

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5313666号
(P5313666)

(45) 発行日 平成25年10月9日(2013.10.9)

(24) 登録日 平成25年7月12日(2013.7.12)

(51) Int.Cl.

G02B 26/10 (2006.01)

F 1

G02B 26/10 104Z

請求項の数 10 (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2008-515375 (P2008-515375)
 (86) (22) 出願日 平成18年6月6日 (2006.6.6)
 (65) 公表番号 特表2008-542849 (P2008-542849A)
 (43) 公表日 平成20年11月27日 (2008.11.27)
 (86) 國際出願番号 PCT/IL2006/000657
 (87) 國際公開番号 WO2006/131916
 (87) 國際公開日 平成18年12月14日 (2006.12.14)
 審査請求日 平成21年6月3日 (2009.6.3)
 (31) 優先権主張番号 11/144,842
 (32) 優先日 平成17年6月6日 (2005.6.6)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 312014443
 エスティーマイクロエレクトロニクス インターナショナル エヌ.ブイ.イスラエル、ジュネーブ、ブランーレワト 1228, シュマン デュ シャンデーフィーユ 39
 (74) 代理人 100076185
 弁理士 小橋 正明
 (72) 発明者 クリロヴ、スラヴァ
 イスラエル国 ホロン 58337 シュプリンツァク 29
 (72) 発明者 メディナ、モシエ
 イスラエル国 ハイファ 34792 サリト ストリート 11

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】MEMS装置、光制御方法及びミラー形成方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光ビームを走査するMEMS装置において、

a. 第1の活性層と、シリコン基板層と、該第1の活性層及び該シリコン基板層の中間の第2の活性層とを有する二重活性層シリコンオンインシュレータ(DSOI)基板と、

b. 上記第1の活性層に形成され、ミラー回転軸の回りに最大傾斜角まで傾斜運動を行うミラーと、

c. 上記第2の活性層に形成され、上記ミラーの傾斜運動をさせる少なくとも1つの第1の櫛歯駆動ステータを有する垂直櫛歯駆動アクチュエータとを備え、

上記第1の活性層には、上記ミラーが最大傾斜角の位置にあるときに、該ミラーの傾斜に対して逆方向のモーメントを印加することができる少なくとも1つの第2の櫛歯駆動ステータが形成されており、上記垂直櫛歯駆動アクチュエータは、上記DSOI基板の第1の活性層に形成され、上記ミラーと同一面上に配置され、該ミラーに固定された少なくとも1つのロータを有することを特徴とする、MEMS装置。

【請求項2】

上記少なくとも1つの第2の櫛歯駆動ステータは、上記第1の櫛歯駆動ステータの平面とは異なる平面に形成されていることを特徴とする請求項1記載のMEMS装置。

【請求項3】

上記ミラーを、上記シリコン基板に、その両側で接続する少なくとも1対のバネを更に備えることを特徴とする請求項1記載のMEMS装置。

【請求項 4】

第1の活性層と、第2の活性層と、シリコン基板層とが順に積層された二重活性層シリコンオンインシュレータ(DSOI)基板に形成された反射素子と、該DSOI基板の第1及び第2の活性層のうちの1つの活性層に形成された固定櫛歯駆動素子を有する少なくとも1つの垂直櫛歯ドライブとによって、反射された光ビームのパスを制御する光制御方法において、

上記少なくとも1つの垂直櫛歯ドライブを用いて、上記反射素子が、最大傾斜角の位置にあるときに、該反射素子の傾斜に対して逆方向にモーメントを印加するステップを有し、

上記光ビームのパスを制御することを特徴とする光制御方法。 10

【請求項 5】

上記DSOI基板に形成された上記少なくとも1つの垂直櫛歯ドライブは、

1. 上記DSOI基板の上記第1の活性層に形成され、上記反射素子に固定された少なくとも1つの可動櫛歯駆動素子と、

2. 上記DSOI基板の上記第2の活性層に形成され、上記少なくとも1つの固定櫛歯駆動素子とを有し、

上記可動櫛歯素子と上記固定櫛歯駆動素子は、静電気的に駆動され、上記反射素子を傾斜させることを特徴とする請求項4記載の光制御方法。

【請求項 6】

第1の活性層と、第2の活性層と、シリコン基板とが順番に積層された二重活性層シリコンオンインシュレータ(DSOI)基板に形成された光ビームを走査するMEMS装置において、 20

a. 上記第1の活性層に形成され、ミラー回転軸の回りに最大傾斜角まで傾斜運動を行うマイクロミラーと、

b. 上記第1の活性層に形成されたロータと、上記第2の活性層に形成された第1のステータとを有し、上記マイクロミラーに傾斜運動を行わせる垂直櫛歯ドライブとを備え、

上記第1の活性層には、上記マイクロミラーが最大傾斜角の位置にあるときに、該マイクロミラーの傾斜に対して逆方向のモーメントを印加することができる少なくとも1つの第2のステータが形成されていることを特徴とするMEMS装置。

【請求項 7】

上記DSOI基板に形成された空間には、上記ロータ及び上記ステータが収容される空間が形成されていることを特徴とする請求項6記載のMEMS装置。 30

【請求項 8】

上記ロータが収容される空間は、上記第2の活性層及び上記シリコン基板層を貫いて延びており、上記ステータが収容される空間は、該シリコン基板層を貫いて延びていることを特徴とする請求項7記載のMEMS装置。

【請求項 9】

第1の活性層と、第2の活性層と、シリコン基板層とが順に積層された二重活性層シリコンオンインシュレータ(DSOI)基板に走査マイクロミラーを形成するミラー形成方法において、 40

a. 上記DSOI基板の第1の活性層に上記走査マイクロミラーを形成するステップと、

b. 上記第1の活性層にロータを形成し、上記第2の活性層にステータを形成して、上記走査マイクロミラーが最大傾斜角度の位置にあるときに、該走査マイクロミラーの傾斜に対して逆方向にモーメントを印加する垂直櫛歯ドライブを形成するステップとを有する、ミラー形成方法。

【請求項 10】

上記ロータを第1の活性層に形成するステップは、上記第2の活性層及び上記シリコン基板層の該ロータを収容する部分を除去することによって行われ、

上記ステータを第2の活性層に形成するステップは、上記シリコン基板層の該ステータ 50

を収容する部分を除去することによって行われることを特徴とする請求項9 項記載のミラー形成方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、微小電子機械システム (Micro Electro Mechanical Systems : M E M S) 又は微小光電子機械システム (Micro Opto Electro Mechanical Systems : M O E M S) によって実現される走査マイクロミラーに関し、詳しくは、走査に用いられる傾斜マイクロミラー (tilting micro-mirror) に関する。

【背景技術】

【0002】

傾斜マイクロミラーは、多くのM E M S デバイス又はM O E M S デバイスの中心的な素子である。M E M S デバイスの走査のために用いられる素子及び動作原理を図1に示す。傾斜マイクロミラー(以下、単に「ミラー」とも言う。)100は、反射面104を有する概ね平坦なプレート(例えば、シリコンを材料とする。)102を備える。プレート102は、共通の捻り(傾斜)軸108に沿って揃えられた2つの捻りヒンジ106'、106"によって懸架されている。これら2つの捻りヒンジ106'、106"により、捻れ軸108を中心に、所定の範囲の角度(通常±5°)で、ミラー100を時計回り又は反時計回りに傾けることができる。ミラー100の反射面104に入射するレーザビーム110は、ミラー100によって、走査領域112に向け直される。傾斜マイクロミラー100は、周知のM E M S 駆動装置によって提供される駆動モーメント(actuation moment)120によって駆動される。

【0003】

図2は、走査マイクロミラーの回転(又は「傾斜」)角の要求される時間依存性、すなわち、走査領域112に反射されたレーザビームが通過する走査パス202の要求される形状を示している。ボックス206に示すような1方向の走査には、鋸歯波信号204が必要であり、一方、ボックス210に示すような順逆両方向の走査には、三角波信号208が必要である。1>2>3>4>5>6は、時間領域における走査を表している。この種のアプリケーションでは、空間歪み及び時間歪みがない画像を生成する必要性から、走査マイクロミラーの動きに特別な要求が課される。この要求には、長期間に亘る周波数安定性及び(小さな回転における)一定の角速度の維持が含まれる(「J.H. Lee et al, Sensors and Actuators A-Physical 96 (2-3) pp. 223-230, 2002」参照)。近年、この種のミラーは、仮想網膜ディスプレイにおいて実現されている(「T.M. Lippert et al, @0 verview of Light Beam Scanning Technology for Automotive Projection Displays®, a available at Micro vision Inc.(r), http://www.mvis.com/pdfs/sid_auto.pdf.」参照)。

【0004】

また、傾斜ミラーは、通信システムにおける光スイッチ及び可変光減衰器、並びに投写技術における光処理装置にも使用されている。特定のアプリケーションによって課される要求に応じて、様々な設計及び動作モードが報告されている。例えば、光通信アプリケーションでは、高い光学品質及び低熱感度と組み合わされる長期間位置決め精度が最も重要な問題である。一方、可視光のデジタル処理のための投写装置において用いられるマイクロミラーでは、位置決めの問題は余り重要でないが、高い反射率、短い切換時間及び高い信頼性の要求を満たさなくてはならない。

【0005】

全てのマイクロミラーにおいて、線形運動が非常に望ましいが、これを実現することは困難である。これは、M E M S アクチュエータによって生じる動作力の固有の非線形性及び高レベルの不確実性に起因する。様々なマイクロデバイス駆動原理及び技術が知られている。例えば、静電気、磁気、熱、圧電、レーザ及び流動励起駆動、並びに形状記憶合金に基づく駆動等が知られている。これらのうち、静電駆動及び磁気駆動が最も広く使用さ

10

20

30

40

50

れている技術である。磁気駆動の主な利点は、入力信号（電流）と駆動力の間に比例関係があることである。しかしながら、このような利点の代償として、磁気駆動技術は、消費電力が大きく、熱が生じやすく、設計が複雑であり、製造プロセスが比較的複雑である。更に、磁気アクチュエータのスケーリング則は、静電アクチュエータのスケーリング則に比べると劣っている。

【0006】

網膜ディスプレイの走査アプリケーションにおいて必要とされるマイクロミラーの典型的な大きさ（数百 μm ~ 数 mm ）及び必要な動作周波数（数十 kHz ）を実現するためには、静電駆動を使用することが望ましい。静電駆動の更なる利点としては、静電デバイスの製造に用いることができる単純で確立したプロセス、低消費電力、既に開発されているモデリングツール、文献に開示されている様々な設計概念等が挙げられる。しかしながら、静電駆動には、静電力に固有の非線形性という大きな問題がある。走査ミラーの場合、この非線形性の結果、傾斜角に対する駆動捻りモーメントの非線形依存性及び動作電圧に依存した非線形性（二次式）が生じる。更に、静電力の非線形性は、機械的弹性復元力の線形性と組み合わされて、同期引込み（pull-in）が不安定になり、これにより、デバイスの動作範囲が制限される。

【0007】

これらの問題を克服するために、これまで、様々な解決策が提案されている。具体的には、「W Zhang et al, Applied Physics Letters 82(1) pp. 130-132, 2003」では、パラメトリック共振に近いマイクロ共振器の動作のために、入力信号の（電圧の）平方根を生成し、これを使用している。例えば、「JH Lee et al, Sensors and Actuators A-Physical 96 (2-3) pp. 223-230, 2002」、「H. Wada et al, Jpn.J. Appl.Phys.41 (10B) pp. 1169-1171, 2002」及び「H Schenk et al, Sensors and Actuators A-Physical 89 (1-2) pp. 104-111, 2001」等に開示されているように、垂直櫛歯ドライブ（vertical comb drive）を使用することにより、傾斜角に依存した駆動モーメントを排除でき、及び電圧に依存した平方根を低減又は除去することができる。映像処理アプリケーションにおいて要求される三角波信号を生成するためには、非常に高い駆動電圧が必要であり、又は、磁気駆動の場合、非常に大きい電流が必要である。この問題は、動作の線形性には関係なく、速度が反転する際の高い角加速度に起因する。この問題を克服するために、「I. Bucher, in Proc. of 29th Israel Conference on Mechanical Engineering, May 12-13, 2003, Technion, Haifa, Israel」では、必要な三角波応答を正弦波成分のフーリエ級数として表し、共振振動数において各成分を励起する手法が開示されている。

【0008】

このような解決策は、非常に複雑であり、高精度で共振振動数を生成することが困難であり、したがって、製造公差による影響が大きく、共振振動数を調整することが非常に困難であるといった問題点を有している。

