

波長・モード多重伝送融合のための遅延干渉型モード合分波器に関する研究

A research on interference-type mode (de)multiplexers for WDM and MDM transmission



藤澤 剛 (Takeshi Fujisawa, Dr. Eng.)

北海道大学 大学院情報科学研究院

メディアネットワーク部門 准教授

(Associate Professor, Hokkaido University, Graduate School of Information Science and Technology)

IEEE OSA 電子情報通信学会

受賞：電子情報通信学会学術奨励賞 (2010年)、他

研究専門分野：光ファイバ通信 光デバイス 光半導体光学

あらまし

波長・モード分割多重通信併用のための、低損失・高消光比モード合分波器に関する研究を行った。具体的に、シリコン導波路を用いた、超小型、モード多重用の波長無依存カプラ構造を有するマッハ・ツェンダー型モード合分波器を新規提案し、独自の設計技術を用いて、デバイス構成、及び、損失・モード間消光比に関する極限性能を追求した。具体的に、2モードの合分波器を対象とし、設計、試作実験により、その有用性を実証した。本研究により、モード分割多重通信を、規模の大きな波長分割多重通信と併せて用いることが可能となり、光通信伝送容量の飛躍的増加を実現することができると考えられる。

1. 研究の目的

光通信伝送容量の飛躍的増加を目的として、モード分割多重伝送技術 (Mode-Division Multiplexing: MDM)^{*1}を用いた通信用光デバイスに関する研究を行う。特に、現行の光通信システムで用いられている、異なる光の波長に情報を載せる波長分割多重技術 (Wavelength-Division Multiplexing: WDM)^{*2}との併用が可能で、波長・モード多重伝送併用遅延干渉型モード合分波器^{*3}に関する研究を行う。

2. 研究の背景

近年の、クラウドサービスに代表される、データ通信の爆発的需要増加を受け、幹線系光通信の更なる大容量化が必須となり、将来的にペタビットクラスの伝送容量が必要となる。光通信伝送容量の拡大は、様々な多重化技術によって達成されてきた。特にWDM技術は光通信の大容量化に有効でありこれまで広く用いられてきたが、通常のシングルモードファイバの伝送容量に関しては理論限界に達しつつある。

空間分割多重技術は、光の有する物理的資源(時間、空間、波長、振幅、位相、偏波)のうち、光通信の多重化に残された最後の物理的資源である、空間を用いて信号の多重化を行う技術である。MDMは空間分割多重技術の一つであり、複数の導波モードを有する数モードファイバ (FMF) を伝送路として用い、導波モードごとに信号を載せることで多重度を増大する。他の多重化技術、特に、WDMと併用することで、伝送容量の飛躍的拡大が可能であり、この数年、主に長距離幹線系光通信の伝送容量拡大を目的として、盛んに研究が行われている。

MDMでは、送信、受信側で異なるモードを合分波する、モード合分波器 (Mode-MUX) が必要となる。Mode-MUXを構成するにはいくつかの方法があるが、申請者らはこれまで、小型で低損失、なおかつ大量生産が可能で、石英系材料を用いた平面光波回路 (PLC) によるモード合分波器を研究し、その成果を世界に先駆けて発表してきた (研究実績欄論文13番)。図1に非対称方向性結合器を用いた、従来のPLC型モード合分波器の構造図と特性を示す。導波路2から入射された光 (Mode1) は導波路1と位相整合する波長で導波路1のMode2へと変換される。その際、変換されなかった成分は導波路2に残り、分波の際にクロストーク (XT) となる。この素子では、同図右に示すように、設計波長においては、変換効率が大きく、XTは小さいが、中心波長から外れると、XTが急激に大きくなってしまい、広い波長範囲で用いることが困難であった。現行の光通信システムで用いられるWDMとの併用を考えた場合 (図2) その波長依存性が大きな問題となり、波長多重数の大きなWDMとの併用が困難であり、真の意味での伝送容量の飛躍的増加を達成することができない。

波長・モード多重伝送融合のための遅延干渉型モード合分波器に関する研究

A research on interference-type mode (de)multiplexers for WDM and MDM transmission

