

審査の結果の要旨

論文提出者 張 柏富

本論文は“Capsule-shaped metallic InGaAs/InP cavity laser for photonic integrated circuits -proposal, simulation and demonstration (光集積回路に向けたカプセル形状 InGaAs/InP 金属共振器レーザの研究 -提案, 解析, 実証)”と題し, カプセル形状の金属共振器を有する光集積回路用の微小半導体レーザを提案し, その特性解析と InGaAs/InP 半導体による実証実験を行った結果について英文で纏めたもので, 7章より構成されている.

第1章は序論であって, 研究の背景, 動機, 目的と, 論文の構成が述べられている.

第2章は“Proposal of capsule-shaped metallic semiconductor laser”と題し, まず微小金属光共振器半導体レーザ一般の種々の形態とその共振器モードに関して論じている. 光集積回路に向けては, ファブリーペロー (FP) 共振器の TE モードを用いるのが最適であると結論している. 金属由来の損失を低減するために, 新たにカプセル形状の FP 共振器を提案している. 平面鏡に替えて円筒鏡を用いることで, 共振器側面の金属損失を回避することが狙いである.

第3章は“Analysis and theories of metallic semiconductor laser”と題し, 金属側面共振器半導体レーザの理論解析手法について論じている. まずレート方程式に基づく閾値利得と閾値電流の導出法を論じ, 次に直感的理解の助けとなる光導波路解析について述べている. 最後に, より厳密な解析を可能にする時間領域有限差分法 (FDTD) による 3次元シミュレーションと, それを用いた近視野像から遠視野像への変換について論じている.

第4章は“Simulation results of capsule-shaped metallic semiconductor laser”と題し, 3次元 FDTD を用いたカプセル形状金属共振器レーザ特性の数値シミュレーション結果について述べている. まず初めに, 円筒鏡の半径を最適化することにより, 共振器 Q 値が 50%改善することが示された. 次に, 求めた Q 値と閉じ込め係数を前章のレート方程式に代入することによって, 閾値利得と閾値電流を計算している. カプセル形状により, 閾値利得, 閾値電流共に顕著に減少することが示された. さらに, 外部取り出し効率を計算したところ, 40~60%の光子が取り出されることが分かった. 共振器直下に導波路を設けて光を取り出す場合にも, 高い結合効率の得られることが示された. 実験結果と照合するため, 遠視野像のシミュレーションについても考察が加えられている.

第5章は“Fabrication of capsule-shaped metallic semiconductor cavity lasers”と題し, カプセル形状金属共振器半導体レーザを InGaAs/InP 系材料で初めて試作実現したことについて, 特にそのプロセス技術を中心に論じている. カプセル形状共振器実現の鍵になる異方性ドライエッチング技術に関し, 種々の化学種とエッチング条件を比較検討している. その結果, メタンと水素の混合ガスによる反応性イオンエッチングが所望のカプセル形状を得る点で最適であることを示した. 金属蒸着に関しても, 陰の部分を生じないように 4重に電子線蒸着を行って, 半導体メサの外側に均一な金属膜を形成することに成功している.

第6章は“Photoluminescence of capsule-shaped metallic semiconductor cavity lasers”と題し, 試作されたカプセル形状金属共振器半導体レーザの特性をフォトルミネッセンス (PL) 法により評価したことについて論じている. 数 μm 以下の共振器を捕捉するための精密顕微 PL 装置を構築したことについて述べた後, PL 測定の結果を詳細に論じている. 異なる形状や品質のサンプルを網羅的に測定した結果, 全ての場合にお

いて、カプセル形状共振器が通常の矩形共振器よりも高い Q 値を示したことが述べられている。良好な仕上がりのサンプルがより高い Q 値を示すことも確認されている。また、実験で得られた PL スペクトルが、シミュレーションによって良く再現された。最後に、223 という高い Q 値を実現したにもかかわらず、今回の研究ではレーザ発振が観測されなかった理由について考察している。

第 7 章は結論であって、得られた成果を総括するとともに将来展望について述べている。

以上のように本論文は、将来の超高密度光集積回路に向けた金属共振器微小半導体レーザの新しい形態として、金属由来の損失を実効的に低減できるカプセル形状共振器を提案し、その共振特性やレーザ発振特性を数値シミュレーションにより明らかにするとともに、InP 基板上の InGaAs 混晶半導体を用いて提案素子を試作実現し、フォトルミネッセンスによる評価を通じて、シミュレーションで予測した通りの低損失共振器が得られることを実証したものであって、半導体光デバイス工学への貢献が少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。