

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889018

研究課題名(和文)半導体三次元キラルフォトリック結晶を用いた円偏光レーザ

研究課題名(英文)Circularly polarized lasing in semiconductor three-dimensional chiral photonic crystals

研究代表者

高橋 駿 (Takahashi, Shun)

東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構・特任助教

研究者番号：60731768

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：半導体三次元キラルフォトリック結晶と量子ドット光源との複合系を形成し、円偏光フォトリックバンド構造を利用して円偏光光源を実現した。この結果は、片方の円偏光に接続する真空場の状態密度を制御したことに起因し、各円偏光の発光強度の差だけでなく、発光寿命の差も観測することに成功した。また、片方の円偏光のみを閉じ込める共振器も実現した。本研究の成果は、キラル構造で守られたロバストな円偏光光源として、通信技術や化学、生物学などへの応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：Circularly polarized light source based on a complex system of semiconductor three-dimensional chiral photonic crystals and quantum dots was realized by use of circularly polarized photonic band structures. This achievement results from manipulating the density of states in the vacuum field for one of the circular polarizations. The emission intensity difference as well as the radiative lifetime difference between the two circular polarizations confirmed the operating principle of the obtained circularly polarized light source. In addition, a chiral cavity mode for circularly polarized light was also demonstrated. These achievements through this research project can be applied to information technology, chemistry, or biology as robust circularly polarized light sources formed by geometrical structures with chirality.

研究分野：三次元フォトリック結晶を用いた光制御

キーワード：電子デバイス・機器 フォトリック結晶

## 1. 研究開始当初の背景

光の円偏光は、映画やテレビにおける三次元ディスプレイや、化学・生物学・医学におけるキラル分子の同定、量子情報処理技術への応用などにおいて重要な役割を担うため、高い注目を集めている。一般に、円偏光は直線偏光光源に対して波長板を利用することで得られる。しかし、このような受動素子では、入射光の反射や吸収により、入射パワーの一部が円偏光に変換されずに失われてしまう。そのため、円偏光を直接生成する高効率な円偏光光源及び円偏光レーザの実現が重要である。

光源から円偏光を直接生成させるためには、光源を円偏光とのみ相互作用させる必要がある。そこで、円偏光の対称性に注目すると、電場及び磁場は光の伝播とともにらせん軌跡を描く。したがって、波長周期のらせん状に屈折率が変調されたキラルフォトニック結晶 (Photonic Crystal: PC) は、円偏光を固有偏光とする。実際、三次元らせん PC 構造では、らせんの巻き方と同じカイラリティの円偏光のみが反射される、円偏光ブラッグ反射が起こる。キラル構造内に導入した光源は左右一方の円偏光のみを放出するほか、キラル構造を鏡として利用することで、片方の円偏光のみを閉じ込める共振器も形成できる。

これまでに、液晶[1]やメタマテリアル[2]などで、可視光または近赤外光の波長程度の周期をもつ三次元カイラル構造が実現されてきた。一方で、半導体では同程度の周期の三次元構造の作製が困難であった。しかし、半導体による三次元キラル構造及びその共振器を実現できれば、実用に適した電流注入型などの小型高効率円偏光光源の実現も期待できる。

この半導体における作製困難を克服するひとつの方法として、近年 micro-manipulation 法が確立され、最も高品質な半導体三次元 PC の作製が実現された[3]。この手法を利用して、GaAs を材料とする半導体三次元キラル PC として回転積層型 woodpile 構造が作製され、キラル構造特有の光学活性が観測された[4, 5]。この受動素子から発展して、PC 内に発光体を含む活性層を導入することで、半導体円偏光光源の実現が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、GaAs キラル PC 及びその微小共振器に光源として InAs 自己形成量子ドットを導入することで、円偏光光源を実現することを目的とする。また、それを応用して、円偏光した光のレーザ発振を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) キラル PC 及びその微小共振器の設計

