

面型光デバイスを用いた並列光インターコネクション

黒川 隆志

光は電子と異なり自由空間を伝搬させることができ、しかも光ビームの間の干渉もない。したがって多数の光ビームに信号をのせて同時に制御できるようになれば、きわめて大きなスループットが期待できる。

一般に光通信の長距離伝送においては時間多重により(最近では波長多重も含めて)スループットの増大を図るのが一般的である。しかし光インターコネクションは距離が短いため光の空間的な並列性を利用した方が効果的な場合が多い。すなわち数 mm から 200 m 程度の短距離であるため、経済性や消費電力の観点から時間多重を最小限にして空間並列によりスループットを得る方が有利となる。

また接続技術としてみると単なる配線としての固定接続と、スイッチあるいは交換機能をもつ柔軟接続に分類できる。図 1 に従来の時間多重接続、本稿で扱う並列光インターコネクションの固定接続と柔軟接続の概念を示す。

以下に代表的な面型光デバイスである面発光レーザー、空間光変調器、面型光スイッチを用いた光インターコネクションの研究の現状を紹介する。

1. 並列光インターコネクションの分類

光インターコネクションをどこに用いるかという用途的な分類からは装置間、ボード間、チップ間、チップ内の接続に分類できる¹⁾。装置間では実際上 200 m 以下、ボード間では数十 cm 以内、チップ間では数 cm、さら

にチップ内では数 mm と内部レベルにいくほど距離は短くなるが、配線密度は逆に増加する。

一方光学的な見方からは図 2 に示すように、並列光インターコネクションは導波路型、自由空間型に大別できる。また後述するように直接画像伝送型も最近提案されている。導波路型並列光接続は多数列のファイバーボンあるいは光導波路により 10~20 チャネル程度の信号を並列に伝送する。自由空間型はデータパターンをレンズ、ホログラムなどを用いて光学的結像により伝送する方法である。大きな並列度が可能だが、距離的には 1 m 以内が限界であろう。ボード間、チップ間の高並列な光接続、究極的には光で並列処理を行おうとする光コンピューティングシステムにも対応しうる。

多数のプロセッサ間の接続の構成を自由に切り替えることも重要である。分散したプロセッサ間の接続構成を変更したりするための再構成接続機能、さらにはパケット単位で径路を切り替えるダイナミック光接続など、高速で大容量のスイッチング機能をもつ光インターコネクションはプロセッサ間の通信のみならず、光交換においても今後重要となる。面型の光スイッチは多チャネルの光切換え接続のキーデバイスとして盛んに研究されている。

2. 固定接続並列光インターコネクション

複数のレーザーを 1 チップに集積したレーザーアレイとファイバーボンおよびフォトダイオードアレイの組合せからなる並列光ファイバーリンクは、端面発光型レーザーや LED (light emitting diode) を用いた 10 チャネル程度のモジュールが検討^{2,3)}されているが、最近面発光レーザーを用いたシステムの開発が盛んである⁴⁾。

Parallel optical interconnections using surface-normal photonic devices (1995 年 10 月 31 日受理)
Takashi KUROKAWA NTT 光エレクトロニクス研究所 (〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1)

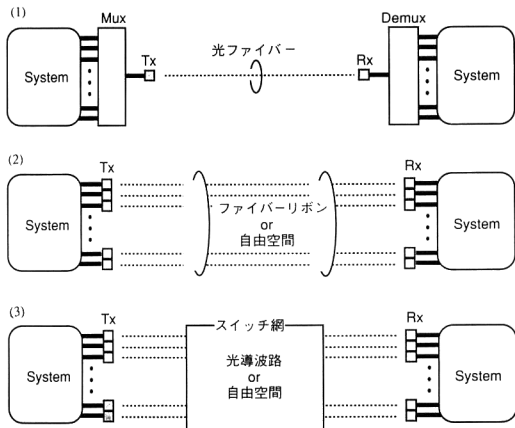


図1 光インターコネクションの形態。(1)時間多重光接続, (2)並列固定光接続, (3)並列柔軟光接続。

面発光レーザーは基板に垂直にキャビティを形成しているため、基板から多数の光ビームを発振できる。またこの構造上、劈開が不要でありウエハーレベルでの検査が可能となるため、低コスト化しやすいといえる。もともと低しきい値電流であるが、最近では酸化プロセスの導入などにより $100 \mu\text{A}$ 以下の小さなしきい値電流が報告⁵⁾されるようになった。このため多数のピクセルをもつレーザーアレイも熱的な制限なく動作できると期待される。面発光レーザーによる並列リンクは特に米国で開発が盛んであり、OETC と POLO の2つの consortium でそれぞれ $500 \text{ Mbps} \times 32 \text{ ch}$, $622 \text{ Mbps} \times 10 \text{ ch}$ の報告^{6,7)}がある。また Motorola は $150 \text{ Mbps} \times 10 \text{ ch}$ のサンプル出荷を始めている。これらはいずれも1次元の面発光レーザーとフォトダイオードアレイを用いている。面発光レーザーの本来の2次元性を利用して2次元のレーザーアレイとフォトダイオードアレイの検討⁸⁾も行われている。

現在伝送距離はファイバー間のスキュウのために $100 \sim 200 \text{ m}$ までである。またチャンネル数はレーザーのしきい値電流によって制限される。伝送距離とチャンネル数の向上には各チャンネル間のスキュウ低減、受光レベルの均一性確保、低消費電力化が重要である。面発光型レーザーを用いた長所は、低消費電力で大きな並列度まで可能なこと、低コスト化が可能なことであるが、課題としては現在のところ短波長帯 (850 または 980 nm) に限られており信頼性が十分確認されていないこと、ウエハー全面にわたって均一な特性を得る製作技術が未確立なことが挙げられる。表1に各機関で行われている並列

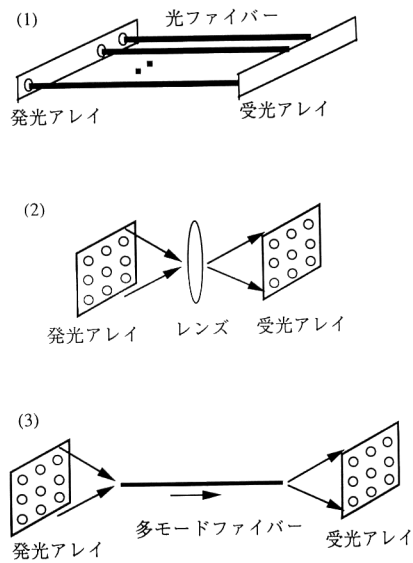


図2 並列光インターコネクションの分類。(1)導波路型, (2)自由空間型, (3)直接画像伝送型。

光ファイバーリンクの現状をまとめた。

自由空間の光接続は原初的な形態としてはフォトカプラーとして盛んに使われているが、図3のようにプログラムを用いたチップ内の光接続やクロックの光分配が Goodman ら⁹⁾によって提唱された。これはチップ間の光接続を自由空間を用いて配線の自由度をもたせるといふことと、クロックスキュウの解消、共有メモリーに対して各プロセッサが並列にアクセスすること(フォンノイマンボトルネックの解消)の3つの利点を示唆している。すなわち、ボードであれチップであれ電気配線や導波路型光配線ではこれらの縁から接続点を取り出さなければならないが、自由空間接続では3次元空間を利用して内部の任意の点と直接接続できるため、トポロジ的な困難が緩和されることになる。また光結像の原理からクロックスキュウが解消でき、特定の1点に多数の光ビームが集中できるため共有メモリーアクセスに対する自由度が得られる。

自由空間光接続の主要な課題は $N:M$ の点の間の任意の自由な接続をどのように実現するか、より端的に言えばどのようにしたら多くの光線が正しい位置で焦点を結ぶことができるかということである。単レンズやマイクロレンズアレイを用いたレンズ系による方法では、多数の光点の相互配置の関係を変えずに結線するのに向いている。GRIN レンズアレイを埋め込んだ光マザーボードによるボード間の接続などが提案¹⁰⁾されている。ホ

表1 並列光ファイバーリンクの開発の現状.

