



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、江畑 敦志、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。

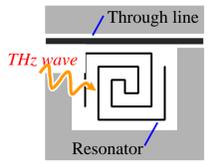
量子インダクタンス検出器 (Microwave Kinetic Inductance Detector)

- 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 ($T_c: \sim 20$ K) を用いた研究が大半

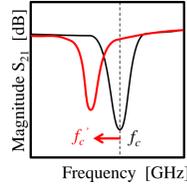
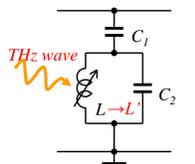
YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO)に着目し、液体窒素温度(77 K)で簡便動作可能なMKIDの実現

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

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

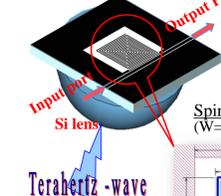
n : Density of Cooper pairs
 m : Mass of Cooper pairs
 q : Charge of Cooper pairs

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

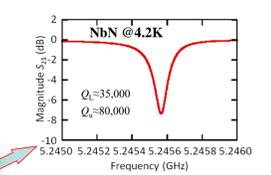
マイクロ波共振特性の変化からテラヘルツ波を検出

MKIDの概要

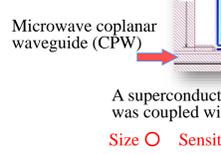
Spiral-MKIDs



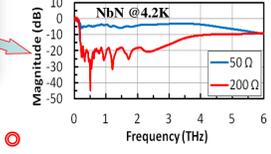
High-Q microwave resonator



Terahertz-wave



Broadband THz antenna

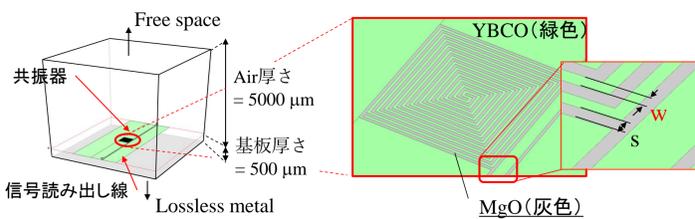


Size ○ Sensitivity ● bandwidth ◎

K. Hayashi et al., *Physics Procedia*, 45, p.213 (2013).
S. Ariyoshi et al., *Applied Physics Express*, 6, p.064103 (2013).

§ 2 センサーの設計

設計手法 (電磁界解析ソフトウェア Sonnet Lite: モーメント法)



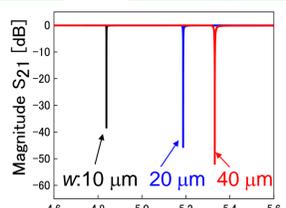
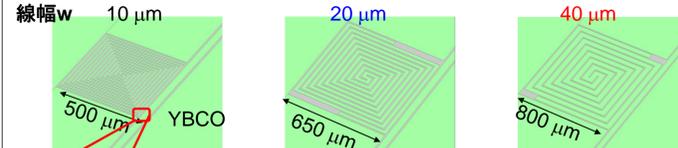
周波数範囲	1 - 10 GHz
基板厚、比誘電率	500 μm, 9.7 (MgO基板)
空間サイズ	一辺 5000 μm の立方体
共振器形状	Rewound 型
境界条件	Free space, Lossless metal
薄膜条件 ⁽¹⁾ (YBCO@4.2 K)	$L_s = 1.0$ pH/sq $R_{rf} = 4.9 \times 10^{-29}$ ΩHz ² /sq

解析項目:

- A) 線幅依存性
- B) 線間隔依存性

[1] J.R. Delaven et al., *IEEE Trans. Magnetics* 27 1532 (1991).

A) 線幅依存性 (数値解)

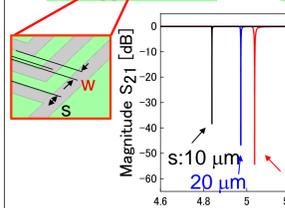
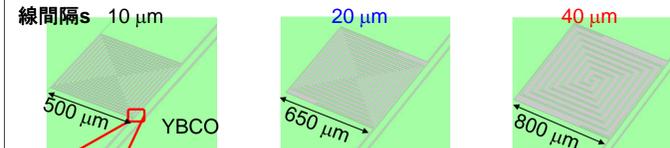


(s: 10 μm w: 10 μm)
周波数: 4.84 [GHz]
 S_{21} : 38.3 [dB]
 Q_L : 3780 [-]

線間隔 s → 一定 (10 μm)
線幅 w → 増加 (10 → 40 μm) で共振特性を解析

周波数: 1.10 倍
 S_{21} : 1.36 倍
 Q_L : 0.21 倍

B) 線間隔依存性 (数値解)



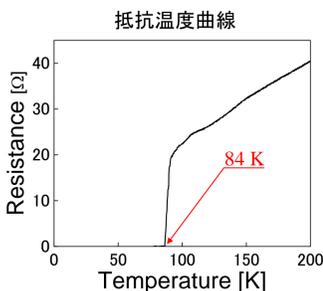
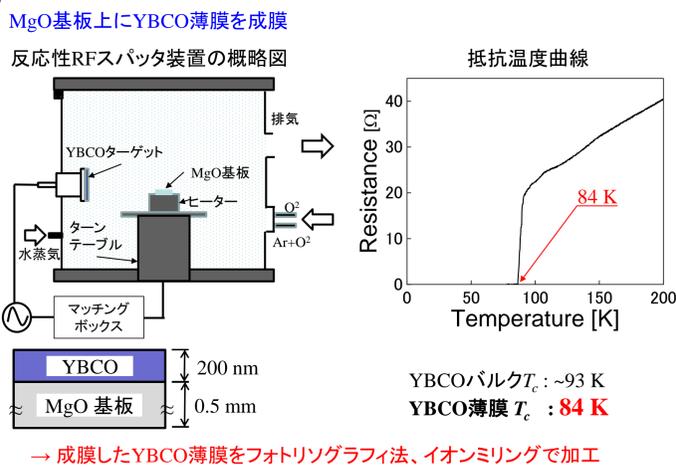
線間隔 s → 増加 (10 → 40 μm)
線幅 w → 一定 (10 μm) で共振特性を解析

周波数: 1.04 倍
 S_{21} : 1.42 倍
 Q_L : 0.16 倍

線幅・線間隔を細くすることにより、更なる高感度化が可能

§ 3 センサーの作製

実験セットアップ



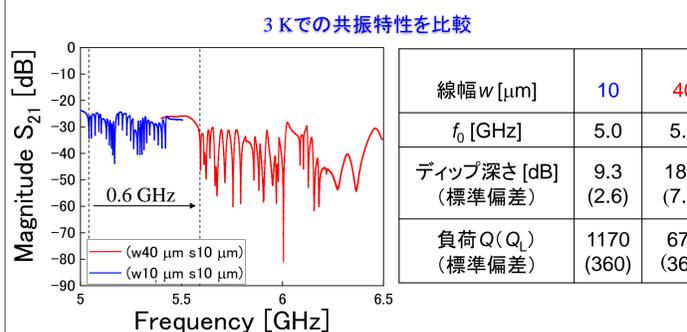
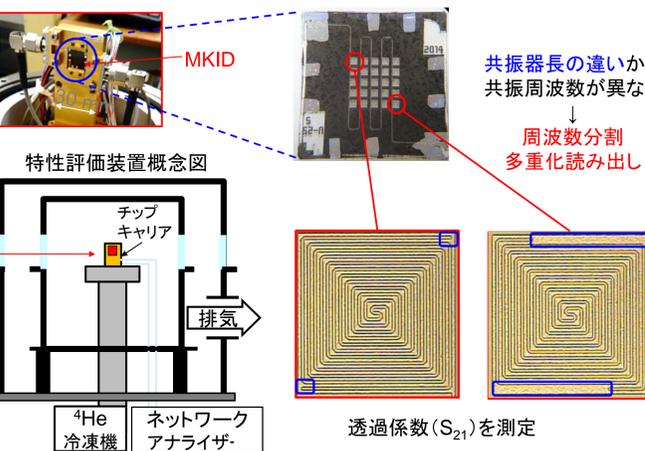
YBCOバルク $T_c: \sim 93$ K
YBCO薄膜 $T_c: 84$ K

→ 成膜したYBCO薄膜をフォトリソグラフィ法、イオンミリングで加工

§ 4 センサーの評価

電気特性評価

冷却温度 3 K で共振器形状による共振特性の依存性を評価



線幅 w [μm]	10	40
f_0 [GHz]	5.0	5.6
ディップ深さ [dB] (標準偏差)	9.3 (2.6)	18.4 (7.4)
負荷 $Q(Q_L)$ (標準偏差)	1170 (360)	670 (360)

線間隔 s → 一定 (10 μm)、線幅 w → 増加 (10 → 40 μm) で線幅依存性を比較

・設計値
 S_{21} : 1.36 倍、 Q_L : 0.21 倍、 Δf_0 : 1.10 倍

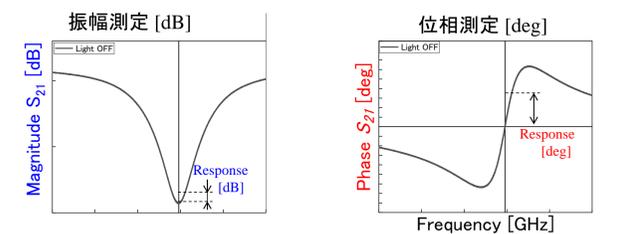
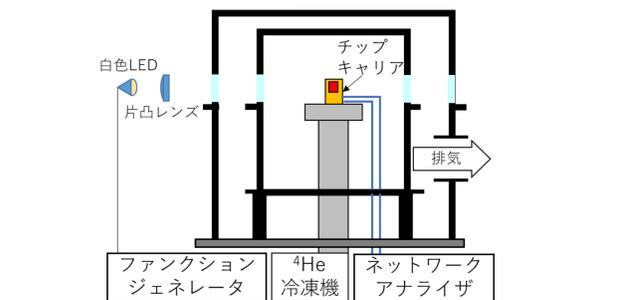
・実験値
 S_{21} : 1.97 倍、 Q_L : 0.57 倍、 Δf_0 : 1.11 倍

S_{21} と Q_L では定性的
共振周波数では定量的に一致

光学特性評価

MKIDの光学特性を振幅・位相の双方から測定評価

光源	白色発光LED 矩形波 (0.5 Hz)
入力電圧	10 V
測定温度	10 K, 70 K



白色発光LEDを用いてMKIDの雑音等価電力 (NEP) を算出

$$NEP \left[\frac{W}{\sqrt{Hz}} \right] = \frac{N}{S} \left[\frac{W}{\sqrt{Hz}} \right]$$

$W_{light}: 17.6$ mW
 $df: 2106.8$ Hz

	10 K	70 K
振幅NEP [W/Hz ^{1/2}]	5.2×10^{-8}	2.6×10^{-7}
位相NEP [W/Hz ^{1/2}]	6.0×10^{-8}	5.0×10^{-8}

	振幅 [nW]	位相 [deg]
Response _{10K}	1.3	17.9
Noise _{10K}	0.2	2.4

位相測定により、70 Kまで感度が保持されることを確認

S. Ariyoshi et al., *Materials Research Express*, 8 116001 (2021).

§ 5 まとめと今後の展望

- We designed, fabricated and characterized a YBCO-based microwave kinetic inductance detector (MKID) consisting of a rewound spiral resonator by using a cryogen-free He4 refrigerator for terahertz (far-infrared) applications.
- As a first step of the optical evaluation, we measured amplitude and phase NEPs by irradiating LED light. The phase measurement achieved better NEP value than the amplitude one at 70 K.
- The optical characteristics will be improved by the optimization of sputtering conditions, photolithography and low-noise measurement.