

学 位 論 文 題 名

A Study on Transmission Characteristics of One-Dimensional Photonic Crystal Coupled Resonator Optical Waveguides for Ultra Compact Optical Circuits

(超小型光波回路のための1次元フォトリック結晶結合共振器型光導波路の
伝送特性に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年, インターネットの普及・拡大に伴い, 光デバイスのなお一層の小型化や集積化が望まれている。従来のシリカ系光導波路では, 放射損失を低減するために, その曲げ半径を数 mm から数 cm とする必要がある。このため, デバイスサイズが大きくなってしまい, シリカ系光導波路は集積化に適していない。一方, シリコン細線導波路やフォトリック結晶導波路と呼ばれる光導波路は, 強い光の閉じ込めを実現できることから, 数 μm オーダーの曲げ半径を可能とし, 従来のシリカ系光デバイス的大幅な小型化・集積化が期待される。

ところで, 光デバイスには, 光スイッチ, フィルタ, バッファなど, 遅延線に基づくものが数多く存在するため, 遅延線そのものの小型化を図ることが超小型光波回路を実現するうえで必須の課題であり, 内外で盛んに研究が進められている。遅延線は, 導波路中を伝搬する光の速度を低減させる, いわゆるスローライト効果によって小型化が可能となるが, シリコン細線導波路では, これを実現することが困難である。フォトリック結晶導波路においては, バンドの端でスローライト効果が現れることが知られている。しかしながら, バンドの端では群速度分散が非常に大きく, それによってパルスの波形が崩れてしまうという問題がある。近年, 導波路パラメータを調節することによって, 群速度分散の低減とスローライト効果を同時に実現したフォトリック結晶共振器が提案された。しかし, こうしたフォトリック結晶共振器には, 動作波長帯域が極めて狭いという欠点がある。

これらの問題を解決する方法として, CROW(Coupled Resonator Optical Waveguide) と呼ばれる結合共振器型の光導波路を利用することが考えられる。CROW は, 共振器を多段に接続した光導波路であり, 隣接する共振器間でのモードの重ね合わせによって光が伝搬する。CROW は, 群速度が遅くなること, バンドの中心において零群速度分散が得られるといった特徴があり, これらの特徴によって, CROW は超小型光波回路の基本構成要素として期待されている。CROW を構成する方法として, リング共振器に基づく CROW, ファブリ・ペロー共振器に基づく CROW, フォトリック結晶共振器に基づく CROW などが考えられるが, なかでも, フォトリック結晶共振器に基づく CROW(PC-CROW) は, 小型化や集積化に最も適した構造である。特に, 1次元の PC-CROW は, 2次元や3次元の PC-CROW と比較して構造が簡単であるため, 集積化の観点から最も有利な構造である。しかし, 1-D PC-CROW は漏れ損失が非常に大きいという問題があり, これにより設計可能なデ

バイスサイズが制限されていた。そこで本論文では、1-D PC-CROW における漏れ損失の低減方法ならびに低損失 1-D PC-CROW の構成法を提案している。また、1-D PC-CROW と直線導波路を高効率に接続するためのテーパ導波路の設計法を示すとともに、1-D PC-CROW の曲げ特性、結合特性を明らかにしたうえで、1-D PC-CROW に基づく方向性結合器、マッハ・ツェンダー干渉計の設計法も示している。さらに、実際の構造に対するシミュレーション結果から、1-D PC-CROW における漏れ損失特性を明らかにしている。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の背景、目的、および構成について述べる。

第 2 章では、CROW の 2 次元導波モード解析のための有限要素法、ビーム伝搬解析のための有限要素時間領域ビーム伝搬法の定式化を示す。

第 3 章では、CROW の 3 次元導波モード解析のための有限要素法の定式化を示す。

第 4 章では、1-D PC-CROW における漏れ損失低減のメカニズムを説明する。漏れ損失を低減可能な構造として、共振器に隣接する空孔の大きさや位置を変化させた CROW を提案する。さらに、群速度を極めて遅くするために、共振器間の空孔の数を変化させた構造に関しても検討を行う。

第 5 章では、1-D PC-CROW と直線導波路を高効率に接続するためのテーパ導波路の設計方法を示す。CROW の構造パラメータを変化させた場合の分散関係を調べ、この結果に基づいて、導波路幅と空孔の大きさを同時に変化させたテーパを提案する。こうしたテーパを用いることで、広い波長帯域にわたって高効率な接続が可能であることを示す。

第 6 章では、1-D PC-CROW の曲げ特性ならびに結合特性の構造依存性評価を行う。さらに、1-D PC-CROW に基づく 3dB 結合器の設計法を明らかにする。

第 7 章では、導波路の高さ方向への漏れを考慮した 1-D PC-CROW の 3 次元有限要素法解析を行う。1-D PC-CROW は導波路の高さ方向への漏れが非常に大きいため、3 次元解析が必要不可欠であることを示す。また、低損失な構造についても検討を行い、その方法として、エアブリッジ型 1-D PC-CROW、空孔の深さを変化させた 1-D PC-CROW を提案し、こうした構造が低損失化に有効であることを明らかにする。

第 8 章では、本研究で得られた成果を総括する。

学位論文審査の要旨

主査	教授	小柴正則
副査	教授	宮永喜一
副査	教授	野島俊雄
副査	教授	小川恭孝
副査	准教授	齊藤普聖

学位論文題名

A Study on Transmission Characteristics of One-Dimensional Photonic Crystal Coupled Resonator Optical Waveguides for Ultra Compact Optical Circuits

