

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 30 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560317

研究課題名（和文） 3次元超伝導マトリックス線路の開発とそのフィルタへの応用

研究課題名（英文） Examination of 3D-matrix superconducting micro-strip lines and its application to filters.

 研究代表者 大嶋 重利 (OHSHIMA SHIGETOSHI)  
 山形大学大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号：40124557

## 研究成果の概要（和文）：

マイクロストリップ線路で作製された超伝導フィルタの耐電力は小さく、送信用フィルタに応用することができない。フィルタの耐電力は、マイクロストリップ線路端に流れる集中電流の大きさで決まる。従って、フィルタの耐電力を大きくするには、その集中電流を低減することが重要である。本プロジェクトは、3次元マトリックス線路フィルタの耐電力を測定し、その線路がフィルタの耐電力向上に有効かどうかを検討するものである。3次元マトリックス線路フィルタは、NbN/AlN/NbNの3層膜をドライエッチング法により加工し作製した。ドライエッチングで加工するとき、マイクロストリップ線路の長手方向に細かい溝を入れ、3次元マトリックス線路を形成した。そのフィルタの耐電力を測定した結果、通常のマイクロストリップ線路フィルタの耐電力よりも3.1dB向上することを見出した。これは、3次元マトリックス線路端の集中電流が軽減したことを意味し、3次元マトリックス線路は超伝導フィルタの耐電力を向上させるのに有効であることを明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

The power handling capability of superconducting filters made by micro-strip lines is small, therefore, the filters cannot be used to the transmitting filters. The limit of power handling capability of filters is caused by the current concentration at the outer edge of a micro-strip line. Therefore, it is very important to reduce the current concentration on the outer edge of a micro-strip line. In this project, we examined the improvement of power handling capability of the filters made by the 3D-matrix micro-strip lines. The 3D-matrix micro-strip line filters were made by following process. First, we made a three-layered film, NbN-AlN-NbN by reactive dc magnetron sputtering. Then the filters were patterned using a conventional photolithography technique. The micro-strip lines were etched by dry etching to divide into the narrow lines. We measured a power handling capability of the filters, and found that the value increased by about 3.1 dB compared with that of the conventional micro-strip line filter. This means that current flowing along the outer edge of the 3D-matrix micro-strip line(3D-SMSL) is less concentrated than in the conventional micro-strip line. The 3D-SMSL is useful to increase a power handling capability of a filter.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：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

超伝導フィルタは、理想的なフィルタ特性（低挿入損失、大きな帯域外社団特性、高い周波数選択性など）を有しており、既に米国や中国で、携帯電話の基地局用受信バンドパスフィルタシステムとして実用化されている。しかしながら、送信用バンドパスフィルタシステムには残念ながら実用化されていない。その大きな原因の一つに、耐電力が小さいことが挙げられている。実用化するためには、超伝導フィルタの耐電力を10W以上にする必要があるが、現在では未だ1W以下である。その原因は、フィルタを構成するマイクロストリップの耐電力が小さいからである。マイクロストリップ線路の耐電力を決めるのは、線路端に流れる集中電流の大きさである。この集中電流が材料の臨界電流を超えると、フィルタ特性が急に劣化し、使用できなくなる。すなわち、線路端お集中電流を低減することが超伝導フィルタの耐電力を上げる起因となる。今までいくつかの手法が提案されているが、その手法では未だ実用できるフィルタまで、耐電力が向上していない。

### 2. 研究の目的

本研究は、高耐電力超伝導フィルタを試作するために、3次元マトリックス線路を提案し、その有効性を検証するものである。超伝導マイクロストリップ線路（SMSL）の耐電力は、線路端に流れる集中電流値の大きさに制約される。これを低減できれば、耐電力の大きなマイクロ波デバイス（フィルタやアンテナなど）が設計できる。我々は、線路をミクロン幅の溝で分割する新しい線路を提案し、そのSMSLの耐電力向上について、電磁界シミュレーションと実験により明らかにしてきた。更に、SMSLの耐電力を向上させるのには、3次元的に線路を分割する形状が適している。我々は、新たに3次元超伝導マトリックス線路（3D-SMSL）を提案した。その耐電力向上をシミュレーション、実験両方で明らかにすることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

超伝導薄膜を用いた3次元マトリックス線路の作製法を確立し、その線路を用いたバンドパスフィルタを試作する。試作した超伝導フィルタの耐電力を評価し、3次元マトリックス線路が超伝導フィルタの耐電力向上に有効であることを実証する為、次のような実験を実施し、成果を上げた。

### (1) 平成22年度

- ① レーザ蒸着法によるYBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCOヘテロエピタキシャル成長技術の検討。
- ② YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCOヘテロエピタキシャル成長膜の超伝導特性の評価（超伝導臨界温度や表面抵抗などの測定）
- ③ 3次元マトリックス線路の有効性のシミュレーション評価。

