

# 論文の内容の要旨

論文題目 両面マイクロミラーの振動を用いた透過型多眼立体視ディスプレイに関する研究

氏名 中井 亮仁

## 1. 序論

本研究の目的は、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いてマイクロミラーアレイを製作し、裸眼でどこから見ても高解像度な立体画像を観察できる立体視ディスプレイを実現することである。従来の立体画像表示装置は解像度と空間分解能がトレードオフの関係になっており、この問題が実用化への最大のネックとなっていた。これに対し、本研究で試作する立体画像表示装置の一番の特徴は、画像表示装置から出力される光情報を時系列のデータとして扱い、マイクロミラーを動的に制御することでその反射光を空間上に走査する点にある。これにより、観察者の見る画像の解像度を落とすことなく空間分解能を上げることが可能となる。DMD のような反射型のミラーアレイを用いた立体視ディスプレイの研究は既に行なわれているが<sup>[1]</sup>、反射型の場合光源とミラーアレイを向かい合わせに配置する必要があり、複雑な光学系及び一定以上の光路を確保する観点からシステムが大規模になる傾向がある。一方本研究では、画素と同サイズのマイクロミラーの両面を用いて反射させることで、ミラーアレイの直下に配置した光源からの光を透過させる構造となっている。これによりシステム全体をシンプルに、かつ薄型にすることが可能である。

## 2. 理論・設計

次に、マイクロミラーの振動により高解像度多眼立体視ディスプレイが実現されるその原理について説明する。Fig.1(a)に示したように、45度の角度で平行に並べられたマイクロミラーアレイを考えると、その両面が鏡面であれば図のように反射が生じ、下に配置された画像表示装置がそのまま見られることになる。ここで、一つおきに固定ミラーと可動ミラーを配置し、可動ミラーを45度から $\alpha$ 度だけ上方に傾けた場合を考える (Fig.1(b)参照)。この場合には、赤色画素 (R2, R4, ...) から出た光は固定ミラーで反射された後可動ミラーで反射されるため、ディスプレイ面と垂直な方向から右方に $2\alpha$ 度だけ光軸が傾くことになる。同様に、青色画素 (L3, L5, ...) から出た光は可動ミラー・固定ミラーの順で反射するため、左方に $2\alpha$ 度だけ傾くことになる。これを上方から見た場合、顔を適切な位置に置くことで左眼は青色画素のみを、右眼は赤色画素のみを見ることができ、これはそのまま立体視ディスプレイとして用いることが可能な構造である。これをさらに発展させて、可動ミラーを $45 \pm \alpha$ 度の範囲で振動させることを考えると (Fig.1(b)と(c))、各眼に入射する画像はTVのインタレースと同様に切り替わることになり、画面のちらつき防止に役立つと思われる。また、この状態において左右の眼に入ってくる個々の画像の解像度は、マイクロミラーの下に配置された画像表示装置の解像度と等しく、さらに振動の一周期の間に複数の画像を時系列で切り替えれば、空間分解能を上げることも可能となる。

本研究では、基板と45度をなす角度までマイクロミラーを傾ける疎動を磁性体材料と外部磁場を用いて、 $45 \pm \alpha$ 度の範囲で振動させる微動についてはローレンツ力を用いて実現することにした。設計したミラーはSi, SiO<sub>2</sub>及びNiから構成される (Fig.2参照)。Niは磁性体材料であるとともに導体でもあることから、これを用いることでプロセスが単純化される。反射部のサイズは $450 \mu\text{m} \times 520 \mu\text{m}$ , Niでできたヒンジ部の長さ, 幅, 厚さはそれぞれ $50 \mu\text{m}$ ,  $20 \mu\text{m}$ ,  $150 \text{nm}$ である。粗動及び微動の変位を理論的に計算するため、Fig.3に示すような弾性ヒンジを持つ片持ち梁構造をモデルとして用いた。外部磁場による粗動は、磁場内に置かれた磁性体にかかる磁気異方性トルク $T_{\text{field}}$ とヒンジの機械的な復元力に起因するトルク $T_{\text{mech}}$ との釣り合いから求められる。ミラー面の磁性体材料の体積を $V_{\text{mag}}$ , 磁性体材料の飽和磁化を $I$ , 外部磁界の強さを $H_{\text{ext}}$ , ヒンジ部に用いる材料のヤング率を $E_{\text{h}}$ , ヒンジの断面二次モーメントを $J_{\text{h}}$ , ヒンジ部の曲率半径を $\rho$ とすると、 $T_{\text{field}}$ と $T_{\text{mech}}$ はそれぞれ以下のように書き表される。

