

1Tbit/s 対応 低損失 コヒーレント変調器モジュール

Low Insertion Loss, High Bandwidth Coherent Driver Modulator for
1 Tbit/s Fiber Transmission

水野 泰孝*
Yasutaka Mizuno

黒川 宗高
Munetaka Kurokawa

板橋 直樹
Naoki Itabashi

三澤 太一
Taichi Misawa

上村 浩
Hiroshi Uemura

塩崎 学
Manabu Shiozaki

インターネット通信量増大に伴い、長距離伝送用途だけでなく、データセンター間通信でも大容量なコヒーレント光ファイバ通信の要求が高まっている。当社では InP 変調器及びドライバ IC の開発を進めており、今回、それらを搭載した変調器モジュールを開発し、3W 以下の低消費電力での 1Tbit/s のファイバ伝送を実証した。さらに、新たな技術として 3D プリント技術を活用したスポットサイズコンバーターを開発し、変調器モジュールとして 9.5dB の低損失を実現するとともに、通信規格の信頼性で問題ないことを実証した。

With the increasing amount of internet traffic, there is a growing demand for high-capacity coherent optical fiber communication not only for long-haul communication but also for inter-data center communication. We have been developing InP modulators and driver ICs. Recently, we have developed a modulator module and successfully demonstrated 1 Tbit/s fiber transmission with a low power consumption of less than 3 W. We have also developed a spot size converter using 3D printing technology and achieved a low loss of 9.5 dB as part of the modulator module, confirming its reliability for Telcordia standards.

キーワード：光ファイバ通信、コヒーレント、変調器、3D プリント、HB-CDM

1. 緒言

近年の SNS 拡大やストリーミング動画の急増、さらにテレワークの普及などに伴い、インターネット通信トラフィックが増加し続けている。特にデータセンターの大規模化・分散化に伴い、データセンター間の通信量増大が顕著となっている。

光ファイバ通信において、従来は光の強度状態に信号を載せる強度変調方式が主流であった。しかし、さらなる大容量化に対応するため、強度状態だけでなく位相状態にも情報を載せるコヒーレント光通信方式が使われるようになってきている。コヒーレント光通信では 1 本の光ファイバに数十波長の光を同時に伝搬させることが可能だけでなく、デジタル信号処理技術と組み合わせることで数千 km に及ぶ長距離通信が可能となる。これらの特徴から、コヒーレント光通信は主に 100km 以上の幹線系通信に使われてきたが、強度変調による長距離伝送の限界や、コヒーレントデバイスの小型低消費電力化に伴い、近年では 100km 以下と比較的短距離であるデータセンター間接続での需要が急増している。

こうしたデータセンター間接続ではデータセンター内と同等以上の通信速度が必要となり、光モジュールにおいても 400Gbit/s 以上の超高速動作が求められる。さらに、昨今のグリーン化の潮流に対応するため、光モジュールの低損失化及び低消費電力化が必要となる。

当社ではこれまで InP 系材料を使用した変調器⁽¹⁾や受信

器⁽²⁾、それらを搭載するモジュール⁽³⁾の開発を進めてきた。これらの開発で培ってきた技術をさらに発展させ、1Tbit/s 超の高速動作可能で、かつ低損失/低消費電力を両立したコヒーレント変調器モジュール (HB-CDM^{*1}) を開発した。

2. モジュール設計

2-1 モジュール構造

今回開発した HB-CDM の外観を写真 1 に示す。当社が培ってきた高集積実装技術により小型低背化を実現し、パッケージサイズは W11.6mm × L30.1mm × H4.45mm と、業界標準である OIF^{*2}仕様⁽⁴⁾に準拠している。電気信号のインターフェースは、OIF 仕様ではリードピンタイプ及び FPC タイプの両方が規定されているが、当社ではより高速動作が期待できる FPC を採用した。

