干渉型ディスプレイデバイスの駆動性能向上

正 員 小口 寿明 (東工大 精研)

非会員 早瀬 仁則 (東工大 精研)

正 員 初澤 毅 (東工大 精研)

Driving performance improvement of the interferometric display device (IDD)

OGUCHI Toshiaki, Member, HAYASE Masanori, Non-Member, HATSUZAWA Takeshi, Member
(Tokyo Institute of Technology, Precision and Intelligence Laboratory)

Performance of the IDD, which is one kind of display device, has been improved. The IDD consists of a driving half mirror and a substrate mirror, which construct an interferometer. It is possible for the IDD to create all the colors of the rainbow in only one pixel. To realize the device, a parallel driving and a precise flatness are required for the driving mirror. To solve those problems, a new structure is proposed in this paper. With respect to the new structure, light interference in the pixel is caused by an optical path difference between the driving half mirror suspended by leaf-springs and a floating half mirror isolated electrically by SiO_2 layers. The driving mirror can be moved by the voltage applied between the driving mirror and a transparent electrode which is located under the floating mirror. This structure contributes to the removal of the hysteresis mirror movement, realization of stable driving and higher display contrast. By experiments using fabricated IDD, improvements of interferometric characteristics and hysteresis property are confirmed.

キーワード： ファブリーペロー干渉計，ディスプレイデバイス，静電駆動

Keywords： Fabry-Perot interferometer, Display device, Electrostatic drive

1. はじめに

干渉型表示素子 (IDD; Interferometric Display Device) は，静電駆動型マイクロハーフミラーを多数集積し，光の干渉色によって生じるコントラスト変化を利用するディスプレイデバイスである。これは，一画素で多彩なカラー表示を行うため，従来の RGB 区間分割型カラー表示方式に比べて画素集積度が向上する可能性があり，高速応答とともに低電力化が期待できる。また，純機械的な動作原理によって動画表示を行うため，素子構造が単純である。これまでに，フィゾー干渉計を用いた IDD の試作，動作原理の確認を行ってきた[1]。しかし，作製された素子は作動変位が大きく駆動電圧が大きい，ヒステリシスを生じ動作が不安定である，全画素開口部に対するミラー部分の面積比が小さい，表示コントラストが小さい，ミラー上にリング状の干渉縞を生じるなどの問題点があった。特に光波干渉を実現可能とする高精度なミラー平面度，ミラー並進性が要求されることはデバイスプロセス上で大きな障壁となっている。

そこで本論文では，新しい干渉型表示素子 (IDD) の構造を提案し，上記のような問題点を改善することを主な目的としている。新しい構造では，両もちはりで支持された駆動ハーフミラーは，透明電極との間に作用する静電力によって駆動し，その間に置かれた電氣的に孤立したフローティングハーフミラーとの間で光波干渉を起こす。この構造は，ヒステリシスの除去，駆動特性の安定化に寄与する。

また本素子では，光透過型のファブリーペロー干渉計 (Fabry-Perot Interferometer: FPI)を採用する[2]。これによりコントラストの向上，表示色の鮮明化が期待される。また，駆動ハーフミラー上に金属を成膜することによって発生する内部応力を軽減するため，Au を少しずつスパッタリングして伝導性と反射率を与える。以下本論文では，まず新しい構造の利点について述べる。次に最適な設計指針を与える。続いてプロセス手法を示し，試作した素子の動作特性の評価と考察を行う。最後にまとめを行う。

2. IDDの原理と構造の改善

前節で述べたような問題点を解消し，駆動特性と表示特性の向上を図るため，新しい構造を提案する。前報と大きく異なる点は，ガラス基板を用いること，従来基板上に置かれた反射ミラーを兼ねている伝導層を伝導と反射の二層に分離することである。

図1に干渉型表示素子の原理図を示す。大きく上部シリコン基板と下部ガラス基板から構成される。従来と同様に，両もちはりで支持された駆動ハーフミラーは基板との間に働く静電吸引力によって基板側へ変位する。駆動ハーフミラーの位置を上下方向に制御すれば，基板側に置かれたミラーとの光路差に従って光波干渉が起こる。波長 λ の単色光を用いた場合，駆動ハーフミラーが $\lambda/4$ 上下すると明暗のコントラスト変化が生じる。白色光を用いれば，干渉色によるカラー表示が可能である。今回はコントラスト向上のため，ガラス基板の裏面より光を入射する透過型のファ

