

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-516783
(P2004-516783A)

(43) 公表日 平成16年6月3日(2004.6.3)

(51) Int. Cl.⁷

H02N 1/00
B81B 3/00

F I

H02N 1/00
B81B 3/00

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 93 頁)

(21) 出願番号 特願2002-550393 (P2002-550393)
 (86) (22) 出願日 平成13年12月4日 (2001.12.4)
 (85) 翻訳文提出日 平成15年6月11日 (2003.6.11)
 (86) 国際出願番号 PCT/GB2001/005349
 (87) 国際公開番号 W02002/049199
 (87) 国際公開日 平成14年6月20日 (2002.6.20)
 (31) 優先権主張番号 0030103.6
 (32) 優先日 平成12年12月11日 (2000.12.11)
 (33) 優先権主張国 英国 (GB)
 (31) 優先権主張番号 0102337.3
 (32) 優先日 平成13年1月30日 (2001.1.30)
 (33) 優先権主張国 英国 (GB)
 (31) 優先権主張番号 0119759.9
 (32) 優先日 平成13年8月14日 (2001.8.14)
 (33) 優先権主張国 英国 (GB)

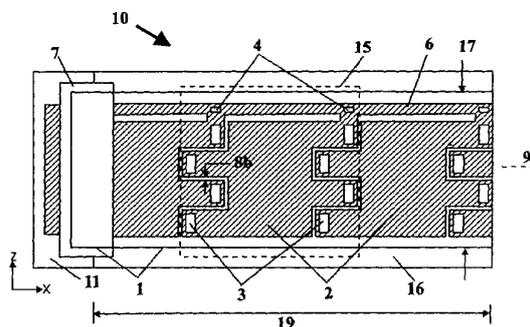
(71) 出願人 503211530
 ダバイ ラド エイチ
 イギリス エスエル3 9エヌエー パー
 クシャー ダチュット リンチフィールド
 ロード 5
 (74) 代理人 100072224
 弁理士 朝倉 正幸
 (72) 発明者 ダバイ ラド エイチ
 イギリス エスエル3 9エヌエー パー
 クシャー ダチュット リンチフィールド
 ロード 5

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 静電装置

(57) 【要約】

多数の第2電極(2)を設けた第1可撓電極(1)を備えて、この第1可撓電極(1)と共に可動する静電装置(10)。電荷によって、各々の第2電極(2)は、第1可撓電極(1)の偏向を生じ、この偏向は、共に運動する第2電極の動きにより増強される。多方向に運動させたり、回転や捻りといった動きを含めて、第1可撓電極を面内や面外に可動させるように静電装置を様々に異なる設計とすることができる。こうした構成とすることで、静電装置は、集積回路の電圧に合わせて機能し、かつ、集積回路製造技術を使用して製造することができる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

偏向可能な第 1 可撓電極と、該第 1 可撓電極に取り付けられ、これと共に可動する少なくとも 1 つの第 2 電極とを備え、電極に電荷が印加されると第 1 可撓電極に偏向を生じさせる静電装置。

【請求項 2】

前記装置がサポートに取り付けられる請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

複数の第 2 電極が互いに近接して第 1 電極上に設けられる請求項 1 または 2 に記載の装置。

10

【請求項 4】

前記第 2 電極または少なくともそのいくつかは線形配列に配置される請求項 3 に記載の装置。

【請求項 5】

前記第 2 電極または少なくともそのいくつかは非線形配列に配置される請求項 3 又は 4 に記載の装置。

【請求項 6】

前記第 2 電極は、1 つ以上の軸に関して第 1 電極に偏向を生じさせるように配置される請求項 3、4、又は 5 に記載の装置。

【請求項 7】

複数の第 1 電極を含み、第 1 電極は各々、その上に取り付けられた少なくとも 1 つの第 2 電極を備える前記請求項の何れかに記載の装置。

20

【請求項 8】

前記第 1 電極は機械的に一体形成され、1 つの第 1 電極の偏向が該第 1 電極又は少なくとも 1 つの別の第 1 電極の位置に影響する請求項 7 に記載の装置。

【請求項 9】

前記第 1 電極が、連続して、平列式に、異なる平面又は角度に互いに、あるいは、これらの任意の組合せに配置される請求項 8 に記載の装置。

【請求項 10】

前記装置が自身の面の内外で運動可能な前記請求項の何れかに記載の装置。

30

【請求項 11】

偏向が一方向又は二方向に装置の収縮を生じる請求項 10 に記載の装置。

【請求項 12】

対向する向きに偏向をもたらすように、1 つ又は複数の第 1 電極に設けられた複数の第 2 電極を含む前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 13】

1 つ又は複数の第 2 電極が 1 つ又は複数の第 1 電極の第 1 表面に設けられ、1 つ又は複数の第 2 電極が 1 つ又は複数の第 1 電極の対向する第 2 表面に設けられる請求項 12 に記載の装置。

【請求項 14】

前記又は各第 2 電極が、それが設けられた第 1 電極より固い前記請求項の何れかに記載の装置。

40

【請求項 15】

多数の第 2 電極が設けられる場合、少なくとも 2 つの隣接第 2 電極が一部重複する前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 16】

前記少なくとも 2 つの第 2 電極は、実質的にその平面内に伸長するフィンガを備え、該フィンガが互いに組み合わせる請求項 15 に記載の装置。

【請求項 17】

第 1 及び第 2 電極に出力を供給するための共有供給レールを備える前記請求項の何れかに

50

記載の装置。

【請求項 18】

異なる方法で第 1 及び第 2 電極に供給するために複数の供給レールを備えた前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 19】

前記第 1 及び第 2 電極に付与する電力を制御するように動作可能な制御ユニットを含む請求項 17 又は 18 に記載の装置。

【請求項 20】

1 つ又は複数の第 2 電極がブリッジ式、または、カンチレバー式に第 1 電極に設けられる前記請求項の何れかに記載の装置。

10

【請求項 21】

前記第 1 及び / 又は第 2 電極は、少なくとも 1 つの伝導層を含む積層部材である前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 22】

前記第 1 又は第 2 電極はその偏向特性を調節するために、穴と、弱勢エリアと、強勢エリアとを有する前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 23】

前記又は各第 1 電極が不浸透性である請求項 1 ~ 21 の何れかに記載の装置。

【請求項 24】

前記第 1 及び第 2 電極間のギャップが真空に保たれるか、もしくは気体、流体、ゲル、又は変形可能な固体の 1 つまたは複数で充填される前記請求項の何れかに記載の装置。

20

【請求項 25】

少なくとも 1 つの第 2 電極がアクチュエータの一部として使用され、少なくとも 1 つの第 2 電極がセンサの一部として使用される前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 26】

前記装置は、時分割ベースでアクチュエータ及びセンサの両方に使用される前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 27】

第 1 及び第 2 平面にそれぞれ設けられた第 1 及び第 2 電極を含み、両電極は、電荷が印加されると該平面に対する角度方向に移動するように動作する静電装置。

30

【請求項 28】

集積回路製造プロセス、MEMS 製造プロセス、又はマイクロ製造プロセスによって製造される静電装置。

【請求項 29】

前記請求項の何れかに記載の静電装置を含むミラー。

【請求項 30】

請求項 1 ~ 28 の何れかに記載の静電装置を含むスピーカ、イヤーフोन、マイクロフオン、超音波検出器又は変換器。

【請求項 31】

請求項 1 ~ 28 の何れかに記載の静電装置を含む光学式スキャナー、ビーム操縦装置、又は総 - 光スイッチ。

40

【請求項 32】

請求項 1 ~ 28 の何れかに記載の静電装置を含む感圧センサ、ポンプ、又はインクジェット・カートリッジ。

【請求項 33】

請求項 1 ~ 28 の何れかに記載の静電装置を含む加速時計、又は加速度センサ。

【請求項 34】

前記請求項の何れかに記載の 2 つ又はそれ以上の静電装置の一次元、二次元、三次元アレイ。

【発明の詳細な説明】

50

【0001】

本発明は静電装置に関し、より詳しくは、超小型電気機械システム(MEMS)またはマイクロ加工装置と一般に称される類のアクチュエータ及びセンサに関する。

【0002】

【背景技術】

通常、アクチュエータであれ、センサであれ、従来技術の静電型変換器は、ドライブ電源電圧と接続する第1および第2部材を備える。そうして生じる引き付け静電力は、これらの部材の少なくとも一方を他方に移動させる。このため、これらの部材は、帯電や放電を容易にし、適正に機能させるため、普通、金属やドーブ処理されたポリシリコンなどの導電体で形成される。

10

【0003】

静止対電極の上に隙間を開けて可動電極を吊り下げた標準的なカンチレバー・アクチュエータなどの従来装置は、例えば、コバックス(1998年:WCB/McGraw-Hill)著による『超小型変換器原典(Micromachined Transducersne Sourcebook)278~281頁に記載されている。しかし、この装置は、隙間長と有効な偏向との間に複雑な問題を抱え、後者の有効な偏向は、ギャップ(隙間)それ自体を超えることはない、かなり大きい。大きな偏向には大きなギャップ、すなわち、標準型のIC駆動回路と殆ど相容れない大電圧を必要とする。多くの場合、実際のギャップより大きな偏向を有する装置を製造することが極めて望ましい。この文献は、主にフリンジ電界によって引力を生成する多数の微小インターデジタル・フィンガを有するコムドライブ・アクチュエータを開示し、この技術は、基板平面に固有のより大きな動きを生み出す。しかし、コムドライブ・アクチュエータは、相対的に大きなサポート/スプリング受動エリア、限定された面外動作、望ましく中央平衡されたフィンガ位置の維持の困難(特に、ギャップ幅が小さい場合)といったいくつかの問題を抱えている。

20

【0004】

その他の先行技術は、1993年IEEEによって刊行された東北大学のヤマグチモトル他による『分布静電型マイクロ・アクチュエータ(Distributed Electrostatic Micro Actuator)』及び米国特許第5,206,557号がある。両文献とも、本来、面外運動ができない大きな面内ストロークを生成させるため、直列に接続された多数の部材を提案している。スタックされた部材が標準的な引張り力を備えたロングチェーンを効率的に形成する。コムドライブと共にこれらの装置を製造するには、実際可能なギャップ幅と駆動電圧レベル(及び性能)の間にトレードオフを生じる可能性のある困難な作業といった、小さなギャップを有する深型構造のマイクロ加工に対する要件を満たす必要がある。これは、標準的な集積回路の駆動電圧と製造の適合性を損なうものである。

30

【0005】

本発明は、改良された静電装置を提供することを目的とする。

【0006】

【発明の開示】

本発明の一態様によれば、偏向可能な第1可撓電極と、第1可撓電極上に設けられて第1可撓電極と一緒に動く少なくとも一つの第2電極とを備え、両電極に電荷が印加されると、第1可撓電極を偏向させる静電装置が、本発明で提供される。

