

# ИСТОЧНИКИ ШУМА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ УСИЛИТЕЛЕЙ И ДЕТЕКТОРОВ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ким Татьяна Михайловна

м.н.с. Лаборатория криоэлектронных систем НИТУ «МИСИС»

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Шитов Сергей Витальевич

# Мотивация

1. Новые болометрические детекторы на основе сверхпроводящего микростика из гафния требуют продвинутых методов измерения
2. Традиционные методы шумовой калибровки мало пригодны для сверхнизких температур, выделяемое тепло ЧТ  $\sim 1$  мВт
3. Традиционные ЧТ трудно модулировать за счет тепловой инерции
4. Тепловая мощность принципиально ниже для микропоглотителя  $\sim 1$  мкВт
5. Калибровка температуры микропоглотителя возможна методом шумовой термометрии на основе дробового шума туннельного перехода

# План

1. Обзор шумовой метрологии
2. Новые концепции сверхпроводящих источников калиброванного шума для сверхнизких температур
3. Разработка и изготовление сверхпроводящих источников шума на основе тонкопленочных технологий
4. Описание сверхнизкотемпературной экспериментальной установки
5. Детали эксперимента, обработка и анализ полученных результатов
6. Заключение

# Введение

- Белый шум – спектр постоянной интенсивности  $S(f) = const$
- Источники белого шума используются как калибраторы мощности

$$P_n = S\Delta f$$

- Источники шума:
  - Газоразрядные (мощные, энергопотребляющие)
  - Термодинамические (флуктуационные, тепловые) токи в металлах

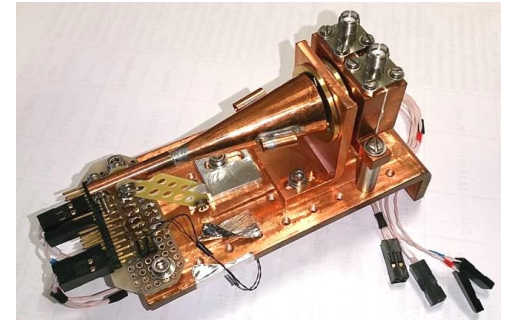
$$P_n = k_B T_n \Delta f$$

Планковский спектр черного тела  $S(f) \neq const$

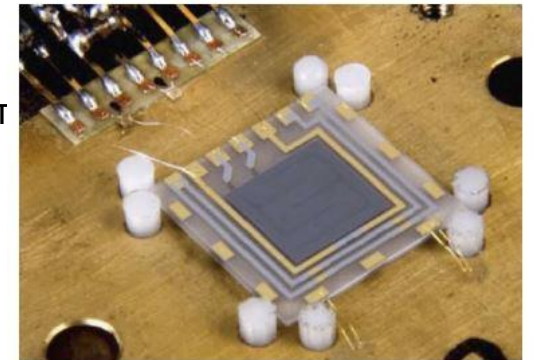
- Дробовой шум (вакуумные и туннельные токи) не зависят от температуры

$$P_{shot} = eIR\Delta f/2$$

- Потенциальные объекты физического эксперимента:
  - Болометры
  - Криогенные усилители



Коническое черное тело и детектор [1]

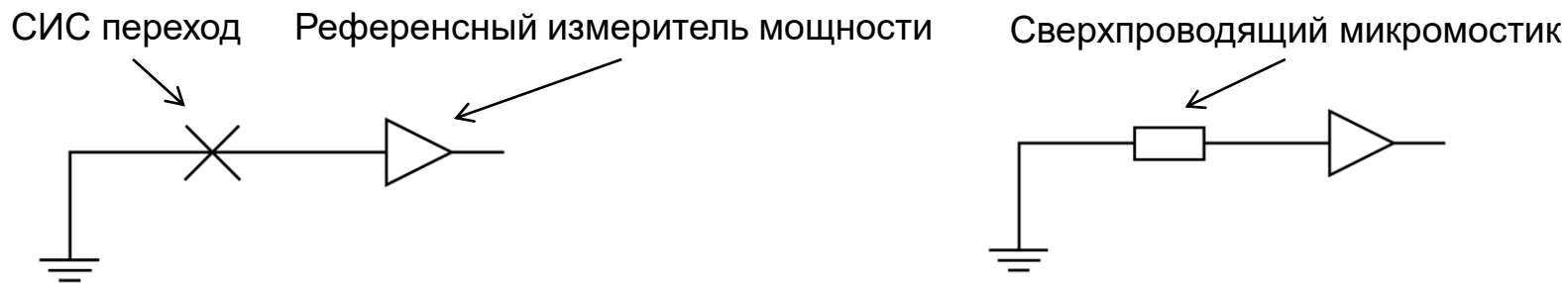


Импульсное планарное тело [2]

[1] S. V. Shitov, N. N. Abramov, A. A. Kuzmin, M. Merker, M. Arndt, S. Wuensch, K. S. Ilin, E. V. Erhan, A. V. Ustinov, and M. Siegel, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3, 2015.

[2] Ph. Abbon, A. Delbart, M. Fesquet, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 575 (3), 412–420 (2007). DOI: 10.1016/j.nima.2007.02.094

# СИС переход и микромостик как источники шума



- Источник дробового шума – туннельный СИС переход в резистивном состоянии
- Сверхпроводящее состояние эквивалентно выключению
- Полоса дробового шума ограничена собственной емкостью туннельного перехода
- Нижний предел шума ограничен снизу щелевым напряжением ВАХ
- Мощность дробового шума *не* зависит от температуры при  $eV \gg k_B T$

$$P_{shot} = eIR\Delta f/2$$

- Эквивалентная температура дробового шума

$$T_{shot} = \frac{P_{shot}}{2k_B\Delta f} = \frac{e}{2k_B}V$$

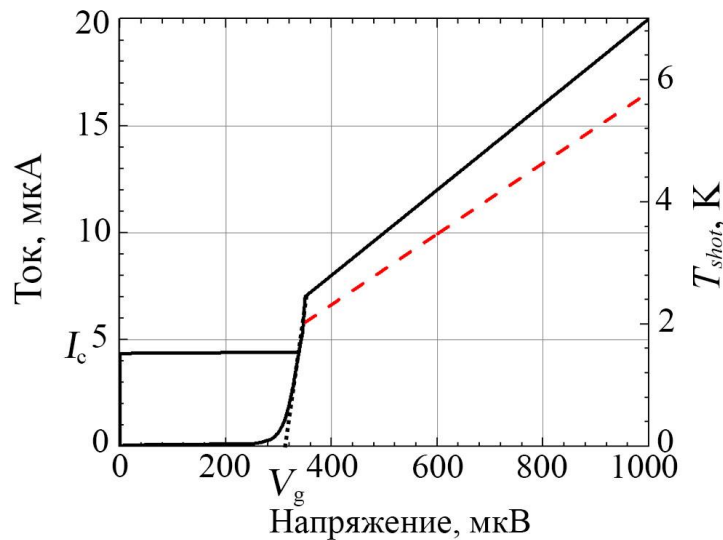
- Источник термодинамического шума – сверхпроводящий микромостик в резистивном состоянии
- Сверхпроводящее состояние эквивалентно выключению
- Термодинамический шум рассматриваем в приближении  $hf \leq k_B T$
- Мощность термодинамического шума

$$P_n = k_B T_n \Delta f$$

- В общем случае применяем формулу Планка для резистора

$$P = \int_{f_1}^{f_2} \frac{hfd f}{\exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1}$$

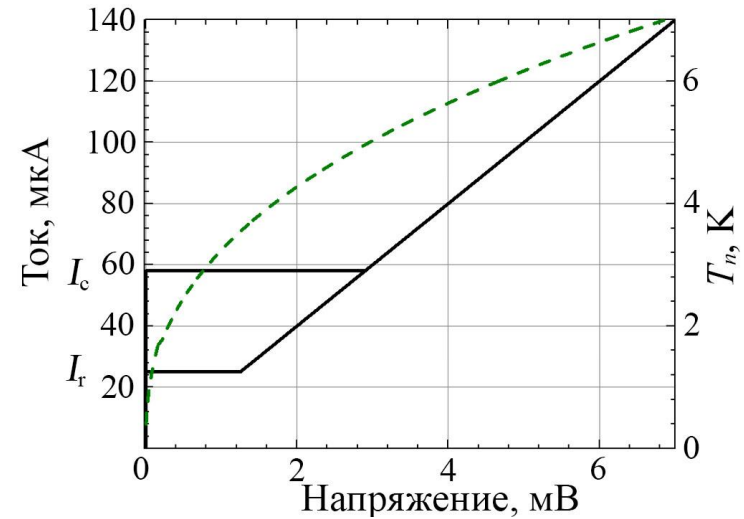
# СИС переход и микромостик как источники шума



