

## 並列計算機内 1 次元並列光リンク

高井 厚志

日立製作所 情報通信事業部 光伝送本部

光インタコネクはメタルケーブルを光ファイバレイケーブルで置換え、配線ボトルネックを解消し桁違いの情報処理可能な装置、並列計算機や大容量通信装置を実現する。シングルモードファイバと 1.6 mA の低しきい値レーザアレイを用いた 200-Mbit/s/ch, 12-ch, 100m, +3.3V CMOS インタフェースの低スキュー光インタコネクを開発した。高消光比レーザ駆動と固定識別レベル受信により直流直結エラーフリー・小型・低消費電力化と気密封止による高信頼を実現し世界に先駆け実用化した。

## Parallel Optical Link for Parallel Processor Systems

Atsushi Takai

Fiberoptic Transmission Operation, Telecommunications Division, Hitachi, Ltd.

Optical interconnects will dispel the "interconnection bottleneck" in designing massive parallel processor systems as well as ATM switching systems, using high speed synchronous parallel optical transmissions. We developed 200-Mbit/s/ch, 12-ch, 100m, +3.3V CMOS interface optical interconnects using single-mode fiber arrays, planar micro-lens arrays and 1.6-mA-threshold-current 1.3- $\mu\text{m}$  LD arrays. These interconnects are fully DC-coupled and error-free (extrapolated BER  $< 10^{-20}$ ) and reliable with hermetically sealing and laser welding. The skew was less than 2.6 ns in the condition of 0 - 80 °C case temperature and +3.3  $\pm$  0.3V power supply.

## 1. はじめに

高度情報化社会に向け桁違いの情報処理能力を有するシステム実現への技術革新が期待されている。LSIの高集積・高速化およびそれらの高密度実装技術の著しい進歩に対し、配線が性能向上のボトルネックになってきている。

この配線ボトルネックを克服する技術として光インタコネクタが期待されている。高速・長距離伝送を可能にする広帯域低損失という伝送路としての特徴に加え、軽量細径で耐雑音環境性に優れ、架間の接地電位差の問題もなく配線として優れた特徴も備えた光ファイバを使用した配線技術である。さらに電磁界環境規制強化に伴って、電磁波を発生しない、また、影響を受けにくい光ファイバが配線材料として注目されている。

最近実用化に向け研究開発が活発なのはボード間・装置間光インタコネクタである。これは、通信装置やコンピュータシステムで高速配線に使用されているメタルケーブルを光ファイバアレイケーブルで置換え、高速・高密度配線を軽量・細径で実現する。>40 Gbit/sの大容量ATM (Asynchronous Transfer Mode)交換機へは既に実用化レベルで搭載されている。超並列コンピュータシステムでは本報告で述べるように実験段階にある。

本報告では、最近の光インタコネクタ研究開発の動向と、超並列計算機 RWC-1 に搭載された<sup>1)</sup>、小型・低消費電力で高信頼なシングルモードファイバ光インタコネクタについて述べる。

## 2. 光インタコネクタの動向

表1に最近の光インタコネクタの報告をまとめた<sup>2-13)</sup>。従来、多様な光インタコネクタが開発されたが、最近の傾向は1.3 μm 端面発光LD (単にLDという)アレイと850 nm 面発光LD (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting LD)アレイを用いた光インタコネクタに大別される。

前者は光伝送で信頼性の実績があり大量に使用されつつある1.3 μm 端面発光LDをアレイ化し、従来の実装技術のアレイ化で実用化を狙っている。この光インタコネクタは実用期にあり、主にATM交換機等、従来より光技術を利用し使用に抵抗の少ない通信装置に適用されている。本領域では従来の通信用光伝送モジュールと同等の信頼性が要求されている。このため、気密封止が必須で複雑な構造となっている。これに対し最近低価格のPassive Alignment技術を用いたLDモジュール技術を適用した光インタコネクタが発表されている<sup>7)</sup>。