有限差分時間領域法 (FDTD 法) による数値計算によって、回転積層型 woodpile 構造からなるキラル PC を設計する。キラル PC における円偏光バンド端が、量子ドットの発光波長に合致するように、構造パラメータを設計する。

また、キラル PC 微小共振器の実現には、PC の周期性を人為的に乱し、欠陥を導入する。本研究では、利得媒質を多く導入するために、量子ドットを高密度で含む等方的な構造を挿入した面欠陥構造を採用した。この面欠陥共振器サイズの設計も行う。

### (2) 半導体キラル PC の作製

InAs 量子ドットが埋め込まれた GaAs 基板を用いて、(1) で設計した構造を作製する。まず、電子線リソグラフィ技術及びドライ・ウェットエッチング技術によって、ロッドが周期的に並んだ 10 ミクロン四方の薄い (200 nm 程度) 層を作製する。この微細加工した基板を、micro-manipulation 法によって 1 層ずつ適切な順序で積層することで、三次元キラル構造を作製する。

### (3) 光学測定

量子ドットにおける非発光過程を抑制するために、液体ヘリウム温度までキラル PC を冷却する。その上で、キラル構造内の量子ドットを光励起してその発光を分光する、顕微フォトルミネッセンス法で測定を行う。得られた発光の偏光状態を調べて、円偏光の純度を算出する。

また、フォトニックバンドの効果を詳細に検証するために、超伝導単一光子検出器を利用した時間分解フォトルミネッセンス法も行う。これによって、状態密度の変化による発光寿命の円偏光依存性を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) キラル PC の設計と作製

近赤外光に対して円偏光フォトニックバンドが形成されるように、近赤外光の波長と同程度の周期をもつキラル PC を設計した。各層ごとに 60 度ずつ面内回転した回転積層型 woodpile 構造を採用し、面内のロッド周期は 500 nm、ロッド幅は 130 nm、各層の厚さは 225 nm、全層数は 16 である。この設計に基づいて、作製した試料の模式図と SEM 像を図 1 に示す。作製した構造のキラリティは左巻きで、InAs 自己形成量子ドットが内部に高密度で埋め込まれている。

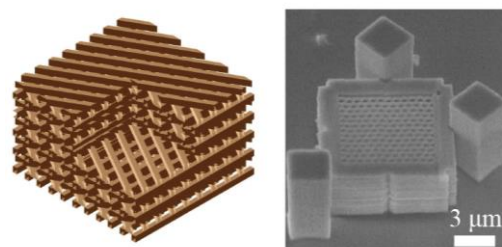


図 1 キラル構造の模式図(左)と SEM 像(右)

## (2) 円偏光光源の実現

(1)の構造内の量子ドットを光励起し、発光する近赤外光を偏光を調べながら分光し、その円偏光の純度として、円偏光度(Degree Of Polarization: DOP)を調べた。ここで、右回りの円偏光(Right-handed Circular Polarization: RCP)と左回りの円偏光(Left-handed Circular Polarization: LCP)に対する発光強度をそれぞれ  $I_{LCP}$ 、 $I_{RCP}$  として  $DOP = (I_{LCP} - I_{RCP}) / (I_{LCP} + I_{RCP})$  である。その結果、波長 1120 nm 以上の領域の円偏光バンドギャップ内にて RCP が 50% の純度で検出された。また、波長 1120 nm の円偏光バンド端では、LCP が 50% の純度で得られた(図 2)。

これは、左巻きのキラル構造によって LCP に接続する真空場状態密度が大きく制御されたことに起因する。発光体の自然放出は、周囲の真空場による誘導放出と捉えることができるため、円偏光バンドギャップ内では、LCP に接続する真空場状態密度が大きく抑制された結果、RCP が高い純度で得られたと考えられる。また、円偏光バンド端では、LCP の群速度が小さく、状態密度が著しく増大したため、LCP が高い純度で得られたと考えられる。

