

フォトニック結晶構造を応用した電磁波回路の解析と応用（成果報告書）

穴田 哲夫* 陳 春平** 中山明芳***

Analysis and application of passive circuits using photonic crystal structure (Final Report)

Tetsuo ANADA* Chun-Ping CHEN** Akiyoshi NAKAYAMA**

1. 緒言

本研究のターゲットは、ミリ波からサブミリ波帯の超広帯域周波数領域において、フォトニック結晶構造を応用した機能性回路の解析と開発を通じて周波数の利用効率を上げ、ミリ波～サブミリ波帯における短距離無線通信の開拓として新しい電磁波回路の基礎研究と実際的な応用を推進することである。従来のメタル配線の導体損を避けるために低損失が期待される（超伝導）フォトニック結晶の周期構造を利用し、空気/誘電体基板中に2次元周期の円柱（Via-hole）/空気穴による人工的周期構造の提案と具体的な電磁波回路への応用例を検討してきた。

移動通信や固定無線を含めて無線通信技術は現代社会において不可欠な社会インフラ基盤として携帯電話、無線 LAN だけでなく、RFIDやIOTセンサー、車載レーダーなども無線通信の応用例である。それに伴って、周波数帯域の逼迫が現実の問題となっており、まだ通信に利用されていない未利用周波数帯を開発することが内外から要求されている。例えば、北京オリンピックにおいて、NHKとNTTの共同開発による120GHz帯を利用した非圧縮ハイビジョン信号の6チャンネル伝送による中継などで無線による複数カメラのハイビジョン映像伝送に成功している。また欧州を中心に79GHz帯を利用する車載レーダーの開発が進められている。このようなミリ波～テラヘルツ波は、エレクトロニクス技術とフォトニクス技術の境界領域にある技術分野であり、両方の技術分野から、通信、計測、テロ対策レーダー、医療、生化学等への広範な応用が期待されており、日本がアメリカ・欧州・韓国などに勝る技術となり得る成長分野であるが、現在は世界中で覇権争いが起こっている。

過去にミリ波の広大な周波数帯は、逼迫とは無縁なものと考えられ、その高分解能や機器の小型・軽量性はセンシングや通信すべてに十分魅力あるものであった。しかし、1970年代後半に長距離伝送路の主役の座を光ファイバに譲ることになって以来、ミリ波の開発とりわけデバイスの開発が停滞し、それが利用のインセンティブをも損なう悪循環に陥っていた。ところが、最近、5Gの提案後、ミリ波・サブミリ波領域の低損失・超小型・超広帯域性を備え

た機能デバイスの開発および設計手法を確立しておくことは、日本が世界に貢献する技術に成りうるものであり、高度情報社会を背景に利用面で新しい動きが展開されつつある。その一つはITSに関連した見通の悪い交差点での識別、自動車レーダへの利用、超高速無線LANやマルチメディアモバイルアクセスなど医療・看護を含めた病院内の通信分野における利用である。一方、これらを支えるハードウェアの柔軟な設計技術を開発しておく必要があり、数十ナノメートルのゲート幅のHEMTに代表されるように、薄膜技術や微細加工技術の進歩により、高性能・高信頼性デバイスの実現が可能になってきている。このように、本格的ミリ波～サブミリ波利用に向けて、ようやく種々の条件が整ってきた。なおサブミリ波応用分野の開拓（通信、セキュリティ、医療・バイオ、農業・食品、非破壊検査、環境）は理化学研究所、NICT、大阪大学・東北大学、海外では米国、中国、および北欧などで実用研究・基礎研究・物性研究を行なっているが、実際の通信分野での電磁波回路と光波回路を融合し、回路理論のように容易に設計できるような工学的研究はあまりなされていない。筆者等は、これまでに汎用的な数値計算手法（FDTD法）や波動伝搬シミュレーション（BPM法）の計算手法の開発を行なってきた経験と実績があり、実用化達成の見通しを得るところまで進展している。以下に本プロジェクト研究の成果として金属フォトニック結晶の電磁波回路への応用に関する研究の一部について報告する。

