

氏名	つづき けん 都 築 健
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成17年3月9日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成7年3月 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	半導体光変調器の高性能化に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 岡 泰夫 東北大学教授 近藤泰洋 東北大学教授 梶谷 剛 東北大学教授 中沢正隆

論文内容要旨

光通信技術は現在の情報化社会を支える基盤技術として発展し、大都市間を結ぶ基幹伝送網だけでなく、各家庭まで光ファイバを用いた情報伝送を行うアクセス系伝送網まで、幅広いレイヤで用いられるようになりつつある。このようなアクセス網の光化により促される伝送容量の増大に伴い、より高速で長距離伝送可能な光通信システムを安価に構築することのできる光デバイスが求められている。本研究では光をオン、オフすることで0、1のデジタル信号に変換する光変調器について高性能化、高機能化のための開発を行うとともに、素子構造に新規な構造を考案、導入することによって従来の光変調器にない低駆動電圧化、小型化を実現した素子の開発を行った。

光変調器は半導体多重量子井戸の量子閉じ込めシュタルク効果を利用した電界吸収型光変調器と、電気光学効果であるポッケルス効果を利用したマッハツェンダ型光変調器に大別される。本研究では、高速・大容量光通信のための光変調器を開発するために、電界吸収型光変調器(EA変調器)の高性能化とモノリシック集積による高機能化、および新規構造での半導体マッハツェンダ変調器の検討を行った。以下に本研究での成果を簡潔に示し、さらに各章ごとに得られた知見および結果についてまとめる。

- EA変調器の偏波無依存条件の確定
- SI埋め込みEA変調器のZn拡散防止構造の確立
- 導波路集積、SOA集積によるEA変調器の高機能化
- n-i-n構造による超高速光変調器の提案
- n-i-n構造マッハツェンダ変調器での10 Gbit/s長距離伝送の実証
- n-i-n構造マッハツェンダ変調器での40 Gbit/s超高速動作の実証

第1章は序論として、光変調器の概要と本論文の目的および構成を示した。

第2章では電界吸収型光変調器に関して、その動作原理であるフランツ・ケルディッシュ効果と量

子閉じ込めシュタルク効果について整理し、本研究で用いたハイメサ構造、SI 埋め込み構造の EA 変調器の構造について示した。次に、電界吸収効果に寄与する半導体のバンド間遷移について、バルク半導体、多重量子井戸について比較した。更に歪み量子井戸についてバンド間遷移の入力光偏波依存性の仕組みについて示すとともに、偏波無依存光変調器を実現するための歪み量を求め、入力光波長 1530 から 1565 nm (C-band)、1565 から 1600 nm (L-band) で偏波無依存の電界吸収型光変調器を実現した。

次に、ファイバ伝送時の光信号の劣化要因となる、変調時の光チャープについて、伝送距離に与える影響を明らかにし、バリア層歪みによってチャープ量が減少する効果を明らかにした。しかし、低チャープ化のためのバンド構造制御は、低駆動電圧化・低ロス化には悪い影響を与え、バンド構造制御のみでのチャープ量制御の困難さも同時に明らかになった。

次に高光入力耐性を向上させ、レーザ等とのモノリシック集積の際必要となる、半絶縁半導体層による埋め込み技術について、Fe ドープ InP 埋め込み層を用いた際の Fe と Zn 原子との相互拡散によって、消光特性の劣化や周波数帯域の減少が起こることを明らかにした。Fe と Zn 原子との相互拡散の影響は、吸収スペクトル、拡散範囲の SEM 観察写真によっても確認できた。この相互拡散による特性劣化を防止するため、①拡散ストップ層の導入、②p型クラッド層の Zn 濃度の低減、③SI 埋め込み層の Fe 濃度の低減、の3つの方策を採った構造で、その効果を比較した。その結果①の方策は、消光比がハイメサ構造に比べ 19 dB から 13 dB へ若干低くなっているが、拡散の発生していない特性に極めて近い特性が得られることが明らかになった。一方②の方策は、励起子ピークによる QCSE 効果が見られるものの、消光に要する電圧が 1.5 倍ほど高くなる、という問題が見られた。次に③の方策は、埋め込み層の Fe 濃度を低減するとともに消光比が大きく取れる、という改善が見られたものの、消光に要する電圧が 1~2 V 上昇することや、暗電流が多くなるなどの問題が見られた。これらの結果から Fe と Zn 原子との相互拡散による EA 変調器の特性劣化の防止には、拡散ストップ層の導入が最も有効であることが明らかになった。本研究では InGaAsP の拡散防止層を 2000 Å 導入することにより、拡散の無いハイメサ型光変調器の特性に極めて類似した SI 埋め込み型変調器を実現している。

