

# モザイク状メタマテリアル素子を用いた 100/400GbE 用小型 4 波長合波器の研究

代表研究者

藤澤 剛

北海道大学 大学院情報科学研究院 准教授

## 1 研究概要

光 100/400 ギガイーサネットにおいて必要となる、小型 4 波長合波器に関する研究を行う。従来合波器で必要であった 1600GHz のフィルタを、波長依存性の小さな、超小型モザイク状モード合波器、及び、 $TE_1$ - $TM_0$  モード変換器を縦列接続した偏波合波器に置き換えることにより、4 波長合波器の大幅な小型化、低損失化、製造トレランス改善を実現する。

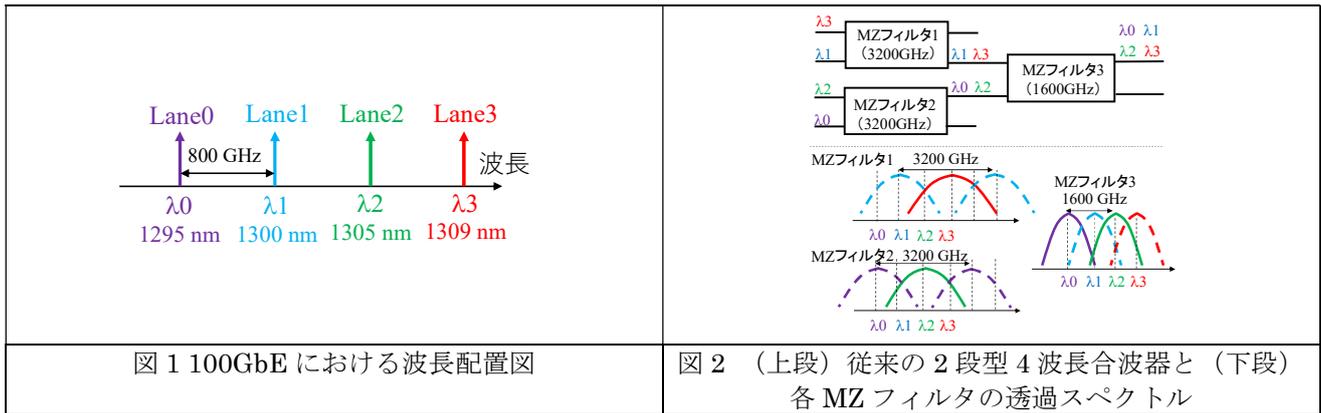
## 2 研究背景

LAN 系通信規格の一つであるイーサネットの光化が進み、急速に市場導入が進んでいる光 100 ギガビットイーサネット(100GbE)、及び、すでに標準化が完了し、近い将来市場導入される 400GbE が注目を集めている。データセンタ間など数十 km 程度の中・長距離に対応するためのイーサネット規格も制定され、伝送媒体としてはシングルモードファイバ(SMF)を用い、100/400GbE どちらにおいても、1 波だけで必要な伝送容量を確保することが難しいため、1.3  $\mu\text{m}$  帯の 4 波長を用いる LAN-WDM 規格が採用されている。図 1 に示すように、各波長の周波数間隔は 800 GHz であり、短波長側から lane0~3 と設定されている。ゆえに、これらの光送信機には、4 つの光源の他に、800GHz 間隔の光を 4 波合波する波長合波器が必要となる。

光送信機において最も重要な特性は、サイズと消費電力であり、一般に消費電力はサイズに比例するため、光送信機全体の大きさを小さくすることが、単位体積当たりの伝送容量の増大、ネットワークのグリーン化に極めて重要となる。光送信機のサイズを決める要因はいくつかあるが、用いる光合波器の形態が大きな影響をもつ。

これまで、自由空間光学、チップ型など、100GbE 向けの様々な波長合波器が提案されてきたが、光源と一体集積可能なチップ型の合波器を用いることで、大幅な小型化を達成できる。その中でも、二つのマッハ・ツェンダー干渉計フィルタ(MZ フィルタ)を縦列接続した、2 段型 4 波合波器[1]は、原理損失がなく、小型の 4 波長合波器として有望視されている。しかし、次項で詳述するように、導波路幅の製造誤差などにより、フィルタのピーク波長位置を各 lane の使用波長に合わせこむことが困難であり、高製造トレランスの 4 波長合波器が強く求められている。また、[1]では InP 系化合物半導体を用いることにより、レーザ光源とのモノリシック集積を実現しているが、InP 系化合物半導体を用いた場合、チップ大きさは数 mm 角程度となり、それ以上のサイズ低減が難しく、今後、増え続ける、データセンタ等の LAN 系光通信における、ネットワークの伝送容量を賄うためには、さらなる伝送容量増大、及び、低消費電力が必須であり、光送信機の一層の小型化が求められている。

