

プラズモニック・メタマテリアルとその光学素子への応用

理化学研究所 河田ナノフォトニクス研究室

田中 拓男

E-mail: t-tanaka@riken.jp

プラズモニック・メタマテリアルとは、光の波長よりも小さな金属製の共振器をアレイ状に構成し、共振器中の電子と電磁場との共振を利用して物質のマクロスコピックな誘電率(ϵ)や透磁率(μ)を制御する人工物質である。特に誘電率と透磁率を同時にマイナスの値に制御すると、その物質の屈折率は負となるが、そのような物質は光の回折限界を受けずに物体の微細構造を結像できる特殊なレンズとして機能することが理論的に予測されるなど近年注目を集めている。また、光の周波数領域に限れば、自然界に存在する物質の透磁率はほぼ 1.0 に固定されており、この周波数領域で磁気的な応答を示す物質は世の中には存在しない。プラズモニック・メタマテリアルを用いればこのような制限も取り払われ、物質に高周波磁界に対する応答特性を付加することも可能となる。図1は、1999年に J. Pendry によって提案された Split-ring resonator (SRR) と呼ばれる共振器構造である[1]。メタマテリアルは、このような共振器構造を宿主となる物質中に無数に3次元的に分散させたものであり、SRRの基本的な動作原理は変動磁場に応答するループアンテナと、構造に由来するインダクタンス(L)とキャパシタンス(C)からなる一種のLC共振回路である。つまり、このSRRアレイにリングを貫く磁場をもった光が入射すると、電磁誘導の原理に従ってリングに沿って電流が流れ、この円電流が外部からの磁場を打ち消すような磁場を作り出す。リングのサイズが入射光の波長に比べて十分に小さいと、個々の共振器構造は光には感知されず全体として透磁率が変化した均質な物質として振る舞う。このSRRの基本的な動作メカニズムはマイクロ波領域において既に実験的にも確認されている[2]。

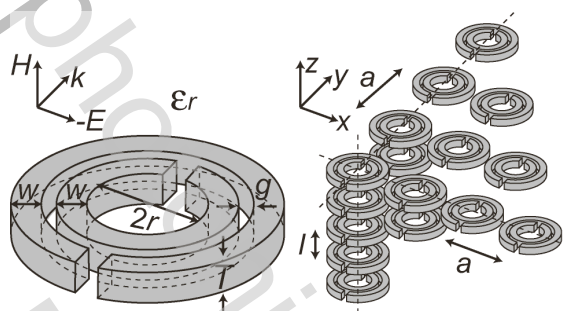


図1 Split-ring resonator array

我々の研究の目的は、光の周波数領域においてこのプラズモニック・メタマテリアルを作りだし、その電磁気学的に特異な応答特性を発現させることである。しかし光の周波数領域においてこういった材料や共振器構造が最適化といった点については、理論的にも実験的にも不明な点が多かった。そこで我々は光周波数領域におけるSRRの磁気応答について電磁気学に基づいた理論解析を行い、可視域におよぶ周波数範囲にわたって負の透磁率が実現できることを世界で初めて証明した[3]。SRRアレイを用いて可視光の周波数領域で負の

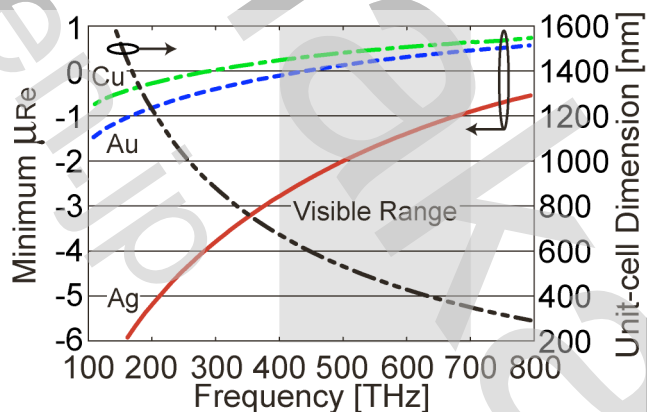


図2 光周波数領域における磁気応答

透磁率を実現するためには、高いQ値と高い共振周波数が必要となる。図2にその解析結果の一例として、銀、金、銅で作ったSRRアレイが実現できる透磁率の最小値の周波数特性を示す。解析の結果、銀で作製したSRRアレイでは共振周波数が上昇するとともに磁気応答は低下するものの、可視光領域をカバーする全周波数帯域において負の透磁率が実現できることを確認した。

我々はメタ材料の真の可能性は「負の屈折率」だけではなくもっと広いと考えている。例えば、物質界面での反射光がなくなるブリュースター角は通常p偏光の光にのみ存在するが、メタ材料を用いて人工的に物質の透磁率を制御することで、s偏光でもブリュースターを実現することができる。我々はメタ材料におけるこのような特異な光学特性にいち早く注目し、物質界面での反射を偏光に関係なく完全に消失させる新奇なメタ材料光学素子を提案した[4]。もちろんp偏光とs偏光のブリュースターの発現は排他的であり、物質の透磁率を制御しただけでは、p、s偏光のブリュースターを両立させることはできない。そこで我々は、この問題を解決するために異方性メタ材料という概念を導入し、光の偏光方向に応じて独立に誘電率、透磁率を制御できるようにした。

図3にこの異方性メタ材料の構造を示す。

また、図4に我々が提案したブリュースター素子の例を示す。図4は空気からガラスへ光が透過するモデルにおいて、その境界面に異方性メタ材料を挿入することで、空気-ガラス界面で生じる光の反射を消失させる素子の設計例である。本来空気とガラスは屈折率が異なるため、その境界面は光にとっては一種のポテンシャル障壁であり、必ず光の反射が生じる。しかし、図4に示すように、境界面にメタ材料を挿入することにより、すべての物質界面において、p、s両偏光にブリュースター条件を満足させることが可能となり、空気からガラスへ反射ロスなしに光を伝搬させることが可能となる。

講演では、時間が許せばこのような3次元の金属構造を持つメタ材料の加工方法についても議論したい[5]。

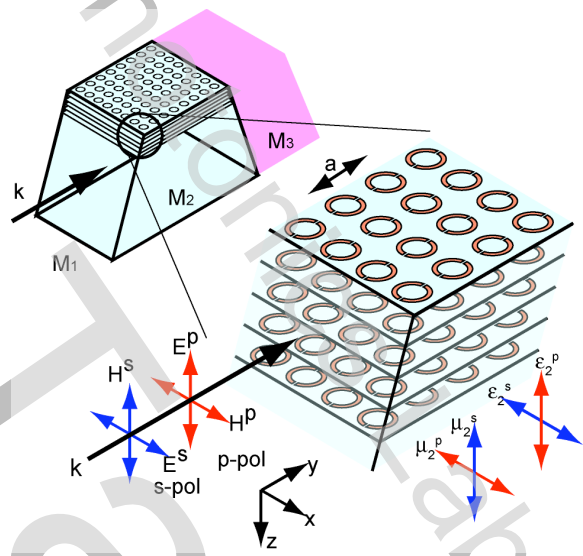


図3. 異方性メタ材料

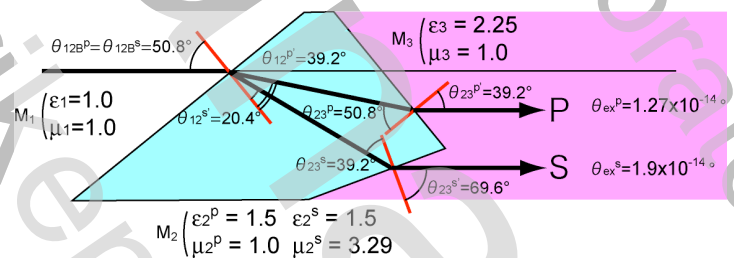


図4. 偏光無依存ブリュースター素子

参考文献

- [1] J. Pendry et al., IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **47**, 2075 (1999).
- [2] D. Smith et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 4184 (2000).
- [3] A. Ishikawa et. al., Phys. Rev. Lett. **95**, 237401 (2005).
- [4] T. Tanaka et. al., Phys. Rev. B **73**, 125423 (2006).
- [5] T. Tanaka et. al., Appl. Phys. Lett. **88**, 081107 (2006).