後者は価格低減を主目的にVCSELの使用とレ

表1 最近の光インタコネクタ発表例

	Hitachi	Hitachi	NEC	Motorola	POLO	Vixel	OETC	Jitney
Ref.	5)	6)	7)	8)	9)	10)	11)	13)
Data rate (Mbit/s/ch)	200	800	1100	400	622	1250	500	500
Channel number	12	10	8	10 x 2	10/20	4	32	20
Length (m)	100	-	-	300	300	-	100	100
Skew (ns)	2.6	0.3	-	0.5+0.5	-	-	0.5 typ	0.5 typ
Interface	T-LV	PECL	ECL	PECL	ECL	PECL	ECL	LVDS
Supply voltage(V)	+3.3	+3.3	-	+5.0	(-5.2)	+5.0	-3.5, -3.3,-2.5	-3.5, -3.3,-2.5
Total power (mW/ch)	200	280 typ	(770)	170	150	620	260	300
Package	4 x 6-pin PGA	13-pin	62-pin Butterfly	14x14-pin PGA	122-pin (QFP)	8 x 2-pin DIL	164-pin QFP	94-pin QFP
Area (cm <sup>2</sup> /ch)	0.32	0.12	-	0.75	0.8	4.2	-	0.28
Light source	LD	LD	LD	VCSEL	VCSEL	VCSEL	VCSEL	VCSEL
Fiber	SMF	SMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF	MMF
Wavelength	1.3 μm	1.3 μm	1.3 μm	850 nm	850 nm	850 nm	850 nm	850 nm

セブタクル(単にレセという)型パッケージを主課題としている。VCSEL は劈開を必要とせず on-wafer test が可能なことから低価格化可能と考えられている。また、Passive Alignment 技術を用いたレセ型パッケージにより使い勝手向上と価格低減をねらっている。

主にワークステーション間的高速バスを目的としており、VCSEL の研究開発の活発な米国が主導している。OETC、POLO の ARPA 支援のプロジェクト、IBM 等の Jitney 合同プロジェクトと Motorola、Vixel の発表がある。このうち、Motorola と Jitney は \$100/(Gbit/s) と \$1/(Mbytes/s) というほぼ同等の価格目標を発表している。

OETC では 160 Gbit/s ATM 交換機および SCI-Link への搭載実験を行っている。

この光インタコネクットの課題は VCSEL と Passive Alignment の信頼性にある。850-nm VCSEL はバンドギャップエネルギーと直列抵抗が大きいため発光時の印可電圧が高い。さらに、放熱抵抗が高いため寿命が短い。改善の努力が重ねられているが、実用化にはもう少し時間が必要と考えられる。

### 3 技術課題<sup>2-3)</sup>

光インタコネクットの基本方式はファイバレイを用いた多チャンネル並列同期伝送であり、各チャンネルの電気入力から電気出力までの遅延時間を同一にする必要がある(図1)。メタル配線を置換え可能な光インタコネクットを実現するための主な技術課題は以下の通り。

- (1) 直流結合エラーフリー(低誤り率)伝送
- (2) 遅延時間バラツキ(以下スキュー)低減
- (3) 小型集積、低消費電力化
- (4) 高信頼、低価格化

報告者らはこれら技術課題を解決した光インタコネクットを世界に先駆けて発表した<sup>2)</sup>。さらに、実用化を目指し、200 Mbit/s x 12 channel 光インタコネクット製品化した。以下、この製品を例に光インタコネクットの課題とアプローチを報告する。

#### (1) 直流結合エラーフリー

制御信号も転送するには直流結合方式が必須であり、消光レベルを基準とした固定識別レベル受信方式を採用した。固定識別レベル方式ではリングングやクロストークを含めた消光比は許容伝送損失より大きくなければならない。このため、しきい特性を有する LD が有用であり、しきい電流以下バイアスで駆動している。バイアスは全チャンネル動作時でもリングングやクロストークで発光しないレベルに設定される。

外挿誤り率 BER (Bit error-rate)は数百チャンネルが 10 年間誤らない  $10^{-20}$  以下を目標とした。エラーフリー転送するために高 S/N 受信とした。光インタコネクットでは受信回路雑音が支配的であり、高 S/N 受信は後述の受信スキュー低減とダイナミックレンジ拡大とのトレードオフにある。クロストーク等を考慮して最小レベル光入力  $50 \mu\text{W}$  とし BER =  $10^{-20}$  相当の S/N を確保した<sup>2)</sup>。