図1 干渉型表示素子の原理図

Fig. 1 Principle of the IDD

図2 IDDの構造

Fig.2 Structure of the IDD

ブリーペロー干渉計を採用する。これは特定波長で選択的に強い透過光が得られ、カラー表示に有利である。新しいIDD構造の詳細を示すため図1の一部（四角枠内部）を図2に拡大して示す。図2(a)に示すように、シリコン基板上の駆動ハーフミラーは、SiO₂を母材とし、その上に成膜したAuにより伝導性と反射率を与える。一方ガラス基板は、対向電極とハーフミラーの二層をもつ。対向電極には透明伝導膜であるITOを用いる。絶縁層としてSiO₂を用いる。基板中のハーフミラーは、絶縁膜内部に埋められたAl薄膜である。このAl層は電氣的に孤立しているため、以下ではこれをフローティングハーフミラーと呼ぶ。前報では、駆動ハーフミラーが基板電極に近づき静電力がバネ復元力を越えると引き込みによるヒステリシス駆動が生じ、素子の駆動と干渉光表示が不安定であった。そこで、絶縁層を厚くとり電極層を駆動ハーフミラーから離して引き込みの除去を行う[3-4]。これにより駆動特性の安定化が期待される。また白色光源を用いる場合、駆動ハーフミラーとフローティングハーフミラーの光路差がコヒーレンス長を越えない程度に小さい方が望ましい。そのため、フローティングハーフミラーは、絶縁層内部で駆動ハーフミラーに近い位置に作製する。

以上のように、電極としての機能と光学反射面としての

機能を分離した適正な配置によって、素子の駆動と干渉光表示が安定することが期待される。また、電氣的に孤立しているAl層は、反射率の簡単な調整に寄与する。

3. 素子の設計

<3.1> 光学設計 一对の平行平板ミラーから成るファブリーペロー干渉計(FPI)型のIDDの光学的な設計指針を以下に示す。問題を簡単にするために、図2(a)のように光学的多重反射が、AuとAlの二枚のハーフミラーでのみ起こると仮定する。すなわち以下のような近似を行う。

- ・AuとAlのエネルギー反射率 R_{Au} , R_{Al} , エネルギー透過率 T_{Au} , T_{Al} のみを考慮し、位相変化を無視する。
- ・SiO₂と空気の界面における透過率を1とする。
- ・光吸収、損失を無視する。

以上のモデルの模式図を図2(b)に示す。このモデル下では、IDDのエネルギー透過率 T は次式となる。

$$T = \frac{(1 - R_{Au})(1 - R_{Al})}{(1 + R_{Au}R_{Al} - 2\sqrt{R_{Au}R_{Al}}\cos(\delta))}, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{4\pi n_{air}}{\lambda} (y + \frac{n_{SiO_2}}{n_{air}} d_f)$$

ただし、SiO₂と空気の屈折率を $n_{SiO_2}=1.46$, $n_{air}=1$ とする。図3に、横軸にミラーの変位をとったときのエネルギー透過率の計算結果を示す。位相は最小値が零になるようにとっている。最適なコントラストを得るためには、上式より二枚の金属ハーフミラーの反射率 R_{Au} , R_{Al} が等しく、透過率が低い方が望ましい。しかし、透過率が低いと光効率が下がるため、より強い光源を必要とする欠点がある。

<3.2> 駆動設計 図2(a)に示すような $x-y$ 座標系をとる。ITOからAlまでの静電容量を C_{sub} , Alから駆動ハーフミラーまでの静電容量を C_{var} とすると、等価的に全静電容量 C は、 C_{sub} と C_{var} の直列コンデンサーとなっているため、 S をコンデンサーの面積、 ϵ_0 , ϵ を空気、SiO₂ の誘電率として次式で表される。

$$C = (\frac{1}{C_{var}} + \frac{1}{C_{sub}})^{-1} = \frac{\epsilon_0 S}{y + \frac{\epsilon_0}{\epsilon} d_i} \quad (2)$$

