

次世代データセンタスイッチ向け90度曲げ 2次元光ファイバアレイ

Two-Dimensional Optical Fiber Array with 90-Degree Bend for
Next Generation Datacenter Switches

熊谷 傳*
Tsutaru Kumagai

北尾 陽輝
Haruki Kitao

中西 哲也
Tetsuya Nakanishi

データセンタ内の消費電力増加に対し、電気と光機能を一体集積することで消費電力を削減可能な Co-Packaged Optics (CPO) スイッチが注目を集めている。CPO スイッチには、低背・高密度・低損失・高信頼性な光接続部品が新たに必要とされる。そのため、90°に小径曲げ加工を施した光ファイバと、2次元配列の精密孔あきガラスプレートを組み合わせた、90°曲げ2次元光ファイバアレイ (2D-FBGE (FlexBeamGuidE)) を開発した。2D-FBGE は、高さ5.5mmの低背性、24心/mmの高密度性、0.5dB以下の低挿入損失、20dB以上の高い偏波保持特性を示し、CPO向け光接続部品に必要な性能を有していることを確認した。

Co-Packaged Optics (CPO) switches are attracting attention for their ability to reduce power consumption by integrating electrical and optical functions to address increasing power consumption in datacenters. CPO switches require new optical connection components with low profile, high density, low loss, and high reliability. For this purpose, we have developed a 90-degree bend two-dimensional optical fiber array (2D-FBGE (FlexBeamGuidE)), which combines a 90° steeply bent optical fiber with a two-dimensional array of precision holes on glass plates. The 2D-FBGE has a low profile of 5.5 mm, high density of 24 fibers/mm, low insertion loss of less than 0.5 dB, and high polarization-maintaining characteristics of over 20 dB. It was confirmed that the 2D-FBGE has the performance required for optical connection components for CPO.

キーワード：光接続部品、Co-Packaged Optics (CPO)、シリコンフォトニクス、FlexBeamGuidE (FBGE)

1. 緒言

通信データ量の継続的な増加に伴い、データセンタ内ネットワークにおけるスイッチの消費電力増大が課題となっている。この課題を解決する技術として、電気と光の機能を一体集積する CPO (Co-Packaged Optics) 技術が注目されている^{(1), (2)}。CPO スイッチは光送受信機能を集積したシリコンフォトニクス (SiPh) 技術^{*1}によって実現することが一般に想定されており、**図1**に示すように、SiPh チップをスイッチ ASIC^{*2}の近くに配置し、電気配線の接続距離を短くすることで、データレートを維持しながら消費電力を削減することが可能である。

CPO スイッチでは、SiPh チップとフロントパネルの間をつなぐためのシングルモード光ファイバ (SMF) 接続部品が必要である。SiPh チップと SMF をコスト効率よく光接続する技術として、グレーティングカップラ (GC) が広く適用されている⁽³⁾が、GC への光ファイバ結合はチップ表面に対して垂直に行われるため、限られた高さスペースでの結合が求められる (**図1**)。そのためには、光ファイバを小径に曲げる必要がある。また、限られた SiPh チップ上で光接続を行うには、光ファイバを高密度に実装した光接続部品が必要とされる。さらに、スイッチ ASIC から発生する熱による影響を避けるため外部光源モジュール (ELS) の活用が検討されているが、ELS からの光を SiPh チップへ効率よく伝搬するために、偏波保持光ファイバ (PMF) を用いる必要がある。

このような背景のなか我々は、CPO スイッチ内の光接続

部品に必要な低背性・高密度性を実現するために、90°に曲げた光ファイバを、2次元配列の精密孔あきガラスプレートに実装した90°曲げ2次元光ファイバアレイ (2D-FBGE (FlexBeamGuidE)) を作製した。本論文では、CPO スイッチ向け光接続部品への要求を整理したのち、要求を満足する2D-FBGE を試作・実証した結果を報告する。

