

(7) 二次元 MEMS ミラーアレイデバイスの開発

加藤 静一

株式会社リコー 研究開発本部 東北研究所

1. 背景と目的

近年の MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術の発達により、多数の微細なミラーを LSI 基板上に製作し、個別に動作制御することが可能になっている。このような二次元 MEMS ミラーアレイは空間変調器として、プリンタ、ビデオプロジェクタ、マスクレス露光機などへの応用が検討されている¹⁻³⁾。これらの応用では、高解像度かつ高い階調性が求められ、さらにより高密度で高速のスイッチング速度が要求されてきている。多くのミラー型空間変調器では、ねじり梁ヒンジという板バネで吊られたミラーを静電力や電磁力で駆動する方式がよく用いられている。ビデオプロジェクタ用ミラーデバイスではフィルファクタを向上するため、ミラー下にヒンジを形成する複雑な構造がとられている例⁴⁾もある。ねじり梁ヒンジでミラーを支持する構造では高解像度を得るためミラーサイズを縮小すると、ねじり梁ヒンジの剛性が増加し駆動エネルギーの増大を招く。

我々はねじり梁ヒンジを用いない新規構造の静電型二次元ミラーアレイを開発したので報告する。このデバイスは構造がシンプルで、バネ剛性による反発力が生じないためミラーを小型化しても駆動力すなわち駆動電圧が極端に増加しない。さらにヒンジを持たず傾斜方向が一軸に制限されないため、傾斜の向きを自在に選択でき二軸の光偏向が可能である。

2. デバイス構造

Fig.1 は開発した二次元ミラーアレイの概略図である。(a)はアレイ内の1ピクセルを、(b)は二次元アレイを示している。電極を示すため、(a)においてはミラーの一部を、(b)においてはアレイ中央の二枚のミラーをそれぞれ取りさった。ミラーの各コーナー付近にポ

ストおよびストッパが形成され、ミラー下にはピボットが設けられている。ミラーを支持するねじり梁ヒンジは存在せず、ポストとストッパの作る空間でピボットを支点とし自由に傾斜できる。ミラーに対向しピボットを囲むように4つの電極が配置されており、これらの電極からの静電誘導によりミラー電位が誘起される。これにより電極とミラー間に静電力が発生しミラーを傾斜変位させることができる。傾斜したミラーとストッパは非接触で、ミラーの偏向角はミラーサイズとピボット高さからなる傾斜角により設計することができる。

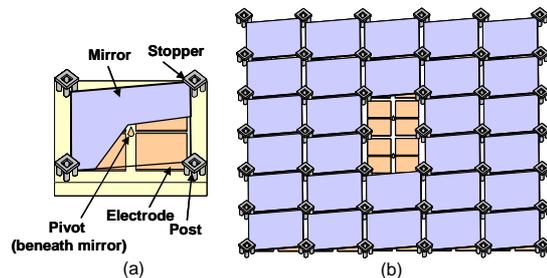


Fig.1 Schematic structure of device.

3. 動作原理

Fig.2(a)と(b)に本デバイスの電極の構成とミラー偏向のための印加電圧例を示す。ミラーは電極とミラー間の電位差による静電力で傾斜変位する。ミラー電位 V_m は電極からミラーに静電誘導で誘起され、次のように求めることができる。電極 A, 電極 B, 電極 C, 電極 D とミラー間の静電容量をそれぞれ C_a, C_b, C_c, C_d とすると本デバイスの等価回路は Fig.2(c)のようになる。ミラーは電気的に浮いており各電極から誘導される電荷の総和は零で、かつ各電極に対する電荷量は

