

光通信用長波長帯半導体レーザーの高性能化に関する研究

著者	武本 彰
著者別名	Takemoto, Akira
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成16年12月
ページ	36-40
発行年	2004-12-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/16599

氏名	武本 彰
生年月日	
本籍	兵庫県
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第590号
学位授与の日付	平成15年9月30日-
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	光通信用長波長帯半導体レーザーの高性能化に関する研究
論文審査委員(主査)	高宮 三郎(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	山田 実(工学部・教授) 森本 章治(自然科学研究科・教授) 飯山 宏一(工学部・助教授) 桑村 有司(工学部・講師)

学位論文要旨

[Abstract]

Long wavelength semiconductor laser diode based on InGaAsP/InP material is one of key devices for high-speed optical fiber communication systems. Various characteristics of the device including reliability and cost issues should be continuously improved in response to a rapid progress of the systems. The paper describes the research on the characteristic improvement of the laser especially focusing on basic structure, cavity structure, and optimization of multiple quantum well structure.

A newly developed buried heterostructure using p-InP substrate named PPIBH(P-substrate Partially Inverted Buried Heterostructure) and insertion of BDR(Band Discontinuity Reduction) layer have given a low threshold and wide temperature operation.

DFB-LD(Distributed Feedback Laser Diode) that has a single wavelength oscillation is the most common light source for high-speed optical transmission. The coupling constant that characterizes performance of the laser can be precisely controlled by a newly developed grating structure named BG(Buried Grating). The coupling constant has been optimized to improve the characteristics including distortion characteristics for analogue application using the structure. The multiple quantum well structure has been also optimized to improve high frequency response.

As a result, high speed of 10Gbps and high temperature operation of 85°C has been achieved.

光通信用長波長帯半導体レーザは、日々増加する通信トラフィックを支える光ファイバ通信システムのキーデバイスのひとつである。そのため、信頼性やコストも含め様々な性能向上が求められている。本論文はこの要求に応えるために行った光通信用半導体レーザの高性能化に関する理論的・実験的研究成果をまとめたものである。

光通信用長波長帯半導体レーザに要求される特性には、

- ①低閾値電流 ②高効率 ③高出力 ④広温度範囲動作 ⑤高速応答
- ⑥低スペクトル広がり ⑦低歪（→アナログ伝送） ⑧低雑音
- ⑨高発振波長精度 ⑩高信頼性 ⑪低コスト

等がある。

光通信用半導体レーザに要求される基本特性、すなわち、低閾値電流、高効率、広温度範囲動作を実現するには、活性層以外を流れるいわゆるリーク電流の抑制が重要である。そのため、まず最初に、基本特性向上のため2つの観点から研究成果をまとめた。

一つ目は、素子の埋め込み構造に関するものである。InGaAsP/InP系の長波長帯埋め込み型半導体レーザでは、p-InP基板上に素子を形成するとp-n-p-nサイリスタ構造で構成される電流阻止層が効率よく機能し、低閾値電流、高効率動作が可能である。しかし、プロセスが複雑なためこれらの性能を実現しにくいという問題があった。そのため、一般的にはn-InP基板を用いたレーザが用いられていた。この問題を解決するため、n-InP電流阻止層の一部を自動的にp型に反転させることで簡単にp-InP基板上にレーザを形成するPPIBH(P-substrate Partially Inverted Buried Heterostructure)と呼ぶ新たな素子構造、作製工程を提案した。

図1に素子構造断面図を示す。本構造では、結晶成長中に不純物の相互拡散が起こりn-InPの先端部0.1~0.2 μ mのみがp型に反転する。その結果、高いリーク電流抑制効果を有する電流阻止構造が形成され、低閾値電流、高効率、高温・高出力動作が可能になった。本構造が光ファイバ通信システムに要求される高い信頼性を有することも確認した。また、不純物の相互拡散による導電型の反転モデルを定式化した。

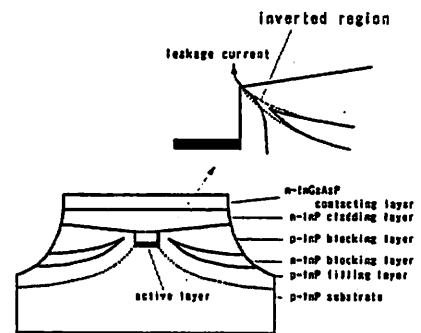


図1 PPIBH-LDの素子断面構造図

2つ目は、電流経路のポテンシャル障壁抑圧に関するものである。リーク電流抑制には活性層を通過する電流を流れやすくすることも効果がある。InGaAsP/InP系の長波長帯埋め込み型半導体レーザでは、p-InPクラッド層と活性層間のバンド不連続によって生じるスパイクが活性層を通過する電流経路に余分なポテンシャル障壁を生じさせ、これが

