



シリコンフォトニクスチップ接続用 90度曲げ光ファイバアレイ

Optical Fiber Array with 90-Degree Bend for Silicon Photonics Chip Coupling

熊谷 傳*
Tsutaru Kumagai

松下 通生
Naoki Matsushita

水戸瀬 雄一
Yuichi Mitose

金内 靖臣
Yasuomi Kaneuchi

片岡 敦
Atsushi Kataoka

中西 哲也
Tetsuya Nakanishi

近年、データセンタ向けのシリコンフォトニクス (SiPh) 型光トランシーバの市場が急速に拡大している。我々は、SiPh 型光トランシーバに必要不可欠な光接続部品として、90度曲げ光ファイバアレイ (FlexBeamGuideE、以下FBGEと略する) を開発した。FBGEは、曲げファイバに応力緩和プロセスを適用することで、高さ3.8mm以下のトランシーバモジュール内に収容可能な省スペース性と、0.5dB以下の低損失性を両立したものであり、高い信頼性を有するSiPhチップ向け光接続部品であることを確認したので紹介する。

Recently, the demand for silicon photonics (SiPh) optical transceivers for data centers has been increasing rapidly. In order to address this situation, we have developed FlexBeamGuideE (FBGE), an optical connection device indispensable for SiPh chips. The FBGE is an optical fiber array with a 90-degree bend, formed using state-of-the-art stress-free fiber bending technology. The developed FBGE is suitable for use in SiPh optical transceivers because of its compact nature with an overall height of less than 3.8 mm, low attenuation loss of less than 0.5 dB, and high reliability.

キーワード：省スペース光ファイバアレイ、シリコンフォトニクス、光接続部品

1. 緒言

インターネットサービスの進展に伴い、情報処理量の増大するデータセンタ (DC) 向け光トランシーバの需要が急激に高まっている⁽¹⁾。DC向け光トランシーバには、高い経済性が求められるが、このような課題を解決する手法として、CMOSプロセスを利用し光送受機能を1チップに集積することが可能なシリコンフォトニクス (SiPh)^{*1}技術が大きな注目を集めている。SiPh技術ではSiPhチップと光ファイバの間で効率的に光を結合させる手法として、グレーティングカップラ (GC) が広く採用されている⁽²⁾。GCは、SiPhチップからの出力光と光ファイバのモードフィールド径 (MFD)^{*2}を一致させ結合損失を低減しつつ、SiPhチップ表面方向に垂直に光を出力する手法であり、ウェハ状態でSiPhチップの性能評価が可能であることから、経済性の高い光ファイバ結合法として知られる。しかし図1に示すように、トランシーバモジュール内の限られた高さの中で垂直に光ファイバと結合させるためには、急峻に曲げた光ファイバ部品が必要となる。DC向けで主に採用されるトランシーバ筐体の業界標準の一つであるQSFP^{*3}内で、この光ファイバ部品に求められる全体の高さは、一般に4mm未満であり (図1 (b))、このとき光ファイバを曲げ半径 $R=2.0\text{mm}$ から 2.5mm に曲げる必要がある。しかし、このような急峻な曲げを光ファイバに与えると、曲げ応力による破断、及び、曲げ損失が課題となる。

以上の課題のもと、我々は厳しい曲げ環境下において

も、高信頼性と低損失性を有する90度曲げ光ファイバアレイ (FlexBeamGuideE、以下FBGEと略する) を開発した。本稿では、省スペース性、低損失性、高信頼性を両立する

