

Прогресс в разработке СИС-смесителей для космической обсерватории "Миллиметрон"

А.В. Худченко,

К.И. Рудаков^{1,2}, В.П. Кошелец^{1,2}, И.В. Третьяков¹, Г.П. Назаров^{1,2}, Я.О. Водзяновский, А.В. Филиппенко^{1,2}, М.Ю. Архипов¹, А.М. Барышев³, М.Мансфельд⁴, Р. Хеспер³, А.М. Чекушкин², Д. Монтофре³, С.В. Кузнецов⁵, Р.А. Черный¹, С.Ф. Лихачев¹

¹Astro Space Center of Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

²Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Moscow, Russia

³Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, Groningen, the Netherlands

⁴Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

⁵Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

1. Space-VLBI receivers:

30 – 50 GHz
84 – 116 GHz
211 – 275 GHz
300 – 373 GHz*

Special design bureau of IRE – KASI (S. Korea)

2. Millimetron Heterodyne Instrument for Far-Infrared (High Resolution Spectrometer)

- operating frequencies : 0,5 – 2,6 THz
- spectral resolution $\geq 10^6$

ASC - PMO (CNSA)

3. Short-wave Array Camera Spectrometer (SACS)

- operational modes: camera+ spectrometer
- operating frequencies: 0,7 – 4,3 THz
- spectral resolution ≥ 100

CEA Saclay (France)

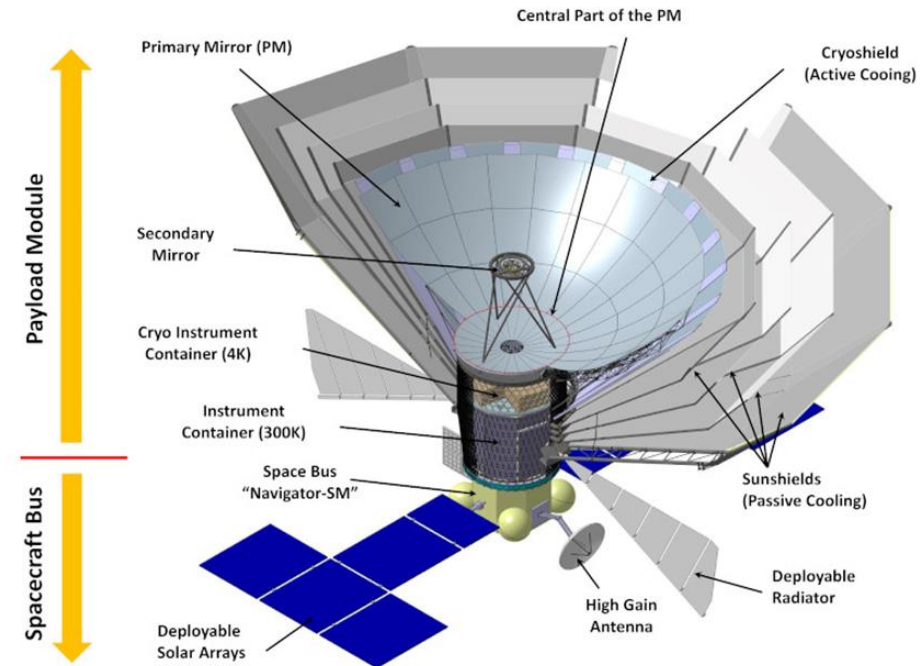
4. Long wave-Array Camera Spectropolarimeter (LACS)

- operational modes: camera+ spectrometer
- operating frequencies: 0,1 – 1 THz
- spectral resolution ≥ 100

University of Rome (ASI) (Italy) (??)

РСДБ приемники для обсерватории Миллиметрон

- 10-м раскрываемое зеркало с СКО 10кмк.
- Орбита - L2 точка Лагранжа
- Криогенные приборы (4K) на борту
- Ракетоноситель Ангара 5
- Запуск - после 2030 г.

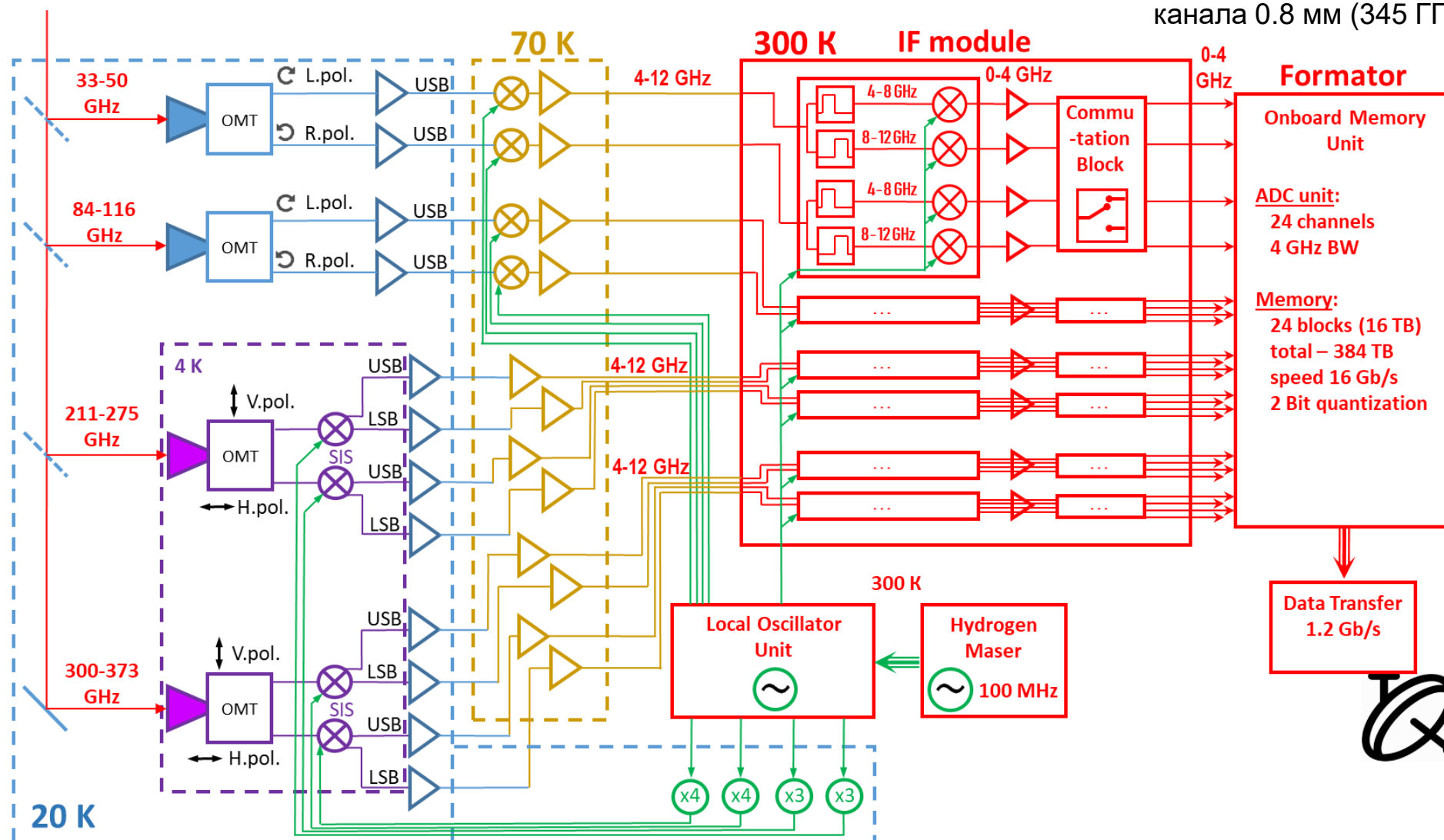


Канал	Частота, ГГц	Шумовая температура, К	Полосы приема	Поляризация	Промежуточная частота, ГГц	Полная ПЧ полоса, ГГц	Тип приемника
РСДБ_1	33-50	20	USB	2, круг	4-12	16	НЕМТ усилитель
РСДБ_2	84-116	37	USB	2, круг	4-12	16	НЕМТ Усилитель
РСДБ_3	211-275	50	USB, LSB	2, круг	4-12	16 (32)	СИС Смеситель
РСДБ_4	300-373	80	USB, LSB	2, круг	4-12	16 (32)	СИС Смеситель

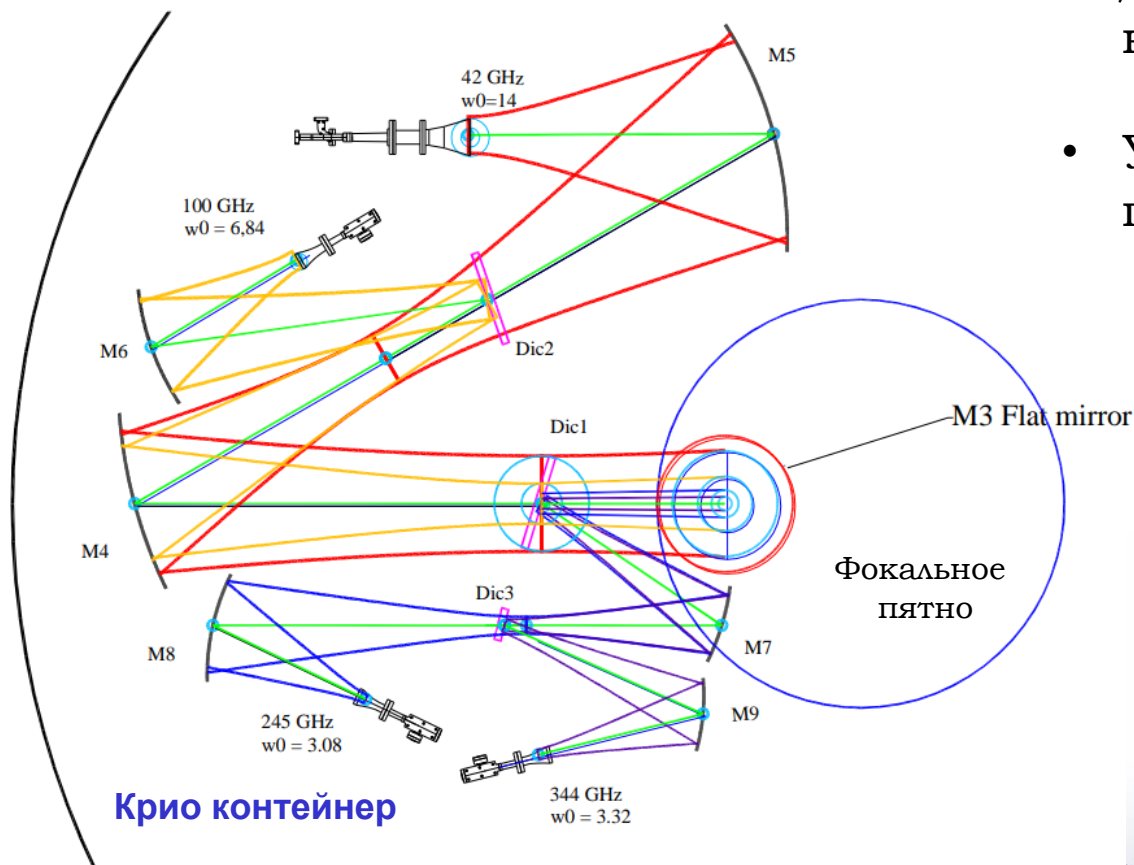
Миллиметрон - схема систем для интерферометрических наблюдений



