マルチモードポリマー光回路簡易測定評価技術

杉原 興浩*, 高山 一也*, 柴田 慎弥*, J. S. Selvan*, 戒能 俊邦*, 平野 光樹**, 牛渡 剛真**, 森本 政仁***, 八木 生剛****, 杉田 彰夫****, 松井 洋子****, 田尻 浩三****

Simple Evaluation Techniques of Polymer Optical Circuits

Okiihiro SUGIHARA*, Kazuya TAKAYAMA*, Shinya SHIBATA*, J. S. SELVAN*, Toshikuni KAINO*, Koki HIRANO**, Takami USHIWATA**, Masahito MORIMOTO**, Shogo YAGI****, Akio SUGITA****, Yoko MATSUI**** and Kozo TAJIRI****

*東北大学多元物質科学研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

**日立電線株式会社 (〒319-1414 茨城県日立市日高町5-1-1)

***古河電気工業株式会社 (〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通6)

****NTT フォトニクス研究所 (〒243-0198 神奈川県厚木市若宮森の里3-1)

*****株式会社日本触媒 (〒564-0034 大阪府吹田市西御旅町5-8)

*Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University (2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8577)

**Hitachi Cable, Ltd. (5-1-1 Hitaka-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1414)

***The Furukawa Electric Co., Ltd. (6 Yawata Kaigandori, Ichihara-shi, Chiba 290-8555)

****NTT Photonics Laboratories (3-1 Wakamiya Morinosato, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0198)

*****Nippon Shokubai Co., Ltd. (5-8 Nishiotabi, Suita-shi, Osaka 564-0034)

1. はじめに

大容量かつ高速通信への需要を満足するために光の重要性が増大している一方で、光通信・情報処理システムの経済化・低消費電力化を目指して研究開発が活発に行われている。ポリマー光導波路は、低温加工性・量産性等の利点を有し低コスト化が期待できることから、次世代FTTH¹⁾やホームネットワーク、あるいはボードレベルの光インターコネクションへ²⁾の適用を目指した光回路が実用間近である。マルチモードポリマー光回路については、これまで多様な簡易プロセスが提案・実証されてきており、低コスト化に貢献してきている³⁾。

一方、材料およびプロセスの多様性から、実際に作製した光導波路の性能測定評価についても簡便迅速に行う必要があるが、これまで簡易測定評価に関しての検討は行われておらず、各工程で膨大な評価時間を要しているのが現状である。

筆者らは、NEDO/METI「次世代FTTH構築用有機部材開発プロジェクト」¹⁾において、素材・加工法・光導波路エレメント・実装の一体的な評価を可能とする簡易評価手法および評価チップの研究開発を行っている。本報では、(1)カットバック法⁴⁾の代替となる直線光導波路伝搬損失測定法の提案や、光回路の基本エレメントである直線・曲線・分岐導波路を一括かつ簡便に測定評価できるエレメント評価チップの提案、(2)伝搬損失測定からコアとクラッドの境界面の荒れを見積もる測定評価法の提案、(3)光ファイバと光導波路の結合損失測定からアライメント実装精度を見積もる測定評価法の研究開発を行ったので紹介する。

2. カットバック代替技術とエレメント評価チップ

光回路は、直線光導波路、曲線導波路、分岐導波路の基本エレメントの組み合わせで構成される。したがって、さまざまな簡易プロセス技術によって作製されたポリマー光回路については、基本構成エレメントの特性を評価することによって実際の光回路でのパフォーマンスを予測することが可能であり、デバイス設計や開発に寄与できる。そこで、直線、曲線および分岐導波路を含めた評価のための簡易評価用光導波路チップ（以下、評価チップという）について述べる。評価チップには、直線光導波路、分岐導波路、曲線導波路などの基本構造エレメントが盛り込まれ、伝搬損失、分岐特性、曲げによる損失などの材料および導波路作製プロセスに起因する各種導波路パラメータを一括して測定できることが望ましい。そこで、評価チップにおいて検討する項目としては、①直線部分のピッチ、②分岐（角度、曲げ）、③曲線（曲率半径、位置）、④光導波路コアサイズなどが挙げられる。コア径、NA⁺などのパラメータを変化させてビーム伝搬法(BPM)によるシミュレーション検討を行い、評価チップの仕様を図1に示すように決定した。評価チップの詳細構成は以下の通りである。

・直線光導波路について

(1)信頼性を確保するため、直線光導波路の全長は4cm以上とした

(2)45度カット法（後述）により切り出される導波路長の差が2cm以上とした

(3)光導波路のピッチは250 μmの整数倍とした

・分岐導波路について

図1. エlement簡易評価チップの構造

- (1) 分岐部分までの直線導波路長は5mmとした
- (2) 分岐角度は1°, 3°, 5°, 10°, 20°とした
- (3) 分岐後、2本の導波路間隔は250 μ mの整数倍となるように、曲げ部分を調整した
- (4) リファレンスとして、同じ曲げ構造をもつ導波路を分岐導波路の隣に配置した

