

審査の結果の要旨

論文提出者 橋本 順一

本論文は、「0.98 μm 帯GaInAs/GaInP高出力歪量子井戸半導体レーザの高信頼化、高波長安定化に関する研究」と題し、エルビウムドープファイバ光増幅器(EDFA)励起用の0.98 μm 帯GaInAs/GaInP高出力歪量子井戸半導体レーザの実用化に関し、実用化を阻む障害となっていた突然故障および発振波長の不安定性の問題を解決し、実用レベルの高信頼性、高波長安定性を達成したことについて纏めたもので、9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。GaAs基板を用いGaInAs歪量子井戸を活性層とする0.98 μm 帯半導体レーザは、EDFA用の低雑音、高効率、低消費電力な励起光源として期待されていたが、COD(Catastrophic Optical Damage)と呼ばれる劣化モードによる突然故障の頻発と、電流に対する発振波長の不安定性が実用化を阻む障害となっていた。一方、EDFAにおける0.98 μm 帯の有効励起波長帯域が10nm前後と狭いため、動作環境や駆動条件によっては、励起レーザの発振波長が励起帯域から外れてEDFAに対する励起効率が下がる恐れがある。従って実用上EDFAを安定に励起するためには、電流に対する波長安定化を図る必要があった。本論文では、実用化を阻害するこれらの問題を克服し、実用レベルの高信頼性、高波長安定性を実現した研究成果についてまとめている。

第2章は「GaInAs歪量子井戸構造の結晶成長」と題し、本論文を通じて議論される半導体レーザで用いられる歪量子井戸活性層の、有機金属気相エピタキシー(OMVPE)による結晶成長法と成長条件、および歪量子井戸の最適化について述べている。

第3章は「埋め込みリッジ型0.98 μm 帯GaInAs歪量子井戸半導体レーザ」と題し、本論文で対象とする半導体レーザの横モード制御構造である「埋め込みリッジ構造」について、その特長、構造最適化、作製プロセスと典型的な特性について述べている。

第4章は「0.98 μm 半導体レーザのCOD劣化解析」と題し、まず0.98 μm レーザのCOD劣化耐性評価実験を行っている。ここではCOD劣化の理論モデルであるStress-Strengthモデルに準拠して、駆動電流をパラメータとして通電時間に対するCOD耐性の変動を調べた。その結果、COD耐性は通電時間と共に明らかに下がっており、また大電流(高出力)の方が低下速度が速いなど、Stress-Strengthモデルと合致した結果が得られ、本モデルがCOD劣化の解析モデルとして妥当であることを確認している。次にCOD耐性の時間変動の定量化を試み、各通電時間におけるCOD耐性の分布が半導体素子の故障解析に標準的に用いられるワイブル統計で記述できることを初めて明らかにした。その分布の代表値として全サンプル数の約63.2%がCOD故障に至るパワー値を用いることで、COD耐性の通電時間、電流ストレスに対する低下速度を定量化できることを示した。本統計処理を用いることで、時間に対するCOD耐性低下率が電流ストレスの7.88乗に比例し、大電流、高出力時には加速度的にCOD耐性が低下し、急激に短寿命化することを明らかにした。さらに、上記で定量化したCOD耐性の時間変動を用いることで、それまで困難とされてきたCOD故障時間の推定を、短時間で精度良く行う方法を開発した。

第5章は「埋め込みリッジ型0.98 μm レーザのCOD耐性の改善その1 (Arプラズマ照射による端面処理)」と題し、まずCOD劣化の主要原因の1つである端面非発光再結合の低減を試みている。レーザ端面へのプラズマ照射によりGaやAsの端面酸化物を物理的に除去し、それに起因する端面上の非発光準位を低減することで端面非発光再結合の低減化を図っている。照射プラズマには、不活性、高純度、低コストのArガスを選択し、照射装置としては低温、低ダメージ照射が可能で、照射後の連続端面コーティングも可能な電子サイクロトロン共鳴(ECR)化学気相堆積装置(CVD)を使用している。Ar照射による端面酸化物除去に伴い、照射サンプルからのフォトルミネッセンス(PL)強度が増大することを観測し、端面酸化物除去が端面非発光再結合低減に直結していることを確認した。また2時間照射で端面酸化物が完全に除去され、かつPL強度が最大となることを見だし、これを最適照射時間と決定した。次に埋め込みリッジ型0.98 μm レーザの端面に上記Arプラズマ照射を行い、プラズマ照射によるレーザ特性への悪影響は生じないことを確認した。さらに照射