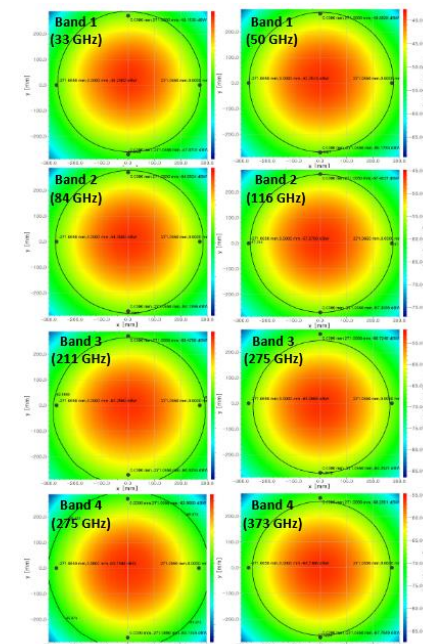
- Возможность МЧС
- Разделение боковых полос
- Планируется присутствие канала 0.8 мм (345 ГГц)



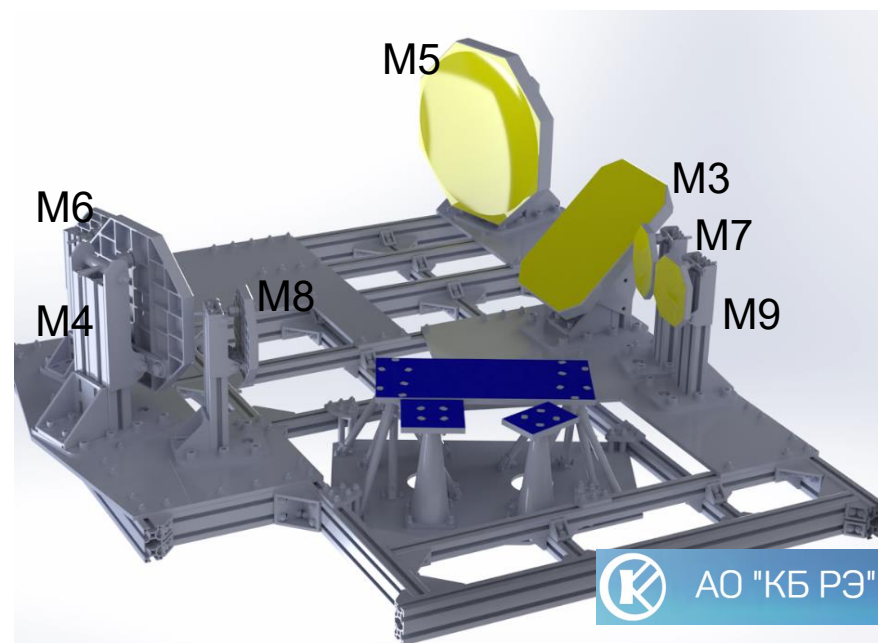
Оптика прибора РСДБ для многочастотного наблюдения



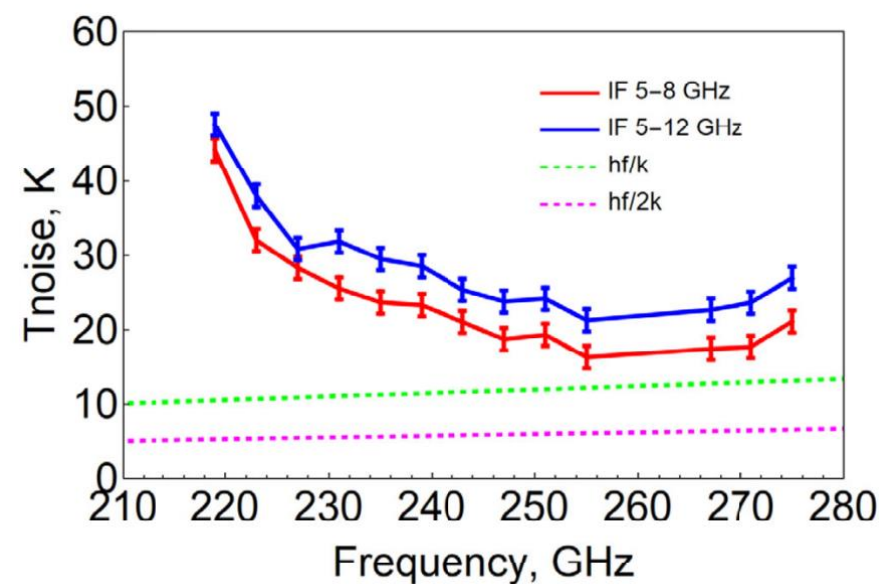
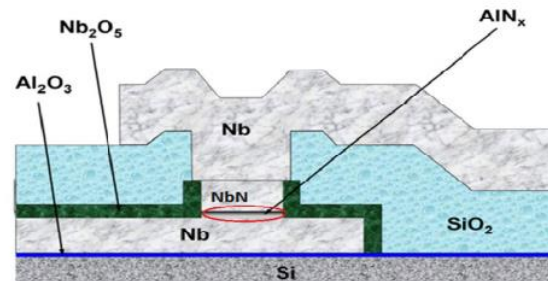
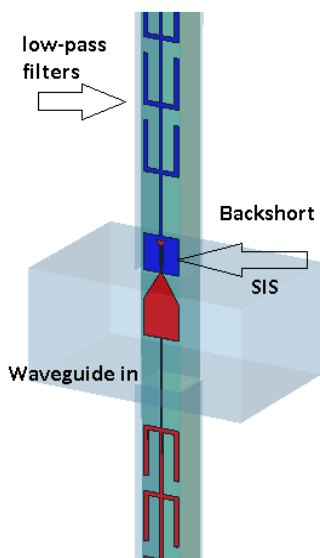
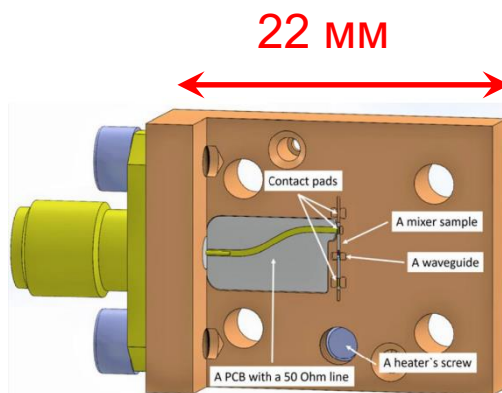
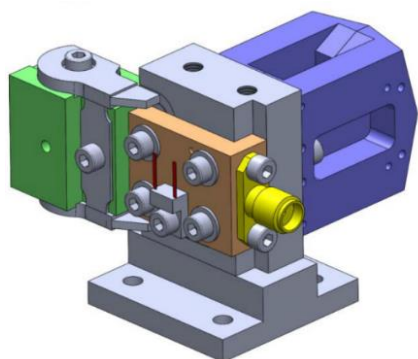
- Диаграмма направленности (GRASP)
- Уровень кросс-поляризации менее -25 дБ



Оптическая схема комплекса КПИИТ

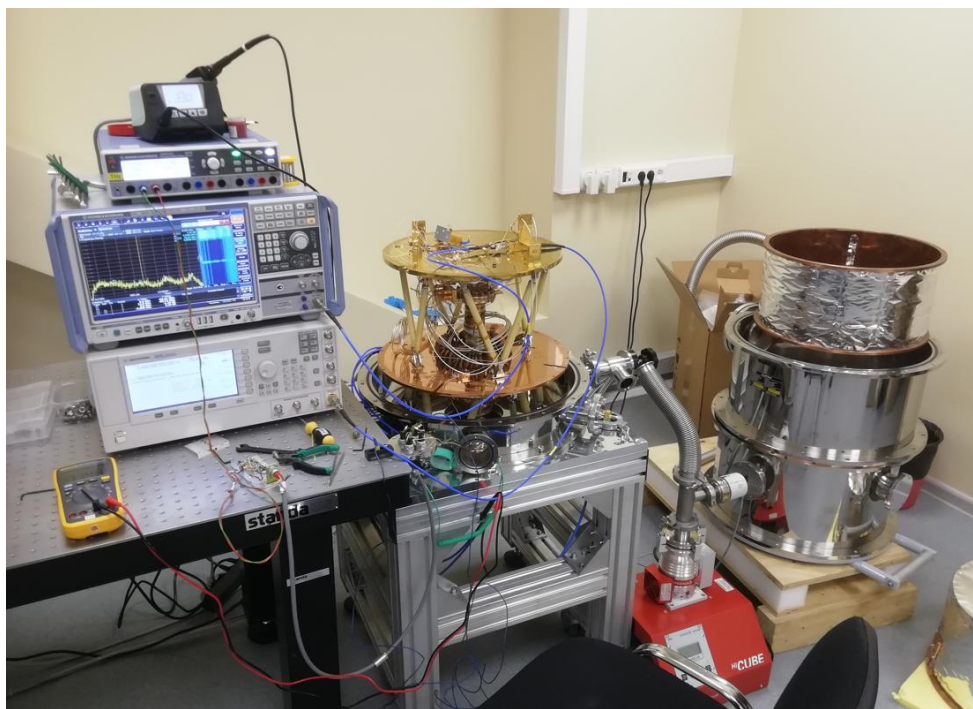


DSB SIS receiver 211-275 GHz (NOVA-IRE-ASC)

