

次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・テラヘルツ・

光パッシブデバイスの理論設計と応用（第1報）

陳 春平* 武田 重喜** 穴田哲夫***

Theoretical Design and Its Application in Microwave, Millimeter-wave, Terahertz-wave, and Light-wave Passive Devices for Next-generation Wireless Communications

Chun-Ping CHEN* Shigeki TAKEDA** Tetsuo ANADA***

1. 緒言

近年、次世代無線通信（5G & beyond 5G）、超高速無線 LAN、車載レーダなどのミリ波電磁波機器の研究開発が加速している。5G 無線通信では 24.25~31.0 GHz, 31.8~33.4 GHz, 37.0~43.5 GHz, 45.3~50.2 GHz, 50.4~52.6 GHz, 64.0~76.0 GHz, 81.0~86.0 GHz の帯域の使用が検討されている。新たなワイヤレス無線通信システムの本格的な普及・発展に向けて、重要な高周波フィルタに対して超小型・低損失および高性能化の電気的仕様を満たす集積化技術の開発が求められている。今後、さらにミリ波からテラヘルツ波帯において利用可能な実装技術の中で、金属/高抵抗シリコンによるフォトリソニック結晶 (MPHC/DPhC) は電磁波回路に重要な役割を果たすことが期待されている。この MPHC 構造の基本的バンドギャップ特性は、2018 年度工学研究所プロジェクト研究報告にて明らかにした[1]。また MPHC 共振器/導波路は、低損失 PCB 基板上に、SIW (Substrate Integrated Waveguide, 別名 Post-Wall-Waveguide) および柔軟なマイクロストリップ線路 (MSL) と共存可能である。本報告では、MSL 励振による正方格子 MPHC インライン形帯域通過フィルタを Step Tune Method と呼ばれるコンピュータ支援の物理構造の最適化を行う[2]。これは従来のように構造全体を一度に最適化（調整）する代わりに、限られた数の物理的寸法のみを最適化（調整）することにより、高速最適化が可能、且つ最終結果の信頼性が高まることを意味する。なお、設計の詳細は紙幅の制限上割愛する。ここでは設計の流れと結果のみを記述する（詳細は文献[2]を参照）。

2. MPHC 誘導性金属ポスト BPF の設計

MPHC 回路は高 Q 特性を有し、高周波帯において、MSL 共振器形

フィルタより、挿入損失とスカート特性の劣化が少なく、理想特性に近い周波数特性を実現することが可能である。今回、筆者等の提案方法では、理想特性を与える全体の結合行列から、考慮する各共振器ごとの小結合行列を算出し、各共振器の実現すべき理想の伝送特性 (S-パラメータ) と順次共振器を追加して電磁界シミュレーション結果を比較して検証する。一方、最近の市販シミュレータには最適化 tool (古典的手法~最新的手法、さらに先進的トポロジー最適化手法) が組み込まれているか、あるいは自作や他のベンダーのソフトウェアをリンクし、マイクロ波フィルタ等の最適化を提案した論文も幾つか報告されている。しかし、変数の多い複雑なモデルでは所望の解を得るにはかなりの計算時間と計算機リソースを消費し、すべての構造パラメータを同時に最適化する手法は必ずしも効率的とは言えない。また収束解が得られない事もある。特に、MPHC モデルの場合、64bit-PC (メモリ 192GB) で計算しても数日かかり、しかも等リップルのチェビシェフ特性が得られるとは限らない。例えば、MPHC 構造のように微細なメッシュ (分割数) を必要とするモデル ($N_x \times N_y \times N_z = 1053 \times 444 \times 32$) では、短時間で簡単に計算できる回路シミュレータは存在しないので、電磁界シミュレータによる繰り返し計算回数の低減と設計時間の短縮が望まれる (メッシュ数を各方向 2 倍にすると計算時間は約 16 倍になり、またメモリは約 8 倍になる)。筆者等が展開する設計手法は直感的に分かりやすく、あらかじめ外部 Q_e および共振器間の結合度 m_{ij} の設計チャートを準備することで、構造定数を短時間、且つ正確に決定されるという特長を持っている。本報告では、設計例として、25GHz 帯における MPHC 構造の N=3 段対称デュアル金属ポスト結合窓の帯域通過フィルタを結合行列に基づいて設計する。

3. 提案する設計の考え方

本論文で提案した N 段直接結合共振器形帯域通過フィルタの設計法は、以下の 4 点に要約される。

- (1) 外部 Q_e , 結合係数 m_{ij} などの物理構造と回路パラメータの対応関係が直感的にわかりやすい設計パラメータを用いる。
- (2) MPHC-BPF の設計において、すべて電磁界シミュレータと最適化ツールに任せるのではなく、外部 Q_e 値と共振器間の結合係数 m_{ij}

*准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

Engineering

**客員研究員 (名誉教授) 神奈川大学工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

***客員研究員 神奈川大学工学研究所

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

の設計チャートをあらかじめ用意することにより、構造パラメータの最終設計値に近い初期値を短時間で決定する。その結果、構造パラメータの調整回数を削減し、計算機負荷の軽減を図ることが可能。