開発プロジェクト	光素子	光ファイバー	スループット	伝送距離, 消費電力
OETC (Martin Marietta, AT & T, Honeywell, IBM)	VCSEL-32 アレイ (850 nm) MSM-32 アレイ (GaAs OEIC)	GI-MM ファイバー 32 芯リボン	16 Gbps (500 Mbps×32 ch)	100 m 400 mW/ch
POLO (HP, Du Pont, AMP USC, SDL)	VCSEL-10 アレイ (980 nm) PIN-PD-10 アレイ	GI-MM ファイバー 10 芯リボン	6.2 Gbps (622 Mbps×10 ch)	300 m 150 mW/ch
Optobus (Motorola)	VCSEL-5 アレイ×2 (850 nm) PIN-PD-5 アレイ×2	SI-MM ファイバー 10 芯リボン	1.5 Gbps (150 Mbps×10 ch)	30 m 100 mW/ch
HOLICS (Siemens, Swiss 工科 大 GEC-Marconi 他)	端面発光 LD 12 アレイ (850 nm) PIN-PD-12 アレイ	GI-MM ファイバー 12 芯リボン	12 Gbps (1 Gbps×12 ch)	10 m 110 mW/ch
日立	端面発光 LD 12 アレイ (1.3 μm) PD-12 アレイ	SM ファイバー 12 芯リボン	3 Gbps (250 Mbps×12 ch)	100 m 200 mW/ch

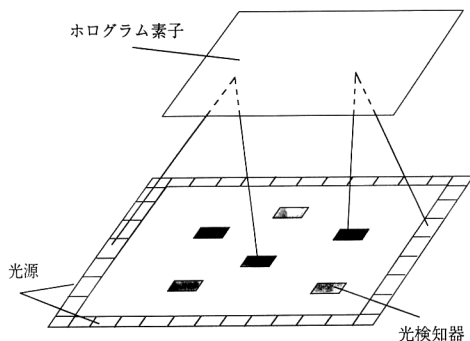


図3 自由空間でのチップ間光接続⁹⁾.

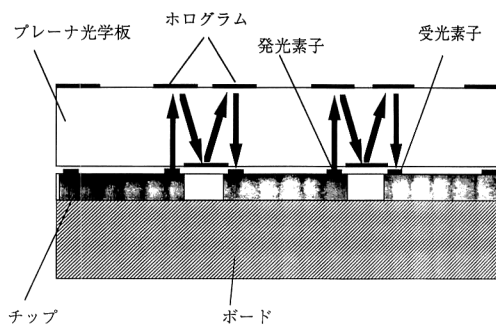


図4 プレーナ光学板による光接続¹¹⁾.

ログラム素子を用いればより複雑な結線パターンが実現できる。ダマングレーティングはひとつの光源から多数のビームスポットを得るのによく用いられる。図4のように上面と下面にホログラムと反射鏡を配置したガラス板内に光を伝搬させるプレーナ光学板によるチップ間光接続などが提案¹¹⁾されている。ホログラムによりホロバックプレーンを構成しボード間接続を行う方法も実験されている¹²⁾。ボード間のバックプレーン光接続については COSINE という並列プロセッサシステムにおいて構成実験¹³⁾が行われた。36枚の各ボードに1個の送信モジュールと4個の受信モジュールがつけられ、レンズとプリズムによりLEDの光を平行ビームとして各ボード間の相互接続を行っている。

LSI (large scale integrated circuit) の集積度の飛躍的な進歩がもたらすピンネックは近い将来重要な問題となると予想されるが、LSI 内部に直接光アクセスできる自由空間光接続は有効な解決方法となりうる。その際、

