

弱導波型多モード干渉カブラの構造最適化による石英光導波路型 2 モード合分波器の広帯域化に関する検討
安井 崇^{†a)} (正員) 杉坂純一郎[†] (正員)

平山 浩一[†] (正員)

Structural Optimization of Weakly Guided MMI Couplers for Broadband Two-Mode (De)multiplexer Based on Silica Optical Waveguides

Takashi YASUI^{†a)}, Jun-ichiro SUGISAKA[†],
and Koichi HIRAYAMA[†], Members

[†] 北見工業大学工学部, 北見市

Faculty of Engineering, Kitami Institute of Technology,
Kitami-shi, 090-8507 Japan

a) E-mail: yasui@mail.kitami-it.ac.jp

あらまし 本報告は弱導波型多モード干渉カブラの構造最適化を検討している。石英光導波路型 2 モード合分波器を構成する多モード干渉カブラの幅と長さの最適化により波長分割多重伝送で使用する波長帯での出力パワーの波長依存性を改善できることを示している。

キーワード 多モード干渉カブラ, 弱導波光導波路, モード分割多重, ビーム伝搬法

1. まえがき

多モード干渉 (MMI: Multi mode interference) カブラはビームスプリッター, 3-dB カブラなど光集積回路を構成する基本的なデバイスとして広く用いられている。更に, モード分割多重 (MDM: Mode-division multiplexing) 方式用 2 モード合分波器 (TM-MUX: Two-mode (de)multiplexer) のような次世代光通信システムにおいて重要な役割を果たすデバイスへの応用が検討されている。これは図 1 に示すように MMI カブラ型モード変換・分離器 (MCS: Mode converter-splitter) 及び 3-dB カブラとバタフライ型位相シフタ (PS: Phase shifter) で構成される。これまでに Si 細線導波路をプラットフォームとした TM-MUX に対して PS の構造を最適化することで波長分割多重 (WDM: Wavelength-division multiplexing) 方式で使用される広い帯域での高性能な動作を実現している [1]。

一方, 光集積回路のプラットフォームとなる代表的な材料の一つに石英 [2] があり, 低伝搬損失, 低偏光依存性, 良好な光ファイバとの接続性といった特徴を有している。だが, 石英光導波路は弱導波型導波路であり, MMI における各モードの実効屈折率とモード番号の関係が 2 次関数的でなくなる。このため, 広く用いられている解析的な設計方法 [3] による高性能な設

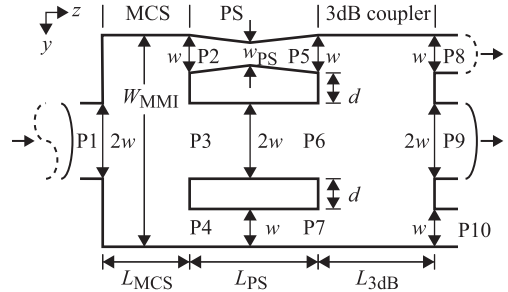


図 1 MMI に基づく 2 モード合分波器
Fig. 1 MMI-based two-mode (de)multiplexer.

計は困難であり, 数値解析による弱導波型 MMI カブラの構造最適化が検討されている [4], [5]. だが, 単一の動作波長における動作特性の改善について検討されており, WDM 方式で使用されるような広い動作波長帯での動作特性の改善に対する検討は筆者らの知る限り行われていない。

ここでは, WDM 方式で使用される広い波長帯における動作特性の改善を目的として弱導波型 MMI カブラの構造最適化について検討している。具体的に, 石英光導波路をプラットフォームとした TM-MUX の MMI 型 MCS と 3-dB カブラの幅と長さを最適化することで動作特性を広帯域化できることを見出している。

2. MMI に基づく 2 モード合分波器

図 1 に示す TM-MUX の MCS, PS, 3-dB カブラそれぞれの入出力ポートを P_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) とする。 P_1 に入力された基本モードは MCS で P_3 の基本モードに結合した後 3-dB カブラの P_9 の基本モードとして出力される。また, P_1 に入力された第 1 高次モードは, P_2 と P_4 の基本モードに結合しこれらの間の位相差が π となる。その後, PS により P_5 と P_7 での位相差を $\pi/2$ として 3-dB カブラで結合させることで P_8 の基本モードとして出力される。これを実現するために必要な MCS 長と 3-dB カブラ長はそれぞれ $3L_c/4, 3L_c/2$ で与えられる [1]。ここで

