

高温超伝導フィルタは低い挿入損失と高い周波数選択度を有することから、移動通信基地局受信装置の高度化に有効である。超伝導薄膜を形成するコストが低廉であり、製作プロセスが容易であるコプレーナ線路型高温超伝導フィルタに着目し、小型化回路構成法の研究と5GHz帯での実験検証を行った。なお、本研究は埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科 小林研究室（小林 禧夫教授）との共同研究により実施した。

1. まえがき

液体窒素温度（77K）程度の臨界温度を有する高温超伝導材料を用いて構成したフィルタ（高温超伝導フィルタ）は、マイクロ波帯においても低損失にて多段化できる。このため、通過帯域における挿入損失を極めて低く抑えるとともに、通過帯域端での急峻な遮断特性および遮断帯域における大きな減衰量を同時に達成することが可能である。これらは移動通信基地局受信装置の受信感度および周波数選択度の改善に極めて有効であることから、国内外の大学、研究機関や企業において高温超伝導フィルタの研究開発が行われている[1][2]。

著者らは、超伝導薄膜形成コストが低廉かつ製作プロセスが容易であることから、コプレーナ線路（CPW：CoPlanar Waveguide）構造に着目したマイクロ波帯高温超伝導フィルタを検討している[3]。具体的には、CPW1/4波長共振器を幅5.4mm、長さ30.5mmの誘電体基板上に直列配置したことで、ほぼフィルタ設計値どおりの特性を無調整にて達成している。しかし、このフィルタを多段化する場合、1段の段数増加に伴ってその共振器長分の約6.4mmだけ誘電体基板長を長くとる必要があるという問題があった。本稿では、CPW1/4波長共振器を並列、かつインターディジタル形に配置することで段数増加に伴う基板面積の増加を抑えたフィルタの設計・製作、評価結果について述べる[4][5]。

フィルタの設計仕様を表1に示す。フィルタは等価回路によるシミュレーションと電磁界シミュレータによるシミュレーションを組み合わせで設計される[4]。フィルタ構造および寸法を図1に、シミュレータによるフィルタ特性の計算結果を表2に示す。

フィルタは表1に示す誘電体基板および高温超伝導材料を用い、表3に示す製作工程の①から③および⑥から⑧の

	仕様
線路構造	コプレーナ
伝達関数	チェビシェフ
共振器長	$\lambda/4$
段数	5
誘電体基板材料	MgO
厚さ	0.5mm
比誘電率	9.68@77K
誘電正接	$< 10^{-7}$
高温超伝導材料	Y-Ba-Cu-O
厚さ	0.5 μ m
臨界温度	86.5K
中心周波数	5GHz
等リップル帯域幅	160MHz
帯域内リップル	0.01dB

Y-Ba-Cu-O：酸化物超伝導材料の1つ。YBCO、Y-123系などとも表される。

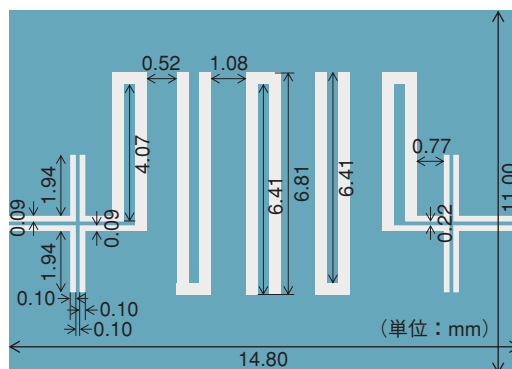


図1 フィルタ構造および主な寸法

表2 フィルタ特性の設計結果

	等価回路	計算値 (電磁界シミュレータ)
帯域外減衰量 (dB/10MHz)		
低周波側	4.30	2.83
高周波側	3.75	4.68
3dB 帯域幅		
中心周波数 (GHz)	5.004	4.996
帯域幅 (MHz)	207	204

表3 フィルタの製作工程

No.	工程
①	感光剤塗布
②	露光 (回路パターンを転写)
③	現像
④	イオンミリング
⑤	洗浄 (感光剤剥離)
⑥	感光剤塗布
⑦	露光 (電極パターンを転写)
⑧	現像
⑨	電極材料の蒸着
⑩	リフトオフ
⑪	切断

リフトオフ：有機溶剤に浸し、感光剤の残っていた部分の金属を剥離すること。

フォトリソグラフィ^{*1}と④のイオンミリング^{*2}の工程を経て製作した[6]。完成後のインターディジタル形フィルタを写真1に示す。外形寸法は金属筐体に収める際の利便性を考慮して、導波管内空間よりもわずかに大きくし、幅11.6mm、長さ15.4mmとした。また、製作したフィルタ構造の寸法誤差は、設計寸法に対して $2\mu\text{m}$ 以内に収まっており、今回のフィルタ構造に対して十分な加工精度を確保している。

