光インタコネクションのための多階積層光導波路網

裏 升吾, 西原 浩

大阪大学大学院 工学研究科電子工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Multistory Optical Waveguide Network for Optical Interconnection

Shogo URA and Hiroshi NISHIHARA

*Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871*

(Received February 10, 1999)

Application potential of multistory optical waveguide structure (MSWG) to intra-board, intra-wafer, or intra-chip optical interconnection systems is discussed with proposed coupling scheme between stacked waveguides using grating couplers. Basic concept of three dimensional optoelectronic integrated circuits (3-D OEICs), which is constructed by stacking several wafer-scale electronic IC (EIC) layers and optical IC (OIC) layers, is figured and described. Number of micro-processors, memories, light sources, photodetectors, etc., are integrated on each EIC layer of semiconductor wafer of several micron thickness. Optical data-bus and control-bus are formed in each OIC layer with MSWG, which is introduced between EIC layers. Use of grating couplers for selective interconnection among MSWG or OIC layers is proposed and discussed with preliminary experimental results.

Key Words: Optical interconnection, Optical waveguides, Grating couplers, Three dimensional optoelectronic integration

1. はじめに

これまで順調に性能向上が図られてきた電子集積回路による信号処理の高速化にいいよ限界が近づきつつある。特に膨大なデータ転送に必要な配線容量の確保が現在の延長技術では解決できず、この課題を打破するためには、新規技術もしくは異種技術の本格的導入を検討せざるを得ないとの危機感がある。導入すべき技術として、光通信や光メモリ、光センサの分野で急速に進展してきた光技術が現状では最右翼と期待されている。光を利用した情報処理分野では、超並列処理可能な光コンピュータが魅力的であるが、その一方で、現在の信号処理のアーキテクチャを大きく変更せずに、実現により近い段階的解決策として、ボトルネックとなっている配線部分に光を利用するというアプローチがある。光配線すなわち光インタコネクションの研究が、近年特に活発なのはそういう背景がある。光インタコネクションの可能性が方法論を含めてさ

まざまなグループで議論され、一部実用化されている。

光インタコネクションに関する研究開発は、システム構成から集積用光源・光検出器の作製・特性改善までを含めて実に多種多様なレベルで、また、様々な分野の研究機関やメーカーで、提案から実証、実用化が行なわれている。また、世の関心も高く、専門の会議^{注1)}や研究会^{注2)}などで精力的に議論され、また、一般誌にも解説記事^{注3)}が掲載されている。光インタコネクションの研究開発の現状についてはそれらを参照願いたい。

筆者らは、光導波路デバイスの研究に長く従事しており、光集積回路技術を光インタコネクションへ応用できないかと考え、数年前から積層光導波路間の接続に関して検討してきた。本稿では、光インタコネクションの将来像についての私見を述べた後、そのキーデバイスとなる多階積層3次元光導波路網の実現のための積層導波路間結合について、グレーティングカップラの適用可能性を中心に述べる。

注1) 例えば、1998年で5回目を迎えたMassively Parallel Processing Using Optical Interconnections (MPPOI) など。

注2) 例えば、光インターコネクト情報処理時限研究専門委員会研究会、電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ (1997-1999) やU-OEIC研究会、光産業技術振興協会 (1993-1997) など。

注3) 例えば、特集「実用化を目指す光インターコネクション」、オプトエレクトロニクス, No. 177, pp.107-166 (1996) や特集「光が変えるコンピュータの世界」、エレクトロニクス1997年1月号, pp.17-55 (1997) など。

