

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420315

研究課題名(和文)メタマテリアルを用いた超伝導フィルタの新しいチューニング手法の開発

研究課題名(英文)Development of new tuning technique of superconducting filter using a metamaterial

研究代表者

大嶋 重利(Ohshima, Shigetoshi)

山形大学・理工学研究科・名誉教授

研究者番号：40124557

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導フィルタの実用化では、中心周波数を低周波側、高周波側にシフトできる手法を開発することが重要であるが、現在までは、低周波側にシフトできる手法しか報告されていない。我々は、チューニングロッドに超伝導共振器を用い、超伝導フィルタの中心周波数シフトを検討した。その結果、小型超伝導共振器をチューニングロッドに用いると中心周波数を高周波側にシフトできることを見出した。共振器を複数配置すればメタマテリアルとなるので、メタマテリアルをチューニングロッドに用いれば、超伝導フィルタの中心周波数を更に高周波側にシフトできる可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：The practical application of the superconducting filter, it is important to develop a technique that center frequency of a filter can be sifted to the higher frequency side, however until now, only method that can be shifted to a lower frequency side was reported. We examined the center frequency shift of the superconducting filter to the higher frequency side using a superconducting resonator tuning rod. Using superconducting-resonator tuning rod, placing the rods in a suitable position on the superconducting resonator, we found that the shift of the filter center frequency was higher frequency side. Also, metamaterial can be constructed using many resonators, therefore we can understand the useful of metamaterial tuning rods to shift the center frequency of the filter to the higher frequency side.

研究分野：超伝導高周波エレクトロニクス

キーワード：超伝導フィルタ チューニング手法 YBCO薄膜 メタマテリアル 超伝導バンドパスフィルタ 超伝導共振器

1. 研究開始当初の背景

平面型超伝導フィルタ、例えば一般的に用いられているヘアピン型共振器を用いたフィルタのチューニングはトリマーロッドを共振器の端部に配置し、それを上下して行う。従って、多数の共振器を有する超伝導バンドパスフィルタでは、多くのトリマーを共振器上に配置し、チューニングする必要がある。しかし、誘電体ロッドトリマーでは、フィルタの共振周波数を低周波側にシフトさせることしかできない。バンドパスフィルタの共振周波数を高周波側にシフトさせるためには、共振器間の結合係数を小さくさせること、実効的な共振器長を短くすることが必要である。そのためには、サファイアロッドのような正の容量では無く、負の誘電率、負の透磁率をもつトリマーで調整する必要がある。現在注目されている「**メタマテリアル**」は正にその性質を有している。ここに新たに「**メタマテリアルを用いた新しいチューニング**」を提案する。

2. 研究の目的

本申請研究では、次の2点を3年間で集中的に検討する。

(1) シミュレーションによる周波数シフトの検討

電磁界シミュレータ SONNET-EM や MW-Studio を用いて周波数シフトを検証する。バンドパスフィルタの共振器上にサファイアロッドやメタマテリアルを接着させたトリマーロッドを配置させ、それを上下・左右に移動させた時のバンドパスフィルタの周波数シフトがどのように生じるかを検討する。

(2) メタマテリアルトリマーロッドの有効性の検証

超伝導共振器や超伝導フィルタを試作し、それをトリマーロッドの配置できるキャビティ内にセットする。次に、配置したトリマーロッドを移動させ、フィルタや共振器の共振周波数シフトを実測し、メタマテリアルチューニングの有効性を実証する。

3. 研究の方法

(1) 電磁界シミュレーションによる形状決定
3段ヘアピン型バンドパスフィルタ及びチューニング用超伝導小型共振器を設計し、その周波数特性を評価する。我々は、電磁界シミュレータにより超伝導バンドパスフィルタの設計に関する実績があるので、その手法を用いて、最適な形状を決定する。

