HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	A Study on High-Density Photonic Integrated Circuits for Optical Packet Routing [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	石坂, 雄平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11303号
Issue Date	2014-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55735
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuhei_Ishizaka_review.pdf, 審査の要旨



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　石坂 雄平

審査担当者　主　査　教　授　齊藤 晋聖
副　査　教　授　宮永 喜一
副　査　特任教授　野島 俊雄
副　査　特任教授　小川 恭孝

学位論文題名

A Study on High-Density Photonic Integrated Circuits for Optical Packet Routing
（光パケットルーティングのための高密度光集積回路に関する研究）

光ネットワークの通信容量の増大に伴い, 電子ルータやデータセンタにおける IT・ネットワーク機器の省電力化および低コスト化が求められている. 現状の光ネットワークではパケットのルーティングを行う際に, 光信号を電気信号に変換し, 電子デバイスにより経路識別処理を行った後, 再度光信号に変換している. こうした膨大な電力を必要とする冗長な手続きを省き, 電子デバイスによる処理速度限界を打破することを目的として, パケットの転送処理を光領域で行う光パケットルーティング技術の研究が国内外で盛んに行われている. しかしながら, 既存の光パケットルーティング機器では, 位相の変化に情報を乗せるコヒーレント光通信への対応がなされておらず, かつ集積化への検討が十分に行われていない. そのため, 光パケットルーティングにおける省電力化および低コスト化に向け, 光の位相情報を処理可能な高密度光集積回路を構成する必要がある.

コヒーレント光通信における光パケット交換では, データ本体であるペイロードに多値偏移変調信号を用い, 経路情報であるラベル信号には二位相偏移変調 (BPSK) 信号を用いるのが有効であると考えられる. その理由として,BPSK 信号は 2 値論理であるため, 論理ゲートを用いた光信号処理に適していることが挙げられる. ここで, 光論理ゲートを用いて BPSK ラベル処理機構を構築することを想定すると, 光の強度が論理値に対応している従来型の光論理ゲート (強度動作型光論理ゲート) では, 光の位相が論理値に対応している BPSK 信号を演算処理することができないという問題が生じる. この問題を解決する方法として, 光の位相が論理値に対応している光論理ゲート (位相動作型光論理ゲート) を用いることが有効であると考えられる. しかしながら, コヒーレント検波を想定した位相動作型光論理ゲートの設計法に関する検討は行われていない. そこで本論文では,XOR,XNOR,NAND および OR として動作する位相動作型光論理ゲートの設計法を提案している.

また, 位相動作型光論理ゲートを多段に接続した光パケットルーティング回路の集積度を上げるためには, シリコン系光導波路を用いて高効率な交差構造や急峻な曲げ構造を構成する必要がある. シリコン系光導波路は, 従来のシリカ系光導波路に比べ, 集積面積を 1/100 程度に削減可能であることから, 近年注目を集めている. また, 低消費電力動作を実現するためには, ペルチェ素子やヒータで温度制御を行うのではなく, 光導波路を用いてデバイス特性の温度無依存化を達成することが望まれる. シリコン系光導波路のなかでもスロット導波路は, 高屈折率媒質であるシリコンに挟まれたサブ波長スケールの低屈折率層に光を強く閉じ込めることができる. そのため, 低屈折率層の材料にシリコンとは逆の温度依存性を有する材料を用いることで, デバイス特性の温度無依存化を実現できる. これまでに, 高密度集積化を目的としてスロット交差構造の設計法が提案されているが, 導波路の高さ方向が一様であるとした 2 次元解析に基づく設計に留まっており, 実際の 3 次元構造に対しての検討は行われていない. そこで本論文では, 新たに開発した導波路不連続問題のための 3 次

元ベクトル有限要素法を用いて, 有限の高さを有するスロット交差構造の解析を行い, 実際には放射損失が大きいことを突き止めている. さらに, このような放射損失を避けるべく, 垂直結合器を有する立体スロット交差導波路を提案するとともに, 高い透過率を達成可能なスロット導波路の曲げ構造について明らかにしている.

ところで, スロット導波路のようなシリコン系光導波路は, 光の回折限界の制約を受けるために, 微細化の限界がある. この限界を突破するためには, 光の回折限界を超えて光を微小領域に閉じ込めることができる表面プラズモンポラリトンを用いた導波路, いわゆるプラズモニック導波路を用いるのが有効であると考えられる. これまで, プラズモニック導波路の伝搬モードの 1 つである金属アシストフォトニックモードは, 低損失ではあるものの, 表面プラズモンポラリトンが発生していないと考えられていた. 本論文では, 電界の非主要成分によって表面プラズモンポラリトンが発生していることを導波路理論に基づいて説明している. また, ハイブリットプラズモニック導波路における金属アシストフォトニックモードは, 一般的に用いられるプラズモニックモードに比べ, 金属による損失および集積化の点で有利であることを示している. さらに, 金属アシスト型スロット導波路を提案し, 金属アシストフォトニックモードを用いることで, 通常のスロット導波路に比べ, 低屈折率層への光閉じ込めを大きくできることを明らかにしている. これは, 光導波路を用いた温度無依存化を実現する上で優位な条件である.

本論文の構成内容は以下のとおりである.

第 1 章では, 本論文の背景, 目的, および構成について述べる.

第 2 章では, 光導波路の解析および設計に用いる, 伝搬モード解析ためのベクトル有限要素法, 導波路不連続問題のための 2 次元有限要素法の定式化を行っている.

第 3 章では, 位相同期ループを有する XOR,XNOR,NAND および OR 光論理ゲートを提案し,C バンドにおいて 21.5 dB 以上の ON/OFF 消光比を達成できることを示している.

第 4 章では, 導波路不連続問題のための 3 次元ベクトル有限用法の定式化を行うとともに, 有限の高さを有するスロット交差導波路を解析し, 従来の 2 次元解析では困難であった放射損失の要因解明を行っている.

第 5 章では, 垂直結合器を有する立体スロット交差導波路を提案するとともに, 高い透過率を達成可能なスロット導波路の曲げ構造について明らかにしている.

第 6 章では, 金属アシストフォトニックモードにおいて, 電界の非主要成分が表面プラズモンポラリトンの発生に寄与していることを明らかにしている. また, ハイブリットプラズモニック導波路における金属アシストフォトニックモードは, プラズモニックモードに比べ, 金属による損失および集積化の点で有利であることを示している.

第 7 章では, 本論文により得られた結果を取りまとめている.

これを要するに, 著者は, 光パケットルーティングにおける省電力化および低コスト化に向け, コヒーレント検波を想定した位相動作型光論理ゲートの設計法を提案するとともに, 集積面積の削減を目的として, 高い透過率を達成可能なスロット導波路の交差構造や曲げ構造, ならびにプラズモニック導波路における金属アシストフォトニックモードの導波原理や曲げ特性を明らかにしており, 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.

よって著者は, 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.