

ポリイミドを用いた可変形ミラーの試作

松縄哲明^{*1}・板谷太郎^{*2}・Sucheta Gorwadkar^{*3}・塩谷陽則^{*4}・若木守明^{*5}・樋口哲也^{*6}

Fabrication of deformable mirror with polyimide substrate

by

Tetsuaki MATSUNAWA, Taro ITATANI, Sucheta GORWADKAR,
Harunori SHIOTANI, Moriaki WAKAKI and Tetsuya HIGUCHI

(Received on Sep. 29, 2004 & accepted on Jan. 25, 2005)

Abstract

A deformable mirror is a device for controlling the wavefront and beam shape by adjusting its surface shape. This device has been introduced into an astronomical telescope and a femtosecond laser. Conventional deformable mirrors are mechanically and thermally unstable due to their membranous structures. We fabricated a new type of deformable mirror with a polyimide substrate. Its structure is supported with aluminum rods to prevent instability. The device was fabricated by means of silicon processing and electronic packaging technology. We obtained the following performance characteristics: a maximum surface displacement of 10 μm and a minimum response time of 30 s.

Keywords: deformable mirror, laser, wavefront, polyimide

1. はじめに

現在、レーザ技術は、情報通信、医学、加工、計測などの分野で広く用いられている。今日では、固体、気体、半導体などを励起媒体とした各種レーザが開発され、それぞれの特徴を生かしたレーザ応用の実用化が進展している。しかし、これらのレーザ発振・増幅装置には、多数の光学部品が用いられているため、光学部品に起因する波面の歪みとビーム形状の変化が大きくなり、レーザ利用の再現性と均一性と安定性における障害となっている。ガウシアンビームを利用する場合、ビームの中央部のみで光軸調整を行う場合が多い。この場合には、ビームの周辺部にいくに従って、波面の歪みが大きくなる傾向があり、その状態は装置の光軸の調整状態により大きく異なる。従って、このようなレーザ光を工業分野で用いる場合、比較的波面の揃った中心部のみを切り取って利用しているのが現状である。この場合は、エネルギー利用効率が小さくなる。そこで、精密に波面を制御することが可能になれば、集光時のエネルギー利用効率の向上、収差の低減などの効果が期待できる。このため、レーザの波面制御は、光学分野において重要な認識のもとに、活発に研究開発が行われている。

波面制御に使われる要素技術の一つが、可変形ミラー (Deformable Mirror: 以下, DM) である。DM とは、波面の歪みを打ち消すように、ミラーの表面形状を変形させることのできるミラーである。現在、広く用いられている DM としては、平面状に積層圧電素子を並べてその上に薄膜ミラーを貼り付け

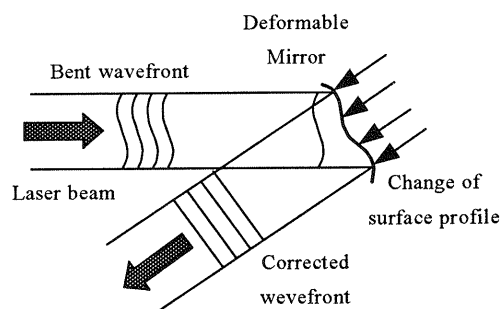


Fig.1 Wavefront control using DM

た形式のもの¹⁾、液晶光学素子を用いた空間位相変調素子^{2),3)}、静電気力を用いたメンブレン方式^{4),5)}のものが挙げられる。

DMを用いた波面補正の様子を Fig.1 に示す。波面の歪んだ入射光が、DMで反射されて波面の歪みが補正されている。

本研究では、波面制御のキーデバイスである DM を、半導体プロセスと実装プロセスを用いて試作した。ハイパワーレーザの照射を考慮すると、DMの安定な動作には、ミラーの下地基板の柔軟性と耐熱性が不可欠である。我々は、最も耐熱性の優れたポリマー材料であるポリイミドを DM に初めて導入⁶⁾し、耐熱性と動作特性の評価を行った。

