光インタコネクション用低消費電力 10 Gbps × 12 ch並列光モジュール

Low Power Consumption 10 Gbps \times 12 ch Parallel Optical Module for Optical Interconnection

石川陽三*	伊 澤	敦*	根角昌	µ 伸*	吉原正和*
Yozo Ishikawa	Atsushi I	zawa	Yoshinobu N	Nekado	Masakazu Yoshiwara
高橋	克 年 *	上村寿	÷憲*	那須秀	÷行*
Katsutoshi	Takahashi	Toshinori U	Jemura	Hideyuki	Nasu

概要 近年, データセンタ内で取り扱うデータ量の急激な増加に対して, チャンネル当りの伝送速 度が10 Gbps以上の光インタコネクションの導入に期待が集まっている。光インタコネクションは 長距離伝送, 高速伝送, 低消費電力などの点で優れているが, IT機器メーカの環境に対する配慮が高 まるに連れて, 特に低消費電力が注目されている。当社ではデータセンタ内の機器間及び機器内双方 に適用可能な小型10 Gbps×12 ch並列光モジュールの開発を進めており, 低消費電力ICと低バイ アス電流駆動が可能な当社の高効率1 µm帯VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) アレイを 用いることで消費電力7 mW/Gbpsを達成した。本稿では並列光モジュールの構造と特性について紹 介する。

1. はじめに

インターネットの急速な普及に伴いデータセンタ内における サーバ,ストレージなどの機器で処理するデータ量が急激に増 加している。データ処理量を増やすためにデバイス単体の高速 化が進められる一方で,CPU(中央演算処理ユニット)-メモ リ間及び,デバイス間の通信速度を上げる必要も出てきており, インタコネクションの高速化が重要になっている。

これまでデータセンタなどのインタコネクションでは伝送距 離が限られていることから、伝送損失は大きいが安価で扱いや すい電気インタコネクションが用いられてきた。近年は処理す る情報量が年々増加しており、一配線当りで処理可能なデータ 容量を増加させる必要が出ている。機器間でも10 Gbps以上の 伝送速度が求められる昨今では電気インタコネクションの処理 能力限界が叫ばれるようになっており、光インタコネクション の導入が盛んに検討されている。図1は電気インタコネクション の導入が盛んに検討されている。図1は電気インタコネクショ ンと光インタコネクションの境界を伝送距離とチャンネル当り の伝送速度の関係で表している¹⁾。実線が電気インタコネク ションと光インタコネクションの境界である。10 Gbps以上の 伝送速度を求める場合、電気配線では数m以上の伝送距離を 実現することは難しいと考えられている。一方光配線は信号線 路の損失が電気配線に比べ非常に小さく、また外部環境からの ノイズの影響を受け難いため、より長い距離のデータ伝送が可 能である。光インタコネクションには2.72 Gbps×12 chで 300 m伝送可能なSNAP12²)を用いた並列光リンクや IEEE802.3ae 10GBASE-SR³ (10 GbE)で規格化された光リンク があげられる。今後は2010年にIEEE P802.3ba 40 Gbps and 100 Gbps Ethernet task forceの標準化が予定されており、10 Gbps×10 ch以上の伝送速度を持った並列光リンクへの期待が 高まっている。

我々は、伝送速度10 Gbps × 12 chで距離数百mまで対応し 高密度実装に適応できる小型並列光モジュールを開発してお り、自社製の高効率1 μ m帯VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) アレイを用いて^{4).5)},実使用に則した動作条件 で7 mW/Gbpsの消費電力を達成した。本稿では開発したモ ジュールのコンセプト、構造及び特性について紹介する。

^{*} 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所



図1 伝送距離と速度における光インタコネクションと電気 インタコネクションの境界 Boundary between optical interconnection and electrical interconnection, using transmission distance and signal speed as a parameter.

