

低消費電力光インターコネクション

石川 陽三・伊澤 敦・根角 昌伸
吉原 正和・上村 寿憲・那須 秀行

Low Power Optical Interconnection

Yozo ISHIKAWA, Atsushi IZAWA, Yoshinobu NEKADO, Masakazu YOSHIWARA, Toshinori UEMURA and Hideyuki NASU

To the next generation high-end servers and routers, the data rate per channel must reach at 10 Gbps and higher. Therefore, it is essential to adopt optical interconnect technologies which realize higher data rate and low power-consumption. At present, actual applications using optical interconnects has been expanded from rack-to-rack to board-to-board applications. In particular, the board-to-board application requires high-density mounting, high data rate, and low power-consumption. We have been proposing 1060-nm optical interconnects to realize low power-consumption by employing high-efficient InGaAs/GaAs VCSEL. We fabricated 1060-nm 10-Gbps×12-channel parallel-optical modules using BiCMOS IC chips. As we tested an optical link using the modules, we achieved a very low power-consumption as same as 7mW/Gbps over the operating case temperature.

Key words: optical interconnect, 1060-nm VCSEL, low power

データトラフィックの増加に伴いデータセンターや企業内のデータ通信において伝送容量増加の要求が高まっており、ラック間の通信からボード間の通信においても通信ポートあたりの伝送速度が10 Gbps以上の高速なインターコネクション技術が求められている。通信デバイスの高速化や高密度実装によって大容量のデータ通信が可能になる一方で、デバイスの消費電力は増え、また高密度に実装されたデバイスを冷却するため空調電力の増加が懸念されている。そこで、配線の伝送損失が小さく高速通信が可能で、通信線が細く配線スペースを多く要しない光インターコネクション技術が注目されている。

高速な電気インターコネクション技術には基板エッジに挿入して使用されるSFP+(small form pluggable plus)があり、銅対線の伝送で速度10 Gbpsが得られる。電気SFP+にはパッシブタイプとアクティブタイプの2種類があり、パッシブタイプは電源を必要とせず消費電力は0 W、アクティブタイプは35 mW/Gbpsと、既存の10 Gbps光トランシーバーSFP+などに比べて消費電力は小さい。しかし伝送距離はパッシブタイプで~7 m、アクティブタイプで~20 m程度であり、一般的に求められる伝送距離~100

m、大規模データセンターで求められる300 mを大きく下回っており、適用範囲は限られる。伝送距離を伸ばすためには銅線径を大きくし帯域を広げることが望ましいが、銅線の取り回しや重量が増えるために取り扱いが困難になり、また配線スペースの増加によって冷却効率が悪くなるなどの懸念がある。多値変調方式を用いて~100 mの伝送を行う10 GBASE-T (IEEE802.3an 2006) 準拠の技術もあげられるが、ドライバー、レーザーICの回路が複雑になり、消費電力がSFP+の数倍になる¹⁾。光インターコネクションではおもに石英系GI 50/125 μm-MMF (graded index multi mode fiber) が用いられ、損失は3 dB/km未満と小さいため100 mまでの伝送は容易になり、またMMFの線径は広帯域な銅線の25%と細く配線スペースを多く必要としないため空調にも有利である。データセンターなどでは膨大な数の光モジュールが高集積で実装されると想定され、安価、低消費電力の光モジュールが求められる。そのため量産性に優れ駆動電流の小さいVCSEL (vertical cavity surface emitting laser) を搭載した並列光モジュールが注目されている。筆者らは、ラック間、ボード間伝送向けの1 μm帯VCSELアレイ搭載10 Gbps×12 ch小型並列光