40

【0007】

一つまたはそれ以上の第2電極は、第1可撓電極と一緒に動くことで、静電力が発生すると、第1可撓電極の偏向を促進させるように機能する。第1電極と第2電極を近接させると、より大きな静電力を発生させ、電力密度及び効率を向上させることができ、また、低い動作電圧にて、大きな偏向を維持することができる。この装置は、半導体集積回路と同程度の駆動電圧レベルで動作可能である。また、この装置は、機これに械的倍率増大機構を組み込み、負荷適応性を改善することにより、従来装置が提供する大きい力や小さい偏向を、小さい力や大きい偏向に変換(その逆も可能)することができる。さらに、従来

50

装置における電極間ギャップと偏向との間の解きほぐせない複雑な関係を、本発明の装置はうまく解きほぐし、それぞれを別個に最適化させている。

【0008】

偏向を高めるため、及び/又は、偏向と力のトレードオフを高めるため、あるいは弱めるための付加的なパラメータとして、セルNの数を使用することで装置設計の柔軟性を高めることができる。例えば、小さいギャップを採用した場合には(例えば、より低い駆動電圧や、より高い出力密度と効率などの理由から)、Nを増やすことで偏向を増大させることができる。

【0009】

本発明の装置は、面内運動や偏向はもとより、面外運動や偏向をも比較的大きくするものである。 10

【0010】

従って、先行技術による装置に比べて、単位印加電圧当たりの第1電極の運動量は増加する。これにより、本発明の装置は、集積回路(IC)で典型的に使用される電圧と同程度の低電圧でも動作する。このため、IC製造との両立性のみならず、本発明の装置はICや駆動回路と統合させることが可能で(例えば単一化が可能で)あり、大幅なコスト節減をもたらす。

【0011】

装置を多様に応用する場合、ギャップを小さく維持しながら大きな偏向をもたらす装置を作ることが極めて望ましい。さらに、より小さなギャップは、電力密度や効率を高め、及び/又は駆動電圧レベルを低くすることができるという利益をもたらす。 20

【0012】

好ましい実施例においては、第1電極上に互いに接近した複数個の第2電極が設けられる。多数の第2電極は第1電極の偏向を高める。

【0013】

複数個の第2電極を設ける場合、線形の配列にしてもよく、その他の形に配列させても構わない。非線形に配置させた場合には、第1電極を2つ以上の軸で偏向させることができ、アクチュエータ又はセンサに複雑な動きをさせることができる。

【0014】

ある実施例では、1つ又は複数の第1電極上に複数個の第2電極を設け、この1つ又は複数の第1電極を対向する向きに運動させる。また、ある実施例では、一つ又は複数の第2電極を第1電極の上面と呼ばれるところに位置させ、一つ又は複数の第2電極を第1電極の下面と呼ばれるところに位置させ、上面の第2電極にて第1電極を下向きに偏向または運動させ、下面の第2電極にて第1電極を上向きに偏向または運動させる。 30

【0015】

多数の第2電極を設ける場合、例えば、他の電極のフィンガと互いに組み合うフィンガを設けることで、第2電極を部分的に重ねることができる。別法として、第2電極の隣り合う配列を交互に配置して、別の形態で重ねることもできる。

【0016】

好ましくは、第2電極に電力を供給するための共通供給レールを設ける。異なる方法で駆動させる多数の第2電極を設ける場合は、複数の供給レールが用意される。 40

【0017】

第1電極と第2電極とのギャップは、真空状態に保持されるか、あるいは気体、液体、ゲル、または変形可能な固体物質で充填した状態に保持される。

【0018】

第1電極及び/又は第2電極には、製造上の目的によるアクセスホール又はその他の穴、偏向を減少もしくは増加させる調節領域を設けることができる。また、ポンプや圧力センサとして利用する場合には、第1電極が穴を持たないこともある。

【0019】

第1電極及び/又は第2電極は、少なくとも1つの導電層を含む層状部材から構成される 50

ことができる。

【0020】

本発明の別の実施態様によれば、第1および第2平面にそれぞれ設けられた第1電極および第2電極を有する静電装置が提供され、これらの電極は両方とも電極間に電荷を印加することで、平面に対するある角度をなす方向に動くことができる。

【0021】

本発明のさらに別の実施態様によれば、集積回路またはマイクロ加工/MEMS製造技術によって作られる静電装置が提供される。

【0022】

本発明は、アクチュエータ、センサ、及び、ここに教示される静電装置を使用するアクチュエータやセンサを組み込んだ装置に拡張できる。 10

【0023】

本発明によれば、集積回路と同程度の低電圧で機能する新しいタイプのアクチュエータおよびセンサを提供することができる。そうしたアクチュエータは、偏向VS電圧特性が改善されると共に、偏向と力とのトレードオフも改善され、より感度の高いセンサとなる。

【0024】

さらに、本発明は、より多目的で適応性の高いアクチュエータの設計パラメータを提供する。すなわち、本発明は、面の内外で運動し、偏向することができ、従って、3つの軸で動くことができる装置を提供する。

【0025】

20

【実施例】

次に、本発明の実施形態を添付の図面を参照して具体例によって説明する。

【0026】

当業者であれば、本書に記載したアクチュエータがセンサとしても使用可能で、従って、『装置』なる用語がアクチュエータとセンサの両方を包括することは理解されよう。さらに、明細書全体として簡便性を目指してアクチュエータに焦点を当てているが、同等のセンサも包括するものである。

【0027】

明細書において、電極E1は以下に記載の部材1、31、91、及び101を示し、同じく、電極E2は、部材2、32、92、及び102を示す。一つ又は複数の軸線について 30
偏向又はわん曲可能な装置をここでは、単軸装置、複軸装置などと称する。

【0028】

図1、2a及び2bに示した装置の実施例は、1つの軸線に対して偏向可能である（この実施例ではZ軸）。図1は装置の平面図、図2aは側面図である。理解しやすいように、図1は第1層の概略だけを示し、図2aと2bで中実の形態を示す。

【0029】

装置10は、分離ギャップ3aをもたらず電気絶縁層3によって互いに隔てられたスチフネスK1の導電性第1部材または層1と、スチフネスK2の導電性第2部材2とを具備する。部材1と2は、装置の第1電極E1と第2電極E2とをそれぞれ形成する。層3は、部材1と2の間のギャップ3aを維持するスペーサとして機能するサポートポスト又はアンカーパッドを備える。 40

【0030】

部材1と2及び層3は、多数のブリッジ状セル15を形成する。これらセル15の配列は共通第1部材1（電極E1）を共有し、装置の本体を成す柔構造18を構成する。

【0031】

有効長さ19と有効幅17とを有する部材18は、ギャップ14によって基板16上に持ち上げられたサポートポスト11に取り付け、又は固定される。従って、部材18は基板16上に吊るされ、その自由端（片持梁）は図2bに示すように角方向12に沿って可動する。

【0032】

第 1 部材 1 が実質的にセル 1 5 の端から端まで連続する一方、第 2 部材 2 は多数のセル 1 5 を個々に形成するように分割される。セル 1 5 は適当な長さ寸法とを有し、方向 9 に沿って、及び / 又は Z 軸に沿って横に連続する。

【 0 0 3 3 】

図 1、2 a 及び 2 b の実施例において、第 2 部材 2 (電極 E 2) は部材の平面に伸びる多数のフィンガを備え、隣接する部材 2 のフィンガが組合わさるよう配置されている。これは、後述するように第 1 部材 1 の偏向を改善する。この実施例において、隣接する部材 2 はギャップ 8 b によって隔てられ、距離 8 a によって互いに一部重複する。距離 8 a は任意の値にできるが、好ましくは、セル長さの半分より短くするのが望ましい。

【 0 0 3 4 】

図 2 b は偏向状態にある装置 1 0 を示す。

【 0 0 3 5 】

部材 1 と 2 (電極 E 1 と E 2) の電気接続ターミナルは位置 1 1 にあり、電源 5 への接続を容易にする。各第 2 電極 E 2 は、同一の層から形成される共通供給レール 6 に接続する。

【 0 0 3 6 】

第 1 電極 E 1 はセル 1 5 の間で共有されるため、その末端が位置 1 1 で電源 5 への接続に利用できる。

【 0 0 3 7 】

第 2 電極 E 2 と同様、メモリ 6 もアンカーパッド 4 (3 に相似) によって電極 E 1 から隔

【 0 0 3 8 】

装置 1 0 の長さ 1 9、セル 1 5 の長さ、アクティブセルのブリッジ長さ (すなわち、部材 3 の間隔) と幅 1 7、その他の関連パラメータなど各種の部材のスチフネス (k) や厚さ (t) といった機械的性質は、特有な活用を考慮して、また、好ましい操作特性を達成するべく、適正に選択される。殆どの静電装置に共通のように、エネルギー、出力、電力は通常、電極 E 1 と E 2 間にある装置の作用面積と電界に比例する。セル幅 1 7 の増大、及び / 又はセルの並列を利用して作用面積を拡大することで、出力が高められる。さらに、電界を増やしたり、所望する電圧が固定している場合は電極間のギャップを減らすことで出力密度 (及び力) が高められる。次に、装置に組み込まれた拡大能力を利用して、所望

【 0 0 3 9 】

一例において、 $N = 10 - 20$ 、およその寸法は、 t_1 (層₁) = 1 マイクロメータ、 t_2 (層₂) = 2 マイクロメータ、 t_3 (層₃) = 3 マイクロメータであり、これらの寸法は、当然、所望する性能やその他の要件によって変わる。

【 0 0 4 0 】

装置 1 0 を電源 5 に接続させると、電極 E 1 と E 2 間のキャパシタンスの結果、電荷 / 静電荷が蓄積される。これにより、電極 E 1 に変形又はカールが生じ、図 2 b に示すように自由端が角方向 1 2 に沿って面外に偏向する。偏向規模は、印加される電圧レベルに比例する。偏向方向は、第 2 電極から第 1 電極に向かう。総計 1 9 b で収縮する結果、X 軸に沿った装置の実効長さが 1 9 a に減じることになる (詳細は後述)。

【 0 0 4 1 】

電源 5 を切ると、電極 E 1 と E 2 間の電気絶縁のレベルによって、装置は一定時間、偏向状態に保たれる。装置 1 0 を非偏向状態に戻すには、例えば、構造 1 8 全体が跳ね返るように電極 E 1 と E 2 を一緒に短絡させるなど、電荷を除く必要がある。

【 0 0 4 2 】

符合 1 2 における末端偏向の総合 D は、個別セル 1 5 各々が生じさせた偏向の合計である。より具体的には、各セル 1 5 が電極 E 1 の総合偏向 D についてその一部を担い、セル 1 5 の数が増えるほど、全体の偏向 D と長さ収縮 1 9 b が大きくなる。これは図 3 b の考察から明らかである。

10

20

30

40

50

【0043】

曲げの大きさはセルの寸法、装置内の位置によって異なり、さらに負荷の種類と状態によっても変わる。装置10は、使用する取り付け方法及び/又はクランプ方法によって多くの運動と出力を生み出す。例えば、中央でクランプさせると末端は上向きの角度に偏向し、末端でクランプさせると中央はY軸に沿って並進又は線形に下向きに運動する。電極E2をE1と対向する側に設置すると、装置は対向する方向に偏向する。

