

## 装置間/ボード間光配線技術の現状

花谷 昌一

マルチメディア社会実現に向けて、新しい情報インフラストラクチャ構築のための技術革新が不可欠である。すなわち、従来の数桁倍の情報処理能力を実現するハードウェア技術である。今日までの大型計算機や大容量交換機等情報処理装置は、論理 LSI (large scale integrated circuit) の高集積・高性能化および高密度ボード実装技術により飛躍的に進歩した。しかし、これら装置間・装置内の信号配線の高速・高密度化が性能向上のボトルネックになっている。この配線ボトルネックを克服し、高速高密度配線を実現する技術革新として、光インターコネクション (光配線) が期待されている。

光インターコネクション技術は広く、例えば図 1 に示すような接続距離、接続方式、多重方式により分類できる。すなわち、情報処理システム内の接続距離および接続方式に応じて、配線から光コンピューター・光交換に至る幅広い適用領域をもつ。このために様々なアレイ集積化や光スイッチ等の方式およびデバイス技術が必要である。

この数年、接続距離 10~100 m 程度、固定接続、空間多重 (並列伝送) 装置間・ボード間光配線技術の研究開発が活発である<sup>1-5)</sup>。従来の同軸ケーブルバンドルを光ファイバーバンドルに置き換えて高速高密度信号配線し、高性能・コンパクトでかつスマートな高度情報処理装置の実現を図るものである (図 2)。光ファイバーには、広帯域低損失伝送路として高速長距離転送可能にする特長に加え、軽量、細径で耐 EMI (electromagnetic

interference) 性に優れ、接地フリーという高密度配線に適した特性があるためである。

本稿では、光ファイバーアレイを用いた並列同期転送による装置間・ボード間光配線技術の動向と筆者らが開発した具体例を紹介し、この光配線技術を議論する。

### 1. 装置間・ボード間光配線の動向

#### 1.1 概要

図 2 からわかるように、この光配線の基本方式は電気/光および光/電気変換アレイと光ファイバーアレイを用い、共通クロックでデータを再生する並列光同期転送である。したがって、各チャンネルの電気入出力間の遅延時間を同一にする必要がある。これを実現する主要技術課題をまとめる。

(1) 遅延時間ばらつき (以下スキュー) 低減。

特に高スループット転送のために自由にチャンネル拡張可能なモジュール間スキュー低減が重要である。

(2) 直流かつエラーフリー (極低誤り率特性) 伝送。データ・制御信号配線機能のためである。

(3) 送受信モジュールの高集積小型化、低消費電力化。

(4) 高信頼化および低価格化

これらに対し、多様なアプローチが行われている。表 1 にこれまで報告された実験例をまとめた。大別には、モジュール形態 (ピッグテイル型、レセプタクル型) もあるが、ここでは発光素子とファイバーの組合せを用いた。すなわち、LED (light emitting diode)/MMF (multi-mode fiber), LD (laser-diode)/MMF, SMF (single-mode fiber) と VCSEL (vertical cavity surface-emitting laser-diode)/MMF の 3 つで大別した。

Current progress in optical subsystem interconnections (1995 年 12 月 21 日受理)

Shoichi HANATANI (株)日立製作所情報通信事業部開発センター (〒244 横浜市戸塚区戸塚町 216)

表1 並列光伝送モジュールの報告例.

