

Детекторы RFTES: статус разработки для радиоастрономии

3-я Международная конференция "Субмиллиметровая и миллиметровая
астрономия: цели и инструменты"

Докладчик: Шитов Сергей Витальевич

Д.ф.-м.н.
Заведующий лаборатории Криоэлектронных систем НИТУ МИСИС

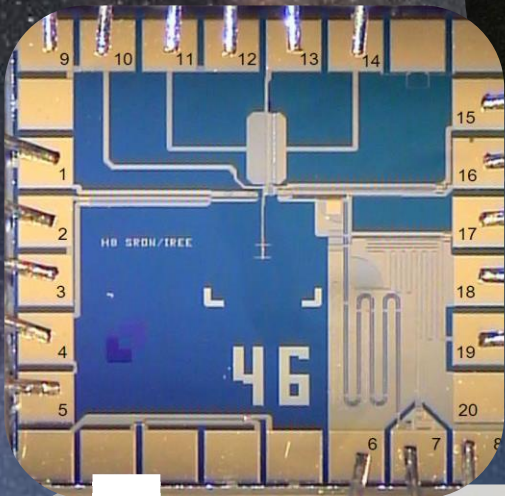
15 апреля 2025 г.



30 лет разработки детекторов ALMA / SISIRT

ГЕЛИЕВЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

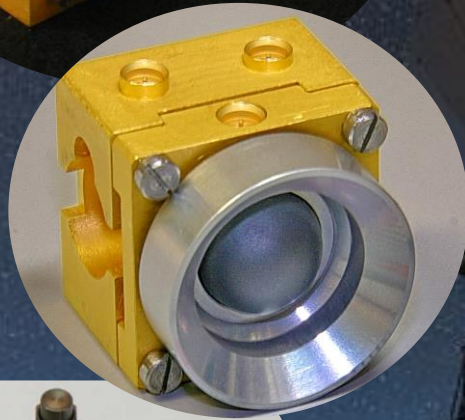
интегральные схемы



Волноводы

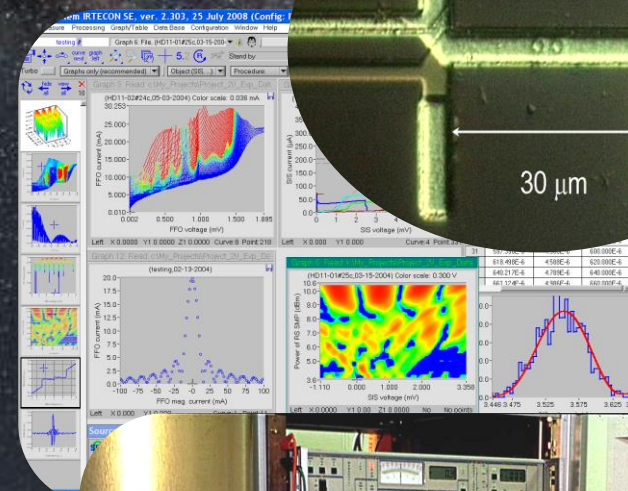
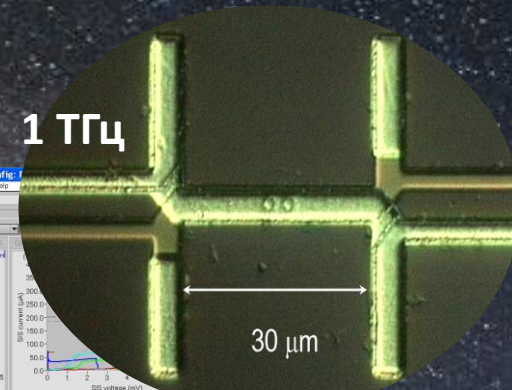


150 ГГц



Квазиоптика

1 ТГц



ЦИФ

матрица

500 ГГц



телескоп

данные



План доклада

Введение.

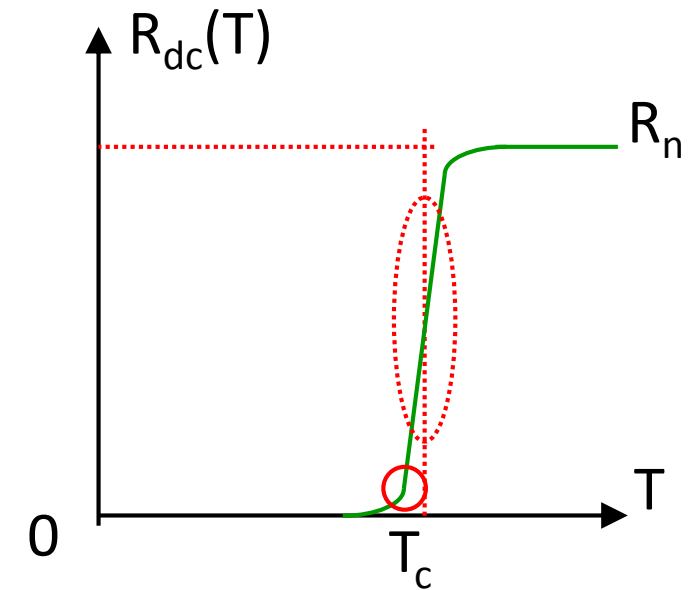
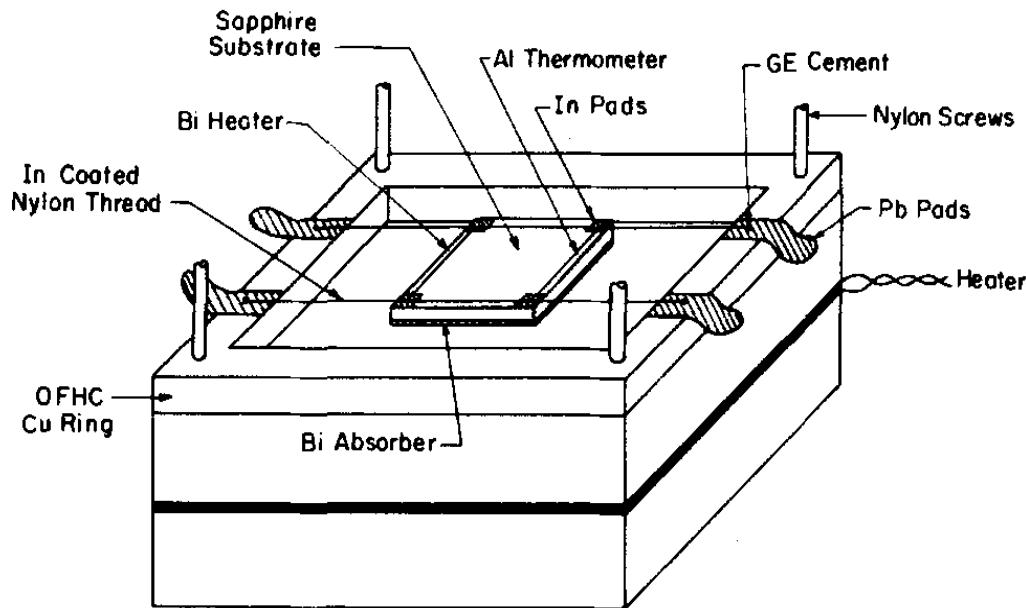
Краткая история разработки ТГц сверхпроводящих прямых детекторов в ИРЭ

- Сверхпроводящие прямые детекторы при сверхнизких температурах
- Идея RFTES и сравнение с известными детекторами
- Особенности частотного мультиплексирования массива RFTES
- Применимость модели электронного газа в пленках гафния
- Нелинейный СВЧ импеданс пленки при малой энергии спаривания
- Методы измерения собственного шума и быстродействия
- Сравнение RFTES и MKID при одной физической температуре
- Усиление в режиме кинетической нелинейности
- Новые схемотехнические решения с использованием RFTES детекторов

Выводы.

1977. Композитный TES болометр: площадной абсорбер и пленочный термометр (1975-1977)

Детектор на краю сверхпроводящего перехода (Transition Edge Sensor, TES detector)



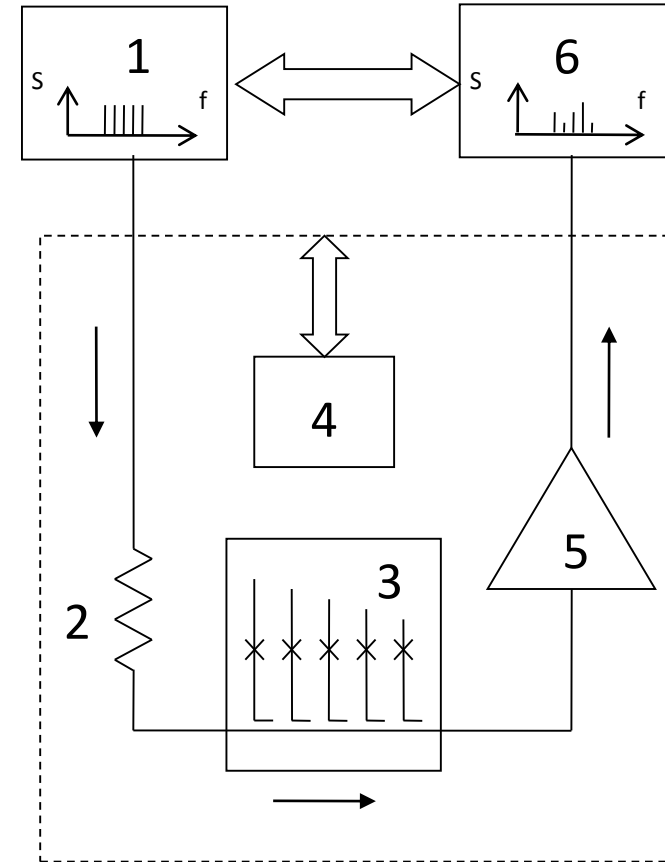
J. Clarke; P. L. Richards; N.-H. Yeh
Appl. Phys. Lett. 30, 664–666 (1977)
<https://doi.org/10.1063/1.89278>

$$NEP = \sqrt{4k_B T^2 G}$$

Частотное разделение каналов (FDM): уникальная частота каждому пикселю

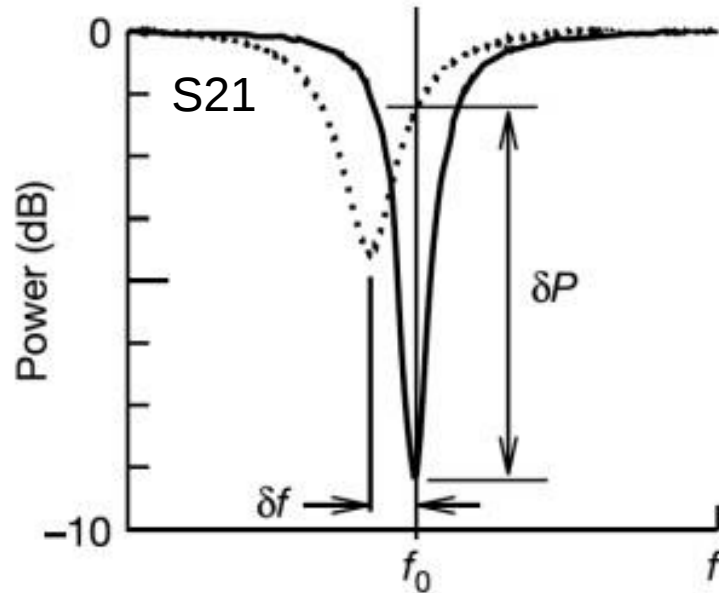
Минимизация передачи тепла
по единственной паре проводов или
под одному общему коаксиалу

1. Гребенчатый спектр смещения
2. Холодный attenuator 30 дБ подавляет шумовой фон 300 К
3. Массив резонаторов с уникальными частотами
4. Криостат растворения 50-500 мК
5. Малошумящий охлаждаемый усилитель
6. Регистрирующая система

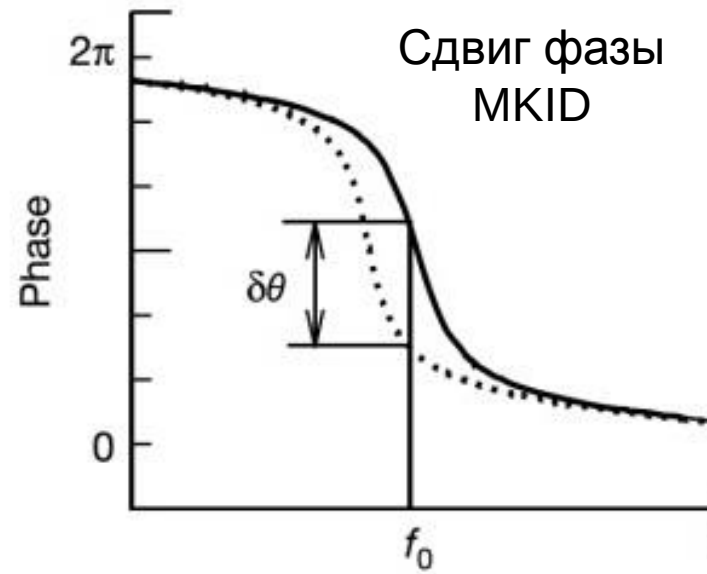


2003. Отклик кинетической индуктивности в MKID

Амплитудный и фазовый отклик сверхпроводящего резонатора



(a)



(b)

P.K. Day, H.G. LeDuc, B.A. Mazin, A. Vayonakis and J. Zmuidzinas. Nature, 425, 817 (2003).

- Фазовый шум
- Ограничение по частоте снизу

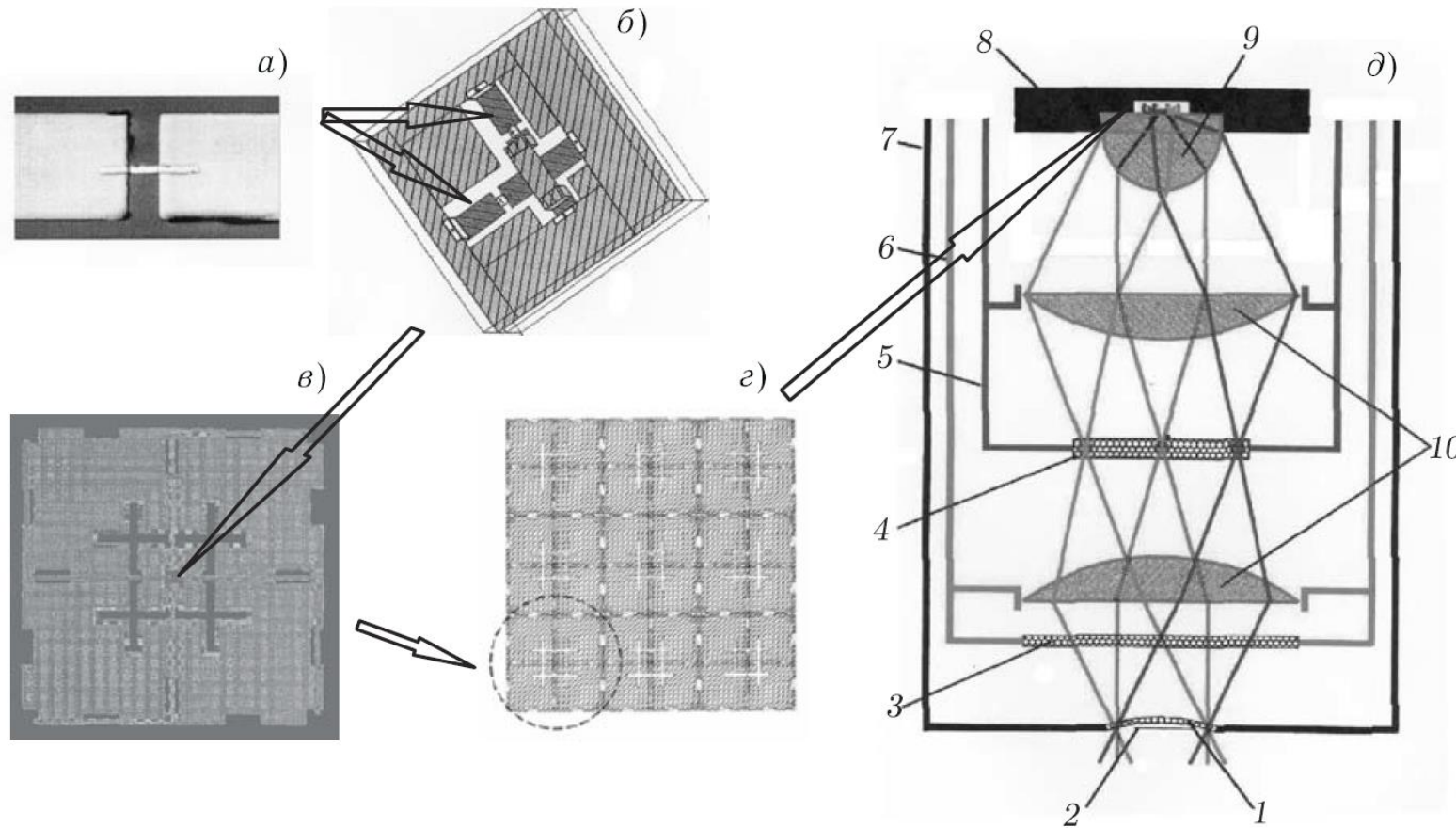
- ТГц фотоны разрушают сверхпроводящие носители, и меньшее число куперовских пар вынуждены поддерживать СВЧ ток резонатора – проявляется инерция (индуктивность)
- MKID требует настройки частоты или мощности на заданную частоту

2007. Изображающая матрица по методу проекций

Том L, № 10–11

Известия вузов. Радиофизика

2007



- Микромостик Ti
- Двухщелевая скрещенная антенна
- Квадратная матрица
- Многолучевая линзовая антенна с одной иммерсионной линзой

Рис. 2. Конструкция приёмной антенной матрицы и оптической схемы, согласующей выход телескопа с матрицей радиометра: (а) болометр с поглотителем микронных/субмикронных размеров

2007. Схема построчной селекции

2007

Известия вузов. Радиофизика

Том L, № 10–11

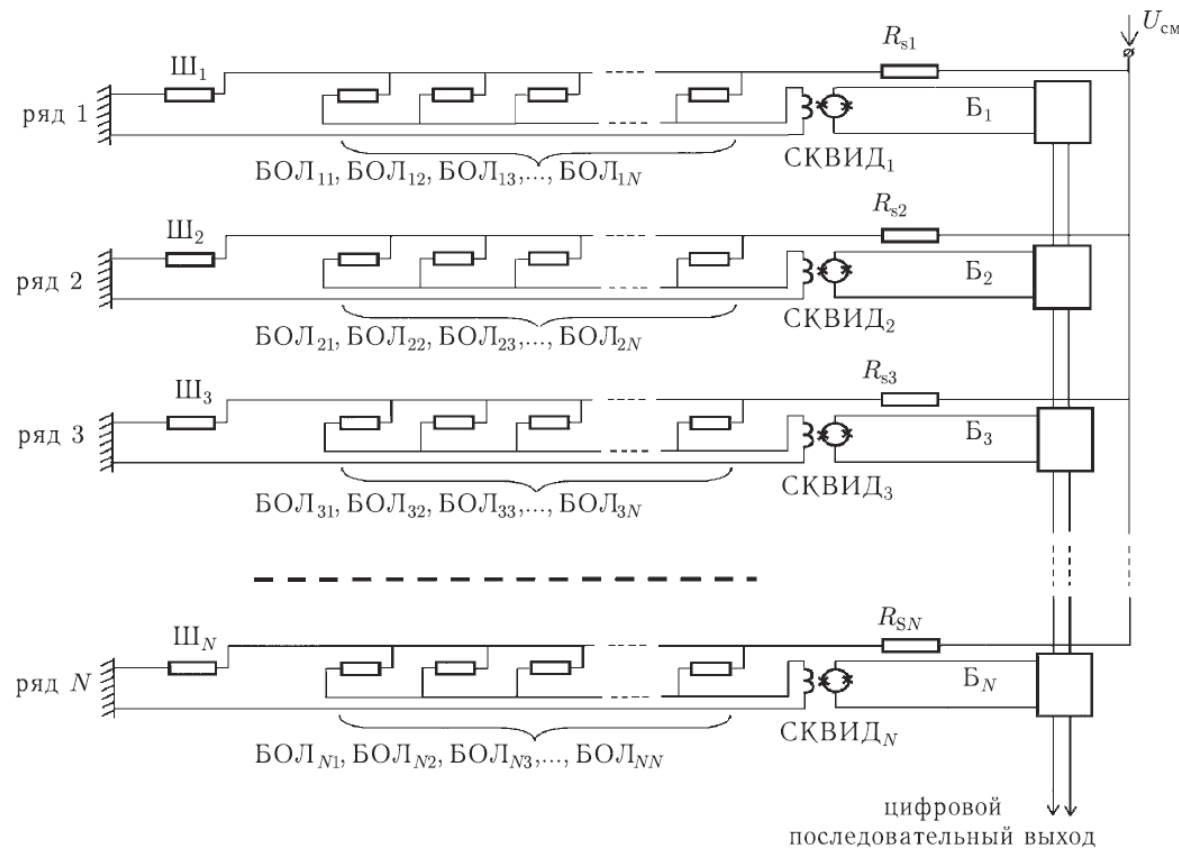


Рис. 3. Включение болометров в схему мультиплексирования: БОЛ_{in} — i -й болометр в n -м ряду, СКВИД_n — СКВИД-усилитель n -го ряда, Π_n и R_{sn} — шунтирующее и балластное сопротивления n -го ряда, U_{cm} — напряжение смещения, Б_n — блок формирования цифровой последовательности n -го ряда

- Конструктив: N болометров в каждом ряду включены в параллель, суммируя сигнал
- Усиление: каждый ряд имеет свой сквид-усилитель (N сквидов)
- Селекция: межканальный мультиплексер – нет частотной селекции
- Анализ: математическая обработка – решение некорректной интегральной задачи

2009. Диаграмма многолучевой линзовой антенны 5x5

Integrated Immersion Lens Antennas for Millimeter and Submillimeter Wave Array Detectors