【0009】

したがって、高い動作周波数及び低い駆動電圧と組み合わせて、動作の線形性が最適化された走査マイクロミラーの実現が望まれている。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明は、優れた走査性能を達成するために、新たな剛性素子（本明細書では、「バウンサー（bouncer）」とも呼ぶ。）又は予め湾曲された非線形剛性素子を用いた傾斜「振動モード（bouncing mode）」マイクロミラーを提供する。更に、本発明は、ペイロード（例えばミラー）を担う部材を、軸に沿って、周期的な非線形の角度軌道で動かす微小機械アクチュエータを提供する。更に、本発明は、固有の非線形力によつて駆動されるマイクロミラーデバイスの区分的な線形応答（piecewise linear response）を実現することができる新規な傾斜マイクロミラーの動作モードを提供する。一実施の形態においては、本発明に基づく「振動モード」の動作は、ミラーが所定の回転角に達する度に起こる、ミラ

10

20

30

40

50

ーと弾性規制体 (elastic constraint)との間の接触現象 (contact event)を含む。この接触現象に続いて、ミラーが跳ね返り、及び角運動が反転するので、この動作を「振動モード」と呼ぶ。他の実施の形態においては、「振動モード」は、一端がアクチュエータに連結され、他端がミラーに連結された予め湾曲された非線形剛性素子の作用によって実現される。本明細書では、平行平板電極 (parallel-plate electrodes)と、平面又は垂直櫛歯ドライブ (planar or vertical comb drive)との両方によって静電容量的に駆動される振動モードの走査マイクロミラーの実施の形態を詳細に説明する。なお、全ての実施の形態において、応答周波数は、駆動電圧を制御することによって調整することができる。この特徴により、微小製造されたデバイスのパラメータの不確実性を補償することができ、応答周波数を、映像アプリケーションに十分な精度で同期させることができる。ミラーが電極に近付いたとき (バウンサと平行平板駆動の具体例) の接触現象における共振モード動作及び駆動力の附加により、非常に低い電力及び電圧による動作が可能になり、小型で低コストのアクチュエータを提供することができる。更に、各跳ね返り現象間のミラーの動きにおいて、補正電圧を印加することによって、線形性を向上させることができる。

10

【0011】

本発明は、本質的には、バウンサ又は非線形剛性素子を、出力信号を整形する非線形振動子、特に衝撃振動子 (impact oscillator)と同じ方法で用いる。跳ね返りを組み込んだ衝撃振動子は、非線形力学の分野で知られ、集中的に研究されているが、本明細書に開示し、詳しく説明するバウンサ又は予め湾曲された非線形剛性素子を用いることは、これまで知られていない。

20

【0012】

本明細書に開示するバウンサを用いた振動モードにおいて、駆動力は、ミラー (受動バリア)に加えても、バウンサ (能動バリア)に直接加えてもよい。なお、多くのMEMSアプリケーションにおいて、マイクロデバイス構造は、機械的に線形であり、非線形性は、駆動力によってのみ生じることが一般的である。例えば、走査ミラーの場合、捻り軸の剛性は一定である。この結果、各跳ね返り現象間の期間において駆動力がない場合、ミラーの動きは、実際には、線形系の自由運動である。このような動きの角速度は、システムの初期の運動エネルギー及び位置エネルギーを定義する初期状態及び捻りバネの剛性によって定まる。運動エネルギーがシステムの全エネルギーに対して支配的な場合、自由運動の間の速度の変化は小さく、望ましいレベルの線形性の運動が達成できる。この状態は、捻りバネの剛性がバリアの剛性と比べて小さいときに実現可能である。

30

【0013】

本発明が提供するMEMS装置及び光制御方法の他の重要な利点としては、システムパラメータに対する出力信号の周波数及び形状の感度が低く、周波数の制御性が優れている点がある。これらの利点は、ミラーの振動数が、バリアの変形によって定義され、その一部が、各跳ね返り現象の間に供給されるエネルギーのレベルによって定まるという事実から生じる。自由運動の間の粘性損失及びシステムパラメータの不確実性は、駆動電圧によるエネルギーの供給を制御することによって、容易に補償することができる。なお、ミラーの共振振動数における不確実性は重要であり、例えば、上述したH.Wadaらの文献には、計算値と測定値の間には25~30%の不一致があると報告されている。駆動電圧を用いて固有振動数を調整することにより、応答周波数を長期間に亘って安定化させ、ミラーの動きをビデオ入力信号に正確に同期させることができる。

40

【0014】

本発明に係る、光ビームを走査するMEMS装置は、第1の活性層と、シリコン基板層と、第1の活性層及びシリコン基板層の中間の第2の活性層とを有する二重活性層シリコンオンインシュレータ (DSOI) 基板と、第1の活性層に形成され、ミラー回転軸の回りに最大傾斜角まで傾斜運動を行うミラーと、第2の活性層に形成され、ミラーの傾斜運動をさせる少なくとも1つの第1の櫛歯駆動ステータを有する垂直櫛歯駆動アクチュエータとを備え、第1の活性層には、ミラーが最大傾斜角の位置にあるときに、ミラーの傾斜

50

に対して逆方向のモーメントを印加することができる少なくとも1つの第2の櫛歯駆動ステータが形成されている。

【0016】

更なる特徴として、少なくとも1つの第2の櫛歯駆動ステータは、第1の櫛歯駆動ステータの平面とは異なる平面に形成されている。

【0017】

更なる特徴として、基板は、二重活性層のシリコンオンインシュレータ(SOI)基板であり、各第1の櫛歯駆動ステータは、各第2の櫛歯駆動ステータとは異なる活性層に形成されている。

【0018】

更なる特徴として、垂直櫛歯駆動アクチュエータは、ミラーと同一平面上に配置され、ミラーに固定された少なくとも1つのロータを有する。

【0019】

また、上述のミラーは、ミラー回転軸の周りにおいて最大傾斜角まで傾斜運動を行うミラーである。本発明に係るMEMS装置は、二重活性層のシリコンオンインシュレータ(SOI)基板に形成されている。

【0020】

上述のアクチュエータは、傾斜運動を起こさせる垂直櫛歯駆動アクチュエータである。

【0021】

更なる特徴として、垂直櫛歯駆動アクチュエータは、SOI基板の二重活性層の1つの活性層に形成され、ミラーと同一平面上に配置され、ミラーに固定された少なくとも1つのロータと、SOI基板の二重活性層の他の活性層に形成された少なくとも1つのステータとを有する。

【0022】

MEMS装置は、ミラーを基板に連結する少なくとも1対のバネを更に備える。

【0023】

更なる特徴として、ミラー及び少なくとも1つのロータが形成される活性層は、二重活性層のSOI基板の上部活性層であり、少なくとも1つのステータが形成される活性層は、二重活性層のSOI基板の下部活性層である。

【0024】

上述のミラーは、二重活性層のSOI基板に形成され、同じSOI基板に形成された垂直櫛歯ドライブによって駆動される傾斜マイクロミラーである。

【0025】

上述の垂直櫛歯ドライブは、SOI基板の二重活性層の1つの活性層に形成された少なくとも1つのロータと、SOI基板の二重活性層の他の活性層に形成された少なくとも1つのステータとを有する。

【0026】

更に、ミラーは、少なくとも1つのロータと同じ活性層に形成されている。

【0027】

本発明に係る、二重活性層SOI基板に形成された反射素子と、該DSOI基板の第1及び第2の活性層のうちの1つの活性層に形成された固定櫛歯駆動素子を有する少なくとも1つの垂直櫛歯ドライブとによって反射された光ビームのパスを制御する光制御方法は、少なくとも1つの垂直櫛歯ドライブを用いて反射素子が、最大傾斜角の位置にあるときに、反射素子の傾斜に対して逆方向にモーメントを印加するステップとを有し、光ビームのパスを制御する。

【0028】

二重活性層のSOI基板に少なくとも1つの垂直櫛歯ドライブを形成するステップは、SOI基板の二重活性層の1つの活性層に、反射素子に固定された少なくとも1つの可動櫛歯ドライブ素子を形成するステップと、SOI基板の二重活性層の他の活性層に、少なくとも1つの固定櫛歯ドライブ素子を形成するステップとを有し、可動櫛歯ドライブ素子

10

20

30

40

50

と固定櫛歯ドライブ素子は静電気的に駆動され、反射素子を傾斜させる。

【0029】

この光制御方法は、反射素子及び可動櫛歯ドライブ素子と同じ活性層に少なくとも1つの更なる固定櫛歯ドライブ素子を形成するステップを更に有し、少なくとも1つの更なる固定櫛歯ドライブ素子は、反射素子に跳ね返り現象を起こさせる。

【0030】

更なる特徴として、二重活性層の1つの活性層に、反射素子に固定された少なくとも1つの可動櫛歯ドライブ素子を形成するステップは、二重活性層のSOI基板の上部活性層に、少なくとも1つの可動櫛歯ドライブ素子、反射素子及び少なくとも1つの更なる固定櫛歯ドライブ素子を形成するステップを有する。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0031】

本発明は、優れた走査性能を達成するために、新たな剛性素子（「バウンサ」）又は予め湾曲された非線形剛性素子を用いた傾斜振動モードマイクロミラー（tilting bouncing mode micro-mirror）を提供する。バウンサ、例えばカンチレバー又は梁は、線形の剛性を有する素子であるが、バウンサと、システム内の異なる剛性を有する他の素子（特に、捻りバネ）とが協働する動作では、これらを組み合わせた「非線形剛性素子」とみなすことができる。これを創意に富んで突き止め、これに注目した。振動モードは、特別な非線形駆動及び制御原理に基づく駆動動作モードを用いる。ミラーを駆動する「振動モード」アクチュエータは、自己励振モード（self-exciting mode）で動作し、その動きは、実際には、リミットサイクル（limit cycle）である。アクチュエータは、ミラーを区分的線形軌道（piecewise linear trajectory）で駆動する。この非線形駆動及び制御原理により、一組の望ましい特徴、例えば小型、軽量、低消費電力、低熱損失、精密なフィードバック制御を有する高周波数サイクル、準線形軌道間隔、低音響雑音等が得られる。本発明の振動モードを実現する非線形駆動及び制御を説明する理論及びシミュレーションは、2004年3月、「スマートマテリアル及び構造（Smart Materials and Structures）」で発表されたブイ・クルイロフ（V. Krylov）及びディー・アイ・バーネア（D.I.Barnea）による「映像アプリケーションのための振動モード静電駆動走査マイクロミラー（Bouncing mode electro-statically actuated scanning micro-mirror for video applications）」にも開示されており、この文献は、引用により本願に援用されるものとする。

20

【0032】

本発明は、非線形共振器の特性の利用に基づくループ整形法（loop-shaping method）を使用する。この手法により、ある波形（例えば正弦波又は矩形波）の入力信号を、他の必要な波形（例えば三角波又は鋸歯波）の出力信号に整形することができる。

【0033】

例えば、正弦波信号によって励起される一般的な非線形振動子の動きは、以下のよう式で表すことができる。

【0034】

【数1】

$$\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + \sum_k \varepsilon_k \theta^k = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

40

ここで、 θ 、 $\dot{\theta}$ 及び $\ddot{\theta}$ は、それぞれ角度及びその第1及び第2の時間導関数であり、c及びAは、定数であり、 Ω は、周波数であり、tは、時間であり、 ε_k は、非線形性のパラメータを表す。

【0035】

この式は、非線形であるので、周期的な出力信号（存在すれば）は、正弦波ではなく、高調波を含む。

【0036】

50

【数2】

$$\theta = \sum_k a_k \sin(k\omega t) + b_k \cos(k\omega t) \quad (2)$$

【0037】

非線形性のパラメータ a_k は、出力信号の波形を定義するパラメータ、すなわち a_k 、 b_k が、必要な波形の出力信号をもたらすように選択することができる。また、システムの非線形性のため、共振振動数は調整することができる。この種のトランステューサは、单一の素子に基づいているので、小型であるという利点を有する。歪みがない画像を生成するためには、走査素子の角速度に特別な要求が課される。具体的には、時間に対する角度の依存性は、三角波又は鋸歯波信号に可能な限り近付ける必要がある。換言すれば、角速度は、区分的に一定でなければならない。角速度の反転、すなわち各半周期の最後における符号の変更は、非常に高い角加速度を含む。傾斜デバイス（式を明瞭にするために、バネはないものと考える。）の最も簡単な運動方程式は、以下の通りである。

【0038】

【数3】

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = M(t) \quad (3)$$

【0039】

20

ここで、 $\dot{\theta}(t)$ は、傾斜角であり、 t は、時間であり、 I は、慣性モーメントであり、 $M(t)$ は、外部から加えられる駆動モーメントである。速度反転前の時刻を t_1 とし、速度反転後の時刻を t_2 として、時間間隔 $[t_1, t_2]$ でこの式を積分すると、以下の式が得られる。