2. 熱変位型 DM

ここでは、既存 DM の問題点を考えたうえで、試作した熱変位型 DM の構造と特徴について説明する。

2.1 静電気力型 DM の問題点

メンブレン方式の DM の構造を Fig.2 に示す。半導体基板の表面に多数の金属電極を配置し、その上に薄膜ミラーを設置す

*1 工学研究科光工学専攻博士課程前期
*2 産業技術総合研究所光技術研究部門
*3 産業技術総合研究所光技術研究部門
*4 産業技術総合研究所光技術研究部門
*5 工学部応用理学科教授
*6 (株) 進化システム総合研究所

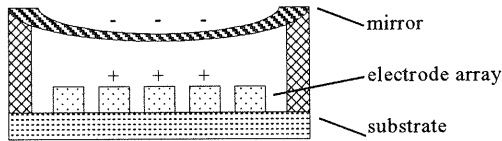


Fig.2 Cross-sectional view of DM (membrane)

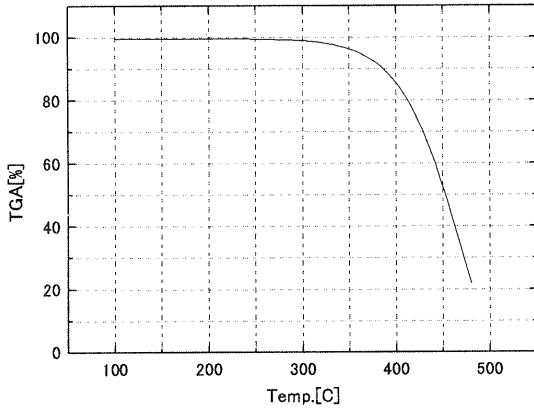


Fig.3 Thermal data-analysis

る。金属電極に電圧を加えることで静電気力を発生し、その引力によるミラーの変形を利用して波面補正を行うものである。現在最も普及しているタイプのDMである。しかし、この構造だと次のような問題点が挙げられる。第一に、静電気力を利用するため、凹の形状しか実現できず、ミラー形状の柔軟性に欠ける。次に、ミラーの周囲が縁止められているため、ミラーの周辺部は電圧を印加しても変位量が小さい。また、ミラーが薄膜構造であるため、放熱は空気への熱の伝達が主となる。しかし、光沢のある金属では反射率は高いが放射率は低く、熱放射特性が悪い。そのため、ハイパワーレーザの入射に対しては、光吸収による加熱のため、ミラーの破損に至ることがある。

本研究では、これらの問題点を解決し、機械的安定性と熱的安定性の両立が期待される熱変位型DMを試作した。

2.2 熱変位型DMの構造

DMの安定動作には、ミラーの下地基板における柔軟性と耐熱性が不可欠である。我々は、前記した問題点を解決する手段として、DMに耐熱性ポリイミドを導入した。本研究で使用したポリイミドは、型番：AIST01である。リガク社製の示差熱天秤(型式：TGA50)による窒素雰囲気中での熱分解計測を行った結果をFig.3に示す。これより、5%熱分解温度は380°Cであることがわかる。また、AIST01はシリコン基板との密着性に優れている。ダイヤモンド探針によるスクラッチ試験を行った結果⁷⁾、ポリイミド膜の剥離は観測されなかった。

試作したDMの構造をFig.4に示す。ポリイミド基板を用いたミラー、伸張部、pn接合部から成っており、pn接合部を電流加熱することにより、伸張部が伸びてミラーの形状が変化する。以上のことより、本構造では、次のような効果が期待できる。

- ・ 伸張部が独立している。また、ミラーの周囲が縁止めされていないため、下部電極間の相互関係を無視できる。
- ・ 凹凸のミラー形状を実現できる。
- ・ 伸張部の変位に対しポリイミド薄膜は弾性変形する。

