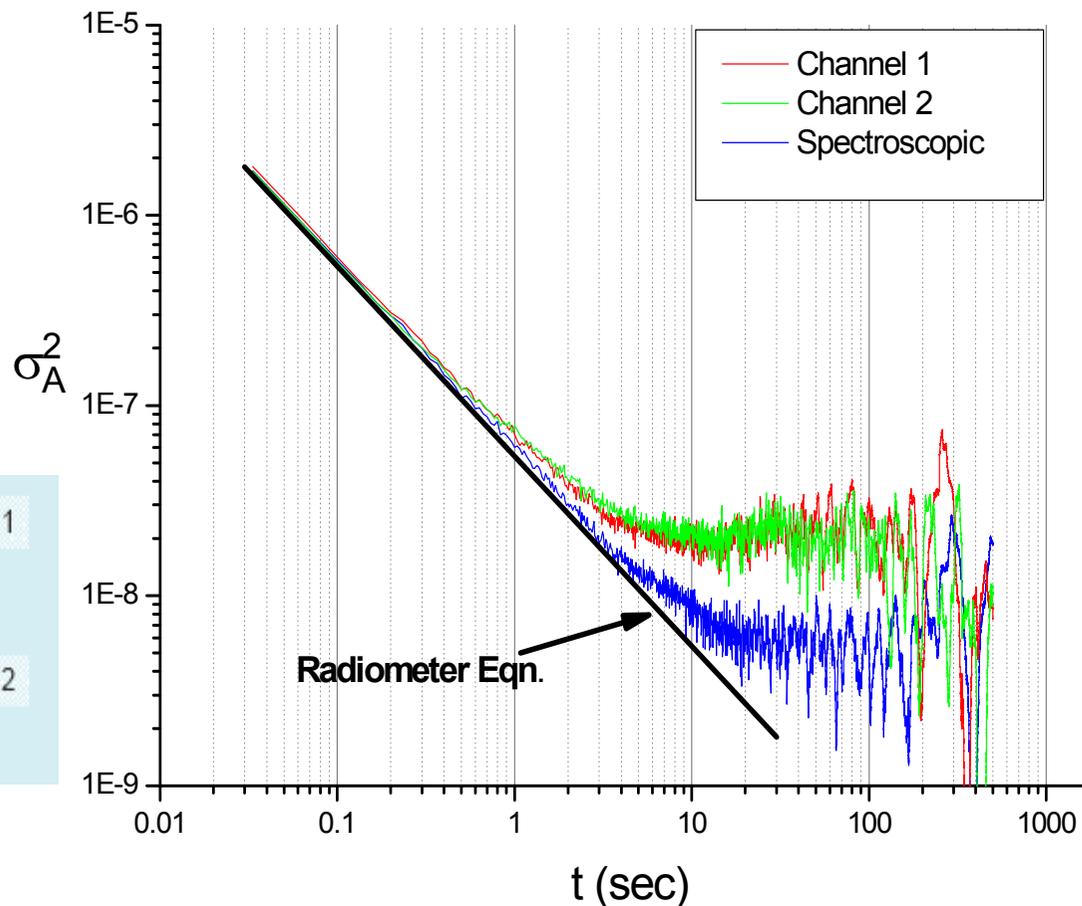
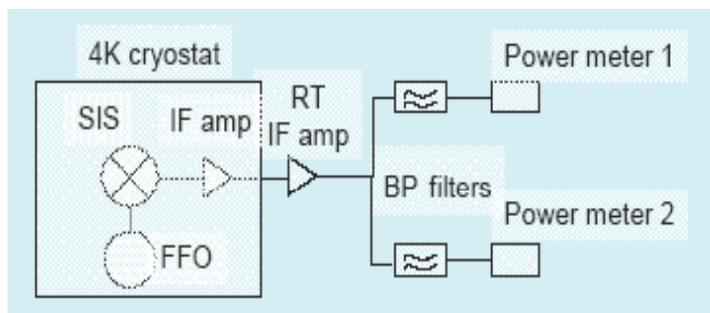
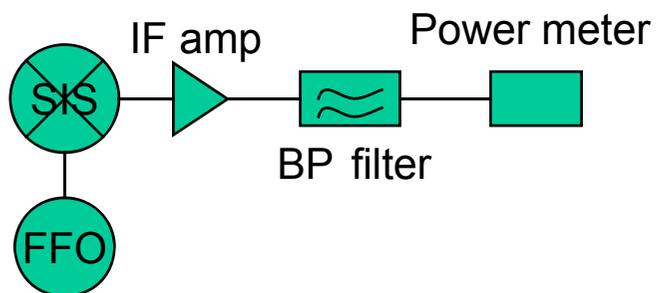
Тш в полосе ПЧ, измеренная для  
частоты гетеродина 497 и 601 ГГц



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

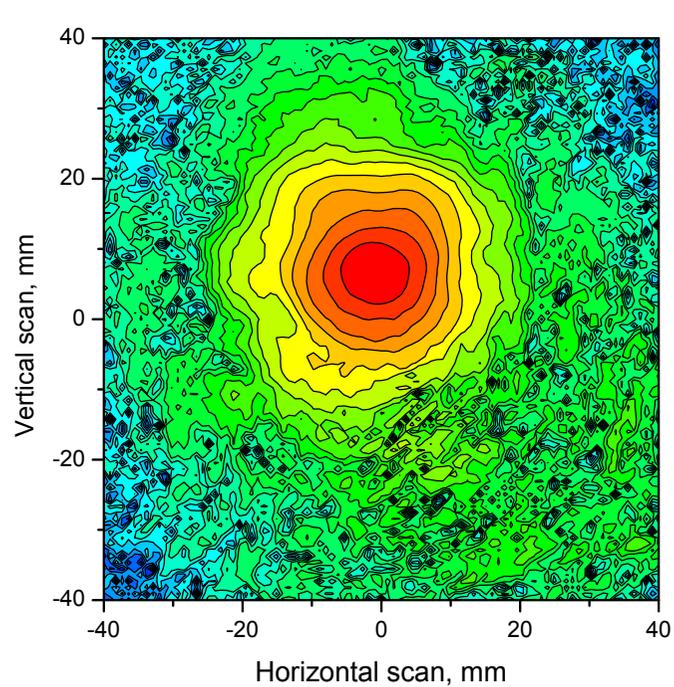
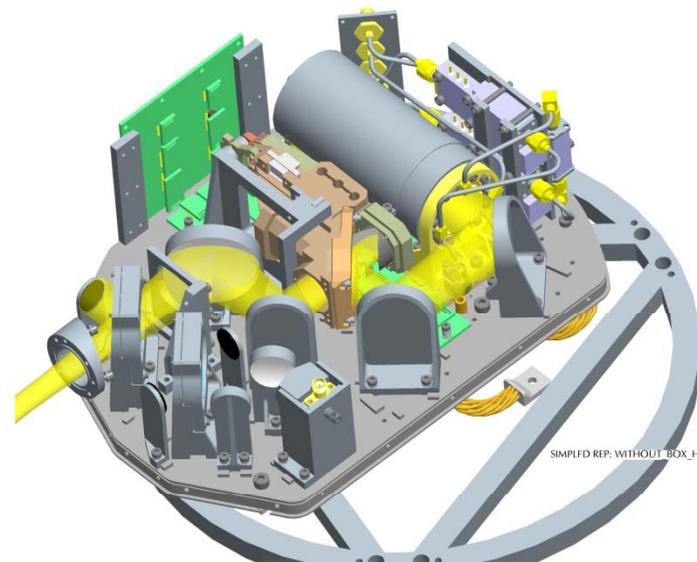


# Стабильность интегрального спектрометра

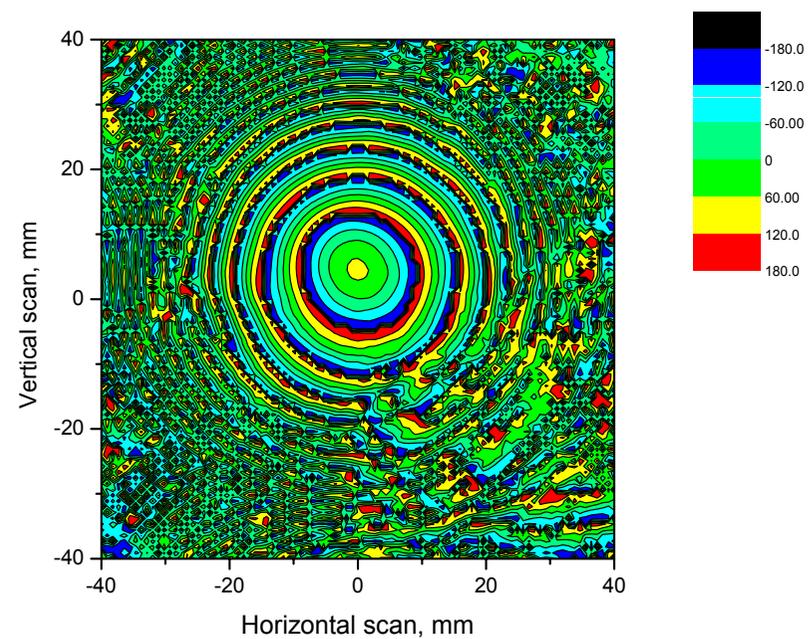


Стабильность СИСП (Allan Variance), СГГ синхронизирован системой ФАПЧ на частоте 600 ГГц. Красная и зеленые кривые показывают стабильность индивидуальных каналов, синяя – спектроскопическую стабильность