現電気実装の寸法トレランスでいかに光実装を実現できるかが重要な課題になろう。

チップ内光配線は多層構造のチップ (3次元 LSI) の層間接続としての提案¹⁴⁾がある。共有メモリの層間データ転送をチップ上の対向した LED と受光素子により行う。Si チップ上にどのように発光受光素子を集積するかがデバイス上の課題である。

直接画像伝送は位相共役の応用として Yariv によって古くに提案されたが、最近新たに光インターコネクションへの応用として提案¹⁵⁾された。直接画像伝送型の光インターコネクションは1本の光ファイバーあるいは導波路でデータパターンを直接伝送しようとするもので、導波路型の長距離接続性、実装性と自由空間型の高並列性の両特長をもつ。強誘電性液晶の空間光変調器¹⁶⁾を書換え可能な位相共役鏡として用いているが、フレーム速度は1000 frame/s程度で、伝搬中の位相乱れのため接続距離はまだ不十分である。

3. 柔軟接続並列光インターコネクション

多数のプロセッサエレメント (PE) 間の柔軟な接続としてはバス、クロスバスイッチ、ハイパーキューブ、シャッフル交換網などがある。バス構成はある時刻においてひとつの PE しかバスにメッセージを流せない。クロスバスイッチは $N:N$ の任意の接続が可能であるが、 N^2 のスイッチが必要となるためコンピューターでは用いられず、電話の交換に用いられている。ハイパーキューブは隣接プロセッサ間の通信が多いときには有利となる。並列プロセッサシステムの並列度が大きくなるにつれ、スイッチ数が少なくてすみ柔軟性が高いシャッフル交換網が有利となる。PE 数が ~ 1000 の超並列システムあるいは超大容量の asynchronous transfer mode (ATM) 交換などにおいては大規模で小型高密度なスイッチ網が期待されるが、自由空間で光により図5のよ

うなシャッフル交換網を構成することはひとつの解決の方向である。

空間光変調器¹⁷⁾は多数の光ビームを制御できる基本的な素子である。ネマチック液晶を用いた電気制御型空間光変調器を用いて多段構成のスイッチが多く検討¹⁸⁾されている。液晶は多数のピクセル化が容易で消費電力も小さいので大規模な入出力構成が可能である。応答速度は ms オーダーと遅いが、いくつかの応用には十分である。例えば PE 間の接続構成を次に走るプログラムに適応した構成に変更するなどである。むしろ課題は損失やクロストークにある。液晶空間光変調器は信号光をそのままスイッチする素子であるため、多段化したとき損失やクロストークが累積するからである。解像度の高い光制御型空間光変調器を書換え可能なホログラムとして用いることにより、大規模な光接続を1段で行う試み¹⁹⁾もある。この場合は強誘電性液晶を用いているためスイッチ速度も早い。

光信号に対してトランスペアレントな素子は損失やクロストークの累積のため多段化に限界がある。一方 AT & T で開発された SEED と呼ばれる半導体光スイッチは、そのメモリ機能によりデジタル再生が可能である。したがっていくら多段化しても損失、クロストークによる信号の劣化が生じない²⁰⁾。コントラストの不足を補うために差動動作が可能な S-SEED²¹⁾を用いて6段、 32×32 光スイッチ網を構成している。NTT では面型 multi-quantum-well (MQW) 変調器とフォトトランジスターを集積した EARS²²⁾ と呼ばれる素子を開発した。出力光のコントラストが高かつ光利得をもって