$$T_{\text{field}} = V_{\text{mag}} I H_{\text{ext}} \sin(\varphi - \theta)$$

$$T_{\text{mech}} = \frac{E_{\text{h}}}{\rho} J_{\text{h}}$$

同様に、ローレンツ力に起因するトルク $T_{\text{Lorentz}}$ は、配線に流す電流 $i$ , ミラー面の長さ $L_{\text{m}}$ , ミラー面の幅 $W_{\text{m}}$ , 磁束密度 $B$ を用いて

$$T_{\text{Lorentz}} = i B W_{\text{m}} \cos(\varphi - \theta) L_{\text{m}}$$

と書き表されるから、釣り合いの式

$$T_{\text{mech}} = T_{\text{field}} + T_{\text{Lorentz}}$$

を  $\theta$  について解くことで微動の変位を得ることが可能である。Mathematica で数値計算により求めた磁束密度とミラーの起き上がり角の関係を Fig.4(a)に、配線に流す電流  $i$  を変化させたときのローレンツ力によるミラーの変位を Fig.4(b)に示す。

### 3. 製作

マイクロミラーの製作プロセスを Fig.5 に示す。ウェハは各層の厚さが 20, 1, 500  $\mu\text{m}$  の SOI (Silicon On Insulator) を用いた。まず最初に、1100 度で 180 分熱酸化することにより 150 nm 程度の  $\text{SiO}_2$  層を成長させた(a)。この  $\text{SiO}_2$  層は Si 基板と Ni 配線とを絶縁する目的と、後の Si の等方性エッチングの際に他に Si が露出している部分をなくすために用いている。熱酸化後、厚さ 150 nm 程度の Ni 層をスパッタにより成膜した(b)。次に、リン酸、硝酸、酢酸の混合エッチャントを用いて Ni をエッチングし、ミラー部、ヒンジ部、及び配線を形成した(c)。Ni のエッチングにより露出した熱酸化  $\text{SiO}_2$  層を、BHF (Buffered HF, HF と  $\text{NH}_4\text{F}$  の 1 : 6 混合緩衝液) を用いて等方性エッチングのマスク形状にエッチングした(d)。その後、SOI 裏面の Si を DRIE を用いてエッチングした(e)。SOI の表面に OFPR800 100CP を二重にスピコートし、露光・現像により表面 Si の等方性エッチング時のマスクを形成した。このときのレジストの厚さ及びポストベークの時間を変化させることで、プラズマ耐性、即ちエッチング時間を調整することが可能である。その後、 $\text{O}_2 + \text{CF}_4$  雰囲気下での等方性エッチングにより、表面 Si 及びヒンジ下の Si を除去した(f)。この時のヒンジ部を裏面から撮影した写真を Fig.6 に示す。最後に HF の蒸気エッチングによってヒンジ部下及びミラー部裏面の  $\text{SiO}_2$  層を除去した(g)。製作したミラーの写真を Fig.7 に示す。

