

# シリコンフォトニクスによる光渦多重技術

東京工業大学 雨宮 智宏・西山 伸彦

(国研)産業技術総合研究所 吉田 知也・渥美 裕樹・榊原 陽一

## 1. はじめに

400GbEの本格的な導入に伴って、Dual-polarization (DP)-QPSKやDP-16QAMに代表されるコヒーレント光通信技術が実用レベルに達しており、1Tbit/sを超える信号速度の標準化議論も開始されている。光ネットワークの伝送性能を決定する基盤技術には、図1に示すように「ポーレート的高速化」「多値化」「多重化」の三つがあり、これらを組み合わせることで、超高速光通信が実現される。

図1において、「多重化」軸にはいくつかの種類があり、主なものとして、波長多重 (WDM: Wavelength-division multiplexing) と空間多重 (SDM: Space-division multiplexing) が挙げられる。既に市場導入されているWDMに加えて、マルチコアファイバを用いたSDMも実用化に向けた実環境試験が行われている段階にあり<sup>(1)</sup>、他の多重化技術を組み合わせること

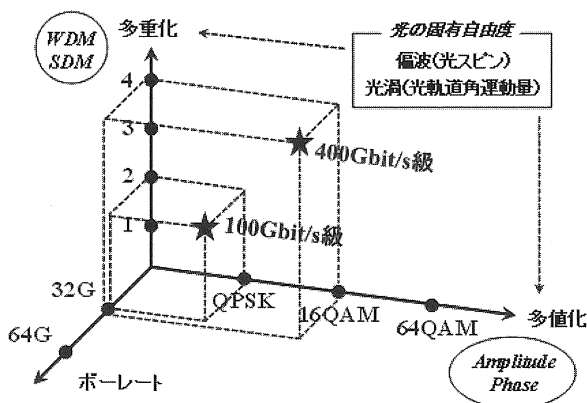


図1 光ネットワークの伝送性能を決定する基盤技術

で700Tbit/s級の伝送が実現されている<sup>(2)</sup>。

上記に加えて、光の二つの自由度である“偏波 (=光のスピン)”と“光渦 (=光の軌道角運動量)”を積極的に利用することで、光ネットワークの伝送性能は更に向上する。この内、偏波については、偏波多重 (PDM: Polarization-division multiplexing) として「多重化」軸に組み込む考え方と、Polarization-switched (PS)-QPSKのような多次元変調方式<sup>(3)~(5)</sup>の一部として「多値化」軸に組み込む考え方の2種類がある。前者は、単純に伝送容量を増やすことに特化しており、後者は伝送容量を増やしつつ受信感度を高めることが可能となる。

もう一方の光渦についても、波面のらせん周期に情報を乗せることで相当の多重化が可能であり、他の多重化技術との親和性にも優れていることから、近年、研究開発が盛んに行われている。既に実用化されている偏波技術と違って基礎研究段階ではあるものの、光渦多重と波長多重を組み合わせることで100Tbit/sの伝送が実現されている<sup>(6)</sup>。また、偏波の場合と同様に、多次元変調方式の一部として「多値化」軸に組み込むことができる可能性も示唆されている<sup>(7)</sup>。

そのような背景のもと、東京工業大学と産業技術総合研究所では、将来的な光渦多重通信に向けて、シリコンフォトニクス技術を用いた光渦多重器の開発を進めている<sup>(8)</sup>。本稿では、その詳細を述べる。

## 2. 素子の要求仕様と概要

光渦多重通信を、現行の光ファイバ通信システムへ適用するために、光渦多重器に求められる要求仕様は以下の3点である。

① 集積チップ化

現在の光渦多重は、その大部分が自由空間データリンクとして研究されている。そのため、光渦の合成分波のために空間位相変調器を用いた比較的大きな光学系 (>1 m<sup>2</sup>) を組む必要があり、光通信システムに用いる系としては現実的ではない。よって、小型化・低コスト化の面からチップ化が必要不可欠となる。

