

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：23760308

研究課題名（和文）最高性能平面型超伝導送信用フィルタの開発

研究課題名（英文）Development of high performance superconducting transmit planar filter

研究代表者

關谷 尚人（SEKIYA NAOTO）

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教

研究者番号：80432160

研究成果の概要（和文）：これまで超伝導送信用フィルタはマイクロストリップライン（MSL）構造と呼ばれる平面構造を用いて研究が行われてきた。しかし、MSL 構造を用いた共振器はサイズが大変大きく、作製できる超伝導薄膜のサイズには限界があることからフィルタの小型化が求められている。そこで、ストリップライン構造を用いることで共振器間の結合を弱めて共振器間距離を狭めることでフィルタ全体の大幅な小型化を実現した。

研究成果の概要（英文）：Generally, Superconducting transmit filters are constructed using microstrip line structure. Because of the limitation on film size, however, these resonators are too large for use in high pole filters. To overcome this problem, we have developed a miniaturized transmit filter with a strip line structure which enables the spacing between resonators to be reduced due to the weak coupling property of it.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

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：マイクロ波・ミリ波

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導送信用フィルタは、従来、マイクロストリップライン（MSL）構造が用いられてきた。最も効果的に耐電力特性を向上させる方法はサイズの大きい円形デュアルモード共振器を用いることである。しかし、サイズの大きい共振器を用いて多段化するとフィルタ全体のサイズが大きくなりすぎる問題があった。送信フィルタの場合、共振器の小型化と耐電力特性の向上はトレードオフであり、特にデュアルモードフィルタは共振器間に強い飛び越し結合があることから、その影響を無視できる程度に共振器間を離さなければならず小型化は極めて困難であり、MSL 構造を用いた送信フィルタ開発は限界に近づきつつある。

## 2. 研究の目的

上記問題に対して、研究代表者はこれまでストリップライン（SL）構造を用いた送信フィルタの研究を行っており、SL 構造の共振器間の結合が MSL 構造と比較して大変弱いことを見出した。また、SL 構造は MSL 構造と比較して、共振器の上部に誘電体基板を有することから効率的に熱を放熱できることから耐電力特性の向上も期待できる。

そこで、本研究目的を以下のように設定する。

『SL 構造を用いることで、超伝導送信用デュアルモードフィルタの小型化・低背化を実現し、なおかつ急峻な遮断特性及び平面型フィルタで最大の耐電力特性を実現する。』

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するために以下の3つの段階に分けて研究を行った。

(1) SL 構造を用いたデュアルモードフィルタの①小型・②低背化

SL 構造を用いたデュアルモードフィルタが従来の MSL 構造を用いたデュアルモードフィルタと比較して①小型・②低背化を実現できるか確認する。

(2) デュアルモードフィルタの有極化

送信フィルタの場合は、共振器を多段化すると共振器に集中する電流密度が増加し耐電力特性が劣化する。そこで、少ない段数で急峻な遮断特性を実現できる楕円関数型フィルタをデュアルモードフィルタで実現する方法について検討を行う。

(3) 設計したデュアルモードフィルタの作製と評価

設計したデュアルモードフィルタをサブファイア基板上に成膜された超伝導体にフォトリソグラフィとドライエッチングを用いて加工しフィルタパターンを作製する。作製したフィルタは冷凍機内に設置しネットワークアナライザで周波数特性を測定し、その後、耐電力特性を測定する。

(4) さらなる高耐電力化

デュアルモード共振器を SL 構造で作製することで小型が可能である。しかし、さらなる高耐電力化には新たな構造の提案が必要である。そこで、新規構造について検討する。

### 4. 研究成果

(1) ①SL 構造の低背化

図1にMSL構造とSL構造のモデルを示す。MSL構造は誘電体基板の下面にGNDを有し、上面に伝送線を有する構造である。実際の測定時にはシールド用のキャビティに設置され実装される。キャビティはフィルタの放射損を抑える役割を有する。キャビティ天井部はフィルタ特性に影響を与えるため、ある程度の距離を必要とする。ここではフィルタから天井までの最適値を15mmとした。一方、本研究で用いるSL構造は伝送線路が誘電体基板に囲まれており、基板上下面をGNDで覆われた構造となっている。実際にフィルタ実装時にもフィルタ全体の高さは変わらないため、基板の厚さしか必要としない。ここで、MSL構造とSL構造の実装時の高さを比較すると、MSL構造は本研究で使用する基板厚を0.5mmとすると全体で15.5mmとなる。SL構造の高さは基板の厚さ以外に必要としないことから本研究で使用する基板厚の2.0mmとなる。基板厚2.0mmのときSL構造はMSL構造の87%の低背化を実現できる。

