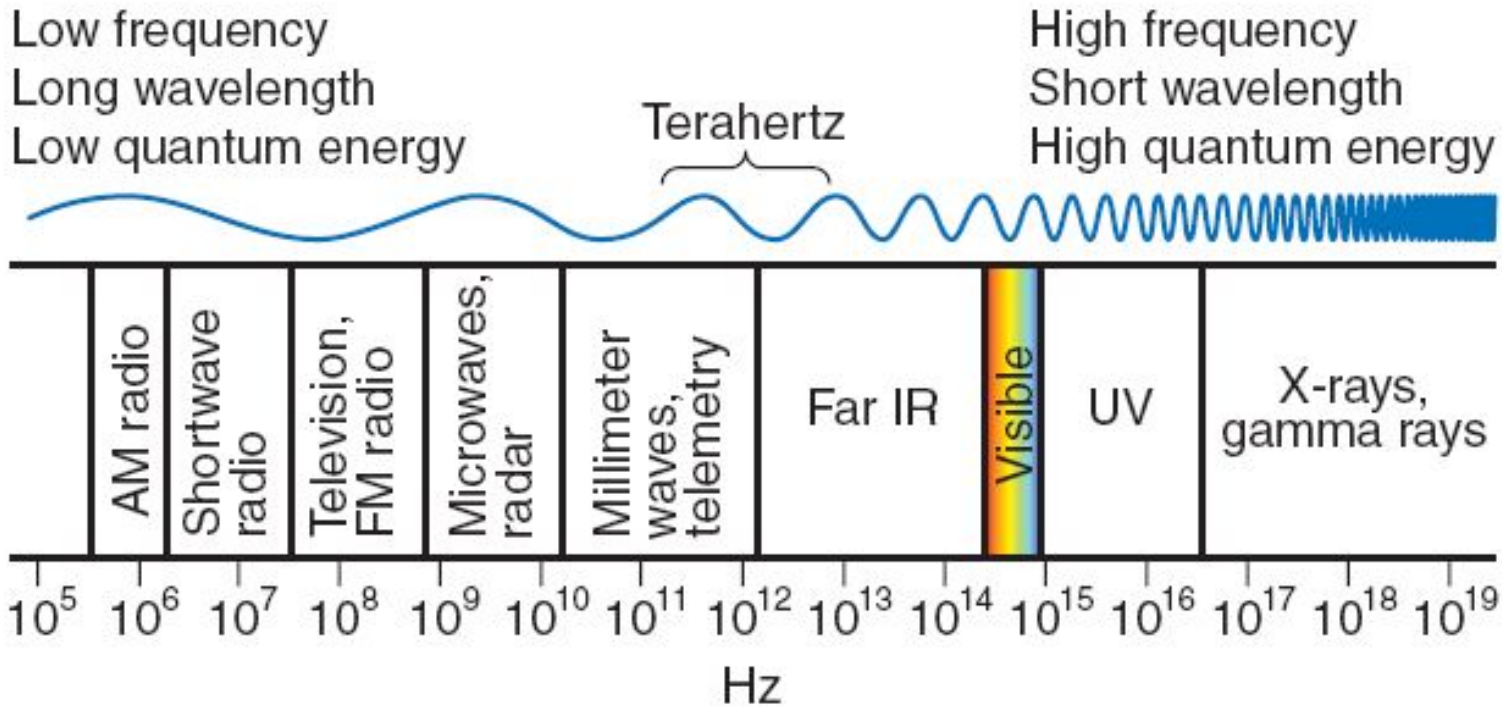


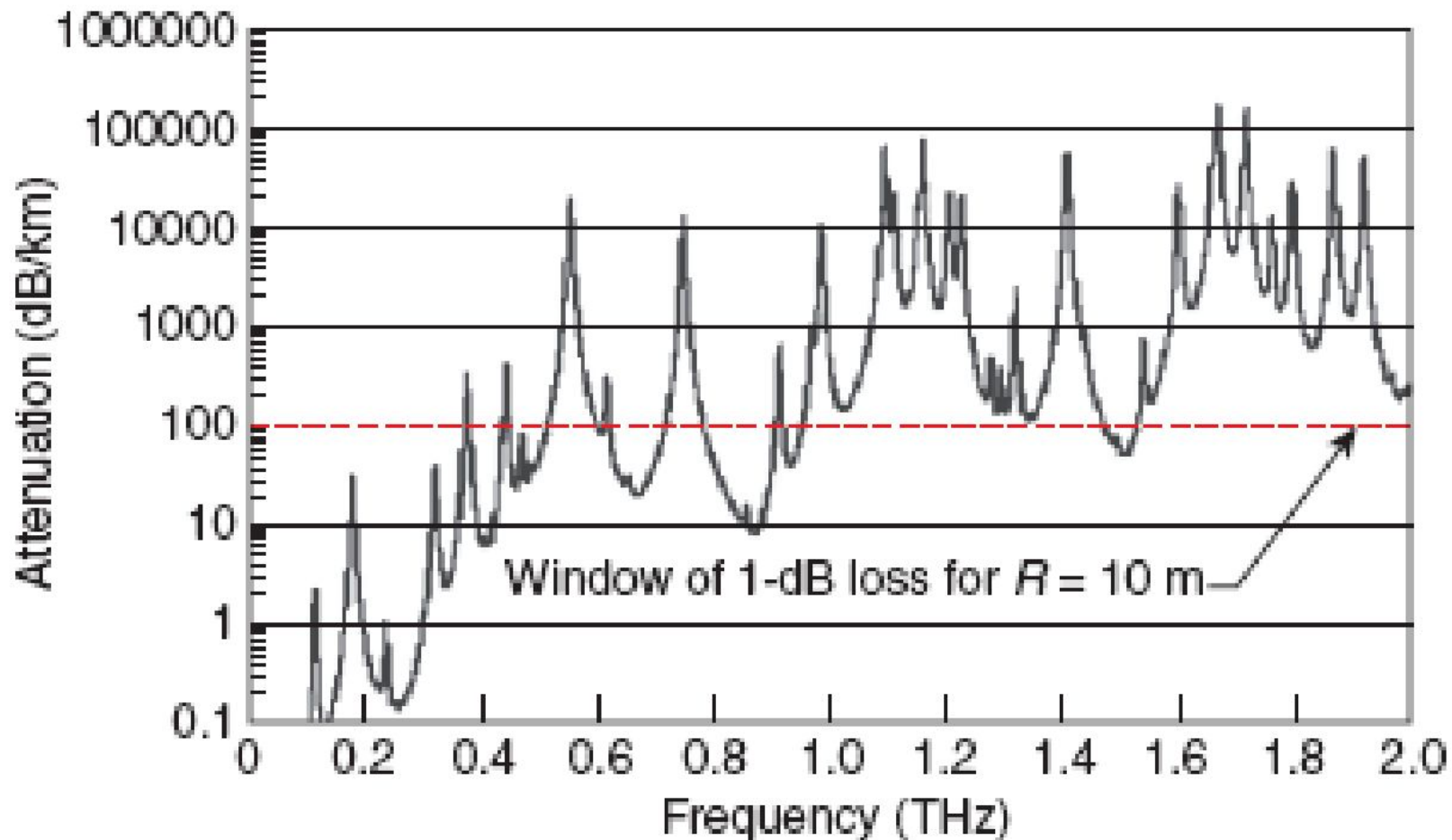
Криогенные детекторы терагерцового диапазона



Frequency (THz)	Wavenumber (cm ⁻¹)	Wavelength (μm)	Energy (meV)	Equivalent temperature (K)
0.1	3.33	3000	0.41	5
1.0	33.3	300	4.1	50
10.0	333	30	41	500
29.7	990	10.1 (CO ₂)	123	
282.0	9,398	1.064 (Nd:YAG)	1160	
474.0	15,797	0.633 (HeNe)	1960	

$$kT = E = \hbar\omega$$

Затухание на уровне моря

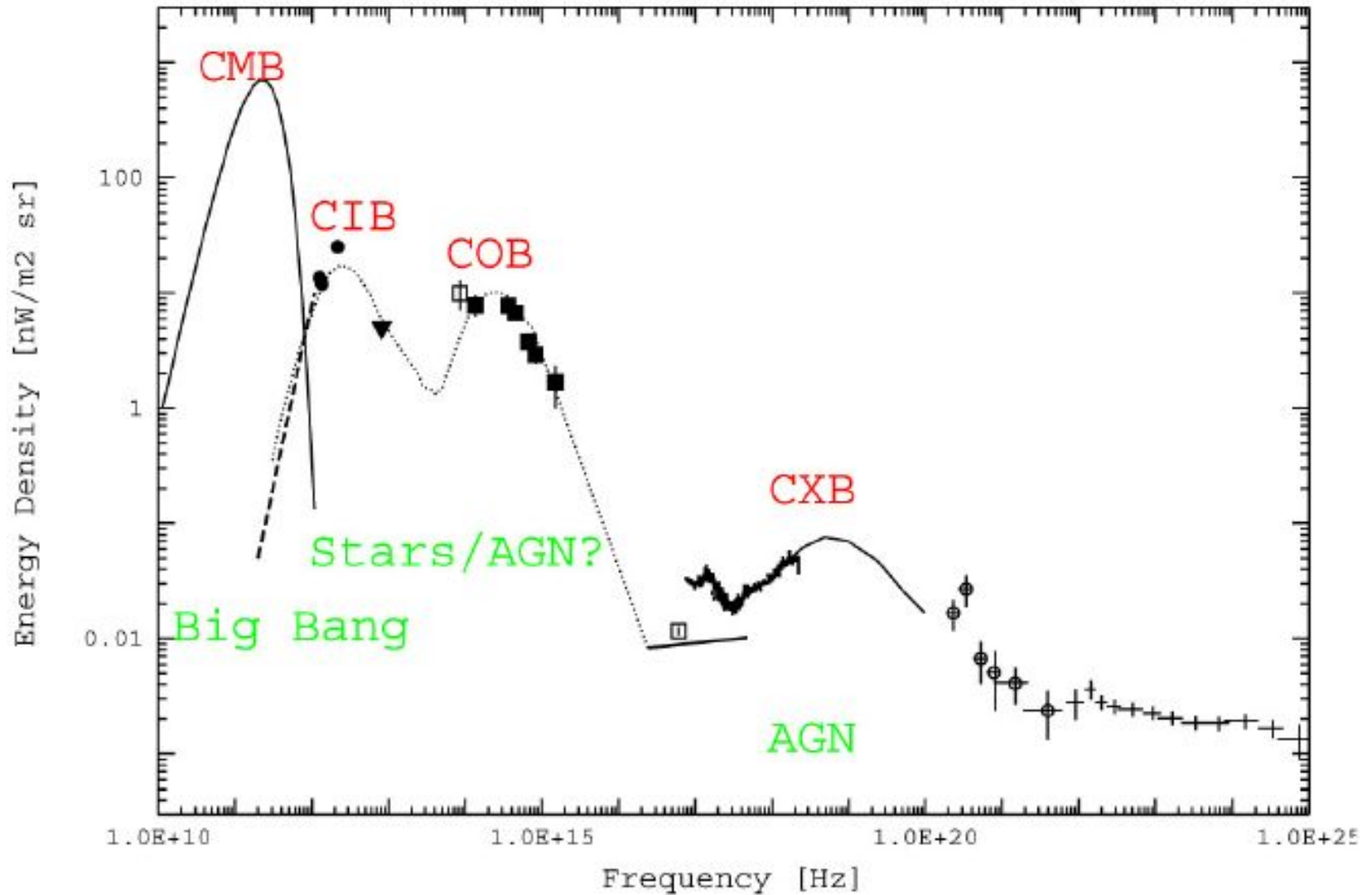


Два семейства методов

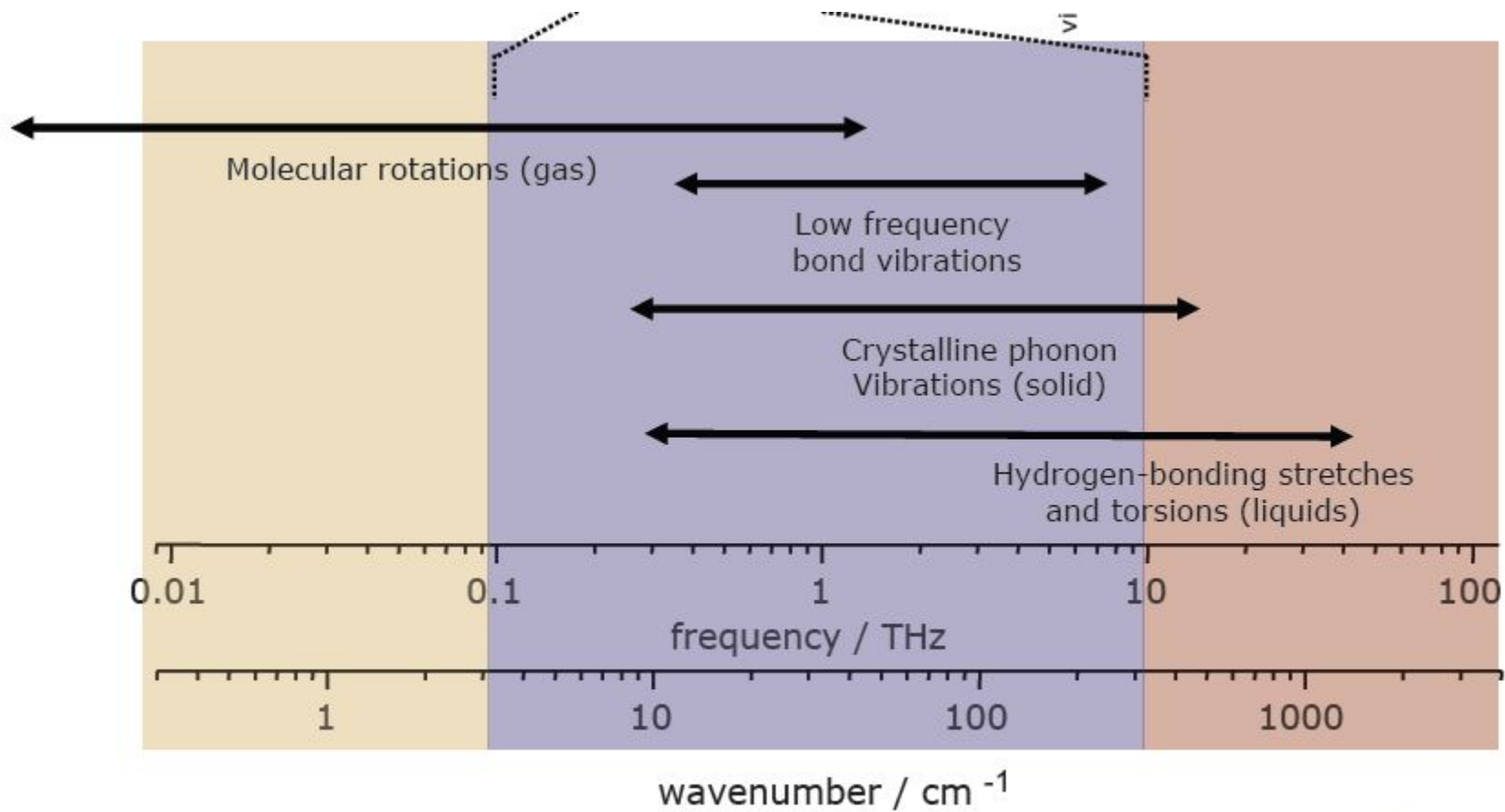
- **Понижение частоты квантово-оптических методов**
 - Низкое спектральное разрешение (ширина линии источников >10 кГц), акустооптика, брэгговские решетки, детекторы мощности
- **Увеличение рабочей частоты радиофизических методов**
 - Все функциональные элементы могут быть представлены в виде R,L,C эквивалентных схем
 - Супергетеродинные приемники. Источники гетеродина имеют высокую фазовую стабильность

