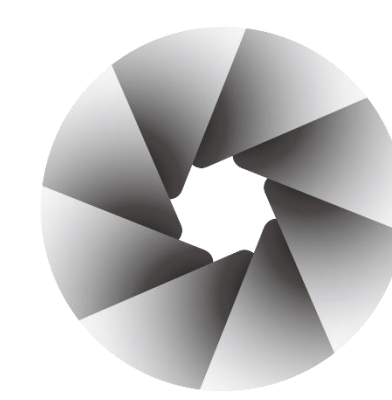




超伝導薄膜を用いたテラヘルツ光センサーアレイの研究開発



プロジェクトメンバー: エレクトロニクス先端融合研究所 有吉 誠一郎、三上 光瑠、田中 三郎

§ 1 研究の背景と目的

光の周波数領域

マイクロ波	ミリ波	テラヘルツ波	赤外線	可視光
周波数	0.1 THz	10 THz		
波長	3 mm	30 μm		

電波としての物質透過性 光波としての直進性

物質透過性、高空間分解能、被ばくが無い。

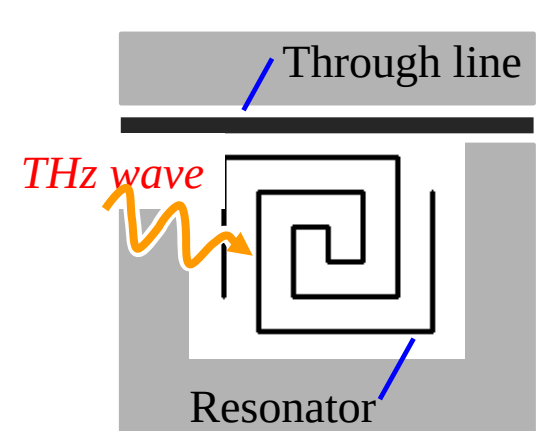
カ学インダクタンス検出器(MKID)

- ・高感度、高応答速度、大規模アレイ化が容易
- ・天文学用途での研究が主流であり、汎用的ではない
- ・超伝導転移温度(T_c)の低い物質(T_c : ~20 K)を用いた研究が大半

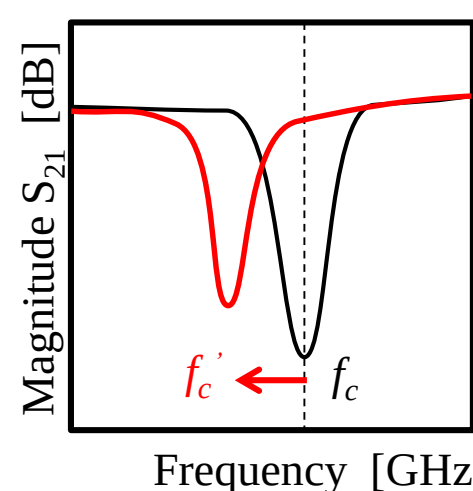
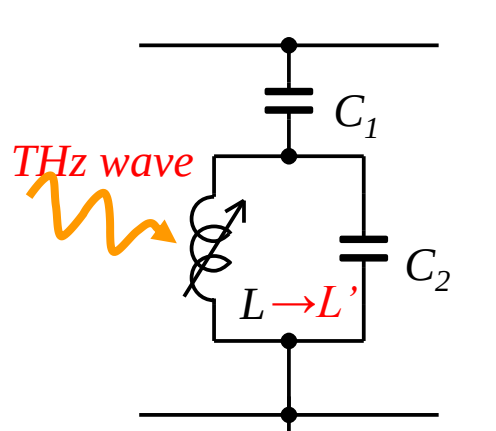
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)に着目し、液体窒素温度(77 K)で簡便動作可能なMKIDの実現