本研究では、従来の InP 系化合物半導体ではなく、シリコン導波路を用いることにより、合波器の更なる小型化を目指す。さらに、従来の 2 段型合波器のうち、最も製造トレランスの厳しい 2 段目の MZ フィルタを、波長依存性の小さな、超小型モザイク状モード合波器、及び、 $TE_1$ - $TM_0$  モード変換器を縦列接続した偏波合波器に置き換えることにより、4 波長合波器の大幅な小型化、低損失化、製造トレランス改善を実現することを目的とする。



### 3 モザイク状メタマテリアルを用いた 4 波長合波器

#### 3-1 全体の構成と本研究のターゲット

図 2 上段に、二つの MZ フィルタを縦列接続した 2 段型合波器の構造、下段に、各フィルタの透過スペクトルの模式図を示す。800GHz 間隔の 4 波長を合波するために、1 段目にピーク波長間隔が 3200GHz、2 段目に 1600GHz のフィルタが必要となる。例えば、MZ フィルタ 1 では、lane1, 3 を合波し、MZ フィルタ 2 では、lane0, 2 を合波する。そして、2 波長が合波された導波路を MZ フィルタ 3 の入力とし、4 波の合波を達成する。フィルタのピーク波長位置は LAN-WDM グリッドと合わせる必要があるが、導波路幅の製造誤差により、ピーク波長位置が簡単に変わってしまうため、その強トランス化が大きな課題となっていた。特に後段の 1600GHz の MZ フィルタ 3 は、ピーク波長の周波数間隔が前段のフィルタの半分のため、最も製造トランスが厳しい[1]。

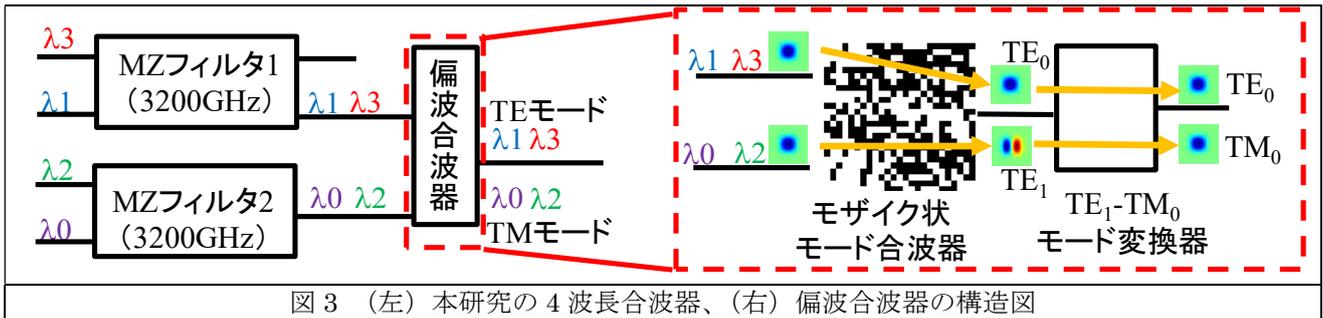
それに対し、モノリシック集積ではなく、光源部と、合波器部を別々に作り、ハイブリッド集積する研究も行われ始めている。特に合波器部には、既存の CMOS ファウンダリーを用いて製造可能な、いわゆるシリコンフォトニクスを用いる合波器の検討がなされ、シリコン導波路を用いた、2 段型合波器が報告されているが[2,3]、これについても、フィルタピーク波長位置制御の困難さについて、まったく同じ問題を抱えている。LAN 系通信に用いる光デバイスにおいては、コストが非常に重要であり、用いる光素子の製造トランスを強化することは実用化に直結する課題であり、高トランスの合波器の実現が強く求められている。

本研究では、100/400GbE 用 4 波長合波器の小型化、製造トランス改善を目的として、図 3 左に示すように、従来の 2 段型合波器において最も製造トランスの厳しい MZ フィルタ 3 を、考える波長帯において、波長依存性の非常に小さな偏波合波器に置き換えた、Si 導波路を用いた 4 波長合波器の研究を行う。

提案構造においては、lane1,3 及び、lane0,2 の光をそれぞれ、MZ フィルタ 1、2 で合波するところまでは従来合波器と同じであるが、lane1,3 を TE モードとして、lane0,2 を TM モードとして後段の偏波合波器において合波するところに特徴がある。SMF を伝送媒体として用いる場合、ファイバ中で二つの偏波はランダムに結合するため、送信側で TE、TM モードを混ぜて合波することは問題ない。一般に偏波合波器の波長依存性は、波長フィルタに比べれば格段に小さく、それは同時に導波路幅に対する製造トランスが強いことを示すため、従来合波器の問題点を解決することができると思われる。