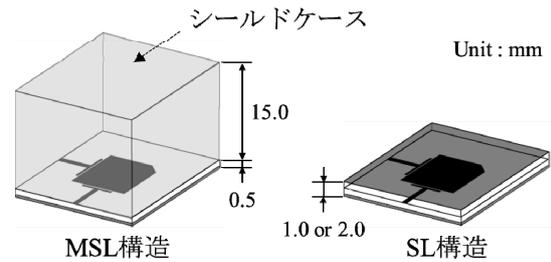
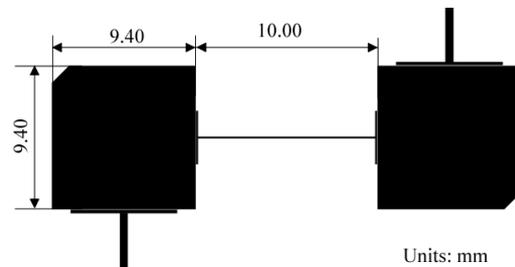


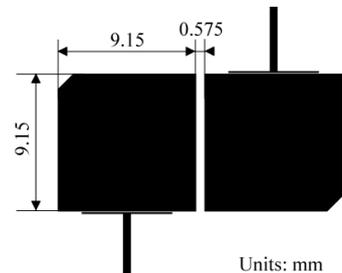
図1 フィルタ構造

表1 設計条件

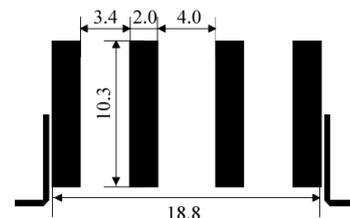
段数	4
中心周波数[GHz]	5
帯域幅[MHz]	90
リップル [dB]	0.1



(a) MSL4 段デュアルモードフィルタ



(b) SL4 段デュアルモードフィルタ



(c) MSL4 段コムラインフィルタ

図2 4 段デュアルモードフィルタ

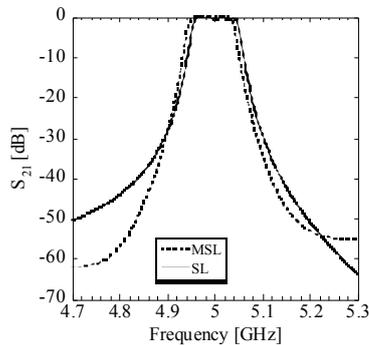


図3 4段デュアルモードフィルタ周波数特性

(1) ②SL 構造の小型化

表1の設計条件をもとに設計した4段MSLモードフィルタの形状を図2(a)に示し、4段SLデュアルモードフィルタの形状を図2(b)に示す。MSL4段デュアルモードフィルタは共振器間に不要な飛び越し結合があるためその影響を取り除くため共振器間距離を10mmとし、それによって必要なモード2とモード3の結合が得られないため導波路を用いて補っている。一方、SL構造は不要な飛び越し結合が無視できるほど小さいため、共振器間距離がわずか0.575mmでMSL構造と同じ設計条件のフィルタを実現できる。図2のフィルタの周波数特性を図3に示す。図3より、MSL及びSL構造ともに飛び越し結合の影響を抑えて設計条件を満たす良好なフィルタを設計できている。図2(a)(b)のサイズを比較すると、MSLフィルタの約60%のサイズでSLフィルタが構成できることが明らかとなった。また、8段デュアルモードフィルタの場合、横方向だけでなく、縦方向にも小型化が可能であることから、8段デュアルモードフィルタではMSL構造の約40%のサイズでSL構造8段デュアルモードフィルタを構成できると考えられる。さらに、図2(a)(b)と同等の設計条件で設計した共振器幅2mmのMSL4段コムラインフィルタ(図2(c))とSL4段デュアルモードフィルタを比較するとほぼ同等のサイズになることがわかる。よって、SL4段デュアルモードフィルタの共振器幅はMSL4段コムラインフィルタの4.5倍以上あり、格段に高い耐電力特性を有すると考えられる。以上より、SL構造を用いたデュアルモードフィルタは平面型フィルタで最も小型で最も高耐電力のフィルタを実現できる可能性をシミュレーションによって明らかにした。

