

マイクロミラーの低温成形・転写技術に関する研究

東京大学 大学院工学系研究科 精密工学専攻

准教授 日暮 栄治

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015027)

キーワード： 低温接合, Au-Au 接合, マイクロミラー, 転写, 低温成形

1. 研究の背景

近年、ウェットエッチングやドライエッチングを用いた微細加工技術が、光通信モジュールやセンサなどに適用され、さまざまな光マイクロシステムが研究されている¹⁾。このようなデバイスは、外部の環境から保護する観点から、最終的にはパッケージングされて用いられる。信頼性の高いパッケージングとしては、セラミックパッケージがある。アルミナなどのセラミック粉末を有機バインダなどとともに混合、キャストニングして作られるグリーンシートに微小な貫通穴をあけて、金属ペーストを印刷技術によって穴部および配線部に塗布し、重ね合わせ焼成することで、立体配線されたセラミック基板が作製される。必要によってキャビティ（空洞）構造を設けることも可能であり、信頼性の高いパッケージが可能となる。

光マイクロシステムを構成する光学素子の中で最も重要な要素の一つがマイクロミラーである。シリコン基板であれば、ウェット異方性エッチング技術によりシリコン(111)面を利用した高精度なマイクロミラー²⁾などが作製されている(図1)。しかしながら、セラミック基板では、シリコン基板の異方性エッチング加工のような加工技術が適用できないため、高精度な斜面(傾斜角)を形成することができず、セラミック基板上に光マイクロシステムを構築する上で必要となる、表面粗さが小さく傾斜角度が高精度に制御されたマイクロミラーを形成することは困難であった。一方、われわれは、低温接合という観点から、Auバンプ表面を平滑なSi基板により塑性変形させ平滑な面(表面粗さ数nm程度)を形成する手法^{3, 4)}を研究しており、これらの成果をマイクロミラー形成に応用することを考えた。

本研究では、シリコン以外の材料基板に、所望の角度を有するマイクロミラーを実現することを目的に、塑性変形によるミラー面の形成と他の基板への低温接合を同時に行う新規マイクロミラープロセスの実証を試みた⁵⁾。

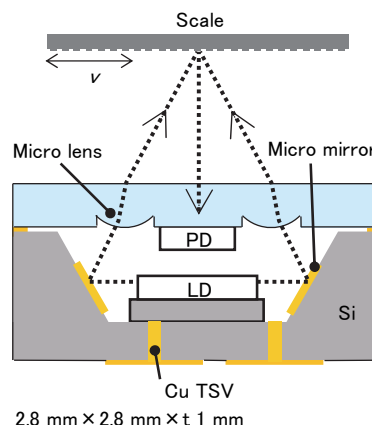


図1 集積型光マイクロ変位センサ²⁾、PD: Photodiode、LD: Laser diode.

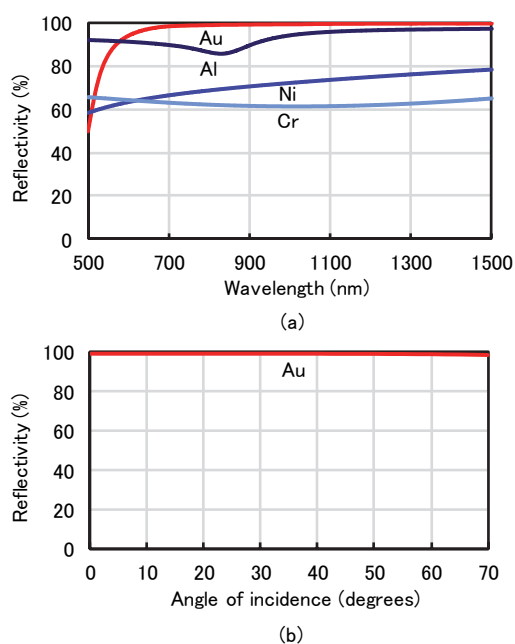


図2 各種金属薄膜の反射率シミュレーション。(a) 膜厚 500 nm、入射角 0.5° 、(b) 波長 1310 nm、膜厚 500 nm.