図 3 左に本研究で新規提案する偏波合波器の構成を示す。まず、モード合分波器を用いて、lane1,3 及び、lane0,2 の光をそれぞれ、TE<sub>0</sub>、TE<sub>1</sub> モードとして合波する。その後、lane0,2 の光を TE<sub>1</sub> モードから TM<sub>0</sub> モードに変換することで、偏波合波を達成する。具体的に、TE<sub>1</sub>-TM<sub>0</sub> モード変換器としては、厚み方向の導波路非対称性によるモード変換を用いた、1.3 μm 帯 Si リブ導波路型モード変換器を用い (3-2 で詳述)、モード合分波器としては、同図右に示すような、モザイク状モード合分波器を新規考案する (3-3 で詳述)。

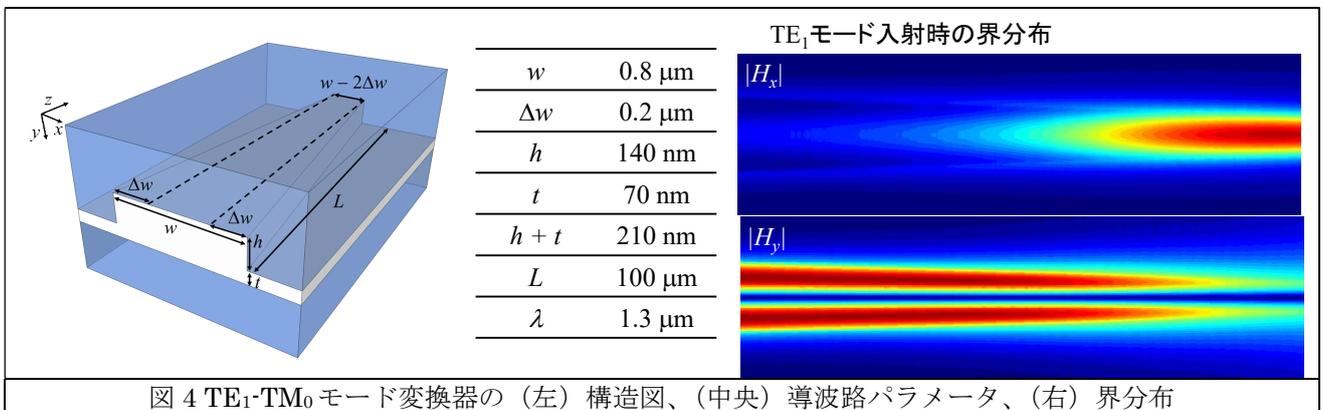
これら二つの素子は波長依存性が非常に小さいため、従来の最も製造トランスの厳しい MZ フィルタ 3 を、製造トランスが強い素子に置き換えることが可能である。さらに、モザイク状素子を用いることで、従来素子の MZ フィルタ 3 部を大幅に小型化することも可能となる。



### 3-2 TE<sub>1</sub>-TM<sub>0</sub>モード変換器の作製と評価

図3に記載のTE<sub>1</sub>-TM<sub>0</sub>モード変換器は図4左に示すような、シリコンリブ導波路を用いて実現することができる。リブ導波路を用いると、厚み方向の対称性が崩れるため、導波路中のTE<sub>1</sub>、TM<sub>0</sub>モード間でモード混合が生じる[4]。幅広の導波路にTE<sub>1</sub>モードを入射し、導波路幅をテーパし、細くしていくことで、TM<sub>0</sub>モードへと変換可能である。図4中央に、ビーム伝搬法により最適化した導波路構造の寸法を示す。光の波長は1.3 μmとしている。同図右に、幅広の導波路にTE<sub>1</sub>モードを入射した場合の界分布を示す。二山の界分布をもつTE<sub>1</sub>モードが、一山のTM<sub>0</sub>モードへと変換されていることがわかる。この素子の特性は、通常のCMOSプロセスで制御できる導波路幅の範囲ではほぼ変わらず、製造トレランスが非常に大きい。

CMOSファウンドリーにより、本素子を作製した。図5上段に、素子の顕微鏡写真を示す。リブ導波路部の後段に、非対称方向性結合器(ADC)を縦列接続している。Port1からTE<sub>0</sub>モードが入射された場合、光はそのままPort2に抜ける。TMモードが入射された場合には、リブ導波路部でTE<sub>1</sub>モードへと変換され、ADCでTE<sub>0</sub>モードへ結合し、Port3に透過する。図4下段に、TE<sub>0</sub>、TM<sub>0</sub>モードをPort1に入射時の透過スペクトルの測定値をいくつかのリブ導波路テーパ長L<sub>taper</sub>に対して示す。TE<sub>0</sub>モード入射の場合はPort2へ、TM<sub>0</sub>モード入射の場合はPort3へ大きな出力が得られ、偏波合分波器として機能していることがわかり、損失はほとんどない。



