学位論文題名

Band Structure Engineering of Semiconductor Quantum Well Devices for Optical Fiber Communications

(光ファイバ通信用半導体量子井戸構造素子のバンドエンジニアリングに関する研究)

学位論文内容の要旨

今日、電話を主とした電気通信は、コンピュータ・ネットワーク技術との融合によって、音声のみならず動画等大容量の情報を統合的に扱うマルチメディア通信の時代へ発展してきている。今後、増加の一途を辿る通信需要に対し、光ファイバ通信は社会基盤として一層の高度化が期待されており、デバイスからシステムまで精力的な研究開発が続けられている。

本論文は、光ファイバ通信において必要不可欠なデバイスである半導体レーザ(以下レーザと略す)と半導体光変調器(以下光変調器と略す)に関するものである。両者とも InP 基盤上の長波系 III-V 族化合物から成る導波路型の p - n ゲイスト構造を有し、電気パルス列を光パルス列に変換し光ファイバに送り出す送信器である。レーザは、ゲイスト構造に順バイアス電圧を印加し、キャリアを活性層領域に注入することで、フォトンの誘導放出による利得を発生する。注入キャリアを電気信号にあわせて変調することにより信号が光パルス列に変換される。一方、光変調器では、逆バイアス電圧を印加すると光吸収層領域の吸収係数や屈折率が変化し、レーザからの入射光が変調され信号に応じた光パルス列が生成される。

光ファイバ伝送においては、いかにして送信器からの光パルスが長距離にわたりその波形を崩さず、かつ高いビットレートで安定に伝播できるかが伝送特性向上の鍵となる。しかし、伝送媒体である光ファイバは強い波長分散特性を有するため、光パルスは伝播の途上波形が広がる方向にその強度や位相を変化させてしまい伝送特性の劣化を招く。本論文では、この現象をチャープと呼び、これを定量的に議論するためチャープパラメータを導入した。チャープ耐性に優れた光ファイバ伝送を実現するためには、レーザや光変調器内での光パルスの生成過程に着目し、光パルスの強度と位相を制御することが重要な課題である。

光強度の変調には、利得/吸収係数か屈折率のいずれか一方のみが変化すれば必要十分であるが、両者は半導体の複素屈折率の虚部と実部に相当し、クラマース・クロニツトの関係によって互いに関係づけられているため、一方の変化は必ず他方の変化を誘起する。チャープパラメータは屈折率のキャリアや電界に対する変化と利得/吸収係数のキャリアや電界に対する変化の比により決まるため、送信器からの光パルスはチャープを伴う。従って、光パルスの強度と位相の制御においては、送信器における利得/吸収係数変化及び屈折率変化の設計の自由度を、クラマース・クロニツトの関係で決まる制約の中で最大化することが問題の本質であり、この点を本論文の取り組むべき課題と位置づけた。半導体の光利得/吸収とそれに伴う屈折率変化はキャリアの伝導帯-価電子帯間直接遷移や室温励起子遷移に起因する。本論文では、半導体の複素屈折率をデザインするため、バンドエンジニアリングとしての種々の手法を提案した。すなわち、レーザの活性層や光変調器の吸収層に量子井戸構造と格子歪を導入し、吸収端近傍の価電子帯バンド構造の変化を通してキャリアの有効質量(状態密度)や遷移の振動子強度を制御する試みを行った。

本論文の構成と各章の概要は以下の通りである。第1章では、本研究の位置づけ及び目的について述べると共に、光パルスの広がりやチャープパラメータの関係、クラマース・クロニツトの関係について詳述した後、レーザ及び光変調器が抱える課題について概説した。

第2章では、後続の各章での議論の基本となるバンド構造に関連する事項について論じ

た。まず、 $k \cdot p$ 法によりバルク半導体に対するハルトマンを導出し、量子井戸構造に対する有効質量方程式を導出した。それを基に、量子閉じこめ、格子歪（圧縮歪、引張歪）の価電子帯バンド構造への効果を明らかにした。更に、量子井戸内伝導帯電子の電界印加時の準束縛状態についての定式化を行った。