さらに半絶縁性半導体層による埋め込み技術に関して、従来使用されていなかった Ru をドーパントとして用いた Ru ドープ InP 埋め込み技術による EA 変調器を作製し、その特性を明らかにした。Ru ドープ InP 埋め込みの EA 変調器は、3.2 V で 16 dB の消光比を示すとともに、電界印加時の吸収スペクトルの変化もハイメサ構造の EA 変調器と同等の特性を示し、Zn 拡散が発生していないことが確認できた。また高周波帯域特性においても、小信号応答特性が 17 GHz まで伸びており、ハイメサ構造と比較して特性の劣化がほとんどないことを確認した。この Ru ドープ InP 埋め込み技術は、超高速の集積光デバイスの実現のために有望な技術であり、40 Gbit/s 用 EA 変調器集積型レーザなどを実現する上で非常に重要な技術になると言える。

第3章では EA 変調器をモノリシック集積した素子について、本研究で作製した素子の構造、および特性を示した。まず、スペースや実装コストの低減が期待でき、光時多重回路などの応用面での期待もできる、EA 変調器アレイ素子について、10 Gbit/s 動作 4 チャンネル EA 変調器アレイを作製し、その特性を示した。EA 変調器に受動導波路を集積し、インピーダンス整合フィルム (IPF: impedance-matched film) キャリアを用いた高周波電気配線を施した素子を作製した。導波路を集積した EA 変調器は、偏波無依存、消光比 30 dB 以上、周波数帯域 10 GHz の特性を示した。IPF

キャリアでの電気の反射が大きいという問題点があり、実装後の周波数帯域は 5 GHz 程度と低かったが、10 Gbit/s でのアイパターンは明瞭な開口が確認でき、チャンネル間のクロストークも低く抑えられていた。電気配線パターンの改善等を必要とするものの、多チャンネル変調素子の実装法に関して一つの方策を示した。

次に EA 変調器のロスを改善するため、本研究で作製した半導体光増幅器 (SOA) をモノリシック集積した素子の構造、および特性を示した。InGaAlAs 系 MQW をもつ EA 変調器と SOA をモノリシック集積し、偏波無依存、ロスレス動作を確認した。また第 2 章で述べた SI 埋め込み時の Zn 拡散防止構造の導入により、周波数帯域 20 GHz 以上の特性を確認し、10 Gbit/s でシングルモードファイバ 40 km の伝送を確認した。SOA 集積の EA 変調器では SOA で補償した分だけ光強度の減衰が防止でき、受信側でのパワー (Received power) が EA 変調器に比べて増大する。EA 変調器で Received power が -39 dBm のときエラーレートは 10^{-6} であるが、SOA で 5 dB ロスを補償したとすると、Received power は -34 dBm になりエラーレートは 10^{-12} になる。このように EA-SOA は EA 変調器に比べ大きなメリットを持つ。

第 4 章では半導体マッハツェンダ変調器について、本研究で新たに考案した n-i-n 構造をもつ光変調器の構造、および特性を示した。まず初めに 1 次の電気光学効果であるポッケルス効果について、変調器の材料として主に用いられている LiNbO₃ と III-V 族半導体について比較した。次に、進行波電極構造光変調器を実現するための分布定数線路の考え方と光と電気の世界速度整合について整理した。また進行波電極構造光変調器を従来の LiNbO₃ 変調器 (LN 変調器) と半導体変調器で比較し、今回新たに考案した n-i-n 構造光導波路の従来と異なる利点について示した。n-i-n 構造は従来の光変調器と異なり、電界の印加密度が高いため、ポッケルス効果を高効率で利用でき、従来のものよりも短い導波路で低電圧駆動の光変調器が実現可能である。またインピーダンス整合や光と電気の世界速度整合条件に対するトレランスが広く、容易に超高速駆動可能な光変調器を実現することができる。本研究で作製した半導体マッハツェンダ変調器は、電極長 3 mm、素子サイズ 0.8 x 4.5 mm と従来の LN 変調器の 1/20、従来の半導体変調器の 1/3 以下の電極長で、位相反転電圧 (V_{π} 電圧) 2.2 V の低駆動電圧を実現した。また C-band、L-band の波長域で駆動条件を変える必要のない波長無依存動作、吸収による透過光強度の劣化のない位相変調特性を確認し、電極長 4 mm の変調器で印加電圧 10 V 以下で $6V_{\pi}$ の位相変調特性を示した。