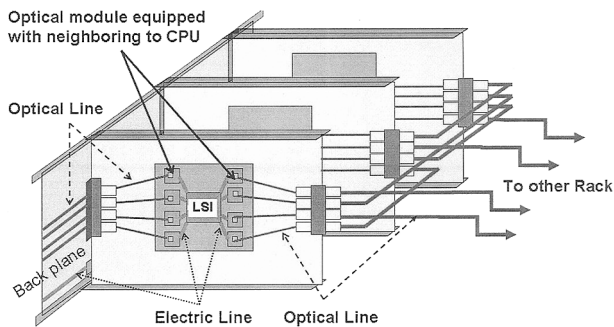


図1 ラック間、ボード間伝送併用光インターコネクションの模式図。

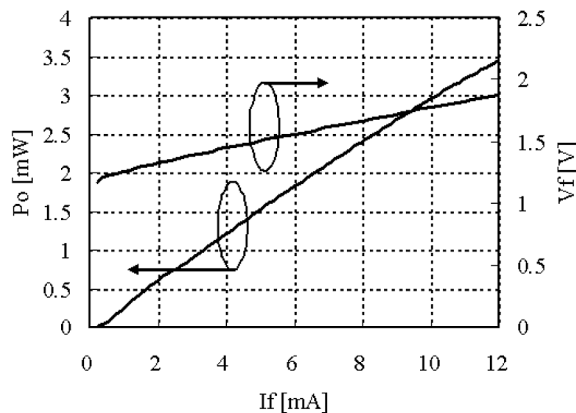


図2 1060 nm-VCSEL の L-I, V-I 特性.

モジュールを用いた光リンクで 7 mW/Gbps の低消費電力を達成しており²⁾、本稿では開発した並列光モジュールとその特性について紹介する。

1. 1 μm 帯小型並列光モジュール

ラック間伝送とボード間伝送が可能な光インターコネクションの模式図を図 1 に示す。既存の基板エッジに光モジュールを実装する形態では、LSI から光モジュールの距離が数十 cm と長く、損失が大きい。ボード間伝送の形態で LSI 近傍に光モジュールを高密度に実装すれば、LSI、光受信モジュールの電気出力、LSI、光送信モジュールのイコライジング能力を抑えることができ、システム基板の低消費電力化が可能になる。作成した光モジュールの外形寸法は 13 mm×13 mm×3.4 mm と小さいため、基板の LSI 近傍に実装でき、100 m 以上の伝送も可能である。光モジュール単体の消費電力に関しては、2012 年にボード間伝送で 10 mW/Gbps 程度の消費電力が要求される²⁾。VCSEL はウェハー面垂直方向に数波長程度の長さの高反射率共振器をもつ構造で活性層体積を小さくできるため、閾値電流が 1 mA 程度と小さく、低バイアス電流で高速応答が可能のため光インターコネクションに多く用いられている。既存の光モジュールにおいては活性層に AlGaAs/GaAs (aluminum-gallium-arsenide/gallium-arsenide) を用いた 850 nm 帯 VCSEL が多く用いられているが、筆者らは活性層に InGaAs (indium-gallium-arsenide) を用いた歪み量子井戸構造の 1 μm 帯 VCSEL を用いている³⁾。InGaAs 活性層は GaAs 活性層に比べ大きな微分利得をもつことから、小さい閾値電流、高い緩和振動周波数 ($\propto \{I_b/I_{th} - 1\}^{1/2}$, I_b はバイアス電流, I_{th} は閾値電流) が得られ、より高速な応答特性が実現できる⁴⁾。1060 nm-VCSEL の L-I, V-I 特性を図 2 に示す。閾値電流は 1 mA を大きく下回っている。閾値電圧は 1.2 V と 850 nm 帯 VCSEL に比べて低く、後述する光モジュール駆動電流範囲で電圧は 1.8 V 未満である。電源電圧 2.4 V の CMOS-IC (complimentary metal-