|                          | NEC    | AT&T  | 東芝   | Siemens | NTT        | 日立    | 富士通        | Motorola | OETC  | POLO  |
|--------------------------|--------|-------|------|---------|------------|-------|------------|----------|-------|-------|
| 発表年                      | '92.11 | '93.2 | '92  | '95.6   | '93.6      | '92.5 | '94.3      | '95.1    | '94   | '95.5 |
| 転送速度 (Mbit/s/ch)         | 200    | 500   | 2000 | 1000    | 700 (2800) | 200   | 156 (625)  | 150      | 500   | 1000  |
| チャンネル数 (ch/module)       | 12     | 9     | 4    | 12      | 12 (4 MUX) | 8     | 20 (4 MUX) | 10       | 32    | 10    |
| 接続距離 (m)                 | 100    | —     | 26   | —       | 250        | 100   | 400        | 30       | —     | 300   |
| スキュー (ns)                | —      | —     | —    | —       | —          | 2.0   | —          | —        | 1.5   | —     |
| 消費電力 (mW/ch)             | 580    | 1280  | 1080 | 110     | 1142       | 280   | 350        | 170 typ. | 400   | 150   |
| 面積 (cm <sup>2</sup> /ch) | 6.17   | 5.56  | 7.19 | 0.09    | 6.2        | 0.31  | 2.98       | 0.59     | —     | —     |
| 光源                       | LED    | LED   | LD   | LD      | LD         | LD    | LD         | VCSEL    | VCSEL | VCSEL |
| ファイバー                    | MMF    | MMF   | MMF  | MMF     | MMF        | SMF   | SMF        | MMF      | MMF   | MMF   |
| 波長 (μm)                  | 1.3    | 1.3   | 1.3  | 0.85    | 1.3        | 1.3   | 1.5        | 0.85     | 0.85  | 0.98  |
| 参考文献                     | 6      | 14    | 16   | 23      | 27         | 5     | 29         | 33       | 31    | 32    |

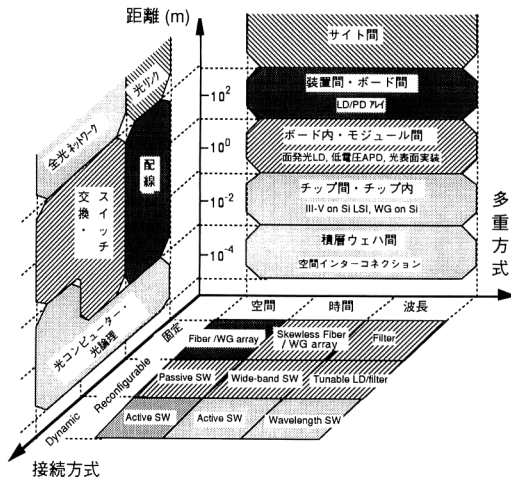


図1 光インターコネクション技術マップ.

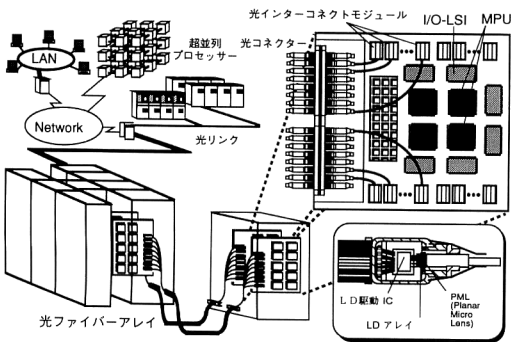


図2 装置間/装置内光配線.

### 1.2 LED/MMF 光配線技術

LEDは特性の温度依存性が小さく、ファイバーとの光結合が容易なため、LED/MMF システム<sup>6-12)</sup>の開発

が当初より活発である。NECは12 ch, 14 Mb/s/ch, 1 km 伝送実験後<sup>6)</sup>, 25 mAの低駆動電流で622 Mb/s動作可能なLEDアレイを開発、200 Mb/s/chで転送可能なBi-CMOS (bipolar-complementary metal oxide semiconductor) LSI搭載集積化モジュール<sup>7-10)</sup>を報告している。ATM (asynchronous transfer mode) 交換機搭載も試みられた。AT & Tはファイバーアレイの各光路長を調整して (optical deskewer), 200 Mb/s, 1 km 転送<sup>11-14)</sup>に成功している。チャンネルごとに個別ICを使用、光素子アレイをSi-V溝フェルルに直接実装している。4:1多重分離CMOS-LSIを開発、500 Mb/s/ch動作により、スループット3.5 Gb/sのモジュール<sup>14,15)</sup>も発表している。