次に、モジュール内部のブロック図を図 1 に示す。内部には当社が開発した InP 変調器、ドライバ IC、各種光学部品及び、それらを一定温度に保つ温調素子が搭載されている。動作原理としては、まず、ファイバを経由して外部から入力された光が InP 変調器へ入射する。同様に、外部から FPC 経由で入力された電気信号が、ドライバ IC により増幅され、InP 変調器に入力される。InP 変調器では入力された電気信号に応じて通過する光の位相状態を変化させることで、光に信号を載せることができる。こうして生成された信号光は、InP 変調器から出射された後、パッケージ外

の出力ファイバへ結合される。このようにして、入力された電気信号が光信号へと変換され、ファイバを通じて外部に送信することができる。

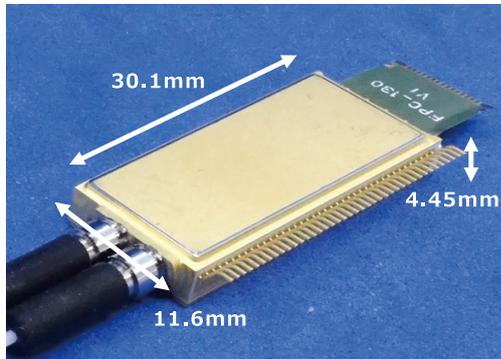


写真1 HB-CDMパッケージ外観

2-2 光学設計

今回新たな技術として、変調器入射部に3Dプリント技術を活用したスポットサイズコンバーター（SSC）^{*3}を導入した。InP変調器では、変調効率を向上するために導波路への光閉じ込めを強くする必要があります。その結果、入射部のビーム径が $1.0\mu\text{m}$ と回折限界よりも小さくなり、ファイバとの光結合において大きな光損失が発生してしまう。この対策として、入射ビームを拡大するために導波路型のSSCを集積する構造が用いられているが⁽⁵⁾、SSC自体にモード変換損失があること、さらに、チップサイズが大きくなってしまいう課題がある。

そこで我々はこれらの課題を解決すべく、図2のようなレンズ型SSCを考案した。導波路型のSSCと異なり光の屈折によりビーム径の変換を行うことで、導波路型SSCの1/10以下のサイズでビーム径の拡大を行うことができる。ビーム径拡大によりファイバとの結合効率を改善するとともに、光学系の調芯トレランスを緩和することが可能となり、信頼性の向上も期待される。

このようなSSCを実現するため、我々は二光子重合^{*4}によるナノスケール3Dプリント技術⁽⁶⁾に着目した。3Dプリント技術ではレーザを照射した部分の樹脂のみを硬化させることができるため、図2のように複雑な形状を持ったSSCを直接InP変調器端面に造形することができる。このようにしてレンズ型SSCを造形したInP変調器をHB-CDMに搭載し、評価を進めた。

