



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			

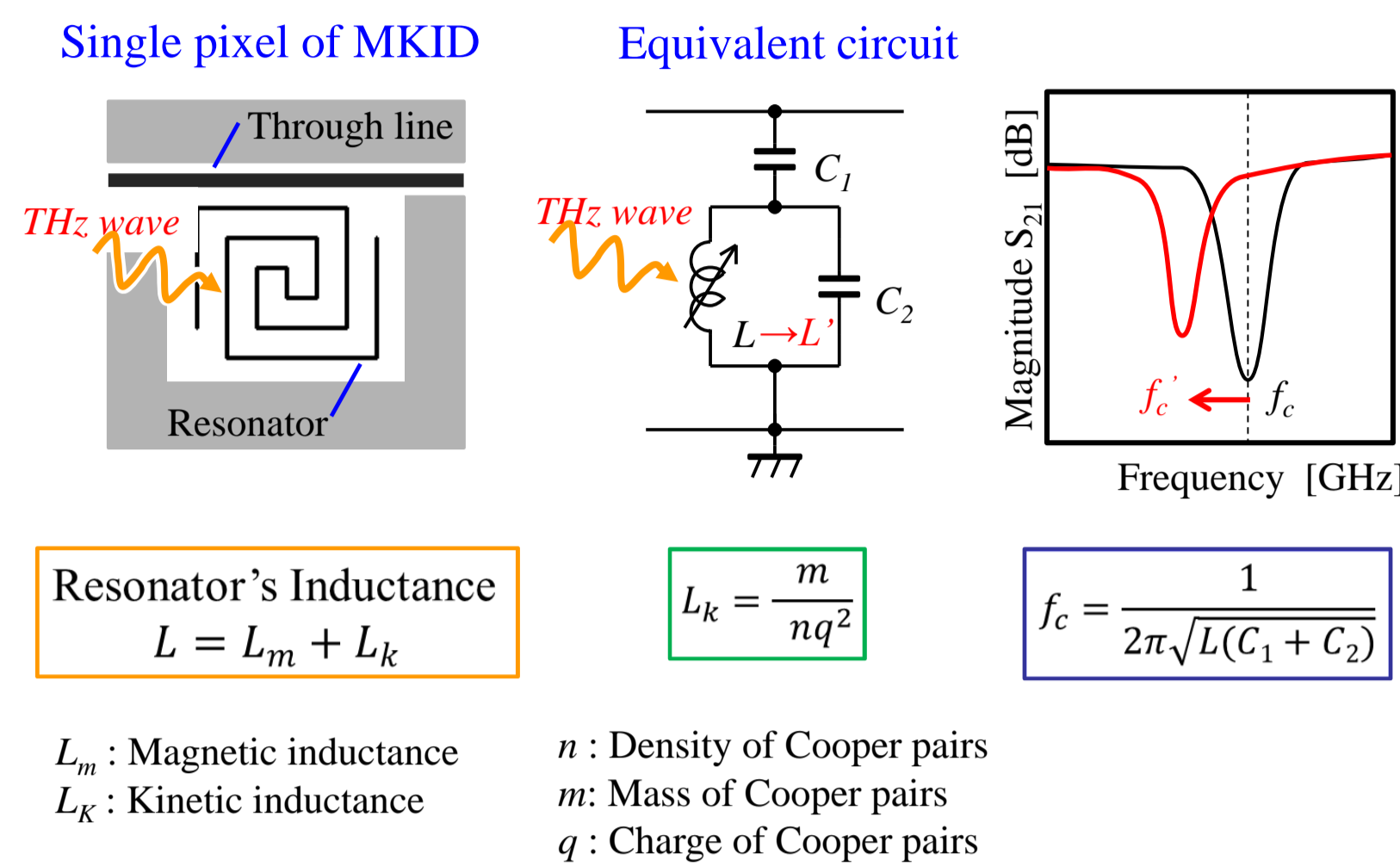
物質透過性、高空間分解能、被ばくが無い。

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

