

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740270

研究課題名(和文)メタマテリアルを用いた単一光子源の開発と輻射場制御

研究課題名(英文)Development of single photon source and radiation control with metamaterials

研究代表者

中山 和之(NAKAYAMA, Kazuyuki)

福岡大学・理学部・助教

研究者番号：80602721

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：多層膜メタマテリアルを用いた輻射場の制御について研究した。多層膜の高精度な作製に重要な四検出器型エリプソメトリの改良を行い、最適な膜厚推定を可能とした。メタマテリアルのサブ波長構造内に準周期秩序を導入した準周期メタマテリアルを提案し、マネトロンスパッタリング法も用いて Ag と SiO₂ からなる準周期メタマテリアルを作製した。メタマテリアル近傍の量子ドットからの発光をストリークカメラにより計測し、寿命の減少を確認した。準周期メタマテリアルによる光と物質の相互作用の増強を立証した。

研究成果の概要(英文)：Manipulation of radiation field with multi-layer metamaterial was studied. We have improved the design of four-detector polarimeter, which is important for precise fabrication of multi-layers, and optimized the precision of film thickness. We have proposed a novel metamaterial called quasi-periodic metamaterial, which has a sub-wavelength quasi-periodic order. The metamaterial was fabricated by a magnetron sputtering method with Ag and SiO₂. A fluorescence measurement of quantum dots near the quasi-periodic metamaterial was performed with a streak camera and a reduction of life time was observed. The enhancement of light-matter interaction with quasi-periodic metamaterial was conformed.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：メタマテリアル 量子光学

1. 研究開始当初の背景

近年量子通信、量子情報、量子コンピュータを研究する上で、ロバストな単一光子源の開発が求められている。単一光子源は応用の観点だけでなく、自然放出やカシミール効果など光と物質の相互作用の素過程の研究においても極めて重要である。単独の原子もしくは人工原子である量子ドットを光源として用いる上で問題となるには、発光過程が自然放出によって決まっていることである。そのため光子源の繰り返しレートが制限され、輻射パターンも等方的になるため特定のモードへの発光レートが極めて低い。このため共振器などを用いて真空場の状態密度(DOS)を変化させ、発光を増強させるパーセル効果など、輻射場の制御技術が活発に研究されてきた。最近では、プラズモン共鳴を利用した量子ドットの発光制御や、量子ドットを用いた真空ラビ分裂など量子ドットを用いた共振器電磁気学実験が注目を浴びている。

申請者は現在用いられている単一光子源を構成する要素をよりロバストに、言い換えれば熱力学的に安定なものを用いる必要があると強く感じていた。そこで室温で自然界にはない電磁応答を示す新奇な物質であり、透明マントや光学分解能を越えるレンズなどで注目を受けているメタマテリアルを用いた輻射場制御に着目した。特にハイパボリックメタマテリアル(HMM)と呼ばれ、非等方的な媒質の持つ誘電率を持つ物質を研究対象とした。HMMはDOSに特異点を持っており、これに起因して非常に光と物質の結合が大きい。HMMを用いて共鳴に頼らない広帯域なパーセル効果など光と原子の相互作用の制御に関する新規なスキームが提案され、いくつかの実証実験がすすめられていたが、最適な構造設計やナノ構造近傍の物理過程において不明な点が多かった。そのため単一光源や面発光レーザーなどの光源開発はもちろんのこと、ナノ構造近傍の光-物質相互作用が重要となるMEMSやNEMSにおいても、メタマテリアル近傍の原子の特性の研究は重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究として高質なHMMの作製技術の確立とHMMを用いた輻射場制御の研究と新奇な物理現象の開拓を目的とした。HMMは、金属-誘電体の多層膜から成る多層膜メタマテリアルを採用した。まず高精度な多層膜を作製するために成膜装置の開発を行う。メタマテリアルによる制御対象として、人工発光体である量子ドットを考える。光と物質の相互作用が増強するメタマテリアル構造を設計、作製する。量子ドットの発光過程の変化を実験的に観測することでこれを立証する。

3. 研究の方法

(1) 本研究で取り扱う多層膜メタマテリアルは高質な金属-誘電体多層膜の成膜が重要となる。多層膜を作製する場合、成膜レートの割り出しが重要であり、これは通常装置を真空から開放し、成膜レートを事前に割り出す必要がある。しかしながら成膜レートは毎回の実験で微妙に変わるものであり、真空を破らずに複数の材質の成膜レートを割り出すことが求められる。そこでその場計測が可能な四検出器型エリプソメトリ(FDP)の手法を改良し、膜厚測定装置の開発を行う。