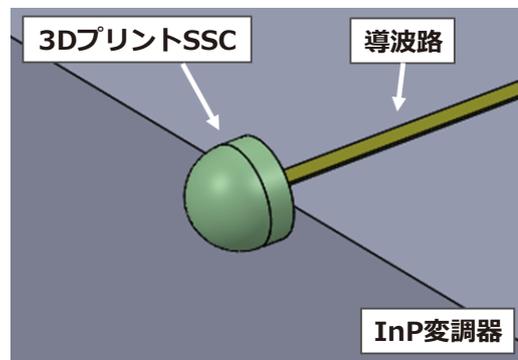


図2 レンズ型SSCイメージ図

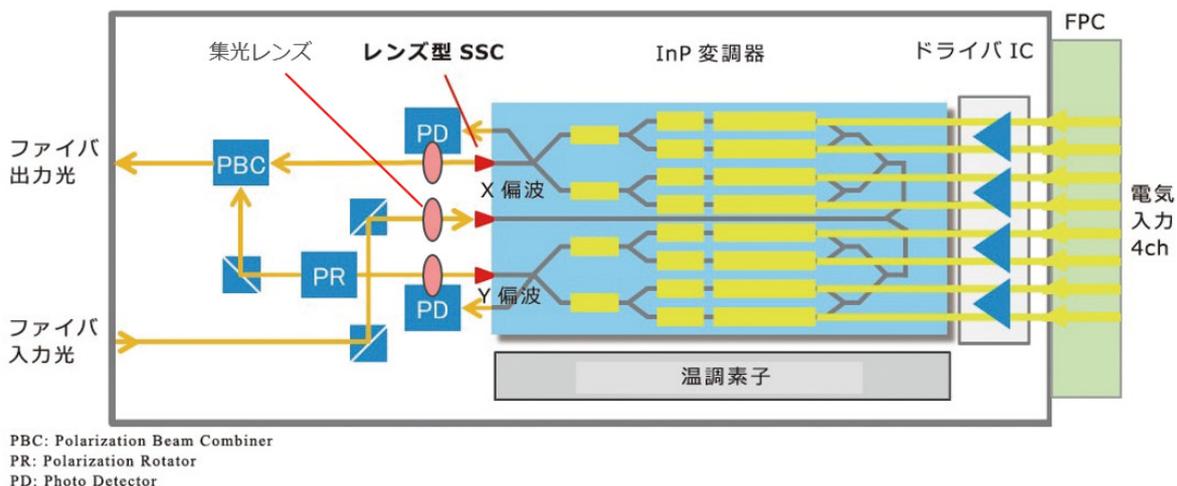


図1 HB-CDM内部ブロック図

3. モジュール評価結果

3-1 光学特性

図3に変調器入射部の集光レンズの調芯トレランスを示す。SSCなしの場合には1dBトレランス±0.4μmと非常に急峻なカーブになっているのに対し、SSCありの場合は±0.8μmと大きくなっていることが確認できる。ここから推定されるビーム径は、SSCなしが1.0μm、SSCありが2.7μmであり、SSCの効果で約3倍に拡大されている。その結果、InP変調器-ファイバ間の結合効率もSSCなしの55%からSSCありの場合の78%と大きく改善していることが確認できた。

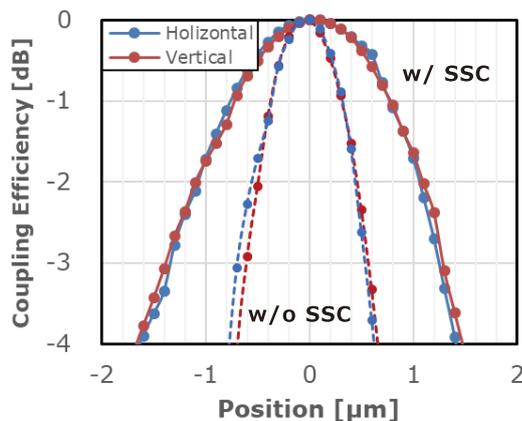


図3 変調器入力レンズ調芯トレランス

次に、HB-CDMモジュールとしての挿入損失の波長依存特性を図4に示す。この値はInP変調器内の伝搬、分岐損失及び、前述の光学系での損失を含む。従来の当社モジュールでは~13.5dBと損失が大きかったが、今回のSSC導入により、モジュール全体で9.5dB@1550nmと大きく損失が改善している。また、波長によるリップルがないことから、SSC搭載による反射の影響が小さいことが見て取れる。さらに、図4中のX偏波 (X-pol) とY偏波 (Y-pol) の損失が完全に一致しており、偏波依存が小さいことがわかる。このようにSSCの導入により良好な光学特性が確認できた。

3-2 電気→光 周波数応答特性

変調器モジュールの高速信号に対する応答性 (周波数応答特性) は、電気信号を伝送する変調器チップ、ドライバIC、パッケージ及びFPCなどの複数部品の特性の掛け算で決まる。当社ではこれらの部品を自社で設計しており、それぞれの部品設計を総合的に最適化することで、1Tbit/sの高速信号に対応した変調器モジュールを実現した。図5には開発したHB-CDMの電気→光 (E/O) 周波数応答特性を示す。1Tbit/sの伝送には点線より上の>75GHzの3dB