2. ミラー材料

図2は、各種金属薄膜（厚さ 500 nm）の反射率と波長の関係を計算した結果である。計算には光学定数データベースにある数値を用いた⁶⁾。本研究では、通信用の近赤外領域の波長のレーザー光（1,310 nm, 1,550 nm）を使用予定であるが、この領域では、Au が最も高い反射率を有するため、Au を反射ミラーとして用いることとした。図2(b)は、波長 1310 nm の光の入射角依存性である。0~70° の入射角範囲で高い反射率を示す。

3. 提案プロセス

図3に本研究で提案するマイクロミラー作製プロセスを示す。まず、Au マイクロロッドをガラス製の成形・接合用ツール（以下、ガラスモールドと呼ぶ）上に設置し、Au 薄膜を蒸着したターゲット基板とともに表面活性化を行う（図3(a)）。次に、基板と Au マイクロロッドを接触させ、加熱・加圧（150°C、3分間）することでガラスモールドの形状をマイクロロッドに転写する（図3(b)）。Au とガラスの凝着力が Au-Au 間の凝着力に比べて極めて小さいことを利用して、離型することで、ターゲット基板に Au マイクロミラーを転写する（図3(c)）。

4. 表面粗さと光散乱損失

ミラー表面での散乱による光の損失は、rms 表面粗さ： σ 、光の波長： λ 、入射角： θ とし、

$$\frac{P_{scat}}{P_{tot}} = 1 - e^{-\left(\frac{4\pi\sigma \cos \theta}{\lambda}\right)^2}$$

として計算できる⁷⁾。図4に、入射角が 45°、波長 1.3 μm の場合の表面粗さと散乱損の関係を示す。光損失を 5% 以内に抑えるためには、ミラー面の rms 表面粗さは 33 nm 以下であり、本研究で作製したミラーの表面粗さの目標値とした。

5. 実験方法

本研究では、表面活性化にアルゴンと水素ガスを混合したガス（Ar+H₂）を用いた大気圧プラズマ⁴⁾を使用した。Ar+H₂ 大気圧プラズマによって Au 表面を活性化することにより、すべて大気中で行える Au-Au 常温接合が報告されている^{4, 8)}。

ガラスモールドには、線引き成形技術で形成したガラスモールド（日本電気硝子株式会社）を用いた。線引き成形技術は、大きな元ガラス（preform）を機械加工し、ヒータで軟化させながらローラーで引っ張ることで、細いガラス管を製造する方法である。光ファイバ用の V 溝基板の量