3. フィルタの特性と評価

3.1 測定環境

フィルタの周波数特性測定に用いたケースの断面構造を図2に示す。厚さ0.5mmのMgO基板の上方および下方にそれぞれ4.5mmおよび3.0mmの空間を設けている。ケースの材料は銅 (C1020) であり、その表面全体には金メッキを施している。測定にはコプレーナプローブを用いた。プローブ先端で校正をとり、フィルタ両端の金属パッド部に直接プローブを当てることにより測定している。

3.2 周波数特性の評価

製作したフィルタの温度60Kにおける周波数特性の測定値を電磁界シミュレータによる計算値とともに図3(a),(b)に示す。また、その主な特性を数値的に表して比較したも

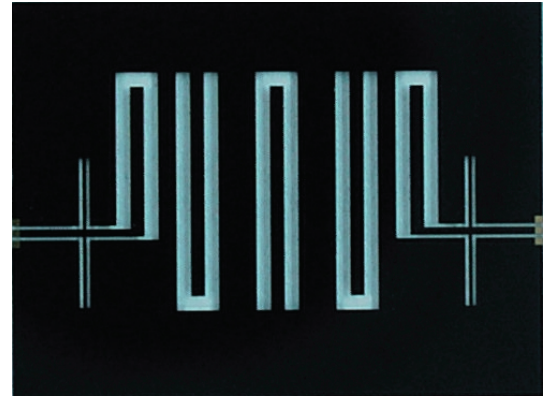


写真1 インターディジタル形フィルタ

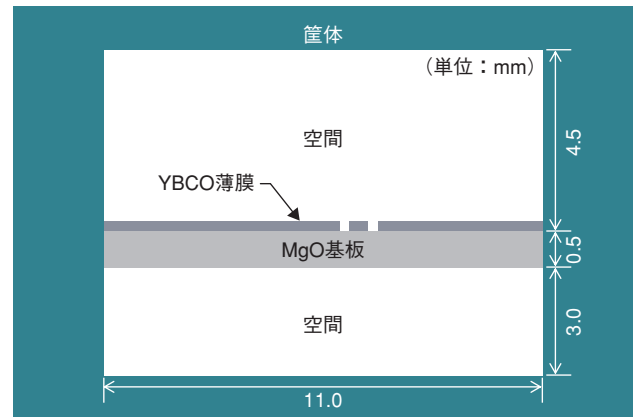


図2 フィルタ測定時のケースの断面構造

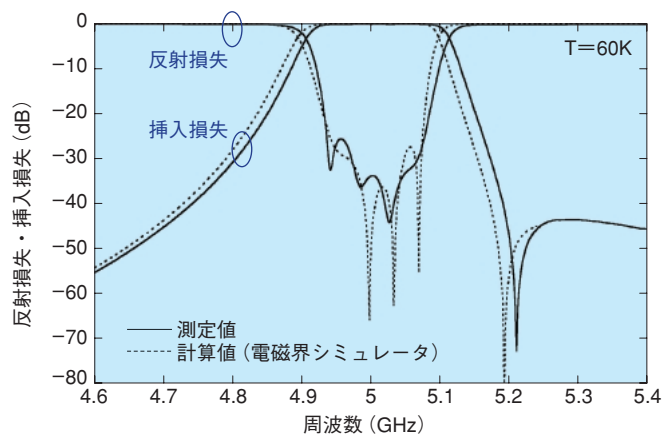
のを表4に示す。電磁界シミュレータによる計算値においては、3dB帯域幅204MHz、その中心周波数4.996GHz、低周波側、高周波側の帯域外減衰量がそれぞれ2.83dB、4.68dBであったのに対して、測定値においては3dB帯域幅205MHz、中心周波数5.010GHz、低周波側、高周波側の帯域外減衰量がそれぞれ2.90dB、4.29dBとなり、ほぼ計算値と一致する良好な結果が無調整にて得られた。挿入損失に関して計算上では導体は無損失としているため、計算値と測定値とを比較することはできないが、測定値の帯域内平均挿入損失は0.10dBと、非常に低損失な値が得られた。また、最小挿入損失0.08dBからフィルタを構成する共振器単体の無負荷Q値^{*3}を推定すると、約10,000以上という高い値が得られた。