MKIDの動作原理

Single pixel of MKID



Equivalent circuit



$$L = L_m + L_k$$

L_m : Magnetic inductance
 L_k : Kinetic inductance

$$L_k = \frac{m}{nq^2}$$

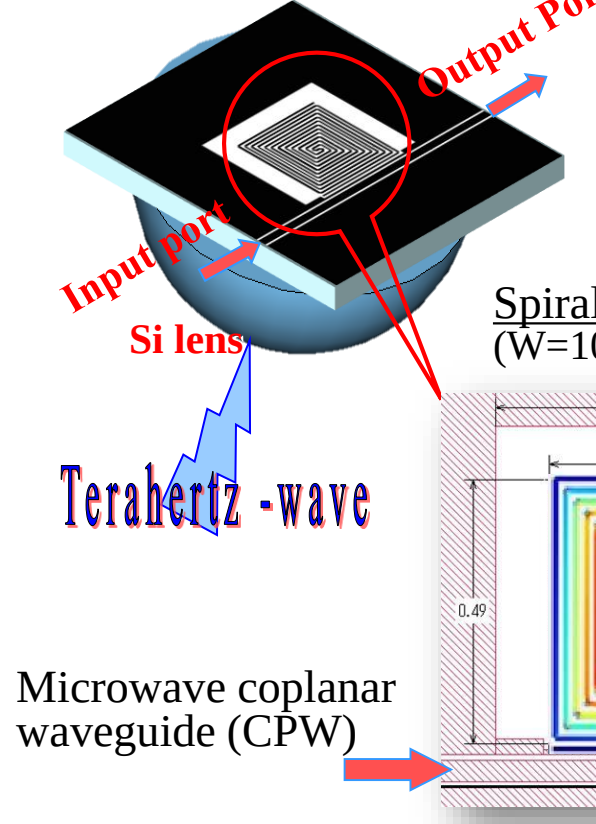
n : Density of Cooper pairs
 m : Mass of Cooper pairs
 q : Charge of Cooper pairs

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$$

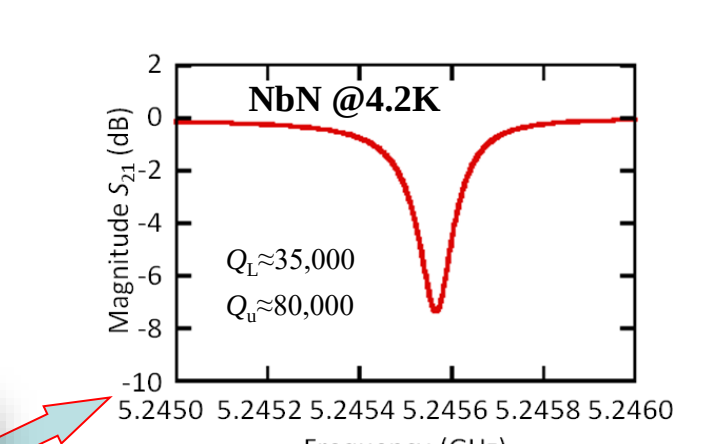
マイクロ波共振特性の変化からテラヘルツ波を検出

MKIDの設計

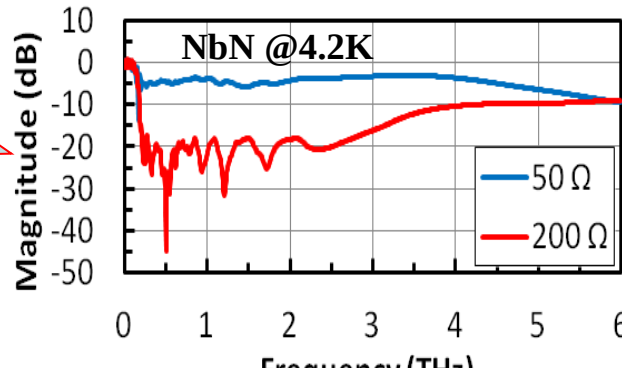
Spiral-MKIDs



High-Q microwave resonator



Broadband THz antenna



A superconducting spiral-resonator was coupled with CPW.