2. 光インタコネクションの構成

2.1 光ファイバ型とフリースペース型

光配線といっても、どの部分の配線(信号伝達線路)に光を利用するかによって議論が異なる。Fig.1に長距離から微小距離までの光による信号伝送の様子を示す。光通信も光による情報伝達であるから、長距離光配線と言えなくもない(Fig.1 (a))。構内光LANや装置間の光接続(Fig.1 (b))も実用化されている。これを装置内、ボード内に縮小適用していこうという通信サイドからのアプローチが最も自然である。これまでに実用化もしくは開発されている光インタコネクションは、光ファイバを主体としている。例えば、Fig.1 (c)に示すような伝送距離100m程度を対象とした光モジュールとして、モトローラのOPTOBUS¹⁾、HPを中心とするPOLO²⁾、IBM、AT&TやハネウェルのOETC³⁾、NTTのParaBIT⁴⁾などが有名である。これらは、いずれも面発光レーザー(VCSEL)とマルチモードファイバを用いて10チャンネル以上で構成しており、転送速度はGbps

から数十Gbpsである。また、Fig.1 (d)に示すようなボード間を接続する光バックプレーンとして、バル研のOptiFlex⁵⁾に代表されるように、光ファイバ配線をフレキシブルシート状としたものも開発されている。

次世代の光インタコネクションとしては、光の並列性の利用、およびボード内やチップ内光配線の実現が挙げられる。光の2次元並列性を利用すればチャンネル数が格段に多くとれ転送容量の画期的改善が見込まれる。2次元データの送受信には2次元配列のVCSELと光検出器が用いられる。例えば、直径が数mmのイメージファイバを用いて2次元光データを像として転送する構成⁶⁾(Fig.1 (e))や、Fig.1 (f)に示すような2次元の受光・発光・プロセッサアレイによるシステム⁷⁾、などが検討されている。一方、ボード内配線を対象とする場合、伝送距離が十数cm程度以下となり、光ファイバは使用しにくく、Fig.1 (g)に示すような微小光学素子構成のフリースペース光学系⁸⁾、Fig.1 (h)に示すような光基板上への電子回路の実装^{9,10)}などの検討が進められている。微小光学素子の代わりや光基板内での光偏向に、平板回折格子を利用する構成も考案され検討されている。しかしながら、LSIチップ内配線など、そのサイズがさらに微小になってくると、光デバイスと電子デバイスの基本的サイズの違いが新たな問題となってくる。また、配線部分だけ光方式に置換する場合、電気-光(E/O)および光-電気(O/E)変換が不可欠であり、そのための発光・受光素子やそれらの駆動素子を多数必要とし、それが光インタコネクションの適用領域を制限する要因となる。

Fig.1 Typical configurations of information link by optics from optical communication down to intra-chip optical interconnection.

2.2 将来像と光導波路網

将来のペタFLOPSの演算速度やテラbpsのスループットを実現するためには超並列演算プロセッサによるコンピュータシステムを必要とする。クロック周波数が数GHzを超えると、クロック当たりの伝送距離は光を用いてもcmオーダー以下となる。したがって、スキュー(伝搬遅延時間差)の問題を緩和するためには、クロック周波数をある程度に抑制して、多数のプロセッサをできるだけコンパクトに集積して並列に機能させることが求められ、信号伝達には最速で混信のない光をできるだけ並列に利用する形態が期待される。しかしながら、電気と光という異種の信号形態を併用する場合、発光・受光素子の集積化を含めて、様々な技術課題を解決する必要がある、その対価として配線手段のみというのでは研究・開発に対する動機や魅力に欠ける。すなわち、光技術を導入するからには配線手段としてのみならず、光サイドにおいて付加的な機能の集積化を念頭に入れ、本格的な光-電子集積回路の研究・開発を推進することが肝要と考えられる。少なくとも光サイドによるデータバスのスイッチングなどは最低限望まれよう。

いまひとつ考慮しなければならない点は、電子と光波のサイズの違いである。フリースペースを伝送媒体として光波を利用する場合、回折広がりによるクロストークの発生や素子サイズの拡大、ビームを集光させるために必要なレンズ開口数の確保のための素子サイズの拡大、などがコンパクトなシステムを構築する際の障害となる。このよ