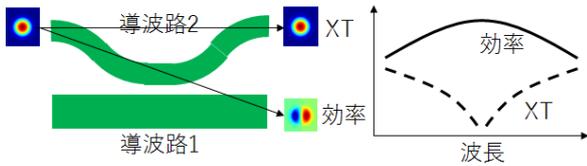


図1 従来型PLC型2モード合分波器の構造と特性

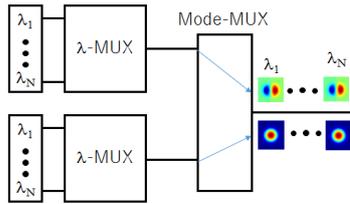


図2 WDM-MDM併用2モード合分波器の概念図

3. 研究の方法

このような問題に鑑み、本研究では、図2に示すような、MDM-WDM併用のための、低損失・高消光比 Mode-MUX に関する研究を行う。具体的に、シリコン導波路を用いた、超小型、モード多重用の波長無依存カプラ (Wavelength Insensitive Coupler: WINC) 構造を有するマッハ・ツェンダー (MZ) 型モード合分波器 (MZ-Mode-MUX) を新規提案し、独自の設計技術を用いて、デバイス構成、及び、損失・モード間消光比に関しての極限性能を追求する。具体的に、2モードの合分波器を対象とし、設計、試作実験により、その有用性を実証する。本研究により、MDMを規模の大きなWDMと併せて用いることが可能となり、光通信伝送容量の飛躍的増加を実現することができる。

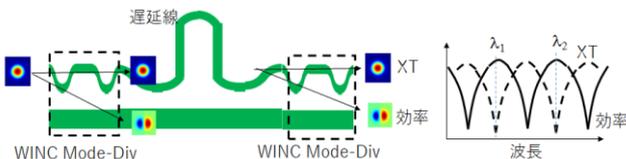


図3 WDM-MDM併用MZ型2モード合分波器の構造図と特性

ここでは、図3に示す、シリコン導波路を用いた、WINC構造を有する超小型MZ-Mode-MUXを提案する。コア・クラッド間の屈折率差の大きなシリコン導波路を用いることで、従来の石英系 Mode-MUX に比

べ、回路規模を100分の1程度に縮小することが可能となる。MZ干渉計は2つの3dBカプラ、及びその間の、遅延線からなり、遅延線の長さに応じて、図3右に示すように、その透過率が波長に対して周期的になることが知られている。WDMで用いられる波長、波長間隔は、規格で厳密に定められているため、それらの波長付近でのみ、変換効率が高く、XTが小さければ良い。言い換えるならば、必要な波長以外の特性は悪くてもかまわない。この設計思想が従来の Mode-MUX との大きな違いとなる。図3に示すように、波長 λ_1 、 λ_2 がシステムで用いる波長だとすると、適切に設計された MZ-Mode-MUX を用いることで、WDMで用いる波長において、低損失・低XTのモード合分波器が構成できることになるが、PLC型MZ干渉計を用いたモード合分波器に関する検討は世界的にまったく行われていない。また、MZ干渉計を構成するには、広帯域で動作する3dBカプラが2つ必要になる。通常のシングルモードMZ干渉計では、マルチモード干渉導波路と呼ばれる素子を使うことで、簡単に広帯域3dBカプラを構成できる。それに対し、本研究の MZ-Mode-MUX では図3に示すように、Mode1とMode2にパワーを半分ずつ分配する、モードディバイダ (Mode-Div) [1]が必要となるが、それについての検討もまったく行われていない。ここでは、この Mode-Div の開発に当たって、図3左の破線部に示すような WINC 構造を利用する。WINC構造は、それ自体も一つのMZ干渉計であり、従来、シングルモードの光波回路において、波長依存性を低減するための構造として用いられてきたが、申請者の知る限り、モード分岐制御への適用はこれが初めてである。

3.1 3dBモードディバイダの設計

図4に、MZ干渉計の3dB分岐部に用いる、WINC型3-dBモードディバイダの上面図を示す。図中、黒で塗りつぶされた領域が導波路コア部を示す。

波長・モード多重伝送融合のための遅延干渉型モード合分波器に関する研究

A research on interference-type mode (de)multiplexers for WDM and MDM transmission