oxide semiconductor integrated circuit) で 990 nm-VCSEL を駆動し、10 Gbps にて 1.5 mW/Gbps の消費電力が確認されており⁵⁾、CMOS 技術と合わせた低電圧駆動による低電力化も期待できる。高速応答に関しては、1.07 μm-InGaAs-VCSEL においてバイアス電流 5 mA で 40 Gbps のエラーフリー伝送が実現されている⁶⁾。10 Gbps 動作に着目すると、小さい閾値電流により低バイアス電流での駆動が可能となり、高微分効率の 1060 nm-VCSEL と 100 m の OM2-MMF (ISO/IEC 規格の OM2 型 MMF) を用いた光リンクにおいてバイアス電流 1.8 mA で良好なアイ開口が得られている⁷⁾。1 μm 帯 VCSEL アレイと InGaAs-PD (photo diode) アレイ、電源電圧 3.3 V の LDD (laser diode driver) と TIA (trans impedance amplifier) を用いて、小型の 10 Gbps×12 ch 光送信 / 受信モジュール (TX/RX) を作製した。IC には高速応答に適したバイポーラトランジスタ技術と電力消費の小さい CMOS 技術を組み合わせた BiCMOS 技術が用いられており、低消費電力での 10 Gbps 動作を可能にしている。

2. 並列光モジュールの特性

2.1 光モジュールの対向伝送特性と消費電力

光モジュールのケース温度 15°C から 80°C における TX/RX のチャンネル 7 の出力波形を図 3 に示す。TX の VCSEL バイアス電流は 4 mA で、12 チャンネル同時 10 Gbps 動作における 25°C の消光比は 4.5 dB 以上、-4dBm の平均光出力が得られた。温度を 15°C から 80°C に上げることで、VCSEL 閾値電流が増加し波形のオーバーシュートは大きくなるが、良好なアイ開口が得られた。RX の出力波形は測定温度範囲でほとんど変わらず、差動出力振幅は 240 mVpp, 立ち上がり / 立ち下がり時間が 35.7 ps / 37.5 ps と全温度範囲で良好な開口が得られた。12 チャンネル同時対向伝送における BER (bit error rate) 特性を図 4 に示す。BER = 10⁻¹² における最小受光感度は -11 dBm ~

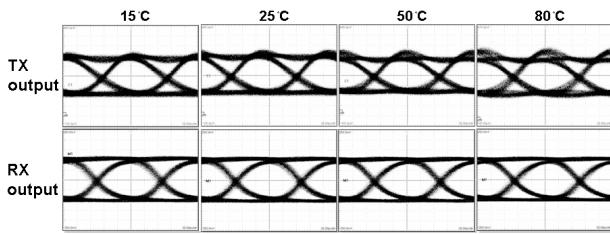


図3 TXとRXの出力波形.

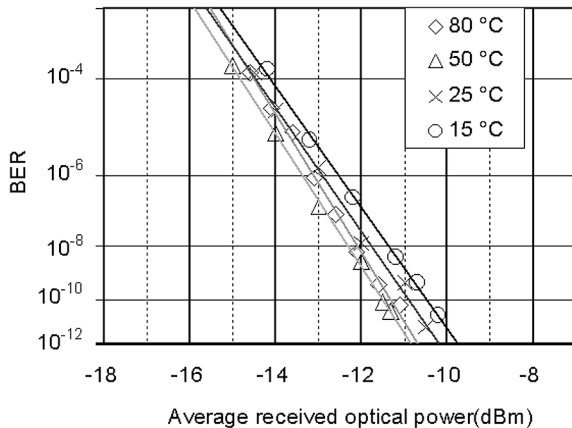


図4 15°Cから80°CのBER特性.

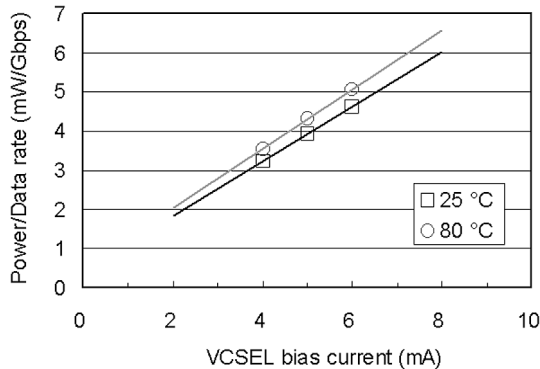


図5 TX消費電力のバイアス電流依存性.

-9.5 dBmであり、対向光リンクで5.5 dBの伝送マージンが得られた。図5にTXの1 Gbpsあたりの消費電力とVCSELバイアス電流の関係を、図6にTXとRXを合わせた1 Gbpsあたりの消費電力を示す。バイアス電流を6 mAから4 mAに下げることによって、消費電力は30%低減された。先述したバイアス電流1.8 mAで駆動するとTXで50%以上の消費電力低減が見込まれ、さらなる電力消費量の削減が期待できる。本結果においては、80°Cのリンク消費電力は最大7 mW/Gbpsであり、2012年の要求レベルを大きく下回る結果を得た。

2.2 OM2ファイバーを用いた伝送特性

一般的に使用されるOM2-MMFを用いた1060 nm光リンクの伝送特性を紹介する。既存のOM2-MMFと850 nm

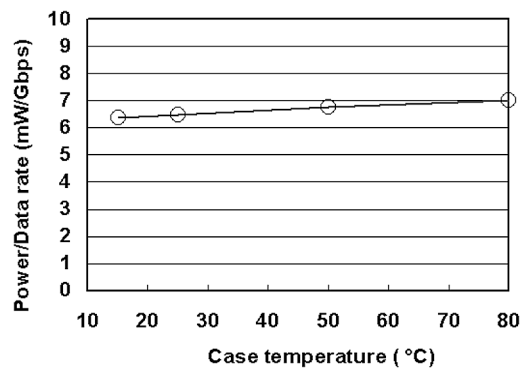


図6 ケース温度と光リンクの消費電力.

帯光モジュールの光リンクでは~82 mの伝送距離が見込まれるが、使用したOM2-MMFの1060 nmのOLF帯域は2262 MHz・kmと広いため、300 m以上の伝送が見込まれる。対向伝送から300 mまでペナルティーは<2dBと小さく、OM2-MMFの1060 nm光リンクで300 mのエラーフリー伝送を確認した。

1060 nm-VCSELアレイを低バイアス電流駆動することで消費電力を低減し、120 Gbps光リンクで消費電力7 mW/Gbpsを達成した。また300 mmまでのラック間伝送においても1060 nm光インターコネクションが適用可能なことを示した。光ファイバーの取り扱い懸念や実績から、現状では電気インターコネクションが主流であるが、高速化と低消費電力化に対して光インターコネクションは有効であり、今後の普及と技術の展開に注目したい。

文 献

- 1) www.cir-inc.com: "Data communications transceiver markets: 2009-2014," Aug. 2009.
- 2) H. Nasu: "Short-reach optical interconnects employing high-density parallel-optical modules," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., to be published in Sept./Oct. 2010 issue.
- 3) K. Takaki, et al.: "Experimental demonstration of low-jitter performance and high-reliable 1060 nm VCSEL arrays for 10 G × 12 ch optical interconnection," SPIE Photonics West, 7615-01 (2010).
- 4) T. Aggerstam, et al.: "Large aperture 850 nm oxide-confined VCSELs for 10 Gbps data communication," SPIE, 4649 (2002) 19-24.
- 5) S. Nakagawa: "1.5 mW/Gbps low power optical interconnect transmitter exploiting high-efficiency VCSEL and CMOS driver," Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), OThS3 (2008).
- 6) T. Anan: "High-speed 1.1 μm-range InGaAs VCSELs," Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), OThS5 (2008).
- 7) J. B. Héroux, et al.: "Low power optical interconnect at 10 Gbps with high efficiency 1060 nm VCSEL," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), CWP3 (2010).

(2010年5月19日受理)