静電2軸MEMS光スキャナの絶縁構造

Two-Dimensional Optical MEMS Scanner with Novel Electrical Insulation Structure

河野	清彦*	•	萩原	洋右*	•	上田	英喜**	•	野毛	宏***
Kiyohiko Kawano		Yousuke Hagihara			Hideki Ueda			Hiroshi Noge		

MEMS 技術を用いて静電垂直コムによって駆動する2軸光スキャナにおいて,SOIウェハの上部シ リコン層に溝を掘り,溝下方の埋込酸化膜と裏面支持基板を残したまま可動フレーム内の絶縁構造を 形成することで,製造プロセスを大幅に簡略化し,高い電気的な絶縁性を得ることができた。その結果, 4 mm 角以下のチップサイズで,可動フレームの慣性モーメントを増すことができ,70 Hz 以下の低周 波数での共振動作を実現するとともに,最大機械振れ角±11°以上が可能となった。 またレーザ光線を作製した光スキャナに入射し,2次元ラスタ走査することで,QVGA (320 × 240

画素)レベルの画像表示を実現している。

In the two-dimensional optical scanner driven by MEMS-based electrostatic vertical combs, the manufacturing process has been substantially simplified while obtaining high electrical insulation by trenching the top silicon layer of an SOI wafer and forming an insulation structure in the movable frame by leaving the buried oxide layer and the bottom silicon support layer underneath. As a result, the inertial moment of the movable frame has been increased even with the 4 mm x 4 mm chip size. The manufactured device achieves a low-frequency resonating operation of 70 Hz or below, and a maximum mechanical scanning angle of $\pm 11^{\circ}$ or greater.

The device is also capable of image displays at a QVGA level (320 x 240 pixels) by applying an incoming laser beam to the optical scanner and two-dimensional raster scan.

1. まえがき

近年, MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を採用した光スキャナの研究が盛んに行われている¹⁾。 たとえば, この MEMS 光スキャナをレーザ走査表示に応 用すると, 従来の投影用レンズ光学系が不要となり, 携帯 機器への組込みも可能な小型プロジェクタの実現が期待で きる。また2次元の光走査でも, 従来は1軸のガルバノミ ラーの組合せにより光学系が構成されていたのに対し, 2 軸 MEMS 光スキャナでは1チップで可能なため, 光軸ず れなく小型の光学系の構成が期待できる。

これまでに研究開発されてきた MEMS 光スキャナの駆動方式は、①静電方式、②電磁方式、③圧電方式の三つに 分類される。筆者らが開発している静電方式は小型、低消 費電力、および制御が容易な点で他の方式より優れている²⁾。 静電 2 軸 MEMS 光スキャナとは静電力により 2 軸が独 立して回転運動が可能な微小光反射鏡で,図1にその構造の概念図を示す。



^{*} 先行技術開発研究所 Advanced Technologies Development Laboratory

^{**} 制御機器本部 制御技術応用研究所 Automation Controls Technology Application Development Laboratory, Automation Controls Business Unit

^{***} 新規商品創出技術開発部 New Product Technologies Development Department

y 軸方向の回転機構は中央のミラーとそれをねじれヒン ジで軸支する可動フレームから成る。ミラー駆動用のパル ス電圧を可動フレームとミラー間に与えることで静電力が 発生し、ミラーが y 軸を中心にして回転する。x 軸方向の 回転機構は可動フレームとそれをねじれヒンジで軸支する 固定フレームから成る。可動フレーム駆動用のパルス電圧 を可動フレームと固定フレーム間に与えることで、同様に 可動フレームが x 軸を中心にして回転する。

ミラー駆動用と可動フレーム駆動用のパルス電圧を独立 して印加するためには、ミラー電極は可動フレームを介し て外側の固定フレームまで引き出す必要がある。したがっ て、可動フレーム内は機械的には一体であるが、電気的に は絶縁されている構造としなけなければならない。