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (1)$$

であり, β_0, β_1 はそれぞれ幅 W_{MMI} の多モード導波路の基本モードと第 1 高次モードの伝搬定数である。

なお, 図 1 中の 3-dB カブラは 3×3 MMI カブラで構成されているが, これは P_i ($i = 5, 7, 8, 10$) を入出力ポートとする 2×2 MMI カブラと P_i ($i = 6, 9$) を入出力ポートとする 1×1 MMI カブラを重ね合わせた構造となっている。ここで 2×2 MMI カブラは

入力ポート P_5 若しくは P_7 に入力された基本モードが P_8 及び P_{10} の基本モードに等しく分岐され 3-dB カプラとして機能する. 他方, P_6 に入力された基本モードは P_9 の基本モードとして出力される. ここでは 2×2 MMI カプラとしての機能に着目しこれを 3-dB カプラと呼ぶ [1].

3. 数値解析結果

TM-MUX の動作波長帯を 1520~1580 nm とし, TE モード入射を考える. クラッドの屈折率はセルマイヤーの多項式 [6] で与え, 比屈折率差を $\Delta = 5.5\%$ [2] とする. 入出力導波路幅 w 及びコアの厚さを $3.0 \mu\text{m}$ とする. 等価屈折率法によって得られる 2次元構造に対して有限要素ビーム伝搬法 [7] を用いて動作特性の評価を行う. また, 位相シフタについては $L_{\text{PS}} = 645 \mu\text{m}$, $w_{\text{PS}} = 2.6 \mu\text{m}$ としている.

はじめに MCS の構造最適化について検討する. まず, MCS における出力パワーと L_{MCS} の W_{MMI} 依存性を図 2 に示す. ここでは波長 1550 nm での β_0, β_1 を用いて $L_{\text{MCS}} = 3L_c/4$ としている. また, 出力パワーは波長依存性があるため動作波長帯内での最大値と最小値を示している. 基本モード入射 ($|S_{31,0 \rightarrow 0}|^2$) 及び第 1 高次モード入射 ($|S_{21,1 \rightarrow 0}|^2$) のいずれに対しても, W_{MMI} が小さくなるに従って最小出力パワーが増加していることが分かる. これは, W_{MMI} が小さくなることによって式 (1) で与えられる L_c の波長依存性が小さくなるためであると考えられる. なお, P_1 に入射した第 1 高次モードは P_2 と P_4 に分岐して出力され, $|S_{41,1 \rightarrow 0}|^2$ は $|S_{21,1 \rightarrow 0}|^2$ に等しい. ここで $|S_{ji,n \rightarrow 0}|^2$ ($i, j = 1, 2, \dots, 10, n = 0, 1$) は P_i から入射した TE_n モードのうち P_j の TE_0 モードに結合した成分のパワーを表す.

このように W_{MMI} を小さくすることで MCS の出力が大幅に改善されるが, W_{MMI} を小さくすると PS を構成する導波路の間隔が狭くなり, 導波路間での結合

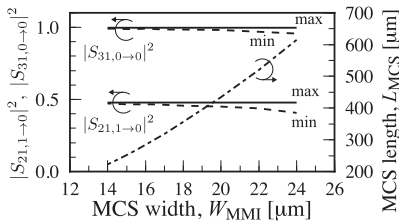


図 2 MCS の出力パワーとデバイス長の MCS 幅依存性
Fig. 2 Output power and length of MCS as a function of width of MCS.

が心配される. P_3 と P_4 の間隔を d とする. P_3 及び P_4 に基本モードを入射し, 長さ L_{PS} 伝搬後の P_6 及び P_7 への出力パワーの d に対する依存性を図 3 に示す. これより d が小さくなると $|S_{74,0 \rightarrow 0}|^2$ が急激に減少し PS を構成する導波路間で結合が生じていることが確認できる. 導波路間隔が $d \geq 2 \mu\text{m}$ のとき動作波長帯全体で 99%以上の透過率が得られている. そこで, ここでは $d = 2 \mu\text{m}$ となる $W_{\text{MMI}} = 16 \mu\text{m}$ を W_{MMI} の最適値として用いることにする.

つづいて, $W_{\text{MMI}} = 16 \mu\text{m}$ に固定し L_{MCS} を変化させたときの MCS の出力特性を図 4 に示す. これより MCS の出力パワーは L_{MCS} に大きく依存し, $L_{\text{MCS}} = 285 \mu\text{m}$ のときに $|S_{21,1 \rightarrow 0}|^2$ 及び $|S_{31,0 \rightarrow 0}|^2$ の最小値が最大となった.