【0040】

【数4】

$$H_2 - H_1 = \int_1^{t_2} M(t) dt \quad (4)$$

ここで、 $H = I \frac{d\theta}{dt}$ は、角運動量である。

30

【0041】

角速度は、反転の前も後も一定であるので、角運動量の変化は、 t_1 及び t_2 に対して無関係である。 $H_2 = -H_1$ 、 $H = 2H_1$ の場合、速度の反転は、エネルギー損失がない弹性跳ね返り現象 (elastic bouncing event) とみなすことができる。 $|H_2| < |H_1|$ の場合、速度の反転は、損失を伴い、塑性衝突 (plastic collision) とみなすことができる。なお、ここでは、周期運動を調べているので、跳ね返りは、弹性跳ね返りでなければならない。運動量の変化は、方程式の右辺に示す積分に等しい。この積分が運動量の変化に等しくなるように、モーメントが加えられる場合、周期運動は、維持される。モーメントは、非常に短い時間（パルス的に）加えることができる。この場合、モーメント自体は、大きくなくてはならない。これに代えて、より小さいモーメントを、より長い時間に亘って加えてもよい。モーメントの付加について許容できる最長の時間、したがって、許容できる最小のモーメントは、システム要求に基づいて定まる。

【0042】

有効な速度反転を実現するためには、モーメントの付加を、ミラーの動きに同期させなければならない。最も簡単な位置制御が用いられる場合、ミラーが所定の角度に達すると、モーメントが加えられる。この場合、制御モーメントは、角度の関数であり、時間の関数ではない。運動方程式は、以下の形式に書き換えることができる。

【0043】

【数5】

40

50

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + k\theta = m(t) + M(\theta) \quad (5)$$

【0044】

ここで、 $m(t)$ は、ミラーの動きを維持するために加えられる駆動モーメントであり、 $M(\cdot)$ は、制御モーメントである。この制御モーメント $M(\cdot)$ は、角度のみの関数であるので、事実上、傾斜の特定の角度だけで、非線形バネに加えられるモーメントとみなすことができる。この「バネ」の付勢は、機械的な跳ね返りに完全に類似している。唯一の違いは、ここで想定している具体例では、この「バネ」が、フィードバック制御機構を用いて実現されるという点だけである。短い「接触」時間の間に大きな駆動モーメントを加える能力がある場合にのみ、この方式を実現することができる。10

【0045】

この振動モードアクチュエータの非常に特別な特性により、アクチュエータの（入力信号による）ペイロード強制運動（payload forced movement）が、新たな波形（例えば、正弦波から三角波又は鋸歯波に）及び周波数に変換される電気的及び光学的な波形整形における一組のアプリケーションが実現される。例示的なアプリケーションとしては、網膜走査注入（retinal scan-injection）による映像表示を実現するマイクロミラーの動きが含まれる。このミラーの動きは、標準ビデオストリームと表示装置を駆動する信号間の比較的簡単な電子インターフェースを実現する。他のアプリケーションとしては、例えば、単一の素子による様々な信号の発生に用いられるRFデバイスがある。20

【0046】

以下では、例示的なアクチュエータとして、静電傾斜アクチュエータを用いた具体例を説明する。ここに説明する静電傾斜マイクロミラーは、レーザ表示アプリケーションによって求められる動作の線形性、高い動作周波数及び低い駆動電圧の要求を満たす。なお、ここで説明する静電駆動は、熱駆動、磁気駆動、圧電駆動等の他の駆動方法に置き換てもよい。

【0047】

図3は、平行平板静電アクチュエータ（parallel plate electrostatic actuator）を用いた従来の傾斜ミラーデバイス300を概略的に示している。傾斜ミラーデバイス300は、ミラー302を備え、ミラー302は、ミラー302の下に位置する基板308上の2つの平行平板電極306a、306bから距離dだけ離れ、捻り軸304によって懸架されている。捻り軸304の周りのミラー302の回転によって、例えば電極306bとの接触角の近くの回転角では、ミラー端部310と電極306bの間の距離d'は、初期の距離dよりも非常に短い。少なくとも1対の新たな剛性素子（バウンサ）を、カンチレバー、二端固定梁（double edge clamped beam）等の形でこの傾斜ミラーデバイスに組み込んだ状態を図14に示す。30

【0048】

図4～図13は、本発明を概念的に説明する図である。一方、図14～図19及び図22は、例えばシリコン又はシリコンオンインシュレータ（silicon on insulator：SOI）MEMSプロセスに適用できる、本発明に基づく特定のMEMS形状及び設計を図示している。また、図20及び図21は、本発明の振動モードマイクロミラーデバイスの好ましい実施の形態を製造するために用いられるシリコンMEMSプロセスの手順を概略的に示している。40

【0049】

図4は、本発明に基づく振動モードマイクロミラーデバイス400（以下、デバイス400とも言う。）の概念及びその動作原理を概略的に示している。デバイス400は、状態（a）において、平面の基板406の上に、捻り（又は傾斜）軸404によって懸架されたミラー402を備える。動作中、ミラー402は、傾斜軸404の周りを傾斜角θで傾く（回転する）。本発明に基づくデバイス400は、従来の傾斜ミラーデバイスとは異なり、傾斜角θが所定の接触傾斜角θ_cより大きくなると、ミラー402が接触する少な50

くとも 1 対の非線形剛性素子 408'、408"（例えばカンチレバー、梁又は細片 [strip] からなる弾性「バウンサ」又は図 12 及び図 18 で例示的に示す予め湾曲された非線形剛性素子）を備える。以下、図 4～図 11 を参照して、特に、バウンサについて説明する。バウンサは、対として、好ましくは（必須ではないが）、傾斜軸 404 を中心に（両端が）対称的に配設される。図 4 に示すように、非線形剛性素子 408'、408" は、ミラー 402 が接触する（状態 b）と、捻り剛性（torsion stiffness）が高まり、ミラー 402 の動きを反転させる。非線形剛性素子 408'、408"（特定の材料、例えば、シリコンから形成される。）は、例えば、周知の法則を用い、付加された駆動力に応じて、特定の特性（跳ね返り効果 [bouncing effect]）を達成するように、設計及び最適化することができる。

10

【0050】

図 5 は、図 4 のデバイス 400 の傾斜角 に対する捻り剛性（モーメント）M の依存関係を概略的に示している。捻り剛性 M は、傾斜角 における捻り軸 404 の剛性と、非線形剛性素子（以下、バウンサとも言う。）408' 又は 408" の更なる剛性とから構成される。ミラー 402 がバウンサ 408' に接触すると、すなわち、 $\theta > \theta_c$ となると、剛性（M 対 曲線の傾きによって定義される）は、大幅に増加する。これにより、三角波信号の生成に必要な飽和型の剛性非線形性が実現される。

【0051】

図 6 は、図 4 のデバイス 400 における振動モードのミラー 402 の動きの過程（時間 t に対する傾斜角 を示す曲線 502 として表現される）を概略的に示している。曲線 502 は、開放時間 T_{REL} によって定義される時点 A、B 間の第 1 の高速過程（first fast stage）と、時間 T_{SLOW} によって定義される時点 B、C 間の第 2 の低速過程（second slow stage）と、時間 T_{LOAD} によって定義される時点 C、D 間の第 3 の高速負荷過程（third fast load stage）の 3 つの過程を含んでいる。第 2 の低速過程において（ミラー 402 がバウンサ 408' に接触していない間）、ミラー 402 は、バウンサ 408' と、アクチュエータによって加えられるエネルギーによって定まる略一定の角速度で回転する。第 1 の高速過程において、変形したバウンサ 408' に保存された歪みエネルギーは、ミラー 402 の運動エネルギーに変換される。第 1 及び第 3 の高速過程において（すなわち、 $\theta > \pm \theta_c$ のとき）、ミラー 402 は、バウンサ 408' に接触し、ミラー 402 の運動エネルギーは、バウンサ 408' の歪みエネルギーに変換される。バウンサ 408' の剛性は、捻り軸 404 の剛性よりも非常に大きいので、バウンサ 408' の変形に対応する更なる角度 $\theta_{MAX} - \theta_c$ は、ミラー 402 の全傾斜角 θ_{MAX} よりも非常に小さい。

20

【0052】

要約すると、上述したクルイロフ及びバーネアの文献にも説明されている、図 4～図 6 に示す振動モードのミラーの動作モードは、ミラーと弾性規制体の間の接触現象、これに続く跳ね返り現象及び動きの反転を含む。図 5 に示すように、システムの剛性は、角度に依存している。

【0053】

図 7 a は、シミュレーションによって得られた振動モードのミラーの動きのタイムチャート（時間 t に対する傾斜角 の依存関係）である。このシミュレーションの詳細は、クルイロフ及びバーネアの文献にも開示されている。このシミュレーションでは、V の符号が付された区分的な時間的に不变の電圧駆動信号（点線）を電極に印加し、この結果（実線）は、時間に対する角度の三角形の依存関係を示している。角速度は、事実上一定である。図 7 b の左側のグラフは、バウンサの変形に対するミラーの固有振動数 の依存関係を示している。固有振動数 は、ある値から開始されるバウンサ変形の一次関数である。この特性は、ミラーの振動数の制御に非常に有用であり、ミラーの固有振動数 を非常に広い範囲で調整することができる。図 7 b の右側の「電圧に対する応答周波数」グラフに示すように、電圧を制御することによって、応答共振振動数を調整することができる。印加電圧の制御による共振振動数の調整によって、微小製造されたデバイスの応答をビデオ

30

40

50

信号に同期させることができる。

【0054】

図7aに示す応答の「質」、すなわち回転角の時間的な線形性は、弾性バウンサの剛性 M_B と、ミラーの捻り軸の剛性 M_{TA} との比 M_B / M_{TA} によって定義される。この比 M_B / M_{TA} は、バウンサの剛性 M_B を高めるか、あるいは、捻り軸の剛性 M_{TA} を低めることによって大きくすることができる。ミラーの固有振動数は、主に、弾性バウンサの変形、したがって駆動電圧によって定義され、事実上、捻り軸の剛性 M_{TA} から独立している。これは、剛性 M_{TA} を最小にしなければならないことを示唆している。この低減は、設計によって実現され、軸の最小面外剛性(minimal out-of-plane stiffness)の必要条件によってのみ制限される。

10

【0055】

図8は、得られた駆動モーメント M_A のタイムチャートを示している。ミラーの端部が電極に近接すると、駆動モーメント M_A が増加する。十分大きな静電引力(attractive electrostatic force)を用いて、バウンサを変形させて、速度を反転させる。バウンサに保存された弾性エネルギーは、ミラーに作用する反発力に変換される。近接モードで作用する新たな剛性素子と、平行平板電極との組合せによって、静電アクチュエータ内で非常に大きな反発力を生じさせることができる。

【0056】

図9は、本発明に基づく振動モードマイクロミラーデバイス900の更に他の実施の形態を概略的に示している。図9では、少なくとも1対のバウンサ902'、902''(以下、単にバウンサ902とも言う。)が、基板906ではなく、ミラー904に取り付けられている。バウンサ902は、基板406(図4)に取り付けられた不動のバウンサ408とは対照的に、可動である。この構成の利点は、ミラー904と同じ層(例えばS0I基板の活性Si層)にバウンサ902を製造することができるので、製造プロセスが簡単であるという点である。図4と同様に、(a)は、バウンサ902を介して基板906に接触する前のミラー904を示しており、(b)は、バウンサ902を介して基板906に接触したミラー904を示している。

20

【0057】

図10は、振動モードマイクロミラーデバイス1000(以下、デバイス1000とも言う。)の更に他の実施の形態を概略的に示している。この構成は、デバイス1000が、(第1の対のバウンサ408'、408''に比べて)「より柔らかい」少なくとも1対の更なるバウンサ1002'、1002''を備えている点を除いて、図4の構成と同様である。もちろん、「少なくとも1対の更なる」の定義には、剛性が異なるバウンサのより多くの対も含まれる。バウンサ1002'、1002''は、信頼性を向上させ、衝撃を緩和するために、接触速度を制御するように作用する。図10の右側には、この構成における、図4と同様の剛性の角度依存関係のグラフを示している。このグラフに示すように、傾きが「緩やかな」部分と、2つの傾きが「急な」部分との中間に、2つの部分1004、1006が追加される。これらの部分1004、1006は、衝突速度が低められたことを示している。

30

【0058】

図11は、振動モードマイクロミラーデバイス1100の更に他の実施の形態を概略的に示し、この振動モードマイクロミラーデバイス1100は、独立して変形可能な少なくとも2つの能動バウンサ1102を備える。能動バウンサ1102は、ミラーによって変形しないが、更なる力 P_A によって変形し、更なる力 P_A は、ミラーの動きに関係なく、能動バウンサ1102に直接加えられる(過程(a)、<_c)。能動バウンサ1102に直接力を加えることにより、ミラーの運動エネルギーが跳ね返り変形(bouncing deformation)のためには最早必要でないので、非対称の鋸歯波信号を生成するためのより大きいエネルギーを能動バウンサ1102に保存することができ、衝突速度をゼロに下げることができる。>_cとなる過程(b)では、力 P_A によって予め変形された能動バウンサ1102がミラーにエネルギーを伝達する。