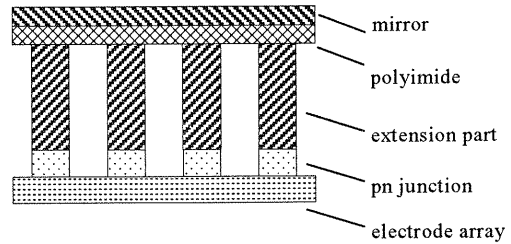


Fig.4 Cross-sectional view of DM

そのため、伸張部による可変形ミラーの変形に対して、剥離や塑性変形による形状の不可逆変化を生じない。

- ・ 伸張部の材質・形状を選択することにより、変位量の設定が可能である。

3. 熱変位型DMの試作

熱変位型DMの試作手順は、以下の4プロセスで行われる。

1. イオン注入、エッチング
2. 電極形成
3. アルミロッド実装
4. ミラー実装

1, 2項が半導体プロセス, 3, 4項が実装プロセスである。加熱部(pn接合部)は半導体プロセスによって形成し、変位量の設定を実装プロセスにより行うことが可能である。

3.1 半導体プロセス(イオン注入・エッチング)

イオン注入法によってp型のシリコン基板にAsを注入し、シリコンのpn接合を形成する。これは、半導体表面における電子とホールの再結合により熱を発生させるためのものである。実験では、基板表面もn層とするため、はじめに700keV、次に350keVと加速電圧を変えて2度イオン注入を行った。次に、注入したAsイオンの活性化、結晶欠陥の低減と結晶の均一化のためにアニールを行う。更に、pn接合の必要な部分を残すため、RIEによりシリコン基板を削り、メサ構造を形成する。実験ではSF₆を用いてエッチングを行った。メサの深さは5μmである。ここまでの工程図をFig.5-(a)に示す。

3.2 電極形成

pn接合部を電流加熱するための電極(Al:1500Å)を、メサの上部と下部に蒸着する。実験では、いずれも電子線加熱方式による真空蒸着法により形成した。リソグラフィプロセスにより、フォトリソによるパターン形成を行い、電極金属蒸着後に、リフトオフプロセスにより電極パターンの形成を行う。なお、上部電極と下部電極間の絶縁層には感光性ポリイミド(AIST01)を採用した。ポリイミドは、リソグラフィプロセスの後にキュアリング処理を施す2工程によりパターン形成を行った。一方、通常用いられるSiO₂による絶縁体のパターン形成では、スパッタリング、リソグラフィ、エッチング、アッシングと4工程必要となる。電極蒸着後の素子構成をFig.5-(b)に示す。

3.3 アルミロッド実装

伸張部には熱膨張率の大きいアルミ合金(Al-Mg系。以下、アルミ)を採用した。アルミのサイズは0.5×0.5×2mmで、

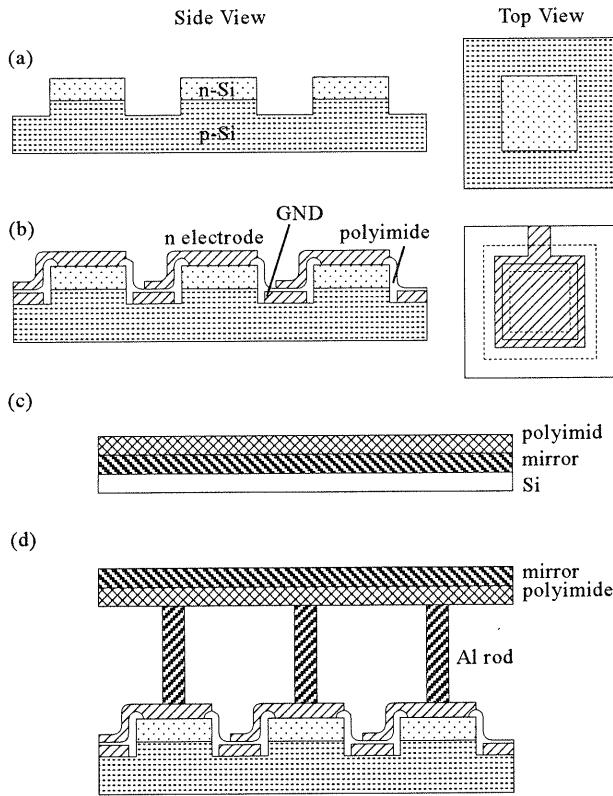


Fig.5 Fabrication processing of DM
(a)RIE processing, (b)electrode deposition
(c)formation of mirror, (d)formation of DM

