

次世代無線通信を支えるマイクロ波・ミリ波・ テラヘルツ波・光波パッシブデバイスの理論設計と応用

陳 春平¹ 張 沢君² 穴田 哲夫³ 武田 重喜⁴ 王 小龍⁵

Theoretical design and application of microwave, millimeter wave, terahertz and optical passive devices supporting next generation wireless communications -A Study on Theoretical Design of Functional Device Using Metallic Photonic Crystal-

Chun-Ping Chen¹ Zejun Zhang² Tetsuo Anada³ Shigeki Takeda⁴ Wang Xiaolong⁵

1. 研究目的

本研究では、次世代無線通信（5G）と IoT（Internet of Things）社会を支える新たな光・テラヘルツ波・ミリ波・マイクロ波帯における電磁波回路（パッシブデバイス）の開発とその設計理論を確立することが望まれている。2014年10月に、総務省が第5世代無線通信（5G）に対する新しい周波数帯割当ての目標とシステム要件を発表し、国内の5Gの実用化が加速している。同年10月に公開した2020年以降の移動通信システムのコンセプト及び技術トレンドに関するホワイトペーパーには、5G無線システムの要件が以下のように発表されている。

- ①従来の1000倍ともなるネットワークの大容量化；
- ②10Gbpsを超えるピークデータレートの高速化；
- ③LTEの100倍同時接続端末の増大；
- ④無線区間の遅延を1ms以下へ短縮し低遅延化；
- ⑤低消費電力化；

そのゆえ、本研究は、①デュアル/トリプル/マルチバンド広帯域フィルタの系統的な設計/合成理論の開発、②非放射損失や超小型軽量化等の利点を有する金属フォトニック結晶を用いたミリ波帯機能デバイスの理論設計、③超小型電力配分器の理論設計、④フォトニック結晶構造に基づいた光通信用デバイスの理論設計の4つの研究内容に重点を置き、研究を進める予定である。

本研究では、デバイスの一般構造の提案と合成/設計理論の開発の両面に重点を置くので、本研究が完成すると、次世代無線通信システムの極めて厳しい仕様を満たす機能性デバイスの最短期間での開発・設計が実現できると考えている。

2. 電磁波回路の統一的結合行列理論

上記の仕様を満たす新たな無線通信システムの電磁波回路を開発

するために、マイクロ波・ミリ波・テラヘルツ波（=サブミリ波）、および光波領域まで含めて電磁波回路（受動回路）を統一的に取り扱う回路理論を展開することが重要である。ここでは、電気回路理論に基づく結合行列理論について簡単に説明するとともに金属フォトニック結晶を用いた帯域通過フィルタへの適用例を示すことで、本理論の有用性の一例を紹介する。

将来の無線通信システム系において、帯域通過フィルタは高選択性に関する要求を満たすべく研究・開発が期待されている。高Q共振器による帯域通過フィルタを設計するために、入出力線路および共振器間の結合メカニズムの基本的理解が必要である。ここでは、R.J. Cameronによって整理された一般化結合行列理論に基づいて帯域通過フィルタを設計する。まず、結合行列と回路方程式について簡潔に概説する。図1に示すように、N個の共振器による狭帯域帯域通過フィルタにおいて、ソースと負荷の結合を考慮したとき(N+2)×(N+2)の結合行列を構築する。最初の列はソースを表し、第2列は第1共振モード、第3列は第2共振モード、・・・、(N+1)列は第N共振モード、最後の(N+2)列は、負荷との結合を表す。このように、図1の等価回路に基づいて、(N+2)×(N+2)の結合行列が得られる。N次の共振モードとソース、負荷の結合を考慮した結合行列[M]は式(1)となる。

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} 0 & M_{s1} & M_{s2} & K & M_{sN} & M_{sL} \\ M_{s1} & M_{11} & M_{12} & K & M_{1N} & M_{1L} \\ M_{s2} & M_{12} & M_{22} & K & M_{2N} & M_{2L} \\ M & M & M & O & M & M \\ M_{sN} & M_{1N} & M_{2N} & K & M_{NN} & M_{NL} \\ M_{sL} & M_{1L} & M_{2L} & K & M_{NL} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