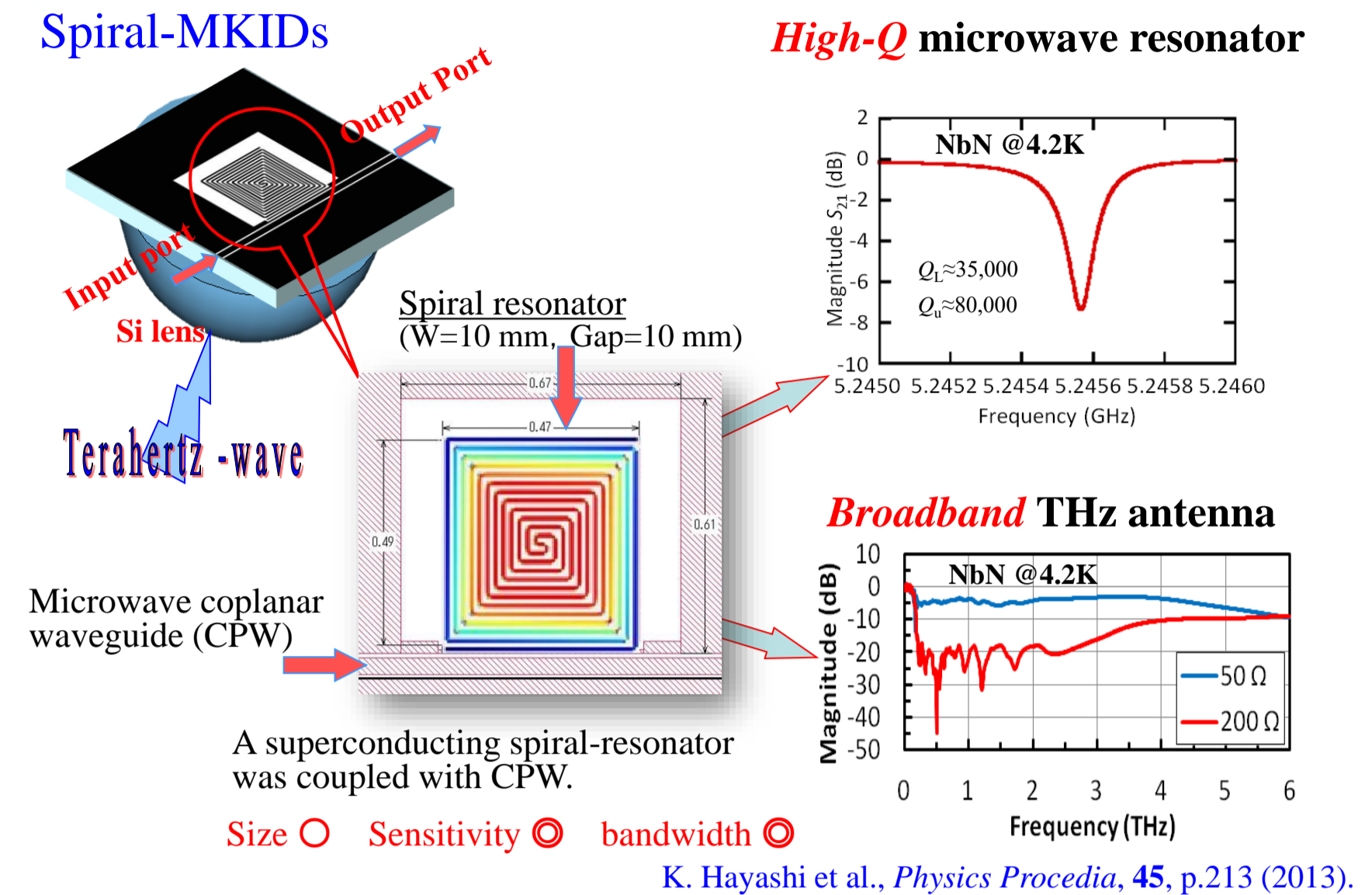
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)に着目し、液体窒素温度(77 K)で簡便動作可能なMKIDの実現

MKIDの動作原理



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

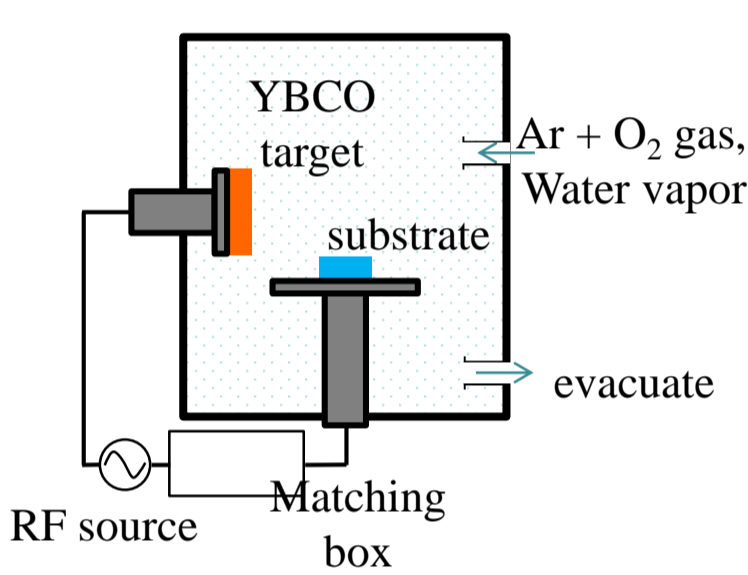
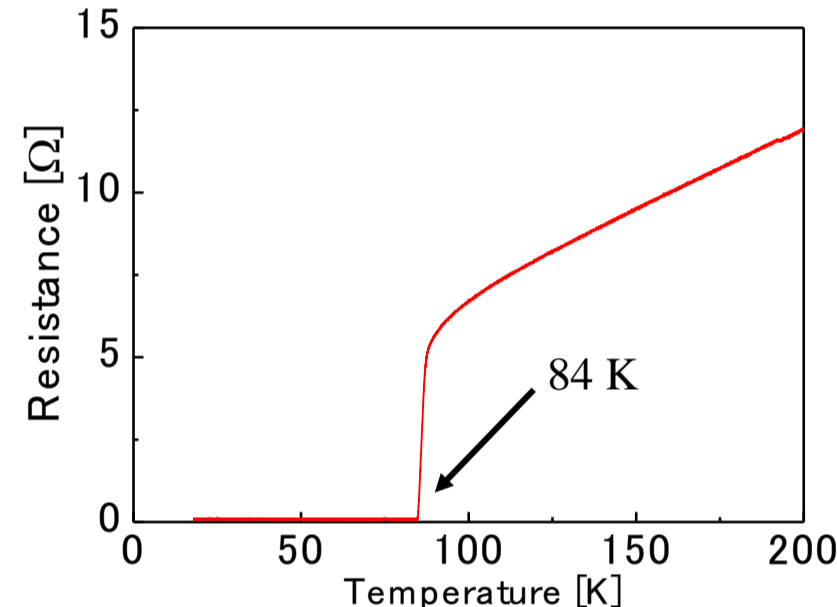


