



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on Selective Mode Multiplexer for Mode Division Multiplexing Transmission [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	王, 晗
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16010号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92242
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Han_Wang_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（情報科学） 氏名 Han Wang

学位論文題名

Study on Selective Mode Multiplexer for Mode Division Multiplexing Transmission

（モード分割多重伝送のための選択型モード合分波器に関する研究）

近年、インターネットトラフィックの増加に伴い、光通信ネットワークに対する通信容量の拡大への要求が高まっている。しかしながら、従来のシングルモードファイバを伝送媒体とした光通信ネットワークの大容量化は限界に近づいていることから、従来の多重化技術に加えて、新たな光信号多重化技術である空間分割多重 (Space Division Multiplex: SDM) 技術が注目されている。SDM の 1 つであるモード分割多重 (Mode Division Multiplex: MDM) は、一本の光導波路の中を伝搬する複数の伝搬モードを伝送チャンネルとして利用することで通信容量を拡大する技術である。

MDM 伝送におけるモード合分波器は、シングルモードシステムとマルチモードシステムを接続して、空間モードの結合または分離を実現するために使用されるキーデバイスである。モード合分波器をその構造で分類すると、空間光学型と導波路型の 2 つのタイプに分けることができる。空間光学型モード合分波器では、位相板やレンズを利用してモード合分波を実現するため、集積性の観点から課題がある。一方、導波路型モード合分波器は、非対称方向性結合器 (Asymmetric Directional Coupler: ADC) を用いたものや、フォトリソランタン型などの構造が報告されており、集積性の観点で優位性がある。

また、モード合分波器をモード結合の大きさで分類すると、モード選択型とモードスクランブル型の 2 つのタイプに大きく分けることができる。MDM 伝送においては、伝送路内でのモード間結合を補償するために、受信側で MIMO (Multi-Input Multi-Output) 信号処理が必要になるが、モードスクランブル型は全てのモード間結合を許容するため、モード数の拡張性に優れているが、MIMO 信号処理の負荷が大きくなるという課題がある。一方、モード選択型は、モード間の結合をできるだけ抑制することにより MIMO 信号処理の負荷を低減することができるが、モード数の拡張性に課題がある。

こうした背景の下、本研究では、MDM 伝送におけるモード合分波器として、集積性と MIMO 信号処理の負荷低減の観点で優位性がある導波路型かつモード選択型のモード合分波器に着目している。先行研究では、ADC 構造を用いた選択型モード合分波器として 6 モード合分波器が報告されているが、モード数の増加に伴い、構造が複雑になるとともに、デバイスサイズも大きくなるという課題があった。また、フォトリソランタン構造を利用したものは、シンプルな構造でデバイスサイズの低減に有望ではあるが、従来研究では 4 モードの合分波しか実現できていなかった。本研究では、石英系平面光回路 (Planar Lightwave Circuit: PLC) を用いたフォトリソランタンモード合分波器を提案し、選択型モード合分波器のモード数拡張に成功している。

また、モード合分波器を光ファイバに接続するには、長方形導波路の導波路モードを光ファイバライクモードに変換する必要があるが、従来の研究では、このようなモード変換を実現するためには、1 段または複数段の直線テーパ構造が用いられていたが、モード変換を十分に行うには非常に長いテーパ長が必要であった。そこで、本研究では、フォトリソランタンモード合分波器の後段で、

導波路モードをファイバライクモードに変換できるテーパモード変換器のサイズ低減手法の提案も行なっている。

さらに、チップ内通信における光通信デバイスにおいては高集積化が要求されており、ナノフォトニクス技術が注目されている。ナノフォトニクスの1つであるフォトニック結晶 (Photonic Crystal: PC) は、その独特の特性と高い集積密度のため、波長分割多重技術 (Wavelength Division Multiplex: WDM) の研究において多くの先行研究がある。しかしながら、MDM 伝送に用いられる PC デバイスの研究はまだ少ない状況である。近年、WDM と MDM を同時に実現できる WDM/MDM ハイブリッド多重技術が提案されている。従来の WDM/MDM ハイブリッド合分波器では、WDM 部分と MDM 部分は異なる導波路構造を用い、WDM 部分は PC、MDM 部分は Si ワイヤ導波路の使用が想定されていた。この場合、PC 導波路と Si 導波路の接続部分で大きな損失が発生するという課題があった。チップ内通信に必要な全ての部品を PC 導波路で集積することが望ましいが、従来の PC モード合分波器は、2次元ピラー構造を用いて設計されており、製造上の観点から現実的ではなかった。そこで本研究では、製造上の観点からより現実的なエアホール型 PC を用いてモード合分波器を設計できることを明らかにしている。

本論文の構成は以下となる。

第1章では、MDM 技術、MDM 伝送システム、PLC フォトニックランタンモード合分波器、PLC モード変換器、および PC モード合分波器の研究背景及び目的を説明している。

第2章では、本研究で主に使用する光導波路解析手法の定式化を行なっている。なお、各デバイスの設計に応じて、他の計算手法を使用する必要があるが、これらの手法は各デバイスの章で個別に説明している。

第3章では、PLC 型フォトニックランタン選択型 4 モード合分波器の設計について説明している。PLC 型フォトニックランタンモード合分波器の設計結果から、フォトニックランタン構造を PLC プラットフォームに適用可能であることを明らかにしている。

第4章では、PLC 型フォトニックランタン選択型 6 モード合分波器の設計について説明している。フォトニックランタンモード合分波器のモード数拡張可能性を検討するとともに、数値シミュレーションを通じてその性能を評価している。

第5章では、PLC 型フォトニックランタン選択型 10 モード合分波器の設計について説明している。本研究で世界で初めて導波路構造に基づく選択型 10 モード合分波器を提案しており、シミュレーションを通じてその性能を評価している。

第6章では、PLC 型フォトニックランタン 6 モード、および 10 モード合分波器の後段に配置される、高速擬似断熱変換 (Fast Quasi-Adiabatic Dynamics: FAQUAD) 法を用いた PLC E31, E13 モード変換器の設計について説明している。FAQUAD 法の設計手順や定式化を説明するとともに、3つの使用条件にそれぞれ対応できる 3種類のモード変換器を提案している。

第7章では、まず、PC の動作原理やバンドギャップ解析手法の定式化について説明している。次に、ピラー型 PC 構造を用いた 5 モード変換器の設計について説明している。ピラー型 PC モード合分波器のモード数拡張可能性を検証するとともに、空気穴型 PC2 モード合分波器の設計について説明している。

第8章では、本研究により得られた結論をまとめている。