② 既存の多重化技術との併用性

既存の多重化技術との整合性があることが望ましい。特に、波長多重と併用することを考えた場合、Cバンド全域において、光渦多重器の波長依存性が小さいことが必須となる。

③ 各種ファイバシステムに合わせた汎用性

光通信システムにおける多重方式として光渦多重を採用する場合、マルチコアファイバや光渦ファイバ<sup>(9)</sup>による通信が有望であるとされている。このとき、多重器に求められるのは、各種ファイバシステムに合わせた効率的な結合を実現することである。つまり、結合先のファイバ構造に合わせる形で、セルフアラインにチップを作製できることが重要となる。

前述の①～③を考慮して開発されたシリコン系光渦多重器を図2に示す。本素子は、「スターカプラ」および「光渦ジェネレータ」の二つの領域から構成されており、標準的なシリコンフォトリソプロセスで一括作製可能となっている。

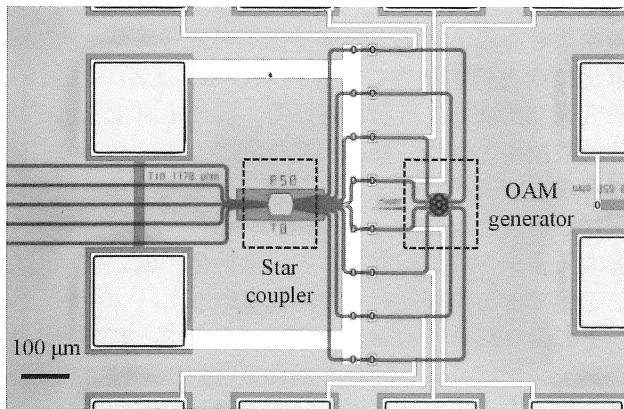


図2 開発されたシリコン系光渦多重器の光学顕微鏡画像

本素子を光渦合波器として用いる場合には、スターカプラの各ポートに多値変調信号を入力する。このとき、入力光はスターカプラにおいて、各ポートに対応した特定の位相差をもった複数の出力光に分波される。その後、それらの位相差を維持したまま、光渦ジェネ

レータから光を取り出すことで、光渦合波が行われる。

光渦ジェネレータは、図3(a)に示すように三次元湾曲したシリコン導波路の出射端が同心円上に並んだ構造となっており、出力光は自動的に空間位相が同心円上に分布した光に変換される。一般的な光渦モードは図4に示すように、等位相面が1波長で $2\pi$ の整数倍 ( $2\pi \times l$ ) になるように分布する ( $l$ は光渦モードのチャージ数)。チャージ数の異なるモードは互いに直交していることから、それらは多重化が可能である。本構造の最大の特徴は、「イオン注入プロセスによる三次元湾曲シリコン導波路」を用いている点であり、これによって低損失で波長無依存性な光渦ジェネレータを実現することができる (三次元湾曲シリコン導波路技術の詳細については、次節を参照のこと)。併せて、本素子の特徴を世界の研究機関と比較した表を付記するので、ご覧頂きたく思う (表1)。

光渦ジェネレータによって作られる光渦モードのチャージ数の限界 (=多重化限界) は、同心円状に並んだ立体湾曲シリコン導波路の本数によって決定される。例えば、図3(a)のようにシリコン導波路の本数が8であった場合、 $l = \pm 8$ では、各導波路間の位相差が  $16\pi/8 = 2\pi$  となってしまう、 $l = 0$ における光渦モードと一致してしまう。そのため、この場合は  $l = -7$  から  $l = +7$  までの最大15多重が限界となる。

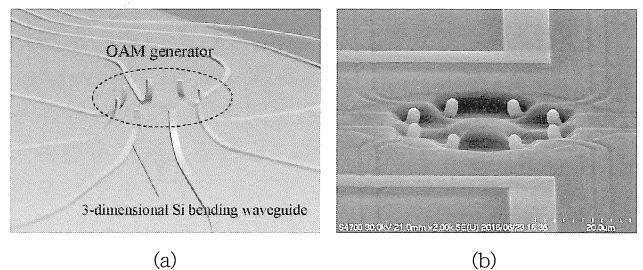


図3 光渦ジェネレータの概要図と走査電子顕微鏡画像

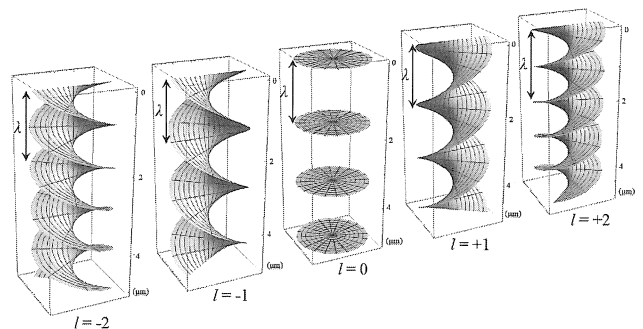


図4 光渦モード  
等位相面が1波長で $2\pi$ の整数倍 ( $2\pi \times l$ ) になるように分布する

表1 光渦多重器における、他の研究機関との比較、位置づけ

研究機関	Ref.	素子構造	材料系	特徴
カリフォルニア大学デービス校 & Bell Lab	[14]	スターカプラ + グレーティングカプラ	Si系光回路	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Si系グレーティングカプラにより、光渦モードを面直出射</li> <li>✓ グレーティングカプラによる波長依存性が顕著</li> </ul>
	[15]	スターカプラ + 3次元導波路	石英系光回路	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ フェムト秒レーザ加工による3次元導波路により、光渦モードを端面出射</li> <li>✓ 波長依存性・損失ともに良好であるが、作製プロセスが特殊</li> </ul>
精華大学	[16]	リング共振器 + グレーティングカプラ	Si系光回路	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Si系リング共振器にグレーティングカプラ付きの導波路を何本も繋ぐことで、光渦モードを面直出射</li> <li>✓ グレーティングカプラによる波長依存性が顕著</li> </ul>
東工大 & 産総研	[8]	スターカプラ + 3次元湾曲導波路	Si系光回路	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Si系3次元湾曲導波路により、光渦モードを面直出射</li> <li>✓ 波長依存性・損失ともに良好であるとともに、CMOS標準プロセスを使用可</li> </ul>

### 3. イオン注入プロセスによる三次元湾曲シリコン導波路技術

シリコンフォトニクスにおいて、シリコン光導波路の端面における光の入出力は通常基板の断面経路になるため、ウェハレベル検査や能動デバイスの実装には大きな制約があった。それに対して、光の入出力を表面方向からできれば大きな利点になり得るが、グレーティングカプラなどの表面光結合器は、波長依存性や偏波依存性が大きいことが問題となっていた。そのようなことから、産総研ではこれまで、イオン注入プロセスを用いてシリコン導波路を垂直湾曲させる手法を提案・実証してきた<sup>(10)(11)</sup>。

手法の詳細は以下のとおりである。まず、BHFウェットエッチングにより、シリコン導波路の先端周囲のSiO<sub>2</sub>クラッドを除去することで、シリコンのみを露出させた片持ち梁構造を形成する。その後、イオン注入を行い、注入中に生じる応力を利用して片持ち梁構造を三次元的に湾曲させる(図5(a))。最後に、湾曲したシリコン導波路を軸にSiO<sub>2</sub>被覆を等方成膜することで、先端部にSiO<sub>2</sub>ドーム構造を形成する(これにより、コリメートレンズ効果が得られる)。本技術を用いることで、5 μmスポット径の先球ファイバ使用時に、偏波無依存、結合損失2.5dB以下の高効率、0.5dB損失増大帯域>130 nmの広帯域結合が得られている<sup>(12)(13)</sup>(図5(b))。

上記技術は、光渦ジェネレータを作製する上で、以

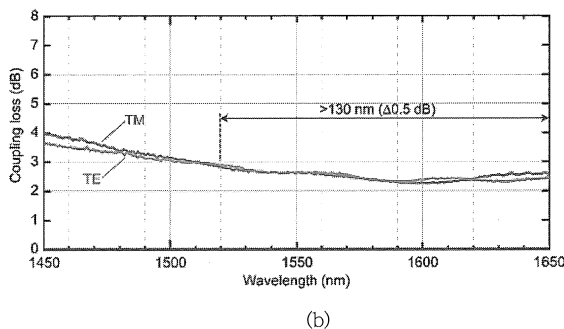
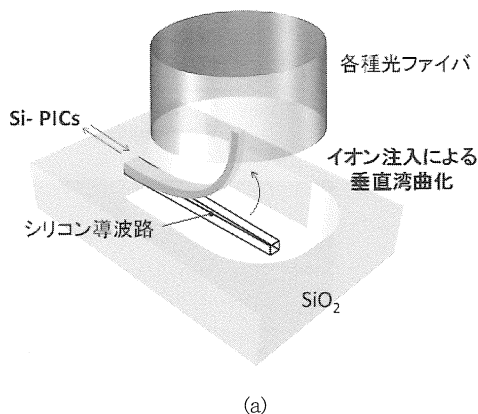


図5 (a)イオン注入プロセスによる三次元湾曲シリコン導波路技術、(b)本技術を用いた結合特性

下の二つの利点を有しており、それぞれが2節の②と③に対応している。

- A 照射プロセスによって、全てのシリコン導波路がセルフアラインで均等に曲がることから、各導波路間の位相ずれや損失差が起きることがない。またサブミクロンオーダーの導波路配置が可能となり、高精度な光渦信号を得ることができる。
- B 照射するイオンの加速電圧、ビーム電流、ドーズ量を変化させることで、湾曲率を精細に制御できることから、様々な結合系へ柔軟に対応可能である。

## 4. 開発したモジュールの評価

前節の技術を、光渦ジェネレータに適用することで、実際に光渦多重器を試作した(図2)。本素子では、5つの光渦を多重化できるように5×8スターカプラを用いるとともに、光渦ジェネレータ径は100 μmに設定した。光渦ジェネレータの走査電子顕微鏡画像を図3(b)に示す。今回は、直線偏光ドーナツビームモードの光渦を多重化できるように設計したが、光渦ジェネレータ内のシリコン導波路の配置を放射状に変更することで、ラゲール・ガウスモードの光渦に適用可能となる。また、スターカプラから光渦ジェネレータに光が伝搬する過程において導波路間の位相差が変わらないよう、各導波路には調整用の熱光学位相シフタを取り付けた。

図6に実装した光渦多重器を示す。ファイバからスターカプラの各導波路への結合はレンズ集光で行っており、出射端からの光渦光はコリメートレンズで平行光とした。また、モジュールの各電極はTiN位相調整器とサーミスタに繋がっている。

本モジュールの基本特性を評価するために、空間位相変調器を用いた光学系から各チャージ数を有する光渦信号光を生成し、それを本モジュールに導入することで、対応するファイバから光が出射されているかどうかを観測した。チャージ数が-2から+2の五つの光渦信号光に対する測定結果を図7に示す。いずれの場合も、入射光渦信号光のチャージ数に対応したファイバポートから光が観測され、5ポート全ての測定結果から、ポート間のクロストークの最低値は23dB