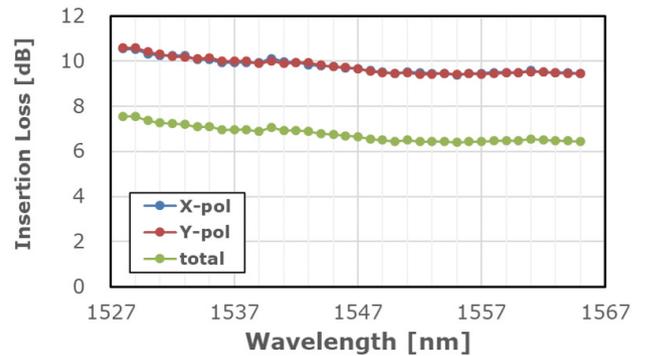


図4 HB-CDM挿入損失 波長依存

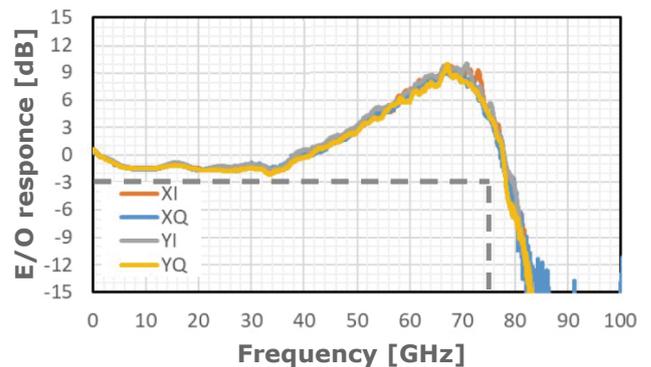


図5 HB-CDM E/O周波数応答

帯域が必要となるが、当社HB-CDMではこれらを満たし、80GHzの帯域を実現していることがわかる。また、4ch全てで同一の特性が得られており、chごとの差が小さいことが見て取れる。

3-3 消費電力

変調器モジュールでは動作速度が高速になるに従って消費電力が大きくなり、OIF仕様では上限6.5Wと規定されている。従来の当社HB-CDMで上記仕様を十分満たせる実

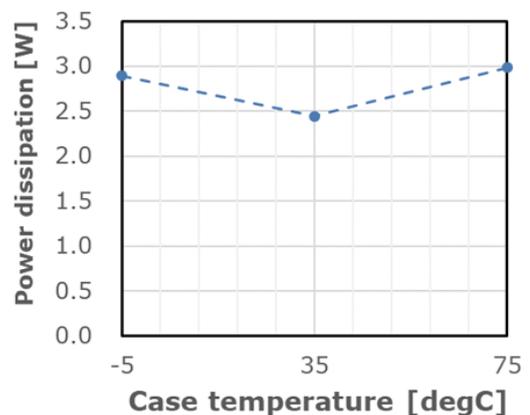


図6 HB-CDM消費電力

力を持ってはいるが、さらに消費電力低減をすべく、温調素子設計の工夫やドライバICの回路設計最適化を行った。

図6には各温度でのHB-CDMモジュールの消費電力を示す。モジュール内の温調素子は50℃に固定しているため、そこからの差が大きい-5℃や75℃で消費電力が最大となる。この結果より、動作範囲である-5~75℃の全ての温度範囲で3W以下での消費電力で動作可能であり、OIF仕様の半分以下と、非常に低い消費電力であることが確認できた。

