

28 Gb/s 1060 nm VCSELの開発と マルチモード光ファイバリンクの特性

Development of 28 Gb/s 1060 nm VCSEL and Characteristics of Multimode Optical Fiber Link

喜瀬智文^{*1}
Tomofumi Kise

鈴木理仁^{*2}
Toshihito Suzuki

舟橋政樹^{*1}
Masaki Funabashi

長島和哉^{*1}
Kazuya Nagashima

那須秀行^{*1}
Hideyuki Nasu

〈概要〉

近年データセンターやエンタープライズネットワーク向けに大容量データ伝送の需要が急速に拡大している。機器間接続などの短距離伝送の用途では、面発光レーザ (VCSEL) とマルチモードファイバ (MMF) を用いたアクティブ光ケーブル (Active Optical Cable: AOC) が導入されている。一方で、データセンターの大型化に伴い必要とされる最長伝送距離が500 m以上と長距離化しているが、従来の波長850 nm VCSELによる技術ではファイバの波長分散の影響で伝送距離が100 m程度に制限される。我々は高速動作可能かつファイバの波長分散の影響が小さい1060 nm帯において、28 Gb/sで動作するVCSELの開発を行った。1060 nm VCSELを搭載した4チャンネルの並列光モジュールと1060 nmに最適化されたMMFを用いて光リンクを構成し、その伝送特性を確認した。28 Gb/s疑似ランダム信号 $2^{31}-1$ で変調した光信号を伝送した結果、500 mにおいてもエラーフリーとなる結果を得た。本技術は将来の大規模データセンターにおける光伝送を支える有力な技術として期待される。

1. はじめに

近年ハイエンドルータ及びサーバ、スーパーコンピュータ等において、高速かつ並列な信号伝送を実現する技術として光インターコネクションの採用が急速に進んでいる。伝送距離が数十メートル程度のラック間伝送では、従来の電気ケーブルから、帯域や伝送距離に優れ、かつ同一の電気インターフェースを有するAOCへの置き換えが進んでいる。AOCには通常、10 Gigabit Ethernet等の短距離用途として普及している波長850 nmのVCSELが光源として搭載されている。また伝送媒体である標準のマルチモードファイバ (MMF) は、850 nmでモード分散が最小になるように設計されている。速度は10 Gb/s x 4chが現在の主流であるが、次の世代の規格として25 Gb/s x 4chが検討されている。一方次世代の光インターコネクションでは、伝送距離が数メートル程度のボード間伝送への導入が進むと考えられる。ボード間伝送では、並列光モジュールがLSIの近傍に高密度に実装され、かつ25 Gb/sかそれ以上の高速動作が必要とされる。当社が開発している1060 nm VCSELは、850 nm VCSELに比べて微分利得が高くしきい値電流密度が低い¹⁾ため、高速変調動作の実現に有利である¹⁾。さらに、データセンター

の急速な普及、大規模化に伴って、機器間接続に必要な伝送距離も300 mから500 m以上への長距離化も求められている。しかしながら、従来の850 nm VCSELではファイバの波長分散の影響で、25 Gb/sの変調速度の場合伝送距離が100 m程度に制限されてしまう。ファイバの波長分散は波長850 nmでは-90 ps (nm. km)であるのに対し、1060 nmでは-34 ps (nm. km)と約1/3となる。従って、長距離伝送の観点でも1060 nm VCSELは非常に有望である。850 nm VCSELと1060 nm VCSELの特性比較を表1にまとめた。1060 nm VCSELは、上記のInGaAs材料による優位性およびファイバ特性における優位性のほかに、出射光がGaAs基板に対して透明であるため裏面からの出射も可能である。これによりパッケージ設計の自由度が広がるという利点がある。

今回、28 Gb/sで動作可能な1060 nm VCSELの開発と、1060 nmに最適化されたMMFリンクを用いて伝送実験を行ったので報告する。

^{*1} ファイテル製品事業部門

^{*2} 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

表1 850 nm VCSELと1060 nm VCSELの比較
Comparison between 850 nm VCSEL and 1060 nm VCSEL.