40

50

【0059】

図12は、本発明の振動モードマイクロミラーデバイスに用いることができる、2つの端部1202、1204を有する概念的な予め湾曲された非線形剛性素子（例えばビーム、ストリング等）1200を概略的に示している。本発明において、「予め湾曲された」素子とは、無限ではない曲率半径を持つ少なくとも1つの部分を有する素子である。非線形剛性素子1200は、元の（応力が加えられていない）予め湾曲された状態において、2つの端部1202、1204間の距離がL₀となるように予め湾曲されている。そして、開始値P₁を有する力Pを端部1202、1204に加える。力Pの値がP₂に達すると、長さL₀がLだけ長くなる。図12bは、加えられた力Pと、非線形剛性素子1200の伸びLとの間の依存関係を示している。力Pに対する伸びLの依存関係は、非常に非線形的であり、非線形剛性素子1200の初期形状の関数である。非線形剛性素子1200を完全に真っすぐにするためには、理論的には無限の力を加える必要がある。この高い非線形性のために、この非線形剛性素子1200の特性は、理想的なバウンサの特性に近い。本発明の予め湾曲された非線形剛性素子1200の寸法は、加えられた力に対して特別な特性（跳ね返り効果[bouncing effect]）を実現するように設計及び最適化することができる。図15～図17は、非線形剛性素子1200を実装した振動モードマイクロミラーデバイスを示している。

【0060】

図13a及び図13bは、それぞれ、平行平板駆動振動モードマイクロミラーデバイス1300（以下、デバイス1300とも言う。）の実施の形態の斜視図及び平面図を示し、デバイス1300は、ミラー1302に連結された本発明のバウンサを備える。この実施の形態は、図9に示す概念を具体化したものである。デバイス1300は、ミラー1302を備え、ミラー1302は、XY平面内に位置し、2つの捻り棒（torsion bar）1304'、1304"によって基板1306に連結されている。ミラー1302は、（例えば金属蒸着によって）導電性を有するよう形成され、（ミラー1302の平面の下であって、この平面から離れた）下方のXY平面内に位置する2つの電極1308'、1308"のうちの1つによって、-Z方向に引きつけられる。デバイス1300は、更に、少なくとも1対のバネ梁（spring beam）1310'、1310"を備え、バネ梁1310'、1310"には、捻り棒1304が固定して連結されている（実際には、同じ層の一部であることが望ましい）。バネ梁1310'、1310"は、衝突非線形剛性バネとして機能する。デバイス1300は、更に、少なくとも1対のストッパ1312'、1312"を備え、ストッパ1312'、1312"は、ミラー1302が捻り棒1304の周りを回転したときに、バネ梁1310が接触することによって、ミラー1302の動きを止める。本質的には、この実施の形態のバウンサは、片端がミラー1302（又はミラー1302の捻り棒1304）に連結され、他端が自由であるバネ梁1310である。バネ梁1310は、ストッパ1312に接触したときに、湾曲して、エネルギーを蓄え、最終的には、ミラー1302の回転を反転させ、ミラー1302を跳ね返す。（捻り棒1304に連結される）バウンサの位置を最適化することにより、ミラー1302の回転角を大きくすることができる。バネ梁1310とストッパ1312との接触部分の拡大図を図13c及び図13dに示す。図13cは、ストッパ1312'に接触していないバネ梁1310'を示している。図13dは、ストッパ1312'に接触したバネ梁1310を示している。図13dでは、図を明瞭にするために、接触の際のバネ梁1310'の湾曲を強調して示している。

【0061】

図14aは、基板1406に連結された少なくとも1対のバウンサ（バネ梁）1412を備え、平行平板静電アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイス1400の実施の形態の平面図を示しており、図14b及び図14cは、それぞれ、図14aの線A-Aの断面の斜視図を示している。この実施の形態は、図4又は図10に示した概念を具体化したものである。なお、図14b及び図14cでは、1対のバネ梁1412a、1412bのみを示しているが、図14aに例示的に示すように、基板140

6の各側には、異なる剛性特性を有する2つ以上の(対の)バネ梁を取り付けてもよいことは明らかである。振動モードマイクロミラーデバイス1400は、ミラー1402を備え、ミラー1402は、少なくとも1対の捻り棒1404を介して基板1406に連結され、下方のXY平面層に配設された2つの電極1410a、1410bのうちの1つによつて、-Z(図面の奥)方向に引きつけられる。ミラー1402は、電極レベル(平面)で基板1406に固定された少なくとも1つのバネ梁1412に、端部が接触するまで回転する。2つ以上のバネ梁を用いる場合、各バネ梁は、異なる弾性特性を有していてもよく、例えば、図14aに示すように、同じ断面積と異なる長さを有していてもよい。ミラー1402は、バネ梁を曲げ、跳ね返る。換言すれば、この実施の形態では、曲げ梁(bending beam)が、ミラー1402ではなく、基板1406の一端に取り付けられている。図14cでは、バネ梁1412a、1412bの撓みを強調して示している。

【0062】

図15a及び図15bは、それぞれ、予め湾曲された非線形剛性素子を備え、回転平行平板によって駆動される振動モードマイクロミラーデバイス1500(以下、デバイス1500とも言う。)の実施の形態の平面図及び斜視図である。この実施の形態では、図12及び図18aに示す予め湾曲されたC字状の素子を用いる。デバイス1500は、この場合、矩形のミラー1502を備えているが、ミラー1502の形状は、包括的に言えば、左右対称の如何なる形状(例えば円形)であってもよい。ミラー1502は、XY平面内に位置し、共通の捻り軸1505に沿って配置された2つの捻り棒1504'、1504"によって、それぞれ、基板1508上の高台(elevation、又は「パッド」)1507に連結されている。図15cの線分A-Aの断面図に示すように、デバイス1500は、更に、上面からオフセットb離間してミラー1502の下方に位置する2対の短い「オフセット」梁1510a、1510d及びオフセット梁1510b、1510cを備える。オフセット梁1510a、1510d及びオフセット梁1510b、1510cは、それぞれ、少なくとも1対(この具体例では、2対)の、好ましくは、C字状のバネ梁1512a、1512d及びバネ梁1512b、1512cによって、基板1508に連結されている。デバイス1500は、更に、ミラー1502の下に配設された2つの電極1520a、1520bを備える。なお、原理的には、少なくとも1対のC字状の(より包括的に言えば、「予め湾曲された」)素子は、バネ梁1512a、1512c、バネ梁1512b、1512d、バネ梁1512a、1512d、又はバネ梁1512b、1512cのみであってもよい。図15dは、静電力によって変形する前のC字状のバネ梁1512a、1512cを示す線分A-Aの断面図であり、図15eは、変形後の断面図である。

【0063】

ミラー1502及び電極1520のうちの1つが帶電されると、(偏心距離bを有する)バネ梁1512上の引張力がモーメントを生じ、捻り棒1504及び共通の捻り軸1505の周りであって、反対方向にミラー1502を回転させる。C字状のバネ梁1512は、歪みを直す(straightening)ことによって、「跳ね返り効果」を起こすために必要な剛性的な非線形特性を有する。なお、C字状のバネ梁1512は、例示的に示したに過ぎず、本明細書に開示する目的のために、例えば、V字状、S字状又はZ字状の他の予め湾曲された非線形剛性素子を用いてもよい。

【0064】

図16a及び図16bは、それぞれ、予め湾曲された非線形剛性駆動素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイス1600(以下、デバイス1600とも言う。)の実施の形態の平面図及び斜視図である。デバイス1600は、それぞれ図15の素子1502~1510と同じ素子1602~1610を備える。詳しくは、デバイス1600は、ミラー1602と、2つの捻り棒1604'、1604"と、高台1606'、1606"と、基板1608と、上面からオフセットb離間してミラー1602の下方に位置する2対の短い「オフセット」梁1610a、1610d及びオフセット梁1610b、1610cとを備える(図16b)。オフセット梁1610

10

20

30

40

50

a、1610d及びオフセット梁1610b、1610cは、2対の、好ましくは、C字状のバネ梁1612a、1612d及びバネ梁1612b、1612cを介して、2つの平面櫛歯駆動ロータ1614a、1614bにそれぞれ連結されており、平面櫛歯駆動ロータ1614a、1614bは、パッド1622上の梁保持バネ(retaining beam spring)1620を介して基板1608に連結することによって、Y方向に自由度を有する。

【0065】

歯1620aを有する櫛歯駆動ステータ1624aと、歯1616aを有する平面櫛歯駆動ロータ1614aとが、導体1630a、1632aを介して帶電されると、(偏心距離bを有する)偏心した引張力により、ミラー1602に、捻り棒1604の周りの反時計回りのトルク(rotation moment)が生じる。同様に、櫛歯駆動ステータ1624b及び平面櫛歯駆動ロータ1614bは、ミラー1602に時計回りのトルクを生じさせる。C字状のバネ梁1612は、櫛歯ドライブによって誘起される動きをミラー1602の線形運動に変換する(跳ね返り効果)ように設計された非線形剛性を有する。なお、C字状のバネ梁1612は、例示的に示したに過ぎず、本明細書に開示する目的のために、例えば、V字状、S字状又はZ字状の他の形状の非線形剛性素子を用いてもよい。

【0066】

図17は、面内に予め湾曲された非線形剛性素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイス1700(以下、デバイス1700とも言う。)の他の実施の形態を示している。詳しくは、図17aは、デバイス1700全体を示しており、図17bは、X方向の引張力から生じるY方向のベクトル力を示している。図17cは、図17bを用いて説明する形態によって加えられる力と、捻り軸1705に対するこの力の偏心bとによって、捻り軸1705の周りのトルク(rotation moment)が生じることを示している。デバイス1700は、ミラー1702を備え、ミラー1702は、XY平面内に位置し、共通の捻り軸1705に沿ってX方向に整列された2つの捻り棒1704'、1704"によって基板1710に連結されている。ミラー1702は、ドライバ1730a、1730bによって、1対の曲がり梁(curved beam)1706a、1706bを介して(それぞれ力1708a、1708bによって)、又はドライバ1730c、1730dによって、1対の曲がり梁1706c、1706dを介して(それぞれ力1708c、1708dによって)、X(及び-X)方向に引っ張られる。上述のように引っ張られると、曲がり梁1706は、その非線形剛性素子(曲がり梁)の曲がったステップ形状(図18の1802a参照)と、偏心距離「b」との組合せ作用を生じる。この偏心性により、垂直力ベクトル作用が生じる。更に、曲がり梁の反対側の対の引張力により、XY平面において、引張力ベクトル(例えば1708bx)に垂直な力(例えば1708by)が生じる。換言すれば、Y方向の力ベクトルは、Z方向において、捻り軸(又は回転軸)1705に対して距離「b」だけ偏心しており、回転軸1705の周りに、捻りモーメントを生じる。

【0067】

ドライバ(例えば1730a)は、ステータ1750によって引き寄せられるロータ1732を備える。ロータ1732は、搬送ビーム(carrier beam)1734に固定されているので、X方向の自由度を有する。搬送ビーム1734は、2つの4撓みビーム(four-beam flexures)1736に連結されており、4撓みビーム1736は、パッド1738で基板1710に固定されている。ロータ1732及びステータ1750は、それぞれ、導体1742、1752によって帶電される。

【0068】

図18は、図15、図16及び17の実施の形態で用いることができる非線形剛性ビーム(nonlinear stiffness beam)の様々な形状を示している。これらの形状には(以下に限定されるものではないが)、図18の(a)に示すC字状の梁1802、図18の(b)に示すS字状の梁1804、図18の(c)に示すV字状の梁1806、図18の(d)に示すZ字状の梁1808等が含まれる。このような各梁において、(矢印で示す)力を加えることにより、梁の曲率及び形状が状態a'から状態a"に変化する(ここでは、

10

20

30

40

50

C字状の形状1802a'、1802a"及びS字状の形状1804a'、1804a"のみを示している)。

【0069】

図19は、垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される(vertical comb drive actuated)振動モードマイクロミラーデバイス1900(以下、デバイス1900とも言う。)の実施の形態を示している。詳しくは、図19aは、斜視図を示し、図19bは、図19aの一部を拡大して示している。デバイス1900は、ミラー1902を備え、ミラー1902は、捻りバネ(捻り軸)1904によって、ミラー1902が形成された層1906に連結されている。ミラー1902は、それぞれ歯1910によって櫛歯駆動ロータを形成する4本の櫛歯駆動ロータアーム1908a~1908dを備える。このデバイス1900は、更に、櫛歯駆動ステータ1914a~1914dを備える。ここでは、図を明瞭にするために、図19bには、セットdのみを示している。実際の動作では、各櫛歯駆動ステータ1914a、1914b上の導電性パッド1925a、1925bによって、櫛歯駆動ロータアーム1908a、1908bを駆動することによって、ミラー1902を捻り軸1904の周りに回転させる。回転方向を反転させるには、櫛歯駆動ステータ1914c、1914d上の導電性パッド1925c、1925dによって、櫛歯駆動ロータアーム1908c、1908dが駆動される。櫛歯ロータアーム1908自体は、導電性パッド1927を介して帶電される。デバイス1900は、更に、1対の跳ね返りバネ梁(bouncing spring beam)1916a、1916bを備え、跳ね返りバネ梁1916a、1916bは、それぞれの櫛歯駆動ロータアーム1908a、1908bに連結されている(更に、これらの櫛歯駆動ロータアーム1908a、1908bを介してミラー1902に連結されている)。更なる対の跳ね返りバネ梁(例えば1916c、1916d)は、櫛歯駆動ロータアーム1908c、1908dに連結されている。ミラー1902が捻り軸1904の周りを回転すると、回転の最後に、跳ね返りバネ梁1916は、ストッパー(図示していないが、例えば、ハンドル層[handle layer]上に配設されている)に接触し、跳ね返り効果を起こす。この実施の形態における動作及び跳ね返り効果は、原理的には、図13の実施の形態と同様である。ミラー1902は、実質的に、リリースホール1929の上に位置している。