### (2) 平成23年度

- ① YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO/CeO<sub>2</sub>/・・・ヘテロ多層膜の作製と評価、並行して、NbN/AlN/NbNの積層膜を作製し、その評価。X線回折による結晶成長評価や超伝導臨界温度や表面抵抗などの測定
- ② 超伝導薄膜の微細加工技術の検討。

### (3) 平成24年度

- ① NbN/AlN/NbNの3層ヘテロ多層膜の作製と評価（X線回折による構造評価と超伝導特性評価）
- ② 3層ヘテロエピNbN/AlN/NbN積層膜の微細加工技術の確立。3D-SMSLの作製技術の確立
- ③ 3D-SMSLを用いたバンドパスフィルタの試作と、その耐電力の評価。（電磁界解析ソフトによるフィルタパターンの検討。ドライエッチングによるフィルタ形状の整形。フィルタの耐電力特性評価）

### 4. 研究成果

始めは高温超伝導薄膜の3D-SMSLを作製し、その耐電力の有効性を評価することにした。サファイア基板上にYBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCOのヘテロエピタキシャル成長条件を検討し、YBCO及びCeO<sub>2</sub>薄膜は単結晶的に成長することを明らか

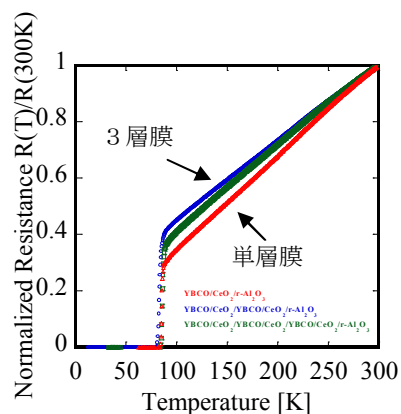


図1 YBCO 単層、2層、3層膜の Tc

にした。その多層ヘテロエピタキシャルの臨界温度( $T_c$ )を測定した結果、 $T_c > 85K$ 以上であることが分かり、3D-SMSLに適用できる特性を有していることがわかった。図1に単層のYBCO, 2層膜YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO, 3層膜(YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO/CeO<sub>2</sub>)の臨界温度( $T_c$ )を示す。

また、図2で示されるような、通常のSMSLと3D-SMSLの線路端に流れる集中電流を電磁界解析シミュレータ(SONNET-EM)により評価した。その結果、3D-SMSLの集中電流の方が小さいことが分かった。これは、3D-SMSLの方が耐電力を大きくできることを意味している。

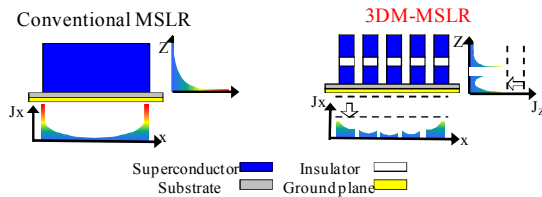


図2 通常のマイクロストリップ線路と、3次元マトリックス線路の模式図

次に、実際に3D-SMSL作製技術の確立を検討した。種々の条件で、ECRドライエッチング法を用いてYBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO薄膜の微細加工を実施した。しかし上部YBCO薄膜の微細加工は綺麗にできるが、層間のCeO<sub>2</sub>薄膜のエッチングができないことが分かった。YBCO/CeO<sub>2</sub>/YBCO薄膜の3D-SMSLの作製はECR法では無理であることが分かった。また、その加工過程において、ECRエッチングでYBCO薄膜を加工する場合、YBCO薄膜からの酸素離脱を防ぐのにはエッチングを間欠的に行う間欠ECRドライエッチング法が有効であることを見出した。

3D-SMSLのための新たな超伝導層・絶縁層・超伝導想の積層膜の探索を行った結果、NbN/AlN/NbNの積層膜が有効であることが分かり、その薄膜の3D-SMSLの作製を検討した。マグネトロンスパッタリング法により、NbN/AlN/NbN積層膜を作製し、その構造、超伝導特性を評価した結果、3D-SMSLに使用できることがわかった。さらに、ECRドライエッチングにより、NbN/AlN/NbN積層膜の微細加工を検討した結果、良好な超伝導特性を有する

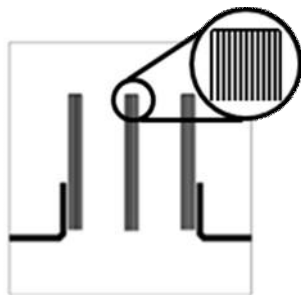


図3 3D-SMSLを用いたフィルタの模式図

3D-SMSLの作製に成功した。その線路を用い超伝導バンドパスフィルタを試作し耐電力を評価した。図3に設計した3段バンドパスフィルタの模式図を示す。幅0.5mmの3層のマイクロストリップ線路を9分割し、3D-SMSLに加工している。また比較のために、スリットの入っていない通常のマイクロストリップ線路フィルタも設計した。