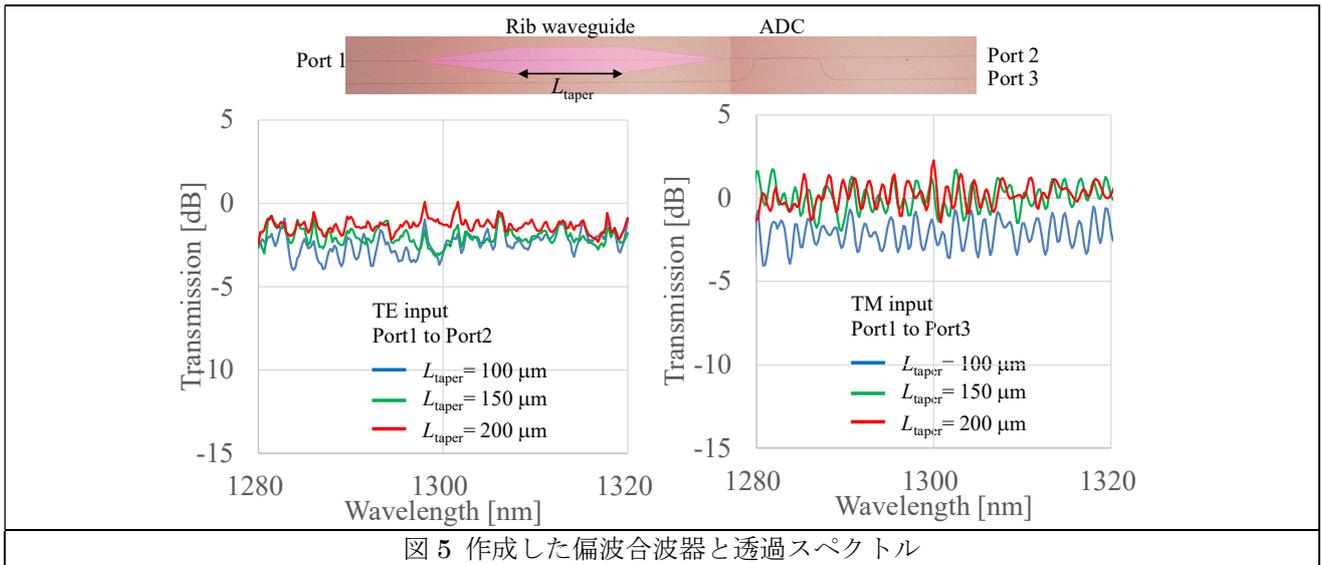


図 5 作成した偏波合波器と透過スペクトル

### 3-3 モザイク状メタ材料によるモード合波器の設計

モザイク状素子[5-7]では、入出力導波路間にシリコンプレートを配置し、プレート上をサブ波長程度（～100 nm）のピクセルで分割し、各ピクセルに 0（シリコンを削る）、1（シリコンを残す、図 3 右中黒色部）を適切に割り当てることにより、モザイク状パターン（シリコンメタ材料）を生成し、目的の性能をもつ素子を実現する。通常の導波路型デバイスに比べ、その大きさを 10 分の 1 以下にすることが可能であり、これまで、超小型の偏波分離デバイスや、パワースプリッタなど比較的簡便な機能をもつ素子が提案されている。

ここでは、図 3 右に示すように、二つの入力ポートから入射された光を、それぞれ、 $TE_0$ 、 $TE_1$  モードへと変換し、合波する、モザイク型モード合波器を考える。モザイク素子を実現するためのポイントとしては、目的となるモザイクパターンをいかにして創出するか、が最も重要であるが、ここでは、機械学習技術の一つである、Direct Binary Search (DBS) 法を用いて設計する。DBS 法では、ランダムに発生したモザイクパターンに対し、ランダムにピクセルを選びながら、そのピクセルを反転し、電磁界シミュレーションにより特性を算出する。そのとき、目標とする特性により近ければ、その反転を保持し、遠ければ、元に戻す。この作業を繰り返して、目的の性能に近い構造に収束させる方法である。DBS 法はブルートフォース（総当たり）的最適化手法であり、計算の負荷が非常に大きいため、まず初めに 2 次元等価屈折率構造に対して、モザイクパターンを算出し、その構造を初期構造として、3 次元の電磁界シミュレーションにより DBS 法を実施し、パターンを探索することとした。一回一回の電磁界シミュレーションには有限要素法[8,9]を使用した。上下導波路からそれぞれ、 $TE_0$  モードを入射した場合の、出力導波路での  $TE_0$ 、 $TE_1$  モードへの透過率を  $t_1$ 、 $t_2$  としたとき、性能指数 (FOM) を

$$FOM = \sum_{i=1}^N \left\{ |1 - t_{1,i}| + |1 - t_{2,i}| \right\}$$

と設定した。どちらの透過率も 1 の場合、FOM は最小化される。DBS 法では電磁界シミュレーションの結果から、ピクセル反転前の FOM が、反転後の FOM よりも大きいとき、その反転を保持する。ここで、N は考える波長の数であり、2 次元等価屈折率構造の設計にあたっては、1.27、1.28、1.29、1.3、1.31  $\mu\text{m}$  の 5 波長を使用した。

