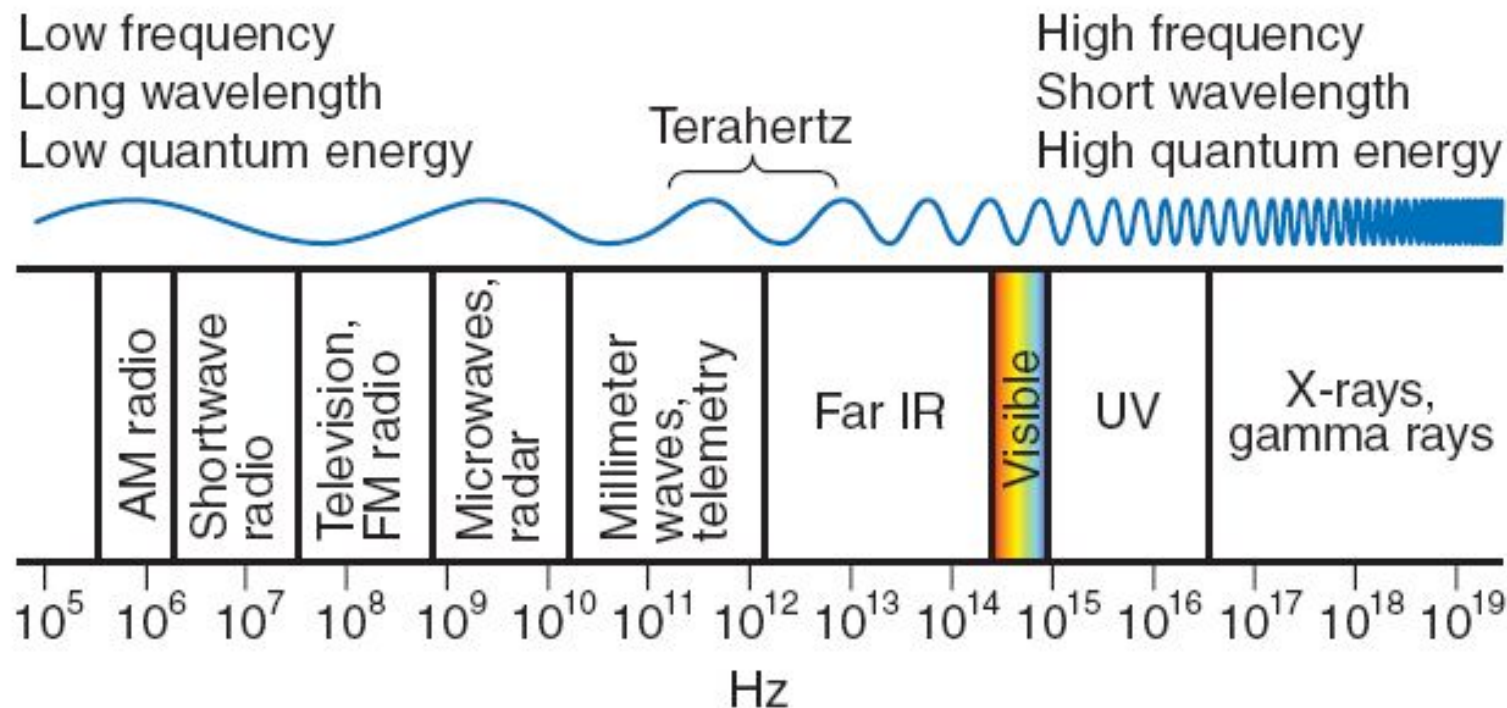


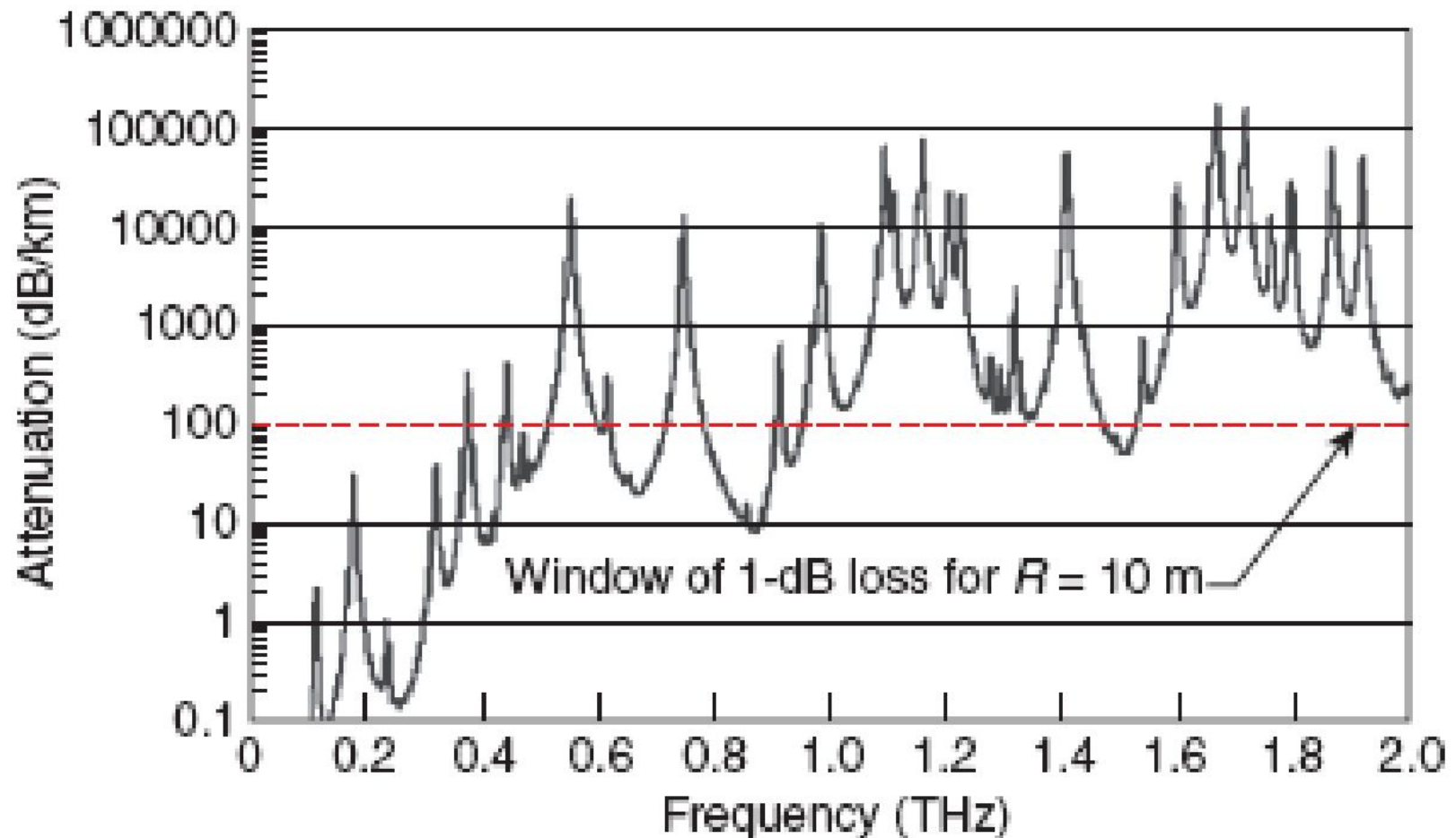
Криогенные детекторы терагерцового диапазона



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

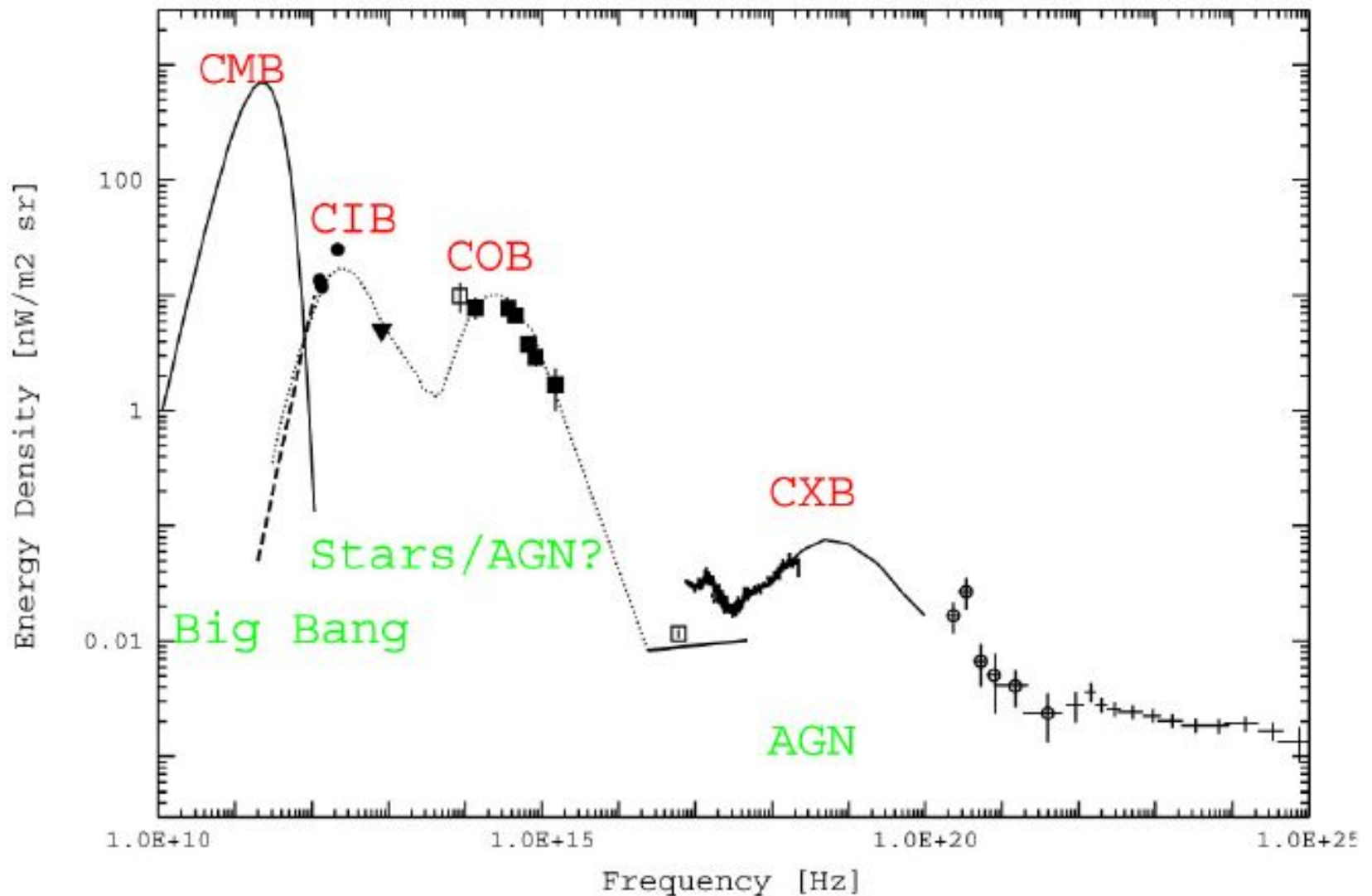


Два семейства методов

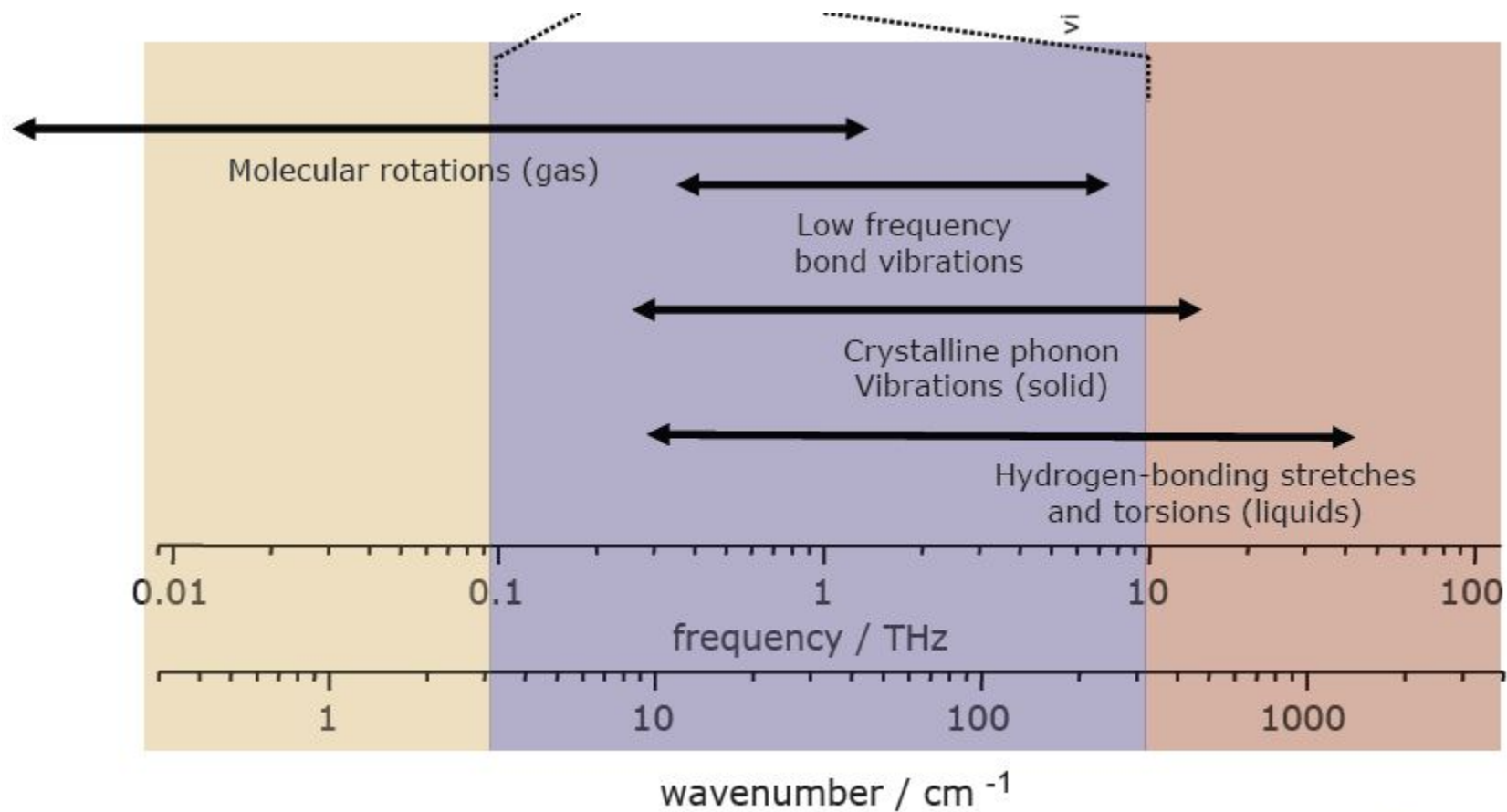
- **Понижение частоты квантово-оптических методов**
 - Низкое спектральное разрешение (ширина линии источников >10 кГц), акустооптика, брэгговские решетки, детекторы мощности
- **Увеличение рабочей частоты радиофизических методов**
 - Все функциональные элементы могут быть представлены в виде R,L,C эквивалентных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