Туннельный СИС переход

— ВАХ

- - - Шумовая температура  $T_{shot}$



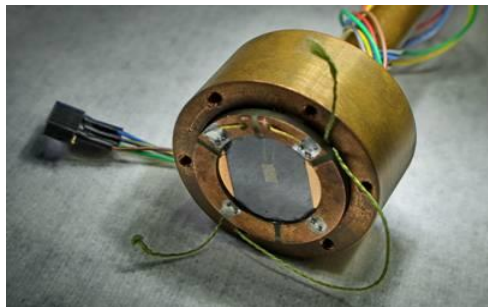
Сверхпроводящий микромостик

— ВАХ

- - - Шумовая температура  $T_n$

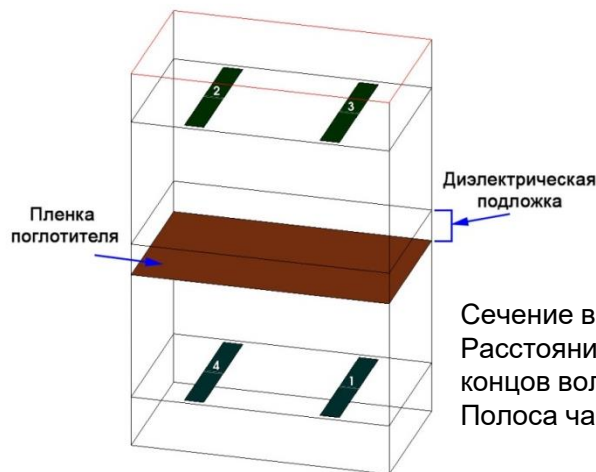
	СИС переход	Микромостик
$R_n$	50 Ом	
min $T_n$	2 К (при $V = 0,35$ мВ)	0,4 К ( $T_c$ Hf)
min $P$	2 нВт	200 нВт ( $I = 60$ мкА)
max $T_n$	9 К (при $V = 1,55$ мВ)	9 К ( $T_c$ Nb)
max $P$	40 нВт	3 мкВт ( $I = 140$ мкА, $G = 10^{-7}$ Вт/м·К [1])

# Модель тонкопленочного (полупрозрачного) поглотителя

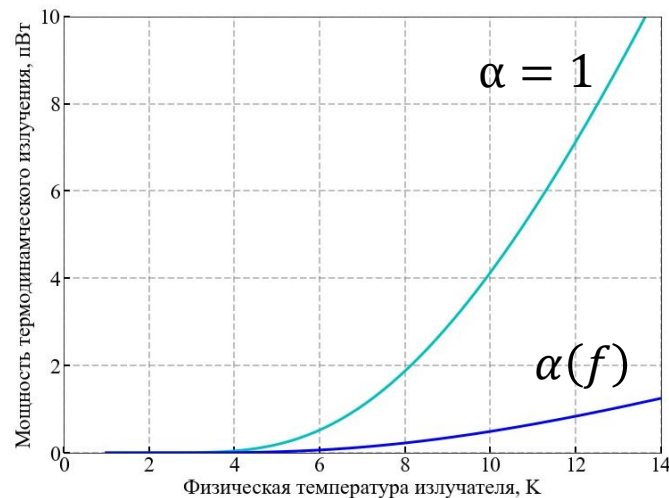
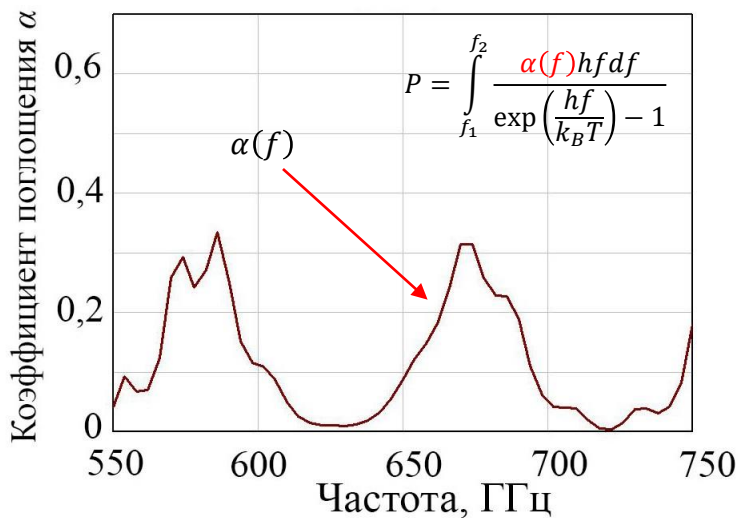


Плоский резистивный излучатель [1]

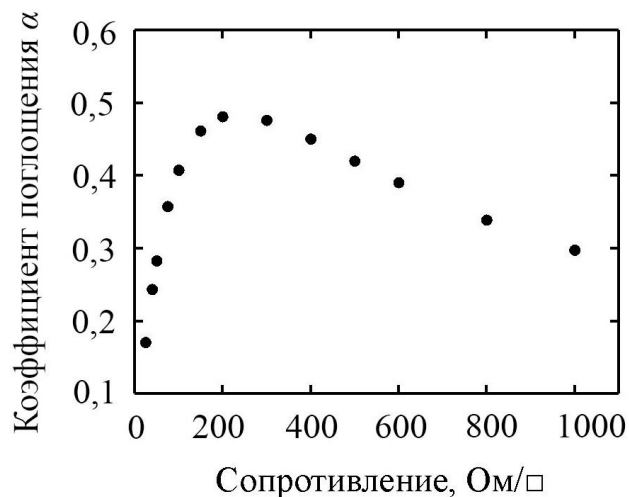
$$P_{\text{ЧТ макс}} = 6,3 \text{ мВт при } R = 1 \text{ кОм, } I = 2,5 \text{ мА}$$



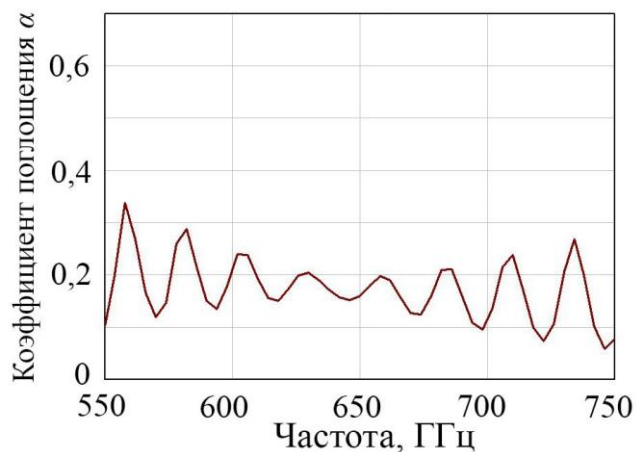
Сечение волновода  $400 \times 240 \text{ мкм}^2$   
 Расстояние до заглушенных концов волновода  $80 \text{ мкм}$   
 Полоса частот  $550\text{--}750 \text{ ГГц}$



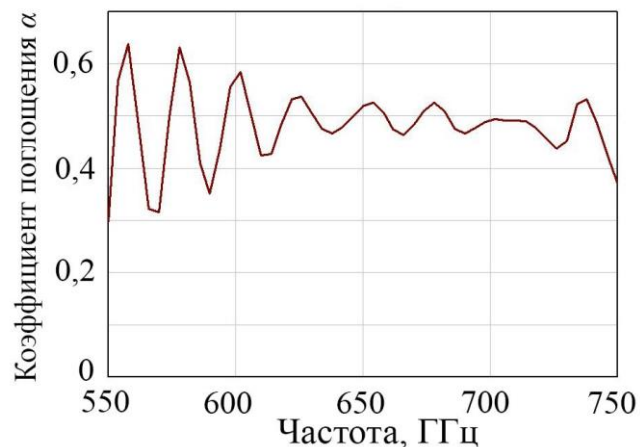
# Поглощение термодинамического источника



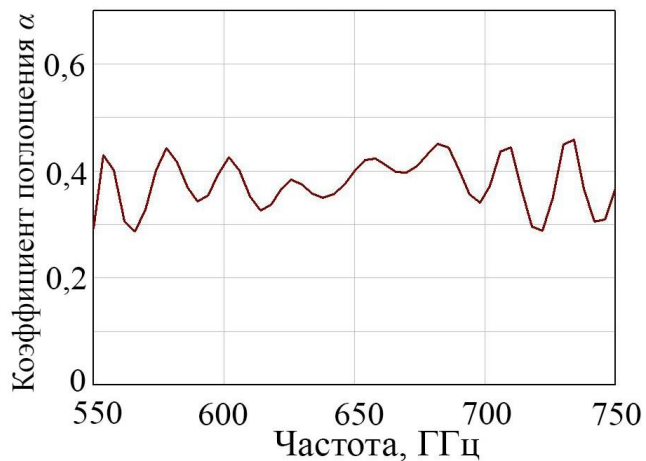
Поглощение пленки, подвешенной в прямоугольном волноводе