次に, 3-dB カプラの構造最適化について検討する. ここで用いている PS の構造より 3-dB カプラを構成する MMI の幅は MCS と等しい W_{MMI} となり, 波長 1550 nm に対する伝搬定数から見積もられる 3-dB カプラ長は $3L_c/2 = 570 \mu\text{m}$ である. P_5 及び P_6 からそれぞれの基本モードを入射した場合の出力パワーの 3-dB カプラ長 $L_{3\text{dB}}$ 依存性を図 5 に示す. ここで, max 及び min は動作波長帯における $|S_{96,0 \rightarrow 0}|^2$ 及び $|S_{85,0 \rightarrow 0}|^2$ の最大値と最小値である.

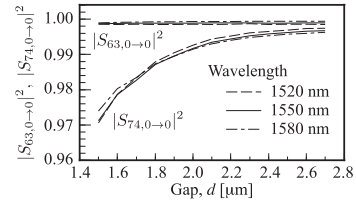


図 3 長さ $645 \mu\text{m}$ の PS に対する $|S_{63,0 \rightarrow 0}|^2$ 及び $|S_{74,0 \rightarrow 0}|^2$ の導波路間隔 d 依存性

Fig. 3 $|S_{63,0 \rightarrow 0}|^2$ and $|S_{74,0 \rightarrow 0}|^2$ as a function of d for the PS with the length of $645 \mu\text{m}$.

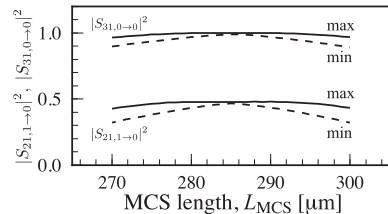


図 4 基本モード及び第 1 高次モード入射に対する MCS の出力パワーのデバイス長依存性

Fig. 4 Output power of the MCS as a function of the length of the MCS for inputs of the fundamental and the first-order modes.

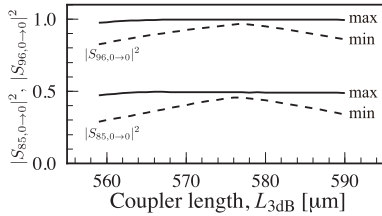


図 5 3-dB カプラの出力パワーのデバイス長依存性
Fig. 5 Output power of the 3-dB coupler as a function of the length of the 3-dB coupler.

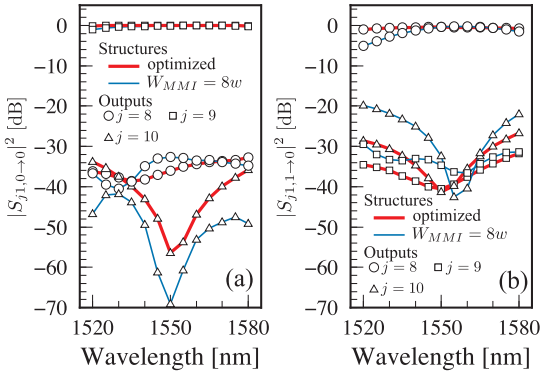


図 6 TM-MUX の出力パワーの波長依存性. (a) 基本モード入射, (b) 第 1 高次モード入射
Fig. 6 Output power of the TM-MUXs as a function of wavelength for the inputs of (a) the fundamental and (b) the first-order modes.

これより、 L_{3dB} を変化させることで出力パワーが大きく改善されることが確認でき、 $L_{3dB} = 577 \mu\text{m}$ のとき $|S_{96,0 \to 0}|^2 > 96.8\%$ 、 $|S_{85,0 \to 0}|^2 > 45.7\%$ が得られている。また、 $|S_{10,5,0 \to 0}|^2 > 45.4\%$ と $|S_{85,0 \to 0}|^2$ と同程度である。

最後に、以上で構造最適化を行った MCS 及び 3-dB カプラと PS を接続した 2 モード合分波器全体の出力パワーの波長依存性を図 6 に示す。ここで、 $W_{MMI} = 8w$ と示している曲線は、PS を構成する 3 本の導波路間での光波の結合を防ぐのに十分な導波路隔 d を確保するために $W_{MMI} = 8w$ とした構造に対する出力パワーである。このとき $L_{MCS} = 615 \mu\text{m}$ 、 $L_{3dB} = 1229 \mu\text{m}$ としている。最適化した構造に対して、動作波長帯での出力パワーは基本モード入射の場合に -0.1 dB 以上、第 1 高次モード入射の場合には -1.0 dB 以上と広い波長帯で高い出力パワーが実現できている。特に、 $W_{MMI} = 8w$ とした場合と比べて第 1 高次モード入射に対する短波長側での出力パワーの改善が大きく、MMI カプラの構造最適化の有効性が確認できる。ま