ここで、Al層の厚さを無視すれば上式のとおりフローティングハーフミラーの有無によらず静電容量は等しい。上の結果は、理想的にはフローティングハーフミラーによって駆動特性は変化しないことを意味している。引き込み制御定数 K を次式で定義する。

$$K = \frac{(\epsilon_0 S/d)}{(\epsilon S/d_i)} = \left(\frac{d_i}{\epsilon d} \right) \quad (3)$$

これは、駆動範囲 d と絶縁層の厚さ d_i のコンデンサー容量の比となっている。駆動ハーフミラーに作用する外力は静電力とバネ復元力である。従って支持はりのバネ定数を k とすると、力のつりあいは次式となる。

$$F = 0 = F_e + F_k = -\frac{\epsilon_0 S V^2}{2(y + Kd)^2} + k(d - y) \quad (4)$$

図3 FPIのエネルギー透過率の計算

Fig. 3 Calculation results of FPI energy transmittance

図4 駆動ハーフミラーの位置と電圧

Fig.4 Mirror position dependence on applied voltage

引き込みを回避するためには、各電圧 V に対する平衡点が安定である必要がある。すなわち、ポテンシャルエネルギーの極小値において二回微分が正となればよい。この条件を満たすミラー位置 y は次式を満たす[5]。

$$y > d \times \frac{2-K}{3} \quad (5)$$

従って、 K の値を $K > 2$ と設定すると、引き込みを除去することができる。図4に、様々な K 値に対して、無次元化されたミラー変位 y/d と電圧 V の関係を示す。実線は安定領域、破線は不安定領域を示している。 $K > 2$ をとり、引き込みを除去する代償として駆動電圧が高くなる。空気中と SiO_2 の誘電率比は約4程度なので、駆動範囲 d と絶縁層の厚さ di の比を8程度にすれば、引き込みが起こらず、ミラーは印加電圧に対して安定に動作できる。

4. 素子の作製

<4. 1> 素子の作製プロセス これまでに述べた構造設計を採用して、マイクロマシニング技術によりIDDを作製した。試料の作製手順を図5に示す。駆動ハーフミラーは、(100) Si 基板上に $2\mu\text{m}$ 厚の熱酸化 SiO_2 膜を用い、電

図5 新しい構造によるIDDのプロセス手法

Fig.5 A novel fabrication process of the IDD

図6 IDDの光学顕微鏡写真

Fig.6 Optical micrograph of the IDD

図7 駆動ミラーの形状測定

Fig.7 Contour of driving half mirror

子線リソグラフィーによりミラー形状にレジストをパターンニング後、フッ酸緩衝液 (BHF) を用いて SiO_2 をエッチングし、TMAH (Tetra Methyl Anmonium Hydroxide) 15 wt% 水溶液中で Si 基板を穴あけエッチングして作製した。また、伝導性確保のために Au を 50nm スパッタリングした。透過率は 0.85 である。作製した試料の光学顕微鏡写真を図6に示す。ミラーのサイズは約 $100\mu\text{m}$ 角である。断面形状を共焦点顕微鏡で測定したところ、応力によるミラーのたわみは、最大で $0.2\mu\text{m}$ 以内であった。形状測定の結果を図7に示す。ガラス基板の作製は、カバーガラス (厚さ 0.15mm) 上に ITO をスパッタリングし基板電極を作製後、TEOS-CVD で SiO_2 を $3.5\mu\text{m}$ 成膜する。この後、フローティングハーフミラーとなる Al をスパッタし透過率を 0.85 に調整する。さらに絶縁層となる SiO_2 を

TEOS-CVD により $0.5\mu\text{m}$ 成膜する。最後に両基板は、ねじによって締め付けが可能な二枚の亚克力板の間に機械的に固定し、空気ギャップを調整する。その後、銀ペーストで配線をした。ただし、固定後フローティングハーフミラーが他の電極と絶縁されていることを確認している。

＜4.2＞ 応力緩和 作製した駆動ハーフミラーは Au をスパッタリングし伝導性と反射率を与える。一回のスパッタでミラーに堆積する Au の膜厚を 10nm とし、ミラーが加熱される時間を短くして熱残留応力を緩和する[6]。

5. 実験結果と考察

前節に述べたプロセスで作製した素子の表示特性を光学顕微鏡, CCD カメラによって構成される顕微鏡系をもちいて観察した。はじめに光源に半導体レーザーを用いて、素子に DC 電圧を印加したところ 0V で暗状態, 10V で明状態が観測された。一画素の IDD の ON, OFF 状態の顕微鏡写真を図 8 に示す。ON 状態では一画素内部に駆動ハーフミラーのたわみに起因する表示むらがみられるものの、画素内にはっきりとした干渉縞がみられない。このため、ミラーの平面性と並進性が光の波長オーダー程度に満足されていると考えられる。次に動特性を把握するため、図 9(a) に示す実験系で動作評価を行った。これは作製した素子を固定する亚克力板は剛性を要し肉厚で、高倍率な測定が不可能な理由による。IDD の電圧供給源としてファンクションジェネレータを用いた。光強度測定は定性的ではあるが、CCD カメラからの画像信号をモニターに表示させ、モニター上に接触させたフォトダイオードにより測定した。図 10 に、入力電圧（振幅 10Vp-p 、振動数 2Hz）に対する素子の光強度変化を示す。（左図：ステップ入力、右図：正弦波入力）。両結果とも、電圧入力に追従して素子駆動が行われている。また静電力がバネ復元力を越えることに起因するヒステリシス特性はみられない。これは本論文で提案する IDD の構造が、印加電圧によるほぼ一意的な表示制御を可能にし、素子の安定駆動に貢献していることを示す。原理でも述べたとおりヒステリシス駆動除去の代償として駆動電圧は上昇する。しかし本素子では、オンオフ動作に必要なミラーの駆動変位は、干渉原理により波長の $1/4$ 程度と小さい。そのため最大コントラストをもってオンオフに要する印加電圧は 10V 程度と電池駆動が可能な程度に低い結果を得ている。支持はりのバネ定数を低くすれば、さらに低電力駆動が可能であると考えられる。

次に素子のカラー表示特性を評価するため、図 9(b) に示すような実験系を構成し光強度の測定を行った。光源に白色光（ハロゲンランプ）をもちいた場合、測定対象とした画素では 0V, 50V では緑表示が 10 から 20V 付近では赤の表示系統色の表示が可能である。各スペクトルに分けて光強度の測定を行うため、光源に赤、緑、青色の LED を用いた。この実験系を用いた場合の光強度の測定算出手順を以下に述べる。まず電圧駆動した素子の表面画像を光学顕微鏡と CCD カメラを用いて PC に取り込む。その後、

On state (10V)

Off state (0V)

図 8 IDD のオンオフ状態の観察

Fig.8 Observation on and off state of the IDD

(a) Driving evaluation

(b) Display evaluation

図 9 実験測定系

Fig.9 Experimental setup

図 10 IDD 光出力の電圧応答

Fig.10 IDD light intensity dependence on voltage

一画素開口部に対応して 100×100 ピクセル分のビットマップ画像を 256 階調の RGB 成分に数値変換する。各 RGB 成分に対する 100×100 ピクセル分の総和(最大 2.56Mbit)を各 RGB 成分の光強度 I とする。以上の手法で測定算出した光強度の測定結果を図 11 に示す。印加電圧は 0 から 50V まで上昇させ、再び零に戻している。図 11 ではこの電圧変化の過程にあわせて時系列に横軸をとっている。図中の各々赤、緑、青の光強度は、それぞれ RGB 信号の R, G, B 成分を示す。電圧上昇時と下降時では、光源の光強度変化や電荷のチャージングなどによって、電圧値に対し光強度 I は完全には一致しないが、引き込み特性は見られない。各信号の光強度変化の部分的にみられる変動は、ミラーのたわみが原因と考えられる。これらを元に画素のコントラスト c について、次式を用いて評価する。

図 11 静電圧による IDD の RGB 光強度

Fig.11 RGB intensity change dependence on DC

表 1 コントラストの算出結果

Table 1 Contrast of the IDD

	Semiconductor Laser	LED (Red)	LED (Green)	LED (Blue)
Wave length λ	670nm	626nm	525nm	473nm
$(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$	23% (max 30%)	18%	3%	8%
$I_{\min} : I_{\max}$	1 : 1.6	1 : 1.4	1 : 1.1	1 : 1.2