2. 光インタコネクションモジュールのコンセプト

光インタコネクションは伝送距離ごとにラック間,ボード間, チップ間,チップ内伝送と分類され,ラック間は10 m以上,ボー ド間は1 m程度,チップ間は10 cm程度,チップ内はそれ以下 と振り分けられる。図2に、ラック間伝送とボード間伝送の様 式図を示している。ラック間からチップ内へと伝送距離が短く なるに連れて構成部品の高集積化が要求され、構成部品の小型 化が求められるようになる。光モジュールに目を向けると,ラッ ク間伝送用ではSNAP12やAOC (active optical cable)に代表 される総伝送速度が数十Gbpsの並列光モジュールが製品化さ れており、ボード間伝送用にチャンネル当たりの伝送速度が 10 Gbps以上で高密度実装可能な小型並列光モジュールの開発 も報告されている^{6).7)}。



図2 ラック間伝送とボード間伝送の模式図 Schematic views of rack-to-rack and board-to-board interconnection.

昨今の情報処理能力の高速化に伴い,情報処理施設における 消費電力の増加が懸念されている。デバイスの高速化及び使わ れるデバイスの数量増加に伴う消費電力の増加がその懸念であ る。また既存のデータセンタでは空調で総電力の30%以上を 消費しているとも言われており,発熱による温度上昇を抑える 空調機器の電力増加や,機器の高密度配置によって起こる冷却 効率の低下を補うための電力増加も問題となっている。インタ コネクションに光技術を導入すると伝送損失を低減でき,また 配線物量が減少されることにより対流可能な空間が広がって機 器の冷却効率が改善される。しかしながら情報処理能力の高速 化が進む中では,伝送損失の低減や冷却効率の改善だけでは消 費電力増加を抑制できない。インタコネクションで求められる 1 Gbps当りの消費電力の2020年までの傾向を図3に示す。現 在は電気配線が主流で消費電力は40 mW/Gbps程度あり, 2012年にはボード間伝送に光配線が採用されて10 mW/Gbps まで電力消費が下がり,2016年にはチップ間配線の光化で3 mW/Gbps,2020年にはチップ内配線の光化で1 mW/Gbpsと, 顕著な低消費電力化が期待されている。



図3 インタコネクションの消費電力の傾向^{1).8)} Trends in power consumption of interconnection.

我々はラック間及びボード間双方に適用可能な,小型で,伝 送速度が10 Gbps×12 ch,消費電力が10 mW/Gbps以下の並 列光モジュールを開発している。120 Gbpsの伝送速度と低消 費電力を満足するために,BiCMOS (bipolar complimentary metal-oxide semiconductor)技術を用いた低消費電力のLDD (laser diode driver),TIA (trans impedance amplifier)を採用 した。送信モジュールには波長が1 μm帯のInGaAs (indium gallium arsenide)-VCSELアレイを用い,受信モジュールには 1 μm帯に高い受光感度を持つInGaAs-PD (photo diode)アレイ を用いた。

1 μm帯VCSELは、一般的に光インタコネクションで使われ る波長850 nm帯のGaAs系VCSELに比べて微分利得が高いた め⁹⁾、VCSELのしきい値電流と駆動電流が同じ条件下ではよ り高い緩和振動周波数を得ることができ、高速動作が可能にな る¹⁰⁾。10 Gbpsの動作速度においては、より低い駆動電流で十 分な帯域が得られるため、光モジュールの消費電力を下げるこ とが可能になる。

光リンクの伝送特性に目を向けると、送信光モジュール (TX)と受信光モジュール(RX)間の伝送マージンを大きく確 保することが重要になる。伝送マージンを決める特長的な項目 について1 μm帯と850 nm帯の比較を**表1**に示す。

Comparison of characteristics of optical link components at 1050 nm and 850 nm.						
Items	Details	1 μm-range (1050 nm)	850 nm-range (850 nm)			
Rx-module, PD	Responsivity	0.75 A/W	0.6 A/W			
Optical fiber	Transmission loss	0.95 dB/km	2.09 dB/km			
	Chromatic	- 34.01	- 90.42			
	dispersion	ps/(nm·km)	ps/(nm·km)			
Tx-module, Eye safety	Mariana antial	+1.5 dBm	– 2.2 dBm			
		Class 1,	Class 1,			
	output power	12 ch module	12 ch module			

表1	光リンク構成部品の特性の波長比較				
	Comparison of characteristics of optical link				
	components at 1050 nm and 850 nm.				

