

光インタコネクションの概観

黒川 隆志 東京農工大学工学部 tkuro@cc.tuat.ac.jp

コンピュータと通信の融合によって始まったIT革命は、コンピュータ間のデータ通信量の爆発的な増加を生じ、長距離のみならず比較的短距離のコンピュータ間あるいはコンピュータ内の接続においても光の需要を顕在化させつつある。この短距離の光を媒体とした接続を光インタコネクションと呼ぶことにする。Fibre ChannelやGigabit Ethernetなど光LANとして規格化されているものの他に、個々のシステム内でユニット（筐体）間の接続のために独自に開発された並列光ファイバリンクなども導入されている。ユニット内の接続の光化はこれからの段階だが、すでにボード間、チップ間さらにチップ内におよぶ多くの構想がある¹⁾。ユニット間の光インタコネクションが進めば大規模な分散処理システムが実現できるが、同時に光-電気インタフェースの問題が顕在化するのには明らかである。なぜならこれまでは伝送速度が遅かったためインタフェースでの遅延は問題とならなかったからである。この点の実装上の解決策としては、光-電気インタフェースをできるだけシステムチップに近づけることである。究極的には光を直接LSIに接続することが目標となる。もしこの技術が実現したときには光の並列性を活かして、画像処理チップなどへの展開も可能となる。これによりこれまでの電子回路によるLSI情報処理システムとはアーキテクチャも異なる、新しい光電融合処理システムが生まれる可能性も秘められている。

ここではユニット間からチップ間までの光インタコネクションの特長と発展形態を概観し、次にそこで用いられるデバイスや実装技術を紹介するとともにその技術的課題について論じる。

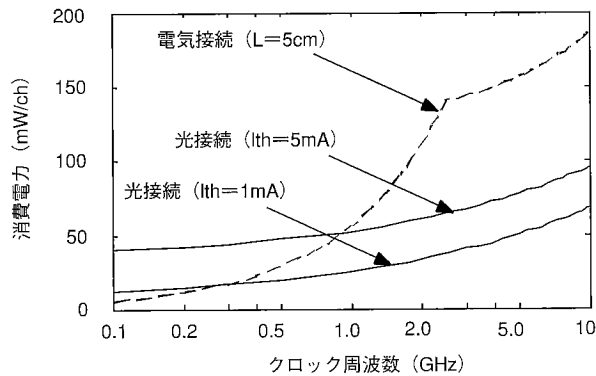
◆光インタコネクションの特長と課題◆

電気接続では、帯域が狭いことによって生じる高速信号の劣化、並列チャンネル間のスキュー、クロストークの発生など、高速化や並列化の限界が明らかである。さらに高速化、長距離化に伴って消費電力が増大し、端子数や発熱の増大に伴う実装上の問題が大きくなる。これに対して光接続の特長は次のようにまとめられる。

- 1) 光は数100THzという高いキャリア周波数を持つので本質的に広帯域であり、高速大容量伝送が可能なこと。
- 2) 電気の場合、干渉を避けるために線と線の間を離さなければならないが、光では無誘導性、非干渉性により空間並列性や波長多重など光の性質に基づく高密度な多重化が可能なこと。
- 3) 光の場合、損失の距離依存性が小さく、低消費電力化が可能なこと。電気では受信端電圧を発生させるために伝送路をいったん充電しなければならないので、伝送エネルギーは距離に比例して増大する。電気と光の接続における消費電力の比較を図-1に示す²⁾。
- 4) インピーダンス整合やアース線が不要なこと。
- 5) 単位体積あたりの通信容量が電気配線に比べてきわめて大きいこと。すなわち銅線に比べて光ファイバはきわめて細いにもかかわらず、大容量の伝送が可能である。さらに自由空間での伝搬を利用でき、この場合超並列の接続が可能なこと。

以上のような特長にかかわらず、光インタコネクションの普及には次のような課題がある。

- 1) 電気と比べて光部品、光実装がまだ高コストなこと。



電気は電圧2.5V, 配線長5cm, 50Ω整合を仮定. 光は受信回路の電力 (20mW@1GHz) が周波数の1/2乗に比例し, レーザ光源の電圧を2.5Vと仮定

図-1 電気接続と光接続の比較²⁾

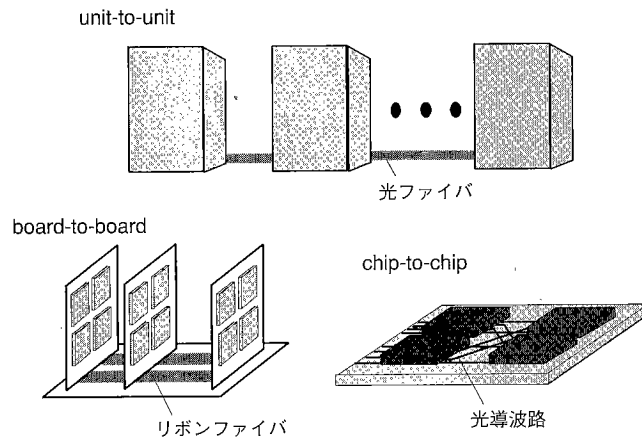


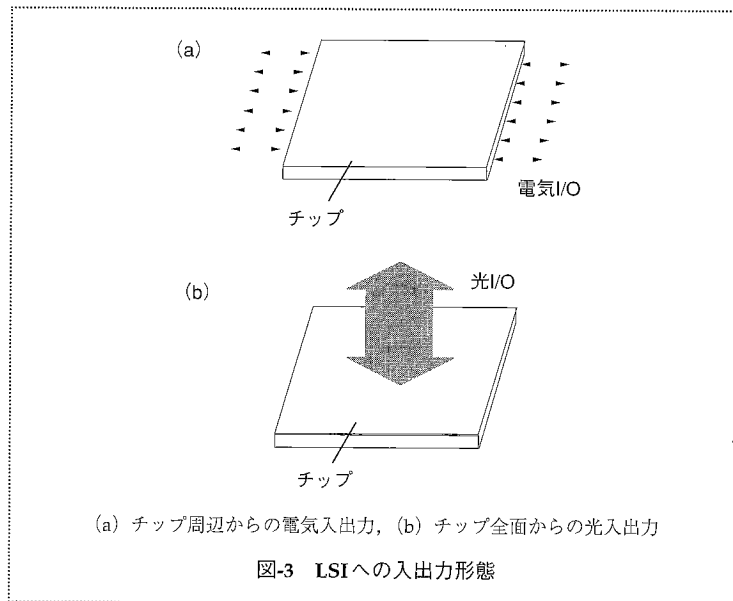
図-2 光インタコネクションの適用形態

- 2) 光によって伝送だけが速くなっても, ハンドシェイクやエラー訂正などによるプロトコル, バッファメモリ, スイッチングなどインタフェースにおける負担が顕在化し, システム全体としての性能に限界が生じること.
- 3) これまでの光技術は長距離の光通信を中心に発展してきたが, 光公衆網は20年以上の長期信頼性を保証している反面, ビット誤り率が 10^{-12} 程度で, また Gbps 以上の伝送速度では厳密な温度管理が必要となる. このような光公衆網の基準を光インタコネクションに持ち込むことは不適切である.
- 4) 光入出力部がシステム LSI と離れていれば, その間に高周波の電気実装が必要となり, 光接続の利点は半減するので, 光 I/O と LSI の集積が望ましい.
- 5) ユニット内での光配線の実装形態はプリント板など電気接続の実装形態に整合させた形で進めていくこと

が, 当面必要である. しかしこれに関しての標準化はまったく進んでいない.