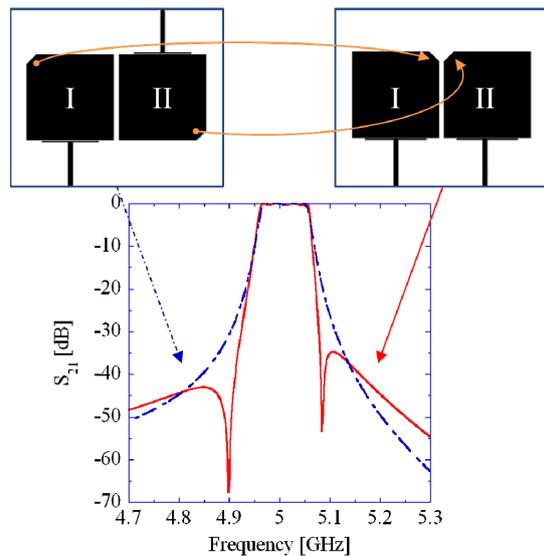


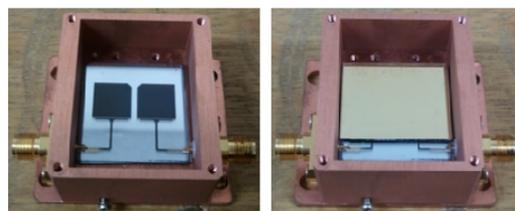
図4 SLフィルタの有極化

(2) デュアルモードフィルタの有極化

MSLデュアルモードフィルタではコーナカット部分を入れ替えることで、阻止域に一对の減衰極をもつ楕円関数フィルタが得られることが知られている。楕円関数フィルタはチェビシェフ関数フィルタと比較して、急峻な遮断特性を得ることができる。

そこで、SLデュアルモードフィルタでも同様にコーナカット部分を入れ替えることで、減衰極が得られるか検討した。図4に前節で設計したチェビシェフ関数フィルタと新たに設計した楕円関数フィルタのパターンと周波数特性を示す。チェビシェフ関数フィルタの共振器Iを時計回りに90°、共振器IIを180°回転させることで阻止域に一对の減衰極を得ることができ、容易に楕円関数フィルタが実現できることがわかる。

ここまでで、デュアルモードフィルタをSL構造で設計することで、小型で高い周波数選択性をもつフィルタが設計できることを電磁界シミュレーションにより明らかにした。



(a) 下部基板のみ (b) 上下部基板

図5 フィルタ実装時

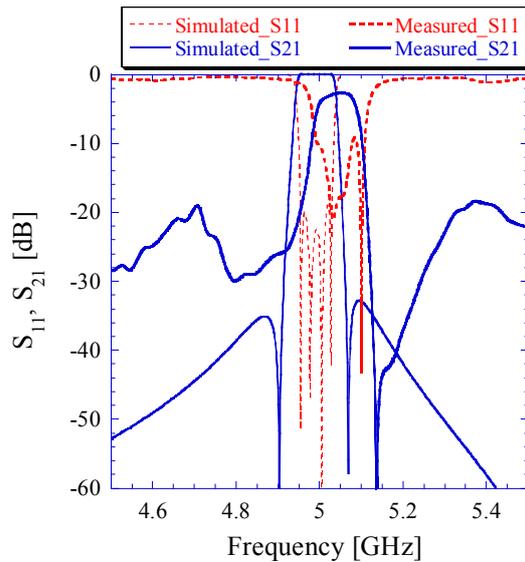


図6 4段SLフィルタの周波数特性

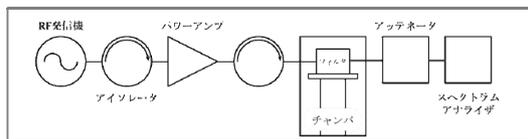


図7 測定系

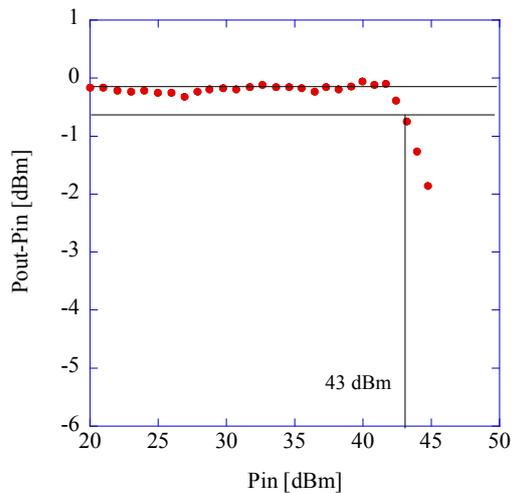


図8 耐電力測定結果

### (3) 設計したデュアルモードフィルタの作製と評価

図5にフィルタ実装時の様子を示す. 入出力は SMA コネクタピンとストリップラインと接触をとるために, 共振器上部の基板を下部の基板より小さくした. つまり, 入出力は MSL 構造で給電し, 途中から SL 構造となる. 図6に周波数特性のシミュレーション結果と測定結果を示す. 測定結果は中心周波数 5.044 GHz, 3 dB 帯域幅 102 MHz のバンドパス特性