【0070】

図19c~図19dは、本発明に基づく垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイス1950の更に他の実施の形態を示している。この実施の形態は、一方が跳ね返り機構(bouncing mechanism)として機能する2組の固定の(ステータ)櫛歯を用いる。図19cは、下部デバイス層(後述する図20の「第2の活性層」2006参照)内に位置している第1の組のステータ櫛歯1952を有するマイクロミラーデバイス1950を示している。第2の組の固定のステータ櫛歯1954は、上部デバイス層(後述する図20の「第1の活性層」2002参照)内に形成されている。可動のロータ櫛歯1956は、第2の組のステータ櫛歯1954及びミラー1958と同じ平面(第1の活性層2002)内に形成されている。

【0071】

図19d及び図19eに示すように、ステータ櫛歯1952によってミラー1958に加えられる静電力(モーメント)により、ミラー1958は最大の角度(例えば10°)まで傾く。ミラー1958が最大の角度位置にあるとき、ミラー1958に取り付けられたロータ櫛歯1956は、下部デバイス層のステータ櫛歯1952(図19dの右側)の領域内に位置する。ミラー軸1960の反対側の可動のロータ櫛歯1956は、上部デバイス層(すなわち、ステータ櫛歯1954)の真上又は重なる位置に浮上する(図19dの左側参照)。ミラー1958が最大の角度位置にあるとき、上部デバイス層にエッティングされた更なる組の固定のステータ櫛歯1954は、今度は、跳ね返り機構として機能し、ミラー1958の傾斜の反対方向にモーメントを加えることができる。このモーメントは、三角波信号を達成するために必要なミラー1958の高い角加速度を生じる。従来の垂直櫛歯ドライブの構成では、ミラーが最大の角度位置にあるとき、櫛歯は、櫛歯領域の

10

20

30

40

50

外側の離れた場所に位置しており、反対方向のモーメントを加えるには、非常に高い電圧が必要であった。一方、本発明では、「二重活性層ステータ(double active layer stator)」構造により、線形領域における完全な動きに貢献する必要な「跳ね返り効果」をミラーに与える。

【0072】

製造プロセス

マイクロミラーは、互いに接着又は溶着された2つのシリコンオンインシュレータ(SOI)ウェーハ、通常のSiウェーハに接着又は溶着されたSOIウェーハ又は特別な二重活性層SOIウェーハを用いて製造することができる。二重活性層SOIウェーハを用いる振動モード傾斜マイクロミラーの例示的な製造プロセスを図20に示す。

10

【0073】

本発明では、精密な製造プロセスのために、ウェーハの接着を必要としない「二重活性層」SOIウェーハを用いる。図21に示すように、背面エッチングは、初期のハードマスクエッチングに位置合せ(aligne)される。処理ステップ及び層機能間の位置合せをより正確することにより、最終的なデバイスの精度が高くなる。

【0074】

図20は、処理する前の最初の二重活性層SOIウェーハを示している。図20には、第1の活性層2002、第1の犠牲層2004、第2の活性層2006、第2の犠牲層2008、シリコン基板2010及び第3の犠牲層2012を示している。第3の犠牲層2012は、ミラー及びアクチュエータの下の取り除かれる領域をパターン化するために使用される。3つの半導体層、すなわち第1の活性層2002、第2の活性層2006及びシリコン基板2010は、犠牲材料(二酸化ケイ素)の層によって、互いに電気的に絶縁されている。第1の犠牲層2004は、第1の活性層2002と第2の活性層2006の間に挟まれており、第2の犠牲層2008は、第2の活性層2006とシリコン基板2010の間に挟まれている。各活性層2002、2006の厚さは、数ミクロン～数十ミクロンである。

20

【0075】

図21a、図21b(ステップ(a)～ステップ(x))は、図20に示すウェーハ構造を用いて、振動モード静電傾斜マイクロミラーを製造するためのプロセスの詳細を示している。プロセスは、ステップ(a)から開始され、ここで、ブランク金属層(blank metal layer)2102を蒸着する。そして、ステップ(b)において、ブランク金属層2102を、フォトレジストマスク2104を用いてパターン化し、ステップ(c)において、ウェットエッチングにより、静電アクチュエータのロータフィンガ用のミラー金属2106及び電気接触パッド2108を形成する。ステップ(d)において、低圧化学気相成長(low-pressure chemical vapor deposition: LPCVD)法により、ウェーハの上面の金属層上に二酸化ケイ素層(以下、酸化物層とも言う。)2110を蒸着する。この酸化物層2110は、金属を保護するためと、シリコン活性層用のハードマスクを形成するためとの両方に使用される。そして、ステップ(e)において、酸化物層2110をパターン化して、エッチングする。ウェーハをひっくり返し、ステップ(f)において、背面^上に、フォトレジスト層2112を、パターン化して、ステップ(e)のパターンに位置合せする。ステップ(g)において、反応性イオンエッチング(reactive ion etching: RIE)によって、第3の犠牲層2012をエッチングし、ステップ(h)において、フォトレジストを除去し、新たなフォトレジスト層2114を蒸着して、パターン化する。ステップ(i)において、第3の犠牲層2012を、前にパターン化されたフォトレジストを用いて、もう一度エッチングする。そして、ステップ(j)において、深掘り反応性イオンエッチング(deep reactive ion etching: DRIE)プロセスによって、シリコン基板2010を、典型的には、50ミクロンの深さまでエッチングする。ステップ(k)において、背面のフォトレジストを除去し、ステップ(l)において、新たなフォトレジスト層2116を形成する。ステップ(m)において、フォトレジスト層2116をパターン化し、ステップ(n)において、シリコン基板2010を、DRIEを用いて、

30

40

50

第2の犠牲層₂₀₀₈に達するまでエッティングする。ステップ(○)において、RIEによって、第2の犠牲層₂₀₀₈をエッティングし、ステップ(p)において、第1の犠牲層₂₀₀₄及び第2の犠牲層₂₀₀₈の両方にそれぞれ達するまで、DRIEを行う。ステップ(q)において、再びウェーハをひっくり返し、ここで、任意ではあるが、ウェーハをキャリアウェーハ₂₁₃₀上に載置してもよい。また、ステップ(p)、(q)で形成されたバックエッティング領域₂₁₃₂により、ミラーの動きが可能になる。ステップ(r)において、上面に、フォトレジスト層₂₁₄₀をスピニ塗布し、ステップ(s)において、パターン化する。そして、ステップ(t)において、第1の活性層₂₀₀₂を、DRIEによって、第1の犠牲層₂₀₀₄に達するまでエッティングする。ステップ(u)において、第1の犠牲層₂₀₀₄を、RIEにより、エッティングする。ステップ(v)において、第2の活性層₂₀₀₆を、DRIEを用いて、約半分まで、すなわち典型的には₂₅ミクロンの深さまでエッティングする。この時点で、フォトレジスト層₂₁₄₀を除去し、ステップ(w)において、マスクされてない部分を、DRIEを用いて、第1の犠牲層₂₀₀₄及び第2の犠牲層₂₀₀₈にそれぞれ達するまでエッティングする。最後のステップであるステップ(x)において、ウェーハの背面からキャリアウェーハ₂₁₃₀を取り除き、ウェーハをダイスカットし、LPCVD法によって蒸着されたハードマスクと共に、第1の犠牲層₂₀₀₄を、フッ化水素酸(HF)でエッティングする。この時点で、ロータフィンガ₂₁₄₂、バウンサバネ₂₁₄₄、ステータフィンガ₂₁₄₆及びミラー₂₁₅₀が画定される。_{HF}で第1の犠牲層₂₀₀₄をエッティングするとき、ロータフィンガ₂₁₄₂の下に残っている第2の活性層₂₀₀₆の一部であって、ステータフィンガ₂₁₄₆の間の部分₂₁₄₈が、デバイスから除去される。

【0076】

上述した本発明の実施の形態により、剛性非線形性(バウンサの場合、装置の残りの部分と組み合わされた非線形剛性)を有する单一の素子(バウンサ又は予め湾曲された非線形剛性素子)により、走査ミラー及び他のデバイスのための三角波出力信号の生成を容易にすることができる。この技術では、信号振幅(したがって、電圧)に対する共振振動数の依存性により、非常に広い範囲で調整を行うことができる。平行平板により駆動される実施の形態では、バウンサの剛性が非常に高いので、ミラーは、バウンサに接触するときに、同期引込みを示すことなく、電極に非常に近接することができる。ミラーが電極に近接することによって、非常に大きい力を生じさせることができる。バウンサは、静電引力を反発力に変換し、これにより、ミラーは、実際にパルス的に駆動される。静電傾斜ミラーは、二重活性層SOI基板(double SOI substrate)で実現される。

【0077】

また、図20の二重活性層SOI基板を用いて、引用により本願に援用される、2004年3月8日に出願された米国仮特許出願番号第60/550,850に開示されている跳ね返り機構がないミラーを含む、「通常の」、汎用的なMEMSに基づく静電傾斜マイクロミラーを製造してもよい。傾斜機構は、垂直櫛歯駆動アクチュエータを用いる。二重活性層SOIウェーハを用いることにより、ウェーハの接着を必要としない精密な製造プロセスを実現することができる。図21に用いて上述したように、背面エッティングは、初期のハードマスクエッティングに位置合せされる。処理ステップ及び層機能間の位置合せをより正確にすることにより、必然的に、最終的なデバイスの精度が高くなる。

【0078】

図22aは、二重活性層SOI基板で実現された静電傾斜ミラーデバイス₂₂₀₀(以下、デバイス₂₂₀₀とも言う。)の斜視図である。デバイス₂₂₀₀は、図19のデバイス₁₉₀₀と共に多くの素子を備え、デバイス₂₂₀₀の製造プロセスは、跳ね返り機構/剛性素子を形成するプロセスを除いて、図21を用いて説明した製造プロセスと同じである。したがって、ここでは、本質的な違いのみを詳細に説明する。デバイス₂₂₀₀は、ミラー₂₂₀₂を備え、ミラー₂₂₀₂は、基板₂₂₀₆に固定された2つの機械的な捻れバネ₂₂₀₄間に懸架されている。捻れバネ₂₂₀₄の固定部の少なくとも1つは、金属領域が塗布された電気接觸パッド₂₂₀₈に連結されている。ミラー₂₂₀₂

の下(背面)の材料は、ミラー 2202 の傾斜を許容する空間 2210 を確保するために、(例えはエッティングにより)除去されている。ミラー 2202 を傾ける静電アクチュエータは、ミラー 2202 に連結されたロータフィンガ 2212 と、基板 2206 に固定されたステータフィンガ 2214 とを含んでいる。図 22 b は、ロータフィンガ 2212 とステータフィンガ 2214 間の垂直方向のオフセットを、より明瞭に示す図である。基板 2206 に固定されたステータフィンガ 2214 には、アクチュエータに駆動電力を供給する電気接触パッド 2216 が取り付けられている。なお、ミラー 2202 及び捻れバネ 2204 に関するロータフィンガ 2212 とステータフィンガ 2214 は、互いに嵌合するように配置されている。ミラー 2202 及びロータフィンガ 2212 は、第 1 の活性層(図 20 の 2002)に形成されている。ステータフィンガ 2214 は、第 2 の活性層(図 20 の 2006)に形成されている。第 3 の犠牲層(図 20 の 2012)は、ミラー 2202 及びアクチュエータの下方にリリースホールを形成するために除去する必要がある領域をパターン化するために使用される。

【0079】

このように、二重活性層 SOI ウェーハを用いて、静電駆動の垂直櫛歯駆動アクチュエータにより駆動される傾斜ミラーデバイスを実現することができる。櫛形フィンガは、ミラーに連結され、ミラーの動きは、ミラーを初期位置に戻すために、二重に作用する機械的なバネによって安定化及び規制される。ミラー及びミラーに連結されたロータフィンガは、動きが妨げられないように設けられた空間の上に懸架される。これらのMEMS デバイスの製造に単一のウェーハを用いることにより、必要なプロセスが多くなると生じやすい位置合せ誤差の可能性を低減することができる。

【0080】

本明細書において言及した全ての刊行物、特許公報及び特許出願は、各刊行物、特許公報及び特許出願を明示的且つ個別に、引用により本願に援用されると示した場合と同様に、その全体が引用により本願に援用されるものとする。更に、本明細書における引用文献の列挙又は特定は、これらの引用文献を従来技術として認めたとは解釈されない。

