

外98-29

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

波長可変半導体レーザの
高性能化に関する研究

申 請 者

石 井 啓 之

ISHII HIROYUKI

1998年10月

発振波長を任意の波長に設定することができる半導体レーザ,いわゆる波長可変半導体レーザは,将来の高度な波長多重型(Wavelength Division Multiplexing:WDM)光通信システムを実現する上で欠かせないデバイスである.回折格子による波長選択機能を持つ分布反射器(Distributed Bragg Reflector:DBR)を半導体活性層とともにモノリシックに集積した分布反射型レーザ(DBRレーザ)は,外部共振器型の波長可変半導体レーザと比較して構造的に安定であり,優れた単一モード特性を示すことや電氣的に波長を高速に変化させられること等から,将来のWDM用波長可変光源の第一候補として期待されている.また,波長可変半導体レーザは,外部共振器型の波長可変半導体レーザにかわる光計測,研究用の光源としても期待される.本論文は,筆者らがこのDBRレーザに種々の改良を加えて高性能化を行ってきた結果をまとめたものである.波長可変半導体レーザにおける重要な性能項目としては,波長可変幅,連続波長可変幅,単一モード性,波長制御時のスペクトル線幅,光出力特性,制御性,モードの安定性,信頼性が挙げられる.本研究では,これらの性能を改善するために,構造の最適化,新構造の導入,作製方法の改良を行った.また,素子自体の特性改善だけでなく,制御方法,外部素子を用いて機能モジュールとして構成することによる特性の改善方法,制御回路による安定化についても検討した.本研究の主な成果としては,第4章に記述される超周期構造回折格子(Super-Structure Grating:SSG)を導入したDBRレーザが挙げられる.このレーザが開発される以前は,波長制御層における屈折率の最大変化量に限りがあるために,DBRレーザ等の波長可変半導体レーザの波長可変幅は10nm以下であった.波長可変レーザにおいて,波長可変幅は応用上最も重要な性能項目である.このSSG-DBRレーザの開発により,ファイバアンプの帯域(30nm)を越える波長可変幅を得ることが初めて可能となった.このことは,波長可変半導体レーザが将来のWDM光通信用光源として応用できる可能性を大いに高めたものであるといえる.その他の成果としては,第3章に記述される短共振器DBRレーザや第5章に記述される櫛形電極DBRレーザによる単電極連続波長チューニング幅の改善である.1つの電極制御でモードが跳ぶことなく連続波長チューニングが行えるレーザは,多波長レーザ・アレイ等の光集積回路用の光源への応用が期待できる.また,第6章に記述する3電極DBRレーザ,及び4電極SSG-DBRレーザのモードと波長安定化に関する検討は,素子の安定性・信頼性を向上させる方法として極めて重要である.

本論文は7つの章により構成される.以下に,各章毎の内容について述べる.

第1章は序論で,本研究の目的,背景,本論文の構成が記述される.

第2章では,半導体レーザの基本的な動作原理,半導体導波路の屈折率制御方法,結合波方程式による分布反射器の解析,DBRレーザの波長チューニング特性について簡単にまとめる.ここで記述される基本的なDBRレーザの解析方法は,第3章以降に述べるDBRレーザや新たな構造を導入したDBRレーザの動作理解に有用となるとともに,これらの素子の構造設計を行う上で役立つものである.

第3章では,均一回折格子を有するDBRレーザの作製方法,特性評価,及び構造最適化について記述する.波長1.55 μm 帯で動作するDBRレーザは,有機金属気相エピタキシャル成長法(MOVPE法)による結晶成長技術,ドライエッチングによるメサ加工技術,電子ビーム露光法による回折格子形成技術を用いてInP基板上に作製される.DBRレーザでは,導波路組成の異なる活性領域と波長制御領域とを同一基板上に形成する必要があり,これにはMOVPE法を用いた直接接合技術を用いている.第4章以降に記述される新構造を導入した波長可変半導体レーザも,この方法により作製される.試作したDBRレーザの特性評価としては,波長チューニングの静特性,及び動特性について詳しく調べられる.DBRレーザの波長は電流制御により,モード跳びをともないつつ5-8nm程度変化し,位相調整領域の制御により縦モードが制御できることが示される.波長の切り替え速度は,波長制御層のキャリア寿命に支配され,それはバイアス電流依存性を持ち,数ns-数十nsである.波長切り替え速度をさらに向上させる方法として,2台のレーザと高速光スイッチを用いた構成についても簡単に述べる.構造最適化では,波長制御層組成の検討結果,短共振器化による連続波長可変幅の拡大化,長共振器化によるスペクトル線幅の低減化について記述する.活性領域長50 μm の短共振器2電極DBRレーザにより,3nmの連続波長可変幅,2.5mAの低しきい値電流が得られ,活性領域長900 μm の長共振器4電極DBRレーザにより,最小線幅185kHzが得られている.