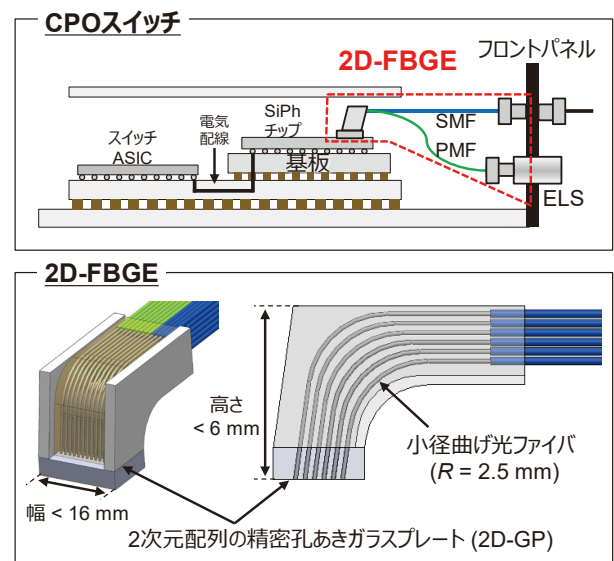


図1 CPO スイッチおよび2D-FBGE の模式図

2. CPOスイッチ向け光接続部品への要求

CPO技術を適用したスイッチでは、スイッチASICをCPOモジュールが取り囲む構成となる。種々の構成が議論されているが、一般にCPOモジュールを8~16個用いる構成が想定されている⁽¹⁾。例えば102.4Tb/sのスイッチの周囲に通信容量6.4Tb/s、レーンあたりの通信速度200Gb/sのDR4^{※3}のCPOモジュールを16個配置する構成を想定すると、各SiPhチップの送受信の実現に64心のSMFの接続が必要となる。加えてELSからSiPhチップへの光を供給するために、8心のPMFが必要となることが想定される。以上から、本検討では合計72心(SMF64心、PMF8心)の光ファイバ接続構成を想定した。これに対し(1)によれば、光ファイバ接続部の最大許容幅は16mmであり、4.5(=72/16)心/mm以上の高密度な光ファイバ実装が必要となる。また、同じく提案書(1)によれば、光ファイバ接続部の最大許容高さは6mmである。そのため、**図1**に示した表面結合型のGCを用いるSiPhチップへの光ファイバ結合には、曲げ半径 $R=2.5\text{mm}$ といった小径に曲げた光ファイバが必要となる。しかし一般に普及している外径 $125\mu\text{m}$ の光ファイバを、曲げ角度 90° 、 $R=2.5\text{mm}$ で曲げた場合、2%を超える曲げ応力が生じ、5年以内に破断する確率は100%と試算され、信頼性上の重大な懸念となる^{(4)、(5)}。

そこで我々は、以上の課題を解決する6.4Tb/s以上のCPOモジュールに適した光接続部品として、72心を実装し高さ6mm以下を実現する高密度光接続部品の創出を目標とした。

まず4.5心/mm以上の高密度光ファイバ実装を実現するため、高精度な孔位置精度を有する2次元配列の精密孔あきガラスプレート(2D-GP)⁽⁶⁾を使用した、2次元光ファイバアレイを採用した。72心の光ファイバを、0.25mmピッチ12心×6列に配列した2D-GPで位置決めすることで、目標の4.5心/mmを大幅に上回る24心/mmを実現できる。これはV溝を用いた1次元配列の光ファイバアレイでは達成困難であり、将来の必要帯域の伸びを十分サポートできる高密度性を実現できる。加えて、2D-GPは①ガラス製であるためSiPhチップとの熱膨張係数のマッチングが良い、②紫外線硬化型樹脂が光ファイバアレイとSiPhチップの接着に用いることができる、③周囲温度が 110°C に達するスイッチASIC周辺での耐熱性の観点からも適している、といったメリットがある。

また6mm以下の高さの実現に向けては、我々が開発した「応力緩和曲げプロセス」(以降、応力緩和曲げ)の適用を検討した⁽⁵⁾。応力緩和曲げを用いて $R=2.5\text{mm}$ の小径曲げを施した光ファイバを2D-GPへ実装することで、高い信頼性を有する2D-FBGEの実現が期待できる。一方、今回開発した2D-FBGEでは、ELSとの接続に向けPMFを内蔵する必要がある。このため、まずPMFへの応力緩和曲げの適用性について検証を行った。

3. 小径曲げPMF

3-1 PMFの小径曲げ加工

PMFはコアの両脇に存在する一対の応力付与部(SAP)がコアに複屈折を与えることにより偏波保持特性を有するため、光ファイバ内の応力を熱で緩和する応力緩和曲げの適用によりその性能劣化が懸念される。そこで、各種曲げ手法と光ファイバ内部に加わる応力の関係を調査した。SMFおよびPMF($125\mu\text{m}$ 、 $R=2.5\text{mm}$)に対し、物理的に光ファイバを曲げる機械曲げ、および、応力緩和曲げを施した。偏光顕微鏡を用いてガラス内部の残留応力を可視化した結果を**図2**に示す。機械曲げの場合、SMFとPMFの両者において、曲げ部分全体に曲げ応力が確認されるのに対し、応力緩和曲げの場合、曲げ応力が緩和されていることがわかる。一方、PMFのコア周囲には応力緩和曲げ後も応力の残留が観測されることから、曲げ応力のみを緩和しつつ、コアにかかる複屈折を残すことが可能であることがわかった。以上より、応力緩和曲げを施したPMFは、高い信頼性と偏波保持特性の両立が期待できる。

一方、応力緩和曲げプロセスにおいてPMFにねじれが加わると、直交偏波間のクロストークが発生し、偏波保持特性の指標である偏波消光比(PER)が劣化することが懸念される(**図3**)。そこで、故意にねじれを加えたPMFに対し熱処理を行いPERへ与える影響について調査した。なお、曲げの影響を排除するため、直線状のPMFにねじれを与えながら熱処理を施すことでねじれによる影響のみを調査した。PERは直交偏波間の光強度比(式(1))から算出した。

$$\text{PER} = 10 \log(P_{\max}/P_{\min}) \dots \dots \dots (1)$$

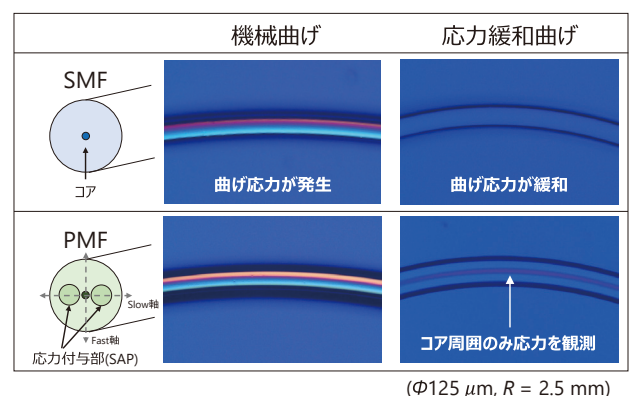


図2 偏光顕微鏡画像(応力発生部が色の变化として確認可能)

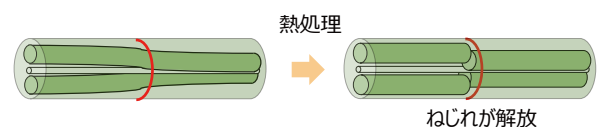


図3 熱処理時のPMFねじれの状態

ここで、 P_{max} 、 P_{min} はそれぞれ PMF 内を伝搬後の光の最大強度と最小強度を表す。

図4に試験結果を示す。ねじれ角度が増加するにつれPERは劣化し、マリユスの法則⁽⁷⁾と一致した。つまり、PER劣化は角度ずれのみによって説明することができ、応力緩和プロセスそのものによる劣化はないことを確認した。

3-2 小径曲げPMFの光学特性

小径な曲げ半径においても低損失を維持するため、低曲げ損失特性を有するPMFを準備し、 $R = 1.5 - 3.5\text{mm}$ の範囲で応力緩和曲げを実施し、曲げ損失 (BL) およびPERを評価した。この際、上述の知見からPMFのねじれを十分に抑制したうえで、曲げ方向を2つのSAPを光ファイバの曲げ平面に対して平行に配置した0°曲げ方向、および、垂直に配置した90°曲げ方向の両者に対して行った。

BLは応力緩和曲げ前後の透過光強度の差から求めた。表1にBLの測定結果を示す。全ての曲げ半径、曲げ方向においてBLは0.1dB以下の低損失を示した。

図5 (a) は、0°曲げ方向におけるPERの測定結果を曲げ半径Rに対してプロットしたグラフである。R = 2.2mmでは25dB以上の高いPERを示した。一方、図5 (b) に示した90°曲げ方向の場合、PER = 10~15dBへ低下し、PERの曲げ方向依存性を確認した。Near Field Pattern (NFP) 像を確認した結果 (図5中に表示)、0°曲げ方向では、NFP像は同心円状であり、シングルモード伝搬を維持しているのに対し、90°曲げ方向では高次モード伝搬に由来すると考えられる異形を示した。90°曲げ方向の場合、負の屈折率を持つSAPが曲げ平面上になく、コアへの光閉じ込めが相対的に弱いことから高次モードが励振されやすく、偏波保持特性が劣化したと推定される。

以上の結果より、PMFを0°方向に曲げた場合、高信頼性、0.1dB以下の低曲げ損失、25dB以上の高い偏波保持特性を両立できることを確認した。

4. 2D-FBGEの作製と評価

4-1 2D-FBGEの作製

72心の光ファイバを実装した2D-FBGEを作製した。図6は、概略図である。2D-FBGEは、2D-GP、12心の応力緩和曲げを適用した光ファイバ (曲げ半径R = 2.5mm)、光ファイバ保護部、および24心MTフェルール⁽⁸⁾から構成されている。2D-GPは12×6配列、ピッチは0.25×0.3mmとした。またSiPh接続界面での反射を抑制するために孔角度は8°とした。作製したサンプルの全高は5.5mmであり

表1 曲げ損失測定結果

曲げ半径 [mm]	BL [dB] (0°方向)	BL [dB] (90°方向)
1.5	0.03	0.08
2.5	0.01	0.01
3.5	0.00	0.04

