



<研究紹介>

研究項目 A02: 計画研究工

「周期構造を利用した光メタマテリアルの作製と物理」

研究代表者 石原照也(東北大学)

サブ波長人工構造によって光領域の透磁率の制御や負の屈折率をはじめとする新奇な光学応答を生み出すために、構造が周期的であることは必然ではないが、周期的な構造を用いることにより、数値計算が簡便になり、物理の見通しがたてやすくなり、作製も容易となる場合がある。また、同じ周期構造であっても、単位胞の内部だけで電氣的な応答と磁氣的な応答の両方をまかなう分子結晶的なデザインと、単位胞間の相互作用によって機能が発生するバンド結晶的なデザインの2種類がありえるが、これまでは前者の研究が主流であったが、本研究グループでは両者の共通点と相違点を比較しつつ研究を行う。

本研究では以下の4つの研究項目をたて、メンバーが協力して研究を行う。

- 1) 光領域の広帯域・低損失メタマテリアルの設計・作製・評価と3次元化
- 2) 負の輻射圧をはじめとした、力学的な効果の検証
- 3) メタマテリアル領域における磁気応答、光起電力、差周波発生、光磁化とその理論的な定式化。新奇現象の予測と検証/発見と解明
- 4) 光リソグラフィによるメタマテリアルの作製技術の開発

東北大学大学院理学研究科 石原照也

金属/誘電体/金属の構造に正方格子状に孔を開けたダブルフィッシュネット (DFN) 構造のデザインでは光領域で負の屈折率をもつことは知られている。本研究ではまず、デザイン、薄膜作製方法、加工技術を洗練して、究極の高品質メタマテリアルを実現する。そのために今回導入する多層膜スパッタ装置においては、成長中のリアルタイムモニタを行い、成長条件だしを徹底的に行う。西村グループの協力のもと、実験と計算の詳細な対応がつくように作製技術、評価技術を整備する。このことは、種々のアイデアを実現するための下準備としても重要である。試料の評価には複素透過率、複素反射率スペクトルの測定のほか、内部電磁場を評価するために、光起電力測定や光磁化を測定し、メタマテリアルにおける電磁応答の特異性明らかにしてゆく。一方、単純な金属誘電体多層膜構造や、周期性を導入した導波路構造でも、周期性によるバンド折り返しにより、負の屈折率をもつバンドが生じる。DFNの負屈折率に比べて、広い帯域で負屈折率をもつことが特徴であるが、負屈折率が現象に直接現れるよ



うな報告はまだなされていない。このような実験を考案して実証する。

光領域のメタマテリアルは通常、電子線描画装置を用いて作製されるが、時間とコストがかかることが問題である。表面プラズモンによって金属微細構造近傍に発生する近接場を利用して、サブ波長周期構造パターンを作製する手法を開発し、大面積のメタマテリアルを大量生産できるようにして、広範囲の実験に提供できるようにしてゆく。

京都大学大学院情報学研究科 西村直志

これまで3次元2周期構造におけるMaxwell方程式の波動散乱問題の高速多重極境界要素法による解法を開発してきた。高速多重極法は未知数の多い複雑な問題を境界要素法で解く事を可能にし、得られた数値計算法は、フォトニック結晶などの解析において有効であることがわかった。本研究ではこの数値計算法をメタマテリアルの研究に適用する事を考える。

境界要素法は考える物体の形状変更に対応できる特徴を有しており、形状設計問題に有利であると考えられる。そこで、本研究では周期高速多重極法を用いて光メタマテリアルの最適形状設計を行うことを目的とする。具体的には、

- ・随伴変数法を用いた感度解析の研究を行う。これについては既に研究をある程度進めているが、さらに非線形計画法を組み合わせた最適設計法を開発する。
- ・エネルギー透過率、エネルギー反射率などの周波数特性が、要求する性能に近いメタマテリアルを設計する。
- ・特に、見掛けの屈折率が負で、かつ、減衰ができるだけ小さいメタマテリアルを設計する。

などのテーマに取り組む予定である。さらに、これ等の研究においては反復計算を行うことが必要になると考えられ、周期高速多重極法の計算効率をさらに高める事が重要と考えられる。このため、新しい前処理法や定式化についても検討を行う。

加えて、本研究の他の担当者のテーマにおいても、現象の解釈のために周期高速多重極法による電磁場計算結果が有用と考えられる場合が多数あるため、これらの計算ニーズにも協力して行く。

秋田大学資源工学部 小野田勝

これまでに行った2次元フォトニック結晶に関する研究を通じて、バンド端における縮退点近傍の状態の放射圧に関して調べたところ、その特異性が明ら



かになってきた。微粒子が電磁波の放射圧により受ける力は、大まかに勾配力と散乱力に分けることができ、後者はさらに、運動量密度に比例する効果と回転項により表現される効果に分けられる。通常の平面波では、回転項による効果はゼロとなるため、散乱力はほぼ電磁波の運動量密度に比例する。しかし、2次元フォトニック結晶におけるTEモードのように、電場が円偏光的な位相を持ち、さらにその位相が空間依存性を持つような場合には、回転項による効果は無視できない。特にバンド端の縮退点近傍の状態では、回転項の効果が他の散乱力に比べて大きく、また、運動量密度と逆向きになりえることがわかってきた。このことはバンド端の状態による放射圧の特異性と、負の屈折率媒質において予想されている逆放射圧との関連性を示唆しているものと考えられる。今後は、この関連性を明らかにすべく、回転項による効果が顕著になる状況の詳細を調べ、分散関係や幾何学的位相との関係についても調べて行く予定である。

理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部 澤田桂

人工周期構造中の光と電子の挙動に対する、幾何学的位相（ベリー位相）効果を研究する。幾何学的位相は空間の曲がり具合を表す指標で、これまでの研究では、光と電子は別々の枠組みで議論されており、両者にまたがった現象は知られていない。幾何学的位相は分散関係の構造が重要な役割を果たすため、光と電子の両方のバンド構造を制御できる系に着目することで新現象が期待できる。そこで、具体的にまず金属フォトニック結晶中のプラズモンに着目する。プラズモニックバンドの構造に起因した幾何学的位相を調べることで、光起電力の起源を探る。

また、メタマテリアルを、マルチフェロイクスとの関連から研究する。メタマテリアルの重要な性質は、電気的応答と磁氣的応答が結合した光学応答を示すことである。このような誘電性と磁性の共存は、通常物質の光学では、空間反転・時間反転の両方の対称性が破れたマルチフェロイクスにおける光学的電気磁気効果が知られている。しかし、通常物質では効果が小さいためあまり実用には向かない。そこで、このような現象をメタマテリアルで増強する可能性を調べる。

奈良先端大学院大学 物質創成科学研究科 富田知志

金属の数十から数百ナノメートルスケールの人工構造（光学メタマテリアル）が、近赤外・可視光領域で示す特異な現象の物理を調べ、新機能を持つ人工材



料としての応用へと繋げる。主な研究項目としては、1. ダブルフィッシュネット型光学メタマテリアルでのカシミール効果、2. 磁性体を埋め込んだダブルフィッシュネット型非相反光学メタマテリアルなどが挙げられる。

1は、これまで行ってきた金属-絶縁体-金属多層膜での光輸送の研究を発展させたものである。スパッタリング法や蒸着法などでAg-SiO₂-Ag多層膜を成膜した後、集束イオンビーム加工装置などでナノ加工を行い、ダブルフィッシュネット型メタマテリアルを作製する。ダブルフィッシュネット型メタマテリアルでの光の共鳴輸送を調べ、光励起時の電気伝導測定、非接触原子間力顕微鏡による力の直接測定などを通じて、カシミール効果の検出を目指す。

2では、磁性ガーネット（例えばYIG）など磁性体を埋め込んだAg-YIG-Agのダブルフィッシュネット型の非相反メタマテリアルを作製し、磁場下での光の透過測定、アンテナ効果などを調べる。これに関してはマイクロ波領域での非相反メタマテリアルを研究している真田グループの上田と協力して行う。

東北大学大学院理学研究科 大野誠吾

金属誘電体メタマテリアルのもつ非線形光学特性について、光起電力の拡張という立場から研究する。たとえばフェムト秒レーザーパルスをうまくデザインされたメタマテリアルへ入射することでTHz帯の電磁波輻射がえられることが期待される。このとき、放射される電磁波は光起電力の発生ダイナミクスを反映した波形となっているはずで、発生したテラヘルツ波の時間波形を調べることができれば光起電力の発生メカニズムを調べる鍵となる。

応用の面では、テラヘルツ帯における新しいタイプの非線形光学結晶をメタマテリアルの視点からデザイン可能であることを意味している。現在、テラヘルツ波を放射する場合、物質の光学フォノンによる吸収が主にその帯域を制限しており、広帯域にフラットな特性でテラヘルツ波を放射する非線形結晶は見つかっていない。非線形光学メタマテリアルはこれらを一新する可能性をひめている。

現在のところ金属誘電体メタマテリアルにおいて非線形光学定数が比較的高いことが数値シミュレーションから見出されている。