3-4 ファイバ伝送特性

開発したHB-CDMが実際のデータ伝送に使えることを示すべく、ファイバ伝送試験を行った。図7に伝送試験の評価系を示す。任意波形発生機 (AWG) で生成した128Gbaudの電気信号をHB-CDMに入力し、光源から入射した1550nmの光を変調する。生成された信号光を光変調アナライザ (OMA) に入力し、波形及びビット誤り率 (BER) の評価を行った。16QAM^{*5}変調でのコンスタレーション^{*6}は図8のようになっており、波形の歪が小さく明瞭な信号が確認されている。理想的な信号との差を示すEVM (Error Vector Magnitude) は9.8%と小さく、ビット誤り率 (BER) 1.04×10^{-3} と、FEC limit^{*7}である 2×10^{-2} よりも十分小さいことが確認できた。これらの結果より、当社HB-CDMが128Gbaud 16QAM、すなわち1Tbit/sでの伝送に対応していることを実証した。

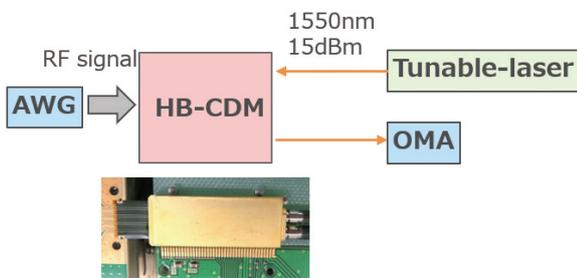


図7 ファイバ伝送特性評価系

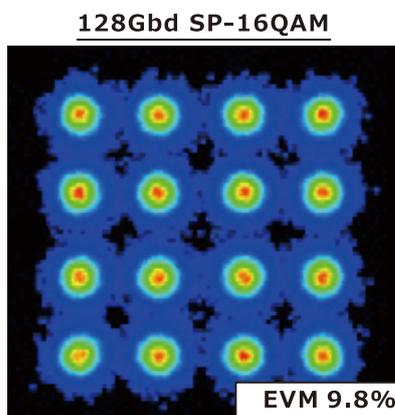


図8 ファイバ伝送特性評価結果

3-5 信頼性

ファイバ伝送に使われる光モジュールには一般的な民生機器に比べ厳しい信頼性が求められ、業界標準の規格 (Telcordia GR-468⁽⁷⁾) として満たすべき信頼性が定められている。そこで、試作したHB-CDMモジュールで信頼性試験を進めた。各試験後に挿入損失を評価し、その変動量をグラフにしたものを図9に示す。規格ではそれぞれの試験後に±0.5dB以内の変動であることが求められるが、今回の試験の結果、変動量は0.1dB以下と小さいことが明確になった。特に、今回新規に導入したレンズ型SSCの信頼性が懸念されたが、熱サイクル、機械衝撃などでも問題ないことが確認できた。

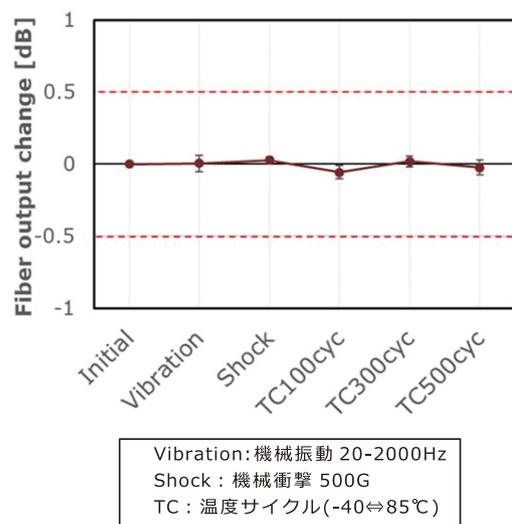


図9 HB-CDM信頼性試験結果

4. 結 言

昨今のインターネット通信量増大に対応すべく、1Tbit/sの超高速伝送に対応したHB-CDMを開発した。変調器、ドライバIC及びパッケージを協調設計することで80GHzの帯域を実現し、1Tbit/sのファイバ伝送を実証した。さらに、今回3Dプリント技術を活用した当社独自のSSCを導入し、結合効率を大幅に改善するとともに、それらを搭載したモジュールでの信頼性がTelcordia規格を満たすことを実証した。