我々がRXに用いるInGaAs-PDは1050 nmで0.75 A/W 以上 の感度を持ち、一般的なGaAs-PDの受光感度0.6 A/Wよ り大きい。光リンクを構成する上でRXの最小受光感度 は重要なパラメータであるが、1 µm帯は1 dBほど小さ い受光感度を実現できることになる。

石英系マルチモード光ファイバ (MMF) は伝送損失と波長分 散に波長依存性を持つ。検討に用いたMMFの1 µm帯の伝送 損失は850 nm帯のそれに比べると1 dB/kmほど小さい。また 波長分散においては1 µm帯の方が1/3程度小さく、同じ波長 幅で比較すると、伝送距離が伸びても信号波形のひずみを小さ く抑えられる。数百m以上の伝送距離が求められる場合は波 長分散の影響を受けにくい1 μm帯が有効である。

TXの最大光出力はIECによってアイセーフティ規格として定 められる11)。光接続部がMTコネクタタイプの12チャンネル モジュールの場合、取り扱い制限のないClass 1規格では1 µm 帯の方が3 dBほど大きな光出力が許容されると見積ることが できる。TXの光出力を大きく設定できれば伝送マージンを稼 ぐことが可能になる。

以上の比較から1 um帯は伝送距離に対してマージンを大き く取った光リンクを設計するのに有効であると言える。

3. 開発モジュールの構造

先の章で並列光モジュールの主要なコンセプトを述べてきた が、本章では開発品の構造について紹介する。図4にピッグテー ルタイプの光モジュールを示す。ピッグテール部を除いた外形 寸法は高密度実装にも適用できるよう13×13×3.4 mm³と小さ く, モジュール底面に面積11 mm² のフットプリントに合う電 気インターフェース部を持つ。IC (LDD またはTIA) から発せ られた熱は、上方に設けた金属カバーを介してヒートシンクな どに伝わり放熱される。



並列光モジュール12) 図4 Photo of parallel optical module.

ボード間伝送で想定されるようなプリント基板 (PCB) 上に 光モジュールを実装する形態の場合、他にも多くのデバイスが PCBに実装される。光モジュールが直接はんだ実装されてい ると、光モジュールの故障によってPCBごと交換する必要性 も出てくる。我々は故障した光モジュールを容易に交換出来る よう、電気インターフェースとしてプラガブルソケットを開発 した¹³⁾。図5にプラガブルソケットを用いた光モジュールの実 装例を示す。プラガブルソケットはスプリングピンを1 mm ピッチで2次元に配列しており、高速I/Oのピン配置において 10 GHzを超える広帯域の周波数特性を有している。ヒートシ ンクで光モジュールをソケットに押し付け固定し、光モジュー ルとPCBを電気接続させて信号伝送を行う。



図5 並列光モジュールと電気プラガブルソケット13) Parallel optical module and electrical pluggable socket.

4. 光モジュールの特性

本章では低消費電力1 µm帯光モジュールの特性を紹介する。 光モジュールの評価系を図6に示す。TX光モジュール(TX), RX光モジュール(RX)はそれぞれ電気プラガブルソケットを 介して評価ボードに実装されている。評価ボードには広帯域の 差動伝送線路が12チャンネル分形成されており、小型で広帯 域のコネクタを有するRFケーブルを介してPPG. オシロス コープ、エラーディテクタに接続されている。温度コントロー ルユニットで光モジュールのケース温度を調節する。ケース温 度を変えながらTXの光出力波形と、対向伝送におけるRXの 電気出力波形,符号誤り率BER (bit error rate)を測定した。

温度15℃から80℃における12チャンネル同時動作時のTX 及びRXの出力波形を図7に示す。TXのVCSELバイアス電流 を4 mAに設定したとき、消光比は25℃で4.5 dBであった。温 度を15℃から80℃に上げることで波形のオーバーシュートは 大きくなるが、十分な開口が得られている。RXにおいても差 動振幅240 mVpp, 立上り/立下り時間が35.7 ps/37.5 psと全 温度範囲で良好な開口が得られた。



図6 光モジュール評価系¹⁴⁾ Block diagram of test setup for optical module.