うな問題を回避するために、光導波路は非常に有効である。

Fig.2に3次元に集積した光電子集積回路網のイメージを示す。面内方向にはウェーハスケールの集積とし、電子集積回路層(以下、EIC層)には演算プロセッサやメモリを混載し、光集積回路層(以下、OIC層)には配線網やスイッチング網を集積し、それらの層を交互に面垂直方向に、例えばウェーハ貼り合わせなどにより、近接もしくは密着して集積するような構成である。EIC層のチップ間にはもはや電気信号配線はなく、チップ周辺には電源ラインと発光・受光素子列だけを配する構造とすることも考えられる。各層の層厚は数~数十 μm 程度であり、ヒートシンクを兼ねた基板に搭載される。

スイッチング機能や簡単な演算機能などの光波制御をOIC層で実行する場合、構成導波路は単一モードであることが望ましく、導波コアのディメンションは小さくすむ。データの配送の単位は、演算プロセッサやメモリの単位である32ビットや64ビットが基本となり、データフローはOIC層内方向とOIC層-OIC層間方向の両者が混在するものとなろう。32チャンネルや64チャンネルでバスユニットを構成し、複数光バスを並列に配線することが要求され、光バス間の機能的接続、例えば、異なるバス間でのデータ共有やスイッチング、単純な演算処理を行うことが求められる。それゆえ、OIC層には、導波路を面内に集積するだけでなく面垂直方向にも集積した3次元的な導波路網構造が適していると考えられる。このような構造を検討する場合、EIC-OIC間のデータの受け渡し、OIC層-OIC層間のデータリンク、OIC層内での積層導波路間の機能的接続、等の実現方法が当面の技術課題となる。

EIC-OIC間のデータの受け渡しは、EIC層の送信元チップ周辺に集積したレーザーからの光を電気信号で変調してOIC層の光導波路に導き、送信先チップ周辺に集積した受光素子で電気信号に変換することで実行される。変調したレーザー光を導波光に結合する方法としては、チャンネル導波路型のDBRレーザーやDFBレーザーの光を方向性結合器等でOIC層導波路に導く方法や、面発光レーザーからの垂直出射光を反射偏向器やグレーティング結合器等でOIC層導波路に導く方法などいくつかの選択肢が考えられ

Fig.2 Schematic view of three dimensional wafer-scale integrated circuits consisting of electronic (EIC) layers and optical (OIC) layers. Each EIC layer includes number of μ -processors and memories as well as E/O (laser) and O/E (detector) elements. Each OIC layer includes optical interconnection network with bus-switching function.

る。これは重要な課題であり、レーザーの集積密度や結合効率、作製難易度、動作安定性により最適な構成が決定されることになるが、この議論は他稿にゆずる。一方、OIC層間や積層導波路間の光波結合に関して、筆者らはグレーティングカップラを利用する方法を提案し、検討を続けており、以下に紹介したい。

3. グレーティングカップラによる多階積層導波路間接続

3.1 積層導波路間の光波結合

基板に垂直方向に積層化された導波路の間の光波の結合法に関しては、縦方向Y分岐型^{11,12)}(Fig.3 (a)), 方向性結合器型¹³⁻¹⁹⁾(Fig.3 (b)), グレーティング結合型²⁰⁻²⁵⁾がある。グレーティング結合型はさらに伝搬定数補償型²⁰⁻²²⁾(Fig.3 (c))と放射モード利用型(グレーティングカップラ型)²³⁻²⁵⁾(Fig.3 (d))に分けられる。高分子導波路^{12,15-17)}や半導体導波路^{13,19-22)}、誘電体導波路^{11,13,18,23-25)}を用いた波長フィルタや光スイッチ等が報告されている。しかしながら、方向性結合器型や伝搬定数補償グレーティング結合型などのエバネッセント波の重なりを利用する形態¹³⁻²²⁾やY分岐型^{11,12)}では、結合する2つの導波路を近接させる必要がある。一方、放射モード利用型²³⁻²⁵⁾では、結合する導波路のそれぞれに集積したグレーティングカップラにより、入力導波光を一旦放射モードに変換し、その放射モードを出力導波光に結合する構成である。放射モードを介するこ

Fig.3 Optical wave coupling between stacked waveguides.

Fig.4 Wavelength selective interconnection among stacked waveguides by grating couplers.

とで、間隔の広い導波路間の結合が可能となる。また、Fig.4に示すように、多階に積層した複数導波路の任意の2つを直接的かつ選択的に結合することも可能であり、3次元導波路網の結合形態としてポテンシャルが高いと考えられる。

3.2 グレーティングカップラによる結合

Fig.5にグレーティングカップラ^{26,27)}の出力結合の様子とベクトルダイヤグラムを示す。この例では、グレーティングカップラは導波コア層上のグレーティング層を凹凸加工することにより屈折率の周期構造を得ている。コア層厚は μm オーダーであり、グレーティング周期 Λ はサブ μm オーダーとなる。導波光は、グレーティング領域に入射すると回折により放射モードに結合し、基板方向およびクラッド方向に出射される。導波光伝搬ベクトルの大きさを β 、グレーティングベクトルの大きさを $K(=2\pi/\Lambda)$ とすると、放射モード光の伝搬角度 θ_i は次の結合条件式で与えられる。

$$n_i k_0 \sin \theta_i = \beta - K \quad (i = c, s) \quad (1)$$

ここで、 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 、 λ は真空中での波長、 n_c および n_s はそれぞれクラッドおよび基板の屈折率を示す。 $\beta = 2\pi N/\lambda$ であり、角度 θ_i は導波モード屈折率 N および波長 λ に依存する。

積層導波路間の光波結合では、2つの導波路にそれぞれグレーティングカップラを集積し、出力結合と入力結合が組み合わされた構成となる²³⁾。3階以上に積層された導波路網であっても、基本的には2つの導波路を選択的に結合することになる。結合角度 θ_i が波長 λ に依存すること、特に逆方

(a) Cross-sectional view

(b) Vector diagram

Fig.5 Radiation of guided wave (output coupling) by grating coupler.

向結合における結合効率が鋭い波長選択性を示すことを利用すると、積層導波路間の選択的接続が可能となる。Fig.6に3階積層導波路間の選択的接続を実証するために作製した試料の構造と光学実験の様子を示す。1階導波路(WG1)の導波光はグレーティングカップラGC1により放射モードに結合し、グレーティングカップラGC2およびGC3により、互いに異なる波長 λ_{12} および λ_{13} でそれぞれ2階(WG2)および3階(WG3)を逆方向に伝搬する導波光に結合する。Corning#7059ガラスを導波コア層とし、 SiO_2 を導波路分離層とする3つのTE単一モード導波路を、グレーティングカップラと共にSi基板上に集積して、試料を作製した。グレーティングパターンは電子ビームで直接描画した。GC1およびGC2は38nm厚のSi-N層を凹凸加工して形成し、GC3は100nm厚の電子ビームレジスト凹凸をそのまま利用した。GC1、GC2およびGC3のグレーティング周期は、それぞれ602nm、492nmおよび502nmである。コア層厚は0.7 μm 、分離層厚2 μm である。グレーティングカップラの開口すなわち結合長は0.5mmとし、結合係数は 2mm^{-1} と設計した。グレーティング厚さは薄く、結合波長以外の放射光に対するGC2およびGC3の影響は非常に小さい。Ti:Al₂O₃レーザー光をWG1に励振し、WG2およびWG3に結合した導波光パワーの波長依存性を測定した。得られた実験結果をFig.7にエラーバーとともに示す。縦軸はそれぞれの中心波長の値で規格化してある。実験結果は実線で示す

Fig.6 Schematic view of the fabricated device for demonstrating wavelength-selective interconnection among three stacked waveguides.

Fig.7 Measured coupling efficiency from WG1 to WG2 or WG3 plotted against wavelength with error bars. Solid lines show calculated prediction.