【0044】

装置10の一般的特徴を次に述べる。先行技術と異なり、電極E1とE2間の密接な近接性と、その結果生じる高い電界レベルを保つことで、装置は高いエネルギー密度と性能を備える。本装置は、独特の適合性を備え、セルNの数と共にその他の変数において偏向Dと出力F間のトレードオフを制御する。一般に、装置10において、Nが増加すると、Fを犠牲にしてDが増加する。逆に、Nを減らすとDも減る。多くの先行技術による装置は、半導体集積回路で使用するのに望ましいレベルを超えるような高い駆動電圧を使用することが通常強いられる。一方、本発明の装置10においては、部材E1、E2間の高い出力と相対的に低い変位をより低い全体出力Fとより大きな全体偏向Dに変換し、事実上の機械的拡大(または、縮小)をもたらし、より低いVレベルを使用する。

【0045】

図3aと3bは、装置20の別の実施例を示し、このとき第2電極E2は組み合わせらず、一部重複もしない。それどころか、これらの電極E2は、長方形の形状で、ギャップ8cによって互いに隔てられている。必要に応じて、多くの電極E2の列を使用して、隣接する列の位置を互いに(X軸に沿って)換えることで、装置20を一部重複型に構成することも可能である。

【0046】

図3bに示すように、第1電極E1に生じる偏向は、第2電極E2によって偏向される主要部分により生じる偏向に対する偏倚の結果、その長さ全体に及ぶ。図3bは、また、第1電極E1の上向き偏向、実際には、第2電極E2と対向する向きへの偏向を図示する。

【0047】

図4と5は、単一の軸(この場合はZ軸)について偏向させる装置30の別の実施例を示す。個の実施例においては、第2電極32はカンチレバー型で、第1電極31の一方の端だけに接続する。

【0048】

この装置30は、スチフネスK31の導電性第1部材31(電極E1を形成)と、スチフネスK32の導電性第2部材(電極E2を形成)とから成り、部材31と32の間に分離ギャップ33aを形成する電気絶縁層33によって隔てられる。部材31と各部材32はサポート層33と共にカンチレバー型のセル45を構成する。必ずしもサポート層33を第2部材32の一方の端に設ける必要はなく、どこに設置するかは任意で、例えば、中央に設けて、共通アンカーパッドを共有する2つの片持梁部を有するようにしても構わない。

【0049】

図1~3bの実施例において、共通第1部材31を共有する1つ又は複数のセル45の配列は、装置30の本体を成す柔構造を形成する。有効長さ39と有効幅37とを有するこの柔構造は、ギャップ44によって基板46の上に持ち上げられたサポートポスト41に取り付け又は固定され、角度方向42に沿って面外に自在に可動する。セル45は適当な長さ寸法を有し、必要に応じて方向39aに沿って再現される。

【0050】

隣接セルの部材32はギャップ49によって隔てられる。

【0051】

絶縁ランディングパッド48は、部材31と32が偏向中に互いに接触するのを防ぐために使用される。パッド48は、例えば、第2電極E2がパッド48と接触するとカンチレバー型からブリッジ型に変化し、従って、第1電極E1にもたらず偏向の種類を換えると

10

20

30

40

50

いったその他の機能も備える。これはリミットスイッチまたはセンサとして有用である。

【0052】

前述した実施例において、部材32は、部材32と同じ層から形成されるサプライ層36に接続する。第1部材31は電源35に接続する位置41まで伸長できる。部材32と同様に、部材36もアンカーパッドと絶縁スペーサ33とによって第1部材から隔てられる（一部重複する場合）。

【0053】

全ての部材31、32、33は適切な材質から成る。

【0054】

その他の関連パラメータにおいて、部材33と幅37間における各種の部材31、32の10
スチフネス(k)や厚み(t)、装置の有効長さ39、セルのカンチレバーの長さ及び有効長さなどの機械的性質や寸法は、用途によって決定される。必要に応じて装置30内の隣接セルの部材32を一部重複させることができる。

【0055】

装置30を電圧電源35に接続させると、部材31、32に蓄積された電荷/静電荷は、部材31から部材32に角度方向42に沿って部材31を変形させる。装置30は、また、図2bに示した装置10の19b同様、長さ収縮を実行する。

【0056】

カンチレバー型装置30は、使用する取り付け方法やクランプ方法に従って、ブリッジ型20
装置と対向する向きに偏向させ、ブリッジ型装置と類似で、かつ、反対の多くの方法で偏向させる。曲げの規模は装置におけるセルの寸法と位置、及び負荷の種類と条件によって決定される。カンチレバー型装置は、通常、ブリッジ型装置と同様の特徴を有する。

【0057】

ブリッジ型とカンチレバー型とが同じ装置に設けられ、かつ、同じ第1電極を使用できることは理解されよう。

【0058】

図6~8は、両方向装置の実施例を示す。両方向装置は、背向式に一つの共通部材1、31を（それぞれ）共有する第2部材2、32の両面配置を利用して作られる。例えば、各装置は独立した電気接続を有する一方、電極E1またはE2の一方を共通部材及び共通ターミナルとして共有し、それにより、各々独立してオン/オフの切換えができる。30

【0059】

図6に示す実施例においては、ブリッジ式の2組の第2電極E2と、これら2組の第2電極に挟まれた1個の共通電極E1とから成る。事実、この挟み式配置はアーク89に沿って何れかの方向に偏向を生じさせる1個の共通電極E1を共有する2つの装置を構成する一方、装置の他方の端は85で固定される。（あるいは、電極E1のみでクランプされた）装置40は、電極の底面または頂面がそれぞれ独立して起動する場合、上向き及び下向き偏向を生じさせる。または、2つの単一方向装置を組合せて、それぞれが組合せた装置を別々の方向に偏向させる。

【0060】

第2電極E2の頂面および底面におけるアンカーパッド3は互いに一直線に配置され、X40
Z面において同一の位置を有する。

【0061】

図7, 8に示すように、2個の電極E1とE2のみを使用して（図6の装置40では3個の電極E2、E1、E2を使用）、別の両方向装置を作ることができる。こうした装置では、2つの伝導層と1つの絶縁層だけを必要とする、例えば、ポリシリコン2層構造プロセスなど、一般に普及している標準的な製造工程を利用できる。こうした融通性により、例えば、両方向型、上向き偏向単一方向型、下向き偏向単一方向型、又はこれらを組合せたものなど、全て同じ製造行程、ロット、及び/又は同じ基板を利用して異なるタイプの装置を製造することが可能となる。従って、一方向にも両方向にも自在に偏向可能な、ブリッジ型およびカンチレバー型の装置、及び/又は両者のタイプを組合せた装置を好都合50

に製造できる。

【0062】

図7は、絶縁アンカーパッド層73と、ポイント76で結合する伝導層74、75とを具備し、サポートポスト71に固定された2層ブリッジ型両方向装置の実施例を示す。例えば、層74を第2電極E2として、層75を第1電極E1としてそれぞれ構成して上向き偏向部77を左側に設け、層74を第1電極E1として、層75を第2電極E2としてそれぞれ構成して下向き偏向部78を右側に設ける。実質的に連続した第1電極E1は、位置76で部材74と75とを結合させて形成される。パーツ77と78は、1つ又は複数の独立及び/又は共有電気ターミナルを有し、79(又は図11に示すその他の列)に沿って再現され、任意のサイズ及び偏向特性を備えた装置が製造される。

10

【0063】

第1電極だけを一体化させることは不要である。代替手段として、一方の装置の電極E1を他の装置又は任意の可動部の電極E2と接続させる。

【0064】

図8はブリッジ型とカンチレバー型両方のセルを有し、サポートポスト81に固定された両方向装置の別の実施例を図示する。この装置は絶縁アンカーパッド83と伝導層84および85とを具備する。例えば、層84を電極E2として、層85を電極E1としてそれぞれ構成して上向き偏向ブリッジ部87を左手側に設け、層84を電極E2として、層85を電極E1としてそれぞれ構成して下向き偏向カンチレバー部88を右手側に設ける。組合せたパーツ87、88は、1つ又は複数の独立及び/又は共有電気ターミナルを有し、89(及び/又は図11に示すその他の列)に沿って再現され、任意のサイズ及び偏向特性を備えた装置が製造される。利点として、電極E1に対して、ブリッジセル及びカンチレバセルの両方が同じ材質/層を利用でき、同様に電極E2についても同じ材質/層が利用でき、E1とE2を装置の同じ側に配置でき、これは、いくつかの応用において好ましいことである。

20

【0065】

層74、75(84、85)は電極E1又はE2、あるいはその両方として構成されるが、その厚みは通常、固定して、標準的なMEMS製造工程で即座に制御できるものではない。従って、必要に応じて、電極E1又はE2、あるいはその両方として機能する層74、75(84、85)を最適化するために、例えば、k1やk2(それぞれ電極E1、E2のスチフネス)を減らすために幅に沿って穴やスリットを設けて、部材E1、E2の実効幅を変えることで実効スチフネス(k)を制御する。図7、8における電極の結合は、例えば図25A~29に示すような任意の種類のものとする。この技術は同じ製造工程で上向き/下向き装置を製造するのにも利用できる。

30

【0066】

パーツ77、78、87、88はそれぞれ1つまたは複数のセルを具備する。

【0067】

セルは、任意の形状、寸法、使用するフィンガの重複部の数で形成できる。図9、10に示すさらに別の実施例では、部材E1、E2および3で構成される多数のセルは、距離8aによって一部重複する電極E2と共にブリッジ装置10のセルに相当する。電極E1は、説明のために概略だけを示す。セルの形状は自由で、独特な偏向を生じさせるために任意の形にできる。例えば、長方形、正方形、三角形、多角形、山形にできる。同様に、図25A~29に示す接続例を含めて適当な電気接続(図示省略)を任意に使用できる。

40

【0068】

単一のセル列を有する装置以外にも、図11に示す装置170のような多数の列を有する装置も提供できる。共通第1電極E1がそうした列で共有される。隣接する列が互いに一部重複するように互い違いにする。列は同じ又は違う方向に偏向を生じ、必要に応じて独立して制御できる。

【0069】

2つの軸について偏向可能な装置

50

図12a～13bは、部材E1とE2間に静電力を確立させて、例えば、Z軸とX軸のように2つの軸について偏向可能な、または、これらの軸について偏向構成要素を有する装置の実施例を示す。一般的な用語として、図12aと13aの部材91と101は、柔軟電極E1（理解を容易にするため、概略のみを図示）であり、柔軟隔膜に類似のものと解釈される。

【0070】

図12aは装置90の実施例を示し、これはブリッジ型の装置（例えば、図1の装置10）に類似のものと解釈される。装置90は、図1の装置10の部材1と2にそれぞれ類似の部材91及び92を具備する（本実施例では、部材92は3個ある）。この目的から、部材92は適当な形状を備え（本実施例では六角形）、エッジ周囲にフィンガ（図示省略）を有し、図1の実施例同様、領域98で近隣のフィンガと組み合わせる。部材92は互いに独立し、例えばフィンガにつき1個又は複数の類似のアンカーパッドによって支持されるブリッジ型装置同様、部材91上（本実施例では91の後方）に支持される。