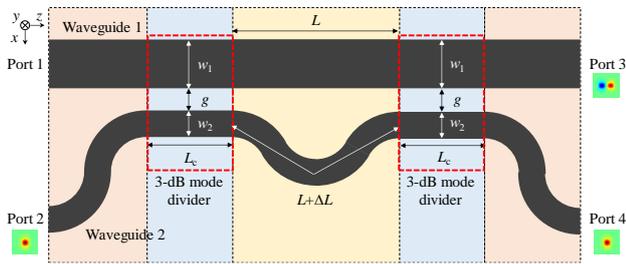


図4 WINC型3-dBモードディバイダの導波路構造

導波路1、2の導波路幅をそれぞれ $w_1 = 837 \text{ nm}$ 、 $w_2 = 400 \text{ nm}$ 、結合部分での導波路間隔を $g = 200 \text{ nm}$ 、結合部分の伝搬距離を $L_c = 9.09 \text{ }\mu\text{m}$ 、中央部分の導波路1、2の伝搬距離をそれぞれ L 、 $L + \Delta L$ 、コアの高さを $h = 210 \text{ nm}$ としている。コア部分の屈折率はシリコンを想定して 3.476、クラッド部分の屈折率はシリカを想定して 1.444 とする。Port 2 に TE_0 モードを入射した際に、Port 3 に TE_1 モード、Port 4 に TE_0 モードを 1:1 の比率で出射するように設計する。前段部分の 3-dB モードディバイダで入射光を分岐させた後、中央部分で遅延線を用いて位相差をつけ、再び 3-dB モードディバイダで結合させることで波長無依存なディバイダを設計する。

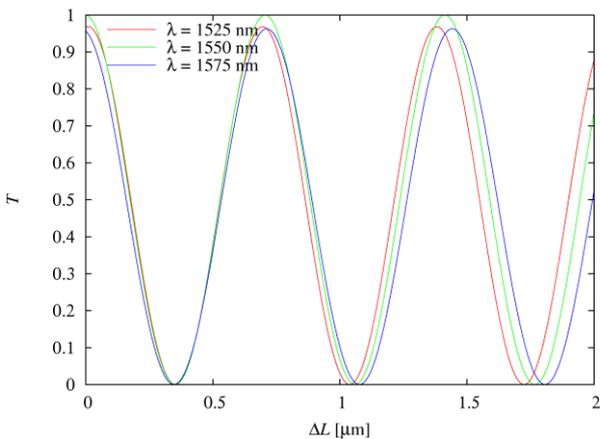


図5 $L = 20 \text{ }\mu\text{m}$ とした際の WINC 型 3-dB モードディバイダの各波長における Port 3 への透過率の ΔL 依存性

図5に、 $L = 20 \text{ }\mu\text{m}$ とした際の WINC 型 3-dB モードディバイダの各波長における Port 3 への透過率の ΔL 依存性を示す。図より、 ΔL が増加した際に、各波長の透過率が 0.5 付近で重なり合う点があることがわ

かる。これらより、 ΔL を最適に設計することで、広帯域化できることがわかる。今回は ΔL の最適パラメータの評価指標として前節と同様に最大偏差を用いる。波長 $\lambda = 1525、1550、1575 \text{ nm}$ の 3 波長で評価をする。最大偏差は、

$$MD = \max \{ |T(\lambda) - T_c| \} \quad (1)$$

で与えられ、 $T(\lambda)$ は波長 λ で Port 2 から TE_0 モードを入射した際の Port 3 への TE_1 モードの透過率、 T_c は基準透過率を表す。 $T(\lambda)$ と T_c の差の絶対値を求め、その差が最大となる値が最大偏差となる。そして、最大偏差が最も小さくなるようにパラメータを設定する。ここでは 3-dB モードディバイダを設計したいので $T_c = 0.5$ とする。値の算出には、モード結合理論(Coupled Mode Theory: CMT)を用いた。

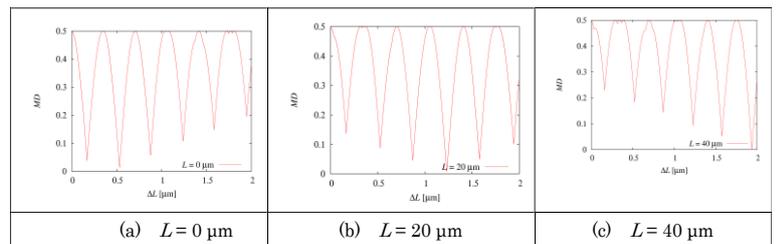


図6 最大偏差の ΔL 依存性

図6に、最大偏差の ΔL 依存性を示す。(a)~(c)はそれぞれ $L = 0, 20, 40 \text{ }\mu\text{m}$ の際の最大偏差を示している。図より、 L の長さによって、最大偏差が最小となる ΔL の値が異なることがわかる。最大偏差が最小となる構造として $L = 0, 20, 40 \text{ }\mu\text{m}$ の際に $\Delta L = 0.531、1.234、1.937 \text{ }\mu\text{m}$ を用いることで、最も広帯域動作する。図7に、WINC 型 3-dB モードディバイダの透過率の波長依存性を示す。図より、どの L の長さでも最適な ΔL を設定することで、広帯域動作していることがわかる。

波長・モード多重伝送融合のための遅延干渉型モード合分波器に関する研究

A research on interference-type mode (de)multiplexers for WDM and MDM transmission

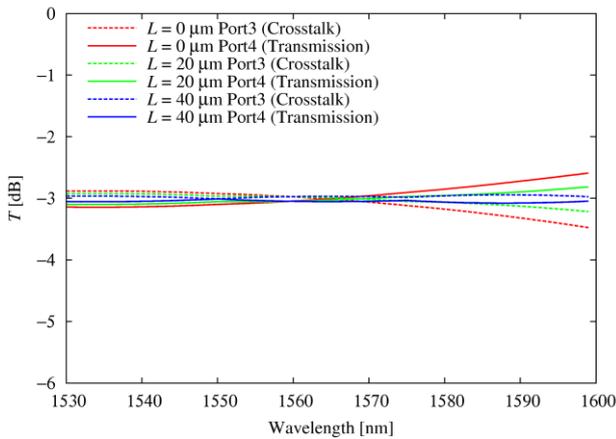


図7 WINC型3-dBモードディバイダの透過率の波長依存性

図8に、 $L = 20 \mu\text{m}$ で設計した WINC 型 3-dB モードディバイダにおいて ΔL が変化した際の透過スペクトルを示す。図より、 ΔL の値が変化すると、透過スペクトルが全波長で同等に変化していることがわかる。

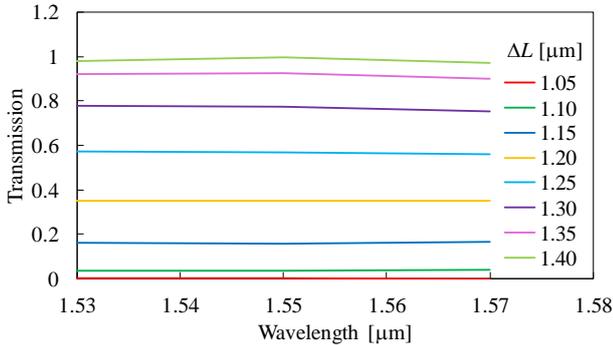


図8 $L = 20 \mu\text{m}$ で設計した WINC 型 3-dB モードディバイダにおいて ΔL が変化した際の透過スペクトル

3.2 MZ-Mode-MUX の設計

図9に、マッハ・ツェンダー型モード合分波器の導波路構造を示す。3-dB モードディバイダのパラメータは 3.1 で設計したパラメータを用いる。MZ-Mode-MUX では、遅延線の導波路長 (L_1, L_2) を変えることで、任意の波長間隔(Free spectral range: FSR)を有するモード合分波器を構成可能である。FSR は

$$\Delta\lambda = \left| \frac{\lambda^2}{N_1 L_1 - N_2 L_2} \right| \quad (2)$$

により与えられ、 λ は波長、 N は群屈折率を表す。

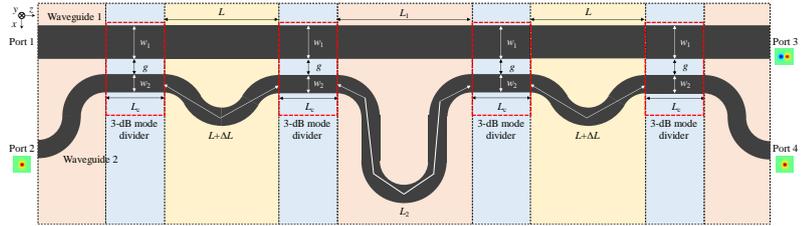


図9 マッハ・ツェンダー型モード合分波器の導波路構造

図10に、 $\text{FSR} = 20 \text{ nm}$ に設定したマッハ・ツェンダー型モード合分波器の透過スペクトルを示す。図より、マッハ・ツェンダーフィルタ特有の周期的なスペクトルが得られていることがわかり、FSR も約 20 nm となっており、想定通りの設計ができています。

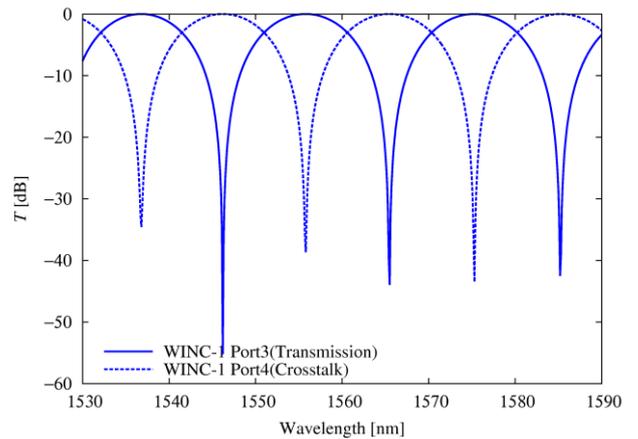


図10 $\text{FSR} = 20 \text{ nm}$ に設定したマッハ・ツェンダー型モード合分波器の透過スペクトル

3.3 MZ-Mode-MUX の試作[2]

図11に、CMOS ファウンドリーにより試作した、3dB モードディバイダの顕微鏡写真を示す。設計パラメータは 3.1 で示したものと同じである。

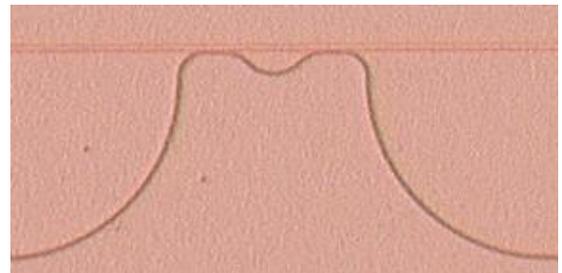


図11 試作したモードディバイダの顕微鏡写真

波長・モード多重伝送融合のための遅延干渉型モード合分波器に関する研究

A research on interference-type mode (de)multiplexers for WDM and MDM transmission

図 12 に、 $L = 20 \mu\text{m}$ とした場合の、(a) CMT による計算、および(b) 測定によって求めた、 $\Delta L = 1.05 \sim 1.40 \mu\text{m}$ におけるモードディバイダの透過スペクトルを示す。どの ΔL を選択しても、波長依存性の低い透過スペクトルが広帯域にわたり得られていることがわかる。また、 ΔL によって分岐比が変化していることがわかる。図より、理論値(実線)と測定値(点)がよく一致していることがわかり、提案したデバイスのコンセプトが確認できた。

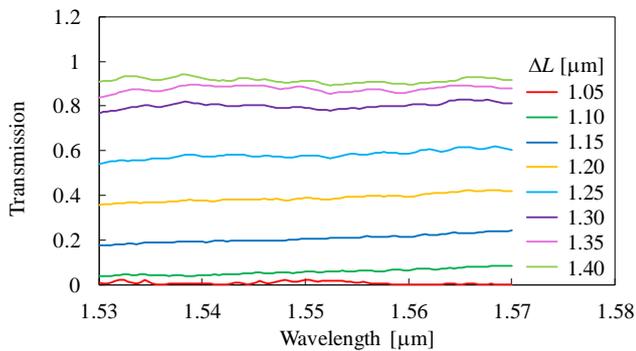


図 12 $L = 20 \mu\text{m}$ とした場合の $\Delta L = 1.05 \sim 1.4 \mu\text{m}$ におけるモードディバイダの透過スペクトルの測定結果

図 13 に、図 11 に示した 3dB モードディバイダを用いて試作した、MZ-Mode-MUX の顕微鏡写真を示す。FSR は 20 nm であり、3.2 の設計パラメータを用いている。二つのモードディバイダに、遅延線導波路が挟まれているのが確認できる。図 14 に、測定により求めた、FSR = 20 nm における MZ モード/波長合分波器の透過スペクトルを示す。図より、周期的な透過スペクトルが得られており、計算結果(図 10)と測定結果がよく一致していることがわかる。測定により得られた FSR は約 20 nm であり、設計通りの素子を実現した。