# Диаграмма направленности СИП для ТЕЛИС

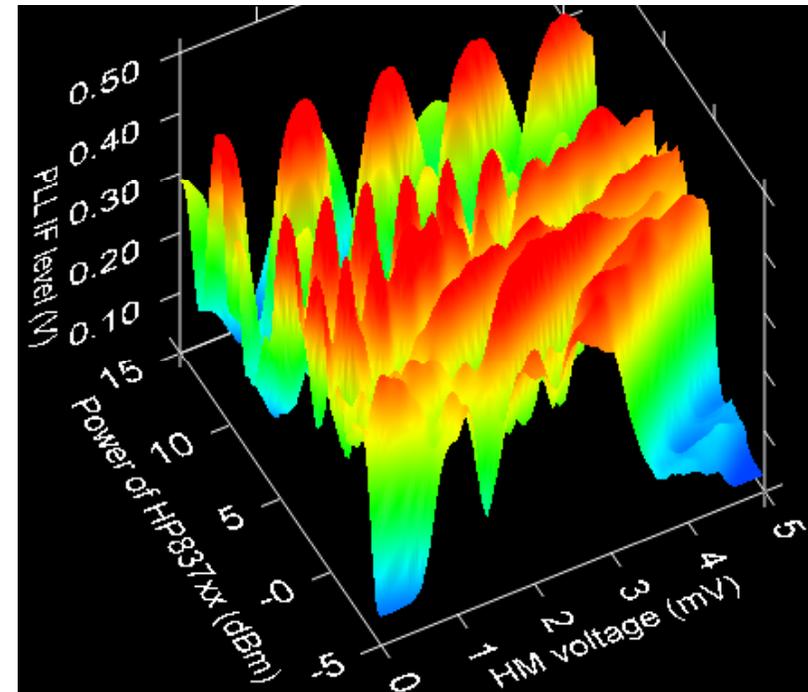
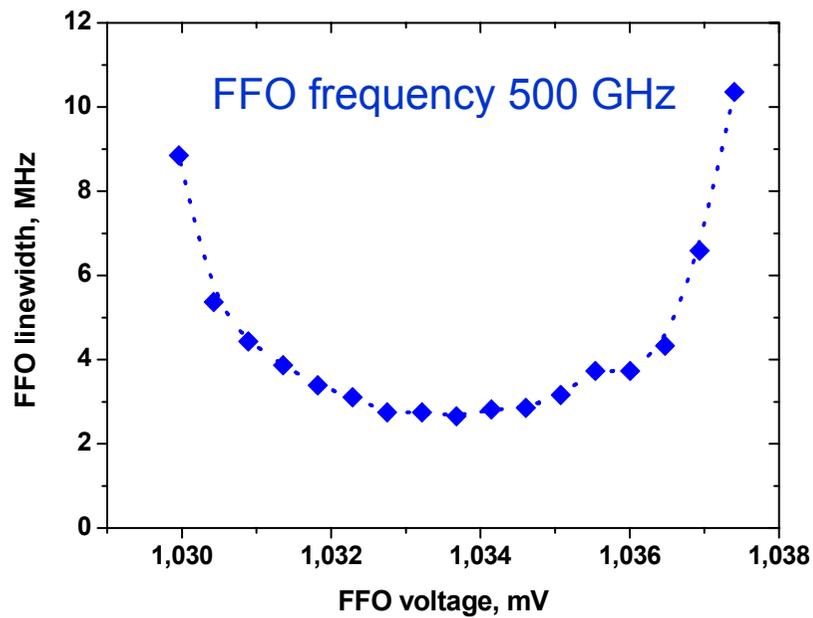