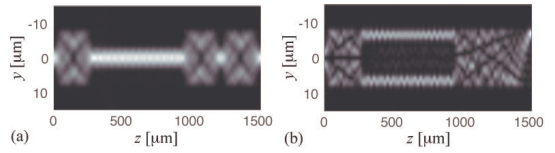


図 7 構造最適化された TM-MUX を伝搬する波長 1550 nm の光波の様子. (a) 基本モード入射, (b) 第 1 高次モード入射
Fig. 7 Propagating field in the optimized TM-MUX at wavelength of 1550 nm for the inputs of (a) the fundamental and (b) the first-order modes.

た、クロストークは基本モード入射の場合 -32 dB 以下、第 1 高次モード入射の場合 -26 dB 以下となっている。図 7 に最適化した構造内を伝搬する光波の様子を示す。ここで、動作波長は 1550 nm である。 P_1 から入射された基本モード及び第 1 高次モードがそれぞれ P_9 、 P_8 の基本モードとして出力されていることが確認できる。

図 7 (b) に示すように、PS の上下の導波路を伝搬する光波の分布に振動が確認される。幅 $w = 3.0 \mu\text{m}$ のこれらの導波路は偶モードに対して単一モード動作であるが第 1 高次モードは伝搬可能である。その結果、MCS から PS への入力時にこれらの導波路の基本モードに加えて第 1 高次モードも励起され振動が生じている。なお、 P_1 に入力した第 1 高次モードから P_2 及び P_4 の第 1 高次モードへのパワー結合率は動作波長帯において最大 2.9% である。図 2 に示す $|S_{21,1 \to 0}|^2$ と比較すると P_2 及び P_4 の第 1 高次モードへの結合が MCS における損失の主な原因となっていることが確認できる。

4. むすび

本論文では弱導波型 MMI カプラの構造最適化について検討を行った。具体的には、石英光導波路をプラットフォームとした TM-MUX を構成する MMI カプラの幅と長さの最適化を行うことにより、1520~1580 μm の波長帯において、基本モード及び第 1 高次モード入射に対してそれぞれ -0.1 dB 、 -1.0 dB 以上の出力を得られることを示した。本手法で得た最適解が大域的な最適解であるかは未確認であり、遺伝的アルゴリズムなどを用いた大域的な最適解の探索を行うこと、及び、損失の主な原因となっている MCS の出力ポートで励振される第 1 高次モードの抑制に関する検討は今後の課題である。

謝辞 本研究を行うにあたり数値計算に貢献された

本学大学院修了生佐々木駿一氏に感謝する。

文 献

- [1] T. Uematsu, Y. Ishizaka, Y. Kawaguchi, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission," *J. Lightwave Technol.*, vol.30, no.15, pp.2421–2426, Aug. 2012.
- [2] M. Takahashi, Y. Uchida, S. Yamasaki, J. Hasegawa, and T. Yagi, "Compact and low-loss coherent mixer based on high Δ ZrO_2 - SiO_2 PLC," *J. Lightwave Technol.*, vol.32, no.17, pp.3081–3088, Sept. 2014.
- [3] L.B. Soldano and E.C.M. Pennings, "Optical multimode interference devices based on self-imaging: Principles and applications," *J. Lightwave Technol.*, vol.13, no.4, pp.615–627, April 1995.
- [4] Q. Wang, J. Lu, and S. He, "Optimal design of a multimode interference coupler using a genetic algorithm," *Opt. Comm.*, vol.209, pp.131–136, Aug. 2002.
- [5] B.R. West and S. Honkanen, "MMI devices with weak guiding designed in three dimensions using a genetic algorithm," *Opt. Express*, vol.12, no.12, pp.2716–2722, June 2004.
- [6] 岡本勝就, 光導波路の基礎, pp.80–81, コロナ社, 東京, 1992.
- [7] 辻 寧英, 小柴正則, 田辺智英, "有限要素スキームを用いた広角ビーム伝搬法," *信学論 (C-I)*, vol.79-C-I, no.10, pp.381–388, Oct. 1996.
(平成 27 年 11 月 11 日受付, 11 月 30 日再受付,
28 年 3 月 11 日公開)