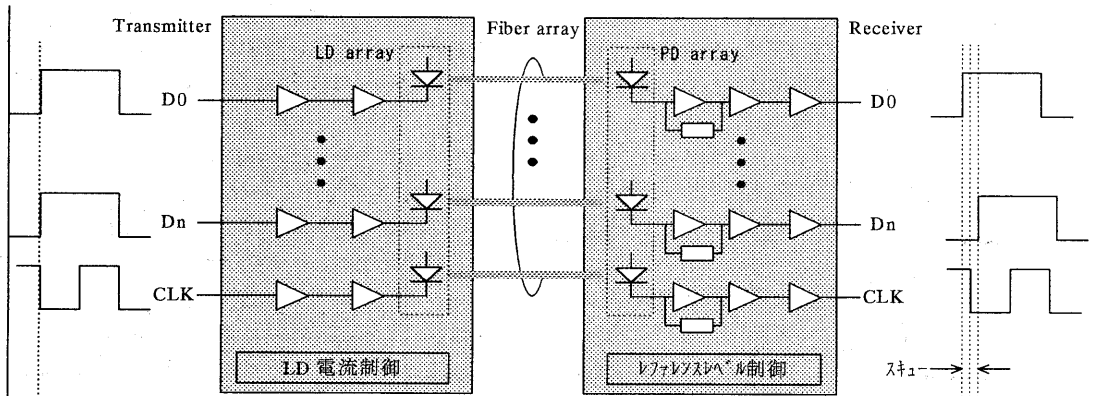


図1 光インタコネクット基本構造

## (2) スキュー低減

光固有のファイバスキュー、送信(発光遅延)スキュー、受信(入力パワー依存)スキューを低減する必要がある。

伝送路のファイバスキュー低減のためシングルモードファイバ(SMF)アレイを用いた。スキューは布設形状で変動するが12 ch程度ではSMFで2 ps/m以下である。また、SMFではモデル雑音によるスキューも発生しない。

送信スキュー(図2)はLD発光遅延のバラツキと温度依存性が主原因である。前述のようにLDのしきい特性を利用ししきい電流以下でバイアスするため、発光遅延を生じる。これはバイアスと変調電流に温度特性を持たせることにより動作温度範囲でスキューを一定内とするようにした。これを安定に実現するために後述の高均一の低しきい電流LDアレイを開発した。

受信スキューはデータの識別レベルが固定のため、入力パワー変動により生ずる(図2)。入力依存スキュー低減のため送信光出力パワーの均一化( $< 3\text{dB}$ )、光コネクタロス低減( $< 3\text{dB}$ )と受信回路の高速化(帯域)1GHzを図った。

## (4) 小型・低消費電力化

小型低消費電力化のためには回路の簡素化が必要である。固定バイアス駆動/固定識別レベル受信方式を採用した。従来の光伝送モジュールに比較し大幅な回路規模低減を図った。

送信回路の各チャンネルは入力バッファ、電流切換回路とバイアス回路で構成される。低しきい値電流LDを用いている為、従来の自動パワー(バイアス)制御(APC: Automatic Power Control)、自動温度制御回路(ATC: Automatic

Temperature Control)が省略されている。LDアレイがp基板を用いている為、簡単なnpnトランジスタ電流切換え回路で個別に駆動されている。

各チャンネルの受信回路はプリアンプ、ポストアンプ、コンパレータとCMOS出力バッファで構成されている。全段直流結合でコンパレータのレファレンスは固定である。固定識別レベル方式なので利得制御や自動識別レベル設定等の回路は省略されている。固定識別レベルはクロストーク、リングング等を考慮して入力光パワー換算25  $\mu\text{W}$ に設定した。

本ICは0.5  $\mu\text{m}$  BiCMOSプロセスで試作した。チップサイズは5.8 x 2.9  $\text{mm}^2$ 、3.3 V単一電源で光素子を含めて消費電力は送受とも1.2 Wであった。チャンネル当たりでは送受合計200 mW/chとなる。

## (4) 高信頼モジュール実装

結合効率の向上と気密封止を目的としてPMLアレイを用いた光結合技術を開発した。PMLはイオン交換法による直径80  $\mu\text{m}$ のPMLを12個250  $\mu\text{m}$ 間隔で集積化したアレイを採用した<sup>4)</sup>。

ファイバアレイはSiあるいはジルコニアに形成された溝に半田固定した。レンズアレイとファイバアレイは光軸調整後YAGレーザ溶接でパッケージケースに固定される。半田および溶接固定とすることにより信頼性を確保した。