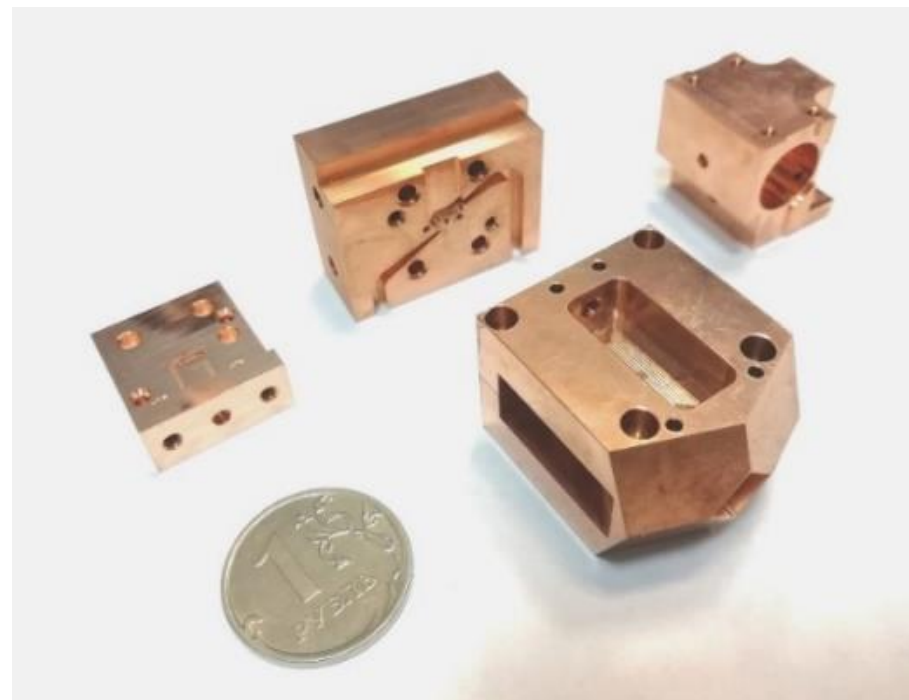


Pictures from K.I. Rudakov PhD Thesis. 2021

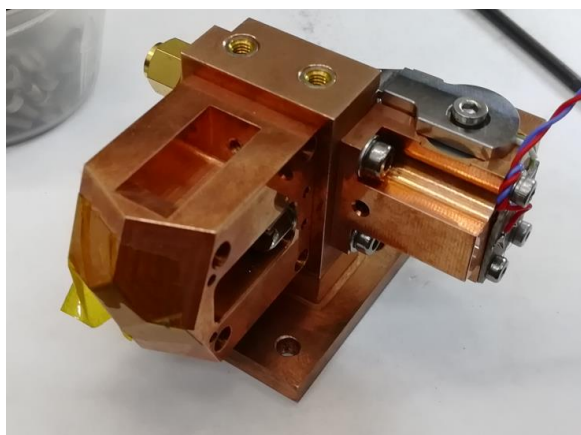
СИС-смеситель 211-275 ГГц в АКЦ ФИАН



4K криостат в АКЦ ФИАН



Детали полноводного смесителя



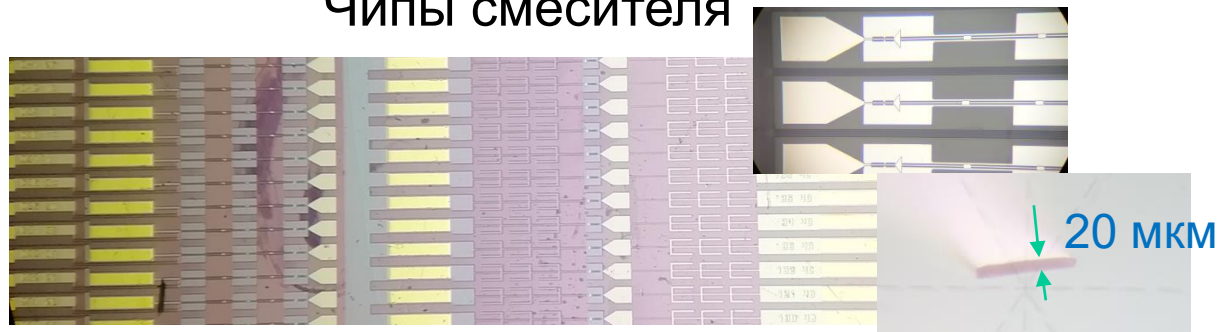
Блок двухполосного
волноводного СИС-смесителя
в сборе



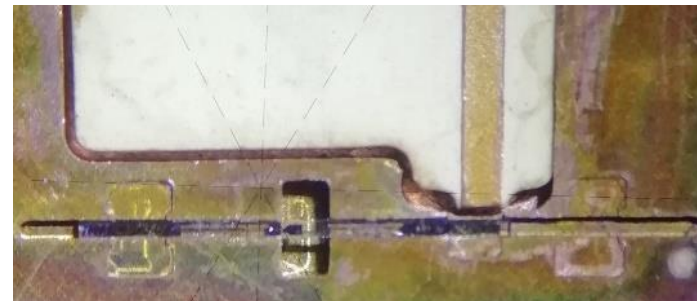
- Все компоненты смесителя - отечественные

Подготовка и монтаж СИС-смесителя

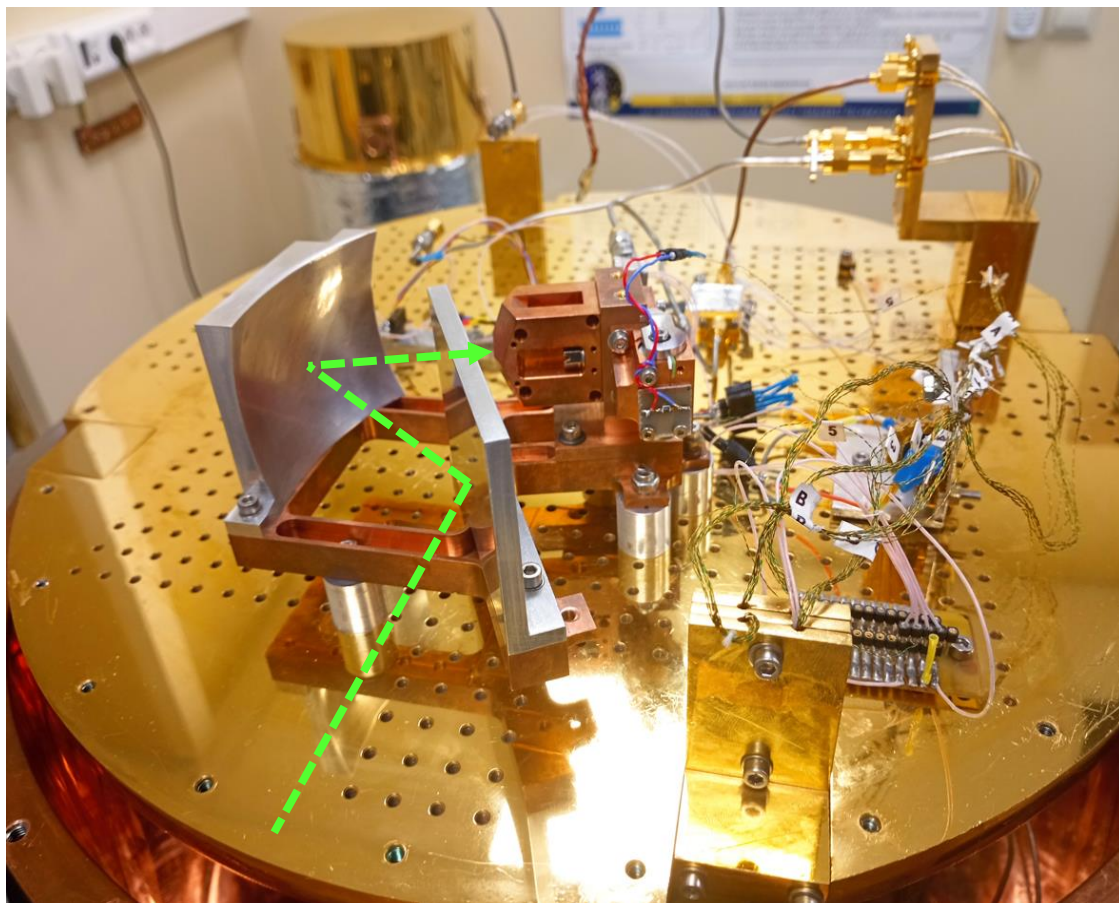
Чипы смесителя



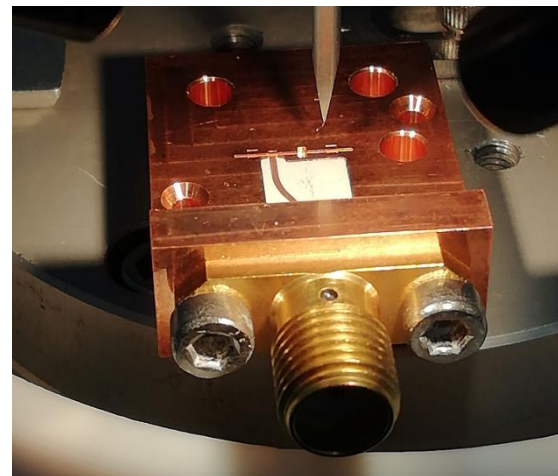
Установка смесителя

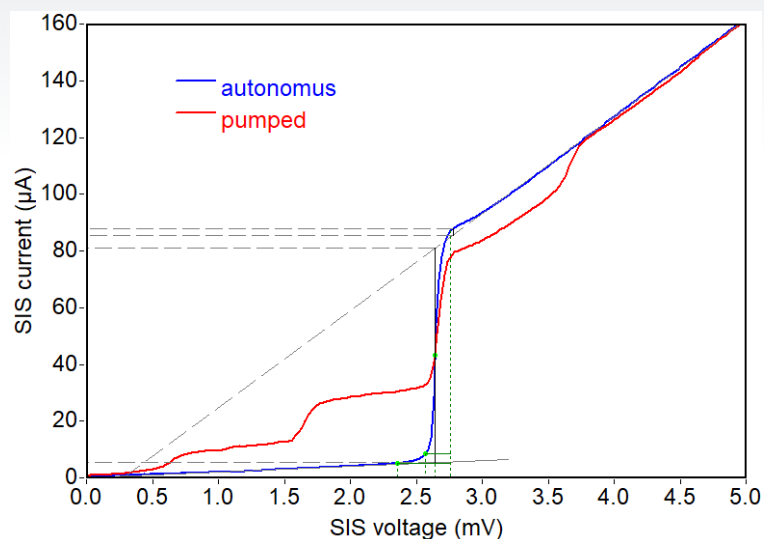


Блок смесителя в криостате

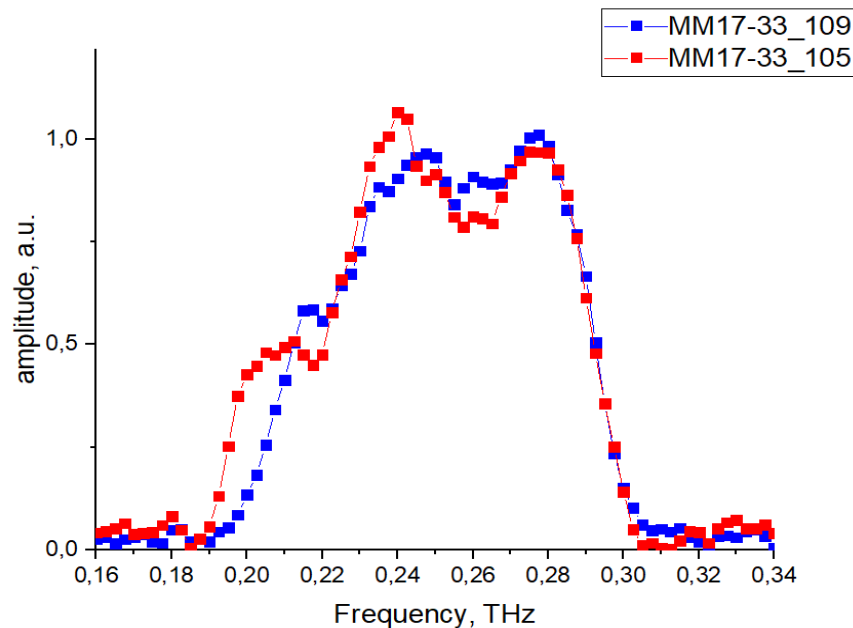


Бондирование смесителя

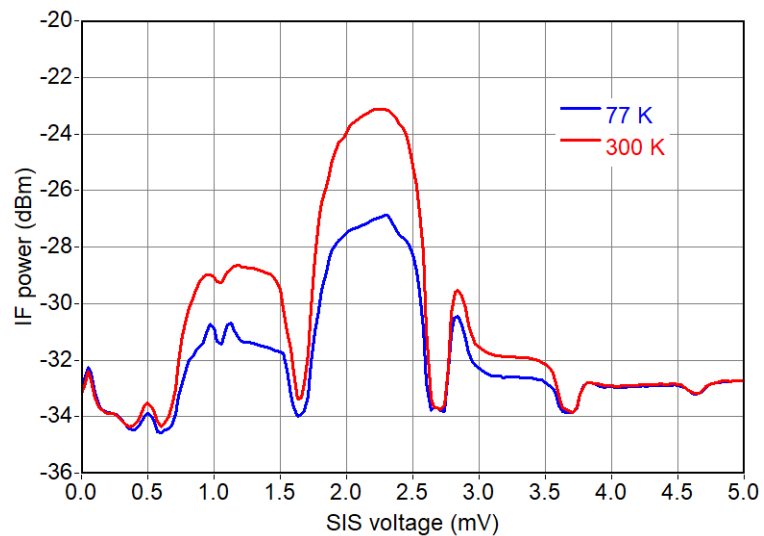




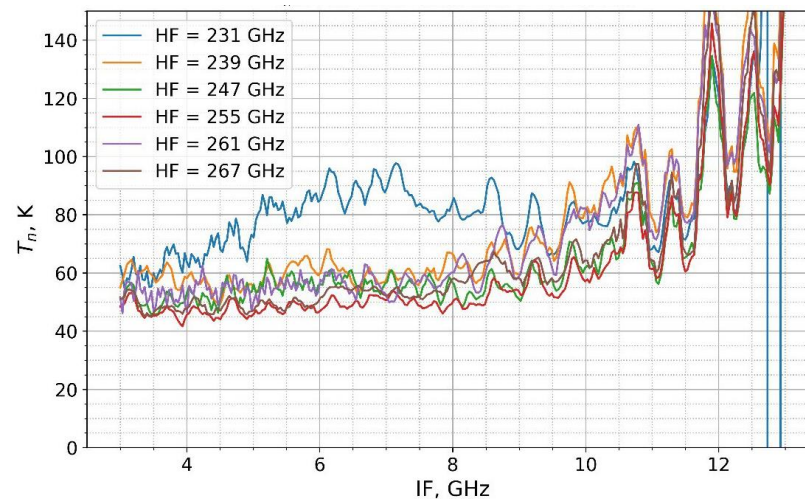
Вольт-амперная характеристика
СИС-перехода