Size ○ Sensitivity ○ bandwidth ○

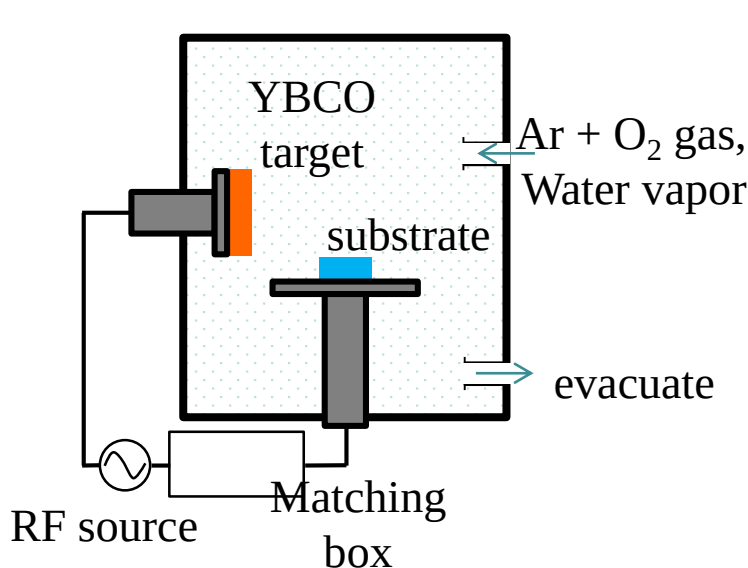
K. Hayashi et al., Physics Procedia, 45, p.213 (2013).

§ 2 MKIDの作製

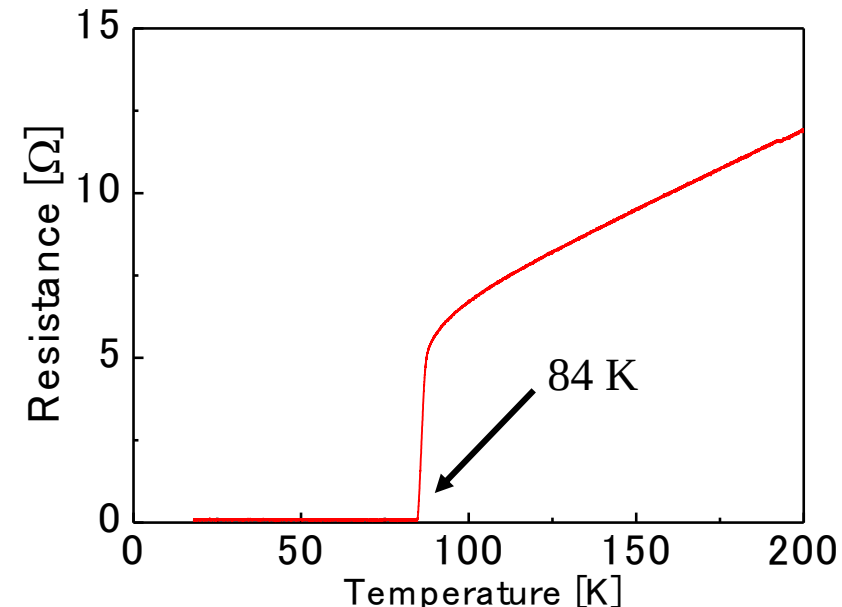
YBCO薄膜の成膜

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) 薄膜をMgO基板上に成膜

反応性RFスパッタリング装置図



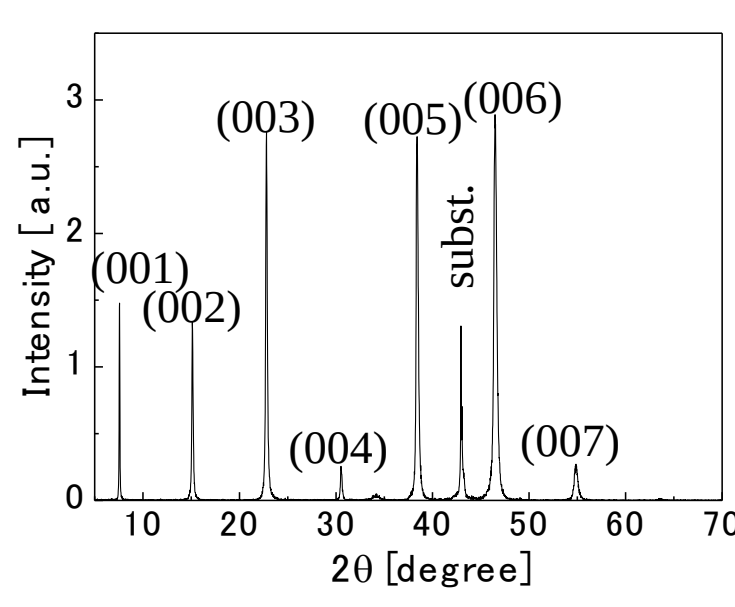
超伝導転移温度(Tc)の測定

 $T_c \sim 84 \text{ K}$ (YBCO bulk: $T_c = 93 \text{ K}$)

