

Title	Control of erbium luminescence in GaAs-based photonic crystal nanocavities
Author(s)	小川, 雅之
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/77622
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (小川 雅之)

論文題
名Control of erbium luminescence in GaAs-based photonic crystal nanocavities
(GaAs系フォトリック結晶微小共振器を用いたEr発光制御)

論文内容の要旨

近年の情報通信技術 (ICT) の飛躍的な発展に伴い、更なるデータトラフィックの増加に対応するため、都市間や海底ケーブルなどに用いられる光通信のさらなる大容量化、高効率化が必要とされている。我々の注目するEr,O共添加GaAs(GaAs:Er,O)は、希土類元素であるEr³⁺イオンの4f殻内遷移 (⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2})により発光波長の温度安定性が高く、且つ鋭い発光を示す。また、発光波長が1.54 μmと石英系光ファイバの最低損失波長域に一致するため、光通信のみならず量子情報通信における波長超安定化光源としての応用が期待される。本論文では、希土類添加半導体によるレーザー発振の実現に向け、GaAs:Er,Oを母体とした2次元 (2D) フォトリック結晶 (PhC) ナノ共振器を実現する成長・設計・プロセス技術を確認するとともに、共振器モードと結合したEr³⁺イオンによる原子発光特性の解明を目指した。

本論文は、以下の全8章から構成されている。

第1章では、序論として光通信技術に関する技術的背景やGaAs:Er,Oの発光の有用性、2D PhCナノ共振器と結合させ、フォトン場の制御することの意義を述べるとともに、本論文の目的・概要を述べた。

第2章では、希土類イオンの発光特性や、III-V族半導体に添加されたEr³⁺イオンの励起過程及び、GaAs:Er,Oの発光体としての特徴を述べた。またPhCの動作原理や、ナノ共振器として機能する際の重要なパラメータについてまとめた。

第3章では、GaAs:Er,O薄膜の作製方法である有機金属気相エピタキシャル法について述べた。またGaAs:Er,O薄膜を母体とした2D PhCナノ共振器の作製方法や、作製した試料の顕微フォトルミネッセンス(μ-PL)測定について述べた。

第4章では、有限差分時間領域(FDTD)法を用いてEr-2O発光中心と2次元フォトリック結晶をカップリングさせた際のパーセル効果の寄与、および発光増強率の分析を行う計算手法を確認した。また、その応用例として、マイクロディスク共振器の放光について、ディスク端面からの角度に対する強度の関係を計算した。

第5章では、GaAs:Er,O薄膜を母体としたL3型2次元フォトリック結晶ナノ共振器を作製し、μ-PL測定により評価した。薄膜に対し垂直な円孔からなるL3型ナノ共振器を作製することに成功した。試料構造中の円孔の間隔を変化させることにより、2次元フォトリック結晶ナノ共振器の共振波長を変化させることに成功し、Er-2O発光ピークと共振器ピークのカップリング、およびEr-2O発光中心の発光強度増大が観測された。さらにこの発光強度増大率を、FDTDシミュレーションを用いて分析した。シミュレーションの結果から、ナノ共振器とカップリングした場合の発光増大率として見積もられた値はμ-PL測定の実験値と近い値を示した。このことから、共振器との結合状態におけるEr-2O発光中心の発光増大率にはパーセル効果が適用されることが解明された。さらに、実験とシミュレーションにおいて増大率に差異についても考察し、Er³⁺イオンの励起される範囲の差や、Er-2O発光中心の結晶中での配向性が可能性として挙げられた。

第6章では、微小なモード体積および高い共振器Q値を有するH0型ナノ共振器を作製し、μ-PL測定により評価した。試料構造中の円孔の間隔を変化させ、試料の温度を調整する事で、Er-2O発光と共振器モードを精度良く結合させた。また、励起強度に対するEr-2O発光強度の依存性において、非線形な振舞いが観測された。結合した状態での発光スペクトルからEr-2O発光の増大率を見積もったところ、最大で25倍程度の高い増大率が得られた。