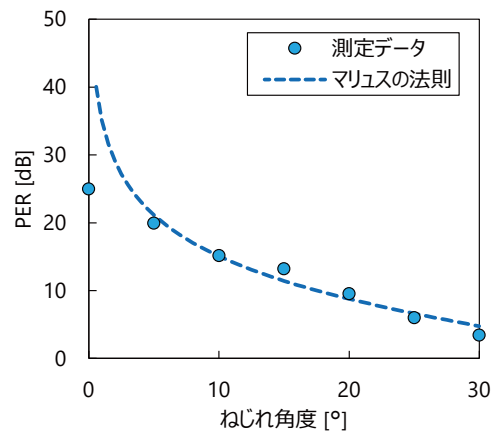


図4 ねじれ試験の結果

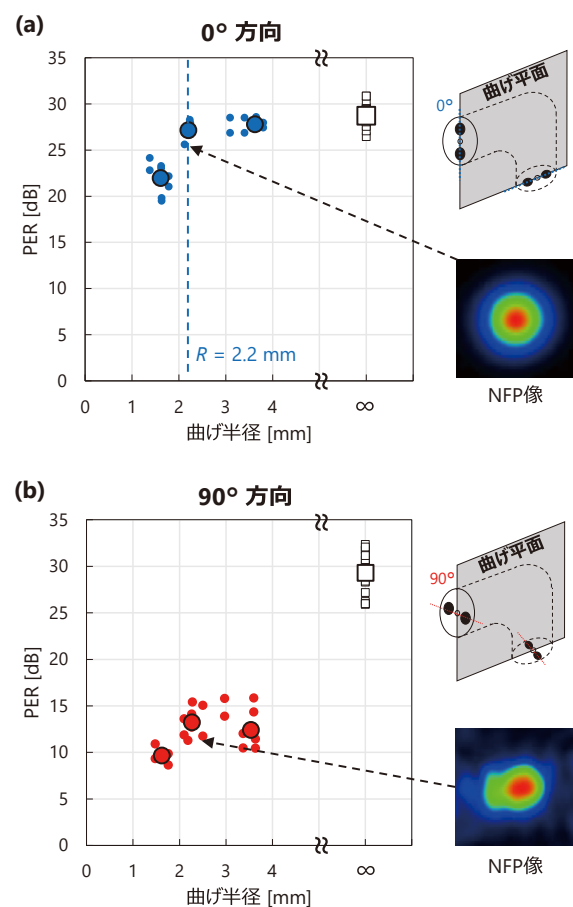


図5 (a) 0°曲げ方向と (b) 90°曲げ方向における PERの曲げ半径依存性

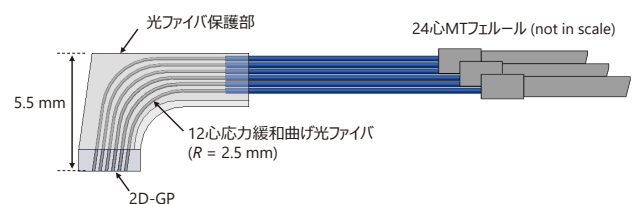


図6 72心2D-FBGEの概略図

許容高さ<6mmの要求を満たしている。72心の光ファイバは3mm幅に配置されているため、光ファイバ密度は24(=72/3) 心/mmとなる。これは、従来の0.25mmピッチの1次元光ファイバアレイと比較して6倍高密度である。この密度は、列や行の数を増やすことでさらなる拡張が可能である。

図7は、64心のSMFと8心のPMFを実装した2D-FBGEの端面写真である。GCの受光可能な偏光軸とのミスマッチによる過剰損失につながるPMFの回転角度のズレは±3°以下であった。また、MTフェルール内のPMFの回転角度のズレも±3°以下であった。

4-2 2D-FBGEの光学特性の評価

2D-FBGEとSiPhチップを接続した場合の損失を見積もるため、挿入損失(IL)と光ファイバコアの位置偏心を測定した。

図8は、ILの測定結果を示したものである。この測定では、2D-FBGEの端面にSMFを調心し、MTフェルール側の光強度をパワーメータで検出した。全心のILは0.5dB以下であり、平均値は0.33dBだった。

次に、光ファイバコア位置偏心を測定した。図9に測定値のヒストグラムを示す。平均値、97パーセンタイル*4および最大コア位置偏心はそれぞれ、0.5、1.4および2.1μmだった。ここで、GCとの結合損失(CL)を推定するために、以下の式(2)を使用した⁽⁹⁾。

$$CL = -10 \log \left(\frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right)^2 \exp \left(-\frac{2s^2}{w_1^2 + w_2^2} \right) \dots (2)$$

2w₁および2w₂は光ファイバ、およびGCのモードフィールド径(MFD)である。GCのMFDは一般にSMFのMFD(=8.6μm)と一致するように設計されているため、2w₁および2w₂ともに8.6μmとして計算した。sは、光ファイバとGCの間の位置偏心である。通常、GCは非常に高精度で作製されており、位置偏心は無視できるほど小さいと考えられるため、sの値は測定した光ファイバコアの位置偏心の値とみなすことができる。以上の仮定に基づき、CLを計算し、図9の第2軸に示した。sが平均値の0.5μmの場合、CLは0.06dBである。また、97パーセンタイルの1.4μmでは、CLは0.46dBである。コア位置偏心の主な原因は、ガラス孔の直径のずれと孔の位置の不正確さによるものである。2D-GPの製造プロセスの高精度化により、さらなるCL低減が期待できる。