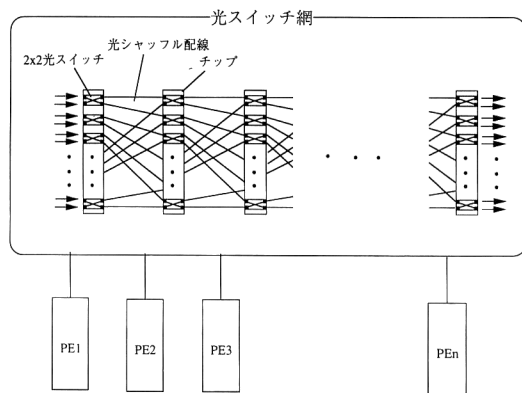


図5 プロセッサ間光スイッチとシャッフル交換網。

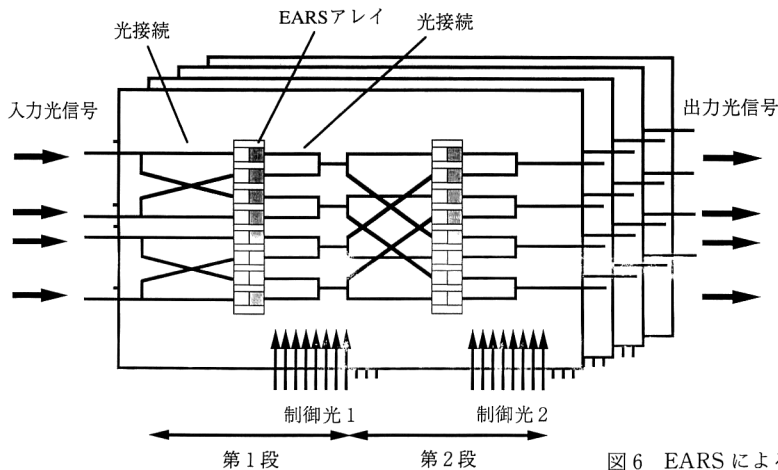


図6 EARS による光スイッチ網の構成²³⁾。

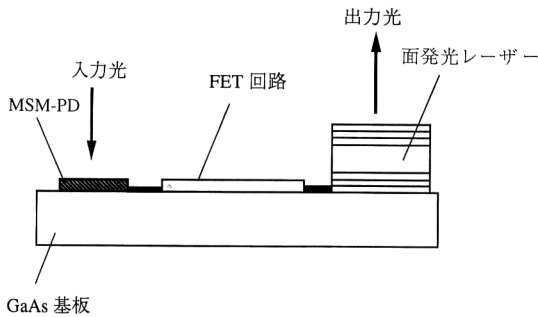


図7 面発光レーザー smart pixel の構造²⁶⁾。

をする。動作波長で透明な AlGaAs 基板を用いているため、基板の両側から光アクセスでき多段化の光学系が簡単になる特長がある。最近 EARS を用いて図6のような原理で小型な 16×16 光スイッチ網が構成され画像交換の実験が行われた²³⁾。AT & T のスイッチ網では各段間の光接続にホログラム素子が用いられており、NTT のスイッチ網ではマイクロレンズアレイと複屈折板が組み合わされている。

以上のようなデジタル再生型多段スイッチ網は各段の光スイッチ素子をチップとみなせば、チップ間の光接続で大規模スイッチ網が構成されているとみることができよう。このチップは S-SEED も EARS も光素子であるが、電子回路と一緒に搭載してより複雑な機能をもたせることも可能である。1 ピクセルに S-SEED、25 個の FET (field effect transistor)、17 個のダイオードを用いて制御メモリのついた 2×1 スイッチ機能を搭載し、16 ピクセルからなる FET-SEED が試作されている²⁴⁾。この素子で 32 入力 16 出力 5 段のスイッチ網が構成された。EARS も MSM (metal-semiconductor-metal) フォトダイオードと FET を集積した FET-EARS²⁵⁾ が試作され、300 MHz のスイッチ速度が報告されている。これらの素子は各ピクセルがデジタル再生やスイッチ、メモリーなどの機能と光入出力をもつことから smart pixel と呼ばれている。電子回路でサポートされた機能により、光だけでは難しい処理を多数の光ビームに対して並列に実行することができるようになる。変調器型の smart pixel に対して面発光レーザーを搭載した図7のような発光型 smart pixel も報告²⁶⁾されている。発光型の場合はバイアス光源が不要なため光学系が簡単となり、波長のトレランスも緩いなどの利点とともに、系全体の消費電力も小さくなり THz/cm² の高密度なスループットが見積もられている²⁷⁾。