(2) 超伝導フィルタ、超伝導共振器の試作
高温超伝導薄膜を用い、超伝導フィルタ、超伝導共振器を試作する。試作は、通常のフォトリソグラフィ技術を用いる。

(3) 超伝導フィルタ、共振器の周波数特性
小型冷凍機を用い、超伝導フィルタのチューニング特性を評価する。チューニング特性の

評価システムは、研究室で保有しているシステムを用いる。

4. 研究成果

(1) 電磁界シミュレーションによる形状決定
電磁界解析シミュレータにより設計した超伝導フィルタの形状及びその周波数特性(シミュレーション結果)を図1, 2に示す。図1のような形状で、図2で示すような良好なバンドパスフィルタ特性を示すことを確認した。次に、誘電体、超伝導薄膜、超伝導共振器(メタマテリアル的な性質を持たせるための共振器)を密着させたトリマーロッドをフィルタの共振器上に配置させ、それを移動させた時の共振周波数シフトを電磁界解析シミュレーションにより評価した。トリマーロッドの配置モデル図を図3に、トリマーロッドの移動モデルを図4に示す。共振器の端部にトリマーロッドを配置し、それを図4で示すように、上下及びx方向に移動させ、周波数シフトをシミュレーションした。図4には超伝導共振器の形状図も示してある。今回は、1つの共振器を配置した時の様子をシミュレーションすることにした。

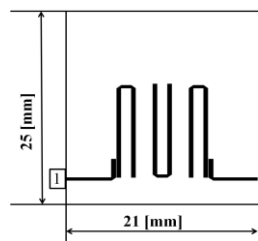


図1 フィルタの概略

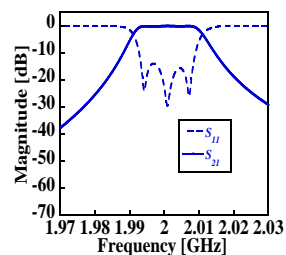


図2 フィルタの特性

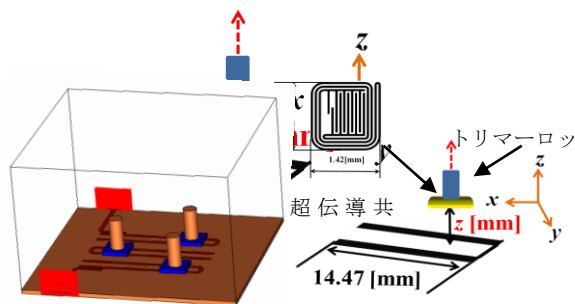


図3 トリマーロッドの配置図

図4 トリマーロッドの移動図

図5に、超伝導共振器や超伝導薄膜をトリマーロッド先端部に接着し、それを移動した時の周波数シフトのシミュレーション結果を示す。縦軸は次式で求められる Δf_0 を示す。

$$\Delta f_0 = f - f_0$$

ここで f_0 はトリマーロッドが無い時の共振周波数である。すなわち、 Δf_0 が正の値の時は、共振周波数が高周波側にシフトしたことを意味している。図5の結果、トリマーロッドが共振器の0.5mm以下の高さに配置されると、共振周波数は高周波側にシフトすることが分かった。また、超伝導薄膜よりも、超

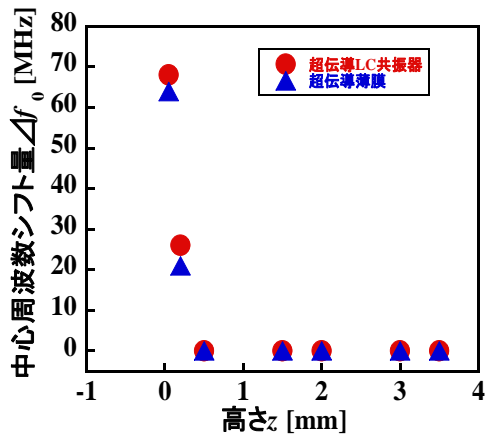


図5 超伝導共振器及び超伝導薄膜トリマーの高さを変えた時の周波数シフト

伝導共振器をトリマーロッドに配置した方が周波数シフトは大きいことも明らかとなった。トリマーロッドを共振器の端部から x 方向に移動させた場合にも、同じように共振周波数がシフトすることを見出している。

(2) 超伝導フィルタ、超伝導共振器の試作
超伝導フィルタ、超伝導共振器はフォトリソグラフィ技術を用いて作製した。用いた超伝導薄膜は MgO 基板上に形成された $YBa_2Cu_3O_7$ 薄膜であり、膜厚は 300nm である。図6に、キャビティ内にセットされている試作した超伝導共振器の写真を示す。中央のヘアピン構造が共振器であり、この上にトリマーロッドをセットし、共振周波数のシフトを測定する。

