



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---------------------|---|
| Title | 波面整合法設計モード制御デバイスに関する研究 [論文内容及び審査の要旨] |
| Author(s) | 澤田, 祐甫 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(工学) |
| Dissertation Number | 甲第15078号 |
| Issue Date | 2022-03-24 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/85391 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | Yusuke_Sawada_abstract.pdf, 論文内容の要旨 |



学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 澤田 祐甫

学位論文題名

波面整合法設計モード制御デバイスに関する研究

(A Study on Mode Controlling Devices Designed by Wavefront Matching Method)

世界のインターネットユーザ数や1人当たりのネットワークデバイス数は、年々増加しており、データ通信の需要が急増している。その多くはデータセンタが関係し、特に、データセンタ内の通信が70%以上を占める。そのため、データセンタ内の通信機器の大容量化・低消費電力化が急務となっている。従来の電気配線は、通信容量や消費電力の観点から限界を迎えつつあり、大容量・低消費電力な光配線技術への転換が重要である。その実現のため、短距離の光インターコネクト技術が必要である。現在、電気回路と光回路を一括集積するコパッケージ化が盛んに研究されており、今後は、より短距離を光配線化する方向で研究が進められている。このような光配線を担うのがシリコン導波路であり、様々な機能を有するシリコン導波路デバイスが研究されてきた。

大容量化のためには、多重化技術が重要である。現在主流の波長分割多重に加え、偏波分割多重、モード分割多重技術等が挙げられる。将来必要となるチップレベルの超短距離通信においては、さらなる高密度集積が要求されるため、追加の光源を必要としないモード分割多重技術の利用が有効である。また、波長分割多重技術と併用し、飛躍的に伝送容量を拡大することが可能である。マルチモードシリコンフォトリソの実現のため、これまで、モード合分波器、モード変換器、マルチモード交差導波路等、様々なモード制御デバイスが報告されてきた。

モード制御デバイスの多くは、非対称方向性結合器、マルチモード干渉結合器、Y分岐等の基本的な構造を用いて設計することが可能である。一般的に、所望の特性を得るために、導波路の寸法を最適化するパラメータ最適化が行われる。しかしながら、パラメータ最適化では、それぞれの基本構造の特徴から大きな改善や変化は見込めず、小型・低損失動作・広帯域動作等の優れた特徴を有するデバイスを設計するには限界がある。そこで、導波路の外形や内部に構造的な自由度を与え、デバイスの高機能化や小型化を追求する研究が盛んに行われている。大規模な計算資源や並列計算技術を利用して、導波路の伝搬解析、事前に準備した評価指標の計算、導波路構造の更新で構成される最適化のプロセスが、十分な性能が得られるまで繰り返される。このような最適化手法の1つに波面整合法がある。波面整合法は、コアとクラッドの屈折率差の小さい石英系光導波路デバイスの設計で実績のある最適化手法であり、モード制御デバイスとして、モード合分波器が報告されていた。屈折率差の大きいシリコン光導波路デバイスの設計においては、偏波制御デバイスで実績があり、シリコンモード制御デバイスの設計においても有用な手法であると期待される。

本研究では、主に、モード制御デバイスの広帯域化のために波面整合法を用いる。設計したモード制御デバイスの試作及び測定実験を通し、実験的な実証を行っている。

モード制御デバイスの設計を始める準備として、導波路不連続問題のための3次元ベクトル有限要素法に基づく波面整合法を開発した。従来の波面整合法は、解析可能な構造に制限のあるビーム伝搬法に基づいており、適用できる構造が限られていた。そのため、任意の導波路構造の伝搬解析が可能である3次元ベクトル有限要素法を採用した。開発した波面整合法を用いてモード変換器を設計

し、開発した波面整合法がシリコン導波路デバイスの設計に有用であることを理論的に実証した。

波長分割多重技術とモード分割多重技術を併用するシステムを想定する場合、広帯域に動作するモード制御デバイスが必要である。初めに、波面整合法を用いて設計したモード変換器の実験的実証を行った。広帯域なモード変換器を設計するため、複数の波長で同時に波面整合法を適用し、理論的かつ実験的に広帯域動作を確認した。本成果は、波面整合法設計シリコン導波路デバイスの初めての実験的実証である。なお、シリコンチップの作製には、量産性に優れるフォトリソグラフィ技術が使用されており、波面整合法設計シリコン導波路デバイスが産業的な観点からも有用であることを示している。次に、波面整合法を用いて設計した3つの非対称方向性結合器で構成される4モード合分波器の実験的実証を行った。広帯域な4モード合分波器を実現するため、3つの非対称方向性結合器の設計においては、複数の波長で同時に波面整合法を適用し、理論的かつ実験的に広帯域動作を確認した。モード合分波器は、あらゆるモード分割多重システムに必要なデバイスであり、本成果で提案した広帯域4モード合分波器は、波長分割多重技術及びモード分割多重技術の併用システムにおいて有用であることを示している。さらに、非対称方向性結合器の一部にテーパ導波路を導入することで、さらなる広帯域化及び低損失化が可能であることを理論的に実証した。

コアとクラッドの屈折率差が大きいシリコン導波路において、波面整合法を用いてモード変換器やモード合分波器等を設計してきたが、初期構造のパラメータによって、十分な性能改善が得られないことや、導波路構造の収束がしないことがあった。その主な原因は、導波路構造が一度に大きく更新されるとき、波面整合法の理論が成立しない場合が生じることである。そこで、波面整合法の適用方法を考案し、安定的に高性能な光導波路デバイスの設計が可能であることを示した。

最近では、外部から制御して切り替え可能なモード制御デバイスが報告されている。再構成可能な(選択的に光信号の挿入や分岐を行う)モード合分波器やマルチモードスイッチ等が挙げられる。最後に、任意4モード変換器の提案を行っている。任意4モード変換器は、2モードの入力に対して、選択的に4つモードのいずれかに変換するデバイスである。再構成可能なモード合分波器と組み合わせることで、送受信のためのデバイス数を削減することができる。任意4モード変換器については、理論的実証まで行っている。