プロセッサ間や光通信網間の可変な光接続を目指し

た光スイッチ網が面型光素子にいきつき、smart pixel の導入によってスイッチ網自体が高密度なチップ間光インターコネクションによって構成されることになる。特に最近の hybrid-SEED では Si 電子回路上に GaAs 光変調器が集積され²⁸⁾、このイメージが強まっている。このことは大規模な光スイッチ網が現在の電子回路だけでも光素子だけでも構成が困難な大きな帯域と複雑な機能を要求されていることを意味している。すなわち hybrid-SEED の例でいえば、GaAs 素子が帯域を担い、Si 回路が機能を担うという分業化が光電子融合の形で実現されている。さらに、スイッチ網制御を光でどこまで行うかは帯域と機能の複雑さとの兼ね合いによって今後検討すべき課題である。

光インターコネクションは単に光通信の経済化版としての位置付けだけでなく、新しいコンピューティングシステムあるいは交換システムの開拓に必須な技術として見直すべき可能性を秘めた技術である。新しい面型光デバイスの開発によって、この可能性の具体化の試みが今後ますます盛んになっていくと予想される。そのとき重要な基盤技術は電子と光の融合集積化技術、自由空間の集積光学技術であり、これら技術の発展が現在のコンピューターシステムの性能向上だけでなく、新しいアーキテクチャーを生み究極的には光コンピューティングシステムの誕生につながることを期待したい。

文 献

- 1) 和田 修：“光インターコネクション”，応用物理，**62** (1993) 2-9.
- 2) 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.
- 3) A. Takai, T. Kato, S. Yamashita, S. Hanatani, Y. Motegi, K. Ito and H. Abe: “200-Mbit/s/ch 100-m optical subsystem interconnections using 8-channel 1.3- μ m laser diode arrays and single-mode fiber arrays,” *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-12** (1994) 260-270.
- 4) M. R. T. Tan, K. H. Hahn, Y.-M. D. Houng and S.-Y. Wang: “Surface emitting laser for multimode data link applications,” *Hewlett-Packard J.*, Feb.'95 (1995) 67-71.
- 5) Y. Hayashi, T. Mukaiharu, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga: “Record low-threshold index-guided InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface emitting laser with a native oxide confinement structure,” *Electron. Lett.*, **31** (1995) 560-562.
- 6) Y. M. Wong, *et al.*: *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-12** (1994) .
- 7) K. H. Hahn: “POLO-parallel optical links for gigabyte data communications,” *Proceedings of 45th ECTC* (1995) pp. 368-375.
- 8) 小濱剛孝, 大磯義孝, 館野功太, 福島誠治, 黒川隆志: “並列光インターコネクション用面発光レーザー, 受光素子アレイ”,

