

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06037

研究課題名(和文) 金属フォトニック結晶サブミリ波電磁波回路の合理的設計と3Dプリンタによる作製

研究課題名(英文) Synthesis design of metallic-photonic-crystal electromagnetic-wave circuits and fabrication by 3D printer

研究代表者

穴田 哲夫 (ANADA, TETSUO)

神奈川大学・付置研究所・名誉教授

研究者番号：20260987

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：金属フォトニック結晶は、誘電体フォトニック結晶と異なり、伝搬する電磁モードが直流からある遮断周波数まで超広帯域フォトニックバンドギャップを有し、フォトニック結晶に点欠陥或いは線欠陥構造を導入することにより、禁制帯ギャップ内に局部電磁モードが生じ、この局所モードによる超小型且つ高Q共振器として動作することを数値計算と正方格子金属フォトニック結晶共振器及び帯域通過フィルタを実際に作製・測定した。その結果、導波管共振器とほぼ同じ高Q値を持ち、高性能フィルタを実現した。本研究を通して、金属フォトニック結晶は導波路、共振器、フィルタ、スイッチなどへの応用に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The main results of a study are summarized as follows. By application of the global bandgap of metallic photonic crystal (M-PhC) structure, novel monopole-mode resonators were proposed to design bandpass filters in microwave and millimeter-wave bands. In order to compute the photonic bandgap of the metallic photonic crystal, we carried out the numerical implementation of the plane wave expansion method and also performed the FDTD (finite-difference time-domain) numerical simulations. The bandgap structure of the proposed square-lattice M-PhC is calculated as well as the mode chart of the monopole-mode point-defect resonator. Through this study, we showed that M-PhCs are effective for applications to electromagnetic wave circuits such as waveguides, resonators, power dividers and switches, etc. even in the microwave /millimeter wave band.

研究分野：マイクロ波・ミリ波回路工学

キーワード：マイクロ波 ミリ波 金属フォトニック結晶 バンドパスフィルタ 電磁波回路

### 1. 研究開始当初の背景

最近の通信情報量の飛躍的増大に伴って、有線と無線のシームレスな数十 Gbps の短距離超高速無線通信システムの実現に向けて、広帯域周波数資源を有効に利用できるミリ波の高周波数域からテラヘルツ波帯での低損失且つ高集積化可能な超小型電磁波回路の開発が望まれている(マイクロ波回路で必要な各種機能受動回路はTHz帯でも必要になるであろう)。これまでに提案された導波構造として、平行平板メタル導波路、NRD導波路、SIW構造などが提案されている。本研究は、マイクロ波、ミリ波及びサブミリ波(テラヘルツ波)領域において、光領域で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構造(M-PhC)を用いた超小型電磁波回路の開発を通して周波数の利用効率を上げ、将来の光とのシームレスな無線通信用の電磁波回路を開発することである。

### 2. 研究の目的

M-PhCによる電磁波の強い閉じ込め機能と超広域バンドギャップに着目し、金属円柱正方格子フォトニック結晶を用いた点欠陥共振器による2重縮退共振モードなどを用いた狭帯域バンドパスフィルタ、微小誘電体摂動によるT字及びY字型電力分配回路を提案すると共に実際に作製・測定するために科研費Cに応募する。

### 3. 研究の方法

金属フォトニック結晶の広域バンドギャップを計算するために、平面波展開法およびFDTD法によるバンドギャップの計算プログラムを開発する。この作成プログラムに基づいて、M-PhC導波路、点欠陥共振器の基本的構造パラメータを決定する。次に線欠陥導波路の中にバンドパスフィルタ機能を構築していく。そのために、まずPhCのバンド構造を平面波展開法とFDTD法による数値解析に基づいて固有値問題を展開し、金属正方格子PhC線欠陥導波路の波動特性を計算する。さらに金属フォトニック結晶点欠陥共振器に円柱誘電体と微小摂動を装荷した共振器の2重縮退モードを用いた狭帯域バンドパスフィルタを提案し、その周波数特性、動作時の電磁界分布及びマイクロ波回路の解析に有用なフォスタ型等価回路に基づいて考察する。また従来の導波管フィルタの設計理論を援用するために複数の共振器の直接結合形の帯域通過フィルタを設計し、PCB基板上に作製・測定し、理論の有効性を確認する。さら