リーク電流を増大させることを突き止めた。このポテンシャル障壁は、クラッド層と活性層の中間組成の層(バンド不連続緩和層)を挿入することで抑制できることを見出した。その厚さは、障壁の広がりから 10nm 程度であれば良い。実際に、バンド不連続緩和層を 1.55 μm 帯半導体レーザに導入し、動作電流や最大光出力が改善されること実証した。また、InP の pn 接合で発生する EL 光の観測から、リーク電流が減少することを間接的に示した。

中高速(～1Gbps 以上)の光通信システムでは、専ら単一波長で発振する DFB-LD(Distributed Feedback Laser Diode: 分布帰還型レーザ)が用いられる。複数の波長で発振する FP-LD(Fabry Perot Laser Diode)では、構造が簡単のため作製しやすいという特長を有するが、波長スペクトル拡がりのため波長分散をもつ光ファイバ中を高速で長距離伝送すると光波形が劣化するためである。論文後半では、DFB-LD の種々の特性向上について研究成果をまとめた。

DFB-LD の特性は、単一波長発振させるために活性層近傍に設けられた回折格子と活性層を構成する多重量子井戸層によって主に決定付けられる。回折格子は、結合定数と呼ばれるレーザの共振器損失を決める重要なパラメータと密接に関係しており、この結合定数の最適化、ならびに、回折格子を精度良く形成することが重要な課題である。

回折格子は高さ約 50nm、ピッチ約 200nm と非常に微細なため、従来技術では回折格子の形状によって決まる結合定数の値を制御することは困難であった。本論文では、結合定数の制御性に優れる埋め込み回折格子構造と呼ぶ新たな構造(図2 埋め込み回折格子構造)を提案し、本構造のパラメータと結合定数の関係を定量化した。その結果、従来構造と比較して本構造の結合定数が回折格子の加工ばらつきに対して鈍感であること、加工制御性の良いガイド層層厚・バリア層層厚を変更すれば結合定数の値を簡単に制御できることを実証した。また、上記回折格子構造を用いて結合定数の異なる DFB-LD レーザを作製し、閾値電流、スロープ効率、スペクトル線幅、相対雑音強度の結合定数依存性が理論と良く合うことを実証した。

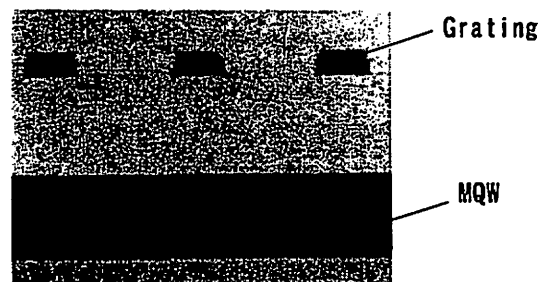


図2 埋め込み回折格子構造

長波長帯半導体レーザは主にデジタル変調方式で用いられるが、光 CATV(Cable Television)システムなどアナログ変調方式で用いられることも多い。アナログ変調方式は雑音に対して弱いものの、アナログーデジタルーアナログ変換が不要なため、安価なシステムが構築できるためである。しかしながら、従来の DFB-LD は変調歪が大きいいため

良質の信号を送信しにくいという問題があった。本論文では、DFB-LDの変調歪の発生メカニズムの分析を行い、

- (1) 光CATVシステムで用いられる1GHz以下の変調周波数域において、変調歪の振る舞いは主にレーザの静的な光出力-電流特性に支配されること
- (2) 静的な光出力-電流特性は、結合定数依存性があること
- (3) 結合定数が1程度の時、変調歪が最小となること

を見出した。また、この変調歪は共振器軸方向に沿った光強度分布によって生じる空間的ホールバーニングが主原因と推定されることを示した。また、前述の結合定数制御技術を用いて結合定数が1程度のDFB-LDを作製し、光CATVシステムで十分実用可能な低変調歪特性を実現した。

近年、高性能な光合分波器と光ファイバアンプの開発により、一本の光ファイバで複数の信号光を伝送する波長多重光ファイバ通信システムが急速に発達している。このシステムでは、信号光源として100チャンネル以上もの波長（波長間隔は0.8nm前後）で発振する多数のDFB-LDが必要である。従来は、干渉露光法と呼ばれる技術を用いて1ウェハあたり1波長分のレーザ（実際にはばらつきにより2~4波長分）しか作製できなかった。この問題を解決するため、アナログ制御型電子ビーム露光装置を開発、同装置を用いて同一ウェハ内に発振波長の異なる1.55 μ m帯のDFBレーザを作製、76nmの波長範囲にわたって、単一波長でレーザ発振が可能であることを実証した。また、発振波長の活性層幅依存性を実験的に検証し、回折格子のピッチと活性層幅を素子毎に変化させることで、発振波長の差が約0.4nmのDFBレーザが作製できることを実証した。

