



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

穴田 哲夫² 陳 春平³ 中山 明芳¹

Fundamental Study on Metallic Photonic Crystal Devices for Millimeter / Terahertz Frequencies and Its Applications

Tetsuo ANADA²

Chun-Ping CHEN³

Akiyoshi NAKAYAMA¹

1. プロジェクト研究の概要

本研究は、短ミリ波からテラヘルツ波領域において、金属フォトニック結晶構造を応用した電磁波回路（デバイス）の開発と解析を通して周波数の利用効率を上げ、将来の高精細 TV カメラ、イメージング、環境計測応用の短距離無線通信用の電磁波回路を開発することである。従来のフォトニック結晶構造は、空气中に誘電体円柱あるいは誘電体基板中に空気穴を正方/三角格子状に配置した結晶構造を研究してきたが、金属円柱によるフォトニック結晶において金属の損失よりも非放射損失や超小型軽量化の利点が勝り、実用的な電磁波回路の見通しを得たことから短ミリ波帯での電磁波回路設計と実現の指針と実験による確認を行うことである。以下に各担当者の役割分担を簡潔に述べると、

- (1) 超電導回路の理論とマイクロ波回路理論の応用：担当は中山明芳教授。
- (2) ミリ波・サブミリ波フォトニック結晶を用いた電磁波回路のシミュレーション及び実験：担当は陳春平准教授。
- (3) Maxwell 方程式に基づいた FDTD 法によるフォトニ

ック結晶デバイスの数値解法の開発と電磁波回路への応用：担当は穴田哲夫客員教授（名誉教授）。

上記研究課題にそって研究を行う、また各教員が文科省科研費の取得など大きな成果を上げつつある。各々科研費を獲得している（15K06037、16K06320、16K06319）。

2. 研究の方向性について

次世代高度情報通信社会の実現に向けて、ミリ波帯より高周波数を利用する無線技術の研究開発が国内外において加速している。実際に 10Gbit/s を超える超高速無線の実現に向け、E 帯（60GHz～90GHz）を利用する無線通信技術の研究・開発・実装技術が急速に進展しており、近い将来、電子デバイス、回路技術が扱える周波数帯がテラヘルツ帯にまで及ぶと思われる。また IEEE802.15 委員会内に THz Interest Group が設立され、KIOSK モデルや無線 LAN モデルに加えて、Point to Point 接続の FWA、データセンタ内光配線の無線化などが議論されている。また日本においては産学官連携によるテラヘルツテクノロジーフォーラムなどを通して、新分野の研究開発がなされている。これまでは主に 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など多岐にわたる産業応用が検討されている。さらに 3D プリンタ技術の進展や半導体微細加工技術の進歩により、発振源を含めて、高性能・高信頼性デバイスの開発が着実に進化しており、本格的短ミリ波・テラヘルツ波（THz）の利用に向けて、新しい高機能を備えた超小型電磁波回路の開発が可能となりつつある。これまで短ミリ波からテラヘルツ帯における導波構造として平行平板金属導波構造、平行平板金属間に誘電体を挿入した NRD 導波路、

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

²客員教授（名誉教授） 工学研究所
Guest Professor, Research Institute for Engineering

³准教授 電気電子情報工学科
Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

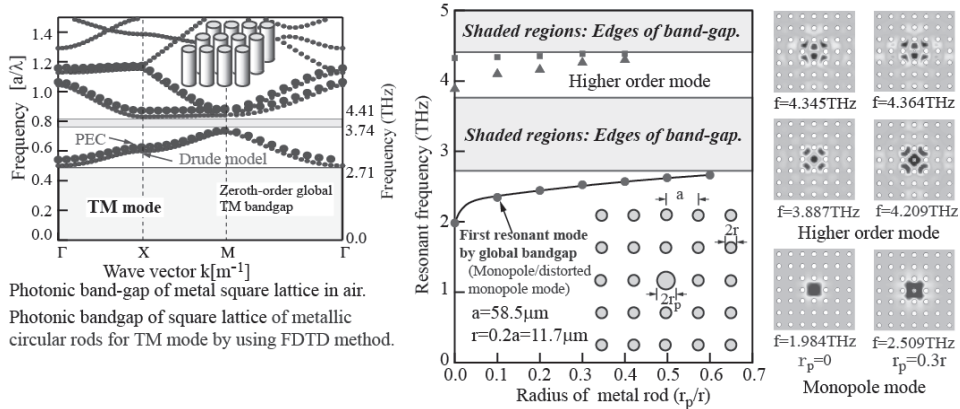


図1 金属正方格子フォトニック結晶のバンド構造と点欠陥共振器の共振モードチャート。

金属ポスト壁による SIW 構造などが提案されている。一方、筆者等は、短ミリ波・テラヘルツ波の波長程度の周期性をもつ誘電体フォトニック結晶中 (PhC) に線欠陥や点欠陥を導入することにより、その欠陥領域に電磁波が強く閉じ込められる局在現象を利用した超小型電磁波回路を提案し、狭帯域バンドパスフィルタや電磁波の伝搬を自在に制御する分岐回路を実現してきた。このようにフォトニック結晶による電磁波回路は単に電磁波の導波にとどまらず、プラットフォームとして用いることにより、様々な機能デバイスを同一基板上に構成することができる。これまで主に誘電体フォトニック結晶デバイスの研究が先行しているが、誘電体 PhC (D-PhC) 構造は、外部への放射を抑えるためにより多くの周期構造を構成する必要がある。一方、金属フォトニック結晶デバイスの研究は、金属のオーミックロスの問題が残るが、小型化、実際にデバイス作製の点で有利である。従って、金属あるいは超電導フォトニック結晶電磁波回路としての設計手法の確立と実装・応用の両面から研究する意義がある。

3. 金属フォトニック結晶のバンド構造と点欠陥共振器
 先ず、2次元金属フォトニック結晶のバンド構造の計算例を図1に与える。金属の周波数依存性を考慮するためにドルーデ・モデルを適用し、金属の誘電関数を次式で近似する。

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - j \frac{\sigma(\omega)}{\omega \epsilon_0}, \quad \sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 + j\omega\tau}$$

ここで金属円柱は銅(Cu)を仮定し、導電率 $\sigma_0=5.8 \times 10^7$ [S/m], プラズマ周波数 $\omega_p/2\pi=1914$ [THz], 衝突周波数 $\omega_c/2\pi=8.34$ [THz]とする。衝突周波数 $\omega_c/2\pi$ の逆数で定義される緩和時間は、 $\tau=10^{-14}$ 程度である。したがって、短ミリ波帯では、 $\omega\tau \ll 1$ であることから $\sigma(\omega)=\sigma_0$ と近似しても

良いことがわかる。ここでは正方格子の周期 $a=58.5\mu\text{m}$ 、金属円柱の半径 $r=11.7\mu\text{m}$ 、 $r/a=0.2$ とする。また完全导体モデルによる計算結果を図中に同時に示す。両計算結果には、大きな差異が見られない。図1におけるTMモードのバンドギャップ図は、 Γ 点での規格化周波数 $a/\lambda=0\sim 0.53$ 、 $a/\lambda=0.73\sim 0.86$ に第1、第2バンドギャップが存在する。このようにTMモードは直流から超広域バンドギャップが存在している。

4. 点欠陥共振器の共振周波数と共振モード

金属フォトニック結晶点欠陥共振器の共振モードは点欠陥を中心とする単位セルを連結して形成したスーパーセル法に基いて計算する。点欠陥共振器の共振周波数は格子定数と金属円柱半径によって決まるので、モノポール共振周波数が $f \approx 2\text{THz}$ 近傍となるように周期は $a=58.5\mu\text{m}$ 、金属円柱の半径は $r=0.2a=11.7\mu\text{m}$ とする。任意の共振周波数を得るには、点欠陥共振器の中央に半径 r_p の金属円柱を挿入する。 $r_p(=0\sim 0.7r)$ が大きくなると、バンドのエッジ($a/\lambda=0.53$, $f_c=2.71\text{THz}$)と重なり、擬似モノポール共振モードは消滅するが、動作中心周波数を広範囲に可変できることがわかる。またCuの導電率 $\sigma_0=5.8 \times 10^7$ [S/m]を仮定したときの無負荷Q値は970程度となる。本共振器の応用として、高性能のバンドパスフィルタへの応用が考えられる。

5. これまでの研究成果

研究成果は国際会議、電子情報通信学会、企業へ情報提供とともに、マイクロ波研究会、マイクロ波シミュレータ研究会、超電導研究会、IEEE IMS, EuMW, APMCのマイクロ波・ミリ波国際会議での発表、企業との連携による実装技術の確立、さらに設計理論などを公開する予定である。本研究は、マイクロ波、ミリ波、短ミリ波、テラヘルツ波、光波と広範囲にわたっており、新しいデバイスや回路を見出していることを付記する。