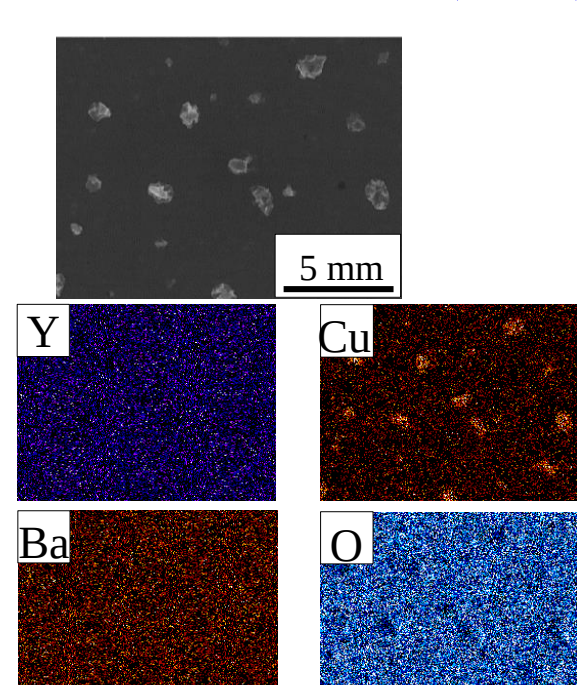
良好な超伝導特性をもつ薄膜を成膜

YBCO薄膜の膜質評価

X線回折(XRD)



走査型電子顕微鏡(SEM)観察

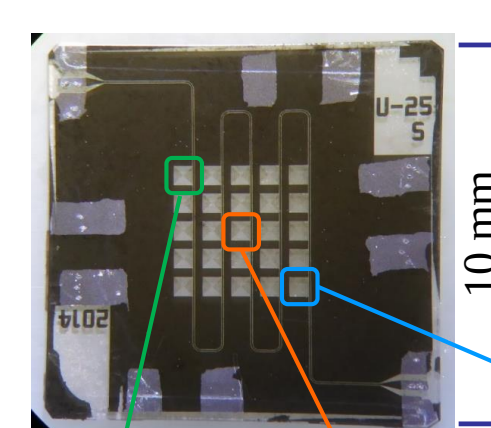


YBCO epitaxial film precipitates Cu-oxide.

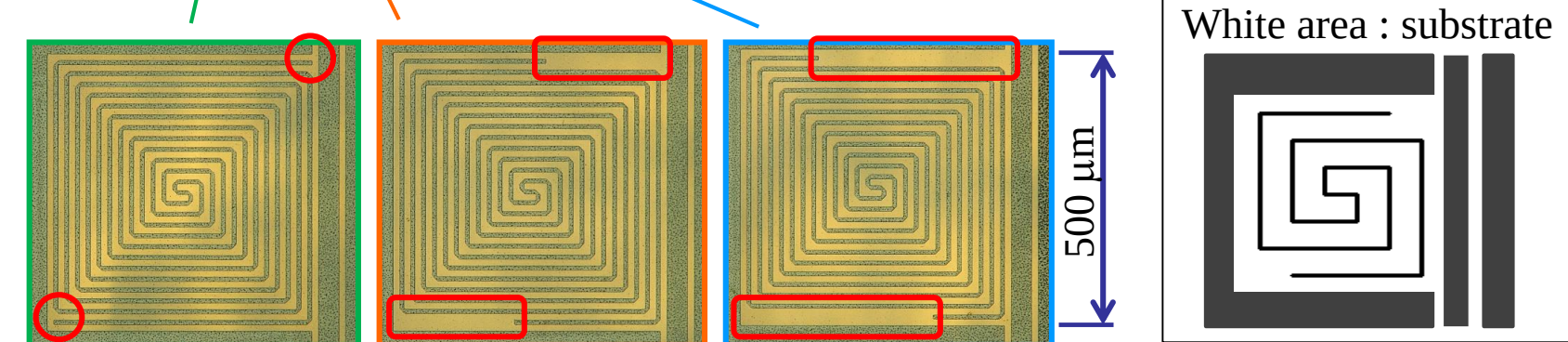
MgO基板上に、高いC軸配向性をもつYBCO薄膜を確認

MKIDアレイの作製

25画素のYBCO製MKIDアレイを作製

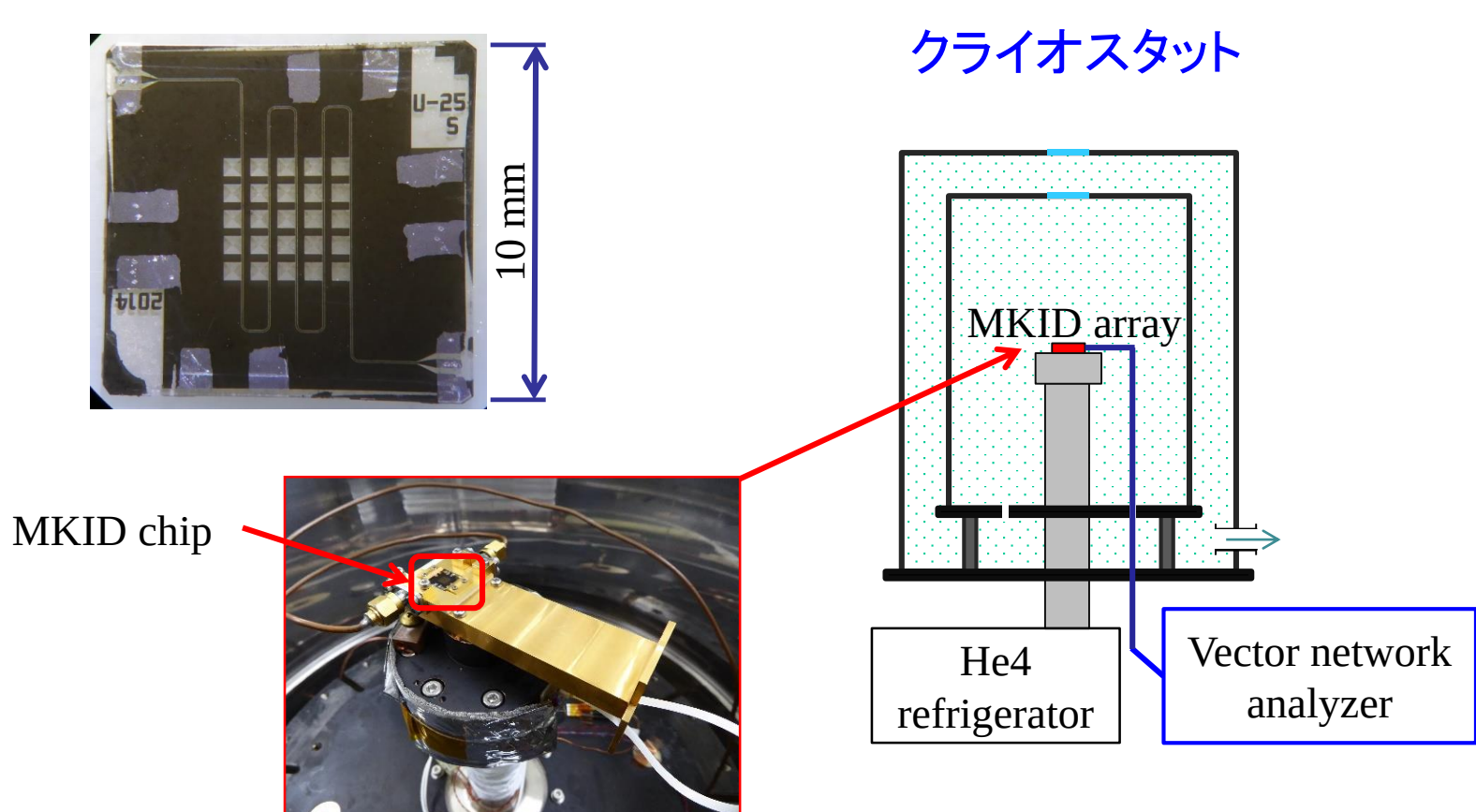


- ・25個のスパイラル型の半波長共振器
- ・共振周波数がそれぞれ異なる周波数分割多重化

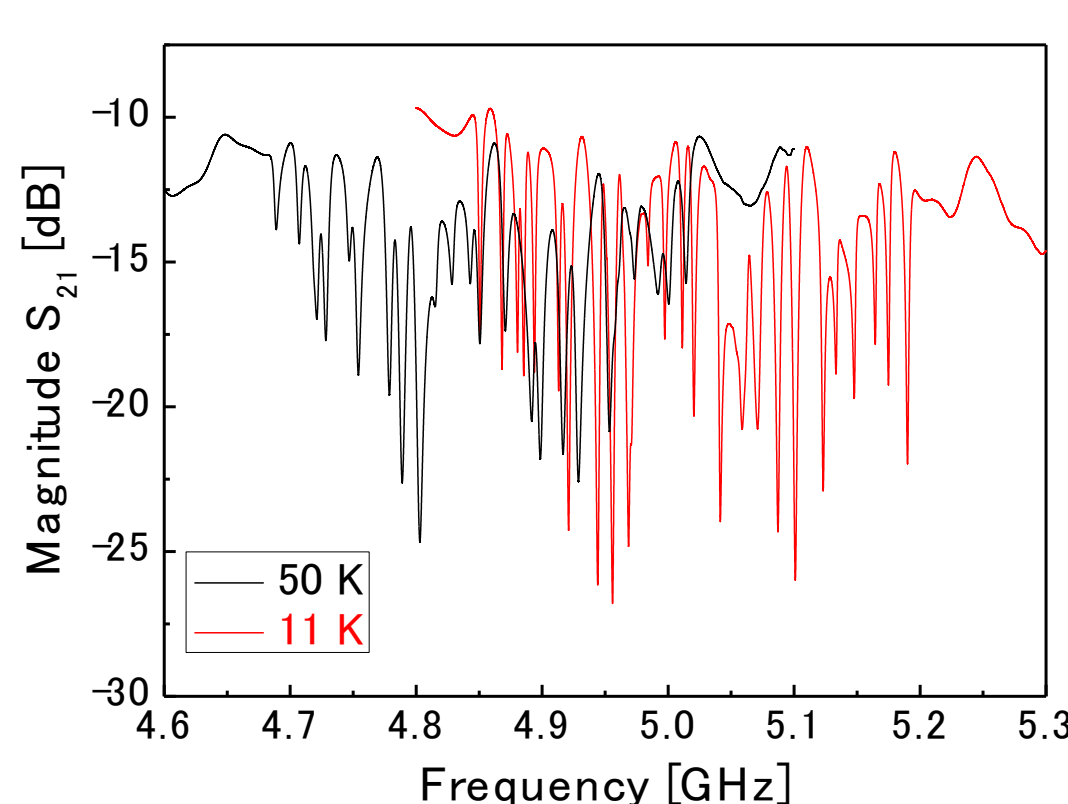
共振器部 T_c : 60 ~ 70 K

§ 3 MKIDの電気特性評価

実験セットアップ

11 ~ 70 K の温度範囲でマイクロ波共振特性(S_{21})を測定

