

インタコネクション用光デバイス

黒川隆志 大磯義孝 松尾慎治
中原達志 館野功太 若月温 津田裕之
NTT光エレクトロニクス研究所

空間的な並列光インターコネクションはMUX/DEMUXを省くため、経済性や消費電力の点で有利となる。ここでは光学実装の見方から、並列光ファイバリンク、自由空間接続、光導波回路の3つの並列光インターコネクションの形態について考察し、それらに応じた光デバイス、特に大きな並列性を有する面発光レーザー、面型光変調器やこれらの光素子とLSIを集積したスマートピクセルの研究の現状を紹介するとともに、応用の観点からの課題についても論じる。

Photonic Devices for Optical Interconnection Systems

T. Kurokawa, Y. Ohiso, S. Matsuo,
T. Nakahara, K. Tateno, A. Wakatsuki, and H. Tsuda
NTT Optoelectronics Laboratories

VCSELs and smart pixel arrays are the key devices for constructing parallel optical interconnection systems, such as parallel optical fiber links, free-space interconnects and optical waveguide circuits. Parallel optical interconnection technologies based on VCSELs and smart pixels are reviewed, and the device and system application issues are discussed.

1. はじめに

光通信技術で用いられている光ファイバや半導体レーザーは飛躍的な伝送容量をもたらし、広帯域ネットワークの普及に貢献している。この光による広帯域な伝送能力を装置間や装置内の接続に利用して電気接続のボトルネックを解消しようという光インタコネクションの動きが急である。

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。即ち数mmから200m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。したがってインタコネクシオンに用いられるレーザや受光器などの光素子は一次元あるいは二次元のアレイ形状であることが望ましい。

本稿ではまず並列光インターコネクシオンの形態について考察し、それらに応じた光デバイス、特に大きな並列性を有する面発光レーザ、面型光変調器やこれらの光素子とLSIを集積したスマートピクセルの研究の現状を紹介する [1]。

2. 並列光インターコネクシオンの形態
光インターコネクシオンの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が、ここでは光学実装の見方から、並列光ファイバリンク、自由空間接続、光導波回路の3つの形態について考察する。

2. 1 並列光ファイバリンク

並列光ファイバリンクは図1に示すように、多数列のファイバリボン、レーザアレイとフォトダイオードアレイによって10-20チャンネル程度の信号を並列に伝送する。端面発光型レーザやLEDを用いた10チャンネル程度のモジュールが検討されているが、最近面発光レーザを用いたシステムの開発が盛んである。表1に最近の並列光ファイバリンクシステムの開発状況を示す [2-4]。1次元の短波系

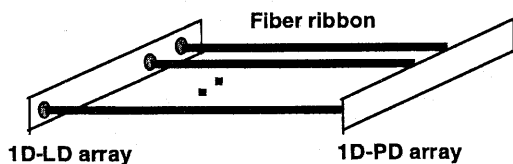


図1. 並列光ファイバリンクの構成

表1. 並列光ファイバリンクの開発状況

	LD array	Optical fiber	Throughput	Trans. length Consum. power
OETC [3]	VCSEL 32 pixels (850 nm)	GI- MMF	16 Gbps (500 Mbps x 32ch)	100 m 400 mW/ch
POLO [2]	VCSEL 10 pixels (980 nm)	GI- MMF	6.2 Gbps (622 Mbps x 10ch)	300 m 150 mW/ch
Motorola [4]	VCSEL 10 pixels (850 nm)	SI- MMF	1.5 Gbps (150 Mbps x 10ch)	30 m 100 mW/ch
Hitachi [5]	Edge-emitting 12 pixels (1300 nm)	SMF	3 Gbps (250 Mbps x 12ch)	100 m 200 mW/ch

面発光レーザとフォトダイオードアレイを用いた並列リンクは特に米国で開発が盛んである。一方国内では長波系の端面発光型レーザアレイを用いたシステムが開発されている [5]。伝送距離と伝送速度は主にファイバー間のスキューによって制限され、各々100-200 m、150-600 Mbpsである。またチャンネル数はレーザ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ー低減、受光レベルの均一性確保、低消費電力化が重要である。

2. 2 自由空間光接続

自由空間接続のもっとも大きな特長は、きわめて大きな接続密度が実現できることにある。即ち、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だ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。大きな並列度が可能だが、距離的には1m以内が限界であり、ボード間、チップ間の高並列な光接続に対応しうる。