Поглощение пленки  $R = 200$  Ом/□ на кварце



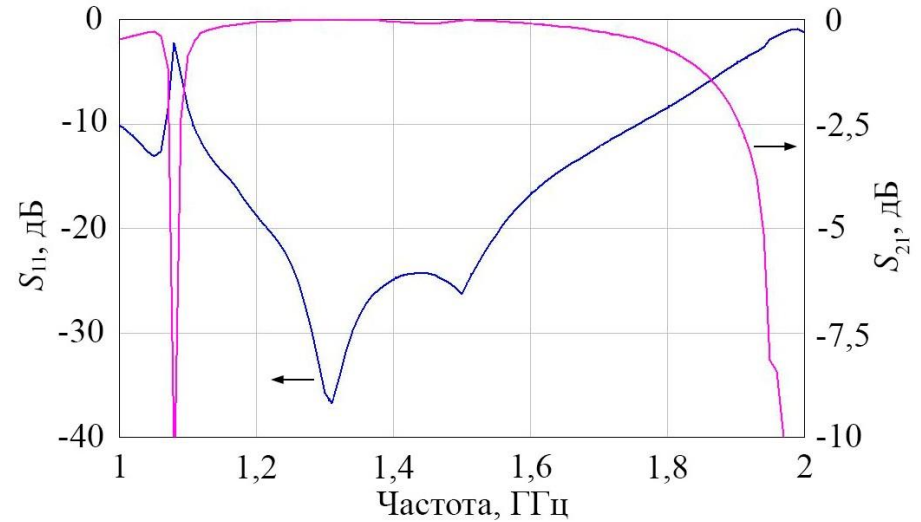
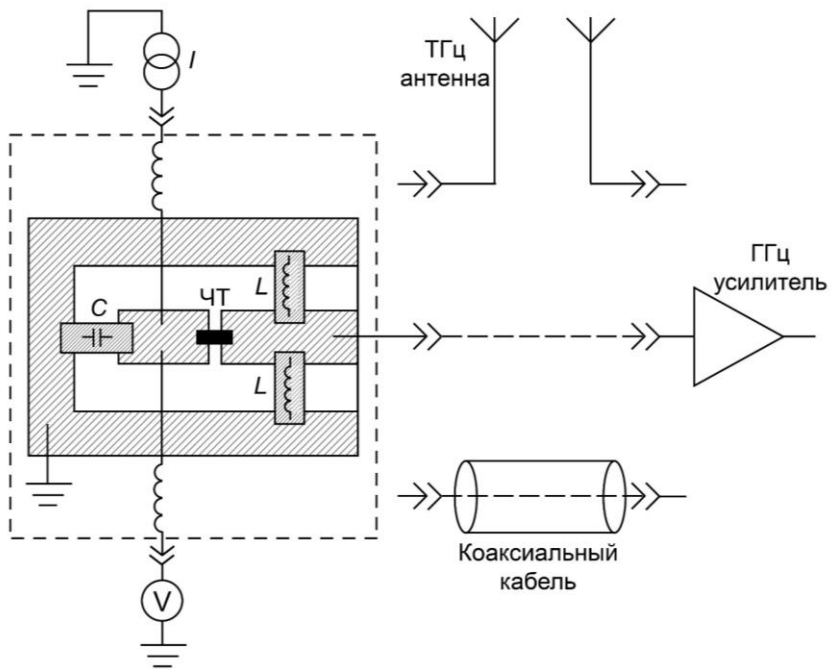
Поглощение подвешенной пленки  $R = 200$  Ом/□



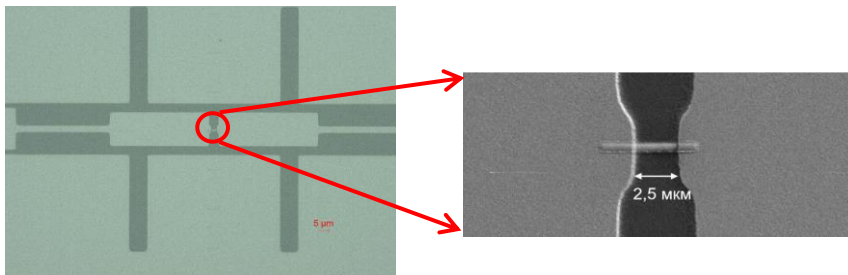
Поглощение двухсторонней пленки  $R = 200$  Ом/□ на сапфире



# Термодинамический источник шума – микромостик: измерение температуры на ГГц, излучение на ТГц



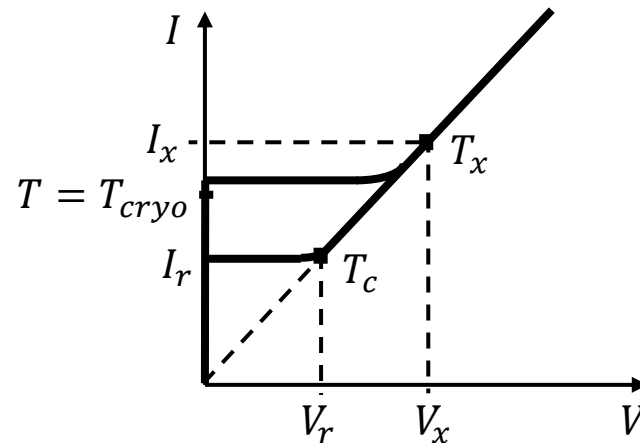
Коэффициенты прохождения и отражения сигнала сверхпроводящего микромостика, нагруженного на вход референсного измерителя мощности



Упрощенная топология чернотельного микроизлучателя – сверхпроводящий мостик из гафния в двухщелевой антенне

Патент №2757756,  
дата приоритета 20.04.2021

# Не существует термометра для локального измерения температуры микромостика: метод теплового гистерезиса



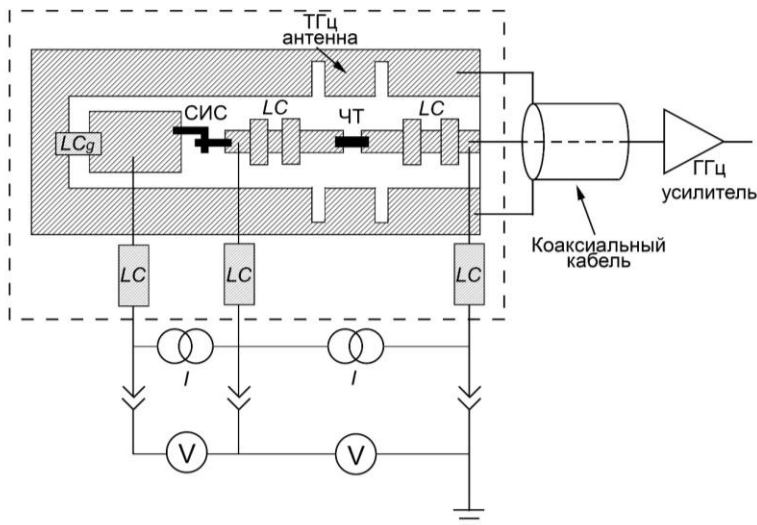
ВАХ сверхпроводящего микромостика

- Мощность при  $T_c$ :  $G(T_{cryo} - T_c) = I_r V_r$
- Теплопроводность микромостика

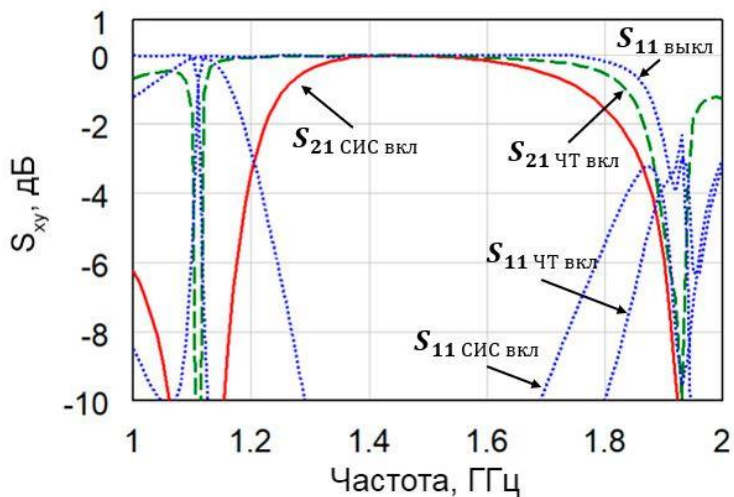
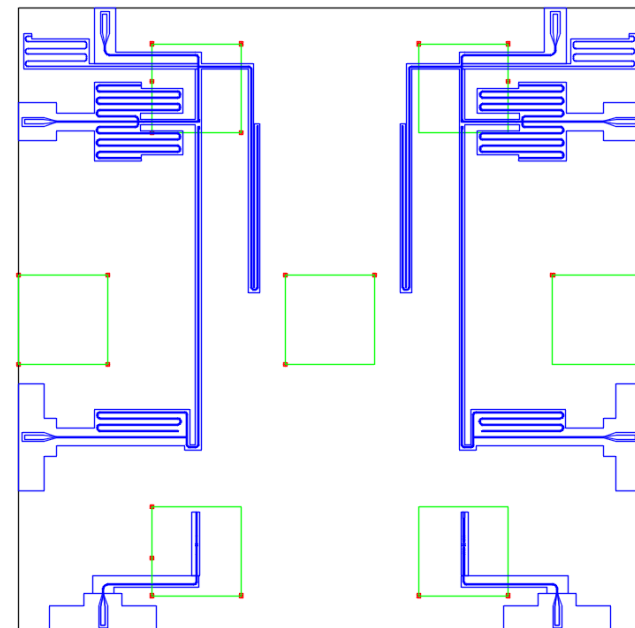
$$G = \frac{I_r V_r}{T_{cryo} - T_c}$$

