

機関番号：11501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21760246

研究課題名（和文）最高性能送信用超伝導バルクフィルタの開発

研究課題名（英文）Development of high-performance transmit filter using superconducting bulk

研究代表者

齊藤 敦（Saito Atsushi）

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70313567

研究成果の概要（和文）：

本研究では最高性能送信用超伝導フィルタを開発すること目的とし、以下のような成果を得た。3段超伝導バルクリング共振器フィルタを設計・製試作し、25W以上の耐電力を得ることができた。さらに、電磁界シミュレーション結果から、3段バルクディスク共振器フィルタは100W以上の耐電力を示すことが予想された。また、急峻なスカート特性を達成するために、9段飛び越し結合型フィルタが必要であることを明らかにし、2段及び3段バルクディスクフィルタの設計・試作を行うことができた。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study was developing a superconducting transmit filter with the best performance. We designed and fabricated the 3-pole filter using the superconducting bulk ring resonators and observed the power-handling capability (PHC) more than 25 W. Moreover, we estimated the PHC of 3-pole filter using the disk resonators more than 100W by the electro-magnetic field simulation. It was also found that the 9-pole cross-coupling filter was needed to obtain the sharp skirt properties and we could design and fabricated 2- and 3-pole filters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：フィルタ，薄膜，超伝導バルク，耐電力特性，相互変調歪み(IMD)，スカート特性

## 1. 研究開始当初の背景

送信用超伝導フィルタを実現するために、共振器内の電流分布を分散させる薄膜型共

振器の構造開発や、超伝導厚膜の研究、ひずみの発生機構に関する研究が成されてきた。一方、我々は、熔融法で作製した単結晶バル

クの表面抵抗（マイクロ波損失）が一般に市販されているマイクロ波デバイス用高品質高温超伝導薄膜と同程度であることを初めて明らかにし、超伝導バルクの高周波応用の可能性を示した。さらに、3次元電磁界解析シミュレータを用いて超伝導バルク3段共振器フィルタを設計・試作し、周波数特性及び耐電力の評価を行ってきた。研究開発当初までに3段 Dy-Ba-Cu-O 系超伝導バルクリングフィルタの耐電力特性が 10 W 以上であることを確認しており、更なる高耐電力化と高スカート特性が望まれていた。

## 2. 研究の目的

次世代（4G：第4世代）移動体通信基地局へのオール超伝導フィルタの実装を目指し、以下を具体的な超伝導送信用フィルタ特性の仕様と数値目標とした。

- ・ 中心周波数：5 GHz
- ・ 帯域幅：100 MHz
- ・ 挿入損失：1 dB 以下
- ・ スカート特性：30 dB/10 MHz 以上
- ・ 耐電力：40 W 以上

## 3. 研究の方法

本研究で作製する超伝導バルクフィルタの耐電力特性及び相互干渉ひずみ (IMD) を正確に評価するために、まず、評価システムの構築を行った。次に3段バルクリングフィルタを用いた耐電力試験を行った。耐電力特性の目標を達成するために、共振器材料として Dy-Ba-Cu-O 系超伝導バルクと Gd-Ba-Cu-O 系超伝導バルクのどちらがより高い耐電力を実現できるかを調査した。さらに、共振器をディスク型に変更した場合の耐電力特性の向上を検討した。

また、周波数特性の目標を達成するために、カップリングマトリクスにより必要な段数を見積もり、その具体的な構造を検討した。その検討から、飛び越し結合を用いた9段フィルタが必要であることを明らかにし、同フィルタを実現するための基礎的な実証を行うために、2段及び3段フィルタを設計し、作製・評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1) IMD 測定システムの構築

本研究で作製する超伝導バルクフィルタの耐電力特性及び相互干渉ひずみ (IMD) を正確に評価するために、評価システムの構築を行った。

図1に IMD 測定システムのブロック図を示す。本補助金にて購入した信号発生器 (SG) を導入することにより最も簡単な耐電力評価システムを構築できた。システムのノイズレベルを調査したところ、IMD3 のレベルが大

