

氏名(本籍)	いわた ひろし 岩田 普 (茨城県)		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第4604号		
学位授与年月日	平成20年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	高性能・高出力な半導体レーザーの研究開発		
主査	筑波大学教授	工学博士	浅川 潔
副査	筑波大李教授	理学博士	青木 貞雄
副査	筑波大学教授	工学博士	山部 紀久夫
副査	筑波大学教授	工学博士	伊藤 雅英
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	末益 崇

論文の内容の要旨

本研究の目的は、半導体レーザーの高性能化・高出力化の実現である。解決すべき3つの課題を明示した。その課題は、1) 活性層に注入されたキャリアの効率良い光への変換、2) 光の導波モードの高出力動作時までの安定化、3) レーザー端面の損傷の抑制である。各技術課題への解決策を探索し、その知見を基に、全ての技術を統合してLDデバイス実証を行った。まず最初に、高出力動作を再現できる「半導体レーザーの計算モデル」を提案した。重要な視点は、共振器方向でのキャリア分布を考慮することである。そのために、「キャリアのレート方程式」と「光の増幅作用」をLD共振器全体で自己無撞着に計算した。計算モデルの有効性を実際の赤色LDに適用して確認した。また、第2の課題である光の導波モードの安定化検討の理論的基盤を与えた。

第1の課題解決に対しては、周期律表に基づく、独自の化合物混晶半導体物性の推定、DH構造を実現する材料系の検討を広い視点から行った。LDの基本構造であるDH構造やQW構造の光学特性が、ヘテロ界面の特性(界面再結合速度)によって支配されていることを時間分解フォトルミネセンス法を用いて定量的に明らかにした。さらにヘテロ界面の不純物の捕獲特性を定量的に評価した。超格子のバッファ効果を利用して、GaAs/AlGaAs系において発振閾値電流の低いQW-LDを実証した。

第2の課題解決として、未だ実現されていない500nm帯LD実現に向けて、InPに格子整合するII-VI混晶系(MgZnCdSe, MgZnSeTe)を提案し、II-VI/III-Vヘテロ界面制御技術、II-VI混晶ドーピング技術を立ち上げた。II-VI材料の多様なバンドラインナップを利用した独自のDH構造を考案し、高輝度なLED動作を実証した。

第3の課題である共振器端面の光耐力向上への指針を得るため、Nd:YAGレーザーを半導体に照射して、材料の光耐力を評価した。その結果、GaAsとInPの光耐力が同じオーダーであること、透明領域で未知の光吸収プロセスがあること、不純物に強く依存することを確認した。未知の光吸収プロセスの定量的な把握を初めて行った。GaAsおよびAlGaAs結晶成長層の光耐力評価も行い、半導体基板の光学特性に強い影響を受けること、半導体のバンドギャップよりも、不純物制御が重要であることを実証した。熱分布の計算を

行い、n型基板上の成長層においては、光耐力の変化が光吸収量の変化で説明できることを示した。p型基板上の成長層においては、実験結果と計算結果が全く異なっており、表面温度だけではなく、表面へのストレスなどが影響しているものと思われる。

これらの結果を基に、LDとしての総合的な課題解決を検討した。LDの計算モデルから、種々の問題がHR端面近傍の高濃度キャリアによって引き起こされるとの仮説を得た。HR端面近傍の高密度キャリアは、DHの視点では、オーバーフロー電流の源となる。また、端面の損傷の視点では、フリーキャリア吸収による端面劣化の要因となる。HR端面近傍の高密度キャリアを低減する方法としてテーパ型導波路を有するLDを提案し、特性シミュレーション、デバイス試作を行った。その結果、LD特性として、キンクフリー出力の向上、最大出力の向上を実証した。また、キンクフリー出力がHR端面側の導波路幅で決定されることを見出した。光損傷実験からの指針であるキャリア密度の低減を、テーパ導波路LDに応用し、端面近傍の注入電流の抑制を行ったところ、AlGaAsをクラッド層とするInGaAs QWLDにおいて、COD抑制に成功した。最大出力は大幅に向上し、熱飽和現象を確認した。

審査の結果の要旨

本研究の狙いは、光通信のみならず光情報処理・光ビーム加工用高出力半導体レーザーの高性能化・高出力化の実現である。本研究では、3つの主要課題、即ち、1) 活性層におけるキャリアの高効率光変換、2) 高出力動作時の光導波モードの安定化、および3) レーザー端面の光損傷の抑制、をそれぞれ解決し、これらの知見を統合して高性能・高出力なLDの実現に貢献した。本研究が目指すデバイス性能の実現には制御すべきパラメータが多い一方、現象が複雑なあまり、それらの理論解析による体系的な問題解決には困難が伴う。このような課題に対し、本研究では、新たな着眼に立った実験を主体として問題解決を図った例が多い。例えば、従来問題視されていた、透明領域でのGaAsの光損傷の発生に関する新知見や、Zn拡散AlGaAs成長層における光耐力低下の実験的検証は、LDの出射端面近傍の窓構造の設計思想を大きく変えるものである。また、テーパ導波路LDにおける今回のHR端面側に着目して高密度キャリア挙動の重要性を指摘した新知見は、光強度が高いAR端面側のみに着目していたが故に問題解決に至らなかった従来の認識を越える新知見と言える。今後LDの更なる高性能化・高出力化のためには、電子と正孔のそれぞれに最適化した非対称なDH構造の導入による活性層注入キャリアの高効率光変換や、共振器方向で層厚や組成を変えてHR端面側でのオーバーフロー電流を低減した構造が有望視される。また、高出力動作時の光波モードの安定化のためには、光散乱やAR端面での光閉じ込め率 Γ が抑制された、テーパ構造の最適化が指摘できる。このような新たな提言が可能となるのも、本研究による実験的検証により様々な問題解決がなされたことによる賜物である。こうして本研究によりLDのさらなる高性能化・高出力化が実現できれば、通信システムや情報システムの小型化、省電力化へつながり、社会へ大きく貢献できるものとする。本研究成果はこの様な意味で高く評価できる。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。