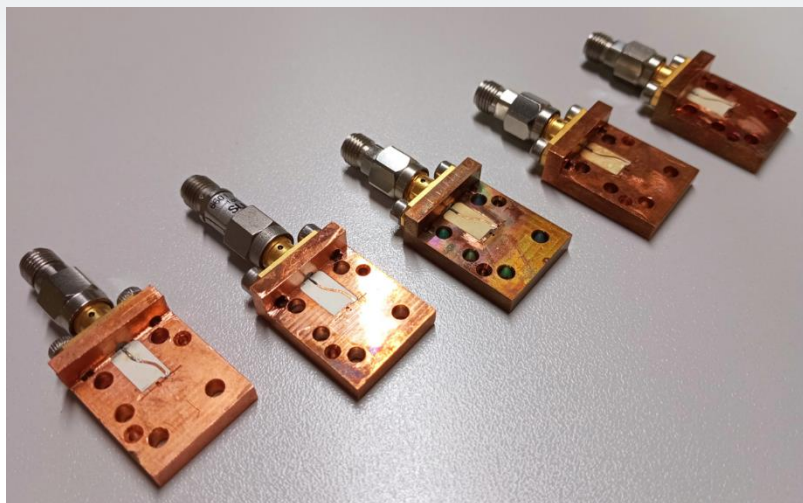
Частотный отклик – Фурье спектрометр



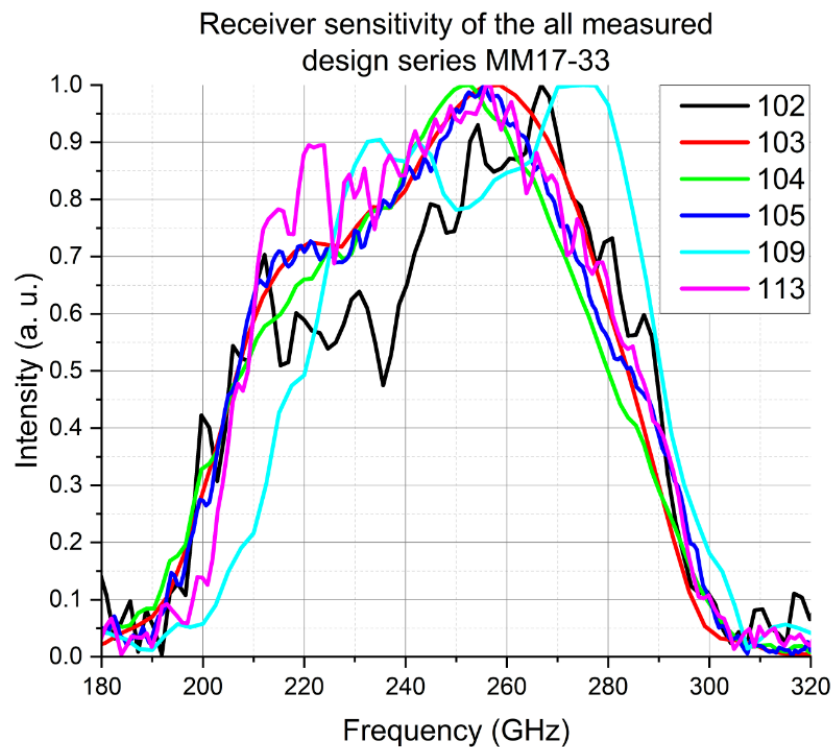
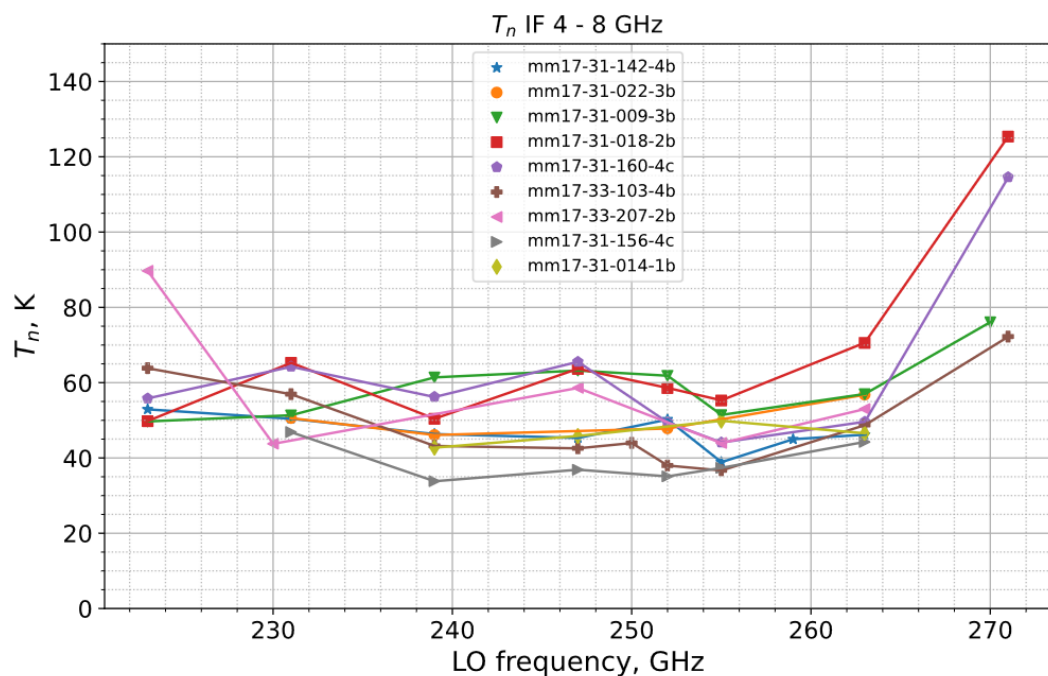
Отклик по мощности от напряжения смещения



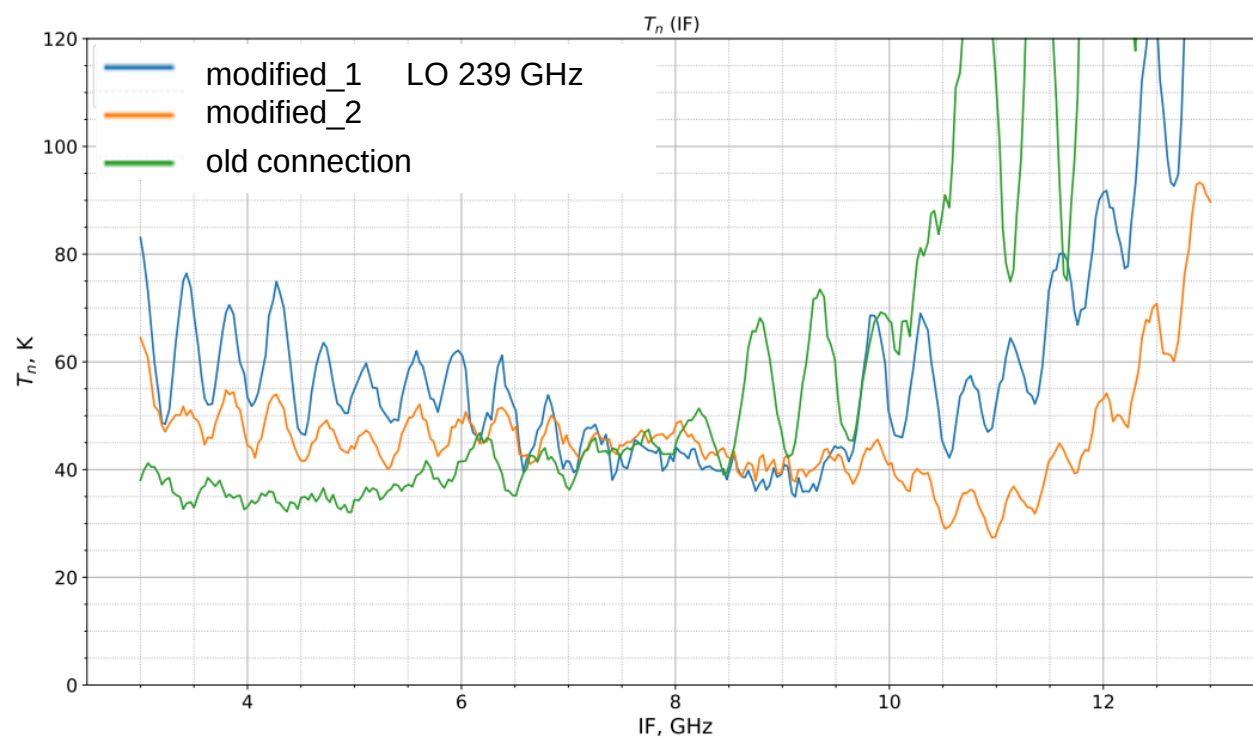
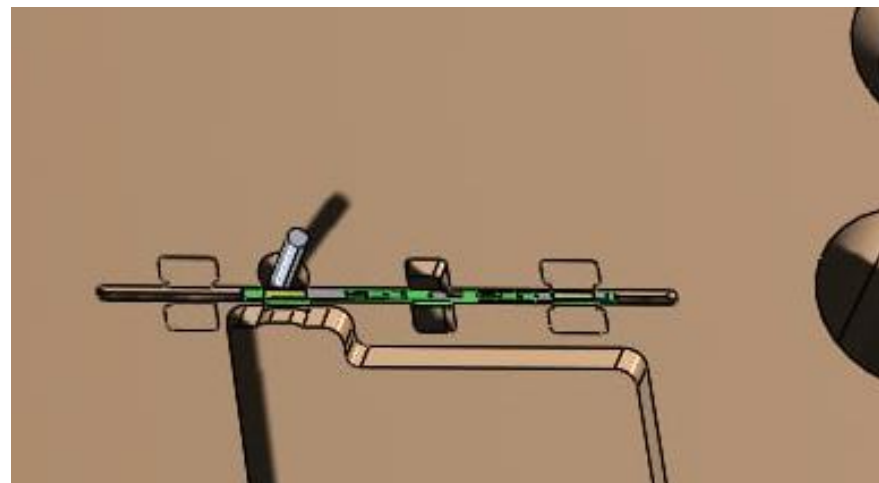
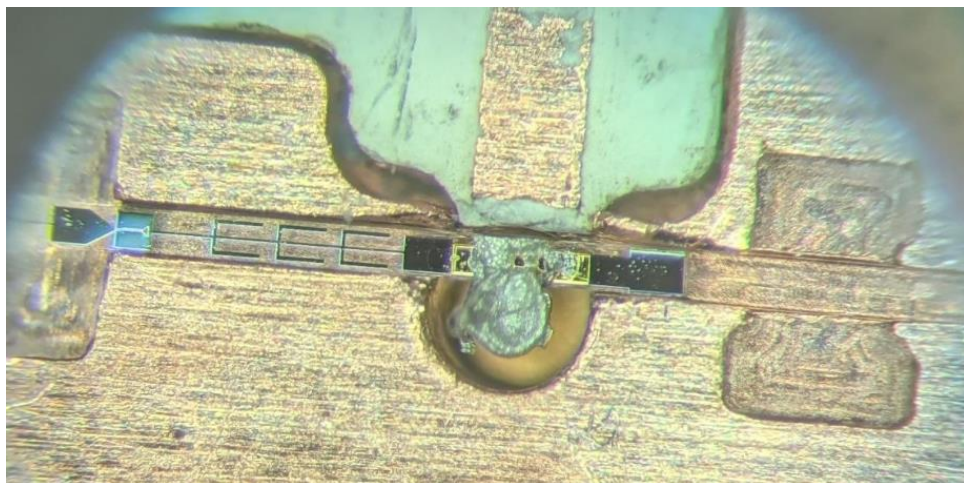
Шумовая температура от промежуточной частоты
для нескольких положений гетеродина