ロッド形である。pn 接合部の電流加熱により発生する熱の影響で、アルミロッドが伸び縮みする。ロッドの配置には半導体素子実装で用いられるダイボンダ装置を利用し、ロッドの固定には銀ペーストを用いて、n 電極上部にロッドを接着した。アルミロッド実装後の DM 基板を Fig.6 に示す。図のように、本素子では各ダイオードのメサ構造は格子状に配列されており、その周りを取り出し電極とグランド電極接続端子が配置されている。なお、シリコン基板が実装されているチップキャリアと各電極端子との接続にはボールボンダを用いた。具体的には、直径 $20\mu\text{m}$ の金線により端子間の接続を行った。

3. 4 ミラー実装プロセス

ミラー部は、DM 基板とは別に作製する。まず、シリコン基板(厚さ約 $400\mu\text{m}$)を $150\mu\text{m}$ の厚さまで研磨する。最初の $200\mu\text{m}$ はラッピング盤により粗削りし、その後 CMP 法により鏡面研磨を行う。次に、ミラーとなる金属を蒸着する。今回は Ti/Au/Ti を蒸着した。最初の Ti は Au とシリコン基板の密着性を高めるため、次の Ti はポリイミドとの密着性向上・ミラーの機械的強度向上のためのものである。次に、ミラー金属上部にポリイミドを塗布し。これを裏返して Fig.5 に示したアルミロッド上に接着する。その後、ミラー金属上部のシリコン基板をドライエッチングによって削る。SF₆ ガスを用いた RIE によりシリコン基板を除去した。これで熱変位型 DM の完成である。ミラーの実装工程を Fig.5-(c)、5-(d)に、試作した熱変位型 DM を Fig.7 に示す。

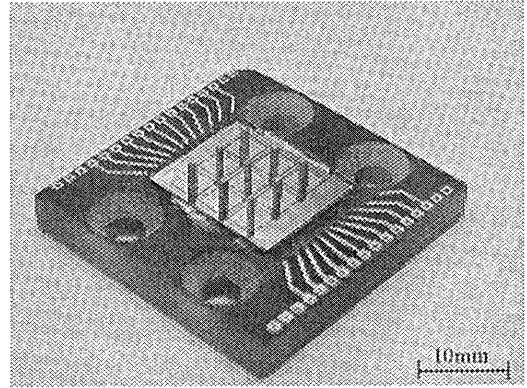


Fig.6 DM substrate after aluminum rod mounting

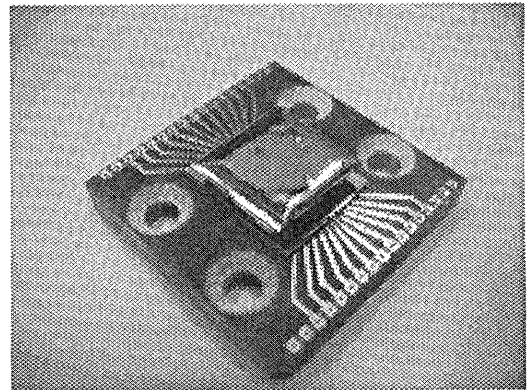


Fig.7 Fabricated DM system

4. 熱変位型 DM の評価実験及び考察

試作した DM の評価実験として、pn 接合部に電圧を印加したときのミラーの変位量を、レーザ変位計を用いて測定した。

4. 1 電流・電圧・変位量特性

一つのアルミロッドに対しての変位量をレーザ変位計によって測定し、最大 $4\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ までの所定の変位量が得られるまで電圧を印加し続け、その時の電流-電圧特性を測定した。 $4\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ のときの変位量、電流、電圧の関係をそれぞれ Fig.8、9 に示す。変位量の値が階段状となっているのは、レーザ変位計の測定精度が $1\mu\text{m}$ であることによる。いずれの場合も、電圧と電流は比例しており、変位量が電圧に対して 2 乗で増大している。これは、発熱量が電圧または電流の 2 乗に比例することから起因する。Fig.9 より、 5.0V で $10\mu\text{m}$ の変位量が実現されていることがわかる。これより、初期状態(変位量 0)から 5.0V の電圧を印加したとき、何秒で $10\mu\text{m}$ の変位が得られるかを測定した。その結果、約 30 秒で $10\mu\text{m}$ へ達した。また、変位量の最大は $13\mu\text{m}$ を実現した。

4. 2 応答時間特性

変位を確認後に電圧をオフにし、電圧オフからミラーが元の状態に戻る(変位量が 0 になる)までの時間を測定した。変位量と応答時間の関係を Fig.10 に示す。変位量が $2\mu\text{m}$ の場合の応答時間は約 10 秒であり、変位量が $4\mu\text{m}$ の場合は約 30 秒、変位量が $6\mu\text{m}$ の場合は約 40 秒、変位量が $8\mu\text{m}$ の場合は約 60 秒、変位量が $10\mu\text{m}$ の場合は約 80 秒であった。なお、これらの測定は変位量が初期値に戻ってから 10 分以上放置しているため、測

定の繰り返しによる素子温度の上昇は無視できると考えられる。

4. 3 考察

ここでは、可視光を中心とした DM の使用波長に対して十分な変位量である $10\mu\text{m}$ を考え、計算値と実験値から熱の利用効率について検討する。本研究で使用したアルミ合金の特性⁸⁾から、密度 $\rho=2.68\text{g}/\text{cm}^3$ より、比熱 $C_p=900\text{J}/\text{kgK}=2.41\text{J}/\text{Kcm}^3$ である。アルミロッドの体積 V は $50\times 10^{-5}\text{cm}^3$ であるため、1 秒当

りの温度上昇 dT を算出すると、 $dT=P/(C_pV)\approx 66\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ となる。ただし、 P は電力である。計算では、Fig.9 より基本動作の見積りのため 1V 、 80mA を代表値とし $P=0.08(\text{J}/\text{s})$ を用いた。また、アルミの線膨張率 $\alpha=\Delta L/\Delta T=23.8\times 10^{-6}$ より、 $10\mu\text{m}$ の変位を得るには約 210°C の熱が必要なことがわかる。これらの値より、 $10\mu\text{m}$ の変位を得るために必要な時間は約 3.2 秒であるといえる。しかし、実験では $10\mu\text{m}$ の変位を得るのに要した時間は、電圧印加開始より約 30 秒であった。また、アルミの熱抵抗 R_s は熱伝導率 $\kappa=138\text{W}/\text{mK}$ より求められ、 $R_s=\sigma/\kappa A=58\text{K}/\text{W}$ となる (σ : 厚さ 2mm , A : 断面積 $0.5\times 0.5\text{mm}^2$)。同様に、シリコンの熱抵抗を算出すると、 $\kappa=168\text{W}/\text{mK}$ より $R_s=0.381\text{K}/\text{W}$ ($\sigma=0.4\text{mm}$, $A=2.5\times 2.5\text{mm}^2$) が得られ、アルミより大幅に小さいことがわかる。これは、アルミと比ベシリコンは薄く、断面積が大きいためである。最大変位量 $10\mu\text{m}$ を得るのに必要な時間は理論上約 3.2 秒であるが、実際はその 10 倍の時間を要している。以上のことより、本素子はアルミロッドの熱膨張を利用した形式ではあるが、発熱の 1 割程度しか膨張には使われておらず、残り 9 割の熱は抵抗の低いシリコン基板側に伝導すると考えられる。従って、今後は、熱の利用効率の向上が必要と考えられる。

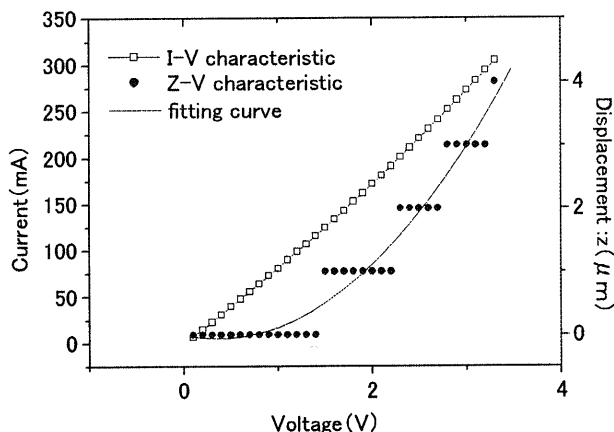


Fig.8 I-V-Z characteristic (1)