Радиоастрономия

The Cosmic Energy Density Spectrum

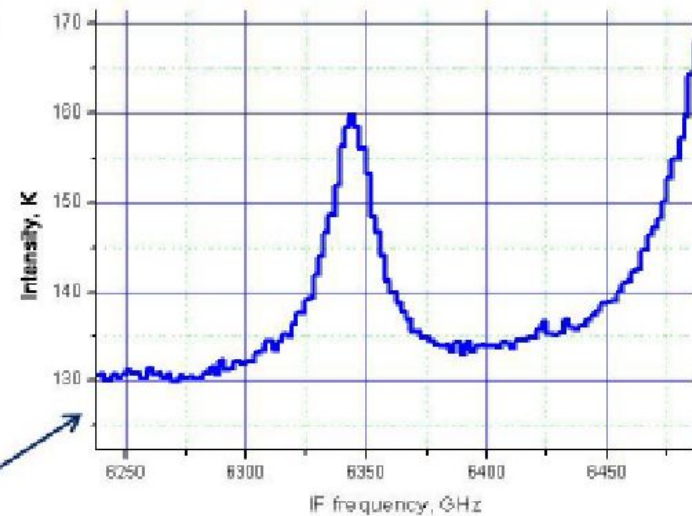
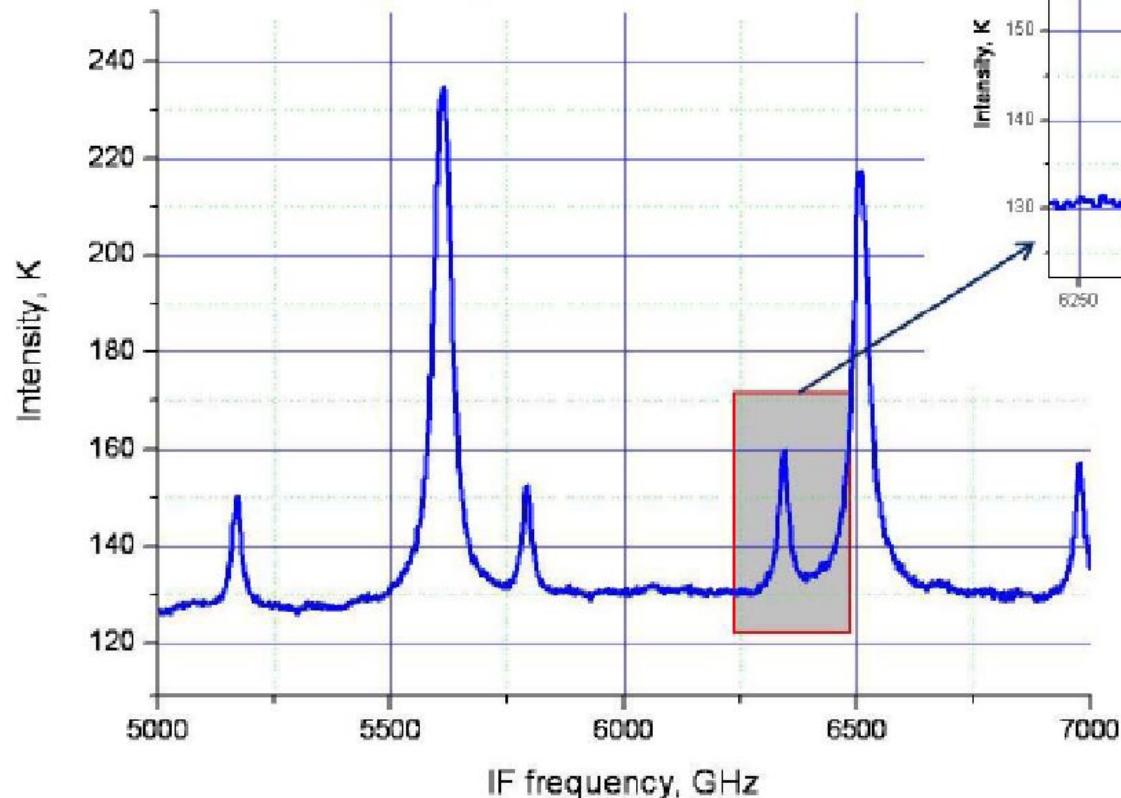


Спектроскопия



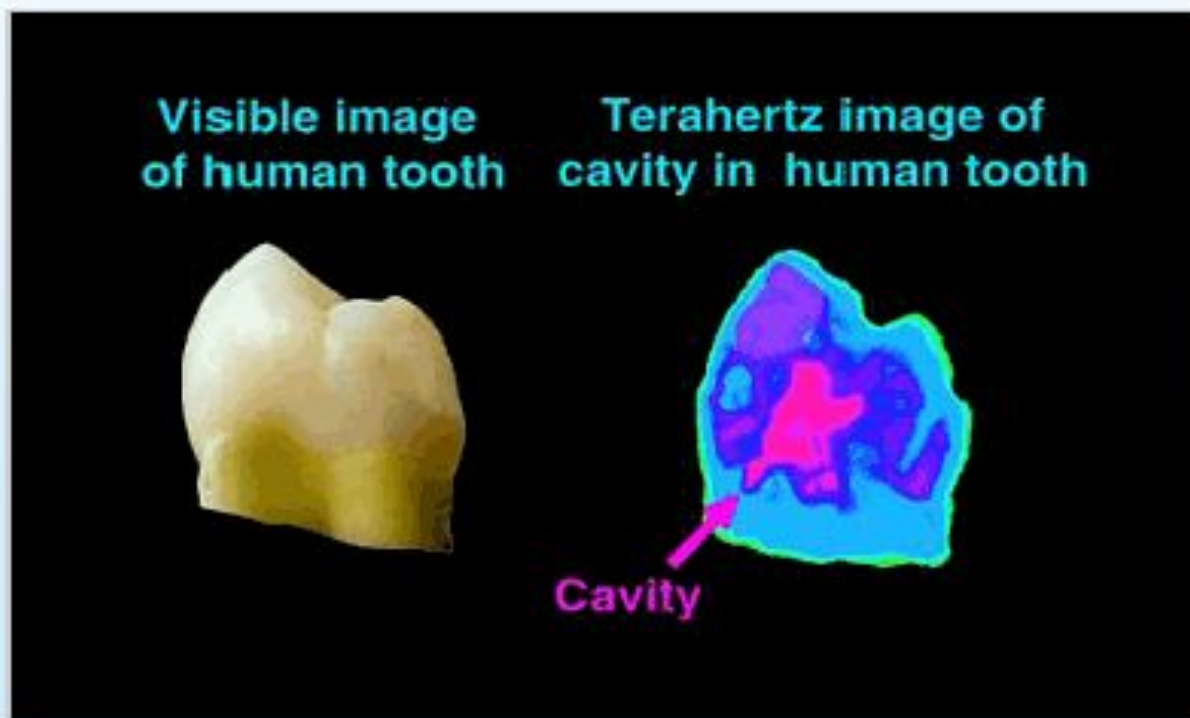
Пример спектра, измеренного гетеродинным методом

Deconvolved spectrum of the OCS emission lines at a gas pressure 2.6 mBar.
LO frequency 601 GHz.



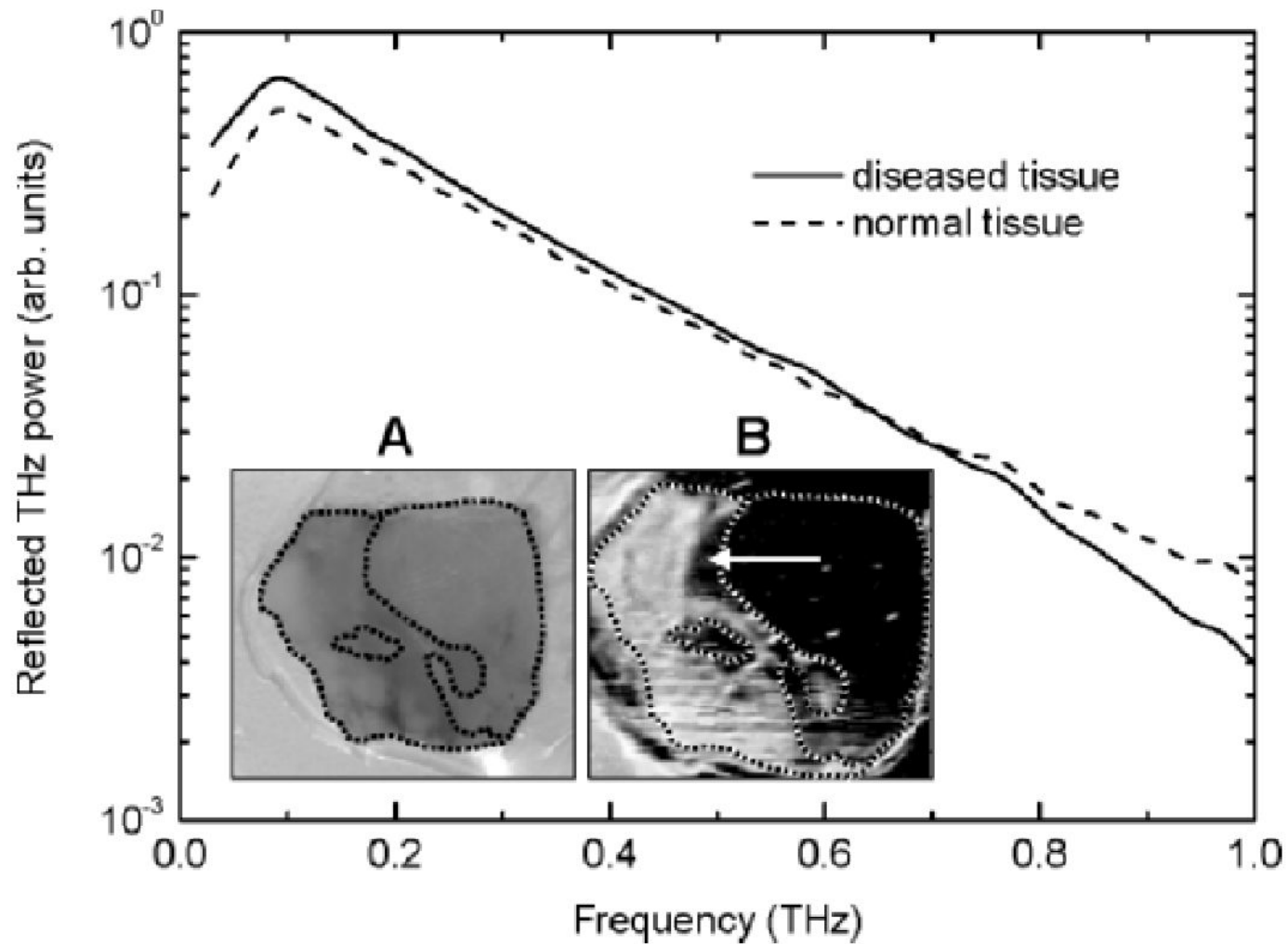
Two strong lines are saturated; weaker lines are not saturated isotopes. The lines are detected, one in the LSB, the other one in the USB

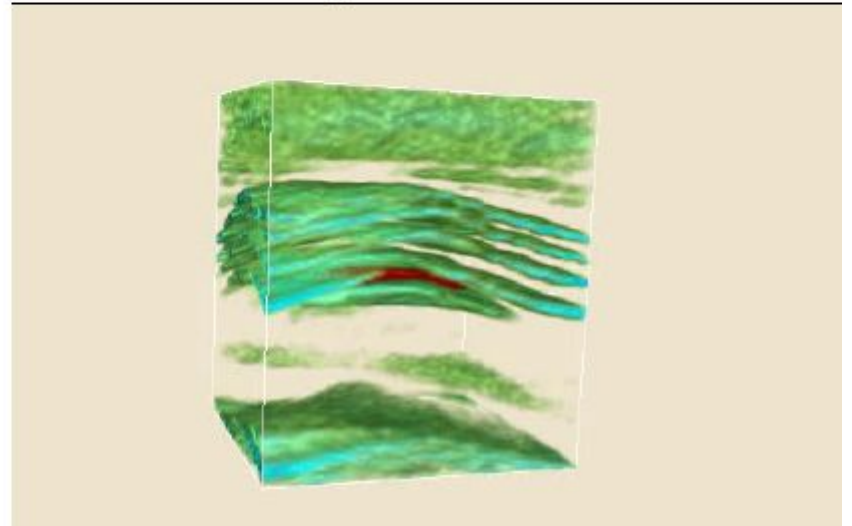
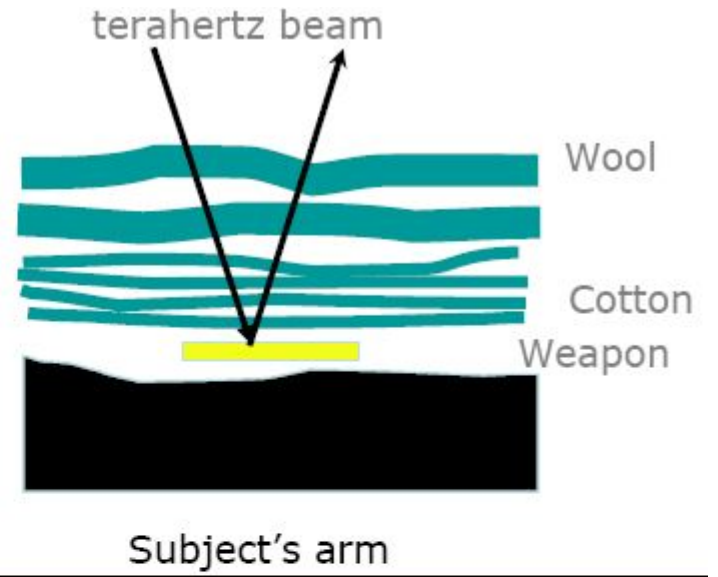
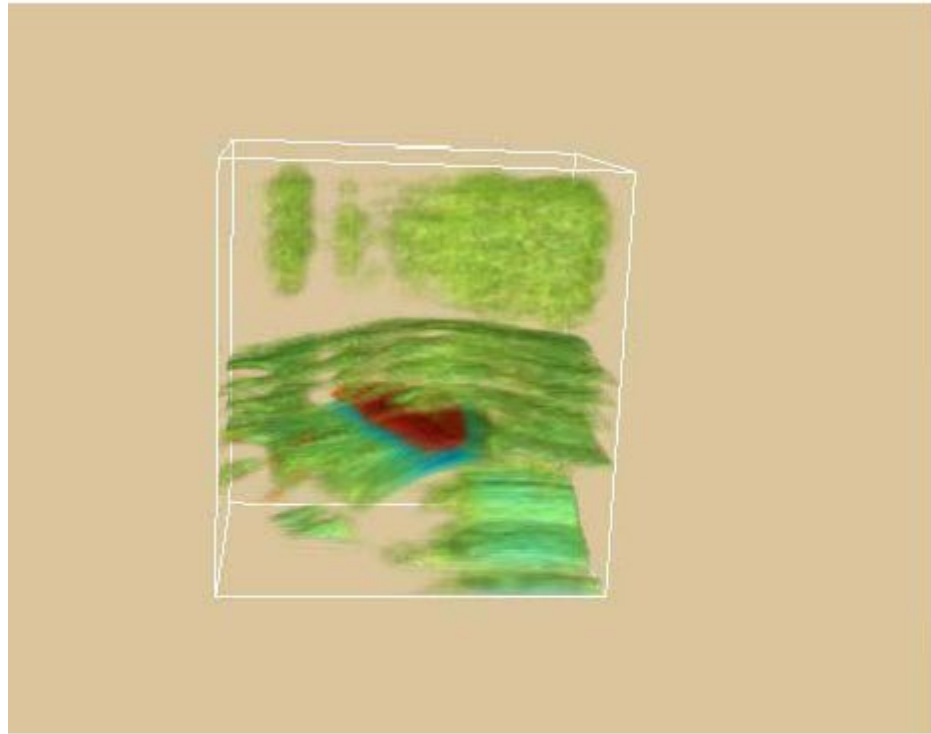
Медицинская диагностика



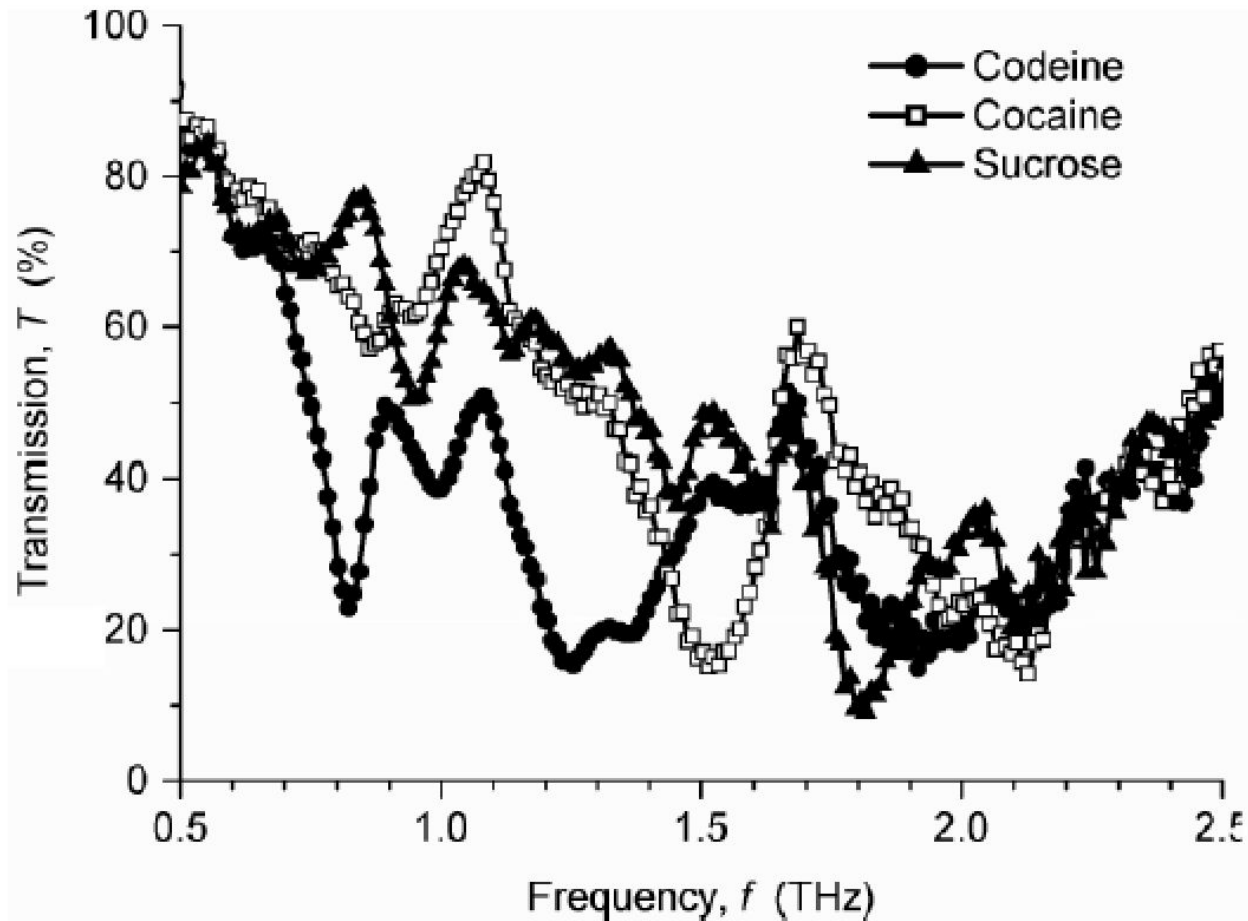
Crawley et al.
Caries Research
37(5):352-359
(2003)