用語集

※1 HB-CDM

High-Bandwidth Coherent Driver Modulator: 変調素子及びドライバICを内蔵したコヒーレント変調器モジュール。

※2 OIF

Optical Internetworking Forum: 光ネットワーク技術に関する標準化を行う業界団体。

※3 スポットサイズコンバーター (SSC)

Spot-Size Converter: 光のビーム径を変換する機能。

※4 二光子重合

樹脂にレーザを照射し、非線形光学効果により照射した箇所のみを局部的に硬化させる技術。

※5 16QAM

光の強度及び位相状態に $2^4 = 16$ のパターンを持たせた伝送方式。1つの信号で4bitの情報を持ち、偏波多重と組み合わせることで8bitの情報を伝送することができる。

※6 コンスタレーション

受信した信号をIQ位相座標平面上で表した図。

※7 FEC-Limit

Forward Error Correction Limit: 前方誤り訂正により修復できる上限のエラー量。この値以下であればエラーフリーで伝送ができる。

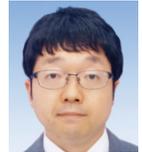
参考文献

- (1) H. Tanaka, T. Ishikawa, T. Kitamura, M. Watanabe, R. Yamabi, R. Yamaguchi, N. Kono, T. Kikuchi, M. Seki, T. Katsuyama, M. Ekawa, and H. Shoji, "Highly Reliable and Compact InP Based In-Phase and Quadrature Modulators for Over 400 Gbit/s Coherent Transmission Systems," IEICE Transactions on electronics, Vol.E103-C, No.11, pp. 661-668 (July, 2020)
- (2) T. Okimoto, H. Yagi, K. Ashizawa, K. Yamazaki, K. Ebihara, S. Okamoto, K. Horino, M. Kurokawa, Y. Sugimoto, S. Kumagai, K. Tanaka, M. Takechi, M. Ekawa, and Y. Yoneda, "80-GHz Bandwidth and High Responsivity of InP Coherent Receiver PIC with Butt-joint waveguide PDs," OFC2023, paper W1A.3 (2023)
- (3) M. Kurokawa, K. Nakayama, M. Takechi, Y. Mizuno, T. Misawa, E. Banno, H. Uemura, Y. Sugimoto, S. Kumagai, T. Okimoto, N. Kono, T. Ishikawa, H. Hara, T. Kato, K. Tanaka, M. Ekawa, and K. Uesaka, "High Optical Output Power and High responsivity IC-TROSA for 800 Gbps applications," ECOC2021, paper We4.G.1 (2021)
- (4) "Implementation Agreement for the High Bandwidth Coherent Driver Modulator (OIF-HB-CDM-02.0)," <https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-HB-CDM-02.0.pdf> (2021)
- (5) Y. Ueda, Y. Ogiso, N. Kashio, Y. Hashizume, N. Kikuchi, M. Ishikawa, M. Kohtoku, "Compact InP spot-size converter with vertically tapered core layer formed by micro-loading effect," Electron. Lett., 53: 797-799 (2017)

- (6) P.-I. Dietrich, M. Blaicher, I. Reuter, M. Billah, T. Hoose, A. Hofmann, C. Caer, R. Dangel, B. Offrein, U. Troppenz, M. Moehrle, W. Freude & C. Koos, "In situ 3D nanoprinting of free-form coupling elements for hybrid photonic integration," Nature Photon. 12, 241-247 (2018)
- (7) Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment (2004)

執筆者

水野 泰孝* : 伝送デバイス研究所 主査



黒川 宗高 : 伝送デバイス研究所 主席



板橋 直樹 : 伝送デバイス研究所 主査



三澤 太一 : 伝送デバイス研究所



上村 浩 : 伝送デバイス研究所 グループ長



塩崎 学 : シニアスペシャリスト
解析技術研究センター 主幹



*主執筆者