図 6 に、設計するモザイク型モード合分波器の概要図を示す。二つの入力導波路、一つの出力導波路の間にモザイク領域（赤破線枠内）が配置されている。シリコン導波路の厚さは 210 nm、モザイク領域は 3  $\mu\text{m}$  の正方形であり、それを 100 nm のピクセルに分割している（計 900 個のピクセル）。よって、DBS 法で設計領域の全てのピクセルをカバーするのに必要な電磁界解析の回数は、900  $\times$  5 波長 = 4500 回となり、膨大な電磁界解析が必要となる。

図 7 に 2 次元等価屈折率構造に対して算出したモード合波器のモザイクパターン、上下導波路から光が入射された場合の界分布を示す。ランダムに発生したパターンに対し、DBS 法により得られた構造が図 6 左の

構造であり、マニュアル設計ではたどり着けないような複雑な構造を有している。同図右には、上下入力導波路から光が入射された場合の  $xz$  面内の界分布を示しており、所望のモード変換が得られていることがわかる。

図 7 は 2 次元等価屈折率構造に対する結果であるが、非常に複雑な構造をしているため、厚み方向の構造の変化を考慮した、実際の 3 次元構造での設計が必須となる。そこで、3 次元フルベクトル有限要素法[6]を用いた、DBS 法によるモザイク素子設計技術を開発した。図 8 に、2 次元設計構造を初期構造として、3 次元設計技術により最適化したモザイクパターンと、コア中心における伝搬面の界分布を示す。3 次元設計によるモザイクパターンは 2 次元設計によるものとは異なる。これは 2 次元設計では考慮されない厚み方向の放射損失を抑えるためと考えられる。