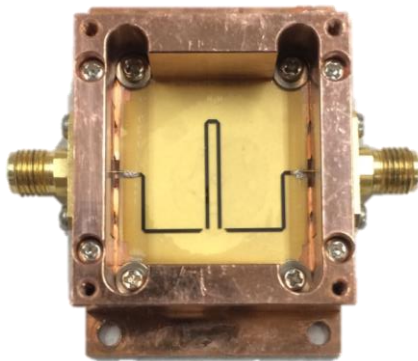


図6 超伝導共振器の実装写真

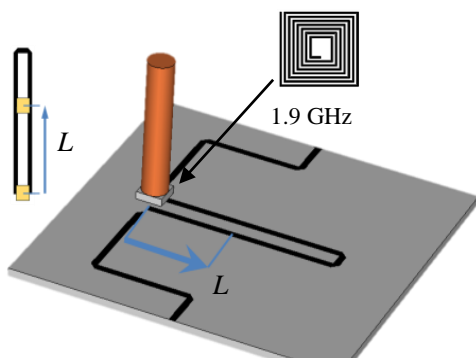


図7 チューニングロッドの移動モデル図

(3) 超伝導フィルタ、共振器の周波数特性
図7で示されるように、チューニングロッドを共振器上(高さ 0.5mm に固定)に移動させ、共振器の中心周波数シフトを実測した。チューニングロッドの先端には、小型の超伝導共振器(共振周波数 1.9GHz)をセットしてある。共振器の周波数特性評価の結果を図8に示す。チューニングロッドを移動させることにより、共振器の共振周波数を低周波側、高周波側にシフトできることを見出した。

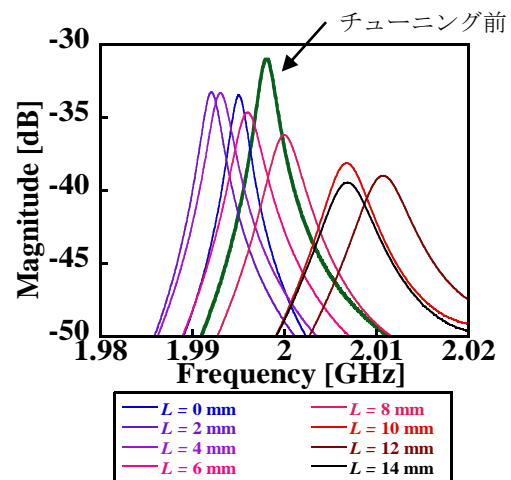


図8 超伝導共振器の周波数特性

次に、超伝導フィルタのチューニングについて評価した。図1で示されるような3段超伝導バンドパスフィルタを試作し、その周波数特性を評価した(図9)。チューニング前は、中心周波数 2 GHz、帯域 20MHz のバンドパス特性を示しているが、チューニング後は中心種波数 2.015GHz、帯域 20MHz のバンドパス特性を示している。すなわち、高周波側に 15MHz シフトしていることが分かる。メタマテリアル特性を示すチューニングロッドを作製するには、共振器を複数個配置することが必要であるが、現在の測定システムではトリマーロッドを複数個配置させることができない。しかしながら、1個の共振器を配置させただけで、超伝導バンドパスフィルタの共