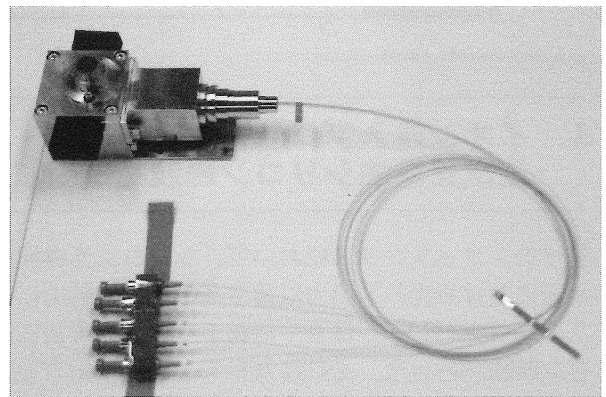


図6 実装した光渦多重器

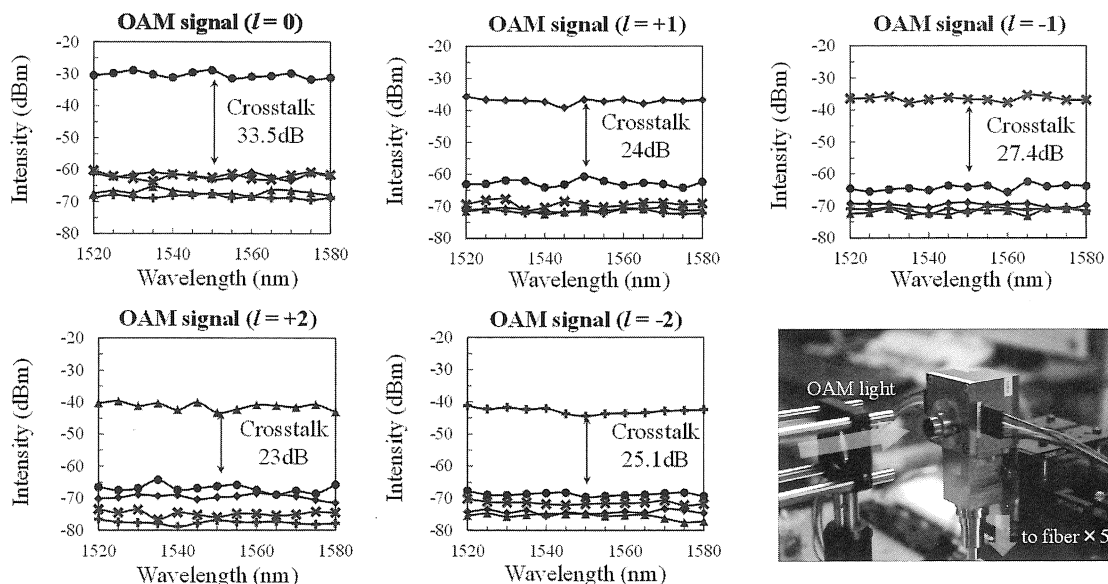


図7 各光渦信号光を本モジュールに導入したときに、各ファイバからの光強度を観測した結果

( $l=+2$ のとき) となった (モジュール自体の挿入損失  $<10$  dB)。

本測定では、入射波長ごとに素子の位相シフトの調整および空間位相変調器の補正を行っている。これは、スターカップラと光渦ジェネレータ間において、各導波路の長さが違うためである。各導波路の長さを同一とし、作製誤差による位相ずれのみを位相シフトで補償する場合はその限りではない。このときは、Cバンド全域で波長無依存な動作を得ることが可能となる。

## 5. おわりに

本研究では、光渦を利用した多重化伝送に注目し、シリコンフォトニクス技術を用いた光渦多重器の開発を行った。特に、イオン照射によるシリコン三次元湾曲技術により、低損失で波長無依存性な光渦合分波の実現にチップレベルで成功し、世界で唯一のモジュール実装された光渦多重器を開発した。開発したデバイスは、五つの光渦信号をクロストーク 25 dB 程度で合分波でき、波長分割多重や偏波多重などの従来の多重方式も併用可能なことから、次世代の大容量データ伝送のコアデバイスとして期待される。

### 謝辞

本研究は、MIC/SCOPE (#182103111)、JST CREST (JPMJCR15N6、JPMJCR18T4)、および JSPS 科研費 (#19H02193、19K15055) の支援によって行われた。

### ＜参考文献＞

- (1) <https://sei.co.jp/id/2019/09/quarterly/file001.html>
- (2) B. J. Puttnam, G. Rademacher, R. S. Luís, T. A. Eriksson, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, K. Maeda, S. Takasaka and R. Sugizaki : "High Data-Rate and Long Distance MCF Transmission With 19-Core C+L band Cladding-Pumped EDFA", *J. Lightwave Technol.* **38**, 123 (2020)
- (3) E. Agrell and M. Karlsson : "Power-efficient modulation formats in coherent transmission systems", *J. Lightwave Technol.* **27**, 5115 (2009)
- (4) D. Che, A. Li, X. Chen, Q. Hu, Y. Wang and W. Shieh : "160-Gb/s Stokes vector direct detection for short reach optical communication", *Proc. OFC 2014*, Th5C.7 (2014)
- (5) S. Ishimura and K. Kikuchi : "Multi-dimensional permutation-modulation format for coherent optical communication", *Optics Express* **23**, 15587 (2015)
- (6) H. Huang, G. Xie, Y. Yan, N. Ahmed, Y. Ren, Y. Yue, D. Rogawski, M. J. Willner, B. I. Erkmen, K. M. Birnbaum, S. J. Dolinar, M. P. J. Lavery, M. J. Padgett, M. Tur and A. E. Willner : "100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength", *Optics Lett.* **39**, 197 (2014)

- (7) 雨宮智宏・他：“光渦変調方式”、特許出願中
- (8) T. Amemiya, T. Yoshida, Y. Atsumi, N. Nishiyama, Y. Miyamoto and S. Arai : "Orbital angular momentum MUX/DEMUX module using vertically curved Si waveguide", *Proc. OFC 2019*, M1C.7 (2019)
- (9) N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner and S. Ramachandran : "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers", *Science* **340**, 1545 (2013)
- (10) T. Yoshida, S. Tajima, R. Takei, M. Mori, N. Miura and Y. Sakakibara : "Vertical silicon waveguide coupler bent by ion implantation", *Optics Express* **23**, 29449 (2015)
- (11) T. Yoshida, E. Omoda, Y. Atsumi, T. Nishi, S. Tajima, N. Miura, M. Mori and Y. Sakakibara : "Vertically curved Si waveguide coupler with low loss and flat wavelength window", *J. Lightwave Technol.* **34**, 1567 (2016)
- (12) Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda and Y. Sakakibara : "Broad-band surface optical coupler based on a SiO<sub>2</sub>-capped vertically curved silicon waveguide", *Optics Express* **26**, 10400 (2018)
- (13) T. Yoshida, Y. Atsumi, E. Omoda and Y. Sakakibara : "Broadband and polarization insensitive surface optical coupler using vertically curved waveguides fabricated with ArF-immersion lithography", *Proc. OFC 2019*, Tu2J.7 (2019)
- (14) T. Su, R. P. Scott, S. S. Djordjevic, N. K. Fontaine, D. J. Geisler, X. Cai, and S. J. B. Yoo : "Demonstration of free space coherent optical communication using integrated silicon photonic orbital angular momentum devices", *Optics Express* **20**, 9396 (2012)
- (15) B. Guan, R. P. Scott, C. Qin, N. K. Fontaine, T. Su, C. Ferrari, M. Cappuzzo, F. Klemens, B. Keller, M. Earnshaw and S. J. B. Yoo : "Free-space coherent optical communication with orbital angular momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit", *Optics Express* **22**, 145 (2014)
- (16) Y. Wang, P. Zhao, X. Feng, Y. Xu, K. Cui, F. Liu, W. Zhang and Y. Huang : "Integrated photonic emitter with a wide switching range of orbital angular momentum modes", *Sci. Rep.* **6**, 22512 (2016)

### 【筆者紹介】

#### 雨宮智宏

東京工業大学 未来産業技術研究所 助教

#### 西山伸彦

東京工業大学 工学院電気電子系 准教授

#### 吉田知也

(国研)産業技術総合研究所 電子光技術研究部門  
フォトニクスシステムグループ 主任研究員

#### 渥美裕樹

(国研)産業技術総合研究所 電子光技術研究部門  
フォトニクスシステムグループ 主任研究員

#### 榊原陽一

(国研)産業技術総合研究所 電子光技術研究部門  
統括研究主幹