

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19024

研究課題名（和文）1分割スプリットリング共振器を用いた光磁界分布イメージング技術の開発

研究課題名（英文）Development of optical magnetic distribution imaging technique with single-slit split-ring resonator

研究代表者

岡本 敏弘（OKAMOTO, Toshihiro）

徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・准教授

研究者番号：60274263

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、1分割スプリットリング共振器（SRR）の磁気共鳴モードと、1分割SRRの電気磁気効果によって生じる光散乱現象の関連を明らかにし、光磁界強度の計測及び光磁界分布イメージングの可能性を調査することである。

主な成果の第1は、直径約100nmの1分割スプリットリング共振器の散乱光を観測することで、SRRのリングに垂直な光磁界の強度が測定可能であることを実験的に明らかにしたこと。第2は、この光散乱現象に適した1分割SRRの設計指針を明らかにしたこと。第3は、複数SRRによって、光磁界強度分布を一度に観測できることを明らかにしたことなどである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、光磁界強度及び光磁界強度分布の観測が実現されたことにより、これまで知られていなかった光磁界を介した物理現象を可視化することが可能になると期待される。過去に、電子顕微鏡、原子間力顕微鏡、近接場光学顕微鏡等の発明が様々な物理現象の発見に貢献したように、光磁界分布イメージング技術の発明も未知の物理現象の発見につながる新しい物性評価用ツールに発展する可能性を秘めており、ナノフォトクスをはじめとして様々な分野に大きな影響を与えられよう。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the relationship between the magnetic resonance mode of a single-slit split-ring resonator (SRR) and the light scattering phenomenon caused by the magnetoelectric effect of a single-slit SRR. And it is to investigate the possibility of optical magnetic field intensity measurement and optical magnetic field distribution imaging.

First, it was clarified experimentally that the intensity of the optical magnetic field perpendicular to the SRR ring can be measured by observing the scattered light of the single-slit SRR with a diameter of about 100 nm. Secondly, the design guideline of the single-slit SRR suitable for this light scattering phenomenon was clarified. Third, it was suggested that the optical magnetic field intensity distribution could be observed by multiple single-slit SRRs.

研究分野：光工学・光子科学

キーワード：光磁界分布 スプリットリング共振器 電気磁気効果 光メタマテリアル イメージング

1. 研究開始当初の背景

2000 年前後のメタマテリアルの登場以降、実効的な透磁率の制御や光磁界によるブリュースター現象など、光磁界が関わる現象が注目されるようになった。光磁界と相互作用可能なメタマテリアルを構成する単位構造(メタアトム)として、金属スプリットリング共振器(Split-ring resonator: SRR)が知られている。負の屈折率実現を目指した研究の中で、可視光のような非常に高い周波数の電磁波に共鳴する SRR 構造として、比較的早くから直径が 100nm 程度の金や銀でできた 1 重リング形状の 1 分割 SRR が研究されていた。1 分割 SRR は、その構造の非対称性によって磁気共鳴が入射光電界でも励起されることや双異方性特性が現れること等が知られていた。しかし光磁界を積極的に利用する研究は少なく、光磁界イメージングに関する研究はこれまで行われていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的を次のように置いた。

- (1) 1 分割 SRR における磁気共鳴と、電気磁気効果によって生じる光散乱現象の関連の解明
- (2) 1 分割 SRR の散乱光から光磁界強度の情報が得られることの実証
- (3) 光磁界分布イメージングの実現可能性の調査

3. 研究の方法

(1) 1 分割 SRR における磁気共鳴と、光散乱現象の関連の解明

有限差分時間領域法を用いた電磁界シミュレーション手法を用いて、直径約 100nm の 1 分割 SRR における光散乱スペクトル特性を調査した。現象の理解を容易にするため、図 1 に示す単純な構造の矩形の 1 分割銀 SRR を想定し、SRR の磁気共鳴をリング面に直交する入射光磁界(H_y)によってのみ励起可能な入射条件として、 E_y 偏光の x 方向に伝搬する光を入射光とした。SRR で生じた z 方向に伝搬する散乱光のうち、入射偏光と同じ E_y 偏光成分と入射偏光に直交する E_x 成分のそれぞれの強度について調べた。

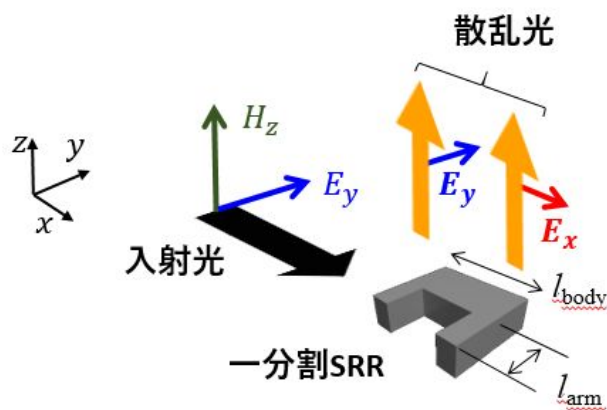


図 1 矩形 1 分割 SRR と光散乱および近接場電磁界シミュレーションモデル

入射磁界によって励起される磁気双極子や、電気磁気効果によって生じる電気双極子等の存在は、SRR 周辺の電磁界分布の他、リング内を流れる電流密度分布を調べることで確認した。また、SRR 形状と、入射光磁界によって生じた散乱光強度の関連を調査し、光磁界検出に適した SRR 形状パラメータについて調査した。

(2) 1 分割 SRR の散乱光を用いた光磁界強度モニタリング実証実験

図 2 のような、S 偏光入射の 2 光束干渉場に置かれた 1 分割 SRR の散乱光を顕微鏡下で観測可能な光学系を構築し、1 個の 1 分割 SRR で生じる散乱光の直交した 2 つの偏光成分それぞれについて測定した。この干渉場は H_z と E_y で干渉条件が異なるため、SRR の励起を H_z のみ(または E_y のみ)で行うことが可能になる。SRR は微小球リソグラフィ法でガラス基板上に作製した直径約 100nm の銀の三日月型 SRR を用いた。光源には波長 780nm の半導体レーザーを使用し、ビームスプリッターで 2 光束に分離後、入射角 45° で SRR が作製された基板の裏面からプリズムを介して照射し、全反射入射とした。片側のビーム光路に位相変調子を挿入し位相遅延させることで、2 光束干渉によって形成された SRR を貫く入射磁界強度を制御し SRR からの散乱光強度との相関について調べた。

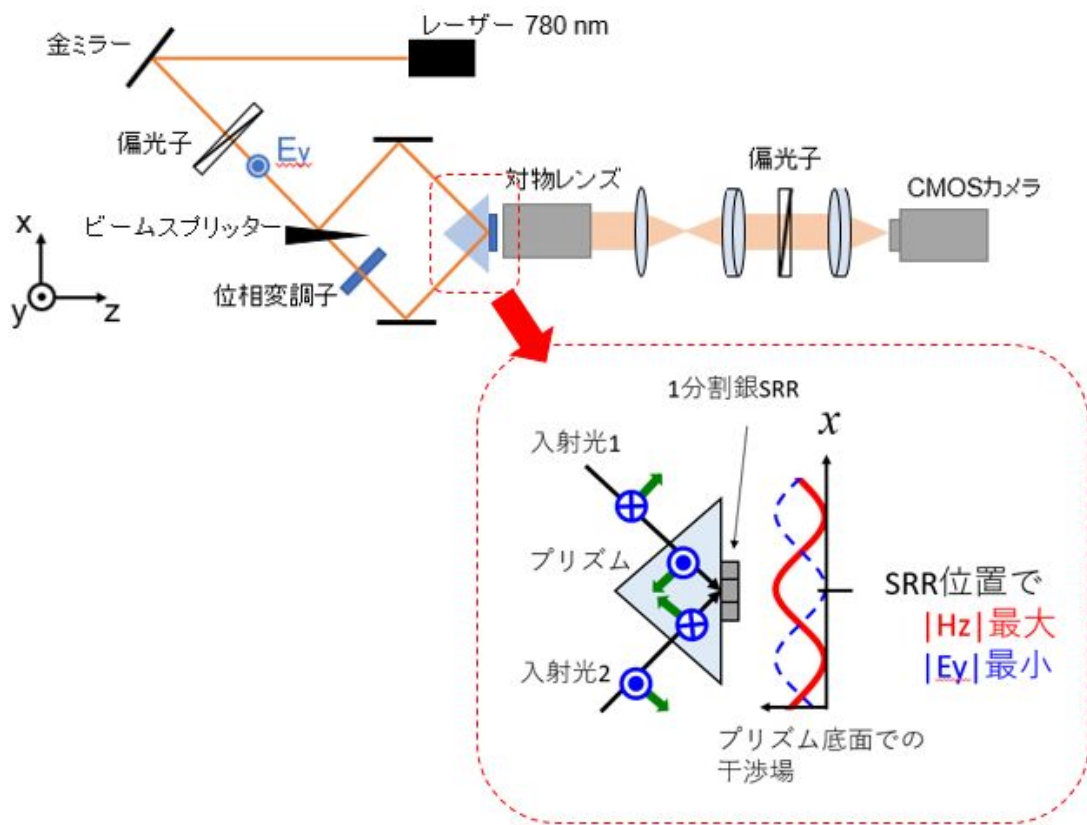


図2 光磁界強度モニタリング実験配置

(3) 光磁界分布イメージングの実現可能性の調査

顕微光学系に設置した高解像度 CMOS カメラを用いて、異なる場所に配置された複数の 1 分割 SRR のそれぞれの光散乱強度を同時に計測し、2 光束干渉で形成された磁界強度分布に対応した信号として得られるのか調査した。

4. 研究成果

(1) 1 分割 SRR における磁気共鳴モードと、光散乱現象の関連の解明

1 個の 1 分割銀 SRR に、磁気共鳴波長に相当する波長の E_y 偏光の入射光を x 方向に入射すると、入射偏光と同じ E_y 偏光の散乱光だけでなく、入射偏光に直交した E_x 偏光の散乱光も生じることを電磁界シミュレーションで確認した。(図 3(a)) この光散乱特性は、SRR 形状や波長によって、 E_y 偏光よりも E_x 偏光成分の方が強くなりうるということが明らかになった。

このときのリング内の電流密度分布は、振動する周回電流が共鳴的に強くなる磁気共鳴を示し、 z 方向の磁気双極子が形成された。同時に、 x 方向に振動する電流成分も現れ、SRR には x 方向の電気双極子が生じることが分かった。(図 3(b)) この x 方向の電気双極子は E_y 偏光入射のまま z 方向から入射させると生じなかったことから、入射電界 E_y によって励起されたものではなく、入射磁界 H_z が x 方向の電気双極子を誘起した「電気磁気効果」であることが結論づけられた。また、 z 方向に伝搬する E_y 偏光の散乱光が生じる原因は、この x 方向の電気双極子であることが明らかになった。

本体部 x 方向の長さ (l_{body}) と、2 つの腕部の長さ (l_{arm}) の異なる様々な形状の矩形 1 分割 SRR において、磁気共鳴波長が $780 \pm 25 \text{ nm}$ となる SRR を比較すると、入射光磁界によって生じる E_x 偏光散乱光強度は、 $l_{\text{body}}/l_{\text{arm}}$ が 2 ~ 2.5 の時に最も高くなり、光磁界検出に適したサイズパラメータであることが分かった。

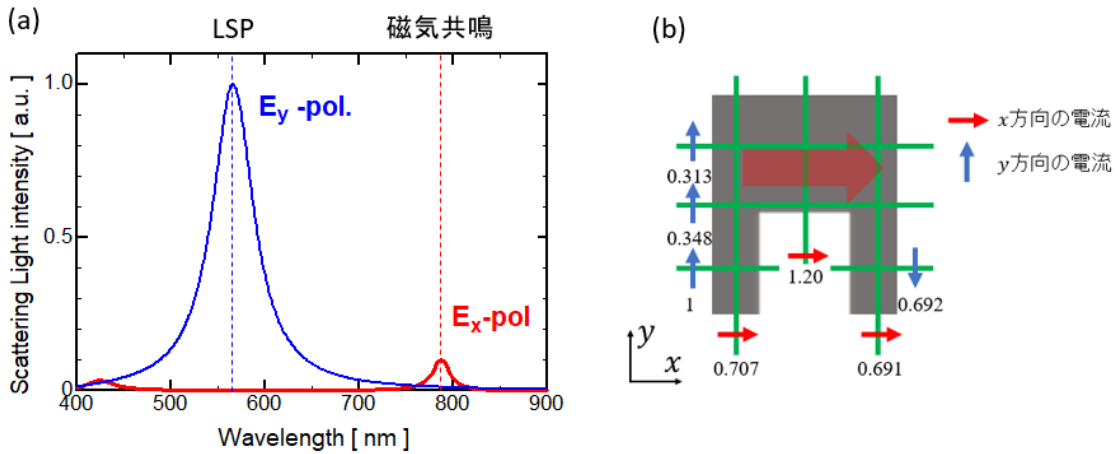


図3 $l_{\text{body}}=80\text{nm}$, $l_{\text{arm}}=45\text{nm}$ の矩形 1 分割 SRR における電磁界シミュレーション結果 (a) 散乱光スペクトル, (b) 波長 787nm における SRR 近傍の磁界から求めた電流密度分布

