



Title	Design and fabrication of photonic nanocavities based on Er, O-codoped GaAs towards quantum information technologies
Author(s)	房, 之棟
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101652
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、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名(房之棟)	
論文題名	Design and fabrication of photonic nanocavities based on Er, 0-codoped GaAs towards quantum information technologies (量子情報技術に向けたEr, 0共添加GaAs微小光共振器構造の設計と作製に関する研究)
論文内容の要旨	
<p>Quantum communication, storage, and computing show potential as next-generation information technologies and have been recently attracting scientific attention. Above all, controllable, stable, and repeatable single photon emitters (SPEs) have been of great significance as an important component of quantum information systems¹. Er-20 luminescent center formed in the Er, 0-codoped GaAs (GaAs:Er, 0) is one of the most promising candidates towards application in such SPEs since trivalent erbium (Er^{3+}) ions have stable sharp luminescence peak at the telecommunication wavelength of $1.54 \mu\text{m}$ due to the intra-4f shell transitions between the $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ states. We have also demonstrated a GaAs:Er, 0 LED working at room temperature, suggesting the realization of an electrically-driven SPE. However, their long lifetime of the luminescent center hinders its application for SPEs. According to the Purcell effect, photonic crystal (PhC) nanocavity is one of the effective solutions owing to its ultra-high quality(Q)-factor and extremely small mode volume. In this thesis, we focus on designing and fabricating 1-D PhC resonators using GaAs:Er, 0 as the active layer. We employ bridge-type PhC and nanobeam PhC to obtain highly enhanced Er luminescence and realize vertical emission, laying the foundation for the implementation of SPEs. This doctoral dissertation can be summarized as follows.</p> <p>Chapter 1 serves as an introduction, discussing the technological background of SPEs. The significance of further enhancing Er luminescence by coupling GaAs:Er, 0 with a 1-D PhC was also introduced. This chapter outlines the objectives and overview of this thesis.</p> <p>In Chapter 2, we review materials for SPEs and discuss the advantages of rare-earth ion emitters (REIs). It also details the emission characteristics and excitation processes of Er^{3+} ions, along with the operational principles and key parameters of PhCs.</p> <p>Chapter 3 describes the growth of the GaAs:Er, 0 active layer using metal-organic vapor-phase epitaxy and the fabrication of 1-D PhC nanoresonators. It also explains the micro-photoluminescence ($\mu\text{-PL}$) measurement procedures for the samples.</p> <p>Chapter 4 analyzes the Purcell effect and the distribution of electric field using the finite-difference time-domain (FDTD) method, discussing mode distribution, Q-factor improvements, and vertical emission. For bridge-type PhC and nanobeam PhC, the Q-factors reached 1.2×10^6 and 7.8×10^6, respectively. The far-field pattern of the nanobeam PhC was also optimized, resulting in a doubling of the vertical collection efficiency.</p> <p>Chapter 5 analyzes the characteristics of fabricated bridge-type PhC cavities. The parameters for the growth process of GaAs:Er, 0 were optimized. The fabrication of the bridge-type PhC cavity was successfully completed, achieving precision with less than 3% error and maintaining structural integrity without any collapse. The enhancement of Er luminescence was up to 7.3 times. Superlinear behavior in luminescence intensity with the increasing excitation power was observed, suggesting a decrease in luminescence lifetime due to the Purcell effect. In addition, a small temperature dependence of 0.095 nm/K was obtained.</p> <p>Chapter 6 reports on the observation and characteristics of nanobeam PhC cavities. The nanobeam PhC cavity was successfully fabricated, achieving a fabrication error of less than 5% while maintaining structural integrity without any collapse. A 4.6-fold enhancement of Er-related luminescence with a Q-factor of >5500 was demonstrated. In addition, a small temperature dependence of 0.049 nm/K was obtained.</p> <p>Chapter 7 provides a summary of this thesis and discusses future challenges.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名(房之棟)		氏名
論文審査担当者	主査	准教授 館林 潤
	副査	教授 中谷 亮一
	副査	教授 山下 弘巳
	副査	教授 荒木 秀樹

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、高効率化および安全性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 裂内遷移 ($^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$) により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、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化光源実現に向け、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 1 次元フォトニック結晶ナノ光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光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 薄膜を母体としたブリッジ型 1 次元フォトニック結晶ナノ光共振器の設計手法を確立している。数値計算により共振器 Q 値を見積もった結果、100 万を超える値が得られることを見出している。さらに、円孔半径や配置を適宜シフトすることにより欠陥を導入したナノビーム光共振器構造を提案し、800 万を超える共振器 Q 値を得ることに成功している。併せて、光共振器から離れた箇所におけるビーム形状も解析し、垂直方向への取り出し効率を上げることにも成功している。

(2) GaAs:Er,O 薄膜を母体としたブリッジ型 1 次元フォトニック結晶ナノ光共振器を作製する手法を確立している。ブリッジ構造が作製過程で崩壊することなく、各パラメータの作製誤差を 3% 以内に抑えることに成功している。顕微フォトルミネッセンス測定により評価を行った結果、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、最近接格子点に二つの O 原子を有する Er(Er-2O)からの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。ブリッジ型 1 次元フォトニック結晶ナノ光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 の発光増大率を見積もったところ、最大で 7.3 倍程度の高い発光増大率が得られている。

(3) 1 次元フォトニック結晶ナノ光共振器の更なる高 Q 値化および低モード体積を実現すべく、ナノビーム型 1 次元フォトニック結晶ナノ光共振器を作製している。実験結果から得られた共振器 Q 値はブリッジ型 1 次元フォトニック結晶ナノ光共振器のそれに比して大きくなっており、Q 値が改善していることを示唆するものである。

以上のように、本論文は次世代光通信用波長帯波長安定化光源の実現に向けて、GaAs:Er,O を母体としたブリッジ型 1 次元フォトニック結晶ナノ光共振器に着目し、ナノ光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。