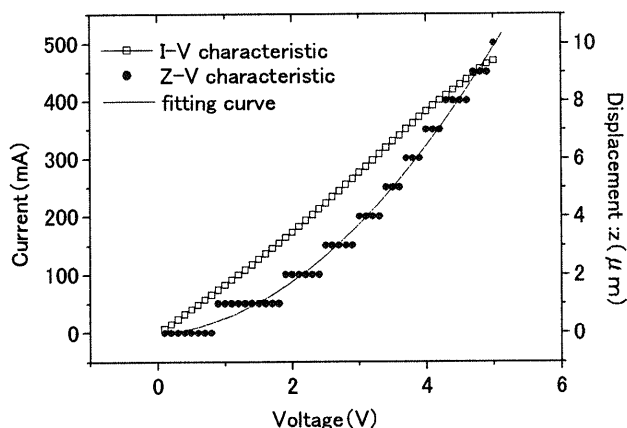


Fig.9 I-V-Z characteristic (2)

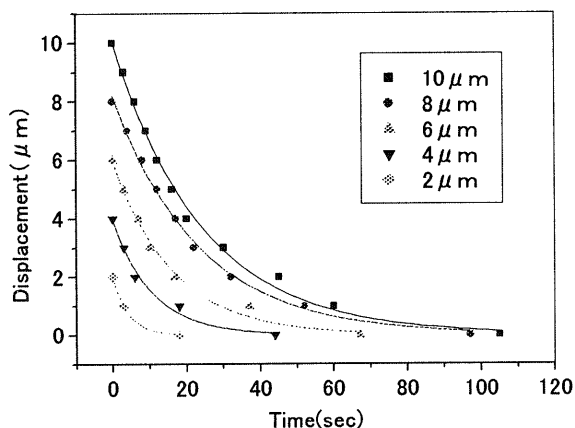


Fig.10 Displacement-response time characteristic.

5. 結論と今後の展望

半導体プロセスと実装プロセスを用いて、熱変位型可変形ミラーを試作した。ミラー基板にポリイミドを用いたため、機械的安定性と熱的安定性の両立が期待できる。また、最大変位量は $10\mu\text{m}$ 以上であり、制御の時定数は変位量 $10\mu\text{m}$ で 30 秒であった。今後は、光学特性の評価・既存 DM との比較により、耐熱性の実証と安定性の検証を行う必要がある。

本素子は、半導体プロセスと実装プロセスを用いて作製されていることから、信頼性と量産性を確保した可変形ミラーへの道を拓くものと考えられる。

参考文献

- 1) J.C.Dainty, A.V.Koryabin and A.V.Kudryashov : Low-order adaptive deformable mirror, Appl. Opt. 37, 4663 (1998).
- 2) D.Dayton, S.Sandven, J.Gonglewski, S.Browne, S.Rogers, and S.MacDermott : Adaptive optics using a liquid crystal phase modulator in conjunction with a Shack-Hartmann wave-front sensor and zonal control algorithm, Opt. Express. 1, 338 (1997).
- 3) A.F.Naumov and G.Vdovin : Multichannel liquid-crystal-based wave-front corrector with modal influence functions, Opt. Lett. 23, 1550 (1998).
- 4) M.C.Roggemann, V.M.Bright, B.M.Welsh, W.D.Cowan, and M.Lee : Micro-electro-mechanical deformable mirrors for aberration control in optical systems, Opt. Quantum Electron. 31, 451 (1999).
- 5) G.Vdovin and P.M.Sarro : Flexible mirror micromachined in silicon, Appl. Opt. 34, 2968 (1995).
- 6) 松縄哲明, S.Gorwadkar, 横井俊久, 若木守明, 板谷太郎, 樋口哲也 : 2004 年春季応物予稿, 28a-D-6, p.1087(2004).
- 7) 森山浩司, S.Gorwadkar, 板谷太郎, 板谷博 : 2004 年春季応物予稿, 30p-ZW-17, p.1428 (2004).
- 8) 日本アルミニウム協会編 : アルミニウムハンドブック 第 6 版, p.26 (2001).