エキシマレーザ加工により高分子光導波路に形成された 45度マイクロミラー

塩田 剛史*, 鈴木 健司*

45 Degree Micro-Mirror Formed Using Excimer Laser Processing for Polymeric Waveguide

Tsuyoshi SHIODA* and Kenji SUZUKI*

*三井化学株式会社機能材料研究所 (〒299-0265 千葉県袖ヶ浦市長浦 580-32)

*Functional Materials Laboratory, Mitsui Chemicals, Inc. (580-32 Nagaura, Sodegaura-shi, Chiba 299-0265)

概要 光電気混載板の任意の光導波路コアから光入出力を可能とするマイクロミラーの形成方法を開発した。ポリイミド光導波路に対して斜めにKrFエキシマレーザを照射させることにより、45度マイクロミラーが ± 1 度の精度で形成できた。加工したマイクロミラーは平面ミラーではなく、コアの幅方向に対して凹面ミラーとなっていた。これは、集光効果があるために、90度光路変換を伴う光結合において、非常に有利であることがわかった。得られたマイクロミラーの反射損失は約0.6dBであり、実用レベルであることが示された。

Abstract

A micro-mirror formed using excimer laser processing for a fluorinated polyimide waveguide film is demonstrated. The tilted excimer laser irradiation to the waveguide core formed a micro-mirror with an angle of 45 ± 1 degree. The micro-mirror had a cylindrical shape and exhibited a lens effect as a concave mirror. The micro-mirror exhibited a low reflection loss of approximately 0.6 dB at a wavelength of 850 nm.

Key Words: Fluorinated Polyimide Waveguide Film, Board Level Optical Interconnection, Excimer Laser, Micro-Mirror, Concave Mirror, Silica Substrate, Polyimide Substrate

1. 緒 論

CPUなど電子LSIにおけるギガビット毎秒を越える高速・大容量化の時代の到来と共に、電気配線におけるノイズ、クロストーク、電磁輻射、帯域制限などの問題がボード内にまで浮き彫りとなって来ている。この問題を解決する1つの方法として、光配線（光導波路）の導入があげられる。これを実現する基板として、光配線と電気配線が積層構造となっている「光電気混載板」が検討されている^{1)~3)}。光配線も電気配線同様に扱い、光を意識しないで高速・大容量伝送を可能にできる基板として期待されている。一方で、1,2箇所など比較的少ない光入出力箇所数の場合、光電気混載板は用いず、光ファイバや光導波路を電気配線基板とは別に、ジャンパー線のように光配線を簡単に実現する方法が提案されてきている^{4),5)}。光電気混載板は、光導波路を用いるため、単なる直線の光配線だけでなく、基板内の自由な配線引き回しや光合分波・光スイッチなどの機能回路形成が可能などが魅力の1つである。以上のような状況を鑑みると、光電気混載板は、基板内のあらゆる場所に実装される多くの素子を光配線で結ぶことができる基板である必要がある。このような光電気混載板を実用化するときの最大の課題は安価な光入出力方法、言

い換えると、光素子と光配線間の光結合方法の開発である。受発光素子には、アレイ化が容易、安価などの理由から、面型素子が用いられようとしている。光電気混載板の場合、受発光素子の光軸と光配線の光軸は90度方向が異なる。よって、光結合するためには90度光路変換をする必要がある。この光路変換する手法の1つとして、マイクロミラーを用いる方法が幅広く検討されている。光電気混載板への適用を考えた場合、マイクロミラー加工技術に要求されることとして、以下のことが考えられる。

- ・光導波路アレイの中から、必要な光導波路コアのみマイクロミラー形成可能
- ・さまざまな面内方向への形成に対応可能
- ・基板の表裏両側に光入出力が可能
- ・埋め込み型の光電気混載基板および光配線の多層化に対応可能

現状、マイクロミラー加工法として最も一般的な手法は、ダイシングソーによる加工である⁶⁾。ダイシング加工のみで簡単に平滑な45度マイクロミラー面を形成できるため、経済性に優れているなどの理由で幅広く検討されている。しかしながら、この手法では、光入出力の不必要なコアも切断してしまうなどの理由から、先にあげた要求に対応させるのは非常に困難である。一方、東海大などでは“光ビ