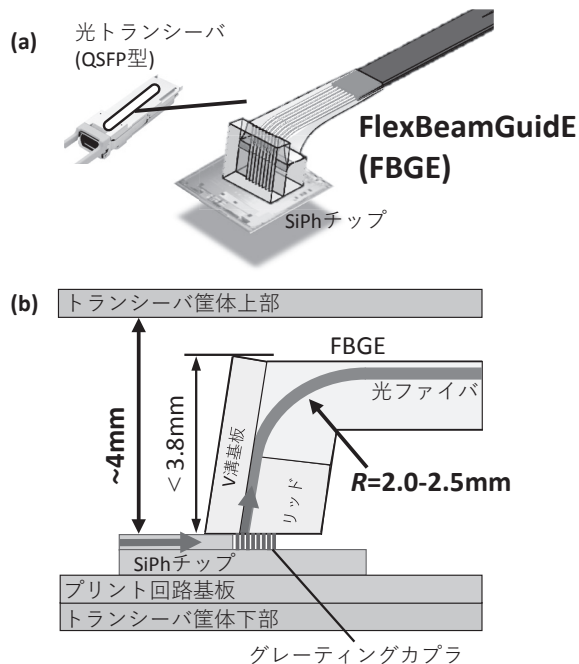


図1 (a)QSFP型光トランシーバと内部のFBGE (b)トランシーバ内で光ファイバ結合に許される空間の概念図

ための各技術を紹介し、開発したFBGEがSiPh型光トランシーバに適した光接続部品であることを示す。

2. 急峻曲げ光ファイバの高信頼化

光ファイバを曲げると、ガラス表面の微細な傷などに応力が集中し破断に至るモード、及び更に急峻な曲げ応力を与えた場合にガラス本来の強度により破断に至るモードの2つの破断モードが主に存在する。このような急峻な曲げ応力までを考慮した光ファイバの破断確率 F は、以下の式(1)で表される⁽³⁾。

$$F = 1 - \exp \left[-\frac{\pi R}{2} N_p \left\{ \left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^n \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\frac{m_1}{n-2}} \right) - 1 \right\} + \left(\frac{\varepsilon_p^n t_p}{k_{02}} \right)^{\frac{m_2}{n-2}} \left\{ \left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^n \left(\frac{t}{t_p} \right)^{\frac{m_2}{n-2}} \right) - 1 \right\} \right] \dots\dots (1)$$

図2は、式(1)を元に、90度曲げ(1/4周の円)時の5年以内破断確率 F を求めた結果である。尚、計算に用いた各パラメータは表1に示した。この結果より、曲げ半径 R が小さ

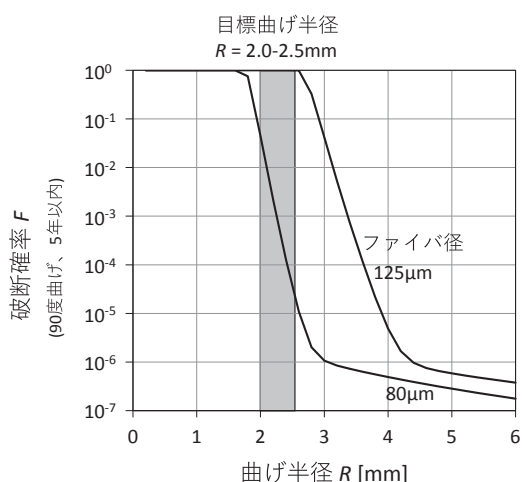


図2 曲げ半径 R に対する破断確率 F の計算値

表1 計算に用いた各パラメータの数値

N_p	10^{-6}
n	20
m_1	3
m_2	30
ε_p	0.01
t_p	0.075
k_{02}	10^{26}

く、強い曲げ応力を与えると F は急激に増加することがわかる。既存のガラス外径125 μ mの光ファイバでは、 $R=2.0-2.5$ mmで $F\sim 100\%$ と破断に至る危険性が極めて高い。また同じ R でもガラス外径が細径なほど曲げ応力は低下するが、ガラス外径80 μ mの光ファイバでも $F\sim 5\%$ と試算され信頼性上の大きな課題となる。

この課題に対応するため、我々は曲げ部に生じる応力を除去する応力緩和プロセスを新たに開発導入した。図3は、曲げ応力によるガラス内部の複屈折を着色により可視化できる偏光顕微鏡で、ガラス外径125 μ mの光ファイバを撮像した結果を示す。図3(a)は、光ファイバに対し機械的な曲げを与えた場合の撮像結果であり、曲げ部に応力が生じていることが確認できる。図3(b)は、応力緩和プロセスを適用した結果であり、 $R=2$ mmの曲げ状態でもガラス内部の応力が消滅していることがわかる。このように応力緩和プロセスを適用した曲げファイバを用いることにより、 $R=2.0-2.5$ mmといった急峻な曲げ形状でも、光ファイバに掛かる応力を実質的に0とすることができ、後述する信頼性試験において高い信頼性を得ることができる。

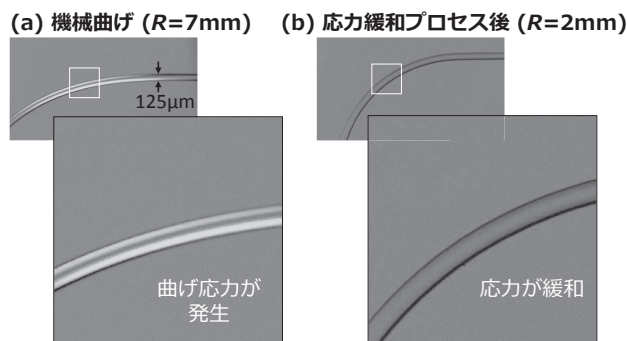


図3 偏光顕微鏡写真(応力発生部が色の变化として確認可能)
(a)機械曲げ、(b)応力緩和プロセス後

3. 曲げ損失の低減

3-1 低曲げ損失光ファイバ

急峻な曲げを光ファイバに与えた場合、機械的な信頼性だけでなく、光学的な曲げ損失も課題となる。そこで我々は、汎用的なステップ型の屈折率分布を有するシングルモードファイバ(SMF)と比べ、小さい曲げ損失を得ることができるトレンチアシスト型の屈折率分布(図4)を有する低曲げ損失光ファイバ(BIF)を採用した。作製したBIFの代表的な特性を表2に示す。SiPh型光トランシーバで広く用いられる波長1310nmにおいて、 $R=2$ mmの90度曲げ損失は0.06dB以下と極めて低い値が得られ、その他全ての特性についても、国際標準のITU-T G.657.B3に準拠することを確認した。

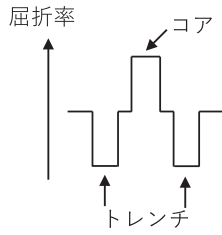


図4 トレンチアシスト型の屈折率分布の概念図

表2 低曲げ損失ファイバ (BIF) の光学特性測定結果

波長 [nm]	1310	1550
MFD [μm]	8.5-8.7	9.5-9.7
伝送損失 [dB/km]	0.333-0.340	0.201-0.212
曲げ損失 [dB/turn]	$R=10\text{mm}$	≤ 0.03
	$R=5\text{mm}$	≤ 0.15
	$R=2\text{mm}$	≤ 0.24
	$R=2\text{mm}$ (1/4turn)	≤ 0.06
ケーブルカットオフ波長 [nm]	1205-1225	

3-2 光ファイバの曲げ形状解析

光ファイバに急峻な曲げを与えると、その摂動により基底モードから高次モードへの結合が発生することが知られており、これによりSiPhチップとの結合損失が増大する懸念がある。そこで前章で示したBIFを前提に、SiPhチップとの低損失な結合が可能な光ファイバの曲げ形状を明らかにすべく、ビーム伝搬法 (BPM) による電磁場解析を行った。目標曲げ形状となる $R=2\text{mm}$ 付近での挙動を明らかにするため、長手方向の位置 z 、曲率 $C (=1/R)$ 、曲率変化率 dC/dz をパラメタとして計算を行った。具体的には図5(a)に示すように、条件 (I) ~ (III) の C の最大値は全て 0.5mm^{-1} ($R=2.0\text{mm}$) とし、曲率変化率の最大値

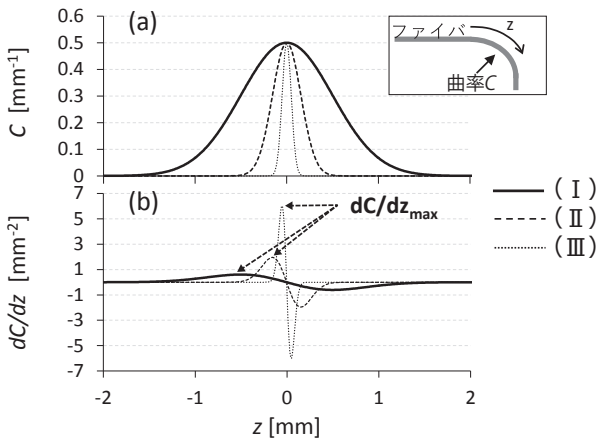


図5 BPM解析に用いた光ファイバの曲率条件 (a) 曲率 C 、(b) 曲率変化率 dC/dz

dC/dz_{max} をそれぞれ (I) 0.61mm^{-2} 、(II) 1.96mm^{-2} 、(III) 5.99mm^{-2} と仮定した (図5 (b))。図6は条件 (I) ~ (III) についてBPM計算で得られた伝搬中の光の電界分布の側面図と伝搬後の電界分布の断面図である。尚、この計算では各曲げ形状と等価な屈折率分布を持つ直線導波路を仮定している。 dC/dz_{max} が小さい条件 (I) では基底モードが支配的であることを示す単峰型の電界分布が曲げファイバ伝搬後も維持されていることが確認できるが、 dC/dz_{max} が大きい条件 (III) では高次モードの励振を示す電界分布の乱れが発生することが確認できる。SiPhチップ上のGCは一般に汎用SMFとの結合損失が小さくなるように設計されており、高次モードの発生はSiPhチップとの結合損失の増加につながる。

