

学位論文題名

GaAlAs 系半導体レーザーの発振波長および
光出力に関する高性能化の研究

学位論文内容の要旨

光産業のキーデバイスである半導体レーザーが実用的意味をもつ連続発振に成功したのは 30 余年前の 1970 年である。以降、GaAs を結晶基板とした GaAlAs 三元系ダブルヘテロ構造の半導体レーザーは単一モード化、短波長化、高出力化および低雑音化といった高性能化に向けて技術が推移してきた。また、半導体レーザーを他の機能素子と一体化しようとする光集積回路および光電子集積回路の研究も古くから行なわれてきた。

GaAlAs 系半導体レーザーの短波長化は実用化という観点から活発に研究が進み、室温連続発振で 638nm の最短波長が達成されている。しかしながら、短波長化に伴う活性層の AlAs 混晶比の増加は、この系のバンド構造に起因する内部量子効率の低下やクラッド層の間接遷移型組成への移行、また格子不整合や化学的不安定性の増大などが短波長化を困難にし、実用レベルでは 750nm 前後に 1 つの壁があると見なされている。現在、CD や MD 等に使用されている半導体レーザーの波長帯域は、十分な信頼性保証の観点から 780~790nm に設定されている。750nm 以下の波長帯域の実用化は InGaAsP や AlGaInP などの四元混晶半導体や GaInP 三元混晶半導体などの材料が用いられている。

GaAlAs 系半導体レーザーの高出力において、最大光出力を決定する主要因になっているのは光学的端面破壊である。組成の 1 つである Al の酸化によりレーザー端面近傍に多くの非発光再結合中心が存在し、レーザー光の吸収によって発熱し熔融に至るためである。光学的端面破壊の抑制を図るには、端面での光の吸収を減少させることやレーザー光密度を下げるために発光面積を大きくすることなどがある。後者において、活性層の薄膜化が最も実現可能であるが、従来の液層エピタキシャル(LPE)成長法では 0.1 μm 以下の結晶薄膜を制御よく成長させることは極めて困難であった。

半導体レーザーを他の機能素子と一体化しようとする光集積回路および光電子集積回路の研究は製品化された事例は少なく、基本的なデバイスの可能性が検証され始めた段階である。技術的な課題としてはデバイスの信頼性確保および劈開法以外の共振器端面形成法の確立である。共振器端面を必要としない分布帰還型(DBF)や分布反射型(DBR)の半導体レーザーも有力な方法である。

本論文は、GaAlAs 系短波長帯半導体レーザーの高性能化およびモノリシック化に関するものであり、長寿命化、短波長化、高出力化および複合機能素子化に取り組んできた。本研究の目的は

- (1) 液相エピタキシャル(LPE)成長による良質な多層薄膜の形成法と無歪組立て工法を確立する。
- (2) 短波長化に伴う特性および信頼性の変化について検討し、最適な素子構造と作製法を提案する。
- (3) 半導体レーザーの高出力化に適した新しい素子構造を提案し、光出力、動作電流および横モード制御についての最適設計法および量産化に適した作製プロセスを確立する。

(4) 劈開法以外の新しい共振器作製プロセスを確立し、光 IC に向けた新しい複合機能素子を実現する。

ことであり、これらの基礎研究・技術開発に基づいた実用化に取り組み、その量産技術の確立と歩留り向上に努めた。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、半導体レーザの高性能化について理論的考察と基礎実験に基づく検討を行っている。半導体レーザの開発指針は短波長化、高出力化および集積化に大別される。また、それぞれ実用化にあたり基本性能としては低雑音化、単一モード化および高信頼化が要求されている。

第 3 章では、半導体レーザの製造技術について述べている。多層薄膜成長を容易にする液相エピタキシャル成長技術および高信頼化の要因となる素子作製および組立技術について解説している。

第 4 章では、横モードの制御が容易な段差基板型 (Terraced Substrate : TS) 半導体レーザを提案し、短波長化についての検討を行なった。一般に短波長化に伴い、しきい値電流、モード安定性、最大光出力および寿命など多くの点において $0.8\mu\text{m}$ 帯の赤外光半導体レーザと同等の性能を得ることが難しくなる。ここでは $0.71\mu\text{m}$ の短波長を実現したうえで、実用レベルの波長域を提言している。