(3) MPhC-BPF の段数や帯域幅の変化に対しても、外部 Q_e 、結合係数 m_{ij} の設計チャート[3]に基づいて、共振器のピアホールによる結合窓の構造パラメータを容易に決定される。さらに、MPhC 構造による点欠陥共振器の基本共振モード（直六面体共振器の TM_{110} のモード）を用いたインライン形狭帯域 BPF を、Cameron 等による一般化結合行列に基づいて、電磁界シミュレータを援用し、MPhC 構造狭帯域 BPF の合成を行う[4]。なお、結合行列に基づく合成法は従来の古典的導波管フィルタの設計理論を包括し、逆行列演算 (Inversion)、相似変換 (Similarity transformation) および共振器ごとに分割 (Partitioning) された伝送特性を自在に取り扱うことができる。また、この結合行列の各要素は各共振器の共振周波数と他の共振器との結合を意味し、各共振器を順次追加するごとに各共振器に対応した結合行列から実現すべき伝送特性が得られる。

(4) 中心周波数近傍において、電磁界シミュレーションの伝送特性を結合行列の伝送特性に一致するように構造パラメータを微調整する。このとき、各段階での微調整はごく少数の構造パラメータなので、計算時間と計算機リソースの節約になる。

4. 設計例

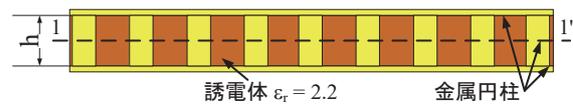
3.で述べた設計手順に沿って BPF の構造パラメータを求め、電磁界シミュレータを用いて局所的最適化することにより、誘導性金属ポスト共振器による 3 段狭帯域 BPF を中心周波数 $f_0 = 24.5\text{GHz}$ で設計した。3 段 BPF の側面図と上面図を図 1(a)(b)、フィルタの周波数特性を図 1(c)に与える。フィルタの構造パラメータを表 1 に纏めている。設計したフィルタは帯域内において、3 つの伝送極を持ち、チェビシェフ型フィルタの理論特性と一致している。また、フィルタを誘電体基板に設計したため、実際の BPF は標準的な PCB プロセスによって作製できることを付記する。

5. むすび

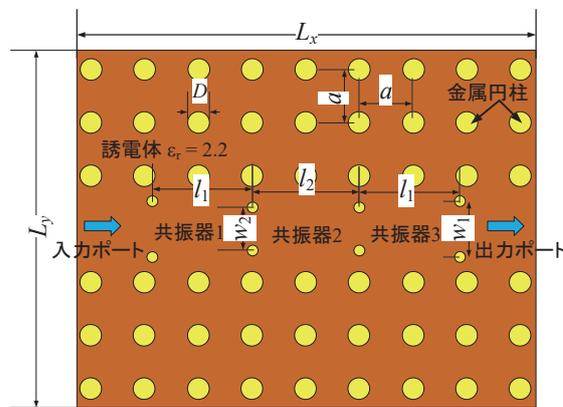
低損失 PCB 基板上に MPhC 線欠陥導波路内に誘導性金属ポスト構造共振器を直列に配置し、急峻なスカート特性を持つ 3 段狭帯域帯域通過フィルタを設計した。また、結合行列に基づく伝送特性、電磁界シミュレーションによる伝送特性より、本設計法の有効性を確認した。本報告では紙幅の制限上、概要のみを述べたが、詳細な理論展開は最終プロジェクト報告に記す予定である。

参考文献

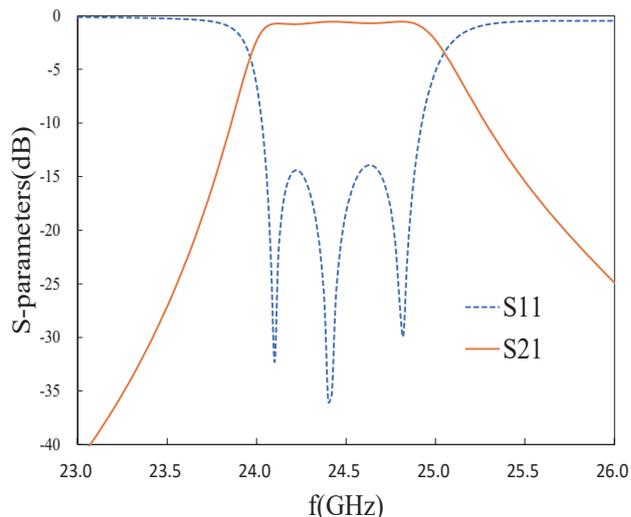
[1] 穴田哲夫, 陳春平, 中山明芳, ミリ波・テラヘルツ波帯における金属フォトニック結晶構造デバイスの解析と応用に関する研究, 神奈川大学工学研究所所報, No.39, pp.130-131, 2020.
 [2] 陳春平, et. al., 結合行列に基づく金属フォトニック結晶構造による準ミリ波帯域通過フィルタの合理的設計, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J103-C, No.8, pp.356-365, Aug. 2020.
 [3] J. S. Hong, M.J. Lancaster, Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, John Wiley & Sons Inc, pp.104-116, 2001.
 [4] R. J. Cameron, R. R. Mansour, C. M. Kudsia, Theory and Design of



(a) 金属フォトニック結晶フィルタの側面図



(b) 金属フォトニック結晶フィルタの上面図 (側面図の 1-1'面)



(c) 金属フォトニック結晶フィルタの周波数特性

図 1 設計した 3 段直結型金属フォトニック結晶フィルタの構造図

表 1 設計した金属フォトニック結晶フィルタの構造パラメータ (単位:mm)

a	D	d	l_1	w_1	l_2	w_2
3	1.2	0.6	5.624	3.15	5.92	2.43
L_x	L_y	基板パラメータ RT/duroid5880				
25.5	19.5	$\epsilon_r = 2.2 \pm 0.02, h = 0.508\text{mm}$				

Modern Microwave Filters and Systems Applications, John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey, pp.544-552, 2007.