(2) 多層膜メタマテリアルによって制御される状態密度を数値計算で見積もり、最適な多層膜構造の設計を行う。成果に詳しく述べるが、この際サブ波長内の構造秩序として準周期を導入することにより、準周期由来の強い光-物質相互作用が生じることを見出した。AgとSiO₂の薄膜を積層した多層膜メタマテリアルを作製し、メタマテリアル表面近傍に量子ドットを塗布し、その発光をpsパルスシステムと同期したストリークカメラを用いて時間領域、周波数領域の測定を行い、構造体による発光レートの制御性を調べる。

4. 研究成果

(1) FDPでは事前に既知の偏光を用いてFDPの偏光特性(以下特性行列と呼ぶ)を求め、FDPによって測定されたデータから逆問題として対象とする光の偏光解析を行うものである。従来アプローチでは、FDPを構成する光学素子によって自動的に決まる装置固有の特性行列を用いて偏光解析を行ってきた。与えられたFDPの特性行列によってはSN比の観点から十分な計測結果を得ることができず、最も悪い条件下では、再現性のある解析結果さえ得ることができない。我々は従来FDPに $\lambda/4$ 波長板を二枚追加することにより、任意の特性行列を構成することが可能であることを見出した。図1に改良されたFDP装置を示す。図2は特性行列を変化させた時の偏光状態の測定例であり、赤線は実験値、黒線はシミュレーションを示す。図2左側に示される最適化されたFDPによる計測結果がシミュレーションと極めて高い精度で一致する事が分かる。本研究により多層膜構造を作製するにあたり、リアルタイムで高い精度で膜厚を計測することが可能となった。

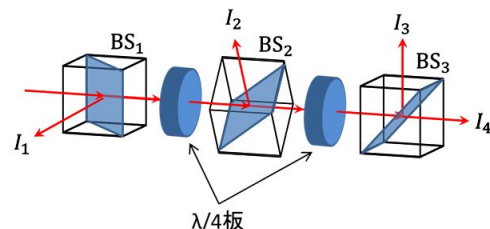


図 1

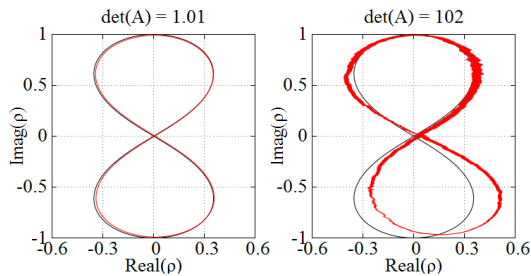


図 2

(2) 従来の HMM の研究ではその特性を考える上でサブ波長構造内の秩序性があまり注目されて来なかった。我々はランダムもしくは周期構造しか考慮されてこなかった HMM の構造内に、準周期構造を導入することで光-物質相互作用の増強が可能であることを見出した。図 3 に一次元準周期配列であるフィボナッチ格子に基づいて Ag と SiO₂ の薄膜を積層した構造体 (FM) を示す。各層の基本の厚みを 20 nm とし、発光波長 640 nm の発光体を多層膜の表面から 20 nm の位置に配置する。準周期由来のモードの寄与を明確にするため、Ag と SiO₂ の層の厚さ比が黄金比となるよう周期的に並べた構造体 (PM) も同様に研究する。図 4 は、第 6 世代のフィボナッチ多層膜 (FM6) と近い構造長を持つ 6 周期多層膜 (PM6) での DOS の計算結果を示す。

