

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870351

研究課題名(和文)希土類イオンとフォトニック結晶の融合による発光機能の制御

研究課題名(英文)Controlling emission properties of rare-earth ions via photonic crystal structures

研究代表者

児島 貴徳 (Kojima, Takanori)

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：70725100

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、希土類添加半導体とフォトニック結晶の融合により、フォトニック結晶によって制御された光子モード下における希土類イオンの発光特性評価およびそのデバイス応用に向けた検討を目的とする。

GaAsを母体とする2次元フォトニック結晶共振器中のErイオンの発光について、計算機実験により発光増強率を見積もったところ、共振波長と発光波長が揃っている場合、受けていない場合と比べて3.4倍発光が強くなるという結果が得られた。一方実測では、計算による予測を上回る20倍という発光増強率が得られた。これは、計算では考慮されていない要素、例えば発光体同士の相互作用による超放射などが生じていることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：We studied emission properties of Er³⁺ ions embedded in GaAs-based two-dimensional photonic crystal nanocavity. We have grown Er₀ co-doped GaAs slab layer by organometallic vapor phase epitaxy. Photonic crystal structures were fabricated by electron beam lithography and plasma etching technique. Numerical simulation using Finite-difference time-domain (FDTD) method was performed and it predicted emission enhancement of 5.4 times. This prediction was compared with the photoluminescence measurement, however, the experimental emission enhancement was 20 times, which exceeded the prediction. This extra enhancement might be due to the interaction among Er ions in the nanocavity, such as superradiant.

研究分野：半導体光物性

キーワード：フォトニック結晶 光共振器 希土類 エルビウム

1. 研究開始当初の背景

近年の情報化社会の根幹をなす光通信において重要な役割を果たしている通信波長帯の半導体レーザダイオードにおいて、その発振波長の温度依存性を低減することは大きな課題となっている。一般的な半導体レーザダイオードにおいて、活性媒質のバンドギャップの温度依存性を低減させる試みがなされており成果を上げている。しかしながら、半導体のバンドギャップは本質的に温度に依存するパラメータであり、バンドギャップに依存しない半導体レーザが実現できれば、既存のデバイスの高性能化、新たな応用への展開が期待される。

2. 研究の目的

以上の背景の元、我々は半導体中に添加された希土類イオンに着目した。半導体中に添加された希土類イオンは 4f 殻内遷移により発光し、この遷移過程は外殻の電子による遮蔽効果によって外界との相互作用に乏しいことが知られている。つまり、希土類イオンは半導体結晶中にありながら孤立原子に似た発光特性をもち、バンドギャップに依存しない半導体レーザの活性媒質として有望である。特に、GaAs 中に酸素と共添加された Er イオン (GaAs:Er, O) は、通信波長帯内の 1538 nm に主要な発光ピークをもち、GaInP/GaAs:Er, O/GaInP ダブルヘテロ構造からの室温で動作する LED が実現されている。レーザ発振を実現するためにはこの GaAs:Er, O に加えて光共振器が必要となる。光共振器には様々な種類があるが、我々は低閾値レーザ発振を目標として、高い共振器 Q 値に比して小さなモード体積を有する 2 次元フォトニック結晶スラブ (2DPC) ナノ共振器に着目した。2DPC ナノ共振器中では光子モードと発光体との相互作用が強く、発光体として量子井戸や量子ドットを用いた研究では様々な量子論的効果が報告されている。本研究で発光体として用いる Er イオンを 2DPC ナノ共振器のような高 Q・小モード体積の共振器中に導入した報告例はなく、その発光特性に関する知見が不足している。従って本研究では 2DPC ナノ共振器に内包された Er イオンの発光特性に関する知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で用いた 2 次元フォトニック結晶スラブナノ共振器は、エアブリッジ構造をもつ円孔三角格子の L3 型ナノ共振器である。作製手順を以下に記す。まず GaAs:Er, O スラブ層の下部に後にウェットエッチングで除去され空気クラッド層となる InGaP 犠牲層を設けた構造を OMVPE 法により成長した。次にこの試料に電子線レジストを塗布し、電子線描画装置を用いて円孔三角格子フォトニック結晶パターンを描画し、現像処理によって電子線レジストにパターンニングを行った。次の

この電子線レジストをマスクとし、塩素系ガスによるプラズマエッチングを用いてスラブへのフォトニック結晶構造を転写した。最後に塩酸によりスラブ下部の InGaP 層を選択ウェットエッチングして空気クラッド層を形成し、GaAs:Er, O スラブからなる 2 次元フォトニック結晶スラブナノ共振器を作製した。

この試料の発光特性を評価するにあたり、まずシミュレーションによる予測を行った。計算には FDTD 法を用いた。計算領域に GaAs からなる円孔三角格子フォトニック結晶スラブを置き、円孔周期数 42 とした有限構造での計算を行った。フォトニック結晶領域の中央に L3 型点欠陥共振器を配置し、この中央に Er イオンを模した 1538 nm に発光ピークをもつダイポールを一つ置いてパルス励起して応答を評価した。本研究では共振器の有無による効果のみを抽出するために、L3 型点欠陥共振器の共振波長をフォトニック結晶の格子定数を変化させることで調整し、以下の二つの状況を設定して差分を評価することとした。