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6)$$

ただし、 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ は電圧に依存した光強度 I の最大値、最小値である。表 1 に、上式より算出されたコントラストをまとめる。長波長の赤色 LED に比べ、緑青系統のコントラストが低い。これは光干渉が、より短波長の光で高い精度を要求することが原因と考えられる。コントラストは長波長で光強度も強い半導体レーザーを光源とした場合が大きく、全画素の平均値としては 0.23 を得ている。特に強度変化の大きい部分では、最大コントラスト 0.30 を得ており、前報の 0.05 と比較すると大きく向上している。なお、RGB 信号のそれぞれについてコントラストを算出し比較すると、赤い光源では 1 割程度違い、緑、青ではほぼ同じである。出力光が大きく変化せず、単色光源を測定に用いていることから、ある程度のリニアリティは保証されると思われるが、今後はフォトダイオード等を用いて光出力の直接測定を行っていく必要がある。

以上のように新しい IDD 構造をもつ素子を試作し駆動した結果、静電力に起因する引き込みは観察されず、ヒステリシスの除去と表示色の安定化がはかられ、本論文で提

案した構造の有用性が確認できた。しかし一方で、コントラストや消光比が低い、入力電圧の絶対値によってカラー表示色を制御できない、駆動ハーフミラーの並進性にばらつきがあるなどの問題点がある。そのため今後は、陽極接合などの手法により貼り合わせを確実に行ってキャップ間隔を一定し、安定な駆動を実現することや反射率など光学係数の最適化を行ったプロセスが必要であると考えられる。

6. まとめ

IDD の駆動特性を改善するために、新しい構造を提案した。これに基づき IDD を作製し駆動を行ったところ、静電力による引き込み特性が改善され、駆動ハーフミラーが安定に動作し RGB 表示が可能であることを確認した。最大コントラストは、2Hz 周波数、10V 振幅で 0.3 が得られた。今後は貼り合わせプロセスや光学係数の最適化、測定系の改善を考慮する必要がある。

(平成 13 年 9 月 25 日受付, 平成 14 年 1 月 23 日再受付)

文 献

- [1] 初沢, 後藤, 小口, 早瀬: 電気学会論文誌 E Vol.119-E, 631-635(1999) “干渉型表示素子の提案と動作原理の確認”
- [2] 土谷, 金子, 越本, 新井: 電気学会論文誌 E Vol.120-E, 252-257(2000), “キャビティ長可変ファブリ・ペロー干渉計を用いたカラー表示装置の表示特性に関する検討”
- [3] 小口, 早瀬, 初沢: 電気学会論文誌 E Vol.120-E, 398-404(2000) “一様曲げモーメントをもつ静電駆動微細はりの変形解析”
- [4] 小口, 早瀬, 初沢: 電気学会論文誌 E Vol.120-E, 498-502(2000) “一様曲げモーメントをもつ静電駆動微細はりのヒステリシス特性解析”
- [5] J.I.Seeger and B.E.Boser: Transducers '99 June, 474-477(1999), “DYNAMICS AND CONTROL OF PARALLEL-PLATE ACTUATORS BEYOND THE ELECTROSTATIC INSTABILITY”
- [6] 小口, 早瀬, 初沢: 電気学会 E 部門総合研究会, MSS-00-24(2000.12.20) “スパッタリングと加熱による SiO₂ 微細はりの曲げ形状の作製”

小口 寿明

(正員) 1972 年 12 月 30 日生。1998 年、東京理科大学大学院修士課程修了。1998 年 4 月より東京工業大学精密工学研究所技官。半導体微細加工とマイクロマシンの開発に従事。

早瀬 仁則

(非会員) 1969 年 7 月 27 日生。1997 年、東京工業大学大学院博士課程修了。1997 年 4 月より東京工業大学精密工学研究所助手。博士(工学)。マイクロマシン、微細加工の研究に従事。

初沢 毅

(正員) 1983 年、東京工業大学大学院修士課程修了。工業技術院計量研究所を経て、1995 年より東京工業大学精密工学研究所助教授。2002 年より同教授。博士(工学)。微細加工を応用したセンサ開発などに従事。