結合行列[M]が与えられると、入出力インピーダンス R_s, R_L を含めた回路全体の行列方程式[A]は次式で与えられる。

$$[-j\mathbf{R} + \Omega\mathbf{W} + \mathbf{M}][\mathbf{I}] = [\mathbf{A}][\mathbf{I}] = -j[\mathbf{e}] \quad (2)$$

ここに[R]は(N+2)×(N+2)、 $R_{11}=R_0=1\Omega$ 、 $R_{N+2,N+2}=R_0=1\Omega$ に正規化。 $[\mathbf{W}]$ は単位行列、但し、 $W_{11}=W_{N+2,N+2}=0$ 、 $W_{ii}=1$ 。

$[\mathbf{e}]=[1,0,0,\dots,0]$ の励振ベクトルである。 $[\mathbf{I}]$ はループ電流、 Ω は正規化周波数である。

¹准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

²特別助教 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

^{3,4}客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

⁵教授 吉林大学 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

$$\Omega = \frac{\omega_c}{\Delta\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_c} - \frac{\omega_c}{\omega} \right) \quad (3)$$

結合行列 $[M]$ の M_{SS}, M_{LL} は $M_{SS}=M_{LL}=0$ である。 M_{S1} (M_{L1})はソース(負荷)と第1共振モードとの結合を意味する。また M_{11}, M_{22} は第1, 及び第2共振モードにおける自己結合係数と関連し, 共振周波数とは次式で近似的に表すことができる。

このように結合行列 $[M]$ が与えられると, 回路のフィルタリング特性を与えるS-行列 S_{11}, S_{21} は次式より回路特性が得られる。

$$\begin{aligned} S_{11} &= I + 2j[A^{-1}]_{1,1} \\ S_{21} &= -2j[A^{-1}]_{N+2,1} \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち, 上式に基づいて, 帯域幅, 中心周波数, フィルタの段数, 帯域内における反射減衰量を与えることにより, 実現すべき仕様を満たす結合行列 $[M]$ が分かれば, 回路の周波数特性は簡単に逆行列を計算することにより得られる。次章で, 本理論の適用例として, 5段帯域通過フィルタについて結果のみを示す。

3. 5段帯域通過フィルタの結合マトリックスの計算例

まずM-PhCの格子定数(周期) $a = 120\mu\text{m}$, 金属円柱半径 $r = 0.2a = 24\mu\text{m}$ と設定する。設計仕様の中心周波数 $f_0 = 1.1\text{THz}$ より, 図2(a)から点欠陥共振器の中心の微小金属円柱半径 $r_p = 0.1r$ を選択する。

2) 共振器とポート間の結合窓の構造パラメータを決定するために, 結合窓の構造パラメータと外部 Q_{ext} の関係を得る。このとき, 外部 Q_{ext} の値55.5となり, 結合窓の円柱半径 $r_1 = 0.6r$ の場合に結合窓の構造パラメータを導出する(外部 Q_{ext} に対して, 結合窓の円柱半径の選択する自由度より, 結合窓の構造パラメータが唯一ではない事に注意)。図2(b)のように, 結合スキームはインライン型とする。

3) 結合窓の円柱半径 $r_1 = 0.6r$ を選択し, 結合窓のすべての構造パラメータを得ることにより, 図2(c)の周波数特性が得られる。

4) 図2(d)に示すように, BPFを完全な単一のユニット, 即ち個々の5つの共振器ではなく, 構造全体を1つの共振器と見なしたとき, 5つの共振モードで動作していることが分かる。

4. 結び

金属平行平板内に挟まれた金属フォトニック結晶(M-PhC)点欠陥共振器の共振モードを用いたインライン型5段BPFを提案し, 結合マトリクス法に基づいて, 合成理論結果がシミュレーション結果とよく一致したことから本結合行列法の妥当性を明らかにした。また点欠陥共振器の中心に微小金属を装荷することによって共振周波数を制御でき, M-PhCによるBPFは将来のテラヘルツ波帯における超高速無線通信用BPFとしての利用が期待される。

5. 文献

[1] "Terahertz technology," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 50, 910-928, 2002.
 [2] Yuguang Zhao, Daniel R. Grischkowsky, 2-D Terahertz Metallic Photonic Crystals inparallel-Plate Waveguides, IEEE MTT, VOL.55,NO.4, APRIL 2007, pp.656-663.
 [3] C.-P. CHEN, T. ANADA, S. TAKEDA and Z. MA, Proposal and Theoretical Design of THz Bandpass Filters using Metallic Photonic Crystal Resonators, Proc. 46th European Micro. Conf., pp. 116-119, Oct. 3-7, 2016, London, UK.

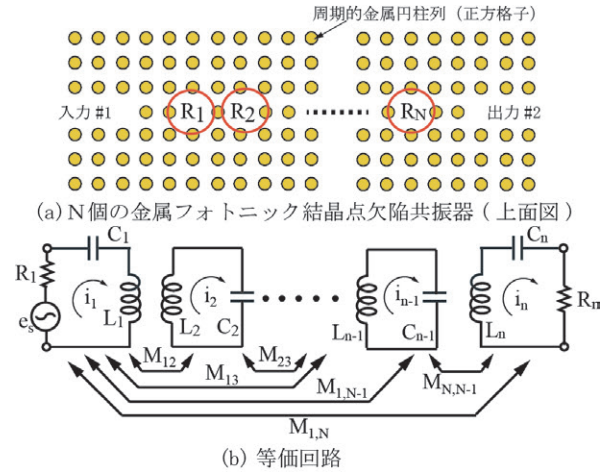


図1 N結合共振器の結合行列とその等価回路
 Fig.1 N-coupled resonators for loop-equation formulation.

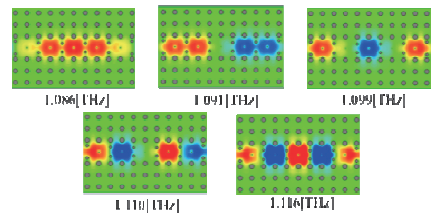
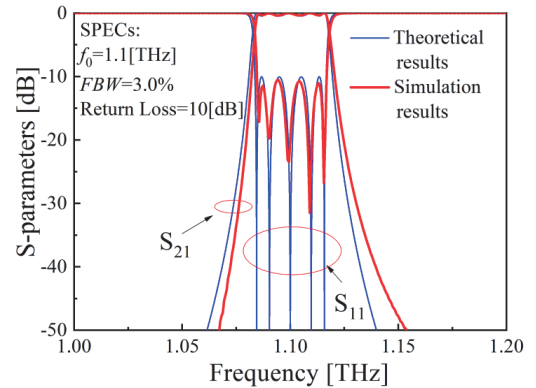
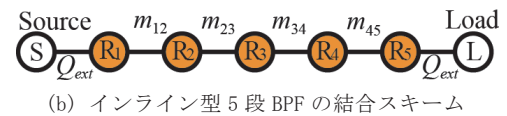
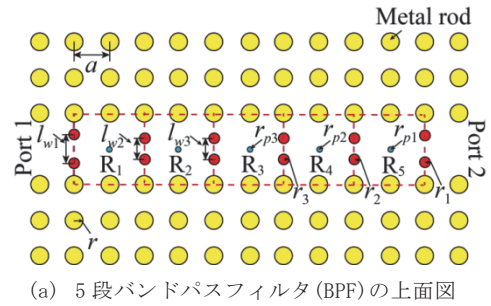


図2 M-PhC構造による5段BPFの周波数特性および伝送極の電界分布。

[4] C.-P. Chen, C. Xie, et al, "Simulation and Measurement of Properties of Metallic Photonic Crystal Point-Defect-Cavities with a Centrally-loaded Rod", IEICE Trans. Electron., Vol.E101-C, No.1, pp.91-95, Jan. 2018.