Радиоастрономия

The Cosmic Energy Density Spectrum

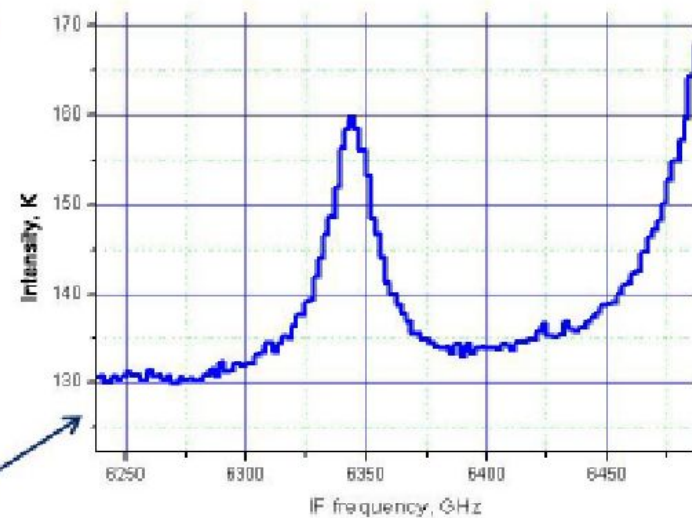
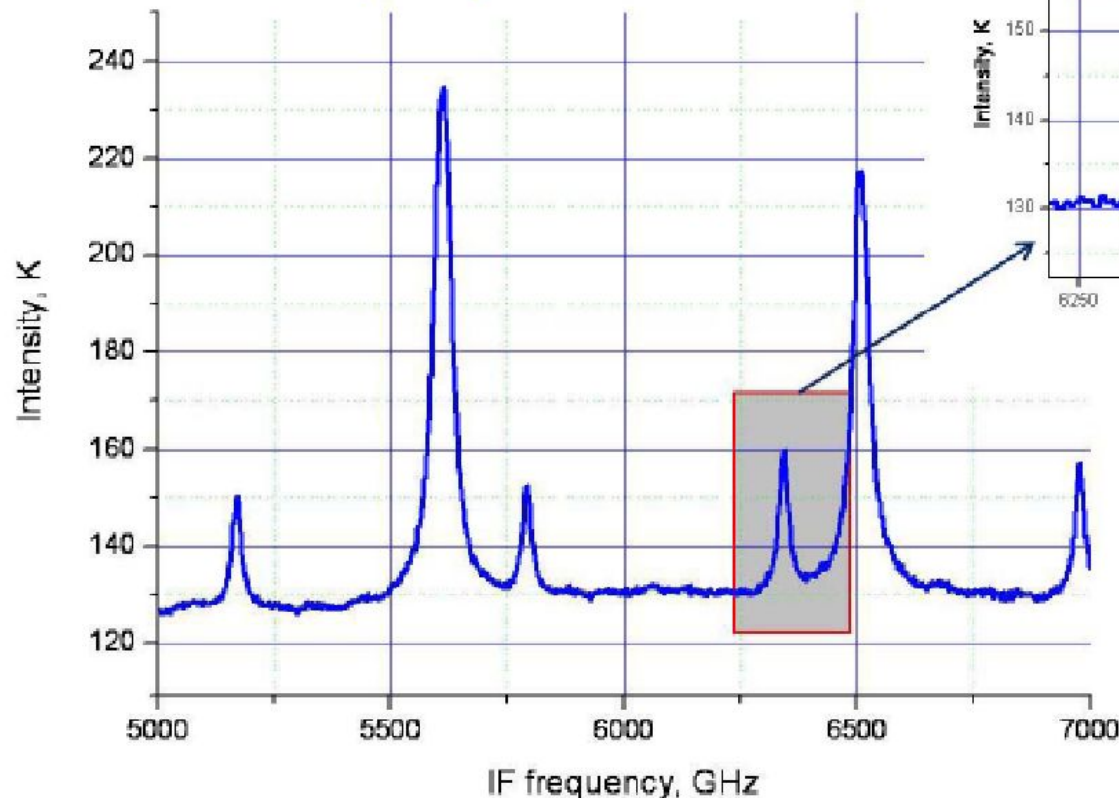


Спектроскопия



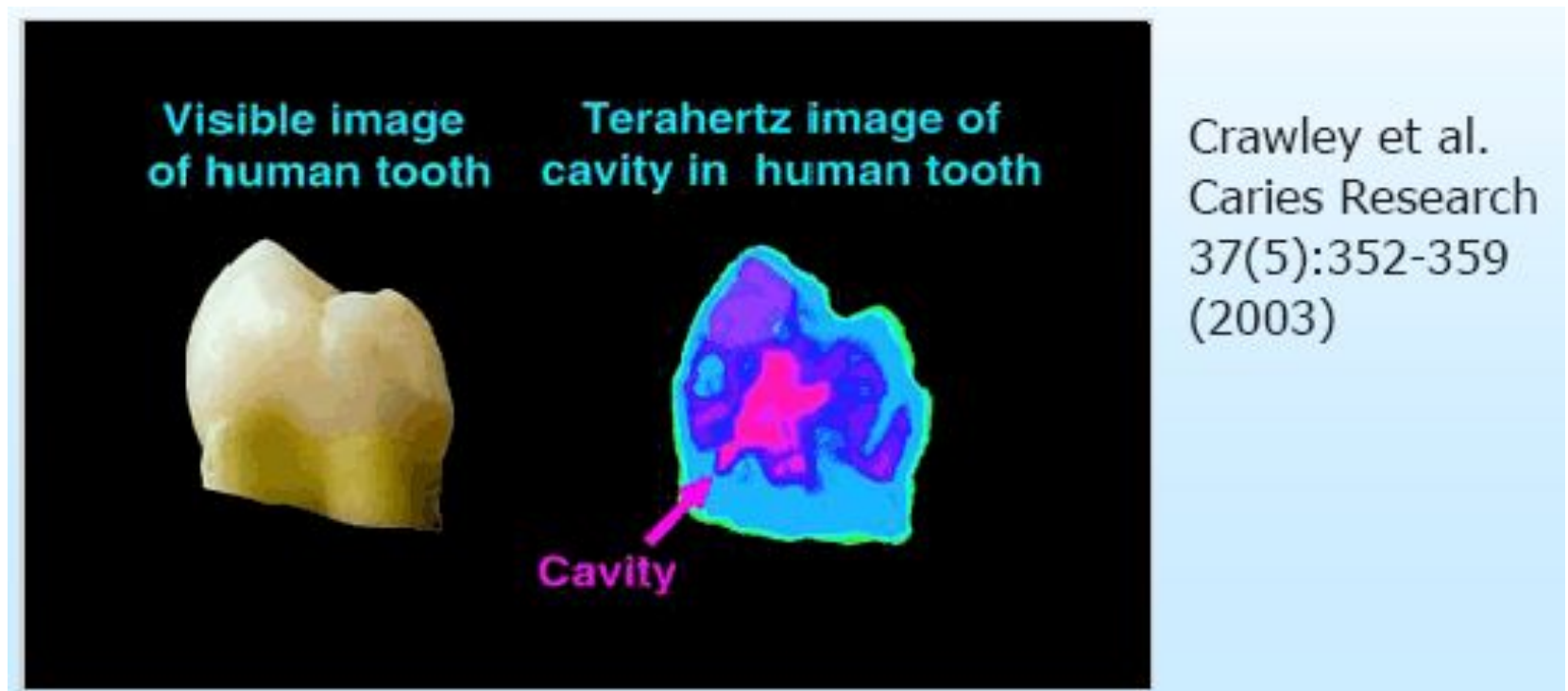
Пример спектра, измеренного гетеродинным методом

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

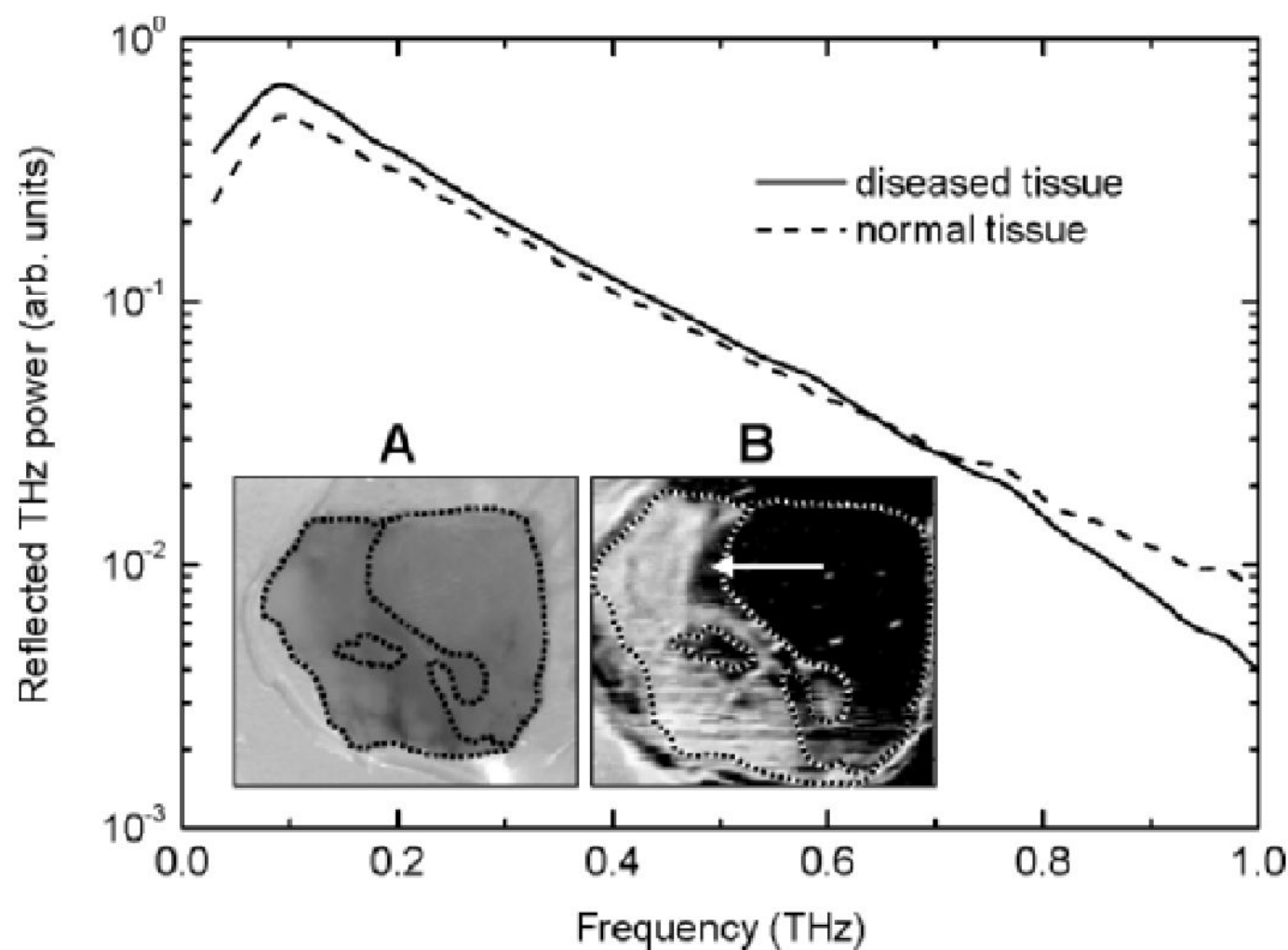


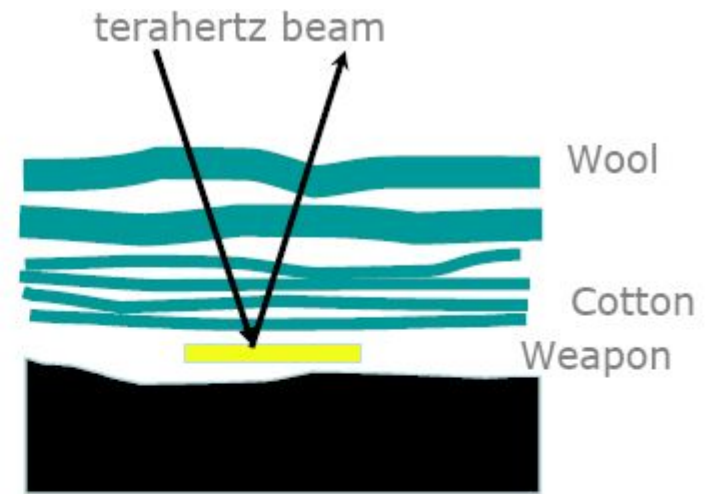
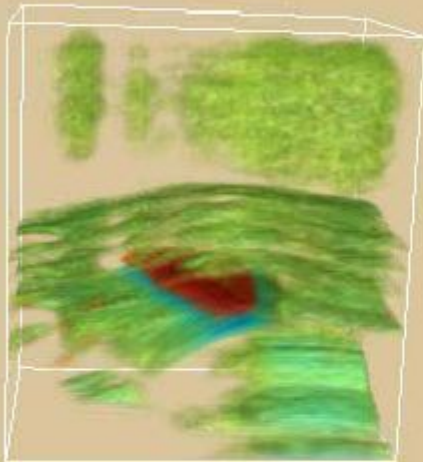
Two strong lines are saturated; weaker lines are not saturated isotopes. The lines are detected, one in the LSB, the other one in the USB