10

【0071】

あるいは、図3a及び3bの実施例同様に、部材92をギャップで互いに分離させることもできる。図12aと13aでは3個のセルしか図示していないが、ライン99及び109に沿ってそれぞれセルを追加することが可能で、任意のサイズ、偏向、セルの数を有する配列を提供できる（図24の配列と類似）。

【0072】

フィンガを組合せる代わりに部材92を任意の形状とし、2つの軸について曲げを容易にするために、部材92の複数または全ての角あるいは頂点付近など、適当な位置に設けたアンカーパッドで支持することもできる。さらに、装置の機能を高めるために、隣接セルの部材92は任意の構成および重複規模とできる。隣接セルの部材92と組み合わせる又は噛合する4つのフィンガをそれぞれ有し、2つの軸について一部重複するセルを備える部材92の代替的な形状を図12bに示す。

20

【0073】

部材91をその周縁部に固定すると、装置の起動を受けて、それぞれ凹型、凸型表面に設置された電極E1とE2と共に湾曲した面を形成するX軸、Z軸について変形する。あるいは、中央部に固定するなど、その他の任意の固定手段を使用できる。いくつかの応用例において、装置90は、MEMSマイクロスピーカ、マイクロフォン、マイクロポンプ、

30

【0074】

図13aは部材101（E1として）、102（E2として）、103を具備するカンチレバー型装置に類似するものと解釈される装置100の実施例を示す。部材102は、例えば、中央部など適当な位置103でアンカーパッドによって部材101上に支持される。この実施例においては、部材101と103は両方とも部材102の後方に設置されているため（理解を容易にするため、図13aでは103を102の前方に表示）、装置100は装置30と類似の方向に偏向を生じさせる。例えば、部材101が周辺部で固定されると、装置の起動を受けて、それぞれ凹型、凸型表面に設置された電極E2とE1と共に湾曲した面を形成するX軸、Z軸について変形する。正方形での電極E2とE1を使用してE1が角で固定された、このタイプの偏向を図13bに示す（図12a及び12bの実施例も同様な方法で偏向を生じることが理解されよう）。

40

【0075】

必要に応じてセルを一部重複させることができる。

【0076】

装置90及び装置100における隣接セル間の領域は、本書に記載するとおり、例えば接続108などの1つ又は複数の電気相互接続を含む。同様に、第2部材92又は102（第2電極E2を構成）は機能に応じて、一緒に又は独立して出力する。装置100は装置90と類似の機能を有する。

【0077】

50

3個のセルだけが図示されているが、任意のサイズと数のセルで配列を構成するべくライン109に沿ってセルを追加することができる。同様に、装置90と100及び電極91と101は、例えば六角形(図24参照)、円形、正方形、非対称な形など、任意の適当な形状にすることができる。

【0078】

2つの軸について偏向可能な両方向装置は、装置90において部材91の反対側に部材92、93をコピーし、装置100において部材101の反対側に部材102、103をコピーしても形成できる。

【0079】

当業者であれば、図7と8で使用された技術と類似の技術を用いてもブリッジ状、カンチレバー状、又は同じ装置にその両方を組合せた複軸装置が製造可能で、そうした装置が2電極構造の製造工程を利用して単一又は両方向に偏向可能なことが理解されよう。

【0080】

2つの軸について運動可能なその他の実施例は、角度を付けて組合せた、それぞれ単一の軸について可動する2つの装置を利用して製造できる。こうした装置は、制御用に共有又は独立したターミナルを備える。例えば、図14の装置140を応用して、同じ装置内の1つ又は複数の列を、1つ又は複数の列に90度に合わせることで、2つの軸について可動する装置を製造できる。起動されると、各装置は1つの軸について偏向を生じる。装置180も2つの軸について偏向可能な別の実施例を示す。電極E1はスリット、隙間、又は穴を有し、性能をさらに促進させる。

【0081】

複合装置

単一の第1電極または複数の第1電極上に多数の第2電極を形成した複合装置の製造も可能である。前者の場合、第1電極を複合的な方法で変形させるように製造し、これに接続する、あるいはスピーカ、マイクロフォン、ポンプなどに使用される1つまたは複数の装置に複雑な動きをもたらす。後者の場合、例えば図1~13b及び23aを参照しながら既に説明した類の装置と組合せて、1つあるいは複数の軸に関する複雑な動き、及び/または、1つあるいは複数の軸に沿った並進的な動きを提供する。装置が偏向可能な軸の数は理論上無制限であり、応用するものや、望ましい偏向特性によって決定される。

【0082】

例えば、ブリッジ型とカンチレバー型のセルを組み合せたり、1つ又は複数の軸について偏向可能なセルを組み合せたり、逆方向、両方向、あるいは他の任意の組合せにより、望ましい任意の角度と方向に運動するように上述した異なるタイプのセルを組み合わせることも可能である。さらに、1つまたは複数のセクションが独立して駆動するために別個の独立した電気ターミナルを備え、あるいは、1つ又は複数の電気ターミナルを備える。こうした組み合わせによる装置は、標準的な製造工程を使用して独特な特徴を備え、従来、複雑過ぎたり、困難過ぎて達成できなかった機能を達成する複合的で接続した構造を提供する。光学式スキャナーやビーム操縦装置の実施例を図14~19に図示する。これらは、総-光スイッチ、光ファイバスイッチ、及び光交差接続(OXC)など電気通信に使用される2Dや3Dの光スイッチに応用できる。

【0083】

当業者にとって公知な適当な駆動回路や制御電子回路を使用して高性能な動きと偏向が得られ、これらの応用やマイクロ・マニピュレータやロボティクス等のその他の技術にとっても望ましい。低電圧の可能出力により、これらの装置は、大幅なコスト削減を実現しつつ駆動回路と完全に統合し、装置内で多数のファイバ光チャンネル間を光スイッチングできる。こうした装置は、1つ又は複数の軸に関して、例えばライトなど干渉性及び/又は非干渉性の電磁波を偏向するのに使用される。

【0084】

図14は回転/ねじりが可能で、複数の装置172(本実施例では7個)を備えた複合装置140の実施例を示し、各々が単一の軸について偏向可能で、部材177によって直列

10

20

30

40

50

的に接続/取り付けされ、装置172の各々が前述した装置によって実行又は共に運動する。装置172（ギャップ176によって近隣部から隔てられている）は多数のセルを備え（本実施例では3個）、隣接装置に対向する向きに偏向可能である。複合装置は171で取り付け又は固定され、他方の端175は自在に偏向するようになっている（本実施例の場合、Z軸について）。端175は、例えばミラー179など任意の望ましい荷重、またはその他の任意の静電装置に接続する。スイッチを入れると、ミラー179は相対的に多大にねじり/偏向され、総角度は使用された個々の装置の数と、各装置のセル数と、Vの規模とを総括したものとなる。装置の方向によって、時計回りと反時計回りの回転が得られる。

【0085】

装置10などその他の装置（あるいはその他の単一または多軸装置）を装置140の175（179の代わりに）に取り付けることで、適切に起動させると、140がもたらす転向角によって第1装置が異なる軸について偏向を生じる（10、140は一緒に又は独立して制御される）。例えば、転向角が90度に近い場合、装置10はXZ面において側方に偏向される。後者のタイプの偏向は基板（XZ面）に対して定位の平面に配置された装置を使用して二者択一的に達成可能である。その他の面内装置を図23aと23bに図示する。

【0086】

図15は、任意のセル数を有する2つの個別装置182、183を具備する“L型”複合装置180の実施例を示す。装置183は、装置182に取り付けられ、それにより可動し、両者は独立して制御可能である。図14に示すように、端185はミラー189のように適正な荷重を駆動させる。個別にスイッチを入れると、装置182はZ軸に沿ってミラーを捻り、偏向させ、一方装置183は、X軸についてミラーを偏向させる。様々な量によって両方の装置182、183のスイッチを入れると、3つの軸XYZの全てについて解決する構成要素と共にミラーは偏向可能となる。例えば、装置182が90度偏向すると、装置183は次にY軸について偏向可能になる（Y軸はページに対して定位）。ミラー189の代わりに装置180に1つ又は複数の静電装置を取り付けるとより複雑な動作が可能となる。

【0087】

図14、15及び図17～19に図示した複合装置はいずれも、光走査/操縦及びOXCスイッチに使用できる。

【0088】

図16は、環状の湾曲したセル162多数から成り、一方の端はサポート168に固定され、部材165を支える他方の端は可動する。部材165はそこに付加された荷重を動かす。本書に記載するその他の実施例と同様、図16の実施例も両方向装置を含む任意のタイプに構成できる。同様に、必要に応じて長方形、三角形、らせん形などその他の形状や通路にも形成できる。

【0089】

図17の実施例は、2つの複合装置121、122が素子125の何れかの側部に1つずつ設けられる。ミラー素子125は、構成要素121、122の偏向端に取り付けられ、他方の端は123に固定される。これらの装置は1つまたは複数の同一方向または対向する方向に偏向可能な2個のパーツ121a、121bを具備する。ミラーを様々な方法で動かすために多くの駆動体系が使用される。例えば、部材121a、121b、122a、122bの全てが上向きに（アウトページに）等量で偏向すると、ミラーは直線的に上方へ動く。一方、偏向が等しくない場合は、ミラーは最も偏向が少ない側に傾斜する。部材121と122の一方のみを偏向させると、ミラーは一方の側に傾く。図16において、部材121b、122bをそれぞれ部材121a、122aと対向する向きに偏向させると、ミラー125は左右に傾く。これらの駆動体系を達成するために、当業者に公知のその他の駆動技術が広く利用される。

【0090】

10

20

30

40

50

荷重をサポートする4つの装置131、132(複合、単軸方向及び/又は両方向)を利用する、より多目的な実施例を図18に示す。この実施例では、例えば、ミラー135は一方の端をフレーム137に、他方の端を装置133、134に固定され、これらの装置133、134は一方の端でフレーム137を支持し、他方の端はアンカーポイント136に固定される。ここで再び、図17の実施例で述べた駆動技術と同様の技術を使用して、ミラー135を1つ又は複数の軸に沿って運動、偏向、傾斜させることができる。

【0091】

図19は、例えば、ミラー145を一方の端で支持し、他方の端がフレーム144に固定された(144は適正に支持される)4つの装置(複合、単軸方向及び/又は両方向)を具備する実施例を示す。上述した実施例と同様、当業者に公知の技術を用いて141の何れか又は複数を適当に起動させることで直線的及び/又は傾斜を伴ってミラー145を可動させる。図17~19に示すミラーは装置をオーバーレイし、従って下に隠すため、ミラーの作用面積を最大限とするのに好都合である。

10

【0092】

この装置は、ポンプやインクジェット印刷用カートリッジなどの純流体として利用することもできる。図20に示す実施例では、例えば円形など適当な形状の複軸(又は単軸)装置281を具備し、これはバックエッチシリコン製の支持(フレーム)部材282にその周縁部が固定される。装置281は、好ましくは密閉型で、連続第1部材E1と共に穴のない不透水膜を形成し、両方向に起動できる。E1は、好ましくはフェースキャピティ285である。別の部材283は、ガラス又はシリコン製で、286a、286bに沿って、それぞれ吸込口、吐出口(例えば漏斗型)を備え、284で部材282と適切に結合し、間にくぼみ285を形成する。

