

令和 6 年 9 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18991

研究課題名(和文)超伝導メタマテリアルを組み込んだテラヘルツ帯力学インダクタンス検出器の研究

研究課題名(英文)Study of terahertz-wave kinetic inductance detectors with superconducting metamaterials

研究代表者

大谷 知行(Otani, Chiko)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・チームリーダー

研究者番号：50281663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：マイクロ波力学インダクタンス検出器(MKIDs)は、1本の読み出し線で多ピクセル信号を読み出せる超伝導検出器だが、各素子でデザインが異なり特性がばらつく。そこで同一デザインの共振器にメタマテリアル(MM)を付加して共振周波数を制御する着想を得た。また、MMの活用により先鋭な特性を有する超伝導に機能性を付与できる。そこでMM組み込み型共振器を含む「超伝導MM」の研究を進めた。まず、アナポール型MMのシミュレーションを行いプラズモン励起透過を示す条件を見出した。また、LNの基板フォノンを活用したMKIDs検出器でLAフォノンの共鳴を観測し、アナポールと組合せて新たな検出器が実現される展望を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導メタマテリアルはまだ始まったばかりであり、超伝導の先鋭な特性に豊富な機能性を付与できるという意味で、大きな可能性を有している。また、マイクロ波からテラヘルツ帯のフォノンは、テラヘルツ帯の測定技術が限定されてきたことからまだ未開拓であり、その直接観測が可能な超伝導体による観測により新たな知見が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Microwave kinetic inductance detectors (MKIDs) are superconducting ones that can read out signals from more than 100 pixels with a single readout line. However, MKIDs have different resonator designs and characteristics for each pixel in order to show the resonant frequency. We have the idea to add metamaterials to the same resonator design so as to show the similar characteristics with the different resonant frequency. Moreover, superconducting metamaterial has great potential in terms of adding functionality to the eminent properties of superconductivity. Then, in this project, 'superconducting metamaterials' including metamaterial-embedded resonators were investigated. First, we performed the simulations of an anapole-type metamaterial and found good conditions for plasmon-induced transmission. Moreover, we observed resonance modes of microwave-excited LA phonons on both surfaces in MKIDs fabricated on a LN substrate, and found the new scheme in combination with anapole.

研究分野：超伝導検出器

キーワード：メタマテリアル フォノン マイクロ波

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導検出器は、その優れた感度特性などから電波天文学をはじめとして様々な最先端研究分野で活用されている。超伝導マイクロ波力学インダクタンス検出器 (MKIDs) は、1本のマイクロ波信号読み出し線に共振周波数の異なる 1/4 波長マイクロ波共振器が多数交流結合した超伝導検出器であり、1本の読み出し線に 100 個以上のピクセルを同時結合して多素子信号を同時に読み出せる。これにより、ピクセル数に比して読み出し回路が簡略化されるとともに、冷凍機の極低温ステージ (駆動温度 $\sim 0.1$  K) への配線数を飛躍的に減らして熱流入を大幅に抑制できるため、高性能の大規模アレイ検出器が実現可能である。一方、この検出器では、各ピクセルのデザインの差異により以下の課題が生じる。

- 1) 共振周波数の間隔がばらつくため、ピクセルごとに読み出し周波数の微調整が必要
  - 2) 受信部に比べてマイクロ波共振器のサイズが大きく、検出器の空間占有率が限られる
  - 3) 感度を左右する共振ピークの鋭さ (共振 Q 値) がばらつき均一性能の検出器実現が困難
- これらの課題の主要因は、検出部ではなく全てマイクロ波共振器にある。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、これらの課題の解決を目指して「メタマテリアル組み込み型共振器つき MKIDs 検出器」を新たに開発することを目的とした。特に、超伝導メタマテリアルの検出器への活用はごく最近になって研究が始まったばかりであり、超伝導特性の先鋭な性能に豊かな機能性を付与する意味で、メタマテリアル技術との融合には大きな可能性がある。そこで本研究課題では、メタマテリアル組み込み型共振器のみにとらわれず、「超伝導メタマテリアル」の新たな機能性の開発も見据えて研究を進めることとした。