Item	InGaAs/GaAs-based VCSEL (1060 nm)	GaAs/AlGaAs-based VCSEL (850 nm)
Threshold voltage	1.17 V	1.46 V
Transparent current density	20 A/cm ²	100 A/cm ²
Differential gain : dg/dJ	40 × 10 ¹⁶ cm ² /A	8 × 10 ¹⁶ cm ² /A
Defect propagation velocity	0.01 ~ 0.1 μm/h (<110>)	2 ~ 10 μm/h (<100>)
Photodiode responsivity	0.75 A/W (InGaAs photodiode)	0.6 A/W (GaAs photodiode)
Multimode fiber loss	1 dB/km	2 dB/km
Fiber chromatic dispersion	-34 ps/(nm.km)	-90 ps/(nm.km)
Substrate transparency back-side emission	Yes	No
Eye-safety maximum optical output power (class 1)	+1.5 dBm	-2.2 dBm

2. 28 Gb/s 1060 nm VCSELの開発

2.1 素子構造と基本特性

まず当社が開発した1060 nm VCSELの構造について説明する。活性層としてInGaAs/GaAs歪量子井戸活性層を採用しており、従来の850 nm VCSELのGaAs/AlGaAs量子井戸に比べて、高微分利得、低しきい値電流密度、ダークライン欠陥の伝播速度が遅いなどの特徴を有している。これらの特徴により、高変調速度、低消費電力、高信頼性が実現可能である。また長波長であることから動作電圧が低いことも低消費電力への貢献が期待できる。図1は、1060 nm VCSELの素子構造を示す。当社はダブルイントラキャビティ (Double Intra Cavity: DIC) 構造を採用している。本構造は、従来型のVCSEL構造とは異なり、複数の半導体ヘテロ障壁を有する分布ブラッグ反射 (Distributed Bragg Reflector: DBR) ミラーが電流経路とならないため安定した微分抵抗が得られるという特徴を有する。またDIC構造は、DBRミラー層をノンドープにできるため光学損失を低くすることが可能である。

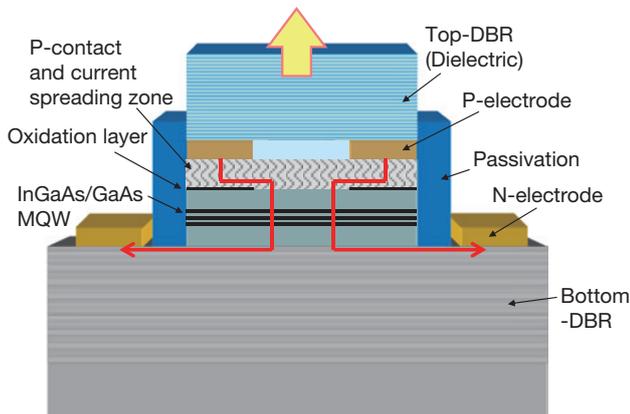


図1 1060 nm VCSEL素子構造
Device structure of 1060 nm VCSEL.

25 Gb/s以上の高速動作を実現するためには、①緩和振動周波数の向上と②低容量化が必要である。①の施策として、まず活性層体積を小さくするために短共振器化が有効である。そのために、共振器に相当する層厚を薄くし活性層への光閉じ込めを向上させた。また、注入キャリアと光を活性層に効率良く閉じ込め微分利得を向上させるために、量子井戸構造 (井戸数、井戸厚、バリア厚) の詳細検討、最適化を実施した。②の施策に関しては、VCSELの寄生容量で支配的なものとして酸化層起因の容量低減が挙げられる。酸化層を厚膜化することにより寄生容量は低減されるが、一方で酸化層による歪の蓄積が増大し信頼性の劣化を招く恐れがある。これらのトレードオフを考慮して酸化層厚の最適化を行った。

図2は開発したアパーチャ径6 μmのVCSELのLIV特性を示している。しきい値電流は0.45 mAと低い値が得られている。また、通常動作電流である6 mA時の電圧が2 V以下に抑えられていることも長波長VCSELの特徴である。

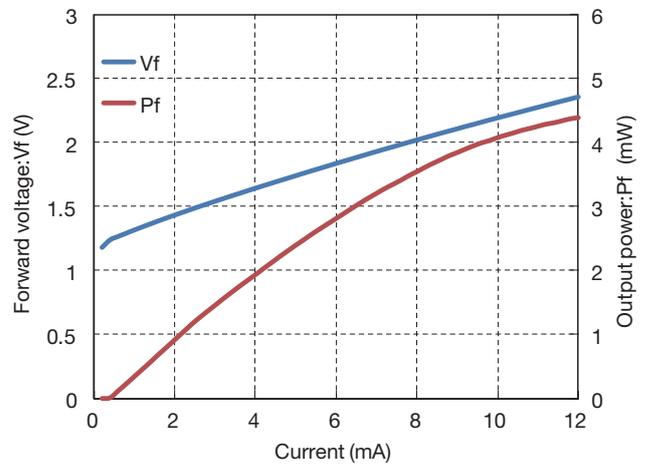


図2 LIV特性 アパーチャ径6 μm
LIV characteristics of device with 6 μm aperture.

