

学位論文題名

歪導入及び異偏波光注入による
単一モード半導体レーザ制御の研究

学位論文内容の要旨

長波長帯半導体レーザの変調帯域の拡大は、光通信における伝送容量の拡大には必要不可欠である。変調帯域拡大のためにレーザの活性層へ多重量子井戸(MQW)構造、さらには歪量子井戸(歪MQW)構造を導入する試みがなされている。近年、半導体レーザの変調帯域が光出力に比例して増加する損失(利得飽和)のために制限されることが明らかになってきた。利得飽和現象はレーザの活性層構造(バルク、MQW、歪MQW)に大きく影響を受けると考えられる。

さらに、半導体レーザ直接変調時の応答速度の向上をはかる際には、素子の寄生容量等、避け難い多くの問題があり、極めて困難を伴う。光で光素子を制御する際には、素子の寄生容量が関与することがなく、光素子を素子本来の応答速度で動作させることができる。また、電気回路を介することなく光素子を直接信号光で制御する技術は、全光伝送、全光交換システムを構築する上で必要不可欠である。

本論文は、長波長帯半導体レーザの発振モードの振る舞い及び応答特性を決定する微分利得(線形利得定数)、利得飽和定数等のレーザの諸パラメータを、種々の活性層構造(バルク、MQW、歪MQW)を有するレーザに対し実験的に導出し、諸パラメータの活性層構造依存性を明らかにすることを第1の目的とし、さらに、活性層構造の異なる長波長帯単一モード半導体レーザに、発振モードとは直交する偏波方向を有する信号光を制御光として注入した際の、発振モードの振る舞い、及び応答特性を実験的に明らかにすることを第2の目的として研究を行ってきた結果をまとめたものであり、5章から成る。

第1章は序論であり、半導体レーザの研究の歴史、及び本研究の目的について述べている。

第2章では半導体レーザに対する基本的な考え方について概説している。半導体レーザにおいては、共振器を形成する光導波路の特性がレーザ特性に大きく影響を及ぼすことより、ここではまず、この光導波路の基本的な事項について記述する。次に、半導体レーザの発振特性を記述する際に用いられるレート方程式

の導出について記述する。基本的にはこのレート方程式を用いて実験結果の解析が行われる。最後に、半導体レーザの活性層を形成する半導体の基本的な性質及び発光課程への寄与の仕方をバルク、多重量子井戸、及び歪量子井戸構造のそれぞれの場合について記述している。

第3章では半導体レーザ特性の活性層構造依存性について記述している。活性層に多重量子井戸構造を導入した際には微分利得等のレーザパラメータの変化にともない周波数応答特性等のレーザ特性の向上が期待される。また、井戸層への歪の導入によりさらなるレーザ特性の向上が期待される。ここでは活性層領域に多重量子井戸構造を導入し、その井戸層へ歪を導入した際の長波長帯半導体レーザの特性変化の測定結果について記述している。まず、活性層の井戸層(InGaAs)への歪量以外はまったく同一とした埋め込み構造を有する $1.5\mu\text{m}$ 帯フリップペロレーザを製作し、その利得スペクトル及び相対強度雑音スペクトルの測定を行うことにより長波長帯半導体レーザ特性への歪導入の効果を明らかにしている。ここでは、微分利得、利得飽和定数、及び線幅増大定数と呼ばれる α パラメータの歪導入時の変化の測定結果について記述している。

活性層の井戸層厚を一定とした際には、井戸層へ圧縮歪を導入するとレーザ発振波長(利得ピーク波長)は長波長側へシフトする。このために、光通信用の光源として縦単一モード化をおこなった $1.55\mu\text{m}$ 帯DFBレーザ等では、その井戸層厚を変化させることにより利得ピーク波長を制御することが必要となってくる。このため、発振波長を同一にしたDFBレーザにおいては、井戸層へ導入した歪による半導体レーザ特性への影響と、井戸層の厚さを変えたことによる量子効果による特性への影響が同時に起こることになる。これらの効果を、発振波長を $1.55\mu\text{m}$ 一定とし、井戸層への歪量と井戸層の幅を変化させたDFBレーザを用いて特性測定を行うことにより明らかにしている。ここでは、測定したDFBレーザの発振モードに対する諸パラメータの歪導入による変化についておもに述べている。