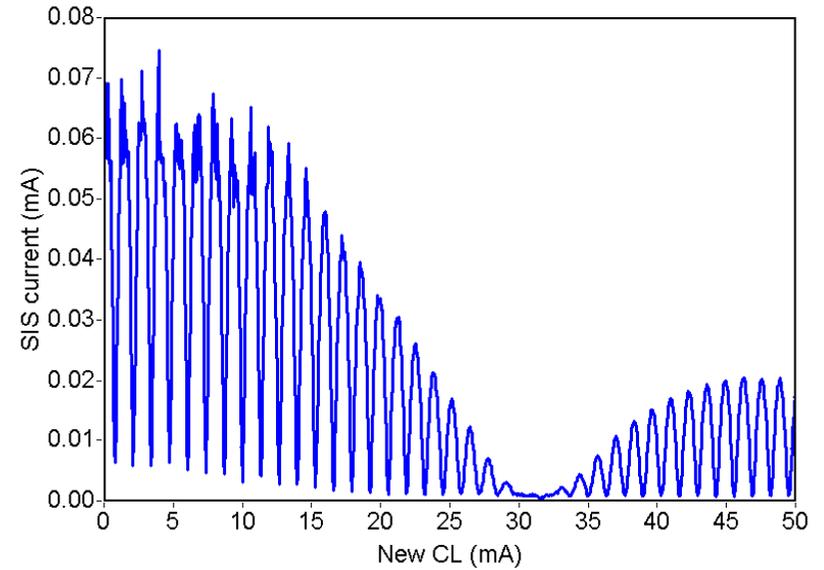
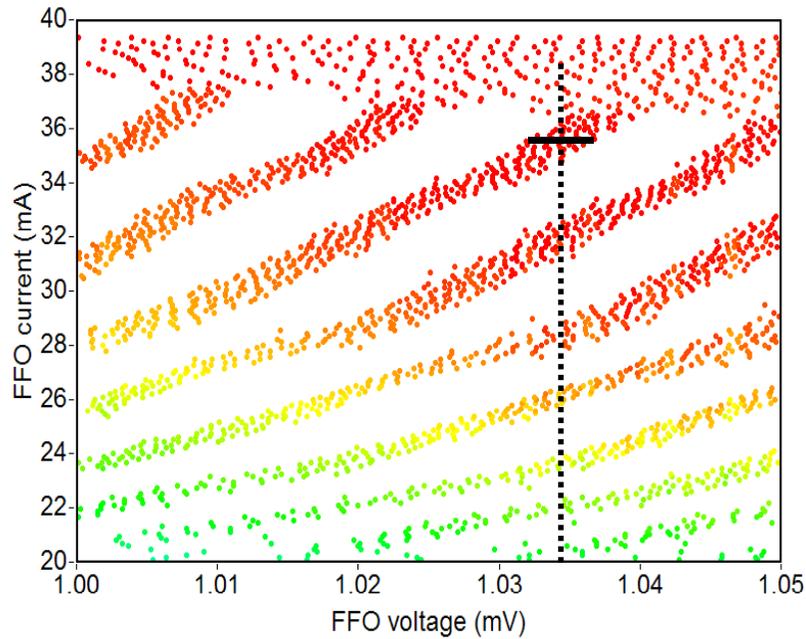