Базально-клеточная карцинома

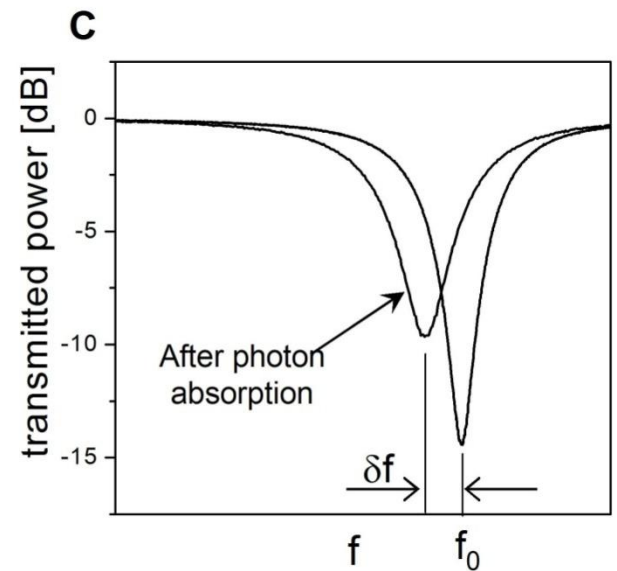
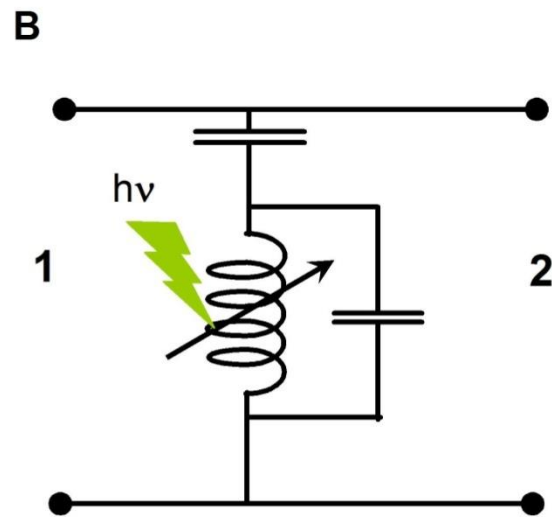
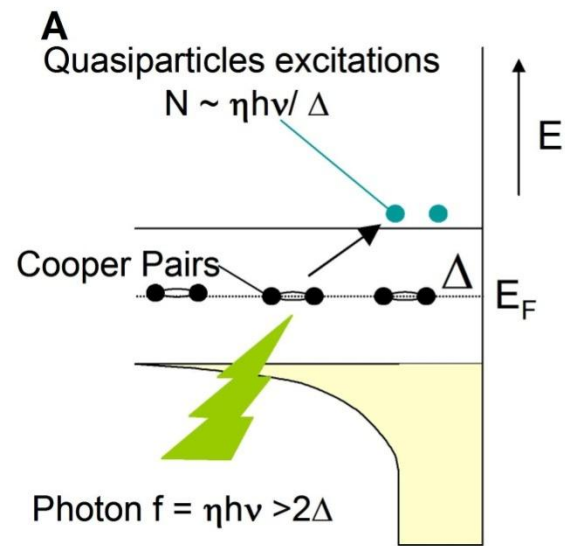




Детектирование наркотических веществ



Детекторы кинетической ИНДУКТИВНОСТИ



Nb

CPW Resonator

Substrate

1

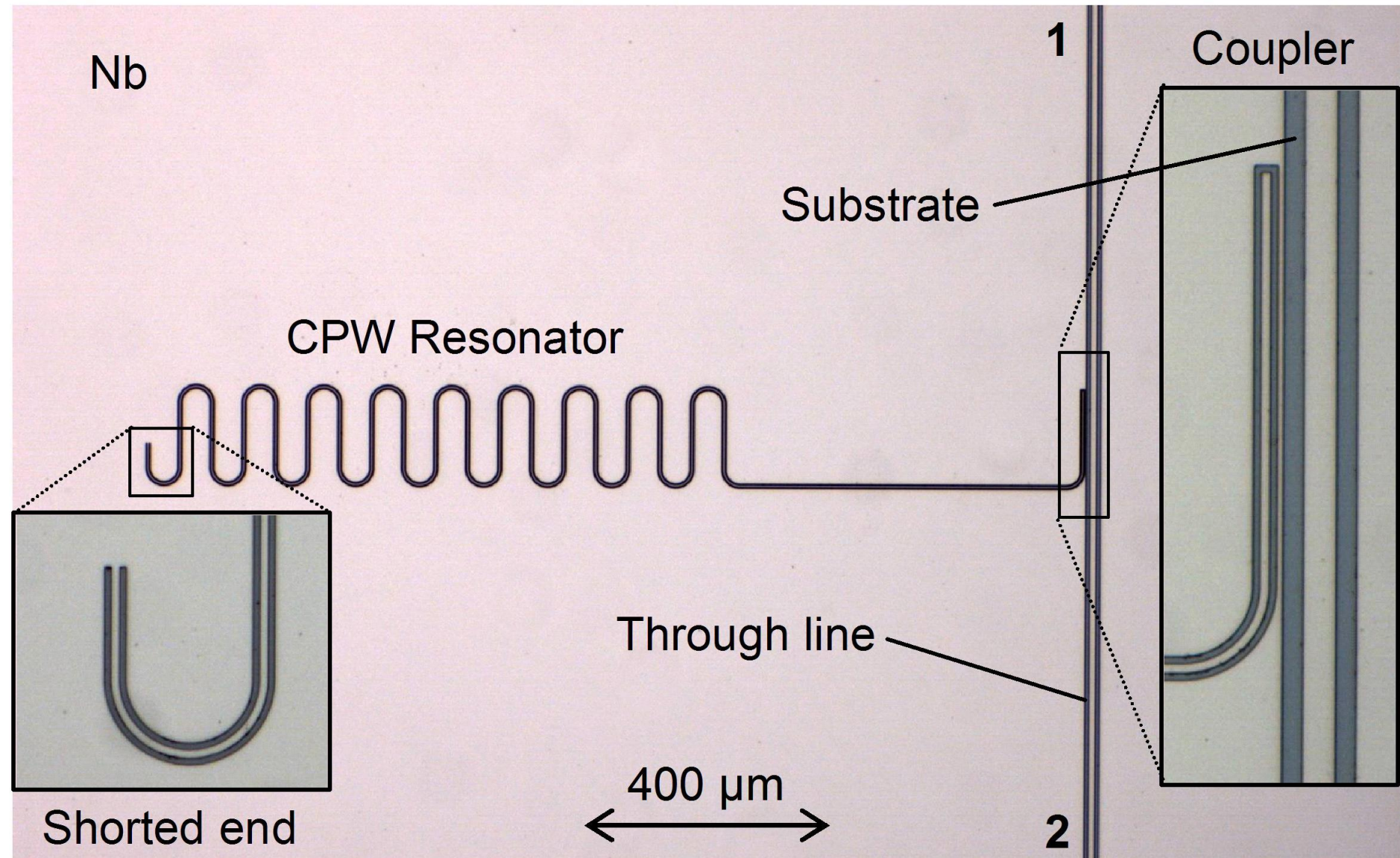
Coupler

Through line

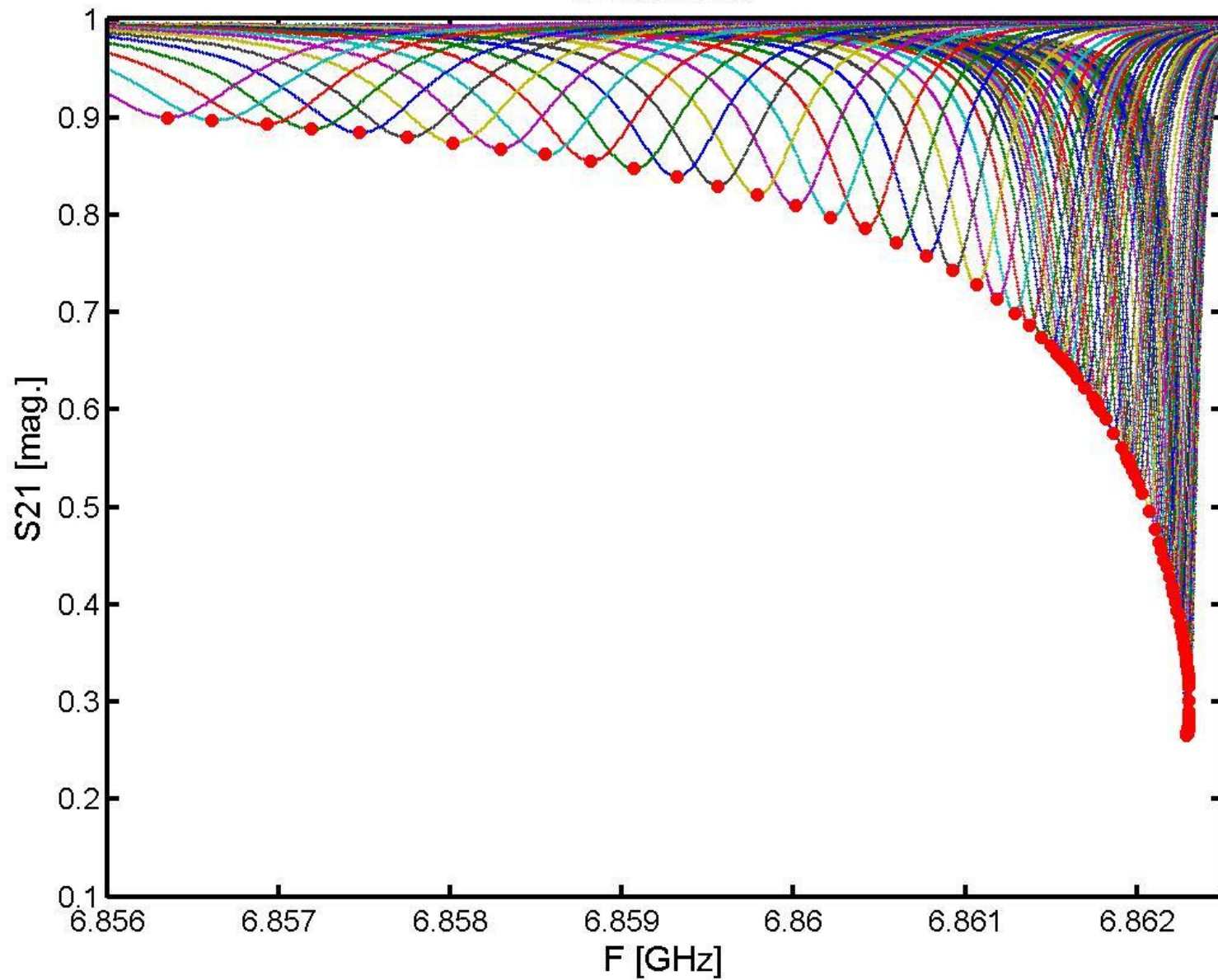
400 μm

Shorted end

2

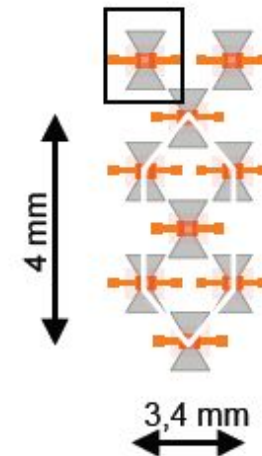
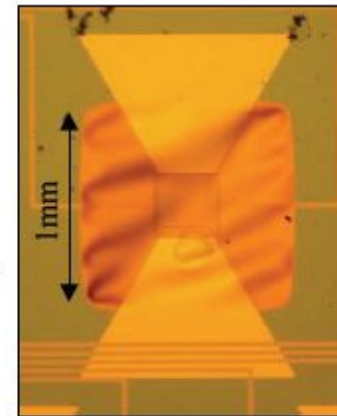
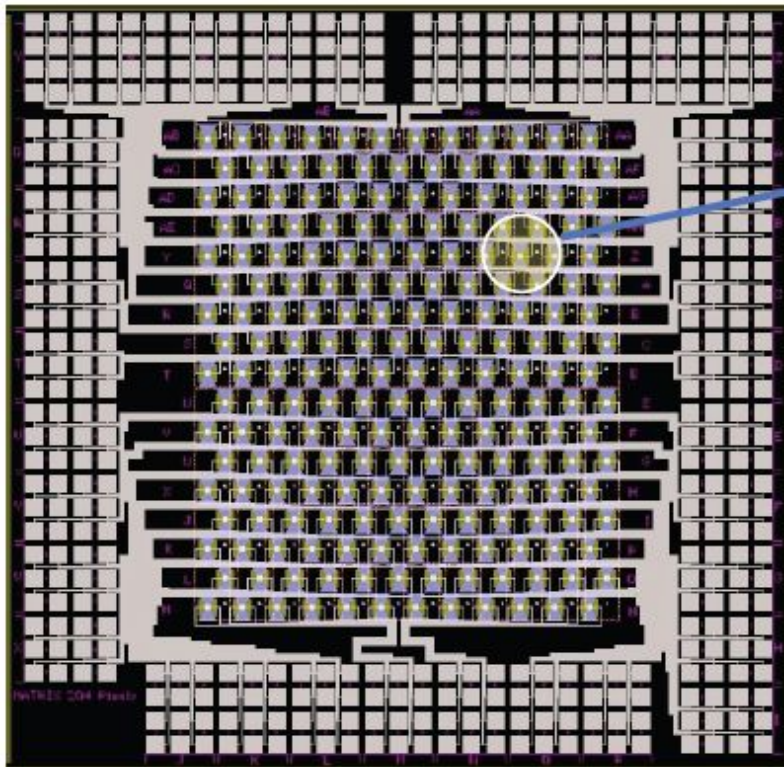


KID resonances



Детекторы с антенной

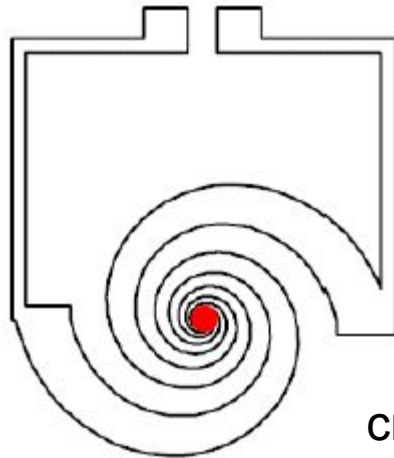
204 bolometers array with antennas



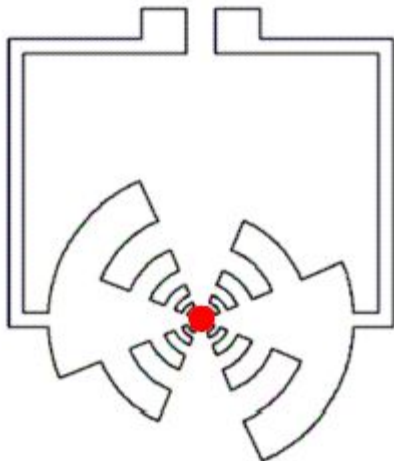
- Planar antenna network for imaging in millimeter wavelength
- Versatile fabrication process for future applications :
 - Polarisation sensitive detectors
 - Integrated frequency selection on the pixels
- Thermal sensor can be either high impedance or superconducting with NbSi