20

【0093】

必要に応じて、2個の一方向バルブ287a、287bを吸込口と吐出口でそれぞれ使用し、矢印で示す方向に流体を導く。膜281は上下動が可能である。上向きの動きでは、くぼみ285が膨張して流体を吸い上げ、下向きの動きでは、収縮して流体を吐出する。従って、ポンプは、結合した溝を介して流体を吸込口から吐出口へ移動させることができる。装置は連続振動状態で動作し、及び/又は即時オン/オフ起動が可能である。

【0094】

部材292によって、部材281の上方にその機能を損なうことなく付加的な環境保護膜291をぶら下げることができる。この実施例、または他の応用例において、適当なサポートポストを介して装置281上に(可動式に)取り付けられた同様の環境保護部材が使用される。

30

【0095】

装置は、スピーカ、イヤホン、超音波発生器などの音響関係にも利用される。例えば、図20の実施例から底部部材283を除いたものが適当な信号で駆動されるスピーカ又は超音波発生器として使用される。必要に応じて上部保護膜も使用され、この場合、第2電極E2をフェース部材291とすることが望ましい。

【0096】

図21の実施例も、支持部材302に固定された装置301を具備する、(より手軽に製造できる)スピーカ又は超音波発生器として使用される。適切な起動により、装置は方向304に沿って偏向し、音波を発生させる。

40

【0097】

装置は、感圧センサや加速度計などのセンサとしても使用できる。図22に示す実施例では、例えば円形の適当な形状の複軸(又は単軸)装置311を備え、周縁部で支持(フレーム)部材312に固定され、バックエッチシリコンで形成される。装置311は、好ましくは密閉型で、連続第1電極E1と共に穴のない不透水膜を形成する。電極E2は、好ましくはフェースキャピティ315である。別の部材313はガラス又はシリコン製で、314で部材312と結合し、間に密閉型キャピティ315を形成する。キャピティ315は適当な手段で、例えば真空など、好ましい基準圧に維持される。装置311は、キャ

50

ピティ 3 1 5 やその内圧に関連する外部圧力の変動に対応して上下方向に偏向可能で、装置 3 1 1 の静電容量の変動に導き、適当な電子検出器によって絶対圧の計測に使用できる。キャピティは部材 3 1 1 の電極 E 2 に環境保護をもたらすので、付加的な保護部材（図 2 0 における 2 9 1）の必要性は減少するが、必要に応じて、そうした保護部材を使用しても構わない。差圧や差圧計として利用する場合、ポート 3 1 6 はそうした圧力の計測を補助するのに使用される。

【0098】

図 2 2 の実施例（部材 3 1 3 を除く）と同様の実施例を使用して、音波を感知したり検知する音響マイクロフォンや超音波検出器が製造される。あるいは、図 2 0（部材 2 8 3 を除く）や 2 1 の実施例と同様の技術も使用される。

10

【0099】

図 2 1 や 2 2 の装置と類似の装置は、感知を助ける付加的な質量を備えた加速度計として利用され、例えば、適当なバルクエッチド・シリコンによって形成される。感圧センサや加速センサは、当業者に公知の駆動技術と手法を利用して、本発明による装置の感知性能及び起動性能の恩恵を受ける力平衡センサとしても使用できる。

【0100】

複合装置のその他の実施例では、上述した長さ収縮効果を利用して自身の平面に実質的に平衡な方向に沿って直線運動と力を生じさせる。一例として、図 2 3 a の X Z 面に配置された装置 2 5 0 が挙げられる。装置 2 5 0 は、直列的に接続する多数のセクション 2 5 4 を備え、各セクションは先行するセクションに取り付けられ、かつ、それと対向する向きに偏向する（部材 2 5 5 はこれに付着）。互いに対向する向きに偏向する 2 つのセクションを使用することで、装置の面内動作が高められる一方、面外動作は減少する。装置 2 5 0 は、底部 A と頂部 B（対称）とに二分割される。二分割 A と B は、より均一で安定した偏位 2 5 9 を生成するのに使用されるが、何れか一つのみが用いられる。従って、片方の A のみを詳述する。各セクション 2 5 4 は、直列的に接続され、図 1 4 のそれと類似のねじり型装置を形成する 3 個の装置 2 5 1 a ~ 2 5 3 a（アーム 2 5 1 a と 2 5 3 a は上向きに偏向し、アーム 2 5 2 a は下向きに偏向する）から成る。起動させると、2 5 1 a ~ 2 5 3 a 角度偏向が加わって、何れかの 2 5 3 a の端とそれに結合する部材 2 5 5 に最大限の偏向を生じさせる。分かりやすくするために、図 2 3 b においては、部材 2 5 3 a と 2 5 3 b の偏向のみを図示する。部材 2 5 5 ~ 2 5 8 は任意の適当な材質とする。

20

30

【0101】

起動させると、装置 2 5 0 は、図 2 3 b の側面図に示すように変形及び収縮する。事実上、部材 2 5 3 a が次のセクションの部材 2 5 5 を次々に駆動させ、装置 2 5 0 にリンクリングをもたらす、そのため収縮が起きる。装置 2 5 0 の収縮長さ L 2 は、変形以前の長さ L 1 より短い。装置 2 5 0 は、左端部が 2 5 7 でクランプすると、実質的に方向 2 5 9 に沿って、末端 2 5 8 に結合する荷重を引っ張るのに使用できる。

【0102】

活動を停止させると、装置 2 5 0 は本来の長さ L 1 に即座に復帰する。

【0103】

装置 2 5 0 は、つなぎやガイドなどの付加的な支持部材 / 固定部材を備え、例えば基板を望ましくない偏向から守るために荷重に適正に結合する。奇数及び偶数の部材 2 5 4 は同時起動が可能（1 つ又は複数の電気ターミナルを共有）か、あるいは、それぞれ独立して起動する。後者の場合、必要に応じて、示差駆動が付加的な上下方向の正味偏向を生じさせる。3 つのセクション（2 5 1 a ~ 2 5 3 a）が図示されているが、任意の数が使用でき、それぞれが本書に記載したタイプの 1 つ又は複数のセルを備える。必要に応じて、上向き偏向部材 2 5 4 の偏向を下向き偏向部材のそれより大きくすることで、装置 2 5 0 を基板から安全な距離に保つことができる。

40

【0104】

収縮型複合装置のその他の実施例によれば、図 7 と 8 に示すように互いに対向する方向に 1 つ又は複数のセルが偏向する装置が形成される。必要に応じて、収縮装置は、基板に対

50

して正位の平面に設置される。

【0105】

面内の直線運動、またはその平面に実質的に平衡な2軸に沿った収縮が可能な装置を考察する。図24はXZ面に設けられた複軸装置260の実施例を示し、これは適当な形状の電極E1及びE2とアンカーパッド(図示省略)とを備える。装置は2つのグループのセルを備え、それぞれが互いに対向する向きに偏向可能である(図7、8の技術と同様の技術を使用)。任意の好ましいサイズの装置を製造するためには、より多くのセルが追加される。装置は初期的には平坦で、起動させると変形するが、本実施例ではXZ面において実質的に2本の軸に沿って収縮する。図25A~29で図示したものと同様の適当な電気接続が使用される。その他の詳細は、図12a~13aの実施例と同様である。

10

【0106】

さらに、複数の単軸装置を使用して複軸長さ収縮装置が提供される。例えば、そうした装置は、徐々に半径の拡大する1つ又は複数の虚同心円の周縁を横切って外側へ放射状に配置された多数のE2電極を有する共通E1電極をXZ面に備える。各セットは自身の円を横切るように設置され、隣接する内側および外側のセットと対向する向きに偏向し、放射状の収縮をもたらす。

【0107】

装置260の応用には、2Dアクチュエータ用の2D直線運動と、人工筋肉と、可変/可制御スチフネスを有する膜と、2Dセンサとが含まれる。

【0108】

装置250と260の双方において、印加される荷重は負荷スプリング形または負荷マウント形で、停止時に即座に復帰するか、あるいは、2つの装置は対向する向きに引っ張られる。

20

【0109】

例えば互いに90度の角度になるよう配置され、各々が実質的に単軸に沿って収縮できる2つまたはそれ以上の250のようなタイプの装置を使用して、その他の面内直線運動装置が製造される。

【0110】

例えば、三次元(3D)運動のように面内及び/面外装置の両方を備えて複合的運動を生成する複合装置が製造される。例えば、実質的に直線的な3D運動の可能な膜形装置が製造でき、これは電極E1を備え、その上には多数のセットの電極E2が取り付けられ、複軸については面内運動を生じ、単軸については、一部、面外運動を行う。各セットは、独立して制御可能である。これは、ロボティクス、位置決め、アラインメント、3D光学的ステージ等に応用される。

30

【0111】

250の装置は、例えば、人工筋肉、ソレノイド、静電式コムドライブ、サーマルアクチュエータ交換など単軸又は複軸の運動が求められる多くのケースで使用される。その他の実施例では、例えば、アクチュエータからのリンケージが接続する場所にオフセット・ピンを有し、アクチュエータの線形運動によって車輪の回転が伝わる回転輪をクランクさせることで、線形変位または線形運動を回転運動に変換させる。2つのこうしたアクチュエータを互いに90度になるよう配置することで、適当な電圧信号で駆動する場合(例えば、90度の位相外れ正弦波)、車輪に連続回転を生じさせる。車輪は歯を有し、噛合するその他の車輪/歯車に荷重を駆動させる。

40

【0112】

複合装置のその他の形態は、面内偏向か面外偏向かを表示するタイプの2つ以上の静電装置を備える一次元アレイ(例えば、線形または収縮)又は二次元アレイ(例えば、線形または角度付き)を含み、様々な応用例で使用できる。例えば、各装置は無線通信用の送受信アンテナや電磁放射線の管理、伝達、感受用の光学的アレイなどのエレメントの走査を実現させる。また、これらは、音波などの信号検知に使用され、装置の作動バージョンが、装置の感知バージョン、あるいは、その他のセンサの管理と走査とを受信範囲にわたっ

50

て行い、最良の受信条件を達成する。

【0113】

その他の実施例においては、アクチュエータとして設定された1つ又は複数の装置が並列、直列、又はその両方の組合せで同じ面に接続する。あるいは、単軸又は複軸について可動する2つまたはそれ以上のアクチュエータ装置が異なる平衡面で互いに積み重なりあって、適切に支持され（例えば、適当な素材による付加的な支持部材/サポートポスト及び/又は可撓シート又は可撓ラミネートを使用）、隣接の装置では互いの偏向を妨害することなく互いに積み重なり、その結果、より大きな出力が得られるなど、装置の性能が改善される。

【0114】

その他の積み重ね型実施例では、1つのアクチュエータ（例えばトップアクチュエータ）がカンチレバー型など別のタイプであることを除いて図6の装置と同様のものを具備する。ブリッジ型とカンチレバー型装置では、互いに対向する向きに偏向されるため、この実施例では両方とも同じ方向に動いて、より大きな出力を生成できるようにした。