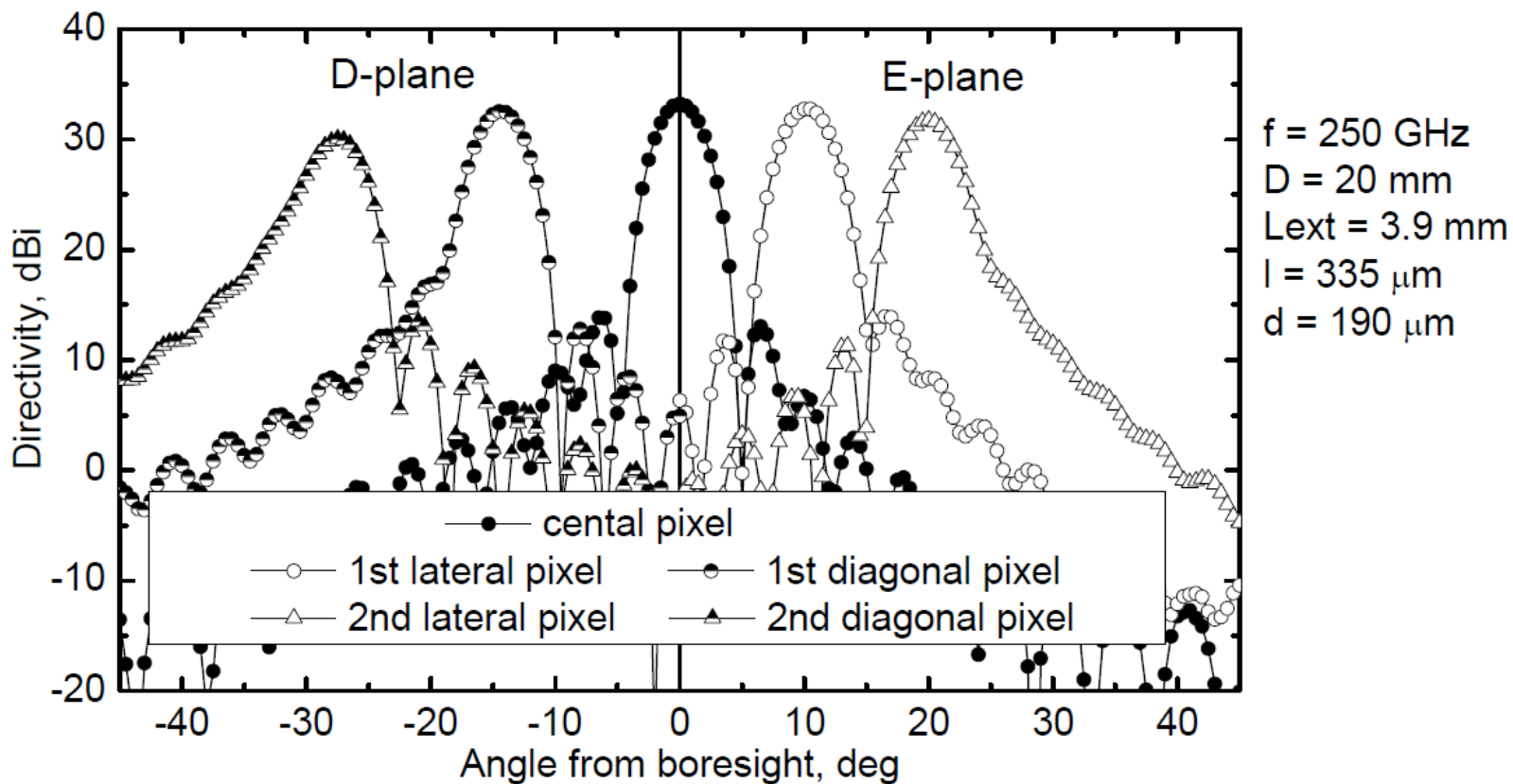
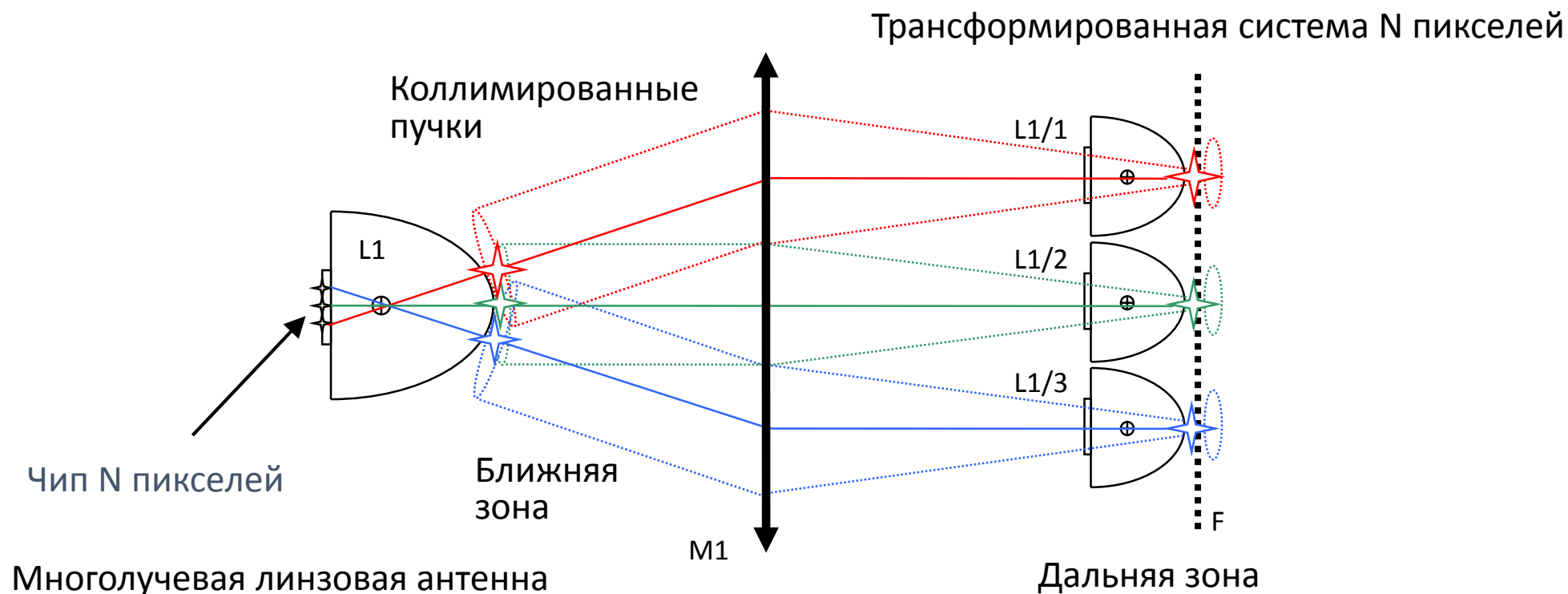


Fig. 3. Beam pattern of 5x5 array elements in two planes: E-plane and D-plane (D means diagonal).

2019. Схема оптического «трансформатора» многолучевой ИЛА в планарную матрицу



Мультиплексирование вращением линейной матрицы

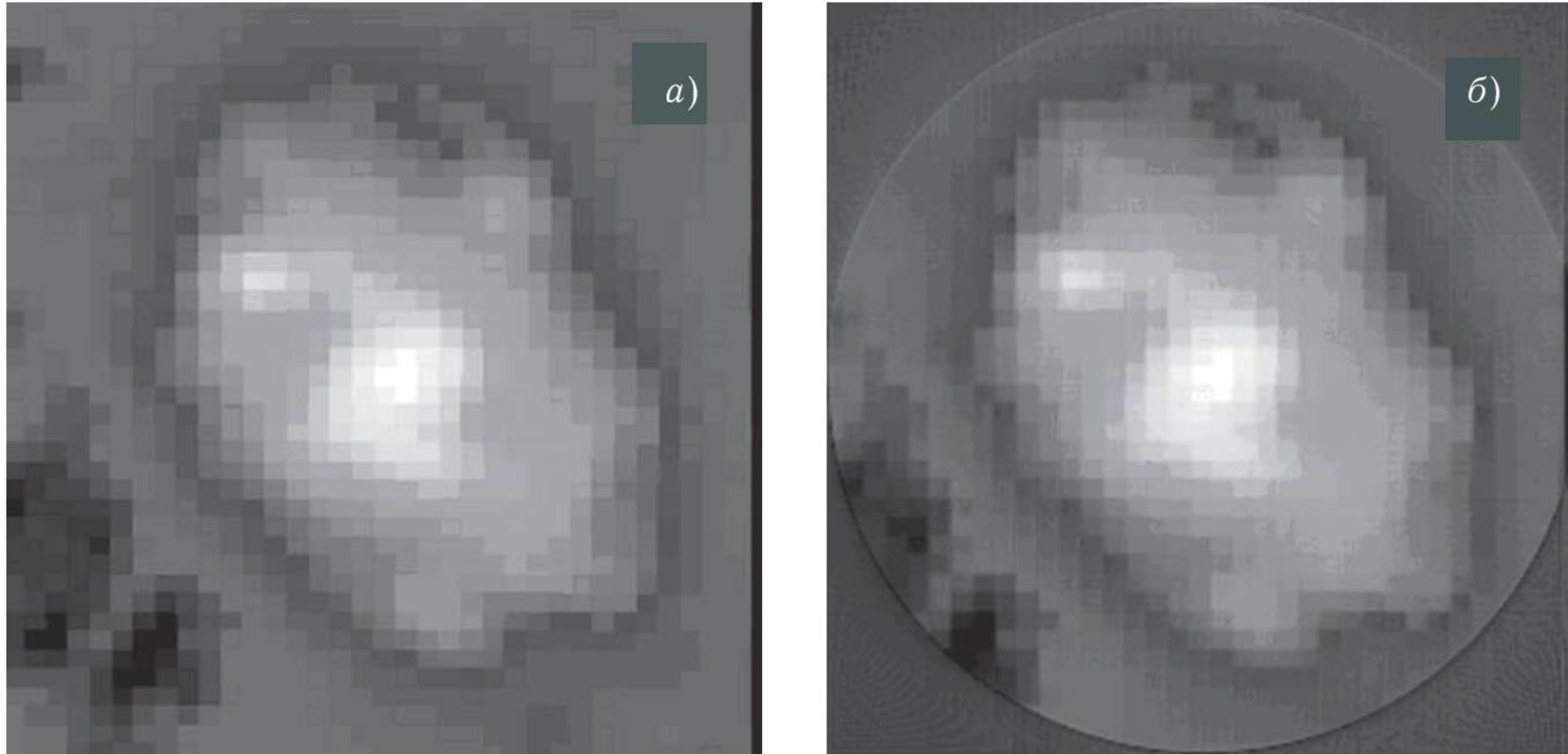


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования работы схемы мультиплексирования сигналов по методу проекций

А. Н. Выставкин, С. В. Шитов, С. Е. Банков и др.

Оригинальная обработка сигнала

Набор технических проблем

- Невозможно исключить или скорректировать неисправный пиксель
- Механическая система вращения изображения (к-зеркало)
- Деликатные сквид-усилители со сложной электроникой
- Высокопроизводительная вычислительная система
- Трудности масштабирования многолучевой матрицы

Схема частотной селекции RFTES пикселей

2007

Известия вузов. Радиофизика

Том L, № 10–11

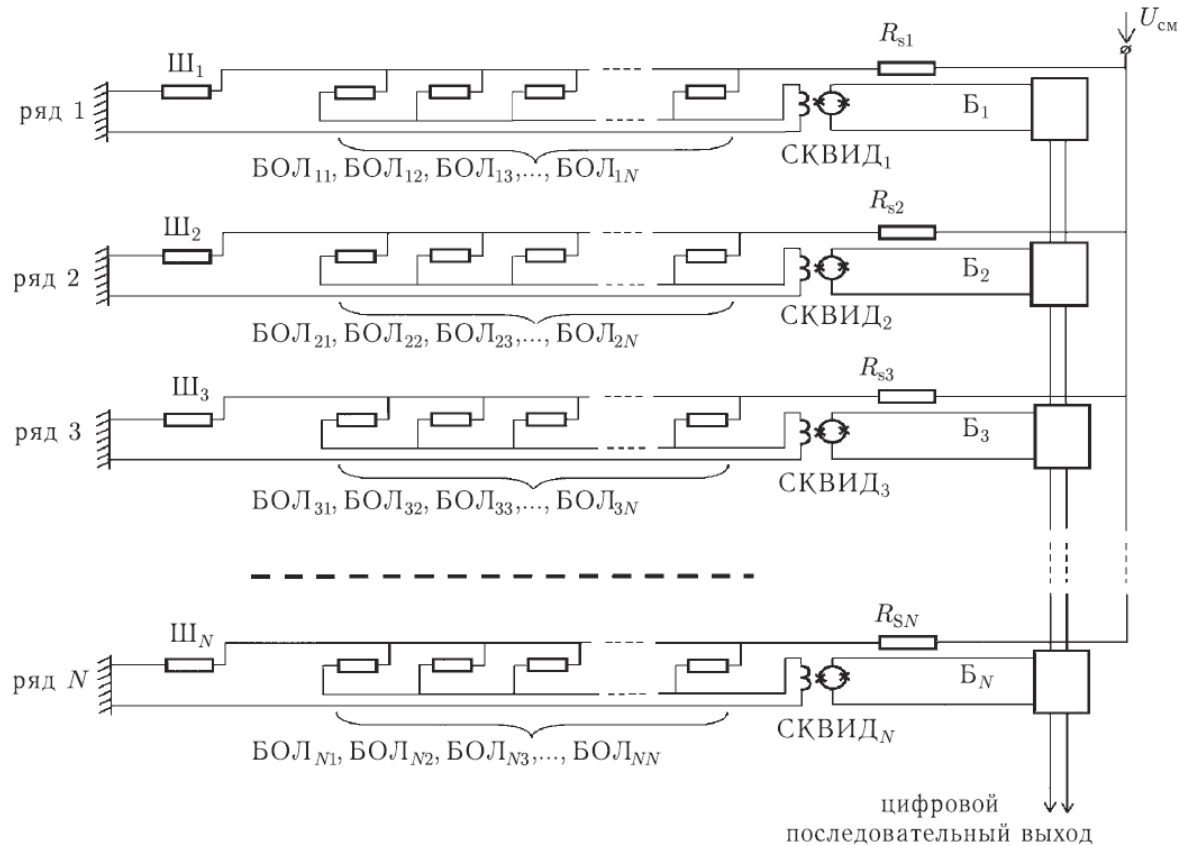


Рис. 3. Включение болометров в схему мультиплексирования: БОЛ_{in} — i -й болометр в n -м ряду, СКВИД $_n$ — СКВИД-усилитель n -го ряда, Π_n и R_{sn} — шунтирующее и балластное сопротивления n -го ряда, $U_{\text{см}}$ — напряжение смещения, Б_n — блок формирования цифровой последовательности n -го ряда

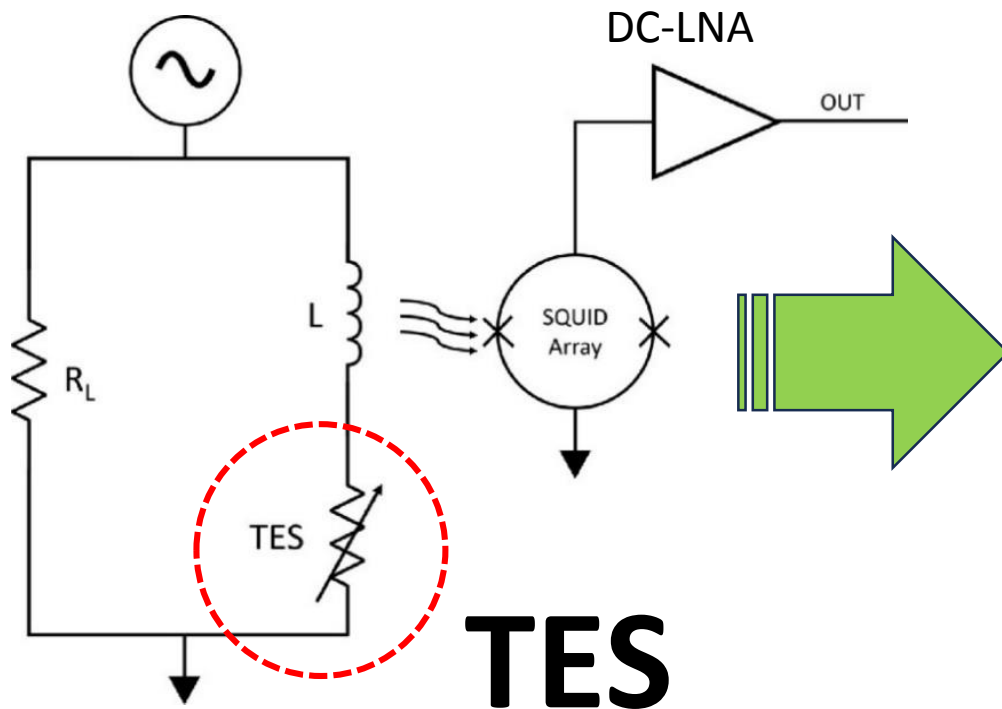
- Конструктив: $N \times N$ независимых болометров включены в одну общую линию СВЧ
- Усиление: единственный СВЧ полупроводниковый усилитель
- Селекция: частотная
селекция всех пикселей —
спектральный анализ
- Анализ: прямое чтение
данных спектрального
анализа

2011. Идея: измерение TES на СВЧ вместо ПОСТОЯННОГО ТОКА

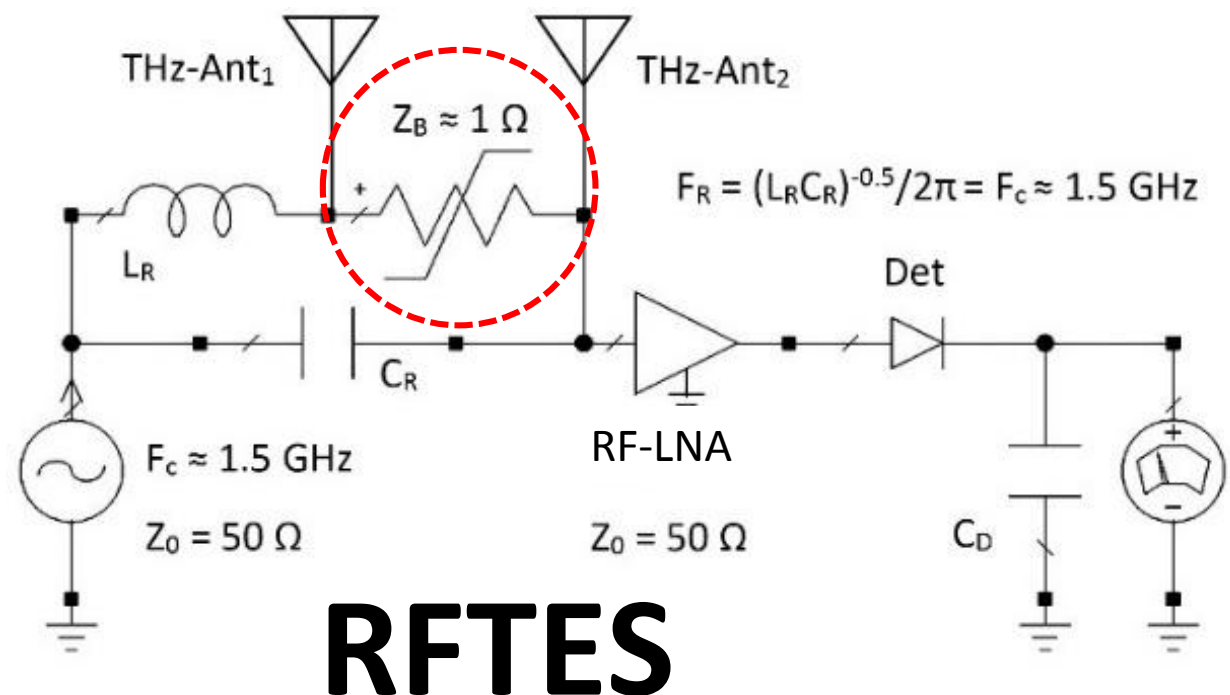
С. В. Шитов. Письма в ЖТФ, 37, 19. 88 (2011)

