

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889001

研究課題名(和文) 微小共振器のキラリティ制御による偏光量子もつれ光子対発生の研究

研究課題名(英文) Polarization entangled photon pair generation controlled by chirality of micro-cavity

研究代表者

黒澤 裕之 (KUROSAWA, HIROYUKI)

北海道大学・電子科学研究所・研究員

研究者番号：20708367

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：半導体ピラーを透明な絶縁膜を介して金属に埋め込んだ共振器において、高いQ値が発生するメカニズムを数値計算および解析的に調べた。共振器のQ値に関して数値シミュレーションを用いて評価し、共振器の特性を調べた。実際に金属埋め込み型半導体ピラー共振器を、電子線描画とドライエッチング技術を使って作製して、n型GaAsの不純物発光をプローブとしてそのQ値を評価した。共振器にL型のカイラリティーを導入して、その共振器特性を探索した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the generation mechanism of high quality (Q) factor in a metal-embedded semiconductor pillar cavity. The properties of the cavity including its Q factor were revealed by numerical and analytical calculations. We fabricated the metal-embedded cavity by electron beam lithography and dry etching techniques. The Q factor of the cavity was probed by DA pair emission of n-GaAs and evaluated. Gammadion type chirality was introduced into the cavity. The Q factor and radiation field of the cavity mode were investigated by numerical calculation.

研究分野：量子もつれ光子対

キーワード：量子ドット 共振器 高Q値 カイラリティー

1. 研究開始当初の背景

安心・安全な通信の必要性が増す昨今、量子情報通信への期待が増している。実用化のためには通信距離の拡大が必要である。通信距離を拡大するためには、量子リピーターと呼ばれる中継器の開発が必須である。その中心は量子もつれ光子対源を二つ使った量子スワッピングである。すなわち、二つの光子源からそれぞれ送られてきた光子間で「ベル測定」を行うと、もう一方の光子間に量子もつれが発生し、通信距離をさらに倍に増やすことができる。「ベル測定」を行うには、識別不可能な光子が二つの光源から同時に測定点に到達し測定される必要がある。これまでに研究されてきたパラメトリック下方変換では光子発生がポアソン統計に従っており、オンデマンドな光子対発生ではない。また、量子ドットにおける励起子分子・励起子のカスケード過程を使った量子もつれ光子対発生では、光子対発生の時間的なタイミングが揺らぎ、大きな課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、共振器効果により量子ドットからの2光子同時放出を増強し、固体光源によるオンデマンド量子もつれ光子対発生を実現するとともに、共振器のキラリティを操作することにより偏光特性を制御することを目的とする。本研究においては、半導体ディスク型共振器を金属に埋め込んだ金属埋め込み型半導体微小共振器を研究する。この共振器は高い光取り出し効率を有しており、高輝度な量子もつれ光子対の発生を可能にする有望な共振器である。

共振器をキラリティーを持つように微細加工して、光場の制御により量子ドットから発生する光子対の偏光制御を行う。これまでこのような提案はなく、独創性が高くユニークな光子源の実現が期待される。

3. 研究の方法

有限要素法をベースにした数値シミュレーションを用いて、金属埋め込み型微小共振器のQ値を評価する。共振器の構造パラメータ

を系統的に変化させ、共振器の構造パラメータとQ値の関係を明らかにする。その結果に基づいて、金属埋め込み型微小共振器のQ値を解析的に議論する。高いQ値を得ることができる指針が得られたら、共振器にカイラリティーを導入して、そのQ値と輻射場の特性の評価を行う。

実際のサンプル作製においては、半導体基板上に化学気相成長(CVD)を用いてマスク用のSiO₂を成膜する。続いて電子線描画装置を使って円形のレジストマスクパターンを作製する。RIE装置を用いて、SiO₂マスクをピラー状に加工して、エッチングマスクとして用いる。続いてSiO₂をマスクとしてICP-RIE装置で半導体をピラー状に加工する。半導体ピラーにCVD装置でSiO₂をコーティングする。SiO₂でコーティングされた半導体ピラーを、電子線蒸着装置にて銀(Ag)を蒸着して埋め込みを行う。銀で埋め込まれた半導体ピラーを反転させて、ガラス支持基板に接着し、埋め込まれずに残っている半導体基板を湿式機械研磨およびICP-RIE装置にて除去する。以上のような過程で金属埋め込み型半導体共振器の作製を行う。

作製した金属埋め込み型半導体微小共振器からの発光(PL)スペクトルを測定して、その線幅を評価することでQ値の実測を行う。

4. 研究成果

(1)金属埋め込み型半導体微小光共振器の高Q値化のメカニズムの解明。

金属埋め込み型微小光共振器において、波動方程式を使った解析を行った。まず、円筒座標系における波動方程式において、変数変換を行い1次元のシュレーディンガー方程式と同じ形に波動方程式を変形した。この式変形によって、波動の問題を粒子の問題に置き換えることができ、直感的な議論が可能となった。このシュレーディンガー型方程式から円筒座標系における電磁場の問題は、以下のポテンシャル中の量子力学粒子の運動と等価であることが分かった。

$$V_{\text{eff}}(r) = \frac{\hbar^2}{2m} \left[\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 (1 - \varepsilon) + \frac{l^2 - 1/4}{r^2} \right]$$

ここで、 \hbar 、 m および l はそれぞれプランク定数、光子の仮想質量、およびモードナンバーである。また、 ε は誘電率であり、 r はディスク中心からの距離である。および c はそれぞれ角周波数と真空中の光速である。このポテンシャルを具体的に図示したところ、絶縁膜の厚さが薄い場合半導体ピラー共振器の縁に局在する電磁モード(whispering gallery mode)が励起可能であるものの、絶縁膜が薄いので金属の損失が無視できないほど大きいことが分かった。一方で、絶縁膜の厚さを厚

くすると半導体ピラーの縁に局在する電磁モードの金属損失は小さくなるものの、光のトンネル効果によって共振器から光が漏れだしてしまっていて、放射損失が大きくなるということが分かった。これらの解析から、ピラー型共振器と金属との間に挿入する絶縁膜には最適値が存在し、トンネル効果を起こさない程度に厚い絶縁膜が高いQ値を得る鍵であることが分かった。また、上述の有効ポテンシャルは誘電率にマイナスがかかっていることから、誘電率が小さいほどポテンシャルバリアが大きくなるということが分かる。吸収損失を抑制するためには透明材料であることが必要であるため、絶縁膜として最適な材料は空気(真空)であることが分かった。また、自由空間と半導体ピラーとの距離を制御することで、共振器からの光取り出し効率が制御可能であることが分かった。

これらの解析を基に数値計算を行って共振器の設計を行ったところ、金属埋め込み型半導体微小共振器のQ値が4,000,000程度まで高められることが分かった。

(2)室温かつ通信波長帯域におけるQ値~1,100の観測

(1)で明らかにした高Q値が得られる指針に基づいて、金属埋め込み型半導体微小共振器を実際に作製して、PLスペクトルからそのQ値を見積もった。作製したピラー共振器の直径は1.5 μmで、その高さは600 nmである。金属と半導体ピラーの間に挿入する絶縁膜の厚さを340 nmとした。金属埋め込み型半導体微小共振器共振器からのPLスペクトルを測定した結果、1366 nm付近にQ値~1,100の高い共振器モードを観測することに成功した。

(3)カイラル型共振の共振特性の解明

共振器にカイラリティを導入して、共振器Q値とその輻射場の性質を調べた。ピラー型共振器の形状を円型に変更した。円型構造として右円型と左円型の構造を設計・導入して、その共振器特性に関して数値計算を使って調べた。金属埋め込み型半導体円型微小共振器においては、その共振器Q値は3,000程度であった。この値はピラー型共振器のQ値と比較すると小さな値ではあるが、金属系共振器としては大きな値であり、円型共振器においても高いQ値が得られることが分かった。円型共振器からの輻射場は、円型構造を反映して鏡映対称性が破れた輻射場を有していた。このことは、共振器にカイラル構造を導入することで輻射場が制御可能であり、それと結合する量子ドットからの光子をも制御することが可能

であることを意味している。また、カイラル構造を右円型から左円型へ反転させると、共振モードの輻射場のカイラリティもまた反転することを確かめた。

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6件)

Nagisa Ishihara, Hiroyuki Kurosawa, Ryo

Takemoto, Jahan Nahid, Hideaki Nakajima,

Hidekazu Kumano, and Ikuo Suemune

"Subwavelength metallic cavities with high-Q resonance modes", *Nanotechnology* **21**, 085201 (2015). 査読あり

S. S. Mou, H. Irie, Y. Asano, K. Akahane, H. Kurosawa, H. Nakajima, H. Kumano, M.

Sasaki, and I. Suemune, "Superconducting

Light-Emitting Diodes", *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM*

ELECTRONICS **21**, 7900111-1-11 (2015).

査読あり

Kanta Kusawa, H. Kurosawa, Seigo Ohno,

Yozaburo Sakaki, Kazuyuki Nakayama, Yuto

Moritake, and Teruya Ishihara

"Waveguide-mode interference lithography technique for high contrast subwavelength structures in the visible region", *Opt. Express* **22**, 18748-18756 (2014). 査読あり

Yuto Moritake, Kazuyuki Nakayama,

Toshihiro Suzuki, H. Kurosawa, Toshiyuki

Kodama, Satoshi Tomita, Hisao Yanagi, and

Teruya Ishihara, "Lifetime reduction of a

quantum emitter with quasi-periodic metamaterials", *Phys. Rev. B* **90**, 075146:1-6

(2014). 査読あり

R. Takemoto, N. Ishihara, H. Kurosawa, N. A.

Jahan, T. Asano, X. Liu, H. Nakajima, H.

Kumano and I. Suemune "High-Q resonance

modes observed in a metallic nanocavity",

Appl. Phys. Lett. **103**, 191104:1-4 (2013).

査読あり

Hiromasa Suo, Keisuke Takano, Seigo Ohno, Hiroyuki Kurosawa, Kazuyuki Nakayama, Teruya Ishihara and Masanori Hangyo "Polarization property of terahertz emission from gammadion-type photoconductive antenna", Appl. Phys. Lett. **103**, 111106: 1-4 (2013). 査読あり

[学会発表](計 7 件)

細井響子、高橋 亨、黒澤裕之、中島秀朗、赤羽浩一、熊野英和、末宗幾夫、早瀬潤子: 「InP(311)B 基板上 InAs 量子ドットからの単一光子発生とその温度特性」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学 湘南キャンパス(神奈川県・平塚市) (2015-03-12).

H. Kurosawa, N. Ishihara, R. Takemoto, N. A. Jahan, H. Nakajima, H. Kumano, and I. Suemune: "Observation of high Q cavity mode in metal embedded nano-pillars", 15th RIES-Hokudai International Symposium, December 16, 2014, CHÂTERAISE Gateaux Kingdom SAPPORO (Sapporo・Hokkaido).

黒澤裕之、澤田桂、熊野英和、末宗幾夫: 「一般化された光線方程式と磁気カイラルメタマテリアルにおける光のローレンツ力」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学 春日井キャンパス(愛知県・春日井市) (2014-09-07).

S. S. Mou, H. Irie, K. Akahane, H. Kurosawa, H. Nakajima, H. Kumano, M. Sasaki, and I. Suemune: "Signature of superconducting density of states in luminescence spectra of InAs quantum dots", International conference on solid state devices and materials (SSDM 2014), September 11, 2014, Tsukuba International Congress Center (Tsukuba・Ibaraki).

H. Kurosawa, N. Ishihara, R. Takemoto, N. A. Jahan, H. Nakajima, H. Kumano and I. Suemune: "Observation of high Q cavity mode in metal embedded nano-pillars", The 41st International Symposium on Compound

Semiconductor (ISCS2014, Compound Semiconductor week 2014), May 14, 2014, Montpellier (France).

黒澤裕之, 石原渚, 竹本亮, N. A. Jahan, 中島秀朗, 熊野英和, 末宗幾夫: 「金属埋込み型半導体ナノピラー共振器における高 Q 値の発生機構」, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学 相模原キャンパス(神奈川県・相模原市) (2014-03-17).

H. Kurosawa, N. Ishihara, R. Takemoto, N. A. Jahan, H. Nakajima, H. Kumano, and I. Suemune: "Observation of high-Q resonance modes from metal-coated nanocavities and future prospect based on cavity mode simulation", SPIE Photonics West 2014, February 3, 2014, San Francisco, California, USA.

石原渚、竹本亮、黒澤裕之、末宗幾夫: 「金属誘電体遮蔽半導体ピラー構造を用いたナノ共振器による高 Q 共振ピークの観測」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学 京田辺キャンパス(京都府・京田辺市) (2013-09-18).

竹本亮、石原渚、黒澤裕之、末宗幾夫: 「金属-誘電体遮蔽半導体ピラー構造の微小光共振器作製とその評価」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学 京田辺キャンパス(京都府・京田辺市) (2013-09-19).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒澤 裕之 (KUROSAWA HIROYUKI)
北海道大学・電子科学研究所・博士研究員
研究者番号: 20708367

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: