光表面実装向け45度ミラー付き高分子光導波路

市村 顕*, 三上 修*, 内田 禎二**, 吉村 了行***, 疋田 真***

Polymeric Optical Waveguide with 45° Mirror for Optical Surface Mount Technology

Akira ICHIMURA*, Osamu MIKAMI*, Teiji UCHIDA**, Ryoukou YOSHIMURA*** and Makoto HIKITA***

*東海大学工学部（〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117）

**東海大学開発技術研究所（〒151-0063 東京都渋谷区富ヶ谷2-28-4）

***NTT光エレクトロニクス研究所（〒319-1193 茨城県那珂郡東海村白方白根162）

*Fac.of Eng., Tokai Univ. (1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292)

**Institute of R&D, Tokai Univ. (2-28-4 Tomigaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-0063)

***Opto-Electronics Labs., NTT (162 Shirakatashirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1193)

概要 光インタコネクションなどを実現する方法として、基板に対し90度に光路変換する方法が考えられている。本稿では提案されたO-SMTの概念を基にし、基板部分である45度マイクロミラー付き光導波路について報告する。光導波路は材質PMMA、コア径 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 、比屈折率差1.2%である。この光導波路に先端が90度のV字型に加工されたダイヤモンドソーで切削加工をすることにより、45度反射面を形成した。測定の結果、挿入損失は1.5dBであり、光導波路長50mm、伝搬損失0.08dB/cmを考慮するとミラー損失は1.1dBと見積もることができる。また、この損失の原因を光線追跡により解析し、45度反射面の特性を検討した。

Abstract

Low loss optical waveguides having a 45° reflector are key of optical surface mount technology (O-SMT) which was proposed to provide a possible solution to growing serious problems in manufacturing process of opto-electronic products. We used polymeric optical waveguides for the substrate of O-SMT. The material of core was polymethyl-methacrylate (PMMA), and the core size was $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, the $\Delta=1.2\%$ multimode waveguide. The waveguides with a 45° mirror were fabricated by cutting the waveguides with a 90° V-shaped diamond saw. The insertion loss of the waveguide with 45° mirror was measured to be 1.5dB, thus the mirror loss was estimated 1.1dB at the waveguide length 50mm and the propagation loss 0.08dB/cm. Furthermore the cause of loss is investigated by Ray Tracing Method.

Key Words: Optical-Surface Mount Technology, Polymeric Optical Waveguide, 45° Micro Mirror, Total Internal Reflection, Ray Tracing Method

1. はじめに

光ファイバ通信の実用化への道が開かれて約四半世紀が経過した。この間に光エレクトロニクスの応用分野は飛躍的に広がり、その技術レベルは急速に発展している。中でも長距離の基幹伝送路は光ファイバ化が進んでおり、今後はFiber To The Home (FTTH) に見られるように一般加入者（アクセス系）向けや、民生用製品などの分野への光の需要は徐々に増大していくと考えられる。しかし、光エレクトロニクスの分野では、デバイス単体の性能ではめざましい進歩を遂げたが、デバイスやボードレベルの光の接続、いわゆる光インターコネクション¹⁾²⁾については、光特有の結合の難しさから光デバイス実装にコストがかかり、量産となると現時点での光表面実装技術では対処が難しいと予想される。そこで、現在のエレクトロニクス製品が低コスト・大量生産に成功したことを踏まえ、光エレクトロ

ニクスでもこれに対応する技術として、O-SMT^{3)~6)} (Optical Surface Mount Technology:光表面実装技術) が提案されている。本稿では、このO-SMTの概念を紹介すると共に、このO-SMTの構成要素である光プリント配線板に焦点を合わせた。すなわち、低損失な高分子光導波路を作製し、これに45度マイクロミラーを加工し、さらに45度ミラー反射特性について実験的・理論的に検討を加えた。

2. 光表面実装技術(O-SMT)の基本概念

2.1 O-SMTの基本構造

光インタコネクションは、デバイスレベル、デバイス・ボードレベル、ボードレベルなど各レベルごとに様々なアプローチが行われており、現在研究段階にある。その中でもO-SMTはエレクトロニクスの表面実装技術に対応するボードレベルの光エレクトロニクスの表面実装技術であ