### 4. 実験

製作したマイクロミラーの特性を調べるために、外部磁場による駆動、ローレンツ力による駆動、共振周波数の測定三つの実験を行なった。基板に垂直な方向に外部磁場をかけたときの、外部磁場の強さとミラーの起き上がり角の関係を Fig.8 に示す。外部磁場の強さは、予備実験の段階でコイルに流す電流を変化させガウスマーターで測定したものを用いた。またミラーの起き上がり角はマイクロスコープで撮影した画像から計算した。測定値は理論曲線に沿って変化しており、粗動として必要な 45 度を含む十分な可動範囲が確保されていることがわかる。Fig.9 に配線に流す電流  $i$  とミラーの起き上がり角の関係を示す。実験は、外部磁場とウェハ表面のなす角が 72 度、外部磁場の強さが 11.6 mT、0.3 Hz の交流駆動の条件で行なった。電流  $i$  は配線と直列に接続した抵抗の電圧降下から計算した。またミラーにレーザー光を当て、反射後のスポット光の移動をスクリーン上に記録することで、ミラーの起き上がり角を計算した。測定値はほぼ直線上に並んでいることがわかる。共振周波数の測定は、反射後のスポット光の位置に 4 分割フォトダイオードを置き、水平方向に配置された二つのフォトダイオードの出力の差分を増幅した後、FFT アナライザを用いて周波数解析を行なった。ミラーを固定している軸、及び系全体を加振したときの結果を Fig.10(a)(b)にそれぞれ示す。この結果より製作したマイクロミラーの共振周波数は 1045 Hz 程度であることがわかった。

次に隣り合う一対のミラーを用いて、レーザー光を基板の表から裏へと透過させ、かつその光軸を振動させる実験を行なった。実験のセットアップを Fig.11 に示す(このときの外部磁場は 14 mT 程度)。Fig.11 右上スクリーン部の拡大写真から、スポット光が二つあることが見てわかる。外部磁場が 12 mT 以下のときスポット光は一つしか存在しないため、一つはミラーの外周部を透過して直接スクリーンに達したもので、もう一つはミラーで 2 回反射された結果到達したものであることがわかる。基板に垂直な方向に 14 mT の外部磁場をかけた状態で、配線に流す電流  $i$  を変化させたときの光軸の角度変化を Fig.12 に示す。条件は若干異なるものの、Fig.9 のグラフのほぼ倍の角度変化が得られていることがわかる。

### 5. 結論

既存の立体視ディスプレイが持つ解像度と空間分解能のトレードオフを解決するため、両面マイクロミラーの振動を用いた透過型多眼立体視ディスプレイという新手法を提案した。この手法の一番重要な構成要素である両面マイクロミラーに関して、外部磁場とローレンツ力の両方で駆動可能な、画素と同サイズのマイクロミラーを設計・試作した。試作したマイクロミラーに関して、外部磁場及びローレンツ力による起き上がり角を測定し、上記手法で用いるのに十分な可動範囲を持っていることを確認した。また、隣り合う一対のミラーで一回ずつ反射させることで、基板を透過して光軸を振動させることが可能であることを確認した。

### 参考文献

- [1] J. Yan, S. T. Kowel, H. J. Cho, C. H. Ahn, G. P. Nordin, and J. H. Kulick, "Autostereoscopic three-dimensional display based on a micromirror array," Applied Optics, vol. 43, pp. 3686-3696, 2004.