自由空間光接続の主要な課題は光学実装の問題である。図2にボード間自由空間接続の一形態を示す。電気プリント配線

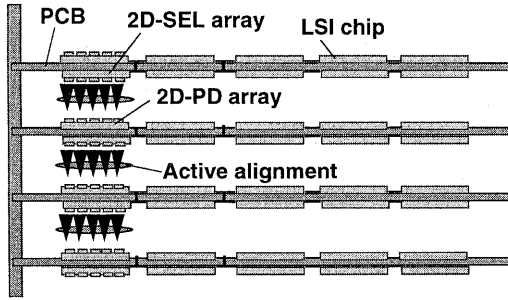


図2. ボード間自由空間光接続

基板は抜き差しをするため相互間の精密な位置決めは困難である。ボード間の自由空間光接続を実現するためには、この光学実装の課題を解決しなければならない。もう1つの問題はいかに多数の接続を自由に切り替えるかというスイッチング機能である。すなわち高速で大容量のスイッチング機能が並列プロセッサや光交換システムの光インターコネクションにおいて重要である。

プリント基板間の位置精度を一定に保つためにメカニカル・フィードバックを採用する方法が提案されている [6,7]。実際CDシステムのサーボ系等小型で安価なオプトメカニクスの利用は十分考えられる。もう1つの方法は固定されたバックプレーンの採用である。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が行われた [8]。GRIN レンズアレイを用いた光バス方式のバックプレーンも提案されている [9]。この構成はスマートピクセルにより各ボードごとにデジタル再生データ転送を行うハイパープレーン方式に拡張された [10]。いずれにおいても自由空間光接続においてはスマートピクセルの開発とそれによる光学実装が

重要な課題である。

2.3 導波回路光接続

大型プリント基板上の任意の点を 600 Mbps以上のデータ速度で電氣的に配線することは容易ではない。プリント基板の代わりに光導波回路を用いて、光信号で配線できれば帯域的な問題はなくなる。最近石英系や有機系の材料によりすぐれた特性の光導波回路が開発されている。これらは低損失で複雑な配線パターンを形成できる点でプリント基板の光版としてボード内インタコネクションへの適用が期待できる。石英系光導波回路は特に低損失で寸法精度も高い。一方有機系光導波回路は大型のボードを製作できる利点がある。面発光レーザーなど面型光素子は受光素子と同様に光導波路上から45度ミラーによって図3のように結合することができる。垂直方向の精密な位置調整が不要となるためプレーナな集積化が可能となる点で、面型光素子は光導波回路接続に適したデバイスといえる。

3. レーザーアレイ

インタコネクションに用いる半導体レーザーに対しては、並列伝送の点から均一性のよいアレイであること、低消費電力

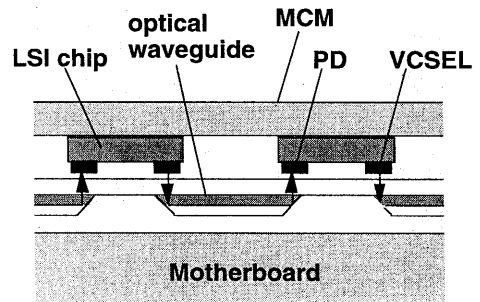


図3. 光導波路と面型光素子の結合

の点から低閾値、高効率、さらに駆動回路との整合性から p 基板にあることが望ましい。

端面発光レーザーは信頼性にすぐれた InP 系で一次元アレイが開発されている [11]。1.3 μm 帯で埋め込みヘテロ構造 InGaAsP/InP-10ch-LD アレイが開発されている。高反射率コーティング、短共振器、微小幅の構造により、閾値 2 mA 以下が達成されている。並列ファイバリンク用の光源としては現在もっとも完成度の高いものと考えられる。

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ため 2 次元アレイが可能となる。またこの構造上、劈開が不要でありウエハ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。図 4 に 850 nm 帯の 8x8 面発光レーザーアレイを示す。64 個のレーザーの平均閾値電流は 1.6 \pm 0.3 mA である。130 度までの発振が確認されている [12]。またフリップチップ接続により 2 次元アレイの配線に対して 2.6 GHz までの広帯域駆動が達成されている。面発光レーザーはもともと低しきい値電流であるが、最近

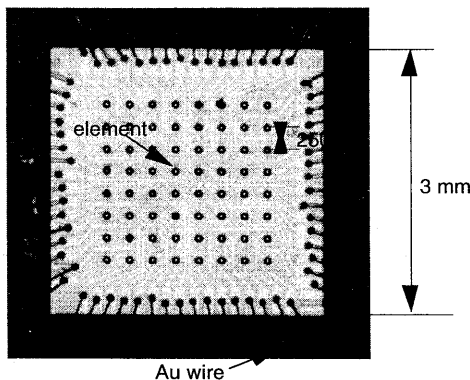


図 4. 8x8 面発光レーザーアレイ

では酸化プロセスの導入などにより 100 μA 以下の小さなしきい値電流が報告 [13] 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。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であり、長波長帯での発振特性の向上が望まれる [14,15]。