変調器の駆動電圧を 1 V 程度まで抑えると、駆動用電子回路に従来必要であった電気のアンプが必要でなくなるため、送信系システムの大幅な低消費電力化、低コスト化が実現できる。このような要求に答えるため、本研究では n-i-n 半導体マッハツェンダ変調器をプッシュプル駆動により変調することで、駆動電圧 1 V、10 Gbit/s の伝送実験を行った。この結果シングルモードファイバ (SMF) 100 km 伝送時のパワーペナルティ -1.5 dB 以下の特性を確認した。この結果は LN 変調器の伝送特性とほぼ同等であり、駆動電圧 3 ~ 5 V の LN 変調器に比べ、はるかに低電圧で動作可能な小型の光変調器が実現できていることが明らかになった。また超高速駆動のための電極の最適化を行い、電極長 3 mm の変調器で周波数帯域 40 GHz の特性を実現し、2.3 V 駆動で 40 Gbit/s の明瞭なアイ開口、動的消光比 9 dB を確認した。

マッハツェンダ変調器では、駆動条件により変調時の光チャープ量を制御できるため、EA 変調器に比べ高速・長距離の光通信に適していると言える。また 40 Gbit/s 以上の超高速光通信では、周波数の使用効率や分散耐力の向上のため、CS-RZ (carrier suppressed return to zero) や RZ-DPSK

(return-to-zero differential-phase-shift keying) 、光デュオバイナリなどの変調方式が必要とされる。このような変調方式に対応するためには、光の位相変調も可能な光変調器が求められる。この機能は EA 変調器に付与することはできないため、本研究で提案した n-i-n 構造光変調器は今後ますます重要性を増す光変調器であり、光通信の発展に大きく寄与するものと考えられる。

本研究により開発した半導体マッハツェンダ変調器は、従来の半導体光デバイスの概念を大きく変えるもので、従来の光変調器に比べ大幅な低消費電力化、高安定化、小型化が実現できる。本研究の推進は光通信システムの発展に寄与するとともに、半導体デバイスの新たな可能性を探索するきっかけになるものと考えている。

論文審査結果の要旨

本論文は、光をオン、オフすることで0、1のデジタル信号に変換する光変調器について、新規な高性能、高機能の光変調器を開発した成果をまとめたものである。今日の光通信技術は、情報化社会を支える基盤技術として、大都市間を結ぶ基幹伝送網や、各家庭まで情報伝送を行う末端伝送網まで、幅広く用いられている。本研究では、今後の高速・大容量の光通信に適合する新しい光変調器として、半絶縁体埋め込み構造電界吸収型光変調器、モノリシック集積電界吸収型光変調器、および新規構造での半導体マッハツェンダ変調器の開発に成功している。

第1章は序論であり、光変調器の概要と本論文の目的および構成を示している。

第2章では、電界吸収型光変調器として、ハイメサ構造、半絶縁体埋め込み構造を開発し、入力光波長が、1530 - 1565 nm (C-band) および 1565 - 1600 nm (L-band) の領域で、偏波無依存の光変調器を実現した結果について述べている。

第3章は、電界吸収型光変調器をモノリシック集積した素子を開発した結果で、構造および作製した素子の特性を示している。導波路を集積した電界吸収型光変調器は、偏波無依存、消光比 30 dB 以上、周波数帯域 10 GHz の特性を示しており、多チャンネル変調素子を実現している。

第4章は、半導体マッハツェンダ変調器の開発に関するものであり、新たに考案し作製した n-i-n 構造をもつ光変調器の特性を示している。このマッハツェンダ変調器は、高速・長距離の光通信に適しており、大幅な低消費電力化、高安定化、小型化が実現できるため、今後の光通信技術として、極めて重要なものと認められる。

第5章は、結論であり、各章の成果をまとめている。

本研究で得られた主な成果をまとめると次のようになる。

- 1) 電界吸収型光変調器の偏波無依存条件の確定
- 2) 絶縁体埋め込み電界吸収型光変調器の Zn 拡散防止構造の確立
- 3) 導波路集積、半導体光増幅器集積による電界吸収型光変調器の高機能化
- 4) n-i-n 構造による超高速光変調器の提案と作製
- 5) n-i-n 構造マッハツェンダ変調器での 10 Gbit/s 長距離伝送の実証
- 6) n-i-n 構造マッハツェンダ変調器での 40 Gbit/s 超高速動作の実証

以上要するに、本論文は今後の高度情報化社会の光通信システムに必要な新しい光変調器に関する新たな知見を与えたものであり、応用物理学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。