

	わた なべ ひとし
氏 名	渡 辺 齊
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	アナログ光通信用半導体レーザに関する研究
指導教官	東北大学教授 伊藤 弘昌
論文審査委員 主査	東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 水野 皓司
	東北大学教授 大野 英男

## 論文内容要旨

アナログ光通信とは、入力信号の波形そのものを忠実に光信号を置き換えて光ファイバ伝送を行い、受信側で同じく忠実に元の電気信号波形に変換する方式である。アナログ方式の利点は、入力電気信号を波形ごとに変換することからデジタル伝送に比べて利用帯域当たりの情報量が多いこと、および現行の電気信号での処理部分を変更することなく、光信号へのインターフェースを因ることが可能であることが挙げられる。アナログ伝送を利用した実用システムとしては、光ファイバ・同軸ケーブル複合伝送方式 (Hybrid Fiber /Coax : HFC)がある。これは敷設済の支線系同軸ケーブルを据え置いて基幹伝送部分のみ光ファイバを導入する方法で、従来からの問題であった基幹系同軸ケーブル部での多重増幅による累積雑音を一掃することができ、また長距離伝送が可能になることからコスト面でもメリットが高い。なかでも都市型ケーブルテレビ(CATV)システムは、数十MHzから数百MHzの帯域で数十チャンネルを同時に光ファイバで送信する副搬送波複合伝送(Sub-Carrier Multiplexing: SCM) を利用しており、アナログ光通信の代表例と言える。

さて、歴史的にはアナログ通信の実用化には大きな壁があった。アナログ方式では光電変換部すなわち半導体レーザおよび受光素子に対して厳しい線形性および低雑音性が要求される。光電変換の線形性が悪ければ、光信号波形は歪んでしまい伝送品質は著しく劣化する。ところが初期の頃のファブリ・ペロー型(Fabry Perot :FP) 半導体レーザは、様々な理由から光出力-電流特性の直線性が悪いために大きな変調歪が発生し、とても実用に耐えるものではなかった。さらにFP型半導体レーザ固有の縦モード競合雑音が発生するなど雑音特性の面でも改善の必要があった。しかし、1980年代の分布帰還型 (Distributed Feedback: DFB)半導体レーザの開発を契機として、再びアナログ伝送が見直される。FP型半導体レーザがチップ両端の結晶面を反射鏡とするのに対し、DFB型半導体レーザは、導波路の近傍に回折格子が設けられ、ここでのブラッグ反射によってレーザ発振するために、優れた縦モード選択性 (単一モード性) が得られる。このためDFB型半導体レーザは、縦モードの競合が抑えられ、極めて良好な雑音特性を有していたのである。このような背景から、半導体レーザにおける非線形性の発生が再び大きな課題として認識されるに至り、本格的な研究が着手された。

DFB型半導体レーザの非線形性の要因としては、(1) 軸方向空間的ホールバーニングによる非線形性、(2) 半導体レーザ内の微少リーク電流による非線形性 (3) 活性層における光電変換の非線形性が3大要素として考えられる。また吸収損失の光出力依存性あるいは利得飽和の光出力依存性による非線

形性も無視し得ない。さらに実用的には、複数のチャンネルで変調を行うときにある確率で信号がしきい値電流以下まで振り込まれることによるクリッピング歪も重大な問題である。この他にアナログ通信系全体の線形性を考える場合には、光ファイバ自身が持つ非線形性、波長分散による歪の発生、光ファイバ内の多重反射による歪、および受光素子の非線形性なども重要な研究課題である。一方、雑音については、DFB型半導体レーザが優れた低雑音性を有することから、少なくともアナログ通信を行う上では、とくに問題視されていなかった。ところが1989年にJudyによって光ファイバ伝送中のレイリー散乱によって発生する雑音の問題が指摘され、これが半導体レーザの変調時の波長ゆらぎ量（チャープ）と密接に関連することから、DFB型半導体レーザ固有の課題として認識されている。

本論文は、DFB型半導体レーザにおいて、(1) 軸方向空間的ホールバーニングによる非線形性の発生および線形化の方法の研究、(2) リーク電流による非線形性の発生および線形化の方法の研究、(3) 光子-電子変換による非線形性の発生および線形化の方法の研究、(4) 光ファイバ伝送中に発生する雑音とその抑圧の研究、から成り立っている。とくに非線形性の研究については、線形性を決定する3大要素について系統的かつ包括的に考察するとともに、線形性を向上させ、雑音を低減する方法を理論、実験の両面から解明した。