第4章では、異偏波信号光注入による単一モード半導体レーザ制御について記述している。第3章で求めたレーザ発振モードに関する知見をもとに、長波長帯DFBレーザを、発振モードの偏波と直交するTM偏波光を注入することにより制御した結果について記述している。また、その周波数応答特性を議論することにより、TM偏波光に対する長波長帯半導体レーザの諸パラメータを導出した結果について記述している。

まず、バルク構造(InGaAsP)の活性層を有し、TE偏波発振するDFBレーザにTM偏波強度変調光を注入することにより、その発振モード制御をおこなった結果について述べている。その際の周波数応答特性をレート方程式を用いて議論することによりバルク構造活性層のTE偏波光に対する利得飽和定数と、TM偏波光に対する利得飽和定数を導出した結果についても同時に記述している。

次に、活性層に多重量子井戸構造を導入したTE偏波発振する $1.55\mu\text{m}$

D F B レーザの T M 偏波強度変調光注入時の周波数応答特性について記述している。活性層が多重量子井戸構造を有する場合にはその 3 デシベル帯域が通常のバイアス電流変調時とまったく異なる振る舞いを示す。レート方程式を用いた検討により、活性層に多重量子井戸構造を導入した際には、活性層自体の T E 偏波光に対する諸パラメータと T M 偏波光に対するそれらとの間に差異が現れ、これが 3 デシベル帯域の異常な振る舞いの原因であることを明らかにしている。さらに、T M 偏波光注入による発振モードの周波数変調について記述している。また、活性層に歪量子井戸構造を導入したレーザで観測される、T M モード利得ピーク波長の短波長化の、異偏波光注入によるレーザ制御時の影響についても同時に記述している。

最後に、半導体レーザの発振光を、波長依存性のある光フィルタを用いた外部キャビティ形成により、偏波方向を回転させ、発振モードの偏波方向と直交させた後にレーザ自身に帰還し、その F M ノイズ及び発振スペクトル線幅、さらには発振モードの周波数変動を低減する試みについて記述している。この試みは、偏波方向が発振モードとは直交する光を半導体レーザに注入することによるレーザ発振モードの周波数変調を応用した、光によるレーザの発振モード制御の一応用例である。ここでは、同時に多電極 D F B レーザを用いた電流負帰還法によるスペクトル線幅及び光周波数安定化の検討結果についても記述している。

第 5 章は、総轄であり、本研究の主要な結果を要約している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 小 川 吉 彦
副 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 永 井 信 夫
副 査 教 授 八 木 駿 郎 (理学研究科)

学 位 論 文 題 名

歪導入及び異偏波光注入による単一モード半導体レーザ制御の研究

長波長半導体レーザの変調帯域の拡大は、光通信における伝送容量の拡大には必要不可欠である。レーザの量子井戸構造活性層へ歪を導入することにより変調帯域の拡大が期待されるが、一方光出力の増加による利得飽和の影響を受けることが最近示唆されている。しかし変調帯域の拡大と歪導入に伴うレーザ動作に直接かわる各種要因の関係は、これまで十分に明かにされていない。またこうした変調帯域の上限は、レーザそのもの以外にも素子の寄生容量、周辺回路の寄生容量などに制限されることも多く、素子本来の性能を引き出せない状態が生じやすく問題となっている。

本論文は、長波長帯半導体レーザの発振モードのふるまいおよび応答特性を決定するレーザの諸パラメータのレーザ構造依存性、特に歪導入と変調特性に関与するレーザ特性の制御との関係を明かにするとともに、発振モードと直交する偏波方向を有する信号光を制御光として注入し、寄生容量に制限されない半導体レーザ制御を目指して研究を進めたものである。その成果として、特に発振スペクトル線幅を決定する重要なパラメータが、歪みの導入によって特性改善することを示すとともに、その物理的理由を明かにしている。またTE偏波モードで発振する分布帰還型レーザを、発振波長とほぼ同じ波長のTM偏波光を注入することにより高速に制御することが可能であることを実験により実証している。さらに単一モード半導体レーザの外部に、波長依存性を有する光フィルタにより形成した帰還系を構成することにより、レーザのFMノイズおよびスペクトル線幅、さらには発振光周波数の変動を低減できることを明かにしている。

これを要するに、著者は、単一モード半導体レーザについてレーザ特性制御の新知見を得たものであり、光通信工学の進歩に対して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。