まず、ミリ波帯において、金属PhC(MPhC)による電磁波の強い閉じ込め機能と超広帯域バンドギャップに着目し、金属円柱正方格子PhC構造を用いた点欠陥共振器による狭帯域バンドパスフィルタを提案すると共に実際に作製・測定し、検証する。そして、波動方程式のスケールリング則を利用し、マイクロ波帯で実際に回路を作製・測定し、シミュレーションあるいは設計値と比較評価した。

2. 2次元完全金属結晶のバンドギャップ図

図1に作製した構造の写真を示すように、2枚の上下導体板で挟み込む平行平板導波路内に正方格子導体円柱を配置した無限周期モデルのバンドギャップ(PBG)を考察する。金属円柱に平行な電界Ez成分、x-y面に磁界成分を持つE波のモードのみがバンドギャップを持ち、H波のモードに対しては存在しないことを付記する。まず、計算に用いる銅(Cu)の材料定数について簡単に議論する。数テラヘルツ以下の銅(Cu)の特性は、古典的電磁気学におけるDrudeモデルを適用すると、導電率は次式で表現される。

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 + j\omega\tau} \cong \sigma_0 \quad (\omega\tau = 1) \quad (1)$$

***教授 電気電子情報工学科

Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

**准教授 電気電子情報工学科

Associate Professor, Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering

*工学研究所客員教授

Guest Professor, Research Institute for Engineering

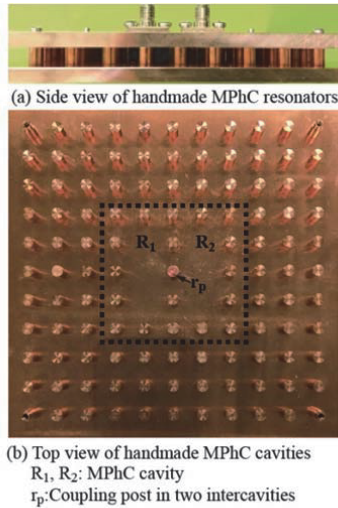


図1 金属フォトニック結晶3点欠陥共振器と同軸励振の写真

ここに、 σ_0 は直流の導電率 (5.8×10^7 S/m), τ は電子の緩和時間(電子の衝突周波数の逆数)を意味し、 $\tau \approx 10^{-14}$ のオーダーとなることから式(1)の近似式が成り立つ。PhC構造のバンドギャップはFDTD法を用いて計算した。MPhCバンドパスフィルタの作製を考慮して、格子定数($a=10\text{mm}$)と金属円柱半径(r)の比が $r=0.2a=2\text{mm}$ の場合の構造の計算結果を図2に与える。MPhCの第1, 第2PBGの周波数範囲は、直流 $\sim 16.2\text{GHz}$, $22.02\text{GHz} \sim 26.20\text{GHz}$ となる。またFDTD法による5列の周期構造に平面波入射したときの波動伝搬特性を与える。遮断域と伝搬域におけるPBG特性と透過特性が対応していることがわかる。このとき、周囲の境界条件は7層のPMLを設定している。また計算時に小さいセルに設定すると Δt も小さくなり、必要なタイムステップ数が増え、計算時間が増大するが、金属円柱モデル、上面の微小エアギャップ(g)を精密に考慮するために、計算メッシュサイズは計算機能力が許す限り、 $\lambda/50$ 以上に設定した。

3. MPhC線欠陥導波路形帯域通過フィルタの伝送特性

図1(a)は入出力用の市販のSMAコネクタ、図1(b)は r_p による2つのMPhC結合共振器(R_1, R_2)の上面図である。実際の測定値をシミュレーション結果と共に図3に与える。図3(a)は金属円柱と上部金属プレート間のエアギャップ $g=0.05\text{mm}$ を設け、さらに結合金属円柱 r_p の高さ $h=4.5\text{mm}$ の結果である。理論(結合行列法)による合成結果と比較しても良く一致した結果が得られている。また図3(b)は $g=0.05\text{mm}$, $h=4.95\text{mm}$ に相当し、偶・奇共振モードの周波数は $f_{\text{odd}} \approx f_{\text{even}}=8.78\text{GHz}$, 外部 Q_e は $Q_{e\text{even}}=21.5$ と $Q_{e\text{odd}}=22.3$, 無負荷 $Q_{o\text{even}}=3573$, $Q_{o\text{odd}}=3566$ とほぼ等しい特殊条件の基で、2つの共振モードが結合し、フィルタリング特性を示すとともに測定結果ともよく一致しており、今後の益々の発展が期待される。

4. むすび

金属フォトニック結晶構造の結合点欠陥共振器間の共振特性は結合金属ポストと上部エアギャップによって動作周波数および共振器間の結合度を調整できることを明らかにした。これによりフィルタ設計の自由度が得られる。また数値シミュレーションと測定結果は

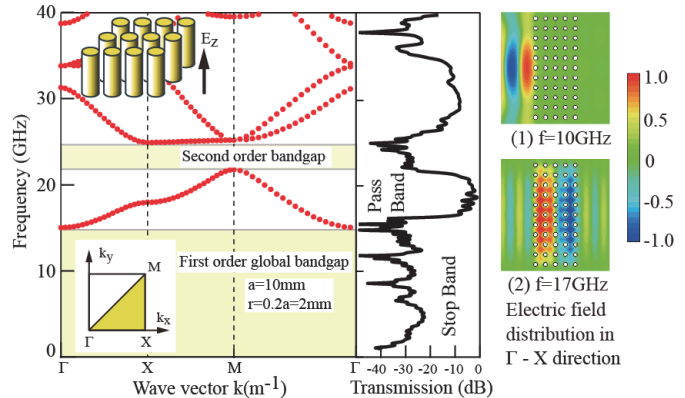
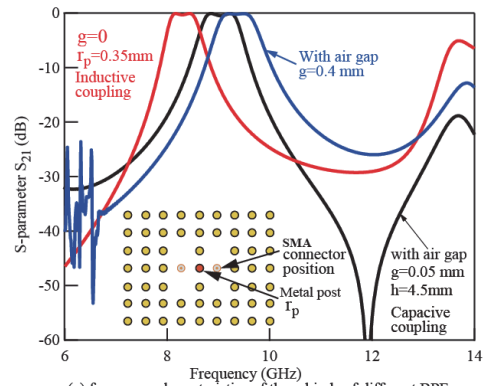
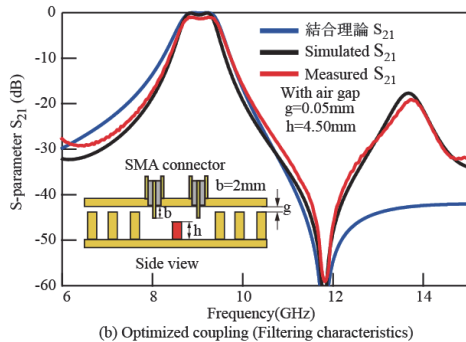


図2 金属正方形格子PhCのPBG構造と波動伝搬特性
Fig.2 Photonic bandgap of metal square lattice in air and transmission spectra.



(a) 3種類の結合による2段チェビシェフBPFの周波数特性 (空気層g, 結合ポストhの高さによる動作周波数のシフト)



(b) Optimized coupling (Filtering characteristics)
図3 シミュレーションと測定結果の比較
Fig.3 Comparison result of FDTD simulation and measurement result of M-PhC BPF.

良く一致したことから、金属フォトニック結晶構造に対する数値シミュレーションの有効性が確かめられた。金属フォトニック結晶による共振器の無負荷Q値は、銅の導体損によって抑えられるが、フィルタ構成のプラットフォームとしての利用が期待される。今後、波動方程式のスケーリング則を利用し、MPhC構造をミリ波・テラヘルツ波帯における種々の電磁波回路の設計に応用したい。

謝辞 本研究の一部は、文部省科研費基盤研究C(15K06037, 16K06320)の補助を受けて行われた。関係各位に深く感謝する。

公表論文

[1] 加藤丈政, 鎌田克洋, 他, "テラヘルツ帯金属フォトニック結晶を用いた電磁波回路の伝送特性", 信学会論(C), Vol.J97-C, No.7, pp.290-297, July 2014.
[2] 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", 信学会論(C), Vol.J101-C, No.1, pp.43-48, 2017.12.11