2.2 高速変調特性

次に高速変調特性について説明する。図3は開発した素子の25°C、6 mAバイアス時の周波数応答特性である。3 dB変調帯域として20 GHz以上が得られている。周波数応答特性を、レーザのレート方程式に基づくレーザの応答と、レーザの等価回路 (図4) から導出される電気的な応答の組合せによる解析を行い、フィッティングした結果を図3中の赤線で示している。実験結果をよく説明できていることが分かる。この解析より緩和振動周波数frとして17 GHz、ダンピング定数γとして70 ns⁻¹が導出された。こうして得られた緩和振動周波数frを規格化バイアス電流に対してプロットしたものが図5である。このグラフの傾きで表される、変調特性を示すパラメータであるD-factorは、10 GHz/(mA)^{1/2}と高い値が得られていることが分かる。

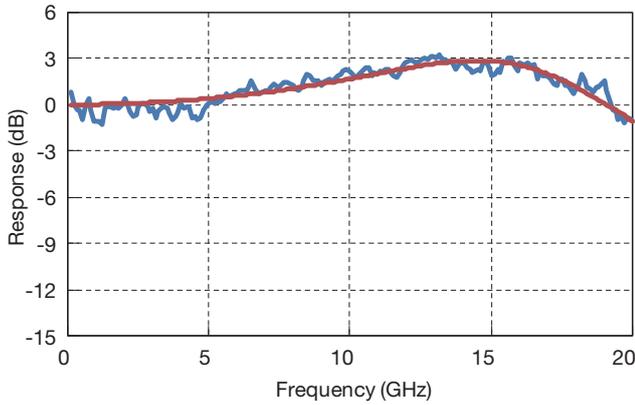


図3 周波数応答特性 $\gamma = 70 \text{ ns}^{-1}$
Frequency response of device with $\gamma = 70 \text{ ns}^{-1}$.

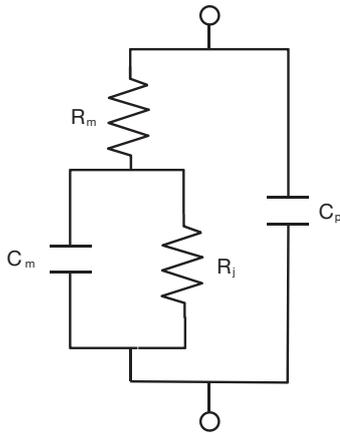


図4 VCSELの等価回路
Equivalent circuit model of VCSEL.

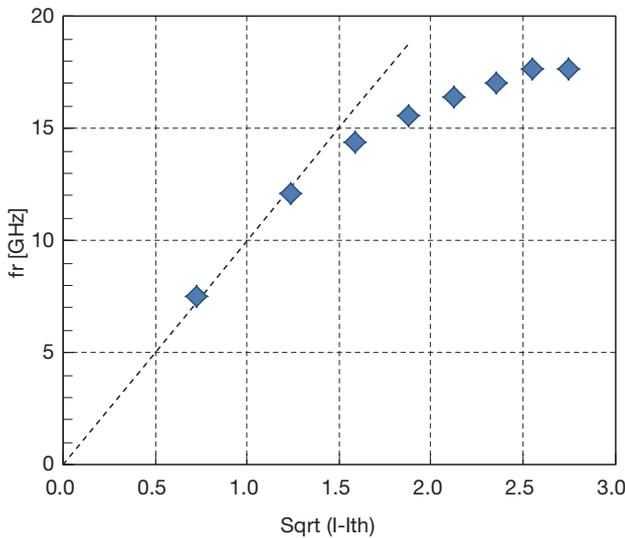


図5 緩和振動周波数の規格化バイアスに対するプロット
Relaxation oscillation frequency as a function of normalized bias current.