第3章では、レーザのチャープパラメータのゼロ化について議論した。レーザは、キャリア注入によりレーザ発振波長を含むある波長領域にわたって利得を持つ。レーザのチャープパラメータは、クラマス・クロニツト変換を利用すると微分利得（利得係数のキャリア注入に対する変化率）のみを用いて表現できる。本章では、従来のレーザの問題点として微分利得がピーク値をとる波長が吸収領域にあることを明らかにし、活性層内の井戸層への圧縮歪と障壁層への p 型変調ドープングの導入によって、ピーク波長が利得領域にシフトすることをそのメカニズムと共に詳細に明らかにした。その結果、チャープパラメータの異常分散項をゼロにできる可能性を理論的に示し、併せて実験による検証を行いチャープパラメータの低減化を立証した。

第4章では電界吸収型光強度変調器を取り上げ、負のチャープパラメータの可能性について理論検討を行った。光パルスのチャープパラメータが負になると、光パルスのパルス幅は光ファイバ中で圧縮されるため伝送特性を大きく向上できる。電界吸収型光変調器は、電界による吸収係数変化を光変調に利用するためチャープパラメータが負になり得る。しかしながら、チャープパラメータの符号が強い電界依存性を有する点が従来型変調器の課題であった。本章では、クラマス・クロニツトの関係に立ち返り、印加電界に依存せず負の屈折率変化を得るための条件を理論的に提案した。更に励起子の有効質量方程式に基づく量子井戸吸収スペクトルの解析から、歪量子井戸構造において、格子歪量と井戸幅を最適化することにより印加電界に依存しない負のチャープ変調動作が実現可能であることを理論的に示した。

第5章ではマッハ・ツェンダ型光変調器の高性能化について議論した。マッハ・ツェンダ型光変調器は、変調原理上、印加電界に依存しない負のチャープ動作が可能という利点を有する一方、屈折率変化を変調動作に利用するため、屈折率変化の増大と吸収係数変化（吸収損失）の低減の両立が要求される。従来、屈折率変化の増大の観点から TE 偏光した入射光による変調動作が常であったが、クラマス・クロニツトの関係から決まる吸収損失の増大が光変調器の性能を制限していた。本章では、価電子帯バンド構造と励起子吸収の関係を詳細に解析し、その結果屈折率変化は入射光の偏光方向、量子井戸構造及び光変調器の動作波長に著しく依存することを見いだした。すなわち、TM 偏光における動作で、屈折率変化の増大と吸収損失の大幅な低減が両立できること、従来の予測に反し無歪量子井戸構造において偏光無依存化（屈折率変化が入射光の偏光方向に依存せず等しいこと）が可能であることを理論・実験の両面から初めて明らかにした。

第6章では本論文の総括を行った。また、付録 A において、量子井戸価電子帯バンド構造を解析する際のヘテロ界面の境界条件について詳細な考察を行った。特に、長波系化合物からなる量子井戸では、井戸層と障壁層の材料の有効質量差が大きくなり従来の境界条件が適用できなくなる可能性を指摘し、それに代わる境界条件の提案を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 田 村 信一朗
副 査 教 授 徳 田 直 樹
副 査 教 授 田 中 啓 司

学 位 論 文 題 名

Band Structure Engineering of Semiconductor Quantum Well Devices for Optical Fiber Communications

(光ファイバ通信用半導体量子井戸構造素子のバンドエンジニアリングに関する研究)

光ファイバ通信において必要不可欠なデバイスである半導体レーザと半導体光変調器は共に InP 基盤上の長波系 III-V 族化合物から成る導波路型の p-n ダイオード構造を有し、電気パルス列を光パルス列に変換し光ファイバに送り出す送信器である。光ファイバ伝送においては、いかにして送信器からの光パルスを長距離にわたりその波形を崩さず、かつ高いビットレートで安定に伝播させるかが鍵となる。しかし、伝送媒体である光ファイバは強い波長分散特性を有するため、光パルスは伝播の途上波形が広がる方向にその強度や位相を変化させてしまい伝送特性の劣化を招く（チャープ現象）。従ってチャープ耐性に優れた光ファイバ伝送を実現するためには、レーザや光変調器内での光パルスの生成過程に着目し、光パルスの強度と位相を制御することが重要な課題である。