【0115】

電氣的相互接続

セルや、様々な部材間、装置間において、対応する電極の電氣的接続/相互接続は、多様な技術をもって確立され、そのうちのいくつかは、図1、4、25A~26Cに図示されている（分かりやすくするために、これらの図には第1電極E1が省略されている）。これらは単軸装置として示されているが、当業者であれば、例えば、装置全体に適切な電氣的接続の経路を設けるか分布するかして、容易に複軸装置や複合装置に適用または応用できる。これらの接続は、好ましくは、装置の望ましい性能と逆行するような影響を与えず、あるいは、有用な偏向や装置のベースサポートからの伸長を不都合に制限することなく、相対的に柔軟性をもって確立される。こうした接続には、当業者にとって公知の素材や技術が使用でき、例えば、電極E1やE2と同じ材質、または適当な厚みと寸法の金属のレイヤーといったその他の材質が使用できる。相互接続は、セル間、セルの側部、上下に設けられる。適当な位置に自由に吊り下げたり、支持する（例えばスペーサ3により）ことで逆の極性を備えた電極との接触を防げる。普通、セルの電極E1は連続部材として既に接続されているが、（複合装置のように）未接続の場合は、E2で説明したような適当な方法を用いる。

【0116】

図25Aにおいて、ブリッジ型装置200は多数のセルを備え、電極E2は可撓部材201によって相互接続する。部材201は、接続202を介して先行セル内の電極E2を、接続203を介して後続セルの電極E2に接続させる。図25Bと25Cは、部材213と共に、又は、図25Cの部材214と共に部材211と212とを備えたその他の接続例を示す。

【0117】

図25Aは205と207及び/又は204と206といったセルの側部に配置された別の接続例を図示する。後者の1つ又は複数の接続は、1つ又は複数の装置への接続を容易にするのに使用され、特に複合装置においては、当業者に公知の技術による装置内電氣的接続を容易にする。

【0118】

図26Aは、部材221を使用して、先行セル内のポイント222にある電極E2を後続セル内のポイント223にある電極E2に接続させるカンチレバー型装置の可撓接続の実施例を示す。図26B及び26cにおける部材231又は232はそれぞれ、図26Aの221に代わる接続を示す。

【0119】

図26Aは、さらに、図25Aに示したものと同様の機能を有する接続225と227と、及び/又は装置の側部に設けられた接続224、226の1つ又は複数を示す。

【0120】

10

20

30

40

50

図 28 と 29 は装置の側部に設けられた電気接続を実行する 2 つの実施例と、それがどう実行され、支持されるかを示す装置の断面図である。図 28 は独立した接続部材 235 (部材 204、206 及び 224、226 に類似) を図示し、図 29 はその他の電極 (例えば E1) の材質の一部をどう利用して部材 236 を介して電極 E2 (あるいは逆) と相互接続するかを示す。

【0121】

図 27A ~ 27E はブリッジ型のセルの異なる実施例を示す。これらは、図 1 の装置 10 における部材 1、2、3 と同様、全て第 1 及び第 2 部材 61 と 62、及び絶縁部材 63 を含む。部材 62 と 64 は 1 つまたは 2 つの部材を構成し、同じまたは異なるスチフネスと、厚みと、材質を有する。部材 62 は図 27D に示すように湾曲している。図 27E は電極規模の重複 68 をもたらずブリッジ式の接続を示す。

10

【0122】

電氣的相互接続は装置の上下何れかに配置され、好ましくは電極 E2 の上に適切に支持され、(セル間の適当な可撓部材と共に) 装置に沿って伝えられる。それにより、電氣的接続が 1 つ又は複数の装置に供給され、及び / 又は 1 つ又は複数の付加的な装置が実行 / 動作 / 偏向する。個々の装置をこの手法で個別に起動させることができる。

【0123】

基板に恒久的に固定する代わりに、製造後に装置を基板から外して、(例えば複合装置など) 望ましい形態に組立てて代用のサポートに取り付けたり、または、個別に使用したりできる。

20

【0124】

取り外した装置は引き続き荷重 (又はサポート) に結合させる (例えば、接合又はガイドにより)。いくつかの実施例においては、静電装置は如何なる基板にも結合せず、可撓リード線を介して単に電源に接続する。

【0125】

製造

本書に記載した MEMS 又は MOEMS (マルチユーザ MEMS プロセス "MUMP" など)、IC 及び半導体プロセス、マイクロ電子及びシリコンプロセス、LIGA/S-LIGA、薄型フィルム、電気めっき、印刷プロセスによるシリコン、ガラス、プラスチックまたはその他の基板への製造、を含む装置を製造するのに当業者に公知の任意の工程と材質が使用される。

30

【0126】

図 30A ~ 30C は、標準的なマイクロ電子技術と処理を用いて、図 1 の装置 10 と同様の上向き偏向装置のパーツを製造する主要ステップを例示する。クロノス総合マイクロシステムなどの標準 MUMP プロセスのいくつかは、標準として、2 層の可動構造ポリシリコンレイヤー間の機能的な絶縁層をすぐには提供しない。この付加的な層は、以下に説明するように製造工程の適当なステージで形成される。

【0127】

製造プロセスは、例えば LPCVD で溶着し、必要に応じてその後、ポリシリコン層 278b を溶着して成形する窒化珪素層 278a を通常有するシリコン基板 270 から始まる。次に、第 1 防食層 275 (リン化シリケートガラス "PSG" など) が、例えば LPCVD によって溶着され、任意に成形される。第 1 構造ポリシリコン層 272 が次に溶着、ドーブ処理、焼きなましされ、第 2 部材 E2 の望ましい基本型に従って成形される。第 2 腐食層 276 (PSG など) が例えば LPCVD によって溶着される。フォトレジスト層 277 が次に敷かれ、開口部 274 が成形される。次に、層 276 の露出部がエッチングされる。次に適当な技術によって絶縁層 273 が溶着され、開口部 274 内にアンカーパッドが形成され、ストリッピング 277 の後で、例えばリフトオフにより 273 の不要部が除去される。層 273 は、好ましくは、腐食層のエッチング液に対して耐性をもつ。第 2 構造ポリシリコン層 271 が次に溶着、ドーブ処理、焼きなましされ、図示するように、第 1 部材 E1 の望ましい基本型に従って成形される。

40

50

【0128】

標準プロセスでは通常、金など付加的な最上層を使用し、これは付加的な電氣的相互接続に使用される。ポリシリコン層は適当にドーブ処理され、続いてアルゴンで焼きなましされ、導電性を高め、応力を減少させる。腐食層もアルゴンで焼きなましされて応力を減少させる。

【0129】

全ての腐食層は、第1及び第2部材271、272を開放するために適当なウエットまたはドライエッチング技術によって除去できる。部材271、272は、成形されたエッチ/アクセスホールを有し、腐食層の除去を助ける。層276は、273と共に適当に平面化及び/又は水平化され、より平滑で、より水平な層271を提供する(例えば、SUMMiTプロセス)。

【0130】

熱酸化または277の除去後に層272に窒化珪素を形成し、層271に溶着などを含めて層273を積層させる方法はたくさんある。図30A~30Cに示すように、装置は直接基板に結合し、これは図2aで図示した結合方法に代用できる。後者の結合は層272、273の下に層275を伸長させ、次に、ベースサポートの周囲(もしくは装置全体)で275を適当にアンダーエッチングすることで達成される。これに代えて、または、これに加えて、層272を溶着する前に、アンカーパッド273のそれと同様に別個のベースサポートが形成される。

【0131】

E1とE2の間に付加的な絶縁層を設ける必要性を緩和することで、標準クロノス総合マイクロシステムによるMUMPの製造工程が代わりに使用される。すなわち、代わりに、除去の間、腐食層(例えば、図30A~30Cの276)の“アンダーエッチング”を利用し、パーツをアンカーパッドとして残す。アンダーエッチングは、基本的に腐食層(例えば、図30Aの275、276)の制御可能な、又は、選択的なエッチングに依存するので、エッチング工程はアンカーパッド除去の不足を解消させる。必要に応じて、アンカーパッドの位置を適当な技術(例えば、イオンビーム、ドーピング処理など)で付加的に処置して、エッチングへの耐性を増すことができる。エッチングを監視/制御するために、適当なエッチ深さ検出技術(手動/自動)が使用される。この“アンダーエッチング”方法は、関連する層を適正なサイズにしたり、及び/又は、アンカーパッドにより長いエッチング路を設けるために、リップ、オーバーハング、アクセスホール(例えば、E1/E2)を提供することで容易になる。

【0132】

2つ又は3つの可動電極装置を製造するのに、サンディアのSUMMiT、SUMMiTVなどの3層構造ポリシリコン部材を有する別のプロセスが使用される。図6の実施例と類似の両方向3電極装置が製造される。また、平衡に設けた2つの装置もこの方法で製造される。3番目の構造ポリシリコンは、必要に応じて、アクチュエータの上(又は付近)に図14~19におけるミラーを形成するなど、付加的な目的のために利用される。

【0133】

ここに開示する装置は低駆動電圧で動作し、従って、CMOS、CMOSとMEMSまたはポストCMOS、BiCMOSなどの技術や標準または改良ICプロセスを使用した駆動回路や電子回路と一体に集積される。これにより、駆動回路及び制御回路の統合によるスマートアクチュエータとセンサが実現される。可動部材やアンカーパッド用の伝導層(金属被覆及び/又はポリシリコン)や絶縁層をそれぞれ1つ又は複数使用することを含む、当業者に公知の適当な方法や技術が広く使用される。

【0134】

ポンプ、感圧センサ、真空装置、及び流体装置など真空キャピティを必要とするアプリケーションにおいて、E1にアクセスホールを設けることは望ましくない。その代わりに、E2のみにアクセスホールを設けることでE1に到達する効果的な経路が提供される。ドライリリース樹状素材のように加熱すると固体から、直接、蒸気に分解するな素材を用いる

など、その他の代替周知技術を使用して腐食層が除去される。

【0135】

良好な層の接着は、付加的な1つ又は複数の接着増進層および技術を含む任意の適当な周知技術によって達成される。大部分のMEMS装置同様、層の取り外しを容易にするために、例えば、製造中にへこみを設ける、及び/又は、装置の使用バンパのように機能するといった、裏に接着剤を用いない任意の先行技術が使用される。

【0136】

熱応力や真性応力が任意の相応しい先行技術によって取り扱われ、制御される。

【0137】

図20の実施例に示したような可撓素材の付加的な膜が、ほこりや湿気などを対象にした環境保護のために使用され、装置に取り付けられて、移動や偏向を行う。 10

【0138】

マイクロステレオ・リソグラフィの“MSL”製造は、特に、垂直に重ねられた装置や基板に対して直角に配置された装置にも使用される。

【0139】

第1部材E1(又はE2)及び/又は荷重部材(例えば図14のミラー)は、例えばバルクマイクロ加工プロセス、あるいは、表面マイクロ加工プロセスとバルクマイクロ加工プロセスとの組合せにより単結晶シリコンから作られる。