Уход от низкочастотных помех и сквид-усилителя

– несравнимо более простая, стабильная и помехозащищенная схема



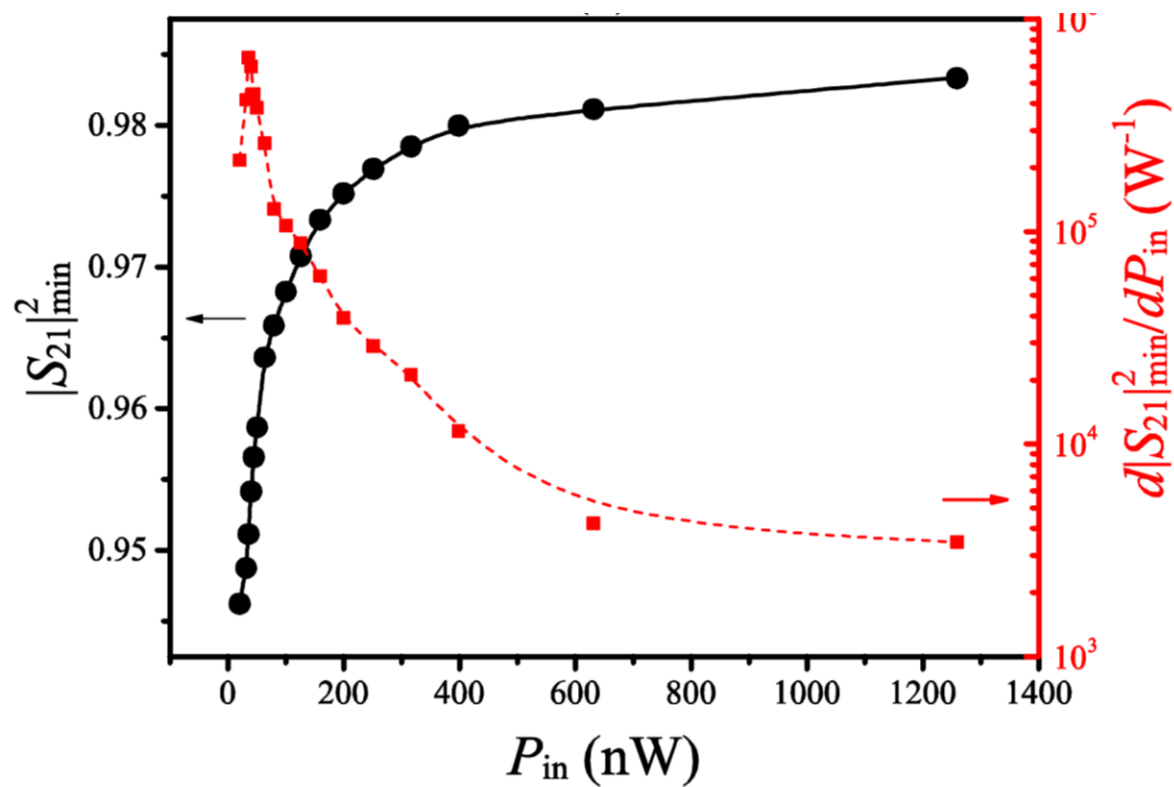
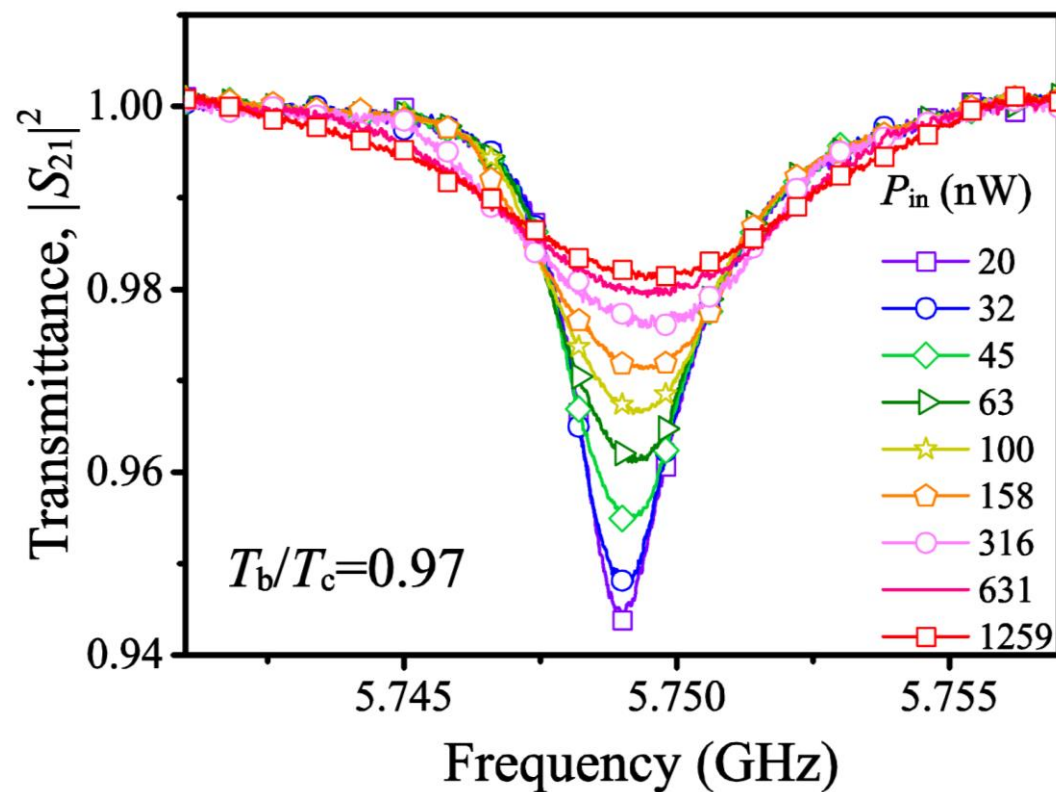
TES



RFTES

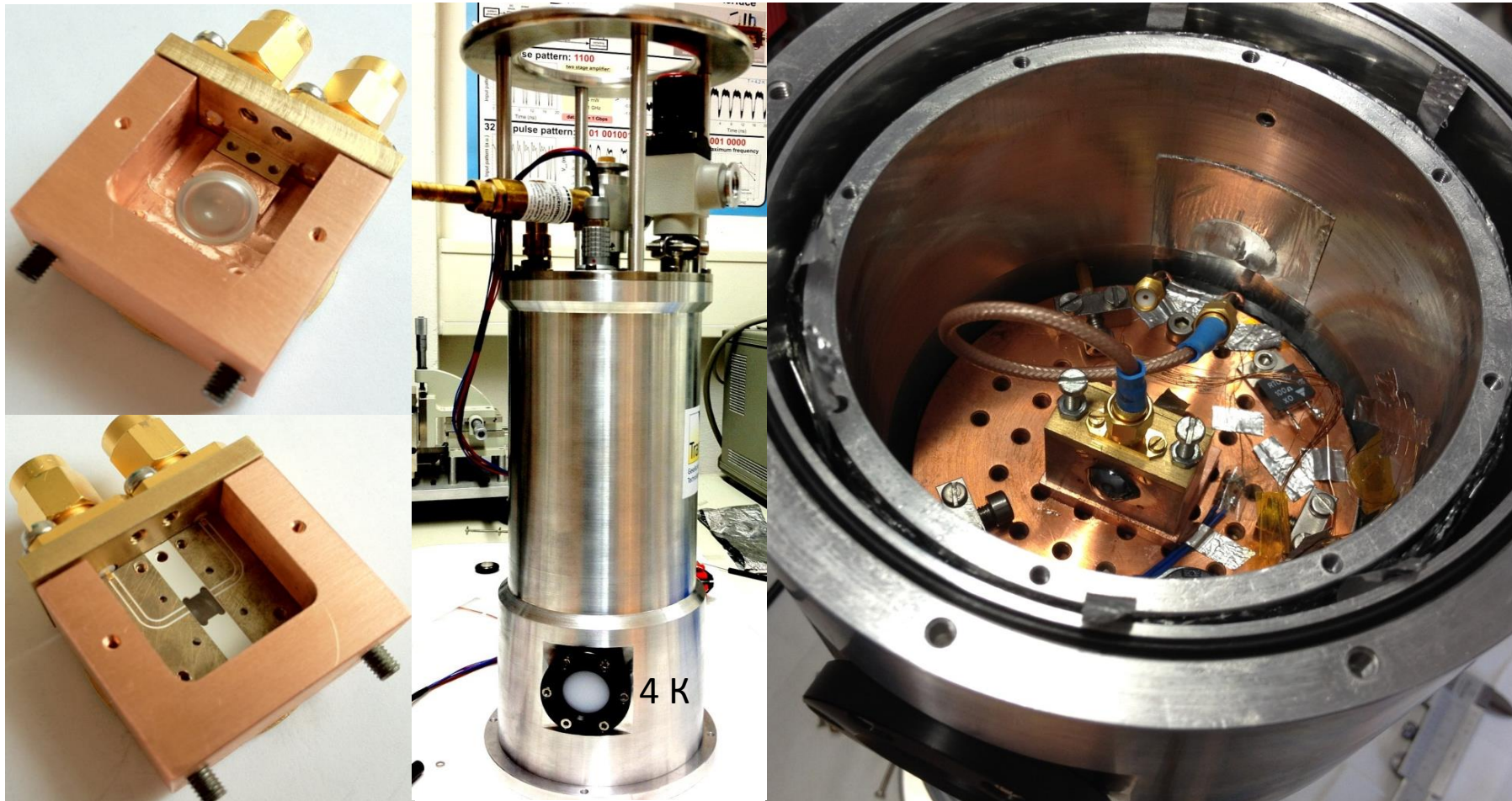
2013. Первые образцы RFTES, отработка режимов

All-Nb structure $F_0 = 5.7$ GHz $T = 4,5$ K



2013. Optical measurements setup / KIT (Germany)

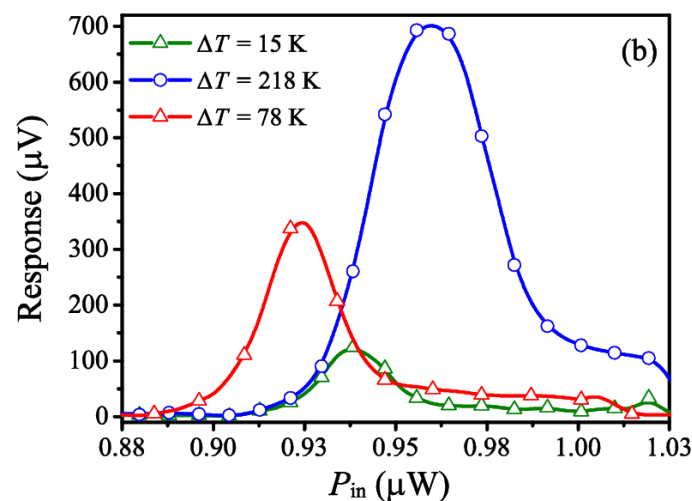
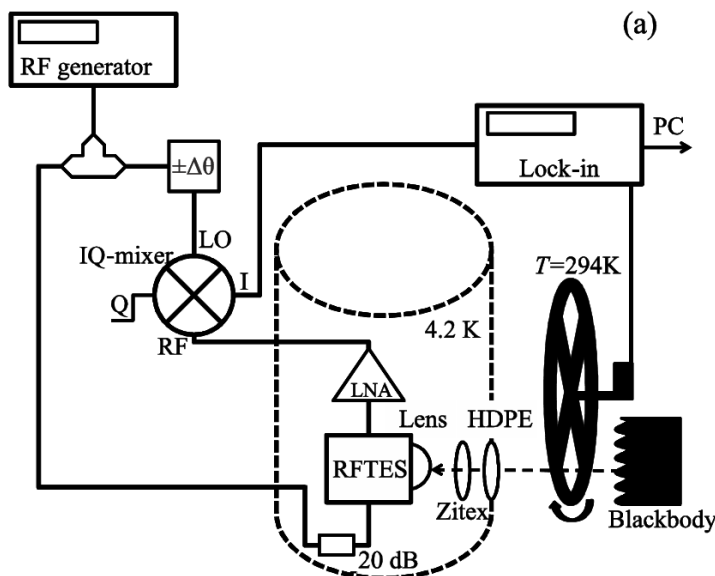
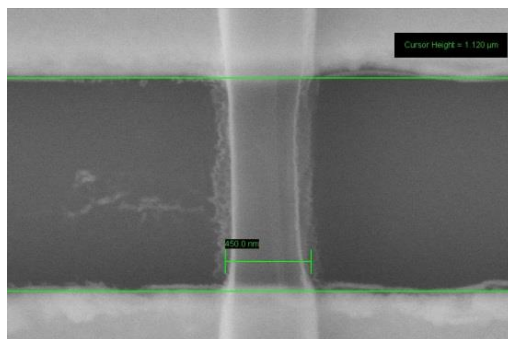
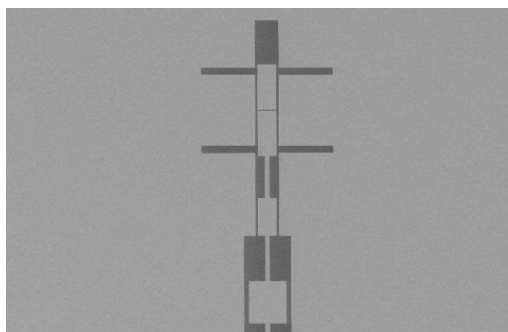
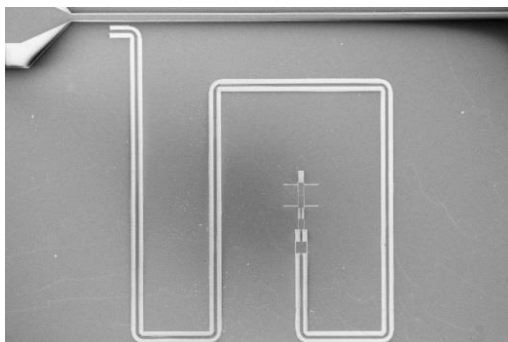
Signal 600-700 GHz / Reading 5.7 GHz



First optical experiment with RF-TES in LHe (4.5K)

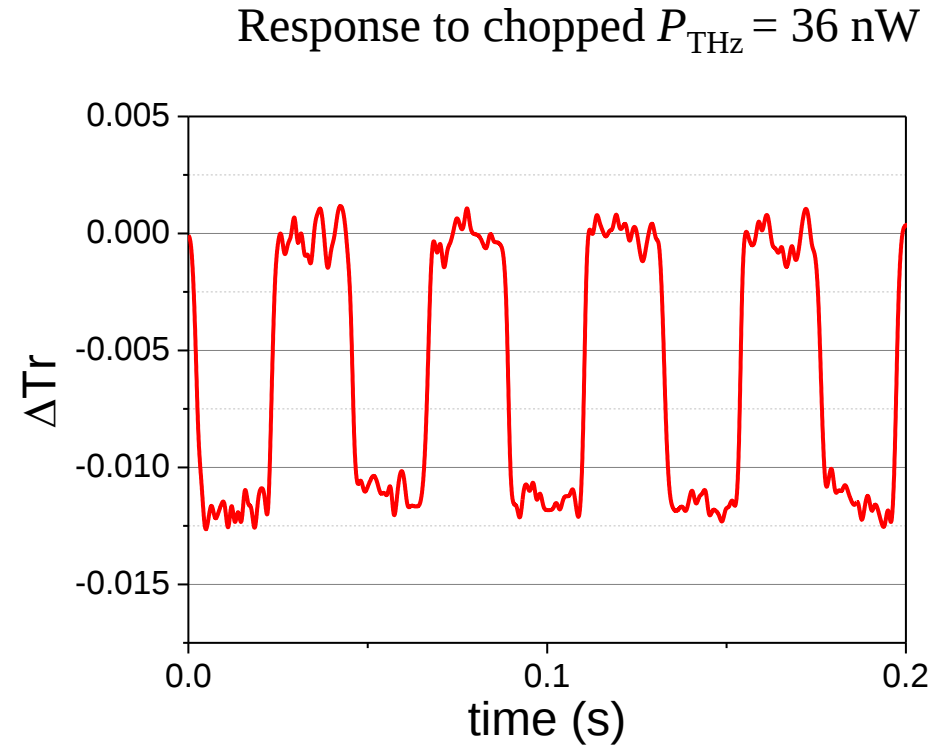
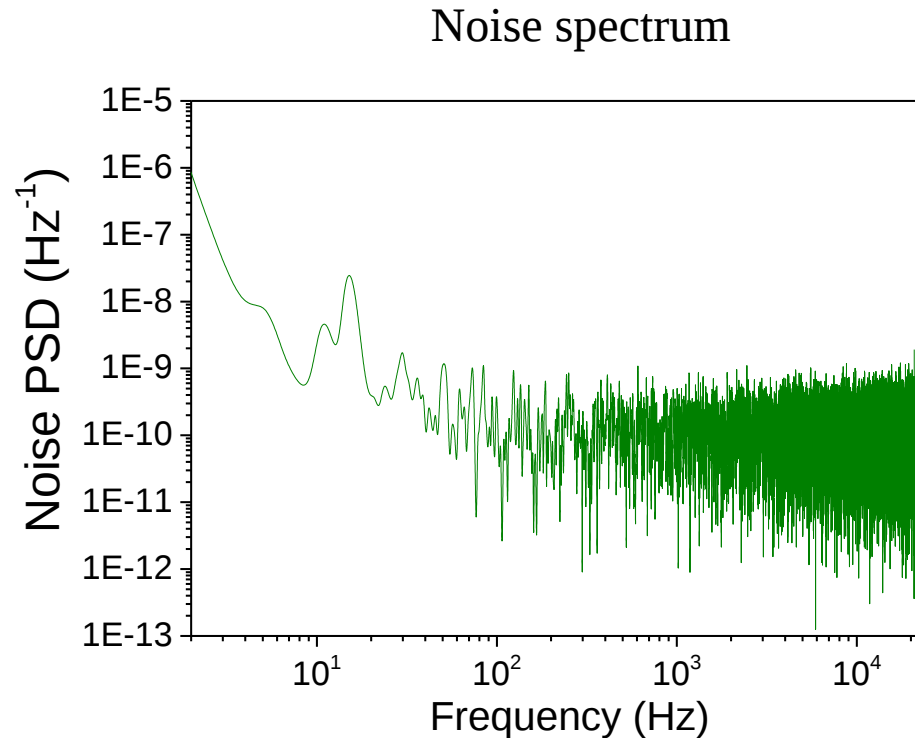
13.11.2013

KIT, Germany



All-Nb structure
 $F_0 = 5.7$ GHz

2013. Experimental data by Artyom Kuzmin / KIT



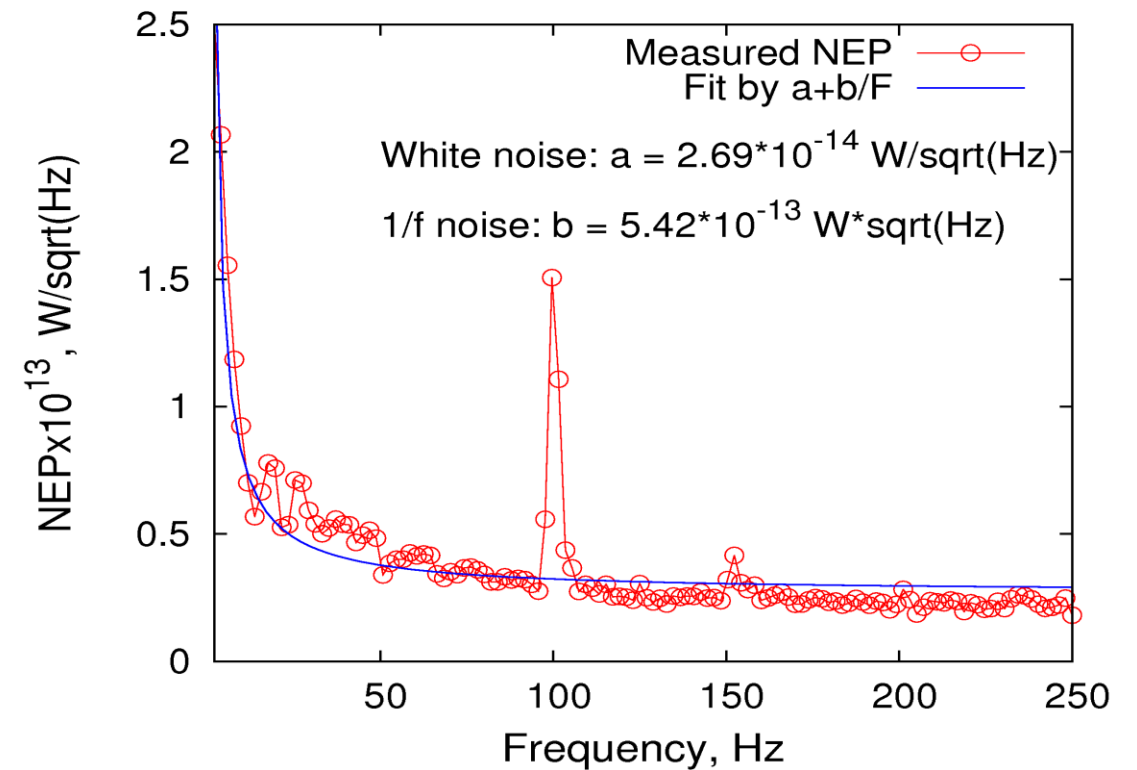
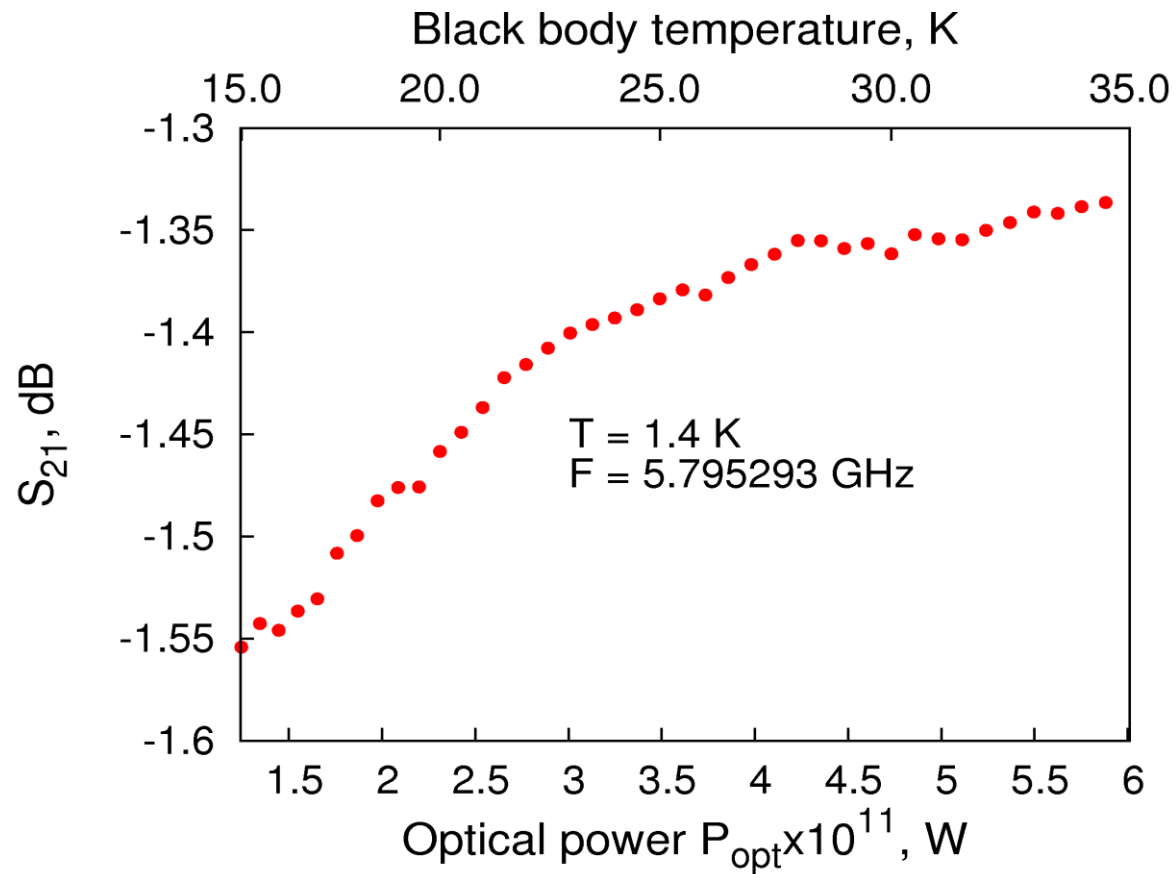
$$\eta = P_{\text{abs}}/P_{\text{THz}} \sim 5 \%$$

$$\text{Internal NEP}_{\text{int}} \approx 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$$