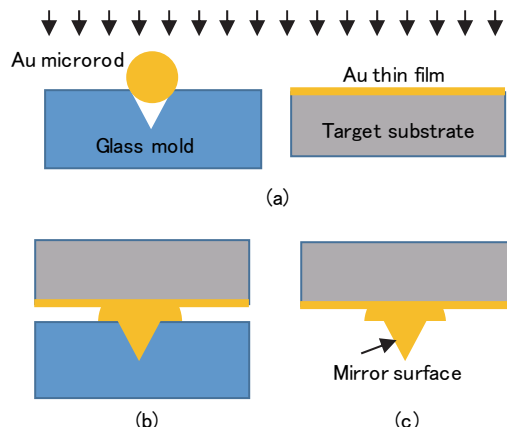


図3 Au 低温接合と塑性変形を利用したマイクロミラー、(a)表面活性化、(b)加熱・加圧、(c)離形

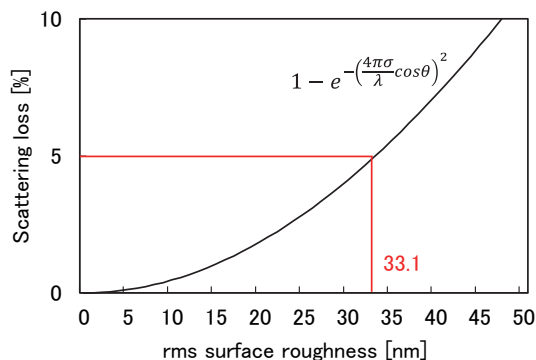


図4 ミラー表面粗さと散乱損失の関係

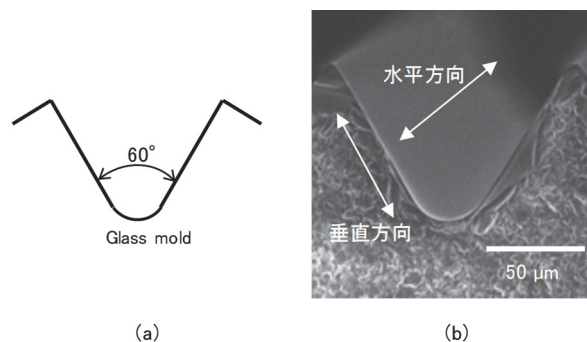


図5 線引き成形技術で加工したガラスモールドの断面、(a)模式図、(b)SEM写真

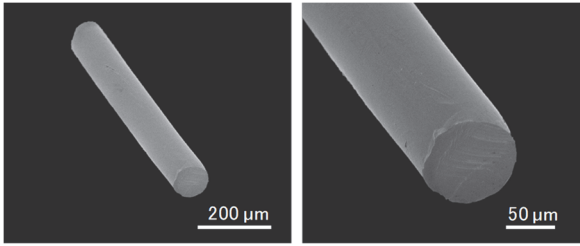


図6 使用したAuマイクロロッドのSEM写真

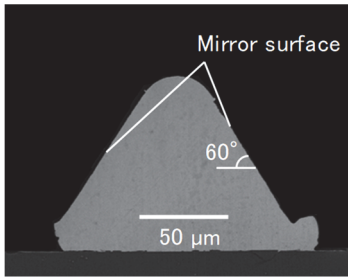


図7 作製したAuマイクロミラーの断面SEM写真

産に用いられている。線引き成形技術で加工したガラスモールド（日本電気硝子株式会社）の断面模式図および走査電子顕微鏡（Scanning Electron Microscope: SEM）写真を図5に示す。

使用したAuマイクロロッド（直径：100-130 μm、純度：99.99%）のSEM写真を図6に示す。

6. 実験結果

作製したAuマイクロミラーの断面SEM写真の一例を図7に示す。転写条件は温度150°C、荷重35 N、保持時間3 minである。ガラスモールド形状がAuマイクロロッドに転写され、傾斜角度60°のミラー面の形成に成功した。Auとガラスの凝着力は、Au-Au間の凝着力に比べて極めて小さいため、離型剤なしに剥離することができた。

マイクロミラー面の表面粗さを、ガラスモールド溝の方向に対して水平な方向と垂直な方向（図5）について測定した。測定にはレーザ顕微鏡（LEXT OLS4100、オリンパス株式会社製）を使用した。図8にガラスモールドの表面プロフィール測定結果の一例を示す。ガラスモールドのrms表面粗さは、水平方向2 nm（測定範囲250 μm）、垂直方向11 nm（測定範囲50 μm）であり、ミラー面形成には十分な表面粗さである。図9に作製したマイクロミラーの表面プロフィール測定結果の一例を示す。転写条件は、温度150°C、荷重30 N、時間3 minである。rms表面粗さは、水平方向10 nm（測定範囲250 μm）、垂直方向25 nm（測定範囲50 μm）とそれぞれ30 nm以下の値を得ることができた。