## 4 光素子アレイ

### (1) 低しきい値電流LDアレイ

上記方式を実現するキーデバイスはLDアレイであり、低しきい電流、高均一、p端子共通化(npnトランジスタあるいはn-ch FETとの整

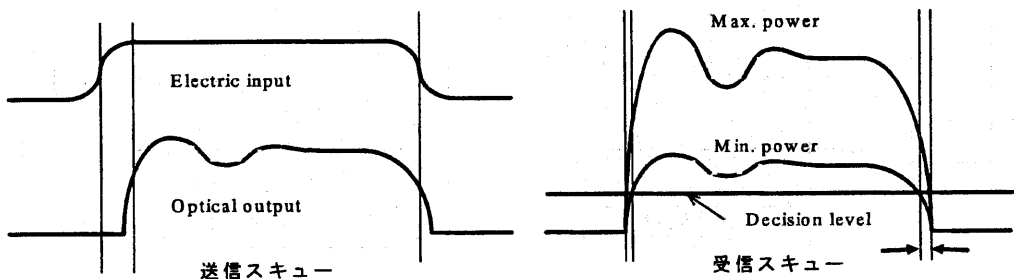


図2 送信スキューと受信スキュー

合性)が要求される。報告者らは光伝送で得られた広温度範囲・高信頼性より  $1.3 \mu\text{m}$  の LD アレイを採用した。

$250 \mu\text{m}$  間隔 12 チャンネル p 基板上  $1.3 \mu\text{m}$  埋込ヘテロ (BH: Buried Hetero) 構造 InGaAsP/InP LD アレイを開発した<sup>14)</sup>(図3)。低しきい電流化のために歪 MQW (Multi-Quantum-Well) を導入し、更に、低リーク埋込構造を開発した。短共振器長 ( $200 \mu\text{m}$ )・非対称高反射率 (70%/90%) 端面コーティングとした。高歩留・高均一化のために3回のエピ成長には MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法を適用した。

しきい電流は最小  $1.2 \text{ mA}$  で  $1.6 \pm 0.3 \text{ mA}$ 、効率は  $0.38 - 0.42 \text{ W/A}$  を得ている<sup>15)</sup>。

## (2) 低容量 PD アレイ

PD (Photo-detector) は受光直径  $50 \mu\text{m}$  の InGaAs/InP pin PD アレイを用いた。低容量化のためにガラスサブマウントにフリップチップ実装している。これにより、 $0.25 \text{ pF}$  の PD アレイを実現した。

## 5 モジュール構造と特性の概要

### (1) モジュール構造概要

図4にモジュール外観を示す。パッケージサイズは  $12.7\text{W} \times 32\text{L} \times 9.5\text{H} \text{ mm}^3$  である。ピン数は24で、PGA型とした。

VLSI の高速化と低電圧化を踏まえ、これと直結可能な  $+3.3\text{V}$  CTT (Center Tapped Termination) 電気インタフェースとした。

12 心光コネクタとして標準化が進められている MPO コネクタを採用した。また、高集積化

を目的に4つの MPO コネクタ接続を可能にする4連 MPO アダプタを開発した。

### (2) 特性概要<sup>5)</sup>

表2に主要性能をまとめた。

図5に送信スキューの累積分布を示す。LD 発光遅延により立上りスキュー (tr skew) は  $250-750 \text{ ps}$  であった。バイアスと変調電流に温度特性を持たせることによりケース温度 ( $T_c$ )  $0 \rightarrow 80^\circ\text{C}$  でスキューは  $50 \text{ ps}$  程度変動に抑圧できた。一方、発光遅延の影響を受けない立下り (tf skew) は  $\pm 100 \text{ ps}$  であった。

図6に受信スキューの累積分布を示す。入力パワー依存スキューは入力パワーが  $-12.3 \rightarrow -3 \text{ dBm}$  に変動した時、立上りで  $300-300 \text{ ps}$ 、立下りで  $100-700 \text{ ps}$  であった。レーザ立上り時間が立下り時間より短いことを反映して立上りのスキューが  $200 \text{ ps}$  小さくなっている。

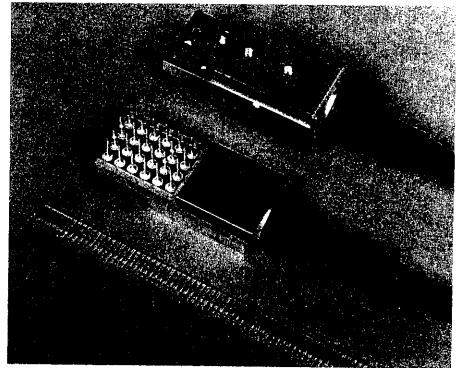


図4 光インタコネクタ外観図

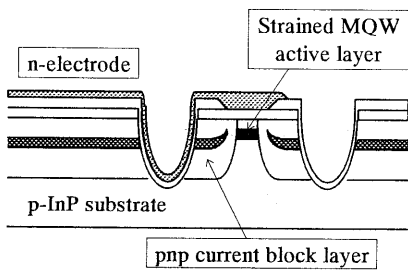
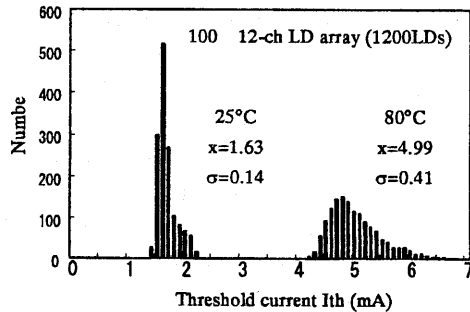


