

氏名(本籍)	あき やま すぐる 秋 山 傑 (埼玉県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第6415号
学位授与年月日	平成25年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	通信用半導体光変調器の高速/高効率動作に関する研究

主査	筑波大学教授	博士(工学)	大野裕三
副査	筑波大学教授	理学博士	舛本泰章
副査	筑波大学教授	Ph.D.	佐野伸行
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	野村晋太郎

論文の内容の要旨

光変調器は高速な電気信号を光信号へと変換する機能を有し、大容量の光通信におけるキー・デバイスである。中でも半導体材料の変調器は材料の電気光学効果が比較的大きく、また、同じ半導体材料からなるレーザー・ダイオードや電子回路との集積形成が可能であるため有用である。半導体光変調器は長距離光ファイバ通信において既に実用化されておりネットワーク社会を支えている。今後も続くインターネットのトラフィック増大を支えるためには、システム全体の規模を維持した上で、光通信システムの伝送容量増大が必要である。そのためには、伝送路の末端で電気/光信号変換を担う光変調器に対して、より高速/高効率な動作が求められる。一方、近年、コンピュータシステムにおいては、集積電子回路(LSI)間のインターコネクットの容量不足がボトルネックとなり、システム全体の処理能力向上に限界が生じることが危惧されている。そこで、従来の電気的なインターコネクットに替わり、大容量の光インターコネクットの導入が望まれている。この場合、限られたスペースに大量の変調器を高密度に配置するため、より一層の高速/高効率動作が変調器に求められる。変調器において高速動作と高効率動作は相反する要求である。そのため従来の変調器構造におけるパラメータの最適化では、一方の特性を犠牲にすることなく他方の特性を改善することは容易ではない。本研究の目的は、新しい素子構造の通信用半導体光変調器を検討することで、従来の素子構造の変調器の特性限界を超えた高速動作/高効率動作を実現することである。

本研究では、第一に進行波電極構造の適用によるInP材料のマッハツェンダ変調器の高速化をはかった。従来、InP材料の変調器は、素子の単位長さあたりの電気容量が大きく、進行波電極とした場合の特性インピーダンスが、駆動系のインピーダンスよりも小さくなるという問題があり、その結果、高速動作が制限されていた。本研究では、InP材料のマッハツェンダ変調器に対して、50Ωインピーダンス整合が可能な新しいセグメント型の進行波電極構造を提案し、本研究で初めて40Gb/sの高速動作を実現した。第二に、インピーダンス整合した電極を用いて、動作速度を維持した上で変調器の作用長の増大をはかり、1.2V振幅の単一の信号源により10Gb/s動作を行い、最も高効率な半導体マッハツェンダ変調器を実現した。第三に、光共振器の導入によるシリコン材料の変調器の高効率化をはかった。シリコン材料の変調器は、LSIとの一体形成が可能であるため、近年、重要度が高まっている。この集積光I/O素子においてシリコン変調器一つ一つ

に割り当てられる面積・消費電力は非常に小さくなるため、シリコン変調器の高変調効率化が必要となる。リング共振器型の変調器は光の共振作用により変調効率の大幅な増大を実現していたが、一方では共振の効果に伴って、変調器の動作波長帯域が極端に狭くなる (<0.1 nm)、共振器内の光子寿命により動作速度限界が生じる、という問題を有していた。本研究では、このような従来のリング共振器型変調器の問題を回避するため、多段に接続したリング共振器をマッハツェンダ干渉計に組み込んだ構造の新しいリング共振器型の変調器を提案した。本研究では、まず、リング共振器の特性の構造パラメータ依存性を実験的に調べ、提案した素子構造に対して最適なリング共振器の構造を明らかにした。また、最適化されたリング共振器を用いて、提案した構造の変調器をシリコン材料にて作製した。その結果、従来のリング共振器型変調器の約 20 倍に当たる 2 nm の波長範囲にて、10 Gb/s、1.5 V の高速 / 低電圧動作を実現し、本構造が高効率かつ広波長帯域動作に対して有効であることを実証した。第四に、提案した素子構造の動的応答特性を解析計算と数値シミュレーションにより調べ、25 GHz 以上の高速動作においては本構造の変調器が従来のリング共振器型変調器よりも高効率であることを示した。以上のように本研究では、進行波電極と光共振器という 2 つのアプローチにより、変調器の共通の目的である高速 / 高効率動作を検討した。得られた成果は、変調器の従来の特性限界を超えるものであり、変調器の応用範囲を拡げることに貢献した。

審査の結果の要旨

本論文にて著者が新たに考案した通信用半導体光変調器素子構造である、進行波電極型 InP マッハツェンダ変調器、多段接続リング共振器装荷 Si マッハツェンダ変調器の両者共に独創性の高い構造である。変調器において高速動作と高効率動作は相反する要求であったが、新たに考案された素子構造では、高速動作と高効率動作の両者を満たす条件が選択可能となった。著者は、これらの光変調器の動作を解析的、数値的に解析を行い、その条件を見いだした。さらに、実際に光変調器を作製し、その動作特性の評価を行った。その結果、従来 10 Gb/s までの動作しか報告されていなかった InP 系材料のマッハツェンダ変調器において、本研究で初めて 40 Gb/s の高速動作を実現した。また、Si マッハツェンダ変調器において、従来のリング共振器型変調器の約 20 倍に当たる 2 nm の波長範囲にて、10 Gb/s、1.5 V の高速 / 低電圧動作を実現し、本構造が高効率かつ広波長帯域動作に対して有効であることを実証した。また、提案した素子構造の動的応答特性を解析計算と数値シミュレーションにより調べ、25 GHz 以上の高速動作においては本構造の変調器が従来のリング共振器型変調器よりも高効率であることを示した。以上のように本研究では、進行波電極と光共振器という 2 つのアプローチにより、変調器の従来の構造の光変調器の特性限界を超える高速 / 高効率動作を実証し、光変調器の応用範囲を拡げることに成功した。本研究により得られた成果は当該研究分野に大きく寄与するものであり、博士論文として相応しい内容のものであると判断する。

平成 25 年 2 月 20 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。