にこれらの回路の励振方法も検討する。即ち、導波管励振、同軸励振、平面的マイクロストリップ線路励振方法を考えている。

### 4. 研究成果

超高周波帯におけるプラットフォームとして金属フォトニック結晶構造を用いることを提案し、実際に電磁波回路の開発を行い、その一部はEuMW等の国際会議、電子情報通信学会等で発表してきた。短ミリ波領域までは光波領域に比して金属の電気伝導度が十分に高いため、電磁波を閉じ込める材料としてマイクロ波周波数と同様に金属を電磁波回路に利用できることを確認してある。また金属フォトニック結晶で構成された電磁波回路は、誘電体フォトニック結晶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、より実際のM-PhC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M-PhC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をマイクロ波フィルタの設計に一般的な結合マトリクス理論を用いてM-PhC狭帯域BPFの設計の見通しを得た。研究成果の一部は、M-PhCによる点欠陥共振器の第一共振モードのモノポールモードおよび変形モノポールモードを用いた狭帯域帯域通過フィルタをR. J. Cameronによって展開された結合マトリクス理論と結合スキームに基づいて金属フォトニック結晶狭帯域2段、3段および4段帯域BPFの提案と結合マトリクスによる設計を試みたので報告した。点欠陥共振器の数値シミュレーションの有効性を確認するために、点欠陥共振器を実際に作製し、ネットワークアナライザ(Agilent E8361A)にて、共振特性を測定し、Q値を評価した。シミュレーションの有効性を確認した。金属フォトニック結晶の広域バンドギャップを計算するために、平面波展開法およびFDTD法によるバンドギャップの計算プログラムを開発する。この作成プログラムに基づいて、M-PhC導波路、点欠陥共振器の基本的構造パラメータを決定できるようにした。次に線欠陥導波路の中にバンドパスフィルタ機能を構築した。そのために、まずPhCのバンド構造を平面波展開法とFDTD法による数値解析に基づいて固有値問題を展開し、金属正方格子PhC線欠陥導波路の波動特性を計算した。さらに金属フォトニック結晶点欠陥共振器に円柱誘電体と微小摂動を装荷した共振器の2重縮退モード

を用いた狭帯域バンドパスフィルタを提案し、その周波数特性、動作時の電磁界分布及びマイクロ波回路の解析に有用なフォスタ型等価回路に基づいて考察した。さらにこれらの回路の励振方法も検討した。即ち、導波管励振、同軸励振、平面的マイクロストリップやCPW線路による励振を検討し、ミリ波帯では超小型同軸コネクタによる励振が放射問題の点から優れていることを明らかにした。最後に、本研究成果の一部は電子情報通信学会誌の解説記事として記載したことを付記する（電子情報通信学会誌，pp.356-361, 2017-05 100(5), pp.356-361, 2017-05）。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 4 件）

- ① 佐藤 知正, 陳 春平, 穴田 哲夫, 馬 哲旺, 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 査読有, C, Vol.J101-C, No.1, pp. 43-48, Jan. 2018.
- ② Chenglong Xie, Chun-Ping Chen and Tetsuo Anada, “2D Microwave Metallic Photonic Crystal Point-Defect-Cavity Resonator”, Microwave and Optical Technology Letters, 査読有, Volume 59, Issue 10, pp.2547-2551, July 2017.(John Wiley) (DOI: 10.1002/mop.30767)
- ③ 陳 春平, 穴田 哲夫, 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—フォトニック結晶によるテラヘルツ波の制御と新機能デバイス—, 電子情報通信学会誌, 査読有, 100(5), pp.356-361, (2017.5)
- ④ 平岡 隆晴, 陳 春平, 穴田 哲夫, 馬 哲旺, 金属フォトニック結晶点欠陥共振器のモノポールモードを用いた帯域通過フィルタの提案と設計, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, C, Vol.J99-C, No.2, pp. 37-41, 2016年2月

〔学会発表〕（計 7 件）

- ① 謝 成龍, 陳 春平, 張 沢君, 穴田 哲夫, 中山明芳, 武田重喜 (アンテナ技研), エアーギャップ付き金属フォトニック構造による多段BPFの設計, 2017年電子情報通信学会総合大会講演論文集, エレク

トロニクス, C-2-55, p.69, 2018年3月21日.

- ② Chenglong Xie, Chun-Ping Chen, Daisuke Tetsuda, Shun Kikawa, Zejun Zhang and Tetsuo Anada, An Extended Study on M-PhC Cavity with Controllable Resonant Frequencies, Proc. Asia Pacific Microwave Conference 2017, Nov. 13-16, 2017. (4-pages) (Kuala Lumpur, Malaysia) DOI: 10.1109/APMC.2017.8251515
- ③ 佐藤 知正, 謝 成龍, 張 沢君, 陳 春平, 穴田 哲夫, 馬 哲旺, 金属フォトニック結晶による線欠陥共振器の共振特性とバンドパスフィルタへの応用, 信学技報, vol. 117, no. 291, MW2017-124, pp. 67-72, 2017年11月
- 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, Nurnberg, Germany. (Session EuMC43-1) DOI: 10.23919/EuMC.2017.8230991
- ⑤ 謝 成龍, 陳 春平, 張 沢君, 穴田 哲夫, 新たなミリ波帯狭帯域バンドパスフィルタの設計と実現に関する一検討, 2017年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, PS1-2, pp. 1510-1511, 2017年9月.
- ⑥ 謝 成龍, 鐵田 大輔, 木川 駿, 陳 春平, 穴田 哲夫, 張 沢君 (神奈川大), 金属フォトニック結晶による高Q点欠陥共振器を用いたバンドパスフィルタの合理的設計, 信学技報, vol. 117, no. 142, EST2017-28, pp. 105-110, 2017年7月.
- ⑦ 陳 春平, 謝 成龍, 鐵田 大輔, 木川 駿, 穴田 哲夫, マイクロ波帯における金属フォトニック結晶点欠陥共振器の理論解析と測定, 信学技報, vol. 117, no. 16, MW2017-7, pp. 29-34, 2017年4月.

〔図書〕（計 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

穴田 哲夫 (ANADA TETSUO)  
神奈川大学・工学部・名誉教授  
研究者番号：20260987

### (2) 研究分担者

陳 春平 (Chun-Ping Chen)  
神奈川大学・工学部・准教授  
研究者番号：20440266

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )