

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06020

研究課題名(和文) モード多重伝送に向けた導波路型高次モード合分波器の研究

研究課題名(英文) Research about mode multiplexer / demultiplexer based on optical waveguides for mode-division multiplexing (MDM) transmission

研究代表者

姜 海松 (Jiang, Haisong)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：00738049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は高次モード光を簡単に合分波できる、導波路型合分波器を実現するため、傾斜接続多モード干渉(a-MMI)導波路を用いたモード合分波器を提案し、その基本動作原理について検証した。その結果より、本質的にモードの自己結像位置差がモードを分離するのに十分でないことを解明し、a-MMI導波路型合分波器の現実的な素子の実現は困難であることが判った。一方、新たに10モード以上一括分波可能なローランド円型合分波器の基本動作原理について検討し、モード合分波器として応用可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research proposed and evaluated a novel optical mode multiplexer / demultiplexer based on angled-multimode interference (a-MMI) waveguide for realizing compact size, low loss, high integrated mode multiplexer / demultiplexer. As a result, the optical mode demultiplexer based on a-MMI waveguide shows the possibility of demultiplexing fundamental and first order mode, however, the mode-crosstalk between fundamental and first order mode is not sufficient, that is due to the insufficient focal point shift between fundamental and first order mode, for transmission system. On the other hand, another type of mode multiplexer / demultiplexer based on Rowland circular type has been investigated, and the principle has also been confirmed for the mode multiplexer / demultiplexer.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：多重モード伝送 多モード干渉導波路 モード合分波器

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンの普及などで、ネットワークの情報通信量は急激に伸びており、シングルモード光ファイバ1本あたりの情報伝送容量が理論限界に達しようとしている。更なる超大容量伝送を実現するため、空間モード多重伝送技術に関する研究が活発化している。空間モード多重伝送技術を実現するには、プロセスが簡単で、高集積化可能な、高次モード合分波導波路技術の確立が不可欠である。このような背景のもとに、最近いくつかの高次モード合分波方式が提案されたが、構成が複雑で集積が難しい等の欠点から合分波器としての実用化が困難であった。

本研究では、高次モード光を簡単な導波路構造で合分波できる、集積可能な、プロセス許容度が高い導波路型合分波器の実現を目指して、傾斜接続構造多モード干渉導波路型合分波器を提案した。多モード干渉(MMI)導波路は、小型化で動作原理が比較的簡単で、プロセス許容度が高い等の利点があることから、光集積回路に幅広く使われる光デバイスである。また、多モード干渉導波路は、MMI導波路での各高次モードの伝搬定数が異なるため、同じ入射位置に対し、自己「結像」位置が異なっている。そこで、傾斜接続構造により、各モードの「結像」位置でモードの分離を図り、高次モードの合分波器としての動作が実現できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、上記提案した MMI 導波路型合分波器において、(1)多モード干渉現象による各高次モードの「自己結像」の位置差が生じる基本動作原理、(2)傾斜接続による低クロストークが実現できる合分波器の基本動作原理を確立し、MMI 導波路型合分波器の基本特性を検証することで、簡単な導波路構造を持つ高次モード合分波器の実現を目的とした。

3. 研究の方法

(1)BPM(ビーム伝搬法)シミュレーションによる高次モードの「自己結像」の位置差の検証：図1に示すように、MMI導波路は、導波路内部に多モード干渉現象が生じ、入射光と同じ光フィールドが1個若しくは複数個、導波方向に沿って周期的に現れる。異なるモードのグースヘンシェンシフトが異なるため、入射した高次モード光は、0次モードに対しモード数増加によるMMI等価幅変化分の位相シフトが生じ、この位相シフトによって、高次モードと0次モードは「結像」位置差が生じる(図2)。このモード間の結像位置の差は、「結像」周期毎に拡大してしまい、結果的にモードの分離が可能だと考えられる。本研究では、BPMシミュレーションを用いて、上述の原理について検証し、0次と1次モードの「結像」位置差を詳しく解析して、0次モードと1次モードの分波原理を検証する。

(2)傾斜接続 MMI 導波路型合分波器の基本動作特性の検証：図3に示すように、MMI導波路に斜めで出力導波路を接続すれば、各モードが異なる位置から出力され、モード間の分波が実現できると考えられる。本研究では、BPMシミュレーションにより、傾斜接続の角度、アクセス導波路幅などのパラメータがモード合分波器の重要特性であるモード間クロストーク及び挿入損失に与える影響を解析し、低クロストークと低損失が実現できる導波路構造について検討する。