る。今後の光エレクトロニクスの量産を考えた場合、光の高効率結合をクリアすると共に、生産現場での調整・組立に要する工数をできるだけ削減し、様々なニーズに即応する設計や、部品やパッケージの事前検査が可能であることが要求される。さらに、現在のエレクトロニクス実装技術をできる限り応用することが成功への足掛かりになることは間違いない。以上のことを考慮した場合O-SMTの条件としては以下のようなことが考えられる。

- (1) 部品やパッケージの検査が可能で、さらに部品点数を減らすためにも、標準化されたデバイス部と基板部の2点を主要構成部品とする。
- (2) デバイス部は、各種のOEIC (Opto-Electronic Integrated Circuit) や電子回路を組み込んだ光電子表面実装デバイス (OE-SMD: Opto-Electronic-Surface Mount Device) とする。
- (3) 基板部は光導波路と電気配線で構成された光電子プリント配線板 (OE-PWB: OE-Printed Wiring Board) とする。
- (4) OE-SMDをOE-PWBに挿入・固定するだけで光学的・電気的接続が行われて調整工数を必要としない構造とする。

上記の基本条件を満たす構成例として、図1にO-SMTの基本概念図を、また図2に詳細な断面構成図を示す。各種のOEIC、マイクロオプティックデバイスや電子回路を組み込んだOE-SMDの底面には位置決め用のガイドピンがついており、これをOE-PWBのかんごう孔に差し込むだけ

図1. O-SMTの基本構造

図2. O-SMTの断面詳細構造

で高さ方向の調整なしに、光学的、もしくは電気的にも結合される仕組みとなっている。

2.2 光電子表面実装デバイス (OE-SMD)

OE-SMDの基本パッケージとしては、外部光変調器などマイクロオプティックデバイス用のパッケージや、光送受信型のパッケージなどが考えられる。図3に、送受信型デバイスのパッケージの例を示す。光導波路を伝搬してきた光をフォトダイオード (PD) などの受光素子で光→電気変換し、パッケージに内蔵された電子回路で電気的処理を行った後に、外部の電子デバイスに接続したり、半導体レーザ (LD) によって電気→光変換を行い、再び光導波路に結合されるという構造になっている。この送受信型OE-PWBは実際に試作・研究段階にある^{7,8)}。この送受信型の問題点としては、厳しい位置合わせ精度 (数 μm オーダー)、半導体レーザと光導波路のビーム形状の差などから結合が難しいことがあげられる。これを解決するために、半導体レーザと光導波路との間にレンズを2枚使用することで高効率を実現させなければならず、これが部品点数の増加につながるなど課題も多い。そこで今後は、光導波路とほぼ同じ径を持ち、光の広がりから従来の半導体レーザより小さいために、レンズなしで光導波路との結合が可能なスポットサイズ変換付き半導体レーザ (SS-LD) を使用するのが有力だと考えられる⁹⁾。

図3. 送受信型O-SMDのパッケージの構成

図4. 光導波路への45度加工

2.3 光電子プリント配線板 (OE-PWB)

OE-PWBに要求される条件は、高性能な光導波路が作製可能であり、さらに数mmから数十cm程度の大型基板が経済的に製作可能でなければならない。また、光導波路と基板上に実装されるOE-SMDとが光学的に結合されるためには、基板に対し光導波路を平行に伝搬してきた光が、基板の平面に対し垂直方向に光路変換するような構造でなければならない。そこで、我々はこれを解決する方法として、図4のように光導波路上に傾斜45度の面を加工し、高屈折率領域から低屈折率領域に光が入射するとき生じる現象である全反射を利用し、空気の流れでの全反射で垂直方向の光路変換を行う方法を用いた。

3. 45度ミラー付き高分子導波路

3.1 高分子光導波路の作製

OE-PWBに要求される条件は、高性能な光導波路が作製可能であり、さらに大型基板が経済的に製作できることである。光導波路の基板の材料としては、石英ガラス、多成分ガラスなどが考えられるが、安価な材料で、大型基板が作製可能であり、また45度の面を作製することから加工性の良い高分子光導波路に注目した。高分子光導波路は、前述の特徴のほかに安価な光機能素子が使えなどのメリットをもつが、欠点としてはガラス材料に比べて損失が大きいことがあげられる。