この結果から、半導体キラル PC において初めて円偏光光源の実現に成功した。円偏光の純度は、キラル構造の層数を増やすことなどでさらに高めることが期待できる。

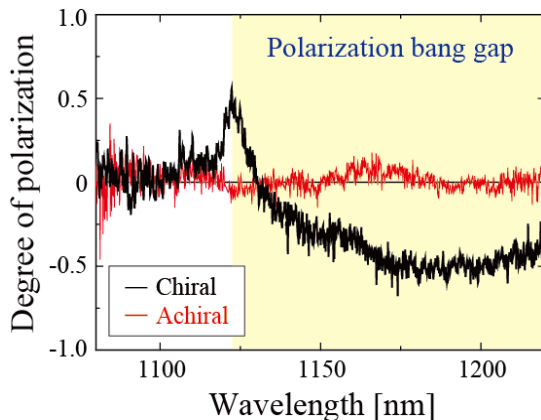


図 2 キラル PC 内の量子ドットの発光の円偏光度スペクトル。円偏光バンドギャップ内では RCP、バンド端では LCP が 50% の純度で発光している。アキラル構造では、円偏光に偏極しておらず、顕著な違いがわかる。

## (3) 円偏光に依存した発光寿命の観測

(2)の成果が、円偏光に接続する真空場状態密度を反映していることを裏付けるために、円偏光発光寿命を調べた。フェルミの黄金則により、励起子の発光寿命は周囲の真空場の状態密度に反比例する。本研究でのキラル PC における円偏光バンドギャップでは、左右一方の円偏光の状態密度のみが抑制さ

れるため、その円偏光の発光寿命が長く、時間平均した発光強度は弱くなると予想される。

実際に、ピコ秒パルスレーザで瞬間的に光励起した直後の各円偏光に対する発光強度の時間変化を示したのが図 3(上)である。波長 1200 nm の円偏光バンドギャップ内での発光で、LCP が RCP よりも発光寿命が長いことがわかる。これは、LCP に接続する状態密度が抑制されていることを直接的に示す結果である。さらに、この各円偏光の発光寿命の波長依存性を調べると、確かに円偏光バンドギャップ内でのみ差がでていることがわかった(図 3(下))。

これによって、キラル構造によって円偏光状態密度が制御されていることが示され、構造によって守られたロバストな円偏光光源が実現されたとと言える。

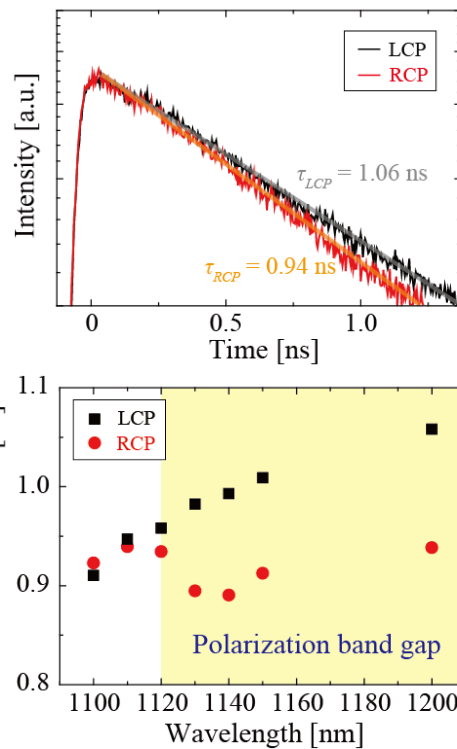


図 3 円偏光バンドギャップ内の波長 1200 nm における各円偏光の発光強度の時間変化(上)と各円偏光の発光寿命の波長依存性(下)。円偏光バンドギャップ内で発光寿命に違いがあることがわかる。