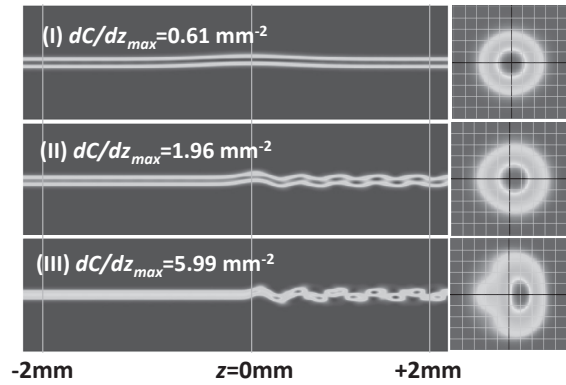


図6 BPM計算結果

図7は、各 dC/dz_{max} 条件で得られた電界分布とSMFの基底モードとの結合損失を解析した結果である。このように dC/dz_{max} とSMF結合損失には概ね線形的な関係があり、本検討で採用したBIFの場合、SMFとの結合損失を 0.5dB 以下とするためには、 dC/dz_{max} を 2mm^{-2} 以下とする必要があったことがわかった。

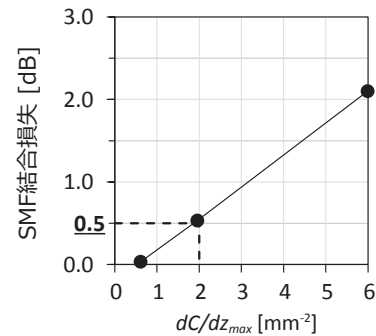


図7 dC/dz_{max} に対するSMFとの結合損失

4. FBGEの各種特性

以上の検討結果を元に、図8に示すMTコネクタ付き8芯FBGEを作製し各種特性を評価した。作製したFBGEの高さは3.8mm以下であり、トランシーバ筐体内に収容可能な省スペース性を有している。図9は、応力緩和プロセスを用いて作製した曲げファイバの曲率Cおよび曲率変化率 dC/dz の代表例である。Cの最大値は $0.4\text{--}0.5\text{mm}^{-1}$ ($R=2.0\text{--}2.5\text{mm}$) であり、目標の曲げ半径が得られている。また、 dC/dz は曲げ区間全域に渡り $\pm 2\text{mm}^{-2}$ 以内であり、SMF結合損失は0.5dB以下が期待される。

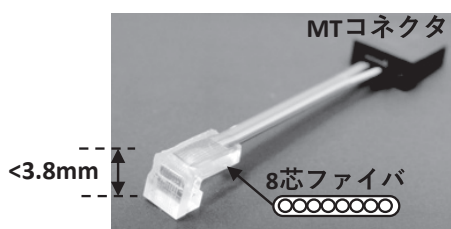


図8 MTコネクタ付き8芯FBGEの写真

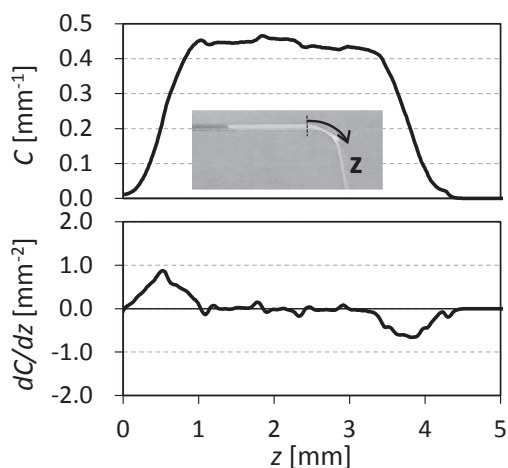


図9 作製した曲げファイバの曲率Cおよび曲率変化率 dC/dz の測定値

GCとの結合損失を模擬評価するため、図10に示すようにFBGEの端面へSMFを実装したファイバアレイを調芯し、結合損失（以下、SMF結合損失）を測定した。図11に $N=1,224\text{ch}$ ($8\text{ch} \times 153\text{サンプル}$) に対する測定結果のヒストグラムを示す。本結果は、図10に示すMTコネクタ部の接続損失も含めた損失であり、FBGE全体の挿入損失として $\leq 0.5\text{dB}$ を確認した。以上よりFBGEはSiPhチップと低損失な結合が可能な光部品として活用が期待できる。