【0140】

上記説明は、記載した実施例が教示する本発明の効果及び特徴を基にしている。 20

【0141】

アクチュエータだけでなく、本書に記載の装置も、単軸又は複軸について偏向可能な機械電気変換器およびセンサとして使用される。機械的偏向Dは、感知目的に使用できる電極E1とE2間の容量値d(C)に変化を生じさせる。作動バージョン同様、相対的に大きな作用面積およびキャパシタンスと組合せて、電極E1、E2の緊密な近接性を維持することで、マイクロフォン、感圧/出力センサ、慣性センサ、加速度計、及びジャイロスコープなど多くのアプリケーションで役立つ良好な感度を得られる。装置上に作動と感知それぞれ別個の専用セクションを設けて、同じ装置が作動と感知の両方の機能を実行する。もしくは、同じ装置を時分割によって違う時にアクチュエータ又はセンサとして使用したり、あるいは、当業者に公知の技術を用いて同時に両方の機能を果たすようにもできる。 30

従って、アクチュエータの動き及び位置が感知、計測、及び/又はフィードバックループで使用され、光ファイバOXCなど多くのアプリケーションで見られるように、チャンネル間の光ビームを正確に検知・操縦するために、また、最適な操縦条件を動的に維持するために、アクチュエータ位置が制御、維持される。その他のアプリケーションには、力平衡の感知技術及び装置が含まれる。

【0142】

アクチュエータやセンサ型の装置はそれぞれ個別に性能最適化パラメータを備える。さらに、集積された電子回路及び論理回路を備え、スマートセンサ及びアクチュエータを実現する。また、1つ又は複数のセンサが1つ又は複数のアクチュエータに取り付けられる。センサの感度は、多くの公知技術により最適化又は制御される。そうしたセンサ装置は本来、両方向性で、前方または後方の何れかの向きに移動する時にd(C)を生じるが、両者の値は等価ではない。等価の値d(C)を得るために、本書で述べた両方向アクチュエータに類似の両方向センサが使用される(例えば、図6のアクチュエータ)。所定の感知アプリケーションにおいては、E1、E2の少なくとも一方がテフロン(登録商標)またはPVDF等のエレクトレット素材であるか、これを備える。 40

【0143】

本書に記載した装置は、アナログまたはデジタル形式で任意の電圧で操作され、スマート駆動回路及び電子回路、または、オンボード駆動回路及び電子回路を使用し、既知の電圧対偏向線形化技術を用いている。これらの又はその他の技術を使用して、共振か非共振の何れか、任意の振動数、振動モード、あるいは、交流モードで装置が駆動される。例えば 50

、共振またはこれに近い交流駆動は偏向をより高め、いくつかのアプリケーションで好都合である。

【0144】

例えば、過度の電圧（スナップダウン、スナップオーバー、又はプルイン現象）に起因する電極 E 1、E 2 間の接触を阻止するために、任意の偏向領域伸長（deflection - range extension）/反崩壊（anti-collapse）技術が使用される。この技術は、個別のセル及び/又は装置全体に適用される。必要に応じて、衝撃を緩和するために、外部制限または停止部材が制動機能/スプリング機能と共に使用される。例えば、装置 30 に関連して図示されているストッパ 48 やブリッジ型の装置における類似のストッパ（例えば中央部に配置）が使用される。好ましくは、電極 E 1、E 2 は鋭いポイントや突起のない平滑な表面を有して、高電界における電圧の降伏を防止する。

10

【0145】

起動装置に収容された静電エネルギーの一部は、適当な技術により、偏向前の状態に復帰した後に回復する。装置は光電装置などのオンボード発電器によって起動される。

【0146】

各装置は同一の又は異なるセルを使用する。形状及び、長さ、厚み、ピッチ、スチフネス、及び/又は材質などの寸法は、同じ 1 つの装置内のセルであっても、同じであったり、違っていたりする。例えば、装置の一方の端から他方の端に行くに従って、セルの幅が徐々に狭まり、これは、装置内の荷重分布法、及び/又は、出力荷重へのエネルギーの供給を改善する。別の実施例では、各セルは最適な荷重駆動のために出力/エネルギーの分配を取り扱う。その他の実施例では、装置のサポート又は荷重に近いセルが異なり、強化されるか、あるいは、その作業用に最適化される。

20

【0147】

第 1 及び第 2 電極の任意の相応しく、好ましいスチフネス（ k_1 、 k_2 ）値及び/又は両者の比率が使用される（例えば、 $k_1 \neq k_2$ 、 $k_1 > k_2$ 、 $k_1 = k_2$ ）。 k_2 / k_1 の比率が 1 より大きいと最大有効偏向 D_{max} が増大する（スナップダウンに先駆けて）。その他のパラメータの中で、 k は t 、材質のタイプ、機械的性質、求められる有効幅及びリッジ、又は適当な方向に沿った溝によって制御される。セルのアスペクト比（長さに対する幅）は、任意の望ましい値をとる。厚み t に加えて、例えば、幅に沿って穴又はスリットを設けて k_1 、 k_2 の値を減らし、又はリッジや溝を設けて k_1 、 k_2 の値を増やすなど、部材の有効幅を制御することにより有効スチフネス k 値がその他の多様な方法で制御される。セル内の有効スチフネス値 k は変数であり、必要に応じて、例えばサポートポスト近辺で変位し、装置の偏向と性能をさらに制御/促進させる。さらに、電極 E 1 は、望ましい偏向を生じるために、スリット又は穴を設ける。寸法、特性、及びサポートポスト間の空間（例えば、幅に沿って）は、望ましい性能を得るために適宜選択される。

30

【0148】

隣接セル同士の重複（図 1 の実施例参照）は、 D 及び/又は F の規模を制御し、これに影響する。任意の適当な値を取る。

【0149】

本書に記載した装置の第 1 及び第 2 部材間の介在スペースは空気を含むか、真空か、次のうち 1 つ又は複数を含む：気体、流体、ゲル、又は変形可能な固体。

40

【0150】

有効な作業/エネルギーは、ほぼ、第 1 電極によって提供され、従って、これは適切な強度及び特性を備える。装置の支持部又は荷重などいくつかの位置において付加的な層（例えば、3 又は E 2）によって強化される。

【0151】

基板面に対して平衡な偏向、すなわち、横方向に偏向を生じる装置は、基板に対して直角な平面に装置を設ける製造工程を使用することで製造される。

【0152】

50

特別な言及はしないものの、いくつかの実施例において、特に、電極が異なる方法で操作されるか、及び / 又はオン・オフ切換えの連続とタイミングで操作される場合、電源を制御するための制御ユニットを電極 E 1 と E 2 に設けている（例えば、2 つ又はそれ以上の電極 E 2 が異なる電圧で操作され、電極 E 1 に異なる偏向効果を生じさせる）。そうした制御ユニットの構造と特徴は、電気制御の当業者にとっては自明のことなので、本明細書では説明しない。

【 0 1 5 3 】

当業者であれば、本発明のクレームの範囲を逸脱しないで上記の実施例に容易に修正を加えられることは容易に理解されよう。

【 図面の簡単な説明 】

10

【 図 1 】

静電駆動器の実施例を示す平面図。

【 図 2 a 及び 2 b 】

静電駆動器の実施例を示す側面図。

【 図 3 a 及び 3 b 】

別の静電駆動器の実施例を示す側面図。図 3 b は、偏向位置にあるアクチュエータを示す。

【 図 4 】

別の静電駆動器の実施例を示す平面図。

【 図 5 】

20

別の静電駆動器の実施例を示す側面図。

【 図 6 ~ 8 】

休止位置に関して対向する 2 つの向きに偏向できるアクチュエータの 3 つの異なる実施例を示す側面図。

【 図 9 及び 1 0 】

多数の第 2 電極を線形配列に設けたアクチュエータの 2 つの実施例を示す。

【 図 1 1 】

複合的な静電装置の別の実施例を示す。

【 図 1 1 】

複合的な静電装置の別の実施例を示す。

30

【 図 1 2 a、1 2 b、1 3 a、1 3 b 】

2 つの別の軸線について偏向可能なアクチュエータの 2 つの異なる実施例を示す。

【 図 1 4 ~ 1 6 】

複合的な静電装置の異なる実施例を示す。

【 図 1 7 ~ 2 4 】

アクチュエータ又はセンサの異なる実施例を示す。

【 図 2 5 A ~ 2 6 C 】

供給レールと電極間の接続例を示す。

【 図 2 7 A ~ 2 7 E 】

ブリッジサポートの異なる実施例を示す。

40

【 図 2 8 及び 2 9 】

第 1 導体と第 2 導体間の異なる接続例を示す。

【 図 3 0 A ~ 3 0 C 】

本書に記載したアクチュエータの製造方法の実施例を示す。

【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau



(43) International Publication Date
20 June 2002 (20.06.2002)

PCT

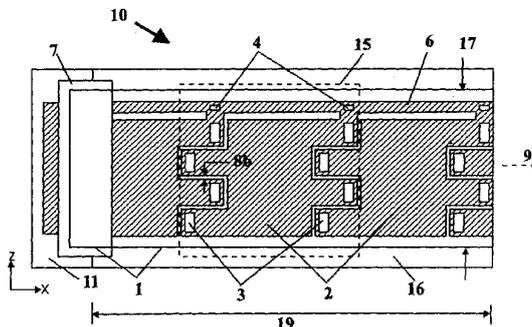
(10) International Publication Number
WO 02/49199 A1

- (51) International Patent Classification: H02N 1/00
 - (21) International Application Number: PCT/GB01/05349
 - (22) International Filing Date: 4 December 2001 (04.12.2001)
 - (25) Filing Language: English
 - (26) Publication Language: English
 - (30) Priority Data:

0030103.6	11 December 2000 (11.12.2000)	GB
0102337.3	30 January 2001 (30.01.2001)	GB
0119759.9	14 August 2001 (14.08.2001)	GB
0126233.6	1 November 2001 (01.11.2001)	GB
 - (71) Applicant and
(72) Inventor: DABBAJ, Rad, H [GB/GB], 5 Linchfield Road, Datchet, Berkshire SL3 9NA (GB).
 - (74) Agents: JEHAN, Robert et al., Williams, Powell & Associates, 4 St. Paul's Churchyard, London EC4M 8AY (GB).
 - (81) Designated States (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TI, TM, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.
 - (84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Published:
 — with international search report
 — before the expiration of the time limit for amending the claims and to be republished in the event of receipt of amendments

[Continued on next page]

(54) Title: ELECTROSTATIC DEVICE



(57) Abstract: An electrostatic device (10) includes a first flexible electrode (1) on which a plurality of second electrodes (2) are mounted so as to move with the first electrode (1). Upon the application of an electrical charge, the or each second electrode (2) causes deflection of the first electrode (1) which deflection is enhanced by the movement of the second electrode therewith. A variety of different designs of the device are possible to provide movement of the first electrode in a plurality of directions and also different types of in and out of plane movement, including rotation and twisting. The structure enables the device to operate at voltage levels compatible with integrated circuits and for the device to be manufactured using integrated circuit manufacturing techniques.