・曲線導波路について

- (1) 曲げ開始部分までの直線光導波路長は5mmとした
 - (2) 曲げ半径は1mm, 2mm, 3mm, 5mm, 10mmとし、2回の曲げを含むようにした
 - (3) 導波路間隔は250 μ mの整数倍になるように配置した
- これにより、伝搬損失測定を可能とし、また曲線・分岐構造の基本構造を評価し、NAに応じた光導波路エレメント損失を一体的に評価可能とすることができる。

前述の評価チップデザインを用い、基本構成エレメントである直線、分岐、および曲線光導波路の評価を行った。評価チップは直接露光法を用いて作製し、コア径70 μ m, NA0.39である。光導波路の伝搬損失値は、光導波路評価で最も重要な値の1つとして位置づけられるが、従来は直線導波路をカットバック法により測定することで評価されていた。しかし、導波路長を変化させるためのダイシングに多くの時間を費やす必要があることから、長時間の測定となり、光回路開発サイクルの短縮におけるボトルネックとなっている。ここでは、新たな伝搬損失簡易測定法として、評価チップのように光導波路アレイを斜めにカットすることにより、各々のアレイの導波路長を変化させることによって、カットバック法と同等の測定ができる「45度カット法」を提案し、その適用可能性および優位性を比較検討した。光源はLED(850nm)、入力ファイバは50 μ m GI、出力ファイバは200 μ m PCF⁺である。また、比較のために同一のサンプルを用いてカットバック法による評価も行った。図2にその測定結果を示す。伝搬損失値は、45度カット法において0.08 dB/cm、カットバック法において

図2. 45°カット法およびカットバック法での伝搬損失測定結果

0.09 dB/cm と算出された。

この結果から、45度カット法がカットバック法と誤差範囲内で同じ伝搬損失であることが示された。カットバック法では数回のダイシングと調芯が必要であるが、提案した45度カット法では1回のダイシングで良いため、測定時間を1/5に短縮できる。したがって、45度カット法がカットバック法代替の伝搬損失測定法として有用に資することが示された。

また、分岐導波路の測定結果を表1に示す。入力系として、LED(850nm)およびLD(850nm)出射光を50GIファイバを介して励振した。表1の結果から、分岐角が大きくなるに従って過剰損が増大する傾向になることがわかる。また位置ずれ許容範囲の評価結果も表1に示す。良好な分岐比の閾値として49.5~50.5を仮定した場合、LED光源では約40 μ mという広い軸ずれ許容範囲をもつ。LED光源を用いることにより、大きな許容度や測定の安定性が向上したことが明らかとなった。以上のごとく、評価チップを作製し測定評価することにより、実際の光回路の短時間での仕様決定に有効である。

マルチモード光導波路の測定評価を行う際、特に入力条件すなわちモード分布⁺やその干渉によって測定結果に一貫性が見られず、信頼性に欠けやすいという問題を抱えている。例えば低次モード励振入力では、コアとクラッドの境界面の粗さ情報を含まない低伝搬損失となりやすいという結果⁴⁾が得られている。したがって、標準化され統一した条件下で測定評価を行うことが望ましい。次世代FTTHプロジェクトにおいても、マルチモード光導波路の測定評価に統一性を与えるための入出力条件を検討しており、ここでは特にモード分布について概説する。

入力光源として、LEDを用い、界分布が光導波路のものよりわずかに小さいコア径のGIガラスファイバを用いて光導波路に入力する。光源と入力光ファイバの間に、さまざまな励振モード分布を作り出すような各種ファイバ（ファイバなし、GI-POF、モードスプリッタ、シングルモード光

表1. 分岐光導波路の測定結果

入力	分岐角 (°)	挿入損失(dB) (ポート1)	挿入損失(dB) (ポート2)	過剰損失 (dB)	パワー分岐比 (%)	パワーバランス (dB)	入力許容ずれ (μm)
LED-GI50	1	3.34	3.39	0.37~0.41	50:50~49:51	0.01~0.06	$\pm 15 \sim 20$
LD-GI5		3.43	3.49	0.44~0.47	50:50~49:51	0.06~0.13	± 5
LED-GI50	3	3.54	3.55	0.47~0.81	50:50	0.01~0.08	$\pm 10 \sim 15$
LD-GI50		3.61	3.60	0.57~0.60	50:50~49:51	0.01~0.02	± 5
LED-GI50	5	3.72	3.69	0.60~0.70	50:50~49:51	0.03~0.17	± 10
LD-GI50		3.67	3.76	0.66~0.74	49:51	0.09~0.17	< 5
LED-GI50	10	5.04	5.16	2.08~2.55	50:50~49:51	0.12~0.27	$\pm 15 \sim 20$
LD-GI50		5.20	5.16	2.16~2.17	49:51	0.04~0.14	< 5
LED-GI50	20	9.81	9.83	6.53~6.82	50:50~49:51	0.02~0.13	± 15
LD-GI50		11.17	11.39	8.27~8.60	49:51	0.22~0.23	< 5