§ 2 MKIDの作製

YBCO薄膜の成膜

YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) 薄膜をMgO基板上に成膜

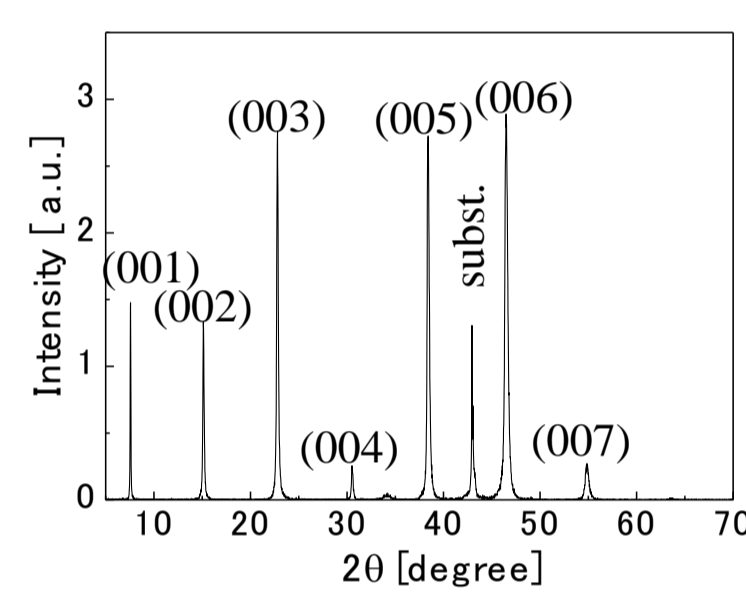
反応性RFスパッタリング装置図

超伝導転移温度(T_c)の測定

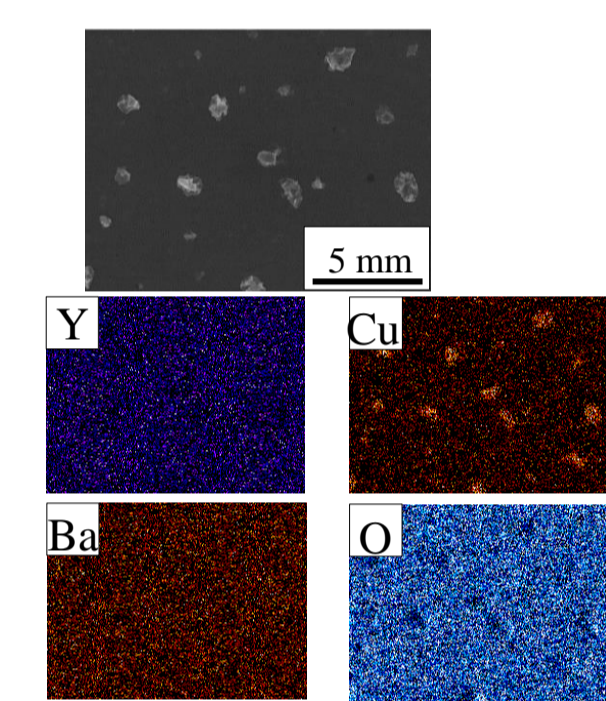
良好な超伝導特性をもつ薄膜を成膜

YBCO薄膜の膜質評価

X線回折(XRD)