Амплитуда



Фаза

# СИП для TELIS – дистанционное управление





## 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 м<sup>3</sup>; вес полезной нагрузки: 1 200 кг



## Таблица частот и измеряемых веществ, выбранных для проекта TELIS

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

# Спектры, измеренные при сканировании телескопа

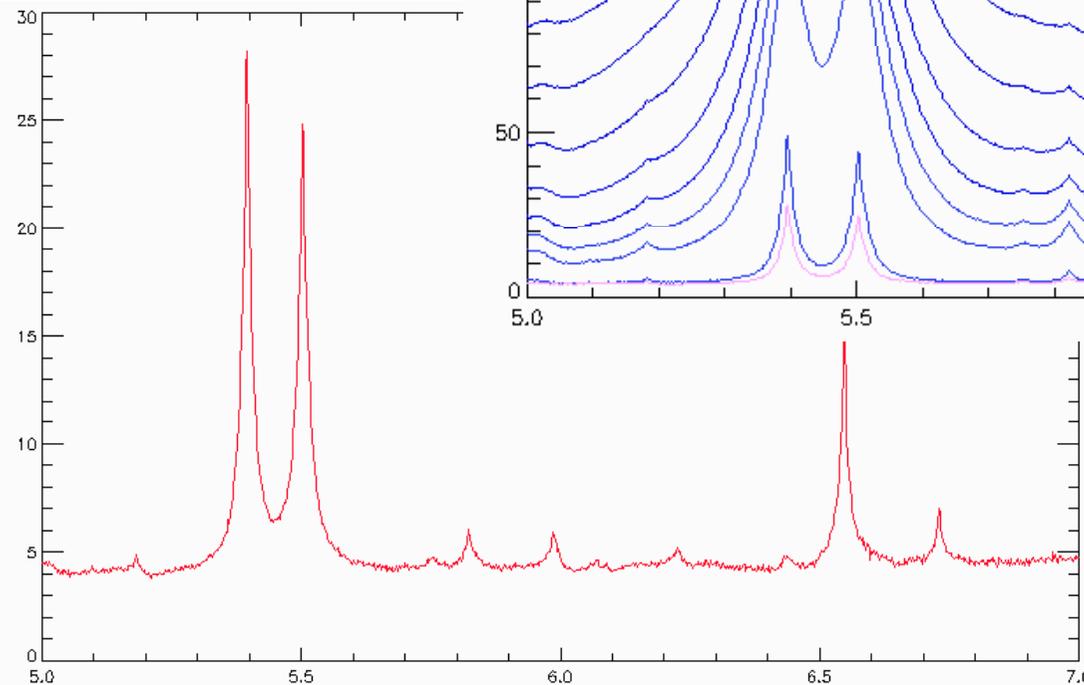
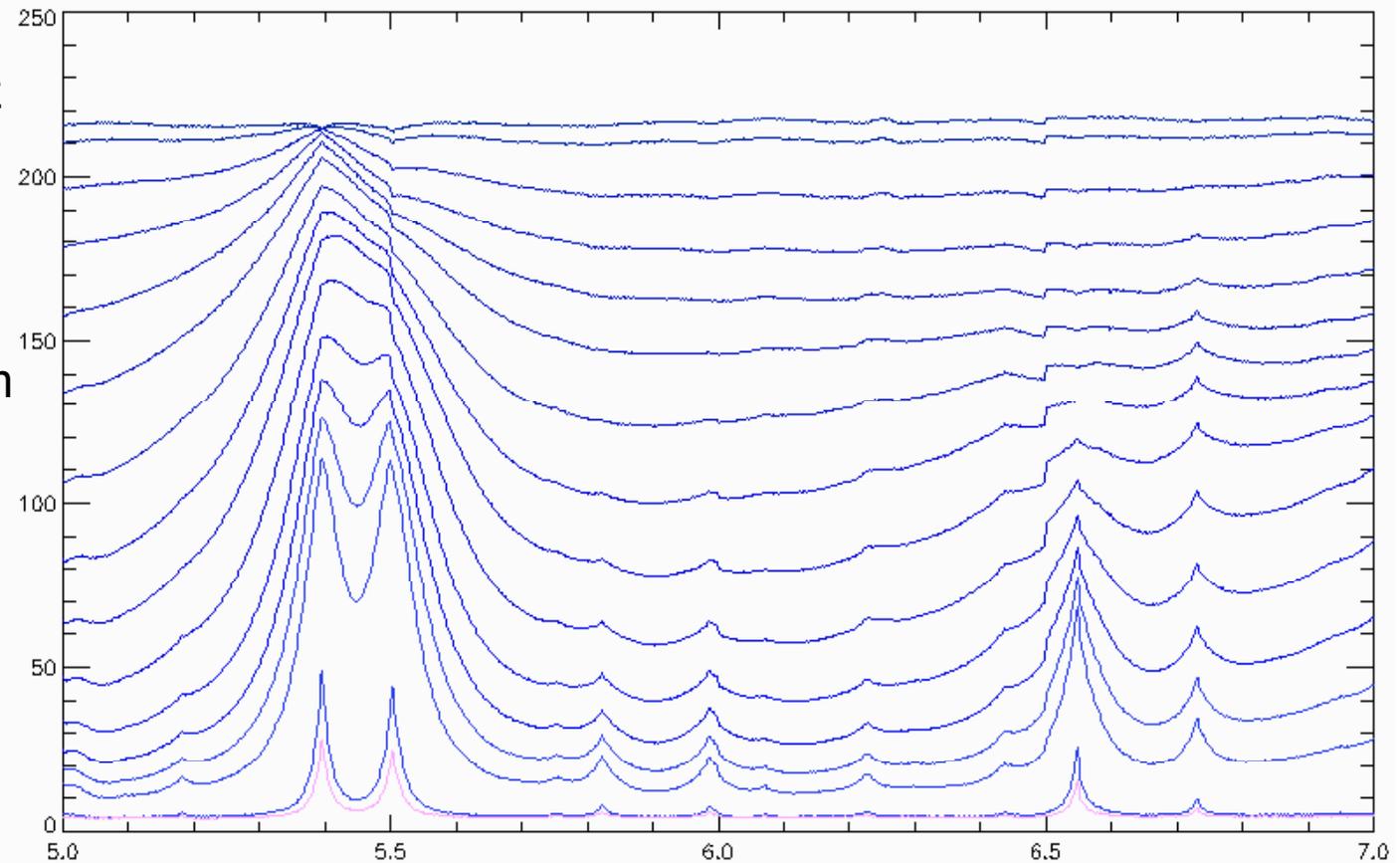
FFO Freq = 495 GHz