ファイバ)とその分布をスクランブルするようなSGSモードスクランブラ⁺を配置する。GIファイバからの出射光の近視野像(NFP)および遠視野像(FFP)を観測することにより、出射光のNFP, FFPは挿入した各種光ファイバの分布に依存せず、SGSモードスクランブラを挿入することにより、スクランブル効果が発揮されモード分布が平準化されることがわかった。また、入力光源としてLDやVCSELを用いる際には、モード間の干渉や相対位相制御が困難となる。したがって、測定の一貫性・統一性を保証するためには、インコヒーレント光源であるLEDを用いることが望ましい。また受光側ファイバとしては、光導波路のコア径、NAより大きい光ファイバを用いて受光するのが適当である。以上のごとく光源、モードスクランブラ、入出力ファイバの組み合わせを適切に用いること、およびその仕様について明記することにより、マルチモード光導波路測定評価法の標準化につながる事が可能である。本測定方法の標準化に関しては、現在METI「基準認証開発研究事業」において研究開発を進めている。

3. 光導波路壁面粗さ簡易評価手法

ポリマー光導波路の伝搬損失の要因の1つにコア/クラッド境界面の粗さによる散乱損失がある。多様なプロセスで作製されるマルチモードポリマー光回路は、そのプロセスによる壁面粗さが伝搬損失に与える影響を評価しておく必要がある。本研究では、図3に示すように、シングルモードファイバの入射角を変化させて(すなわち低次モードから高次モードと変化させて)励振することにより、損失から壁面粗さを見積もる簡便な方法を提案する。まず、光導波路コアの上下2壁面の荒れた数個のサンプル(コア径 $60\mu\text{m}$, NA0.28, 平均粗さRa: 20, 35, 70, 130 nm)を作製する。あらかじめ所望の粗さを有する平板からの転写法を用いて、下部コア/クラッド, 上部コア/クラッドの境界面粗さが制御されたスラブ型光導波路を作製し、次に側面をダイシングソーで滑らかにカットして溝を形成した後、溝にクラッド材を充填してチャネル型光導波路サンプルとした。サンプルにシングルモードファイバの入射角度を 0° ,

図3. シングルモードファイバ斜め入射法の概要図

図4. 損失と壁面粗さの関係のグラフ

3° , 5° と変化させて損失を測定したグラフを図4に示す。また、2次元BPMを用いて粗さデータを入力させた場合のシミュレーション結果も同図に示す。損失実測値と粗さデータを用いたシミュレーション値はほぼ一致し、この損失-粗さの関係のグラフをマスターカーブとして用いることにより、損失値から壁面粗さを簡便に評価することが可能となる。また、出力FFPを観測することにより、粗さが大きい導波路ほどFFPが低角側に寄っており、高次モード光が粗さに敏感で損失増大となっていることが明らかとなった⁵⁾。

4. パッシブアライメント簡易実装評価手法

ポリマー光回路の低コスト化を測るためには、ファイバガイドV溝やコネクタなどパッシブアライメント簡易実装が必要不可欠である。簡易実装においては、入射および受光ファイバの調芯など煩雑なプロセスを省く代わりに、結合にかかる部品の加工精度や位置合わせの高さとその簡単な評価が要求される。本研究では、ポリマー光回路パッシ

図5. アライメント実装精度を評価する画像認識法の工程概要

ブアライメントの位置ずれから結合損失増加を簡易評価する方法を開発する。

実装時における挿入損失低減のためには、パッシブアライメントにおける導波路とファイバとの位置ズレを小さくする必要がある。したがって、パッシブアライメントにおける接続損失を簡便に評価するには、導波路チップとファイバレイの作製精度を評価し、導波路とファイバとの位置ズレ量と接続損失の関係性から評価することが望ましい。そこで、POF（LUCINA、コア径120 μ m GI）と光導波路の位置ズレ量と接続損失との関係性を求める実験を行った。

実測とシミュレーションの両面から検討した。図5にその概要図を示す。用いた光導波路アレイは、コアサイズ90 μ m、長さ3cm、NA0.22であり、画像認識用マーカを備えている。入射ファイバ、受光ファイバにはPOFを用いた。光源には850nm LEDを用いた。シミュレーション条件として、入出力ファイバにはPOFの屈折率分布を用いた。ファイバ→導波路の入力系において、両者コアの位置ズレ量と接続損失の関係をシミュレーションし、またアクティブアライメント測定によって検証を行い、図6のようなマスターカーブを作成した。次にコネクタを用いたパッシブアライメント実装による接続損失の増加分を評価した。コネクタの形状は、ファイバガイド穴構造と導波路チップ差し込み溝構造により、位置ズレを引き起こす自由度の少ない構造を採用した（図5中にその構造を示す）。CCDを用いた画像認識により、ファイバコアと光導波路コアの位置ズレ量を実測する。パッシブアライメント接続損失測定の結果を、マスターカーブ上にプロットする（図6）。

この結果から、コネクタによる接続損失の増加は、ファイバ位置ズレ量から予想される値に十分近く、マスターカーブと画像認識を用いることにより、位置ズレ量から接続損失増加量を評価することが可能である。今回はコネクタを用いた入力系パッシブアライメントの評価について記載したが、V溝を用いた場合の接続損失増加量評価や光導波路→光ファイバ（出力系）での接続損失増加量も、同様のマスターカーブと画像認識を用いることにより、簡便に見積もることができる。

図6. 入力系における損失増加量とコア位置ずれ量の関係のグラフ

5. おわりに

マルチモードポリマー光回路の簡易測定評価技術について、(1)カットバック法代替となる45°カット伝搬損失測定法と、光回路の基本エレメントである直線・曲線・分岐導波路を一括かつ簡便に測定評価するためのエレメント評価チップ、(2)伝搬損失測定からコア／クラッド境界面の粗さを見積もるシングルモード斜め入射測定評価法、(3)光ファイバと光導波路の結合損失測定からアライメント実装精度を測定評価する画像認識法を提案し、その簡便性について紹介した。紙面の都合上、マルチモード光導波路の測定評価に統一性を与えるための入出力条件については詳細に記述できなかったが、文献6)、7)を参照されたい。光源、モードスクランブラ、入出力ファイバの組み合わせを適切に用いることが必要であり、現在さらなるデータを取得中である。本技術を導入することにより、簡便一体的に測定評価できれば、評価時間の大幅な短縮になり、マルチモードポリマー光回路の実用化に向けての展開が期待される。

本研究を遂行するにあたり、日立電線伊藤雄三氏（現工学院大学）に壁面粗さ評価についての有益なご議論をいただいた。また本研究は、NEDO「次世代FTTH構築用有機部材開発プロジェクト」の成果である。

（2007.12.3受理）

文 献

- 1) <http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p04007.html>
- 2) R. T. Chen and C. Choi: "Optical Interconnects", Ed. S. Banerjee, Morgan & Claypool Publishers, USA, 2007
- 3) 杉原興浩: "ポリマー光回路作製技術", 化学工学, Vol. **68**, No. 8, pp. 438-441, 2004
- 4) H. Mizuno, O. Sugihara, S. Jordan, N. Okamoto, M. Ohama and T. Kaino: "Replicated Polymeric Optical Waveguide Devices with Large-Core Connectable to Plastic Optical Fiber Using Thermo-Plastic and Thermo-Curable Resins", J. Lightwave Tech., Vol. **24**, No. 2, pp. 919-926, 2006
- 5) 牛渡剛真, 他: 電子情報通信学会 2006 総合大会, C-3-6 2006
- 6) 八木生剛, 森本政仁, 柴田慎弥: "マルチモードポリマー導波路の評価方法", 信学会OPE研究会, 2006
- 7) 八木生剛, 柴田慎弥, 森本政仁: "マルチモードポリマー導波路の評価方法", エレクトロニクス実装学会第30回OPT公開研究会, 2006

† 用語解説

カットバック法: 光導波路の伝搬損失を測定・算出する方法。

導波路の損失を導波路長 L_0 からの出力パワーと, 導波路長 L に切断したあとの出力パワーの差から損失を求める方法。

NA: Numerical Aperture (開口数) の略。光ファイバでは, 臨界角 θ_c 以下の光だけが伝送できるが, 伝送可能な入射角度を表すのに, 開口数が使用される。開口数は

$$NA = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{0.5}$$

であり, コアとクラッドの屈折率によって決定される。

PCF: Plastic Clad Fiber の略。コアがガラスでクラッドがプラスチックで構成される光ファイバ。

モード分布: 光導波路あるいは光ファイバ内の特定の伝搬モードにおける界分布。

SGS モードスクランブラ: 屈折率分布形状が, ステップインデックス型(SI), グレーテッドインデックス型(GI), ステップインデックス型(SI)の3つのファイバをこの順番に接続したもので, これに光を入射することで高次のモードを励振することが可能になる。主に帯域測定用の全モード励振器として用いられる。