6 измеренных смесителей в 2023 г.,
более 10 в 2024 г.

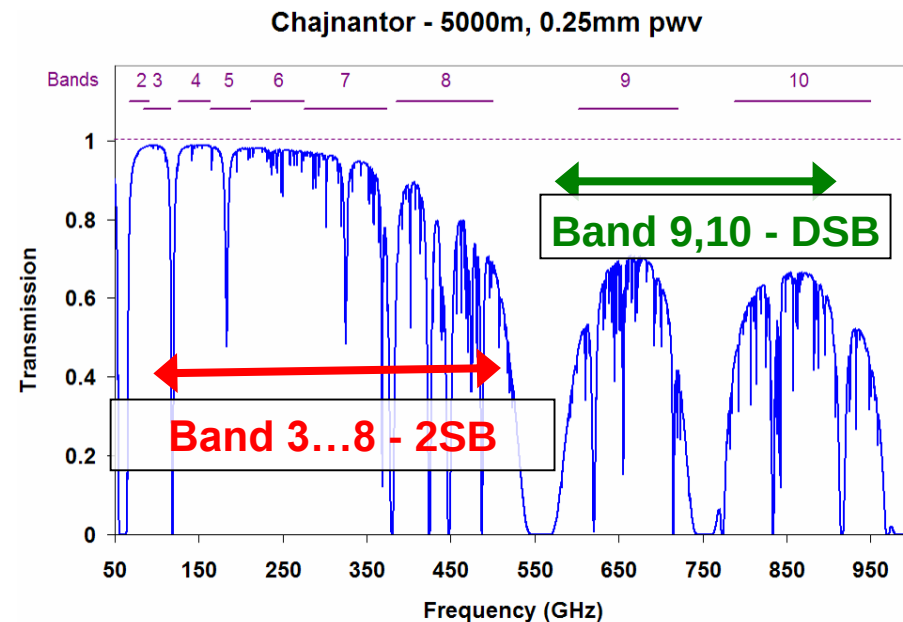
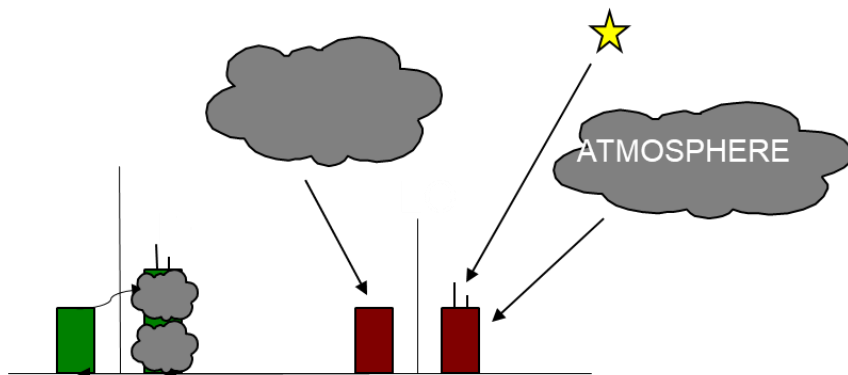


Модификация вывода ПЧ сигнал для расширения полосы ПЧ

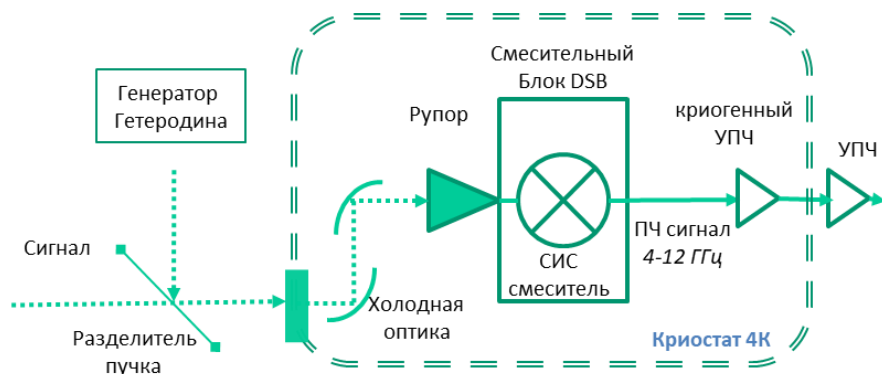


- Модификация ПЧ выхода расширяет полосу ПЧ до 12 ГГц

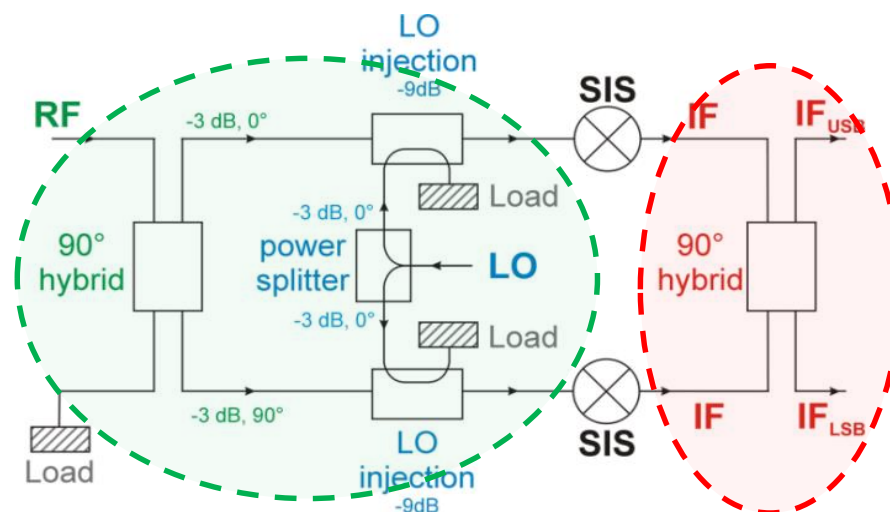
СИС-приемники с разделением полос



Двухполосный СИС приемник



СИС смеситель с разделением полос



Волноводный блок для СИС смесителя с разделением полос

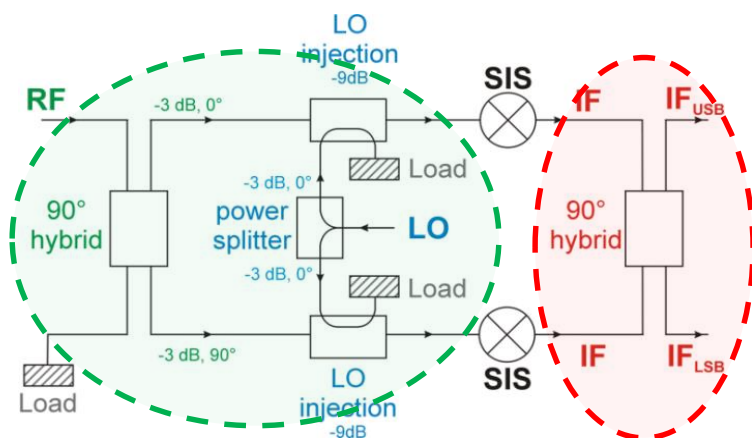
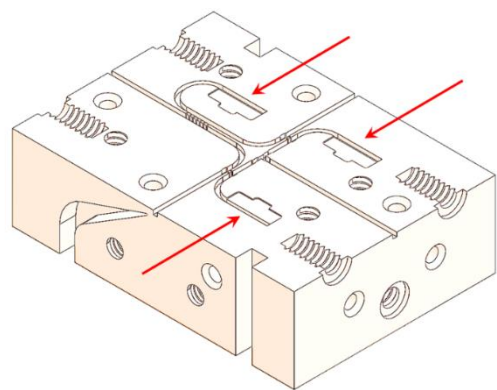
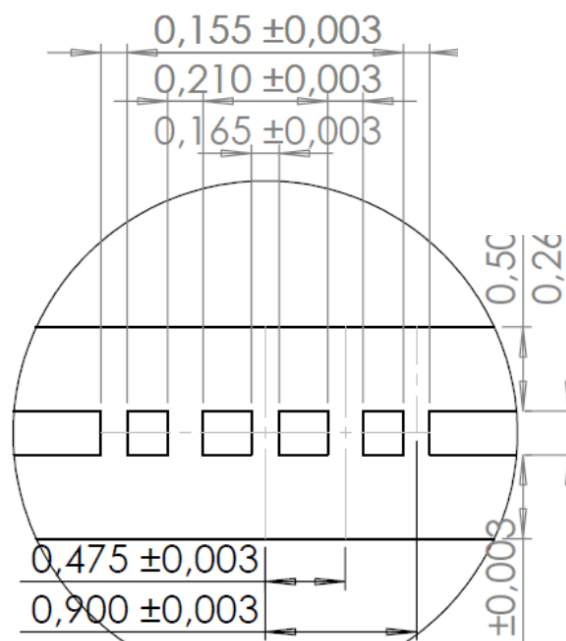