- Мощность в произвольной точке  $x$ :  $P = G(T_x - T_{cryo}) = I_x V_x$

# Комбинированный источник шума



Упрощенная топология чипа  
 Патент №2757858, дата приоритета 21.04.2021



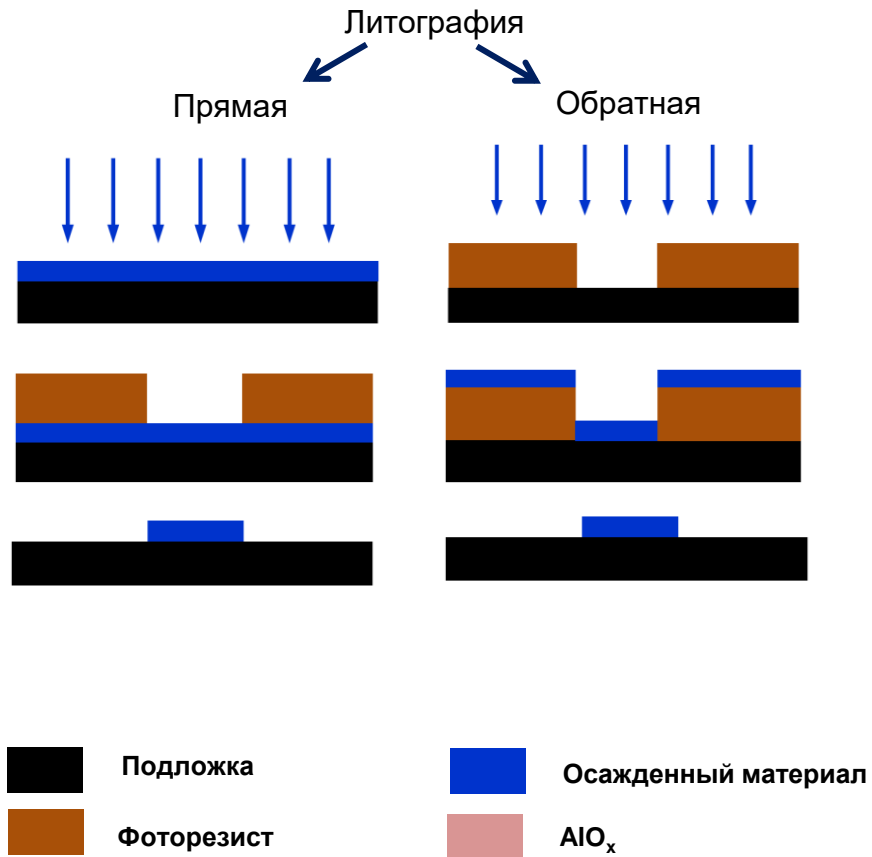
Коэффициенты прохождения и отражения сигнала каждого источника на общий детектор



Практическая топология интегрального устройства в составе излучающей матрицы из 7 пикселей

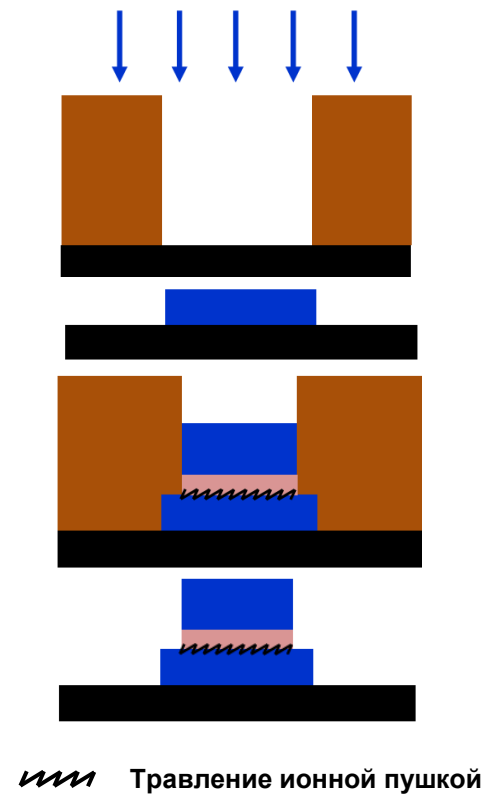
# Методы изготовления экспериментальных образцов

## Изготовление микромостика и электродов



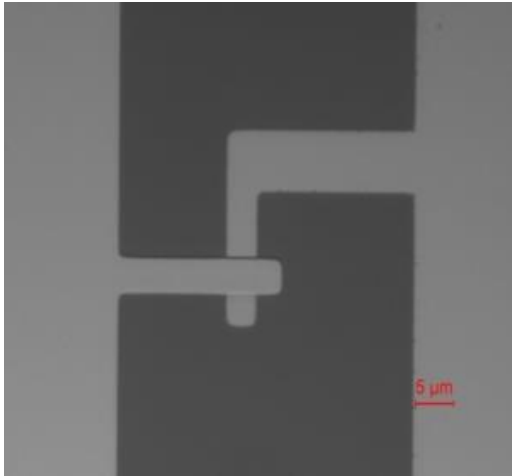
## Изготовление СИС переходов

Метод прямого осаждения с разрывом вакуумного цикла [1]

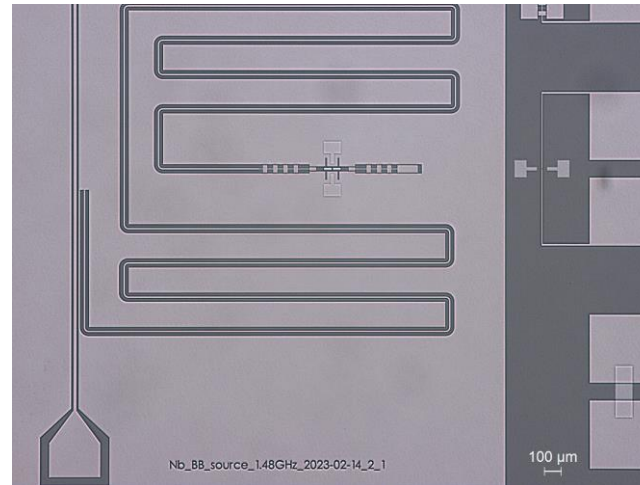


[1] L. Grünhaupt, Uwe von Lüpke, D. Gusenkova, S.T. Skacel, N. Maleeva, S. Schlör, A. Bilmes, H. Rotzinger, A.V. Ustinov, M. Weides, I.M. Pop. Appl.Phys,Lett, 111, 072601, 2017

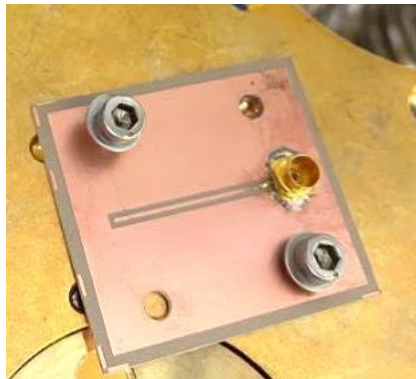
# Экспериментальные структуры



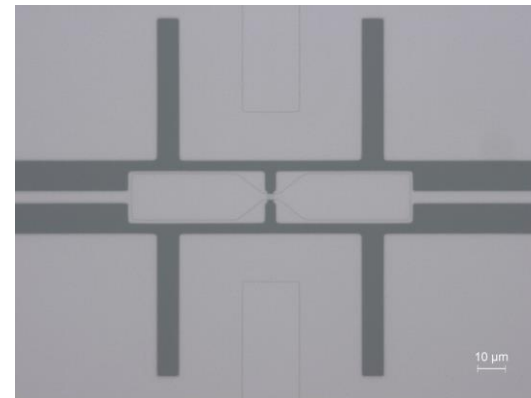
СИС переход  $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$   
 $4 \times 4 \text{ мкм}^2$  для источника дробового шума



Чип термодинамического источника

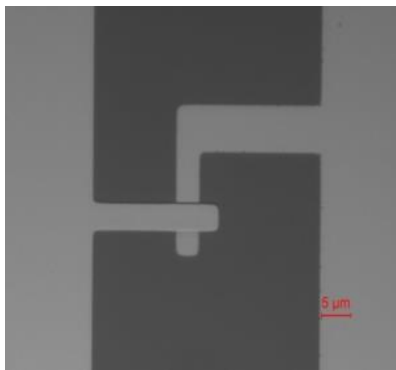


Плата СВЧ ТММ 10 для  
источника дробового шума  
(растрав 17 мкм)

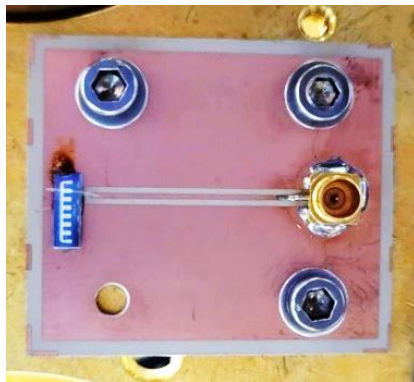


Микромостик в двуцелевой антенне  
детектора/излучателя.  
Размер рабочей части  $2 \times 2 \text{ мкм}^2$