一方、ダンピング定数 γ については、レーザのレート方程式より以下のように表される。

$$\gamma = 4\pi^2 \tau_p f_r^2 + \gamma_0 \quad (1)$$

ここで、 f_r は緩和振動周波数、 τ_p は光子寿命を表す。ダンピング定数が小さいと、アイ波形におけるオーバーシュートやジッタ等による波形劣化につながる。ダンピング定数を大きくするためには、式(1)より光子寿命 τ_p を長くする、すなわち共振器の光学損失(ミラー損失と内部損失の和)を下げる必要がある。これらを実現するために、ドーピングプロファイルの精密な最適化と、上部DBRの反射率の調整を行った。我々の採用するDIC構造はノンドープミラーであるため、本質的に低光学損失が得られやすい。また上部DBR反射率の調整も誘電体DBRの追加成膜やエッチングによって容易に行うことが可能である。

図6は、 $\gamma = 100 \text{ ns}^{-1}$ の素子の25°C、6 mAバイアス時の周波数応答特性を示す。3 dB変調帯域としては18 GHzであるが、低周波領域でも平坦な周波数応答特性が得られていることが分かる。

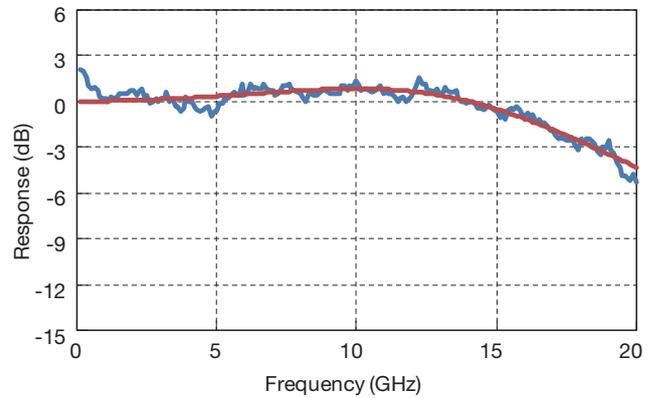


図6 周波数応答特性 $\gamma = 100 \text{ ns}^{-1}$
Frequency response of device with $\gamma = 100 \text{ ns}^{-1}$.

これら開発したVCSEL素子について、28 Gb/s, NRZ, PRBS: $2^{31}-1$ の信号を用いてアイパターンの評価を実施した。図7(a)ダンピング定数 γ が 60 ns^{-1} の素子、図7(b)は 100 ns^{-1} の素子それぞれの28 Gb/sのアイパターンである。図7(a)では、0レベル、1レベルにおけるオーバーシュートやジッタが顕著である。一方、図7(b)の波形から分かるように、ダンピング定数を大きくすることにより信号のオーバーシュートやジッタが抑制され、良好なアイ開口が得られていることがわかる。

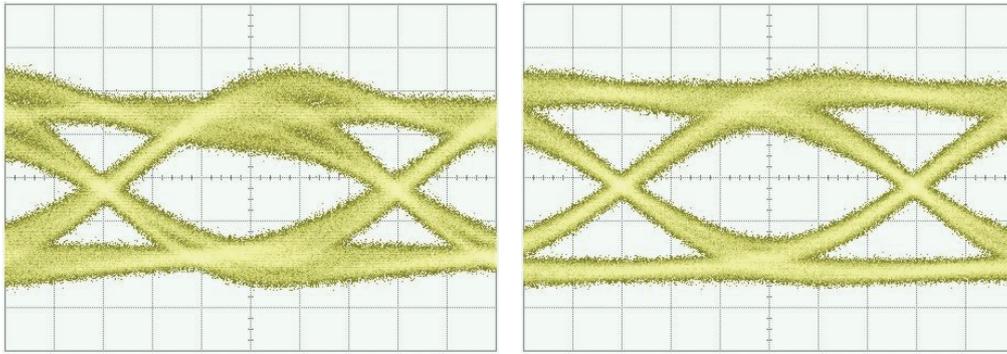


図7 28 Gb/sのアイ波形 (a)左は $\gamma = 60 \text{ ns}^{-1}$, (b)右は $\gamma = 100 \text{ ns}^{-1}$
 Eye diagrams at 28 Gb/s. (a) Left: $\gamma = 60 \text{ ns}^{-1}$, (b) Right: $\gamma = 100 \text{ ns}^{-1}$.