半導体レーザの特性は結合定数以外に活性層の構造にも大きく左右される。従来、活性層はバルク型と呼ばれる均一の組成を有する半導体層で構成されていたが、有機金属気相成長法などの薄膜形成技術の進歩により、厚さ数nmの半導体層を複数積層し量子効果を利用した(歪)多重量子井戸構造により、レーザの特性は著しく向上するようになった。しかしながら、歪多重量子井戸構造は量子井戸層層厚・組成・層数・歪量、バリア層層厚・組成・歪量、光閉込層層厚・組成という非常に多数のパラメータを最適化しなければ特性を十分引き出すことができない。本論文では、主に量子井戸数と層厚に着目し、動特性、特に、緩和振動周波数向上の観点からの最適化の検討を行った。その結果、限界はあるものの量子井戸数を増やし、また、量子井戸層厚を大きくすることが緩和振動周波数向上に有効であることを理論・実験両面から明らかにした。また、緩和振動周波数向上に伴い、1GHz以上での高周波域での変調歪低減や信号伝送距離の向上が可能であることも実証した。

一般的に、DFB-LDは素子の前端面を低反射率コート、後端面を高反射率コートして用いられる。このタイプのDFB-LDは、作製が容易、低閾値電流・高効率・高温動作が可能という長所を有するが、原理的に単一波長動作する確率が100%ではない、個々の素子で特性がばらつくという短所を有する。これは、通常行われている劈開による端面形成では回折格子で反射される光と素子端面で反射される光の位相差が制御できないためである。この問題を回避するため、素子中央で回折格子の位相を1/4波長分だけずらし、かつ、素子の両端面を低反射率コートした $\lambda/4$ シフト型DFB-LDが提案されている。しかしながら、このタイプのレーザは100%の確率で単一波長動作するものの、作製が難しい、効率が低い、高温動作しにくいという短所を有するため用途が限定されている。本論文では、前述した様々な特性改善の研究成果、ならびに、高精度のエッチング・成膜が可能なドライエッチング・有機金属気相成長法等を用いて、総合的に $\lambda/4$ シフト型DFB-LDの特性改善を図った。その結果、 $1.3\mu\text{m}$ 帯直接変調用のDFB-LDに於いて、 85°C の高温で10Gbpsの高速動作が可能(図3)であることを実証した。

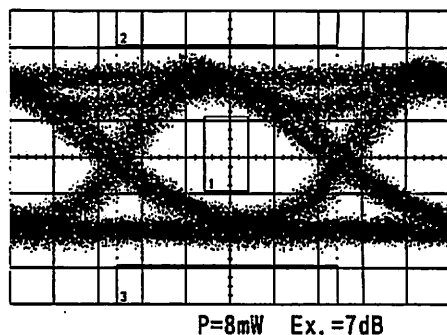


図3 $\lambda/4$ シフトDFBレーザの10Gbps変調時の 85°C におけるアイパターン(フィルタあり)

学位論文審査結果の要旨

平成15年7月29日に開催された第1回学位論文審査会、及び同日に行われた口頭発表会を踏まえて同日に開催された第2回学位論文審査会で審査した結果、以下のとおり判定した。

本論文はInGaAsP/InP系材料から成る波長 $1.55\mu\text{m}$ の光通信用半導体レーザに関するもので、多くの優れた提案とその実行によって、通信システムに適合する高性能レーザを実現するとともに関連する理論も構築している。具体的には、1) エピタキシャル成長中不純物拡散による洩れ電流阻止機能強化とバンド不連続制御による寄生抵抗削減を行って動作電流の低減、発光効率と最大出力の向上を実現し、2) DFBレーザに必要な精密に制御された回折格子を実現しやすい製法を実現することで、DFBレーザにおける回折格子と光の結合状態が閾値電流、微分効率、スペクトル線幅、変調歪み、波長の精密制御性等に及ぼす影響の最適制御を可能にするとともに、その理論的設計指針も示している。さらに、3) 多重量子井戸レーザにおける量子井戸数と緩和振動周波数との関係も理論的に示し、これに基づいて10Gbpsの直接変調が可能なDFBレーザを実現している。以上の成果は全て実用レーザに適用され、国内外の光通信システムの高性能化に貢献している。

以上の成果から、本委員会は本論文が博士学位論文に値するものと判断した。