第1に、DFB型半導体レーザにおいて軸方向空間的ホールバーニング(LSHB)に起因する光出力-電流特性の非線形性の理論的および実験的考察と線形化の検証を行った。まず、結合波方程式による共振器内の電界分布の計算をもとに、線形性の実験的検証をすすめ、軸方向ホールバーニングに起因する非線形性は、共振器内の光電界分布の平坦性に依存し、平坦性が高いほど線形性は向上することを明らかにした。非対称反射率型DFBレーザにおいては、光電界分布の平坦性は光結合定数および共振器端面の回折格子の位相条件によって決定され、光結合定数 $\kappa$ と共振器長 $L$ の積が1.0のとき変調歪の極小値が得られる。一方、同一の光結合定数でも位相条件が異なると大きく線形性が変化することも示した。これは位相条件によって光電界分布が異なるためである。回折格子の位相は現在の技術では制御が困難なため、光結合定数の制御は、線形性の高いレーザを得られる確率を高める意味しか持たないことに注意すべきである。

このような点から共振器端面の位相条件に影響されない位相シフト型DFBレーザは有益である。しかし単純な単一位相シフト構造では位相シフト付近に電界が集中するため電界分布の平坦性は極めて悪い。ここでは複数の位相シフトを導入することにより光電界分布の平坦化を図る多重位相シフト構造の線形性を検証した。実験において、 $\kappa L=1.85$ において2シフト構造は単一位相シフト構造に比べ、約4dBの2次歪の向上が得られ、計算と良い一致を見ている。また同じく位相シフト型DFBレーザにおいて傾斜型回折格子構造を新たに提案した。ある関数形に光結合定数を用いるとほぼ完全な光電界分布の平坦化が実現できることは知られているが、実際の作製は困難である。これに対し本論文では1次関数もしくは2次関数という単純な関数形でも電界分布の平坦性が向上することをシミュレーションにより明らかにした。選択成長法を利用した作製プロセスにより光結合定数が共振器方向に連続的に変化する構造を実現し、均一な回折格子構造に比べ明らかに線形性が向上することを実証した。

第2に、InGaAsP/InP系半導体レーザにおいて一般的に用いられる埋込型半導体レーザのリーク電流の経路を明らかにし、線形性との関係を定量化した。ここでは、埋込型半導体レーザの代表例とし

てFSBH型半導体レーザを解析した。この結果から、リーク電流は、(a) 活性層とn-InP電流ブロック層の間に生じるリークパスを流れる電流、(b) 電流ブロック層を貫通する電流、(c) 活性層からオーバーフローする電流に大別され、これらのリーク電流と変調歪（線形性）とは定量的な相関関係があることを明らかになった。

具体的にはまず、従来の常識に反しブロック層を貫通して流れるリーク電流は線形性に大きく影響することをブロック層幅依存性から明らかにした。加えてこれも従来は重要視されなかった活性層からの電子のオーバーフローも線形性に決定的な影響をもたらすことを実験的に示した。オーバーフローによるリーク電流は、活性層構造の最適化によって低減することができる。具体的手法としては、量子井戸数の制御によるしきい値キャリア密度の低減およびp-クラッド層のドーピング濃度の制御によるビルトインポテンシャルの拡大が有効である。

変調歪の周波数特性は一般に複雑な振る舞いを示すが、この原因は主にリーク電流の周波数特性を反映したものである。とくに変調歪の極小値近傍に現れる強い周波数依存性は同領域における位相回転の周波数特性に起因している。変調歪の位相回転は半導体レーザ内部の寄生容量に支配され、寄生容量の低減によって周波数特性の平坦化を図ることができることを示した。

第3は、光子-電子変換における非線形応答による歪を考察することを目的とした。まず、レート方程式から2次および3次の非線形成分を導いた。とくに相互変調2次歪および相互変調3次歪の解析的記述を初めて行い、実測値と良く一致することを示した。具体的に非線形成分を低減する手法として緩和振動周波数の増大に着目し、量子井戸活性層の設計の最適化によって微分利得の向上を図ることができることを見いだした。とくに微分利得が量子井戸活性層の光閉じ込め量の設計に依存することを実験的に示し、その設計の限界値において緩和振動周波数の最大値  $5.1\text{GHz/mW}^{1/2}(=2.41\text{GHz/mA}^{1/2})$  を得た。また、上記を実現する結晶作製法として歪補償型量子井戸構造を採用し、臨界層厚以上の量子井戸層の作製を可能にした。