が得られた. 挿入損失は約 2.6 dB でありシミュレーション結果と比較するとかなり大きな値となった. この原因は GND 面に金を用いたためだと考えられる. また, 帯域外の遮断特性がかなり悪い結果となった. これは, 入出力部分を MSL 構造から SL 構造へ変換する際, 整合を取っていないためだと考えられる. 今後, 整合方法について十分に検討する必要がある.

次に図7に示す, 耐電力特性の測定系を用いて耐電力特性の評価を行った. 図8に測定した耐電力特性を示す. 測定した周波数はフィルタの最小挿入損失が得られた 5.045 GHz を選択し, 35 K まで冷却して行った. 入力電力( $P_{in}$ )と線形出力電力( $P_{out}-P_{in}$ )の差が-0.5 dBm となる電力をフィルタの耐電力と定義し, 評価した. これより, 試作したフィルタの耐電力は約 43 dBm であり, ワットに換算すると約 20 W となった. 文献[A]の4段 MSL フィルタの耐電力は 2.69 W と報告されており, 同様の 25 mm 基板を用いているのにも関わらず, 今回作製したフィルタは約 7.4 倍もの耐電力が得られている.

以上から, 4段 SL デュアルモードフィルタは小型かつ高耐電力を同時に実現できるフィルタであることを実験的に明らかにした. 今後は挿入損失の改善や帯域外遮断特性の改善を行う.

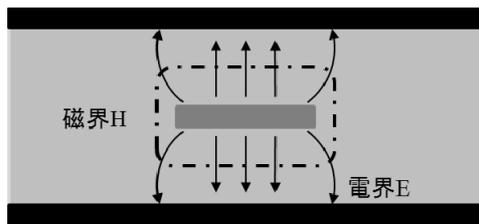
[A] Y. Tanaka, T. Tatsunokuchi, M. Akiya, A. Saiyo, S. Ohsima, 2011 Korea-Japan Microwave Conference, pp. 78-81, 2011.

### (4) さらなる高耐電力化

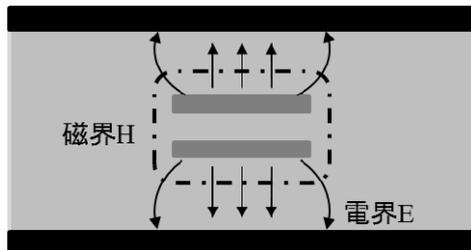
ここまで, SL 構造を用いたデュアルモードフィルタは小型で高耐電力を実現できることを明らかにした. しかし, デュアルモード共振器を用いてこれ以上の高耐電力を実現するのは難しい. そこで, 新たな構造として, デュアルモード共振器を垂直方向に2枚重ねるダブルストリップ共振器構造を提案した.

図9に従来の SL 構造を用いたシングルストリップ共振器(SSR)と提案するダブルストリップ共振器(DSR)の構造を示す. ダブルストリップ共振器とは図9(b)に示すように積層方向に共振器を重ねた構造である. 積層化した上下の共振器それぞれに同じ方向の電流が流れるようにすることで共振器間の磁界が打ち消し合い, 見かけ上膜厚が厚くなることで, 共振器端部に集中する電流が緩和され耐電力の向上が期待できる.

今後, DSR 構造について研究を重ね, 実用化を目指してさらなる高耐電力特性を有する超伝導送信フィルタの開発を行っていく.



(a)SSR



(b)DSR

図9 フィルタ構造

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] N. Sekiya, H. Matsuura, S. Kakio, S. Ohshima, "Use of additional patch conductor to realize HTS dual-mode filter with double-strip-resonator," Physics Procedia to be published 2013 査読有
- [2] N. Sekiya, H. Matsuura, M. Akiya, Y. Tanaka, S. Ohshima, "Novel HTS double-strip resonator for high-power application," IEEE Trans. Appl. Supercond. to be published 2013 査読有
- [3] T. Horiuchi, N. Sekiya, S. Kakio, S. Ohshima, "Improvement of power handling capability and out-of-band rejection for HTS stripline filter with shuttle-shape resonators," Physics Procedia, vol. 27, pp. 324-327, 2012. 査読有
- [4] N. Imai, N. Sekiya, S. Kakio, S. Ohshima, "Use of double-layer coupling circuit and additional patch conductors to improve power handling capability of HTS transmit filter," Physics Procedia, vol. 27, pp. 332-335, 2012. 査読有
- [5] N. Sekiya, M. Nagao, S. Kakio, A. Saito, S. Ohshima, "Effect of coupling state on power handling capability of HTS transmit filters with stripline structure," Physics Procedia, vol. 27, pp. 328-331, 2012. 査読有

