

氏 名	やま ぐち たか お夫 山 口 隆 夫
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 5 年 1 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 41 年 3 月 東北大学工学部電子工学科卒業
学 位 論 文 題 目	GaAlAs 半導体レーザの高出力化と多ビーム 化に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 小野 昭一 東北大学教授 川上彰二郎 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 大見 忠弘

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は、各種光情報処理用の高性能半導体レーザの開発に関する研究として、GaAlAs 半導体レーザの製造技術である液相エピタキシャル結晶成長法の確立と、半導体レーザのための素子加工、素子構成の研究、ならびにそれを基礎とする半導体レーザの高出力化のための素子構造、設計、製造の諸技術、及び 1 素子から複数のレーザビームを射出するマルチビームレーザの構成と製造技術及び動作解析などについての研究結果をまとめたものである。

本研究は半導体レーザの製造技術である液相エピタキシャル法の高精度化、高出力レーザの必要条件である端面破壊抑制と発振モードの安定化、さらに熱的条件の最適化をはかることにより、実用的な素子開発を行うと共に、多ビーム化技術の確立によって光ディスクシステムやレーザビームプリンタなどの光情報処理機器の高機能化に有効な GaAlAs 半導体レーザを開発することを目的として行われた。本論文は 6 章から成る。

第 1 章は“序論”で本研究の背景と目的ならびに意義を述べ、その意義は、①開発された高出力半導体レーザが実用的な信頼性を有し、光ディスクシステムなどの光情報処理機器の高性能化に寄与すること、さらに②半導体レーザの多ビーム化における熱的相互作用の問題とその解決方法を明らかにし、設計手法と製造技術の確立が一層の光機器の高度化に貢献できる点にあることを明らかにしている。

第 2 章の“液相エピタキシャル成長法の GaAlAs 半導体レーザへの展開と基板加工基礎技術”

では、液相エピタキシャル成長法を GaAlAs 半導体レーザの製造技術に展開したこと、基板エッチングによる溝形成技術を初めてデバイス作製に適用したセルフアライン型 FET の製造、溝付基板上の液相エピタキシャル法と MBE 法による高抵抗 ZnSe とを組み合わせた BCP (Buried-Cap-Planar, キャップ埋込みプレーナ型) 半導体レーザについて述べている。

- ① まず、GaAlAs 半導体レーザへの LPE 技術の適用のため、新しい横型スライドボート法を開発したことを述べている。ボートは Ga 融液を保持するメルトホルダー、融液の厚さを自動的に決めるスペーサ、融液飽和度調整用ダミーウェハと成長用基板とを同時にセットする基板スライダからなり、このボートにより GaAlAs/GaAs ダブルヘテロ接合が高精度に形成できる。
- ② 次に、GaAs 基板結晶のプレファレンシャルエッチング技術を初めてデバイス作製に適用したことを述べている。(100) 面上で Br-CH<sub>3</sub>OH 液によるエッチング溝とゲートのセルフアライン技術により、ゲート長 5 μm で最大遮断周波数 6 GHz の高性能 FET を得た。このことにより、プレファレンシャルエッチングの有用性を初めて明らかにすると共に、半導体レーザに適用するための H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>OH 系による V 溝形成技術を確立した。
- ③ さらに、①、②の技術を適用してキャップ埋込みプレーナ型 (Buried-Cap-Planar, BCP) ストライプレーザと呼ぶ新しい構造の GaAlAs 半導体レーザを作製した。この素子は、ダブルヘテロ構造を LPE 成長後、キャップ層をストライプ部を残してエッチングし、その後、MBE 法により半絶縁性 ZnSe で埋込むものである。拡散などの高温処理が不要で、かつ ZnSe と GaAs の物理的特性がよく似ていることから、界面の歪や格子不整合が生じにくい。そのため、高信頼性、高性能の半導体レーザが開発された。得られた素子の主な特性は、発振しきい値電流 40mA、光出力 10mW、発振波長 780nm であり、50°C、5 mW、3500 時間以上安定な連続動作を確認した。

第 3 章の“GaAlAs 半導体レーザの高出力化”では、高出力化技術として最適な素子構造を得るための設計技術、端面反射率の最適化、また、端面電流非注入構造の採用とその構造最適化を行い、光出力 100mW 級の高信頼性素子を実現したことを述べている。