第 5 章では、液相エピタキシャル成長 (LPE) 法の特徴を生かし、高出力に適した超薄膜活性層が制御よく形成できるツイン・リッジ基板 (Twin-Ridge Substrate: TRS) 型高出力半導体レーザを提案し、その原理と最適化設計および作製した素子の特性について解説している。

第 6 章では、第 5 章で述べた TRS レーザに改良を加え、光出力増大のための新しいアプローチによる超高出力半導体レーザを提案し、その素子設計、製法および発振特性について述べている。基本的には、埋め込みストライプ構造を用いて電流注入効率を向上し、低しきい値化によって端面破壊レベルを向上させたものであり、この構造を BTRS レーザと呼んでいる。

第 7 章では、同一基板上に TS 型と TRS 型レーザを一体化した二波長レーザアレイと BTRS 型の高出力半導体レーザアレイについて述べている。BTRS 型の高出力半導体レーザアレイは発光ストライプを 3 本アレイ化したものであり、全てのストライプが同位相で発振する位相同期型アレイと異なる位相で発振する位相非同期型アレイについて、両者の比較検討を行なっている。

第 8 章では、光 IC やショートキャビティ化の 1 つのアプローチであるエッチドキャビティレーザを提案し、その作製法および室温連続発振特性について述べている。ここで新たに開発した化学エッチング法は GaAlAs/GaAs 多層構造の結晶面異方性を利用したものであり、通常の劈開面と遜色のない反射率をもつエッチドキャビティ面を実現している。

第 9 章では第 8 章で述べた高品質の鏡面が形成できる化学エッチング技術を用いて作製した新しい複合キャビティレーザについて、素子構造、製法および波長選択性について解説している。

第 10 章では、本研究における成果を総括し、今後の展望について述べている。

最後に、著者は GaAlAs 系半導体レーザにおいて短波長化および高出力化を実現し、半導体レーザの高性能化に関する有益な知見を得ると共に、これらの研究に基づいて CD、MD や光ディスクファイル等の光ピックアップへの実用化、月産約 1,000 万個にも達する半導体レーザの量産化などの実績を築いた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 小 柴 正 則
副 査 教 授 三 島 瑛 人
副 査 教 授 山 本 眞 史

学 位 論 文 題 名

GaAlAs 系半導体レーザの発振波長および 光出力に関する高性能化の研究

光産業のキーデバイスである半導体レーザが実用的意味をもつ連続発振に成功したのは 30 余年前の 1970 年である。以降、GaAs を結晶基板とした GaAlAs 三元系ダブルヘテロ構造の半導体レーザは単一モード化、短波長化、高出力化および低雑音化といった高性能化に向けて技術が推移してきた。また、半導体レーザを他の機能素子と一体化しようとする光集積回路および光電子集積回路の研究も古くから行なわれてきた。

GaAlAs 系半導体レーザの短波長化は実用化という観点から活発に研究が進み、室温連続発振で 638nm の最短波長が達成されている。しかしながら、短波長化に伴う活性層の AlAs 混晶比の増加は、この系のバンド構造に起因する内部量子効率の低下やクラッド層の間接遷移型組成への移行、また格子不整合や化学的不安定性の増大などが短波長化を困難にし、実用レベルでは 750nm 前後に 1 つの壁があると見なされている。現在、CD や MD 等に使用されている半導体レーザの波長帯域は、十分な信頼性保証の観点から 780~790nm に設定されている。750nm 以下の波長帯域の実用化は InGaAsP や AlGaInP などの四元混晶半導体や GaInP 三元混晶半導体などの材料が用いられている。

GaAlAs 系半導体レーザの高出力において、最大光出力を決定する主要因になっているのは光学的端面破壊である。組成の 1 つである Al の酸化によりレーザ端面近傍に多くの非発光再結合中心が存在し、レーザ光の吸収によって発熱し熔融に至るためである。光学的端面破壊の抑制を図るには、端面での光の吸収を減少させることやレーザ光密度を下げるために発光面積を大きくすることなどがある。後者において、活性層の薄膜化が最も実現可能であるが、従来の液層エピタキシャル(LPE)成長法では 0.1 μ m 以下の結晶薄膜を制御よく成長させることは極めて困難であった。