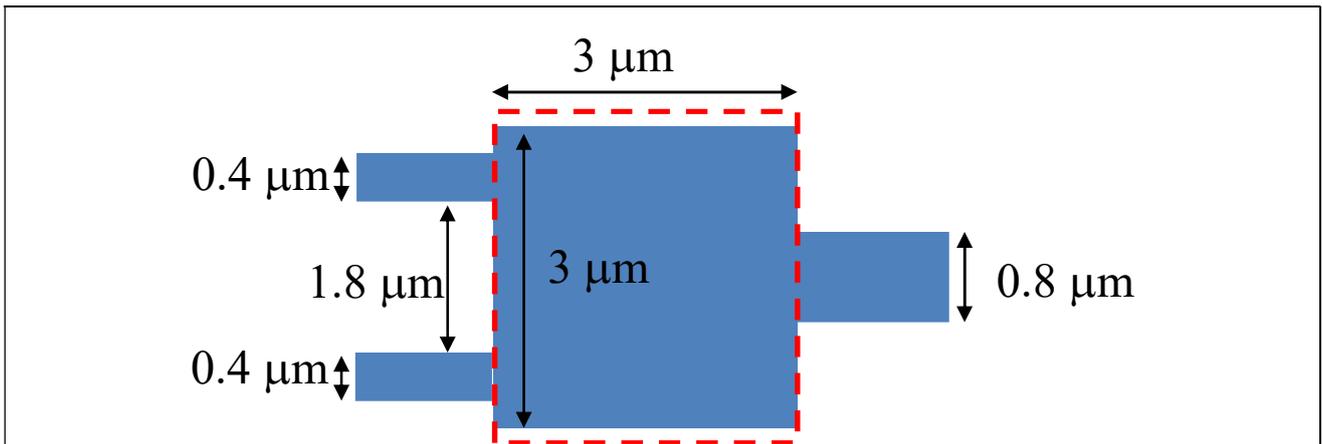


図 6 モザイクモード合分波器の概要図

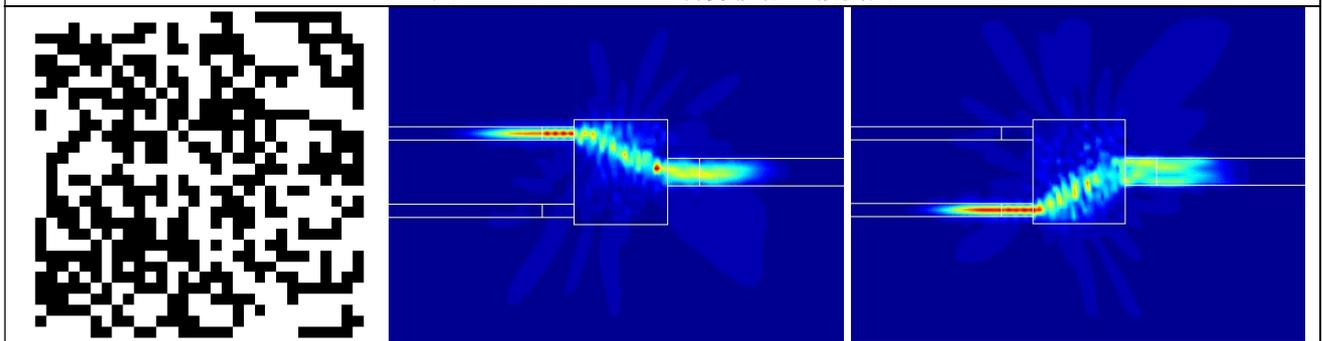


図 7 2 次元等価屈折率構造に対する (左) モザイクパターンと (右) 界分布

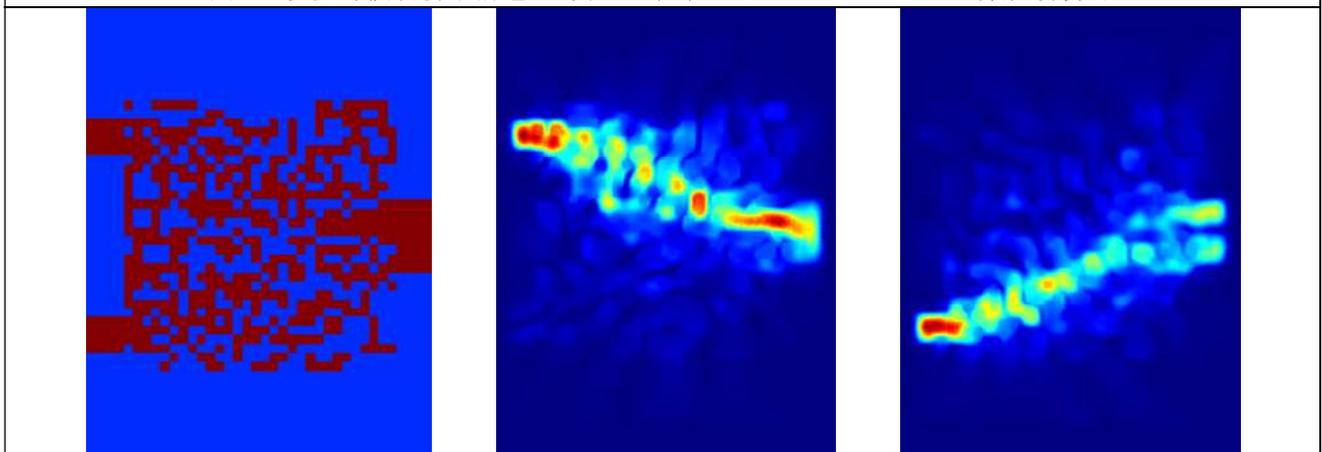


図 8 3 次元等価屈折率構造に対する (左) モザイクパターンと (右) 界分布

### 3-4 モザイク状メタマテリアルによるモード合波器の製造、評価

設計した素子を CMOS ファウンドリーにて試作した。図 9 に試作した素子の概要図とモザイク部の顕微鏡写真を示す。Port1 から入射した光は設計通りであれば、基本モードとしてモザイク部から出力され、port3 に出力される。Port2 から入射した光は、TE<sub>1</sub> モードとしてモザイク部から出力され、モザイク素子の後段に設けた ADC により、基本モードへと変換され、port4 に出力されるはずである。

図 10 に作製した素子の透過スペクトルを示す。Port1 から入射した場合には、port3 への出力が大きく、port2 から入射した場合には port 4 への出力が大きくなっていることがわかり、モード合分波の原理確認を達成した。出力でのモード間クロストークは、両入力共に、10dB 以上となった。挿入損失が 10dB 程度と大きいのが、これは製造プロセスの改善によって低減可能であると考えている。