Схема СИС смесителя с разделением полос



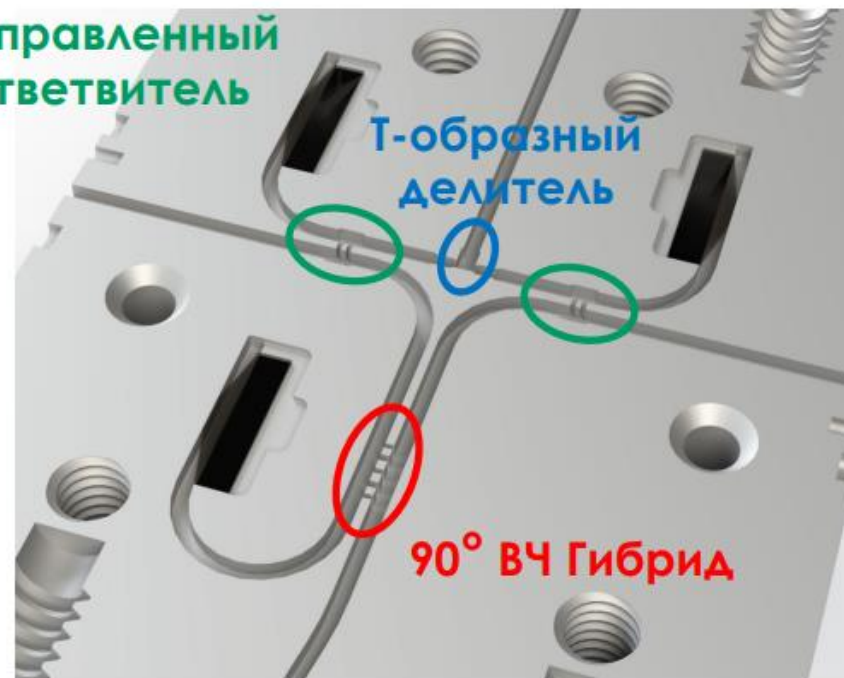
Половина волноводного блока



Направленный
ответвитель

T-образный
делитель

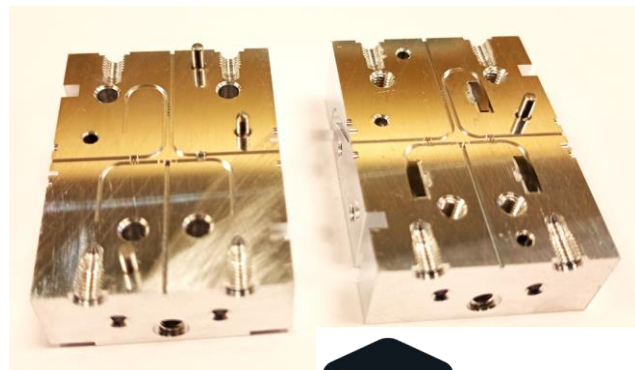
90° ВЧ Гибрид



3D модель волноводного блока

Чертеж волноводного гибрида
для фрезы 150мкм

Смеситель с разделением боковых полос для диапазона 211-275 ГГц



ООО «ТриДэ»

Волноводная нагрузка:
Кварцевое стекло
125 микрон +
NiCr 8 нанометров x3

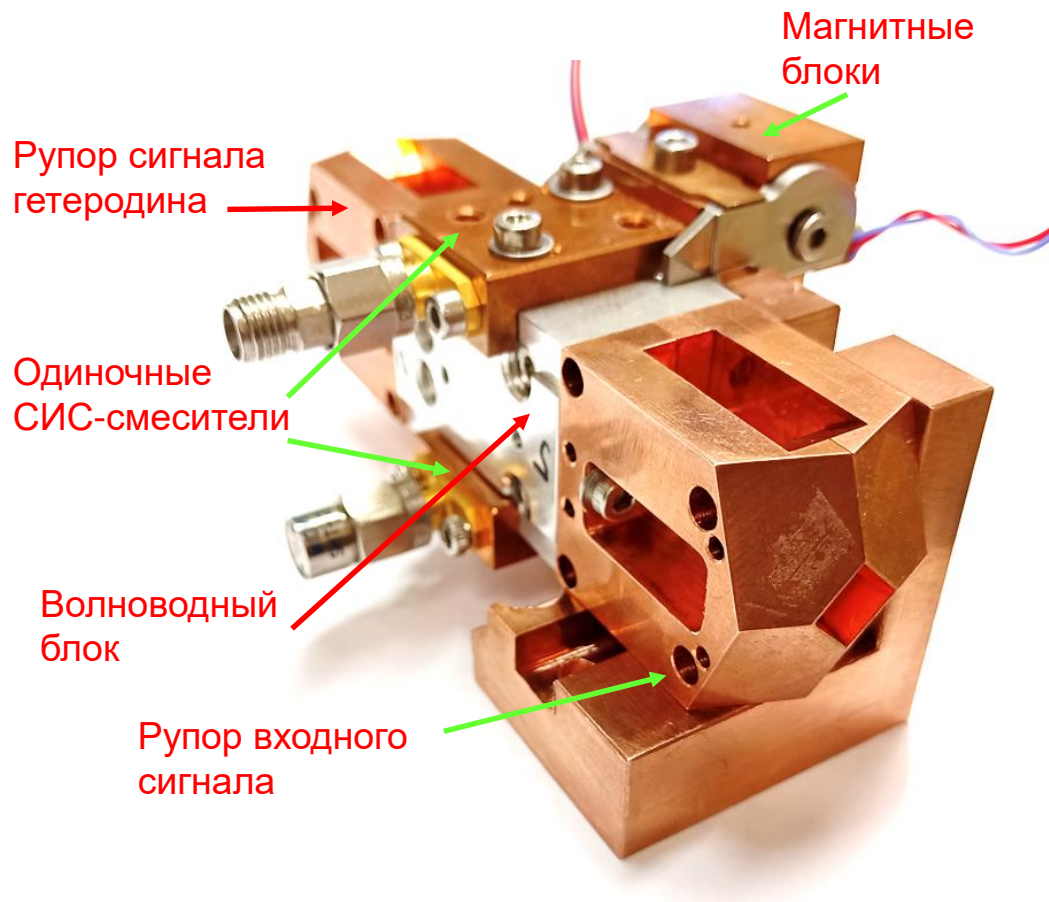
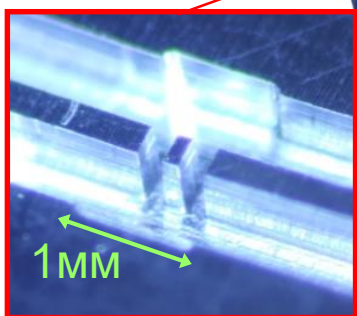
Опорный генератор

SIS 1

SIS 2

90° ВЧ Гибрид

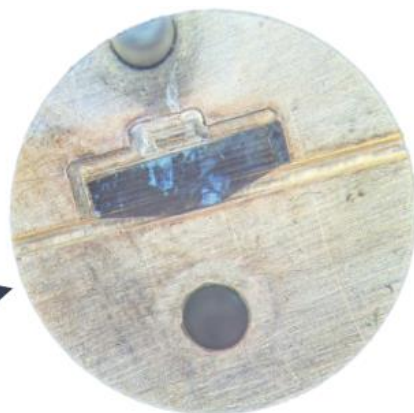
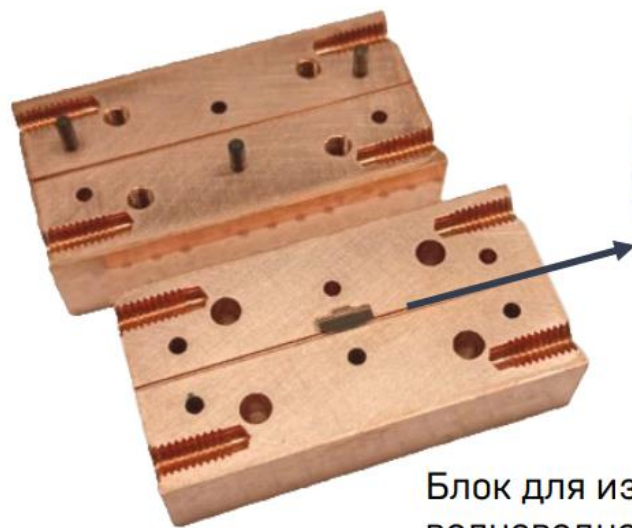
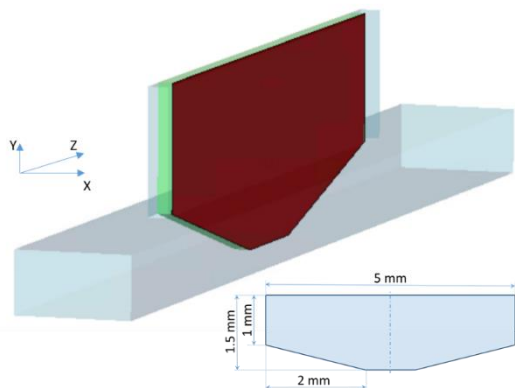
Исследуемый сигнал



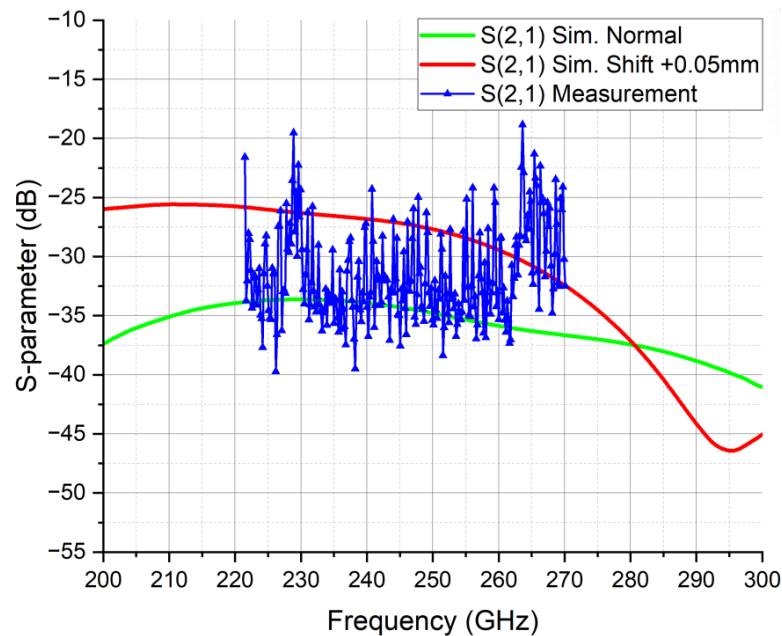
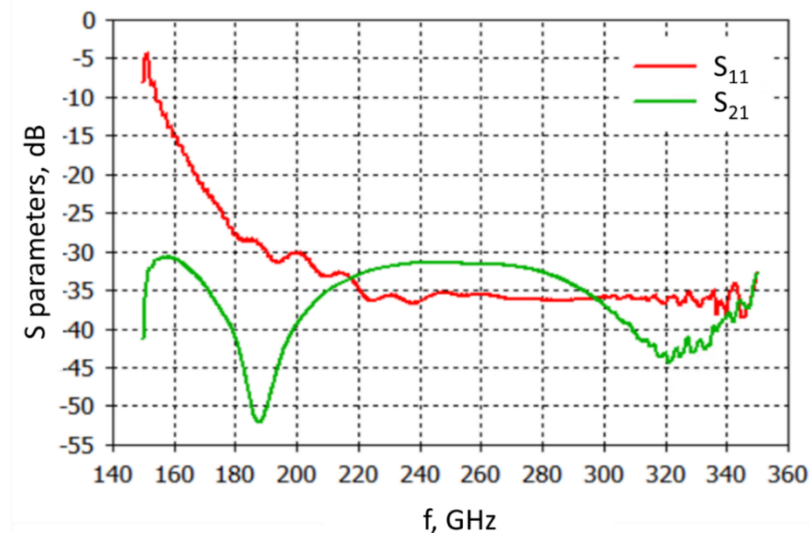
- Изготовлен волноводный блок
- Собран смеситель с разделением полос

