

氏 名	劉 海文
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第229号
学位授与年月日	平成28年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Novel Compact High-Temperature Superconductor Multi-Band Bandpass Filters (小型高温超電導マルチバンド帯域通過フィルタに関する研究)
論文審査委員	委員長 教 授 馬 哲旺 委 員 教 授 明連 広昭 委 員 准 教 授 大平 昌敬 委 員 准 教 授 木村 雄一

論文の内容の要旨

With the increasing development of multi-service wireless communication networks, microwave components and systems that support various modern communication standards have become a widespread tendency. Therefore, as a key passive component in the radio-frequency (RF) front-end, multi-band bandpass filter (BPF) designed with compact size, high performance and low loss is in great demand for enhancing the system functionality.

Being an essential part of a multi-band operation system, the multi-band BPF has achieved great attention in recent years. Basically, the reported multi-band design methods can be classified into three typical categories. The first approach is utilizing the multi-layered structure to achieve the multi-band response. However, the aforementioned multi-band BPFs require multiple types of resonators and multi-layered fabrication technology, which increase fabrication difficulty and cost. The second approach is to connect two types of dual-band BPFs in parallel, such as symmetric stepped impedance resonators (SIRs), and fork-type resonators. Each set of resonators produce two passbands, and four passbands are therefore achieved by two sets of these resonators. But, the circuits always occupy a relatively large size. The third approach is adopting coupled multi-mode resonators for multi-band BPFs. Multiple resonant modes are excited at desired frequencies using one multi-mode resonator, thus, a compact filter configuration can be obtained. However, their higher-order passbands have noticeable insertion losses of more than 1 dB.

Recently, high-temperature superconducting (HTS) materials become more and more attractive in designing the RF/microwave filters because of their lower loss and excellent performance. Generally, the current study on HTS filters focuses mainly on the single-band BPFs, and only few attempts have so far been made on multi-band HTS BPF. For example, dual-/triple-band HTS filters were designed by using multi-spiral resonators. In addition, dual-band HTS filters have been realized by using quarter-wavelength SIRs, embedded split ring resonators, or multi-stubs loaded resonators. It is noted that some complex synthesis algorithms are required and coupling matrix need to be extracted for achieving a good performance. So, they take more effort to fulfill design parameters.

This dissertation is organized as follows.

In Chapter 1, the background and motivation of this study are described. The current research status of HTS microwave filters is reviewed, and the composition of this dissertation is explained.

In Chapter 2, the basic principles of microwave HTS filter design are given. This chapter also introduces HTS materials and processing. Basic concepts and theories of filters in this chapter provide an effective method for high-performance miniaturized multi-band HTS microwave bandpass filter design. In this research, HTS thin film YBCO deposited on a 0.5-mm-thick MgO substrate is utilized to fabricate the filter circuits.

In Chapter 3, multi-band HTS filters based on split ring resonators (SRR) are discussed. A compact triple-band HTS YBa₂Cu₃O_y microstrip BPF using a multimode split ring resonator (SRR) is presented. Also, its properties and equivalent circuit model are investigated by the even- and odd-mode analysis. Furthermore, a dual-band superconducting metamaterial structure with improved performance based on the proposed multimode SRR is introduced in this chapter, which is constructed by two dual-mode SRRs and a high-impedance transmission line component.

In Chapter 4, multi-band HTS filters based on stub-loaded resonators (SLR) are proposed. A multiple mode resonator with loaded open and shorted stubs is introduced and a compact triple-band HTS BPF using multimode stub-loaded resonator is proposed. To sharpen the passband skirt, a source-load coupling configuration with a non-resonant node is arranged to produce several extra transmission zeros for realizing high-selectivity performance. Moreover, a simple sextuple-mode resonator loaded by open- and short-ended stubs is proposed. A multi-band BPF designed using the proposed resonator is explained and the desired passbands can be conveniently allocated by properly choosing the dimension parameters of the stub-loaded resonator. To sharpen the passband skirt of the filter, a source-load coupling configuration with interdigital structure is arranged to produce multiple transmission zeros. Then, a multipath coupling diagram is constructed and the relative phase shifts of each path are studied to explain the responses of the triple-band filter. A grounding technique of the shorted-end stub is realized by connecting with the packaging metal walls instead of via-holes in the substrate. In consideration of the inaccuracy in HTS fabricating and packaging, an optimization scheme is proposed.

In Chapter 5, multi-band HTS filters based on square ring loaded resonators (SRLR) are designed. A compact dual-band HTS BPF and a quad-band HTS BPF using quadruple-mode square ring loaded resonators (SRLR) are introduced respectively. The even- and odd-mode method is applied to investigate the equivalent circuit of the proposed quadruple-mode SRLR so that the design graphs for the relationship of the electrical length parameters and the resonance performances are obtained. Meanwhile, multi-transmission zeros are created due to the different propagation paths of the square ring structure. Also, signal-interference theory is adopted to explain the generating mechanism of the transmission zeros. The quadruple-mode SRLRs are coupled with a pseudo-interdigital coupling structure for achieving the desired coupling strength conveniently, which also miniaturize the circuit size.