次に、作製した2D-FBGEにおけるPMFの偏波保持性能を評価するためPERを測定した。一般に、SiPhチップのGCは1つの偏光しか受光できないため、PERの低下はPMF/GC結合界面で過剰損失(EL)をもたらす。ELは、PERを用いて以下の式で見積もることができる。

$$EL = 10 \log(1 + 10^{-PER/10}). \dots (3)$$

目標のELを0.1dB以下とすると、PERは16dB以上必要

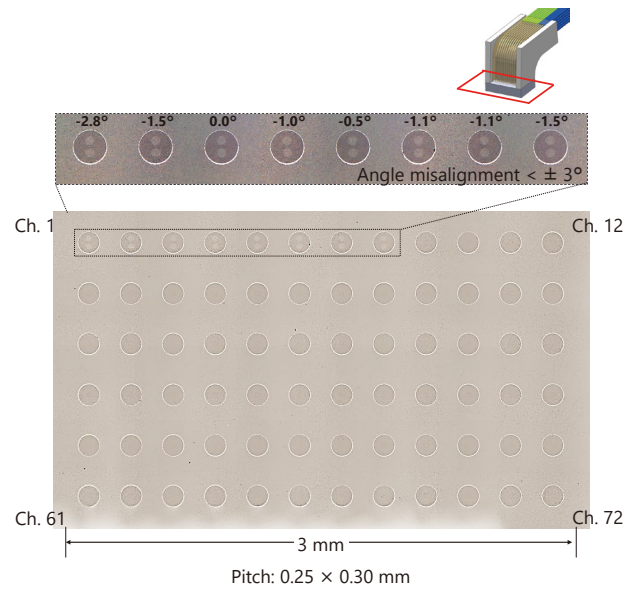


図7 2D-FBGEの端面写真

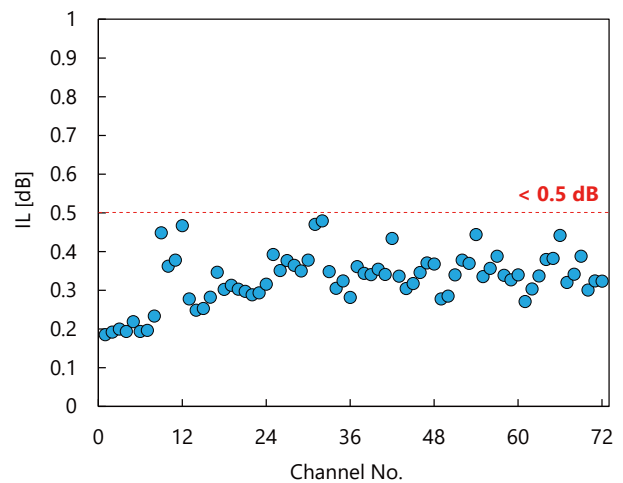


図8 IL測定の結果

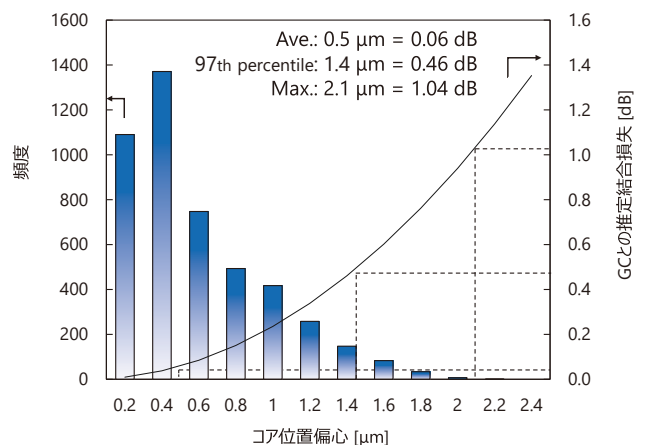


図9 コア位置偏心の測定値と、GCとの推定結合損失

となる。PERの測定結果を図10に示す。結果から、8心のPMFすべてにおいてPERが20dB以上であり、2D-FBGEが高い偏波保持性能を有し、0.1dB以下のELが期待できることがわかる。

4-3 信頼性評価

72心2D-FBGEの基本的な信頼性を確認するため、加速試験として-45℃～85℃×100サイクルのヒートサイクル試験と、85℃/85%RH×100時間の湿熱試験を行い、光ファイバ断線がないことを確認した。また、スイッチASIC周辺での使用を想定し、110℃×168時間の初期試験を実施し、光ファイバ断線、光学特性の劣化が生じないことを確認しており、今後継続試験予定である。

