ボード内高速光伝送技術 (ポリマー光導波路)

荒井 進也*

On-Board High Speed Optical Transmission Technology (Polymer Waveguide)

Shinya ARAI*

* 住友ベークライト株式会社光電気複合インテグレーション事業開発推進部 (〒140-0002 東京都品川区東品川二丁目5番8号)

* COIN Business Development Dept., SUMITOMO BAKELITE CO., LTD (2-5-8, Higashi-Shinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0002)

1. はじめに

近年、スーパーコンピュータやデータセンタの高性能化は著しい。データ保存や計算リソースをネットワーク経由で利用する、いわゆるクラウド化によりデータセンタで取扱う情報量は飛躍の一途を辿る。例えば富士通のスーパーコンピュータ PRIMEHPC FX100 では1レーン当たりの伝送速度は25.78125 Gbpsであり、光伝送比率が電気伝送の比率を大きく上回るとの報告もされている¹⁾。

現在普及する光配線は、ラック間接続をする光トランシーバやアクティブ光ケーブル (Active Optical Cable, AOC) に用いられる光ファイバであるが、近年データセンタのハイパースケール化に伴い、QSFP28以降のメーカ間合意規格活動として、ボード内光インターコネクションに関する標準化推進もCOBO (Consortium for On-Board Optics)²⁾などの活動に代表される様に機運が高まり、ボード内領域の光配線化が進んでいる。

現状、これらの光配線は石英光ファイバをベースとしており、光コネクタや光モジュールの接続信頼性、並びに光モジュールの発熱など光インターコネクションに関する課題と改善策が多く報告されている^{3),4)}。本項では、今後さらに高集積化が予測されるボード内の光配線課題について、その解決手段として期待されるポリマー光導波路 (Polymer Waveguide, PWG) の採用利点、性能目標値、現状課題と改善技術を順に紹介する。

2. ポリマー光導波路を用いた高速光信号伝送

2.1 サーバラック内の光導波路配線領域

現状、サーバラック内で光配線の採用検討が行われている領域を図1に示す。光伝送距離はLSIなどのチップ間を結ぶMCM上の数mmから、チップとボードエッジを接続する数十cm程度、最大長ではボード間接続を想定した1mまでの領域が適用範囲にあると考えられている。光電変換モジュールは電気伝送距離を極力短くするために、LSI近傍に配置する検討をされる事が多く、本項では解説を割愛

適用領域/用途	PWG伝送距離	ユニット内光配線イメージ
①MCM上光配線 Optical MCM用途	～約50mm	光ファイバ 光導波路 光電変換部 光コネクタ LSI MCM ② ミッドプレーンボード
②MCM近傍- ボード端光配線 オンボード 光モジュール用途	～約200mm	LSI MCM ① ミッドプレーンボード
③ユニット内 ボード間光配線 バックプレーン 配線用途	～約1000mm	LSI MCM ②' ミッドプレーンボード バックプレーン ・光ファイバ/光導波路配線の適用検討事例を元に図示。 ・それぞれ基板上/基板内蔵両タイプを含む

図1. サーバボード内のPWG・光ファイバ適用領域と光配線距離

しているが、光ファイバを主としたオンボード光モジュールでは図1の②'に示す領域での開発がその主流である。

2.2 ポリマー光導波路の利点

PWGはポリマーの特長である柔軟性により、ボード上の実装部品が密集する領域を回避する配線が出来る。また、プリント配線板へ直接光回路を形成する使い方や、一度フィルム化した光配線を後から電気基板に貼り合わせるなど光電気複合基板としての使い方も可能である。また、光回路の特長としては、光ファイバのように並走する多芯配線に加えて、同一面層内において、湾曲配線、多分岐配線、クロス配線などが製法上容易に形成できる。また多芯配線についても、光回路間ピッチ100μmを下回る様な高密度配線が可能である。