そのシミュレーションの実証結果に基づいて、0次と1次モードの分波器の設計及び試作について検討する。

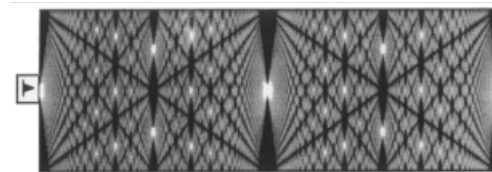


図1 MMI 導波路内部においての光モード伝搬のシミュレーション図。入射光と同じ光フィールドが導波方向に沿って周期的に現れている。

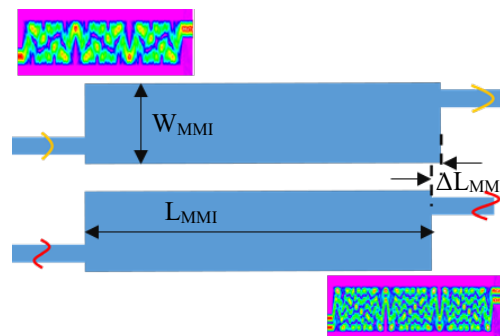


図2 0次モードと1次モードの「結像」位置差。

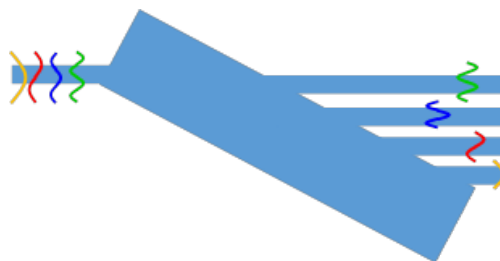


図3 MMI 型導波路高次モード合分波器の構造(斜め接続により高次モードの分波を実現する)。

4. 研究成果

(1)高次モードの「自己結像」の位置差の実証：BPM シミュレーションにより、同じ入射位置に対して、0 次モードと 1 次モードの自己「結像」位置差が、「結像」周期毎に拡大してあることを確認した。表 1 にその実証結果を示す。

表 1 0 次モードと 1 次モードの「結像」位置差と「結像」周期との関係。

W _{MMI} [μm]	結像周期	ΔL_{MMI} [μm]
20	3	0
	9	7
	15	17
30	3	6
	9	30
	15	43
40	3	5
	9	44
	15	62

(2)傾斜接続 MMI による高次モードの分波特性について検証：高次モードの「自己結像」位置差の検証結果に基づいて、傾斜接続 MMI 導波路型分波器の傾斜接続の角度、アクセス導波路幅などのパラメータがモード間クロストークと挿入損失に与える影響について BPM シミュレーションにより解析した。その解析結果に基づいて、合分波器を設計し、モード間クロストークを確認した。表 2 に設計した合分波器の検証結果を示す。0 次モードと 1 次モードの分波は可能であるが、モード間クロストークが 0 次モード、1 次モードともに -10 dB より大きく、十分なクロストークが得られなかった。また、挿入損失が 0 次モード、1 次モードともに -2 dB 程度であることが確認された。

表 2 設計した合分波器分波結果。

モード	モード間クロストーク[dB]	損失[dB]
0 次	-9.87	-3.06
1 次	-5.60	-2.97

設計した合分波器で十分なモード間クロストークが得られなかった原因は、MMI 導波路において各モードの「自己結像」位置差が、傾斜構造でのモード分波には不十分であると考えられる。また、より大きな位置差を得るためには、MMI 結像の周期を大きくする必要があるが、その場合素子のサイズが大き

なり、製造トレランスが極めて厳しく、現実的な素子の実現が困難であることが判った。

(3)新たに 10 モード以上一括分波可能なローランド円型合分波器の原理について検討：強結合マルチコア導波路において高次モードの波面が異なることと、ローランド円において異なる波面の集光位置が異なる特性を利用して、新たに図 4 で示すような、10 モード以上一括分波可能なローランド円型合分波器を検討し、その原理実証を行った。その結果、モード間クロストーク特性はまだ不十分だが、基本原理として使える目処は付いた。また、モード間クロストークは、入力側の強結合導波路の本数、入・出力導波路間の間隔、ローランド円の入力側の半径等のパラメータの調整によって改善できることを確認した。

(4)導波路曲線部分におけるモード間クロストークの抑制について検討：合分波器の設計において、導波路の曲線部分では高次モードの励起現象によってモード間クロストークが懸念される。そのため、スリット構造(図 5)を用いる強結合導波路のモード間クロストークの抑制効果について検討し、導波路中心にスリット構造を入れることで、モード間クロストークが 10dB 程度抑制可能であることを確認した。

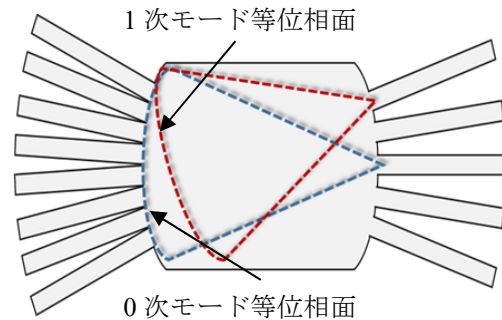


図 4 ローランド円の等位相面集光原理概略図。

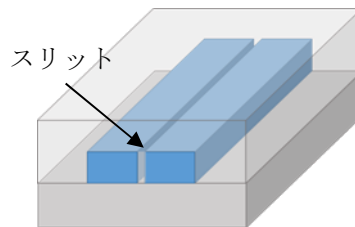


図 5 スリット入り強結合導波路。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕（計 2 件）

- (1) Haisong Jiang, Toshimichi Oiwane, and Kiichi Hamamoto, “Proposal of Novel Optical Mode Demultiplexer Based on Angled-Multimode Interference (a-MMI) Waveguide,” Technical Digest of The 20th Microoptics Conference (MOC 2015, Fukuoka, Japan), H47, 27th Oct. 2015
- (2) Kantaro Fujimoto, Haisong jiang, and Kiichi Hamamoto, “Proposal of mode-maintaining slit waveguide,” Proceedings of The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24, Tokyo, Japan), P14-05, 22nd Aug. 2017

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：OPTICAL MULTIPLEXING DEVICE,
OPTICAL DEMULTIPLEXING DEVICE AND
OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

発明者：姜 海松、浜本貴一

権利者：国立大学法人、九州大学

種類：特許

番号：PCT/JP2016/81270

出願年月日：2016年10月21日

国内外の別：外国

6. 研究組織

(1)研究代表者

姜 海松 (JIANG, Haisong)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：00738049

(2)研究分担者

浜本貴一 (HAMAMOTO, Kiichi)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：70404027