

## 論文の内容の要旨

論文題目                    0.98  $\mu\text{m}$  帯 GaInAs/GaInP 高出力歪量子井戸半導体レーザーの  
高信頼化、高波長安定化に関する研究

氏 名                        橋 本 順 一

GaAs 基板を用い GaInAs 歪量子井戸を活性層とする 0.98  $\mu\text{m}$  帯半導体レーザーは、エルビウムドープファイバ増幅器 (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。

このうち COD は通電中におけるレーザー端面での非発光再結合の増殖に伴い、端面劣化が進行して端面温度が上昇し、ついには融点を超えて端面が溶融破壊し、レーザーが頓死する故障モードで、本レーザーのような GaAs 系の短波長レーザーにおいて高出力時に特異的に生ずる劣化モードである。本レーザーは EDFA 励起用光源として、150mW レベルの高出力動作が必須であったため、高出力動作時に頻発する本故障を撲滅しない限り、実用化は不可能であった。

一方発振波長の不安定性に関しては、筆者等が開発した AlGaInP 埋め込みリッジ型 0.98  $\mu\text{m}$  帯半導体レーザーでは 300mA の電流注入で約 15nm 波長が変動した。EDFA における 0.98  $\mu\text{m}$  帯の有効励起波長帯域 (EDFA を励起し、増幅機能を生じさせることが可能な波長帯域) が 10nm 前後と狭いことを考えるとこれは過大な波長変動であり、動作環境や駆動条件によっては、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った。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。

本論文は EDFA 励起用 0.98  $\mu\text{m}$  帯 GaInAs/GaInP 高出力歪量子井戸半導体レーザの実用化に関し、実用化を阻む元凶となっていたこれらの課題を克服し、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たものである。

筆者等は電流ブロック層に AlGaInP を用いた、独自の埋め込みリッジ型 0.98  $\mu\text{m}$  帯半導体レーザの実用化を目指し、構造最適化することで出力的には実用レベルの 150mW 級レーザチップを開発したが、150mW レベルの高出力動作時には数百時間で COD 初期劣化が頻発した。そこで筆者等は COD 対策を最優先課題と捉え、まず COD 劣化の現状を把握するために、0.98  $\mu\text{m}$  レーザの COD 劣化耐性評価実験を行った。本実験では、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た。

次に上記実験結果に統計処理を施すことで、COD 耐性の時間変動の定量化を試みた。その結果、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、その分布の代表値として全サンプル数の  $100 \times (1 - e^{-1})\%$  (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することに成功した。本統計処理を用いることで、筆者らの 0.98  $\mu\text{m}$  レーザの場合、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、上記統計処理にて定量化した 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推定する方法を開発した。

以上の COD 耐性評価から、高出力時の信頼性確保のためには抜本的な COD 耐性向上策を講ずることが急務であることが明確になった。そこで次に第 1 の向上策として、COD 劣化の主原因の 1 つである端面非発光再結合の低減化を試みた。具体的には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た。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 ECR (Electron Cyclotron Resonance)-CVD を使用した。

条件出しの結果、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見出し、当初の予想通り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実証した。また 2 時間照射で端面酸化物が完全に除去され、且つ PL 強度が最大となることを確認し、これを最適照射時間と決定した。

その後埋め込みリッジ型 0.98  $\mu\text{m}$  レーザの端面に上記最適時間で Ar プラズマを照射し、照射サンプルの特性や信頼性を調べた。まず照射前後での特性比較から Ar プラズマ照射してもレーザ特性へのダメージは生じないことを確認した。これは低ダメージ照射の ECR-CVD を採用したことが有効に寄与していると思われる。次に Ar 照射レーザと未照射レーザを 50°C、150mW 出力一定の条件で通電し、信頼性を比較した。その結果、Ar 照射レーザは未照射レーザに比べ寿命は 1 桁以上長くなり、予想通り Ar 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。しかしながら Ar 照射してもレーザ寿命は数千時間程度に留まり、COD 耐性の改善はまだ不十分であり、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。