そこで我々は、高分子の中でも比較的安価で、低損失な材料であるポリメチルメタクリレート¹⁰⁾ (PMMA: polymethyl methacrylate) に注目し、研究対象とすることにした。作製した光導波路のコア材質は重水素化PMMA (屈折率1.489: 波長850nm帯) であり、クラッド層の材質に紫外線硬化型エポキシ樹脂 (屈折率1.471: 波長850nm帯) を用いた¹¹⁾。コア材料に用いた重水素化PMMAは、カットバック法により波長850nm帯で0.08dB/cm¹²⁾という低損失を実現している。また、クラッド材料に用いた紫外線硬化型エポキシ樹脂は機械的強度に優れているので、コアの補強を行えるばかりでなく、曲げに強くフレキシブルな光導波路が作製可能である。

光導波路の作製過程を図5に示す。スパッタにより銅膜を形成した4インチシリコン基板上に、下部クラッド、コア、レジストの順にスパインコートにより塗布する。その後、レーザビームによりコアパターンを描画し、フォトリソグ

図5. 45度ミラー付き高分子光導波路の作成法

図6. 高分子光導波路の断面写真

ラフィと、酸素ガスによる反応性イオンエッチングを行うことによりコアリッジを加工し、残りのレジストを除去する。最後に、下部クラッドと同じ材料をスパインコートにより上部に塗布することにより、埋め込み型の高分子光導波路が完成する。図6に作製した高分子光導波路の断面写真を示す。コアの断面は $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ の大きさで、コアとクラッドの比屈折率差は1.2%のマルチモード導波路である。

3.2 45度全反射ミラー作製法

45度の反射面を加工する方法はいくつかの方法が考案されており、ドライエッチングによる方法¹³⁾、反応性イオンエッチングによる方法¹⁴⁾、レーザアブレーション法¹⁵⁾などが考えられる。我々は、より簡単かつ生産性の高い手法で高精度の加工を行う製法として、図7のように高速回転した薄いセラミックブレードを用いて光導波路を切削する

図7. 薄いセラミックブレードを用いた45度切削加工法

図8. ダイヤモンドソーを用いた45度マイクロ加工法

図9. 45度ミラーの側面写真

加工法を行ってきた¹⁰⁾。しかしこの方法では、加工面としては良好であったが、45度にブレードを固定していたために、角度精度に問題があった。そこで、新しい加工法として、図8のように先端を90度のV字型の形状をもつダイヤモンドソーを用いて光導波路に切削加工することにより、45度の全反射面を形成した。図5に示した作製過程の中で、ダイヤモンドソーによる45度ミラー作製の工程の後、塩酸でSi基板から導波路部分をはく離することにより、45度ミラー付き光導波路フィルムを作製した。

図9に加工した45度ミラー付き光導波路の側面写真を示す。45度全反射面として良好な斜面が形成されているのがわかる。この断面形状より測定したミラー面と光導波路平面とのなす角は約44度であった。

4. 45度マイクロミラー付き光導波路の特性評価

作製した45度マイクロミラー付き光導波路の測定を図10の測定系を用いて測定を行った。測定系は波長850nmの光源から出射した光を、コア径50μmのGI (Graded Index) マルチモードファイバ (MMF) を用いて、全長50mmの

図10. 45度ミラー反射光の測定系

図11. 反射光のニアフィールドパターン (NFP)

図12. 反射光のファーフIELDパターン (FFP)

45度ミラー付き光導波路に端面入射し、45度のミラーで反射した反射光を測定する仕組みとなっている。反射光のニアフィールドパターン (NFP) やファーフIELDパターン (FFP) の測定は、45度ミラー面上部に固定したNFP光学系 (対物レンズ) およびFFP光学系 (f-θレンズ) をビジコンカメラを介して観測することにより行った。

長さ50mmの45度ミラー付き光導波路の反射光のNFPを図11に示す。径 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ の正方形のコアに閉じこめられた光が45度ミラーでよく反射されていることがわかる。

また、同様の条件の反射光のFFPを図12に示す。図12(a)は光導波路の光軸と垂直方向 (x軸)、図12(b)は光導波路の光軸方向 (z軸) の規格化プロファイルである。広がり角は $1/e^2$ 全角で、x軸方向は15.4度であり、z軸は16.3度であった。x軸方向のプロファイルは、ほぼ左右対称であるが、z軸のプロファイルは非対称になっているのがわかる。この原因について後に検討を加えることにする。

次に、45度ミラーの反射損失は図13のような測定系を用いて行った。測定はNFPやFFPの測定同様波長850nmの光を、シングルモードファイバ (SMF) を用いて端面入射

図13. 45度ミラー損失測定系

図14. 反射光広がり測定

し、45度ミラーで反射した光を直径 $5.8 \times 5.8 \text{ mm}^2$ のディテクタで受けることにより行った。途中でシングルモードファイバを用いることにより、シングルモードファイバと光導波路との間に生ずる結合損失は、マッチングオイルを使用することによりほぼ無視することができる。

測定の結果、挿入損失は平均1.9dB、最良のもので1.5dBであった。この光導波路の波長850nm帯での伝搬損失は約0.08dB/cmであり、光導波路長50mm、さらにシングルモードファイバ-光導波路間の結合損失を無視できると考えると、45度ミラーでの損失は平均1.5dB、最良のもので1.1dBと推測することができる。

また、図14のように反射光をコア径200 μm のGIマルチモードファイバを垂直に立てて測定をしたところ、挿入損失は平均2.0dBであり、大口径ディテクタとはほぼ変わらない値であった。このことにより、光導波路上に表面実装するフォトダイオードの受光径は200 μm もあれば十分であり、O-SMTに適用できることを実証した。

45度ミラーでの損失の原因は様々な要因が考えられる。まず一つ目は、加工の際、ミラー面にわずかに生じてしまった加工荒れである。二つ目は、45度ミラー面において全反射条件を満足しないことによって生ずる透過光が存在することである。これらの原因をできるだけ明らかにするために理論的に解析を進めることにする。

5. 45度ミラーの反射解析

5.1 光線追跡による45度ミラーの解析

光導波路の解析法はビーム伝搬法 (Beam Propagation Method:BPM) など有名な解析法があるが、今回の場合解析対象がマルチモード光導波路であり、さらに全反射の解

図15. 光線追跡法の解析方法

図16. 光線追跡法による45度ミラー解析結果

析を行うのでBPMを適用することができない。そこで、光線追跡法を用いることにした。

光線追跡法は純粋に光を光線として幾何学的に追いかける方法である。光線追跡による解析方法としては、先に示したFFPの結果から、光導波路の光軸方向 (z軸) のプロファイルの非対称性について検討を加えるために、図15に示すように光導波路の光軸方向 (z軸) と光導波路の厚み方向 (y軸) との二次元で光線追跡を行うことにした。

図15のように、コアと下部クラッドの境界面と、45度ミラーとが交差する点をz軸の解析スタート地点とし、その地点から光導波路最大伝搬角の範囲で様々な角度で伝搬する光線を追跡する。光線が境界面にぶつかった時点で反射・透過の判定を行うと同時に、光強度も判定することにより、光線の進む方向と強度の両方を知ることができる。

実際の光導波路と同じ条件 (コア: 屈折率1.489, 厚さ40 μm , 上部クラッド: 屈折率1.471, 厚さ90 μm) で解析した結果を図16に示す。45度ミラーにおいて透過光が生じている様子がわかる。光導波路を伝搬する高次モードの光 (伝搬角の大きい光線) が、45度全反射ミラーにおいて全反射の条件を満たさずに透過することが確認された。また、光導波路の上部クラッドから空気層へ抜けるときに、わずかながら光が広がっているのは、上部クラッドと空気の屈折率の違いにより生ずる屈折の影響である。また、図12(b)に示したFFPのz軸のプロファイルが左右非対称なのは、45度ミラーに当たった光が全反射条件を満足せずに、45度ミラーを透過してしまい、反射光としてあるはずのマイナスの角度 (光導波路伝搬方向と逆方向) のプロファイルの一部が消滅してしまっているからである。

図17. 45度ミラーによる反射・透過比

5.2 光線追跡と現実の45度ミラーの検討

光線追跡による、角度に対する反射率・透過率のグラフを図17に示す。45度の理想反射面においては、反射光が約75%で透過光約25%という結果となった。以上のことから、理想反射面においても約1/4の光が透過し、ミラー損失の大きな要因となっていることがわかる。また、本実験に使用したミラー角度は約44度であることから、図16より光線追跡による反射・透過比はそれぞれ約80%、20%であった。これを実際に光導波路で測定したところ、導波路16本の平均で反射・透過比はそれぞれ約79.1%、19.9%であり、ほぼ同じ値を示した。このことから、ミラー損失の大きな要因は加工荒れによるものよりむしろ構造損失の部分が大きいということが言える。よって、今後の45度ミラー改善の課題としてはこの構造損失を減らすために何らかの工夫が必要であり、その方法としては、45度ミラーに金属の膜を蒸着する方法や、コアやクラッド全体の屈折率を上げることで臨界角を小さくすることにより、全反射面での入射角の幅を広げ、損失を低減することなども考えられる。もちろん、ミラー角度の精度をあげると共に、ミラーの加工散乱の可能性もあることからブレードの材質の検討を進めていくことも重要である。

6. まとめ

今後の光表面実装を解決する方法として提案されたO-SMTの概念を紹介し、基板部分である45度マイクロミラー付き高分子光導波路についての報告を行った。光導波路はコア材料に高分子のPMMAを用い、コア径 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 、比屈折率差1.2%の埋め込み型マルチモード光導波路である。この光導波路に先端が90度の形状のダイヤモンドソーを用いて切削加工を行うことにより、45度マイクロミラー付き光導波路を作製した。測定の結果、平均挿入損失1.9dB最良のもので1.5dBであった。光導波路長50mm、伝搬損失0.08dB/cmであることから、平均ミラー損失1.5dB、最良のもので1.1dBと推測される。また、光線追跡法により45度ミラーの特性を明らかにし、ミラー損失の主な原因が構造損失であることを突き止め、ダイヤモンドソーによる切削加工法は45度ミラーを作製する方法として有力であ

ることを示した。

謝 辞

本研究に関し、ご協力いただきましたNTT光エレクトロニクス研究所の今村三郎主幹研究員、都丸暁主幹研究員に感謝いたします。また、実験を進めるにあたり協力していただいた寺内浩二君（現在、住友電工通信エンジニアリング勤務）、佐藤隆志君に感謝いたします。

(1997.7.23-受理 1997.11.13-再受理)

文 献

- 1) J.Bristow et al: "Cost Effective Optoelectronic Packaging for Multichip Module and Backplanes Kevel Optical Interconnects" in Proc. of SPIE, Vol.2400, pp.61-73, 1995.
- 2) 和田 修, 他: "光インターコネクション", 応用物理, Vol.62, No.1, p.2, 1993
- 3) T.Uchida, et al: "Optical Surface Mount Technology", IOOC' 91, p. 413, WeB6-2, Paris, Sept., 1991.
- 4) T.Uchida, et al: "Optical Surface Mount Technology", Jpn. Appl. Phys, Vol. 31, No.5B, p.1652, 1992.
- 5) 三上 修, 内田 禎二: "光実装技術の展望", 電子情報通信学会, 技術報告, EMD95-24, CPM95-50, OPE95-47, pp.1-6, 1995.
- 6) 内田 禎二, 三上 修: "光表面実装技術 (O-SMT)", 回路実装学会誌, Vol.10, No. 5, p.346, 1995.
- 7) 畑田 創, 三上 修, 内田 禎二: "送受信型光表面実装デバイス", 応用物理学会秋季, 28a-SQ-28, 1995.
- 8) 畑田 創, 三上 修, 内田 禎二: "送受信型光表面実装デバイス", 応用物理学会春季, 28a-D-11, 1996.
- 9) 杉江利彦, 他: "Butt-joint 型選択成長スポットサイズ変換付き $1.3 \mu\text{mLD}$ ", 電子情報通信学会総合大会, SC-4-5, 1995
- 10) 吉村了行, 他: "平板型ポリマ光波回路", 電子情報通信学会春季大会, No.5, SC8-3, 1994.
- 11) 吉村了行, 他: "平板型ポリマ光波回路", 電子情報通信学会春季大会, No.5, SC8-3, 1994.
- 12) 金子明正, 他: "ポリマーフレキシブル導波路", 電子情報通信学会, 技術報告, EMD96-35, CPM96-58, OPE96-57, LQE96-59, pp.67-71, 1996.
- 13) H.Takahara, et al: "Optical Waveguide Interconnections for Opto-electronics Multichip Modules", in Proc. SPIE, Vol.1849, Opto-electronic Interconnects, pp.70-78, 1993.
- 14) 各務 学, 他: "高分子導波路と面内/面外分岐回路", 第18回光波センシング技術研究会, LST18-15, 1996.
- 15) B.L.Booth: "Polymers for Integrated Optics Waveguides", in Polymers for Electric and Photonic Applications, C.P.Wong, Ed., NewYork: Academic, 1993, pp.549-599.
- 16) 内田 禎二, 他: "光表面実装用ガラス基板の低損失マイクロ加工", 1994年電子情報通信学会春季大会, C-328.