Примеры широкополосных антенн

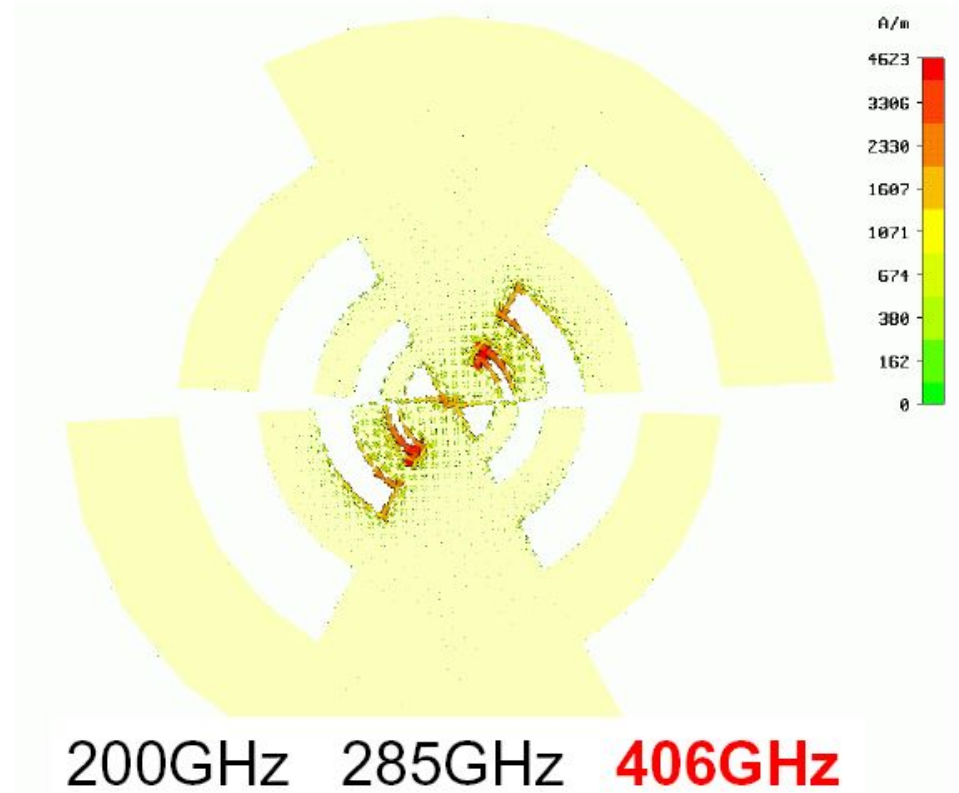
Поверхностные токи
логопериодической антенны



спиральная

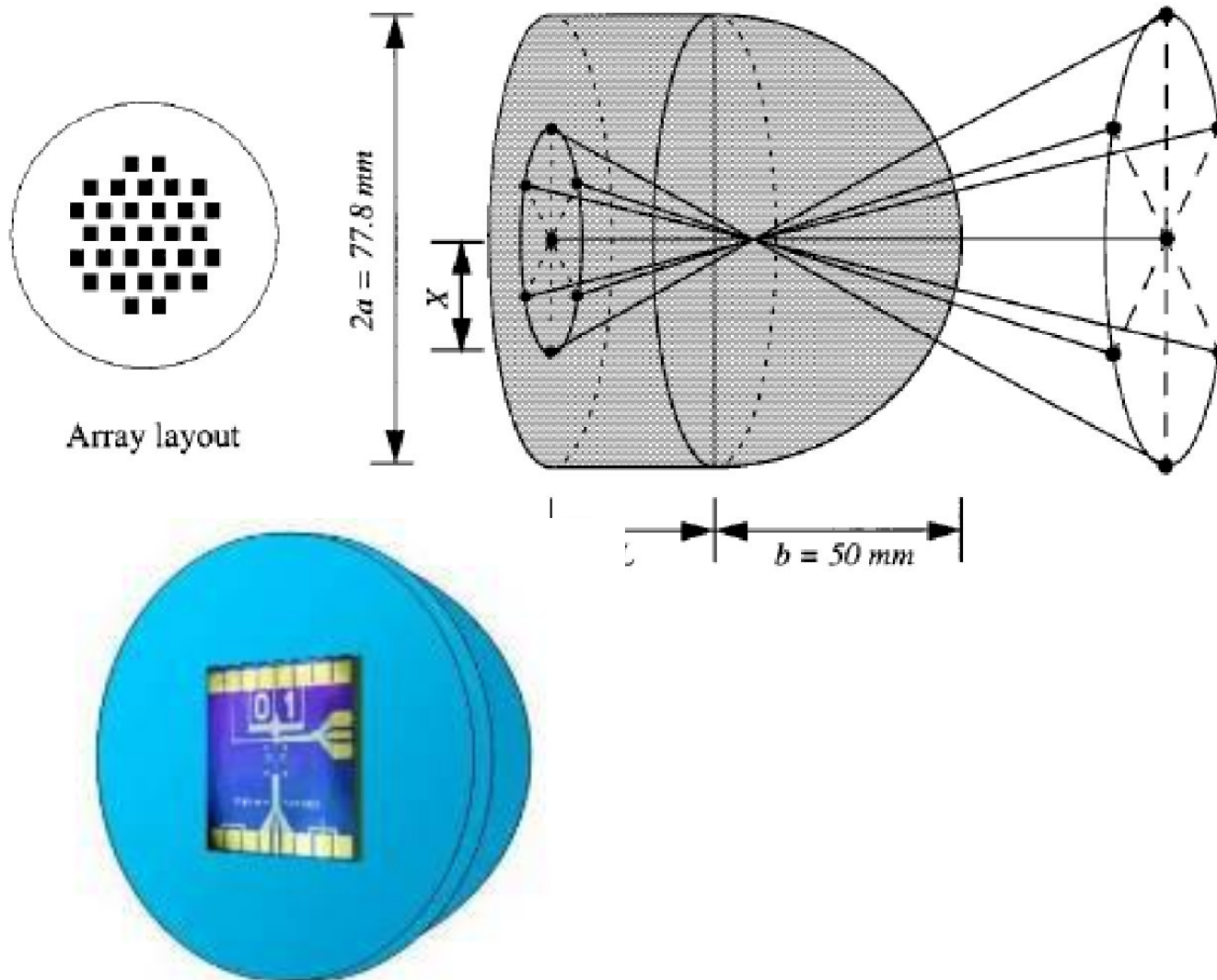


логопериодическая



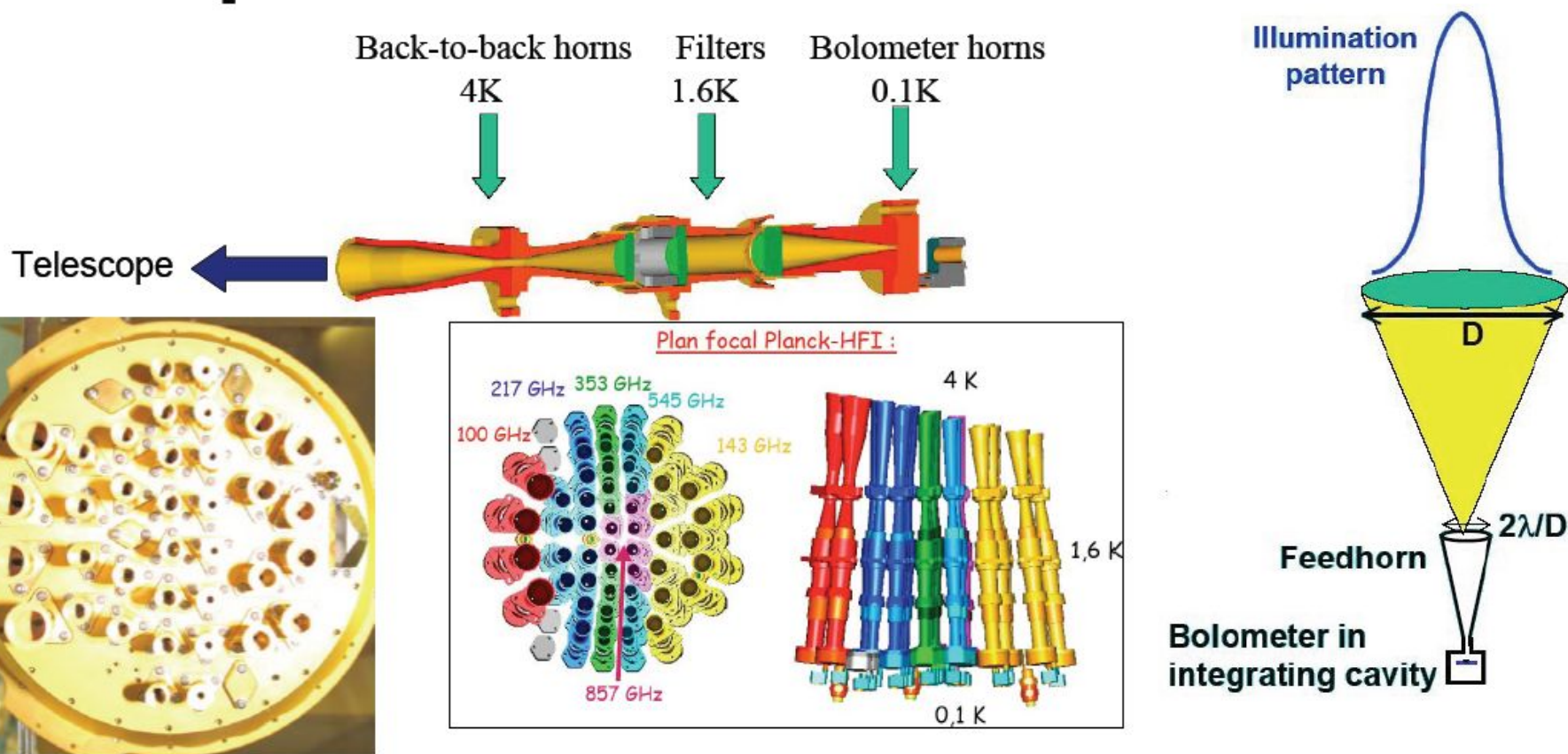
200GHz 285GHz **406GHz**

Размещение чипа на квазиоптической линзе



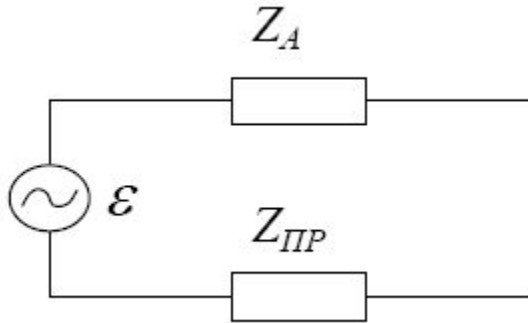
Волноводные конструкции

Example: Planck-HFI



Недостаток - узкополосность

Согласование антенны с приемником



Импеданс приемника $Z_{\text{пр}} = R_{\text{пр}} + iX_{\text{пр}}$

Импеданс антенны $Z_A = R_A + iX_A$

$$I = \frac{\varepsilon}{(Z_A + Z_{\text{ПР}})} \quad P_{\text{ПР}} = \frac{1}{2} I^2 R_{\text{ПР}}$$

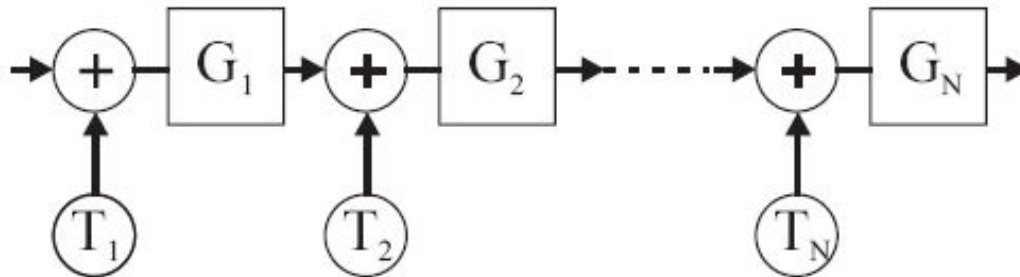
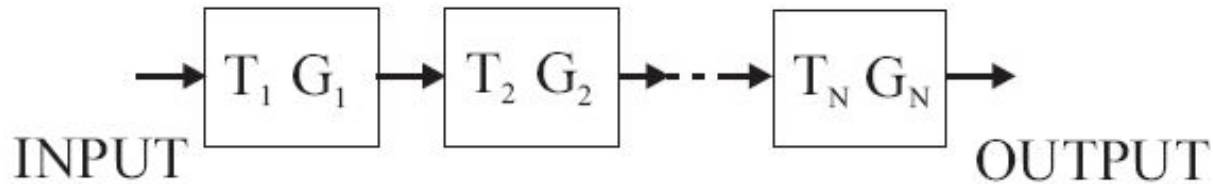
$$P_{\text{ПР}} = \frac{\varepsilon^2 \cdot R_{\text{ПР}} / 2}{(R_{\text{ПР}} + R_A)^2 + (X_{\text{ПР}} + X_A)^2}$$

$$P_{\text{ПР}}^{\text{max}} = \frac{\varepsilon}{8R_{\text{ПР}}}$$

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПР}}^{\text{max}} \cdot \frac{4R_A R_{\text{ПР}}}{(R_{\text{ПР}} + R_A)^2 + (X_{\text{ПР}} + X_A)^2}$$

Гетеродинные приемники

Шумовые свойства цепи усилителей



$$T_i = \frac{P_i}{k_b B} \quad G_{rec} = \prod_{i=1}^N G_i, \quad T_{rec} = T_1 + \sum_{i=2}^N \frac{T_i}{\prod_{k=1}^{i-1} G_k}$$

Y-factor

Измерение шумовой температуры калиброванным источником шума

$$P_1 = kBG A(T_1 + T_n) \quad P_2 = kBG A(T_2 + T_n)$$

$$Y = \frac{P_1}{P_2}$$

$$T_n = \frac{T_1 - T_2 Y}{Y - 1}$$

Прямое детектирование

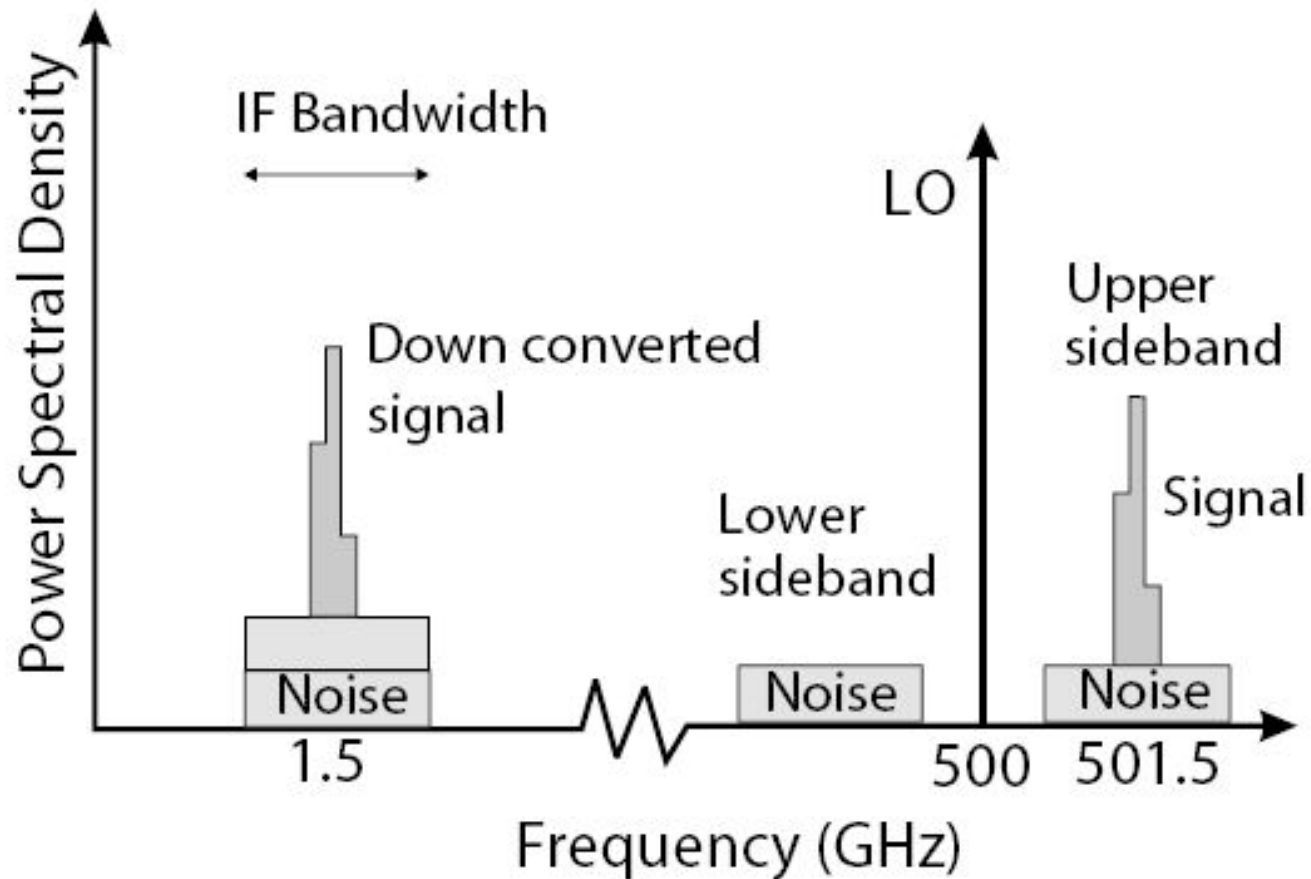
$$I(V_0 + V_\omega \cos \omega t) = I(V_0) + V_\omega \cos \omega t \frac{\partial I}{\partial V} + \frac{1}{2} V_\omega^2 \cos^2 \omega t \frac{\partial^2 I}{\partial V^2} + \square$$

Соотношение амплитуд тока и напряжения $I_\omega \cos \omega t = V_\omega \cos \omega t \frac{\partial I}{\partial V}$

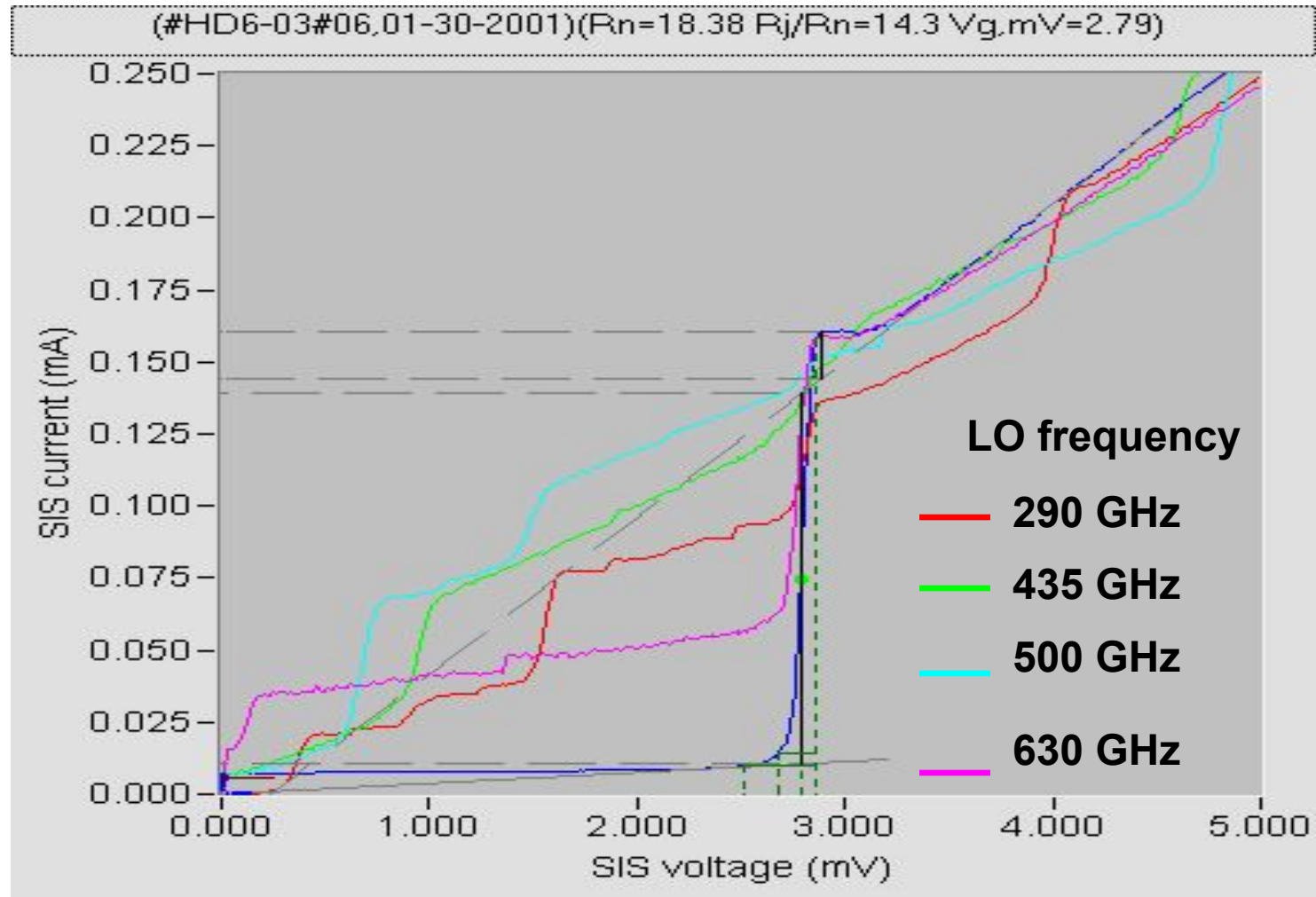
Отклик по постоянному току $\Delta I_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} V_\omega^2 \cos^2 \omega t \frac{\partial^2 I}{\partial V^2} d(\omega t) = \frac{1}{4} V_\omega^2 \frac{\partial^2 I}{\partial V^2}$

Чувствительность $R = \frac{\Delta I_{DC}}{\Delta P} = \frac{\Delta I_{DC}}{1/2 V_\omega I_\omega} = \frac{1}{2} \frac{(\partial^2 I / \partial V^2)}{(\partial I / \partial V)}$

Гетеродинное преобразование частоты



SIS pumped by FFO; frequency tuning



0.3 THz

1.5 THz

6 THz

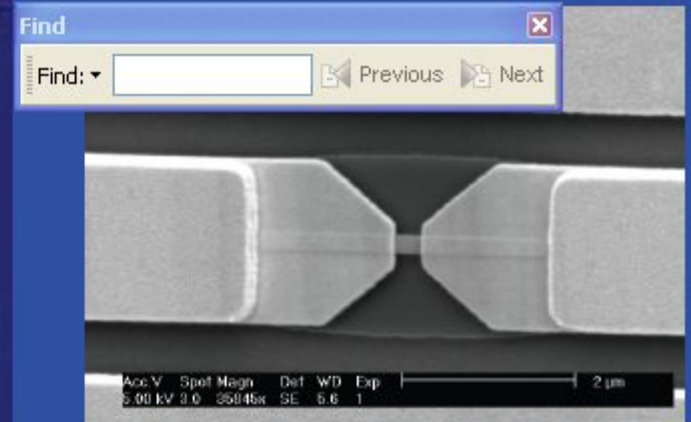
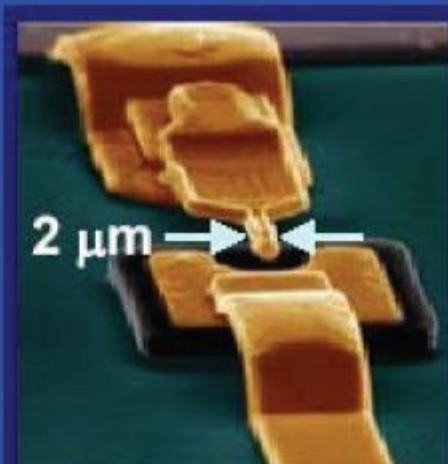
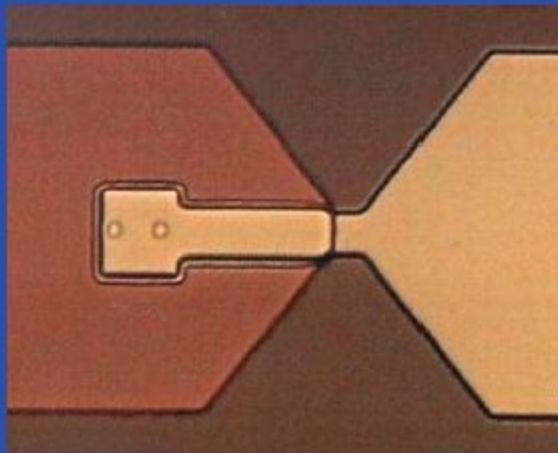
← SIS mixer →



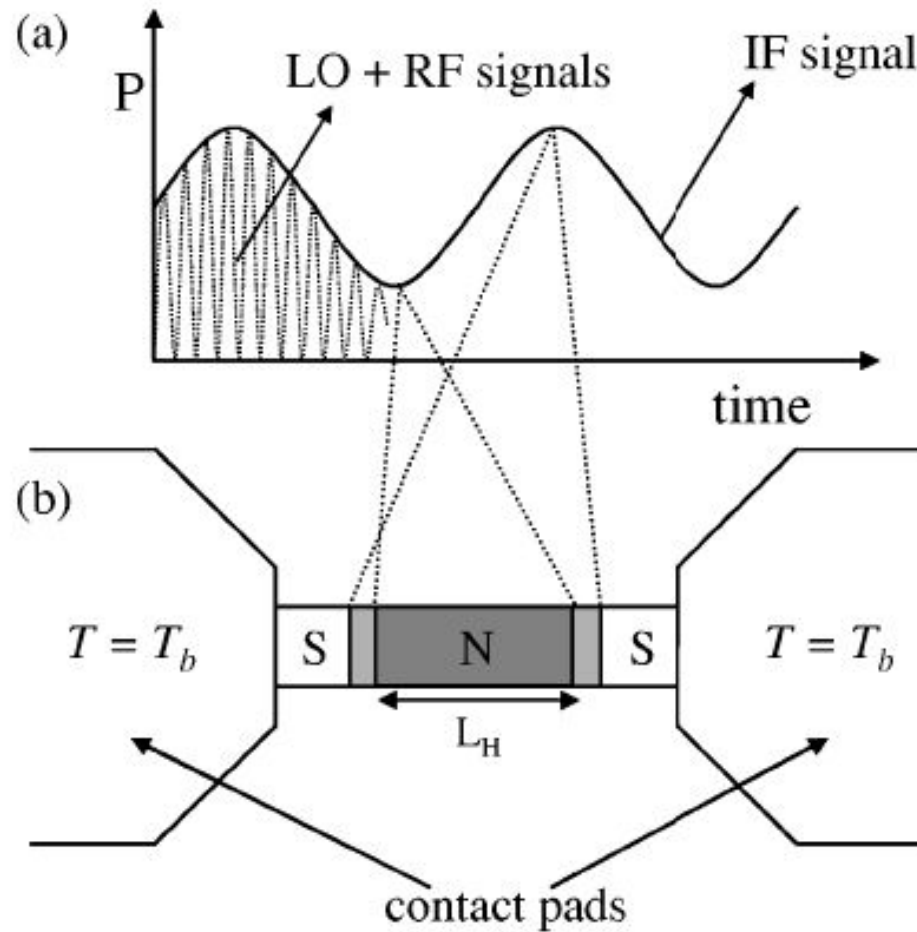
Schottky mixer : more LO power
(> 1mW), and less sensitive



HEB mixer (diffusion or phonon cooled)



hot-spot mixing model



Внутри «горячего» пятна

$$-K \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{c_e}{\tau_{e-ph}} (T - T_b) = j^2 \rho + p_{LO}$$

В сверхпроводящей области

$$-K \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{c_e}{\tau_{e-ph}} (T - T_b) = p_{LO}$$

~ $(T_e^4 - T_b^4)$

$$\lambda_{th} = \sqrt{\frac{K \tau_{e-ph}}{c_e}} = \sqrt{D \tau_{e-ph}}$$

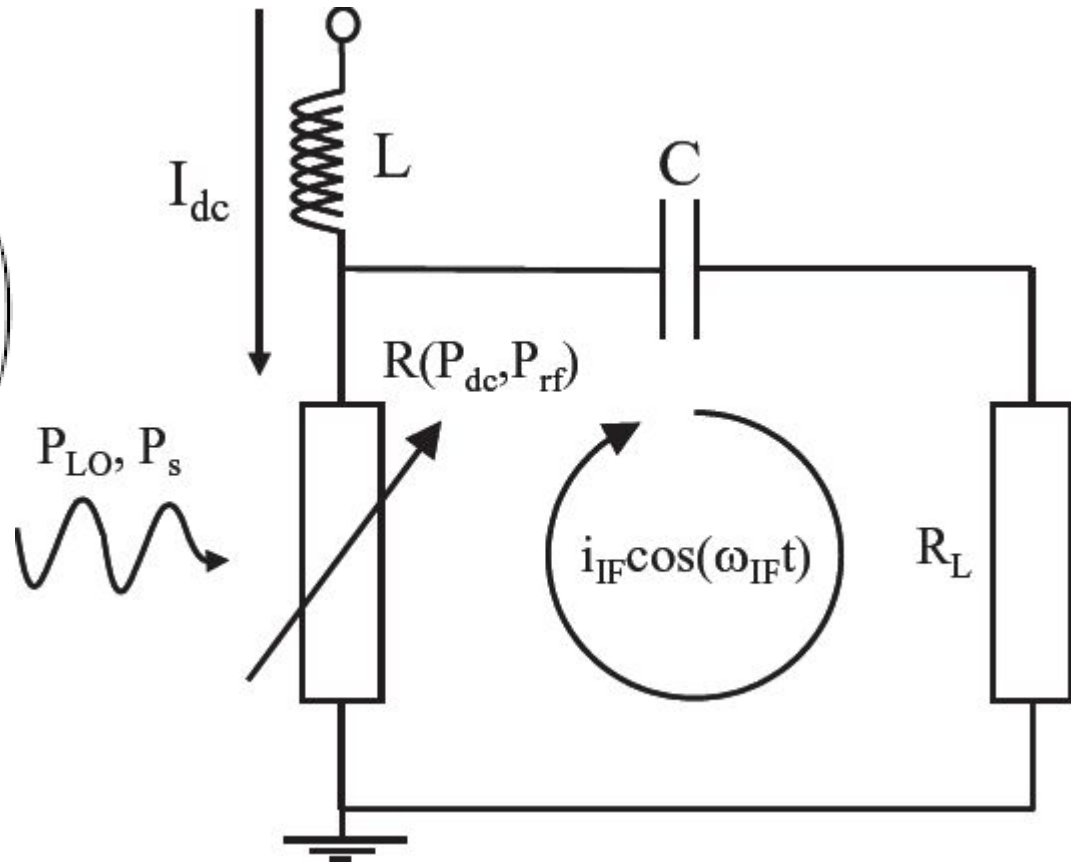
$L_b > \lambda_{th}$ -phonon cooled

$L_b < \lambda_{th}$ -diffusion cooled

Responsivity

$$S_0 = I \left(\frac{dR}{dP} \right) = j\rho \left(\frac{dL_H}{dP} \right)$$

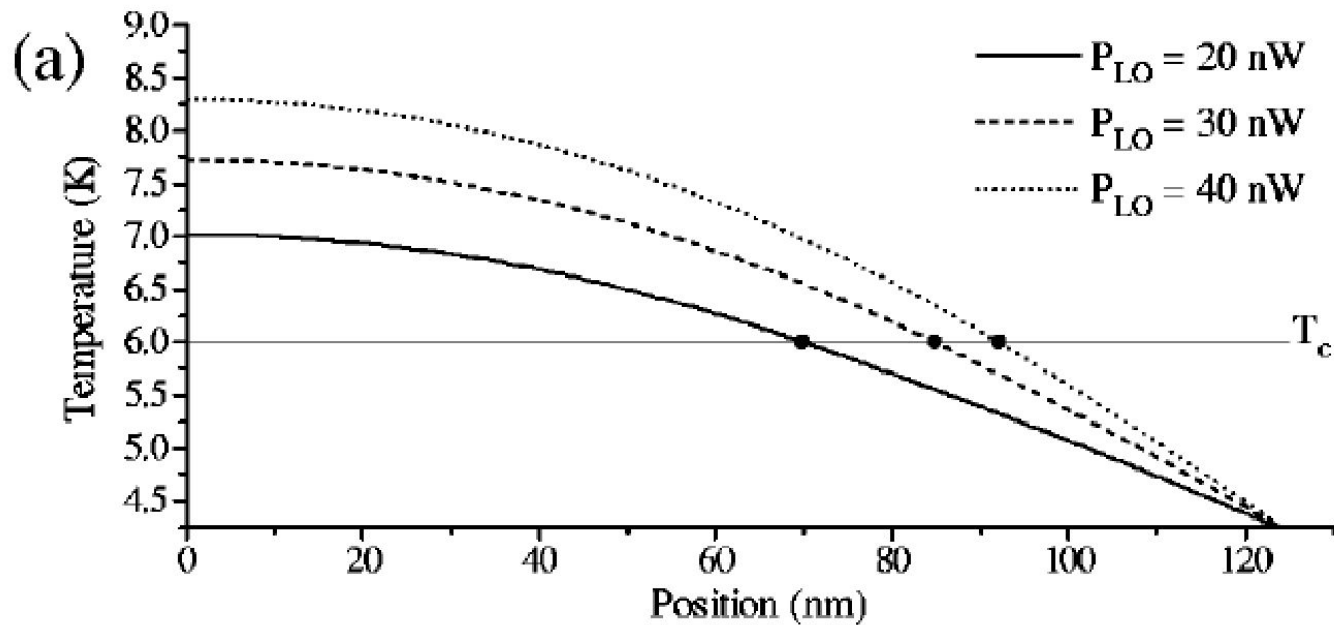
$$\tau = \frac{C}{G}$$

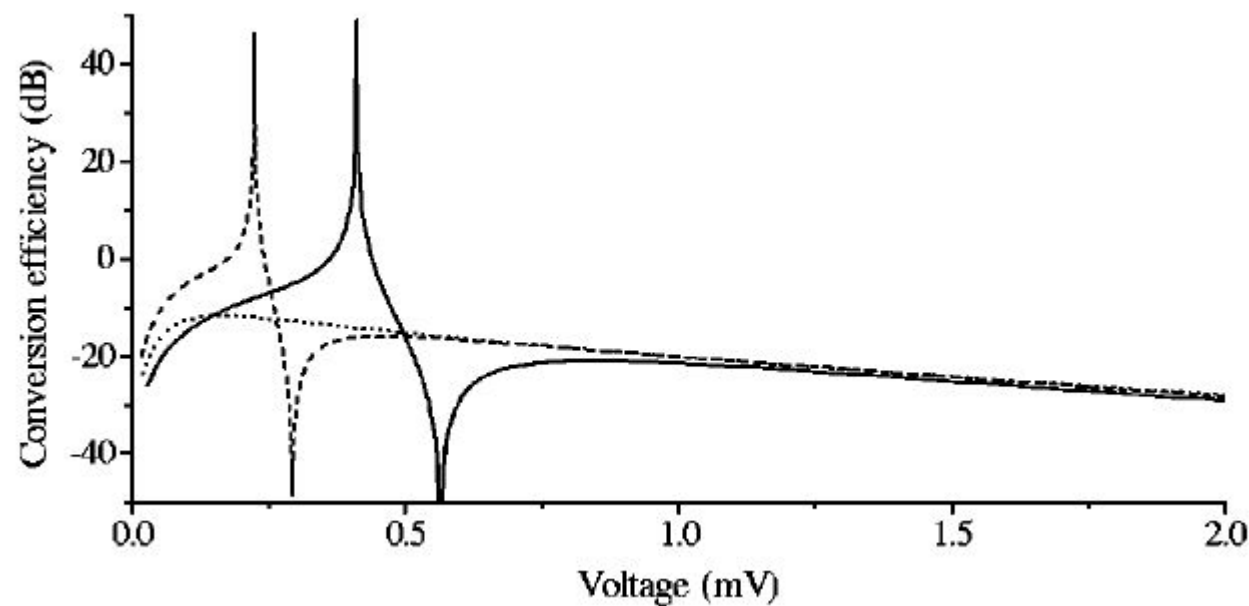
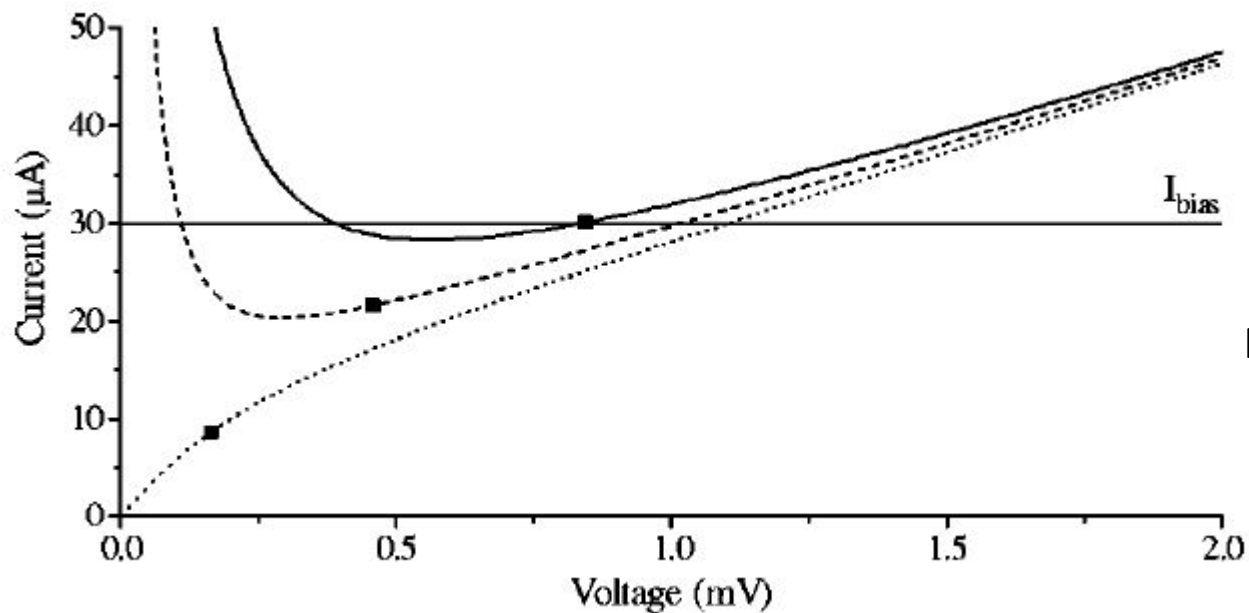


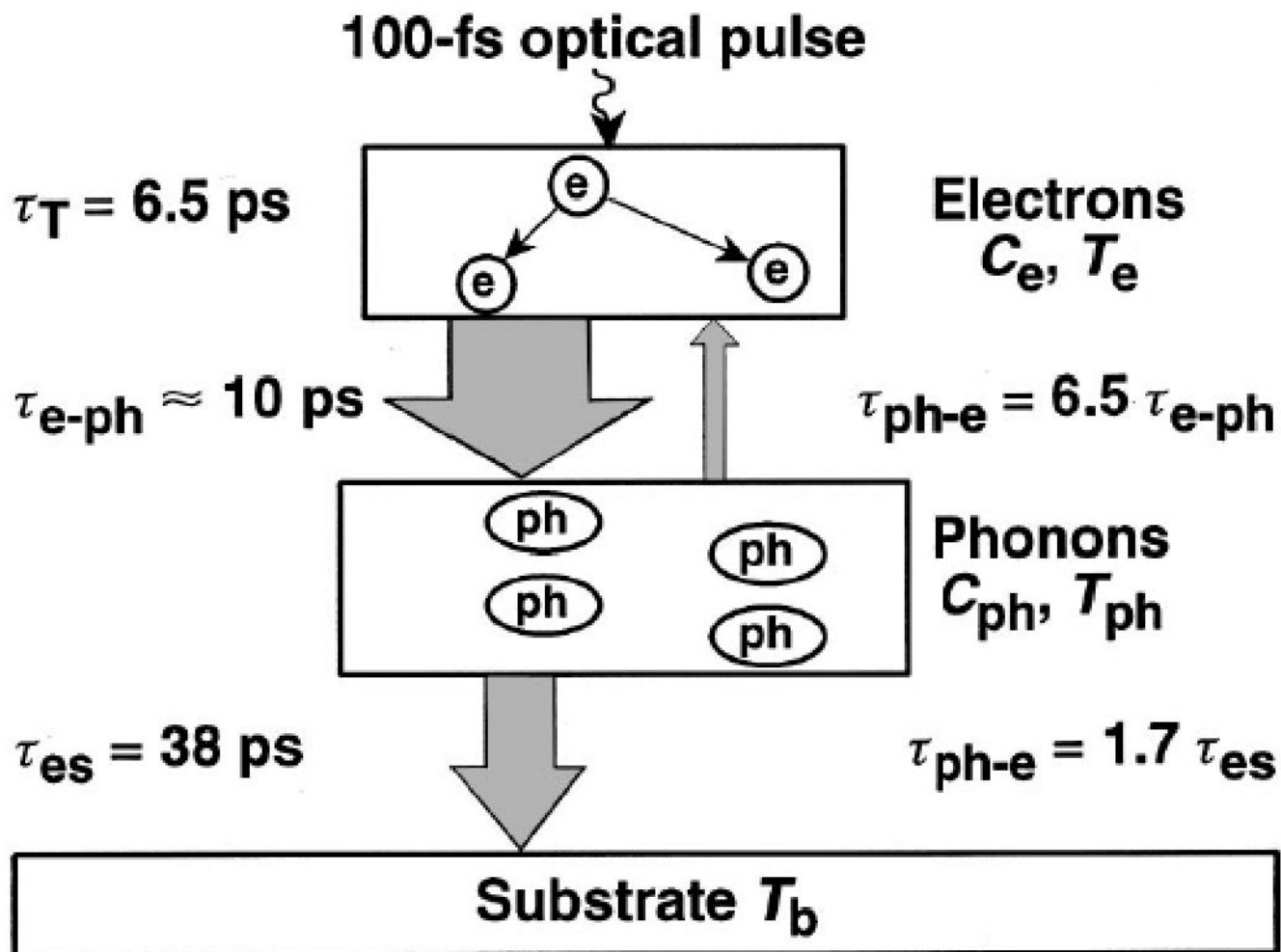
$$S = \frac{I \frac{dR}{dT}}{G(1 + \omega_{IF}^2 \tau^2)^{1/2}} = \frac{S_0}{G(1 + \omega_{IF}^2 \tau^2)^{1/2}}$$

$$\eta = \frac{P_{IF}}{P_S} \sim 2S(\omega) \frac{P_{LO}}{Z_L} \quad \text{- Эффективность преобразования}$$

$$\eta = \frac{2S_0^2 P_{LO} Z_L}{(Z_L + Z_B)^2} \quad Z_B = \frac{dV}{dI}$$

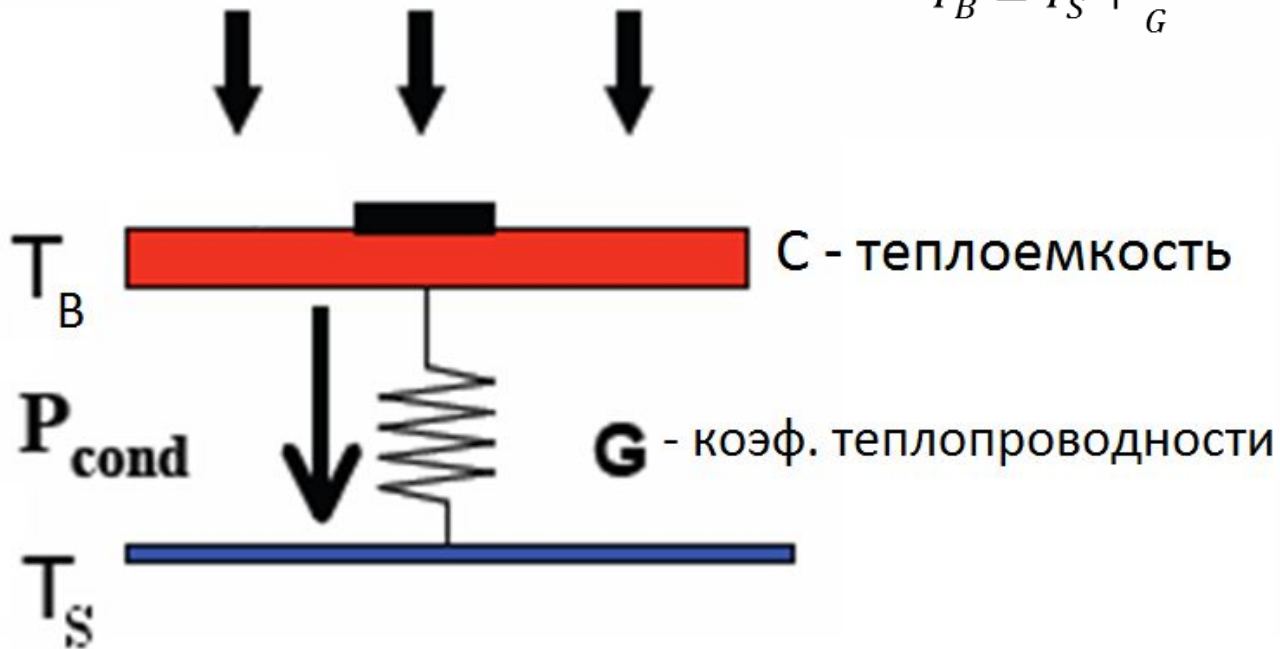






Физика болометров

$$T_B = T_S + \frac{P}{G}$$



Расчет чувствительности

$P = P_0 + P_1 e^{i\omega t}$ - падающая мощность модулируется с частотой ω

$T_B = T_0 + T_1 e^{i\omega t}$ R – сопротивление резистивного
термометра

Тогда выделяемая мощность $I^2 R(T) = I^2 \left[R(T_0) + \frac{dR}{dT} T_1 e^{i\omega t} \right]$

Исходящий тепловой $\tilde{G}(T_B - T_S)$
поток

$\tilde{G} = \frac{(A/l)}{(T_S - T_0)} \int_{T_0}^{T_S} \kappa(T) dT$ [W/K] $\kappa(T)$ – удельная
теплопроводность

Уравнение теплового баланса

Поток входной мощности равен потоку выходной и сумме выходной и накапливаемой в абсорбере с теплоемкостью C

$$P_0 + P_1 e^{i\omega t} + I^2 R(T_0) + I^2 \left(\frac{dR}{dT} \right) T_1 e^{i\omega t} = \tilde{G}(T_0 + T_S) + G T_1 e^{i\omega t} + i\omega C T_1 e^{i\omega t}$$

$$G = \left. \frac{dP}{dT} \right|_{T_0} \quad - \text{динамическая теплопроводность}$$

стационарная часть - $P_0 + I^2 R(T_0) = \tilde{G}(T_0 + T_S)$

зависящая от времени $\frac{P_1}{T_1} = G + i\omega C - I^2 \left(\frac{dR}{dT} \right)$

Чувствительность по напряжению

$$S_A = \frac{V_1}{P_1} = \frac{I \left(\frac{dR}{dT} \right) T_1}{P_1}$$

Подставляя нестационарную часть уравнения теплового баланса получаем:

$$S_A = \frac{I(dR/dT)}{G - I^2(dR/dT) + i\omega C} \quad [\text{В/Вт}]$$

Поскольку R зависит от T, то для учета приращения напряжения V1 используют эффективную теплопроводность

$$G_e = G - I^2 \left(\frac{dR}{dT} \right) = G - I^2 R \alpha$$

где $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ - коэффициент электротермической обратной СВЯЗИ

Электротермическая обратная СВЯЗЬ

- Полупроводники: $\alpha < 0$ $G_e > G$
- сверхпроводники: $\alpha > 0$ $G_e < G$

Чувствительность по напряжению

$$S_A = \frac{IR\alpha}{G_e(1 + i\omega\tau_e)} \quad \tau_e = \frac{C}{G_e}$$

Нужен разумный баланс между высокой чувствительностью и малой τ_e

Мощность эквивалентная шуму

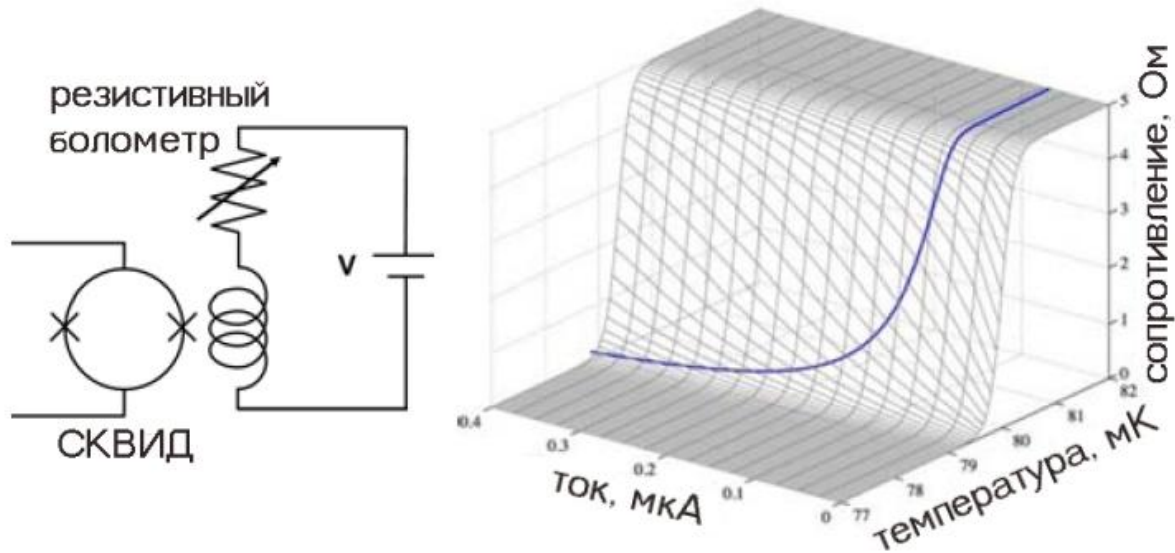
- Это оптическая мощность, приложенная к входу идеального (нешумящего) оптического приемника и создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника.
- Мощность сигнала на входе, при которой соотношение сигнал/шум на выходе равно 1, если времени интегрирования составляет 0.5 с

