



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大容量マルチモード伝送システム実現のためのシリコンフォトニクスデバイスに関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	中村, 航大
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16014号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92386
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kodai_Nakamura_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 中村航大

学 位 論 文 題 名

大容量マルチモード伝送システム実現のためのシリコンフォトニクスデバイスに関する研究
(Study on Silicon Photonics Devices for Realizing High-Capacity Multimode Transmission System)

情報社会の発展に伴い、通信トラフィックは年々増加し続けている。これに合わせて通信に関連する消費電力も増加し続けており、今後の光通信には大容量かつ低消費電力であることが求められる。モード分割多重 (Mode Division Multiplexing: MDM) 技術は同一導波路中に存在する複数のモード (基底) を利用する空間分割多重 (Space Division Multiplexing: SDM) 技術の一つである。MDM 伝送では、単一波長において複数のモードを利用するため、利用波長数を変えずに通信容量の拡大が可能である。この MDM 技術を利用した大容量光ファイバ伝送がいくつも報告されており、今後の通信容量拡大方策として期待されている。

長距離マルチモード伝送においては損失が最も低い C バンド (1550 nm 帯) の波長が用いられることになる。また、伝送中に減衰した光を増幅するための光増幅器が利用されるが、低次のモードほど損失が低く利得が大きいので、各モードのパワーがばらつく。これにより、伝送距離が制限されるとともに、受信部で行う Multi-Input Multi-Output (MIMO) 信号処理の精度が劣化するため、各モードのパワーを均一化するデバイスが必要となる。低消費電力化やデバイス集積の観点から、パワー均一化デバイスは可能な限り小型であることが求められる。

一方、数 m～数 km 程度の光通信を行うデータセンター関連では、光イーサネットを利用した通信システムが構成されており、100 Gbps, 400 Gbps の伝送容量を持つ通信規格が標準化されている。このような通信システムでは波長分散特性の影響が少ない O バンド (1260～1360 nm 付近) の光が用いられている。これまでの光イーサネット規格は、シングルモード伝送で複数の波長に異なる信号を乗せる波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) 技術を利用し、伝送容量を拡大してきたが、変調速度の物理的限界や、波長数拡大に伴う伝送損失の増加等の課題から、シングルモード伝送での限界に達しつつある。今後の通信トラフィックの増加に対応するためには、新しい技術を利用した通信容量の拡大が必須である。

このような状況の中で、成熟した既存の CMOS プロセスを利用して作成可能なシリコンフォトニクスデバイスは、従来半導体デバイス製造に利用してきた CMOS プロセスを利用できることから製造コストが低く、また利用する材料の比屈折率差の大きさから、超小型の光学素子を実現する技術として期待されている。シリコンフォトニクスデバイスを用いることで、長距離マルチモード伝送のための小型かつ低消費電力であるモード均一化デバイスの実現が可能であると考えられる。また、シリコンフォトニクスデバイスを用いたモード合波器も数多く報告されており、このようなデバイスを用いることで、光イーサネットにおいてもマルチモード伝送を利用した大容量化が可能であると考えられる。

本論文では、WDM/MDM 併用マルチモード伝送システムを想定し、シリコンフォトニクスに基づく波長・モード制御デバイスの提案とその実験的検証を行っている。具体的に、長距離伝送を想定した C バンド WDM/MDM 併用マルチモード伝送システムに向けたパワー均一化デバイスとして、モザ

イク状素子に基づく超小型 3 モード交換器の設計, および波長無依存カプラ型チューナブルモードディバイダの設計とその実験的検証を行っている. また, モザイク状素子設計のために, メタヒューリスティクスと直接二分探索法を組み合わせた新たな自動設計手法の提案を行っている.

加えて, 光イーサネットでマルチモードを利用する新たな伝送方式の提案とその実現のための波長・モード制御デバイスの設計及び実験的検証を行っている. 具体的に, CWDM4 と呼ばれる WDM 伝送規格に対し 3 つのモードを利用する伝送方式の実現を目指している. 各波長・各モードの伝送容量を 100 Gbps とすると, この伝送方式では 4 波と 3 モードの 12 種類のキャリアで 1.2 Tbps のテラビットスケールの伝送容量を実現可能となる. この伝送方式実現のための波長制御デバイスとして, 製造誤差耐性の高い 4 波長合波器の設計と実験的検証を行っている. また, 小型かつ製造誤差耐性の高いモード合波器実現のための新たな光学素子の設計理論の提案とその実験的検証を行っている.

以下に, 本論文の概要を示す.

第 1 章では, 本研究の背景および目的を述べている.

第 2 章では, 導波路解析や素子設計に利用した数値解析手法の解説を行っている.

第 3 章では, 方向性結合器の設計に利用したモード結合理論についての解説を行っている.

第 4 章では, メタヒューリスティクスと直接二分探索法を用いた光学素子の自動設計手法の提案を行っている. 本論文では, 優れたメタヒューリスティクスの一つであるハイイロオオカミ最適化と直接二分探索法をそれぞれ適した最適化過程で利用することで, 従来の直接二分探索法設計より高い確率で高性能なモザイク状素子と呼ばれる超小型高機能光学素子の設計が可能であることを理論的に示している.

第 5 章では, 波長無依存カプラ型チューナブルモードディバイダの設計と試作, その実験的検証を行っている. 波長無依存カプラの遅延線部にヒータを設置することで, 製造後にも広帯域特性を保ったまま透過率の調整が可能であることを実験的に示している.

第 6 章では, $2 \times 2/2 \times 1$ マッハツェンダー型 2 波長合波器と高トレランス偏波回転合波器を利用した O バンド CWDM 用 4 波長合波器の実験的検証を行っている. 製造誤差の影響を均一化可能な $2 \times 2/2 \times 1$ マッハツェンダー型 2 波長合波器に加え, 偏波回転器を構成するモード合波器に製造誤差耐性を高める設計を適用することで, 4 波長合波器全体の製造誤差耐性を高めることが可能となっている.

第 7 章では, 位相不整合非対称方向性結合器を 2 段接続した波長無依存カプラ構造に基づくモード合波器の新たな設計理論の提案とその実験的検証を行っている. また, 非対称方向性結合器にテーパ構造を導入することで, より高性能なモード合波器の実現が可能であることを理論的に示している.

第 8 章では, 2 つの異なる非対称方向性結合器を接続した非対称波長無依存カプラ構造と, それを発展させた 3 段縦続接続波長無依存カプラ構造の提案とその理論的検証を行っている. 単純な直線非対称方向性結合器に基づく 3 段縦続接続波長無依存カプラ構造を利用することで波長依存性の低減と製造誤差耐性を飛躍的に向上可能であることを理論的に示している.

第 9 章では, 本研究により得られた結論の総括を行っている.