きく、一般的なフィルタの IMD3 特性を測定することが困難であることがわかった。そこで、超伝導2信号通過フィルタの導入を提案し、その有効性について調査した。図2は、超伝導2信号通過フィルタの周波数特性を示している。このフィルタは2つの基本信号のみを通過させ、IMD3 波 ( $2f_1 - f_2$ ) を低減させることができる。図3に IMD3 の測定結果を示す。IMD3 は基本波の傾きに対して3倍の傾きで生じ、入力電力が 22 dBm までは線形性であることが確認できた。また、IP3 は 55.81 dBm であった。図2の周波数特性をもつ超伝導2信号通過フィルタをシステムに組み込むことで、システムにおける IMD3 の出力電力が 22.95 dBm 低減し、IP3 は 10.9 dBm 増加した。

以上の結果から、超伝導2信号フィルタが IMD3 波測定においてノイズレベルの低減に有効であり、簡易なコンポーネントでも低ノイズ IMD3 波測定システムが実現できることを明らかにした。今後、この2信号通過フィルタの特性向上によりさらに、低い IMD 測定システムが実現できると期待できる。

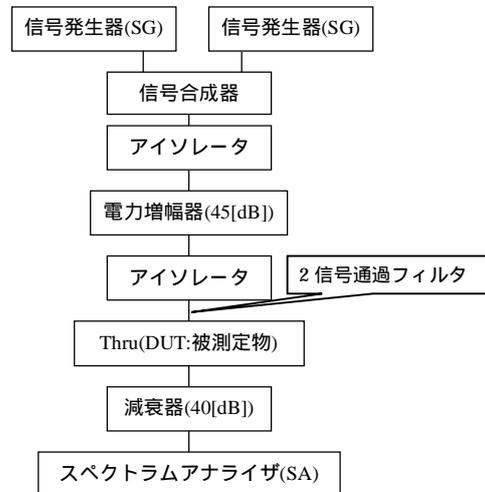


図1 IMD 測定システムのブロック図

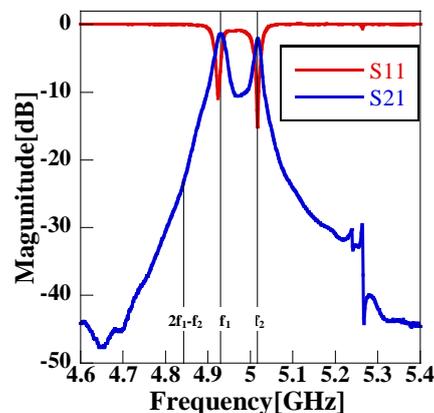


図2 超伝導2信号通過フィルタの周波数特性

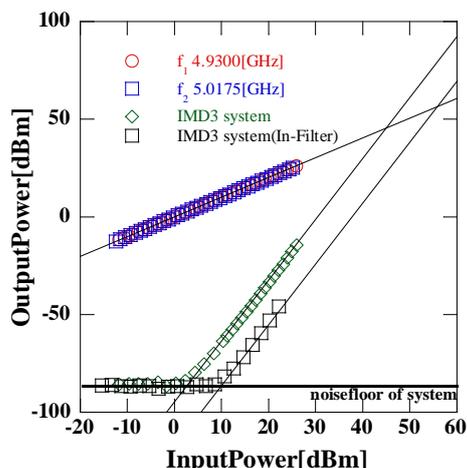
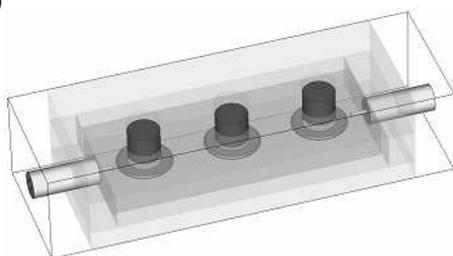


図3 IMD測定結果

(2) 3段超伝導バルクリングフィルタの耐電力特性 (Dy-Ba-Cu-0系とGd-Ba-Cu-0系超伝導バルクの比較)