半導体レーザを他の機能素子と一体化しようとする光集積回路および光電子集積回路の研究は製品化された事例は少なく、基本的なデバイスの可能性が検証され始めた段階である。技術的な課題としてはデバイスの信頼性確保および劈開法以外の共振器端面形成法の確立である。共振器端面を必要としない分布帰還型(DFB)や分布反射型(DBR)の半導体レーザも有力な方法である。

本論文は、GaAlAs系短波長帯半導体レーザの発振波長および光出力に関する高性能化に関するものであり、長寿命化、短波長化、高出力化および複合機能素子化に取り組んできた。本研究の目的は

- (1) 液相エピタキシャル(LPE)成長による良質な多層薄膜の形成法と無歪組立て工法を確立する。
- (2) 短波長化に伴う特性および信頼性の変化について検討し、最適な素子構造と作製法を提案する。
- (3) 半導体レーザの高出力化に適した新しい素子構造を提案し、光出力、動作電流および横モード制御についての最適設計法および量産化に適した作製プロセスを確立する。
- (4) 劈開法以外の新しい共振器作製プロセスを確立し、光 IC に向けた新しい複合機能素子を実現する。

ことであり、これらの基礎研究・技術開発に基づいた実用化に取り組み、その量産技術の確立と歩留り向上に努めた。

以下に本論文の構成を示す。

第1章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第2章では、半導体レーザの高性能化について理論的考察と基礎実験に基づく検討を行っている。半導体レーザの開発指針は短波長化、高出力化および集積化に大別される。また、それぞれ実用化にあたり基本性能としては低雑音化、単一モード化および高信頼化が要求されている。

第3章では、半導体レーザの製造技術について述べている。多層薄膜成長を容易にする液相エピタキシャル成長技術および高信頼化の要因となる素子作製および組立技術について解説している。

第4章では、横モードの制御が容易な段差基板型(Terraced Substrate: TS)半導体レーザを提案し、短波長化についての検討を行なった。一般に短波長化に伴い、しきい値電流、モード安定性、最大光出力および寿命など多くの点において $0.8\mu\text{m}$ 帯の赤外光半導体レーザと同等の性能を得ることが難しくなる。ここでは $0.71\mu\text{m}$ の短波長を実現したうえで、実用レベルの波長域を提言している。

第5章では、液相エピタキシャル成長(LPE)法の特徴を生かし、高出力に適した超薄膜活性層が制御よく形成できるツイン・リッジ基板(Twin-Ridge Substrate: TRS)型高出力半導体レーザを提案し、その原理と最適化設計および作製した素子の特性について解説している。

第6章では、第5章で述べたTRSレーザに改良を加え、光出力増大のための新しいアプローチによる超高出力半導体レーザを提案し、その素子設計、製法および発振特性について述べている。基本的には、埋め込みストライプ構造を用いて電流注入効率を向上し、低しきい値化によって端面破壊レベルを向上させたものであり、この構造をBTRSレーザと呼んでいる。

第7章では、同一基板上にTS型とTRS型レーザを一体化した二波長レーザアレイとBTRS型の高出力半導体レーザアレイについて述べている。BTRS型の高出力半導体レーザアレイは発光ストライプを3本アレイ化したものであり、全てのストライプが同位相で発振する位相同期型アレイと異なる位相で発振する位相非同期型アレイについて、両者の比較検討を行なっている。

第8章では、光 IC やショートキャビティ化の1つのアプローチであるエッチドキャビティレーザを提案し、その作製法および室温連続発振特性について述べている。ここで新たに開発した化学エッチング法はGaAlAs/GaAs多層構造の結晶面異方性を利用したものであり、通常の劈開面と遷色のない反射率をもつエッチドキャビティ面を実現している。

第9章では第8章で述べた高品質の鏡面が形成できる化学エッチング技術を用いて作製した新

しい複合キャビティレーザについて、素子構造、製法および波長選択性について解説している。

第10章では、本研究における成果を総括し、今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は GaAlAs 系半導体レーザにおいて短波長化および高出力化を実現し、半導体レーザの高性能化に関する有益な知見を得ると共に、これらの研究に基づいて CD、MD や光ディスクファイル等の光ピックアップへの実用化、月産約 1,000 万個にも達する半導体レーザの量産化などの実績を築くなど、光エレクトロニクスの分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。