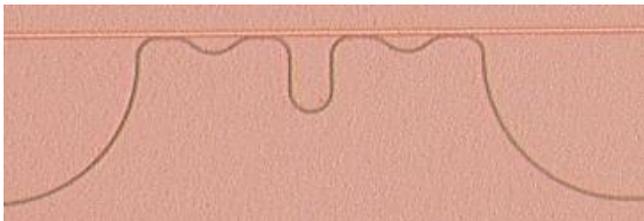


図 13 試作した MZ-Mode-MUX の顕微鏡写真

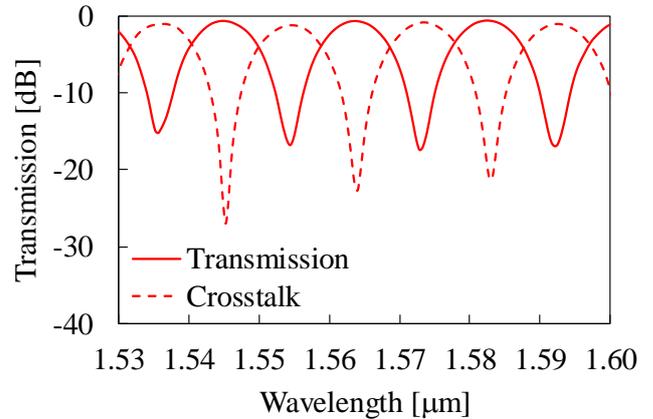


図 14 FSR = 20 nm における MZ モード/波長合分波器の透過スペクトルの測定結果

4. 将来展望

これまで示してきたように、本研究で提案したモード合分波器は、使用する波長において、低損失、高消光比となっており、WDM 技術との併用に適している。これは従来の、設計波長から離れると性能が劣化するモード合分波素子に対する利点となる。

また、研究を始めた当初は、単純な 3dB の分岐素子と、それを組み合わせた干渉型モード合分波器の構成を目指していたが、図 12 に示すように、モードディバイダの分岐比は、遅延線の長さにより、自由に変えられることを発見した。これは、同じ長さの遅延線に対して、熱等の摂動を与えることで、分岐比にチューナビリティを付与できることを示唆しており、「モード」に関する光の変調器や、パワー可変減衰器、利得等化器などへの応用が可能となると考えられる[3]。

おわりに

WINC 型モードディバイダ、MZ-Mode-MUX の透過スペクトルの評価結果から、広帯域のモード分岐、及び、任意の波長間隔のピーク波長間隔を有する波長合波が可能であることを実験により実証した。本素子を用いることで、WDM と MDM の併用がより一層効果的になり、光通信伝送容量の飛躍的増加の一助になると考えられる。

波長・モード多重伝送融合のための遅延干渉型モード合分波器に関する研究

A research on interference-type mode (de)multiplexers for WDM and MDM transmission

用語解説 関連文献

- *1 モード分割多重通信：光導波路中に存在する各種のモードに情報を載せ、通信する技術
- *2 波長分割多重通信：一本の光ファイバ上に複数の光波長を多重し効率的な信号伝送を行う多重法の一つ
- *3 モード合分波器：複数のポートから入射された光を、異なるモードとして一つの導波路に合分波する素子

参考文献

- [1] S. Ohta, **T. Fujisawa**, S. Makino, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "Si-based Mach-Zehnder wavelength/mode multi/demultiplexer for a WDM/MDM transmission system", *Optics Express*, vol.26, no.12, pp. 15211-15220, June 2018
- [2] M. Kudo, **T. Fujisawa**, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Tsujikawa, K. Nakajima, and K. Saitoh, "A Broadband Mode Divider with Arbitrary Branching Ratio Based on Wavelength-insensitive Coupler", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Paper Th2A.4, San Diego, USA, Mar. 3-7, 2019.
- [3] K. Nakamura, **T. Fujisawa**, T. Sakamoto, T. Matsui, K. Nakajima, and K. Saitoh, "A tunable mode divider based on wavelength insensitive coupler using thermo-optic effect for gain-equalization in MDM network", *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Paper Th2A.6, San Diego, USA, Mar. 8-12, 2020.

この研究は、平成28年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成29～平成元年度に実施されたものです。