## (4) キラル PC 微小共振器の実現

キラル PC 内に意図的に欠陥を導入することで、円偏光共振器モードの形成にも取り組んだ。共振器構造として、キラル PC に平板を挟んだ面欠陥構造を採用した(図 4(上))。各構造パラメータは、面内のロッド周期が 444 nm、ロッド幅 130 nm、層厚 200 nm、全層数 18 であり、欠陥層の厚さは 2 層分の 400 nm とした。

(2)と同様の測定を行った結果が図 4(下)である。波長 1150 nm 以上の円偏光バンドギャップの領域内の波長 1190 nm に共振器モードによるピークが観測された。この共振器 Q 値は 170 程度と見積もられた。また、この共振器波長は、FDTD 法による数値計算結果とも良い一致を示した。

この結果から、半導体キラル PC 構造において、初めて円偏光フォトニックバンドギャップ内に共振器モードの発光を観測することに成功した。さらに積層数を増やすなど、共振器構造の検討を進めることで、共振器モードを利用した高効率な円偏光光源の実現が期待できる。

なお、円偏光レーザ発振にも挑戦したものの、本研究期間中に発振を観測することができなかった。最近、利得媒質における利得が不十分であったことが判明したため、より高品質な量子ドットを利用したキラル PC の作製を進めており、実現には間もないと考えている。

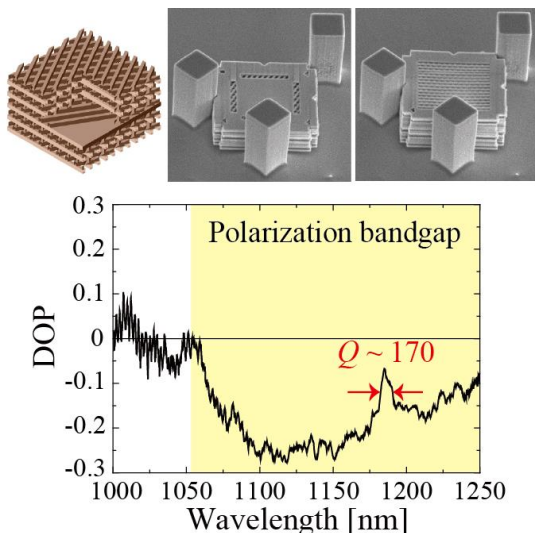


図 4 キラル PC 微小共振器の模式図(左上)及び SEM 像。左中図は面欠陥層の積層後、左右図は全層積層後。下図は円偏光度の波長依存性。共振器モードに由来するピークが円偏光バンドギャップ内に見られる。

#### <引用文献>

- [1] H. Coles and S. Morris, Nat. Photon. 4, 676 (2010).
- [2] J. K. Gansel *et al.*, Science 325, 1513 (2009).
- [3] A. Tandraechanurat *et al.*, Nat. Photon. 5, 91 (2010).
- [4] S. Takahashi *et al.*, Optics Express 21, 29905 (2013).
- [5] S. Takahashi *et al.*, Appl. Phys. Lett. 105, 051107 (2014)

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 11 件)

- ① S. Takahashi, “Circularly Polarized Light Emission of Quantum Dots at the Band Edge of Three-Dimensional Chiral Photonic Crystals,” CLEO: 2015, 15 May 2015, San Jose, US
- ② S. Takahashi, “Controlled Radiative Life Time of Circularly Polarized Emission from Quantum Dots by Three-Dimensional Chiral Photonic Crystals,” 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 28 July 2015 Sendai International Center (Miyagi, Sendai)
- ③ S. Takahashi, “Chiral Cavity Mode Emission from Quantum Dots in a Three-Dimensional Photonic Crystal,” 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, 30 March 2016, Todaiji Temple Cultural Center (Nara, Nara)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

高橋 駿 (TAKAHASHI, Shun)  
 東京大学・ナノ量子情報エレクトロニクス  
 研究機構・特任助教  
 研究者番号：60731768