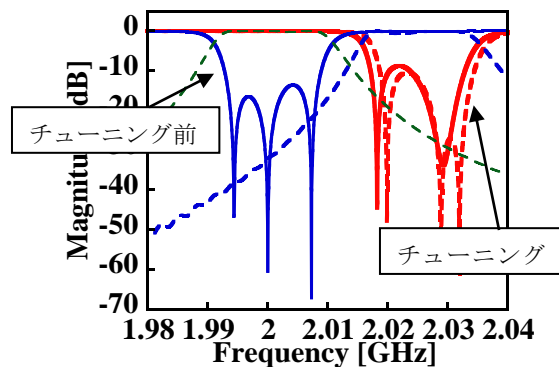


図9 超伝導共振器を用いたフィルタ特性のチューニング

振周波数を高周波側にシフトできるので、メタマテリアルトリマーを用いれば、更に高周波側にシフトできるものと思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) T. Kato, A. Saito, R. Tsurui, H. Teshima, S. Ohshima “Power-Handling Capability of Superconducting Filters Using Disk- and Ring-Type Bulk Resonators” IEEE. Trans. Applied. Supercond. Vol.25, 査読有, No. 3, 1501105 (2015.6)
- (2) Kuroda A. Saito, S. Ohshima “Design and Fabrication of Compact HTS Duplexers Using a CQ Structure With a High Qu Resonator” IEEE. Trans. Applied. Supercond. Vol.25, 査読有, No.3, 1500304 (2015.6)
- (3) A. Saito, R. Tsurui, T. Kato, K. Nakajima, H. Teshima, S. Ohshima “100-W-class superconducting transmit bandpass filter using thick disk resonator made with Gd-Ba-Cu-O single-crystal bulk” Appl. Phys. Express8,043101, (2015.3), 査読有
- (4) S. Ohshima, S. Takahashi, M. Endo, A. Saito “Improvement of power-handing capability of superconducting filters using 3D-matrix microstrip lines” J. Phys. Conference Series 507,(2014)042027,doi:10.1088/1742-6596/507/4/042027, 査読有
- (5) K. Sato, S. Sato, K. Ichikawa, M. Watanabe, T. Honma, Y. Tanaka, S. Oikawa, A. Saito, S. Ohshima “Dependences of microwave surface resistance of HTS thin films on applied dc magnetic fields parallel and normal to the substrate” J. Phys. Conference Series 507, 査読有, (2014) 012045, doi:10.1088/1742-6596/507/1/012045
- (6) H.Ishii, T.Kimura, N.Kobayashi, A.Saito, Z.Ma, S. Ohshima,” Development of UWB HTS Bandpass Filters with Microstrip Stub-Loaded Three-Mode Resonators” IEEE Trans. Applied Supercond. Vol.23, No.3, 査読有, (2013) 1500204
- (7) Y.Tanaka, M.Akiya, H.Ishii, A.Saito, S. Ohshima,” Improving Power-Handling Capability of 4-Pole HTS Filters by Expanding Line Width of Resonator 2 with Narrow Slits” IEEE. Trans. Applied Superconductivity 23, 査読有, (2013) 1500504.
- (8) 関谷尚人 和田光司 大嶋重利 「入出力整合補償回路を有する中心周波数可変型インターディジタル結合共振器バンドパスフィルタに関する基礎検討」エレクトロニクス実装学会誌 16, 査読有, (2013) 1-10.

[学会発表] (計 8 件)

- (1) 鈴木悠介, 齊藤 敦, 中島健介, 大嶋重利 「超伝導フィルタの新しいチューニング法の検討」第70回応用物理学会東北支部学術講演会, 3P17, (2015.12.3), 南田温泉ホテルアップルランド(青森県 弘前市)
- (2) S. Ohshima “Research trend of our recent superconducting microwave passive devices ” 8th East Asian Symposium on Superconductive Electronics (2015.11.5) (Daejeon, 韓国)
- (3) 齋藤大暉, 鶴井椋太, 大嶋重利, 齊藤 敦 「送信用超伝導バルクフィルタの外部Q値可変機構に関する検討」第76回応用物理学会秋季学術講演会, (2015.9.14) 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)
- (4) S. Ohshima, K. Sato, M. Kondo, N. Takanashi, A.Saito “Relationship between the vortex movement and the surface resistance of YBCO thin films in high magnetic fields” The 12th European Conference on Applied Superconductivity (2015.9.7) (リヨン、フランス)
- (5) S. Ohshima, K. Sato, N. Takanashi, K. Nakajima, A. Saito “Microwave Surface Resistance of $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ Films in High DC Magnetic Fields” The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (2015.7.1) 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県 国頭郡恩納村)
- (6) 黒田晃弘, 齊藤 敦, 大嶋重利 「小型超伝導分波器の設計・試作・評価」2015年度春季低温工学・超電導学会 (2015.5.27) 産業技術総合研究所 (茨城県つくば市)
- (7) 黒田晃弘, 堺三洋, 齊藤敦, 大嶋重利 「高無負荷 Q 共振器を用いた小型超伝導分波器の設計」電子情報通信学会ソサエティ大会 (2014.3.19) 新潟大学 (新潟県新潟市)
- (8) S. Ohshima, S. Takahashi, M. Endo, A. Saito, “Improvement of Power Handling Capability of Superconducting Filters using 3D-matrix Microstrip Lines” 11th European Conference on Applied Superconductivity, 1P-EL-3-03 (2013.9.17) (ジェノバ イタリア)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ohshima-lab.yz.yamagata-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大嶋 重利 (OHSHIMA SHIGETOSHI)

山形大学・大学院理工学研究科

名誉教授

研究者番号：40124557

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し