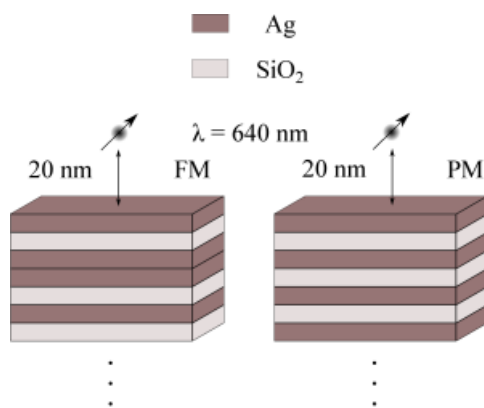


図 3

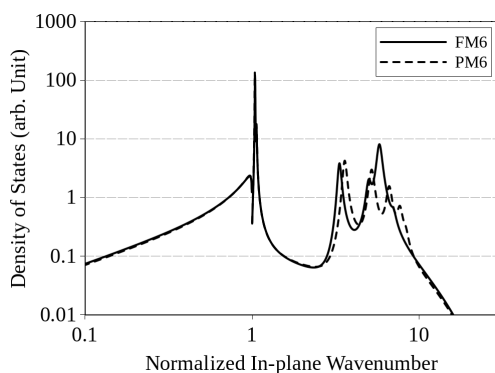


図 4

DOS 内の非等方的な誘電率による高波数モード中に、FM6 ではさらに特徴的なピーク構造を持つことが分かる。この DOS の持つ特異性のためフィボナッチ多層膜では光-物質相互作用がより増強される。多層膜構造は奈良先端大学院大学の富田助教の協力のもとマグネトロンスパッタリング法で作製し、発光体として量子ドットをスピンコート法で塗布することによりサンプルを作製した。ピコ秒チタンサファイヤレーザーで発生した 800 nm の光の第二高調波を、量子ドットの発光寿命測定用励起光源として用いた。発光寿命測定は、ストリークカメラにより行った (図 5)。発光寿命測定結果を図 6 に示す。準周期的に積層したサンプルにおいて、発光寿命がもっとも短くなっており、準周期由来する相互作用の増強が立証された。

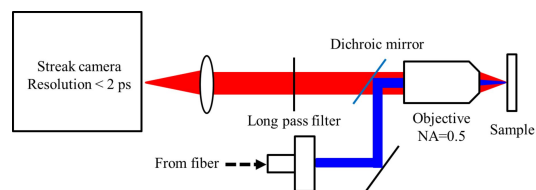


図 5

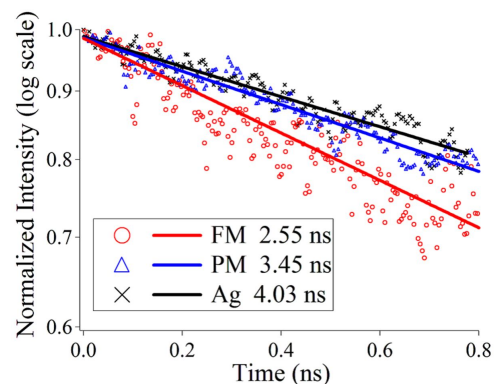


図 6

本研究ではストリークカメラを用いた光の強度測定を行った。今後はメタ材料によって制御された光の量子性を計測するため、単一光子検出器を用いた光子相関実験をすすめ、制御された光の量子性について検証を行う。本研究により、ロバストな単一光子源の実現や、メタ材料を用いた新たな共振器量子電磁気学の研究が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

1. 鈴木 敏大, 中山 和之, 大野 誠吾, 石原 照也, 四検光子型偏光解析装置の最適化,

- 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 16 日, 同志社大学
2. K. Nakayama, Y. Moritake, T. Suzuki, H. Kurosawa, T. Kodama, S. Tomita, H. Yanagi, and T. Ishihara, Manipulation of Spontaneous Emission with Quasi-periodic Metamaterials, The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2013 年 7 月 1 日, Kyoto, Japan
 3. Y. Moritake, K. Nakayama, T. Suzuki, H. Kurosawa, T. Kodama, S. Tomita, H. Yanagi, and T. Ishihara, Controlling spontaneous emission using a quasi-periodically stratified metal-dielectric metamaterial, 3rd Korea-Japan Metamaterials Forum, 2013 年 6 月 27 日, Ewha Womans University, Seoul, Korea
 4. 森竹 勇斗、中山 和之、鈴木 敏大、黒澤裕之、大野 誠吾、児玉 俊之、富田 知志、柳 久雄、石原照也, サブ波長フィボナッチ構造を用いた自然放出増強, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学
 5. 中山 和之、森竹 勇斗、石原照也, 準周期メタマテリアルによる発光制御, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学
 6. 森竹 勇斗、中山 和之、石原照也, 準周期的に積層された金属誘電体メタマテリアル中の電磁状態密度, 第 23 回光物性研究会, 2012 年 12 月 7 日, 大阪市立大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 和之 (NAKAYAMA, Kazuyuki)
 福岡大学・理学部・助教
 研究者番号：24740270

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：