実用化のためには COD 耐性を更に 2 桁以上改善する必要があり、これを実現するには COD 発生のもう 1 つの主原因である端面光吸収を大幅に低減する必要があった。そこで筆者等は COD 耐性向上の第 2 の方策として、端面近傍の活性層を高バンドギャップ化することで端面光吸収を低減する、端面ウィンドウ化に取り組んだ。ここで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、活性層を高バンドギャップ化する新規手法を考案した。本手法では、注入されたイオンが活性層まで拡散しないため、従来の手法に比べて注入イオンのダメージに起因する活性層劣化が大幅に軽減されることが期待された。またイオン注入装置を用いることでウィンドウ特性として高い均一性、再現性が期待され、また従来のレーザ作製プロセスとの整合性も良いので、ウィンドウレーザの生産性の観点からも最適の手法と考えられた。

次に筆者らは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  $\mu\text{m}$  程度離し且つアニール温度を最適化することで、当初の狙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するのに充分なだけの高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  $\mu\text{m}$  ウィンドウレーザを作製し、特性や信頼性を評価した。まずイオン注入領域の PL 特性を評価したが、注入領域は非注入領域に比べて再現性良く 30nm 以上短波長化されており、ウィンドウ領域として良好に機能しうることを確認した。本ウィンドウレーザの特性は従来の非ウィンドウレーザと同等であり、ウィンドウ化による劣化

は見られなかった。これは今回開発した活性層にまではイオンを注入しない新規ウィンドウ作製技術の低ダメージ性によるものと考えられる。次に信頼性評価のため、本ウィンドウレーザを 50°C, 150mW 出力一定の条件で通電したところ 1.4 万~1.6 万時間安定動作し、COD 発生は皆無であった。本通電結果から 50°C, 150mW における寿命として約 28 万時間の实用レベルの信頼性が得られた。

さらに本ウィンドウレーザの通電に伴う COD 耐性変動を明確化するため、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。その結果通電後も 400mW を超えて COD 発生は皆無であり、ウィンドウ化により COD 耐性が劇的に改善され、实用レベルの COD 耐性が実現されていることを明らかにした。さらに長期通電前後での電流—電圧、電流—出力特性を比較したが、両特性とも通電前後での特性はほぼ一致し、劣化は見られなかった。従って、本ウィンドウレーザは COD 劣化だけでなく、ウィンドウ領域を含む内部結晶劣化についても十分な耐性があることが判った。この内部劣化抑制にも、今回開発した活性層にまではイオンを注入しない新規ウィンドウ作製技術の低ダメージ性が有効に寄与していると思われる。

最後に实用化へのもう 1 つの課題であった電流に対する発振波長の安定化についての取り組みを述べる。筆者等はファイバグレーティング (FG) を外部反射器に用いて、外部共振型ファイバグレーティングレーザ (FGL) 構造とすることによる波長安定化を検討した。FGL では発振波長は、温度依存性微小 (10 pm/K)、かつ電流には無依存である FG のブラッグ波長でほぼ決まるため、FGL の発振波長も温度、電流に対して高安定となる。FG の構造パラメータと共振器長を振って構造最適化のための条件出しを行い、共振器長を 50cm 以上と長くし且つ FG 帯域幅を 1nm まで狭めることで、0.35nm 以下の狭線幅な発振スペクトルと 0.2nm 以下の高波長制御性が得られることを明らかにした。

このようにして最適化した FG を搭載した 0.98  $\mu\text{m}$  帯 FGL 励起モジュールを試作し、特性評価した。その結果、従来品と同等以上の出力特性、キッ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 で 1nm 未満と劇的に低減することに成功し、FGL 構造導入により实用に十分なレベルの波長安定化を達成した。

このような研究経緯を辿り、筆者等は COD 劣化と波長不安定性の課題を克服し、最終的に实用レベルの信頼性と波長安定性を有する 0.98  $\mu\text{m}$  帯半導体レーザの開発に成功した。