図2に従来の絶縁構造^{2).3)}を有する光スキャナの断 面図を示す。これはSOI (Silicon on Insulator)ウェハの 上部シリコン層に溝を掘り,溝の側壁を酸化した後にポ リシリコンを埋め込むことによって形成されている。し かし、この構造では溝のアスペクト比が大きいとCVD (Chemical Vapor Deposition)法等を用いての完全な埋込 みが困難なため、電気的な絶縁性や機械的強度が不十分と なる問題がある。

また表示器への応用を考慮した場合,水平走査を行うミ ラーと垂直走査を行う可動フレームの共振周波数比が大き くなるほど走査線数が増え,より高精細な画像表示が可能 となるため,可動フレームの共振周波数は低いほうが望ま しい。共振周波数を下げるためには,従来の構造では可動 フレームを支持するねじれヒンジのばね定数を小さくする か,慣性モーメントを増加させる方法があるが,前者には 強度や加工精度に限界がある。後者については可動フレー ムサイズを大きくするしか方法がなく,結果的にチップサ イズが大きくなってしまうという問題がある。



これらの問題を解決するため,筆者らは裏面支持構造を 有する独自の絶縁構造を開発した。本構造により電気的な 絶縁性に優れ,チップサイズが小型で,かつ可動フレーム の共振周波数が低い光スキャナを開発した。本稿では,そ の構造,作製手順,振動モード解析結果,および光スキャ ナの特性について述べるとともに,表示器への適用例につ いても報告する。 2. 光スキャナの基本構造

2.1 構造の詳細

図3に開発した光スキャナの構造を示す。



(a)上面斜視図



(b)コム電極とねじれヒンジの拡大図





(d) A-B 断面図
図3 光スキャナの構造

中央のミラーの直径は1 mmで, その両端はねじれヒン ジによって軸支されている。また, ミラーの周囲には短辺 が2.5 mm, 長辺が3.0 mmの長方形型の可動フレームが 設けられ, 長辺中央でねじれヒンジにより軸支されている。 さらに, 垂直方向の静電トルクを印加するためのコム(櫛 歯)電極がミラーの外周と可動フレームの短辺外側に配置 されている²⁾。可動フレーム上の絶縁構造は, 埋込酸化膜 と下部のシリコン支持基板層を残したまま上部のシリコン 層のみエッチングで溝を掘ることで形成される。また, ミ ラー電極を外側の固定フレームまで引き出すための配線は, エッチングによって固定フレーム上部のシリコン層に溝を 掘ることで形成され, 給電パッドに接続される。

2.2 作製手順

ミラー,コム電極,およびねじれヒンジは,SOI ウェハ の上部シリコン層(厚み 30 ~ 35 µm)に ICP(Inductively Coupled Plasma) エッチングを行うことで作製される。ま た同時に,可動フレーム上に 20 µm 幅の溝を掘り絶縁構造 を形成する。この方法により,従来のポリシリコン埋込構 造に比べて,きわめて容易に絶縁構造を形成できる。なお, SOI ウェハの埋込酸化膜の厚みは 2 µm である。

次に、SOI ウェハの支持基板層(厚み400 μm)の固定 フレームと可動フレームを除く部分に ICP エッチングを行 い、裏面支持構造を形成する。従来の2軸光スキャナと異 なり、可動フレームは質量の大きい裏面支持構造と一体と なっているため大きな慣性モーメントを有しており、チッ プサイズを大きくせずに共振周波数を下げることができる。 さらに、裏面支持構造の厚みを調整すると慣性モーメント が変化して可動フレームの共振周波数の調整が可能となる ので、裏面支持構造部のみは必要に応じて追加の ICP エッ チングを行う。

高い光学反射率を得るため、ミラー上にアルミニウム薄 膜を形成し、また配線のため給電パッド上にもアルミニウ ム薄膜を形成する。さらに、フッ酸で不要な酸化膜を除去 して可動部をフリーにする。

2.3 振動モード解析

この可動フレームは,鉛直断面で見ると2本のねじれヒ ンジに沿った回転軸に対して非対称な構造であるため,ね じれ振動の安定性についての懸念がある。そこで,典型的 な可動フレームについて有限要素法により低周波数側から 5次までの振動モード解析を行う。ただし,共振周波数へ の影響は少ないとみなし,エアダンピングの効果は無視す る。図4に解析した振動モード図を,表1に各振動モード に対する共振周波数を示す。ねじれ振動モードについては, 比較のため実測値(サンプル20個の平均)も載せている。

最低次の振動モードであるねじれ振動モードの共振周波 数は 75.6 Hz であり,他の高次の振動モードの共振周波数 (640 Hz 以上)と比較してきわめて低い。したがって,他の高次の振動モードの影響を受けにくいため,安定なねじれ動作が可能であると考えられる。



図4 5次までの振動モード図

表1 可動フレームの5次までの振動モードと共振周波数

振動モ	— К	共振周波数(Hz)				
ねじれ -	計算値	75.6				
	実測値	75.5				
面内平行		640				
面内回転		754				
面外平行		3730				
面外回転		7005				

3. 光スキャナの特性

3.1 電気特性

図5に可動フレーム上の絶縁分離されたミラー電極と可 動フレーム電極間の電流-電圧特性を示す。



図5 絶縁構造の電流一電圧特性

ポリシリコンを埋め込んだ従来品の絶縁構造と開発品の 絶縁構造の特性を比較すると、開発品のほうが大幅に電気 的な絶縁性に優れていることがわかる。主に埋込酸化膜を 介して発生するリーク電流値は100 V印加時に0.8 nA と 微小である。その結果、高電圧でのミラーの駆動が可能と なり、大きな振れ角を得ることができる。

3.2 機械特性

対向するコム電極間に周期的なパルス電圧を印加すると、 ミラーと可動フレームをそれぞれねじれ振動させることが できる。図6に機械振動周波数に対する機械振れ角(水平 面を基準としたときの傾き)の変化の一例を示す。実線は 高周波数側から周波数を掃引し,破線は低周波数側から掃 引した結果である。共振曲線は共振ピーク付近で非対称な 形状であり,周波数の掃引方向に依存するヒステリシスを 有することがわかる。これらの現象は,垂直コム電極を有 する構造において大きく面外へねじれ振動する際に特徴的 に観察されている²⁾。



(b) 可動フレームの特性



図7は、ねじれヒンジの寸法が異なる11個の光スキャ ナサンプルについて、測定した最大機械振れ角を機械共振 周波数の関数としてプロットしている。ミラーの駆動電圧 は100 V,可動フレームの駆動電圧は40 V であり、大気 中で測定を行う。共振周波数はミラーが15.7 ~ 36.8 kHz, 可動フレームは66.9 ~ 89.2 Hz である。 この図から、ミラーの最大機械振れ角は、同じパルス電 Eにおいては一般的な調和振動子と同様、共振周波数の増 加に伴って±7.6°から±2.6°に単調に減少していく傾向 があることがわかる。一方、可動フレームの最大機械振れ 角は共振周波数に依存することなく約±11.8°とほぼ一定 である。

以上のような複雑な共振現象の定量的解明にはさらに検 討が必要であるが、ねじれトルクが振れ角に強く依存する パラメトリック共振系モデルが手がかりとなる可能性があ る⁴⁾。







4. 光スキャナによる表示

光スキャナに入射したレーザ光線を2次元ラスタ走査し た場合の走査線数は、ミラーと可動フレームの共振周波数 の比で決まり、共振周波数比が大きいほど走査線数が増加 するため、高精細な画像表示が可能となる。開発した光ス キャナの大きな特徴の一つは、チップサイズが4mm角と 小型でありながら可動フレームの共振周波数が低いことで ある。その結果、200本以上の走査線数での2次元ラスタ 走査が可能となる。もしミラーと可動フレームの共振周波 数が近い場合には、複雑なリサージュ走査となるので、画 像を表示するためには複雑な制御が必要となる⁵⁾。しかし、 この開発した光スキャナは2次元ラスタ走査が可能である ため、比較的簡単な制御で画像表示ができるという利点も ある。図8にラスタ走査とリサージュ走査の一例を示す。



(a) ラスタ走査(水平:垂直走査周波数 = 10:1)



(b) リサージュ走査(水平:垂直走査周波数 = 10:9)