計算予測に測定誤差内で一致しており、設計どおりの結合波長差5nmおよびピークの半値全幅0.5nmを示すことを確認できた²⁵⁾。

4. 今後の展開

光ファイバを用いたボード間、架間の光インタコネクションは既に実用化、商品化されており、次世代の構成として、光の並列性を利用したシステムの開発やチップ間やチップ内の光配線の実現が、現在の研究開発の対象となっている。もちろん、要素技術として、光源の一層の低消費電力化や高密度集積化、O/E素子とプロセッサとの集積化、なども重要な課題であり、光インタコネクション応用にねらいを定めた研究も多い。2次元光データ転送システムの開発は、光コンピュータに発展していく中間段階として捉えることができる。基本的にはフリースペース光学系が採用されるが、イメージファイバやホログラフィック素子などを利用することで新たな展開が期待される。一方、チップ内などのmmからcmオーダーにおける光インタコネクションとしては、サイズの問題から微小光学素子や光ファイバは使用しにくく、光基板や光導波路による構成が魅力的となる。その中でも、多階に積層した光導波路網は、格段の高密度化や高機能化を検討するための有力な候補となり得る。

グレーティングカップラを用いれば、多階に積層した複数の導波路間を選択的に接続できる。現状ではまだ原理確認の段階ではあるが、ボード内、ウェーハ内やチップ内の光インタコネクションを光導波路網で構成する可能性を議論する上で、ひとつの判断材料となろう。しかしながら、結合効率およびその波長依存特性に課題があり、そのまま適用することは難しい。今回作製したデバイスの結合効率は、設計値が25%、実験値が数%以下であった。効率が低いのは、放射モード光による光パワーの空気側や基板側への漏洩が原因である。現在、この損失を生じさせないために、積層導波路の上下に反射構造を導入することを検討中である。一方、結合効率の波長依存特性は、Fig.7のような効率ピークが尖鋭なものより、矩形の方が、動作安定性の点で望ましい。上述の反射構造を導入したものでは、この波長依存特性の改善も期待できるとの理論的見通しを得ている。チャネル化や結合状態のスイッチング、導波光励振方法などの検討が、次のステップとなる。いずれにしても、積層導波路の作製やグレーティングカップラの集積化は、確立された通常のプレーナプロセスで実現できるという利点があり、今後の進展が期待される。

参考文献

- 1) L. J. Norton, F. Carney, R. K. Denton Jr., J. Fauty, H. Geist, D. James, J. H. Knapp, S. Planer, G. Raskin, E. Reyes, J. E. Sauvageau, D. B. Schwarz, R. Stradling, and G. Westbrook: *Proc. IEEE LEOS*, San Francisco, 1997 (IEEE, Piscataway, NJ, 1997) **2**, p.189.
- 2) A. Yuen, K. Giboney, E. Wong, L. Buckman, D. Haritos, P. Rosenberg, J. Straznicki, and D. Dolfi: *Proc. IEEE LEOS*, San Francisco, 1997 (IEEE, Piscataway, NJ, 1997) **2**, p.191.
- 3) Y.-M. Wong, D. J. Muehlner, C. C. Faudskar, D. B. Buchholz, M. Fishteyn, J. L. Brandner, W. J. Parzygnat, R. A. Morgan, T. Mullally, R. E. Leinbenguth, G. D. Guth, M. W. Focht, K. G. Glogovsky, J. L. Zilko, J. V. Gates, P. J. Anthony, B. H. Tyrone, Jr., T. J. Ireland, D. H. Lewis, Jr., D. F. Smith, S. F. Nati, D. K. Lewis, D. L. Rogers, H. A. Aispain, S. M. Gowda, S. G. Walker, Y. H. Kwark, R. J. S. Bates, D. M. Kuchta, and J. D. Crow: *J. Lightwave Technology* **13** (1995) 995.
- 4) M. Usui, N. Matsuura, N. Sato, M. Nakamura, N. Tanaka, A. Ohki, M. Hikita, R. Yoshimura, K. Tateno, K. Katsura, and Y. Ando: *Proc. IEEE LEOS*, San Francisco, 1997 (IEEE, Piscataway, NJ, 1997) **1**, p.51.
- 5) R. A. Nordin, W. R. Holland, and M. A. Shahid: *J. Lightwave Technology* **13** (1995) 987.
- 6) Y. Li, T. Wang, H. Kosaka, S. Kawai, and K. Kasahara: *Appl. Opt.* **35** (1996) 6920.
- 7) 石川 正俊：第3回光インターコネクト情報処理研究会 (1998) OIP98-15.
- 8) G. Verschaffelt, R. Buczynski, P. Tuteleers, P. Vynck, V. Baukens, H. Ottevaere, C. Debaes, S. Kufner, M. Kufner, A. Hermanne, J. Genoe, D. Coppee, R. Vounckx, S. Borghs, I. Veretennicoff, and H. Thienpont: *Photon. Tech. Lett.* **10** (1998) 1629.
- 9) 三上 修：第3回光インターコネクト情報処理研究会 (1998) OIP98-12.
- 10) 小柳 光正：第3回光インターコネクト情報処理研究会 (1998) OIP98-16.
- 11) H. Yajima: *Appl. Phys. Lett.* **22** (1973) 647.
- 12) W. H. Steier, S.-S. Lee, S. Garner, A. Chen, H. Zhang, L. R. Dalton, H. Fetterman, A. Udupa, D. Bhattachaya, and Y. Shi: *Proc. IEEE LEOS*, Orland, 1998 (IEEE, Piscataway, NJ, 1998) **2**, p.3.
- 13) P. R. Berger, Y. Chen, P. Bhattacharya, J. Pamulapati, and G. C. Vezzoli: *Appl. Phys. Lett.* **52** (1988) 1125.
- 14) S. Suzuki, K. Shuto, and Y. Hibino: *Photon. Tech. Lett.* **4** (1992) 1256.
- 15) W. Sotoyama, S. Tatsuura, K. Motoyoshi, and T. Yoshimura: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** (1992) L1180.
- 16) M. Hikita, Y. Shuto, M. Amano, R. Yoshimura, S. Tomaru, and H. Kozawaguchi: *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 1161.
- 17) T. A. Tumolillo Jr. and P. R. Ashley: *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 3068.
- 18) S. Asakawa, Y. Kokubun, M. Ohyama, and T. Baba: *Electron. Lett.* **29** (1993) 1485.
- 19) S.-K. Han, R. V. Ramaswamy, and R. F. Tavlykaev: *Electron. Lett.* **31** (1995) 29.
- 20) R. C. Alferness, U. Koren, L. L. Buhl, B. I. Miller, M. G. Young, T. L. Koch, G. Raybon, and C. A. Burrus: *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 3209.
- 21) H. Sakata and H. Kawasaki: *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 1201.
- 22) Z. M. Chuang and L. A. Coldren: *Photon. Tech. Lett.* **5** (1993) 1219.
- 23) Q. Xing, 裏 升吾, 栖原 敏明, 西原 浩：電子情報通信学会論文誌 (C-I) **J80-C-I** (1997) 461.
- 24) Q. Xing, S. Ura, T. Suhara, and H. Nishihara: *Opt. Commun.* **144** (1997) 180.
- 25) S. Ura, R. Nishida, T. Suhara, and H. Nishihara: *Proc. IEEE LEOS*, Orland, 1998 (IEEE, Piscataway, NJ, 1998) **2**, p.307.
- 26) M. L. Kuhn, P. F. Heidrich, and B. A. Scott: *Appl. Phys. Lett.* **16** (1970) 525.
- 27) H. Kogelnik and T. P. Sosnowski: *Bell. Syst. Tech. J.* **49** (1970) 1602.