Медицинская диагностика

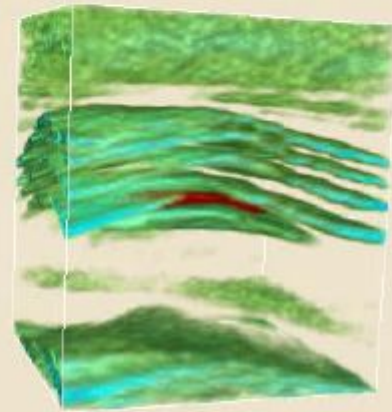


Базально-клеточная карцинома

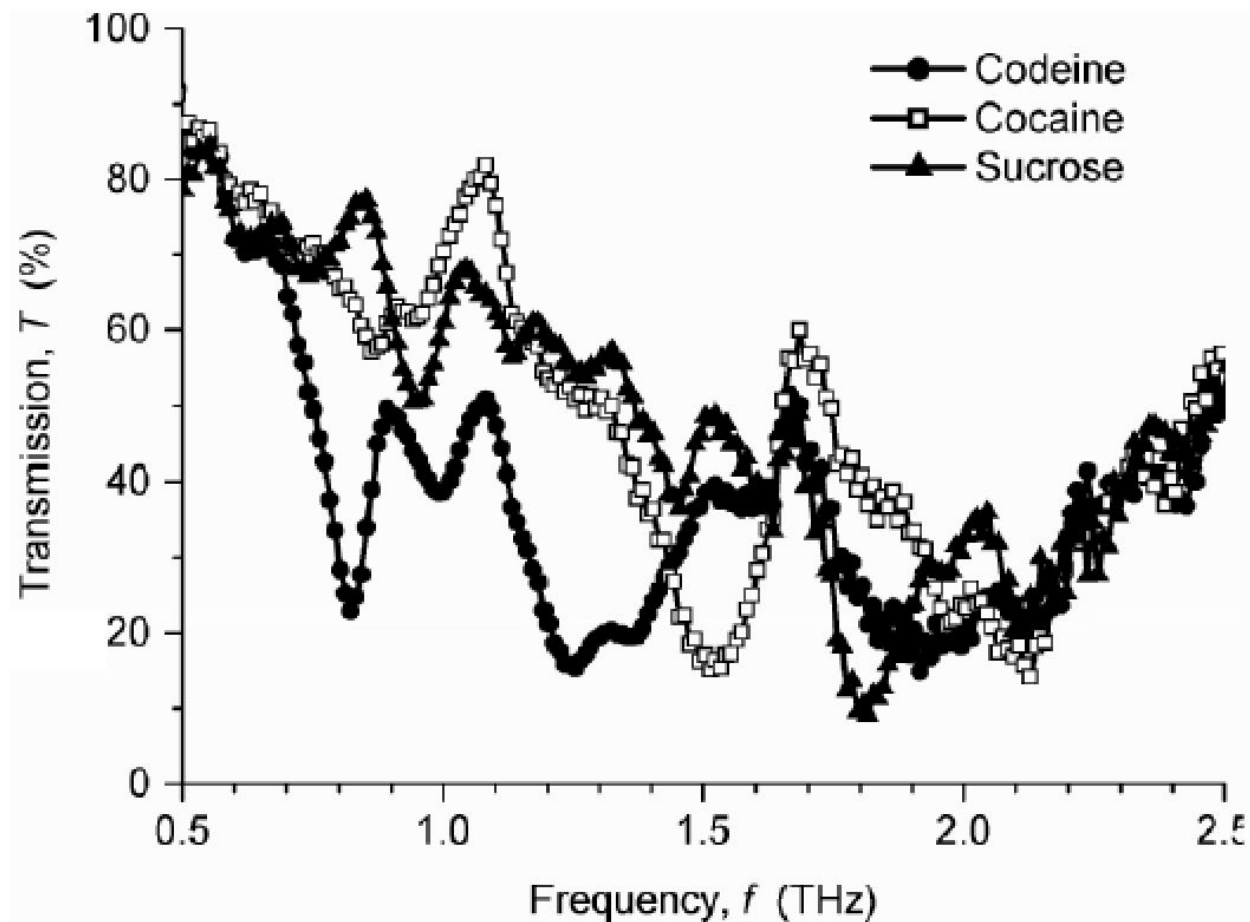




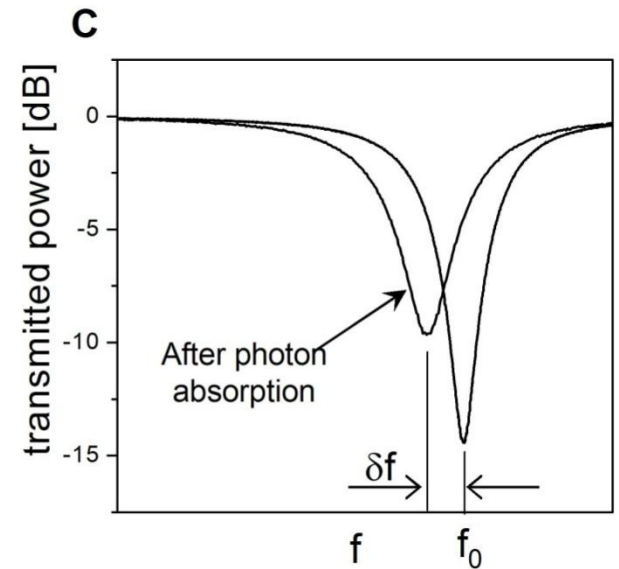
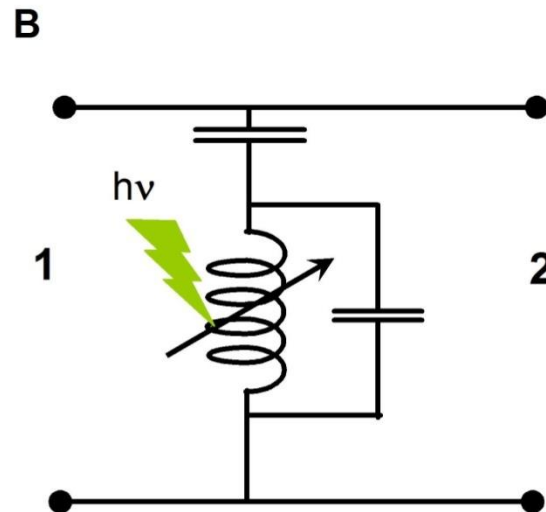
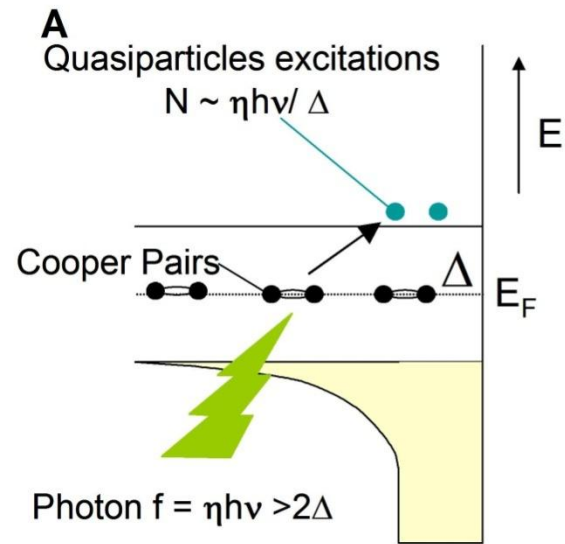
Subject's arm



Детектирование наркотических веществ



Детекторы кинетической ИНДУКТИВНОСТИ



Nb

CPW Resonator

Substrate

Coupler

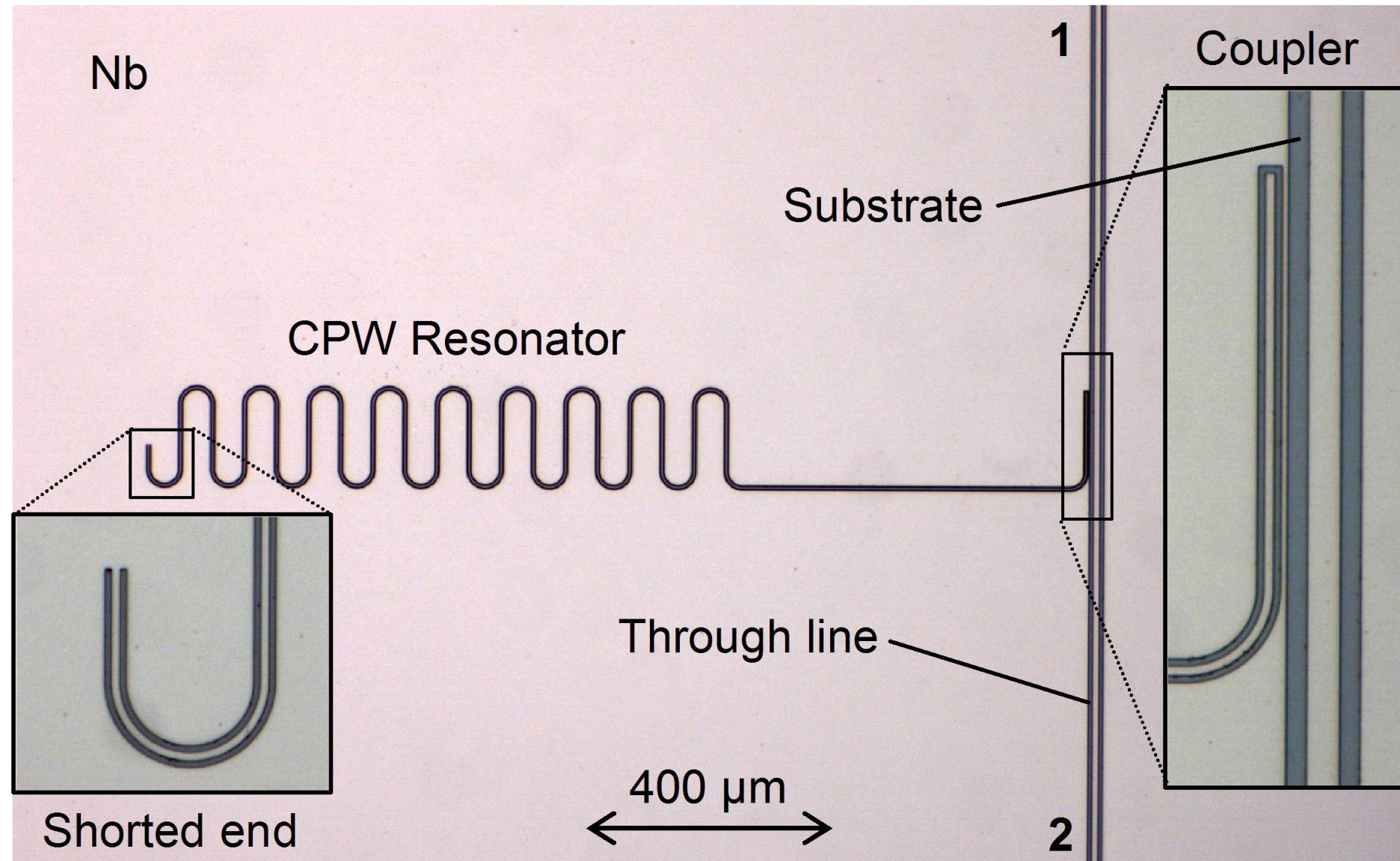
Through line

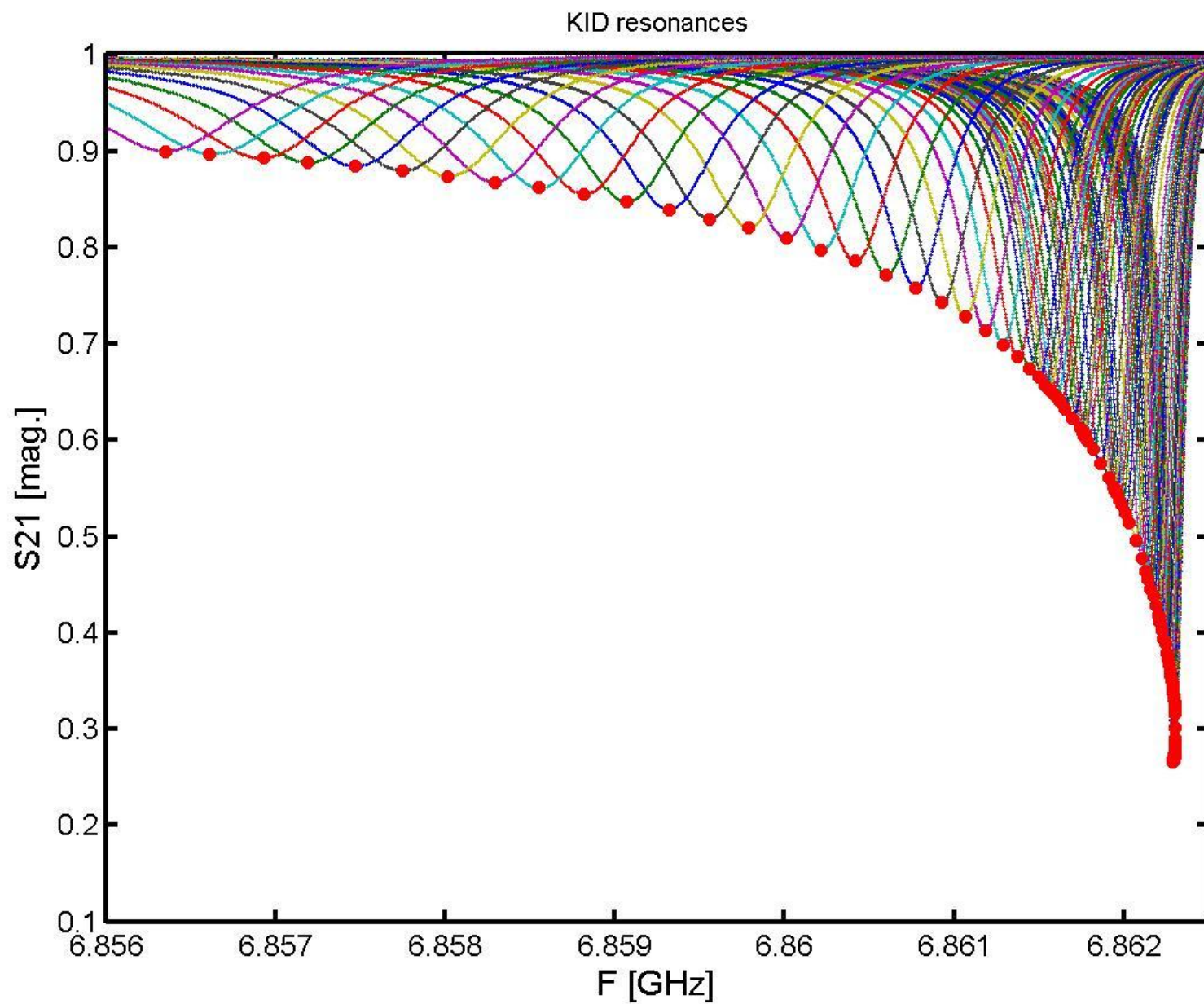
400 μm

Shorted end

1

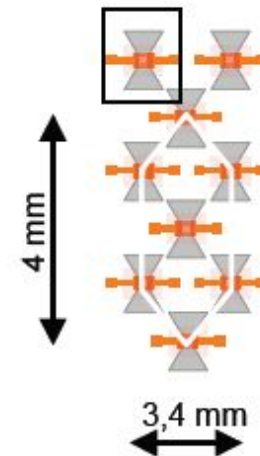
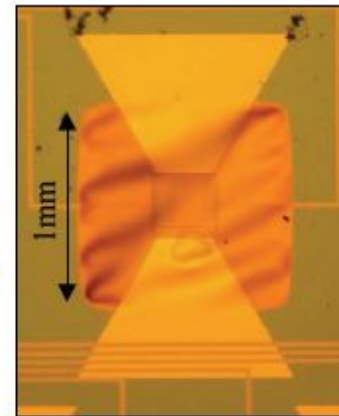
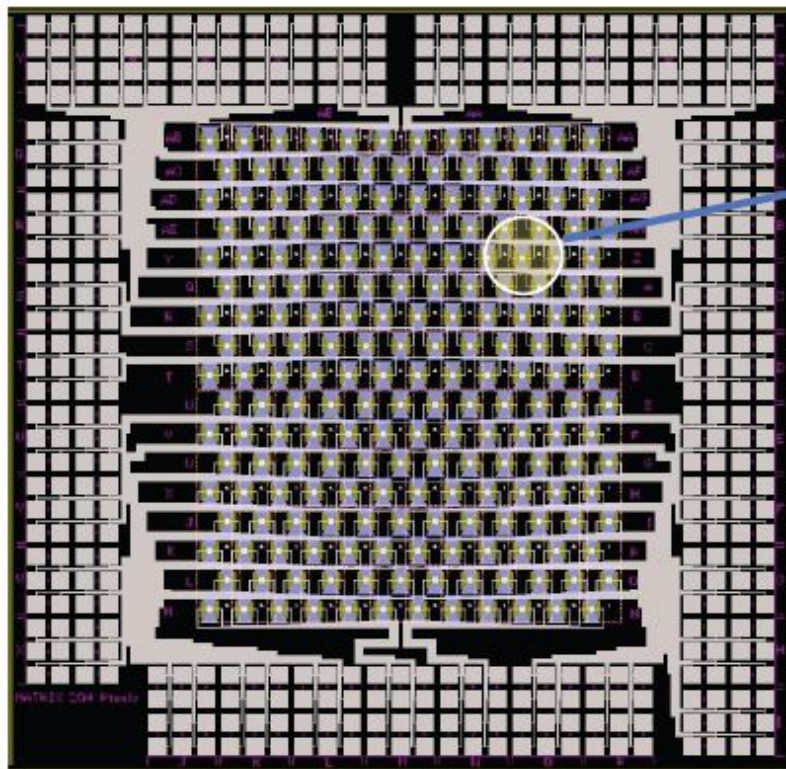
2





Детекторы с антенной

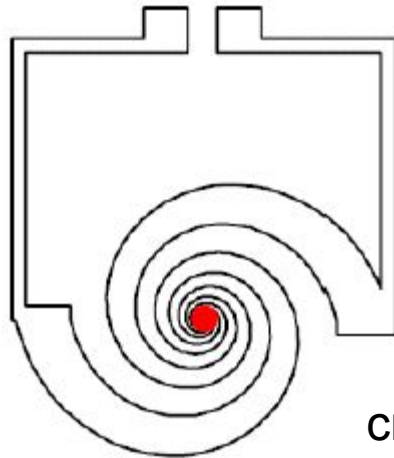
204 bolometers array with antennas



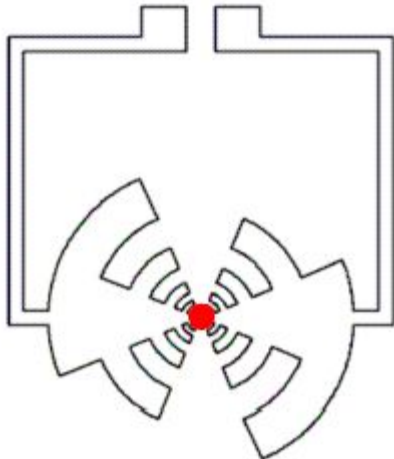
- Planar antenna network for imaging in millimeter wavelength
- Versatile fabrication process for future applications :
 - Polarisation sensitive detectors
 - Integrated frequency selection on the pixels
- Thermal sensor can be either high impedance or superconducting with NbSi