4. スマートピクセル

LSI 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ればボード内、ボード間のインタコネクションを自由に大容量にすることができる。その際かに LSI に光 I/O を付加するか、すなわち電子回路と光素子の集積技術が重要な課題となる。現在のスマートピクセルの開発状況を図 5 に示す。

半導体スマートピクセルには変調器型と面発光型の 2 種が主に開発されている。変調器型は多重量子井戸構造で現れる鋭い励起子吸収の電界移動 (量子閉じ込めシュタルク効果) を利用した面型変調器を電子回路に集積したもので、AT&T で開発された SEED が代表的である。そのメモリ機能によりデジタル再生が可能であり、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。コントラストの不足を補うために差動動作が可能な S-SEED 構成とし、1 つのピクセルに 25 個の FET を搭載した 16 ピクセルからなる FET-SEED が試作されて

いる。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 [16]。

NTT では面型多重量子井戸変調器とフォトトランジスターを集積したEARSと呼ばれる素子を開発した。出力光のコントラストが高くかつ光利得を持っている。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を簡単にできる。EARSもMSMとFETを集積したFET-EARSが試作され、300 MHzのスイッチ速度が報告されている [17]。

電子回路の機能性の点からはSi-CMOS回路の方が融通性が高い。最近開発されたHybrid-SEEDではSi電子回路上にGaAsのSEEDを集積しピクセル内に多数のトランジスタを搭載している [18]。GaAsのSEEDとSi電子回路の接続にはフリップチップ接続が用いられている。

変調器型のスマートピクセルにたいして面発光レーザーを搭載したスマートピクセルも報告されている。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がある。モノリシックな面発光レーザースマートピクセルは、GaAs基板上の1ピクセルに面発光レーザー、MSMフォトダイオード、3つのFETが集積されたものが開発されている [19]。1ピクセルのサイズは250ミクロン角で速度は220MHz、100 μWの微弱光でスイッチできる。また最近Si-CMOSと面発光レーザーの新しいハイブリッド集積法についても検討が進められている [20]。

最後にスマートピクセルの集積度や帯域の可能性についてふれておこう [21]。ピクセルあたりの消費電力によって1チップ

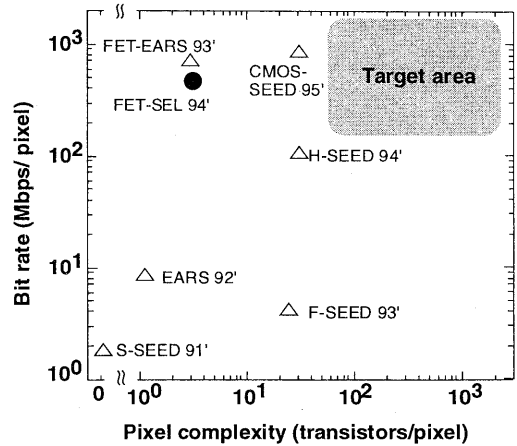


図5. スマートピクセルの開発状況

ブあたりのチャンネル数がきまる。また消費電力の低減のために変調器型では変調器にかかる電圧の低減、面発光型ではレーザーのしきい値電流の低減が重要となる。いずれの型のスマートピクセルでも1チップあたりTHz/cm²オーダーの極めて大きなスループットが可能と見積もられているが、システム全体としてみれば光源の不要な発光型の方が消費電力的には有利となる。

5. まとめ

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づけだけでなく、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、自由空間を含めた光学実装技術である。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を産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。

謝辞 本論文をまとめるにあたり多くの議論を頂いた岩村英俊部長を始めNTT研究所の多くの同僚に感謝する。

文献

[1] T. Kurokawa and T. Ikegami: "Optical interconnection technologies based on VCSELs and smart pixels", Proc. of MPPOI '96, 300-305, Maui (1996)

[2] K. H. Hahn: "POLO-parallel optical links for gigabyte data communications", Proc. of 45th ECTC, 368-375 (1995)

[3] 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. of Lightwave Technol., LT-13, 995-1013 (1995)

[4] D. B. Schwartz, C. K. Y. Chun, B. M. Foley, D. H. Hartman, M. Lebby, H. C. Lee, C. L. Shieh, S. M. Kuo, S. G. Shook, and B. Webb: "A low cost, high performance optical interconnect", Proc. of 45th ECTC, 376-379 (1995)