ン”を用いた方式の提案がなされている^{7),8)}。光入出力部に穴を明け、そこに光路変換用マイクロミラー付きの短尺光ファイバを挿入する手法である。しかしながら、ミクロンオーダの長さ精度で光ファイバを加工する必要がある、また、1~数ミリ長の光ピンをハンドリングしなければならないなどクリアすべき課題はまだ残っているのが現状であった。

本研究において、光電気混載板の任意の光導波路コアから光入出力を可能とするマイクロミラーの形成法を開発した。ポリイミド光導波路に対して斜めにKrFエキシマレーザを照射させることにより、45度マイクロミラーが ± 1 度の精度で形成できた。得られたマイクロミラーの反射損失は約0.6dBであり、実用レベルであることが示された。

2. エキシマレーザ加工によるマイクロミラー形成

Fig. 1に加工の概念図を示す。エキシマレーザを光導波路に対して斜めから照射させ、角穴加工をすることで、45度マイクロミラー形成を行う。この加工方法は、さまざまなタイプの光電気混載板に対応できると考えられる。その適用構造例をFig. 2に示す。(a)は光導波路を基板表面に貼り合わせたタイプ、(b)は光導波路を基板裏面に貼り合わせたタイプ、(c)は光導波路が基板内に埋め込まれており、マイクロミラーが内蔵されているタイプ、(d)は(c)同様埋め込みタイプで、マイクロミラー（光ピン）を挿入したタイプである。Fig. 2に示したように、さまざまな方向からエキシマレーザを照射させることにより、さまざまな光入出力に対応できることがわかる。特に、(d)の場合、次のような利点が考えられる。ミクロンオーダの位置精度でマイクロミラーを加工した“光導波路型光ピン”をあらかじめ長めに作成しておく。受発光素子と光結合する端面に対してミラー面の位置精度はレーザ加工精度で決まるために実用可能なレベルが簡単に達成できると考えられる。受発光素子と“光導波路型光ピン”の光結合・接着固定、穴への挿入、はんだ実装後、光伝送しない不要な光導波路部をハサミなどでカットすることができる。このように、ハンドリングが非常に簡便である。また、光素子と“光導波路型光ピン”間の光結合方法はわれわれが過去に報告したパッシブアライメント法⁹⁾を用いることで安価に実現可能である。光導波路層が多層になった場合、レーザ加工位置を変えるだけで各層への光入出力が可能となる。以上のように開発したマイクロミラー付き光導波路は“光ピン”としても非常に有望であると考えられる。

マイクロミラーを形成する光導波路には、われわれの開発したはく離層法と呼ぶ成形方法により作製したフッ素化ポリイミド光導波路フィルムを用いた⁹⁾。フィルムの厚みは、コア部付近で約90 μm であった。コアサイズは幅40 μm 、高さ約25 μm 、比屈折率差は1.1%とした。

本研究で用いたKrFエキシマレーザ（波長248nm）加工

Fig. 1 The schematic diagram of formation of a 45 degree micro-mirror using the tilted excimer laser irradiation to a waveguide. The broken arrows represent the optical path in the waveguide

Fig. 2 Optical and electrical circuit boards with micro-mirrors formed using the excimer laser processing. (a) Waveguide on electrical board type. (b) Waveguide under electrical board type. (c) Waveguide with micro-mirrors embedded into electrical board type. (d) “Optical waveguide pin” type. The broken arrows represent the optical path in the waveguide

Fig. 3 The schematic diagram of formation of the 45 degree micro-mirror using the tilted excimer laser irradiation to the waveguide. The optical system for excimer laser irradiation with a mask projection method

には、Fig. 3に示したような、縮小光学系・マスク投影法を用いた。マスク投影法であるために、マスクを交換するのみで、さまざまな加工に対応できる。それだけでなく、マスクと光導波路をコンタクトさせた方式では難しい凹凸のある光導波路への加工や、光電気混載板の中間光配線層への加工であっても、精度の高い加工が可能である。さらに、縮小光学系のために、マスクパターンサイズは加工サイズよりも大きい。よって、安価なマスクで微細かつ高精度な加工が可能となる。

Fig. 3に示したように、加工する光導波路フィルムを保持基板上にワックスで貼り付けた。このとき、基板には石

Fig. 4 The photographs of the micro-mirrors formed using the excimer laser irradiation. (a) View from upper side. (b) Cross-section of the micro-mirror. (c) Cross-section of the waveguide

英ガラス基板とポリイミド基板を用いた。エキシマレーザ加工装置の縮小像位置にかつ45度前後の入射角度になるようにセットした。本研究において、マスク縮小像の大きさは $200 \times 200 \mu\text{m}$ とした。照射条件は、光導波路への照射エネルギー $0.4 \text{ mJ}/\text{パルス}$ 、繰り返し周波数 $200 \text{ パルス}/\text{秒}$ で2秒間とした。加工後の加工面の処理は行わなかった。

Fig. 4に形成したマイクロミラーの写真を示す。照射角度52度のときの形成されたマイクロミラーの上面からの写真、および断面写真である。また、Fig. 4(c)に用いた光導波路の断面写真も挿入した。光導波路コアごとにマイクロミラーが形成できていることがわかる。ここで、上面からの観察写真において、マイクロミラーの形状に見られる凹凸形状は、光導波路断面形状 (Fig. 4(c)参照) における上側クラッドの凹、下側クラッドの凸をそのまま反映している。マイクロミラー面の平均粗さをレーザ顕微鏡 (キーエンス社 VK-9500) にて測定したところ、 α 面で約 $0.1 \mu\text{m}$ 、 β 面で約 $0.2 \mu\text{m}$ であり、比較的平滑な面が形成できていることがわかった。

3. マイクロミラー角度のエキシマレーザ照射角度依存性

Fig. 5に、形成したマイクロミラー角度のエキシマレーザ入射角度依存性を示した。Fig. 5より、 α 面を45度マイクロミラーとして用いる場合には、入射角度 θ は39度、 β 面をマイクロミラーとして用いる場合、入射角度は石英ガラス基板のとき52度、ポリイミド基板のとき48度にすることにより、簡単に45度マイクロミラーが形成できることが確認できた。また、200回マイクロミラーを形成したところ、角度ばらつきは ± 1 度 (3σ) であり、高精度加工であることがわかった。

Fig. 5中の α 面と β 面とではマイクロミラー角度 ϕ_α 、 ϕ_β が、石英ガラス基板の場合、12度差が生じた。石英ガラス基板上の光導波路に垂直方向 ($\theta=0$ 度) からエキシマレー

Fig. 5 Micro-mirror angle ϕ as a function of incident angle θ of excimer laser. ϕ_α and ϕ_β are the mirror angles for α -plane and β -plane, respectively, as shown in the schematic diagram. The open circles and the open squares represent those for a silica substrate. The open triangles and the open diamonds represent the data for a polyimide substrate

ザを照射させたとき、入射側の穴径が大きくなるように片側約6度のテーパが存在した。このテーパがそのままマイクロミラーの角度差に反映していると考えた。

また、Fig. 5からわかるように、 ϕ_β の値は基板がポリイミドの方が、石英ガラスよりも約3度小さかった。エキシマレーザ照射角度52度で加工した穴のエキシマレーザ照射側と基板側との穴径を比較したところ、両方の基板とも照射側の穴径はほぼ同じであった。基板側の穴径はポリイミド基板の方が約 $5 \mu\text{m}$ 大きくなっていた。これらの現象を、エキシマレーザ照射中の光導波路の熱膨張という観点から以下のように考えた。エキシマレーザ照射中、照射部は高温になり、加工部付近の光導波路は穴をふさぐ方向に熱膨張する。このとき、基板のポリイミドは石英ガラスよりも熱伝導率が一桁小さいため、ポリイミド基板の方が、基板付近での熱膨張が石英ガラス基板の場合と比べて大きいことが考えられる。よって、ポリイミド基板の方が、基板付近の光導波路は熱膨張分余計にレーザ加工され、結果としてFig. 5のように角度 ϕ_β が小さくなったと考えた。この考えからすると、 ϕ_α 値にも差が生じるはずである。しかしながら、 α 面のマイクロミラー角度 ϕ_α にはほとんど基板による影響はなかった。 α 面の方が β 面よりも構造上、放熱しやすいこと、また、加工中生じるスミアを低減するために、照射中 α 面に向けて酸素ガスを吹き付けていたことから、エキシマレーザ加工部表面付近の温度は基板の影響をそれほど受けなかったと思われる。エキシマレーザ加工における樹脂の挙動を定量的に理解するには、照射中の応力分布

Fig. 6 The micro-mirror observed by a laser microscope. The right bottom figure shows the shape and roughness of the micro-mirror along the arrow. This cylindrical (convex) shape indicates that the mirror has a function as a concave one

も考慮した詳細な熱伝導シミュレーションが必要となる。これについては現在検討中である。

4. マイクロミラー面の形状解析

保持基板を石英ガラス、エキシマレーザ入射角度52度として加工したマイクロミラー面(β面)のレーザ顕微鏡写真をFig. 6に示す。またFig. 6の右下にマイクロミラー面のコア部付近、横方向の形状(白矢印部)の測定結果を示した。右下図から、マイクロミラー面が凸形状を有していることがわかった。曲率半径は約580 μmであった。凸形状を有しているということは、このマイクロミラーは凹面ミラーとして機能することが期待できる。凹面ミラーとしての光学的な検証結果については次節で述べる。われわれのポリイミド光導波路コア位置のクラッド層は上側が凹、下側が凸の断面形状を有している(Fig. 4(c)参照)。これは、ポリイミドの前駆体であるポリアミド酸溶液が約80重量%以上溶剤を含んでいるために必然的に生じる形状である⁹⁾。光導波路クラッドの凸側からエキシマレーザを照射したところ、凸形状のマイクロミラーが得られた。ここで、同じポリイミド光導波路フィルムの表面がフラットな面(コアのない箇所)に、同様にエキシマレーザ加工を施したところ、加工面のレンズ形状は観測されず、平面であった。したがって、光導波路クラッドの凸形状がマイクロミラーのレンズ形状形成に寄与していると考えた。そこで、入射角度を52度固定とし、光導波路クラッドの凸形状と形成されるマイクロミラー面の曲率半径との相関について調べた。ここでいうマイクロミラーの曲率半径および光導波路クラッドの曲率半径とは、Fig. 6右下の図のようにレーザ顕

Fig. 7 The radius of curvature of the micro-mirror as a function of that of the cladding of the waveguide. The open circles and the open triangle represent those for excimer laser irradiation from the cylindrical (convex) cladding of the waveguide on a silica and a polyimide substrates, respectively. The open square represents that for excimer laser irradiation from the concave cladding of the waveguide on a silica substrate

微鏡によって観測した凸形状に対して内接させるようにフィッティングさせた円の半径のことである。Fig. 7に測定結果を示す(○プロット)。Fig. 7から、マイクロミラーの曲率半径は光導波路クラッドの凸形状の曲率半径に比例していることがわかった。また、光導波路クラッドの凹み側からエキシマレーザを入射させると、マイクロミラー面も同じ比例関係で凹面(凸面ミラー)が形成されることが観測された(□プロット)。一方、ポリイミド基板を用いた場合、レンズ形状の曲率半径は約3倍上昇した(△プロット)。また、石英ガラス基板を用いた場合とポリイミド基板を用いた場合の穴径の大きさはポリイミド基板の方が、ほぼ石英ガラス基板のときに形成された凸形状分だけ大きかった。

これらの結果を、エキシマレーザ加工部の高さの差という観点から考えた。光導波路クラッドの凸側からエキシマレーザを照射するとき、凸形状の上部側と下部側では加工部高さに差がある。すでに加工された下部側は遅れてきた上部側の加工による発熱によって加工済の箇所が再度熱膨張する。この下部側の熱膨張分が余計に加工され、結果として光導波路クラッドの凸形状に相関したレンズ形状が形成されたと考えた。ポリイミド基板を用いた場合、加工中の放熱が悪く、加工穴付近の温度は石英ガラスのときに比べて高い、また、角穴において角より真ん中付近の方が温度は高いということが考えられる。よって、石英ガラス基板のときに得られた凸形状も加工され、大きな曲率半径となったと考えた。

以上、エキシマレーザ加工によって形成されたマイクロミラーは凹面ミラー形状になっていることを示した。その曲率半径は光導波路クラッドの曲率半径および保持基板の

種類によって制御できることがわかった。

5. マイクロミラーの光学的評価

前節で述べたマイクロミラーのレンズ効果の光学的検証および反射損失の測定を行った。まず、前者について以下に述べる。マイクロミラーが形成された光導波路パターンに、他端から波長850 nmの光を光ファイバ（コア径10 μm ）を介して、突き当て光結合により導入した。マイクロミラー面（ β 面）での反射光を上部よりCCDカメラにより観察した。光導波路クラッドに形成されている凸形状（Fig. 4(c)参照）もレンズ効果を発現してしまう。マイクロミラーのレンズ効果のみを観察するために、凸状側の光導波路クラッドの上面にクラッドとほぼ同じ屈折率を持つマッチングオイルでカバーガラスを貼り付けた。これにより、Fig. 4(c)の下側の光導波路クラッドがフラットであると同等に扱える。観察系および観察結果をFig. 8に示す。Fig. 8中z軸方向にCCDカメラの焦点をずらして反射スポットを観察した。光導波路クラッドに近接した位置では、光導波路コア断面の凹み（Fig. 4(c)参照）を反映した反射スポットが観測された。 $+z$ 軸方向に焦点をずらすと、先のコア断面の凹みを反映した反射スポットと比較して、凸形状になっているミラーの方向（Fig. 8中x軸方向）の光がy軸方向の光に比べて広がりが抑えられたスポットとなった。さらに $+z$ 軸方向にカメラの焦点を離すと急激にx軸方向の光は広がり、円形状に近いスポットとなった。図示していないが、十分離れたところの反射スポットはx軸方向に長い楕円形状となった。これらの効果は、前節で述べた凹面ミラー形状に起因すると考えられる。そこで、反射スポットをCCDカメラの代わりに、開口数0.28、コア径62.5 μm の光ファイバで受光し、先と同様に $+z$ 軸方向にずらしたときの光ファイバと光導波路間の光損失の変化を測定した。マイクロミラー面の曲率半径580 μm と約1800 μm における光損失の測定結果をFig. 9に示す。ここで、得られた光損失には反射損失を含んでいる。580 μm の方が約1800 μm と比べて短い距離で受光量が減少し始めている。この差は、開口数0.22の光導波路からの反射スポットが光ファイバのコア径よりも大きくなったために受光量が減少したということでは説明できない。レンズ面の曲率半径に依存した反射光の広がり角の差、曲率半径の差に起因する凹面ミラーの焦点位置の差を反映した結果と考えられる。このように、レンズ効果を有するマイクロミラーは光電気混載基板における受発光素子と光導波路間の光結合にとって有利である。

次に、マイクロミラーの反射損失を測定した。反射スポットを観測した光学系において、カバーガラスおよびマッチングオイルを取り除き、測定を行った。反射光はGRINレンズと開口数0.2、コア径200 μm の光ファイバを組み合わせて、開口数0.4、100 μm 径で受光した。これにより、全反射光のほぼ100%が受光できることは確認した。

Fig. 8 Three photographs of the reflected light at the micro-mirror. The deformed spots reflected the dent core cross-section of our waveguide, as shown in Fig. 4(c). The effect of the concave micro-mirror in the x-axis direction was observed

Fig. 9 Optical loss between a multimode fiber and a waveguide, including the reflection loss of the micro-mirror. To avoid the lens effect of the convex waveguide cladding, the cover glass (0.1 mm in thickness) was put on the waveguide with a matching oil. The open squares and open circles represent the data for the radii of micro-mirror curvature of 580 μm and approximately 1800 μm , respectively. The inset is a schematic diagram of the optical system for evaluating the concave micro-mirror effect

マイクロミラーの反射損失の測定結果をFig. 10に示した。光ファイバと光導波路間の光結合損失と光導波路の光伝搬損失の和は隣接するマイクロミラーなし直線光導波路を用いて求め、これをreferenceとした。Fig. 10挿入図の光学系での測定値（挿入損失）からreferenceを引くことにより、マイクロミラーの反射損失を算出した。ばらつきは若干あるものの、保持基板による差はほとんどなく、平均反射損

Fig. 10 Optical losses of micro-mirrors formed for five core patterns in an arrayed waveguide. The open circles and the open squares represent those for silica and polyimide substrates, respectively. The inset is the optical system for evaluating the reflection loss of the micro-mirror. Non reflected and scattered lights were detected by two photo-detectors (①, ②)

失は0.66 dB, 最小反射損失0.54 dBと, 低反射損失であることがわかった。ここで, 損失の原因を調べるため, Fig. 10の挿入図に示したように, 径10mmの受光素子で非全反射光および散乱光を受光した。非全反射光は主に挿入図の①の受光素子位置で観測されるはずである。測定した結果, 約0.6 dBの反射損失のうち, ①の位置では0.1 dB未満であり, ほとんどが②の受光素子位置であった。完全に非全反射光と散乱光とを分離することができないが, 反射損失の主要因は平均粗さ約0.2 μm のマイクロミラー面での散乱損失が原因と考えられる。

以上, 本研究で開発したマイクロミラーは凹面ミラーの機能も有し, 約0.6 dBの低反射損失であることから, 十分実用レベルに達している。よって, エキシマレーザを用いたマイクロミラー加工方法は光電気混載基板の実用化に向けて, 有効な技術になると考えられる。

6. まとめ

さまざまな構造の光電気混載基板の任意の光導波路コアから光入出力を可能とするマイクロミラーの形成法を開発した。ポリイミド光導波路に対して斜めにKrFエキシマレーザを照射させることにより, 45度マイクロミラーが ± 1 度の精度で形成できた。加工したマイクロミラーは平面ミラーではなく, マイクロミラーの幅方向に対して凹面ミラーとなっていた。これは, 集光効果があるために, 90度光路変換を伴う光結合において, 非常に有利であることがわかった。得られたマイクロミラーの反射損失は約0.6 dB

であり, 実用レベルであることが示された。当然のことながら, 開発したマイクロミラー加工技術は光導波路コアごとに形成可能であるだけでなく, マスク幅を広げることにより, 一括で多チャンネルの光導波路に対応できる。よって, さまざまなチャンネル数/箇所, 光入出力箇所数, マイクロミラーの向き, さらに光ピンなどにも適用可能である。したがって, 開発したマイクロミラー加工技術は光電気混載基板の実用化に向けて有効な技術になると考えられる。

(2004.4.9-受理)

文 献

- 1) 茨木 修, 熊井晃一, 岡部 豊, 市村 顕, 三川 孝: “キャビネット内光電気複合実装技術の検討”, 電子情報通信学会論文誌C, Vol. **J84-C**, No. 9, p. 727, 2001
- 2) 石井雄三, 新井芳光: “チップレベル光インターコネクションのための広いトレランス “光パンプ” インターフェース”, 電子情報通信学会論文誌C, Vol. **J84-C**, No. 9, pp. 793, 2001
- 3) 高原秀行, 石橋重喜, 石沢鈴子, 平田泰興, 小勝負信建, 恒次秀起: “OE-COF (Optoelectronic Chip on Film)実装技術の検討”, 電子情報通信学会論文誌C, Vol. **J84-C**, No. 9, p. 800, 2001
- 4) 畠山意知郎, 吉川隆士, 三好一徳, 蔵田和彦, 田中 敬, 田中英樹: “光I/O内蔵型システムLSIパッケージ”, 第17回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, p. 257, 2002
- 5) 塩田剛史, 高松信博, 鈴木健司: “光導波路フィルムを用いたボード内光インタコネクション”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **6**, No. 6, p. 481, 2003
- 6) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru and S. Imamura: “Low-Loss Polymeric Optical Waveguides with 45° Mirrors”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. **37**, No. 6B, p. 3657, 1998
- 7) 佐藤隆志, 伊藤祐一, 三上 修, 内田禎二: “光SMT向けマイクロミラー付きピンによる90度光路変換”, Optics Japan, 23p B18, 1999
- 8) B. S. Rho, J.-Y. Eo, S. Kang, H.-H. Park, T. W. Kim, Y. S. Joe and D. J. Yang: “New architecture of optical interconnection using 45 degree-ended connection rods in waveguide-embedded print circuit boards”, Proceedings of SPIE, Vol. **4997A**, 4997-12, 2003
- 9) 塩田剛史: “酸化シリコン薄膜をはく離層に用いた転写法によるフッ素化ポリイミド光導波路フィルム作製とその応用”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. **5**, No. 6, p. 574, 2002