図3 低しきい値 LD アレイ構造としきい電流分布



#### 4. まとめ

200Mbit/s/ch、12チャンネル、+3.3VCMOSインタフェース光インタコネクタを開発し、実用レベルにあることを確認した。報告しなかったが従来の光モジュールと同等の試験を行い信頼性に問題ないことを確認した。

さらに、これを超並列コンピュータやATM交換機に適用し良好な結果を得た。

表2 主要諸元

Channel (MDS2211A)	11Data + 1 CLK
(MDS2201A)	12DATA
Data rate	> 200 Mbit/s/ch
Skew	< 2.6 ns
Length	> 100m
BER	< $10^{-20}$
Interface	CMOS (CTT)
Optical connector	12-MPO (SMF)
Power supply	+3.3V single
Power consumption	< 200 mW
Operating case temperature	0 - 80 °C

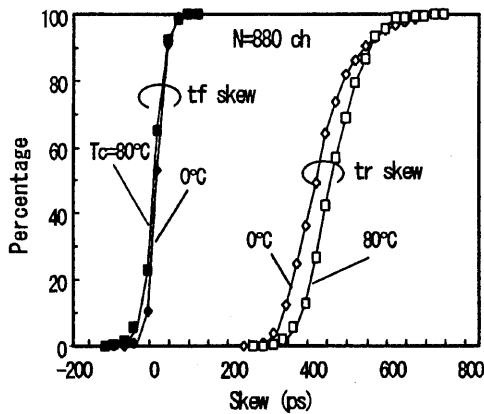


図5 送信スキュー累積分布

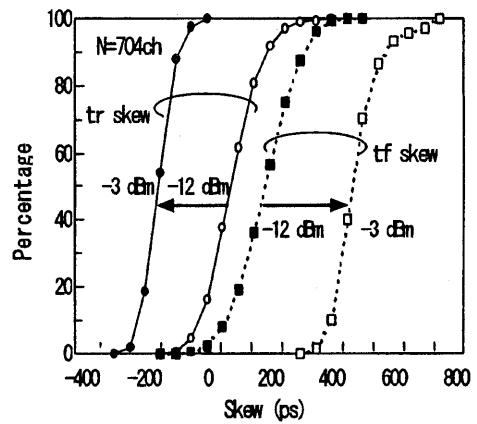


図6 受信スキュー累積分布

#### 参考文献

- 1) S.Nishimura et al.; Proc. of IEEE LEOS '96, W11, pp61-62, 1996
- 2) A. Takai, et al.; Proc. of 42nd ECTC, pp. 115-119, 1992
- 3) A. Takai, et al.; J. of Lightwave Technol., vol. 12, No. 2, pp. 374-377, 1994
- 4) S. Kaneko, et al.; Proc. of ECOC '93, pp413-416, 1993
- 5) 三浦、他; 1996年電子情報通信学会エレクトロニクスサイティ大会 SC-5-4, pp.224-225, 1996
- 6) Y. Fukashiro, et al.; Proc. of IEEE LEOS '96, W14, pp-67-68, 1996
- 7) T. Nagahori; Proc. of 46th ECTC, pp.255-258, 1996
- 8) M. Lebbby; Proc. of 46th ECTC, pp.279-291, 1996
- 9) K. H. Hahn; Proc. of 46th ECTC, pp.301-307, 1996
- 10) S. Swirhun; Proc. of 46th ECTC, pp.316-320, 1996
- 11) Y-M. Wong; J. of Lightwave Technol., vol. 13, No. 6, pp. 995-1016, 1995
- 12) Y-M. Wong; Proc. of 46th ECTC, pp. 269-278
- 13) J. D. Crow; Proc. of 46th ECTC, pp.292-300, 1996
- 14) A. Oishi, et al.; Proc. of ECOC '93, ThC12.6, pp.21-24, 1993.
- 15) K. Uomi, et al.; IEEE Phon. Technol. Letter, vol. 7, no. 1, pp. 1-3, 1995