Криогенная волноводная нагрузка 210-300 ГГц

- Пленка NiCr толщиной 8 нм
- Сопротивление 250 Ом/квадрат
- Кварцевая подложка
толщиной около 125 мкм
- Отражение -35дБ в диапазоне 220-330 ГГц

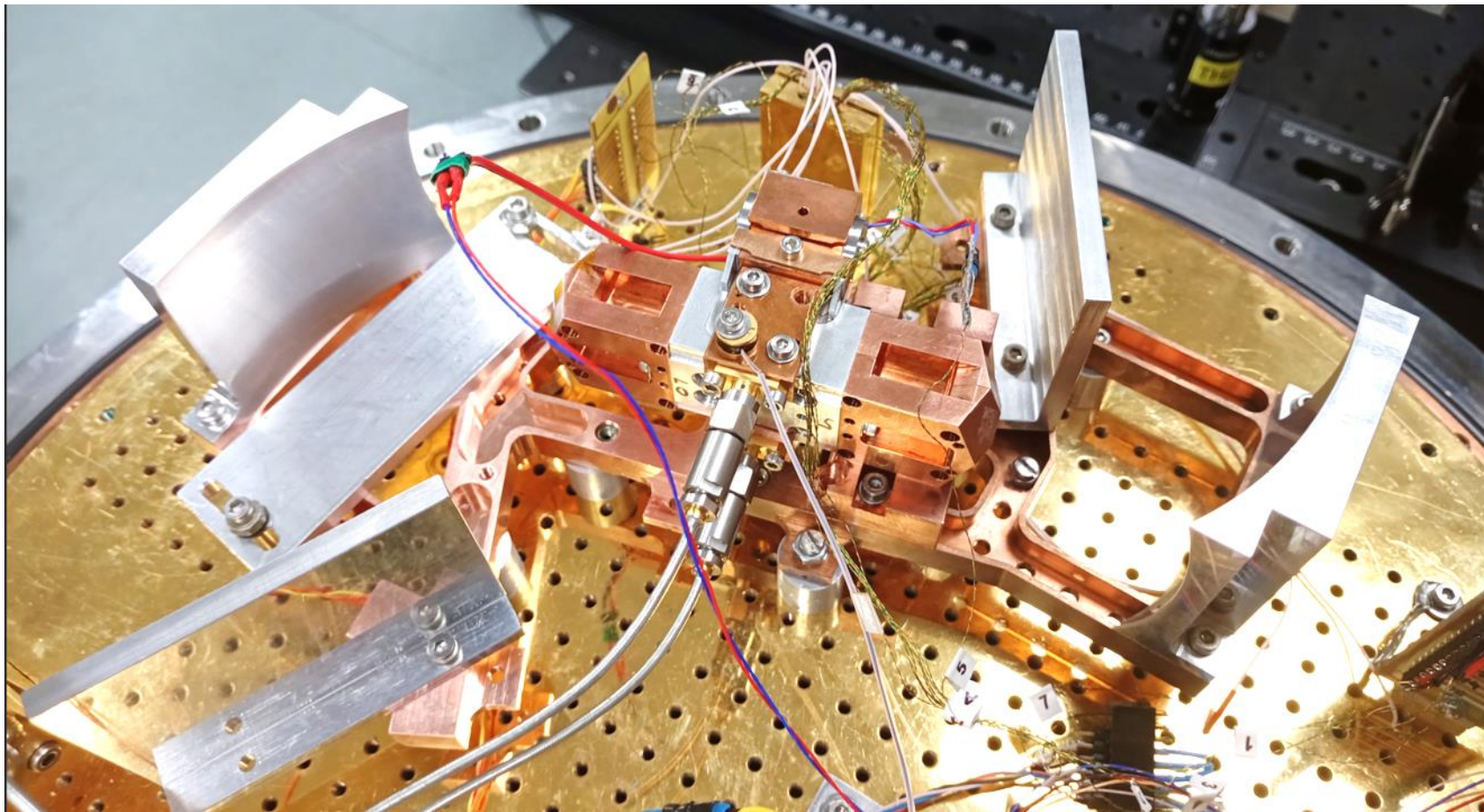


Блок для измерения
волноводной нагрузки



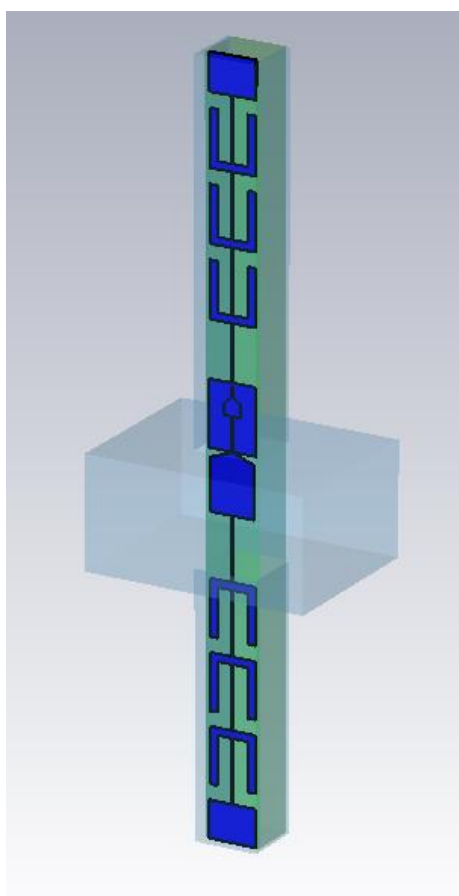
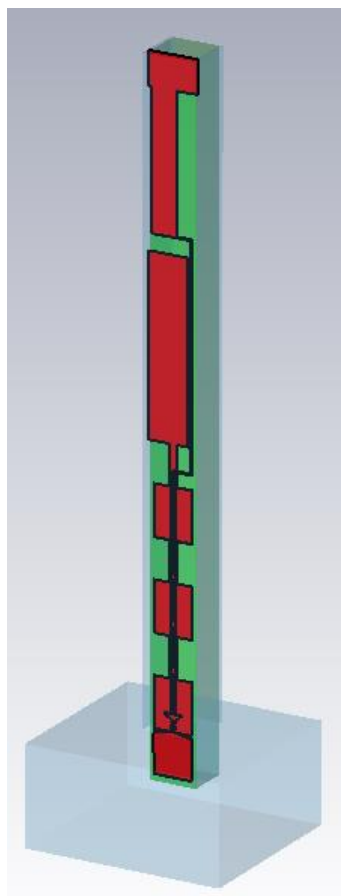
СИС смеситель с разделением боковых полос для диапазона 211-275 ГГц

- СИС смеситель с разделением боковых полос смонтирован в криостат
- Проведены предварительные испытания. Полное тестирование проходит сейчас.

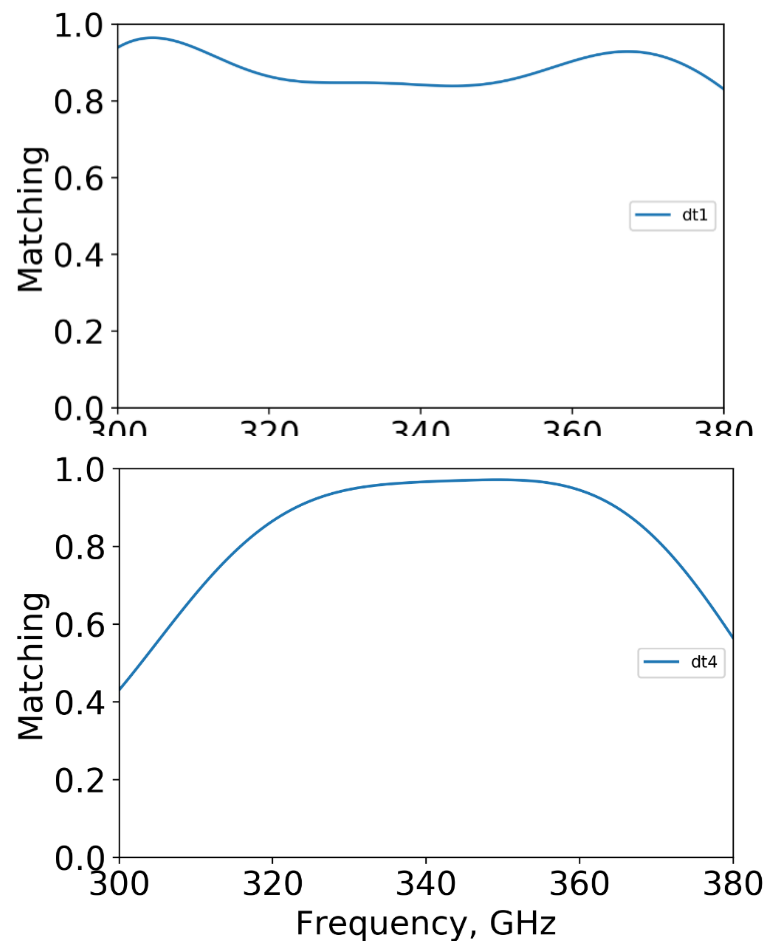


Смеситель на 345 ГГц

- Разработан дизайн
- Изготовление и первые испытания – 2025г.



СВЧ модель Nb согласующих линий



Расчетная амплитудно-частотная характеристика.

Смеситель на 345 ГГц

- Изготовлены подложки с микросхемами
- Спроектированы элементы смесителя

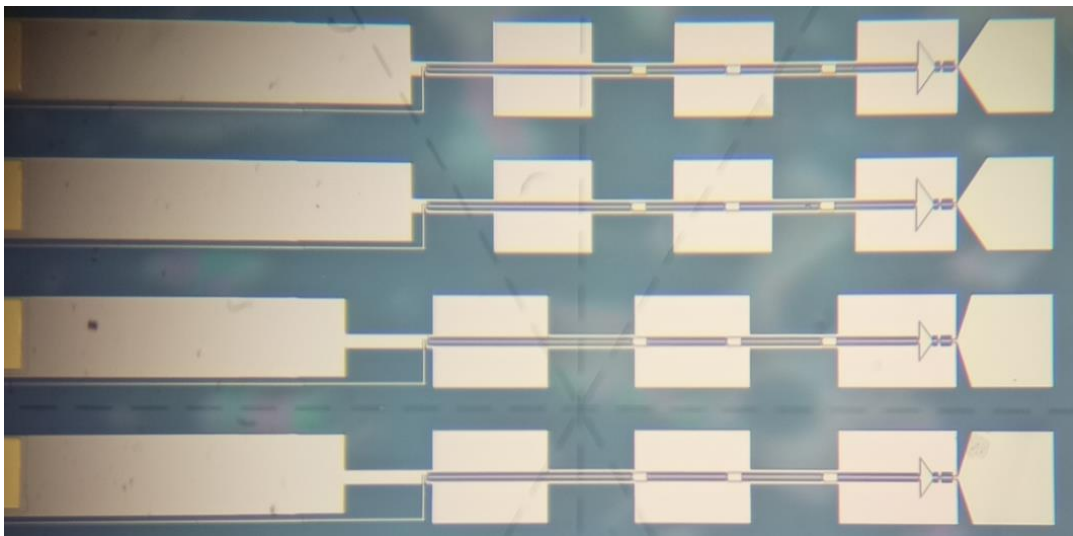
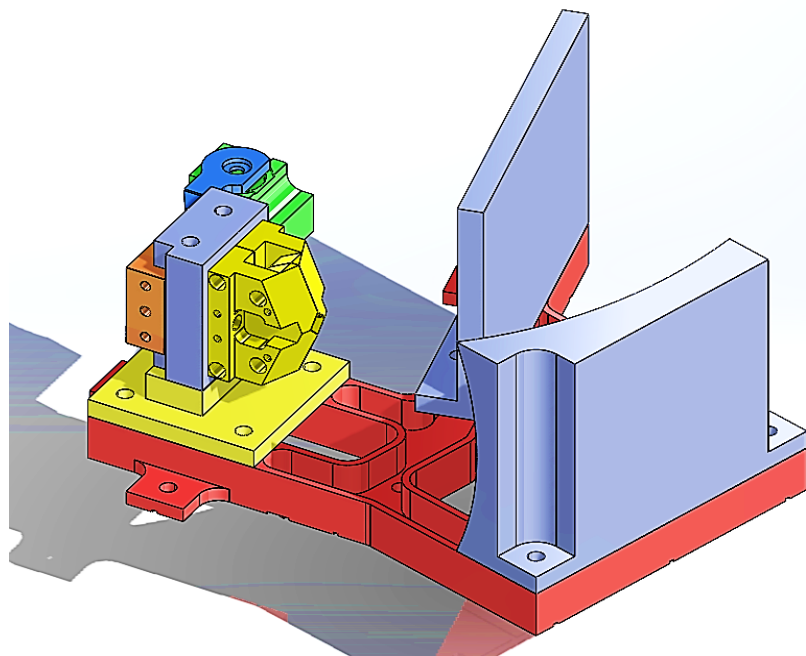