【図面の簡単な説明】

【0081】

【図 1】

走査のために用いられる傾斜マイクロミラーの素子及び動作原理を示す図である。

30

【図 2】

走査ミラーの回転角の要求される時間依存性を示す図である。

【図 3】

平行平板静電アクチュエータを用いた従来の傾斜ミラーを示す図である。

【図 4】

本発明に基づく振動モードマイクロミラーデバイスの概念及びその動作原理を示す図である。

【図 5】

図 4 に示すデバイスの傾斜角に対する捻り剛性(モーメント)の依存関係を示す図である。

40

【図 6】

図 4 に示す振動モードのミラーの動きの過程を示す図である。

【図 7 a】

シミュレーションにより得られた振動モードのミラーの動きのタイムチャート(時間に対する角度の依存関係)を示す図である。

【図 7 b】

バウンサの変形に対するミラーの固有振動数の依存関係を示す図である。

【図 8】

跳ね返り現象によって生じた駆動モーメント M_A のシミュレートされたタイムチャートを示す図である。

50

【図9】

バウンサがミラーに接続された振動モードマイクロミラーデバイスの更に他の実施の形態を示す図である。

【図10】

基板に連結されたより柔らかい更なるバウンサの対を有する振動モードマイクロミラーデバイスの更に他の実施の形態を示す図である。

【図11】

独立して変形可能な能動バウンサを備える振動モードマイクロミラーデバイスの更に他の実施の形態を示す図である。

【図12】

本発明の振動モードマイクロミラーデバイスにおいて用いられる予め湾曲された非線形剛性素子を示す図である。

10

【図12 b】

加えられた力と、図12 a の非線形剛性素子の伸びとの間の依存関係を示す図である。

【図13 a】

バウンサを備えた平行平板駆動振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の斜視図である。

【図13 b】

バウンサを備えた平行平板駆動振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の平面図である。

20

【図13 c】

バウンサを備えた平行平板駆動振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の駆動時の側面図である。

【図13 d】

バウンサを備えた平行平板駆動振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の非駆動時の側面図である。

【図14 a】

バウンサを備え、平行平板静電アクチュエータにより駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の平面図である。

30

【図14 b】

バウンサを備え、平行平板静電アクチュエータにより駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の斜視図である。

【図14 c】

バウンサを備え、平行平板静電アクチュエータにより駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の斜視図である。

【図15 a】

予め湾曲された非線形剛性駆動素子を備え、回転平行平板によって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の平面図である。

【図15 b】

予め湾曲された非線形剛性駆動素子を備え、回転平行平板によって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の斜視図である。

40

【図15 c】

図15 a の線 A - A の断面の斜視図である。

【図15 d】

図15 a の線 A - A の静電力による変形前の断面図である。

【図15 e】

図15 a の線 A - A の静電力による変形後の断面図である。

【図16 a】

予め湾曲された非線形剛性素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の平面図である。

50

【図16b】

予め湾曲された非線形剛性素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の斜視図である。

【図17a】

面内に予め湾曲された非線形剛性素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの他の実施の形態の平面図である。

【図17b】

面内に予め湾曲された非線形剛性素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの他の実施の形態のミラーを含む中央部分の平面図である。

10

【図17c】

面内に予め湾曲された非線形剛性素子を備え、平面櫛歯ドライブによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの他の実施の形態のミラーを含む中央部分の斜視図である。

【図18】

予め湾曲された非線形剛性ビームの様々な形状を示す図である。

【図19a】

バウンサを備え、垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の全体図である。

【図19b】

バウンサを備え、垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの実施の形態の一部拡大図である。

20

【図19c】

本発明に基づく垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの更に他の実施の形態を示す図である。

【図19d】

本発明に基づく垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの更に他の実施の形態を示す図である。

【図19e】

本発明に基づく垂直櫛歯駆動アクチュエータによって駆動される振動モードマイクロミラーデバイスの更に他の実施の形態を示す図である。

30

【図20】

二重活性層SOIウェーハの断面の様々な層を示す図である。

【図21a】

二重活性層SOIウェーハを用いて、振動モードマイクロミラーを製造するための例示的なプロセスの手順(a)~(1)を説明する図である。

【図21b】

二重活性層SOIウェーハを用いて、振動モードマイクロミラーを製造するための例示的なプロセスの手順(m)~(x)を説明する図である。

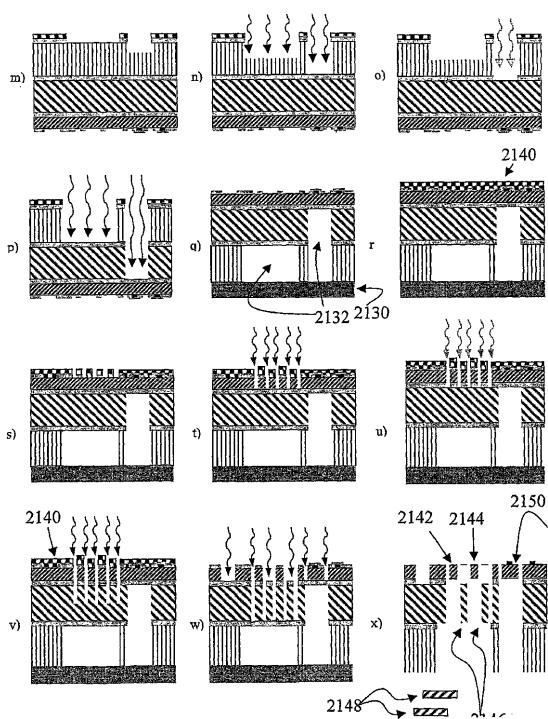
【図22a】

二重活性層SOI基板で実現された静電傾斜ミラーデバイスの斜視図である。

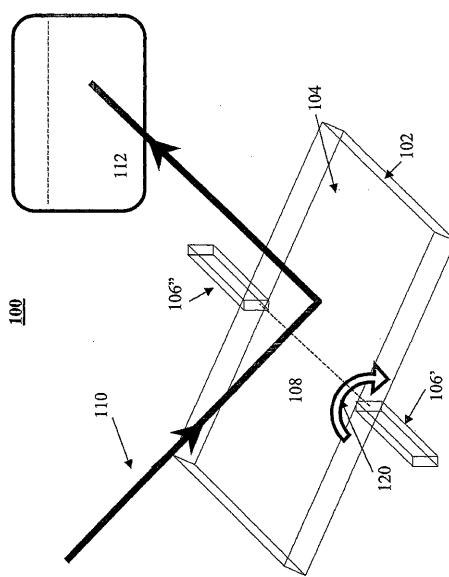
【図22b】

垂直櫛歯駆動アクチュエータのロータフィンガと、ステータフィンガとの間の垂直オフセットを詳細に示す図である。

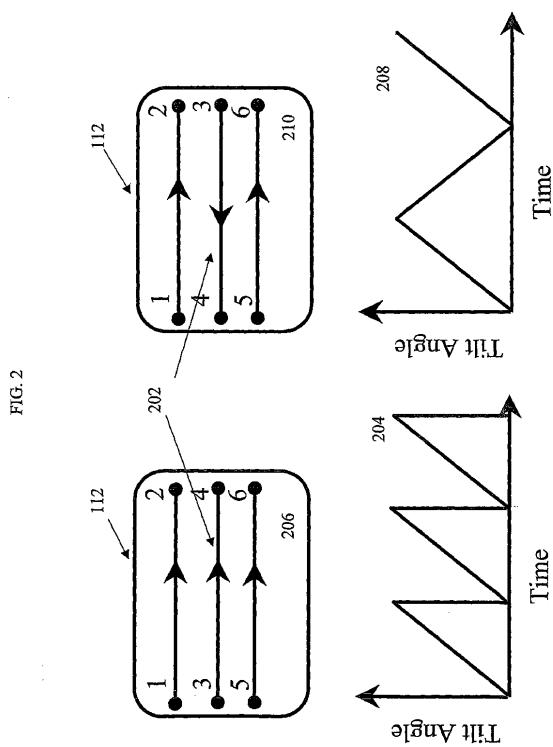
40



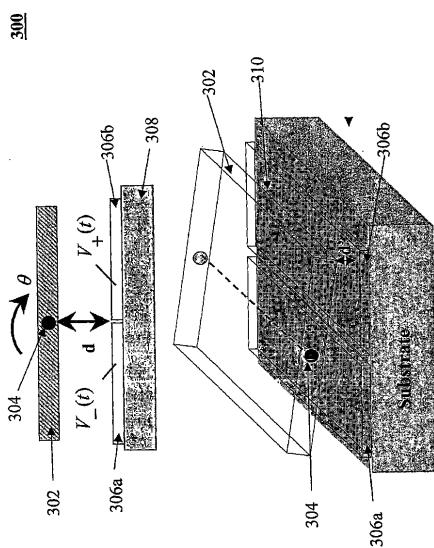
【図1】



【図2】

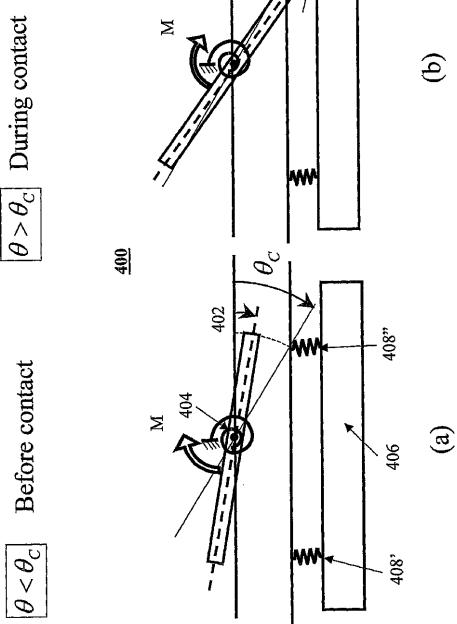


【図3】



【図4】

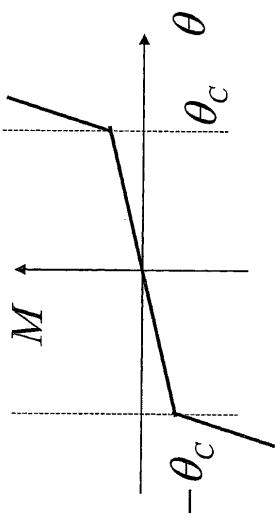
FIG.4



【図5】

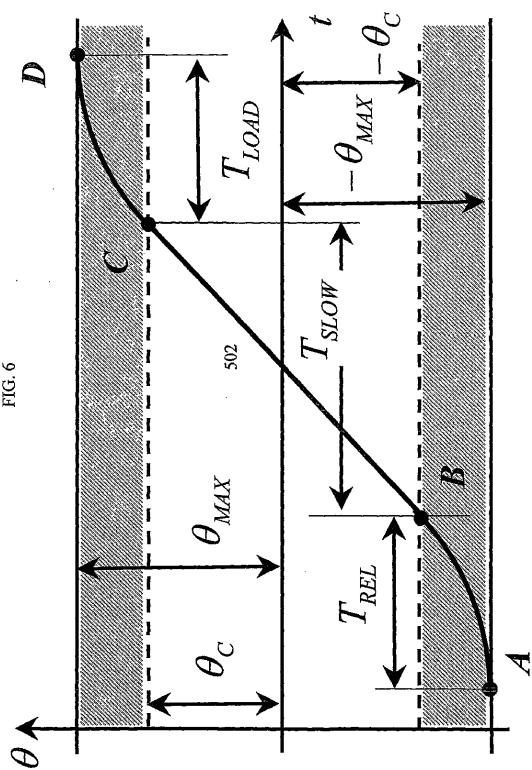
Restoring moment-impact oscillator

FIG.5



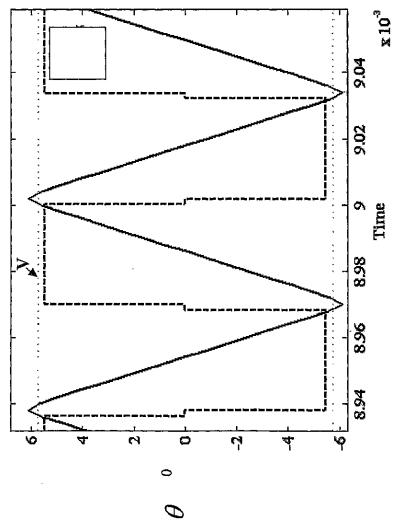
【図6】

FIG.6

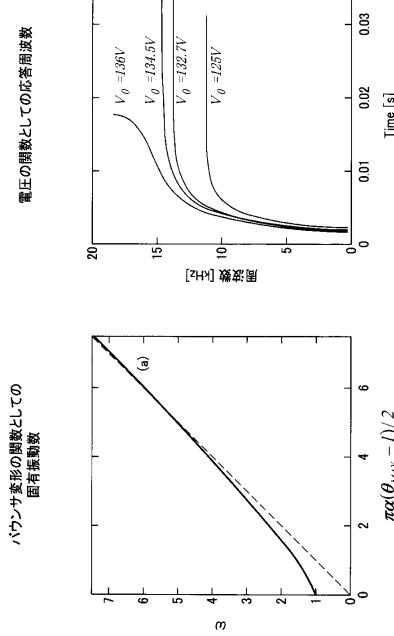


【図7 a】

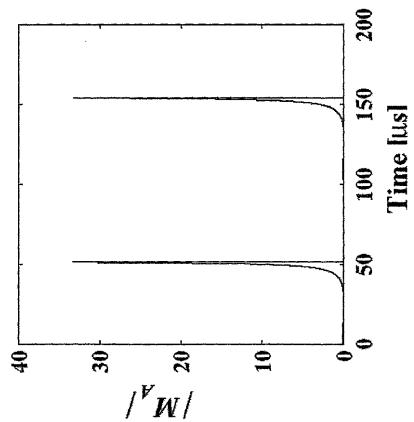
FIG. 7a



【図 7 b】

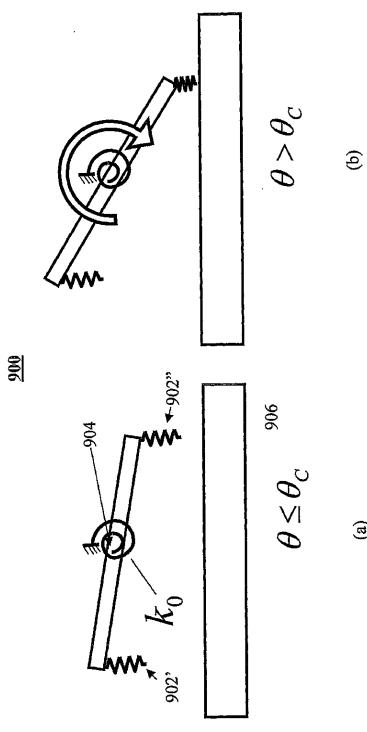


【図 8】



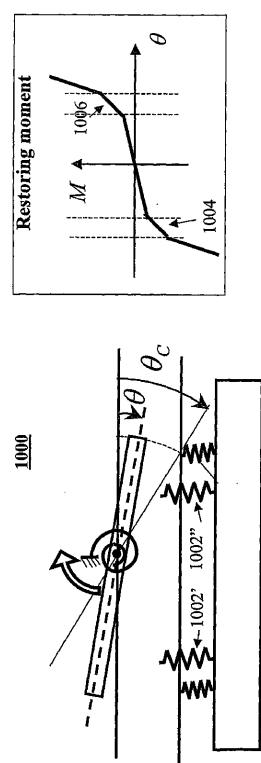
【図 9】

FIG. 9



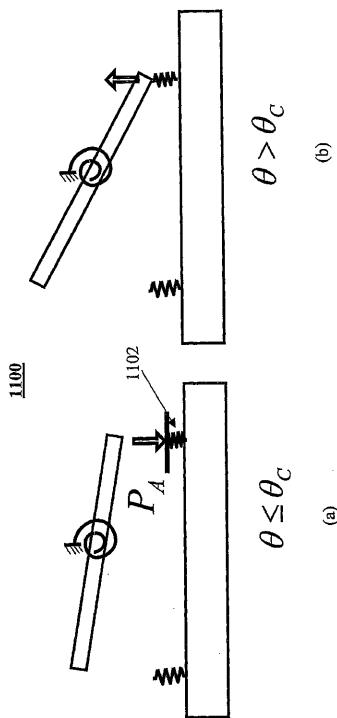
【図 10】

FIG. 10



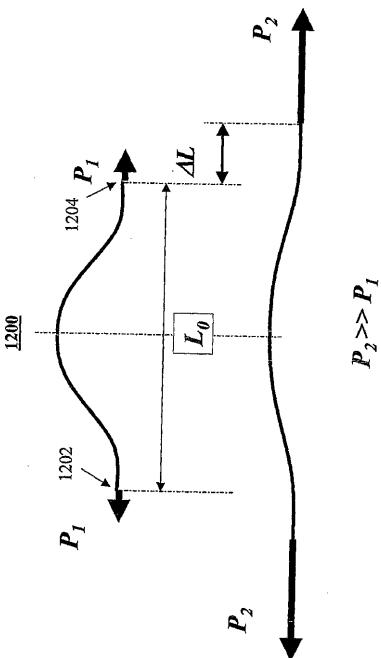
【図 1 1】

FIG. 11



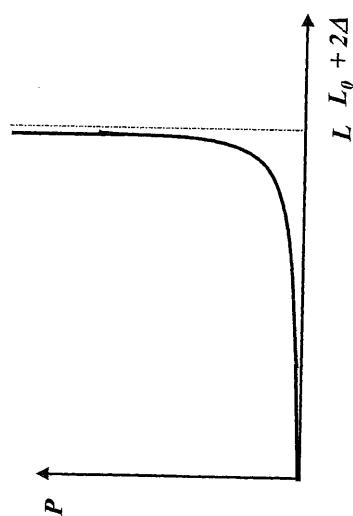
【図 1 2】

FIG. 12



【図 1 2 b】

FIG. 12b



【図 1 3 a】

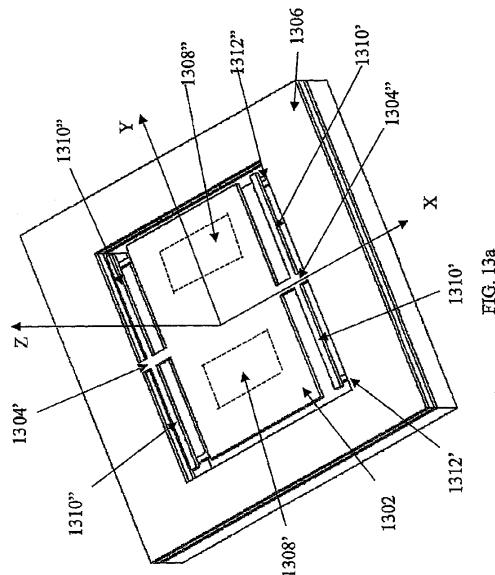


FIG. 13a

【図 1 3 b】

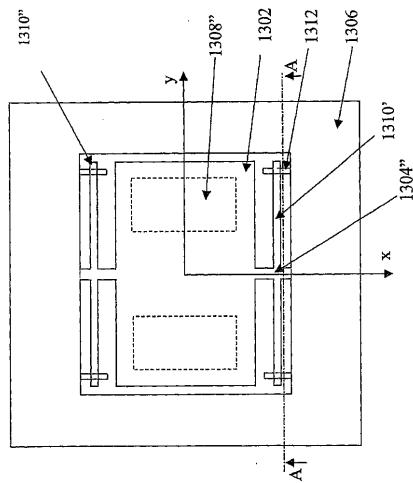


FIG. 13b

【図 1 3 c】

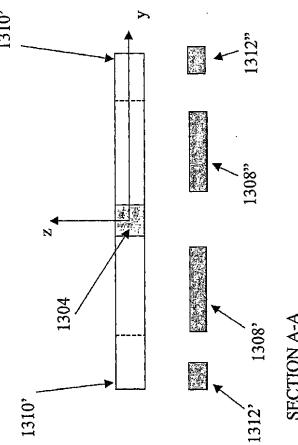


FIG. 13c