さて、上記の一連の実験からいくつかのレーザにおいて相互変調歪が特異な振る舞いをすることを発見した。相互変調3次歪の測定値が計算で導かれる値より明らかに良好な数値を示したのである。この現象を解明するため相互変調3次歪の位相特性の測定および解析を行った結果、変調歪の位相は半導体レーザのバイアス電流に対して一定ではないことが明らかとなった、つまり変調歪が大きく良化するバイアス電流付近で歪の位相回転が生じることが分かった。これに対する考察から、変調歪が非線形応答を含む複数の要因で構成される場合、それぞれの要因による非線形成分の位相が異なるため、実際に測定される変調歪はこれらのベクトル和で表されると推論した。これは、半導体レーザの変調歪の要素分析を実施する上で、重要な意味を持ち、今後の研究の方向を示唆するものである。

第4は、半導体レーザ固有の雑音だけでなく、光ファイバ中でレイリー散乱により発生する雑音にも着目し、光ファイバ伝送後雑音を半導体レーザの構造設計との関係において低減することを目的とした。まず、DFB型半導体レーザ固有の量子雑音について簡便な理論式を導き、実際の測定値とよく一致することを示した。

またキャリア輸送を考慮したレート方程式に基づき、量子井戸構造を設計、試作し、理論によく一致して光閉じ込め層厚を変えることでチャープ量が制御できることを示した。レイリー散乱による雑

音はレーザのチャープ幅広いほど低減できる。上記の結果に基づいて、実際にチャープ量を拡大した半導体レーザを用いて光ファイバ伝送後の雑音を測定し、チャープ幅が広い素子では搬送波対雑音比が改善されることを示し、新しい量子井戸の設計が有効であることを実証できた。

以上のように、本論文では半導体レーザの非線形性および雑音について研究を行い、上記を決定する要因を解明するとともに、線形性を向上させ、雑音を低減する方法を明らかにした。

## 審査結果の要旨

アナログ光通信はケーブルテレビの多チャンネル光ファイバ伝送などの広い応用分野を持っているが、良好な伝送品質実現のために光源の半導体レーザには線形性および雑音に対してデジタル光通信の場合より厳しい特性が求められる。本論文は、この半導体レーザの非線形性および雑音を発生させる原因を分析するとともに、それらの改善方法を理論、実験の両面から解明したもので、全文は6章より成る。

第1章は序論である。

第2章では、分布帰還型半導体レーザにおいて軸方向空間的ホールバーニングに起因する非線形性の理論的および実験的考察を行っている。ここで著者は、軸方向ホールバーニングに起因する非線形性が共振器内の光電界分布の平坦性に依存し、平坦性が良いほど線形性は向上することを初めて明らかにした。これはアナログ用半導体レーザを設計する上で重要な知見である。これをもとに、ほぼ完全に平坦な光電界分布が得られる傾斜型回折格子構造を有する半導体レーザを新たに提案し、均一回折格子構造に比して20dB以上の2次変調歪の改善が得られることを実証した。

第3章では、リーク電流に起因する非線形性を解析している。光通信用として一般的に用いられる埋込型半導体レーザのリーク電流の経路を明らかにしており、デジタル用途では従来見過ごされてきたブロック層を貫通するリーク電流および活性層をオーバーフローする電流と、線形性との間には定量的な相関関係があることを示した。さらにその低減方法をレーザ構造設計の点から実証に基づき示したことは重要な成果である。

第4章では、光子-電子変換における活性層の非線形応答による変調歪を考察している。変調歪の位相特性の測定から、測定される変調歪は複数の要因による非線形成分の位相のベクトル和で表されることを指摘している。

波長チャープ幅が広い光源は、光ファイバ伝送中のレーリ-散乱に起因して発生する雑音低減に有効であることが知られている。

第5章では、キャリア輸送を考慮したレート方程式に基づき量子井戸構造を最適設計することにより半導体レーザの波長チャープ幅拡大が達成できることを示すとともに、レーザを試作し、光ファイバ伝送後の雑音が低減されることを実証している。これは重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、アナログ光通信用として半導体レーザの非線形性および雑音を決定する要因を初めて包括的に解明し、それらを改善する方法を提案、実証したものであり、光通信工学および量子エレクトロニクスの発展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。