### 1.3 LD/MMF, LD/SMF 光配線技術

LDはLEDに比べ発光効率が高く、高速動作可能なので200 Mb/s以上の高速配線に有望である。しきい電流 ( $I_{th}$ ) のLD間バラツキと温度変化による発光遅延の変化が出力波形パターン依存性とスキュー要因となる。駆動回路簡素化のため、低しきい電流、高均一特性のLDアレイ開発が必須である。LD駆動 (変調+バイアス) 電流に温度依存性をもたせるのも有効である。

LDを用いた高速転送実験を東芝が最初に行った<sup>16)</sup>。  $I_{th}=6$  mAのLDアレイとGaAs-ICが用いられた。光結合はSi基板を利用したパッシブアライメントである。SMFのスキューは2 ps/m以下と、MMF 15 ps/mの数の一であり、数十m以上の長距離にはSMFが適している。LD/SMF光配線は日立より初めて報告<sup>5,17-21)</sup>された。低スキュー化のために  $I_{th}$  は3 mA以下のLDアレイが開発された。平板マイクロレンズアレイを用い

光結合方式<sup>19)</sup>と、Si LSI 送受信回路で小型低消費電力化を行っている。これを基に、+3.3 V 動作、CMOS インターフェイスの 12 ch 集積化モジュールが昨年 6 月に製品化された。250 Mb/s/ch 転送可能で、消費電力 200 mW/ch 以下である。高速転送例は、富士通の 622 M, 1.2 Gb/s/ch<sup>24,25)</sup>、日立の 800 Mb/s/ch<sup>26)</sup>と、Siemens の 1 Gb/s 以上がある<sup>22,23)</sup>。

時間多重化方式<sup>27,28)</sup>を用いた高スループット化の発表もある。光モジュールの小型低消費電力、低価格化に有望な方式と考えられる。富士通は、155 Mb/s 信号に対し、4:1 多重方式が有効であることを明らかにし、スループット 3 Gb/s のモジュールを発表している<sup>28,29)</sup>。フレームビットを C ビット化し、これを基準にデータの並べ替えを行うことで、高速化に伴うスキューの問題を論理的に処理している。クロック供給方式、フレーム同期および同期回復時間低減が今後の課題である。

#### 1.4 VCSEL/MMF 光配線技術

VCSEL (面発光 LD) を用いた研究が米国を中心に活発である<sup>30-33)</sup>。VCSEL は発光パターンの調整が容易で、このためファイバーとの高効率光結合が可能である。さらにヘキ開工程が不用で、オンウエハー検査可能等から高性能・低価格化に有望と考えられる。GaAs 系材料が用いられているため、高信頼化が今後の課題である。ARPA (advanced research project agency) の支援で、OETC (optoelectronic technology consortium: GE, AT & T, Honeywell, IBM) と POLO (parallel optical links organization: HP, Du Pont, AMP, USC, SDL) が研究開発を行っている<sup>30-32)</sup>。OETC では、スループット 16 Gb/s のワークステーション用光リンクを目指している<sup>30,31)</sup>。ファイバーを斜め研磨後、Au 蒸着鏡化して光素子とファイバーとを光結合させている。POLO も同様に、スループット 10~20 Gb/s のワークステーション用光リンクを目指し、基本動作確認を終えている<sup>32)</sup>。今後は波長 850 nm の素子で、1 Gb/s/ch 以上動作の光モジュール開発を 1997 年までに進行予定である。45 度斜め研磨の有機系導波路を用いて、4 dB 以下の高光結合を得ている。Motorola 社は一昨年 12 月にサンプル [OPTOBUS] を発表した<sup>33)</sup>。トランシーバー型レセプタクルモジュールである。POLO と同様に光結合に有機系導波路を用いているが、こちらは導波路端面に光素子を装着している。

VCSEL を用いた光配線技術は、素子の高信頼性、スキューやモーダル雑音等の技術課題はあるが、小型・低

表 2 装置間/装置内光配線目標性能。

|          |                     |
|----------|---------------------|
| 接続距離     | > 100 m             |
| 信号転送速度   | > 200 Mbit/s/ch     |
| 集積チャンネル数 | 8 ch                |
| スキュー     | < 2.0 ns            |
| 誤り率      | < 10 <sup>-20</sup> |
| 消費電力     | < 200 mW/ch         |