### 3. 研究の方法

まず、具体的な目標として、マイクロ波共振器デザインをエレメントごとに変えるのではなく、主となるマイクロ波共振器の基本構造や長さを同一にし、代わりに共振器構造の隙間に 2 次元平面構造のメタマテリアルを多数組み込むことを想定した。一方、超伝導体は、常伝導体に比べて高い導電率、低い高周波ロスをもつとともに、抵抗が消失することに起因する余剰なインダクタンス (力学インダクタンス) を有し、その電気伝導特性は常伝導体と異なるため、それらの特性を適切に取り入れた設計が必要と考えた。そこで本研究では、超伝導体の特性を取り入れた単一メタマテリアルのシミュレーションから開始し、併せて、超伝導メタマテリアルの可能性を検証するという方針を取ることにした。

### 4. 研究成果

具体的なメタマテリアル構造として、プラズモン励起透過 (Plasmon-induced Transparency, PIT) を示すアナポール型メタマテリアルを想定した。最終的には、このような構造を MKIDs 検出器と統合することを想定したが、その検討過程で、単一構造でも優れた機能性を表出する可能性を見出したため、それについて HFSS を用いた電磁界シミュレーションを実施して素子構造の設計を行った。具体的には、図 1 のように Nb 超伝導体を用いた構造において、リング共振器の外径、太さ、ギャップの幅などの条件を変えて良好な条件の探索を行いテラヘルツ帯で PIT を示す条件を得た (図 1)。これをもとに実際のデバイスの作製を進めようとしたが、途中過程で困難が生じたため実デバイスの作製に至らなかった。

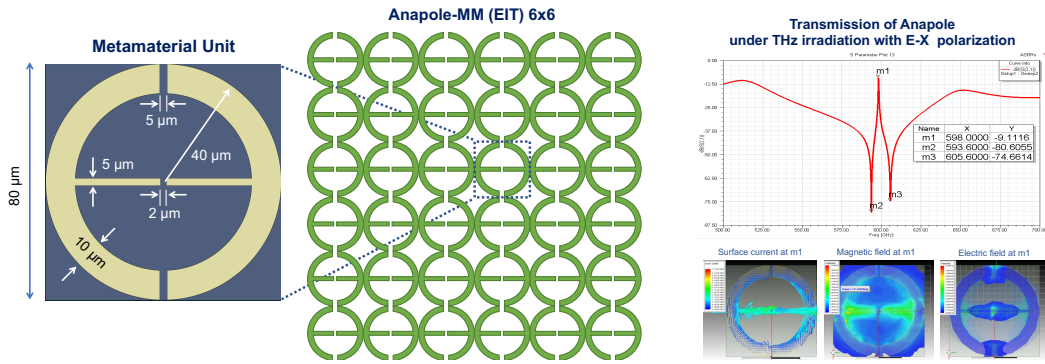


図1. (左) 想定したアナポール型メタマテリアルと求められたパラメータセット。  
(右) このパラメータセットに対する1エレメントのテラヘルツ帯透過特性。

一方、本研究と並行してフォノン検出型のMKIDs検出器の研究も進めた。このテーマはもともとメタマテリアル構造との組み合わせを想定していなかったが、メタマテリアルとの組み合わせにより高周波フォノンの検出において優れた特性を示す可能性が期待されることがわかり、本研究の一環として本研究を進めた。このテーマでは、我々の過去の研究においてフォノン伝搬異方性が示唆されていた強誘電体のニオブ酸リチウム ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) を基板に用いて、MKIDs素子を作製した。そして、特性評価のために、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて 0.15 K におけるマイクロ波共振信号の観察を行ったところ、図2のように共振ピークの周りに多数の別の共振構造が観察された。これらの共振構造の周波数間隔は、LN基板内の表面と裏面との音響縦モードフォノン (LA フォノン) の定在波と考えて矛盾しなかった。また、これらの共振構造の形状は、MKIDs共振器の共振ピークから外れるに連れて形状の非線形性が高まっていることも明らかとなった。これらのことから、LA フォノンとの相互作用により MKID 素子のマイクロ波共振ピークが変調を受けてこのような形状が観察されていると考えられる。ここで見られているフォノンは MHz オーダーの低周波フォノンであるが、これを高周波に拡張することが可能となると、テラヘルツ帯のフォノンの振る舞いを明らかにできる可能性がある。そして、その研究において上記のアナポール型メタマテリアルの先鋭なピーク形状は極めて重要な役割を果たすと期待される。このように、本研究の実施によって、超伝導メタマテリアルの新たな可能性を切り拓くことができたと考えている。

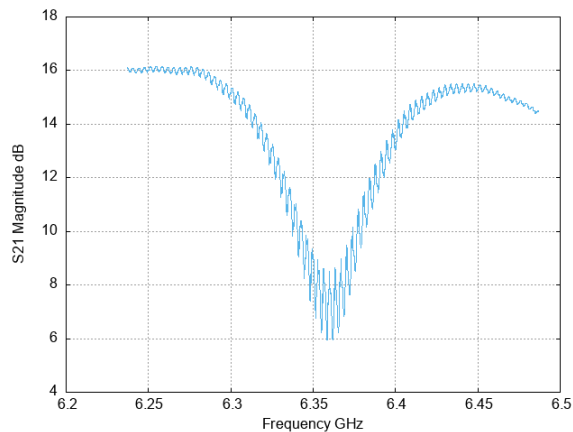


図2. ストイキオ LN 基板上に作製した MKID 素子で得られたマイクロ波共振ピーク (6.35 GHz 付近の凹み) とその周囲に多数観察された LA フォノン由来の多数の共鳴構造。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 村山 亮介、美馬 覚、田井野 徹、野口 卓、大谷 知行	4. 巻 122
2. 論文標題 超高Qの薄膜型超伝導共振器に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 11-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 大谷 知行、村山 亮介、美馬 覚、田井野 徹、野口 卓
2. 発表標題 超高Q値の薄膜超伝導マイクロ波共振器の研究開発
3. 学会等名 理研シンポジウム 第10回「光量子工学研究」 ポストコロナ時代の新しい光科学
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Mima, R. Murayama, T. Taino, T. Noguchi, C. Otani
2. 発表標題 Thin-film superconducting microwave resonator with high quality factor
3. 学会等名 The 11th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村山 亮介、美馬 覚、田井野 徹、野口 卓、大谷 知行
2. 発表標題 超高Q値の薄膜超伝導マイクロ波共振器
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 C. Otani, S. Mima, T. Taino, R. Murayama, T. Noguchi
2. 発表標題 Nb thin-film superconducting microwave resonator with high quality factor for kinetic inductance detectors
3. 学会等名 15th International Workshop on High Temperature Superconductors in High Frequency Field (HTSHFF 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 C. Otani, S. Mima, T. Taino, R. Murayama, T. Noguchi
2. 発表標題 An Ultra-high-Q Thin-film Superconducting Resonator for Terahertz Detectors
3. 学会等名 10th International Symposium on Terahertz-Related Devices and Technologies (TeraTech 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷知行, 美馬 覚, 田井野徹, 村山亮介, 野口 卓
2. 発表標題 高い共振Q値を有するオンチップ超伝導マイクロ波共振器の研究開発
3. 学会等名 R5年度 応用物理学会 北陸・信越支部セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中城悠翔, 美馬 覚, 大谷知行, 亀井雄斗, 伊藤凌太, 野口 卓, 小林達哉, 田井野徹
2. 発表標題 誘電体フリー超伝導共振器の中空構造に関する研究
3. 学会等名 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	伊藤 凌太 (Ito Ryota)		
研究協力者	Zheng Xiaobo (Zheng Xiaobo)		
研究協力者	亀井 雄斗 (Kamei Yuto) (90968330)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・特別研究員  (82401)	
研究協力者	田井野 徹 (Taino Tohru) (40359592)	埼玉大学・理工学研究科・准教授  (12401)	
研究協力者	美馬 覚 (Mima Satoru) (50721578)	国立研究開発法人情報通信研究機構・未来ICT研究所・研究員  (82636)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------