図8 走査方法の比較

表示用モジュールは,光スキャナチップをTO5 キャン パッケージに実装し,レーザダイオード(波長 635 nm), コリメータレンズ,アパーチャで構成される光源部ととも に筐体(サイズ 25 × 15 × 13 mm)内部に組み込む。図 9に表示用モジュールの概観を示す。



画像表示のデモンストレーションに用いる光スキャナ の,機械共振周波数はミラーが15.3 kHz,可動フレームが 71.7 Hz,最大機械振れ角は大気中で y 軸回り ± 7.1°, x 軸回り ± 11.4°である。なお、ミラーの駆動電圧は100 V, 可動フレームの駆動電圧は40 V である。また、可動フレー ム下部に形成された裏面支持構造は200 μmの厚みに ICP エッチングされている。

画像を表示するために、ミラーを15.6 kHz で振動させ

て水平走査を行い,また可動フレームは78.0 Hz で振動さ せて垂直走査を行う。それぞれの駆動周波数は,水平と垂 直の走査を同期させるため,その比が整数になるように共 振ピークよりわずかに高く設定している。

レーザダイオードは、水平, 垂直方向の駆動パルス信号 に対して適切なタイミングで同期する画像信号によって直 接変調される。歪のない表示を行うためには走査速度がほ ほ一定である必要があるが、実際の光スキャナは正弦波 状の共振振動を行っている。したがって、今回は光学走査 角度の 50 ~ 70 %を表示に使用して歪を少なくしている。 レーザ強度変調のためのシリアル画像信号は、ビットマッ プデータから容易に生成することが可能である。

図 10 は投影表示した画像の一例である。ここでは一般 的なラスタ走査に工夫を加えて、QVGA (320 × 240 画素) 相当の画像分解能を得ている。フィードバック制御を行う ことなく、室温で8時間以上安定な表示を行うことができ る。また、デバイス自体の連続動作試験は5000時間以上 に達している。



図10 光スキャナにより投影表示された画像

5. あとがき

MEMS 技術を用いて静電垂直コムによって駆動する2 軸光スキャナにおいて,SOIウェハの上部シリコン層に 溝を掘り,溝下方の埋込酸化膜と裏面支持基板を残したま ま可動フレーム内の絶縁構造を形成することで,製造プロ セスを大幅に簡略化し,高い電気的な絶縁性を得ることが できた。その結果,4mm角以下のチップサイズで,可動 フレームの慣性モーメントを増すことができ,70Hz以下 の低周波数での共振動作を実現するとともに,最大機械振 れ角±11°以上が可能となった。また,レーザ光線を作 製した光スキャナに入射し,2次元ラスタ走査することで, QVGAレベルの画像表示を実現した。

小型でフォーカスフリーというこの光スキャナの特徴を 活かして、今後新しいアプリケーションへの活用が期待さ れる。表示のみならず、高速のレーザ計測などの分野への 展開も考えられる。

*参考文献

- 1) M. E. Motamedi : MOEMS, SPIE Press, p. 369-451 (2005)
- 2) H. Schenk, P. Dürr, T. Hasse, D. Kunze, H. Lakner, H. Kück : Large Deflection Micromechanical Scanning Mirrors for Linear Scans and Pattern Generation, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron, Vol. 6, No. 5, p. 715–722 (2000)
- J. Kim, D. Christensen, L. Lin : 2-D Scanning Mirror Using Plastically Deformed Angular Vertical Comb Drive Actuator, TRANSDUCERS '05, p. 697-700 (2005)
- H. Urey, C. Kan, and W. O. Davis : Vibration Mode Frequency Formulae for Micromechanical Scanners, J. Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, p. 1713-1721 (2005)
- K.-U. Roscher, H. Grätz, H. Schenk, A. Wolter, and H. Lakner : Low-Cost Projection Device with a 2D Resonant Micro Scanning Mirror, Proceedings of SPIE, Vol. 5348, p. 22-31 (2004)

◆執 筆 者 紹 介



河野 清彦 先行技術開発研究所



萩原 洋右 ^{先行技術開発研究所}



上田 英喜



野毛 宏 新規商品創出技術開発部 博士 (工学)