以上より、2D-FBGEは、高信頼性を有し、SiPhチップとの高密度・低損失な結合が可能な光接続部品として期待できる。

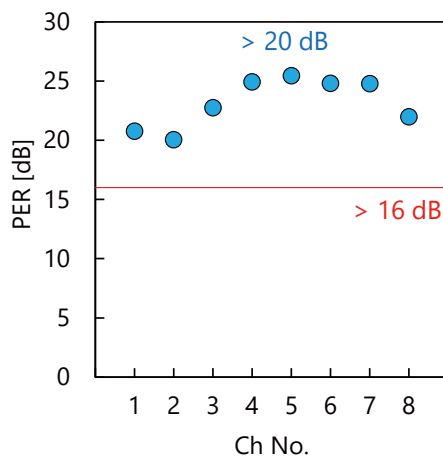


図10 PER測定の結果

5. 結 言

次世代データセンタで使用されるCPOスイッチ向けの、高密度光接続部品として72心2D-FBGEを実証した。応力緩和曲げ適用により、高信頼性、低損失、偏波保持特性を有するPMFの小径曲げ加工技術を確立し、PMFの曲げ方向を0°方向にすることで25dB以上の高いPERと0.1dB以下の低曲げ損失を両立した。作製した2D-FBGEは、挿入損失0.5dB以下、コア位置偏心平均0.5μm、PER>20dB以上を達成しており、CPO等の高密度、省スペース性を要とする応用に対し、実用的な光接続部品として活用が期待される。

用語集

※1 シリコンフォトリソ技術

シリコンフォトリソ (SiPh) は、半導体として広く使われるシリコンに、光送受信機能をシリコンチップ上に集積する技術であり、従来の光トランシーバと比べ、部品点数を削減可能なことから、経済性の高い光トランシーバ作製に有利な特徴を持つ。

※2 ASIC

Application Specific Integrated Circuit：電子部品の種類の1つで、特定の用途向けに複数機能の回路を1つにまとめた集積回路の総称。

※3 DR4

光の送受信を行う光トランシーバの規格の1つ。送受信に光ファイバを4対 (合計8心) 使用する。

※4 パーセンタイル

データを小さい順に並べ、任意の%に位置する値を示す。

・FlexBeamGuideEは住友電気工業株の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) CPO JDF, "Co-Packaged Optical Module Discussion Document," V1.0 (2019)
- (2) A. Bechtolsheim, "Scaling the Cloud Network," Arista Networks Inc. OCP (2018)
- (3) P. D. Dobbelaere, S. Abdalla, S. Gloeckner, M. Mack, G. Masini, A. Mekis, T. Pinguet, S. Sahni, D. Guckenberger, M. Harrison, and A. Narasimha, "Si Photonics Based High-Speed Optical Transceivers," European Conference and Exhibition on Optical Communication, We.1.E.5 (2012)
- (4) M. Tachikura, Y. Kurosawa, and Y. Namekawa, "Improved theoretical estimation on mechanical reliability of optical fibers," Proceedings of SPIE, vol.5623, 2005, pp.622-629. DOI: 10.1117/12.577302
- (5) T. Kumagai, T. Nakanishi, T. Hayashi, K. Takahashi, M. Shiozaki, A. Kataoka, T. Murakami, and T. Sano, "Low-Loss and Highly Reliable Low-Profile Coupler for Silicon Photonics," Optical Fiber Communication Conference 2019, W2A.2 (2019)
- (6) Nicholas Psaila, "3D laser direct writing for advanced photonic integration," Proceedings of SPIE 10924, Optical Interconnects XIX, 109240U (2019)
- (7) M. Born and E. Wolf, Principle of Optics. Cambridge University Press, New York, 7th ed. (1999)
- (8) IEC 61754-5, IEC 61754-7
- (9) D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splice," Bell System Technical Journal, vol.56, pp. 703-718 (1977)

執 筆 者

熊谷 傳* : 光通信研究所
博士 (学術)



北尾 陽輝 : 光通信研究所



中西 哲也 : 光通信研究所 グループ長



* 主執筆者