7. 結論

本研究では、成形・接合ツールにガラスモールドを用い

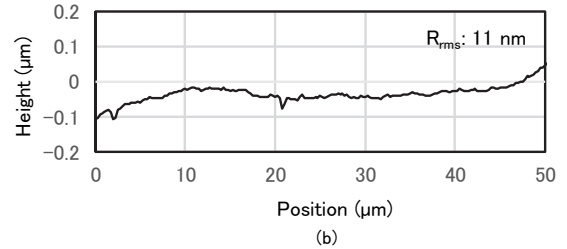
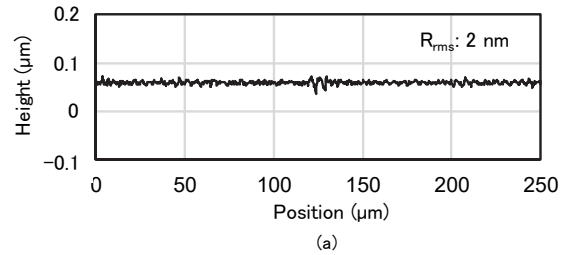


図8 ガラスモールドの表面プロフィール測定例、(a) 水平方向、(b) 垂直方向

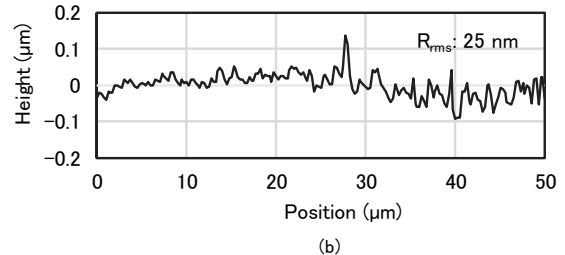
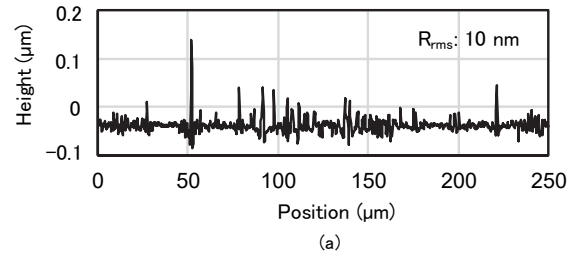


図9 Auマイクロミラーの表面プロフィール測定例、(a) 水平方向、(b) 垂直方向

て、シリコン以外の基板上にマイクロミラーを転写・成形する低温プロセス（150°C）の提案を行った。平滑な表面を有するガラスモールドを用いて、Auマイクロロッドに押し付け加圧することにより、塑性変形を利用して、平滑（rms表面粗さ30 nm以下）で傾斜角度が高精度に制御されたAuマイクロミラーを実現できることを示した。従来のシリコンマイクロマシニングでは作製困難なセラミックス等の基板上に平滑なAuマイクロミラーを形成できるため、セラミックスパッケージされた小型光マイクロシステムや光インターコネクションへの応用などが期待される。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、公益財団法人天田財団平成27年度一般研究開発助成AF-2015027を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澤田廉士, 羽根一博, 日暮栄治, 光マイクロマシン, 株式会社オーム社, ISBN 4-274-03589-1 (2002).
- 2) E. Higurashi, D. Chino, T. Suga, and R. Sawada, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 15, no. 5, pp. 1500-1505 (2009).
- 3) 佐藤丈史, 日暮栄治, 須賀唯知, 澤田廉士, 電子情報通信学会論文誌「エレクトロニクス:C」, vol. J94-C, no. 11, pp. 470-471 (2011).
- 4) E. Higurashi, M. Yamamoto, T. Sato, T. Suga, and R. Sawada, IEICE Transactions on Electronics, vol. E99-C, no. 3, pp. 339-345 (2016).
- 5) S. Matsuoka, E. Higurashi, T. Suga, and R. Sawada, 2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN 2016), pp.259-260, (2016).
- 6) M. N. Polyanskiy, Refractive index database, <http://refractiveindex.info> (accessed February 1 2017).
- 7) C. Marxer, C. Thio, M.-A. Grétillet, N. F. de Rooij, R. Böttig, O. Anthamatten, B. Valk, and P. Vogel, J. Microelectromech. Syst., vol. 6, no. 3, pp. 277-285 (1997).
- 8) M. Yamamoto, E. Higurashi, T. Suga, R. Sawada, T. Itoh, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 4S, 04FC12 (2018).