- [6] N. Sekiya, K. Yamamoto, S. Kakio, A. Saito, S. Ohshima, "Power handling capability of transmit filters using stripline structure," Physica C, vol. 471 no. 21-22, pp. 1217-1220, 2011. 査読有
- [7] N. Sekiya, N. Imai, S. Kakio, A. Saito, S. Ohshima, "Miniaturized transmit dual-mode HTS patch filter with stripline structure," Physica C, vol. 471 no. 21-22, pp. 1221-1223, 2011. 査読有
- [8] N. Sekiya, K. Yamamoto, S. Kakio, A. Saito, S. Ohshima, "Miniaturized sharp-cutoff transmit HTS filter with a stripline structure," Physica C, vol. 471 no. 21-22, pp. 1214-1216, 2011. 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- [1] 松浦広和, 關谷尚人, 秋谷守紀, 田中佑斗, 大嶋重利  
"ダブルストリップ共振器を用いた楕円関数型超伝導デュアルモードハイパワーフィルタの検討"  
信学技報, Vol. 12, No. 355, pp. 43-48, 2012. 12/13~14 (山梨大学)
- [2] 堀内友徳, 關谷尚人, 秋谷守紀, 田中佑斗, 大嶋重利  
"ストリップライン構造を用いた送信用超伝導デュアルモードフィルタの作製と評価"  
電子情報通信学会ソサエティ大会, C-2-60, 2012. 9/13 (富山大学)
- [3] 松浦広和, 關谷尚人, 堀内友徳, 秋谷守紀, 田中佑斗, 大嶋重利  
"ダブルストリップ共振器を用いた送信用超伝導デュアルモードフィルタの作成と評価"  
電子情報通信学会ソサエティ大会, C-2-61, 2012. 9/13 (富山大学)
- [4] 松浦広和, 關谷尚人, 堀内友徳, 秋谷守紀, 田中佑斗, 大嶋重利  
"ダブルストリップ共振器を用いた送信用超伝導ストリップラインフィルタの検討"  
信学技報, SCE2012-4, MW2012-4 (2012-4), pp. 19-23, 2012. 4/20 (機会振興会館)
- [5] 關谷尚人, 龍口 司, 小林 巨卓, 秋谷 守紀, 齊藤 敦, 大嶋 重利,  
"ストリップライン構造を用いた小型超伝導送信フィルタの耐電力特性"  
第72回応用物理学術講演会, 31p-W-4, 2011. 8/31 (山形大学)
- [6] 關谷尚人, 堀内友徳, 山本敬介, 齊藤

- 敦, 大嶋重利,  
“小型超伝導送信用ストリップライン  
フィルタの耐電力特性”  
電子情報通信学会ソサエティ大会,  
C-2-39, 2011. 9/13 (北海道大学)
- [7] **關谷尚人**, 今井望, 長尾雅則, 齊藤敦,  
大嶋重利,  
“ストリップライン構造を用いた送信  
用超伝導デュアルモードパッチフィル  
タの小型・低背化”  
信学技報, SCE 2011-3, pp. 11-16,  
2011. 7/13 (機会振興会館)
- [8] **關谷尚人**, 山本敬介, 堀内友徳, 齊藤  
敦, 大嶋重利,  
“送信用超伝導ストリップラインフィ  
ルタの耐電力特性に及ぼす共振器間結  
合状態による影響”  
信学技報, SCE 2011-4, pp. 17-22,  
2011. 7/13 (機会振興会館)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：ダブルストリップ共振器  
発明者：關谷尚人  
権利者：日本製鋼所  
種類：特許  
番号：2012-174911  
出願年月日：2012年8月7日  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等  
山梨大学 研究者総覧  
[http://erdb.yamanashi.ac.jp/rdb/A\\_DisInfo.Scholar?ID=3ED79D6805215830](http://erdb.yamanashi.ac.jp/rdb/A_DisInfo.Scholar?ID=3ED79D6805215830)

6. 研究組織

(1)研究代表者

關谷 尚人 (SEKIYA NAOTO)  
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・助教  
研究者番号：80432160

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし