

氏名	みやざき やすのり 宮崎 泰典
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	論工博第3812号
学位授与の日付	平成16年11月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	NOVEL InGaAsP QUANTUM WELL ELECTROABSORPTION MODULATORS FOR ULTRAHIGH-SPEED AND ULTRALOW- CHIRP OPERATION (超高速化と超低チャープ化動作のための新規な InGaAsP 系量子井戸構造を 有する電界吸収型光変調器に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 北野正雄 教授 野田 進 助教授 川上養一

### 論文内容の要旨

本論文は、光通信システムの大容量化、長距離化のために不可欠な超高速、超低チャープ特性を有する InGaAsP 系量子井戸電界吸収型光変調器 (EAM) に関するものである。特に、超低チャープ特性を実現できる新規な量子井戸構造を提案し、その特性に関して数値解析、評価を行い、毎秒10ギガビット (10 Gbps) および 40 Gbps において最も低いチャープを実証するとともに、システム適用性を実証する伝送実験を行ったものであり、7章から構成されている。

第1章は、序論であり研究の背景と論文の構成を述べている。

第2章は、EAMの原理と基本構成について述べ、次いで、変調光のスペクトル拡がりを示すチャープの定義とその特徴について述べている。さらに、EAMの特性を決定するメカニズムと諸特性のトレードオフ要因について述べ、本研究において解決すべき課題を提示している。

第3章は、EAMを分布帰還型レーザダイオード (DFB-LD) とモノリシックに集積した EAM-DFB-LD について述べ、特に、2.5 Gbps 及び 10 Gbps における良好な光波形及び長距離伝送特性を実現するために必要なチャープ条件 ( $\alpha$  パラメータ) を数値解析により導くとともに、これを実現するデバイス構造を実験により決定している。

第4章は、浅い量子井戸を用いた 10 Gbps 超低チャープ EAM-DFB-LD について述べている。初めに、海底光ケーブルシステムに代表される超長距離分散補償伝送システムにおいて要求されるチャープ条件を数値解析により求めている。次に、従来の EAM がこのチャープ条件を満たせなかった原因を、高光出力時に量子井戸内に蓄積するフォトキャリアの寿命及びそれに起因する過剰チャープの定量的検討により明らかにした。また、その結果を利用して、量子井戸のポテンシャル障壁を低くすることで過剰チャープを低減して、10 Gbps EAM-DFB-LD として過去最低チャープ ( $\alpha < 0.5$ ) と、正負分散に対する良好な伝送特性を実現した。

第5章では、EAMの消光比特性に与える不純物拡散の影響について検討している。初めに、EAM-DFB-LDの結晶成長過程において EAM 吸収層に拡散した Zn の濃度分布をシミュレーションにより再現し、吸収層内の主たる拡散種を同定し、これを低減することで消光比特性が改善することを実証している。次に、一層不純物濃度を低減する必要がある 20/40 Gbps 伝送用 EAM にはアクセプタに Be (ベリリウム) を用いることで、実際に吸収層に拡散する不純物濃度を低減し、ほぼ均一な電界強度分布を実現することで、20/40 Gbps 変調に耐えうる良好な消光比特性が得られることを実証している。

第6章では、非対称量子井戸を用いた 20/40 Gbps 低チャープ単体 EAM について述べている。まず、半絶縁性基板を用いてキャパシタンスを低減することで、変調帯域幅を 40 GHz 以上に拡大できることを数値解析により示した。次に、消光比特性を犠牲にせずチャープのみを低減する方策を、吸収スペクトルの定性的検討から導出し、これを実現する新しいアプローチとして EAM の吸収層に伸張歪非対称量子井戸を用いることを提案した。伸張歪非対称量子井戸の歪とポテンシャル分布を設計パラメータとして電子及び正孔の準位と波動関数を制御することで、消光比特性を犠牲にせずチャープのみを低減できることを、理論計算により最適化した伸張歪非対称量子井戸 EAM の評価により実証している。最後に、伸張歪非対

称量子井戸 EAM を用いて 20/40 Gbps 伝送実験を行い、目標とした良好な伝送特性と 40Gbps 伝送用 EAM としては初めて  $\alpha < 1$  を満たす超低チャープ動作を両立することを実証した。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、大容量長距離光ファイバ通信システムの主要な構成要素である 1.55  $\mu\text{m}$  波長帯 InGaAsP 系半導体電界吸収型光変調器の超高速動作と超低チャープ動作に関する研究を纏めたものである。

強度変調に付随する光周波数の変調及び拡がりであるチャープは、変調速度が速く、また伝送距離が長くなるほど、低減しなければならない。しかし、従来の半導体光変調器では、高速動作と低チャープ動作を両立させることは困難であり、新たな解決手段が必要とされていた。本論文では、光変調器におけるチャープの発生要因を検討し、高速変調特性を損なうことなくこれを低減する新たな方法を提案し、試作評価を行い、その有効性を実証した。

まず、素子静電容量に起因する動作周波数の制限、及び量子井戸の量子閉じこめシュタルク効果による吸収変化に付随する屈折率変化に起因するチャープについて検討し、高速動作と低チャープ動作のトレードオフを緩和するための必要条件を導いた。

つぎに、従来型光変調器において高出力時に見られる過剰チャープが、量子井戸吸収層内に発生蓄積するフォトキャリア（正孔）の蓄積に起因することをつきとめた。これを防ぐために吸収層に浅い量子井戸を用いることを提案し、過剰チャープ低減効果を実証するとともに 10 Gbps 動作光変調器として最小チャープを達成した。

また、素子作製プロセス中に吸収層内に拡散するアクセプタの濃度を低減することで消光比特性の改善を図った。濃度低減法として、吸収層近傍の Zn 濃度を減らす方法、アクセプタを Zn からより拡散の少ない Be に置き換える方法を提案し、それらの有効性を実証した。

さらに、消光比特性を犠牲にせずチャープを低減する方法として、量子井戸のウエル層に伸張歪を加え、かつウエル層とバリア層の間に中間のバンドギャップを持つ層を挿入して量子井戸準位及び波動関数を制御する、伸張歪非対称量子井戸構造を提案し、電界吸収型光変調器としては世界で初めて 40 Gbps 動作と低チャープ特性の両立を達成した。

以上のように、本論文は InGaAsP 系半導体電界吸収型光変調器に独自設計の量子井戸構造を適用することで、世界で初めて超高速動作と低チャープ動作の両立を実現したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成16年10月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。