◆光インタコネクションの形態◆

光インタコネクションは適用領域の観点から図-2のように分類される. 現在はユニット間の接続 (第一世代) が実用化されている. この場合の接続距離は数mから1km程度で, 一般的には100m以下がほとんどである. 伝送媒体には光ファイバが用いられる. 第二世代はボード間の接続であり, これにはバックプレーンでの配線も含まれる. 距離は数cmから1m程度までであり, 光ファイバ, 自由空間, 導波路など媒体の選択肢は多い. 第三世代はチップ間の接続である. これはマルチチップモジュール (MCM) 間も含み, 数mmから10cmの距離



で、導波路または自由空間が用いられよう。第二世代では発受光素子はLSIチップ上に直接搭載されることが望ましく、第三世代ではこの技術は必須となる。最終的にチップ内の接続にまで光配線が持ち込まれるかは、まだ不明の部分が多い。

物理的な面から配線形態をみると、光ファイバ、導波路、自由空間に分類される。光ファイバは数10cm以上の距離で用いられ、現状の技術では1本のファイバあたり2.5Gbps以下の伝送速度が（コスト的な観点から）実用的であるので、これ以上の伝送速度を実現するためには多重化が必須となる。空間多重では何本かのファイバがまとまったりボンファイバが、また波長多重の場合はシングルモードのファイバが用いられる。現在のところ空間多重による並列光ファイバリンクが主体であるが、距離は100m程度までである。波長デバイスの普及が進めば、特に数100m以上の光LANでは波長多重方式の光インタコネクションが主流になると予想される。

導波路（光を伝搬させるための回路、プリント板に相当する）は第二世代以降で光プリント板、あるいは光マザーボードといった形態で、チップ間の配線やバックプレーンに用いられよう。現状の導波路は石英のシングルモードが開発されており主としてWDMネットワークに用いられているが、光プリント板としてはむしろマルチモードのポリマー材料も候補となる。

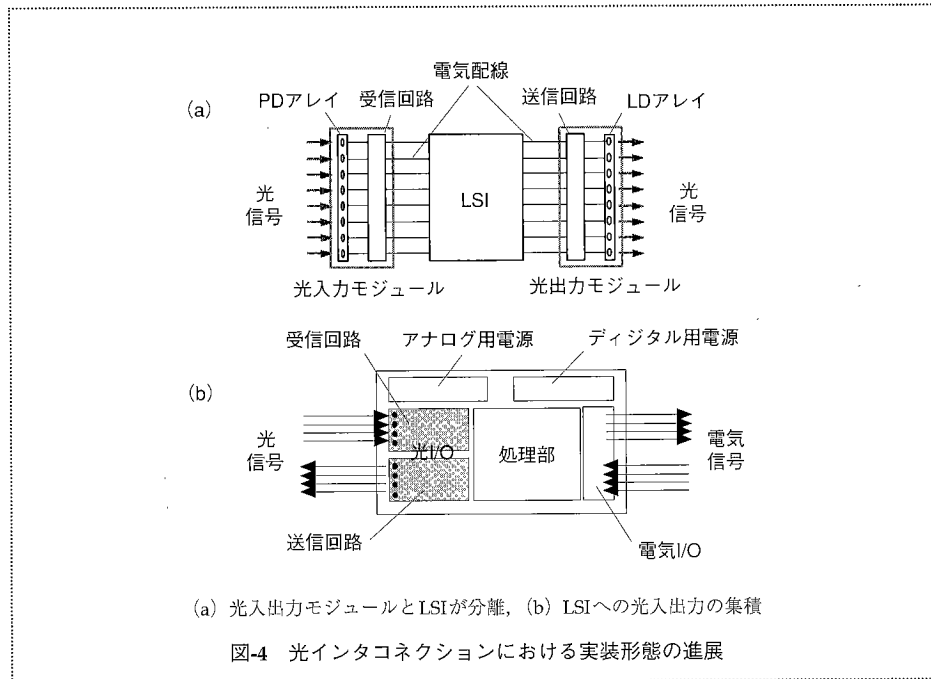
自由空間での光接続は単なる銅線の置き換え以上の意味を持つ。なぜなら図-3に示すように、これまでの電気配線が2次元的な面内に限られていたのに対し、自由空間光接続は3次元的な配線となり、配線密度、自由度

とも飛躍的に増加するからである。自由空間光接続は特にLSIへの光I/Oの集積によって具体的な意味を持つてくると予想され、このとき単なる光接続だけでなく画像処理など並列処理を主体としたスマートピクセルへの発展も期待される³⁾。これはさらに新しい光電融合並列処理システムにつながる可能性も秘められている。

◆デバイス／実装と技術的課題◆

長距離の光通信ではファイバの損失と分散の小さい1.3または1.5 μm の長波長帯が用いられるが、光インタコネクションではいくつかの選択肢がある。特に距離の短いユニット内の配線では、0.85 μm の短波長帯あるいは可視光帯を用いることもできる。どの波長帯を用いるかは光源、伝送媒体の選択に影響し、結果としてシステムの適用領域、コストと信頼性に跳ね返る。

光源となる半導体レーザー（laser diode: LD）はInP（インジウムリン）系の長波長帯LDが信頼性に優れるがコストが高い欠点がある。その点で光ディスク用の可視光LDは量産されているため低コストであるが、信頼性は低い。これらは半導体基板の端面から光が出る端面発光型LDであるが、基板に垂直に光を出射する面発光LD（vertical-cavity surface-emitting laser diode: VCSEL）の開発も進んでいる。2次元的なアレイ構造ができ消費電力も小さいので、並列の光インタコネクションに適している。また面発光LDは後述するように、LSIチップ上への集積にも適した構造となっている。面発光LDは短波長帯が主流であったが、最近では長波長帯



でも特性の改善が進んでいる。

光ファイバは高速の長距離伝送に適するが径が細いため接続が難しいシングルモードファイバと、光源との接続やファイバ同士の接続の簡単なマルチモードファイバがある。光インタコネクションでは多くの場合どちらも適用可能であるが、日本ではシングルモードファイバがよく出回っているのでこちらが使われることが多い。空間並列のためにリボンファイバを用いる場合は、接続の点からマルチモードファイバの方が使いやすいであろう。特に面発光LDや光ディスク用LDを用いる場合はマルチモードファイバが適している。波長多重の場合はシングルモードファイバが適しているが、波長的に分波したり合波するための波長多重デバイスがまだ高価であることから、本格的に光インタコネクションに導入されていない。

光実装が電気実装と異なるのは次のような点である。

- 1) 電気のような干渉を気にしないが、接続などにおいて μm の寸法精度が必要である。この寸法精度を保証しつつ簡易な実装工程を実現することが重要となる。
- 2) Gbps以上の送受信には厳密な温度管理が必要となる。したがって何らかの多重化が必須となる。
- 3) 光I/O部と処理部とが別々のモジュール(チップ)となっている場合(これまで開発されているものはほとんどがこれである)には、相互の接続に高周波の電気配線が必要になる。図-4に示すように、十分に光接続の効果を発揮するためには、処理部に直接光がアク

セスする形態にしなければならない。これはLSIチップ上に光素子を実装することを意味し、スマートピクセルと呼ばれるこの技術はまだ開発段階にある。

光実装は従来の電気実装に整合する形で混載していくことが当面求められるので、以上の点は特に大きな課題となろう。

◆まとめ◆

長距離公衆通信網を中心に進んできた光技術をそのまま光インタコネクションに適用することには種々の問題がある。その最たる点はコストであるが、FTTHの普及とともに光技術は急速に低コスト化されることが期待できる。またLSIの急速な進歩はいずれ電気接続から光接続に転換せざるを得ない状況を迎えるだろう。この2つの条件が満たされたとき、コンピュータ内部まで光インタコネクションが入り込み、新しいコンピュータシステムに発展していくことが期待される。

参考文献

- 1) Kurokawa, T., Matsuo, S., Nakahara, T., Tateno, K., Ohiso, Y., Wakatsuki, A. and Tsuda, H.: Design Approaches for VCSEL's and VCSEL-based Smart Pixels toward Parallel Optoelectronic Processing Systems, *Appl. Opt.*, 37 (2), pp.1-11 (1998).
- 2) Tocci, C. and Caulfield, H. J.: *Optical Interconnection*, Artech House, Boston (1994).
- 3) Ishikawa, M.: Optoelectronic Parallel Computing System with Reconfigurable Optical Interconnection, In *SPIE Critical Reviews*, CR62, pp.156-175 (1996).

(平成12年7月18日受付)