価格化に極めて有望であり、今後研究開発はいつそう活発化すると考えられる。

## 2. 装置間・ボード間光配線技術

筆者らが開発した具体例をもとに、装置間・ボード間光配線技術を議論する。

### 2.1 目標性能と技術課題

表 2 は装置間・ボード間光配線の目標性能である。室内に装置を自由に設置可能な接続距離、LSI 論理処理速度の進展を考慮した転送速度である。誤り率は数百チャンネルの高スループット動作で 10 年以上誤らないこと、消費電力は長距離電気配線で一般的な ECL (emitter coupled logic) と同等以下とした。

#### (1) 直流伝送方式

制御信号転送可能な直流結合回路方式が必須である。集積化を考慮し、回路簡素化のために固定識別レベル直流受信方式が有効である。高消光比が必要な固定識別レベル方式では、光源に LD が最適である。

#### (2) エラーフリー転送

高 S/N および低クロストーク転送が必須である。誤り率 10<sup>-20</sup> 以下を満足する S/N は 25.3 dB 以上である。等価光入力雑音パワーを 0.2 μW とすると、最小光入力パワーは 3.6 μW となる。クロストーク等を考慮し、等価固定識別光受信レベルを 25 μW とした。

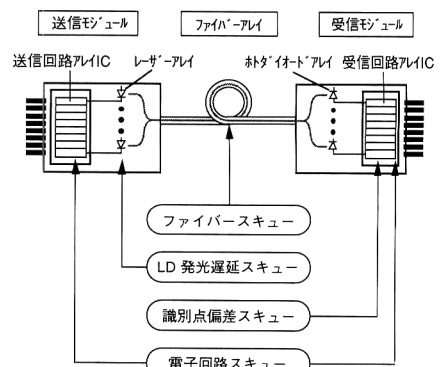
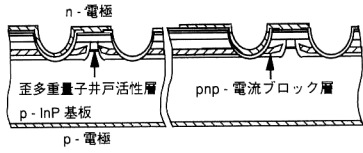
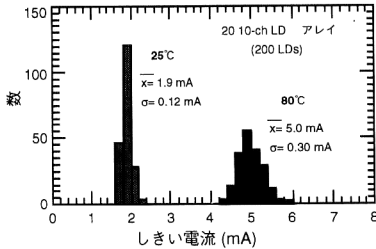


図 3 LD を用いた光配線の主なスキュー。



(a) 低しきい電流 LD 断面構造図



(b) LD しきい電流の分布

図4 低しきい電流 LD とその特性.

### (3) スキュー低減

図3に主要なスキュー要因を示す。LD 発光遅延と受信入力依存スキューはLD/固定識別レベル方式固有である。発光遅延スキュー低減には、LDの低しきい電流化および均一化と光子寿命の低減が必須である。80°Cで500 ps以下のスキューにするには、ECL同等のLD駆動電流20 mA時で、 $I_{th}=3$  mA以下のLDアレイが必要である。入力依存スキューは、識別レベルが固定のため、パルス幅に対する識別タイミングが受信光入力パワーによって異なることに起因する。その低減には、受信パワーの均一化、光素子および受信回路の高速化が必要である。SMFのスキューは2 ps/m以下である。

## 2.2 キーデバイス/キーテクノロジー

上記方式を実現するLDアレイは、高効率低しきい値電流化、高均一化、高信頼化、p基板上集積化が要求される。これに対し、10チャンネルp基板上1.3  $\mu$ m埋込みヘテロ構造InGaAsP/InP-LDアレイを開発した<sup>34)</sup>。低しきい値化に、MQW (multi-quantum well) 構造、非対称高反射率 (70%/90%) 端面コーティング・短共振器長 (200  $\mu$ m) を採用した。無歪MQW<sup>34)</sup>で $I_{th}=3$  mA以下、歪MQW<sup>35)</sup>構造で $I_{th}=1.6 \pm 0.3$  mAを得た(図4)。低クロストーク動作のためにLDアレイ搭載用SiC基板は、LD直下、側面と裏面をメタライズし、低寄生インダクタンス化した。

受光部には、低スキュー化のために受光直径50  $\mu$ mの低容量裏面光入射型InGaAs/InP pin-PDアレイを開発した。ガラスサブマウントにフリップチップ実装し、容量0.24~0.25 pFを実現した。

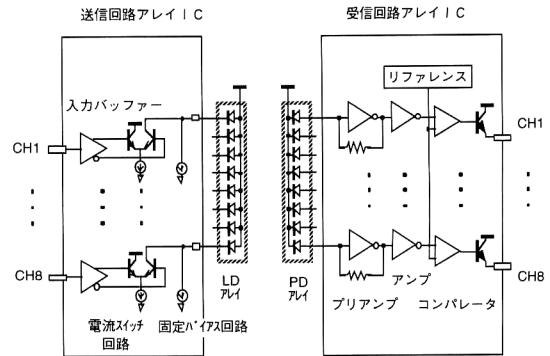
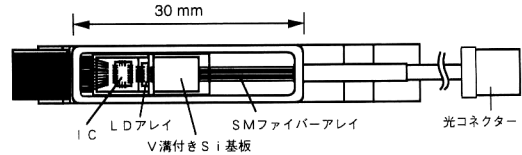
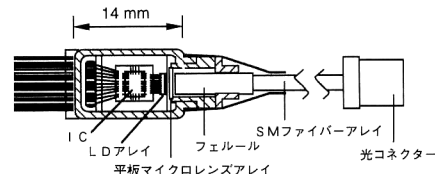


図5 送受信アレイ回路ブロック図.



(a) パッドジョイント光結合方式



(b) 平板マイクロレンズアレイ光結合方式

図6 装置間ボード間光配線用モジュール構造.

図5は送受信アレイ回路ブロック図である。0.8  $\mu$ m-Siバイポーラプロセスで試作した。送信回路は、入力バッファ、電流スイッチと固定バイアス回路で構成される。従来の光通信用に用いられる自動パワー制御回路、温度制御回路が省略、単純化された。p基板LDのため、簡単なnpnトランジスタの電流スイッチで駆動できる。

受信回路は、プリアンプ、アンプとECL出力のコンパレータで構成した。固定識別方式なので、利得制御や自動識別レベル設定回路等を省略できる。電源ライン等はシミュレーションで最適化した。

## 2.3 開発した光モジュール

図6にパッドジョイント光結合方式と平板マイクロレンズアレイを用いたモジュール外観図を示す。いずれも高信頼化のために樹脂固定を使用していない。光入出力部の小型気密封事にはレンズ方式の光結合が有利である。ピン数は11 (ECL入出力信号8, 電源1, グランド2ピン) で、バイパス容量以外の外付け部品を必要と

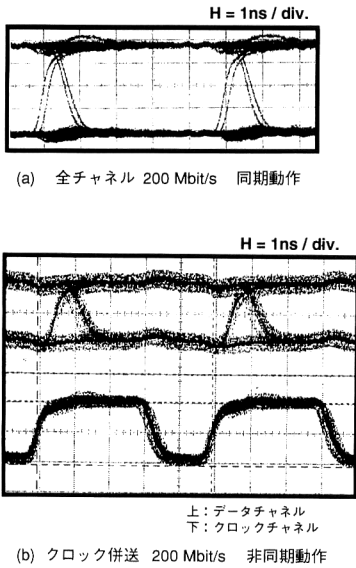


図7 受信出力波形.

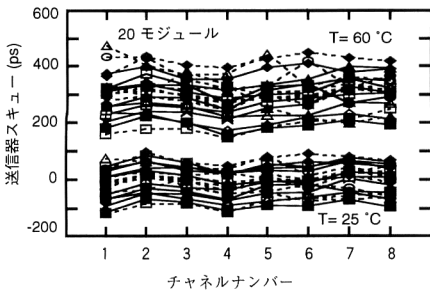


図8 LD発光遅延による送信スキュー特性.

