



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



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 村椿 太一

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 μm 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について、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においては、電気配線と比べて低消費電力化や低遅延化が期待できる光配線の導入を検討する動きが活発化している。将来的には、オンチップで行われる超短距離の通信にまで光配線の導入が有望視されている。

通信用光集積回路のプラットフォームとしては、シリコンフォトニクスが有望である。電子集積回路の成熟した製造プロセスと互換性を有しており、回路を安価に量産可能なほか、コアを Si、クラッドを SiO_2 として構成する導波路の高い比屈折率差を利用して、光デバイスを高密度に集積可能という特徴を有する。これまで、光通信の研究では、光ファイバが優れた伝送特性を示す 1.31 μm 帯や 1.55 μm 帯の利用が主に議論されてきた。一方で、オンチップ通信に限ると、新たな候補として 2 μm 帯が挙げられる。同帯域の利点としては、Si の二光子吸収が弱い、自由キャリアプラズマ効果が強いといった、変調器等の応用にとって魅力的な特性を有していることや、同波長帯で動作し、最近研究が活発に行われている GeSn レーザを利用することで、従来の通信波長帯では困難であった、Si 基板上へのモノリシック集積による低コストでの光源実装が期待できることが挙げられる。

通信分野において、伝送容量拡大は常に重要な課題である。光通信においては、波長分割多重技術が主な多重化技術としてこれまで盛んに研究されてきた。一方で、オンチップ通信への適用を考えると、波長数を増やすことは一般に光源の追加を必要し、スペースや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であり、新たな多重化軸を追加する技術として、モード分割多重 (Mode Division Multiplexing: MDM) 技術が注目を集めている。

マルチモードオンチップ光ネットワークを構築する際に、様々なマルチモードデバイスが必要となる。特に重要なデバイスとして、MDM システムのインターフェースを担うモード合分波器、配線の自由度を高めるマルチモード交差導波路、信号の分岐・合流を担うマルチモード 3-dB 結合器および Y 分岐、動的な経路制御を担う位相シフタが挙げられる。本論文では、これらの基本素子を網羅的に研究することで、波長 2 μm 帯向けマルチモード光デバイスのライブラリを構築している。

光デバイスを作製すると、実際の構造パラメータと設計値の間に誤差が生じ、性能を劣化させてしまう。一般に、デバイスの面積を小型化しようとすればするほど、製造誤差への耐性は下がっていく。人力でのパラメータ探索による設計の限界を打開するため、本研究では、量子力学に基づいた高速疑似断熱力学と呼ばれる解析的設計手法や、直接二分探索法と呼ばれる数値的最適化手法、そして各手法を基に新たに開発した設計手法など、数理的設計手法を利用して構造を設計し、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う。導波モード解析については、3 次元構

造の導波路を解析するための2次元ベクトル有限要素法, 導波路不連続解析については, 2次元構造の導波路を解析するための2次元スカラー有限要素法, 3次元構造の導波路を解析するための3次元ベクトル有限要素法を取り上げる。

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する。

第4章では, モード発展型2モード3-dB結合器を提案する。結合領域のテーパ形状を高速擬似断熱力学に基づいて設計することで, 直線テーパを使用した場合と比べて, 長さを3分の1以下に短縮可能であることを数値解析, および測定実験を通じて実証している。また, 測定実験を通して, 提案する3-dB結合器は導波路の幅と間隔に関する $\pm 20\text{ nm}$ 以内の変化に対して高い耐性を有することを明らかにしている。

第5章では, モード発展型4モードY分岐を提案する。高速擬似断熱力学を基に, 放射損失低減のための断熱性の制御法を新たに開発しており, 同デバイスのテーパ形状設計に利用することで, 直線テーパと比較して長さを約9分の1に短縮可能であることを数値解析上で明らかにしている。また, 入出力導波路が分離されたモード発展型Y分岐では, 入出力導波路が直接接続された標準的なゼロギャップY分岐と比べて, 分岐部先端の頑健性を改善可能であることを, 測定実験を通して実証している。実験結果によると, モード発展型はゼロギャップY分岐と比べて, 分岐部先端の製造誤差に由来するモードクロストークを5 dB低減できている。

第6章では, 第4章, 第5章で研究したモード発展型デバイスを組み合わせて構成した4モード合分波器を提案する。テーパ非対称方向性結合器を3段に直列接続した, 一般的な4モード合分波器の構成との測定結果の比較を通じて, 提案するモード発展型4モード合分波器は, 導波路の幅と間隔に関する $\pm 20\text{ nm}$ 以内の変化に対して高い耐性を有すること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する。3本の導波路を並べたスロットライク導波路では, 構造パラメータを適切に設計することで, 熱光学効果による実効屈折率変化のモード依存性を高め, 熱印可時には TE_1 モードにのみ π 位相シフトを適用可能であることを数値解析上で確認した。また, 同デバイスを利用して TE_1 モード 2×2 スイッチや, ノンブロッキング4モード交換器を構成可能であることを, 数値解析上で明らかにした。

第8章では, サブ波長構造支援型4モード交差導波路を提案する。従来のサブ波長構造支援型デバイスで課題であった, 内部に配置する SiO_2 円孔径の変化に対する耐性の低さを改善するために, 製造誤差耐性の高い構造探索のための直接二分探索法を新たに開発し, 同デバイスの設計に利用した。提案する4モード交差導波路は, 設置面積が $12 \times 12\text{ }\mu\text{m}^2$ と小型であり, かつ円孔径に関する $\pm 10\text{ nm}$ 以内の変化に対して高い耐性を有している。上記の径変化の下で, 挿入損失, クロストークはそれぞれ, 0.87 dB以下, -24 dB以下と良好な特性を示すことを数値解析上で確認した。

第9章では, サブ波長構造支援型 2×2 3-dB結合器を提案する。同章では2種類の設計を提案しており, 数値解析結果に基づいてまとめている。1つ目は性能特化型で, 標準的なマルチモード干涉結合器に対してサブ波長構造を適用することで, デバイスの設置面積や外形は変わらずにインバランスを0.4 dB程度改善する。2つ目は, サブ波長構造が有効に作用しており, マルチモード干涉領域の長さは, 結像理論から導出されるものと比較して3分の1に短縮されている。また, どちらの設計結果も, 円孔径に関する $\pm 10\text{ nm}$ 以内の変化に対して高い耐性を有している。

最後に, 第10章では, 本研究により得た結論をまとめている。