



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	マルチモードオンチップ光ネットワークのための2 μm 帯シリコンデバイスの研究
Author(s)	村椿, 太一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16996号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16996
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99840
Type	doctoral thesis
File Information	Taichi_Muratsubaki_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 村椿 太一

審査担当者 主 査 教 授 齊藤 晋聖

 副 査 教 授 大鐘 武雄

 副 査 教 授 西村 寿彦

学位論文題名

マルチモードオンチップ光ネットワークのための $2\text{ }\mu\text{m}$ 帯シリコンデバイスの研究

(A Study on 2- μm -Band Silicon Devices for Multimode Photonic Network-on-Chip)

近年の電子集積回路では、性能改善のボトルネックは演算部ではなくデータ伝送部にあると言われている。そこで高性能計算システムでは、電気配線に比べ低消費電力化・低遅延化が期待できる光配線の導入検討が進んでいる。将来的には、オンチップで行われる超短距離通信への光配線導入も有望視されている。

このような背景の下、通信用光集積回路のプラットフォームとしては、シリコンフォトリソグラフィが有望である。電子集積回路の成熟した製造プロセスと互換であり量産性に優れるほか、 Si/SiO_2 導波路の高い比屈折率差により高密度集積が可能である。これまで主に $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 帯や $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯が議論されてきたが、とりわけオンチップ通信では $2\text{ }\mu\text{m}$ 帯も有力候補である。同帯域は、 Si の二光子吸収が弱く自由キャリアプラズマ効果が強いなど、変調器等に有利な特性を有し、 GeSn レーザの利用により Si 基板上への低コスト光源実装も期待できる。

一方で、通信分野において伝送容量拡大は重要課題であり、光通信では波長分割多重が主流である。しかしオンチップ適用では、波長数増加が光源追加を要するためスペース・電力の観点から限界がある。そこで波長分割多重と併用可能な新たな多重化軸として、モード分割多重 (Mode Division Multiplexing: MDM) 技術が注目されている。

MDM をオンチップで実現しマルチモードオンチップ光ネットワークを構築するには、多様なマルチモードデバイスが必要である。特に、モード合分波器、マルチモード交差導波路、マルチモード 3-dB 結合器および Y 分岐、位相シフタが重要であり、本論文ではこれら基本素子を網羅的に研究している。

ただし、これらの素子を実装する上では、光デバイス作製時に生じる設計値との差 (製造誤差) が性能劣化を招き、小型化するほど耐性が低下するという課題がある。そこで本研究では、高速疑似断熱力学等の解析的設計手法、直接二分探索法等の数値的最適化手法、ならびにそれらを基に開発した手法を用いて、小型化と高い製造誤差耐性を両立したデバイスを提案している。

本論文の構成は、以下の通りである。

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、本研究で用いた数値解析手法の定式化を行っている。

第 3 章では、伝搬方向について構造が緩やかに変化する導波路の伝搬特性評価に用いる局所モード結合理論について説明している。

第 4 章では、高速擬似断熱力学に基づくテーパ設計により、直線テーパの場合に比べ長さを 3 分の 1 以下に短縮可能なモード発展型 2 モード 3-dB 結合器を提案し、数値解析および測定で実証している。また、導波路幅・間隔の ± 20 nm 変化に対する高い耐性も示している。

第 5 章では、放射損失低減のための断熱性制御法を開発し、直線テーパ比で長さを約 9 分の 1 に短縮可能なモード発展型 4 モード Y 分岐を提案している。さらに入出力導波路分離構造により、ゼロギャップ Y 分岐に比べ分岐先端の頑健性を改善し、製造誤差由来のモードクロストークを 5 dB 低減できることを測定で示している。

第 6 章では、第 4・5 章のモード発展型デバイスを組み合わせた 4 モード合分波器を提案し、一般的な構成との比較により、幅・間隔の ± 20 nm 変化に対する高耐性を明らかにしている。

第 7 章では、スロットライク構造に基づくモード選択的位相シフタを提案し、熱光学効果によって TE_1 モードのみに π 位相シフトを付与できることを数値解析で確認している。また、 TE_1 モード 2×2 スイッチおよびノンブロッキング 4 モード交換器の構成可能性も示している。

第 8 章では、直接二分探索法を新たに開発して設計に適用し、 $12 \times 12 \mu m^2$ の小型なサブ波長構造支援型 4 モード交差導波路を提案する。 SiO_2 円孔径 ± 10 nm 変化の下でも、挿入損失 0.87 dB 以下、クロストーク -24 dB 以下を示すことを数値解析で確認している。

第 9 章では、サブ波長構造支援型 2×2 3-dB 結合器として 2 種類の設計を提案している。性能特化型では外形を変えずにインバランスを約 0.4 dB 改善し、小型化型では干渉領域長を結像理論由来の値の 3 分の 1 に短縮するとともに、いずれも円孔径 ± 10 nm 変化に対して高い耐性を有することを示している。

第 10 章では、本研究により得た結論をまとめている。

これを要するに、筆者は、 $2 \mu m$ 帯シリコンフォトニクスを基盤として、マルチモードオンチップ光ネットワークに必要となる主要受動素子群を体系的に設計・試作・評価し、実装に向けた技術的有効性を明らかにした。また、高速擬似断熱力学や最適化手法を取り入れることで、小型化と製造誤差耐性の両立という重要課題に対する設計指針を確立し、情報通信フォトニクスに関する学術分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。