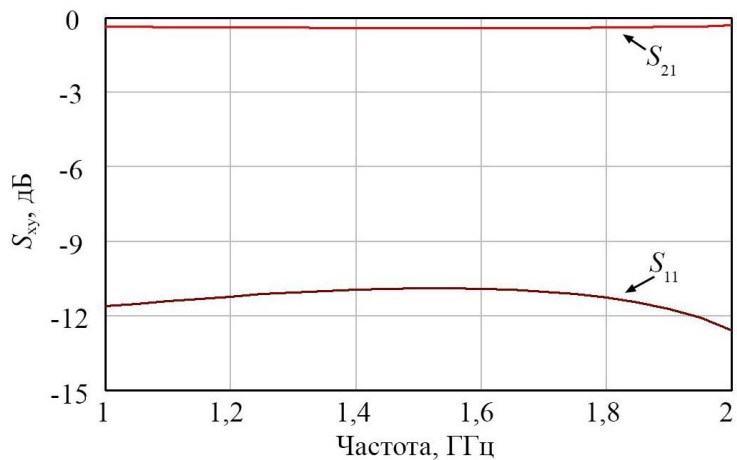
# Источник дробового шума



СИС переход  
Al/AlOx/Al



Согласующая плата с  
установленным чипом СИС



Характеристики согласования СИС перехода на  
плате

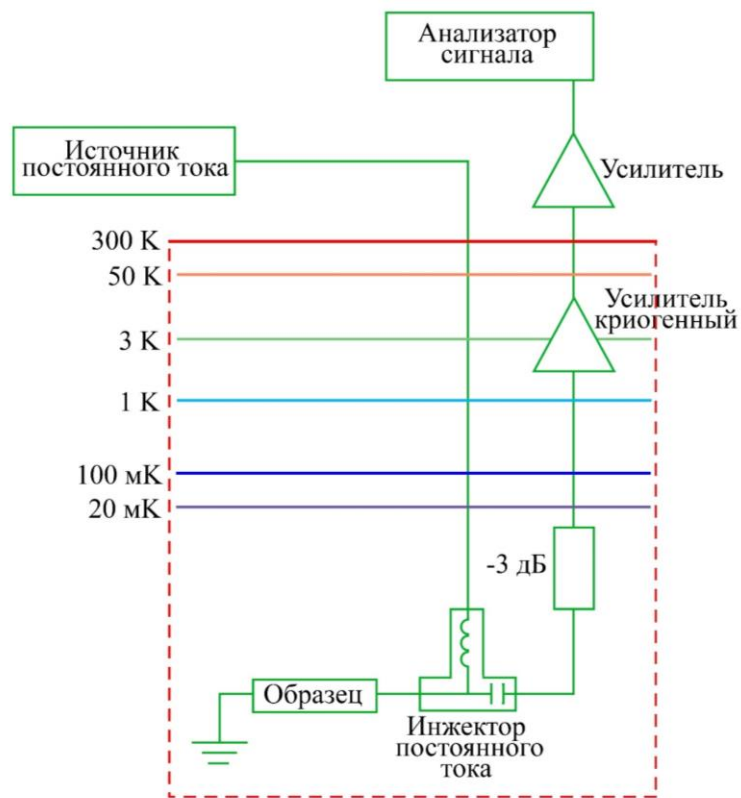
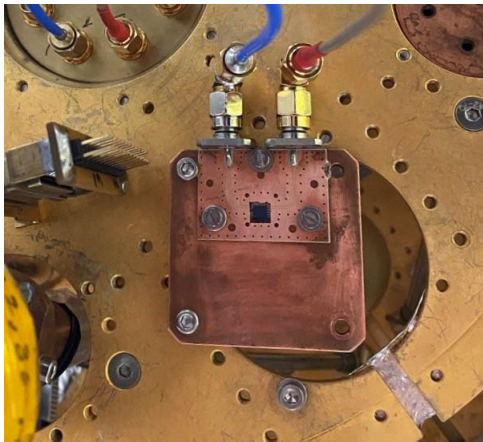
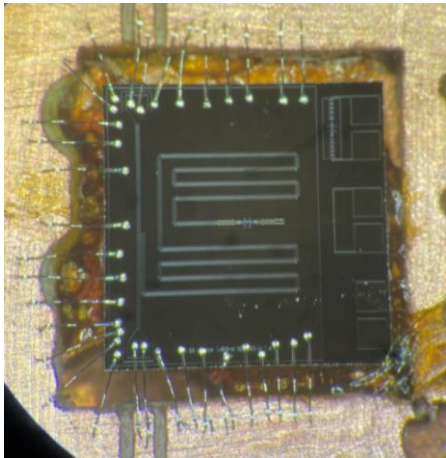


Схема установки для определения шума  
усилителя

# Источник термодинамического шума с микромостиком из ниобия в резонаторе



Монтаж чипа в криостате

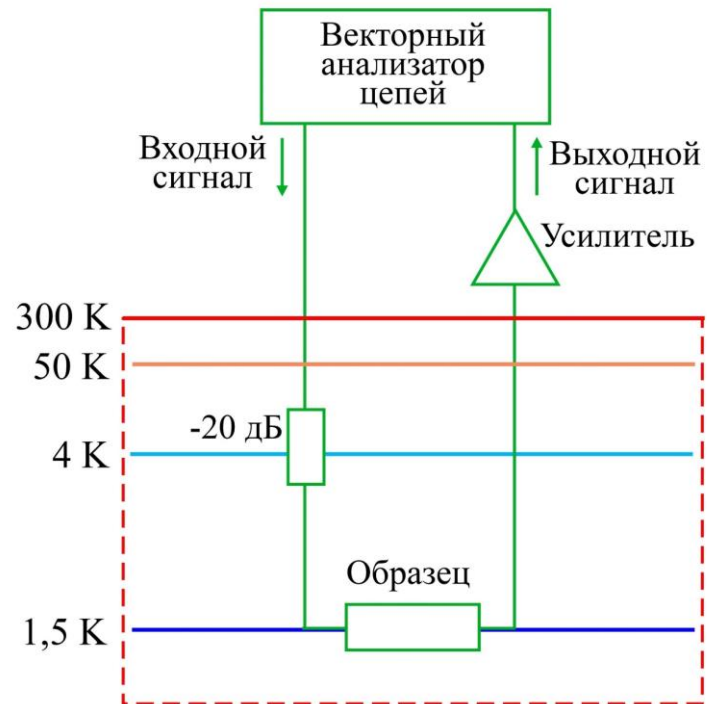
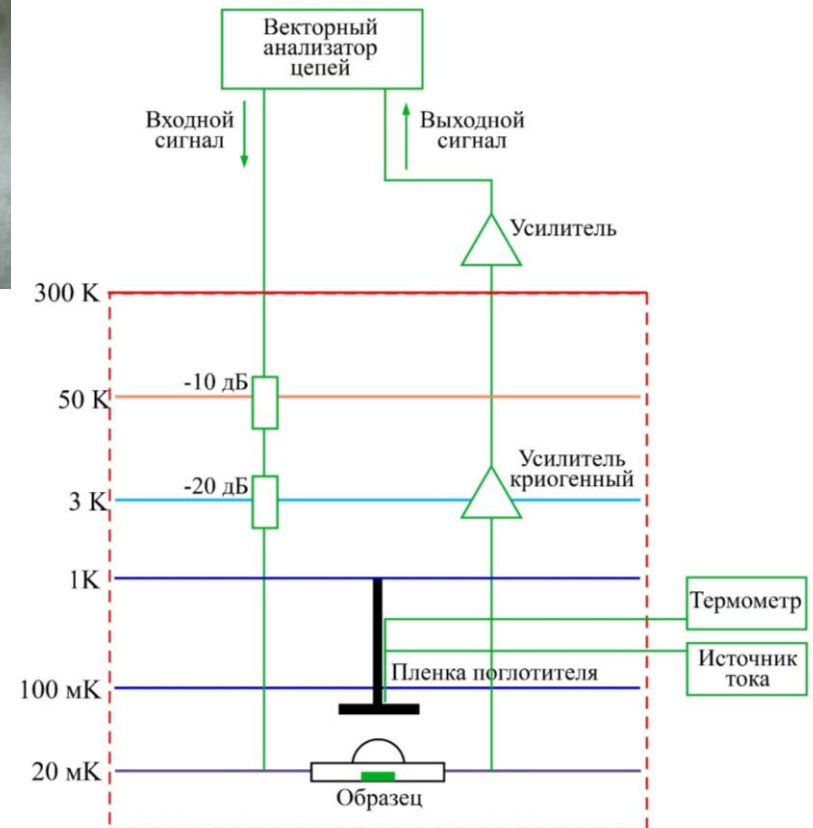
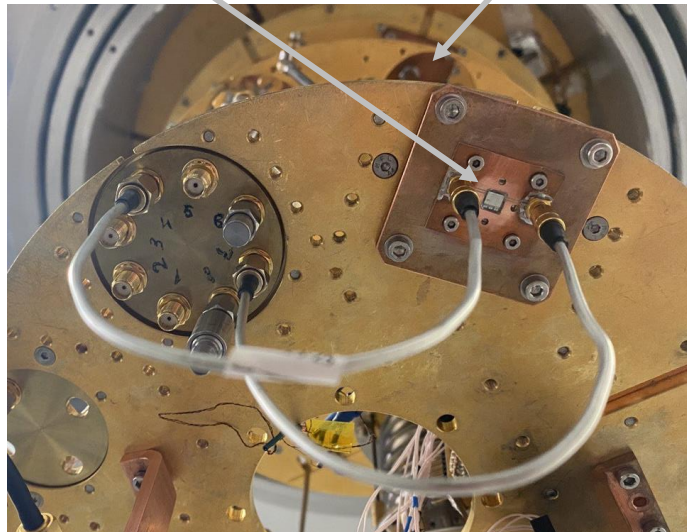
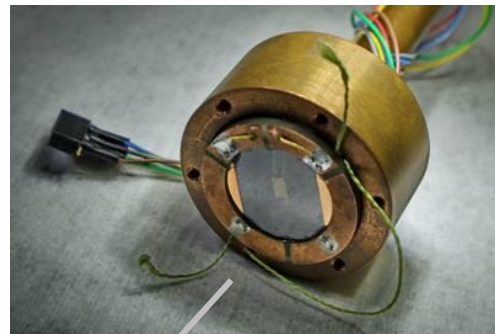
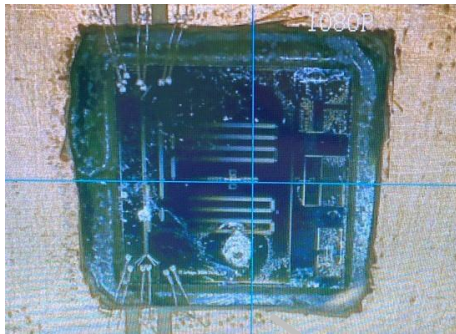