Фото Nb микросхем изготовленных чипов СИС-смесителей



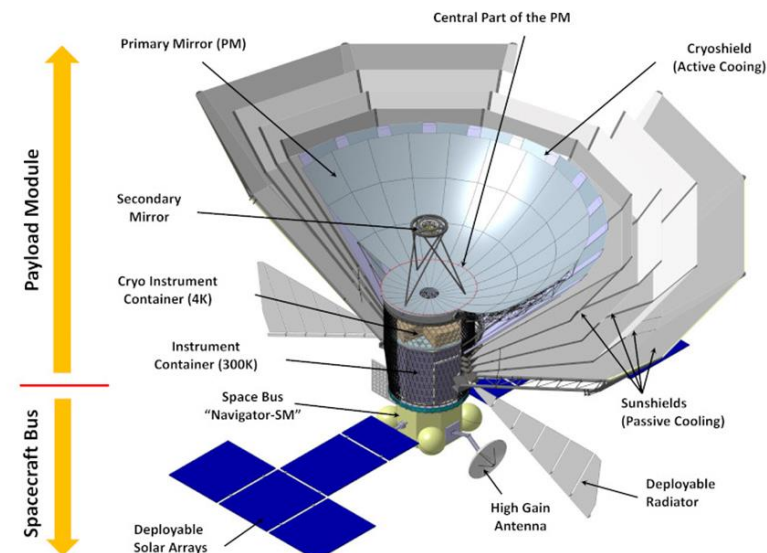
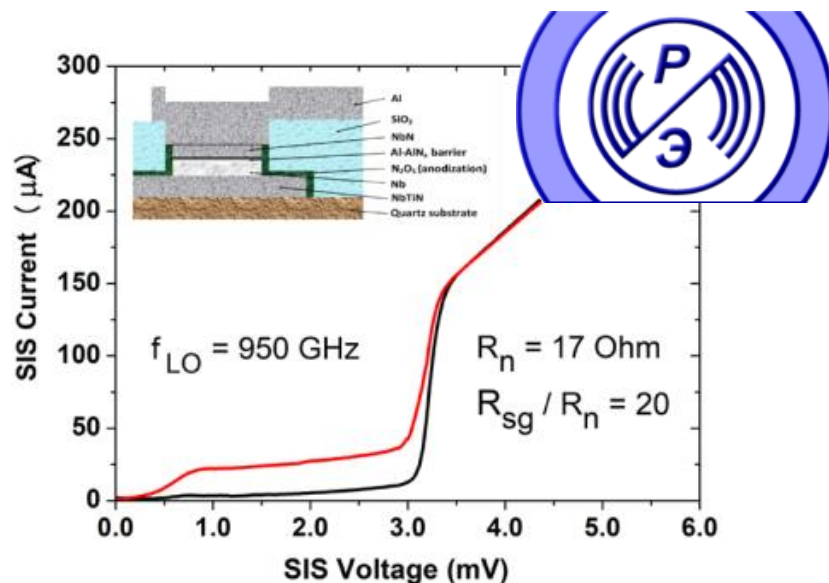
Модель смесителя в криостате

СИС-смесители для Спектрометра Высокого Разрешения

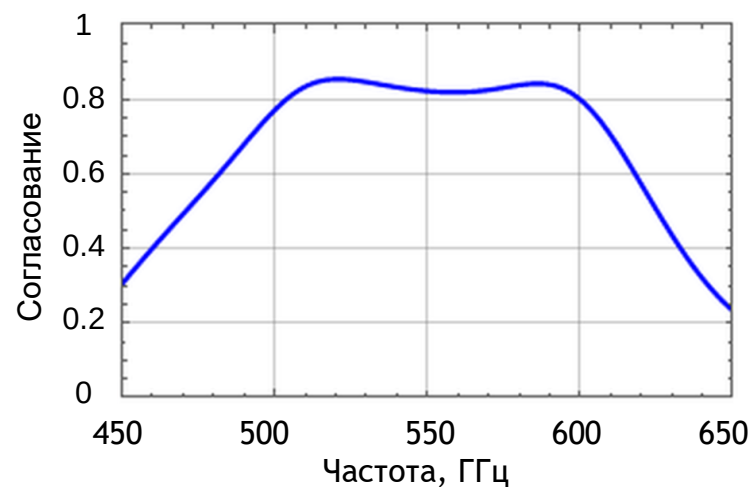
FREQUENCY RANGES AND MAIN PARAMETERS OF HRS INSTRUMENT RECEIVERS.

<i>Chanal</i>	<i>Band (GHz)</i>	<i>Pixel</i>	<i>Technology</i>	<i>T_n (K)</i>	<i>Res. (")</i>
<i>M1</i>	500–600	3	<i>SIS</i>	200	14
<i>M2</i>	740–900	3	<i>SIS</i>	400	9
<i>M3</i>	1080–1230	3	<i>SIS</i>	1000	7
<i>M4</i>	1300 – 1400	7	<i>HEB</i>	1000	6
<i>M5</i>	1890 – 1910	7	<i>HEB</i>	1200	4
<i>M6</i>	2390 – 2410	7	<i>HEB</i>	1400	3
<i>M7</i>	2660 – 2680	7	<i>HEB</i>	1400	3

Tretyakov et.al, IEEE TST, 2025
Kirsanova et.al, UFN, 2025

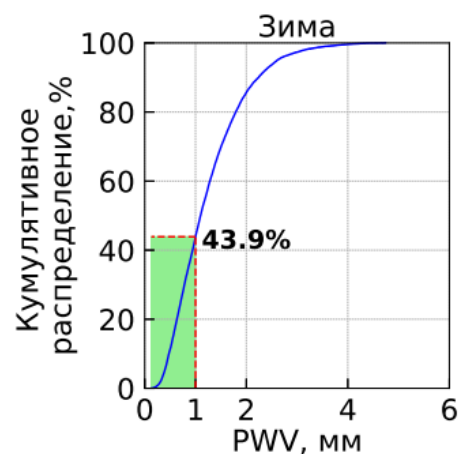


АЧХ предварительного дизайна
на диапазон 500-600 ГГц

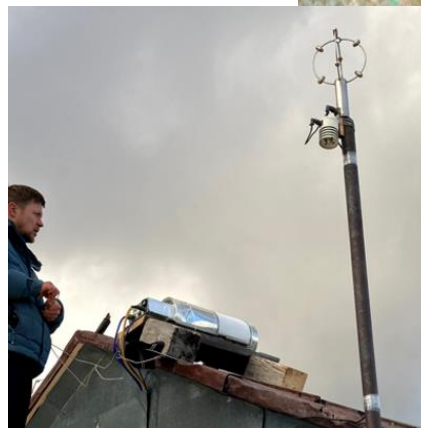
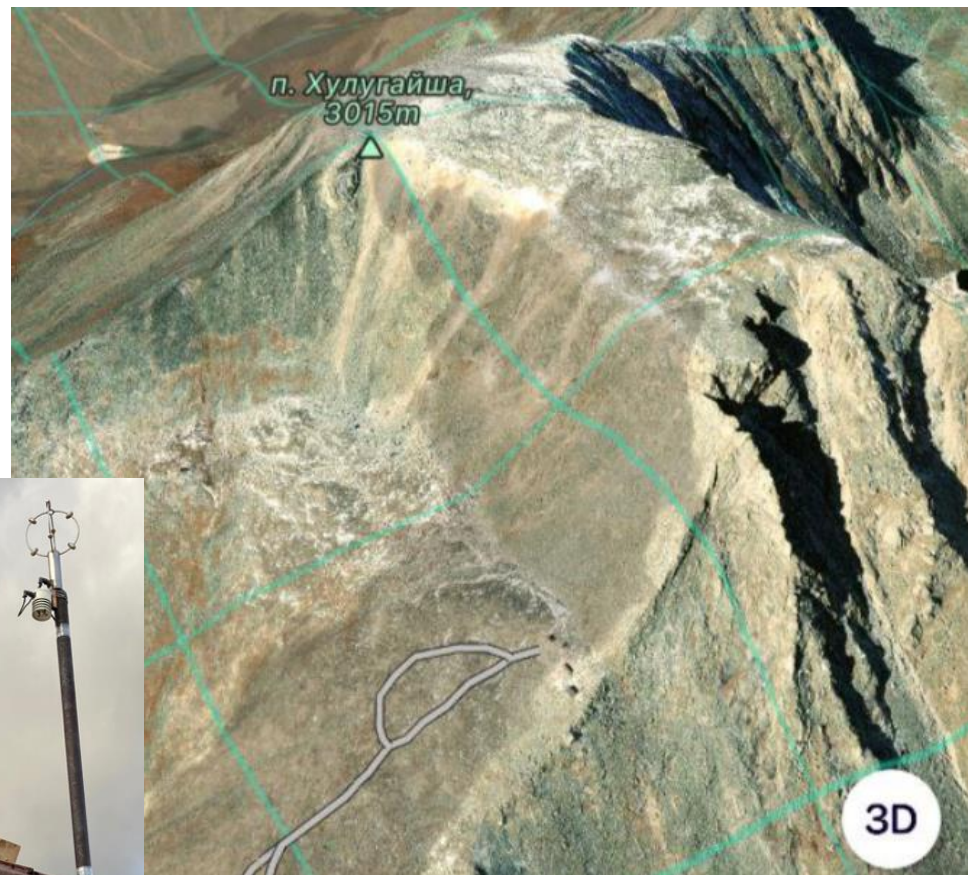


Перспективное плато в Восточных Саянах

- Высота – 3000м – хорошо!
- Размер плато (до 700х400м) !
- Прозрачность – перспективно...!
- Инфраструктура – есть база ИСЗФ на 2800м
- Дорога – тягач, нужно улучшение



Хабарова и др. 2024 (accepted)



Заключение:

- Разработка СИС-приемника для диапазона 211-275 ГГц для обсерватории «Миллиметрон» и для применения на наземных телескопах находится на завершающем этапе.
- Спроектированы СИС-смесители на 300-373 ГГц. Идет изготовление.
- Инициированы работы по проектированию СИС-смесителей для диапазона 500-600 ГГц

Спасибо за внимание!