図4に通常のSMSLフィルタと3D-SMSLフィルタの耐電力を示す。横軸は入力電力、縦軸は(入力電力-出力電力)を表している。入力電力に対して(入力電力-出力電力)の値が-0.5dBのところ

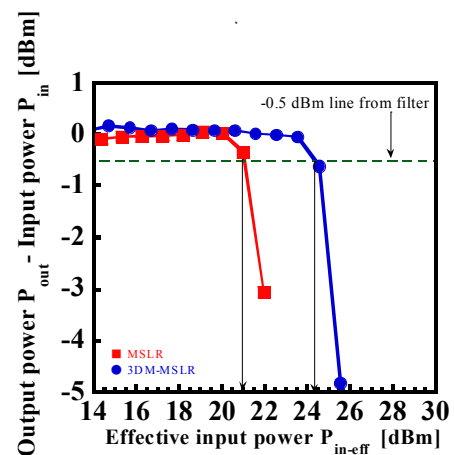


図4 3D-SMSLフィルタ及びSMSLフィルタの耐電力特性

を耐電力と定義すると、通常のSMSLフィルタ及び3D-SMSLフィルタの耐電力はそれぞれ、21.1dBm, 24.4dBmとなり、3D-SMSLフィルタの方が3.3dB耐電力が大きいことがわかった。また3D-SMSLは同じ形状の積層膜フィルタ、分割型フィルタよりも耐電力が大きいこともわかった。すなわち、3D-SMSLは積層膜、分割線路よりも線路端の集中電流を小さくすることができる。

以上のように、本プロジェクトで提案した「3次元マトリックス線路(3D-SMSL)は超伝導フィルタの耐電力向上に有効である」ということを実験的に明らかにすることができた。しかし、実験で用いたNbN超伝導薄膜の $T_c$ は約14Kであり耐電力の測定は、5Kで行った。従って、NbN薄膜の3D-SMSLフィルタの耐電力は24.4dBmと1W以下である。YBCO薄膜の3D-SMSLフィルタが実現できれば、耐電力10W以上となることが予想される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

(1) S.Ohshima, M.Endo, K.Tanaka, K.Nakagawa, T.Honma, S.Sato, S.Takahashi, Y.Tanaka, A.Saito

"Improved Power Handling Capability of Superconducting Microstrip Lines for Microwave Devices" Physics Procedia, 査読有 **36**, (2012) 429-434. DOI:10.1016/j.phpro.2012.06.258

(2) N.Sekiya, K. Yamamoto, S.Kakio, A.Saito, S.Ohshima, "Effect of coupling state on power handling capability of HTS transmit filters with stripline structure" Physics Procedia, 査読有 **27** (2012) 328-331.

DOI:10.1016/j.phpro.2012.03.477.

(3) 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, 査読有 **27** (2012) 332-335.

DOI:10.1016/j.phpro.2012.03.478..

(4) Y.Endo, S. Ono, M.Uno, T.Saito, K.Nakajima, S. Ohshima, "Improvement in Power Handling Capability of Superconducting Filters Using Multi-Layered Microstrip Line Resonators" IEEE Trans. Superconductivity **121**, (2011) 559-562.

DOI:10.1109/TASC.2010.2089772, 査読有

(5) S.Ohshima, M.Uno, Y.Endo, S.Takeuchi, S.Ono, A.Saito, N.Sekiya, " Comparison of power handling capabilities of sliced and conventional microstrip line filters" 234 (2010) 37-42.

DOI:10.1088/1742-6596/234/4/042025. 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) S. Takahashi, S.Oikawa, A.Saito, S. Ohshima, " Fabrication and Evaluation of Multi-Layered YBCO/CeO<sub>2</sub> Films" International Sym. HTSHFF-2012 (2012.5.29, 宮城県松島町)

(2) Y.Tanaka, T.Tatsunokuchi, M.Akiya, A.Saito, S.Ohshima, "Improved Power Handling Capability of 4-pole HTS Filters by Expanding the Line Width of Second Resonator" ASC-2012 (2012.10.10, Boston, United States of America) 3EPE-05

(3) 高橋峻平、秋谷守紀、齊藤敦、大嶋重利 「3次元マトリックス線路を用いた超伝導フィルタの高耐電力化」第 86 回秋季低温工学・超伝導学会学術講演会(2012.11.10, 岩手県盛岡市) 3D-a06.

(4) 大嶋重利 「高温超伝導マイクロ波デバイスの実用状況」電情通学会総合大会 (2011.3.14, 東京都) CT-1-2.

(5) 高橋峻平 遠藤之正 武田和幸 六鎗潤 齊藤敦 大嶋重利 「積層 YBCO/CeO<sub>2</sub> 薄膜の作製と評価」第 72 回応物学術講演会 (2011.8.30, 山形県山形市) 31p-ZT-4.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] (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・教授

研究者番号：40124557

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