(2) 1 分割 SRR の散乱光を用いた光磁界強度モニタリング実証実験

微小球リソグラフィ法を用いて三日月型の 1 分割銀 SRR を作製し、S 偏光入射の 2 光束干渉場に置かれた 1 分割 SRR の散乱光強度を観測すると、片側のビームの位相遅延量変化に対し、 E_y 偏光成分と E_x 偏光成分で半波長シフトした散乱光強度特性が確認された。これは、散乱光のそれぞれの偏光成分が、異なる入射光成分 E_y または H_z によってそれぞれ励起されたことを意味する。研究成果(1)の結果をふまえると E_x 偏光散乱光は入射光磁界に起因し、その強度は入射光磁界強度に依存することが明らかになった。

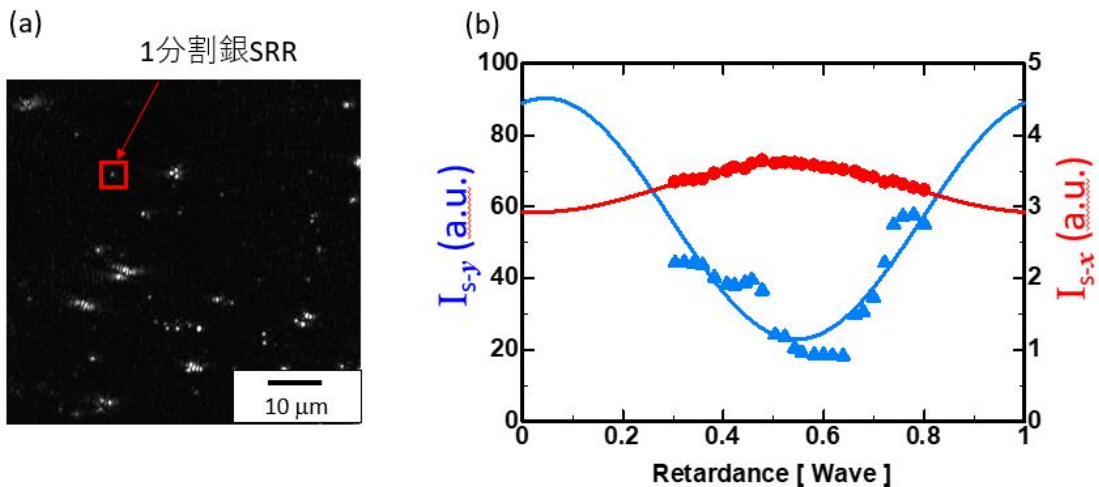


図4 2 光束干渉場に置かれた 1 分割銀 SRR の散乱光特性 (入射波長 780nm) (a) 暗視野光学像 (赤四角内の光点が実験に用いた SRR), (b) 位相遅延量に対する散乱光強度の E_y 偏光成分 I_{s-y} 及び E_x 偏光成分 I_{s-x} の変化

(3) 光磁界分布イメージングの実現可能性の調査

プリズム底面に数 10 ミクロン離れて分布する複数の SRR で生じる個々の散乱光強度を CMOS カメラで同時に観測した結果、散乱光強度が極大となる液晶リターダの位相遅延量は SRR によって異なることが確認された。これは光磁界強度が最大となる 2 光束干渉条件が場所によって異なることを反映した結果であり、言い換えれば各々の場所における光磁界強度の違いが個々の SRR の散乱光強度の違いとして観測できたことを意味する。以上の結果より、1 分割 SRR を用いることで光磁界の空間分布イメージングが原理的に可能であると結論づけた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣中 厚祐, 岡本 敏弘, 山口 堅三, 原口 雅宣
2. 発表標題 1分割スプリットリング共振器における電気磁気効果の形状依存性
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣中 厚祐, 福田 知洋, 岡本 敏弘, 原口 雅宣
2. 発表標題 1分割スプリットリング共振器から成る2次元メタマテリアルの電気磁気効果による光散乱の観測
3. 学会等名 2019年度応用物理・物理系学会中国四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 敏弘
2. 発表標題 金属スプリットリング共振器と光メタマテリアル
3. 学会等名 日本光学会ナノオプティクス研究グループ 第25回研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富田亮, 岡本敏弘, 谷川紘太, 鎌田隼, 岩本知佳, 福田知洋, 栗田真, 北岡昌真, 原口雅宣
2. 発表標題 バルク光メタマテリアルの実現に向けた取り組み
3. 学会等名 LED総合フォーラム2019in徳島
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 敏弘
2. 発表標題 光磁界と相互作用する金属スプリットリング共振器で構成された光メタマテリアルの開発
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高島 和起, 岡本 敏弘, 廣中 厚祐, 山口 堅三, 原口 雅宣
2. 発表標題 1分割リング型共振器を用いた局所光磁界の検出
3. 学会等名 第18回プラズモニクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	原口 雅宣 (HARAGUCHI Masanobu) (20198906)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部（理工学域）・教授 (16101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------