フィルタのスプリアス特性の測定値を、電磁界シミュレータによる計算値とともに図4に示す。測定した全周波数域にわたって測定値と計算値はよく一致していることから本フィルタ構造および設計手法の妥当性が確認できた。一

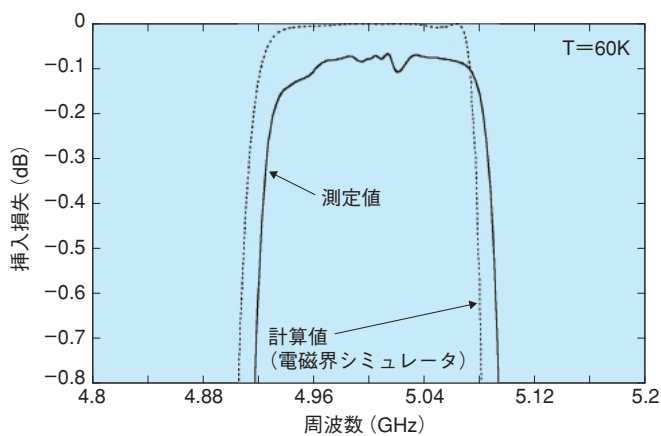
*1 フォトリソグラフィ：写真現像技術に応用した微細構造成造技術。

*2 イオンミリング：気体をイオン化し、強電界にて加速し基板に衝突させることで表面を削り取る加工法。

*3 無負荷Q値：共振器内部における電力損失に基づく値。この値が高いと、低損失で周波数選択度の高いフィルタを構成できる。



(a) 帯域付近の特性



(b) 帯域内挿入損失の特性

図3 温度60Kにおけるフィルタの周波数特性

表4 温度60Kにおけるフィルタの諸特性

	計算値 (電磁界シミュレータ)	測定値
3dB帯域幅		
中心周波数 (GHz)	4.996	5.010
帯域幅 (MHz)	204	205
挿入損失 (dB)		
最小値	—	0.08
帯域内平均	—	0.10
帯域外減衰量 (dB/10MHz)		
低周波側	2.83	2.90
高周波側	4.68	4.29