第4章では,最大屈折率変化量による波長可変幅の制限を克服するために考案した,超周期構造回折格子(SSG)を用いたDBRレーザについて記述する.SSG-DBR反射器では,周期的に位相(周波数)変調が施された回折格子が形成されており,その反射スペクトル上には複数の周期的な反射ピークが生じる.反射ピーク間隔のわずかに異なる2対のSSG-DBRをレーザの前後の反射器として用いることにより,ヴァーニア目盛りの原理にしたがって波長可変幅を拡大することが可能となる.本章では,波長可変幅の拡大化の原理について述べた後,本素子において最も重要であるSSG反射器の解析,最適設計法,作製方法について詳細に記述する.理想的な反射スペクトルとしては,ピーク反射率が均一で不要な反射ピークのないことが,良好な波長特性を得る上で重要である.そこで,SSG反射器の位相変調関数の最適化計算を行った結果を示す.SSG反射器の作製方法としては,電子ビーム露光法を用いてピッチを階段状に変化させる方法と位相シフトを挿入する方法について検討した.前者では,2nm以下のピッチ分解能を必要とし,またピッチの継ぎ目でのエラーが反射特性に大きく影響を与えてしまうのに対して,後者では24nm程度のピッチ分解能で済み,また継ぎ目エラーも生じず,後者の方法がSSG作製法として優れていることが示される.SSG-DBRレーザの波長可変幅は,半導体活性層の利得帯域幅に匹敵するようになる.したがって,利得ピークと反射ピークの波長関係,及び発振しきい値キャリア密度を適切に設定しないと,所望の波長特性を得ることができない.そこで,広い疑似連続波長

チューニングを実現するための素子構造の最適設計法についても明らかにする。設計上では、70nmの疑似連続波長可変幅が得られることが示される。試作結果としては、素子の基本特性、広域波長特性、及び波長スイッチング特性が記述される。最大波長可変幅（不連続）としては105nmが得られ、また素子構造を最適化した素子により、最大疑似連続波長可変幅としては62.4nmが得られた。通常のDBRレーザと同様の優れた単一モード安定性が広い動作波長範囲にわたっても維持されていることが示される。さらに、熱制御型SSG-DBRレーザにより、400kHz以下の狭線幅動作と40nmの広域波長チューニングを両立した結果が示される。SSG-DBRレーザでは、所望の波長を得るのに3つ制御電流を設定する必要がある。そこで、波長に対する電流データを得るための、コンピュータを用いた自動測定方法の検討についても示される。最後に、制御回路を一体化した波長可変光源モジュールについて記述する。このモジュールは、40nmの波長帯域の0.1nm毎の任意の波長に、最小時間ステップ10 μ sで高速に波長を切り替えることが可能である。また、半導体アンプを用いて、光出力を一定に保つ機能が備わっている。このモジュールは、高速な光計測用光源として、十分実用レベルの性能を備えている。

第5章では、波長制御電極端子数を減らすために楕形電極を導入した波長可変レーザの検討結果について述べる。ここでは、楕形電極DBRレーザと分布活性領域型DFBレーザを提案し、それらのチューニング原理、試作結果について記述する。これらのレーザでは、楕形電極を導入した効果により、反射器の反射ピークと縦モードとが自動的に同期して変化する。よって、位相調整領域を省略することが可能となる。その結果、前者においては単電極連続波長チューニングが実現され、後者においては単電極連続波長チューニング、ならびにSSG-DBRレーザよりも制御電極数が1つ少なくとも広域波長チューニングができることが示される。

第6章では、波長の安定性を確保するために重要と考えられる3電極DBRレーザ、及び4電極SSG-DBRレーザの波長とモードの安定化方法について検討した結果を示す。前者におけるモードの安定点は、波長制御電流に対して光出力が極大になる点であり、後者のそれは、鞍点になることが理論的、実験的に示される。このことを利用して、フィードバック回路を構成し、モード及び波長の安定化を行った結果が示される。モード安定化では、素子特性がある程度変化してもモードを常に安定に保つため、信頼性を向上させる意味においても重要である。実験では、 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ の素子温度の変化に対してもモードの安定性が保たれた。これは、素子特性が $\pm 0.5\text{nm}$ 程度の波長変化に相当する分変化しても素子が安定に動作することを意味する。

最後に第7章では、本研究を通じて明らかとなった内容を整理し、波長可変レーザの今後の展望、課題についても記述し、結論とする。