2014. Испытания RFTES при температуре 1,4 K

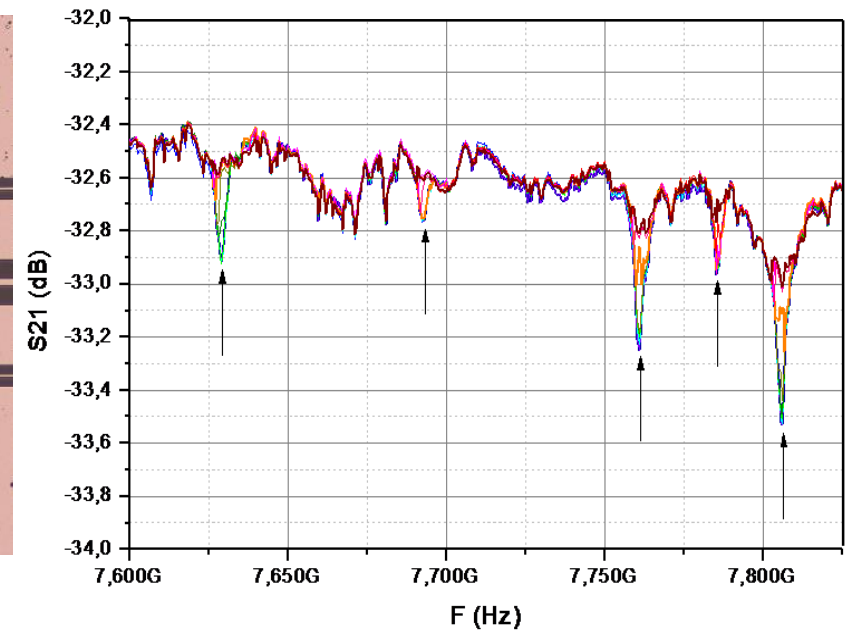
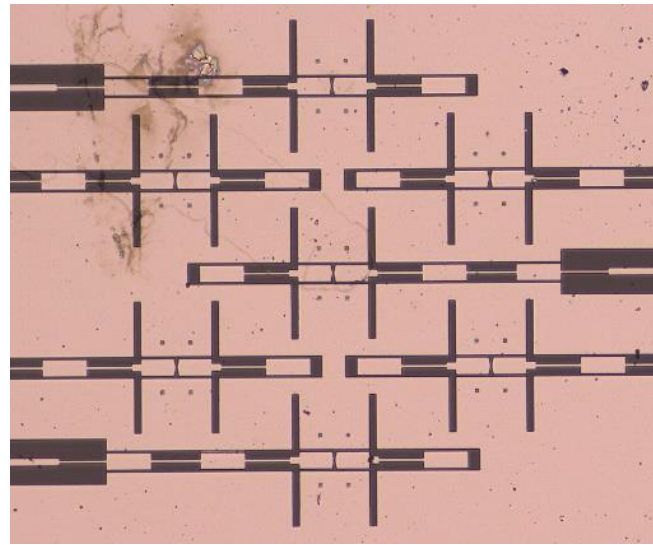
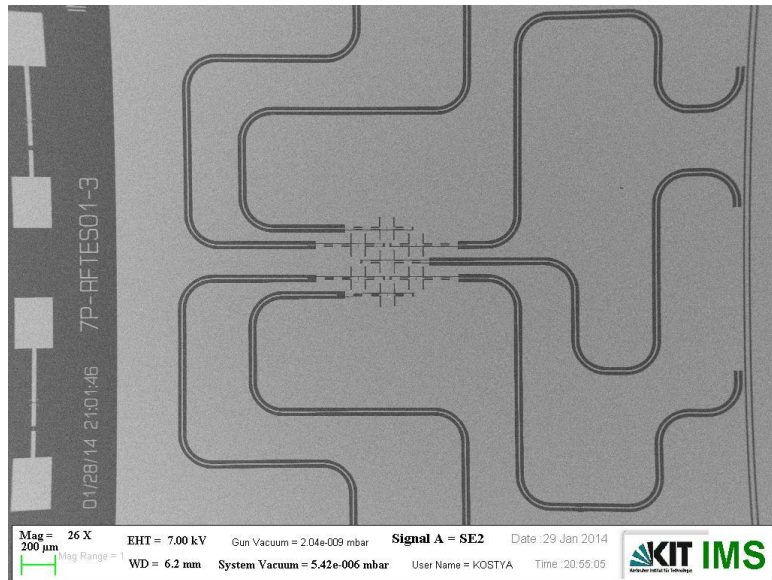
(Н. Абрамов / МИСИС)

All-Nb structure $F_0 = 5.7$ GHz

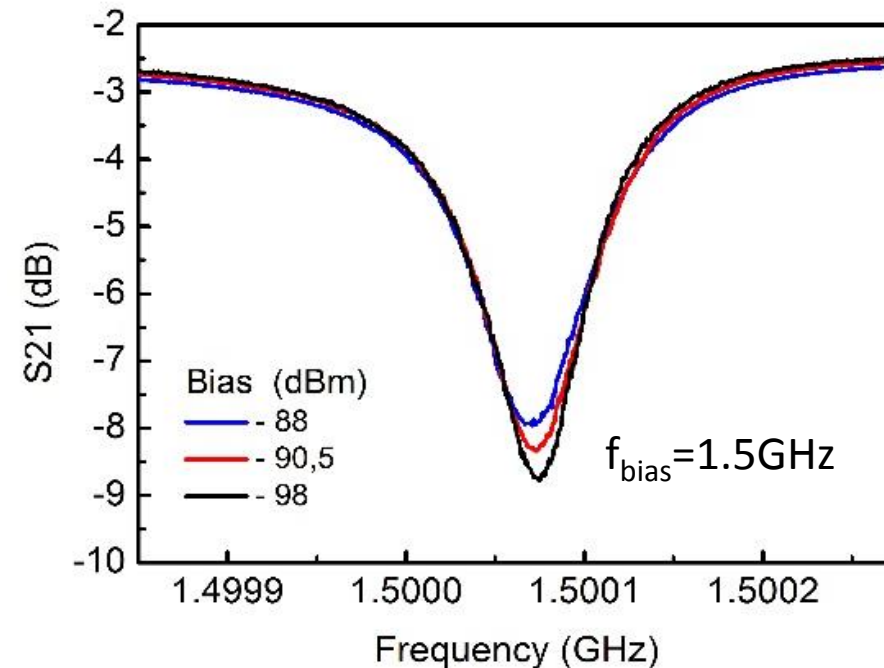
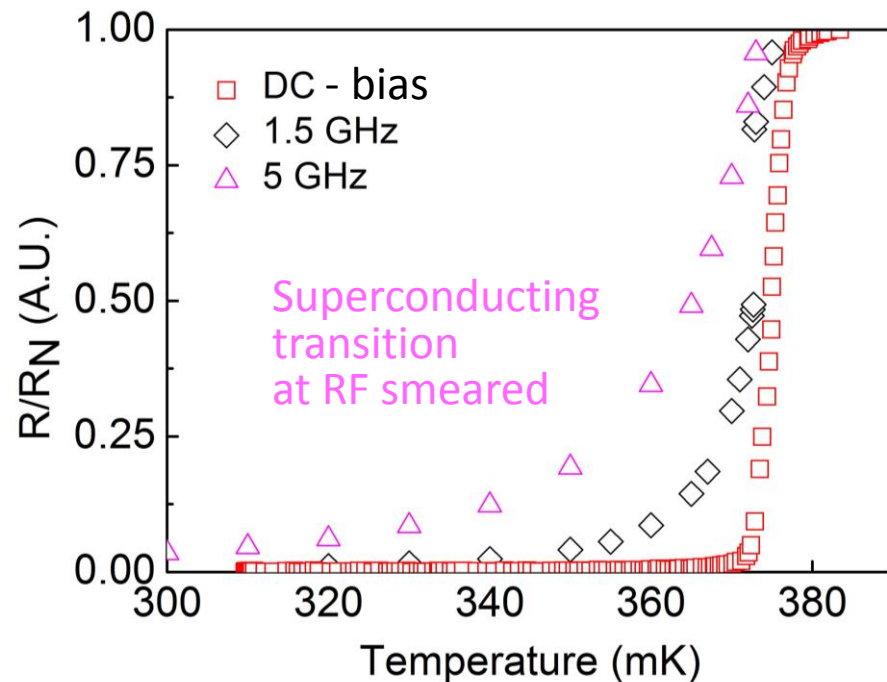


2014. Матрица для многолучевой антенны

All-Nb structure / Signal 600-700 GHz / Reading $F_0 = 7.7$ GHz



2015. RFTES детектор на ~300 мК (мостик из Hf) Учет импеданса по теории Маттиса-Бардина

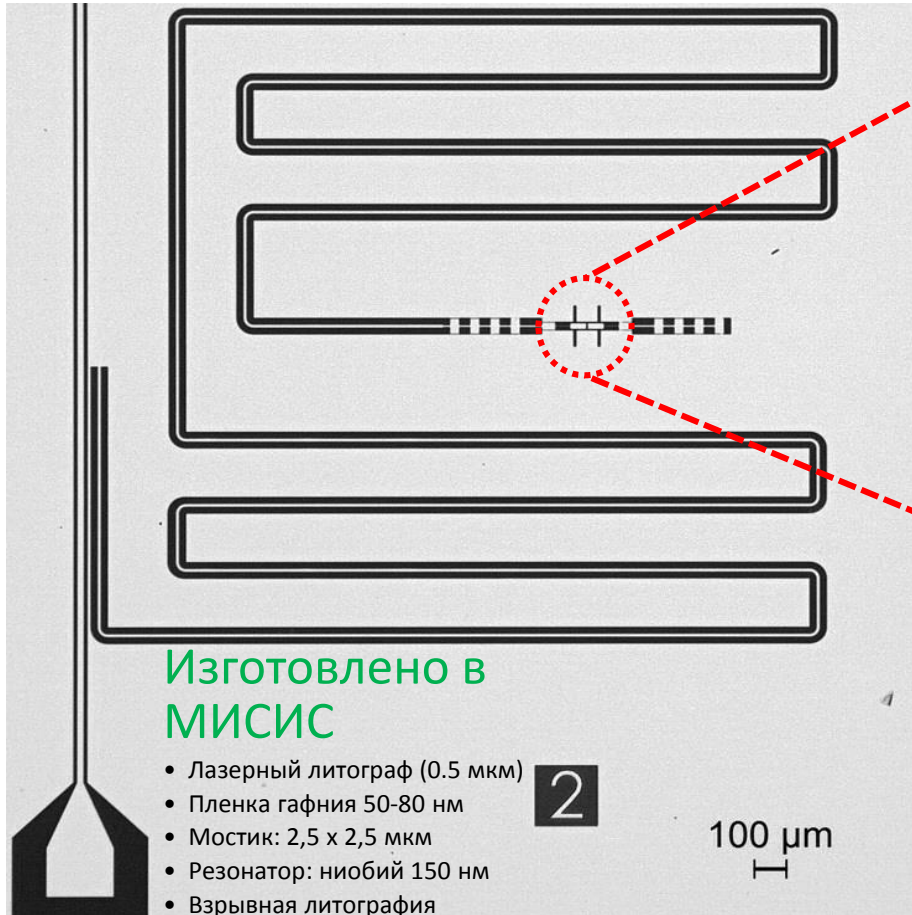


- **Теория Маттиса-Бардина** описывает влияние температуры на поверхностный импеданс СВЧ тока вблизи T_c для равновесного случая. Можно ли применять, если за проводимость отвечает электронный газ при неравновесном разогреве?
- Эксперимент: Отклик резонатора соответствует нелинейному резистору. Индуктивный отклик мал. Это позволяет подавить фазовый шум опорного генератора.

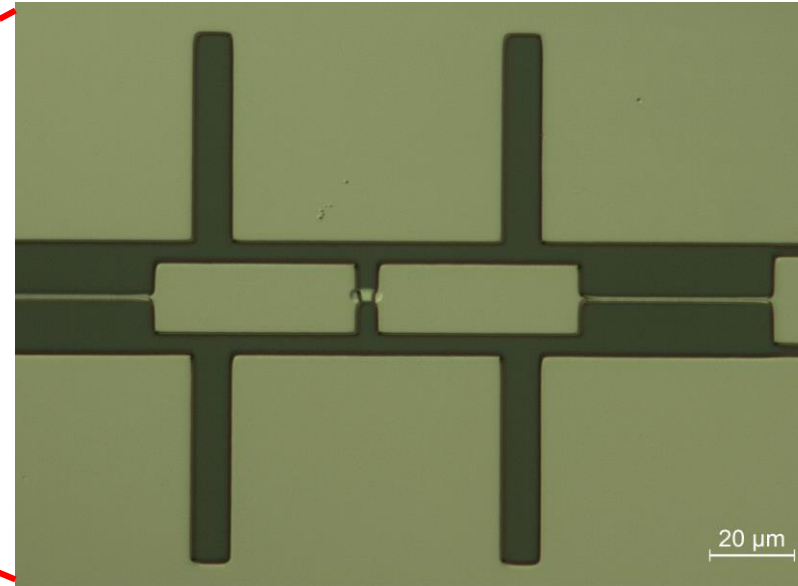
Топология RFTES детектора на 400 мК

Нет гальванического контакта к мостику – реактивный ток резонатора через емкость $C < 0,1$ пФ

Свернутый четвертьволновой резонатор 1,5 ГГц



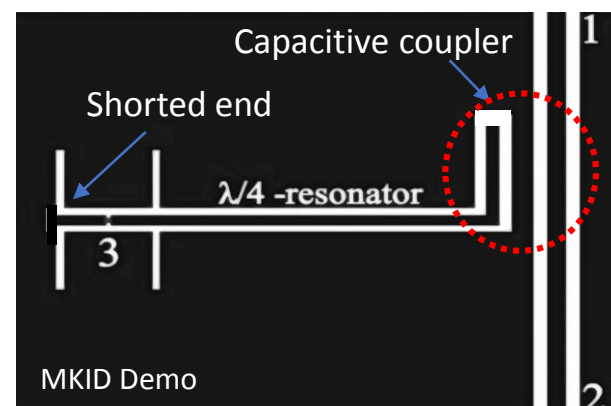
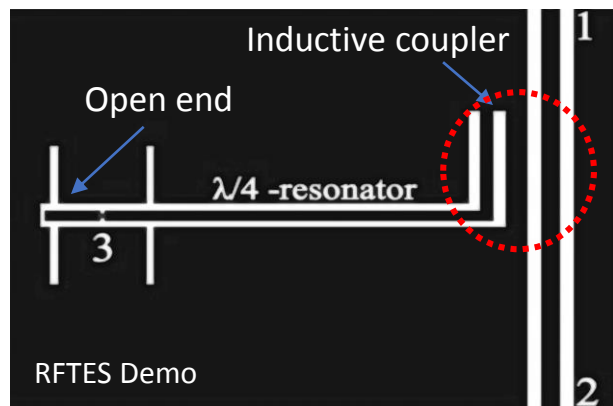
Антенна двойная щель 550-750 ГГц



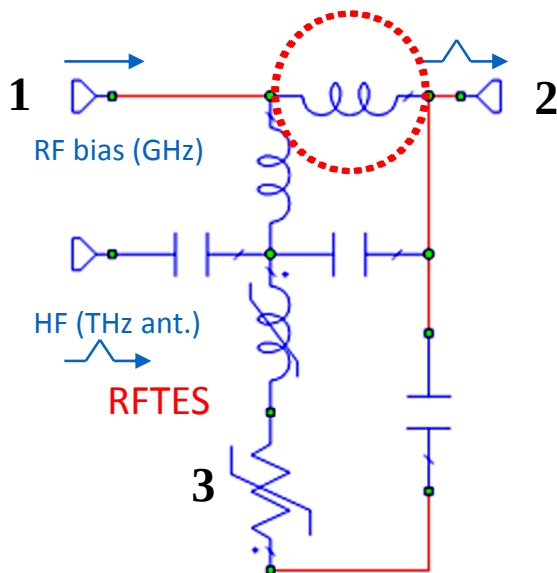
- Резонатор 1,5 ГГц слабо связан с линией возбуждения
- Мостик из гафния включен в цепь тока резонатора
- ТГц токи антенны изолированы от цепей резонатора
- Мостик согласован с антенной и разогревается суммой токов антенны и резонатора

Сравнение электрических схем TES vs MKID

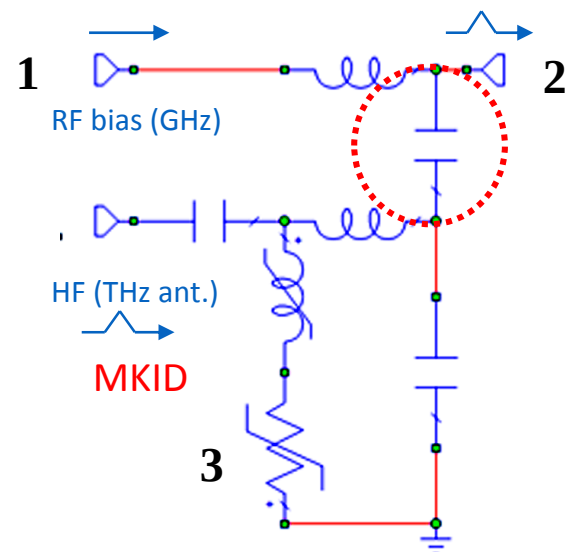
оба детектора являются Watt → Watt преобразователями; разный элемент связи



RFTES
Фильтр-пробка

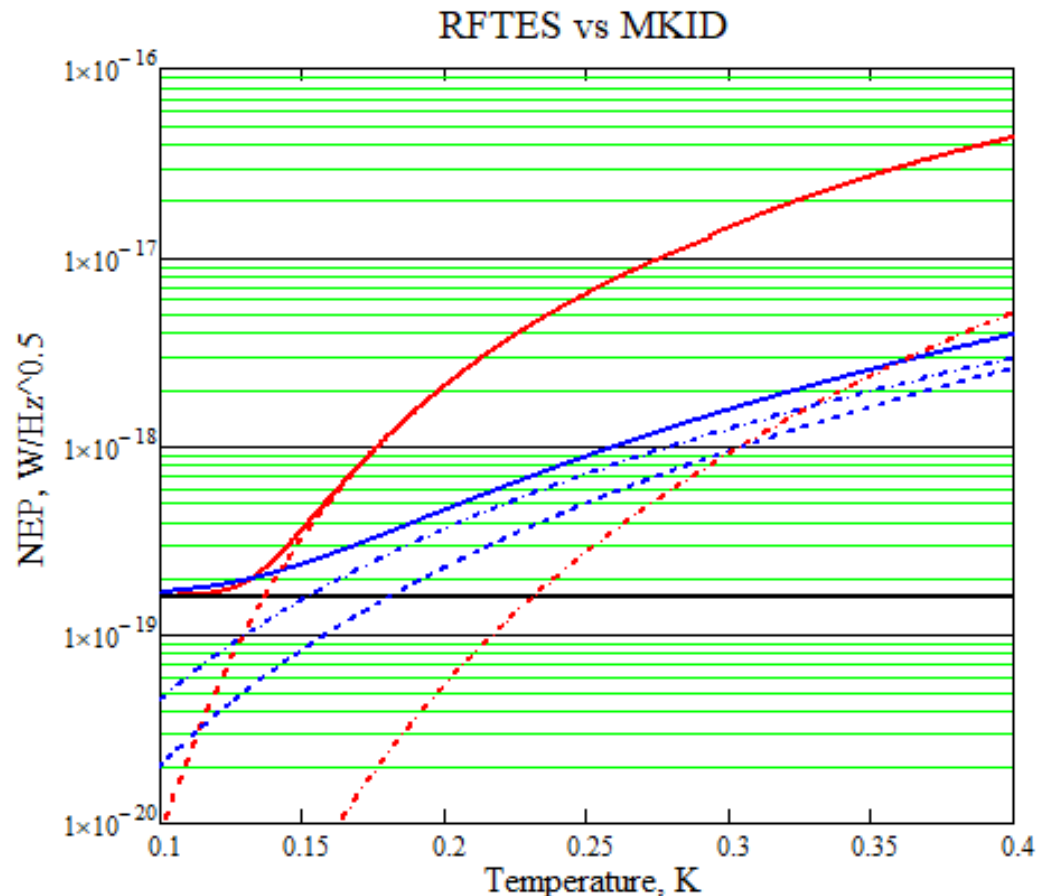


MKID
Резонансный шунт



Сравнение NEP для RFTES и MKID

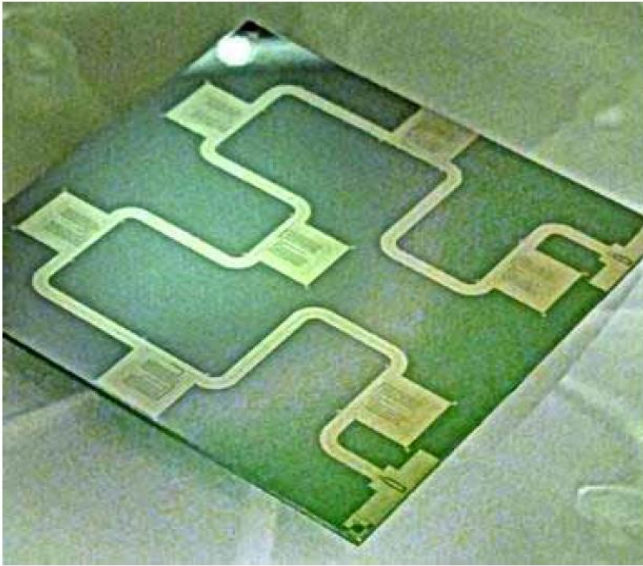
одинаковый объем поглотителя, одинаковая рабочая температура