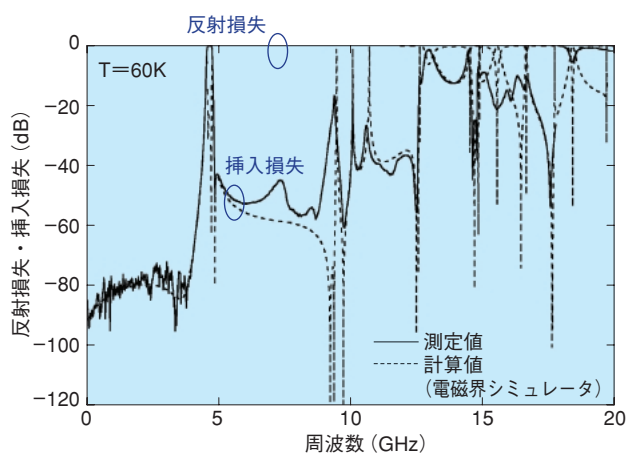


図4 フィルタのスプリアス特性

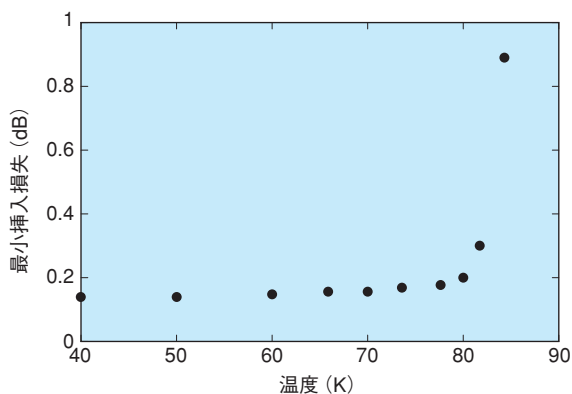


図5 フィルタの最小挿入損失の温度依存性

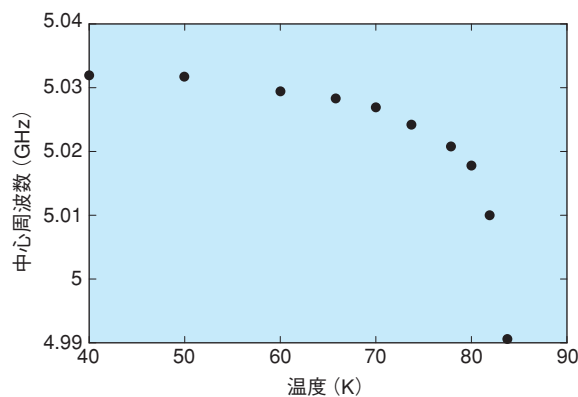


図6 フィルタの中心周波数の温度依存性

方、本フィルタに用いた共振器は1/4波長共振器であり、第2の共振はその共振器長が3/4波長となる15GHz付近で現れるものと予想されたが、実際には10GHz付近に観測された。この原因としては、2共振器間の幅1.08mm、長さ6.81mmの導体が10GHz付近で両端短絡の1/2波長共振しているためであると考えられる。また、13GHzを超えた周波数域においては数多くの共振モードが確認できる。これらは、測定時に用いた金属ケースが横方向で11.0mmと比較的大きいことから、導波管モードが低い周波数帯に下りてきたためと考えられる。

3.3 温度依存性の評価

フィルタの挿入損失および中心周波数について温度依存性の評価結果を述べる。なお、今回の実験検討ではフィルタを複数個製作しており、測定上の都合により本節で用いたフィルタは前節までのフィルタとは異なっている。フィルタの最小挿入損失の温度依存性を評価した結果を図5に示す。図5から、フィルタの温度上昇に伴ってフィルタの

挿入損失が増大していることが確認できる。これは温度上昇に伴う高温超伝導薄膜の表面抵抗増大によるものと考えられる。フィルタの中心周波数の温度依存性を評価した結果を図6に示す。図6から、温度の上昇に伴ってフィルタの中心周波数が低域側にシフトしていく様子が確認できる。これは、高温超伝導薄膜のカイネティックインダクタンス^{*4}および誘電体基板材料(MgO)の比誘電率が、それぞれ有する温度依存性によるものと考えられる。

4. あとがき

移動通信基地局受信装置の高度化に有効な高温超伝導フィルタに関して、CPW型帯域通過フィルタの小型化回路構成法の実験検証結果を述べた。具体的には、CPW1/4波長共振器を並列かつインターディジタル形に配置することで、段数増加に伴う基板面積の増加を抑えたフィルタに着目し、その設計に基づいてフィルタを製作するとともに実験検証を行った。その結果、通過帯域近傍の特性、スプリアス特性、共に測定値と計算値はよく一致することを確認した。これにより、インターディジタル形フィルタ構造、および電磁界シミュレータと等価回路によるシミュレーションを用いた設計手法の妥当性を実験的に確認した。本フィルタ構造は多段化による基板面積増加量が少ないため、小型で多段の急峻な帯域外遮断特性を有する帯域通過フィルタに適している。

文 献

- [1] A. I. Braginski: "Superconducting Electronics Coming to Market," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 9, No. 2, pp. 2825-2836, Jun. 1999.
- [2] T. Nojima, S. Narahashi, T. Mimura, K. Satoh and Y. Suzuki: "2-GHz band cryogenic receiver front end for mobile communication base station systems," IEICE Trans. Commun., Vol. E83-B, No. 8, pp. 1834-

1843, Aug. 2000.

- [3] 小泉 大輔, 佐藤 圭, 檜橋 祥一: "寸法誤差の影響を受けにくい結合構造を適用した5GHz帯コプレーナ形 $\lambda/4$ 共振器高温超伝導フィルタ," 信学技報, MW2004-25, pp. 55-60, Mar. 2004.
- [4] 河口 民雄, 馬 哲旺, 小林 禰夫, 小泉 大輔, 佐藤 圭, 檜橋 祥一: "CPW1/4波長共振器を用いた5GHzインターディジタル帯域通過フィルタ," 信学技報, MW2005-2, SCE2005-2, Apr. 2005.
- [5] 小泉 大輔, 佐藤 圭, 檜橋 祥一, 河口 民雄, 馬 哲旺, 小林 禰夫: "CPW1/4波長共振器を用いた5GHz帯インターディジタル形帯域通過フィルタの実験検討," 信学技報, SCE2005-3, MW2005-3, Apr. 2005.
- [6] 河合 邦浩, 佐藤 圭, 檜橋 祥一, 鈴木 秀行, 馬 哲旺, 小林 禰夫: "5GHz帯コプレーナ型高温超伝導フィルタ," 信学技報, MW2002-8, SCE2002-8, pp. 41-44, Apr. 2002.

用 語 一 覧

CPW: CoPlanar Waveguide (コプレーナ線路)

^{*4} カイネティックインダクタンス: 超伝導インダクタンスの1つで、超伝導電子の慣性力によって生じるパラメータ。