Примеры широкополосных антенн

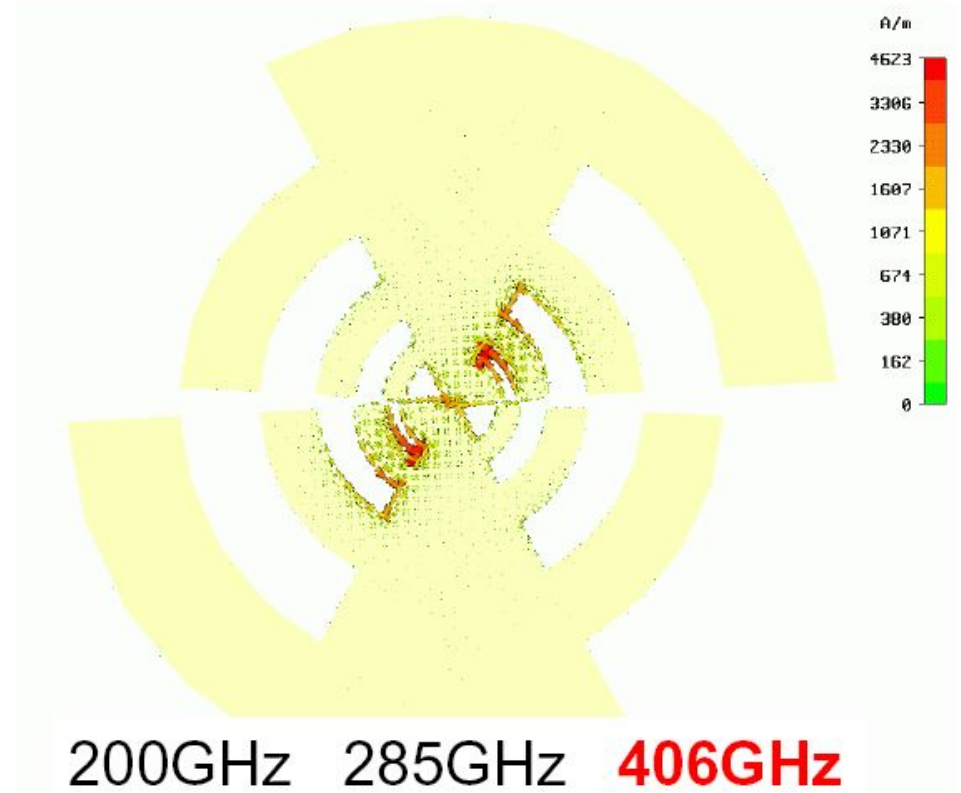
Поверхностные токи
логопериодической антенны



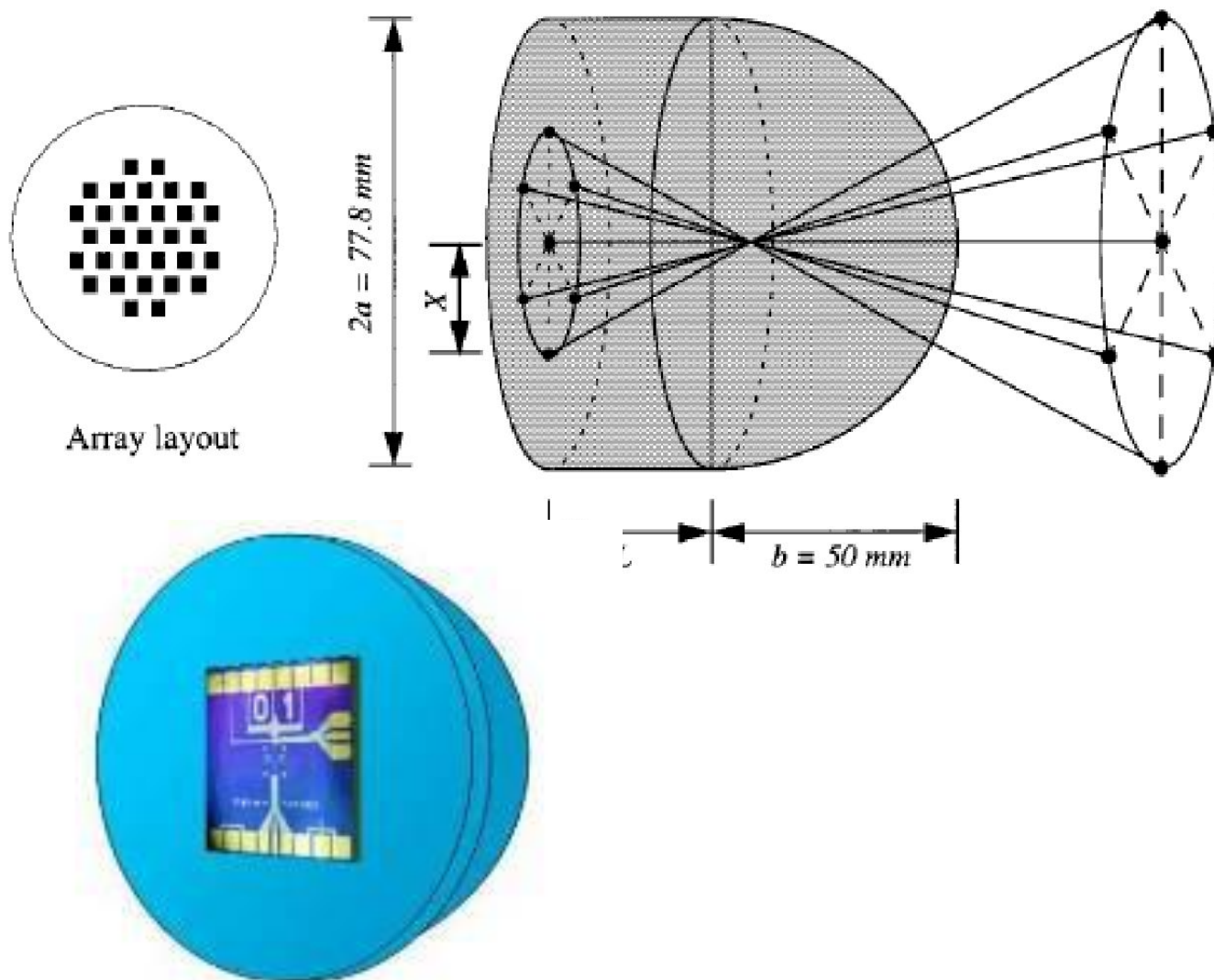
спиральная



логопериодическая

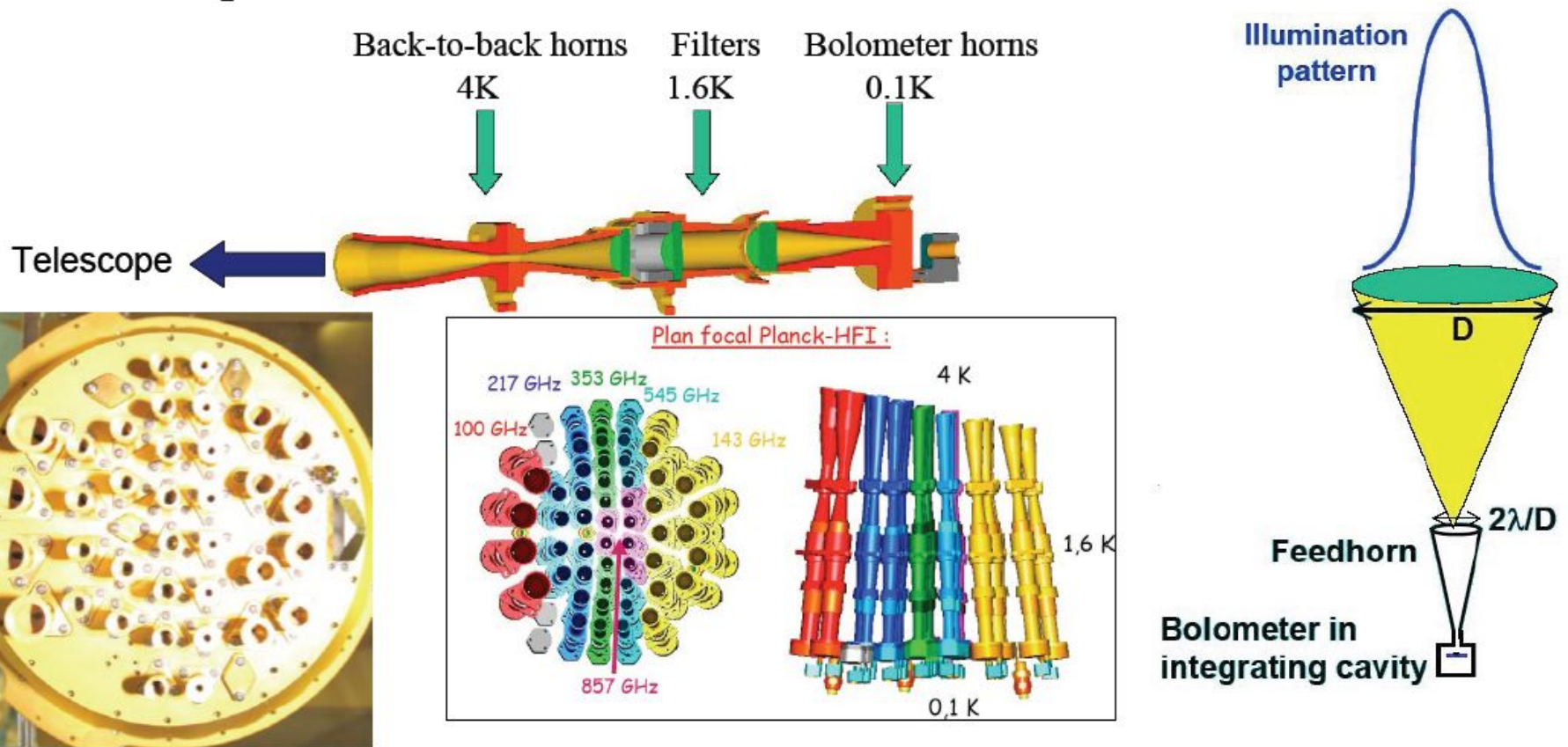


Размещение чипа на квазиоптической линзе



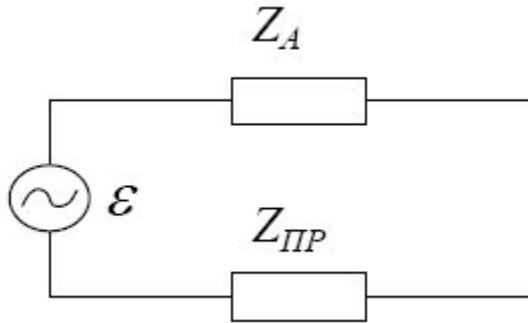
Волноводные конструкции

Example: Planck-HFI



Недостаток - узкополосность

Согласование антенны с приемником



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

Импеданс антенны $Z_A = R_A + iX_A$

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

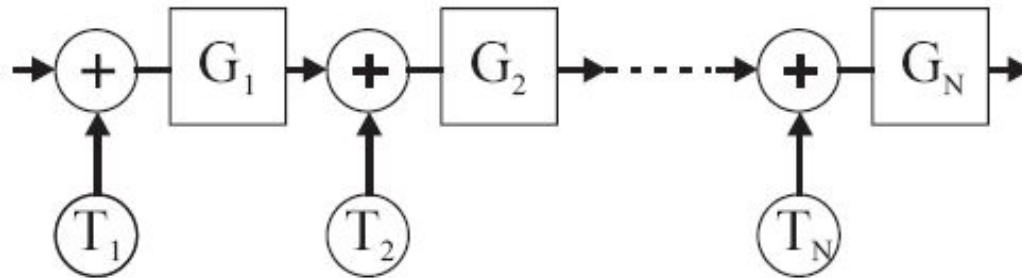
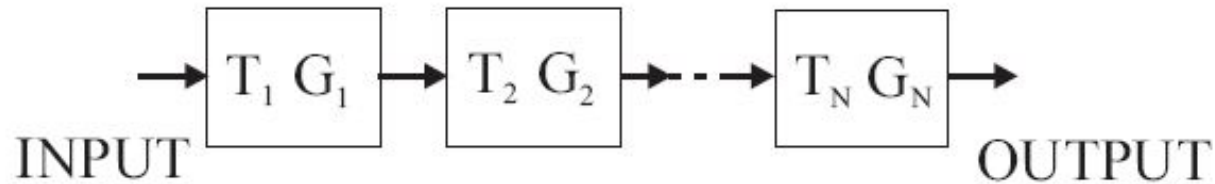
$$P_{\text{ПР}} = \frac{\varepsilon^2 \cdot R_{\text{ПР}} / 2}{(R_{\text{ПР}} + R_A)^2 + (X_{\text{ПР}} + X_A)^2}$$

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

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

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

$$P_1 = k B G A (T_1 + T_n) \quad P_2 = k B G A (T_2 + T_n)$$

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

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

Прямое детектирование

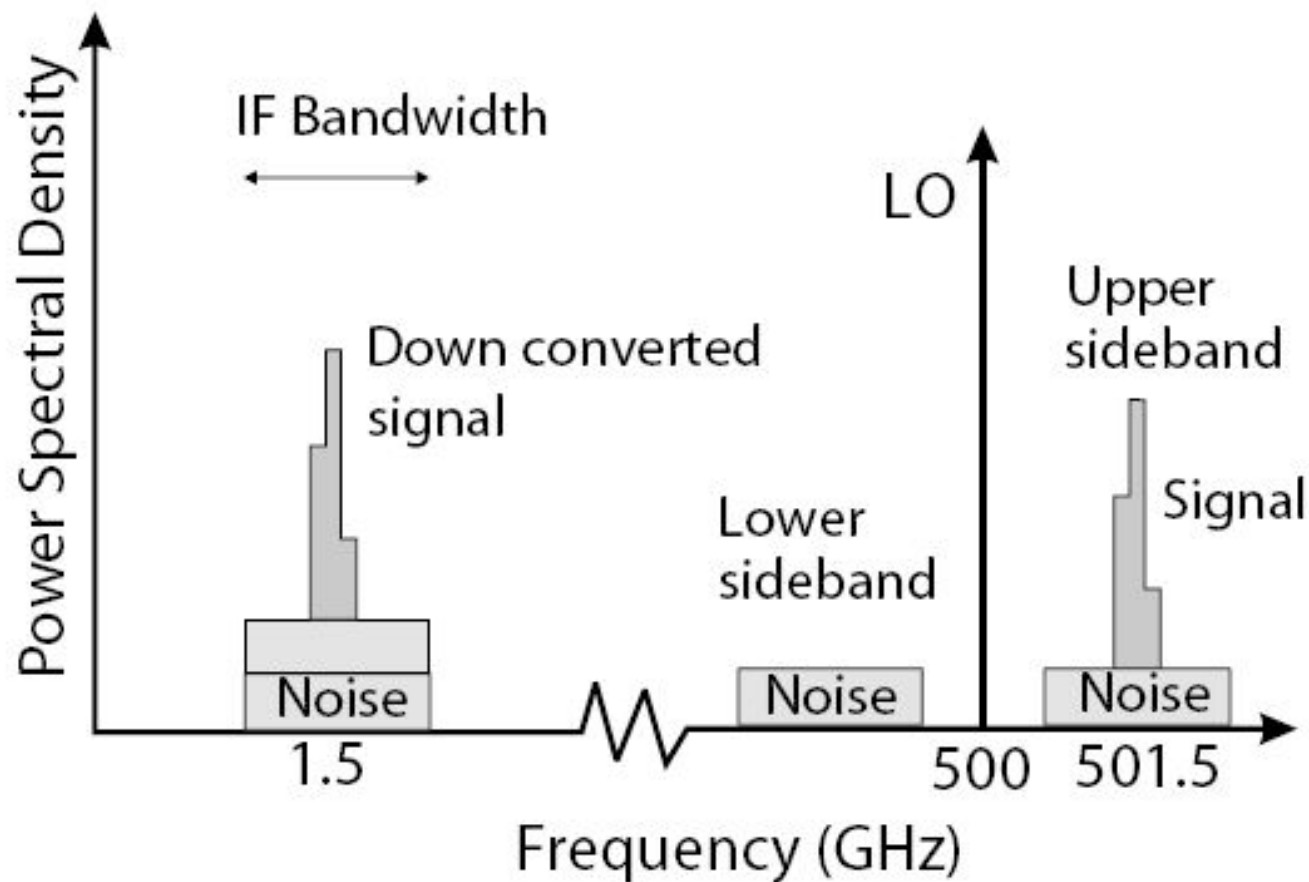
$$I(V_0 + V_\omega \cos \omega t) = I(V_0) + V_\omega \cos \omega t \frac{\partial I}{\partial V} + \frac{1}{2} V_\omega^2 \cos^2 \omega t \frac{\partial^2 I}{\partial V^2} + \square$$

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

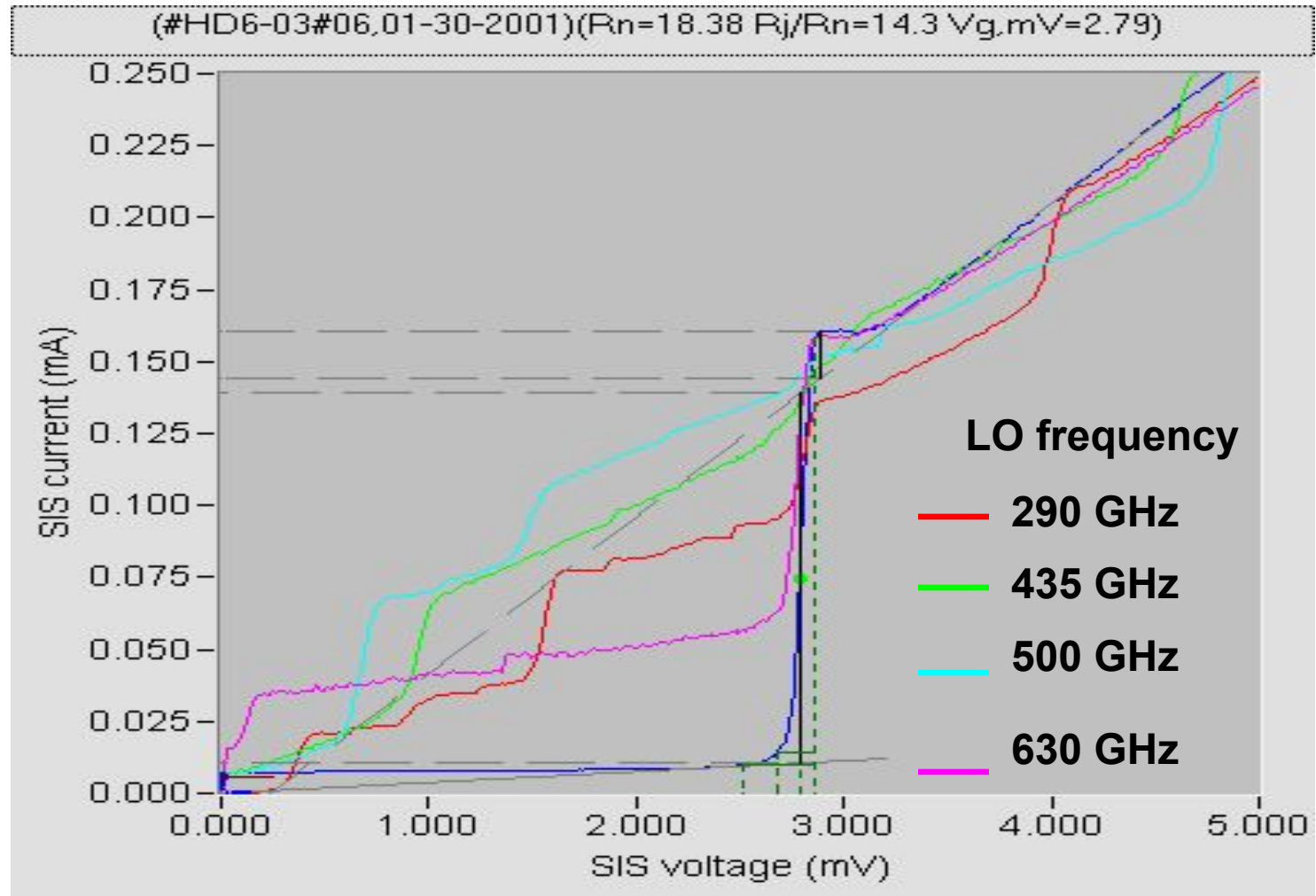
Отклик по постоянному току $\Delta I_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} V_\omega^2 \cos^2 \omega t \frac{\partial^2 I}{\partial V^2} d(\omega t) = \frac{1}{4} V_\omega^2 \frac{\partial^2 I}{\partial V^2}$

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





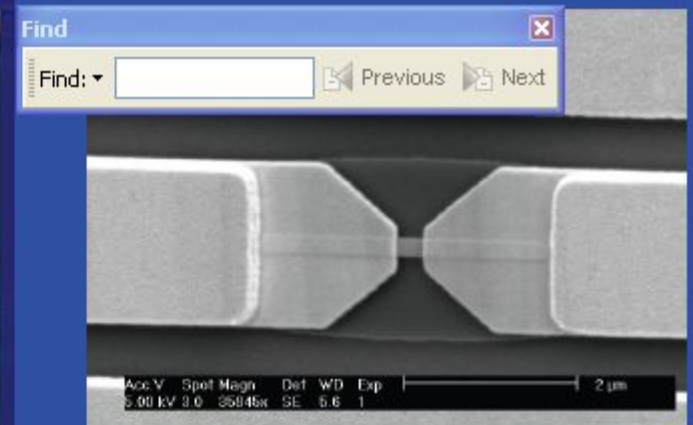
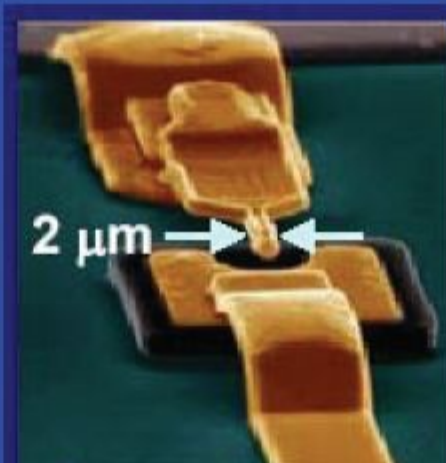
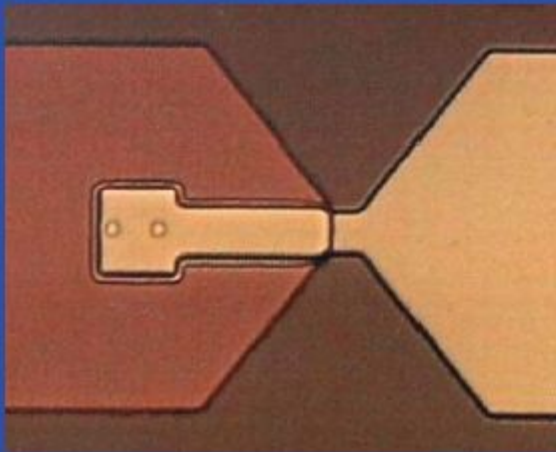
← → SIS mixer



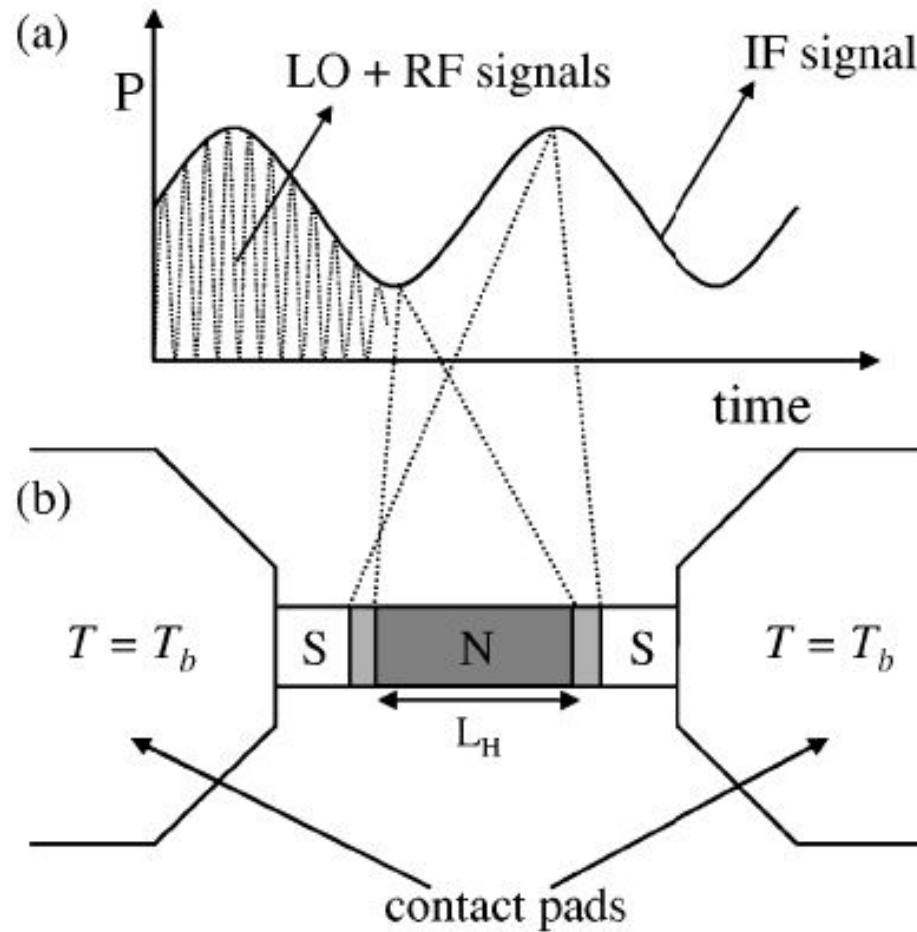
Schottky mixer : more LO power
(> 1mW), and less sensitive