基本的には光源、および光ファイバと相互接続して使用されることを前提としており、前述する特長から MCM および基板上、または基板内蔵配線など光ファイバでは引き回し困難な領域を補完することが期待されている⁵⁾。

2.3 ポリマー光導波路の種類と特性

PWG は光ファイバ同様にシングルモード (SM) とマルチモード (MM) 導波路の 2 種類に大別されるが、ここでは多芯伝送を前提とする MM に限定して解説を行う。

MM を細分化すると、コア内の屈折率分布が一様であるステップインデックス (SI) 型と屈折率分布が緩やかに変化するグレーデッドインデックス (GI) 型に分類される (図 2)。SI 型はコア部とクラッド部で屈折率が異なるため、その境界面にて全反射伝送する方式である。その特性から光信号のモード分散が大きく、伝送帯域も狭くなる傾向にある。

一方、GI 型は光伝搬速度が屈折率に反比例する特性を利用することで、経路の異なるモードの伝送路出力端への到達時間を近づける事ができる。このため、SI 型と比較して光伝送の高速化や長距離伝送に有効とされている。尚、図 2 に記載する散乱損失やクロストークについても、この屈折率構造の違いにより生じるがこの課題については後述する。

一般的に PWG を作製する際は、フォトリソグラフィなどプリント配線板と同様の製法でコア部形成後に周囲のクラッドを形成する工法が用いられており、SI 型構造が現在

の主流である。

3. ポリマー光導波路の光伝送性能目標値と技術課題、開発動向

3.1 光伝送性能の目標値

まず初めに、ポリマー光導波路の伝送性能目標値について紹介する。表 1 は目標とする伝送レート (単位: Gbps) について、伝送距離毎に必要な伝搬損失 (Propagation loss) (単位: dB/cm) とモーダル帯域幅 (Modal Bandwidth, MBW) (単位: GHz・m) を示したものであり、双方の性能を同時に達成することで伝送が可能となる。尚、表 1 の目標値を算出する前提としていくつか仮定をおいている。ひとつは光変調振幅基準の相対強度雑音 (RIN_OMA)⁶⁾ であり、-130 dB/Hz (25 Gbps), -135 dB/Hz (56 Gbps) としている。目標仕様の算出の詳細については、JIEP 光回路実装技術研究会発行「光回路実装ロードマップ 2016 年度版」を参照いただきたい⁷⁾。

この目標仕様案から、例えば 56 Gbps の速度で 100 cm の伝送路の実現を目指す場合、伝搬損失 0.04 dB/cm, MBW 60 GHz・m の達成がひとつの目安といった見方が出来る。

3.2 ポリマー光導波路における伝送性能課題

光ファイバ伝送においては、マルチモード光ファイバ自体が既に成熟した技術、製法であるため、光伝搬損失や MBW は少なくとも本項で議論される配線長においては議論の対象とならない。一方、ポリマー光導波路については

図 2. SI 型と GI 型の屈折率分布・モード分散の違い

表 1. マルチモードポリマー光導波路の目標仕様案

項 目		単位	VSR (Chip to Mod.) 10 cm	SR (Chip to Mod.) 30 cm	MR (Chip to Mod.) 50 cm	LR (Back plane) 100 cm
現状 (SI 型)	RIN_OMA	dB/Hz	-130			
	Propagation Loss	dB/cm	0.05@850 nm, 0.15@1,060 nm, 0.20@1,310 nm			
	Modal Bandwidth	GHz・m	8			
目標 1 25Gbps	RIN_OMA	dB/Hz	-130			
	Propagation Loss	dB/cm	0.4	0.12	0.08	0.04
	Modal Bandwidth	GHz・m	8	8	30	30
目標 2 50Gbps	RIN_OMA	dB/Hz	-135			
	Propagation Loss	dB/cm	0.4	0.15	0.09	0.04
	Modal Bandwidth	GHz・m	8	30	60	60

下記の様な課題が挙げられる。

3.2.1 光結合損失

大きく分けると、「光素子とPWG」と「PWGと光ファイバ」の2箇所の接続損失が考えられる。とりわけ後者はSI型とGI型との接続によりコア径の違いや開口数 (Numerical Aperture, NA) の差によるミスマッチが発生する上に、異なる形状、材料同士の光接続になるため、界面での反射損失やチャンネル間損失バラつきなども増加する傾向にある。これらは、光接続部におけるパターン幅の適正化やスポットサイズ変換 (Spot-Size Converter, SSC) の採用、光コネクタへの集光機能付与などが改善策として挙げられる。また、反射損失、チャンネル間バラつきの抑制にはマッチング部材などの採用などが効果的である。

3.2.2 光伝搬損失

光伝搬損失に関しては、不純物混入やボイド、コア表面荒れなど製造に依存する外的要因と、材料自身が持つ吸収、散乱損失など内的要因とに分けられる。とりわけSI型においては、屈折率境界面の仕上がりが伝搬性能の優劣に直結する。ただし図2のようにGI型のような屈折率分布を有する場合は、緩やかな屈折率変化により光が閉じ込められるため、散乱損失を抑制することに一定の効果が見込める。

吸収損失は主に電子遷移吸収と分子振動吸収があり、それぞれ光源の波長帯により影響度合いが変わるため、使用する波長に応じた材料チューニングが行われていることが多い。PWGにおいては、1,000 nm を越える長波長域における炭素-水素 (C-H) 結合による吸収影響が顕著なため、改善手段として水素の一部を重水素、またはフッ素置換して吸収波長をシフトすることで同波長帯域における吸収損失を低減する方式が提案されている⁸⁾。

3.2.3 光伝搬遅延

信号速度の高速化や光路の長さに比例して発生する。光の伝搬は、伝送路内を伝搬する経路、入射角度などにより幾つかのモードに分かれており、入射角が小さいものから0次、1次、…、N次モードと表され入射角が大きい程、遅延が大きくなる。光伝送は位相ずれにより干渉および消滅するため、MM伝送方式に限り帯域幅について議論されることになる。

表1の現状値に示される通り、SI型光導波路のMBWはおよそ8 GHz・mに留まるが、現在主に議論される25 Gbps以上の伝送速度においては30 cmを越える領域で性能不足に陥ると考えられる。

3.2.4 光クロストーク

電気信号同様に周辺配線への混信度合を指し、配線の並走距離が長く、配線間の距離が近いほど影響が強くなるとされている。しかしながら、MM光ファイバにおいては1本毎に被覆がされているため、そもそも同課題が取り上げられることは少ない。一方で、PWGにおいては、採用され

る可能性がある配線長について考察した場合、並走する伝送路長こそ最大でも1 mと短いものの、各コアの間は屈折率の異なるクラッド層で遮られるのみである。そのため、一度コアから漏れ出た光はクラッド層を直進し、隣接するコアやさらには隣接コアを通り抜けた先のコアにまで伝搬し、各コア内を伝搬する別の光信号に混信することが報告されている⁹⁾。屈折率分布構造を最適化することや、屈折率境界面の荒れの改善、または、伝送路が持つ屈折率を越えないNAの制御などが解決手段として挙げられている。

3.3 GI型光導波路における伝送性能改善効果

上記で挙げた伝送性能の目標値や想定される課題に対して、性能改善に大きく寄与する技術として、2.3項で言及したGI型構造の採用が挙げられる。現在、大学や研究機関、メーカ各社からいくつかの報告^{10),11)}がされている。課題毎に紹介していく。