Схема экспериментальной установки

# Детектор RFTES с микромоустиком из гафния и ЧТ, установленные в криостате 30 мК



Установка разработана А.В. Меренков, С.В. Шитов [1]

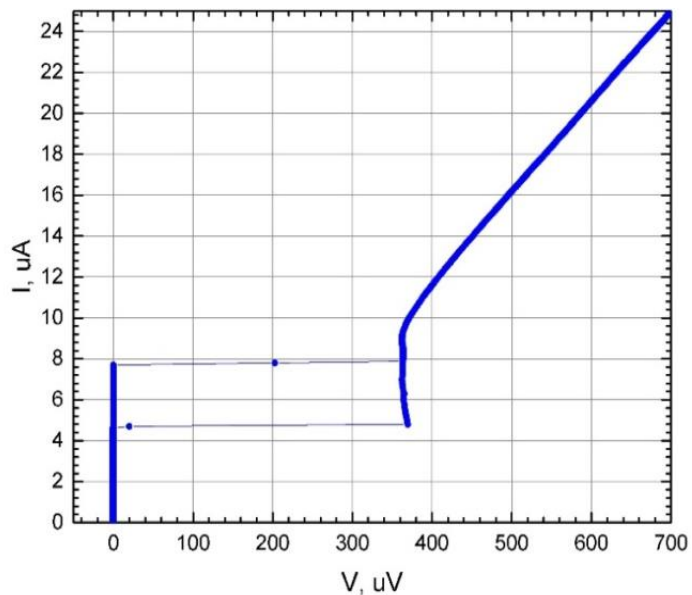
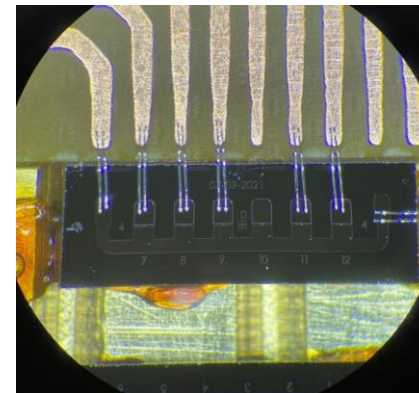


# Вольтамперные характеристики экспериментальных туннельных переходов

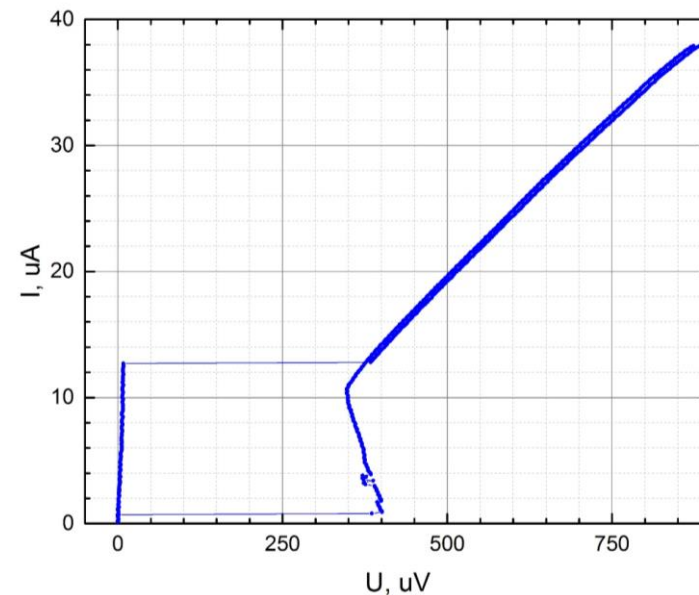
Соотношение Амбегаакер-Баратова  $I_C R_n = \pi \Delta / 2e$

Напряжение щели  $V_g = 2\Delta / e$

Критический ток  $I_C = \pi V_g / 4R_n$

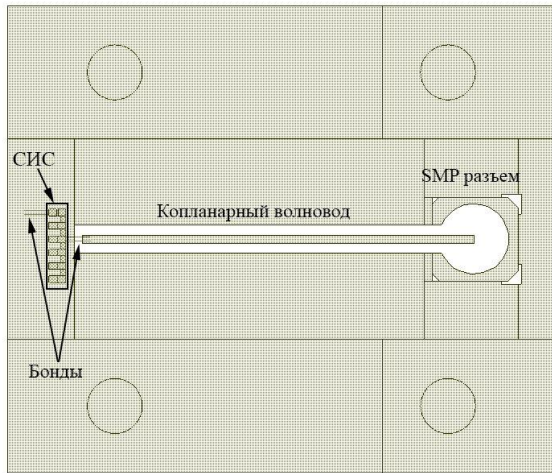


Значение критического тока 8,55 мкА

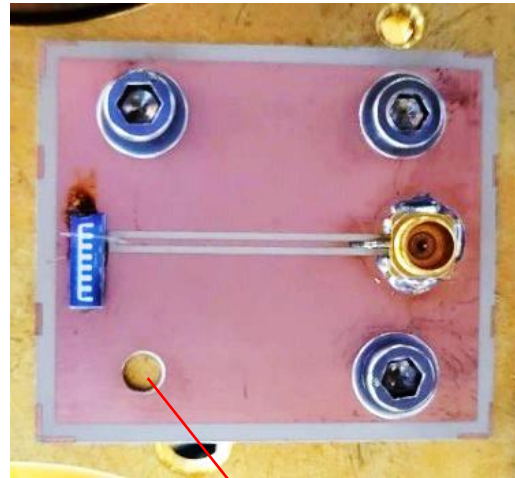


Значение критического тока 13,1 мкА

# Измерение шумов тракта с криогенным усилителем с помощью источника дробового шума



Электродинамическая модель источника дробового шума



$$T_{shot} = eV_{СИС}/2k_B$$

Метод двух отсчетов

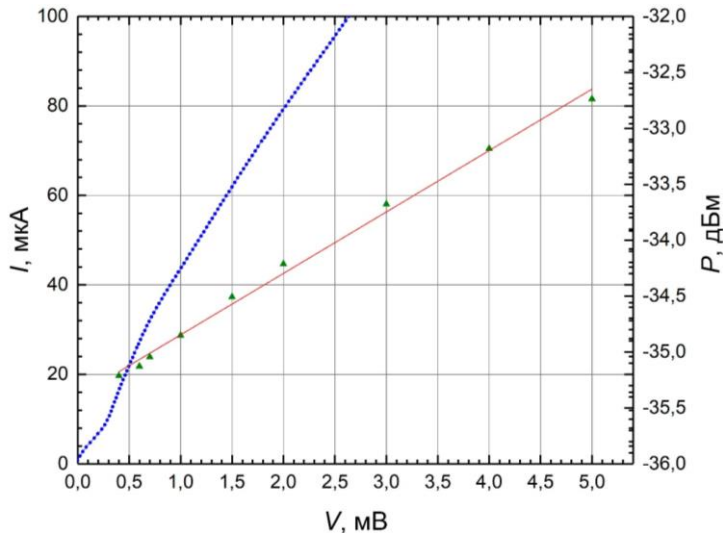
$$T_n = \frac{(T_{hot} - Y T_{cold})}{Y - 1}$$