電荷量 = 静電容量 × (電極電位 - ミラー電位)
 であるので、

$$Ca(Va - Vm) + Cb(Vb - Vm) + Cc(Vc - Vm) + Cd(Vd - Vm) = 0$$

となる。上式より、ミラーのフローティング電位 V_m は次式で示される。

$$V_m = (CaVa + CbVb + CcVc + CdVd) / (Ca + Cb + Cc + Cd)$$

各電極のミラーに対向する面積が同じであり、ミラーが電極 A、電極 B 側と電極 C、電極 D 側の間で傾斜変位する場合、傾斜変位中の角度に関わらず静電容量の関係は

$$Ca = Cb, Cc = Cd$$

である。

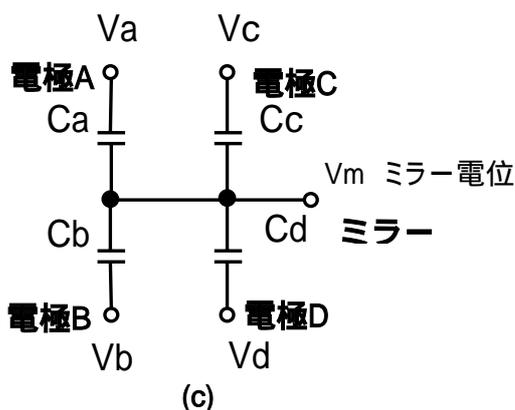
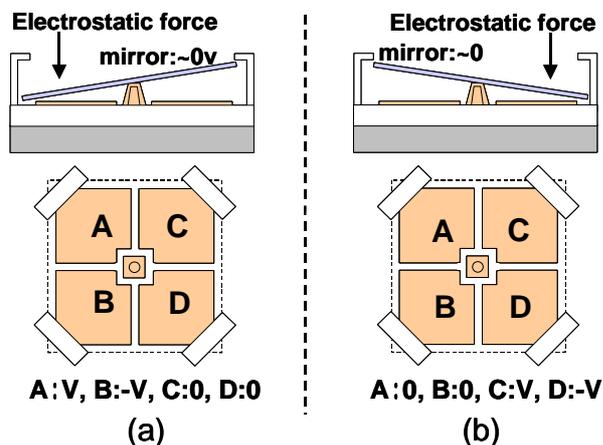


Fig.2 Operation principle.

Fig.2(a)では、電極 A、電極 B、電極 C、電極 D の電位はそれぞれ、 $V, -V, 0, 0$ に印加される。 $V_a = V, V_b = -V, V_c = 0, V_d = 0$ であるので、ミラー電位 V_m は $0V$ となる。

このときミラーへの静電力は電極 A と電極 B に発生するが、電極 C と電極 D はミラーと同電位であり静電力が生じない。この静電力でミラーは電極 A, B 側に傾斜変位する。一方、Fig.2(b)では、電極 A、電極 B、電極 C、電極 D の電位はそれぞれ、 $0, 0, V, -V$ に印加され、ミラーの電位は $0V$ となる。電極 A、電極 B 側はミラーと同電位で静電力は生じない。電極 C、電極 D にはミラーと静電力が発生し、ミラーは電極 C, D 側に傾斜変位する。さらに、4 電極の電位の組み合わせにより、前述のミラー変位と直交する方向への傾斜変位させることも可能である。

4. 動作シミュレーション

K. Jung らの報告 5) を基に下記 (1), (2), (3) の仮定によって、本デバイスの動作を Fig.3 のような簡単なモデルでシミュレーションを行うことができる。

(1) ミラーの傾斜による移動距離 d は、平行平板ミラーの $(3/4)d$ から $(1/4)d$ までの並進運動距離に等価である。

(2) 並進移動距離は m 個の微小距離 ($d, d/2 = m d$) に分割できる。但し静電力は d の間一定である。

(3) ミラーの質量 M による運動エネルギーが保存される。

3. 動作原理の項で述べたように電圧 V がミラーと電極間に印加される。

i 番目の微小距離における、静電力 (F_i)、加速度 (a_i)、速度 (v_i)、時間 (t_i) の関係は式 (1), (2), (3), (4) のように記述される。 ϵ_0 は真空中の誘電率、 A は 1 つの電極の面積を示す。ミラーの応答時間すなわち傾斜開始から完了までの時間は微小時間 t_i の総和とすることができる。

$$F_i = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (2A) \frac{V^2}{\frac{3}{4}d - \frac{i-1}{m} \Delta d} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{F_i}{M} \quad (2)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \left(\sum_1^i F_i \Delta d \right)}{M}} \quad (3)$$

$$t_i = \frac{v_i - v_{i-1}}{a_i} \quad (4)$$

この計算方法による時間に対するミラー変位の様子を Fig.4 で示した。サイズ $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 0.3 \mu\text{m}$ 厚、傾斜角 10° のミラーを 30V で駆動した場合のシミュレーション結果である（以下、ミラーサイズ $20 \mu\text{m}$ 角のものを $20 \mu\text{m}$ ミラーと称し、他のサイズも同様である）。

ミラー移動距離 $d = 20 \mu\text{m} \times \sin 10^\circ = 3.47 \mu\text{m}$ を並進動作距離として 100 の微小距離に分割した。ミラーに用いる Al 合金の密度 3200kg/m^3 から質量を $M = 3.84 \times 10^{-13} \text{kg}$ 、一つの電極面積 $A = 90 \mu\text{m}^2$ 、真空中の誘電率 $\varepsilon_0 = 8.855 \times 10^{-12} \text{F/m}$ とした。ねじり梁ヒンジによる復元力が存在しないので、傾斜変位の終わりに近づくに従い、曲線の傾きすなわち速度が増加していることが分かる。図に示すようにデバイスの応答時間（Response Time）は変位開始から終了までの時間とした。

Fig.5 はミラーサイズと印加電圧を変えた場合のシミュレーションによる傾斜角 10° のミラーの応答時間を表している。ミラーサイズは $10 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ で、ピボット高さはそれぞれ $0.87 \mu\text{m}$ 、 $1.30 \mu\text{m}$ 、 $1.74 \mu\text{m}$ であり、対応する電極の面積はそれぞれ $18 \mu\text{m}^2$ 、 $45 \mu\text{m}^2$ 、 $90 \mu\text{m}^2$ である。ヒンジによる反発力や復元力がないため、応答時間はミラーサイズと駆動電圧で決まり、ミラーサイズを小さくすると同じ応答時間を得る駆動電圧を減少させることができる。

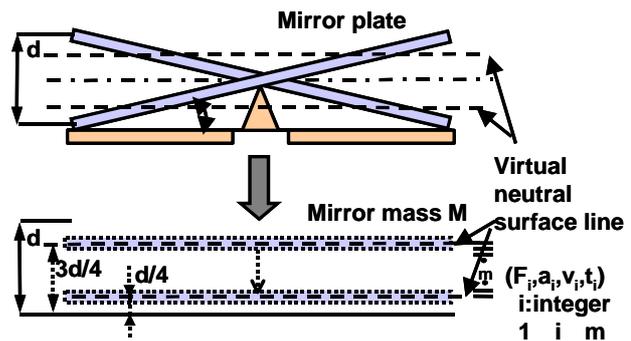


Fig.3 Model for mirror motion.

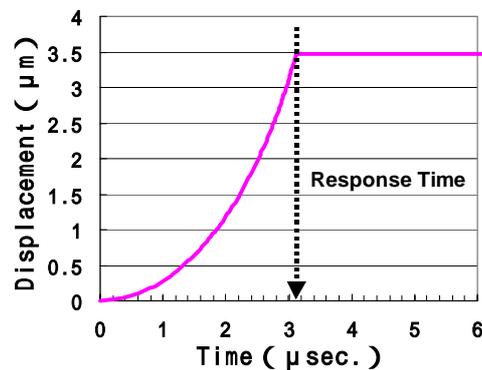


Fig.4 Numerically calculated displacement vs. time.

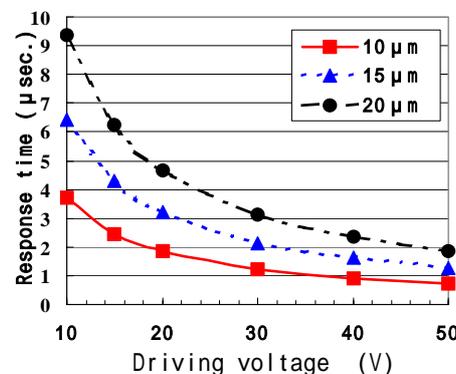


Fig.5 Estimation of response time of the device

5. デバイス試作

MEMS 二次元ミラーアレイでは駆動 LSI を製作済みの基板上に表面マイクロマシン技術によりマイクロメカニカル構造を形成する方法がよく用いられる。従って、マイクロメカニカルな構造を形成するプロセスは Si 半導体 CMOS プロセスに整合性がよく、かつ製作済みの LSI に影響を与え

ないプロセス温度で形成されることが必要である。今回の報告では、デバイスの基本的な動作評価をする目的で LSI 回路は形成せずに、二層メタル配線を形成した後に二段階の犠牲層プロセスにより MEMS ミラーアレイ構造を形成した。Fig.6 にプロセスフローを示す。

- (a) 第一メタルの AlSiCu 膜が形成されたシリコン基板上にピボットを作製する。
- (b) 2. デバイス構造の項で示した電極として TiN 膜をスパッタ法で成膜する。
- (c) ピボットを完全に覆うように第一犠牲層のフォトレジストを塗布し平坦化する。
- (d) ミラーとなる Al 合金をスパッタ法で第一犠牲層の上に成膜する。
- (e) さらに、第二犠牲層であるフォトレジストを塗布し平坦化する。
- (f) 第二犠牲層のミラーのコーナー付近にポストとなる孔を開け、酸化膜を成膜し、孔を埋める。
- (g) 最後に犠牲層を酸素プラズマでアッシング除去する。

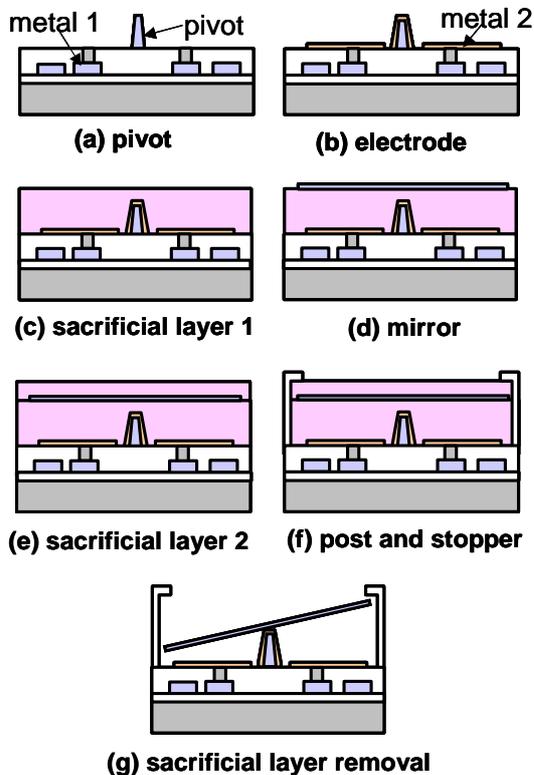
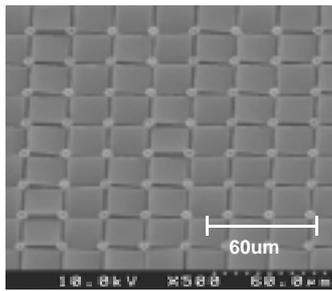


Fig.6 Process flow.

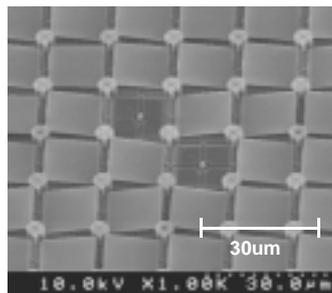
同一基板上に形成した 3 種類のミラーサイズのデバイス (a) 20 μm ミラー、(b) 15 μm ミラー、(c) 10 μm ミラーの SEM 像を Fig.7 に示す。ポストの直径を 1.2 μm 、ストッパの直径を 4 μm にした。ピボット高さは 0.8 μm であり、10 μm 、15 μm 、20 μm ミラーの傾斜角はそれぞれ 9.2°、6.1°、4.6° である。各サイズともミラー表面が平坦に得られ、試作プロセスがミラーデバイス形成に適していることが分かった。ポストとストッパの拡大写真を (d) に示す。ミラーが傾斜変位動作中にはポストだけでなくストッパにも接することがあり、ストッパにより 4 本のポストが繋がり機械的な強度を確保しつつ、ミラーとポストやストッパとの接触面積が小さくなる構造が得られている。ミラーがポストやストッパに接触するとき発生する機械的な抵抗力はミラーの応答特性を悪くするので接触面積を小さくする構造が重要であり、本デバイス構造ではそれを実現することが出来ている。

6 . 評価結果および考察

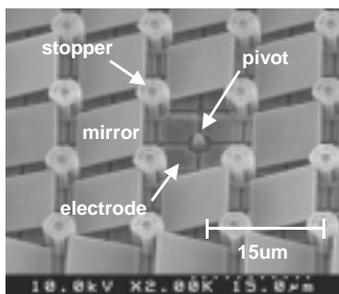
ミラーの動作はレーザドップラー振動計 (グラフィテック社製 AT7212) で評価した。測定は環境湿度変動の影響を除くため、2300Pa の減圧雰囲気と大気圧の乾燥窒素雰囲気で行った。Fig.8 に 15 μm ミラーと 20 μm ミラーを 25V で駆動した場合の傾斜変位の応答特性をシミュレーション結果と共に示した。減圧雰囲気ではシミュレーションと測定結果が、残留振動成分を除き良く合っていることが分かる。窒素雰囲気では傾斜変位が遅くなっており、窒素のような粘性気体を押しつぶす時に発生するスクイズフィルムダンピング (squeeze film damping)⁶⁾ がミラーの傾斜動作に影響したためと考えられる。また、傾斜変位後に数 μsec 間の残留した振動が見られる。減圧雰囲気より窒素雰囲気では振動が小さいのは雰囲気の粘性抵抗による減衰が大きいためと考えられる。



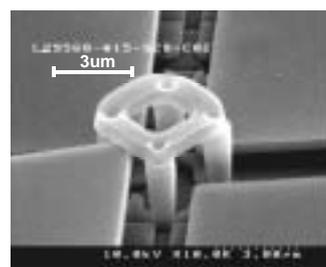
(a) 20 μm



(b) 15 μm



(c) 10 μm



(d) post and stopper

Fig.7 The fabricated two-dimensional mirror array device.

但し、この残留振動波形にはレーザドップラー振動計の測定周波数の制限に起因する電的に発生した振動波形も含まれており、今後詳細な解析が必要である。残留振動を含む波形では傾斜変

位開始から傾斜を完了する変位値に達するまでの時間を応答時間 (Response time) とした。

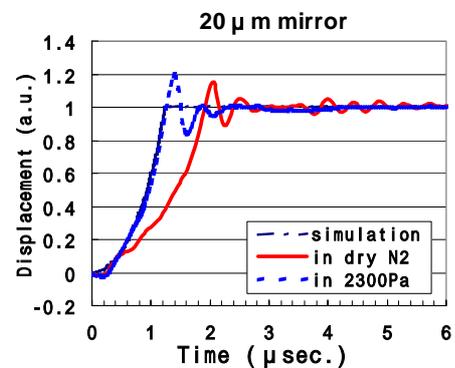
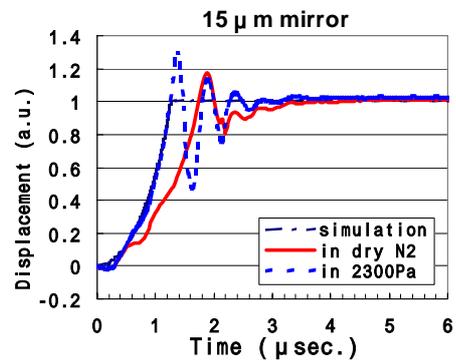


Fig.8 Time response of the device.

Fig.9 に 15 μm と 20 μm ミラーの駆動電圧に対する応答時間を示した。応答時間を 2300Pa の減圧雰囲気と大気圧の乾燥窒素雰囲気中で測定し、シミュレーション結果との比較を行った。15 μm ミラーと 20 μm ミラーともに減圧雰囲気の応答時間はシミュレーションと良く一致しているが、窒素雰囲気の応答時間は遅くなっていることが分かる。これは前述のような気体の抵抗がミラーの傾斜動作を妨げているためと考えられる。窒素雰囲気でも駆動電圧が大きくなると駆動トルクも増加するため、シミュレーションや減圧雰囲気での応答時間と差が少なくなっている。15V 未満の駆動電圧ではミラーが動作せず、また、40V を超えての駆動電圧では第一メタルと第二メタル間でショートが発生したため、測定の範囲を 15V から 40V とした。ミラーと接する部材との間にファンデアワールス力などに起因する固着力

(stiction force)^{7), 8)}が存在しているために、15Vより低電圧での静電力ではミラーを動作させることができなかったと思われる。

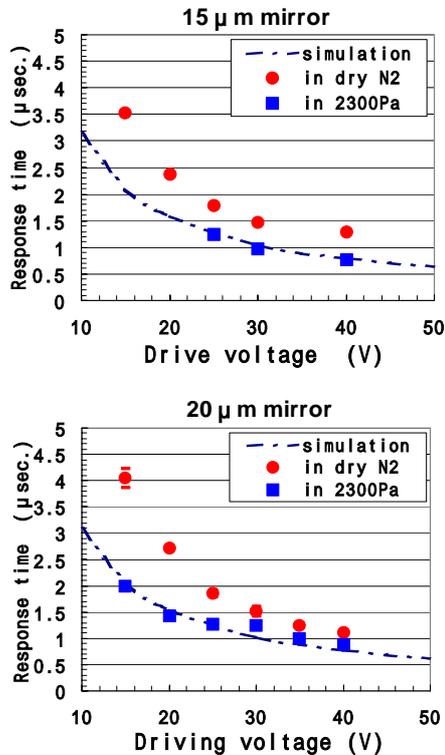


Fig.9 Response time against driving voltage.

7. 結論

ねじり梁ヒンジを用いない新構造静電駆動二次元ミラーアレイの開発を行った。簡単なシミュレーションにより、ミラーの応答時間を見積もることができた。二層メタルの表面マイクロマシニングプロセスを用いミラーデバイスを製作し、応答特性を評価することができた。15 μmミラーと20 μmミラーの応答時間は減圧雰囲気ではシミュレーションと良く一致したが、窒素雰囲気では窒素の粘性抵抗により遅くなった。駆動電圧が15V未満では動作せず、ミラー接触部に固着力が作用しているものと考えられる。

8. 今後の展開

高密度化のためさらに微細なミラーのプロセス開発を行う。また、LSI制御回路基板上に二次元マイクロ

ミラーアレイを一貫して製作し、個別ミラーの駆動および制御方法を開発する。

参考文献

- 1) W. E. Nelson and R. L. Bhava, :Digital Micromirror Device Imaging Bar Hardcopy, Color Hard Copy and Graphic Arts IV, J. Bares (ed.), Proc. SPIE Vol. 2413, (1995), pp.58-65.
- 2) H. Urey and D. L. Dickensheets: Display and Imaging systems, M. E. Motamedi (ed.), MOEMS, Bellingham, WA: SPIE Press, (2005).
- 3) G. P. Watson et al. : Spatial light modulator for maskless optical projection lithography, J. Vac. Sci. Technol., B24(6), Nov/Dec, (2006).
- 4) J. T. Tsai and M. C. Wu: Gimbal-Less MEMS Two-Axis Optical Scanner Array With High Fill-Factor, J. of Microelectromechanical Systems, vol. 14, No. 6, Dec., (2005), pp.1323-1328.
- 5) K. Jung et al. : Numerical analyses of micromirror for projection TV using FEM, Microsystem Technologies, vol7, (2001), pp.75-79.
- 6) F. Pan et al. : Squeeze Film Damping Effect on Dynamic Response of a MEMS Torsion Mirror, J. Micromech. Microeng. 8, (1998), pp. 200-208
- 7) S. A. Henck: Lubrication of digital micromirror devices™, Tribology Letters, vol.3, (1997), pp.239-247.
- 8) B. Bhushan and H. Liu: Characterization of nanomechanical and nanotribological properties of digital micromirror devices Nanotechnology, vol.15, (2004), pp.1785-1791.

禁無断転載

2007 年度

ビジネス機器関連技術調査報告書(“ 3 ” 部)

発行 社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会
技術委員会 技術調査小委員会

〒105-0003 東京都港区西新橋 3-25-33

NP 御成門ビル 4F

電話 03-5472-1101

FAX 03-5472-2511