(超小型光波回路のための1次元フォトリック結晶結合共振器型光導波路の伝送特性に関する研究)

近年、インターネットの普及・拡大に伴い、光デバイスのなお一層の小型化や集積化が望まれている。従来のシリカ系光導波路では、放射損失を低減するために、その曲げ半径を数 mm から数 cm とする必要がある。このため、デバイスサイズが大きくなってしまい、シリカ系光導波路は集積化に適していない。一方、シリコン細線導波路やフォトリック結晶導波路と呼ばれる光導波路は、強い光の閉じ込めを実現できることから、数 μm オーダーの曲げ半径を可能とし、従来のシリカ系光デバイスの大幅な小型化・集積化が期待される。

ところで、光デバイスには、光スイッチ、フィルタ、バッファなど、遅延線に基づくものが数多く存在するため、遅延線そのものの小型化を図ることが超小型光波回路を実現するうえで必須の課題であり、内外で盛んに研究が進められている。遅延線は、導波路中を伝搬する光の速度を低減させる、いわゆるスローライト効果によって小型化が可能となるが、シリコン細線導波路では、これを実現することが困難である。フォトリック結晶導波路においては、バンドの端でスローライト効果が現れることが知られている。しかしながら、バンドの端では群速度分散が非常に大きく、それによってパルスの波形が崩れてしまうという問題がある。近年、導波路パラメータを調節することによって、群速度分散の低減とスローライト効果を同時に実現したフォトリック結晶共振器が提案された。しかし、こうしたフォトリック結晶共振器には、動作波長帯域が極めて狭いという欠点がある。

これらの問題を解決する方法として、CROW(Coupled Resonator Optical Waveguide) と呼ばれる結合共振器型の光導波路を利用することが考えられる。CROW は、共振器を多段に接続した光導波路であり、隣接する共振器間でのモードの重ね合わせによって光が伝搬する。CROW は、群速度が遅くなること、バンドの中心において零群速度分散が得られるといった特徴があり、これらの特

徴によって、CROW は超小型光波回路の基本構成要素として期待されている。CROW を構成する方法として、リング共振器に基づく CROW、ファブリ・ペロー共振器に基づく CROW、フォトニック結晶共振器に基づく CROW などが考えられるが、なかでも、フォトニック結晶共振器に基づく CROW(PC-CROW) は、小型化や集積化に最も適した構造である。特に、1 次元の PC-CROW は、2 次元や 3 次元の PC-CROW と比較して構造が簡単であるため、集積化の観点から最も有利な構造である。しかし、1-D PC-CROW は漏れ損失が非常に大きいという問題があり、これにより設計可能なデバイスサイズが制限されていた。そこで本論文では、1-D PC-CROW における漏れ損失の低減方法ならびに低損失 1-D PC-CROW の構成法を提案している。また、1-D PC-CROW と直線導波路を高効率に接続するためのテーパ導波路の設計法を示すとともに、1-D PC-CROW の曲げ特性、結合特性を明らかにしたうえで、1-D PC-CROW に基づく方向性結合器、マッハ・ツェンダー干渉計の設計法も示している。さらに、実際の構造に対するシミュレーション結果から、1-D PC-CROW における漏れ損失特性を明らかにしている。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、本論文の背景、目的、および構成について述べる。

第 2 章では、CROW の 2 次元導波モード解析のための有限要素法、ビーム伝搬解析のための有限要素時間領域ビーム伝搬法の定式化を示す。

第 3 章では、CROW の 3 次元導波モード解析のための有限要素法の定式化を示す。

第 4 章では、1-D PC-CROW における漏れ損失低減のメカニズムを説明する。漏れ損失を低減可能な構造として、共振器に隣接する空孔の大きさや位置を変化させた CROW を提案する。さらに、群速度を極めて遅くするために、共振器間の空孔の数を変化させた構造に関しても検討を行う。

第 5 章では、1-D PC-CROW と直線導波路を高効率に接続するためのテーパ導波路の設計方法を示す。CROW の構造パラメータを変化させた場合の分散関係を調べ、この結果に基づいて、導波路幅と空孔の大きさを同時に変化させたテーパを提案する。こうしたテーパを用いることで、広い波長帯域にわたって高効率な接続が可能であることを示す。

第 6 章では、1-D PC-CROW の曲げ特性ならびに結合特性の構造依存性評価を行う。さらに、1-D PC-CROW に基づく 3dB 結合器の設計法を明らかにする。

第 7 章では、導波路の高さ方向への漏れを考慮した 1-D PC-CROW の 3 次元有限要素法解析を行う。1-D PC-CROW は導波路の高さ方向への漏れが非常に大きいため、3 次元解析が必要不可欠であることを示す。また、低損失な構造についても検討を行い、その方法として、エアブリッジ型 1-D PC-CROW、空孔の深さを変化させた 1-D PC-CROW を提案し、こうした構造が低損失化に有効であることを明らかにする。

第 8 章では、本研究で得られた成果を総括する。

これを要するに、著者は、低群速度分散とスローライト効果を同時に実現できるように超小型光波回路の基本構成要素として期待されている PC-CROW に関して、特に集積化に最も適した 1-D PC-CROW において従来問題となっていた漏れ損失の低減方法を見い出すとともに、その曲げ特性や接続特性を明らかにし、1-D PC-CROW による超小型光波回路実現のための有益な知見を得ており、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(情報科学)の学位を授与される資格あるものと認める。