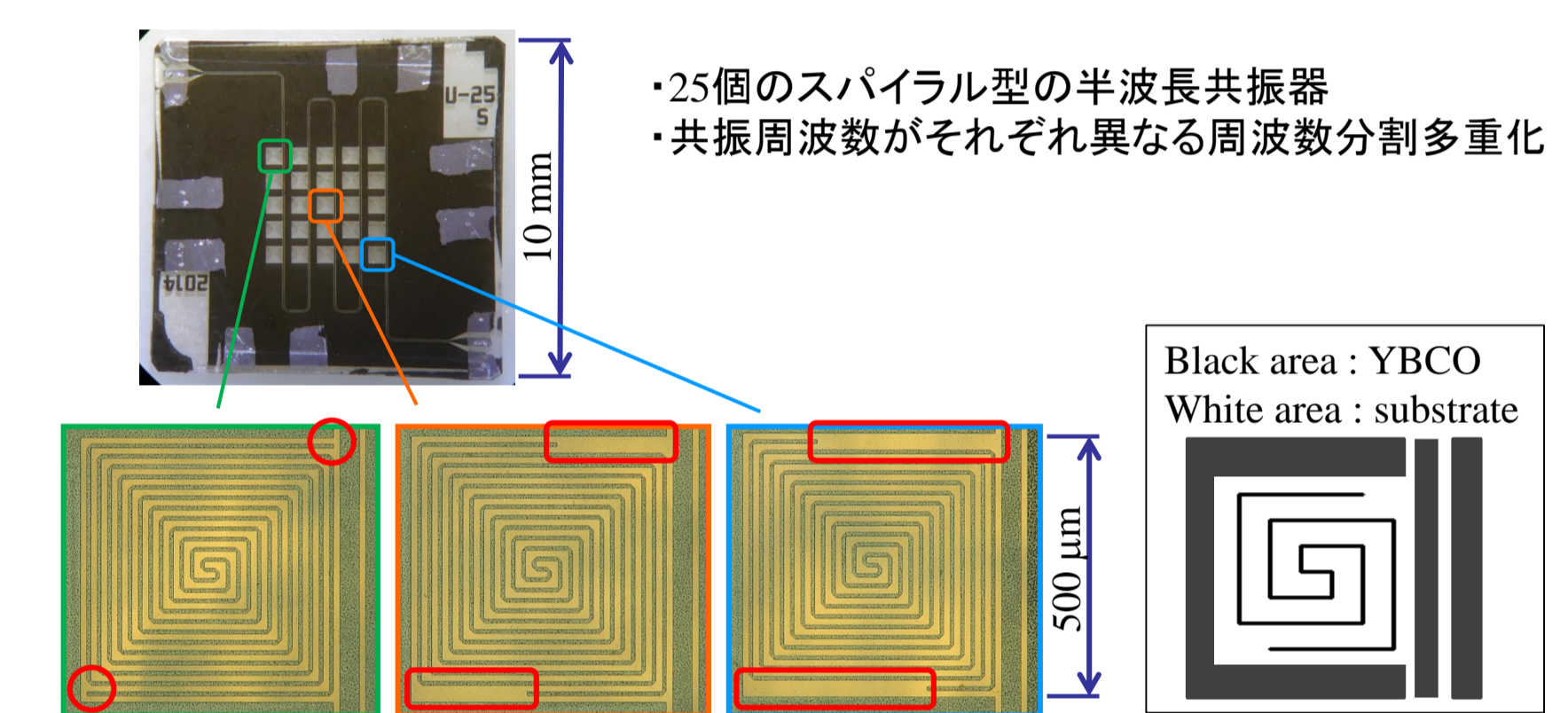
走査型電子顕微鏡(SEM)観察



MgO基板上に、高いC軸配向性をもつYBCO薄膜を確認

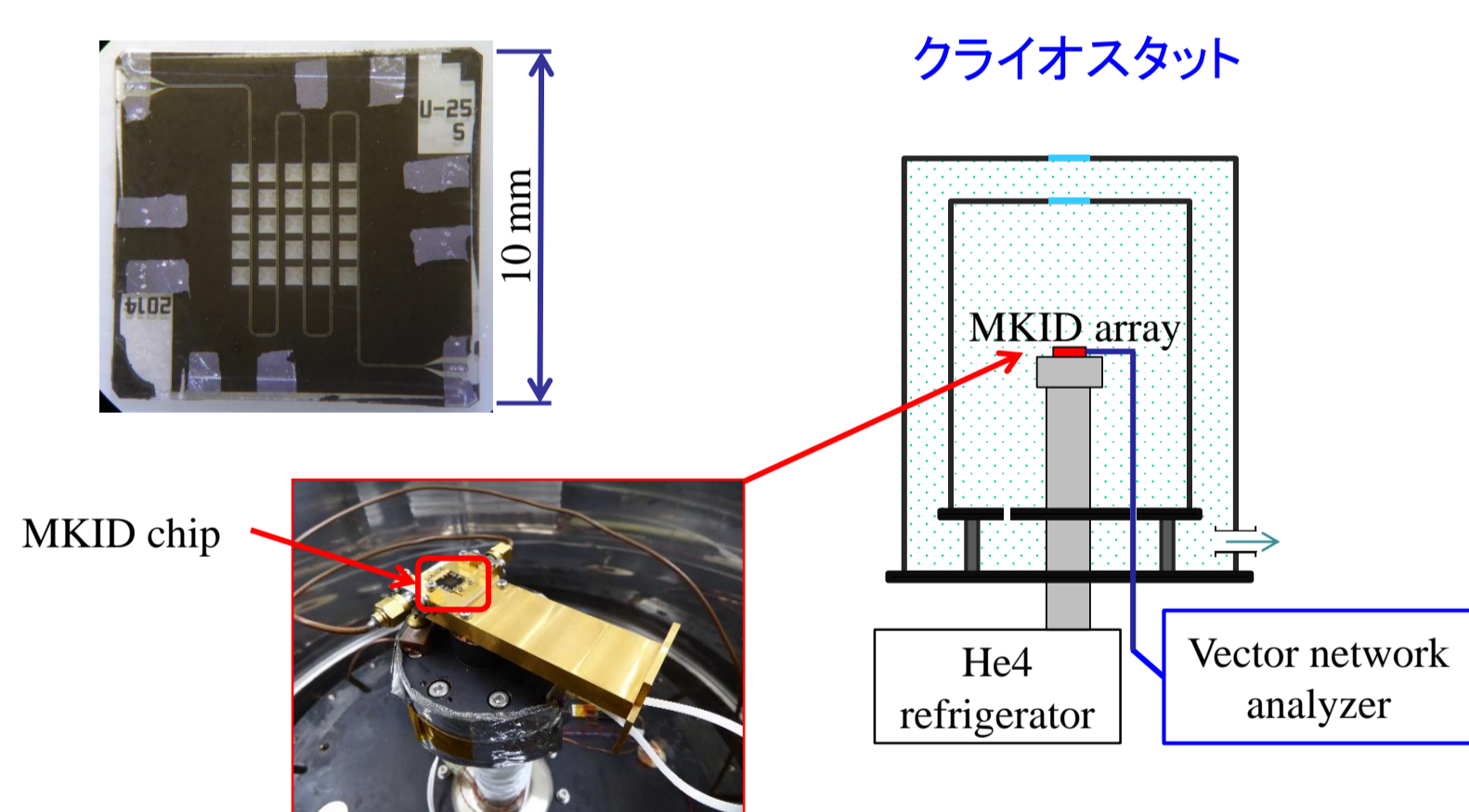
MKIDアレイの作製