- ① まず高出力半導体レーザの基本設計に当り、溝付き基板上の内部ストライプ GaAlAs 半導体レーザにおける導波モード解析を行い、安定な横モード発振のための導波路構造の最適設計を行った。その結果、発振波長 830nm の素子において、ストライプ幅 5~6 μm、活性層厚 0.04~0.06 μm、平坦部における基板側クラッド層厚 0.3~0.35 μm を得た。
- ② 次に端面反射膜構造と反射率の最適設計を行い、光出力 100mW 級の半導体レーザでは、例えば前面が 0.06、後面が 1.0 の組み合わせが動作電流を最小にする反射率であることを明らかにした。実際の素子においては、後面からの出射光をモニタリングに使用できるよう前面反射率 0.08、後面反射率 0.8 とし、また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-Si 多層膜における反射率の設計とスパッタリングによる膜形成法を確立し、素子作製に適用した。
- ③ さらに前面を低反射率、後面を高反射率とする非対称端面コートにより、キンク発生の光出力は 1.7 倍に向上し、端面破壊 (COD) レベルは 1.7~3 倍に向上することを実験的に明らかにした。これらのレベル向上は、キンク発生や COD が端面における内部光エネルギーと関連するとして

理論的に説明できた。

- ④ また、半導体レーザの高出力化のための熱的条件を検討し、共振器長による特性の変化を明らかにした。まず、動作電流密度、しきい値電流密度は共振器長を長くすることによって減少し、その低減率は共振器長600  $\mu\text{m}$ 程度まで顕著である。また、20mWにおける発振波長は400  $\mu\text{m}$ 以下で短波長化し、バンドフィリング効果を示唆すると共に、熱飽和に関係する重要なパラメータである特性温度が低く、高出力レーザとしては不適當であることが分かった。これらの共振器長とレーザ特性の関係から、100mW級の半導体レーザでは、その共振器長として600  $\mu\text{m}$ 程度が最適であることを示した。
- ⑤ 以上の解析に基づく最適の素子パラメータを基本にして、端面電流非注入領域を持つ新素子を開発した。非注入領域のCODレベルに及ぼす効果について理論的に検討し、端面部の温度が中央部より10度以上低くなること、及びその結果として、CODレベルが約1.5倍に高まること、及び非対称端面コートを行えば、CODの起こる最大光密度は約20MW/ $\text{cm}^2$ となり、極めて高出力化できることを示した。試作された素子の代表的特性として、 $\lambda=830\text{nm}$ 、 $\theta_{\perp}=25$ 度のもので最大光出力(CW、室温)230mWの高出力を得た。この素子は光出力100mW、60°Cの連続動作で2000時間(室温換算36000時間)を越す安定動作が確認され、100mW級の素子として実用に耐えられるものであることを示した。

第4章の”GaAlAs半導体レーザの多ビーム化”では、1パッケージから複数のレーザビームを出射し、かつそれぞれのビームが独立に駆動・制御できるマルチビーム半導体レーザを開発し、その構造、製法、特性を述べている。また、多ビームレーザ特有の問題として、ビーム間の熱的相互作用の重要性を指摘し、その低減化をはかったことを述べている。

- ① まず多ビーム化の基本的特性を明らかにするため、3ビーム半導体レーザを開発した。素子構造として、ハイブリッド型、モノリシック型について検討すると共に、各ビーム独立にAPC制御することができるマルチビームレーザの基本構造を確立した。また、マルチビームレーザ特有の問題として、ビーム間の熱的相互作用を指摘し、それによってレーザビームのスペクトルや光出力が変動することを示した。この3ビーム半導体レーザは、オーバーライト機能を持つ光ヘッドに応用され、その有用性が明らかになった。
- ② 次に3ビームレーザで確立した基礎技術を元にして、波長830nm、光出力40mW、ビーム間隔100  $\mu\text{m}$ の4ビームレーザを開発した。熱的相互作用の評価方法としてパルス通電法を導入し、隣接素子間の熱的相互作用を定量的に明らかにした。この熱的相互作用の低減方法として、APC法、DCバイアス法を提案し、また、素子構造上の対策としては、チップ厚の薄層化や長共振器化などが熱的相互作用低減のため有効であることを示した。
- ③ さらに端面非注入構造を持つ100mW高出力半導体レーザをマルチビームレーザに適用することによって、100mW 4ビーム半導体レーザを開発した。この素子は、チップ厚みを70  $\mu\text{m}$ とし、ヒートシンク材料としてcBNを用いることで、熱的相互作用は100mW駆動時わずか2.1°Cと極めて低く抑えることができた。

④ そしてビーム数の一層の増大とビーム間隔の短縮をはかり、波長790nmの高出力8ビーム半導体レーザを開発した。ビーム間隔は50 $\mu$ mとし、熱的相互作用を抑えるため、接合面を下にして組立てた。熱的相互作用は100 $\mu$ m間隔の素子間で1.4 $^{\circ}$ C、50 $\mu$ m間隔の素子間でさえもわずか2.4 $^{\circ}$ Cと低く、さらに一層の多ビーム化とビーム間隔の短縮が可能であることを示唆した。

第5章の”マルチビーム半導体レーザの動作解析”では、マルチビームレーザ特有の問題である熱的相互作用を理論的に明らかにするため、解析解による方法、差分法、有限要素法の3つの方法を用いてレーザチップ内の熱解析を行い、解析結果が実験結果にほぼ一致し、マルチビームレーザの高性能化、高信頼性化に生かされたことを述べている。

- ① まず熱解析を行うに当り、熱伝導方程式の解をフーリエ級数展開し、フーリエ係数を漸化式として算出した。この方法を3ビームレーザに適用した結果、隣接素子による熱的相互作用は4 $^{\circ}$ Cとなり、実験値と一致した。また、活性層温度分布の解析結果から、素子間隔50 $\mu$ m、25 $\mu$ mでは熱的相互作用がそれぞれ約7 $^{\circ}$ C、9 $^{\circ}$ Cとなり、ビーム間短縮の可能性を示している。
- ② 分離溝を含む実際に近いモデルで解析すること、及び非定常状態での熱解析を行うため、差分法による解析を行った。この方法を4ビーム半導体レーザに適用し、隣接素子による熱的相互作用は素子点灯後約2msで定常状態に達し、温度上昇値は実測値と一致すること、チップ厚みを120 $\mu$ mから60 $\mu$ mにすることで熱的相互作用及び定常状態に達する時間は減少することが明らかになった。また、ヒートシンク材料としてcBM、ダイヤモンドなどを用いたときの熱的相互作用の低減を理論的に明らかにした。
- ③ 熱源（発振部）付近での高精度解析を目的として、有限要素法による熱解析方法を確立した。この方法により、8ビーム半導体レーザの解析を行い、熱的相互作用の大きさが実験値と一致すること、8ビーム全て動作の状態では、発振部温度は8ビームとも約20 $^{\circ}$ Cとなることを明らかにした。また、ヒートシンクとしてcBMを用いることで、この発振部温度も半減することを明らかにし、素子高信頼化のための方法を示した。

第6章は”結論”で本研究の意義と各章で得られた結果を要約した。

- ① 本研究に基づいて製造されるGaAlAs高出力半導体レーザは現在その光出力が150mW級の素子まで実用化されつつあり、各種光ディスクシステム、印刷システム、SHG（第2高調波発生）素子用光源など、その応用範囲は急速に広がりつつあり、また、②多ビームレーザについても近年各方面でその重要性が認識され光通信、光情報処理両面での研究報告が増加している。このように、本研究は各種光機器の高性能化を実現する上で極めて重要な成果を得ることができ、その工学的意義は極めて大きいと考える。

## 審 査 結 果 の 要 旨

現在、半導体レーザーは小型、軽量のコヒーレント光源として、光通信や各種光情報処理機器のキーデバイスになっているが、今後も、これら光エレクトロニクス分野の発展の多くは、この半導体レーザーの高性能化により達成されるものと思われる。

著者は、光情報処理機器の高速化、多機能化を図るため、屈折率導波型 GaAlAs 半導体レーザーの高出力化と多ビーム化とを目的に、多くの理論的検討と実験的研究を行ってきた。

本論文は、これらの研究成果を纏めたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、初めて半導体レーザーの作製に適用した、選択エッチングによるV溝形成法を中心に、著者の確立した高精度素子作製技術について述べている。

第3章では、高出力レーザーを実現する素子構造についての理論的研究結果と、それに基づいて製作した素子の動作特性とについて述べている。注目すべき成果は、出力制限の主因であったレーザー端面破壊を防止するため、両端面近傍を電流非注入領域とする構造を導入し、その高歩留り製作技術を確立した事である。これにより、最大光出力230mW（連続動作、室温）を達成し、出力100mWで3万時間以上の安定動作を可能にした事は高く評価できる。

第4章では、光ディスク装置やレーザープリンタの高速化、等のため要望の強い、個々に制御できる多ビーム半導体レーザーの開発研究について述べている。ここで、実用上問題になる光のクロストークや熱的相互作用に関する実験的検討結果と、詳細な熱解析の結果とに基づき、3～8本の高出力（30～100mW）レーザーを100～50 $\mu$ m間隔で単チップ化し、多ビーム半導体レーザーを実現しているが、これは大きな成果と云える。

第5章では、前章で述べた多ビーム半導体レーザー実現のためには不可欠な、種々のチップ構造についての熱解析の手法と、その結果とを纏めて詳述している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、半導体レーザーを使用した各種光情報処理機器の一層の高速化、多機能化を目指し、そのための基本的条件となる半導体レーザーの高性能化に関し、多くの理論解析と実験とによる研究を行い、当面の目的である高出力化、多ビーム化を達成する迄の研究成果を纏めたもので、電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。