【図 1 3 d】

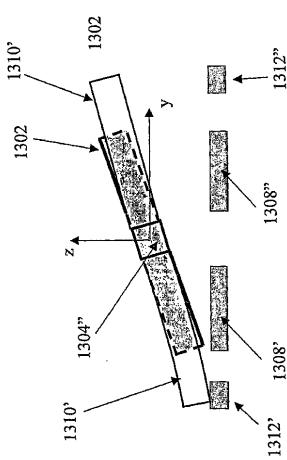


FIG. 13d

【図 1 4 a】

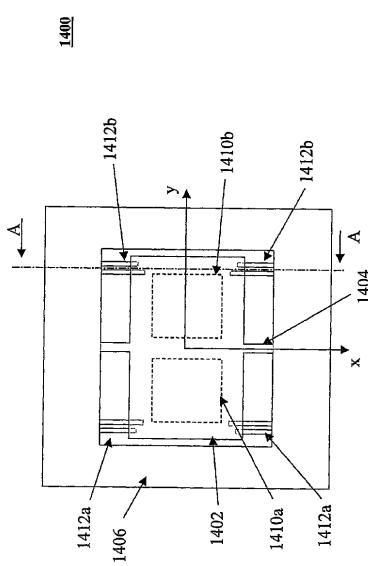


FIG. 14a

【図 1 4 b】

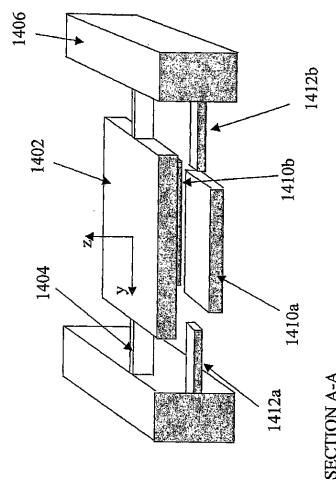


FIG. 14b

【図 1 4 c】

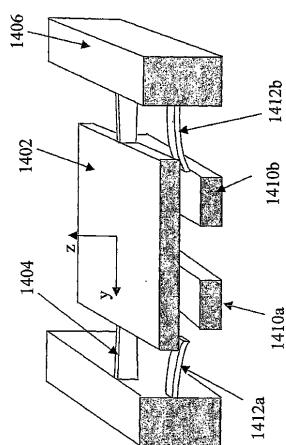


FIG. 14c

【図 1 5 a】

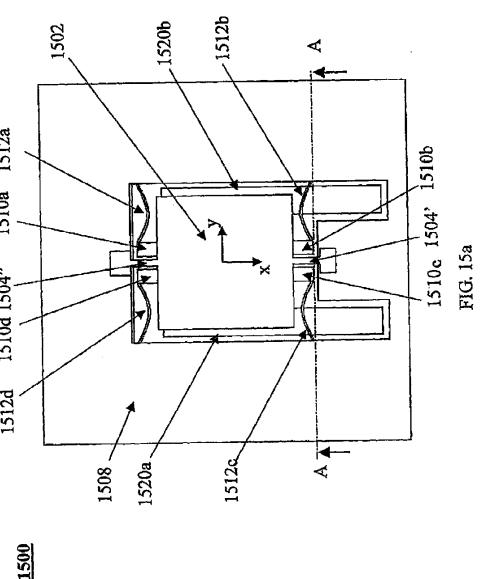


FIG. 15a

【図 1 5 b】

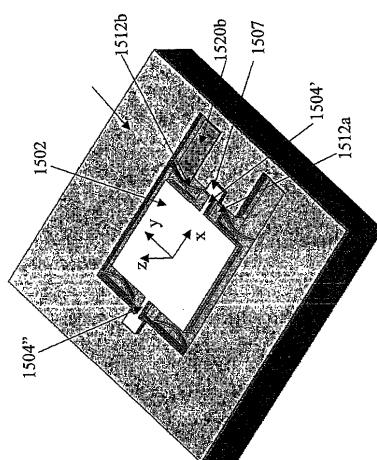


FIG. 15b

【図 15c】

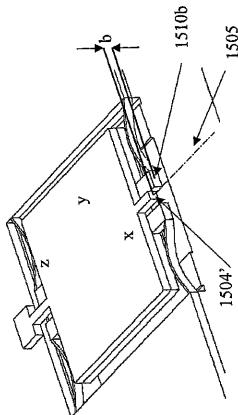


FIG. 15c

【図 15d】

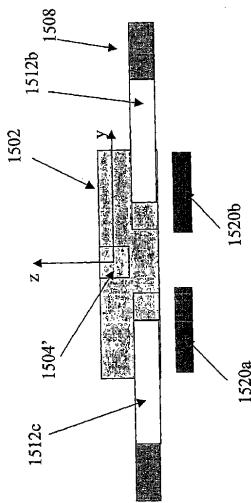


FIG. 15d

【図 15e】

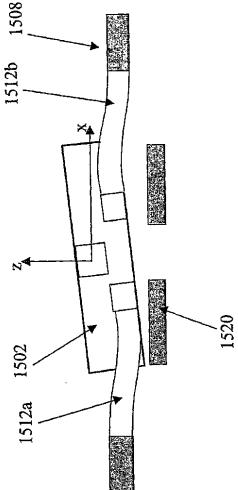


FIG. 15e

【図 16a】

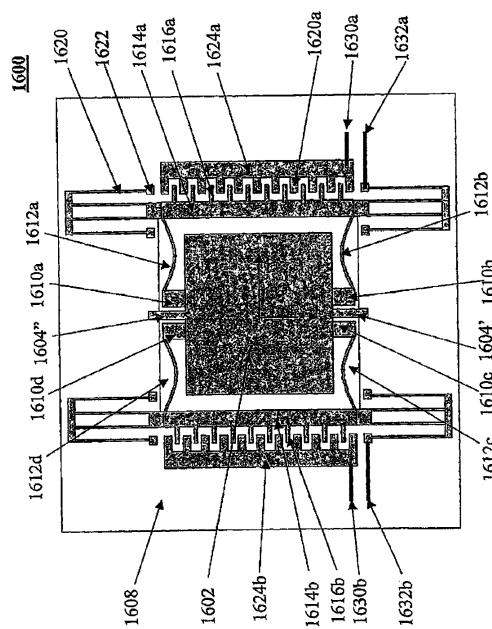


FIG. 16a

【図16b】

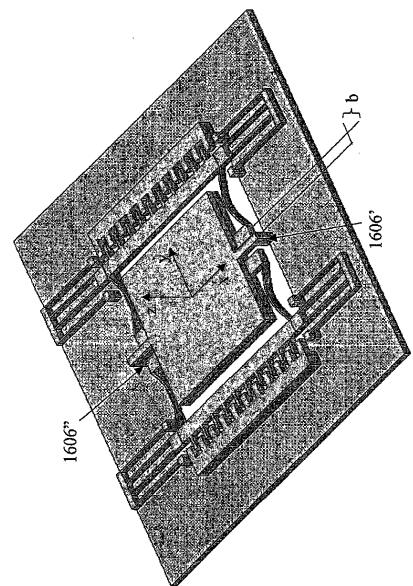


FIG. 16b

【図17a】

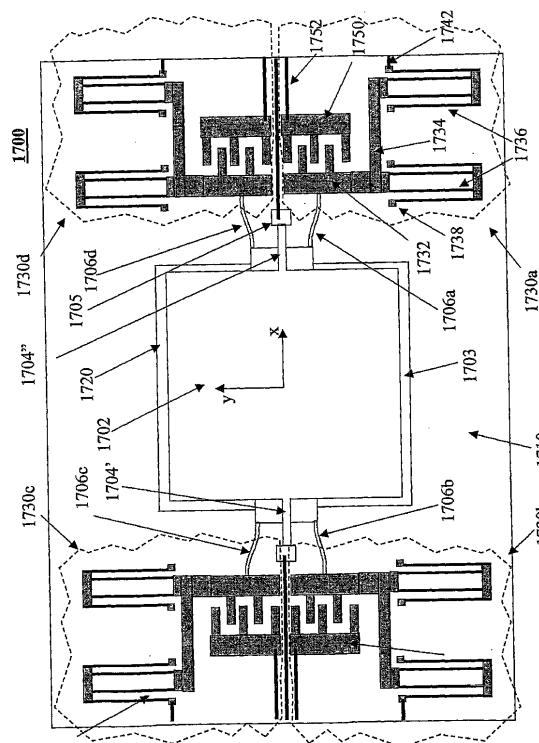


FIG. 17a

【図17b】

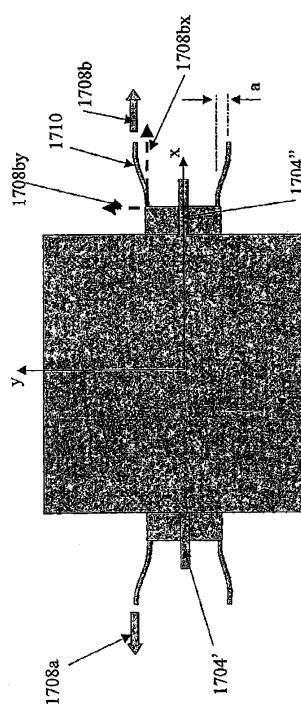


FIG 17b

【図17c】

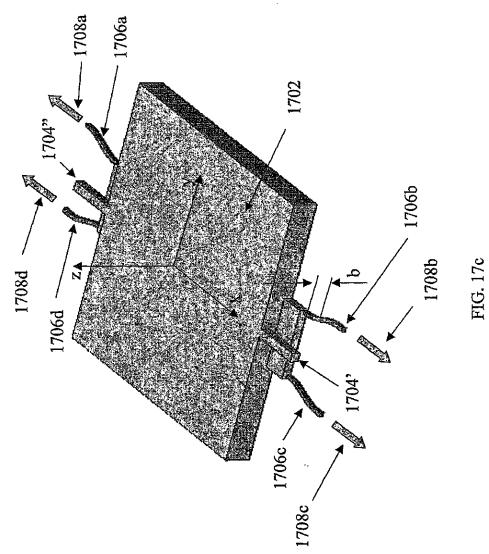
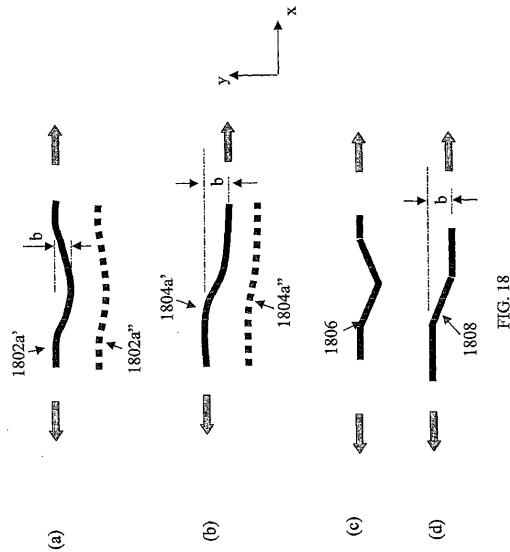
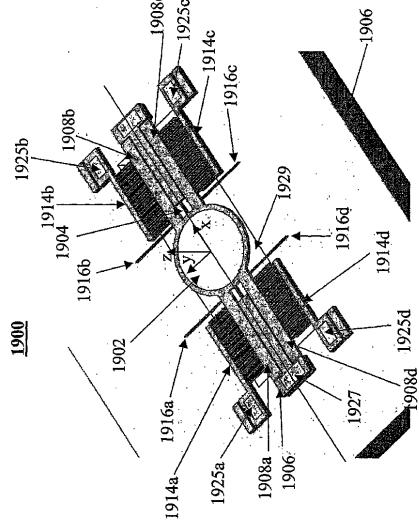


FIG. 17c

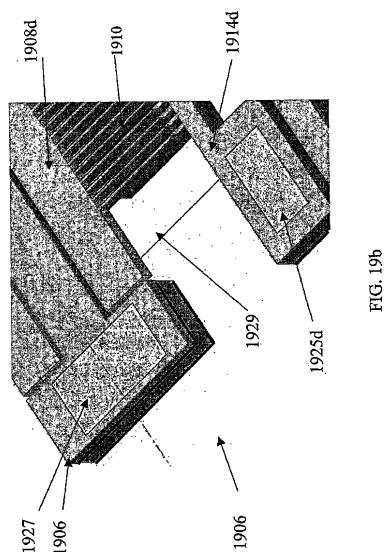
【図18】



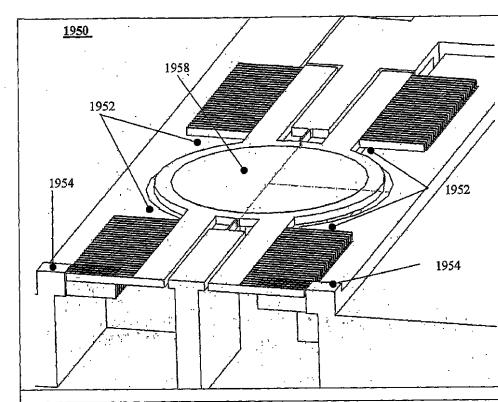
【図19 a】



【図19 b】



【図19 c】



【図 19d】

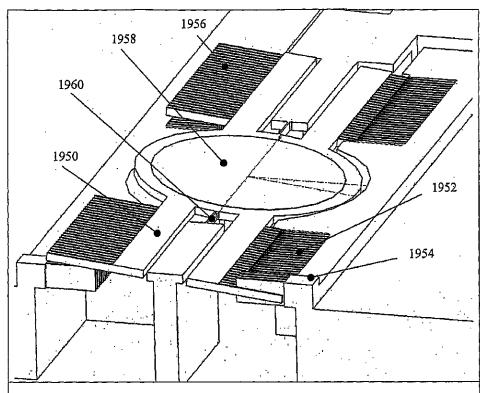


FIG. 19d

【図 19e】

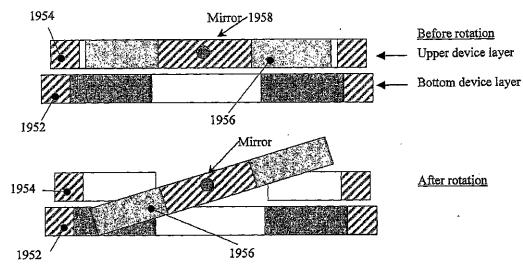
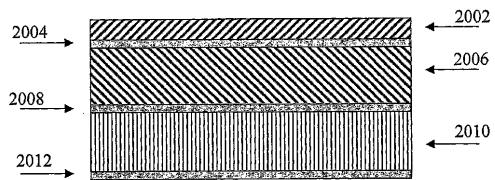


FIG. 19e

【図 20】

FIG. 20



【図 22a】

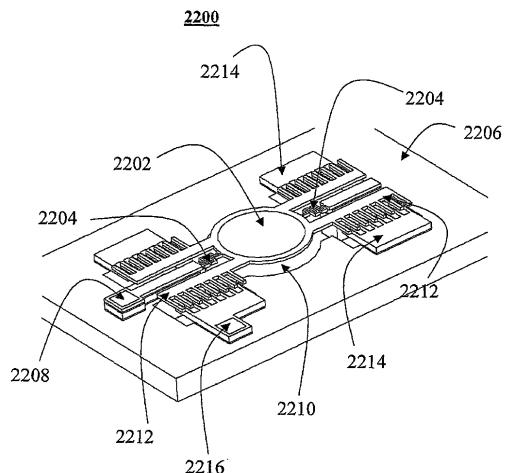


Fig.22a

【図 22b】

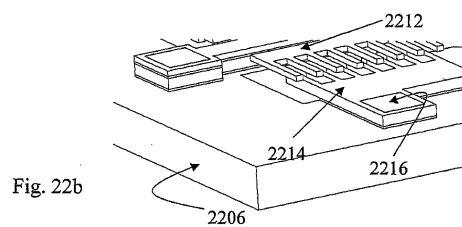
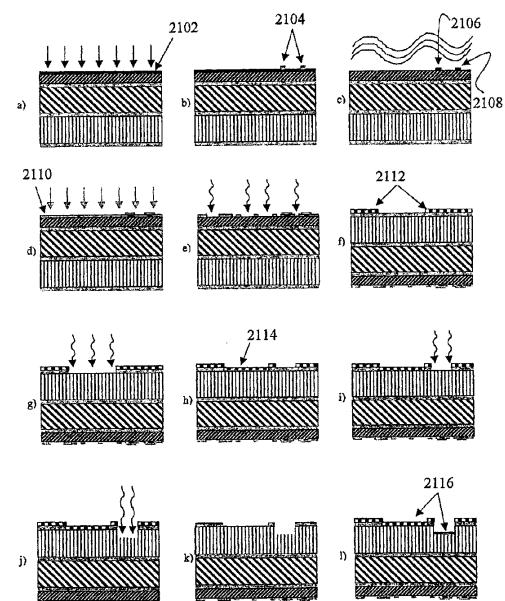
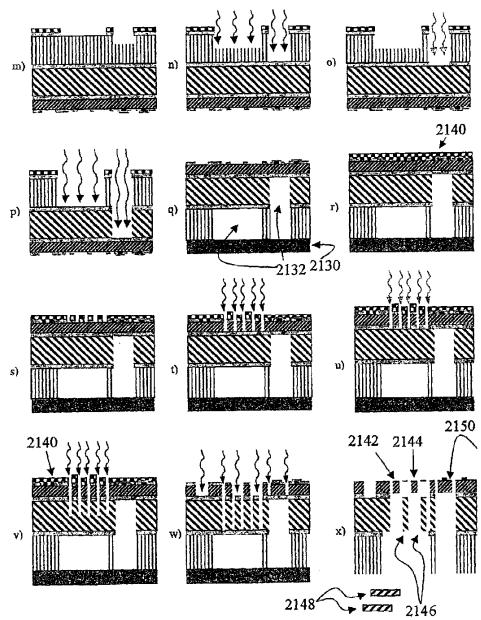


Fig. 22b

【図 21a】



【図21b】



フロントページの続き

(72)発明者 フーバー、アヴィグドル
イスラエル国 イエフド 56000 メヴォ ヤスミン 1

(72)発明者 ラレザー、ロネン
イスラエル国 リション レジオン 75310 ランバン ストリート 4 / b

審査官 吉田 英一

(56)参考文献 米国特許出願公開第2005/0036196(US, A1)
特開2005-043612(JP, A)
特開2004-347663(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 02 B 26/00 - 26/12
B 81 B 1/00 - 7/04
B 81 C 1/00 - 99/00