3段超伝導バルクリングフィルタを用いた耐電力試験を行った。耐電力特性の目標を達成するために、共振器材料としてDy-Ba-Cu-0系とGd-Ba-Cu-0系超伝導バルクのどちらがより高い耐電力を実現できるかを調査した。図4は3段超伝導バルクリングフィルタの電磁界解析モデル(a)と作製したフィルタの写真(b)である。図5は3段Dy-Ba-Cu-0超伝導バルクリングフィルタの典型的な周波数特性であり、フィルタ特性が得られていることがわかる。図6は、3段超伝導バルクリングフィルタの典型的な耐電力特性である。Dy-Ba-Cu-0バルクを用いた場合、ほとんどの

(a)



(b)

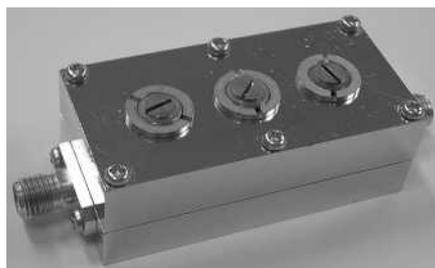


図4 3段超伝導バルクリングフィルタの電磁界モデル(a), 作製したフィルタの写真(b)

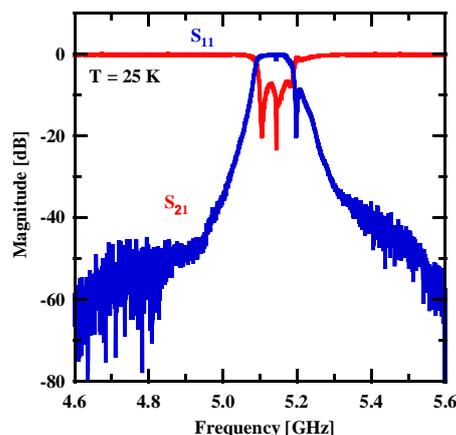


図5 3段Dy-Ba-Cu-0超伝導バルクリングフィルタの周波数特性

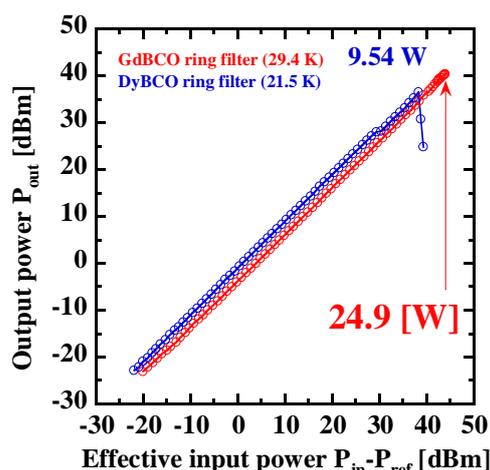


図6 3段超伝導バルクリングフィルタの耐電力特性 (赤)Gd-Ba-Cu-0, (青)Dy-Ba-Cu-0

場合約 10 W 程度の耐電力であったのに対して、Gd-Ba-Cu-0 バルクを用いた場合、25 W 以上でも線形性を保っていた。よって、Gd-Ba-Cu-0 バルクの方が高耐電力フィルタ材料として有望であることが明らかとなった。この理由は、Dy-Ba-Cu-0 に比べて Gd-Ba-Cu-0 バルクの熱伝導率が良いためであると考えている。

(3) 更なる高耐電力化に向けた 3 段超伝導バルクディスクフィルタの検討

共振器をディスク型に変更した場合の耐電力特性の向上を電磁界シミュレーションにより検討した。図7は3段バルクリングフィルタ(a)及びディスクフィルタ(b)の電流密度分布を示している。この結果から、ディスク共振器はリング共振器に比べて約4倍の耐電力特性を示すことが予想できる。従って、Gd-Ba-Cu-0 ディスク共振器フィルタは、100 W 以上の耐電力特性を示すことが予想される。この実験的検証は、今後の課題である。

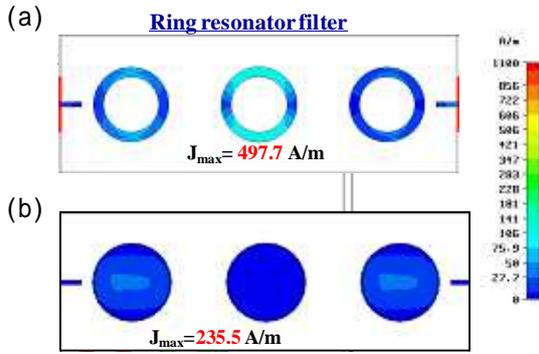


図7 3段バルクフィルタの電流密度分布  
(a) リング共振器, (b) ディスク共振器

(4) 飛び越し結合9段フィルタの設計

周波数特性の目標を達成するために、カップリングマトリクスにより必要な段数を見積もり、その具体的な構造を検討した。図8は、フィルタトポロジを示しており、電磁界の流れを考えることにより周波数特性を計算することができる。図9はその周波数特性を示しており、急峻なスカーフを示すフィルタが得られている。

図8,9に示したフィルタを実現するための基礎的な実証を行うために、S-1-9-Lを考慮した2段フィルタ、S-4-5-6-Lを考慮した3段フィルタを設計・試作した。

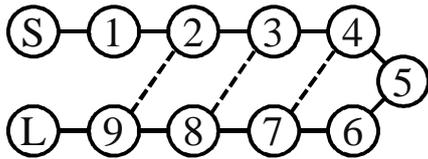


図8 飛び越し結合を用いた9段フィルタのフィルタトポロジ

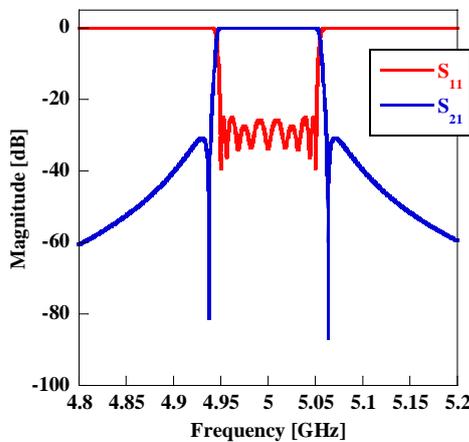


図9 飛び越し結合を用いた9段フィルタの周波数特性

(5) フィルタの設計と作製

2段フィルタの設計と作製

超伝導バルクディスク共振器を用いた2段フィルタの設計と作製を行った。図10はシミュレーションによる周波数特性(a)と作製写真(b)を示している。図11は実験結果を示しており、フィルタ特性が得られている。挿入損失が仕様よりも少し大きいですが、これは、給電線の長さを調整することで改善可能であると考えている。フィルタの耐電力特性は、約10Wであったが、この結果については、周波数特性の改善後再調査の必要がある。

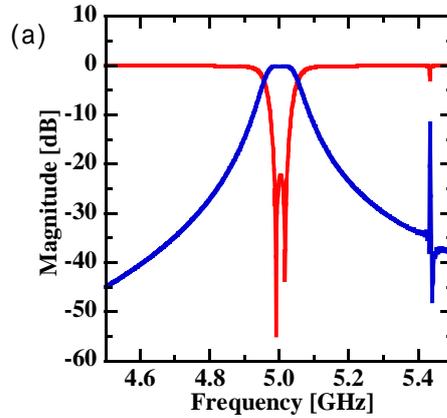


図10 2段フィルタの周波数特性(シミュレーション) (a)と作製写真(b)

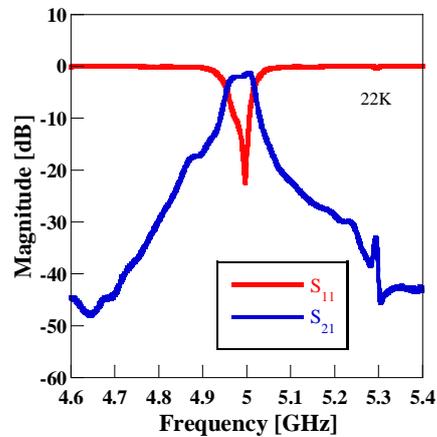


図11 2段フィルタの周波数特性(実験結果)