- NEP_MKID
- NEP_RFTES
- NEP_phot
- - - NEP_G-R(MKID)
- - - NEP_G-R(RFTES)
- . . NEP_phon(MKID)
- . . NEP_phon(RFTES)

Ведущий исследователь: Л. С. Соломатов
Детали представлены
на XXIX Нано-Симпозиуме
13 марта 2025 (постер)

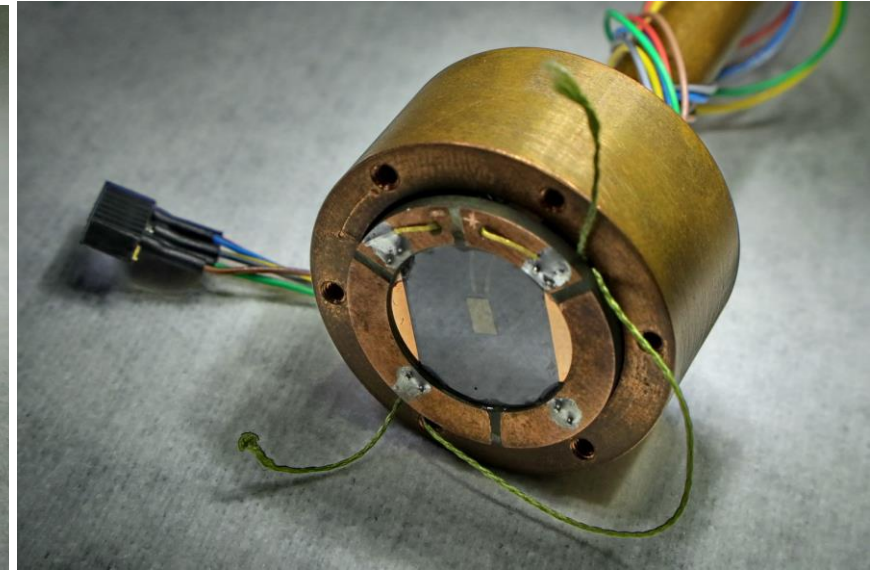
2020. Матрица RFTES и черное тело $T_{bb} = 3 \dots 12 \text{ K}$



Чип матрицы из 7-ми пикселей

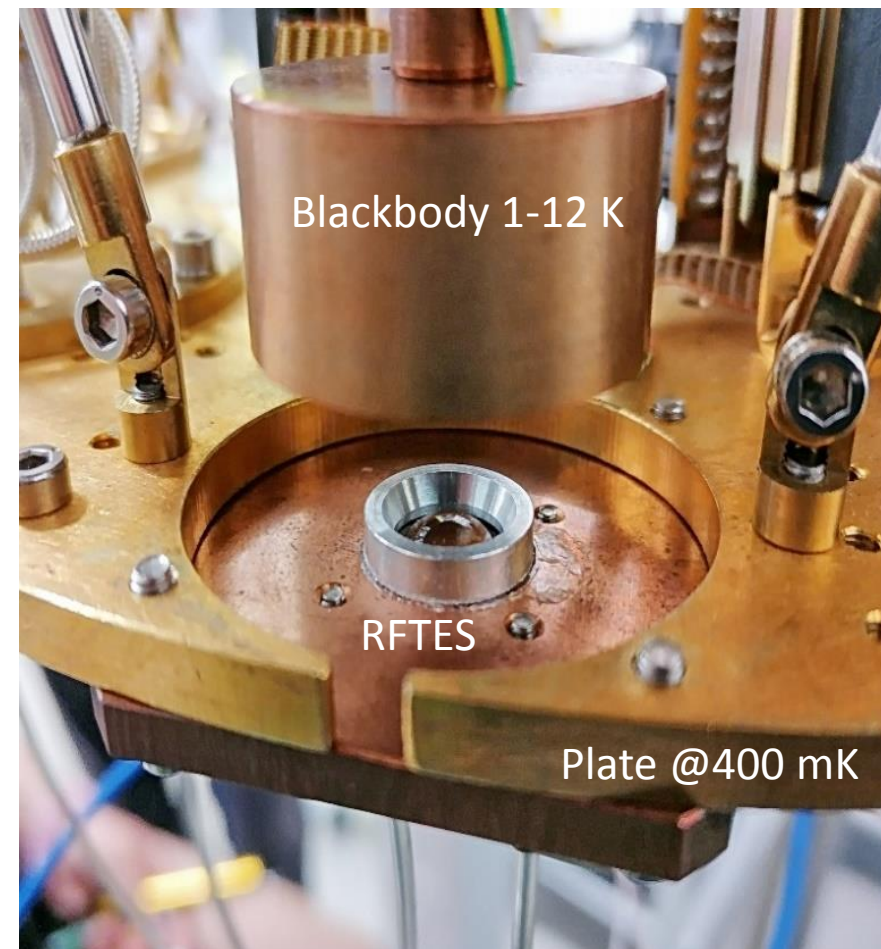
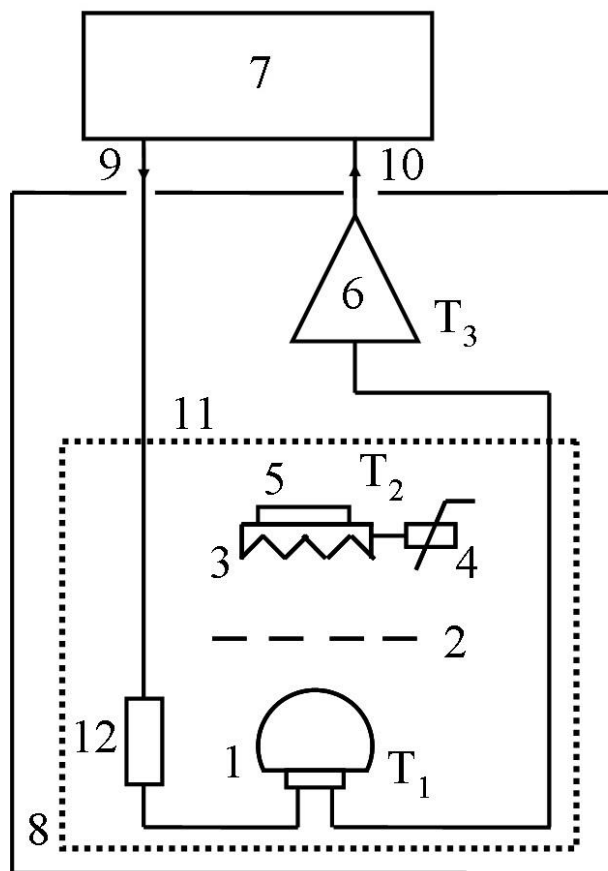
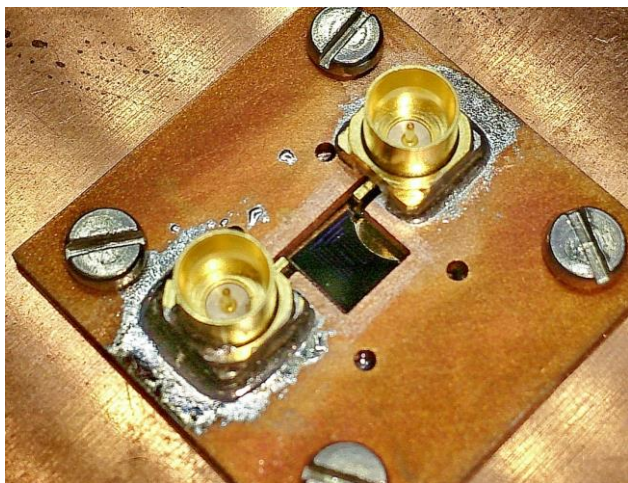


Оптическая сборка из 7-ми линз

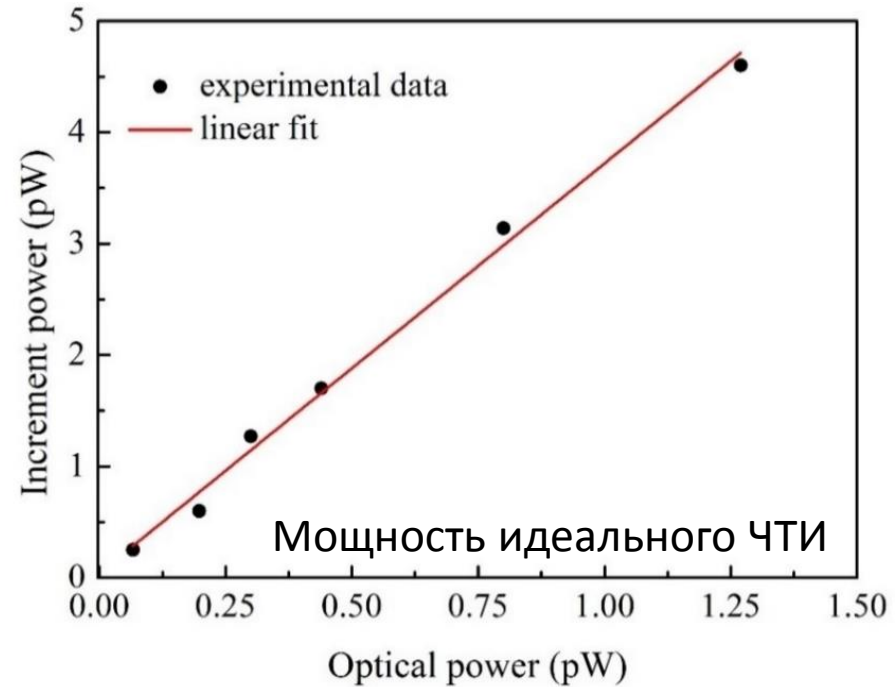
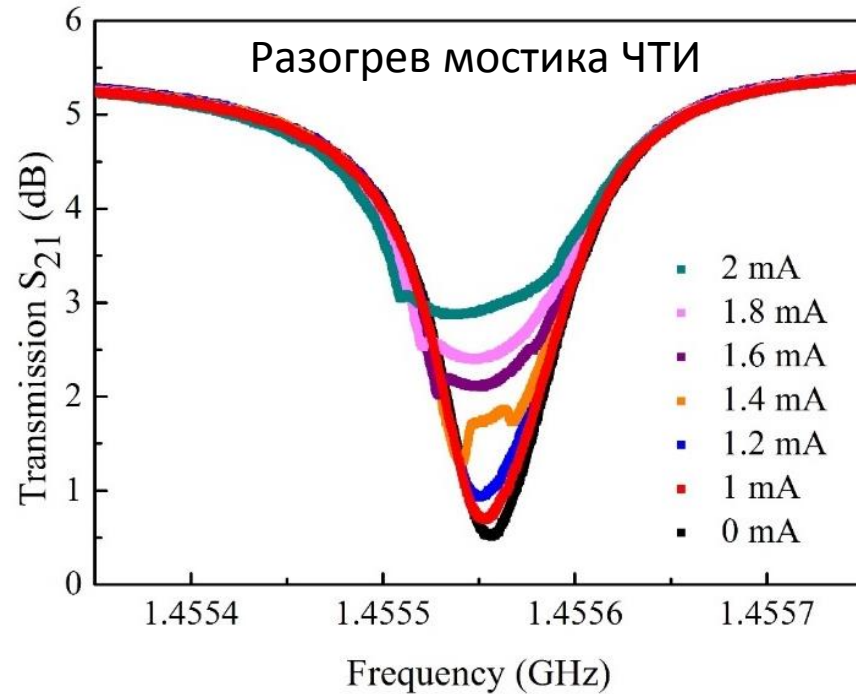


Чернотельный калибратор 3-10 K

2021. RFRES в составе рефрижератора растворения



Реакция резонатора на чернотельный излучатель (ЧТИ)



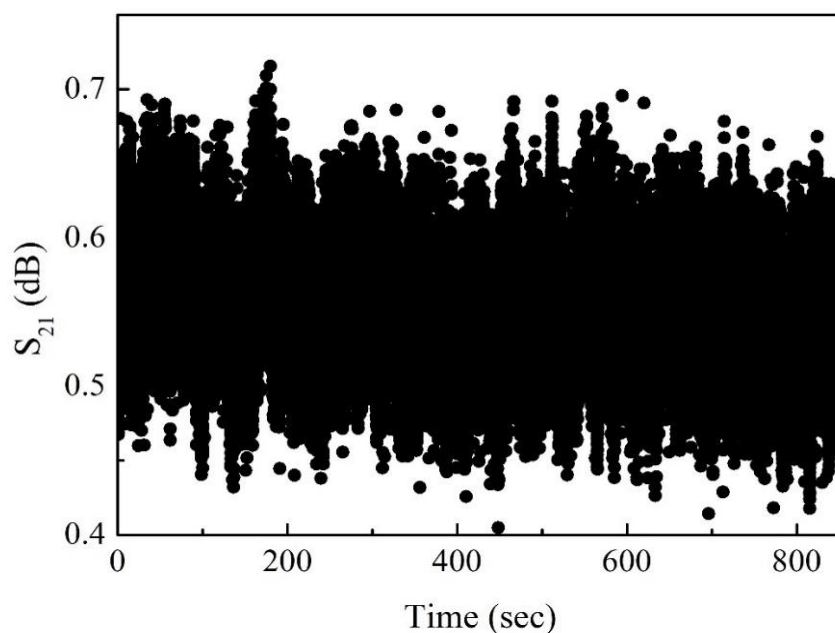
Оптическая мощность завышена ~ 7 раз
из-за малой черноты излучателя $A = 0.14$

Меренков А. В., Ким Т. М., Чичков В. И., Калинин С. В., Шитов С. В. Сверхпроводящий болометрический детектор с высокочастотным считыванием при температуре 400 мК // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64. – №. 10. – С. 1404.

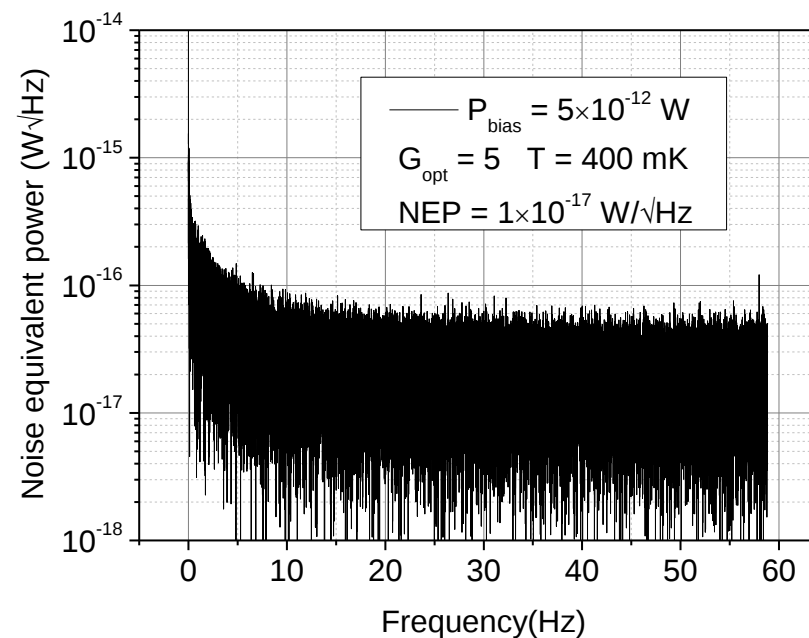
2021. Оптический тест RFTES с черным телом

пленочный мостик из гафния $A = 2 \times 2 \text{ }\mu\text{m}$ толщиной 80 nm и критической температурой $T_c = 410 \text{ mK}$

VNA input power fluctuation on time



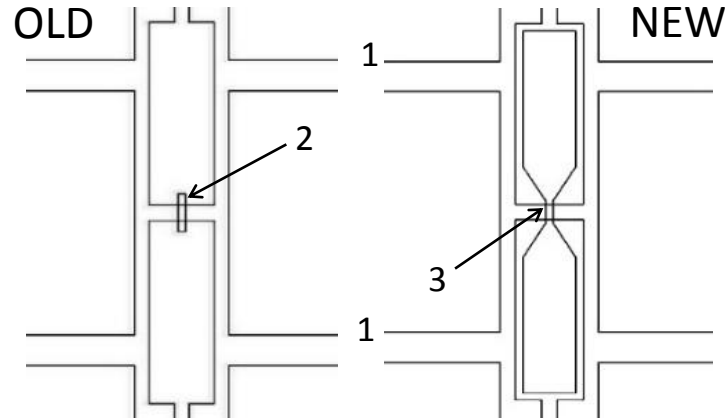
Noise power spectrum density



(NEP, Noise Equivalent Power – Мощность, Эквивалентная Шуму, МЭШ)

2023. Кинетический эффект в RFTES детекторе:

$P_{\text{сиг}} \rightarrow \Delta P_{\text{вых}}$ - усиление



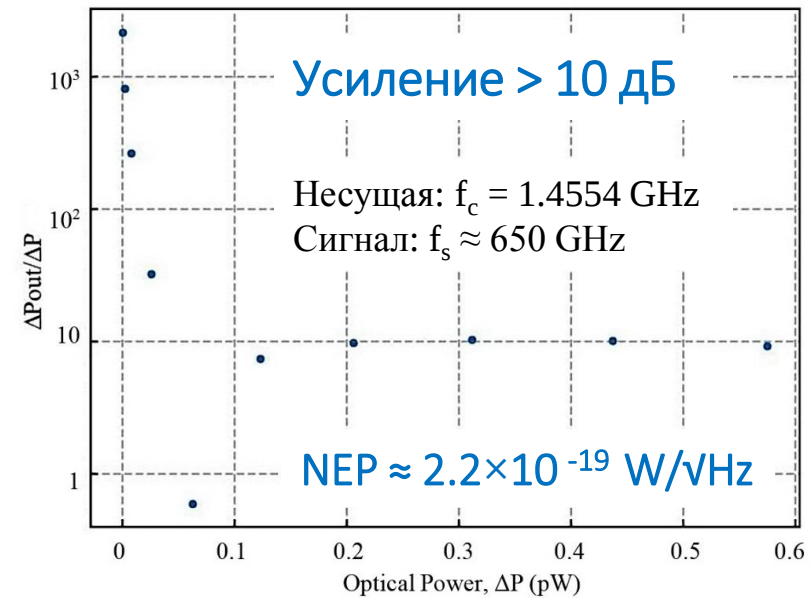
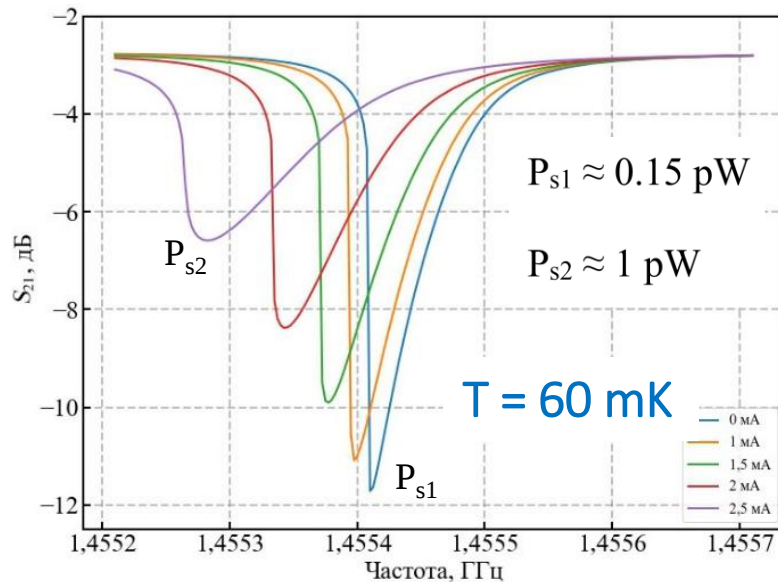
$$dL_{k1} \approx 0.11 \text{ nH} \quad dL_{k2} \approx 0.33 \text{ nH}$$

$$L_k(n_s - n_{ph1}\tau_1) - L_k(n_s) = dL_{k1}$$

$$L_k(n_s - n_{ph2}\tau_2) - L_k(n_s) = dL_{k2}$$

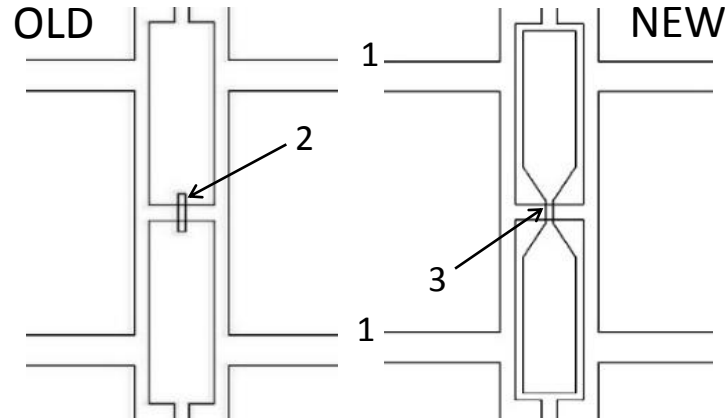
$$n_{ph}\tau = dn_s$$

$$n_s \approx 3.4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$



2023. Кинетический эффект в RFTES детекторе:

$P_{\text{сиг}} \rightarrow \Delta P_{\text{вых}}$ - усиление



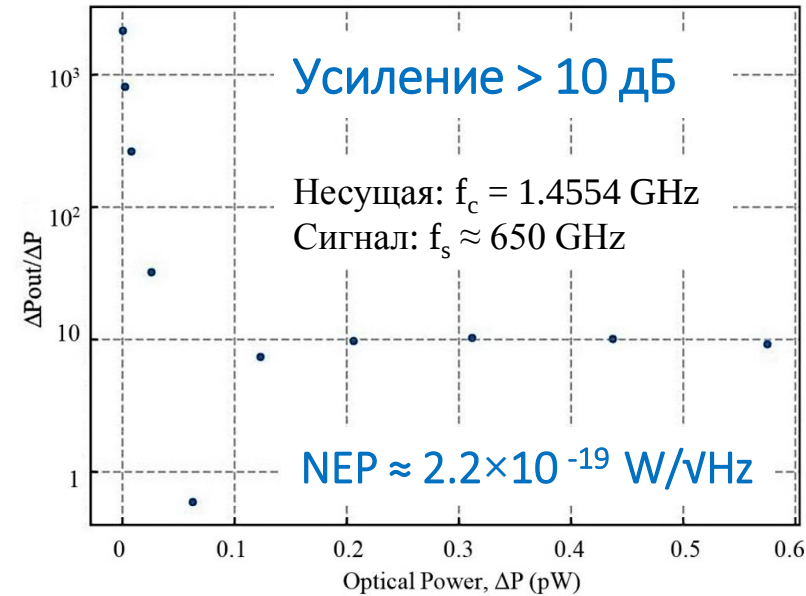
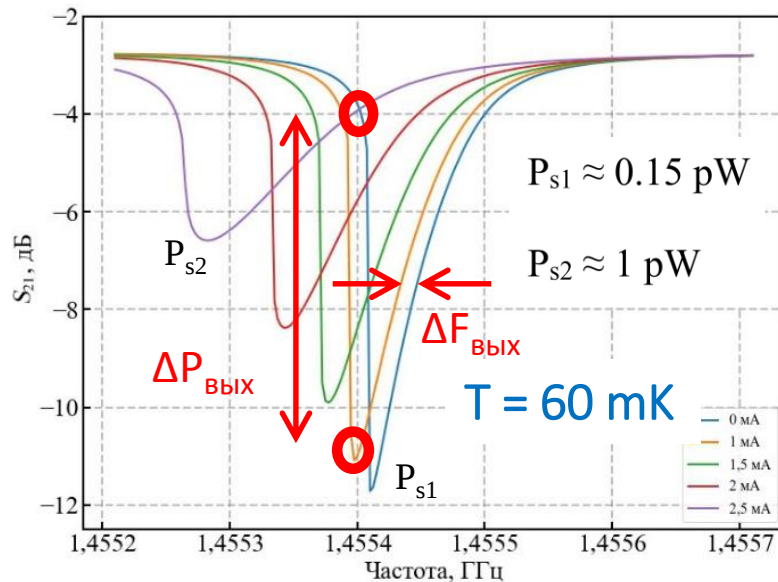
$$dL_{k1} \approx 0.11 \text{ nH} \quad dL_{k2} \approx 0.33 \text{ nH}$$

$$L_k(n_s - n_{ph1}\tau_1) - L_k(n_s) = dL_{k1}$$

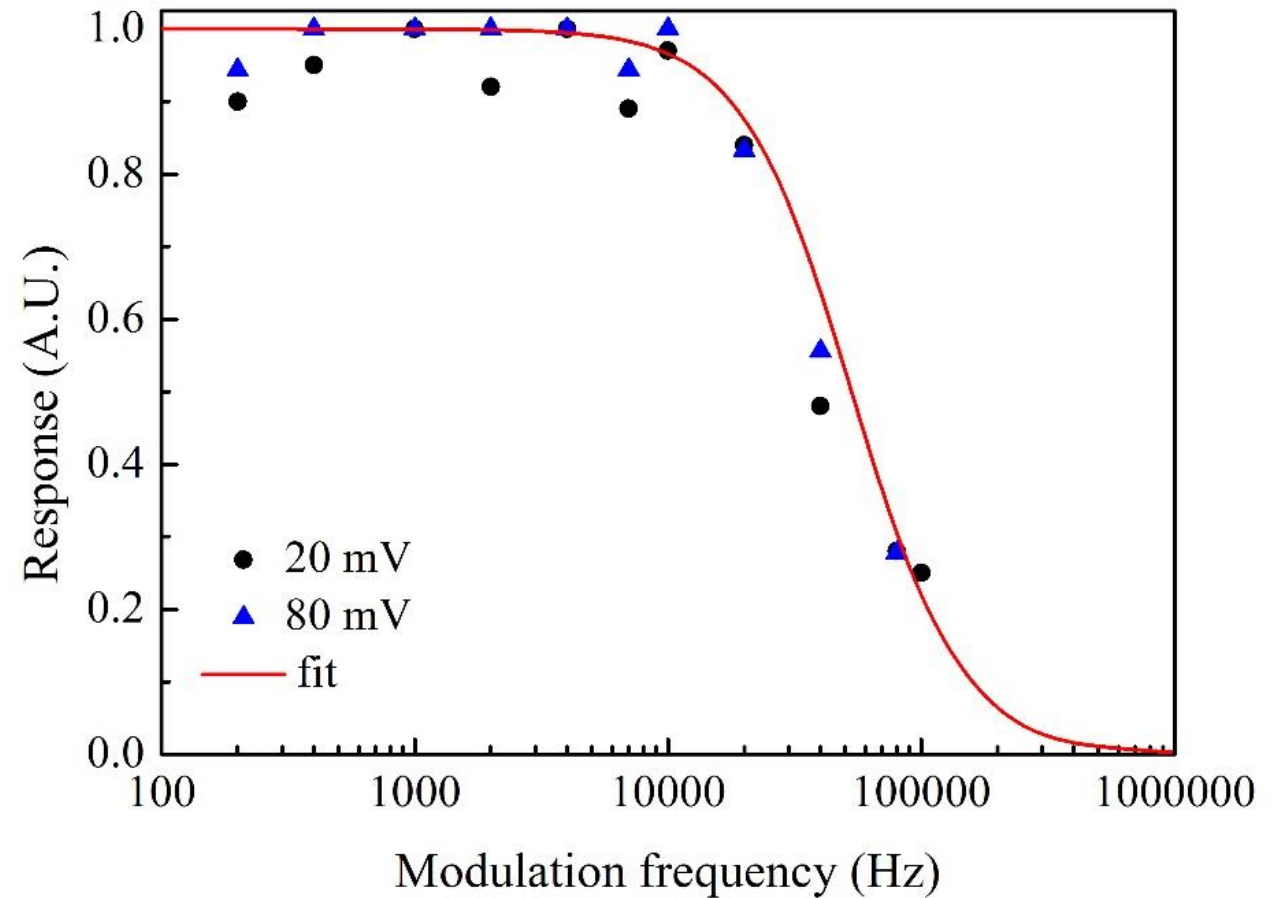
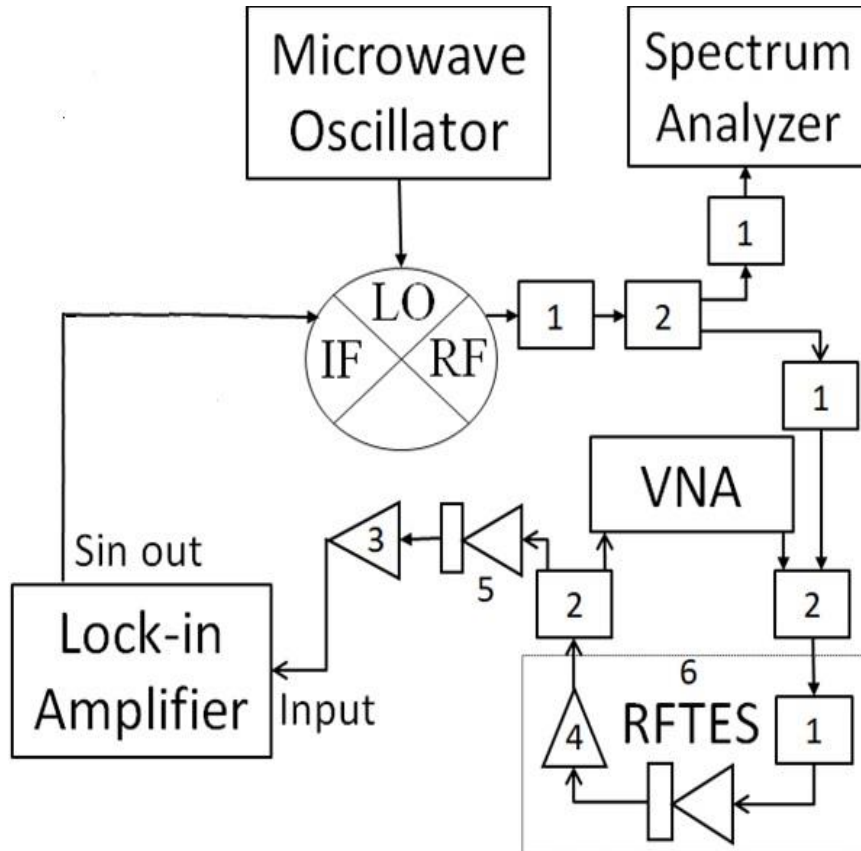
$$L_k(n_s - n_{ph2}\tau_2) - L_k(n_s) = dL_{k2}$$

$$n_{ph}\tau = dn_s$$

$$n_s \approx 3.4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$



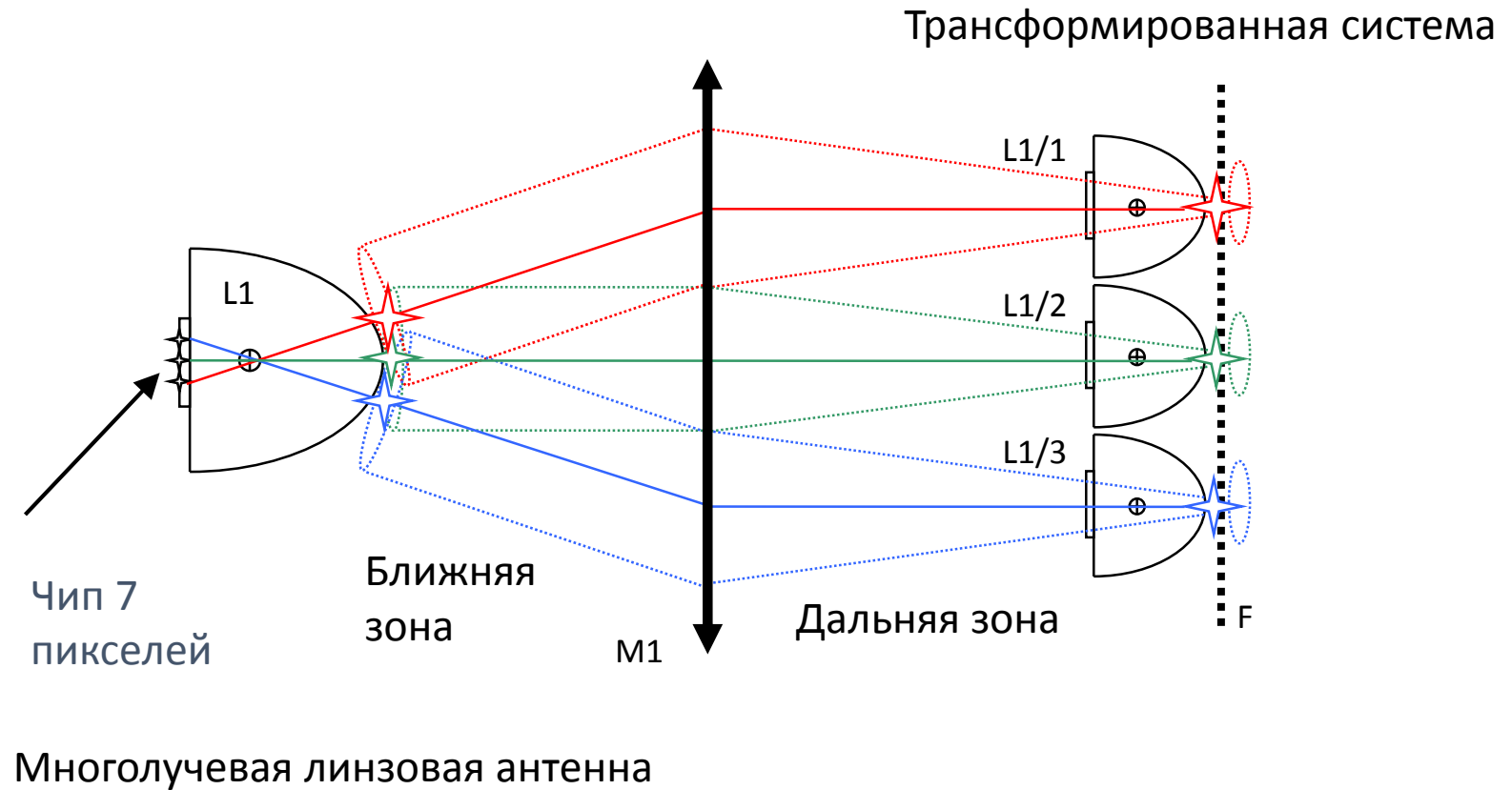
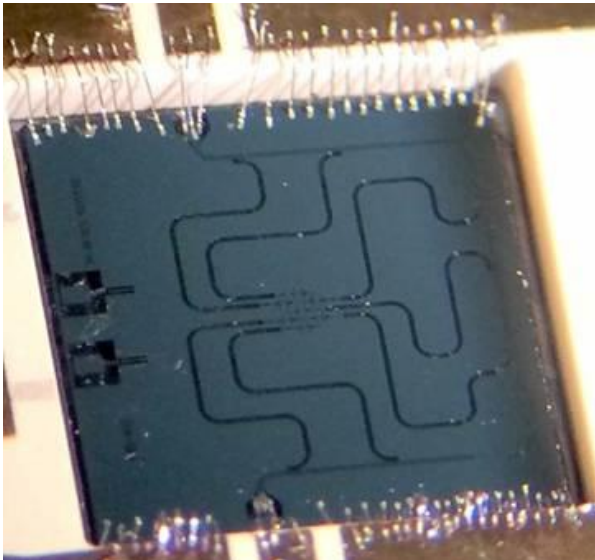
Скорость отклика RFTES схема измерения



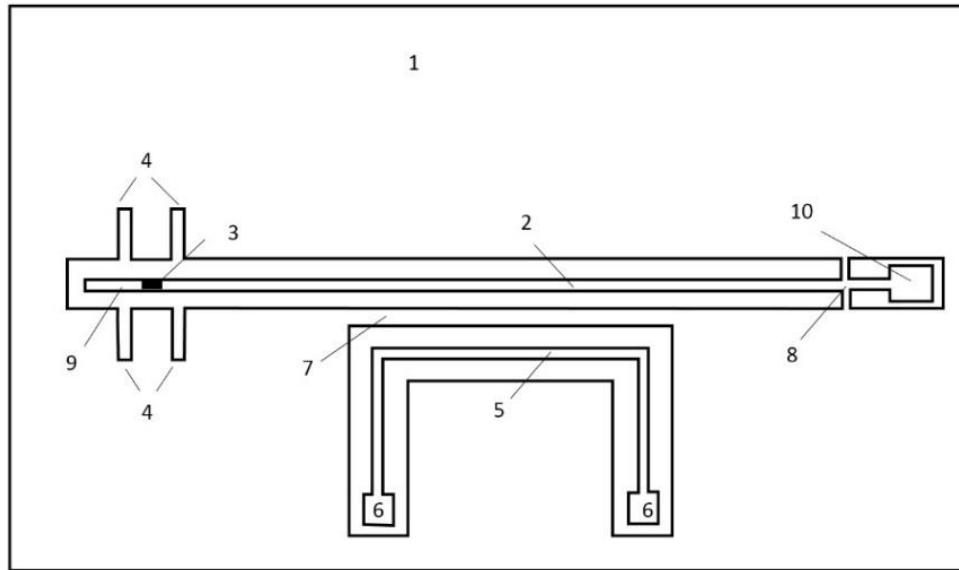
Физические принципы проверены. Что дальше?

- Практические применения
 - Астрономия / матрицы
 - Безопасность / пассивное наблюдение
 - Медицина / температурная карта тела
 - Неразрушающий контроль по теплу
 - Считывание кубитов / частоты 1-10 ГГц

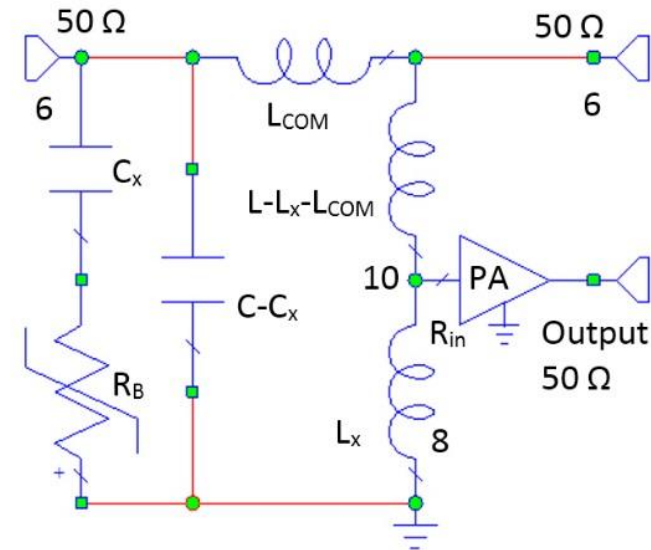
Оптическая система «1 линза – 7 пикселей» и схема трансформации в систему «7 линз – 7 пикселей»



Перспективы развития (1): схема с подключаемым параметрическим усилителем



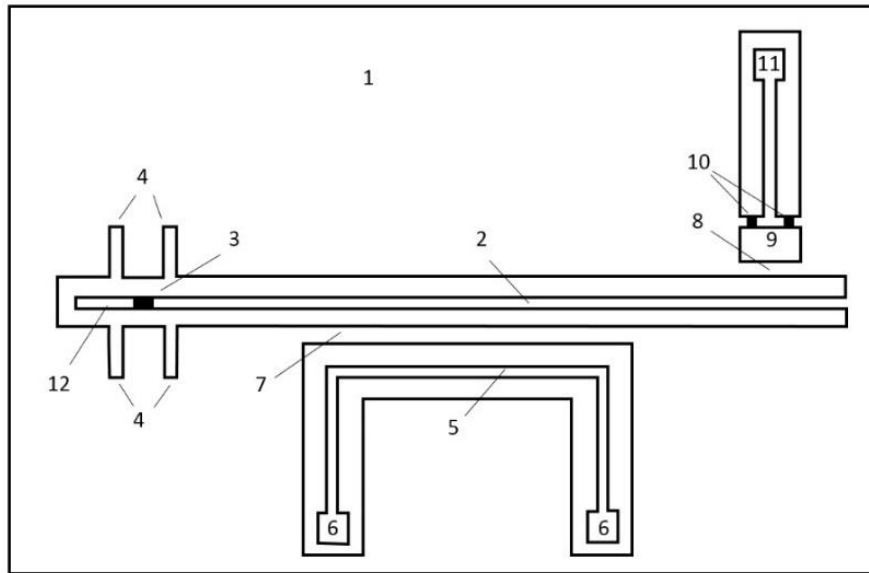
(a)



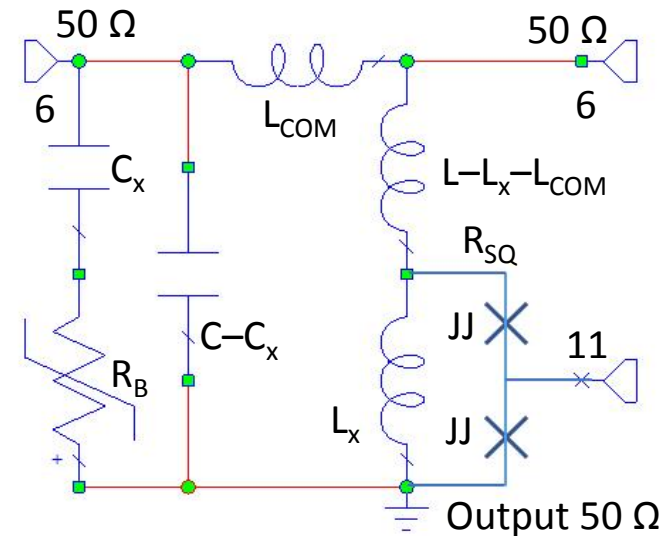
(b)

Резонатор нагружен элементом связи 8; контакт 10 нагружен входным импедансом параметрического усилителя (ПУ) R_{in} ; 9 - концевая емкость C_x ; 6 и 10 - физические выводы, которые нагружены коаксиальными кабелями ввода/вывода и входным импедансом параметрического усилителя R_{in} . Концевая емкость C_x отмечена как 9. На эквивалентной схеме цифрами 6 и 10 указаны физические выводы

Перспективы развития (2): сквид-усилитель с индуктивным возбуждением = активный детектор



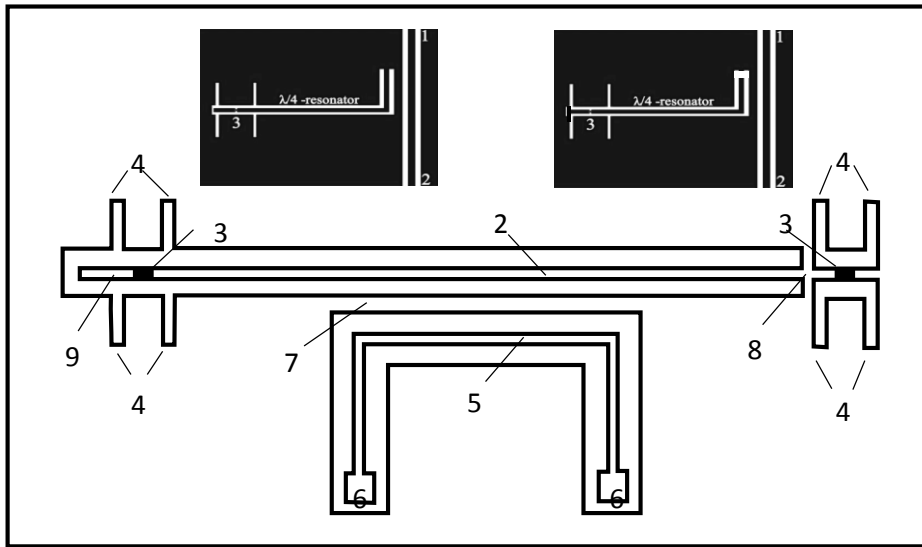
(a)



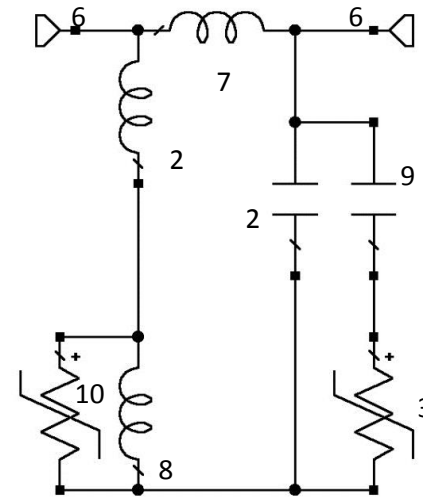
(b)

1 – диэлектрическая подложка; 2 – четвертьволновой копланарный резонатор; 3 – мостик R_B ; 4 – планарная двухщелевая антенна; 5 - линия возбуждения резонатора; 6 – терминалы линии возбуждения; 7 – элемент магнитной связи резонатора L_{COM} ; 8 – элемент магнитной связи сквида (L_x с рис. 3b); 9 – магнитная петля сквида; 10 - джозефсоновские контакты JJ; R_{SQ} – импеданс сквида; 11 – выходной терминал сквида; 12 – концевая емкость резонатора C_x , отношение C_x/C определяет коэффициент включения импеданса мостика 3 в резонатор 2.

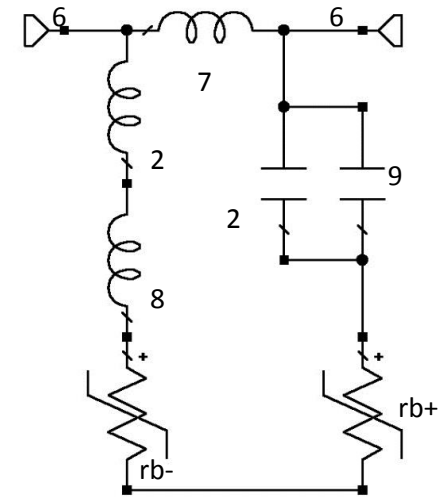
Перспективы развития (3): дифференциальный детектор (балансный, или нуль-детектор)



(a)



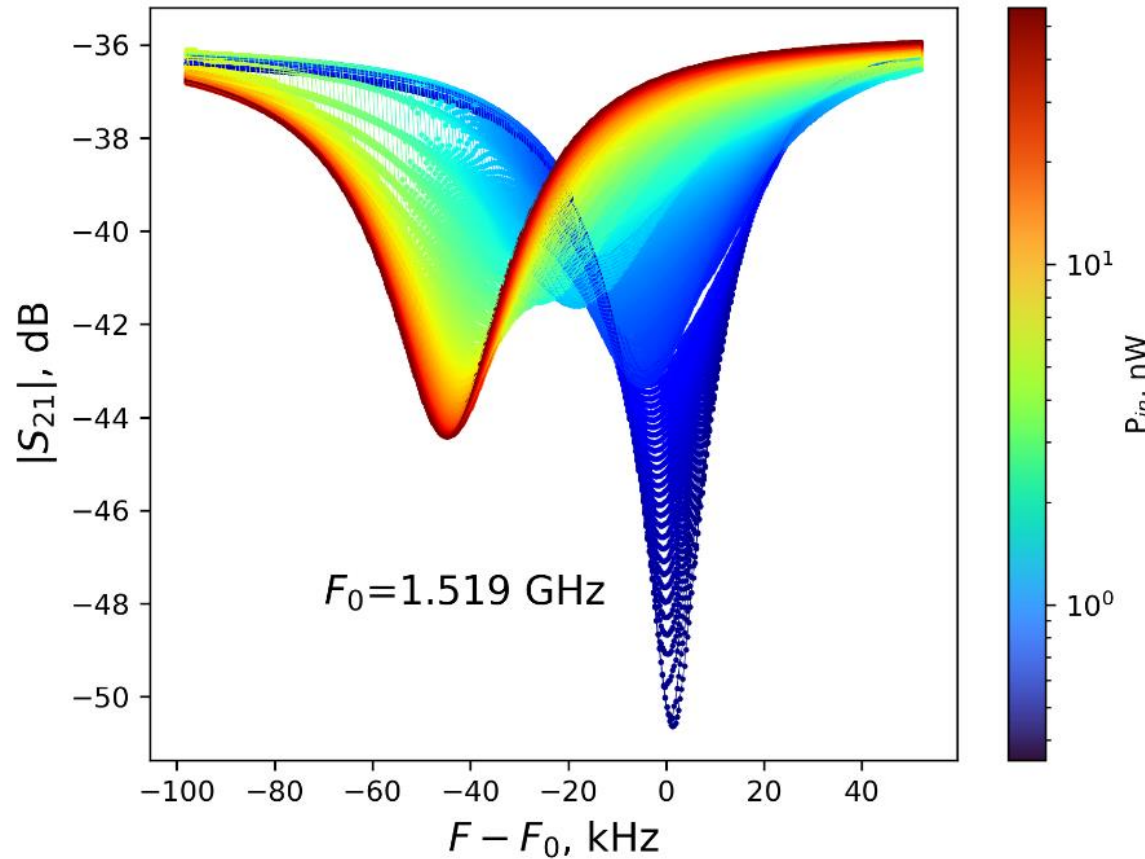
(b)



Резонатор 2 нагружен двумя мостиками 3 с сопротивлением R_b , концевая емкость C_b (9), и индукторами L_R и L_c (8); терагерцовые антенны 4; линия возбуждения 5 с контактами 6, сегмент магнитной связи 7, (б) электродинамический эквивалент (а): резисторы r_{b-} и r_{b+} , это мостики, имеющие разный знак влияния на резонатор. Параметры цепи и уровень подогрева детектора выбираются так, чтобы потери r_{b-} и r_{b+} в рабочем режиме были равны.

RFTES L-типа для дифференциального детектора

Эксперимент



- максимальная крутизна амплитудного преобразования

$$d|S_{21}|^2/dP_{in} = 9 \cdot 10^8 \text{ 1/W}$$

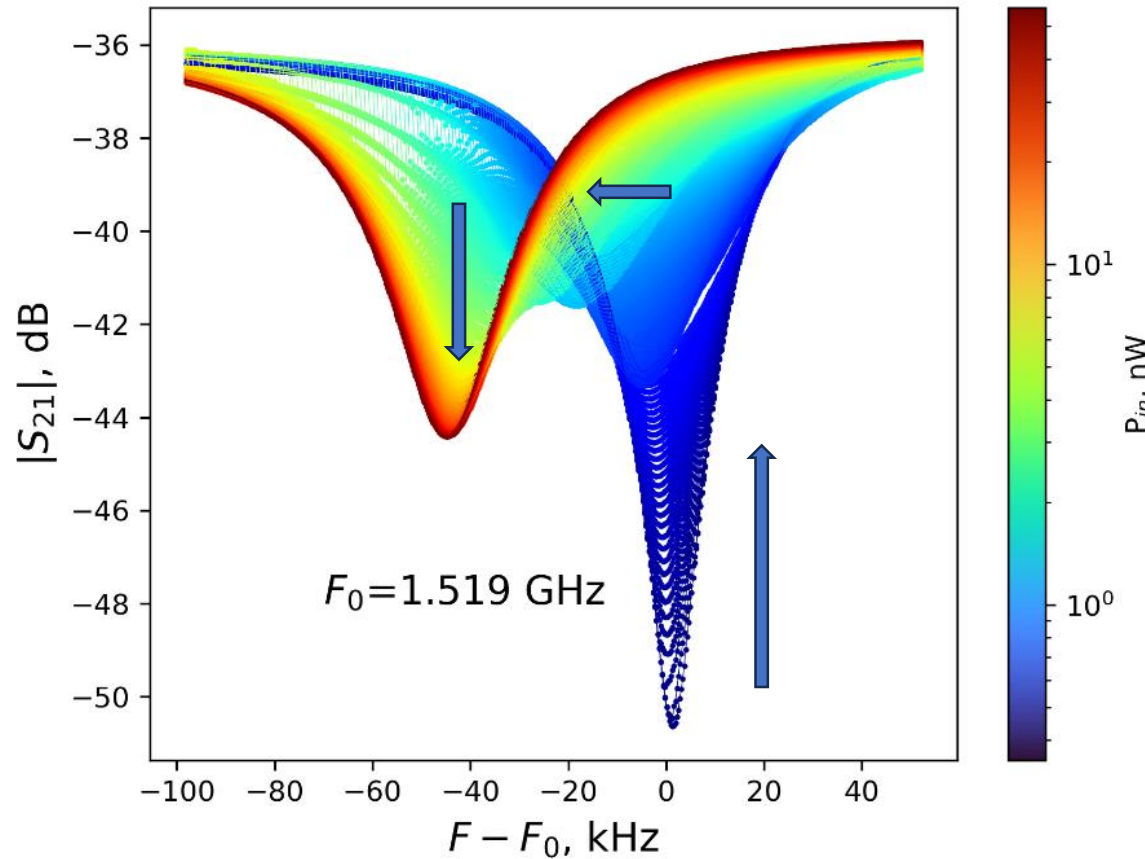
- максимальная крутизна частотного (фазового) преобразования при индуктивном переходе частоты

$$dF/dP_{in} = 3.2 \cdot 10^{13} \text{ Hz/W.}$$

Ведущий исследователь: Н.Ю.Руденко
Детали представлены на XXIX Нано-Симпозиуме 13 марта 2025 (постер)

RFTES L-типа для дифференциального детектора

Эксперимент: эволюция АЧХ резонатора (1,5 ГГц)



- максимальная крутизна амплитудного преобразования

$$d|S_{21}|^2/dP_{in} = 9 \cdot 10^8 \text{ 1/W}$$

- максимальная крутизна частотного (фазового) преобразования при индуктивном переходе частоты

$$dF/dP_{in} = 3.2 \cdot 10^{13} \text{ Hz/W.}$$

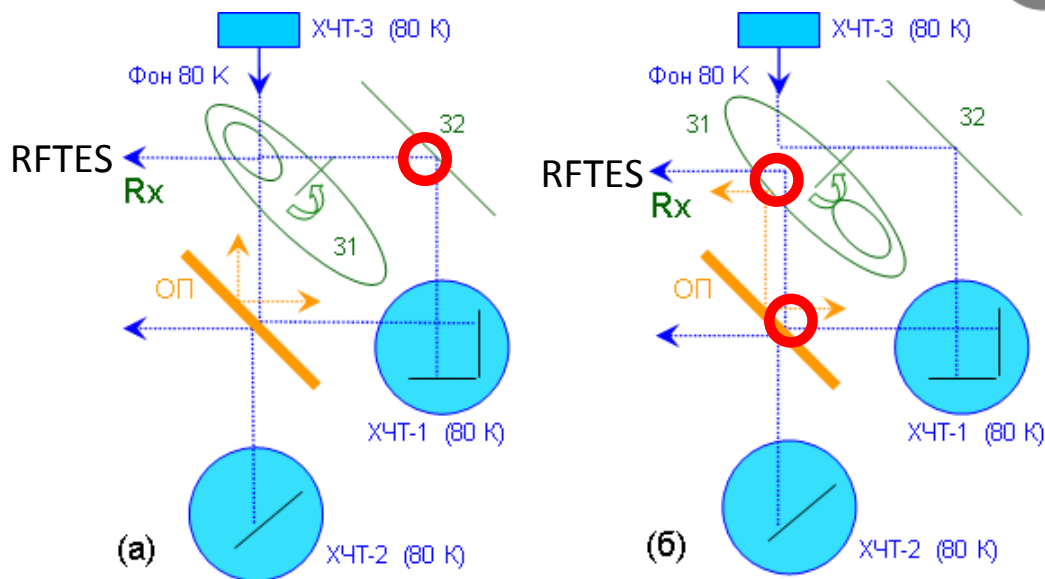
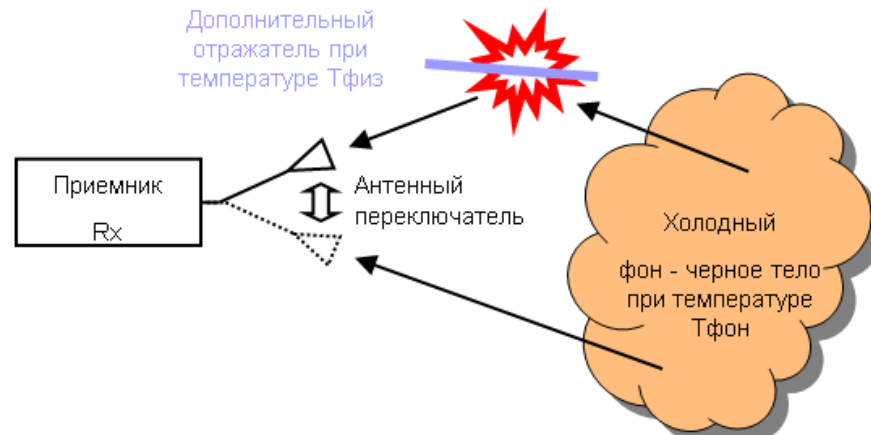
Ведущий исследователь: Н.Ю.Руденко
Детали представлены на XXIX Нано-Симпозиуме 13 марта 2025 (постер)

Как определить коэффициент отражения на ТГц?

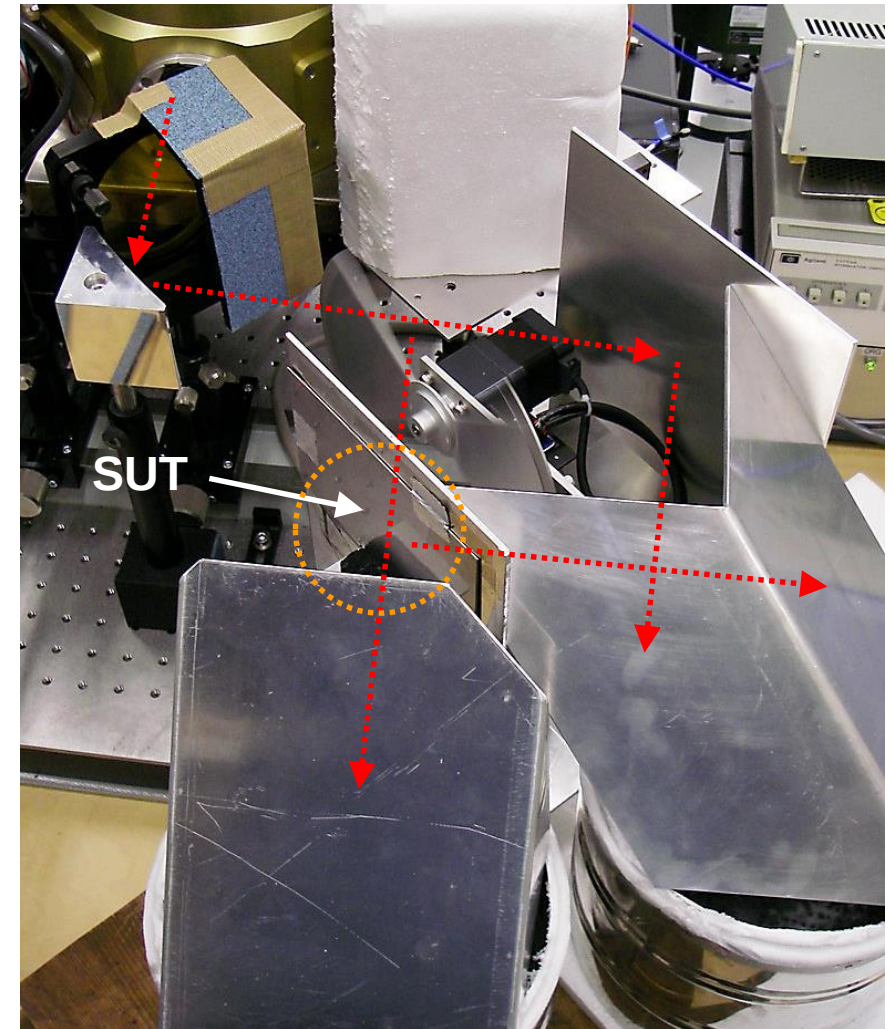
- Интерферометра **ALMA** на пустынном плато Атакама (Чили, 5000 над уровнем моря)
- **ТЗ-1:** матовая (шероховатая) поверхность, не отражающая ИК
- **ТЗ-2:** коэффициент поглощения $< 1 \%$



Перспективы развития (4): сбалансированный радиометр для измерения малых поглощений



- Разница двух путей – одно дополнительное отражение от образцы (SUT)
- Разница в уровнях сигнала двух плеч – искомый шум SUT