3.3.1 光結合効率改善

1点目の報告¹²⁾では、コアを覆う上下および左右全周囲のクラッドに対してGI屈折率分布を形成する光導波路製法と性能についてである。コア径 $\square 45 \mu\text{m}$ 、伝送路長66.5 mmのPWGの両端にGI型ファイバ (コア径 $\phi 50 \mu\text{m}$) を接続した際に、伝搬損失を含み損失が約0.6 dBとSI型と比較して良好な結果が得られている。また、コア位置ズレによる結合損失も1 dB増加に対して約 $\pm 10 \mu\text{m}$ のトレランスが得られている。

3.3.2 光伝搬遅延改善

2点目の報告¹³⁾では、クラッド部を形成した後に特殊な熱処理を加えることにより、コアとクラッドの境界部に材料の屈折率分散を発現させることで、GI型に近い屈折率分布を実現している。この結果、MBWは1.0 m長のスパイラルパターンのPWGにおいて60 GHz・m以上の性能を達成している。

3.3.3 クロストーク改善

3点目の報告¹⁴⁾ではGI型とSI型の各光導波路における併設するコアとのクロストーク改善効果を示している。配線間ピッチ $250 \mu\text{m}$ で配置された隣接コアに対しても-40 dB以上と非常に安定したクロストーク性能が得られている。

4. 終わりに

以上、ボード内光配線における光配線長、および光伝送路であるポリマー光導波路の課題として、伝送損失 (結合損失、伝搬損失)、伝搬遅延、クロストークの3つに触れ、その要因と開発状況について紹介した。今後のマルチモードポリマー光導波路の開発指針、あるいは光導波路を採用検討される方の一助となれば幸いである。

(2017.6.6- 受理)

文 献

- 1) <http://www.fujitsu.com/downloads/JP/archive/imgjp/jhpc/primehpc/primehpc-fx100-hard-ja.pdf>
- 2) <http://cobo.azurewebsites.net/>
- 3) R. Joshua, et al.: "Extended temperature performance of 120 Gbps midboard optical engine," Proc. of SPIE, Vol. **9753**, 97530E-1
- 4) T. Uemura, et al.: "Thermal design of 28-Gb/s $\times$ 24-channel CDR-integrated VCSEL-based transceiver module," ICSJ2016, pp. 79–82
- 5) <https://annex.jsap.or.jp/photronics/kogaku/public/37-02-sougouhoukoku.pdf>
- 6) <http://kikakurui.com/c5/C5954-3-2013-01.html> 7.10. 相対強度雑音
- 7) 光回路実装技術委員会 光回路実装技術研究会：光回路実装ロードマップ 2016 年度版 “光インターコネクションの第二普及世代に向けた課題と予測,” pp. 61–71, Feb. 2017
- 8) http://www.hitachi-chem.co.jp/japanese/report/048/48_r3.pdf
- 9) https://www.jstage.jst.go.jp/article/ejisso/24/0/24_264/_pdf
- 10) B. W. Swatowski, C. M. Amb, M. G. Hyer, R. S. John, and W. K. Weidner: "Graded index silicon waveguides for high performance computing," OIC2014, pp. 133–134
- 11) K. Soma and K. Ishigure: "Fabrication of a graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using a micro dispenser for a high density optical printed circuit board," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol. **19**, No. 2, 3600310, 2013
- 12) A. Horimoto, et al., Sumitomo Bakelite: "Simple Channel Reconnection using Polynorbornene Based GI Waveguide for Optical Interconnect," ICSJ2015, pp. 118–121
- 13) N. Bamiedakis, et al., University of Cambridge: "High-bandwidth and low-loss multimode polymer waveguides and waveguide components for high-speed board-level optical interconnects," SPIE2016, Vol. **9753**, 975304-1-9
- 14) R. Kinoshita, et al.: "Polymer Optical Waveguides With GI and W-Shaped cores for High-Bandwidth-Density On-Board Interconnects," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Vol. **31**, No. 24, DECEMBER 15, 2013

著者紹介

荒井進也（あらい しんや）
住友ベークライト株式会社
光電気複合インタポーザ事業開発推進部