[5] 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. of Lightwave Technol., LT-12, 260-270 (1994)

[6] G. C. Boisset, B. Robertson, and H. S. Hinton: "Design and construction of an active alignment demonstrator for a free-space optical interconnect", IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 676-678 (1995)

[7] T. Yamamoto, K. Hirabayashi, M. Yamaguchi, S. Hino, Y. Kohama and K. Tateno: "Active alignment of massively parallel free-space board-to-board optical interconnections using an adjustable liquid prism", in Technical Digest of 1996 International Topical Meeting on Photonics in Switching (PS'96), PThD6, Sendai (1996)

[8] K. Noguchi, T. Sakano and T. Matsumoto, "A 128 x 128-channel free-space optical switch using polarization multiplexing technique," in Proc. ECOC'91 (Paris, France), vol. 1, 165-168, Sept. (1991)

[9] K. Hamanaka: "Optical bus interconnection system using Selfoc lenses", Opt. Lett., 16, 1222-1224 (1991)

[10] D. V. Plant, B. Robertson, H. S. Hinton, W. M. Robertson, G. C. Boisset, N. H. Kim, Y. S. Liu, M. R. Otazo, D. R. Rolston, and A. Z. Shang: "An optical backplane

demonstrator system based on FET-SEED smart pixel arrays and diffractive lenslet arrays", IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 1057-1059 (1995)

[11] S. Yamashita, A. Oka, T. Kawano, T. Tsuchiya, K. Sitoh, K. Uomi, and Y. Ono: "Low threshold (3mA) 1.3 μ m InGaAsP MQW laser array on a p-type substrate", IEEE Photon. Technol. Lett., 4, 954-957 (1992)

[12] Y. Ohiso, K. Tateno, Y. Kohama, H. Tsunetsugu and T. Kurokawa: "Flip-chip bonded 0.85- μ m Vertical-cavity Surface-emitting Laser Array using AlGaAs substrate", Proc. of Integrated Photonic Reserch'96, IWD3-1, 481-485, (1996)

[13] G. M. Yang, M. H. MacDougal, and P. D. Dapkus: "Ultralow threshold VCSELs fabricated by selective oxidation from all epitaxial structure", Digest of CLEO '95, CPD4 (1995)

[14] N. M. Margalit, D. I. Barbic, K. Streubel, R. P. Mirin, D. E. Mars, J. E. Bowers, and E. L. Hu: "Laterally oxidized long wavelength cw vertical-cavity lasers", Appl. Phys. Lett., 69, 471-472 (1996)

[15] Y. Ohiso, C. Amano, Y. Itoh, K. Tateno, T. Tadokoro, H. Takenouchi, and T. Kurokawa: "1.55 μ m vertical-cavity surface-emitting lasers with wafer-fused InGaAsP/InP- GaAs/AlAs DBRs", Electron. Lett., 32(16), pp.1483-1484 (1996)

[16] F. B. McCormick, T. J. Cloonan, A. L. Lentine, J. M. Sasian, R. L. Morrison, M. G. Beckman, S. L. Walker, M. J. Wojcik, S. J. Hinterlong, R. J. Crisci, R. A. Novotony, and H. S. Hinton: "Five-stage free-space optical switching network with field-effect transistor self-electro-optic-effect device smart-pixel arrays", Appl. Opt., 33, 1601-1618 (1994)

[17] T. Nakahara, S. Matsuo, C. Amano and T. Kurokawa: "Switchable-logic photonic switch array monolithically integrating MSM's, FET's, and MQW modulators", IEEE Photon. Tech. Lett., 7 (1), 53-55 (1995)

[18] 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 Photon. Technol. Lett., 7, 360-362 (1995)

[19] S. Matsuo, T. Nakahara, Y. Kohama, Y. Ohiso, S. Fukushima, and T. Kurokawa, "Monolithically integrated photonic switching device using an MSM PD, MESFET's, and a VCSEL", IEEE Photon. Technol. Lett., 7, 1165-1167 (1995)

[20] S. Matsuo, T. Nakahara, K. Tateno and T. Kurokawa: "Novel technology for hybrid integration of photonic and electronic circuits", IEEE Photon. Tech. Lett., 8 (11), 1507-1509 (1996)

[21] T. Nakahara, S. Matsuo, S. Fukushima and T. Kurokawa.: "Performance comparison between multiple-quantum-well modulator-based and vertical-cavity-surface-emitting laser-based smart pixels", Appl. Opt, 35, 860-871 (1996)