光強度の利得/吸収係数と屈折率は複素屈折率の虚部と実部に相当し、クラマース・クローニツヒの関係によって互いに関係づけられており、一方の変化は必ず他方の変化を誘起する。チャープパラメータは屈折率のキャリアや電界に対する変化と利得/吸収係数のキャリアや電界に対する変化の比により決まるため、送信器からの光パルスはチャープを伴う。従って、光パルスの強度と位相の制御においては、送信器における利得/吸収係数変化及び屈折率変化の設計を、クラマース・クローニツヒの関係で決まる制約の中で最適化することが本質であり、この点を本論文では詳細に議論している。半導体の光利得/吸収とそれに伴う屈折率変化はキャリアの伝導帯-価電子帯間直接遷移や室温励起子遷移に起因する。本論文では、望ましい半導体の複素屈折率を設計するため、バンドエンジニアリングとしての種々の手法を提案した。すなわち、レーザの活性層や光変調器の吸収層に量子井戸構造と格子歪を導入し、吸収端近傍の価電子帯バンド構造の変化を通してキャリアの有効質量（状態密度）や遷移の振動子強度を制御する試みを行っている。

本論文の構成と各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の位置づけ及び目的について述べると共に、光パルスの広がりとチャープパラメータの関係、クラマース・クロニツヒの関係について詳述した後、レーザ及び光変調器が抱える課題について概説している。

第2章では、後続の各章での議論の基本となるバンド構造に関連する事項について論じている。まず、 $k \cdot p$ 法によりバルク半導体に対するハミルトニアンを導出し、量子井戸構造に対する有効質量方程式を導出した。それを基に、量子閉じこめ、格子歪の価電子帯バンド構造への効果を明らかにし、更に量子井戸内伝導帯電子の電界印加時の準束縛状態についての定式化を行っている。

第3章では、レーザのチャープパラメータのゼロ化について議論している。本章では、従来のレーザの問題点として微分利得（利得係数のキャリア注入に対する変化率）がピーク値をとる波長が吸収領域にあることを明らかにし、活性層内の井戸層への圧縮歪と障壁層へのp型変調ドーピングの導入によって、ピーク波長が利得領域にシフトすることをそのメカニズムと共に詳細に明らかにしている。その結果、チャープパラメータの異常分散項をゼロにできる可能性を理論的に示し、併せて実験による検証を行いチャープパラメータの低減化を立証した。

第4章では電界吸収型光強度変調器を取り上げ、負のチャープパラメータの可能性について理論検討を行っている。特にクラマース・クロニツヒの関係に基づき、印加電界に依存せず負の屈折率変化を得るための条件を理論的に提案した。更に励起子の有効質量方程式に基づく吸収スペクトルの解析から、歪量子井戸構造において、格子歪と井戸幅を最適化することにより印加電界に依存しない負のチャープ変調動作が実現可能であることを理論的に示している。

第5章ではマッハ・ツェンダー型光変調器の高性能化について議論している。まず価電子帯バンド構造と励起子吸収の関係を詳細に解析し、屈折率変化が入射光の偏光方向、量子井戸構造及び光変調器の動作波長に著しく依存することを見いだしている。すなわち、TM偏光における動作で、屈折率変化の増大と吸収損失の大幅な低減が両立できること、従来の予測に反し無歪量子井戸構造において偏光無依存化（屈折率変化が入射光の偏光方向に依存せず等しいこと）が可能であることを理論・実験の両面から初めて明らかにした。

第6章は本論文の総括であり、結論と今後の課題について述べている。

これを要するに、著者は、光ファイバ通信用半導体量子井戸構造素子のバンドエンジニアリングについての新知見を得たものであり、量子物理工学ならびに応用物理学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。