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

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

$\sim (T_e^4 - T_b^4)$

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

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

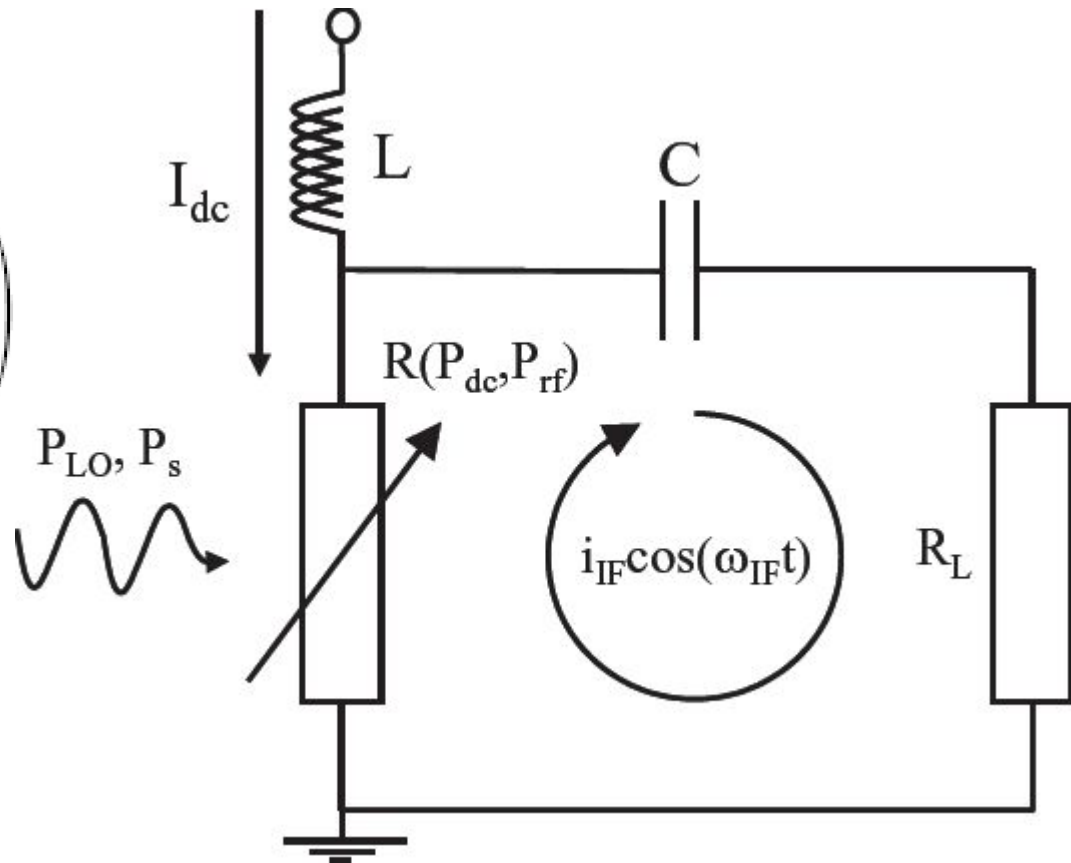
$L_b < \lambda_{th}$ -diffusion cooled

Responsivity

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

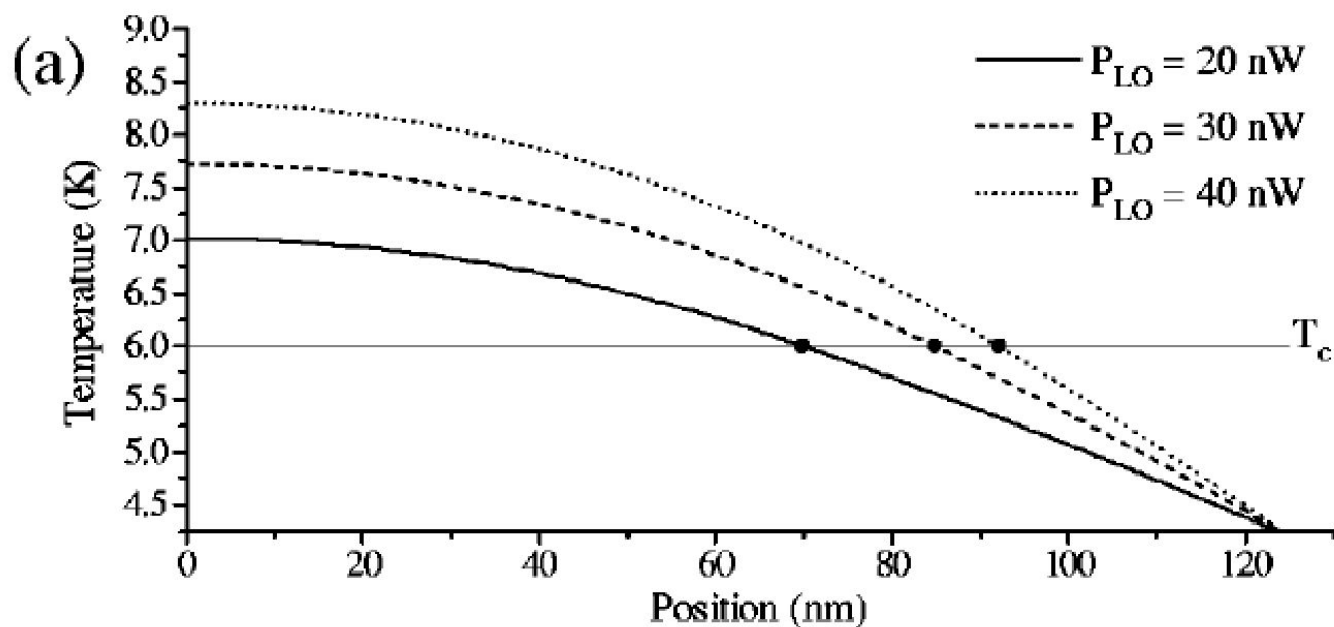
$$\tau = \frac{C}{G}$$

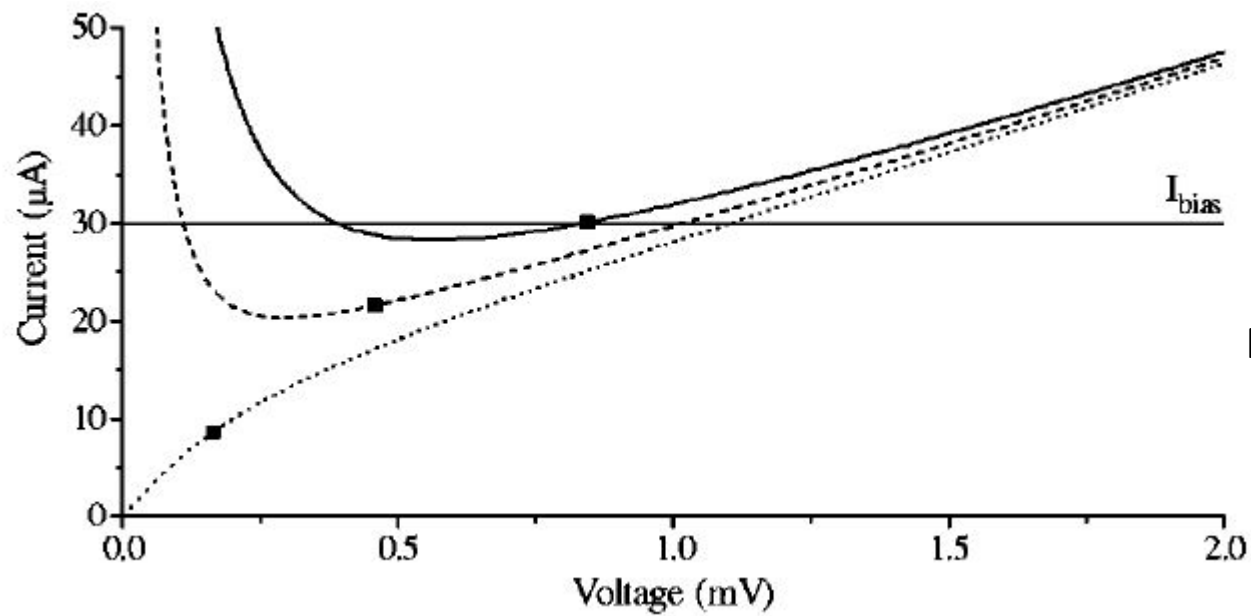
$$S = \frac{I \, dR/dT}{G(1 + \omega_{IF}^2 \tau^2)^{1/2}} = \frac{S_0}{G(1 + \omega_{IF}^2 \tau^2)^{1/2}}$$



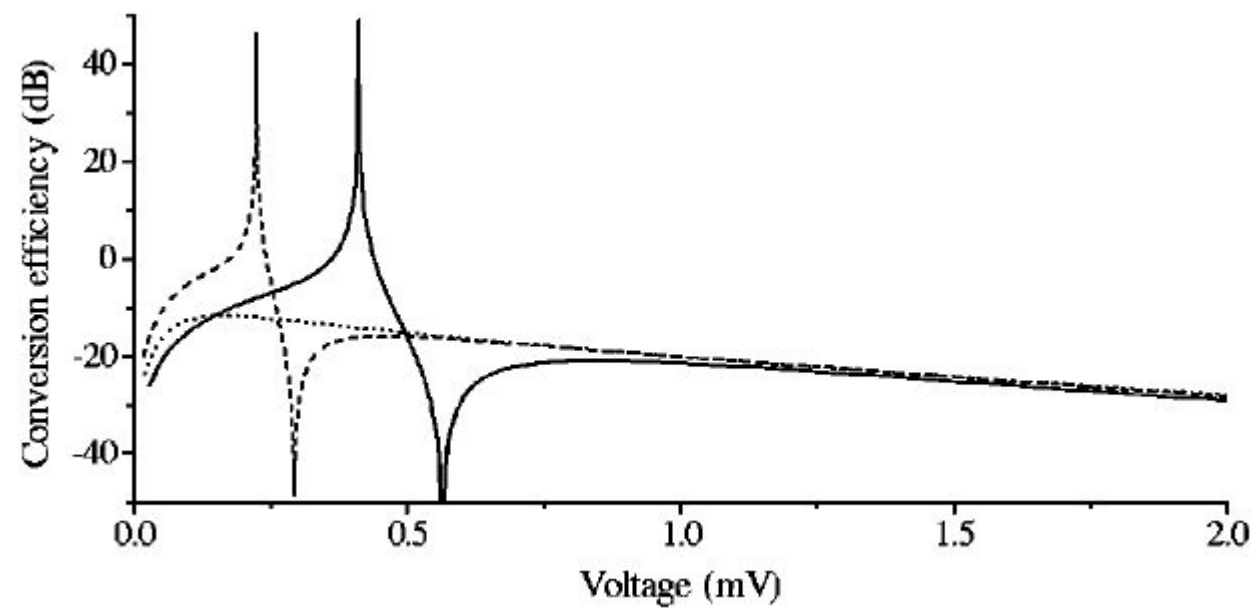
$$\eta = \frac{P_{IF}}{P_S} \sim 2S(\omega) \frac{P_{LO}}{Z_L} \quad - \text{Эффективность преобразования}$$

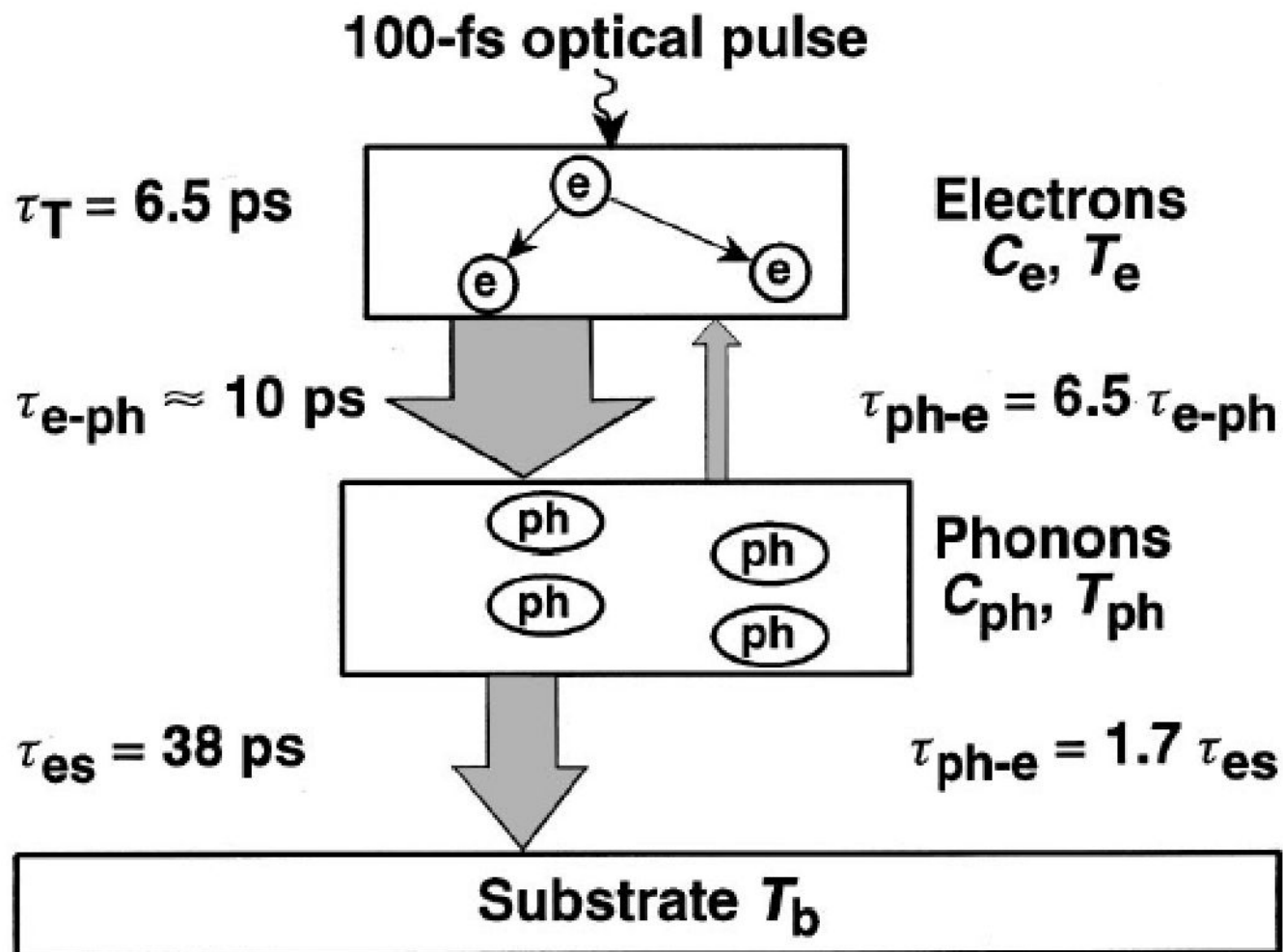
$$\eta = \frac{2S_0^2 P_{LO} Z_L}{(Z_L + Z_B)^2} \quad Z_B = \frac{dV}{dI}$$





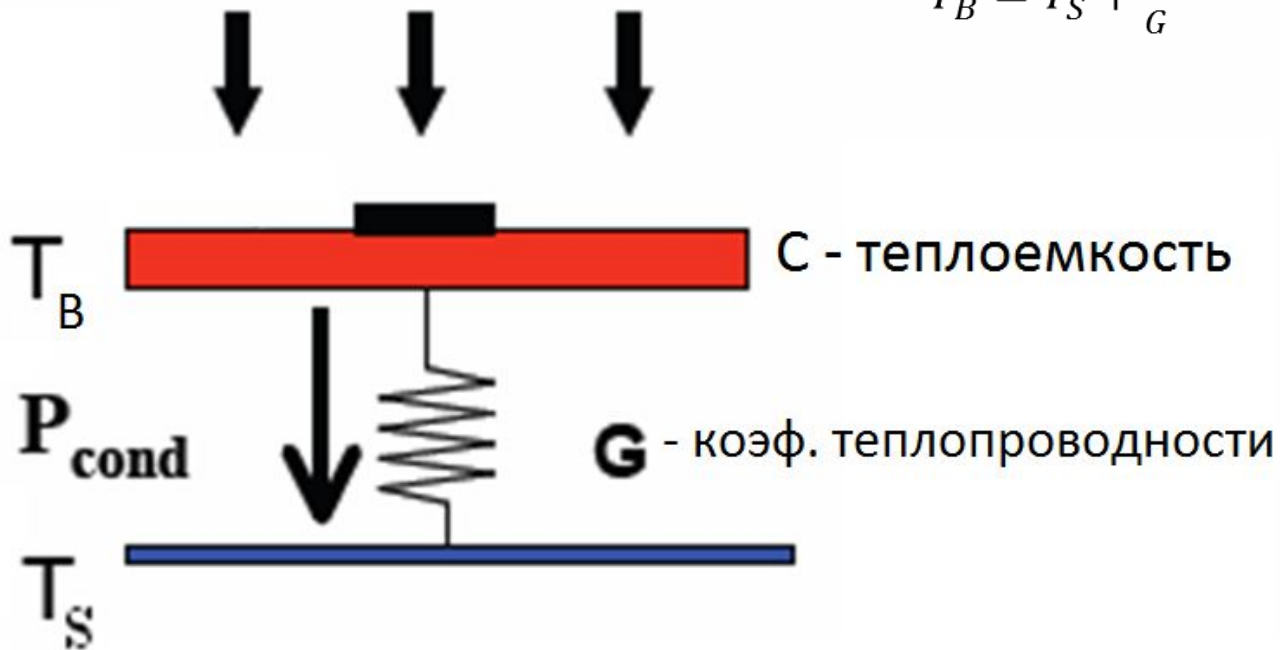
$P_{\text{LO}} = 20, 30, 40 \text{ nW}$





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

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

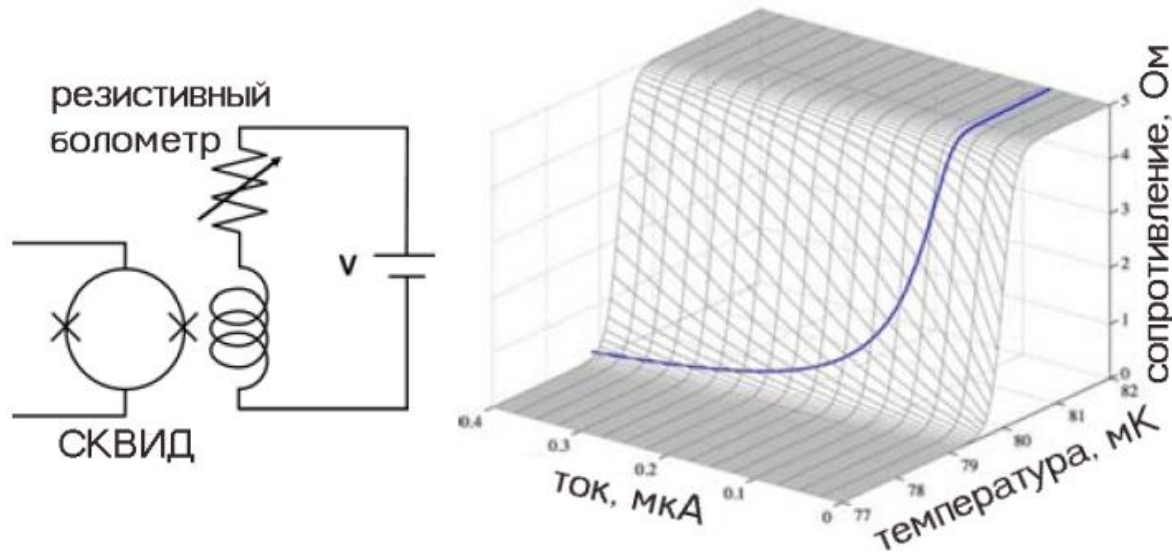
- Это оптическая мощность, приложенная к входу идеального (нешумящего) оптического приемника и создающая на выходе электрическую шумовую мощность, равную наблюдаемой на выходе фактически рассматриваемого приемника.
- Мощность сигнала на входе, при которой соотношение сигнал/шум на выходе равно 1, если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

Собственная МЭШ болометра

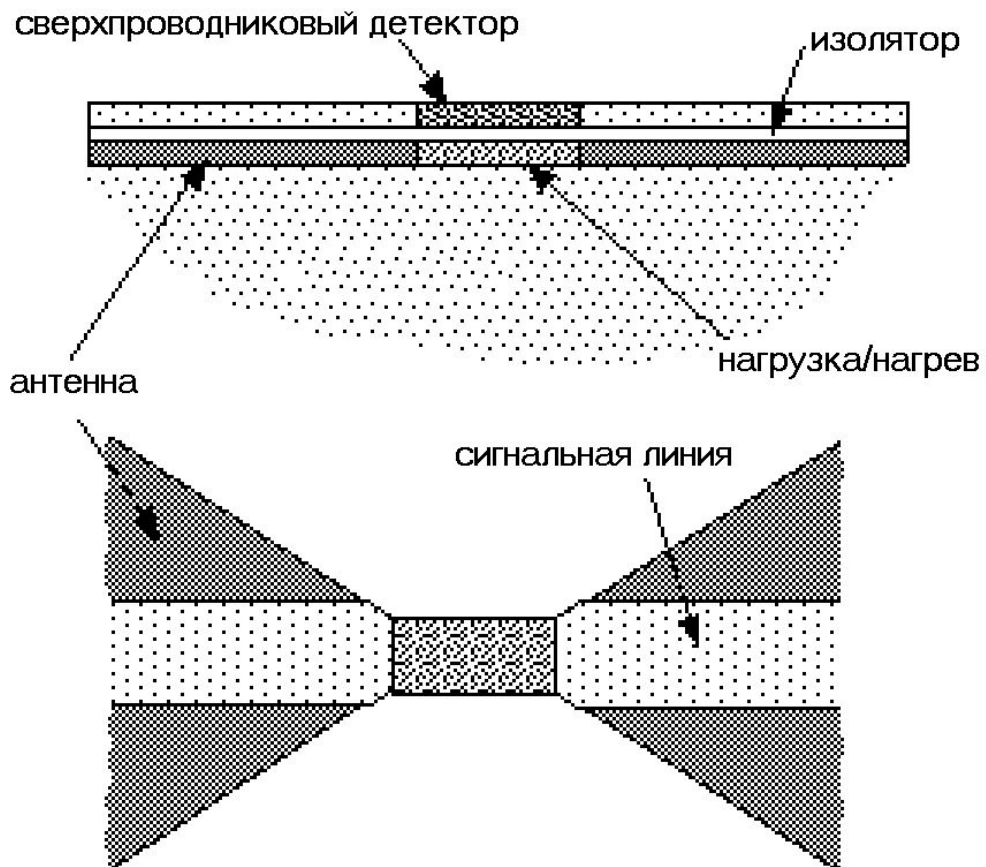
$$(NEP)^2 = (NEP_{phot})^2 + \frac{4kT^2G}{\gamma^2} + \frac{4kTR}{S^2}$$

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.



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

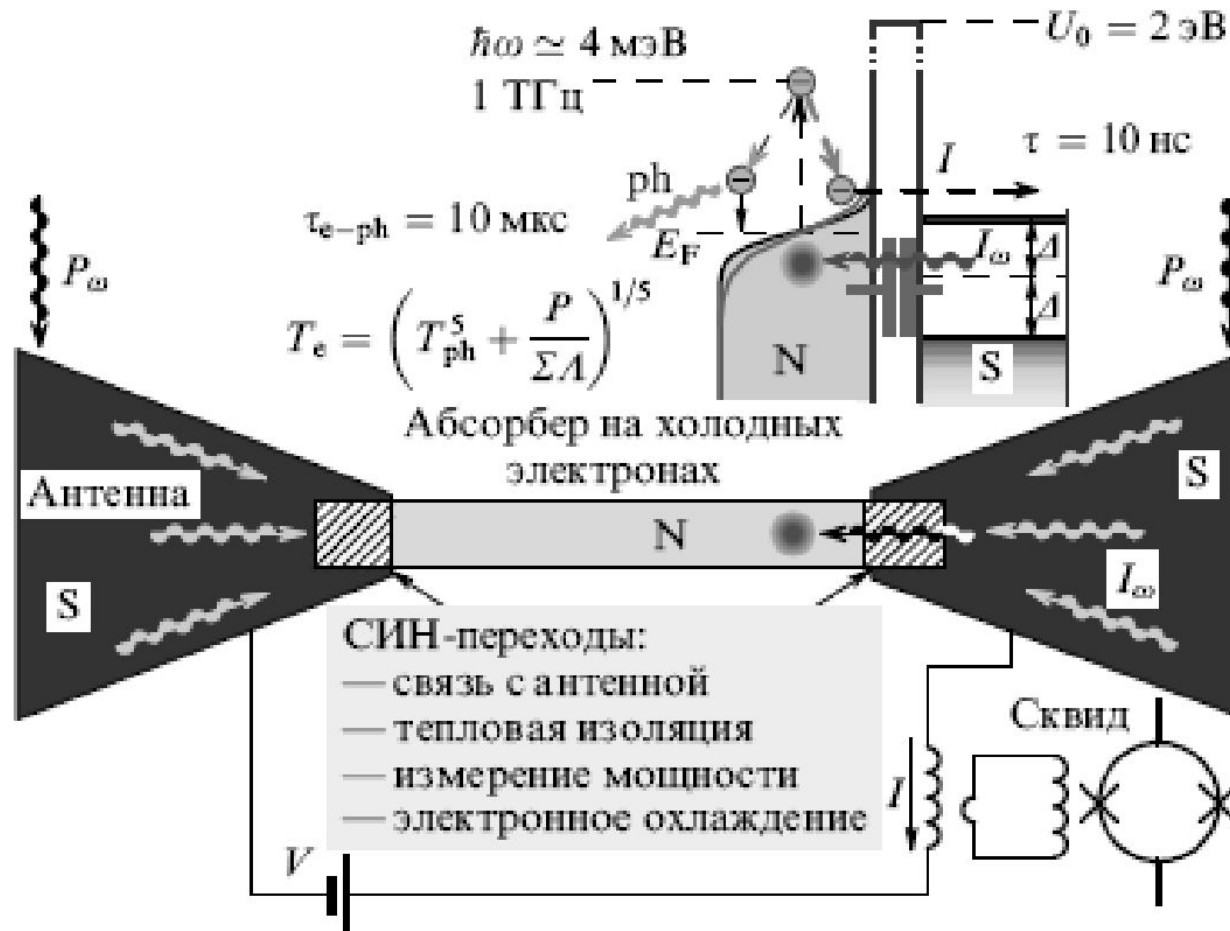
$$NEP \sim 10^{-15} \text{ W/Hz}^{0.5}$$

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

$$\text{При } T_c = 500 \text{ mK}$$

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

Болометр на холодных электронах



Уравнение теплового баланса БХЭ

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

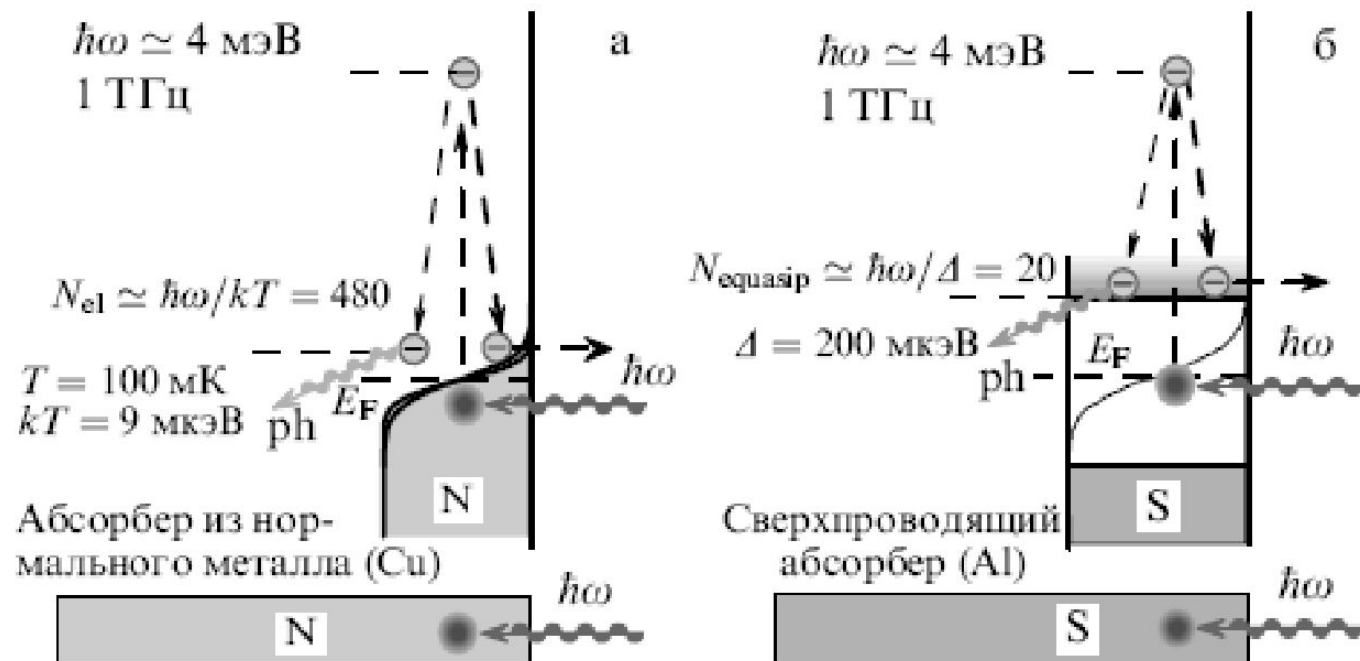
Λ — объем абсорбера $C_A = \gamma T_e$ — удельная теплоемкость

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

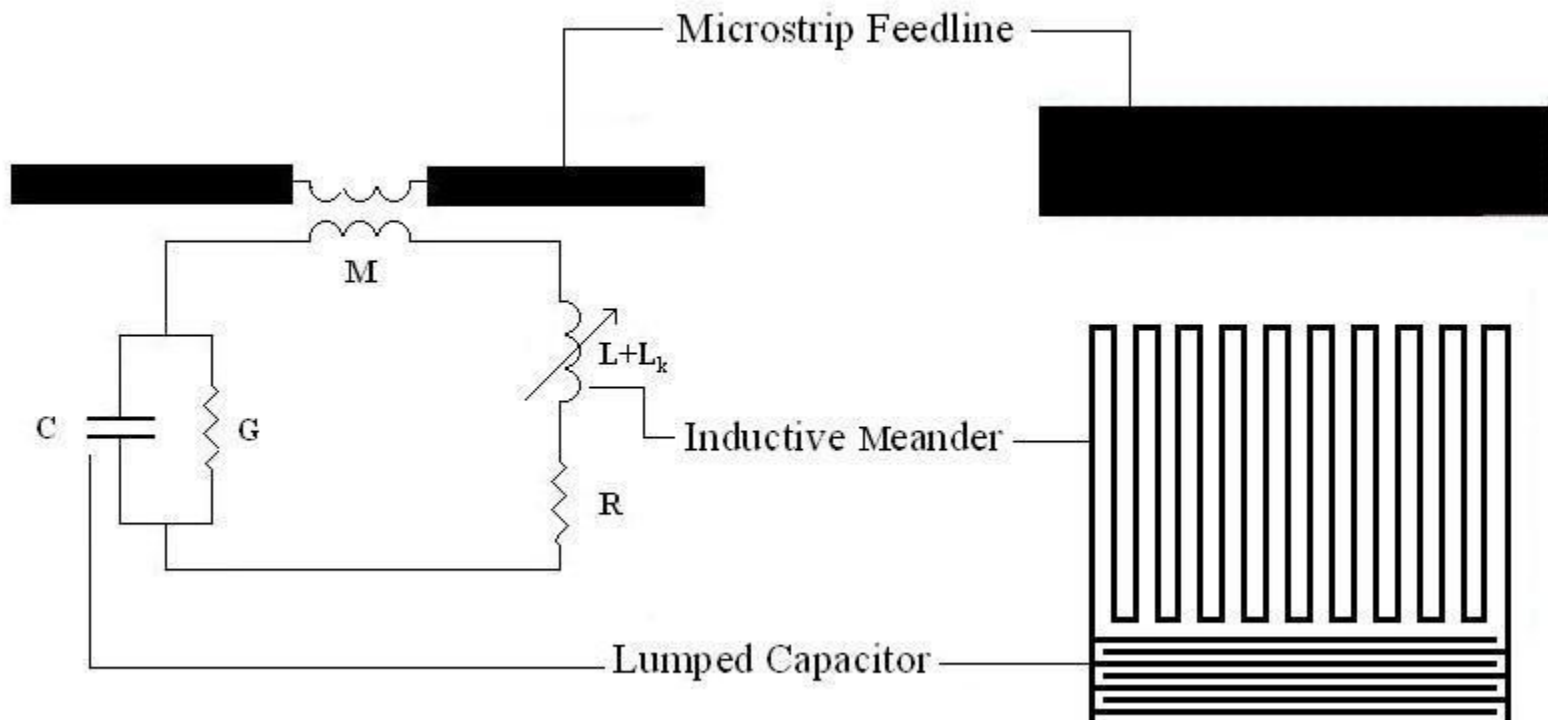
$$S_i = \frac{\partial I}{\partial P} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}} + G_{\text{e-ph}} + i\omega C_A} = \frac{\partial I / \partial T}{G_{\text{cool}}} \frac{L}{(L+1)[1+i\omega\tau]} \quad L = G_{\text{cool}} / G_{\text{e-ph}} \gg 1$$

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

Квантовая эффективность N и S абсорберов



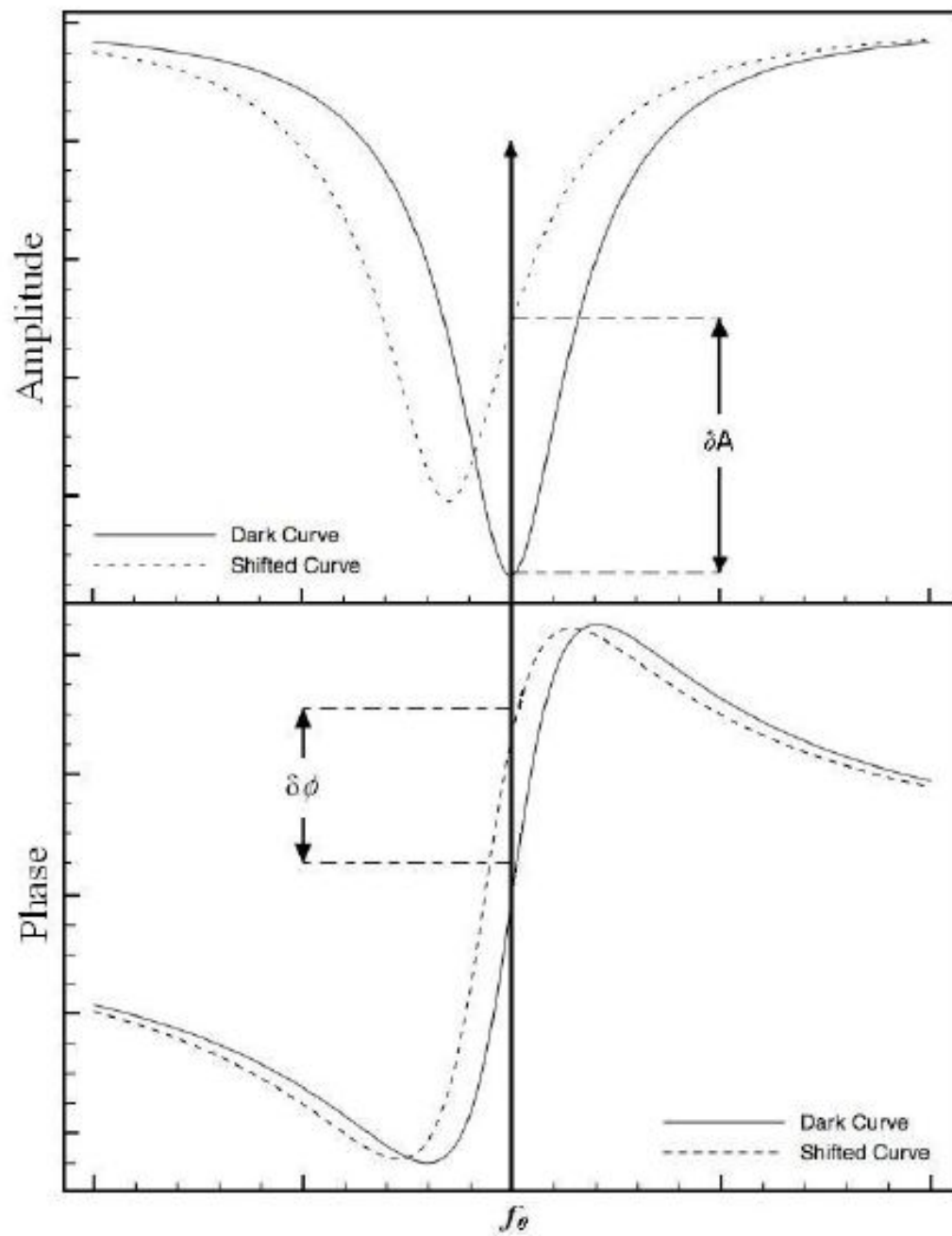
Массив – частотно селективная поверхность