$$Y = \frac{P_{hot}}{P_{cold}}, Y_{dB} = 10 \lg Y_{lin}$$

$$I_c = 12,37 \text{ мкА}$$

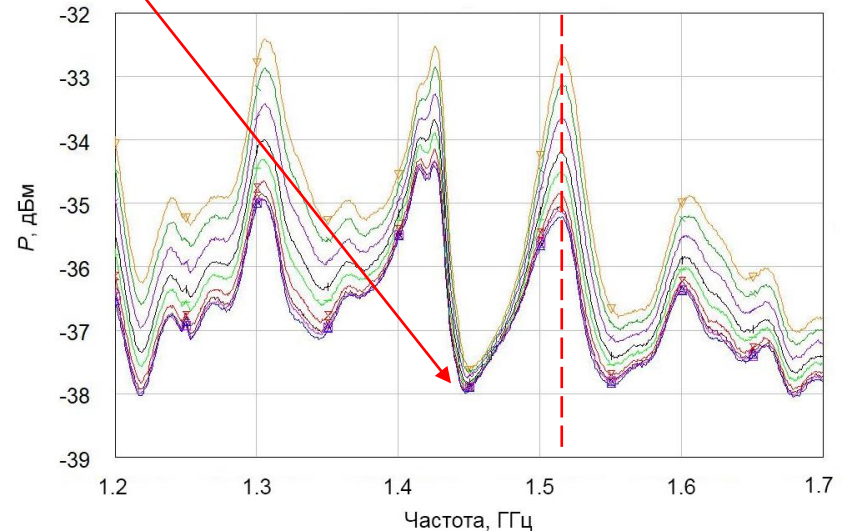
$$T_{shot \min} = 1,97 \text{ К}$$

$$P_n = 4 \text{ нВт}$$



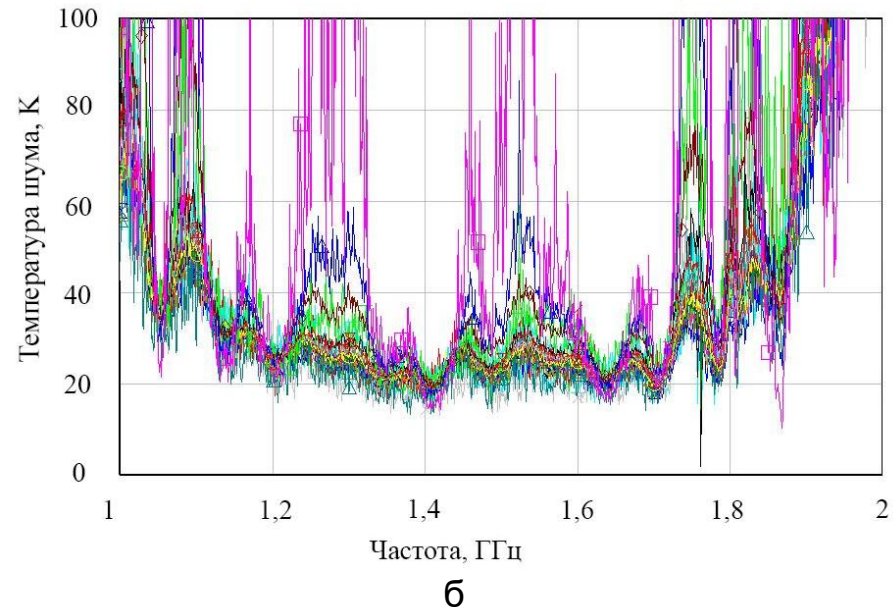
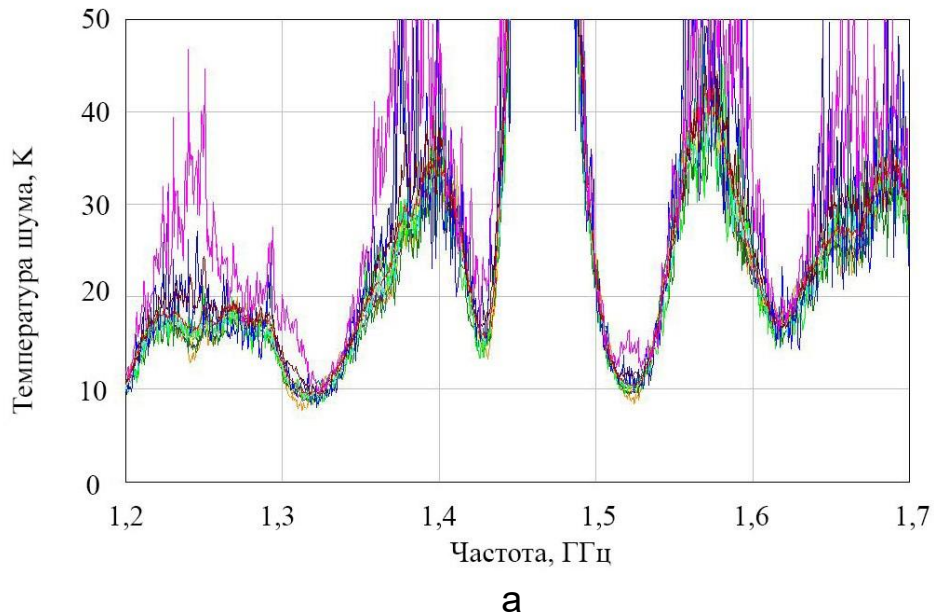
- ..... Вольтамперная характеристика СИС перехода
- ▲— Мощность дробового шума на частоте 1,514 ГГц

Паразитный эффект отсутствующей земли



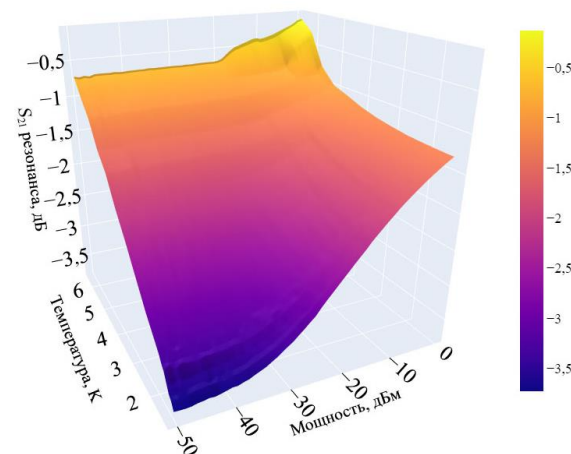
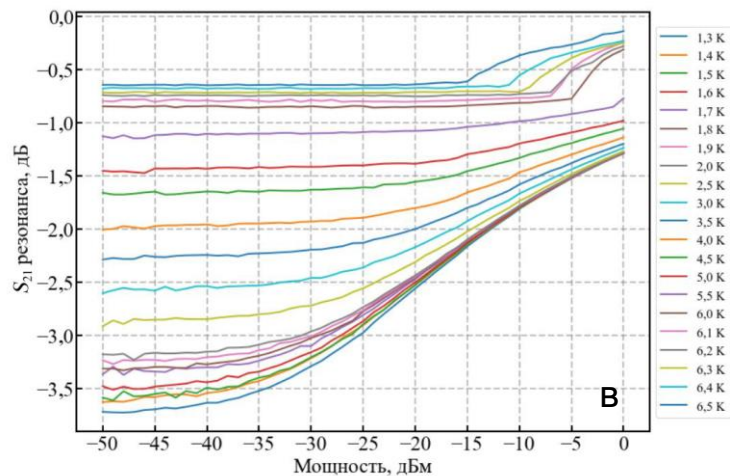
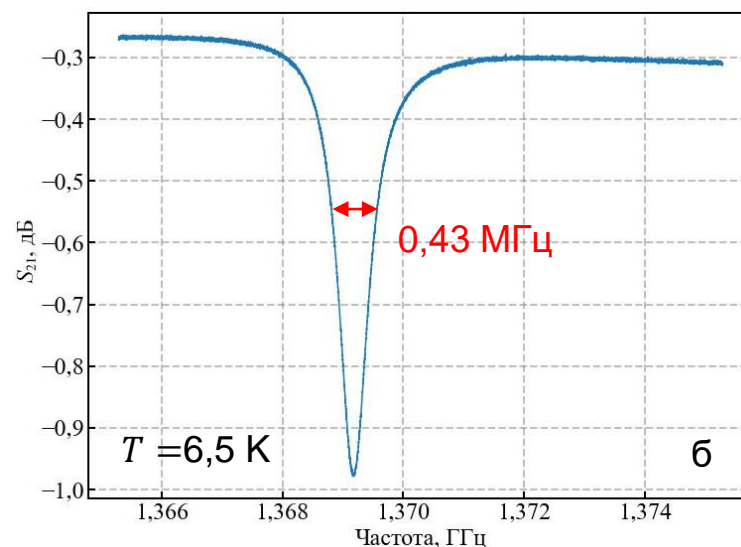
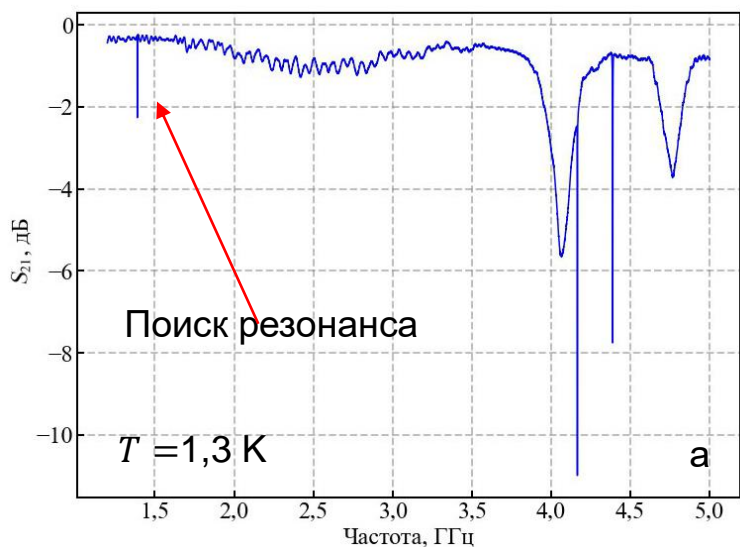
Частотные зависимости мощности дробового шума СИС перехода на выходе усилительной системы при различных напряжениях. Высокая изрезанность означает наличие стоячих волн в тракте между образцом и усилителем

# Измерение шумов тракта с криогенным усилителем с помощью источника дробового шума



Частотные зависимости шумовой температуры усилительной системы  
а) с одним отсутствующим заземлением б) все заземления присутствуют