- 1995年電子情報通信学会総合大会, SC-4-3 (1995) p. 461.
- 9) J. W. Goodman, F. J. Leonberger, S.-Y. Kung and R. A. Athale: "Optical interconnections for VLSI systems," Proc. IEEE, **72** (1984) 850-865.
 - 10) K. Hamanaka: "Optical bus interconnection system using Selfoc lenses," Opt. Lett., **16** (1991) 1222-1224.
 - 11) J. Jhans, Y. H. Lee and J. L. Jewell: Proc. SPIE, **1359** (1990) 164.
 - 12) R. C. Kim, E. Chen and F. Lin: "An optical holographic backplane interconnect system," IEEE J. Lightwave Technol., **9** (1991) 1650-1656.
 - 13) T. Sakano, T. Matsumoto, K. Nogichi and T. Sawabe: "Design and performance of a multiprocessor system employing board-to-board free-space optical interconnections: COSINE-1," Appl. Opt., **30** (1991) 2334-2343.
 - 14) M. Koyanagi, H. Takata, H. Mori and J. Iba: "Design of 4-Kbit \times 4-layer optically coupled three-dimensional common memory for parallel processor system," IEEE J. Solid-State Circuits, **25** (1990) 109-116.
 - 15) S. Fukushima and T. Kurokawa: "Parallel interconnection through an optical fiber using phase conjugation mirror acceptable for optical data pattern," IEEE J. Quantum Electron., **29** (1993) 613-618.
 - 16) T. Kurokawa and S. Fukushima: "Spatial light modulators using ferroelectric liquid crystal: tutorial," Opt. Quantum Electron., **24** (1992) 1151-1163.
 - 17) 福島誠治, 黒川隆志: "液晶空間光変調器の技術動向", 応用物理, **64** (1995) 418-426.
 - 18) M. Yamaguchi, T. Matsunaga, S. Shirai and K. Yukimatsu: "Analog free-space optical switch structure based on cascaded beam shifters," IEICE Trans. Commun., **E77-B** (1994) 163-173.
 - 19) H. Yamazaki, T. Matsunaga and S. Fukushima: "1 \times 1104 holographic switching with a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," IOOC '95 (Hong-Kong, 1995).
 - 20) 黒川隆志: "デジタル光デバイスと信号処理への応用", 電子情報通信学会技術報告, OPE 94-7 (1994).
 - 21) D. A. B. Miller: "Quantum-well self-electrooptic effect devices," Opt. Quantum Electron., **22** (1990) S61-S98.
 - 22) C. Amano, S. Matsuo and T. Kurokawa: "Novel photonic switch arrays consisting of vertically integrated multiple-quantum-well reflection modulators and phototransistors: Exciton absorptive reflection switch," IEEE Photonics Technol. Lett., **3** (1991) 736-738.
 - 23) T. Yamamoto, M. Yamaguchi, K. Hirabayashi, S. Matsuo, H. Iwamura, Y. Kohama, T. Kurokawa and K. Koyabu: "Digital free-space photonic switching module using micro-beam optical interconnections and exciton absorption reflection switch (EARS) arrays," MOC '95, Hiroshima, PD 1 (1995).
 - 24) A. L. Lentine, R. A. Novotony, T. J. Cloonan, L. M. F. Chirovsky, L. A. D'Asaro, G. Livescu, S. Hui, M. W. Focht, J. M. Freund, G. D. Guth, R. Leibenguth, K. G. Glogovsky and T. K. Woodward: "4 \times 4 arrays of FET-SEED embedded control 2 \times 1 optoelectronic switching nodes with electronic switching nodes with electrical fan-out," IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 1126.
 - 25) T. Nakahara, S. Matsuo, C. Amano and T. Kurokawa: "Switchable-logic photonic switch array monolithically integrating MSM's, FET's, and MQW modulators," IEEE Photonics Technol. Lett., **7** (1995) 53-55.
 - 26) S. Matsuo, T. Nakahara, Y. Kohama, Y. Ohiso, S. Fukushima and T. Kurokawa: "Monolithically integrated photonic switching device using an MSM PD, MESFETs, and a VCSEL," IEEE Photonics Technol. Lett., **7** (1995) 1165-1167.
 - 27) T. Nakahara, S. Matsuo, S. Fukushima and T. Kurokawa: "Performance comparison between multiple-quantum-well modulator-based and surface-emitting-laser-based smart pixels," Technical Digest of CLEO/Pacific Rim '95, Makuhari, WP 1 (1995) pp. 100-101.
 - 28) K. W. Goossen, J. A. Walker, L. A. D'Asaro, S. P. Hui, B. Tseng, R. Leibenguth, D. Kossives, D. D. Bacon, D. Dahringer, L. M. F. Chirovsky, A. L. Lentine and D. A. B. Miller: "GaAs MQW modulators integrated with silicon CMOS," IEEE Photonics Technol. Lett., **7** (1995) 360-362.