のある無しで信頼性を比較したところ、照射レーザは未照射レーザに比べ寿命が1桁以上長くなり、プラズマ照射による端面酸化物の除去がCOD耐性向上に有効であることを実証した。それでもレーザ寿命は数千時間程度に留まり、Ar照射だけでは実用レベルの信頼性確保が困難であることも判った。

第6章は「埋め込みリッジ型0.98 μ mレーザのCOD耐性の改善その2 (ウィンドウ構造の導入)」と題し、COD発生のもう1つの主原因である端面光吸収の大幅低減をねらって、新たな端面窓構造(ウィンドウ構造)の導入を試みている。ウィンドウ化の手法としては、上部クラッド層の途中までイオン注入し、その時生じた空孔をアニールにより拡散させることで、量子井戸活性層とその隣接層間に原子の相互拡散を生じさせ、活性層を広バンドギャップ化する新規手法を考案している。ウィンドウ作製に最適の注入イオンとして窒素を見出し、これを用いたウィンドウ作製条件の最適化を行った。その結果、イオン注入領域を活性層から0.8 μ m程度離し、かつアニール温度を最適化することで、当初のねらい通り活性層への注入ダメージは完全に回避され、同時に注入領域のバンドギャップ波長は30nm程度短波長化され、ウィンドウ領域として機能させるのに十分な広バンドギャップ化が実現されることが判った。この最適条件を用いて埋め込みリッジ型0.98 μ mウィンドウレーザを作製し、特性や信頼性を評価した。次に長期通電したウィンドウレーザの通電前後でのCOD耐性を評価したところ、通電後も400mWを超えてCOD発生は皆無であり、ウィンドウ化により実用レベルのCOD耐性の実現されることがわかった。さらに長期通電前後での電流-電圧、電流-光出力特性を比較し、通電前後で劣化のないことを確認した。本論文で提唱する新規ウィンドウ作製技術は、内部劣化抑制にも有効であることが示された。

第7章は「埋め込みリッジ型0.98 μ mウィンドウレーザの高出力化」と題し、110mW級モジュールの開発を目指して横モード不安定化に起因するキンクレベルの向上を図り、リッジ構造における空間ホールバーニングの抑制技術を検討した結果が述べられている。具体的にはエッチストップ層組成の変更、上側クラッド層のドーピング見直しを行って、キンクレベルを実際に向上させることに成功している。

第8章は「埋め込みリッジ型0.98 μ mレーザの波長安定化」と題し、実用化へのもう1つの課題であった注入電流変化時の発振波長の安定化について論じている。ここではファイバブラッググレーティング(FG)を反射器とする外部共振器レーザ(FGL)構造によって波長安定化を図っている。FGLでは発振波長はFGのブラッグ波長でほぼ決まるため、温度、電流に対して高安定となる。FGの共振器長を50cm以上と長くしかつFG帯域幅を1nmまで狭めることで、0.35nm以下の狭線幅発振スペクトルと0.2nm以下の良好な波長制御性が得られることを示した。最適化したFGを搭載した0.98 μ m帯FGL励起モジュールを試作した結果、従来品と同等以上の出力特性、キンク特性を維持したまま、電流に対する発振波長変動を0~300mAの範囲で1nm未満と格段に低減することに成功し、実用に十分な波長安定化を達成した。

第9章は結論であって、本研究で得られた成果を総括している。

以上のように本論文は、エルビウムドープファイバ増幅器励起用の波長0.98 μ m帯歪量子井戸半導体レーザについて、その劣化機構の解析を通じて、突然故障を防止する端面アルゴンプラズマ照射技術および新たな端面窓構造を考案し、これら技術を適用して同レーザの高出力、高信頼動作を可能にするとともに、外部光ファイバ格子共振器構造を応用して電流変化に伴う波長変動を抑止し、ファイバ増幅器励起光源として確立・実用化したもので、電子工学分野に貢献するところが少なくない。

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。