Orbit – 30 km;

Increment – 1.5 km,

Tangent: 10.5 – 30 km

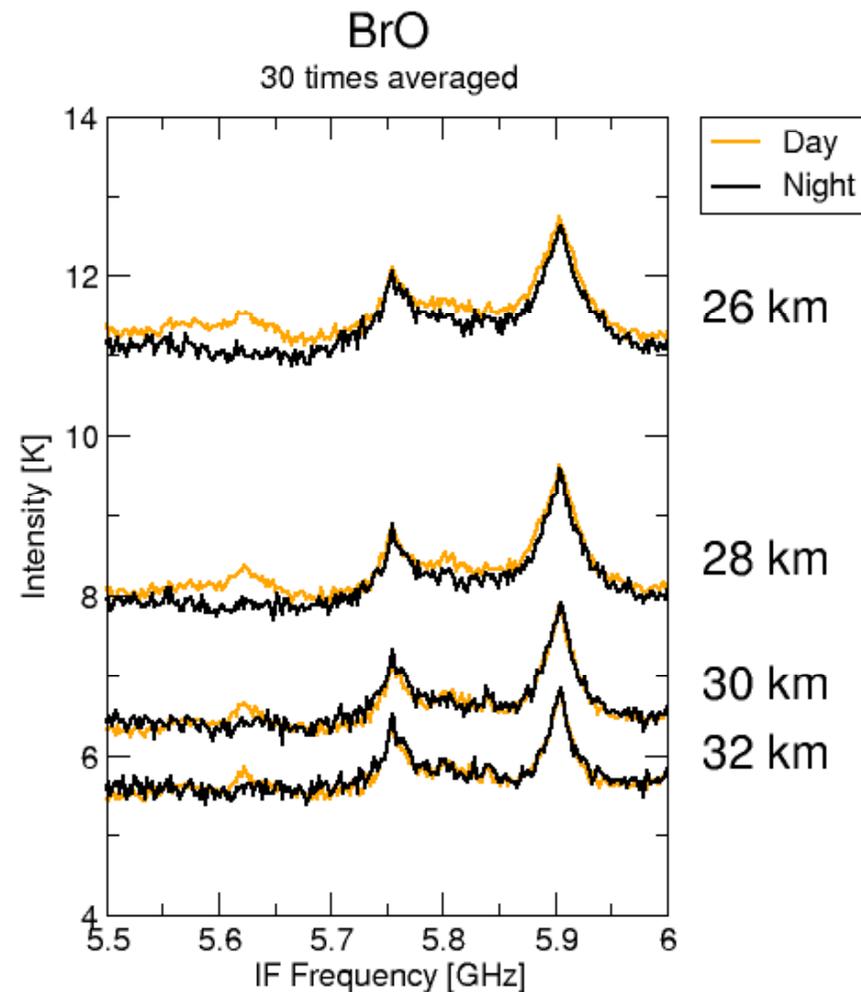
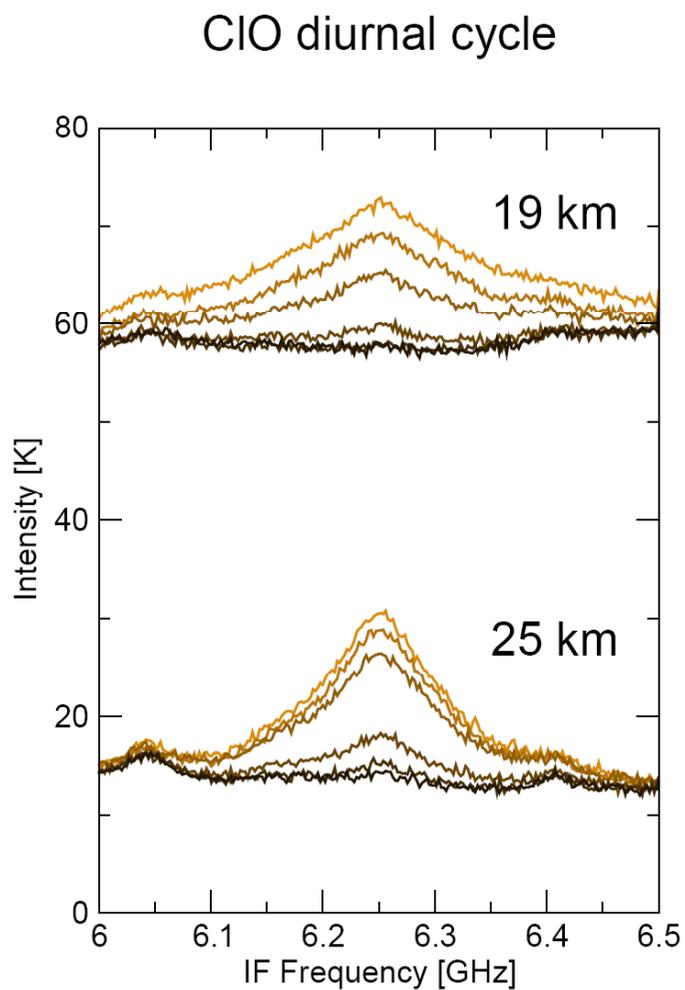
45 degrees up



