

# 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（研究成果報告書）

穴田 哲夫<sup>2</sup> 陳 春平<sup>3</sup> 中山 明芳<sup>1</sup>

## Fundamental Study on Metallic Photonic Crystal Devices for Millimeter/ Terahertz Frequencies and Its Applications (Second Report)

Tetsuo ANADA<sup>2</sup> Chun-Ping CHEN<sup>3</sup> Akiyoshi NAKAYAMA<sup>1</sup>

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は、ミリ波、テラヘルツ波領域において、電磁波の強い閉じ込めを実現するために従来の誘電体フォトニック結晶の代わりに金属フォトニック結晶を用いた超小型電磁波回路の実現と新機能の開発を通して周波数の利用効率を上げ、将来の光通信と無線通信とのシームレスな接続を目指して新電磁波回路を金属フォトニック結晶基板上に開発することである。

### 2. テラフォトニクス概要

近年、フォトニック結晶とテラヘルツが融合した新しいテラフォトニクス（新しい学際領域）分野の研究が国内外で活発に行われている。

テラヘルツ波（0.1-100THz）は光波と電波の境界領域に位置し、電磁波の発生・検出が容易でなかったため、これまで未開拓の電磁波スペクトル領域である。この未開拓のテラヘルツ波はX線に代わる非接触・非侵襲な透視手段として、非破壊検査、分光分析などのイメージセンサー、材料分野、バイオテクノロジー分野等多岐にわたる産業応用なども検討されている。一方、通信においては電磁波の有効利用という観点から、テラヘルツ波帯の電磁波を超高速・大容量無線通信システムへの応用研究が考えられる。またフォトニック結晶とは電磁材料の屈折率が波長程度の周期的に配置された構造体のことである。半導体結晶中の電子のように、バンド構造をとりうることで、1970年代半ばに小林哲郎、1979年に日本の大高一雄によって初めて指摘された。その後、1987年にアメリカ、カナダの研究者（Yablonovitch and John）によって、そのような周期構造体の中に光のエネルギー禁止帯（フォトニックバンドギャップ）が形成されることが示され、今日、フォトニック結晶と呼ばれる概念が確立さ

れた。この基本原理は周期構造に関するBlochの定理やフロッケの定理の基に古くから知られていたが、微細周期構造を人工的に二次元または三次元的に作製することが極めて困難だったことから、1990年代後半までは現実的なフォトニック結晶は存在しなかった。このフォトニック結晶の持っているポテンシャルは、電磁波の全反射効果にとどまらない。例えば、結晶内に周期構造から外れた点欠陥構造を導入すると、その欠陥部のみに電磁波が局在（共振現象）する。同様に線欠陥構造を導入すると、その線欠陥部を電磁波が伝播する導波路となる。さらに「導波路」と「点欠陥」を組み合わせることにより、電磁波を捕獲するといった信号処理デバイスの機能が可能となる。

### 3. 電磁波回路への応用例

上記に述べたように、フォトニック結晶による多彩な電磁波の制御とその応用を開拓する研究が次々と進展し、フォトニック結晶中では多数の電磁波が非常に強く結合するために、従来の物質や導波路とは大きく異なる分散関係が現れる。このような分散関係を積極的に利用することで、自在に電磁波伝搬の方向変換を有する電磁波スイッチが実現できると期待されている。ここでは電磁波の伝搬方向を自在に制御した分岐回路の設計例（図1）とTHz帯バンドパスフィルタ（図2）の設計例を与える。特に狭帯域バンドパスフィルタのスカート特性を良くするために、帯域外に減衰極を設けることで、急峻な減衰特性を実現していることは興味深い特性である。

ここにFDTD法による数値計算条件として、バンド特性を計算し、基本導波路である金属正方格子の1列を取り除いた線欠陥導波路（ $r/a=0.2$ ,  $a=58.5\mu\text{m}$ ）を計算し、電磁波回路の周波数特性（伝搬特性）と電磁界分布などを求めた結果を記す。このとき、入力波形はガウス関数を正弦波で変調した入力波形（入射モード：E-polarization（ $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ））、境界条件として周囲の人工の吸収境界を7層のPML境界（Perfectly Matched Layer）、メッシュは波長の $\lambda/10 \sim \lambda/40$ 、金属はCu（銅）のドルーデ・モデル、微小摂動誘電体ロッドは高抵抗シリコン $10^4\Omega\text{cm}$ 、比誘電率 $\epsilon_s=11.56$ の円柱を仮定している。なお、正方格子のバンドギャップのPBG特性はFDTD法と平

<sup>1</sup>教授 電気電子情報工学科  
Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information  
Engineering

<sup>2</sup>客員教授 工学研究所

Guest Professor, Research Institute for Engineering

<sup>3</sup>准教授 電気電子情報工学科

Assistant Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information  
Engineering

面波展開法で計算している。詳細は、前回の報告書を参照(神奈川県 工学研究所 所報, Dec. 2016, pp.130-131)。

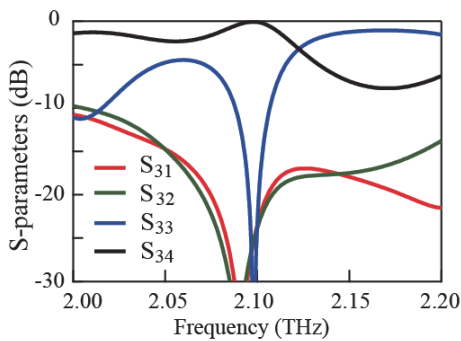
4. まとめ

超高周波帯におけるプラットホームとして金属フォトニック結晶を用いることを提案し、実際に電磁波回路の開発を行った。その一部は IEEE-IMS, EuMW 等の国際会議で発表した。また金属フォトニック結晶 (以下 MPhC) で構成された電磁波回路は、誘電体フォトニック結晶 (DPhC) と比較して少ない周期構造で電磁波を強く閉じ込めることができる上、これまで蓄積された導波管回路の設計理論を活用することができる。したがって、より実際的な MPhC によるフィルタなどの電磁波回路を研究することは意味あると考える。ここでは MPhC による点欠陥共振器の最低次共振モード (モノポールモード) を用いた狭帯域帯域通過フィルタ (以下 BPF) をマイクロ波フィルタの設計に有用な結合マトリクス理論を用いて MPhC 狭帯域 BPF の設計の見通しを得た。残された課題は、実際に計算に対応した金属フォトニック結晶フィルタを作製し、実験によって確認することである。金属フォトニック結晶の応用に関しては、筆者等が知る限り、最も優れた特性の高機能バンドパスフィルタを開発している。しかし、金属特有のオーミック損失の影響は避けられず、この問題解決には超伝導を利用すればよいが、これは今後の課題とする。最後に、本研究成果は、基盤研究 C (15K06037) に反映して

いることを付記する。

5. 主な公表文献

[1] 陳, 穴田, テラヘルツ帯における次世代無線通信のための電磁回路のシミュレーションと設計, 電子情報通信学会誌 Vol. 100 No. 5 pp. 356-361 2017年5月  
 [2] 佐藤 知正, 陳 春平, 穴田 哲夫, 等, 金属フォトニック結晶を用いた点欠陥共振器間の結合に関する検討とバンドパスフィルタへの応用, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J101-C, No. 1, pp. 43-48, Jan. 2018.  
 [3] 金澤和輝・陳 春平・穴田哲夫・中山明芳・武田重喜, 金属フォトニック結晶構造による減衰極を有する3段BPFの設計, C-2-40, ieice 総合大会2017  
 [4] Chun-Ping CHEN, Shun Kikawa, Daisuke Tetsuda, Tetsuo Anada, and Shigeki Takeda, "Design of a Novel Type of Narrow Band BPFs using High-Q M-PhC Resonators," Proc. 47th European Micro. Conf. (EuMW2017), pp. 904-907, Oct. 9-13, 2017, Germany. (Oral session)  
 [5] Chun-Ping CHEN, Tetsuo ANADA, Shigeki TAKEDA, et al, "Proposal and Theoretical Design of THz Bandpass Filters using Metallic Photonic Crystal Resonators," Proc. 46th European Microwave Conference, pp.116-119, 4-6 Oct 2016, London, UK



Frequency characteristics of MPhC splitter

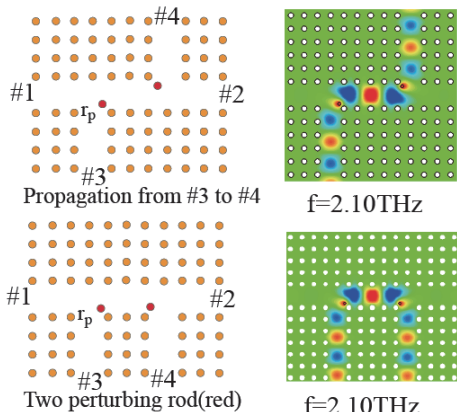
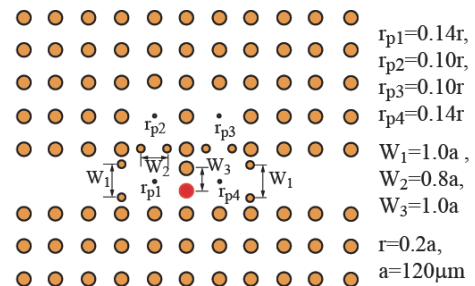
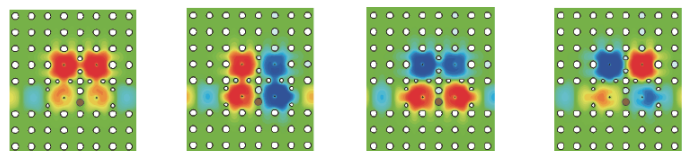


図1 金属フォトニック結晶による多ポート分岐回路の周波数特性( $r_p=0.5r$ )

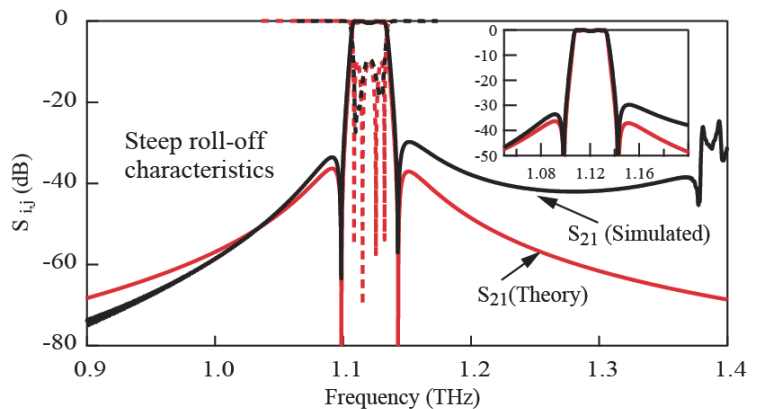
Fig.1 Frequency characteristics of multi-port branch circuits using metal photonic crystal.



(a) Structure of metallic PhC four pole filter (Capacitively coupling, brown: gap of 0.02a between upper metal and small metal rod)



(a) 1.109THz (b) 1.104THz (c) 1.120THz (d) 1.130THz  
 (b) Electric field profiles of four states of coupled resonators.



(c) Frequency characteristics by coupling matrix method and simulation.

図2 金属フォトニック結晶4段帯域通過フィルタの構造と特性  
 Fig.2. Structure of metallic PhC four-pole filter and synthesis result of bandpass filter with two transmission zeros.