図7 TXモジュールとRXモジュールの出力波形¹⁴⁾ Output waveforms of TX-module and RX-module.

対向伝送におけるBER特性を図8に示す。15℃から80℃で BER = 10⁻¹²における最小受光感度は – 11 dBmから – 9.5 dBm であった。TXの光出力は – 4 dBmであり,光リンクの伝送マー ジンは5.5 dBとなる。TXの光出力波形,伝送距離,光ファイ バの伝送帯域を最適化することで伝送ペナルティは抑制される が,一般的に3 dB程度のペナルティを見込む必要がある。本 検討では2 dB以上余裕のある光リンクを示すことができた。



図8 15℃から80℃のBER特性¹⁴⁾ BER characteristics at temperatures from 15℃ to 80℃.

図9に25℃と80℃におけるTXのVCSELバイアス電流と消 費電力の関係を示す。TXの消費電力はバイアス電流に殆ど比 例し、ケース温度80℃の方が比例係数は大きくなっている。

既存の850 nm VCSELにおいて25℃の光出力波形を評価し たところ、6 mA以上のバイアス電流で良好なアイ開口が得ら れたことから、TXの消費電力は5 mW/Gbps以上が見込まれ る。1 µm帯VCSELを実装したTXではバイアス電流4 mAの 条件で、良好な光出力波形と、対向伝送のBER=10⁻¹²において エラーフリーが確認された。TXの消費電力は3 mW/Gbps程 度であり、既存の850 nmVCSELを使用した場合に比べて、消 費電力が60%程度になると見積られる。



図9 TXモジュール消費電力のバイアス電流依存性¹⁴⁾ Bias-current dependeny of TX-module power consumption.

TXとRXを合わせた消費電力と15℃から80℃までのケース 温度の関係を図10に示す。1 Gbps当りの消費電力は80℃でも 7 mW/Gbpsであった。伝送距離を伸ばす場合,伝送ペナルティ を考慮してTXの消光比を上げるために,TXの消費電力が上 がることもありうる。しかしながら10 mW/Gbpsまでは十分 な余裕があり,本検討の光モジュールが2012年見積レベルを 十分満足できることを示している。



図10 TXモジュール消費電力のケース温度依存性¹⁴⁾ Case-temperature dependency of TX-module power consumption.

5. 1 µm 帯光リンクの伝送特性

4章では1 μm帯光リンクの低消費電力動作に関して述べた が、ここでは複数種のファイバを用いた光リンクの伝送特性に ついて紹介する。

5.11 µm帯光リンクの伝送距離限界

10 Gbps/chのラック間伝送における伝送距離は300 mまで とされているが、大規模なデータセンタでは300 m以上の要求 もあると言われている。伝送距離はMMFのモード分散に大き く影響され、モード分散の影響はファイバの伝送帯域で表わさ れる。光インタコネクション用のMMFは伝送帯域ごとに国際 規格によって標準化されている。ISO/IEC11801 (International organization for standardization/International electrotechnical commission)では850 nm/1300 nmで最小帯域500 MHz·km以上のものをOM2,850 nmで最小実効帯域2000 MHz·km以上のものをOM3と規定している。10 GbEでは82 mまでの伝送にはOM2,300 mまではOM3が指定されている。 また300 m以上の伝送については、最小実効帯域4700 MHz·km のOM4ファイバの標準化が検討されている。

