

学位論文題名

A Study on Polarization Control Devices Based on High-Index Contrast Waveguides for Polarization Diversity Systems

（偏波ダイバーシティシステムのための高屈折率差光導波路に基づく
偏波制御デバイスに関する研究）

学位論文内容の要旨

光通信システムの通信容量の増大に伴い、これを構成する光デバイスの小型化、省電力化が求められている。シリコン細線導波路に代表される高屈折率差光導波路は、コアとクラッドの大きな屈折率差によりコア部への光の閉込め効果が非常に強く、半径数 μm の微小曲げにおいても十分な低損失が得られ、従来のシリカ系素子を劇的に微小化することが可能であり、高密度化、高機能な光集積回路の母体として発展することが期待されている。また、製造技術の観点からは、成熟したシリコン半導体の微細加工技術が適応できるために、微細パターンの形成が容易で、量産性に優れる。このため、高屈折率差光導波路を用いた超小型光デバイスを実現化する研究が国内外で盛んに行われており、既にシリコン細線導波路を用いたリング共振器やアレー導波路回折格子など、様々なデバイスが報告されている。

しかしながら、高屈折率差光導波路の課題の一つとして、強い偏波依存性がある。光デバイスを注意深く設計することにより、偏波無依存化を実現することも可能であるが、光回路を構成するすべてのデバイスに対して、そのような設計を行うことは非常に難しい。そのため、高屈折率差光導波路の偏波依存性を解決する有望な方法として、偏波ダイバーシティシステムが注目されている。偏波ダイバーシティシステムでは、入射された光を偏波スプリッタを用いて TE-like モード、TM-like モードの各偏波に分離し、TM-like モード（あるいは TE-like モード）を偏波変換器により 90° 回転させ TE-like モード（あるいは TM-like モード）とする。こうして分離された二つの光波を同一の光デバイスに作用させ、その後、一方の TE-like モード（あるいは TM-like モード）を偏波変換器によって 90° 回転し、最後に偏波コンバイナを用いて合波することにより、光デバイスの偏波無依存化を実現することができる。したがって、小型で高性能な偏波スプリッタならびに偏波変換器は、偏波ダイバーシティシステムにおいて必要不可欠なデバイスである。

これまでに、小型な偏波スプリッタとして、シリコン細線導波路を用いて方向性結合器を構成し、結合長が TM-like モードと TE-like モードで異なることを利用した偏波スプリッタが提案されている。しかしながら、単純な方向性結合器を用いているため、 $10 \mu\text{m}$ 程度のデバイス長の方向性結合器で達成できる C バンド帯における偏波消光比は 13 dB 程度であり、さらなるデバイスサイズの小型化や消光比の改善が望まれる。また、小型な偏波変換器として、シリコン細線導波路の側面と上部に金属薄膜を装荷した構造が提案されている。金属と誘電体の境界に光が強く局在する表面プラズモンポラリトンの効果により、 $3 \mu\text{m}$ のデバイス長で消光比 11 dB の偏波変換器を実現しているが、表面プラズモンポラリトンの影響により損失が非常に大きく、損失の低減が望まれている。そこで本論文では、共振結合に基づく導波路型偏波スプリッタ、ならびに表面プラズモンポラリトンを用いたモード変化型偏波変換器を新たに提案し、従来の導波路型偏波制御デバイスに比べて小型で高性能

な偏波スプリッタ, および偏波変換器が構成可能であることを明らかにしている.

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, 高屈折率差光導波路の数値解析に用いるベクトル有限要素法, ベクトル有限要素ビーム伝搬法, ならびに3次元ベクトル有限要素法の定式化を行っている.

第3章では, 三つのシリコン細線導波路を用いた共振結合型方向性結合器に基づく偏波スプリッタを提案する. 左右の導波路を入出力の導波路, 中央の導波路を共振器として用い, 共振器の構造を最適設計することによって, $12\ \mu\text{m}$ 程度のデバイス長でCバンドより広い帯域において, 20 dB 以上の偏波消光比を達成できることを示す.

第4章では, SOI基板からの製造をより容易にすることを想定し, 偏波スプリッタを構成するすべての導波路の高さを同一とするために, スロット導波路を共振器に用いた偏波スプリッタを提案し, シリコン細線導波路を共振器に用いた場合と比べて遜色のない偏波消光比が得られることを示す.

第5章では, シリコン細線導波路上部にシリカからなるバッファ層と伝搬方向に幅が狭くなる金属薄膜を装荷したモード変化型偏波変換器を提案する. シリコン細線導波路上部のバッファ層の厚さや金属薄膜の大きさを最適化することにより, $10\ \mu\text{m}$ 程度のデバイス長で, Cバンド全域において, 約 20 dB の偏波消光比, 4.7 dB 以下の損失を達成できることを示す.

第6章では, 本論文により得られた結論を取りまとめている.

学位論文審査の要旨

主査	准教授	齊藤	晋聖
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	特任教授	小柴	正則

学位論文題名

A Study on Polarization Control Devices Based on High-Index Contrast Waveguides for Polarization Diversity Systems

(偏波ダイバーシティシステムのための高屈折率差光導波路に基づく
偏波制御デバイスに関する研究)

光通信システムの通信容量の増大に伴い、これを構成する光デバイスの小型化、省電力化が求められている。シリコン細線導波路に代表される高屈折率差光導波路は、コアとクラッドの大きな屈折率差によりコア部への光の閉込め効果が非常に強く、半径数 μm の微小曲げにおいても十分な低損失が得られ、従来のシリカ系素子を劇的に微小化することが可能であり、高密度化、高機能な光集積回路の母体として発展することが期待されている。また、製造技術の観点からは、成熟したシリコン半導体の微細加工技術が適応できるために、微細パターンの形成が容易で、量産性に優れる。このため、高屈折率差光導波路を用いた超小型光デバイスを実現化する研究が国内外で盛んに行われており、既にシリコン細線導波路を用いたリング共振器やアレー導波路回折格子など、様々なデバイスが報告されている。

しかしながら、高屈折率差光導波路の課題の一つとして、強い偏波依存性がある。光デバイスを注意深く設計することにより、偏波無依存化を実現することも可能であるが、光回路を構成するすべてのデバイスに対して、そのような設計を行うことは非常に難しい。そのため、高屈折率差光導波路の偏波依存性を解決する有望な方法として、偏波ダイバーシティシステムが注目されている。偏波ダイバーシティシステムでは、入射された光を偏波スプリッタを用いて TE-like モード、TM-like モードの各偏波に分離し、TM-like モード (あるいは TE-like モード) を偏波変換器により 90° 回転させ TE-like モード (あるいは TM-like モード) とする。こうして分離された二つの光波を同一の光デバイスに作用させ、その後、一方の TE-like モード (あるいは TM-like モード) を偏波変換器によって 90° 回転し、最後に偏波コンバイナを用いて合波することにより、光デバイスの偏波無依存化を実現することができる。したがって、小型で高性能な偏波スプリッタならびに偏波変換器は、偏波ダイバーシティシステムにおいて必要不可欠なデバイスである。

これまでに、小型な偏波スプリッタとして、シリコン細線導波路を用いて方向性結合器を構成し、結合長が TM-like モードと TE-like モードで異なることを利用した偏波スプリッタが提案されている。しかしながら、単純な方向性結合器を用いているため、 $10 \mu\text{m}$ 程度のデバイス長の方向性結合器で達成できる C バンド帯における偏波消光比は 13 dB 程度であり、さらなるデバイスサイズの小型

化や消光比の改善が望まれる。また、小型な偏波変換器として、シリコン細線導波路の側面と上部に金属薄膜を装荷した構造が提案されている。金属と誘電体の境界に光が強く局在する表面プラズモンポラリトンの効果により、 $3\ \mu\text{m}$ のデバイス長で消光比 11 dB の偏波変換器を実現しているが、表面プラズモンポラリトンの影響により損失が非常に大きく、損失の低減が望まれている。そこで本論文では、共振結合に基づく導波路型偏波スプリッタ、ならびに表面プラズモンポラリトンを用いたモード変化型偏波変換器を新たに提案し、従来の導波路型偏波制御デバイスに比べて小型で高性能な偏波スプリッタ、および偏波変換器が構成可能であることを明らかにしている。

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、高屈折率差光導波路の数値解析に用いるベクトル有限要素法、ベクトル有限要素ビーム伝搬法、ならびに 3 次元ベクトル有限要素法の定式化を行っている。

第 3 章では、三つのシリコン細線導波路を用いた共振結合型方向性結合器に基づく偏波スプリッタを提案する。左右の導波路を入出力の導波路、中央の導波路を共振器として用い、共振器の構造を最適設計することによって、 $12\ \mu\text{m}$ 程度のデバイス長で C バンドより広い帯域において、20 dB 以上の偏波消光比を達成できることを示す。

第 4 章では、SOI 基板からの製造をより容易にすることを想定し、偏波スプリッタを構成するすべての導波路の高さを同一とするために、スロット導波路を共振器に用いた偏波スプリッタを提案し、シリコン細線導波路を共振器に用いた場合と比べて遜色のない偏波消光比が得られることを示す。

第 5 章では、シリコン細線導波路上部にシリカからなるバッファ層と伝搬方向に幅が狭くなる金属薄膜を装荷したモード変化型偏波変換器を提案する。シリコン細線導波路上部のバッファ層の厚さや金属薄膜の大きさを最適化することにより、 $10\ \mu\text{m}$ 程度のデバイス長で、C バンド全域において、約 20 dB の偏波消光比、4.7 dB 以下の損失を達成できることを示す。

第 6 章では、本論文により得られた結論を取りまとめている。

これを要するに、著者は、高屈折率差光導波路における強い偏波依存性を解決するための偏波ダイバーシティシステムの基本構成要素に関して、小型で高性能な共振結合型偏波スプリッタ、ならびにモード変化型偏波変換器の構成方法を見出すとともに、その偏波制御特性を明らかにし、高屈折率差光導波路デバイスの偏波無依存化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があるものと認める。