表3にFBGEのファイバアレイ部の信頼性評価試験の結果を示す。試験内容は、Telcordia GR-1221-COREに準拠し

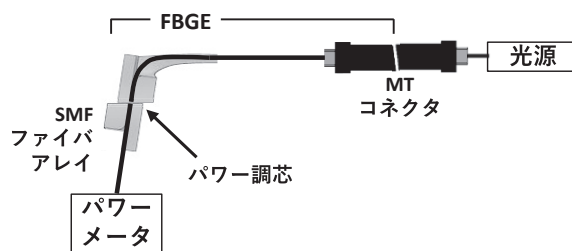


図10 SMFとの結合損失の測定系

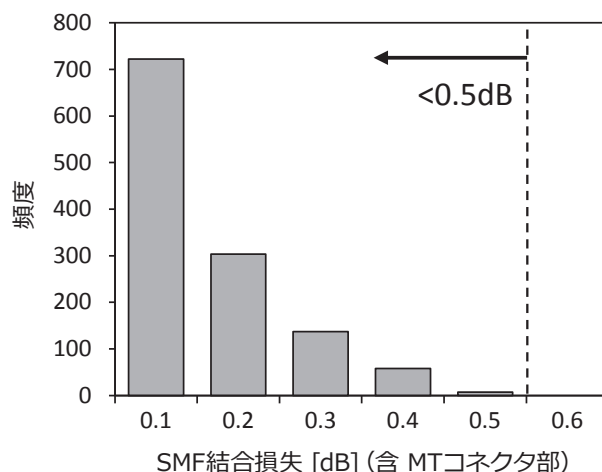


図11 SMF結合損失のヒストグラム (MTコネクタ部での損失を含む)

ている。 $N=18$ サンプルを適用し、全項目において試験前後の挿入損失の変化は $\leq 0.5\text{dB}$ と規格内であり、試験後の破断もないことを確認した。更に同規格の参考試験項目である湿熱試験2,000時間、ヒートサイクル試験500サイクル後も、顕著な損失変化、及び破断は認められず、急峻な曲げ形状を持つFBGEが十分に高い信頼性を両立することを確認した。

表3 ファイバアレイ部の信頼性試験 (N=18) Telcordia GR-1221-COREに準拠

試験項目	試験条件	挿入損失の変化量 [dB]	破断
機械衝撃	6方向、各3回、500 G、1ミリ秒	-0.07~0.03	0
振動	10-2,000 Hz、正弦波、20G	-0.11~0.12	0
熱衝撃	0-100℃、5分、15回	-0.11~0.08	0
ねじり	0.5 kg、10回	-0.11~0.12	0
ケーブル引っ張り	0.5 kg、1分	-0.11~0.11	0
高温保持	85℃、2,000時間	-0.11~0.12	0
湿熱	85℃/85% 500時間、2,000時間 (参考試験)	500時間: -0.11~0.05 2,000時間: -0.11~0.11	0
ヒートサイクル	-40~85℃、100回、500回 (参考試験)	100回: -0.08~0.06 500回: -0.07~0.07	0

5. 結 言

FBGEは、曲げファイバに応力緩和プロセスを採用することで、高さ3.8mm以下の省スペース性を実現しつつ、Telcordia GR-1221-COREに準拠する高い信頼性と、SiPhチップとの低損失な結合が得られることを確認した。この省スペース性、高信頼性、低損失性より、開発したFBGEは実用的なSiPh型光トランシーバの光ファイバ接続部品として活用することができる。

用語集

※1 シリコンフォトニクス

シリコンフォトニクス (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一般に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 モードフィールド径

Mode Field Diameter (MFD) : シングルモード光ファイバの伝搬モードの電界分布の広がり直径を表す。光接続する際に、MFDの差が大きいほど接続損失が大きくなる。

※3 QSFP

Quad Small Form-Factor Pluggable: 光トランシーバ業界標準の一つ。

執 筆 者

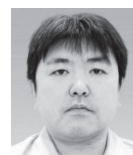
熊谷 博* : 光通信研究所
博士 (学術)



松下 通生 : 光通信研究所



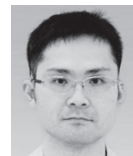
水戸瀬雄一 : 光通信研究所



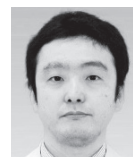
金内 靖臣 : 光通信研究所 主査



片岡 敦 : SEIオプティフロンティア(株) グループ長



中西 哲也 : 光通信研究所 グループ長



*主執筆者

・ FlexBeamGuidEは住友電気工業(株)の商標です。

参 考 文 献

- (1) P. J. Winzer and David T. Neilson, From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade, J. Lightw. Technol 35 (5), 1099-1115 (2017)
- (2) P. D. Dobbelaere et al., Si Photonics Based High-Speed Optical Transceivers, ECOC (2012) We.1.E.5
- (3) Tachikura et al., Improved theoretical estimation of mechanical reliability of optical fibers, Proc. of SPIE, 5623, 622-629 (2005)