MKIDアレイのマイクロ波共振特性

共振ディップ数 23本@50 K 25本@11 K
共振周波数: 温度上昇により低周波数側にシフト

共振特性とカ学インダクタンス

共振周波数と磁場侵入長の関係式

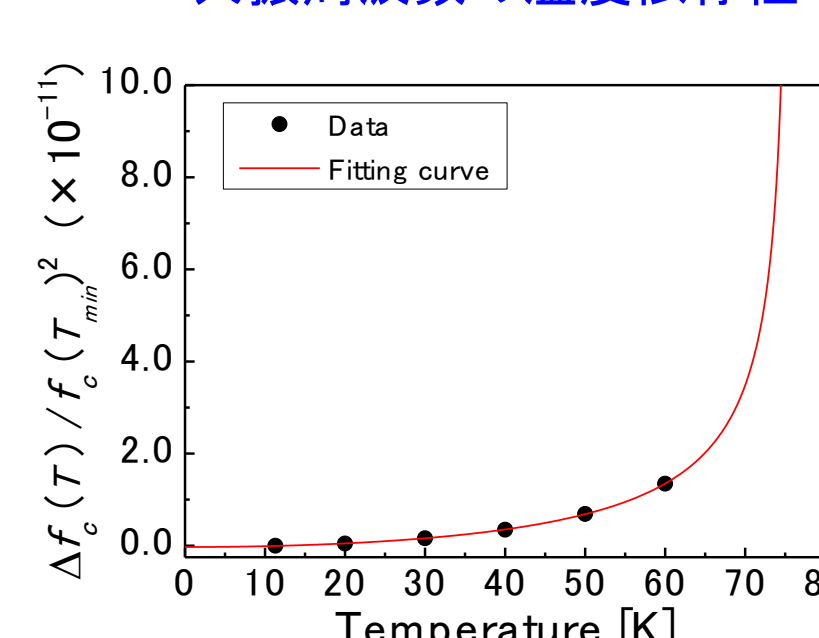
$$\lambda_0 \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} - \lambda(T_{min}) \propto \frac{\Delta f_c(T)}{f_c(T_{min})^2}$$

磁場侵入長とインダクタンスの関係式

$$\mu_0 \lambda^2(T) = L_k$$

$\lambda(T)$: Penetration depth
 μ_0 : Permeability
 L_k : Kinetic inductance

共振周波数の温度依存性



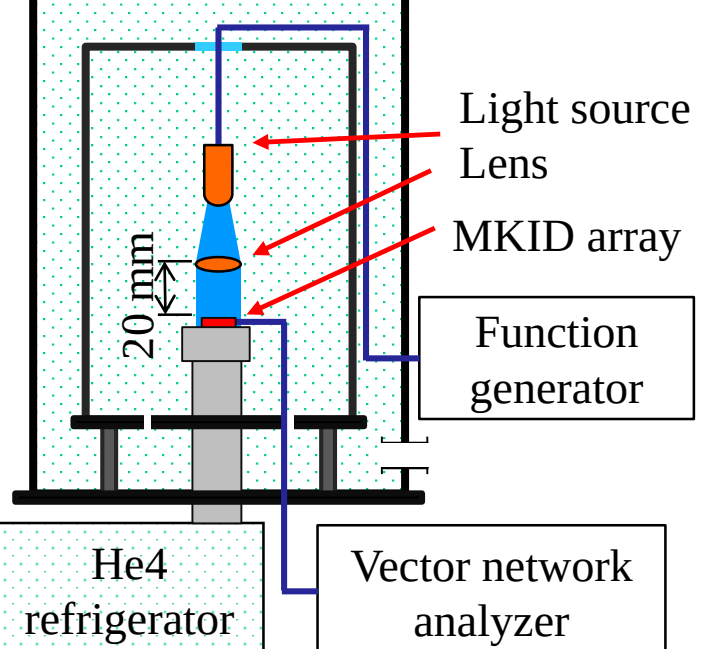
共振周波数の温度変化

→カ学インダクタンスの変化によるもの

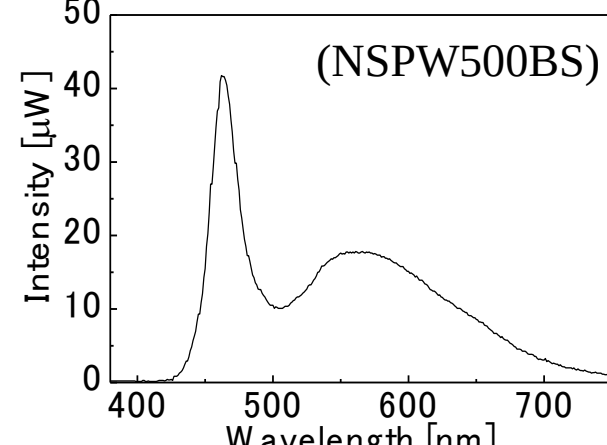
§ 4 MKIDの光学特性評価

実験セットアップ

- ・光源 LED (白色可視光, 11 cd@5.0 V)
- ・出力 矩形波 (0.5 Hz, Duty 50 %)

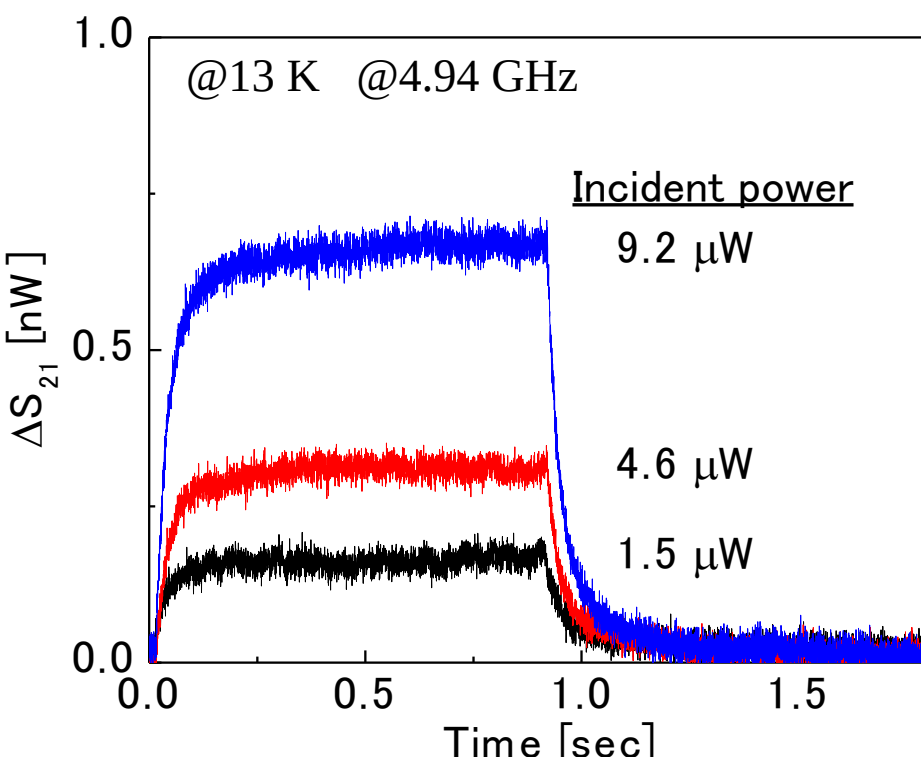


LED発光スペクトル (NSPW500BS)



MKIDの光学応答

白色可視光に対する応答を測定

可視光に対する応答性を確認
共振特性の改善による性能向上が必要

時定数の推定

$$y = A_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + A_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

$$A_1 = 0.34, \tau_1 = 30 \text{ ms}$$

$$A_2 = 0.069, \tau_2 = 190 \text{ ms}$$

雑音等価電力(NEP)の推定

$$NEP = \frac{\text{Noise}}{\text{Responsivity}}$$

$$NEP = 3.7 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$$

現状と今後

	現状	今後
Frequency	Visible light	Terahertz (far-infrared) range
Pixel size	Prototype 25-pixel array	Array optimization, Larger array
Operating temperature	11 ~ 70 K	77 K (LN ₂ temperature)
Sensitivity	NEP ~ 3.7 × 10 ⁻⁹ W/√Hz @13K	lower NEP
Response time	~ 30 ms	< 1 ms

§ 5 まとめと今後の展望

- We fabricated and evaluated an YBCO-based microwave kinetic inductance detector (MKID) consisting of a rewound spiral resonator (Spiral-MKID) by using a cryogen-free He4 refrigerator for terahertz (far-infrared) applications.
- As a first step of the optical evaluation, we measured the response time and NEP. The response time of 30 ms and the NEP of the order of 10⁻⁹ W/√Hz at 13 K were confirmed.
- The microwave resonance characteristics will be improved by the optimization of substrates, sputtering conditions and photolithography.