3. 1060 nm最適化MMFによるマルチモード伝送

3.1 1060 nm最適化MMFによる伝送実験

次に当社で開発した1060 nm VCSELと、米OFS社で開発した1060 nmに最適化したコア径50 μm のMMFを用いて伝送試験を行った。本MMFは、1060 nm帯でモード分散が最小となるようにファイバの屈折率プロファイルが調整されている。伝送試験に使用した実験系を図8に示す。VCSELは、駆動用ICおよびマイクロ光学系とともに4チャンネル並列光送信モジュールに実装されている(図8中写真)²⁾。またPD(Photo

Detector)およびTIA(Trans Impedance Amplifier)が実装された光受信モジュールも同時に用意し、送信/受信モジュールを対向させて伝送試験を実施した。なお、これらの光モジュールは専用の評価ボードにのせて駆動・制御している。使用した1060 nm用MMFについては、モード分散を表すパラメータであるDMD(Differential Mode Delay)が0~23 μm の半径方向領域において0.12 ps/mであった。また実効モード帯域は4,000 MHz.km以上であり、1060 nmにおけるOM4グレードのファイバに相当する。

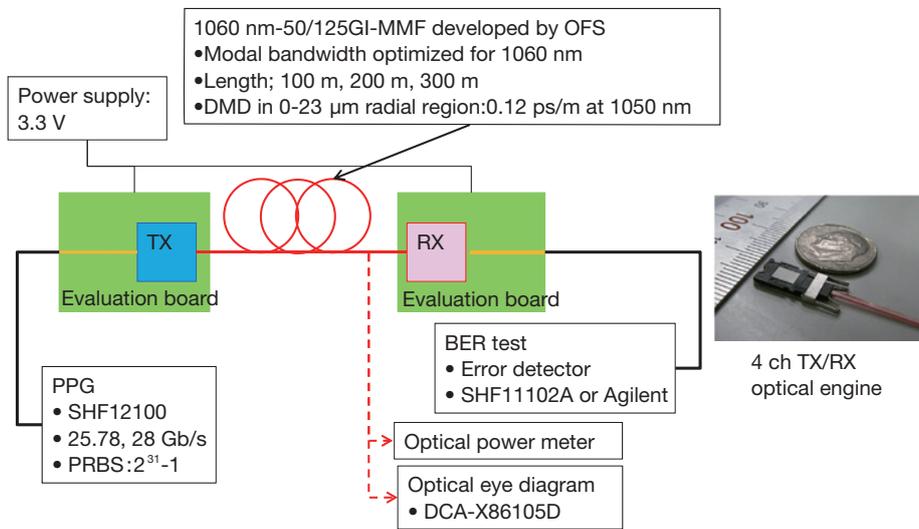


図8 伝送試験の評価系
 Experimental setup of transmission test.

図9(a), (b)はBack to Back時と500 m伝送後、それぞれのアイパターンを示す。500 m伝送後においても良好なアイ開口を維持していることがわかる。図10はそのBER特性である。100 m, 300 m, 500 mにおいてエラーフリー動作を確認し、500 m伝送時のパワーペナルティは2.2 dBであった。図11はBERパ

スタブ曲線を示す。この図より、距離が長くなるに従ってトータルジッタは増加しているが、500 m伝送時のトータルジッタはデュアルディラックモデルによる外挿で0.82 UIと見積もられ、ジッタマージンが存在していることを確認した³⁾。