Собственная МЭШ болометра

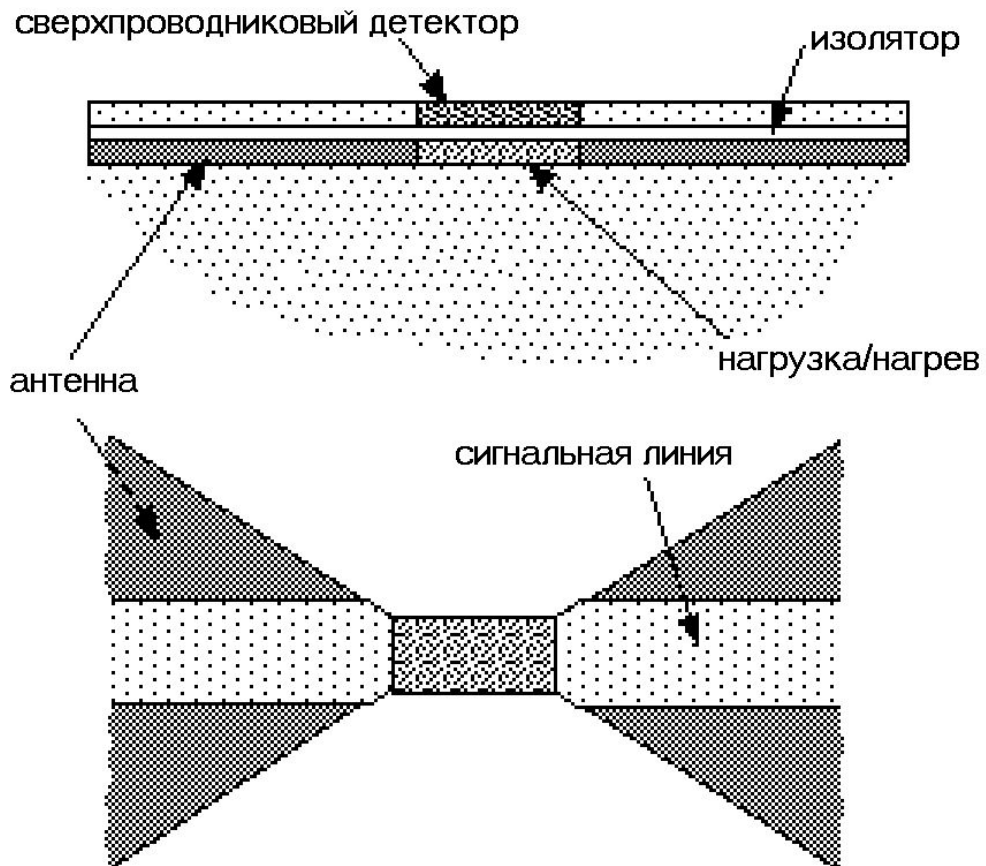
$$(NEP)^2 = (NEP_{phot})^2 + \frac{4kT^2G}{\gamma^2} + \frac{4kTR}{S^2}$$

Тип болометра	Энергия квантования, мкэВ	Характерный параметр абсорбера, мК	$NEP_{shot}, 10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_e = 9$	$T_e = 50$	1
БСП	$\Delta = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Delta = 200$	$T_c = 1200 \text{ (Al)}$	7

Болометр на крае с/п перехода



Изменение электронной температуры БКП под действием излучения приводит к увеличению сопротивления пленки вблизи критической температуры T_k . Ток через болометр, работающий в режиме задания напряжения, считывается посредством СКВИДа.



$$\Delta T < 10^{-5} \text{ K}$$

$$NEP \sim 10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$$

Минимальная NEP $\sim 10^{-15}$
W/Hz^{0.5}

При $T_c = 500 \text{ mK}$

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

Уравнение теплового баланса БХЭ

$$P_{\text{cool}}(V, T_e, T_{\text{ph}}) + \Sigma \Lambda (T_e^5 - T_{\text{ph}}^5) + C_A \frac{dT}{dt} = P_0 + \delta P(t)$$

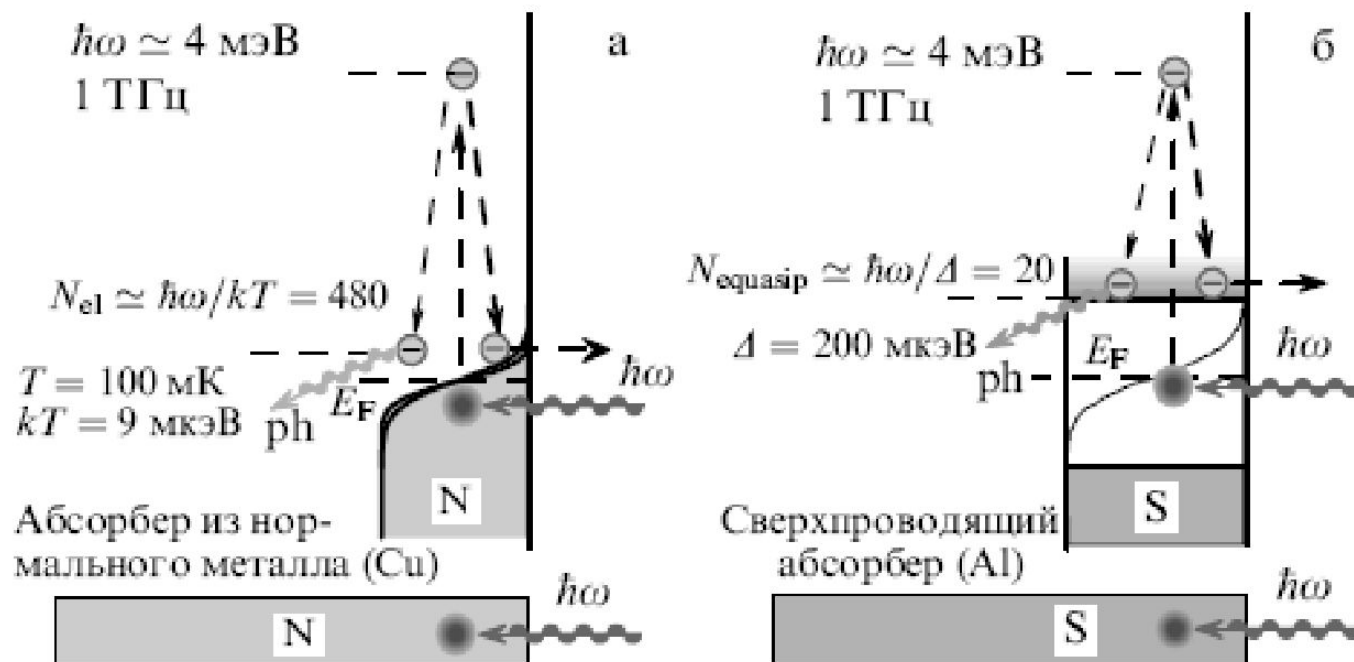
Λ — объем абсорбера $C_A = \gamma T_e$ — удельная теплоемкость

$$G_{\text{eff}} = G_{\text{cool}} + G_{\text{e-ph}} + i\omega C_A$$

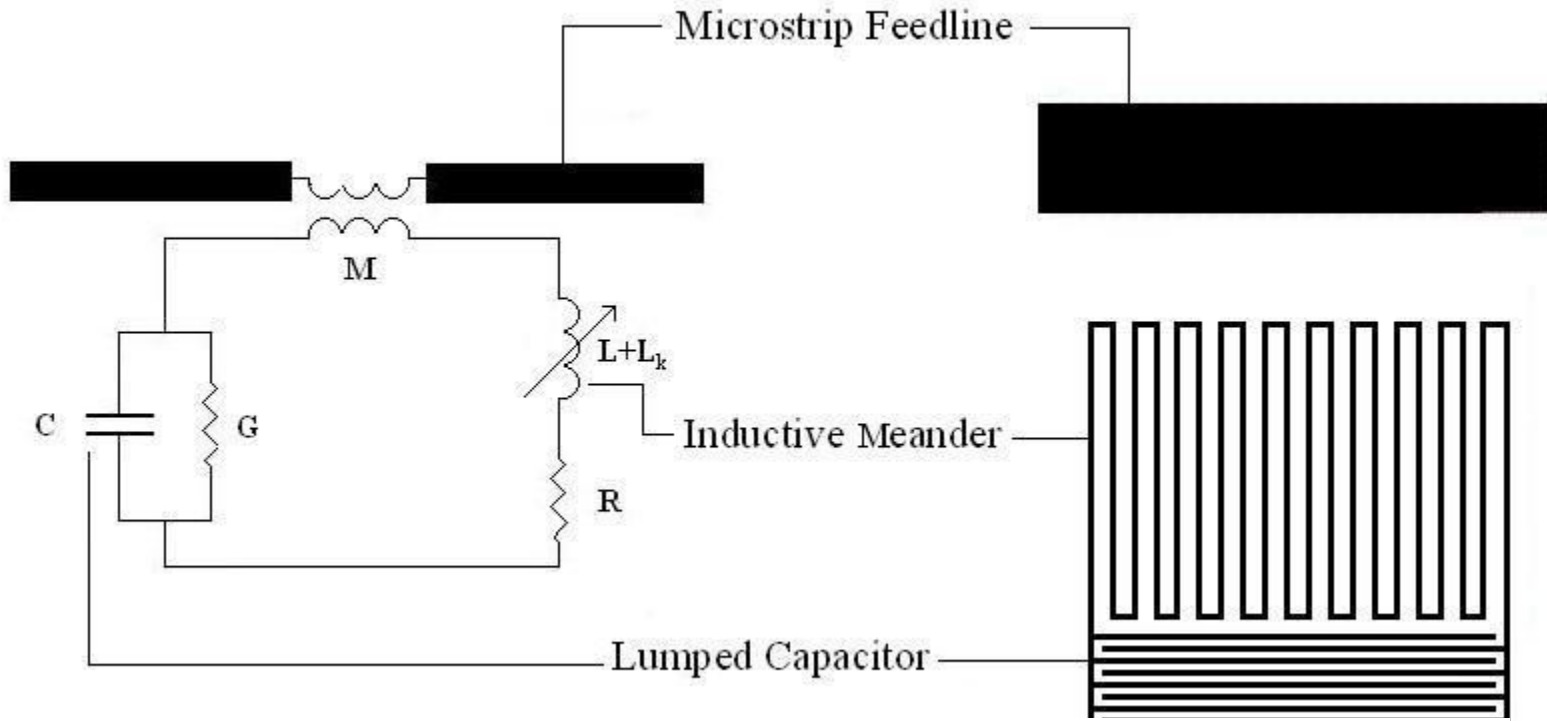
$$S_i = \frac{\partial I}{\partial P} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}} + G_{\text{e-ph}} + i\omega C_A} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}}} \frac{L}{(L+1)[1+i\omega\tau]} \quad L = G_{\text{cool}} / G_{\text{e-ph}} \gg 1$$

$$\tau = \frac{C_A}{G_{\text{e-ph}} + G_{\text{cool}}} = \frac{\tau_0}{L+1} \quad \tau_0 = C_A / G_{\text{e-ph}}$$

Квантовая эффективность N и S абсорберов

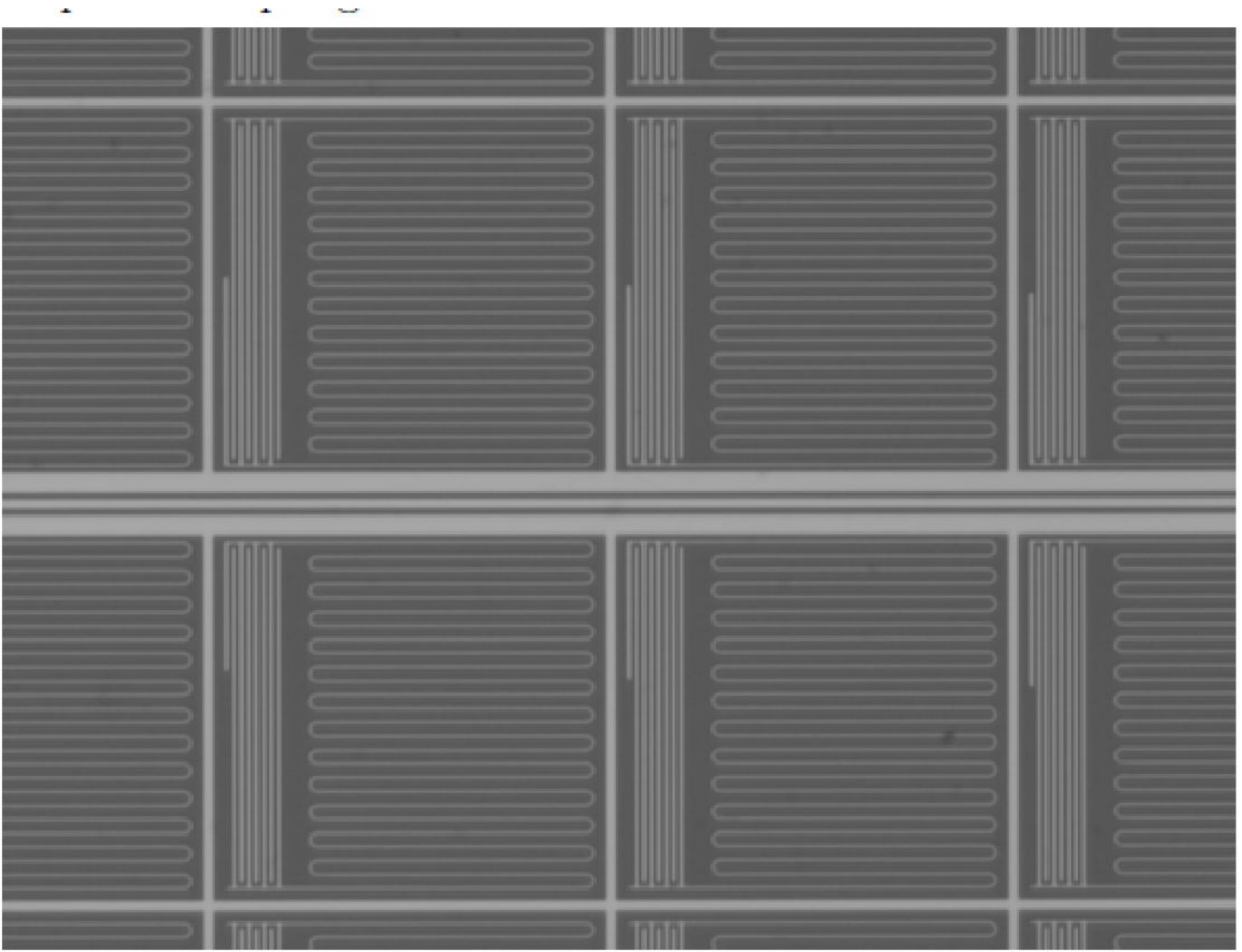


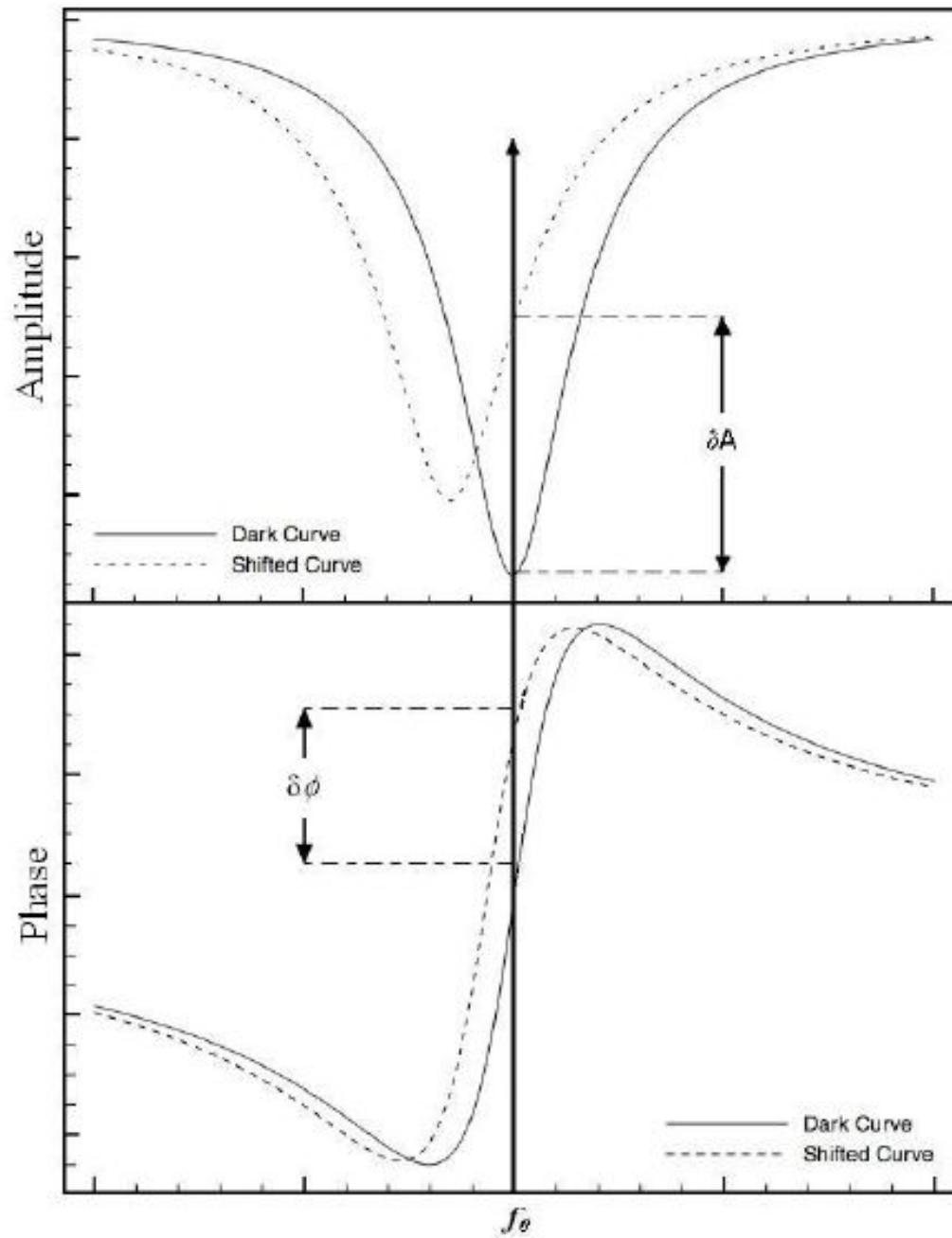
Массив – частотно селективная поверхность

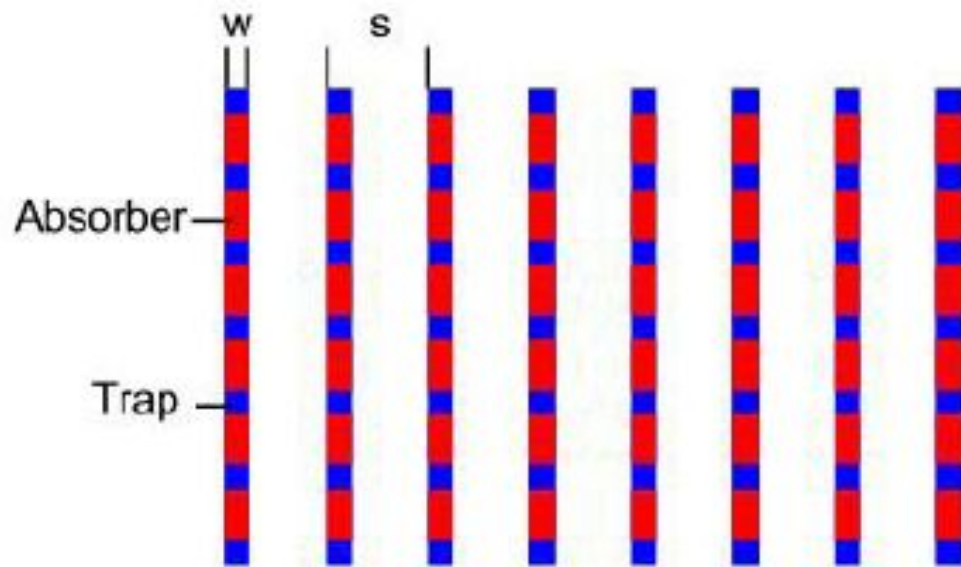


Lumped element kinetic inductance detectors for far-infrared astronomy

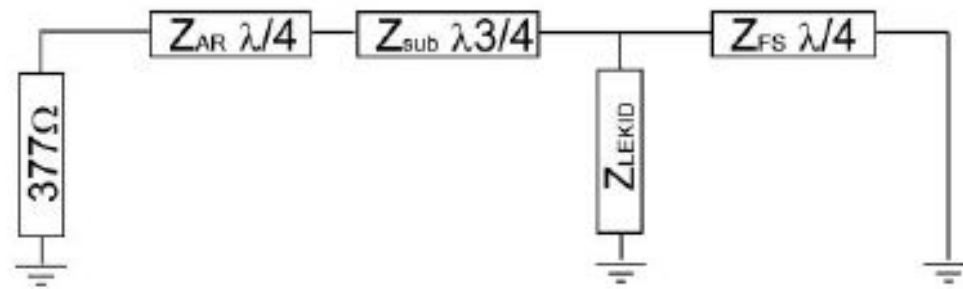
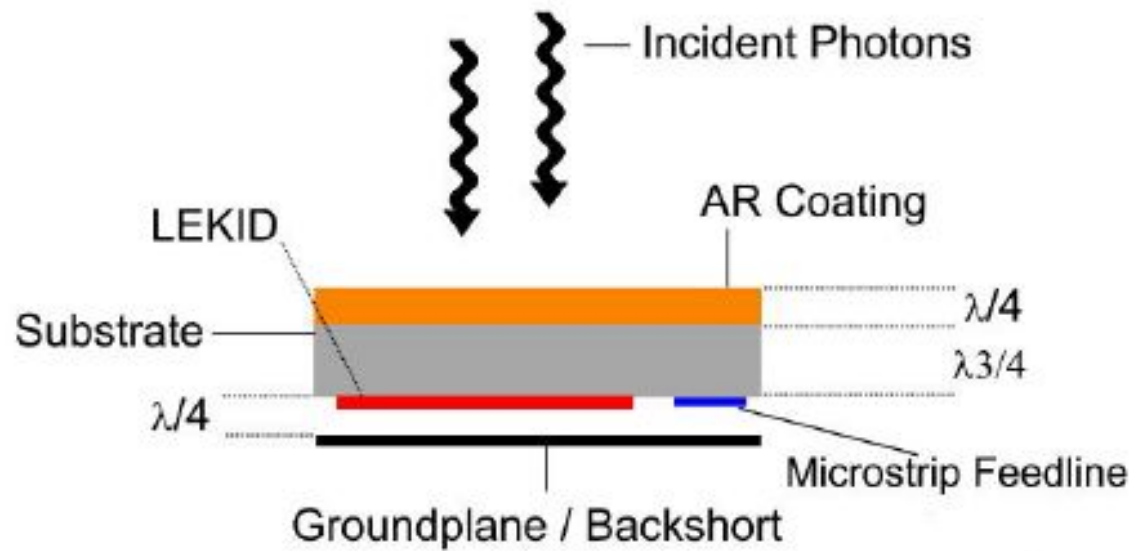
Simon Doyle^a, Jack Naylon^b, Philip Marskopf^a, Adrian Porch^b, Stafford Withington^c, David Goldie^c, Dorota M. Glowacka^c, Jochem J.A. Baselmans^b, Stephen J. C. Yates^b, Henk Hoovers^b



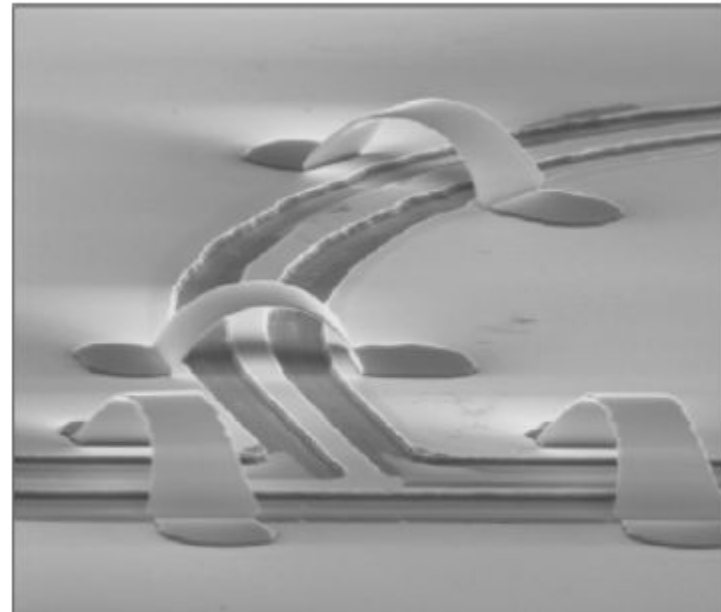
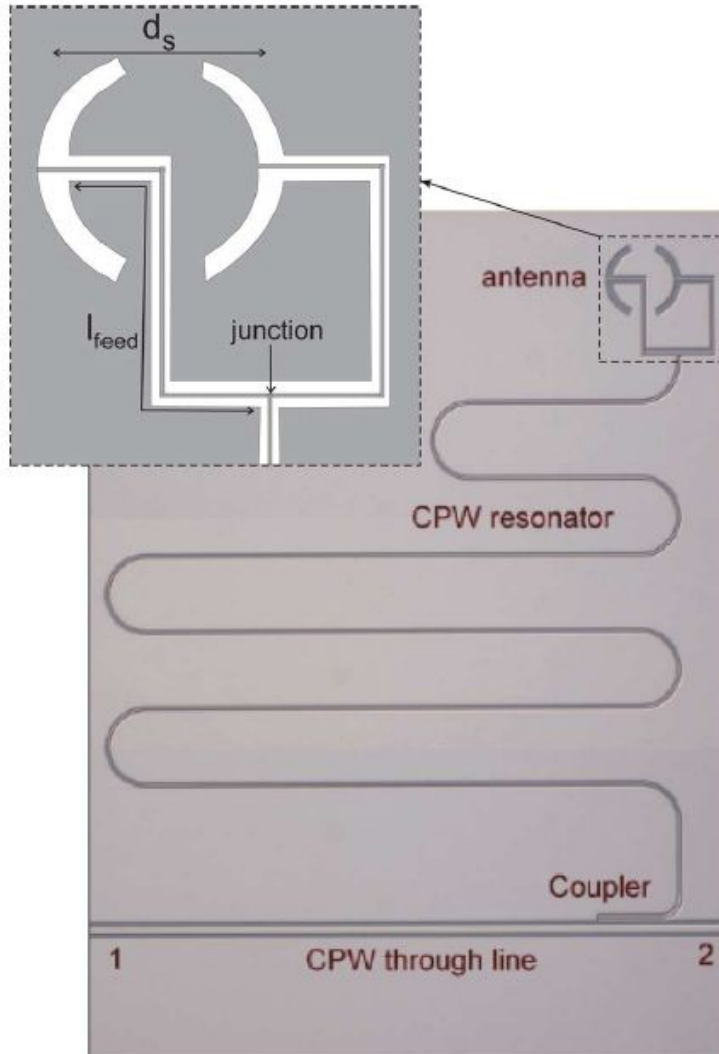




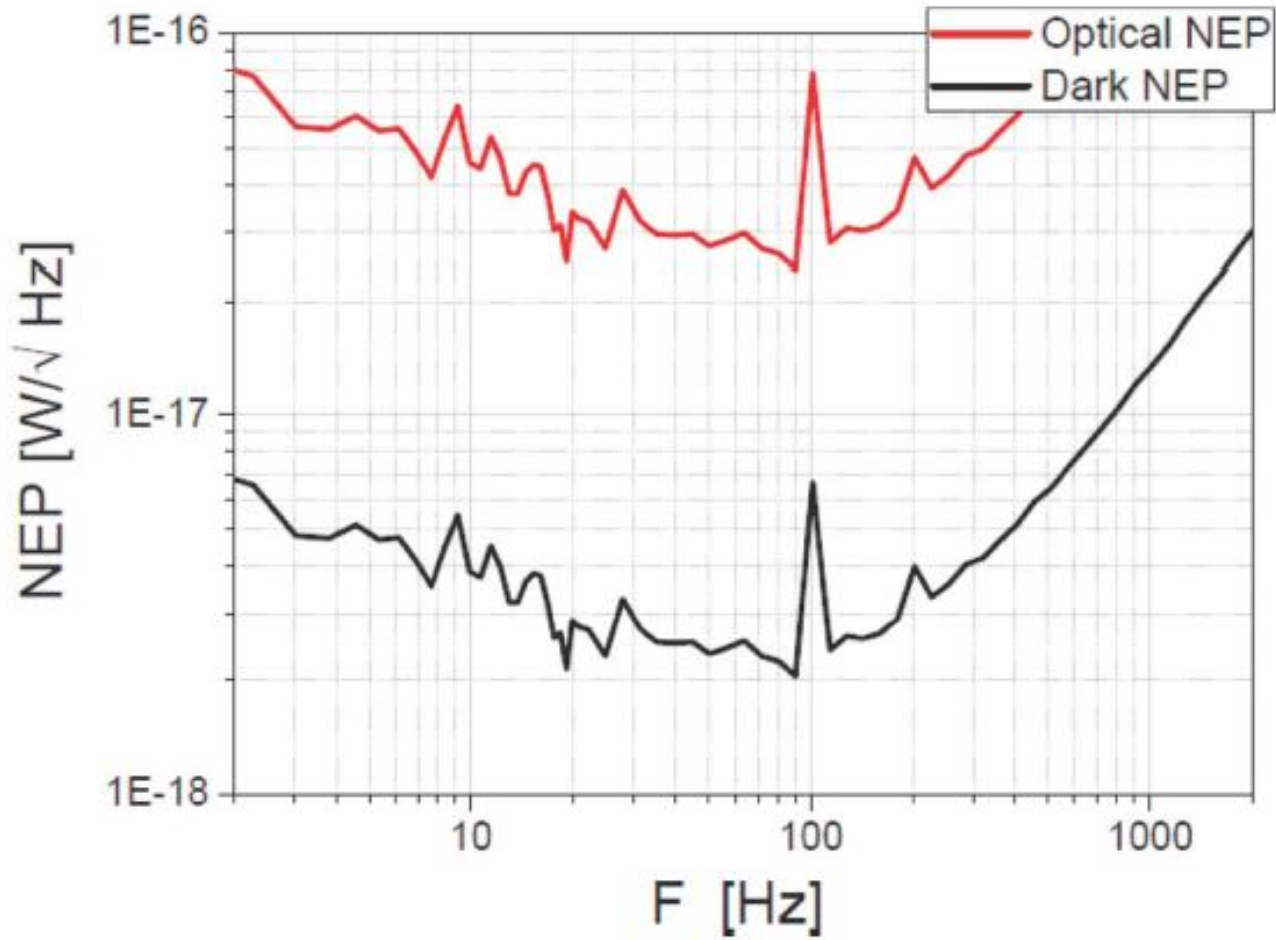
$$Z_{eff} = \frac{Z}{F} = Z \frac{s}{w}$$



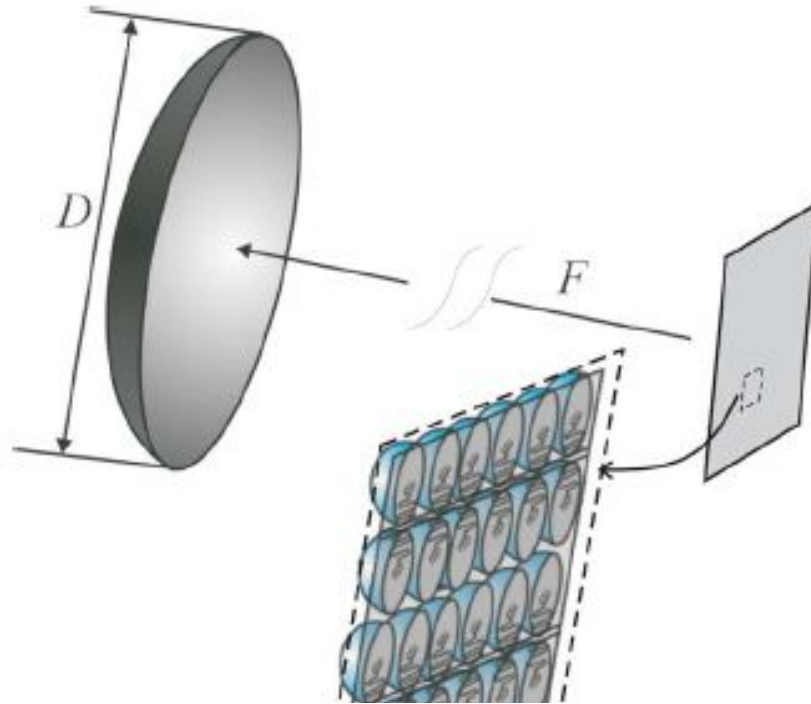
Массив линзовых антенн



MЭШ



Массив линзовых антенн



IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOL. 1, NO. 1, SEPTEMBER 2011

Progress in Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors

Andrey Baryshev, Jochem J. A. Baselmans, Angelo Freni, *Senior Member, IEEE*,
Giampiero Gerini, *Senior Member, IEEE*, Henk Hoevers, Annalisa Iacono, *Student Member, IEEE*,
and Andrea Neto, *Senior Member, IEEE*

Тип болометра	Энергия квантования, мкэВ	Характерный параметр абсорбера, мК	$NEP_{shot},$ $10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_e = 9$	$T_e = 50$	1
БСП	$\Delta = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Delta = 200$	$T_c = 1200 \text{ (Al)}$	7