

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860014

研究課題名（和文） 人工ナノ構造による局在電磁場を用いた多重極遷移の制御

研究課題名（英文） Control of multipole transition with localized electric magnetic field on artificial nanostructures

研究代表者 小西 邦昭 (KONOSHI KUNIAKI)

東京大学・大学院工学系研究科・特任助教

研究者番号：60543072

研究成果の概要（和文）：

ガリウム砒素系の半導体薄膜を用いて、量子ドットが埋め込まれた光導波路の上に円型の格子構造を有する「半導体人工キラリナノ周期構造」を作製した。通常、真空中では等方的な自然放出をする発光体が、この構造のカイラリティーの効果によって円偏光を放射することを実証した。外部磁場を用いずに室温で簡便に円偏光放射を得るための新しい手法であり、円偏光を用いたスピントロニクスや量子情報技術への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：

We fabricated GaAs-based semiconductor planar chiral nanostructures, which consist of periodic gammadion strictures on a waveguide layer with quantum dots. We demonstrated that isotropic emitters radiate circularly polarized light by the effect of the chirality of this structure. This is a new simple method to realize circularly polarized emission at room temperature without external magnetic fields, and can be applied as a circularly polarized light source to spintronics and quantum information technology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：光物性物理学、量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用工学・量子光光学

キーワード：光物性物理学、キラリティー、ナノ構造、フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

光と物質の相互作用において、物質のサイズに比べて光の電磁場の波長が十分に長い場合は、相互作用ハミルトニアン¹の多重極展開の最低次の項である電気双極子相互作用の効果²が支配的になり、より高次の磁気双極子相互作用や電気四重極子相互作用の寄与はその 10^{-6} 程度にしかならない。このため、通常は高次の多重極相互作用が観測されるのは電気双極子相互作用が禁制となる場合であり、その場合でもその効果は非常に小さい。

しかしながら、磁気双極子遷移や電気四重極子遷移によって、等方的媒質中における二次の非線形光学効果の発現や、等方的媒質中における偏光回転現象である光学活性など、電気双極子相互作用のみでは生じ得ない様々な光学応答を生じさせることが知られている。これらの多重極光学遷移を、より簡便な手法によって効果的に増大させ、かつ自在に制御することが可能になれば、物質中における新たな光機能発現手法となることが期待される。

このような光の波長よりも小さな人工

ナノ構造の作製は、電子線ビームリソグラフィに代表される近年の微細構造形成技術の進展により可能になった。このような微細構造に光が共鳴的に入射した場合、局所的な電磁場増強が生じることが明らかになっている。このような局所的な巨大電場の存在は、同時にその周囲で大きな電場勾配が生じていることを意味しており、このような局所増強電場の近傍においては、上記のように、最低次の電気双極子遷移の効果のみでは記述できない効果が増大することが予想される。ここでナノ構造を用いる大きなメリットは、共鳴効果による電場増強効果によって非常に大きな電場勾配が実現可能であること、およびその構造の設計によって電磁場分布や共鳴波長を自在に制御することが可能であるということ、さらにナノ構造の配置によって放射パターンの制御も可能となることが挙げられる。

研究代表者はこれまでに、キラリティーを有する形状のナノ構造における巨大旋光性の発現についての研究を進めてきた。金属キラリナノ構造における巨大旋光性の発現メカニズムは、入射光によって構造中に誘起されるマクロナ磁気双極子モーメント及び電気四重極子モーメントの効果によって理解することができる。このように、光によってナノ構造中に誘起される特異な電磁場分布は、その構造の内部に置かれた発光体の制御にも用いることが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

電磁場の振動方向が、光の進行に伴って右回り、もしくは左回りに変化していくような性質を持つ光を“円偏光”と呼ぶ。生体中で重要な役割を担っているキラリ分子は、片方の回転方向の円偏光のみと強く相互作用するため、生体分子の検出や選択的生成には円偏光状態の光が必要である。また、円偏光状態の光は、固体中の電子スピンと相互作用するため、電子スピン制御に基づいた新しいエレクトロニクス(スピントロニクス)や量子情報技術においても重要である。

これまででは、円偏光状態の光を得るためには、他から放出された光を液晶や固体結晶の偏光フィルターを通して円偏光化する手法が一般的であった。しかしながら、光がフィルターを通る際には、所望の円偏光状態以外の光は捨てられてしまうため、エネルギー利用効率が低くなってしまいう問題がある。また、複数の光学素子を組み合わせるために、デバイスの小型化が難しいという点も問題となる。これらの問題点を解決するためには、フィルターを用いることなく、円偏光の光を直接発するデバイスが実現できればよい。

本研究は、人工キラリナノ構造の内部に生

じる、左右円偏光モードに対して異なる応答を示す特異な局所電磁場分布を利用し、その内部に発光体を配置することによって、直接円偏光状態の光を放射するデバイスを実現することを目的とする。

3. 研究の方法

我々は、分子線エピタキシー法を用いて作製した $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 層上の GaAs 薄膜に対して、電子線ビームリソグラフィ、反応性イオンエッチングを行うことにより、光導波路の上に円型の格子が周期的に配置された人工構造(半導体人工キラリナノ周期構造)を作製した(図1)。このような円形の構造は、生体分子と同様に、鏡に映した形がもとの形と重ならないという特徴(キラリティー)を持ち、透過光において巨大な旋光性が観測されることが知られている。導波路層の内部には、発光体として InAs 量子ドットが配置されている。導波路層近傍では、共鳴波長において局在電場が増強されることが知られており、左右円偏光に対する異方性が大きく増大する可能性がある。量子ドットを光励起し、その際の発光スペクトルの左右円偏光成分をそれぞれ測定することによって、放射される光の円偏光度を評価した。

また、数値計算シミュレーションを用いて、人工キラリナノ周期構造の近傍の真空場電磁場モード分布を計算して放射される光の円偏光度を見積り、実験結果との比較を行なった。

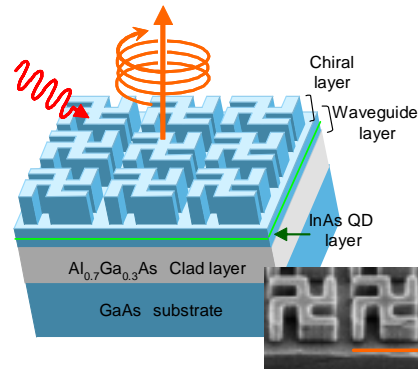


図1 半導体人工キラリナノ周期構造の模式図とSEM像。スケールバー(橙色)の長さは1 μm 。

4. 研究成果

光励起によって試料垂直方向に放射される光の左右円偏光成分の測定結果を、図2(a), (b)に示す。通常の量子ドットからの発光では、左右円偏光成分(I_{LCP} , I_{RCP})のスペクトルに違いは観測されないのに対し、半導体人工キラリナノ構造からの放射スペクトルでは、その形状が大きく異なっている。人工キラリナノ構造のキラリティー(円の向き)を逆にすると、放射される左右円偏光スペクトルも逆になることから、この効果が構造のキラリティーによるものであることがわかる。

測定した左右円偏光スペクトルから算出した円偏光度 ($= (I_{LCP} - I_{RCP}) / (I_{LCP} + I_{RCP})$) の波長依存性を図 2(c) に示す。観測された円偏光度は、1004nm において最大-26.4%に達した。

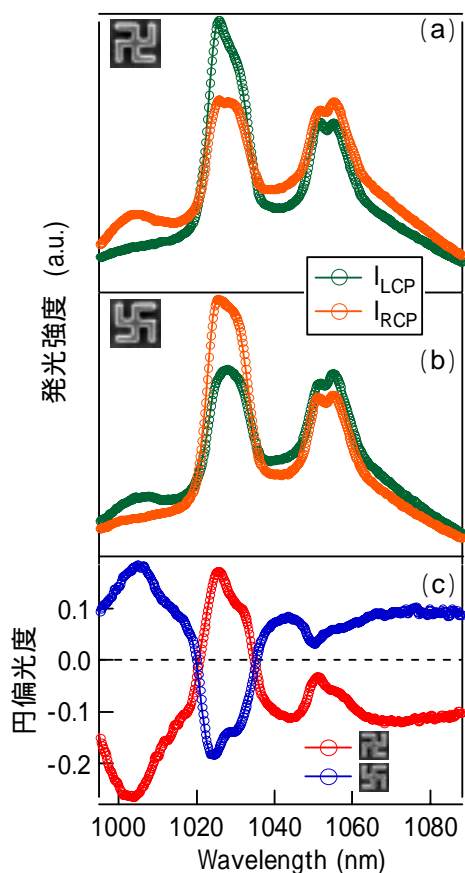


図 2 左向き卍(a)及び右向き卍(b)試料からの発光スペクトル。ILCP: 左円偏光成分、IRCP: 右円偏光成分。(c) 左向きおよび右向き卍試料からの発光の円偏光度。

観測された円偏光度と、人工キラリナノ構造の内部に誘起される真空場分布との関係を明らかにするため、数値計算シミュレーションを行った。発光体からの、各真空場モードへの自然放出レートは、その発光体の位置における真空場モードの電場強度の二乗に比例する。ここでは、構造の垂直方向の無限遠方において、左右円偏光の平面波に接続する真空場モードの、構造近傍における強度分布を計算した。結果を図 3(a)(b)に示す。右回り円偏光モードの電場強度が、構造の内部で大きくなっており、特に導波路層とキラリ層に強く局在していることがわかる。実際の試料では、発光体である量子ドットは、面内に様に分布しているため、電場強度の面内積分の大きさの比から、円偏光度を算出することができる。計算結果から見積もられる円偏光度の大きさは、-27.4%であり、実験で得られた結果と良く一致した。計算の結果、図

3 の白矢印で示された位置に量子ドットを配置することができれば、90%を超える円偏光度が達成可能であることがわかった。

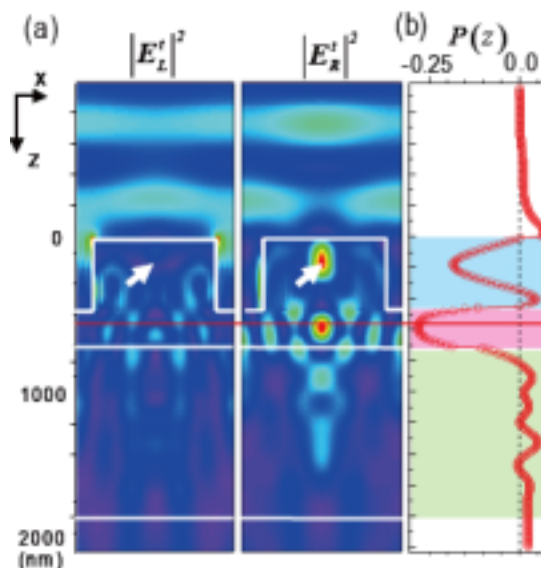


図 3 (a) 構造の垂直方向無限遠で左右円偏光に接続する真空場モード分布の計算結果。左図が左回り円偏光、右図が右回り円偏光。赤線は試料中で量子ドットが配置されている位置を示す。(b) 円偏光度の発光層位置依存性の計算結果

本研究で示した手法は、外部磁場などを用いることなしに、円偏光放射を室温で得ることができる手法である。また、既存の半導体プロセスを用いて作製可能であるため、半導体素子へのモノリシック集積化にも適していることから、発光ダイオードや半導体レーザー素子への応用が可能である。これらのデバイスは、円偏光を用いた光エレクトロニクス、スピントロニクスへの応用や、バイオセンシング用の円偏光光源としてのさまざまな応用などが期待できる。さらに、発光層として単一量子ドットなどを用いることにより、円偏光化されたシングルフォトン発生デバイスなど量子情報技術に必要な次世代量子デバイスへの応用も期待できる。

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4件)

1. K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, M. Kuwata-Gonokami, "Circularly Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Nanostructures," *Physical Review Letters*, **106**, 057402 (2011) 査読有
2. N. Kanda, K. Konishi, M.

- Kuwata-Gonokami, "Light-induced terahertz optical activity," *Optics Letters*, **34**, 3000 (2009) 査読有
3. K. Konishi, N. Kanda, B. Bai, Xiangfeng Meng, Petri Karvinen, J. Turunen, Y. P. Svirko, M. Kuwata-Gonokami, "Optical activity in metal and dielectric planar chiral gratings," *Proc. of SPIE* **7395**, 73951F (2009) 査読有
 4. 小西邦昭、五神真 "ナノ格子による巨大旋光性" *応用物理*, 第78巻, pp531, 2009年 査読有

〔学会発表〕(計 13 件)

1. K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, M. Kuwata-Gonokami, "Circularly-Polarized Photoluminescence from Semiconductor Chiral Photonic Nanostructures," *NANOMETA2011*, (4th, Jan 2011, Tirol, Austria)
2. 小西邦昭、野村政宏、熊谷直人、岩本敏、荒川泰彦、五神真, "半導体キラルナノ周期構造を用いた円偏光発光制御" ナノ量子情報エレクトロニクス公開シンポジウム (2010年12月22日, 東大浅野キャンパス, 東京)
3. 小西邦昭 "人工キラル格子による偏光制御 ~ 円偏光発光素子のメタマテリアル ~" レーザー学会東京支部セミナー 第21回「若手技術者のためのレーザー応用セミナー」(2010年7月16日, 慶応大矢上キャンパス, 東京)
4. K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, M. Kuwata-Gonokami, "Circularly-Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Photonic Crystals," *Conference on Lasers and Electro-Optics / Quantum Electronics and Laser Science Conference, CLEO/QELS:2010* (17, May, 2010, San Jose, U.S.A)
5. N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami "THz polarization control with chiral grating structures" *The 7th Asia-Pacific Laser Symposium* (13, May, 2010, Jeju island, Korea, Invited)
6. 小西邦昭、野村政宏、熊谷直人、岩本敏、荒川泰彦、五神真 "半導体キラルフォトニック結晶からの円偏光放射" *日本物理学会第65回年次大会* (2010年3月21日, 岡山大学津島キャンパス)
7. K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, M. Kuwata-Gonokami, "Circularly-Polarized Photoluminescence from Semiconductor Planar Chiral Photonic Crystals" *International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics* (20, Nov. 2009, Komaba, Tokyo)
8. N. Kanda, K. Konishi, and M. Kuwata-Gonokami "Dynamics of Light-induced Three-dimensional Chirality" *International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics* (19, Nov. 2009, Komaba, Tokyo)
9. 小西邦昭 "微細構造による巨大旋光性" *日本物理学会2009年秋季大会* (2009年9月27日, 熊本大学黒髪キャンパス, 招待講演)
10. 神田夏輝、小西邦昭、五神真 "人工キラル格子における光励起三次元キラリティーの過渡光学応答" *日本物理学会2009年秋季大会* (2009年9月26日, 熊本大学黒髪キャンパス)
11. 小西邦昭、野村政宏、熊谷直人、岩本敏、荒川泰彦、五神真 "半導体キラルフォトニック結晶構造からの円偏光 PL スペクトル" (応用物理学会学術講演会, 2009年9月8日富山大学)
12. K. Konishi and M. Kuwata-Gonokami "Giant optical activity of planar chiral nanostructures and circularly-polarized light emission" *CLEO/Pacific Rim 2009: The 8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, (1, Sep. 2009, Shanghai, China, Invited)
13. K. Konishi and M. Kuwata-Gonokami "Polarization control with metal and semiconductor chiral nanogratings" *Noma 2009: 9th Mediterranean Workshop and Topical Meeting "Novel Optical Materials and Applications"* (13, Jun. 2009, Cetraro, Italy)

〔その他〕

論文ハイライト

- ・ *Physical Review Focus* "Giving Light a Spin" (28 January 2011)
- ・ *NPG Asia materials* "Photonics: Mirrored images" (doi:10.1038/asiamat.2011.4)

報道発表

- ・ 日刊工業新聞 2011年2月2日付
「人工的な周期構造 円偏光発光素子を開発 東大 半導体プロセスで小型化」
- ・ 科学新聞 2011年2月18日付
「新原理 円偏光発光素子 半導体プロセスで作製 東大」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西 邦昭 (KONISHI KUNIAKI)
東京大学・大学院工学系研究科・特任助教
研究者番号：60543072