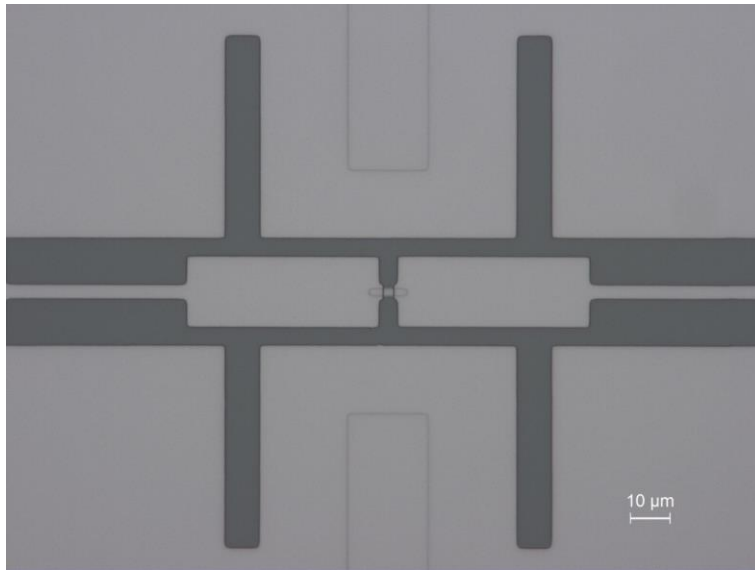
# Исследование микроизлучателя из ниобия с СВЧ разогревом: реперная точка - $T_c$ мостика



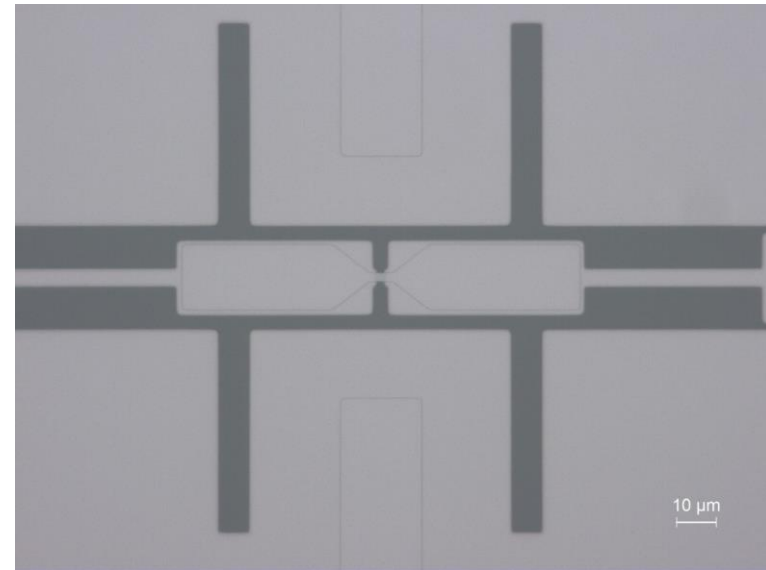
$$G = 7,38 \times 10^{-10} \text{ Вт/К}$$

$$\text{NEP} = 4,04 \times 10^{-16} \text{ Вт}/\sqrt{\text{Гц}}$$

# Топологии структуры микромостика из гафния в антенне



а

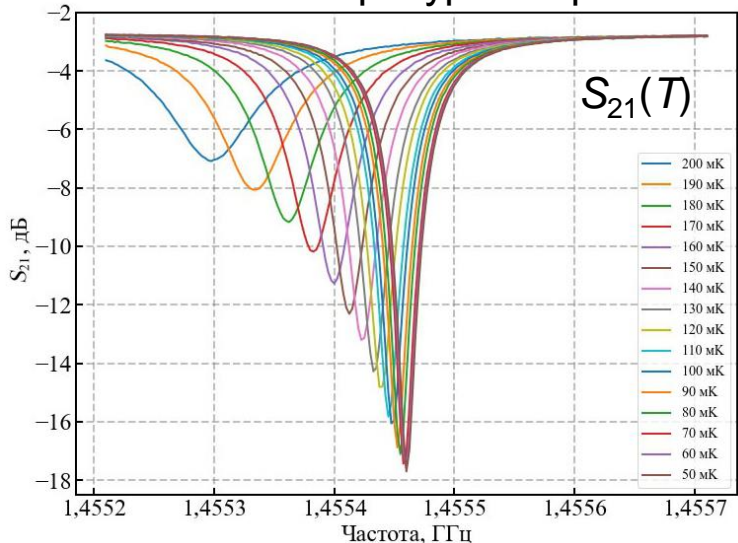


б

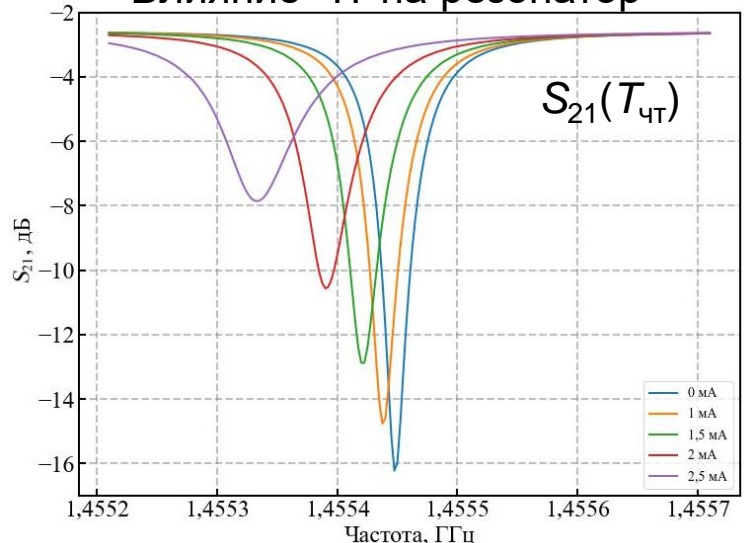
Практическая структура микромостика в двуцелевой антенне  
а) без подслоя; б) с подслоем

# Исследование отклика новой конструкции детектора - микромостика с подслоем из гафния: избыточная кинетическая индуктивность (наблюдалась впервые, задел на будущее)

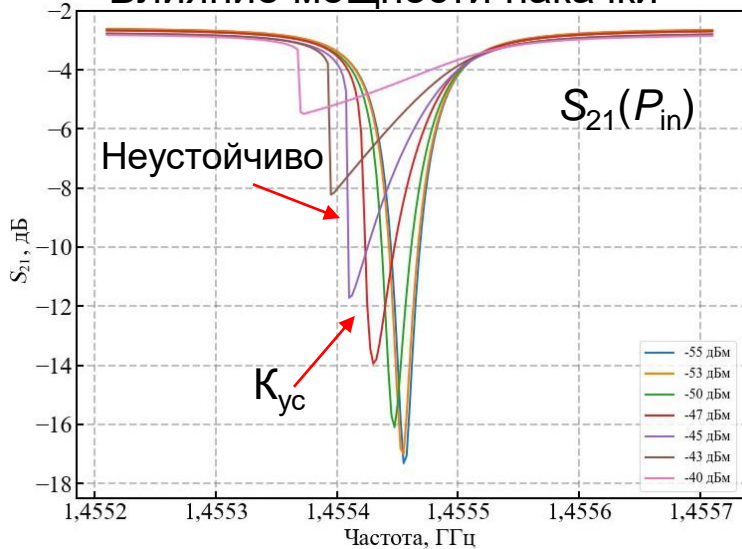
## Влияние температуры на резонатор



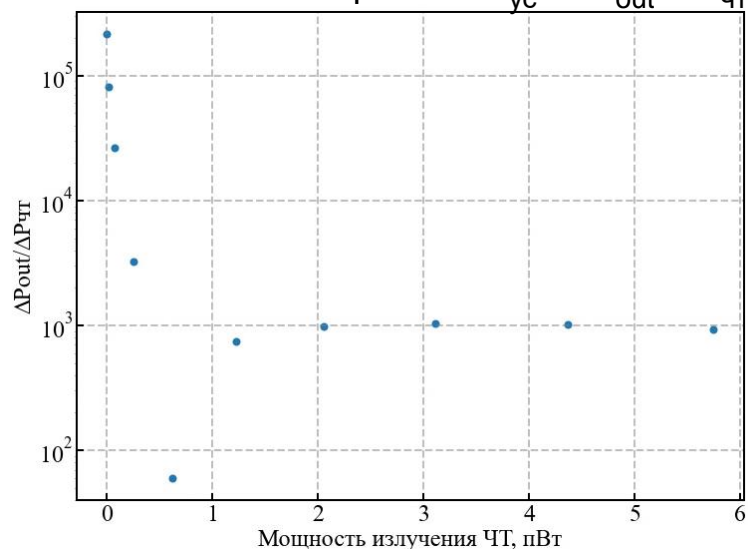
## Влияние ЧТ на резонатор



## Влияние мощности накачки



## Усиление мощности $K_{ус} = \Delta P_{out} / \Delta P_{чт}$



# Заключение

1. Кардинальное снижение тепловыделения и повышение быстродействия термодинамического излучателя оптического типа достигается при использовании микроразмерного пленочного поглотителя, интегрированного с планарной линзовой антенной, что делает такой излучатель эффективным инструментом для тестирования (калибровки шума) чувствительных цепей при сверхнизких температурах  $\sim 30$  мК.
2. Резистивная пленка на поверхности диэлектрической подложки является термодинамическим излучателем оптического типа с максимальным коэффициентом черноты около 50%, физическая температура которого может регулироваться пропусканием постоянного тока непосредственно через пленку поглотителя.
3. Источник дробового шума на сверхпроводящем туннельном переходе является эффективным калибратором для определения термодинамической температуры микроразмерного поглотителя и может быть интегрирован с таким поглотителем в составе единой планарной микросхемы.
4. RFTES болометр может быть использован в качестве термодинамического излучателя с внутренней калибровкой.

**Спасибо за внимание!**