Выходная частота, ГГц

Выходная частота ПЧ, ГГц

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





# 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.

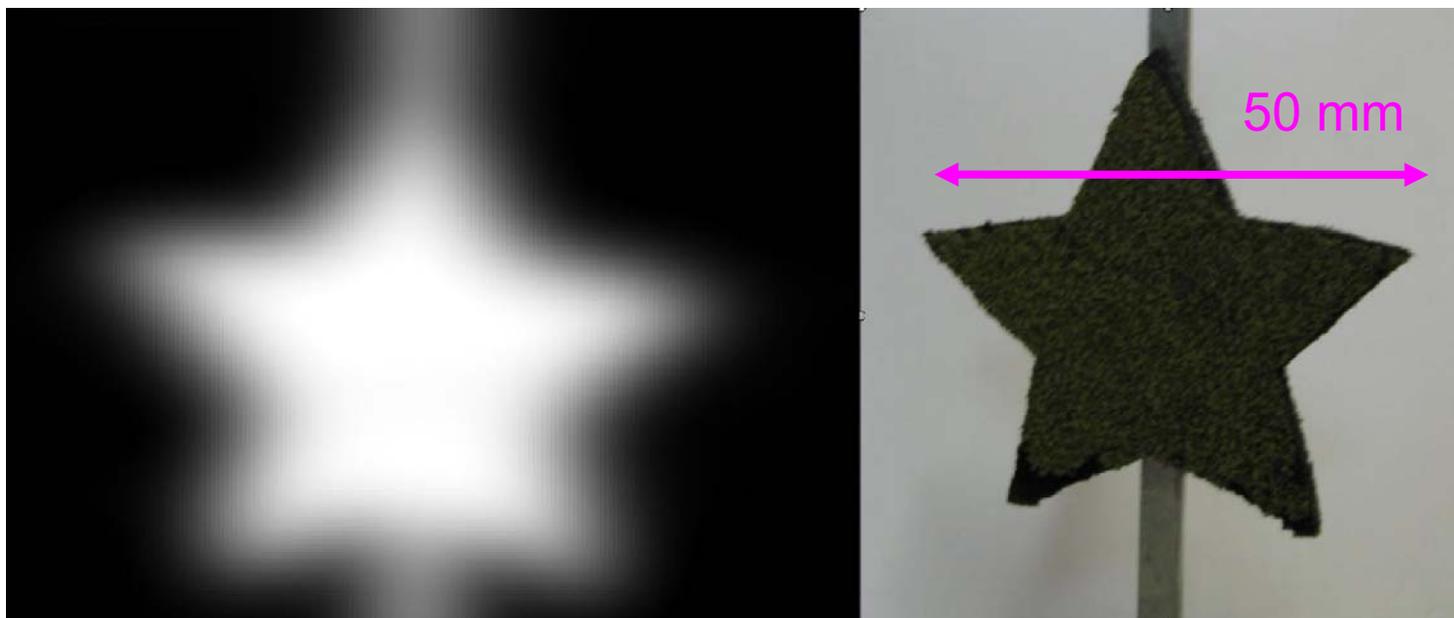
Фото лабораторной установки  
для спектрального анализа  
выдыхаемого воздуха