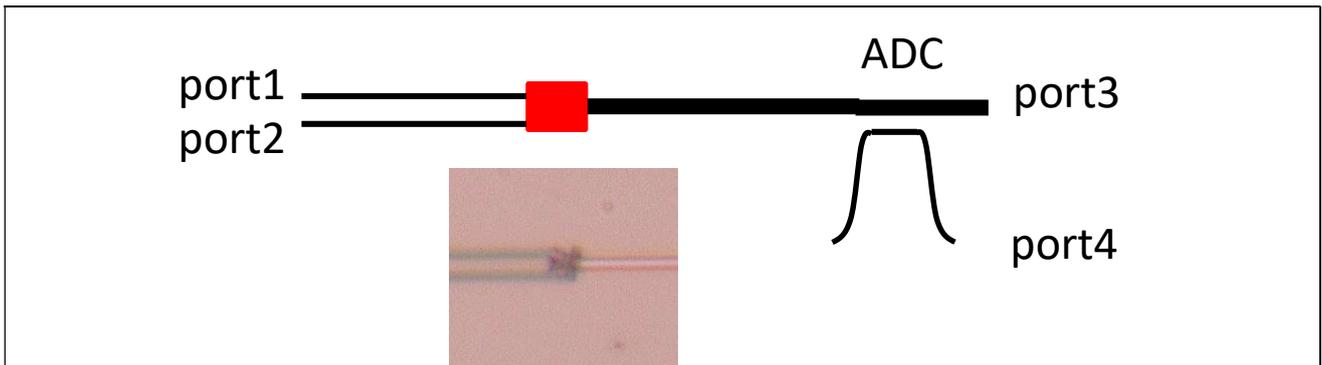


図 9 作製したモード合分波器の概要図とモザイク部の顕微鏡写真

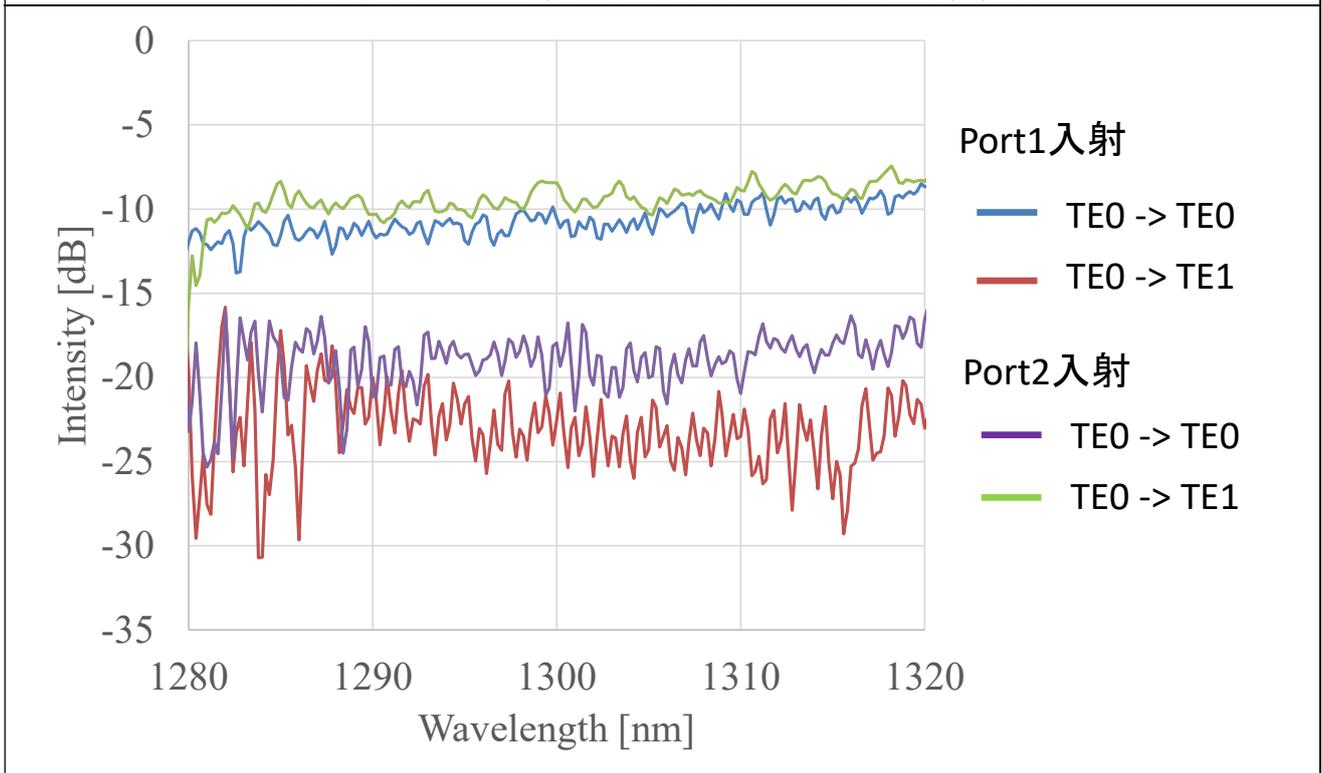


図 10 モザイク状モード合分波器の透過スペクトル

## 4 まとめと今後の展望

光 100/400 ギガイーサネットにおいて必要となる、小型 4 波長合波器の高性能化を目指し、従来の 2 段型合波器で必要であった、1600GHz のフィルタを置き換えるための、波長依存性の小さな、超小型モザイク