1) L3 型点欠陥共振器の共振波長がダイポールの波長と一致していない(離調している)。

2) L3 型点欠陥共振器の共振波長はダイポールの波長と一致している(離調していない)。

1) は、ダイポールはフォトニックバンドギャップ中に存在するものの、共振器の影響を受けていないという状況であり、2 次元フォトニック結晶による面内方向への伝搬抑制の効果のみを反映した計算結果が得られる。一方、2) ではそれに加えて共振器との相互作用も反映された計算結果が得られる。なお、L3 型共振器の Q 値は 5000 であり、共振波長 λ_{cav} 、スラブの実効屈折率 n_{eff} とした時のモード体積は $0.7(\lambda_{cav}/n_{eff})^3$ であった。

次に、FDTD 法によるシミュレーションと同様の評価を顕微フォトルミネッセンス (PL) 測定にて行った。シミュレーションと同様フォトニック結晶の格子定数が異なる試料を複数用意し、Er イオンの発光ピークと共振波長が離調している場合と離調していない場合を比較した。励起光は Ar イオンレーザ (488 nm) を用い、室温で測定を行った。

4. 研究成果

FDTD 法によるシミュレーションで得られた、上述の状況 1) と 2) における発光スペクトルを比較したところ、発光増大率は 74 倍となった。Purcell 係数 F_p は、共振波長 λ_{cav} 、スラブの実効屈折率 n_{eff} 、モード体積 V 、系の Q 値を用いて次のように書けて

$$F_p = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_{cav}}{n_{eff}} \right)^3 \frac{Q}{V}$$

具体的に値を代入すると $F_p = 76$ が得られ、FDTD 法で求めた増大率は Purcell 係数の値

から見て妥当な値といえる。ところで、計算において発光体(ダイポール)は共振器中央、すなわち共振器内でもっとも電界強度が大きい場所に存在し、偏光も完全に一致しているという仮定が置かれている。実際の試料では共振器内には複数の Er イオンが様々な位置に様々な向きの偏光をもって存在しており、実測値と比較するためには補正が必要である。そのため、以下のような補正を行った。L3 型共振器の最低次共振モードの面内電界強度分布の断面プロファイルは、おおむねガウス分布した 5 つの主要な領域からなる。そこで、以下のような仮定を置き、共振器内に存在する Er イオンの内、計算値通りの増強を得られるものの割合を求めた：

- 1)それぞれの領域は直径 = 分布の半値全幅の円柱で構成され、高さは最大値で規格化されたピーク強度で与えられる。
- 2)スラブ厚さ方向の電界強度は一定である。
- 3)Er イオンの偏光は完全にランダムであり、共振モードと結合する確率は 1/3 である。

この仮定の下、共振波長 1538 nm を与えるフォトニック結晶の格子定数 $a = 416$ nm の構造に対して計算を行うと、計算値通りの増強率を得られる Er イオンの割合は全体の 7.3% となった。従って、実測値では 74×0.073 5.4 倍の増強となると予想される。

次に、作製した試料の PL 測定結果について述べる。様々な格子定数(すなわち、動作波長)をもつフォトニック結晶構造に対して PL 測定を行い、1538 nm にある Er 発光のメインピークと共振ピークが離調しているものとしていないものの PL 発光強度を比較したところ発光増強率は 20 倍となり、上述の予想値 5.4 倍を大きく上回る結果となった。この理由として、FDTD シミュレーションにおいてはダイポールを 1 つだけ配置しており、ダイポール間の相互作用を全く考慮していないという点が挙げられる。例えば、ダイポールモーメントの揃った N 個の 2 準位系が相互作用をもつとき、コヒーレントな自然放出が生じて発光レートが N 倍となる Dicke の超放射と呼ばれる現象が知られており、今回得られたシミュレーションによる予測を上回る発光増強率はこのようなダイポール間の相互作用を反映したものであることが示唆される。

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 3 件)

T. Kojima, K. Sakuragi, M. Ogawa, N. Fujioka, A. Koizumi, S. Noda, and Y. Fujiwara: “Emission properties of Er

ions in GaAs modulated by photonic crystal nanocavities”, 17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara, Japan, March 29 (2016).

M. Ogawa, N. Fujioka, K. Sakuragi, T. Kojima, A. Koizumi, and Y. Fujiwara: “High-Q photonic crystal double-hetero structure nanocavity with Er,0-codoped GaAs for low-threshold lasers”, 2016 MRS Fall Meeting, Boston, USA, November 29 (2016).

T. Kojima, K. Sakuragi, M. Ogawa, N. Fujioka, A. Koizumi, and Y. Fujiwara: “Extremely improved emission properties of Er luminescent centers in GaAs-based photonic crystal nanocavities”, 2016 MRS Fall Meeting, Boston, USA, November 30 (2016).

[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
児島 貴徳 (KOJIMA, Takanori)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70725100

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：

(4)研究協力者
()