25画素のYBCO製MKIDアレイを作製

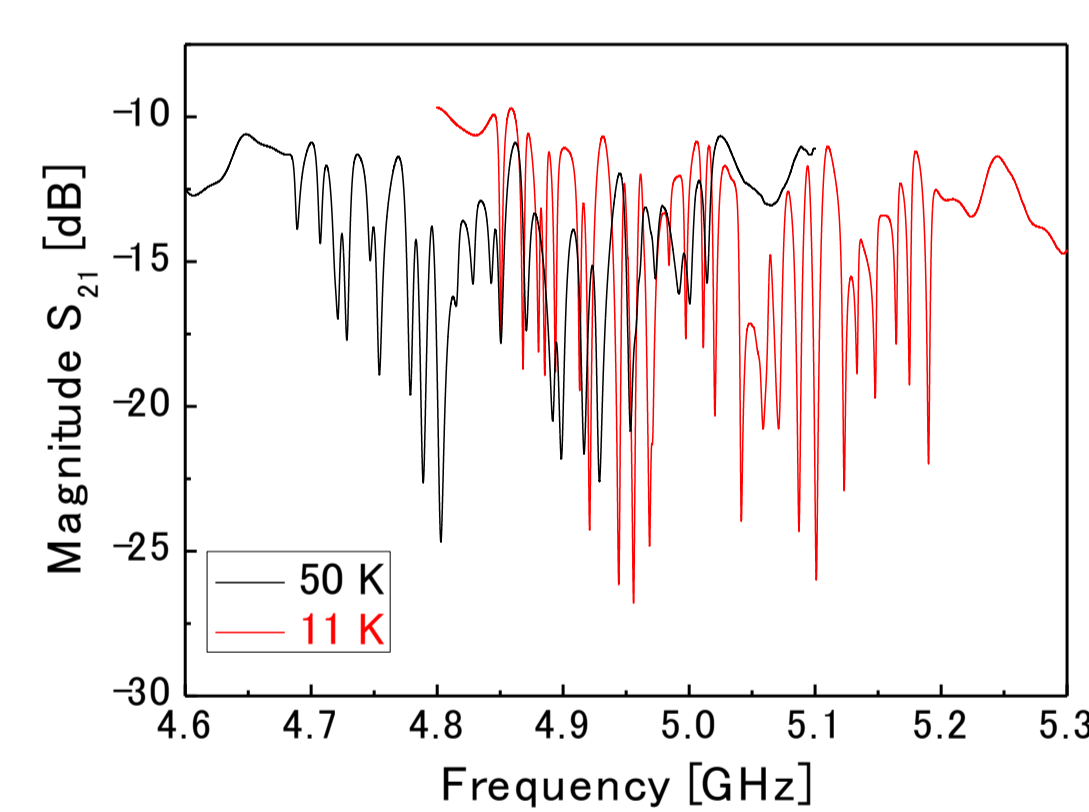


§ 3 MKIDの電気特性評価

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

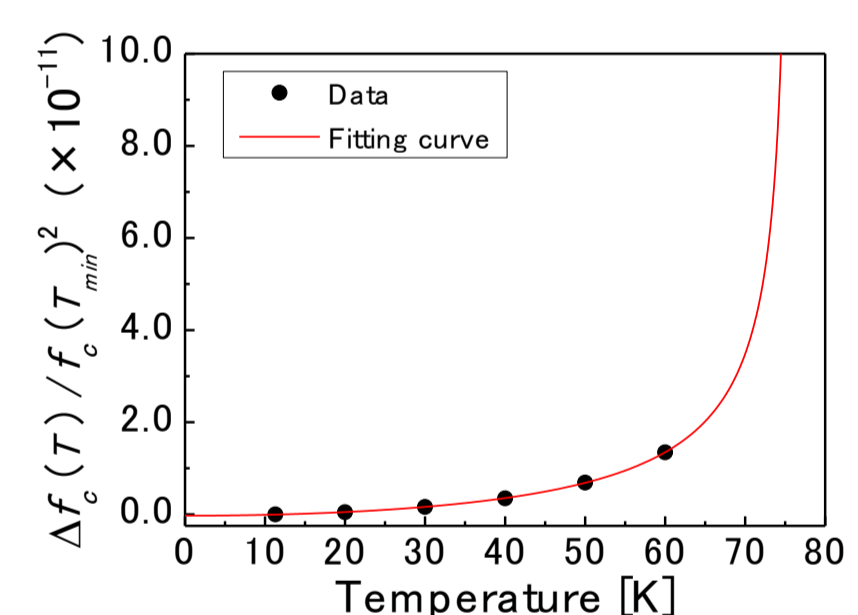
$$\lambda_0 \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} - \lambda(T_{min}) \propto \frac{\Delta f_c(T)}{f_c(T_{min})^2}$$