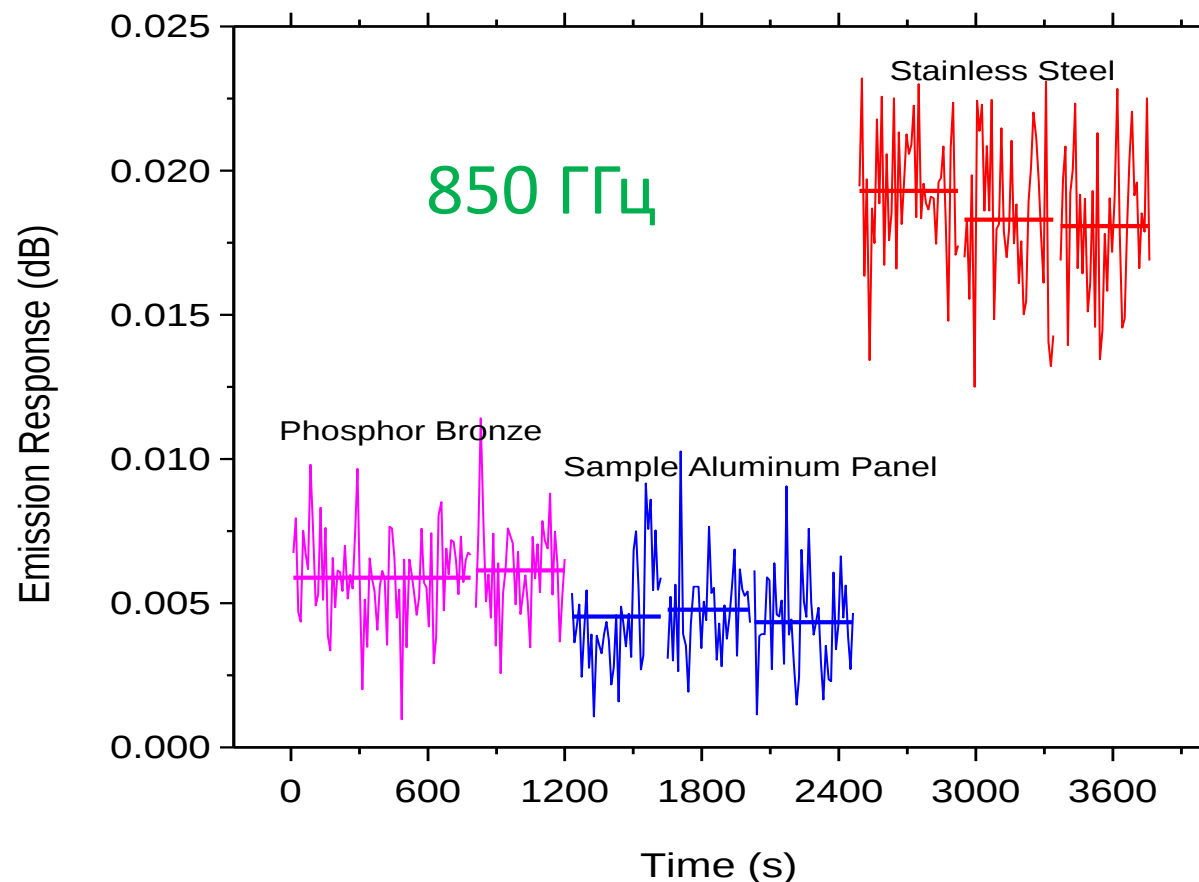


Измерение тепловой эмиссии листовых материалов

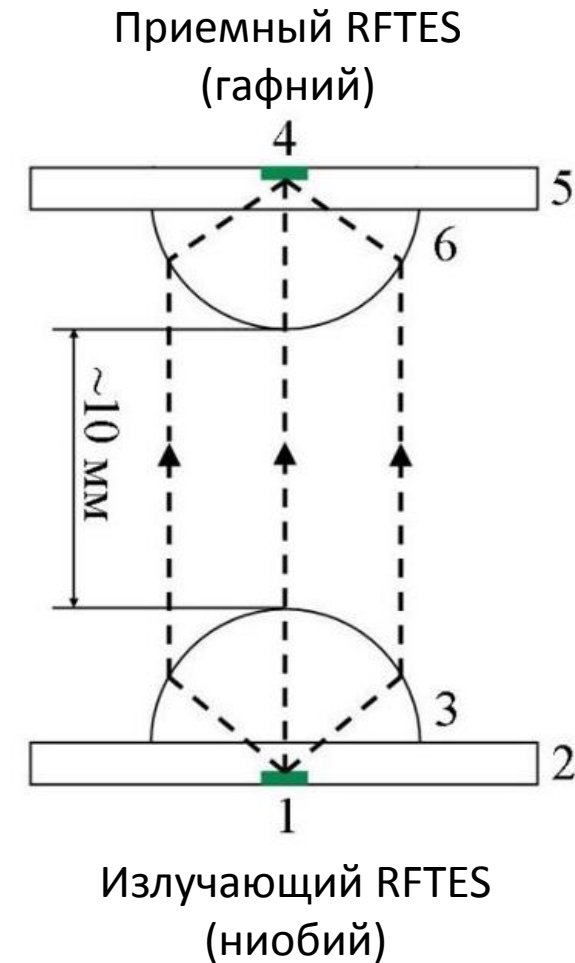
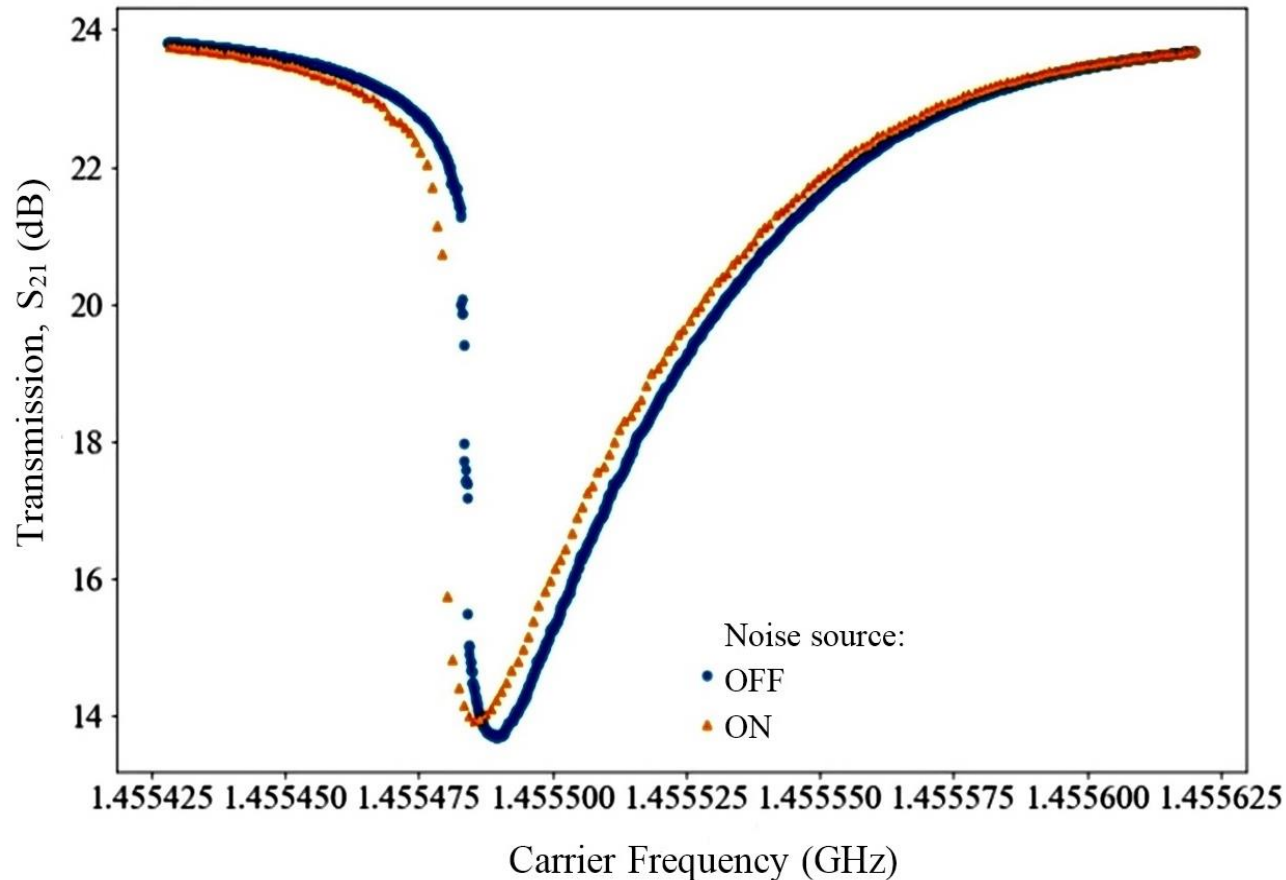
С. В. Шитов, А. В. Уваров, А. Б. Ермаков, А. Н. Выставкин. Измерение поглощения рефлекторной антенны на терагерцовых частотах методом сбалансированного радиометра. Журнал технической физики. 2011. Т. 81. В. 11. С. 112-121. <http://journals.ioffe.ru/jtf/2011/11/p112-121.pdf>

1. Лист фосфорной бронзы
2. Тестовая антенная панель
3. Лист нержавеющей стали

S. V. Shitov, A. V. Uvarov, A. B. Ermakov, A. N. Vystavkin. *Measurement of the Reflector Antenna Absorption at Terahertz Frequencies by the Method of a Balanced Radiometer*. Technical Physics, V. 56, No. 11, pp. 1652–1660 (2011). <http://journals.ioffe.ru/jtf/2011/11/p112-121.pdf>



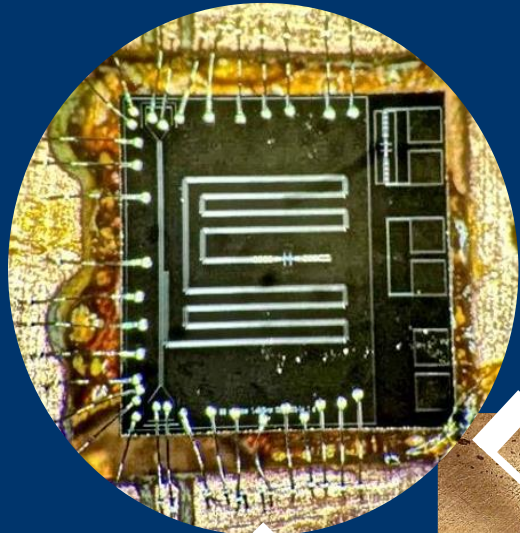
Перспективы развития (5): RFTES болометр как чернотельный калибратор с СВЧ разогревом



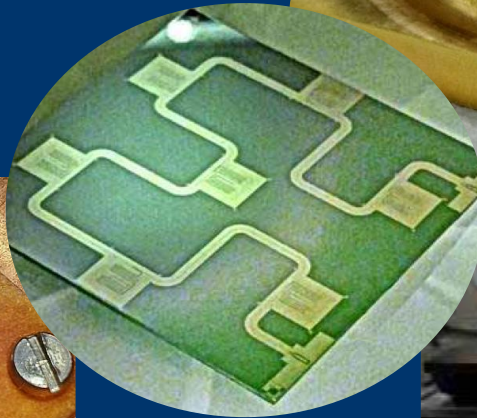
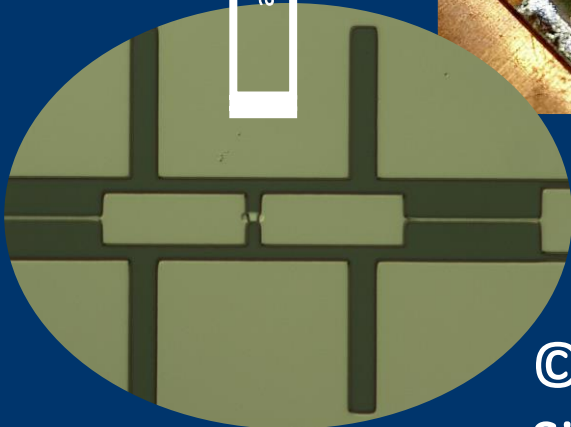
ОПИСАНИЕ ПРОДУКТОВ локализованная технология

ПРОТОТИПЫ: MVP – чипы

УРОВЕНЬ
ГОТОВНОСТИ – 7

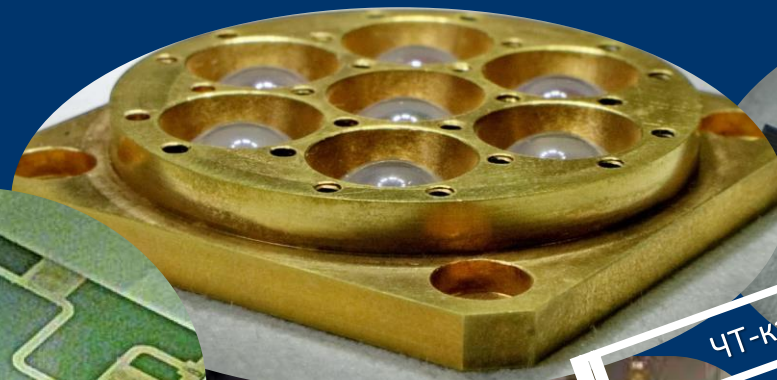


антенна

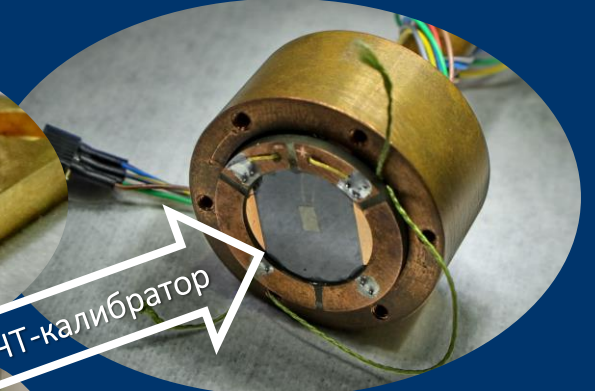


чип

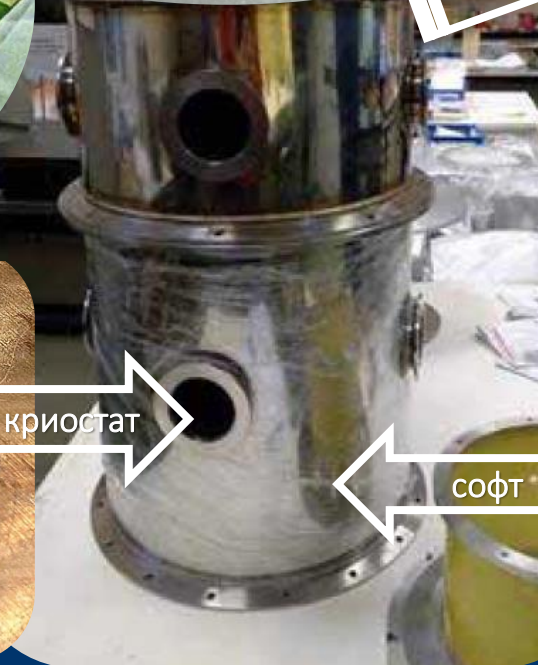
сборка



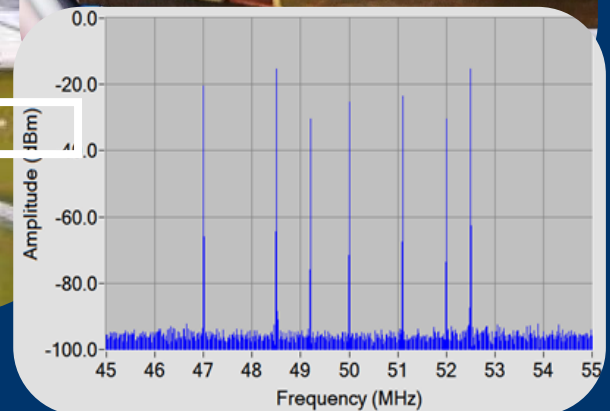
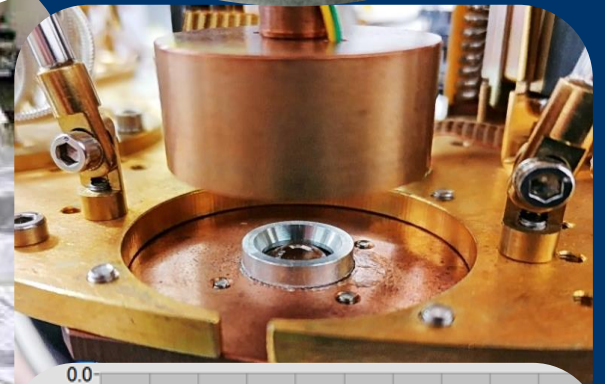
ЧТ-калибратор



криостат



софт



© RFTES
Since 2011

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЛИЦЕНЗИРОВАНИЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ (ЧИПОВ)

Список основных публикаций (WoS) 2011-2024 гг.

1. С. В. Шитов. Болومتر с высокочастотным считыванием для матричных применений. Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, В. 19. С. 88-94. <http://journals.ioffe.ru/pitf/2011/19/p88-94.pdf>
2. С. В. Шитов, А. В. Уваров, А. Б. Ермаков, А. Н. Выставкин. Измерение поглощения рефлекторной антенны на терагерцовых частотах методом сбалансированного радиометра. Журнал технической физики. 2011. Т. 81. В. 11. С. 112-121. <http://journals.ioffe.ru/itf/2011/11/p112-121.pdf>
3. A. Kuzmin, S. V. Shitov, A. Scheuring, J. M. Meckbach, K. S. Il'in, S. Wuensch, A. V. Ustinov, M. Siegel. Development of TES Bolometers with High-Frequency Readout Circuit. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – January 2013. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/THZ.2012.2236148>
4. А. А. Кузьмин, С. В. Шитов, А. В. Устинов. Анализ работы болометра на границе сверхпроводящего перехода с использованием СВЧ считывания. 2014. Журнал технической физики. 2014. Т. 84. №1. С. 139-144
5. A.A. Kuzmin, S. V. Shitov, A.V. Ustinov. Analysis of Bolometer Operation near the Superconducting Transition Edge Using Microwave Readout Technical Physics, 2014, V. 59. No. 1, P. 137–142. Pleiades publishing 2014
6. S. V. Shitov, N. N. Abramov, A. A. Kuzmin, M. Merker, M. Arndt, S. Wuensch, K. S. Ilin, E. V. Erhan, A. V. Ustinov, M. Siegel. Wide-Range Bolometer with RF Readout TES, IEEE Transactions on Applied Superconductivity 12/2014; 25(3). DOI:10.1109/TASC.2014.2385090
7. Ilin, E. V. Erhan, A. V. Ustinov, and M. Siegel. Wide-Range Bolometer With RF Readout TES. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3 (2015)
8. Kuzmin A. A., Merker M., Wuensch S. H., Siegel M., Semenov A. D., Shitov S. V., Ustinov A. V. Superconducting noise bolometer with microwave bias and readout for array applications. Applied Physics Letters. Т. 111. № 4. С. 042601 (2017)
9. A. V. Merenkov, V. I. Chichkov, A. B. Ermakov, A. V. Ustinov, S. V. Shitov. Progress in Development of the superconducting bolometer with microwave bias and readout. IEEE Transactions on Applied Superconductivity JUNE. 2017, V. 27(4), pp. 1-5 ISSN: 1051-8223 Online ISSN: 1558-2515 DOI: 10.1109/TASC.2017.2655507 (2017)
10. Шитов С. В. Камера дистанционного температурного контроля. Патент на полезную модель RU 188418 26.12.2018 (2018)
11. Меренков А.В., Шитов С.В., Чичков В.И., Ермаков А.Б., Ким Т.М., Устинов А.В. Сверхпроводящий резонатор с микромостиком из гафния при температурах 50-350 мК. Письма в журнал технической физики. Т.44, No.13, С.59-67 (2018) DOI: 10.21883/PJTF.2018.13.46328.17149
12. Merenkov A. V., Shitov S. V., Chichkov V. I., Ermakov A. B., Kim T. M., Ustinov A. V. A Superconducting Resonator with a Hafnium Microbridge at Temperatures of 50–350 mK. Technical Physics Letters, V. 44, No. 7, p. 581–584. ISSN 1063-7850 Pleiades Publishing, Ltd. (2018) DOI:10.1134/S106378501807012X
13. Меренков А. В., Чичков В. И., Ермаков А. Б., Устинов А. В., Шитов С. В. (Merenkov A.V., Chichkov V.I., Ermakov A.B., Ustinov A.V., Shitov S.V.) Superconducting RFTES Detector at Milli-Kelvin Temperatures, IEEE Trans. Appl. Supercond, 2018 Vol. 28, Issue 7, id. 282798110/2018, DOI: 10.1109/TASC.2018.2827981 (2018 г.)
14. Меренков А.В., Чичков В.И., Устинов А.В., Шитов С.В. (Merenkov A.V., Chichkov V.I., Ustinov A.V., Shitov S.V.) Analysis of Microwave-Readable RFTES Bolometer, Proceedings of 13th Workshop on Low Temperature Electronics, WOLTE-13, IOP Conf. Series: Journal of Physics (2019) 1182, p. 012009 DOI:10.1088/1742-6596/1182/1/012009 (2019 г.)
15. Меренков А.В., Чичков В.И., Ермаков А.Б., Шитов С.В. Исследование высокочастотного нелинейного импеданса микромостика из гафния для электронной термометрии и детектирования аттоваттных сигналов. Сборник трудов семинара «Актуальные проблемы физики конденсированных сред» 29-30 октября 2019 г. Черноголовка (2019 г.) ISBN 978_5_6040418_3_3. doi:10.26201/ISSP.2019.45.557/XII_FKS.30
16. А. В. Меренков, В. И. Чичков, А. Б. Ермаков, А. В. Устинов, С. В. Шитов. Микромостик из гафния в планарном СВЧ резонаторе для измерения электронного разогрева аттоваттного уровня. Нанозифика и наноэлектроника. Труды XXIV Международного симпозиума (Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.) В 2 т. Том 1. С.87-88 — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2020. — 469 с. ISBN 978-5-91326-587-6 <https://nanosymp.ru/ru/archive> (2020)
17. Ким Т.М., Шитов С.В. Сверхпроводящий источник шума для сверхнизких температур. Письма в журнал технической физики (2021) Онлайн: <https://journals.ioffe.ru/articles/51791> DOI:10.21883/PJTF.2021.24.51791.18897
18. Патент РФ на полезную модель (RU 188418 U1). Камера дистанционного температурного контроля. С. В. Шитов. Приоритет от 26.12.2018. https://yandex.ru/patents/doc/RU188418U1_20190411
19. Патент РФ на изобретение №2749796. Устройство для соединения фланцев. Вдовин В. Ф., Корчагин В. В., Мансфельд М. А., Шитов С. В. Приоритет от 26.10.2020
20. Патент РФ на изобретение (RU 2 757 756 C1). Сверхпроводящий источник термодинамического шума. С. В. Шитов, Т. М. Ким. Приоритет от 20.04.2021.
21. Патент РФ на изобретение (RU 2 757 858 C1). Сверхпроводящий источник высокочастотного шума. С. В. Шитов, Т. М. Ким. Приоритет от 21.04.2021.
22. А. В. Меренков, Т. М. Ким, В.И. Чичков, С. В. Калинин, С.В. Шитов. Сверхпроводящий болометрический детектор с высокочастотным считыванием при температуре 400 мК. Физика твердого тела. Т.64, №10. С.1404-1411 (2022) DOI:10.21883/FTT.2022.10.53081.50NH
23. Ким Т.М., Меренков А.В., Ермаков А.Б., Соломатов Л.С., Чичков В.И., Шитов С.В. Устройства и методы измерения параметров RFTES-болометра. Журнал технической физики (2023) Т.7, С.995 DOI:10.21883/JTF.2023.07.55759.117-23
24. Шитов С.В. Активный сверхпроводящий терагерцовый детектор. Журнал технической физики. Т. 7, С. 988 (2023) DOI: 10.21883/JTF.2023.07.55758.116-23
25. Патент РФ №2801961 "Активный сверхпроводящий детектор", Шитов Сергей Витальевич, заявка №2022134753 от 28 декабря 2022. Дата регистрации 21 августа 2023 г.
26. Патент РФ №2801920 "Дифференциальный сверхпроводящий детектор". Шитов Сергей Витальевич, заявка №2022134754 от 28 декабря 2022. Дата регистрации 18 августа 2023 г.
27. Yu. Balega, O. Bolshakov, A. Chernikov, A. Gunbina, V. Edelman, M. Efimova, A. Eliseev, A. Krasilnikov, I. Lapkin, I. Lesnov, M. Mansfeld, M. Markina, E. Pevzner, S. Shitov, A. Smirnov, M. Tarasov, N. Tyatushkin, A. Vdovin, V. Vdovin. Development of Cryogenic Systems for Astronomical Research. Photonics 2024, 11, 257. <https://doi.org/10.3390/photonics11030257>
28. С.В.Шитов, Т.М.Ким, Л.С.Соломатов, Н.Ю.Руденко, А.В.Меренков, А.Б.Ермаков, В.И.Чичков. Прогресс технологии RFTES-детекторов. Журнал технической физики, 2024, том 94, вып. 7, С. 1060-1070, DOI:10.61011/JTF.2024.07.58341.168-24
29. Л.С.Соломатов, А.В.Меренков, С.В.Шитов. Теоретическое исследование автоколебаний в RFTES-детекторе. Физика твердого тела, 2024, том 66, вып. 6
30. L.S.Solomatov, A.V.Merenkov, S.V.Shitov. Theoretical study of self-oscillations in the RFTES detector. Physics of the Solid State, 2024, Vol. 66, No. 6, p. 806-812 DOI:10.61011/PSS.2024.06.58689.2HH
31. S.V.Shitov, T.M.Kim, L.S.Solomatov, N.Yu.Rudenko, A.V.Merenkov, A.B.Ermakov, V.I.Chichkov. Progress of RFTES detector technology. Technical Physics, 2024, Vol. 69, No. 7, p. 987-996 DOI:10.61011/TP.2024.07.58802.168-24

Спасибо за
внимание!