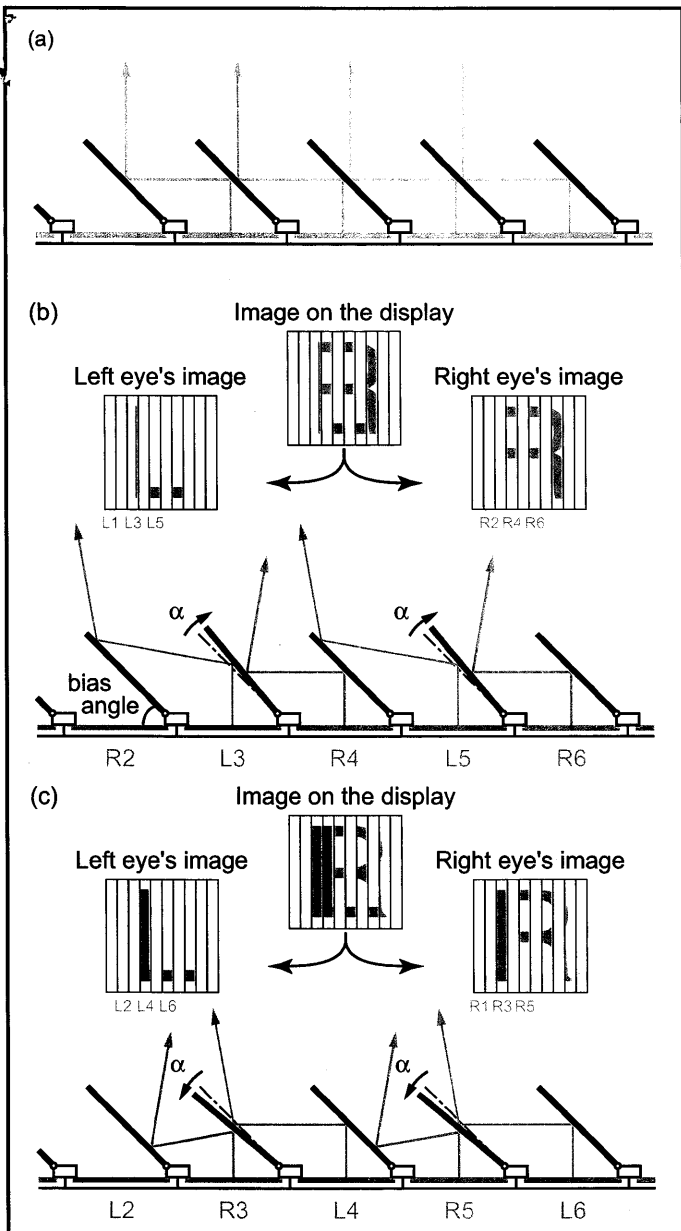


Fig. 1. 両面マイクロミラーの振動を用いた透過型多眼立体視ディスプレイの原理. (a): 全てのミラーが45度で固定されている場合, (b): 可動ミラーだけが上方に $\alpha$ 度だけ傾いている場合, (c): 可動ミラーだけが下方に $\alpha$ 度だけ傾いている場合

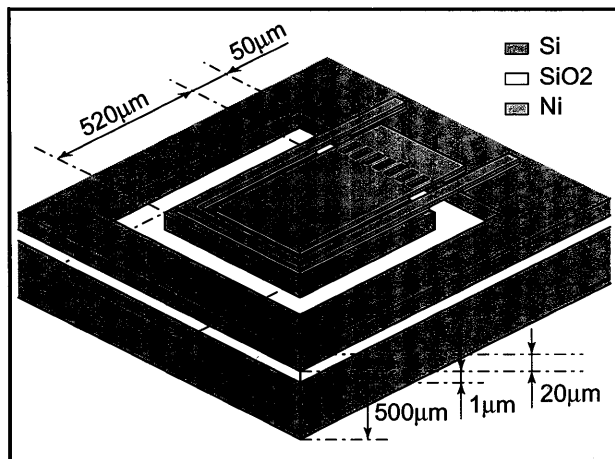


Fig. 2. 設計したマイクロミラーの概略図. ミラーはSi, SiO<sub>2</sub>及びNiから構成され, ミラー面のサイズは450  $\mu\text{m}$ ×520  $\mu\text{m}$ , ヒンジ部の長さ, 幅, 厚さはそれぞれ50  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 150 nmである.