状モード合波器、及び、 $TE_1$ - $TM_0$ モード変換器を縦列接続した偏波合波器に関する研究を行った。 $TE_1$ - $TM_0$ モード変換器については、シリコン導波路、リブ型モード変換器を用いることにより、極めて低損失のデバイスを実現した。モザイク状モード合分波器については、2次元等価屈折率、及び、3次元のモザイク素子設計技術を開発し、所望の特性を有するモザイクパターンの特定に成功した。製造した素子は、過剰損失が大きい、モード間クロストークは-10dB以下の、モード合分波の原理確認を達成した。

今後は、製造プロセスの改善による、過剰損失の抑制とともに、 $TE_1$ - $TM_0$ モード変換器とモザイク状モード合分波器の集積による小型偏波合波器の実現が課題である。そして、本研究で開発した小型偏波合波器と、3200GHzのフィルタの集積により、100/400GbE向け小型4波長合波器を実現していく。

## 【参考文献】

- [1] T. Fujisawa, S. Kanazawa, Y. Ueda, W. Kobayashi, K. Takahata, A. Ohki, T. Itoh, M. Kotoku, and H. Ishii, "Low-loss cascaded Mach-Zehnder multiplexer integrated 25-Gbit/s×4-lane EADFB laser array for future CFP4 100GbE transmitter," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.49, no.12, pp.1001-1007, Dec. 2013.
- [2] K. Hassan, C. Sciancalepore, J. Harduin, T. Ferrotti, S. Menezo, and B.B. Bakir, "Toward athermal silicon-on-insulator (de)multiplexers in the O-band", *Optics Letters*, vol. 40, pp. 2641-2644, June 2015.
- [3] L. Chang, Y. Gong, L. Liu, Z. Li, and Y. Yu, "Low-loss broadband silicon-on-insulator demultiplexers in the O-band" *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, pp. 1237-1240, Aug. 2017.
- [4] D. Dai, Y. Tang, and J.E. Bowers, "Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides," *Optics Express*, vol. 20, pp. 13425–13439, 2012.
- [5] B. Shen, P. Wang, R. Polson, and R. Menon, "An integrated-nanophotonics polarization beamsplitter with  $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$  footprint," *Nature Photon.*, vol.9, pp. 378-382, June 2015.
- [6] K. Xu, L. Liu, X. Wen, W. Sun, N. Zhang, N. Yi, S. Sun, S. Xiao, and Q. Song, "Integrated photonic power divider with arbitrary power ratios," *Opt. Lett.*, vol. 42, pp. 855-858, Feb. 2017.
- [7] A. Majumder, B. Shen, R. Polson, and R. Menon, "Ultracompact polarization rotation in integrated silicon photonics using digital metamaterials," *Opt. Express*, vol. 25, pp. 19721-19731, Aug. 2017.
- [8] T. Fujisawa and M. Koshiba, "A frequency-domain finite element method for modeling of nonlinear optical waveguide discontinuities," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 129-131, Jan. 2004.
- [9] T. Fujisawa, S. Makino, T. Sato, and K. Saitoh, "Low-loss, compact, and fabrication-tolerant Si-wire 90° waveguide bend using clothoid and normal curves for large scale photonic integrated circuits," *Optics Express*, vol.25, no.8, pp. 9150-9159, Apr. 2017.

## 〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
A novel Si four-wavelength multiplexer for 100/400GbE using higher-order mode composed of (a)symmetric directional couplers and $TE_1$ - $TM_0$ mode converter	Optics Express	Dec. 2019
Low-loss silicon $2 \times 4 \lambda$ multiplexers composed of on-chip polarization-splitter-rotator and $2 \times 2$ and $2 \times 1$ Mach-Zehnder filters for 400GbE	Optical Fiber Communication Conference (OFC)	Mar. 2020
最適化手法を用いたモード分割多重通信向け光導波路デバイスの研究	電子情報通信学会ソサイエティ大会	Sep. 2019
ニューラルネットワークによるモザイク型モードディバイダの特性学習	電子情報通信学会総合大会	Mar. 2020

2×2/2×1 マツハ・ツェンダーフィルタとオンチップ偏波分離回転子を用いた低損失400GbE 用シリコン2×4 波長合波器の作製	電子情報通信学会総合大会	Mar. 2020
---	--------------	-----------





## 【文字のフォントとサイズについて】

- タイトル  
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 14pt
- 研究者  
左揃え (日) MS明朝 (英) Century 10pt (タブ設定されています)
- 見出し1  
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 11pt
- 見出し2  
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 10pt
- 見出し3  
左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 10pt
- 本文  
左揃え (日) MS明朝 (英) MS明朝 10pt
- 参考文献  
左揃え (日) MS明朝 (英) Century 10pt
- 発表資料  
左揃え (日) MS明朝 (英) Century 9pt
- 注書き  
左揃え (日) MS明朝 (英) MS明朝 10pt