In Chapter 6, conclusions of this dissertation are summarized. Recommendations for future work on the challenging issues of advanced microwave multi-band HTS filters for wireless communication systems are also addressed.

論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、平成 28 年 2 月 22 日に論文発表会を開催し、論文発表、質疑応答および論文内容の審査を行った。以下に審査結果を要約する。

近年様々な無線通信技術およびサービスは急速に発達し、マルチモード・マルチバンドに対応した無線通信システムが求められている。各種の通信機器に欠かすことのできない重要なデバイスとして、マルチバンドに対応できる小型高性能なマイクロ波帯域通過フィルタ (BPF) の研究開発は注目を浴びている。

これまでに報告されたマルチバンドマイクロ波フィルタは 3 つの種類に大別されている。第 1 種は多層構造を利用したマルチバンドフィルタである。しかし、多層構造は製作が困難でありコストも高いといった制約を受けている。第 2 種は異なる通過域を持つ複数の BPF を組み合わせることにより、マルチバンドを実現している。しかし、このような構成では回路サイズが大きくなり、また入出力におけるインピーダンス整合回路が必要となってしまう。第 3 種はマルチモード共振器、例えば、ステップインピーダンス共振器 (SIR) の基本モードと高次モードを利用して設計したマルチバンド BPF である。この方法では、マルチバンドの中心周波数は別々に容易に制御できるが、第 2 以降の通過域では挿入損失が著しく大きくなってしまいう等の問題点がある。

一方、ここ数年高温超電導 (HTS) 材料の低損失特性を利用して研究開発が進められている HTS マイクロ波回路は将来の有望な無線通信技術の 1 つとして注目されている。しかし、これまでに報告された HTS マイクロ波フィルタのほとんどはシングルバンドの BPF であった。そこで、申請者は HTS を利用したマイクロ波マルチバンド BPF の研究開発に取り組み、種々の新しい共振器およびフィルタの構造と設計法を提案し、優れた特性を持つマイクロ波マルチバンド BPF を実現した。本論文の構成は以下の通りである。

論文は全 6 章から成り、第 1 章では、研究の背景、現状と目的、および論文の構成を述べた。

第 2 章では、マイクロ波フィルタの設計手法、高温超電導 YBCO 薄膜と低損失 MgO 基板材料等の電気特性、および HTS マイクロ波フィルタの製作工程を記述した。

第 3 章では、偶 - 奇モード理論に基づき、マイクロストリップスプリットリング共振器 (SRR) に対するモード解析を行ったうえで、YBCO 薄膜スプリットリング共振器を用いたデュアルバンド BPF とトリプルバンド BPF をそれぞれ設計、試作、測定し、低損失などの所望のフィルタ特性を得た。

第 4 章では、HTS マイクロストリップ半波長共振器に複数の開放と短絡スタブを付け加えることにより、3 モード共振器を構成し、トリプルバンド BPF を提案した。この 3 モード共振器のストリップ線路とスタブをスパイラル状に折り曲げることにより、フィルタのサイズをごく小さくすることができた。また、フィルタの入出力線路間にインタデジタル結合を巧みに導入することにより、フィルタの阻止域に複数の減衰極を発生させ、急峻なフィルタ周波数特性を実現した。さらに、ステップインピーダンススタブを付け加えることにより、4 モード共振器とクアドバンド BPF の提案と設計を行った。

第 5 章では、HTS マイクロストリップ方形リングを装荷した共振器に対し、偶 - 奇モード解析を行い、共振器の基本共振モードと高次共振モードの 2 次元設計グラフを得た。この種の共振器を用いて、デュアルバンド BPF とクアドバンド BPF をそれぞれ設計した。また、信号干渉の考えから、フィルタの減衰極の発生メカニズムを明らかにした。設計、試作、測定したデュアルバンド BPF とクアドバンド BPF は所望の 2 つまたは 4 つの通過域と低損失等の優れた周波数特性を示した。

第 6 章では、本研究から得られた成果と結論をまとめ、今後の研究動向と課題を展望した。

本論文の研究成果は将来無線通信システムへの応用が大きく期待されている高温超電導マイクロ波マルチバンドフィルタに関するもので、理論と実用上の貢献度が極めて高い独創的な研究成果である。なお、本論文の主な内容は、すでに Applied Physics Letters, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, IEEE Microwave and Wireless Component Letters などの該当分野トップレベルの国際誌を含め、8 編査読付きのジャーナル論文に掲載されている。

以上より、本論文は博士（工学）の学位授与に十分値するものであると判定した。