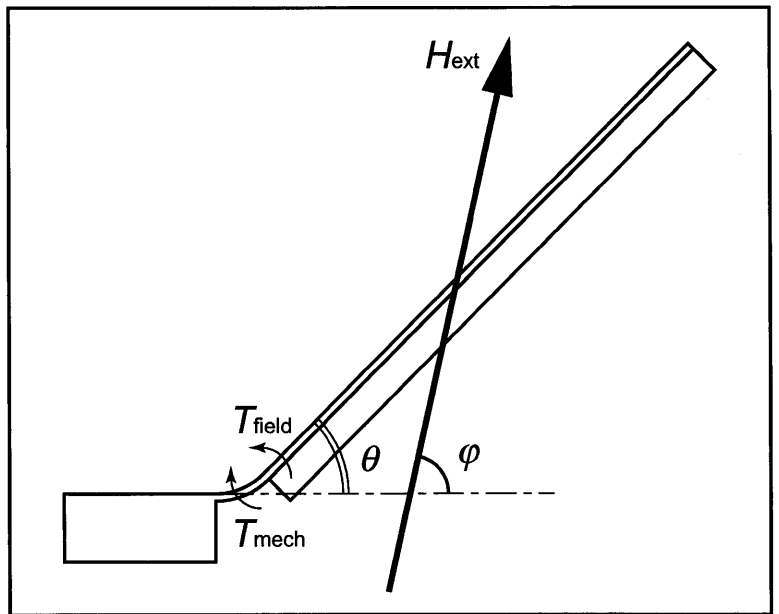


Fig. 3. 弾性ヒンジを持つ片持ち梁構造のモデル

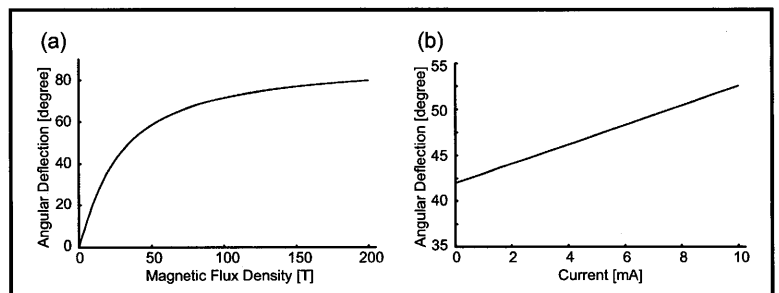


Fig. 4. Mathematicaで数値計算により求めた理論線. (a): 磁束密度とミラーの起き上がり角の関係, (b): 配線に流す電流とミラーの起き上がり角の関係

