



Title	Plasmonic Metamaterials and Their Magnetic Properties
Author(s)	石川, 篤
Citation	大阪大学, 2007, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/48435
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	いし かわ あつし 石 川 篤
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	第 2 1 1 6 3 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 19 年 3 月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 工学研究科応用物理学専攻
学 位 論 文 名	Plasmonic Metamaterials and Their Magnetic Properties (プラズモニックメタマテリアルとその磁気特性)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 河 田 聡 (副査) 教 授 菅 原 康 弘 助 教 授 朝 日 剛 助 教 授 高 原 淳 一

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ナノスケールで人工的に配列された金属構造が示す磁気応答の解析と、その光学素子への応用、作製技術の開発、および赤外領域における磁気特性の実験的検証について述べたものである。このような、自然界には存在しない光学特性を示すナノ構造体をメタマテリアルと呼ぶ。論文は、序論、本論 5 章、および総括から構成されている。

第 1 章では、自然界に存在する物質とメタマテリアルの光学特性の違いについて述べた。メタマテリアルが示す磁気応答が、光学・電磁気学にもたらす物理的意味について説明し、透磁率が 1.0 以外の値をもつ物質中における特異な光の伝搬について述べた。この研究分野の関連研究について概説し、本研究の位置づけを述べた。

第 2 章では、光に対して磁気応答を示す金属ナノ共振器アレイの原理について述べた。この磁気特性を解析するために、光周波数領域において適用可能な内部インピーダンスを導出し、金属の伝導特性について評価した。そして、誘電率 2.25 の物質中に 3 次元配列した金属ナノ共振器アレイをモデルに解析を行なった結果、100THz 以上における磁気応答の実現にはインダクタンスは大きく、キャパシタンスは低減した共振器構造が必要であるとの結論を得た。この結果に従い構造を最適化した銀の共振器アレイが、可視光に対する透磁率を負の値から 1.0 以上の値にまで変化させることを示した。

第 3 章では、光の反射がゼロとなるブリュースター角が、透磁率が 1.0 以外の値をもつ物質においては S 偏光に対しても発現することを見出した。この原理に基づき、 $\mathbf{P} \cdot \mathbf{S}$ 両偏光に対して同時にブリュースター角を実現する 1 軸性メタマテリアルを考案し、屈折率の異なる 2 つの物質境界面での光の反射を完全になくすことを考えた。この光学素子を用いることで、空気とガラスの間を光が無反射で透過することを数値計算により確認した。

第 4 章では、メタマテリアルを構成する 3 次元金属構造の作製には、2 光子吸収過程に基づく光加工法が必要となる物理的根拠について説明した。そして、フェムト秒パルスレーザー光を硝酸銀水溶液中に集光照射し、銀イオンを 2 光子吸収光還元することで、3 次元金属構造を超解像で作製する手法を考案した。本手法を用いて、ガラス基板上に自立するマイクロオーダーの 3 次元銀構造の作製に成功した。作製した銀構造の抵抗率を測定した結果、 $5.29 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$ とバルクの銀に比べてわずか 3.3 倍という良好な電気特性を確認し、本手法がメタマテリアルの作製に有効であるとの結論を得た。

第5章では、第4章で開発した手法を用いて、線幅 $1.5\ \mu\text{m}$ 、長さ $10\ \mu\text{m}$ の銀ロッドが2本ずつ、間隔 $4\ \mu\text{m}$ でペアになった構造を2次元アレイ化したメタマテリアルを作製した。このメタマテリアルの磁気特性を FT-IR を用いて評価した結果、 $600\ \text{cm}^{-1}$ 付近にロッドペアと入射磁場との相互作用に起因する吸収ピークを観測した。この実験結果が、作製したロッドペアアレイをモデルに行なった数値解析結果と一致することを確認した。

総括では、本研究で得られた結果をまとめて考察し、本論文の結論と今後の展望について述べた。

論文審査の結果の要旨

物質の光学特性は、誘電率と透磁率によって表現される。自然界には光に対して磁気応答を示す物質が存在しないため、物質の透磁率は 1.0 であり、光学特性は誘電率のみに依存している。本論文は、この制限を克服するため、自然界には存在しない光学特性を示す人工物質であるメタマテリアルを金属ナノ構造を用いて創製することを提案し、その磁気応答特性の電磁気学的解析、作製技術の開発、および作製したメタマテリアルの磁気特性の実験的検証を行っている。その主な成果を要約すると次の通りである。

(1) ナノ共振器アレイを構成する金、銀、銅の光周波数領域における内部インピーダンスを導出し、これを用いて3次元配列した金属ナノ共振器アレイの電磁気学的な特性を解析し、光周波数領域において磁気応答を実現するのに必要な共振器構造を提案している。また、この解析結果を基に構造を最適化した銀の共振器アレイを用いることで可視光に対する透磁率を、1.0 を中心に ± 3.55 の範囲で制御できることを示している。

(2) 透磁率が 1.0 以外の値をもつ物質においては、光の反射がゼロとなるブリュースター角が S 偏光に対しても発現することを示している。P・S 両偏光に対して同時にブリュースター角を実現する 1 軸性メタマテリアルを新たに提案し、空気とガラスの境界面を光が無反射で透過することを数値計算により確認している。

(3) フェムト秒パルスレーザー光を硝酸銀水溶液中に集光照射し、銀イオンを2光子吸収光還元することで、3次元の金属構造体を作製する手法を提案している。そして、本手法を用いて、バルク体に匹敵する高い導電性を有するマイクロオーダーの3次元銀構造の作製に成功している。

(4) (3) で開発した手法を用いて、銀のロッドペアを2次元アレイ化したメタマテリアルを作製し、このロッドペアアレイと入射磁場との相互作用に起因する、 $600\ \text{cm}^{-1}$ 付近における磁気応答の測定に成功している。さらにこの実験結果が、作製したロッドペアアレイをモデルに行なった数値解析結果と一致することを確認している。

以上のように、本論文では、金属ナノ構造でできたメタマテリアルが示す磁気応答の解析を行ない、そこで得られた知見を光学素子へ応用し、さらにメタマテリアルの作製技術の開発、および磁気特性の実験的検証を通して、光周波数領域において磁気応答を示す人工物質を創製できることを示したものであり、応用物理学、特にナノ光学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。