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

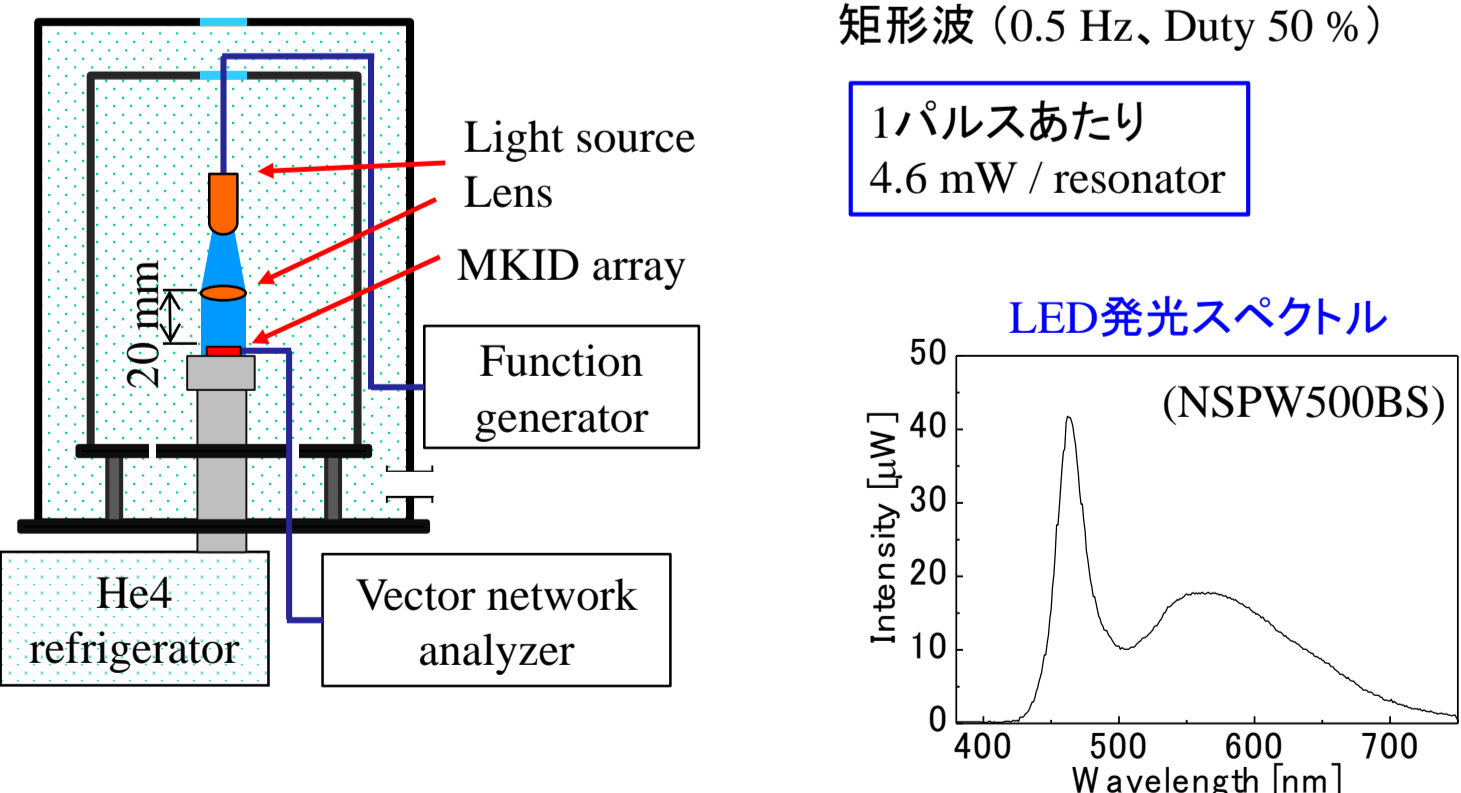
共振周波数の温度依存性

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

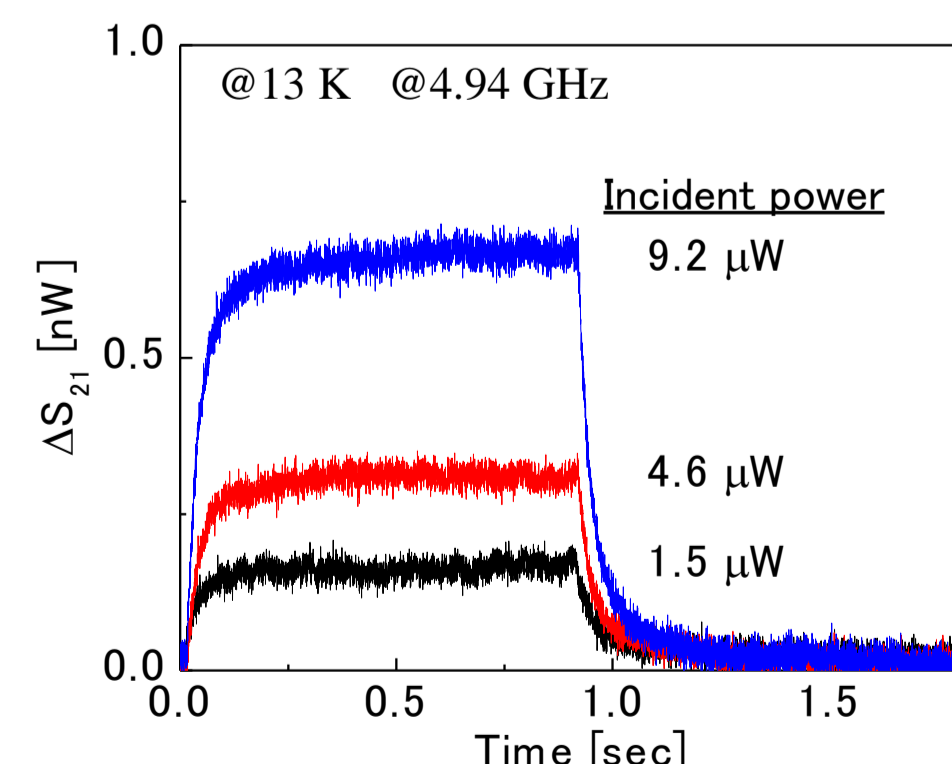
実験セットアップ

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



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

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

$A_1 = 0.34$, $\tau_1 = 30$ ms
 $A_2 = 0.069$, $\tau_2 = 190$ 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.