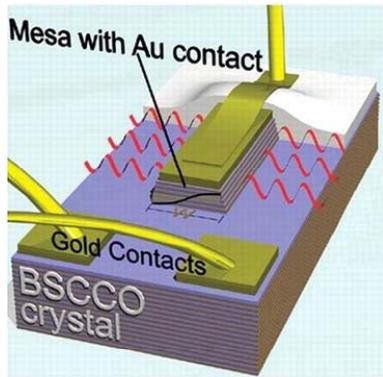
MSPU

## Пассивная система построения терагерцового изображения

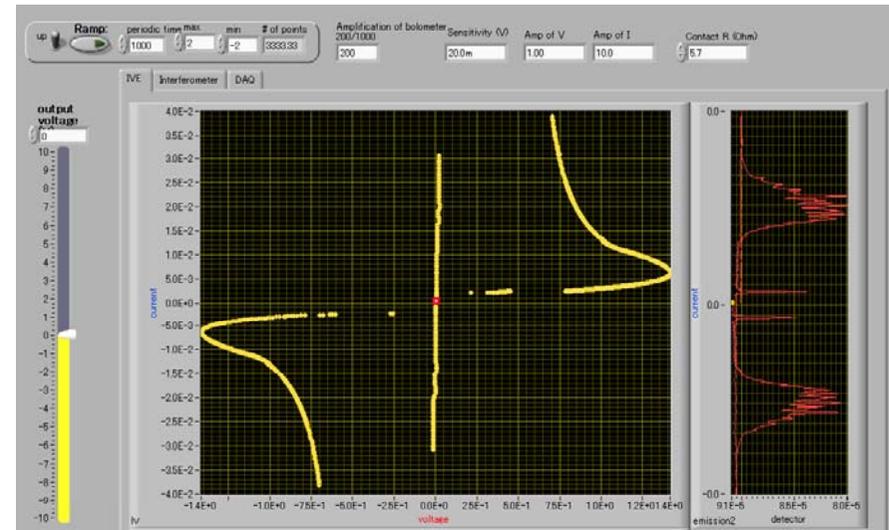


- One pixel receiver with mechanical scanning (NETD  $\sim 13$  mK; Spatial resolution  $\sim 2$  mm)
- Next step: linear array of SIRs

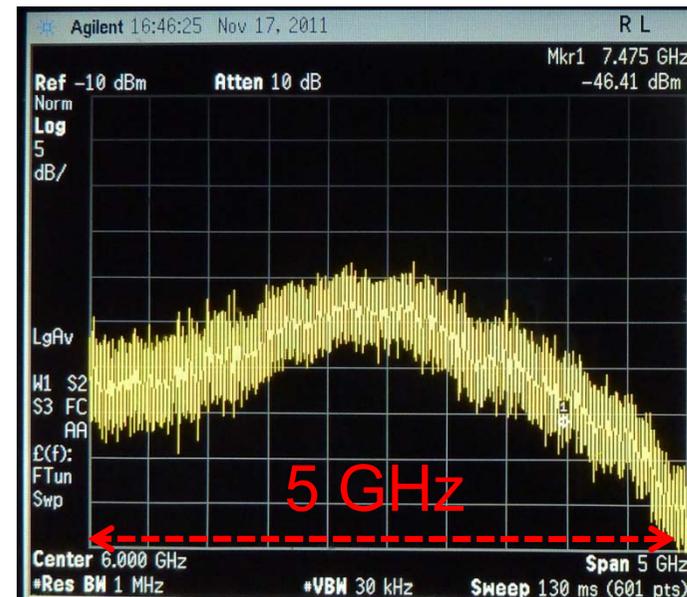
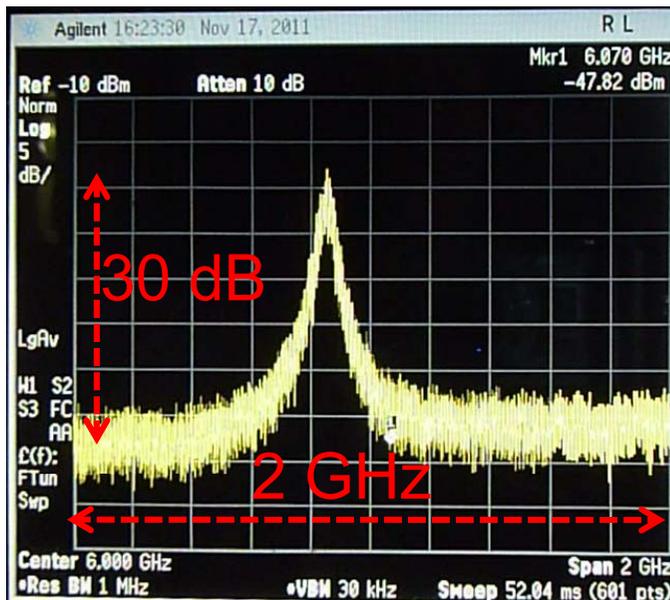
# Спектры излучения из BSCCO mesa, измеренные СИП



Huabing Wang  
Tsukuba, Japan  
Nanjing, China



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



# 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  $\text{ClO}$  и  $\text{BrO}$ , 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.