### 3段フィルタの設計と作製

次に3段フィルタの設計と作製を行った。図12はシミュレーションによる周波数特性(a)と作製写真(b)を示している。シミュレーションによる数値特性には、高周波側に余剰な通過帯域が見られるが、今後の多段化により低減させることができるものと考えている。図13は実験結果を示しているが、大きな挿入損失により特性が劣化している。この原因が、図8におけるS-4-5-6-Lを考慮した折り返し構造に起因するかを再検討する必要がある。

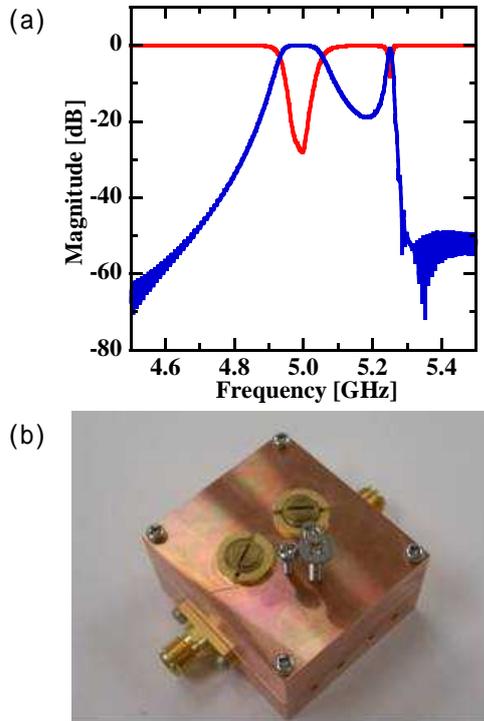


図12 3段フィルタの周波数特性(シミュレーション)(a)と作製写真(b)

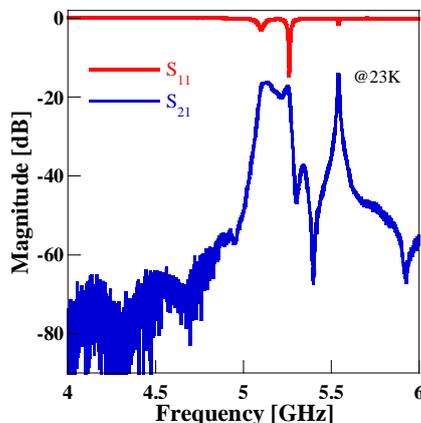


図13 2段フィルタの周波数特性(実験結果)

### 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9件)

1. S. Nakayama, T. Honma, K. Nakagawa, A. Saito, and S. Ohshima, The dc magnetic field, temperature, and film thickness dependence of microwave surface resistance of YBCO and DyBCO thin films, Physica C, 470, 1042-1044 (2010). (査読あり)
2. K. Nakagawa, S. Nakayama, A. Saito, S. Ono, H. Kai, M. Mukaida, T. Honma, and S. Ohshima, Relationship between intrinsic surface resistance and critical current density of YBCO thin films with various thickness, Physica C, 470, 1361-1364 (2010). (査読あり)
3. S. Ohshima, M. Uno, Y. Endo, S. Takeuchi, S. Ono, A. Saito, and N. Sekiya, Comparison of power handling capabilities of sliced and conventional microstrip line filters, Journal of Physics: Conference Series 234, 042025 (2010). (査読あり)
4. N. Sekiya, Y. Nakagawa, A. Saito, and S. Ohshima, Design of novel tunable HTS microstrip filters, Physica C, 469, 1653-1657 (2009). (査読あり)
5. S. Ono, Y. Harada, A. Saito, J.-H. Lee, M. Uno, T. Kato, M. Yoshizawa, and S. Ohshima, Design of superconducting multi-pole miniaturized filter with quasi-spiral resonators considered unwanted coupling, Physica C, 469, 1649-1652 (2009). (査読あり)
6. S. Ohshima, T. Kaneko, J. H. Lee, M. Ohsaka, S. Ono, and A. Saito, Automatic trimming technique for superconducting band-pass filter using a trimming library, IEICE Trans. Electron, VOL. E92-C, 303-306 (2009). (査読あり)