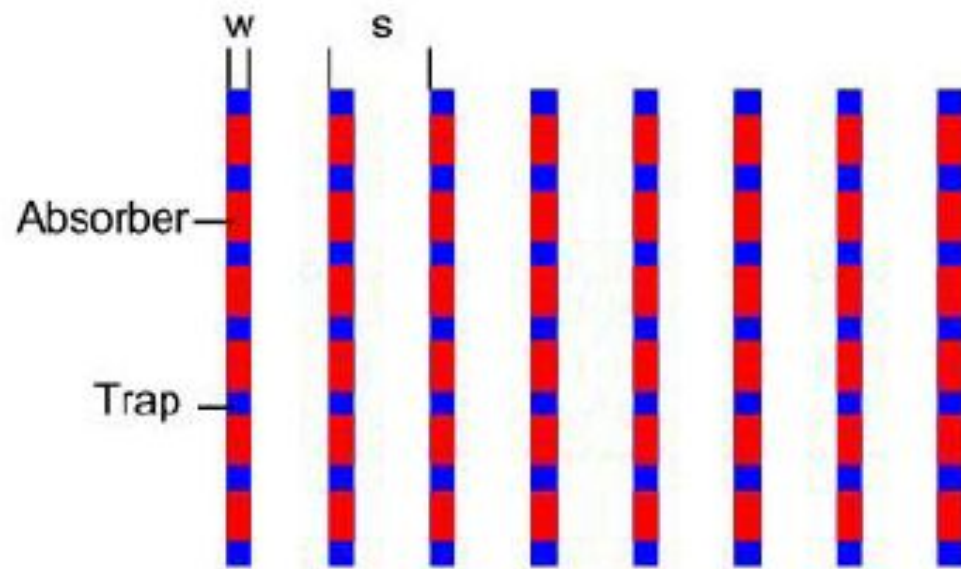


Lumped element kinetic inductance detectors for far-infrared astronomy

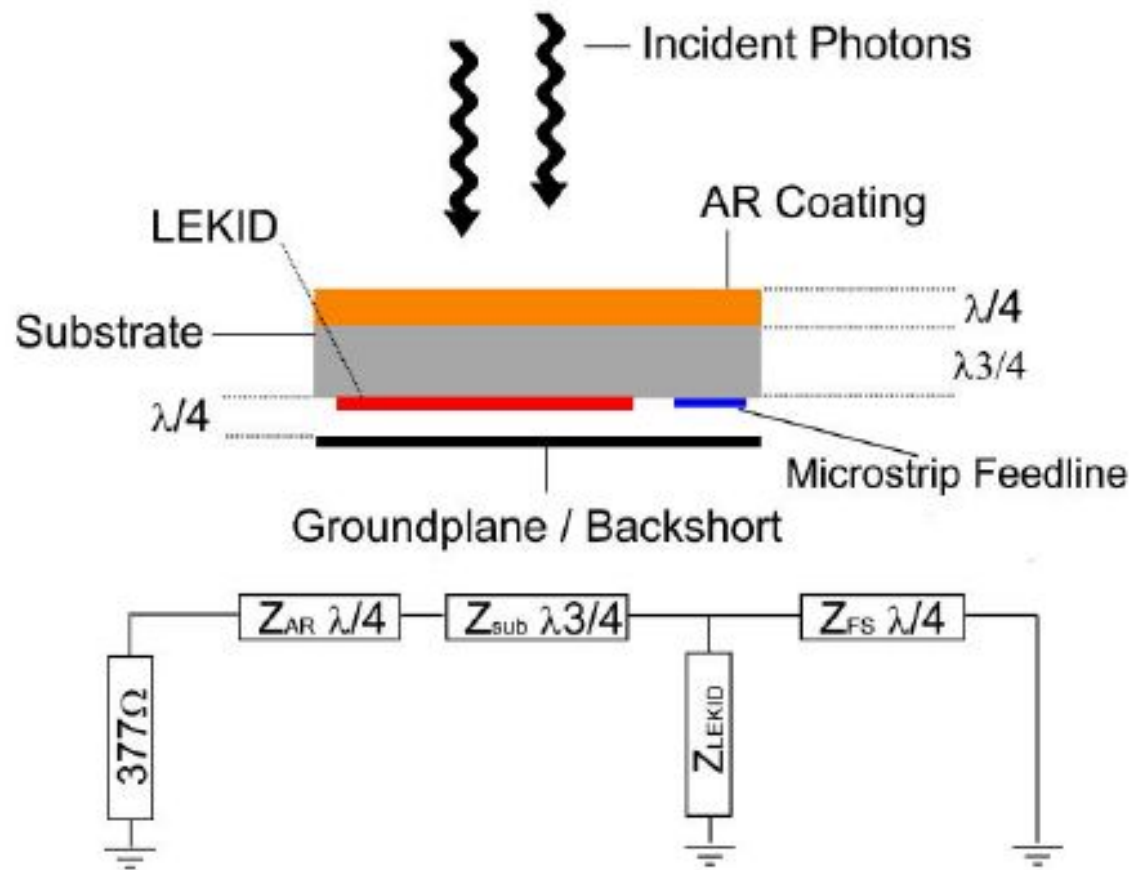
Simon Doyle^a, Jack Naylon^b, Philip Marskopf^a, Adrian Porch^b, Stafford Withington^c, David Goldie^c, Dorota M. Glowacka^c, Jochem J.A. Baselmans^b, Stephen J. Yates^b, Henk Hoovers^b

The image shows a grayscale, high-contrast pattern that resembles a book cover or a decorative endpaper. The pattern is composed of a grid of rectangular sections. Each section contains a series of vertical lines of varying thicknesses, creating a striped effect. These sections are separated by horizontal bands of a different shade of gray. The overall effect is a rhythmic, geometric design. The pattern is repeated across the entire frame, with some slight variations in the intensity of the gray tones, suggesting a textured surface or a scan of a physical object.

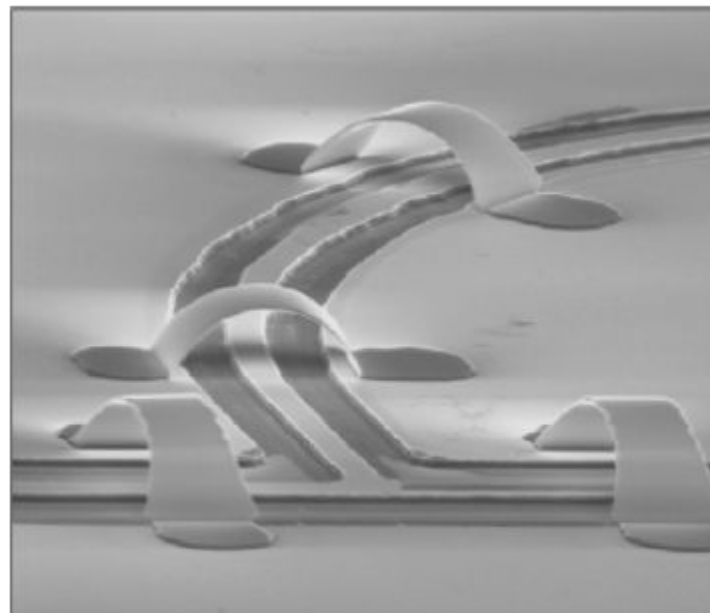
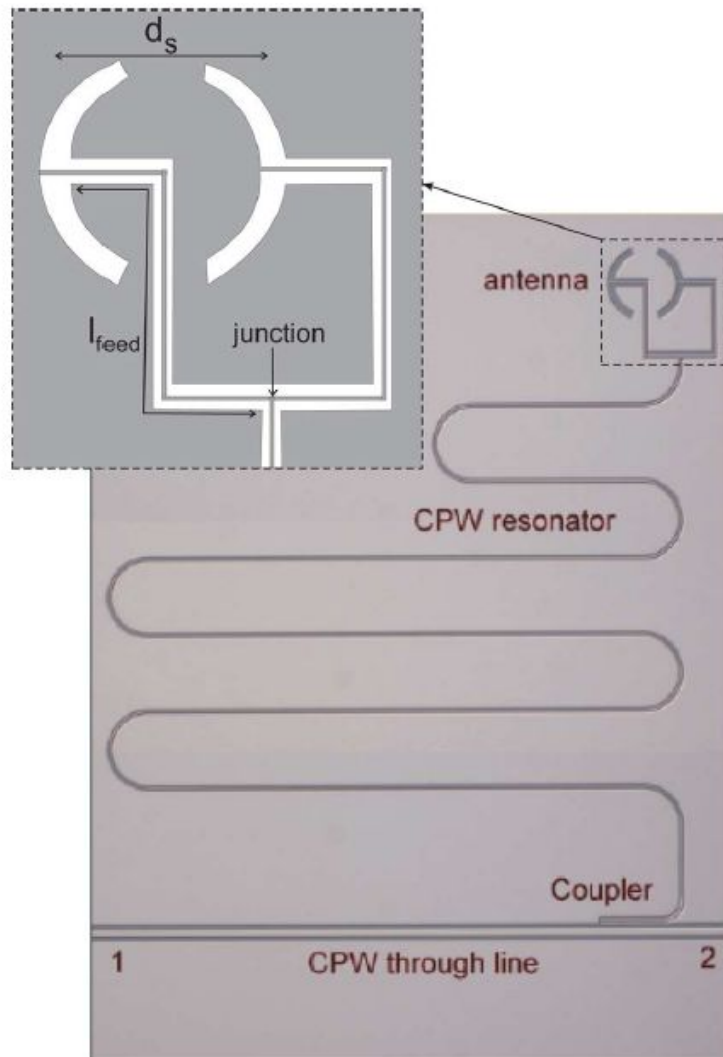




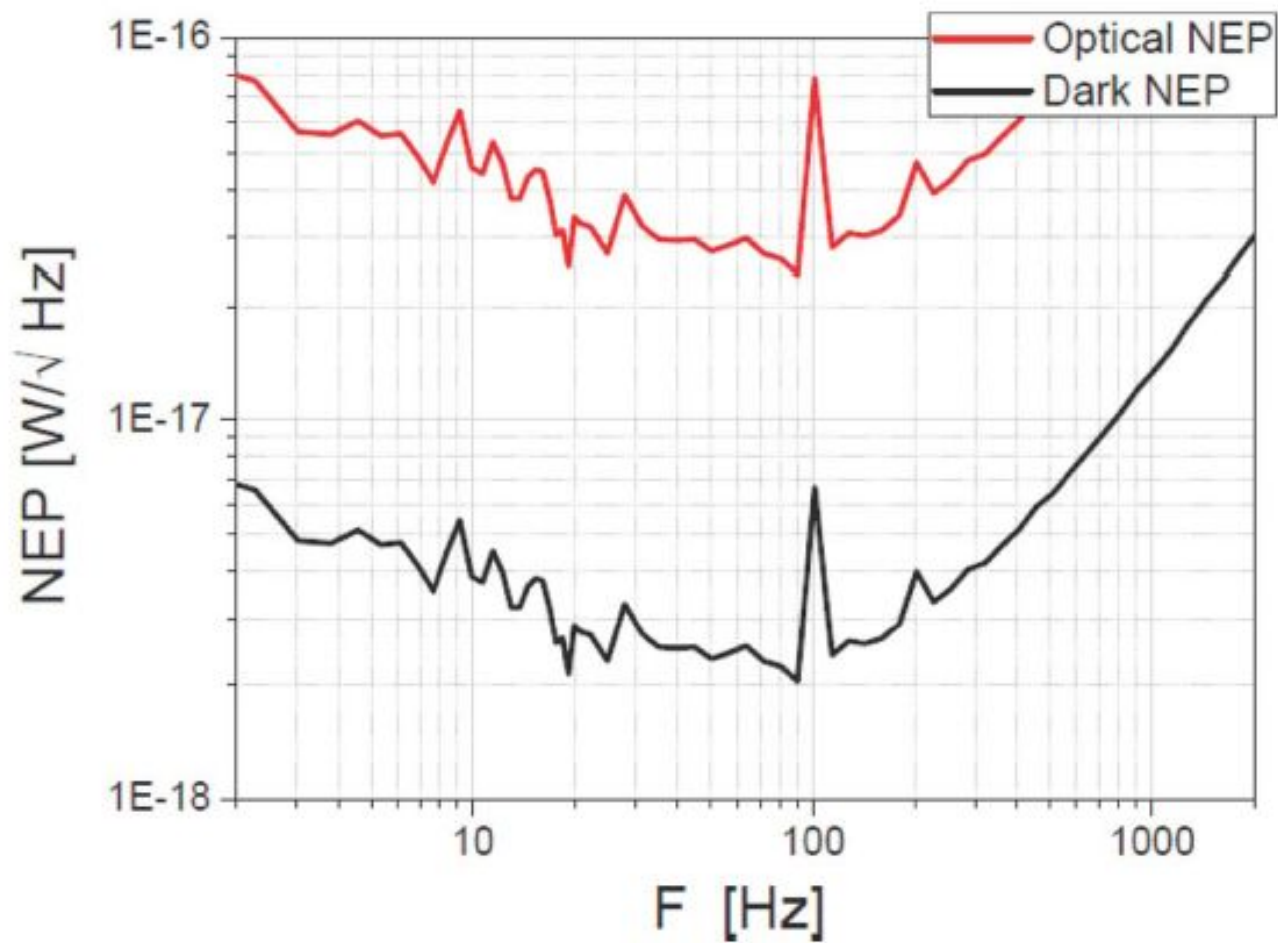
$$Z_{eff} = \frac{Z}{F} = Z \frac{s}{w}$$



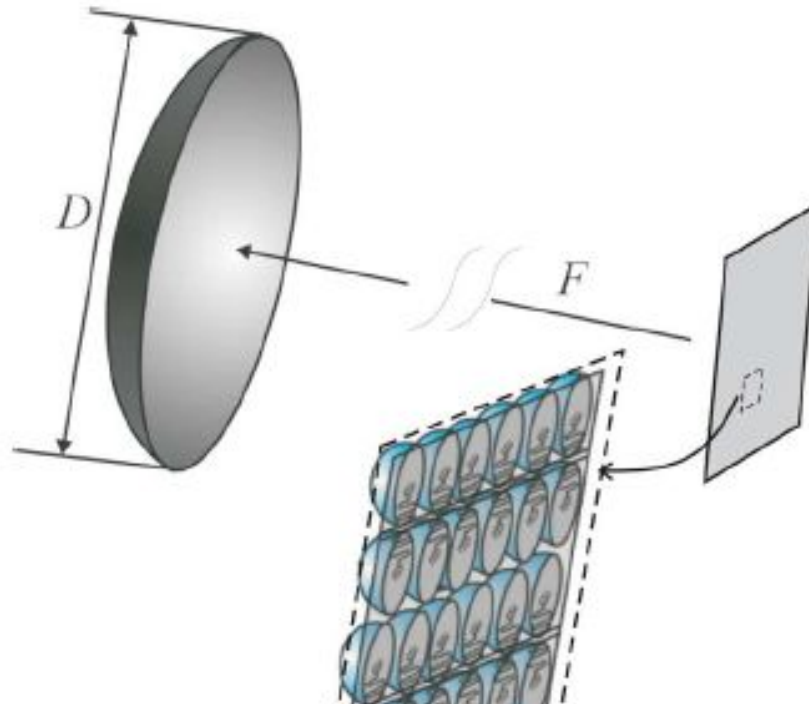
Массив линзовых антенн



МЭШ



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	$\text{NEP}_{\text{shot}},$ $10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1/2}$
БХЭ	$k_B T_c = 9$	$T_c = 50$	1
БСП	$\Delta = 73$	$T_c = 500$	4
БКИ [11, 12]	$\Delta = 200$	$T_c = 1200 \text{ (Al)}$	7