しない。

図7に受信出力波形を示す。(a)は、全チャンネルが200 Mb/sで同期した場合、(b)はデータおよびクロック各1チャンネルが200 Mb/s、他の5チャンネルを199 Mb/sで動作させ、ランダムにクロストークを発生させた場合である。いずれも出力波形は十分なアイ開口である。固定識別レベル受信方式に適した直流光重畳の誤り率評価法<sup>20)</sup>により、誤り率 $10^{-20}$ 以下のエラーフリー転送可能なことを確認した。送信スキューは主にLD発光遅延によるもので、ケース温度25~60°Cで500 psを得た(図8)。光入力依存スキューは、入力50~300  $\mu$ Wで、1 ns以下である。

これらの結果をもとに、CMOSインターフェイス、集積チャンネル数を12にした光モジュールを製品化した。図9は、これを16個用いて試作したスループット20

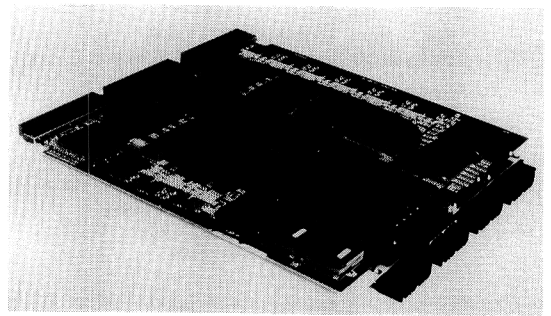


図9 光インターコネクトを用いた20 Gb/s ATM交換用スイッチボード。

Gb/sのATM交換機用スイッチボードである<sup>36)</sup>。これにより、電気コネクタのピンネックと伝送距離の制約が解消され高性能なシステムが構築可能になった。

装置間ボード間光配線技術の動向と開発したモジュール試作結果を用いて、光配線技術を議論した。本技術のいっそうの発展には、低価格化、高密度低消費電力化と標準化が今後の課題である。特に同軸ケーブルに替わる短距離低速領域の適用には、低価格化の技術革新が必要である。光配線技術は、論理LSIがボトルネックとなる入出力インターフェイスから解放され、より高性能高機能化を可能にする技術であり、電線を越える配線技術として確実に実用化に向かうであろう。

## 文 献

- 1) D. H. Hartman: "Use of guided wave optics for broad level and mainframe level interconnects," *Proceedings of the 41st Electric Components & Technology Conference (ECTC)* (IEEE, 1991) pp. 463-474.
- 2) R. A. Nordin, A. F. J. Levi, R. N. Nottenburg, J. O'Gorman, T. Tanbun-Ek and R. A. Logan: "A systems perspective on digital Interconnection technology," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **10** (1992) 811-827.
- 3) T. A. Lane: "Optical interconnects for the Connection Machine," *Proc. SPIE*, **1178** (1989) 24-35.
- 4) J. D. Crow: "Optical interconnects speed interprocessor nets," *IEEE Circuit Device Mag.*, **7** (1991) 21-25.
- 5) A. Takai, H. Abe and T. Kato: "Subsystem optical interconnections using long-wavelength LD and single-mode fiber arrays," *Proceedings of 42nd ECTC* (1992) pp. 115-119.
- 6) K. Kaede, T. Uji, T. Suzaki, T. Torikai, J. Hayashi, I. Watanabe, H. Honmou, M. Shikada and M. Itoh: "Twelve-channel parallel optical-fiber transmission using a low drive current 1.3-mm LED array and a p-i-n PD array," *Technical Digest of Optical Fiber Conference (OFC) '89, TUD-3* (1989) p. 235.
- 7) K. Kaede, T. Uji, T. Nagahori, T. Suzaki, T. Torikai, J. Hayashi, I. Watanabe, M. Itoh, H. Honmou and M. Shikada: "12-channel parallel optical-fiber transmission

- using a low drive current 1.3- $\mu\text{m}$  LED array and a p-i-n PD array," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-8** (1990) 886-888.
- 8) T. Nagahori, T. Uji, T. Torikai, I. Watanabe, T. Matsumoto, J. Hayashi, M. Itoh, H. Honmou, H. Kaneko and K. Kaede: "150 Mb/s/ch 12-channel optical parallel transmission using an LED and a PD array," *Technical Digest of OFC '90*, THc-3 (1990) p. 165.
  - 9) T. Nagahori, M. Itoh, I. Watanabe, J. Hayashi and H. Honmou: "150 Mb/s/ch 12-channel optical parallel interface using an LED and a PD array," *Opt. Quantum Electron.*, **24** (1992) 479-490.
  - 10) 清田一成, 松田和彦, 松原隆雄, 藤本隆士, 竹内知美, 栗坂 勝, 長堀 剛, 伊藤正隆: "架間伝送用 200 Mbps $\times$ 12 CH 光並列インタフェース", *NEC 技報*, **45** (1992) 61-65.
  - 11) Y. Ota, R. C. Miller, S. R. Stephen, D. R. Kaplan, C. W. Seabury, R. B. Huntington, J. G. Johnson and J. R. Potopowicz: "Twelve-channel individually addressable InGaAs/InP p-i-n photodiode and InGaAsP/InP LED arrays in a compact package," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1118-1122.
  - 12) Y. Ota and R. G. Swartz: "Multi-channel optical data link (MODLINK)," *Technical Digest of Optoelectronics Conference (OEC) '90*, 11D1-5 (1990) pp. 42-43.
  - 13) Y. Ota and R. G. Swartz: "Multi-channel parallel data link for optical communication," *IEEE Mag. Lightwave Telecommun. Syst.*, **2** (1991) 24-32.
  - 14) Y. Ota and R. G. Swartz: "Multichannel 4-Gbit/s (500-Mbit/s-per-channel) parallel optical data link," *Proceedings of OFC/IOOC '93* (1993) pp. 167-168.
  - 15) Y. Ota, R. G. Swartz, T. J. Gabara, A. E. Dunlop and W. C. Fischer: "28 channel parallel optical data link with total thruput of 3.5 Gb/s," *Proceedings of OEC '94* (1994) pp. 48-49.
  - 16) F. Shimizu, H. Furuyama, H. Hamasaki, F. Kuroda, M. Nakamura and T. Tamura: "Optical parallel interconnection characteristics of 4-channel bit synchronous data transmission module," *Proceedings of 42nd ECTC* (1992) pp. 77-82.
  - 17) 花谷昌一, 高井厚志, 阿部 基, 茂木祥宏: "装置間光インタコネクットの伝送特性", *信学技報 OCS*, **OCS93-32** (1993) 25-32.
  - 18) A. Takai, M. Haneda, T. Kato, S. Hanatani and Y. Motegi: "Error-free subsystem optical interconnections," *Proceedings of 1993 Japan IEMT Symposium* (1993) pp. 374-377.
  - 19) S. Kaneko, Y. Motegi, T. Kouno, S. Kito, K. Takayama, S. Matsubara, A. Takai and T. Kato: "Multi-channel SM-fiber pigtail transmitter/receiver modules using planar micro lens array coupling," *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC) '93* (1993) pp. 413-416.
  - 20) S. Hanatani, A. Takai, H. Abe, Y. Motegi and H. Kodera: "Fully-integrated error-free optical subsystem interconnections," *IEEE Denshi Tokyo*, **32** (1993) 194-198.
  - 21) A. Takai, T. Kato, S. Yamashita, S. Hanatani, Y. Motegi, K. Ito and H. Abe: "200-Mb/s/ch 100-m optical subsystem interconnections using 8-channel 1.3- $\mu\text{m}$  laser diode arrays and single-mode fiber arrays," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-12** (1994) 260-270.
  - 22) H. Karstensen, C. H. Hanke, M. Honsberg, M. Blaser and J. Wieland: "Fiber ribbon based DC-coupled optical interconnection," *Proceedings of ECOC '93* (1993) pp. 549-552.