我々は伝送帯域を1050 nmに最適化したMMFを試作して 1 μ m帯光リンクを構成し、光リンクの伝送限界を調べた。使用 したMMFのOFL (over filled launched)帯域は4300 MHz·km で、OM4の実効帯域と殆ど変わらず広帯域であった。

各距離伝送後の光出力波形を図11に示す。対向伝送(BTB) から650 mまで波形劣化はほとんど見られないが,800 m以上 でISIペナルティが大きくなり開口は潰れ始める。BTBから 1000 mで消光比は2 dB弱低下しており,1300 mで立上り/立 下り時間を測定できないほど波形が劣化している。



図11 各距離伝送後の光アイダイアグラム Optical eye diagram after transmission over different distances.

光リンクのBER特性を図12に示す。1300 m伝送ではISIペ ナルティで光信号のS/Nが低下したためにエラーフロアが見 られたが、1000 mまではBER=10⁻¹²においてエラーフリーを 達成しており、-8 dBm以下の受光感度が得られた。本光リ ンクの伝送限界は1000 m以上であり、本検討において1 μm帯 光リンクを1 kmまでのアプリケーションに適用できることが 示された。



図12 各距離伝送後のBER特性 BER characteristics after transmission over different distances.

BTBを基準とした受光感度の差をパワーペナルティとして、 伝送距離との関係を**図13**に示す。図中の点は先のBER測定よ り得られた実測データを示す。実線はIEEEで開示されたスプ レッドシート¹⁵⁾を用いて算出した見積値で、計算条件として 中心波長1050 nm, RMS (root mean square) 波長幅0.42 nm, MMFのOFL帯域4300 MHz·kmを用いた。計算では700 mで 3 dB, 1000 mで9 dB超のペナルティが見積られたが、データ は1000 mで3.2 dBと、大きく見積を下回っている。これは光 リンクのMMF中の伝播状態がOFL状態と異なり、伝播モー ドが限定されて実際の帯域がOFL帯域より大きくなったため と考えられる。破線は、中心波長を850 nmにして、他の条件 を同一にした場合のペナルティの計算結果を示している。ペナ ルティ3 dBの伝送距離は500 m以下と見積られる。一方で、 波長1050 nmの場合は200 mほど長く700 mと見積られ、これ はMMFの波長分散が小さいことに起因する。このことから広 帯域のMMFを用いて500 m以上の伝送を行う場合、1 µm帯 は850 nm帯に比べてより大きな伝送マージンを期待できる。



図13 パワーペナルティの伝送距離依存性 Relationship between power penalty and transmission distance.

5.2 汎用 MMF を用いた1 µm 帯光リンクの伝送特性

光インタコネクションで使われる石英系MMFは伝送 帯域でOM2及びOM3に分類さるが、これらは850 nm と1300 nmを対象としている。OM2及びOM3を用いた 1 μm帯の伝送帯域は標準化されておらず、一般的にあ まり知られていない。ここではOM2及びOM3で構成し た1 μm帯光リンクの伝送特性を紹介する。

石英系MMFを使った300 m以下の伝送において波長分散の 影響は小さく、モード分散による帯域制限が支配的となるため、 使用する波長におけるMMFの伝送帯域が重要となる。本検討 で使用したOM2及びOM3の伝送帯域を**表2**に示す。OM2の 1060 nm OFL伝送帯域は2262 MHz·kmと850 nmや1300 nm のOFL帯域に比べて広く、スプレッドシートを用いた見積で はペナルティ3 dBの距離が350 m以上となり、300 m以上の 伝送が可能と見込まれる。OM3は850 nmに最適化されている ため、1060 nmで1094 MHz·kmと850 nm OFL帯域に比べて 狭いが、150 m以上の伝送は可能と見積られた。

表2	使用したOM2及びOM3の伝送帯域
	OFL bandwidth of OM2 and OM3 used.