7. S. Ohshima, M. Ohsaka, J. H. Lee, S. Takeuchi, H. Kinouchi, S. Ono, Y. Takano, T. Nakamura, M. Yokoo, and A. Saito, Development of High-Speed Tuning System for HTS Filters, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 1, 903-906 (2009). (査読あり)
8. J. H. Lee, M. Ohsaka, S. Ono, M. Uno, A. Saito, and S. Ohshima, A simple tuning method for high-temperature superconductor microstrip filters by using two dielectric floating plates, Supercond. Sci. Technol., Vol. 22, 025013 (2009). (査読あり)
9. A. Saito, J. H. Lee, H. Teshima, S. Ono, and S. Ohshima, Power-Handling Capability of Transmit Filters using Superconducting Bulk Ring Resonators, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 1, 889-902 (2009). (査読あり)

[学会発表](計9件)

1. 齋藤 敦, 手嶋英一, 龍口 司, 秋谷守紀, 中島健介, 大嶋重利, 超伝導バルク共振器を用いた送信用フィルタの設計と作製, 第58回応用物理学関連連合講演会, 25p-KJ-13 (2011).
2. 六鎗 潤, 櫻井智之, 武田和幸, 小林巨卓, 齋藤 敦, 大嶋重利, アモルファス YBCO パターン焼成法による Meander Line 共振器の作製と評価, 第58回応用物理学関連連合講演会, 25p-KJ-12 (2011).
3. Saito, H. Teshima, S. Ono, N. Sekiya, H. Yamada, K. Nakajima, and S. Ohshima, Design and Fabrication of Superconducting Transmit Filter using Gd-Ba-Cu-O Bulks, International Conference on Superconductivity and Magnetism(ICSM2010), ELA-P-016, Antalya, Turkey (2010).
4. A. Saito, H. Teshima, S. Ono, N. Sekiya, M. Takeda, K. Nakajima, and S. Ohshima, Design and estimation of superconducting band-pass filters using HTS bulk resonators, Applied Superconductivity Conference, 4EPB-02(Washington DC, USA, 2010.8)
5. 龍口司, 齋藤 敦, 小野哲, 宇野正紘, 遠藤之正, 齋藤剛司, 中島健介, 大嶋重利, 超伝導二信号通過フィルタを用いた5GHz帯相互干渉歪測定システム, 信学技報, SCE2010-3 (2010).
6. A. Saito, J. H. Lee, S. Ono, M. Uno, Y. Endo, H. Teshima, A. Kawakami, K. Nakajima, and S. Ohshima, Resonator structures and power-handling capability for superconducting transmit band-pass filters, International Superconductive Electronics Conference (ISEC) 2009, HF-P08(Invited), Fukuoka, Japan (2009).
7. A. Saito, J. H. Lee, S. Ono, M. Uno, Y. Endo, H. Teshima, K. Nakajima, and S. Ohshima, Superconducting transmit band-pass filters using bulks with low-surface resistance, Yonezawa Conference 2009, II-3(Invited), Yonezawa, Japan (2009).
8. 齋藤 敦, 手嶋英一, 小野哲, 李宰勲, 宇野正紘, 遠藤之正, 中島健介, 大嶋重利, Gd(Dy)-Ba-Cu-O 超伝導バルク共振器フィルタの作製と耐電力特性の評価, 信学技報, SCE2009-8, 39-43 (2009).
9. 齋藤 敦, 手嶋英一, 小野哲, 宇野正紘, 遠藤之正, 中島健介, 大嶋重利, HTS バルク共振器フィルタの耐電力特性と多段設計, 第70回応用物理学合学術講演会, 8p-R-19 (2009).

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 敦 (Saito Atsushi)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 70313567