  - 23) H. Karstensen, C. H. Hanke, M. Honsberg, J.-R. Kropp, J. Wieland, M. Blaser, P. Weger and J. Popp: "Parallel optical interconnection for uncoded data transmission with 1 Gb/s-per-channel capacity, high dynamic range, and low power consumption," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-13** (1995) 1017-1029.
  - 24) H. Rokugawa, T. Ikeuchi, N. Fujimoto, T. Horimatsu, H. Nobuhara and K. Miura: "Multigigabit-per-second optical parallel transmitter module using a 4-ch laser diode array with a wide temperature range operation," *Proceedings of ECOC '92* (1992) pp. 265-268.
  - 25) N. Fujimoto, H. Watanabe, K. Mori, T. Horimatsu, K. Tanaka and K. Miura: "Gigabit-per-second optical parallel transmitter/receiver modules with fully integrated GaAs MESFET LSI chips," *Technical Digest of OFC/IOOC '93* (1993) pp. 165-167.
  - 26) 深代康之, 花谷昌一, 金子 聡, 三浦 篤, 大石昭夫, 荒川文彦: "高速 10 チャネル集積化光インタコネク用小型送信ジュール", *信学技報 OCS*, **OCS95-4** (1995) 25-31.
  - 27) J. Nishikido, S. Fujita, Y. Arai, S. Hino and K. Yamasaki: "Demonstration of multigigabit optical interconnection using offset laser driving for a broadband switching network," *Technical Digest of OFC/IOOC '93* (1993) 168-169.
  - 28) T. Ikeuchi, T. Kiyonaga, H. Watanabe, N. Fujimoto, T. Odagawa and G. Nakagawa: "Experimental results of an optical transmitter module for multichannel optical transmission," *1994 IEICE Japan Spring Conference*, B-1102 (1994) p. 169.
  - 29) M. Yano, G. Nakagawa and N. Fujimoto: "Skew-free parallel optical links and their array technology," *Proceedings of 45th ECTC* (1995) pp. 552-564.
  - 30) D. K. Lewis, P. J. Anthony, M. Bendett and J. D. Crow: "The optoelectronics technology consortium (OETC)," *IEEE LEOS Newslett.*, October (1992) 12-13.
  - 31) Y.-M. Wong, D. J. Muehler, C. C. Faudskar, D. K. Lewis, P. J. Anthony, M. Bendett, D. M. Kuchta and J. D. Crow: "Technology development of a high-density 32-channel 16-Gb/s optical data link for optical interconnection applications for the optoelectronics technology consortium (OETC)," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-13** (1995) 995-1013.
  - 32) K. H. Hahn: "POLO-parallel optical links for gigabyte data communications," *Proceedings of 45th ECTC* (1995) pp. 368-375.
  - 33) D. B. Schwartz, C. K. Y. Chun, B. M. Foley, D. H. Hartman, M. Leiby, H. C. Lee, C. L. Shieh, S. M. Kuo, S. G. Shook and B. Webb: "A low cost, high performance optical interconnect," *Proceedings of 45th ECTC* (1995) pp. 376-379.
  - 34) S. Yamashita, A. Oka, T. Kawano, T. Tsuchiya, K. Saitoh, K. Uomi and Y. Ono: "Low threshold (3 mA) 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP MQW laser array on a p-type substrate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **4** (1992) 954-957.
  - 35) A. Oishi, A. Oka, T. Kawano, Y. Ono, K. Uomi, T. Tsuchiya, M. Komori and A. Takai: "Lowthreshold (1.8 mA) 1.3- $\mu\text{m}$  strained quantum well 10-element laser arrays for optical interconnections," *Proceedings of ECOC '93 Post-dead Line*, ThC 12.6 (1993) pp. 21-24.
  - 36) 小崎尚彦, 安田武史, 狩野哲男, 小杉則貴, 田中昌章: "大容量多機能共通バッファ形 ATM スイッチ", *信学技報 SSE*, **SSE 95-11** (1993) 13-18.