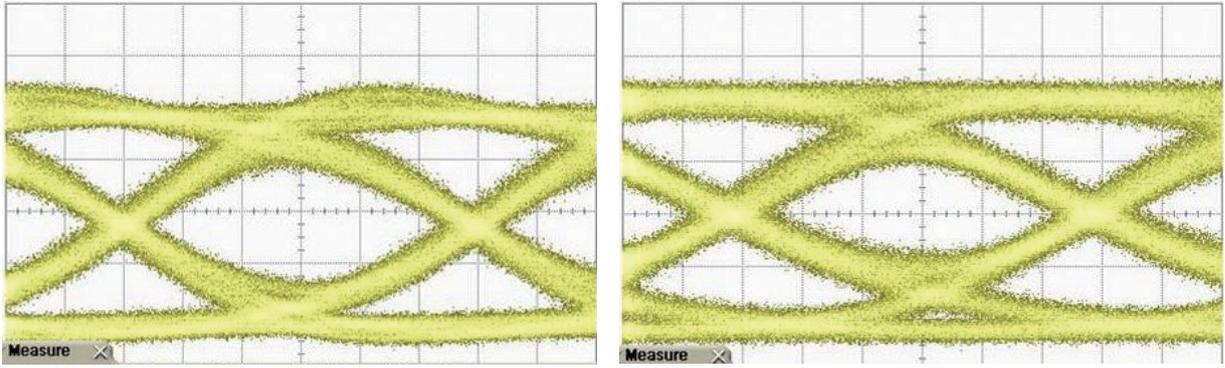


図9 1060 nm最適化MMF伝送時の28 Gb/sアイパターン
 (a)左: Back to back, (b)右: 500 m伝送後
 Eye diagrams of transmission test using MMF optimized for 1060 nm.
 (a) Left: Back to back, (b) Right: After 500 m transmission.

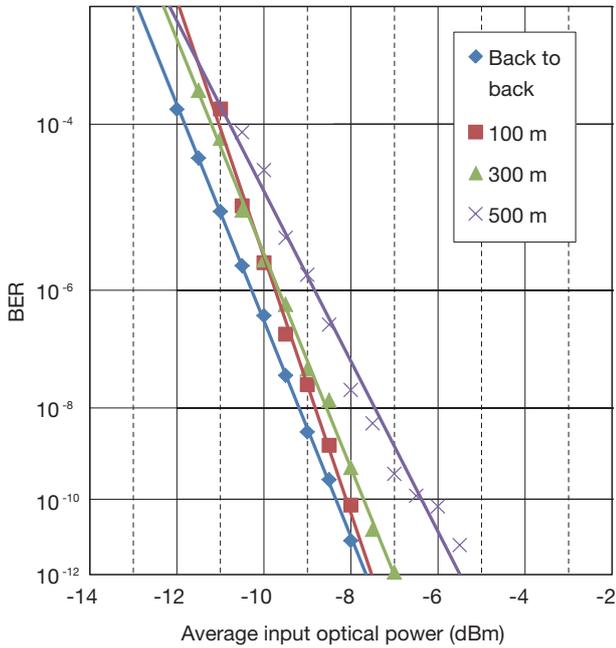


図10 1060 nm最適化MMFを用いた伝送実験のBER特性
 ビットレートは28 Gb/s
 BER characteristics of transmission test using MMF
 optimized for 1060 nm at 28 Gb/s.

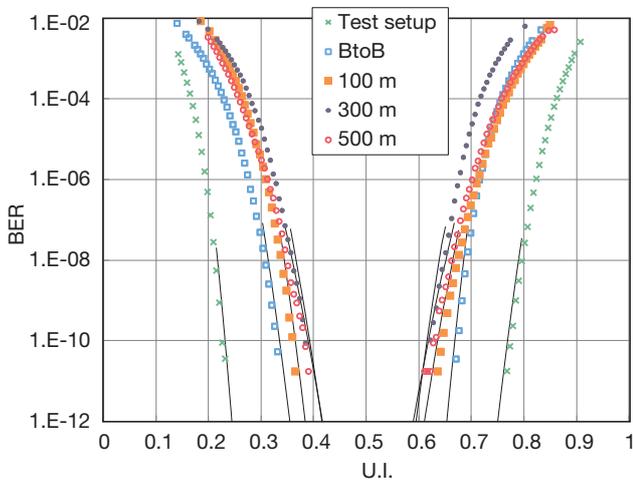


図11 1060 nm最適化MMFによる伝送実験のBERバスタブ
 曲線
 BER Bathtub curve of transmission test using MMF
 optimized for 1060 nm.

3.2 モード分散補償MMFリンクによる伝送実験

最後に米Corning社と共同で実施した1060 nm最適化MMFリンクへの新たなアプローチについて紹介する⁴⁾。コンセプトを図12に示す。OM4などの850 nm用に標準化されているMMFは、波長1060 nmでは材料分散の影響により図12左側に示すように右曲りのDMD特性を有する。これにより実効モード帯域は著しく低下してしまう。そこでこのモード分散を打ち消すために、OM4とは逆の左曲がりのDMD特性を有するように設計されたMMFと組合せることによって、全体として所望の波長においてモード分散が最小化されたMMFリンクを構成することができる。これをモード分散補償MMFリンクと呼ぶ。500 mのモード分散補償リンクのDMDは、0.23 μm のコア領域において、0.09 ps/mと十分に低い値であった。このリンクは波長1060 nmにおいて10 GHz.kmの実効モード帯域を有すると見積られる。

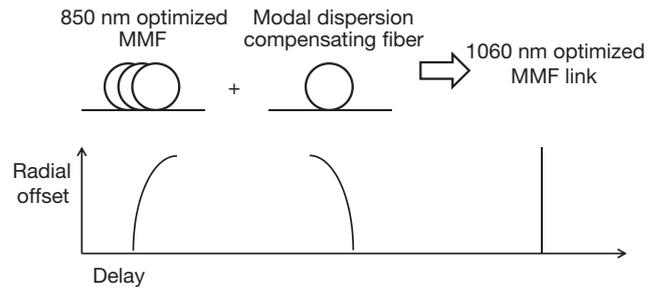


図12 モード分散補償リンクのコンセプト
 Concept of modal dispersion compensated link.

このモード分散補償MMFリンク用いて行った伝送試験のBER特性を図13に示す。300 m, 500 mにおいてエラーフリー伝送が実現できており、パワーペナルティはそれぞれ1.2, 2.3 dBという低い値が得られた。

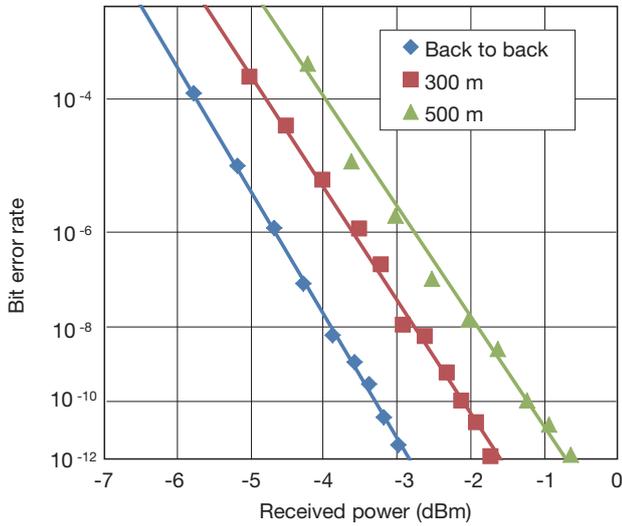


図13 モード分散補償MMFリンクのBER特性 ビットレートは25 Gb/s
BER characteristics of modal dispersion compensated link at 25 Gb/s.

4. おわりに

本論文では、28 Gb/sで動作する1060 nm VCSELの開発について報告した。緩和振動周波数の向上、低容量化の施策およびダンピング定数の最適化により、変調帯域18 GHzおよび28 Gb/s変調動作を実現した。また開発した1060 nm VCSELを搭載した4チャンネルの並列光モジュールと1060 nmに最適化されたMMFおよびモード分散補償MMFリンクを用いて光リンクを構成し、伝送特性として28 Gb/s、500 mにおいてエラーフリーを確認した。本技術は、将来のデータセンターで求められる高速かつ長距離伝送を実現するうえで有望と考えられる。

参考文献

- 1) T. Suzuki, et al., "1060 nm 28-Gbps VCSEL developed at Furukawa," Proc. SPIE 9001, 900104-1-9, (2014).
- 2) H. Nasu, et al., "Sn-Ag-Cu Solder Reflow-Capable 28-Gb/s x 4-Channel High-Density Parallel-Optical Modules," IEEE J. Lightwave Technol., vol.31, no.24, p.4111, (2013).
- 3) K. Nagashima, et al., "1060-nm VCSEL-based 28-Gb/s x 4-channel optical signal transmission beyond 500-m MMF using high-density parallel-optical modules," IEEE CPMT Symposium Japan, 12-2, (2014).
- 4) T. Kise, et al., "Development of 1060 nm 25-Gb/s VCSEL and Demonstration of 300 m and 500 m System Reach using MMFs and Link optimized for 1060 nm," Technical Digest of OFC2014, Th4G.3, (2014).