Category	850 nm/1300 nm OFL Bandwidth	1060 nm OFL Bandwidth
OM2	850 nm, 789.9 MHz·km 1300 nm, 1602.4 MHz·km	2262 MHz·km
OM3	850 nm, 4509 MHz·km 1300 nm, 708 MHz·km	1094 MHz·km

OM2及びOM3を用いた1 µm光リンクのBER特性をそれぞ れ図14及び図15に示す。OM2及びOM3共にBTBから300 m までBER=10⁻¹²でエラーフリー伝送を確認できた。OM2の 300 m伝送におけるパワーペナルティは2 dB未満であり、300 mで伝送マージンがあることが示された。OM3では150 mか ら300 mで伝送ペナルティが2 dB以上増加しており, 伝送限 界は300 m程度と見られるが, 150 mまでは伝送マージンを 持っていることが分かる。本検討で使用したOM2及びOM3で 構成した1 μm帯光リンクは150 mまでの伝送が十分可能であ り, OM2を用いた光リンクは300 mまで適用可能であること が示された。



図14 OM2-MMF伝送後のBER特性 BER characteristics after OM2-MMF transmission.



図15 OM3-MMF伝送後のBER特性 BER characteristics after OM3-MMF transmission.

6. おわりに

ボード間光インタコネクションに向けて高密度実装可能な小型10 Gbps×12 ch並列光モジュールを開発した。1 μm帯 VCSELアレイ及びPDアレイとBiCMOS技術を用いた低消費 電力ICを採用し、TX-RX対向12チャンネル同時伝送で7 mW/Gbpsの消費電力を達成した。1 μm帯最適化MMFを用い た1 km伝送やOM2及びOM3ファイバを用いた300 m伝送を 達成し、ラック間伝送においても1 μm帯光リンクは広範囲で 適用可能であることを示した。今後更に低消費電力化が重視さ れるなか、低消費電力と1 μm帯の特長を生かして、高まる光 インタコネクションの需要に応えられるよう商品開発を進めて いく。

参考文献

- H. Nasu: "100 Gbps for \$100, 1 μm-wavelength-range optical interconnects employing high-density parallel-optical modules", OFC/NFOEC, Workshop OMA, (2009).
- 2) SNAP12 Multi-Source Agreement, Rev 1.1, (2002).
- 3) IEEE standards 802.3ae, Jun. 2002.
- 4) K. Takaki et al: "A recorded 62% PCE and low series and thermal resistance VCSEL with double intra-structure," IEEE International Semiconductor Laser Conf., PD1.1, Sept. (2008)
- K. Takaki et al: "Experimental demonstration of low-jitter performance and high-reliable 1060 mm VCSEL arrays for 10 G × 12 ch optical interconnection," SPIE Photonics West, 7615-01, (2010).
- T. Ishikawa et al: "High-density and low-cost 10 Gbps×12 ch optical modules for high-end optical interconnect application," OFC/NFOEC, OMK6, (2008).
- J. Sasaki et al: "PETIT: a compact 40 Gb/s optical interface module for multi-terabit backplane interconnects," OECC, 6F4-2, (2005), 340-341.
- 8) The Green 500, http://www.green500.org/.
- Thomas Aggerstam et al, "Large Aperture 850 nm Oxide-Confined VCSELs for 10 Gbps Data Communication," SPIE, 4649, (2002), 19-24.
- N. Suzuki et al: "1.1 μm-range InGaAs VCSELs for high-speed optical interconnections," IEEE PTL, 18, (2006), 1368-1370.
- 11) JIS C 6802:0000 (IEC 60825-1:2001)
- H. Nasu et al: "Very low power of<7 mW/Gbps, 1060 nm 120 Gbps optical link employing high-density parallel-optical module, "ECOC, (2009), P6.17
- 13) 那須 他: "電気プラガブルソケット搭載120 Gbit/s並列光モ ジュール, "信学ソ大, (2008), C-3-4.
- 14) 吉原他: "1 μm帯を用いた低消費電力10 Gbps×12 ch並列光 モジュール,"信学ソ大, (2009), C-3-54.
- 15) IEEE 802.3z link model spreadsheet, rev.3.1.16a, 10 GEPBud3_1_16a.xls (2005).