第7章では、2D PhCナノ共振器の中でも特に高い共振器Q値をもち、しかしモード体積は比較的大きい、ダブルヘテロ共振器の作製・評価を行った。室温において、Er-2O発光と単一の鋭い共振器ピークとを結合させることに成功した。試料の励起強度に対するEr-2O発光強度の依存性からは、非線形な振舞いが観測された。Er-2O発光の増大率は最大で25倍程度となった。

第8章では、本論文の総括を行うとともに、今後の課題について述べた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小 川 雅 之)			
	(職)	氏	名
論文審査担当者	主 査	教 授	藤原 康文
	副 査	教 授	中谷 亮一
	副 査	教 授	山下 弘巳
	副 査	准教授	舘林 潤

論文審査の結果の要旨

近年の情報通信技術の飛躍的な発展に伴い、更なるデータトラフィックの増加に対応するため、都市間や海底ケーブルなどに用いられる光通信のさらなる大容量化、高効率化が必要とされている。Er と O を共添加した GaAs (GaAs:Er,O) は、希土類元素である Er³⁺イオンの 4f 殻内遷移 ($^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) に起因する、発光波長の温度安定性が極めて高く、且つ鋭い発光を示し、その発光波長が 1.54 μm と石英系光ファイバの最低損失波長域に一致するため、光通信のみならず量子情報通信における波長超安定化光源としての応用が期待される。これまでに、GaAs:Er,O 系の発光ダイオードが実現されているものの、光通信へ応用するにはコヒーレント光、即ちレーザー発振の実現は望ましい。本研究では、希土類添加半導体による光通信用波長帯波長超安定レーザー発振実現に向け、GaAs:Er,O を母体とし極めて高い共振器 Q 値及び小さいモード体積を特徴とする 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器を実現する結晶成長・構造設計・プロセス技術を確立するとともに、フォトニック結晶ナノ共振器の共振器モードと結合させることにより Er³⁺イオンからの原子発光特性に及ぼす影響とその発光制御可能性について議論しており、下記の知見を得ている。

- (1) GaAs:Er,O 薄膜を母体とした L3 型 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器を作製し、顕微フォトルミネッセンス測定による評価について議論している。薄膜に対し垂直な円孔からなる L3 型ナノ共振器を作製することに成功している。試料構造中の円孔の間隔を変化させることにより、2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の共振波長を制御させることに成功し、顕微フォトルミネッセンス測定により Er-2O 発光中心と共振器ピークの結合および Er-2O 発光強度の 18 倍程度の増大が観測されている。また、パーセル効果及び光取り出し効率を考慮した計算シミュレーションの結果から、発光増大率として見積もられた値が顕微フォトルミネッセンス測定の実験値と良い一致を示している。これは、2 次元フォトニック結晶ナノ共振器と結合した Er 原子発光特性の解明の一助となっている。加えて、同様の測定・計算手法を光共振器の一つであるマイクロディスク構造にも適用し、発光増大率の実験値と理論値を比較した結果、今回得られた 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器において、より高い発光増大率が得られることを立証している。
- (2) 極めて小さいモード体積および非常に高い共振器 Q 値を有する H0 型 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器を作製し、顕微フォトルミネッセンス測定により評価を行っている。試料構造中の円孔間隔や試料の測定温度を変化させることにより、Er-2O 発光と共振器モードを精度良く結合させることに成功している。また、試料の励起強度に対する Er-2O 発光強度の依存性からは、発光強度の非線形な挙動が観測されている。2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の共振器モードと結合した状態での発光スペクトルから Er-2O 発光増大率を見積もったところ、最大で 25 倍程度の高い発光増大率が得られている。
- (3) 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の中でも特に非常に高い共振器 Q 値をもち、モード体積の比較的大きいマルチヘテロ 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器の作製・評価を行っている。室温において、本共振器構造に由来する共振器ピークと Er-2O 発光を結合させることに成功している。また、試料の励起強度に対する Er-2O 発光強度の依存性からは、発光強度の非線形な挙動が観測されており、Er-2O の発光増大率は最大で 25 倍程度となっている。

以上のように、本論文は次世代光通信用波長安定化光源の実現に向けて、GaAs:Er,O を母体とした 2 次元フォトニック結晶ナノ共振器に着目し、ナノ共振器に由来する共振器モードが Er 発光特性に及ぼす影響とその発光特性制御可能性について明らかにしており、材料工学分野に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。