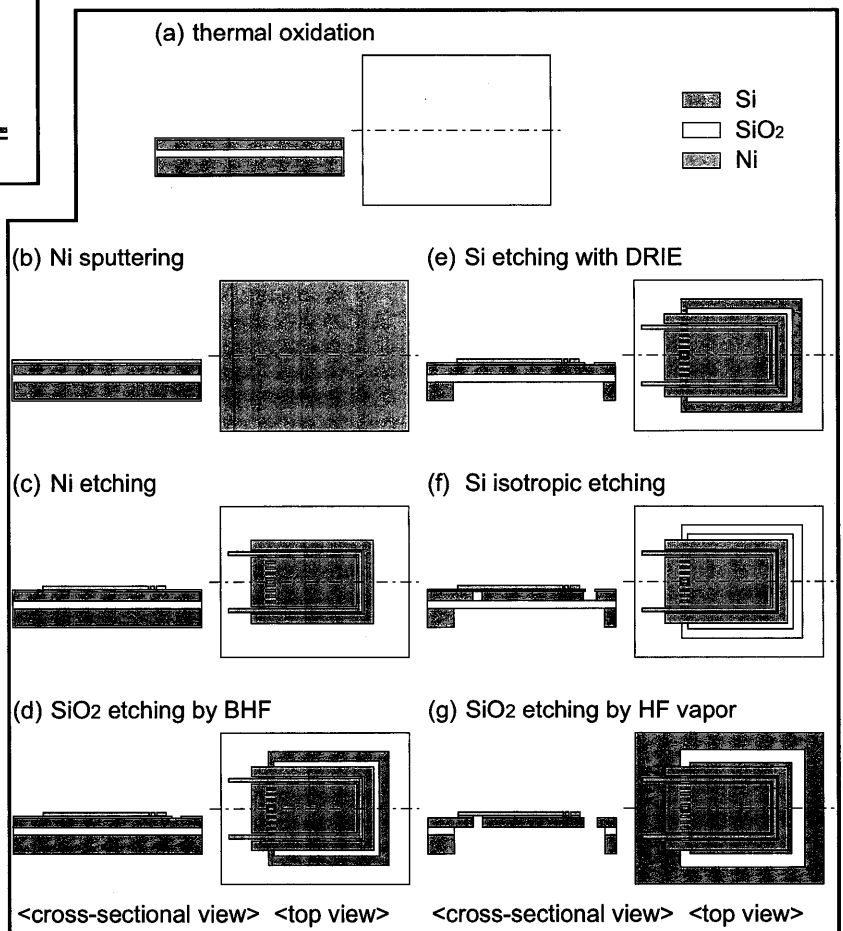


Fig. 5. マイクロミラーの製作プロセス.

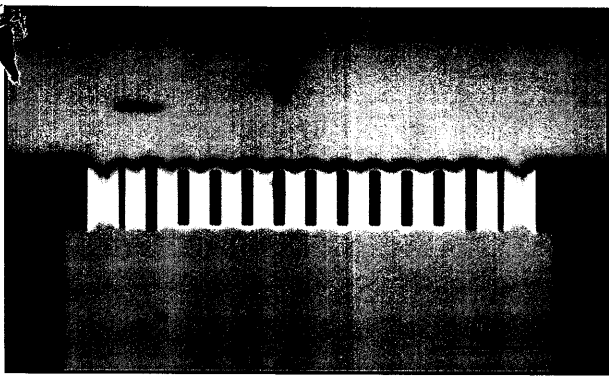


Fig. 6. 等方性エッチング後のヒンジ部の様子(裏面から撮影).

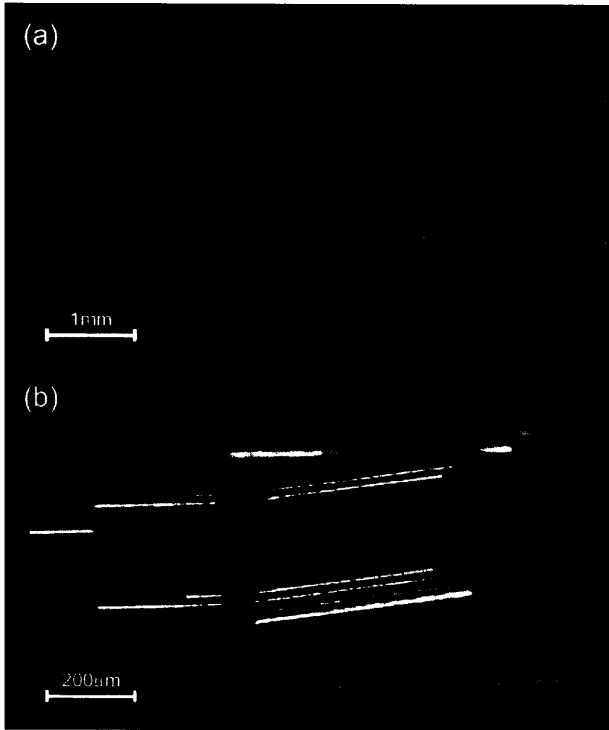


Fig. 7. 製作したマイクロミラー. (a): 全体図, (b): 拡大図

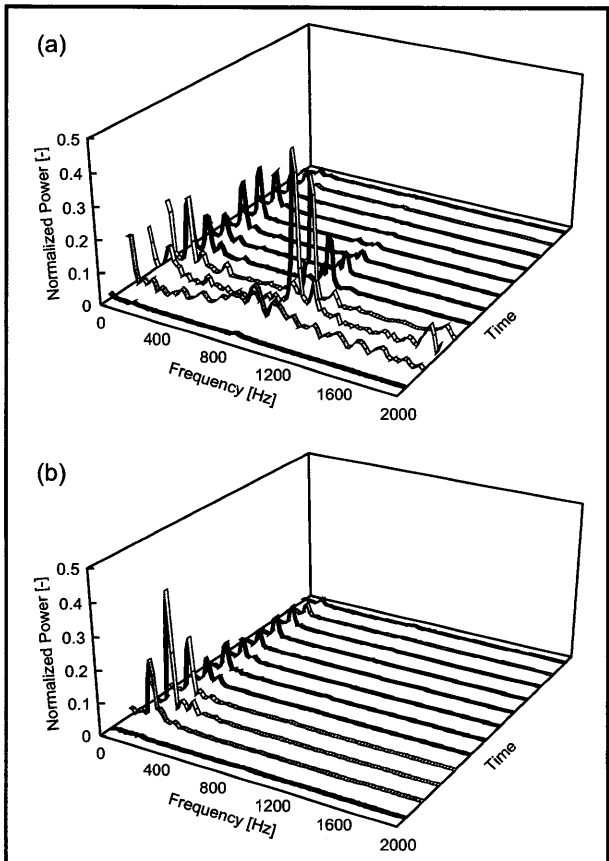


Fig. 10. 共振周波数測定の実験結果. (a): ミラーを固定している軸を加振した場合, (b): 系全体を加振した場合

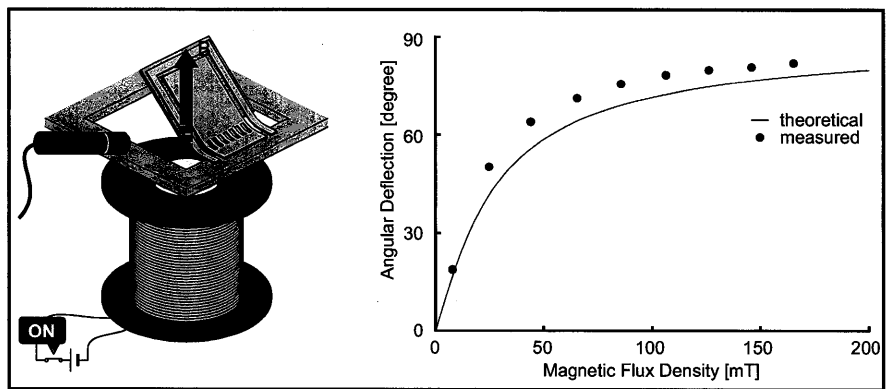


Fig. 8. 外部磁場の強さとミラーの起き上がり角の関係.

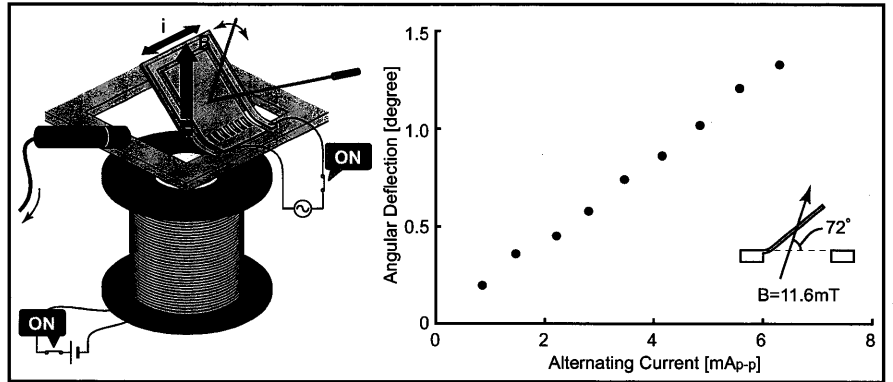


Fig. 9. 配線に流す電流とミラーの起き上がり角の関係.

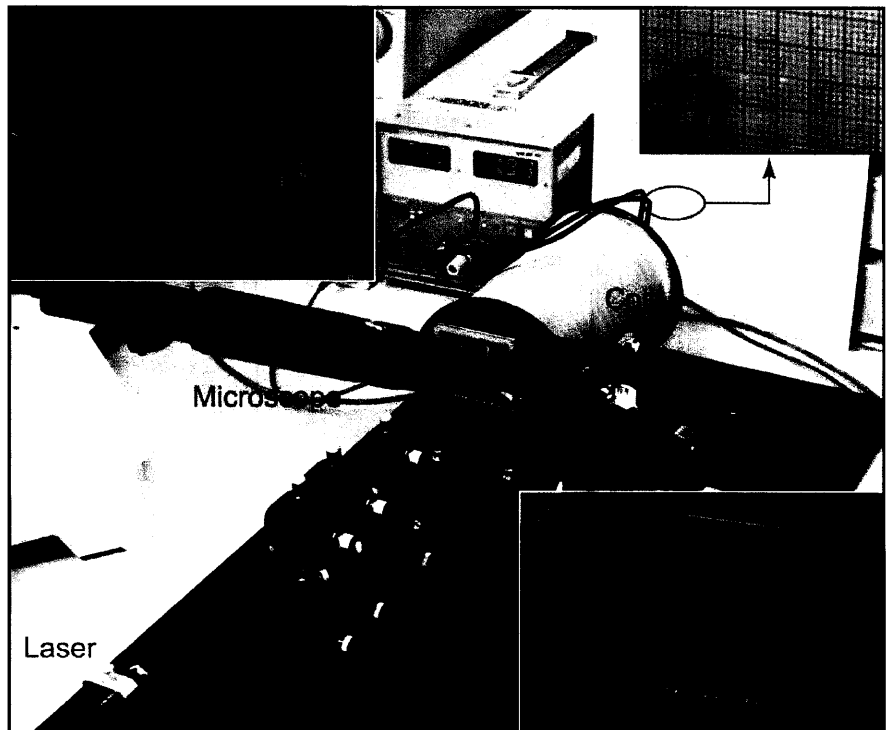


Fig. 11. 隣り合う一対のミラーを用いた2回反射の実験. 二つあるスポット光のうち、一つはミラーの外周部を透過して直接スクリーンに達したもので、もう一つはミラーで2回反射された結果到達したものである.

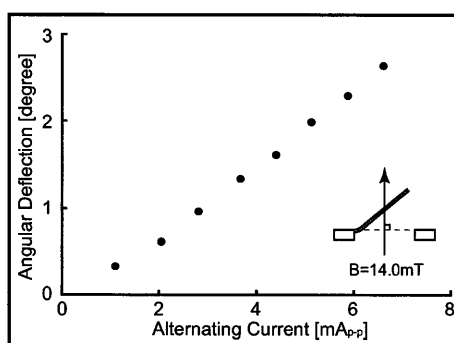


Fig. 12. 配線に流す電流と光軸の角度変化の関係. ミラーの角度変化のほぼ倍の値が得られている.

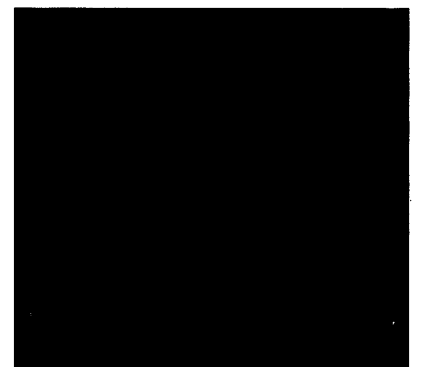


Fig. 13. 製作した立体視ディスプレイのプロトタイプ.