WO 02/49199 A1

WO 02/49199 A1



For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

ELECTROSTATIC DEVICE

The present invention relates to electrostatic devices, in particular actuators and sensors of the type commonly referred to as Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) or micromachined devices.

Generally, prior art electrostatic transducer devices, whether actuators or sensors, 5 comprise first and second members connected to a drive voltage-source. The resulting attractive electrostatic forces cause at least one of the members to move towards the other. For this purpose, the members are normally made of conductive material, such as metals and doped-polysilicon to facilitate charging and discharging and ensure proper operation.

Prior art devices are disclosed, for example, in the "Micromachined Transducers 10 Sourcebook" by G.T.A. Kovacs, WCB/McGraw-Hill, 1998, at pages 278 to 281, such as the classic cantilever actuator having a movable electrode suspended above a stationary counter-electrode by a gap. This suffers from the inextricable link between the gap length and useful deflection, with the latter usually much less than but not exceeding the gap itself. Larger deflections require larger gaps and consequential large voltages that are very 15 often incompatible with standard IC drive electronics. For many applications it is highly desirable to make devices having deflections larger than the actual gap. This book discloses a comb-drives actuator which has a large number of fine interdigitated fingers producing attractive forces mainly due to fringing fields, which can produce larger movements inherently in the substrate plane. Comb-drive actuators suffer from several 20 problems including: relatively large support/springs passive area, limited out-of-plane movement, difficulty in maintaining the desirable centrally-balanced finger positions, particularly at smaller gap widths.

Other prior art includes the article "Distributed Electrostatic Micro Actuator" by Motoharu Yamagauchi et al of Tohoku University published by IEEE in 1993, and United 25 States patent no. 5,206,557. Both documents provide large number of members connected in series to produce larger in-plane strokes that are not inherently capable of out-of-plane motions. The stacked members effectively form long chains with normal pulling forces. Together with comb-drives, manufacture of these devices is compounded by the requirement to micromachine deep structures with narrow gaps, a difficult task likely to 30 cause trade-off between achievable gap widths and drive voltage levels (and performance). This reduces compatibility with standard integrated circuit drive voltage levels and manufacturing.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

2

The present invention seeks to provide improved electrostatic devices.

According to an aspect of the present invention, there is provided an electrostatic device including a first flexible electrode able to be deflected and at least one second electrode mounted on the first electrode so as to move therewith and to cause deflection of the first electrode upon the application of an electrical charge to the electrodes.

The or each second electrode works to create enhanced deflection of the first electrode upon the establishment of an electrostatic force as it moves with the first electrode. The maintenance of close proximity of the first and second electrodes allows higher electrostatic forces, power density, efficiency to be developed and/or lower operating voltages which can be maintained even at large deflections. The device can operate at drive voltage levels compatible with semiconductor integrated circuits. It can also actively transform the high force/low deflection exhibited by the prior art devices to a lower force and larger deflection (and vice versa), in effect providing built-in mechanical magnification, improving load adaptability. Moreover, the inextricable link between inter-electrode gap and deflection in prior art devices can be successfully de-coupled, allowing each to be advantageously optimised separately.

Design flexibility can be facilitated by using the number of cells N as an additional parameter for increasing deflection, and/or for trade-off between deflection and force, and vice versa. For example, if a smaller gap is used (for example, for reasons of one or more of: lower drive voltage, higher power density and efficiency), deflection may still be enhanced by increasing N .

Devices made by the teachings herein may provide relatively large out-of-plane as well as in-plane movements and deflections.

Thus, the amount of movement of the first electrode per unit of applied voltage is increased compared to prior art devices. This can enable the device to be operated at lower voltages, even voltages typically used in integrated circuits (ICs). Thus, as well as compatibility with IC fabrication, the devices may be integrated with ICs and drive electronics (e.g. monolithically) leading to significant cost reductions.

For many applications it is highly desirable to make devices having large deflections while keeping the gap small. Furthermore, smaller gaps lead to the advantage of higher power densities, efficiencies and/or lower drive voltage levels.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

3

In the preferred embodiment, there is provided a plurality of second electrodes located proximate one another on the first electrode. A plurality of second electrodes increases the deflection of the first electrode.

Where a plurality of second electrodes is provided, these may be arranged in a linear array or may be in any other arrangement. Where they are arranged in a non-linear array, they can produce deflections of the first electrode about more than one axis to create complex actuator or sensor movements.

In an embodiment, there is provided a plurality of second electrodes arranged on the first electrode or electrodes to provide movement of the first electrode or electrodes in opposing directions. In one example, one or more second electrodes may be located in what could be termed on the top surface of the first electrode and one or more second electrodes located in what could be termed on the bottom surface of the first electrode; such that the top second electrode(s) produce a downward deflection or movement of the first electrode and the bottom second electrode(s) produce an upward deflection of the first electrode.

Where a plurality of second electrodes is provided, these may overlap, for example by the provision of fingers which interdigitate with the fingers of the other electrode. Alternatively, adjacent rows may be staggered to effect another form of overlap.

Preferably, there is provided a common supply rail for supplying the or a plurality of second electrodes with power. Where there is provided a plurality of second electrodes to be driven in different manner, a plurality of supply rails may be provided.

The gap between the first and second electrodes may be kept under a vacuum or filled with one or more of a gas, liquid, gel or deformable solid material.

The first and/or second electrode or electrodes may have access holes for manufacturing purposes or other apertures, weakness or strengthening areas to adjust the deflection thereof. Alternatively, the first electrode may have no holes for applications as pumps and pressure sensors.

The first and/or second electrodes may be in the form of layered members including at least one conductive layer.

According to another aspect of the present invention, there is provided an electrostatic device including first and second electrodes arranged in first and second

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

4

planes respectively, both of which electrodes are operable to move in a direction at an angle to the plane thereof on application of an electrical charge between the electrodes.

According to another aspect of the present invention, there is provided an electrostatic device produced by an integrated circuit or a micromachining/MEMS
5 fabrication technique.

The invention also extends to actuators and sensors and devices incorporating actuators and sensors which use an electrostatic device as taught herein.

It is possible with the present invention to provide new types of actuators and sensors which can be operated at lower voltages making them more compatible with
10 integrated circuits. The actuators can have improved deflection versus voltage characteristics and improved trade-off between deflection and force, and more sensitive sensors.

Furthermore, the present invention can offer more versatile and flexible actuator design parameters. It can provide devices which are capable of motions and deflections in
15 and out of their own planes, thereby moving in three axes.

Embodiments of the present invention are described below, by way of example only, with reference to the accompanying drawings, in which:

Figures 1, 2a and 2b show plan and side elevational views of an embodiment of electrostatic actuator;

20 Figures 3a and 3b are side elevational views of another embodiment of actuator, with Figure 3b showing the actuator in a deflected position;

Figures 4 and 5 are, respectively, plan and side elevational views of another embodiment of electrostatic actuator;

Figures 6 to 8 are side elevational view of three different embodiments of actuator
25 able to deflect in two opposite directions relative to a rest position;

Figures 9 and 10 show views of two embodiments of actuator with a plurality of second electrodes in a linear array;

Figure 11 shows another embodiment of complex electrostatic device;

Figures 12a to 13b are plan views of two different embodiments of actuator able
30 to deflect about two different axes;

Figures 14 to 16 show different embodiments of complex electrostatic device;

Figures 17 to 24 show different embodiments of actuator or sensor;

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

5

Figures 25A to 26C show examples of connection between supply rail and the electrodes;

Figures 27A to 27E show different embodiments of bridge supports;

5 Figures 28 to 29 show different examples of connection between a first conductor and a second conductor; and

Figures 30A to 30C show an embodiment of method of manufacture of an actuator as herein described.

10 It will be apparent to the skilled person that the actuators described herein could also be used as sensors and therefore the term "device" is intended to encompass both actuators and sensors. Furthermore, on the whole the description focuses on actuators for simplicity only and it is intended that equivalent sensors are also encompassed.

15 In this specification, electrode E1 refers to members 1, 31, 91 and 101 described below, and electrode E2 refers to members 2, 32, 92 and 102 described below. Devices able to deflect or bend about one or more axes may be referred to herein as single axis devices, double axis devices and so on.

Referring to Figures 1, 2a and 2b the embodiment of device shown can deflect about one axis (in this example about the Z-axis). Figure 1 shows the device in plan view, while Figure 2a shows a side elevational view of the device. For ease of understanding, 20 Figure 1 shows the first layer in outline only, but is shown in solid form in Figures 2a and 2b.

The device 10 comprises an electrically conductive first member or layer 1 of stiffness k_1 and an electrically conductive second member or layer 2 of stiffness k_2 separated from one another by an electrically insulating layer 3 which provides a 25 separation gap 3a between members 1 and 2. The members 1, 2 form first and second electrodes E1, E2 of the device respectively. Layer 3 provides support posts or anchor pads also acting as spacers maintaining gap 3a between the members 1 and 2.

The members 1 and 2 and the layer 3 form a plurality of bridge-like cells 15. An array of these cells 15 share a common first member 1 (electrode E1) and together form a 30 flexible structure 18 which forms the main body of the device.

The member 18, which has an active length 19 and width 17, is mounted and fixed to a support post 11 raised above substrate 16 by gap 14. Thus, the member 18 is

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

6

suspended above the substrate 16 and its free (cantilevered) end can move along angular direction 12 shown in Figure 2b.

The first member 1 may be substantially continuous throughout the cells 15 while member 2 is segmented to form a plurality of individual cells 15. The cells 15 may have any appropriate length and dimensions and may be repeated further along direction 9 and/or laterally along the Z axis.

In the embodiment of Figures 1, 2a and 2b, the second members 2 (electrodes E2) are provided with a plurality of fingers which extend in the plane of the member and are arranged such that the fingers of adjacent members 2 interdigitate. This improves the deflection of the first member 1, as is described below. In this embodiment, adjacent members 2 are separated by gap 8b and overlap one another by distance 8a. Distance 8a may be of any desirable value and is preferably less than half a cell-length.

Figure 2b shows the device 10 in the deflected state.

The electrical connection terminals for the members 1 and 2 (electrodes E1 and E2) are at location 11 to facilitate connection to voltage or power supply 5. Each second electrode E2 is connected to a common supply rail 6 which may be formed from the same layer.

Since electrode E1 is shared between the cells 15, its end is available at location 11 for connection to power supply 5.

Like electrode E2, member 6 may also be separated from electrode E1 (if they overlap) by anchor pads 4, similar to 3.

The mechanical properties, such as stiffness (k) and thickness (t), of the various members, the length 19 of the device 10, the length of the cells 15, the active cell bridge-length (that is between members 3) and width 17 and other relevant parameters may be appropriately chosen for the particular application under consideration and to achieve operating characteristics desired. In common with most electrostatic devices, the energy, force and power are generally proportional to the device's active area and the electric field between electrodes E1 and E2. The force may be increased by increasing the active area, such as by increasing the cell's width 17 and/or using parallel rows of cells. Moreover, the power density (and force) may be increased by increasing the electric field or if the desired voltage level is fixed, the inter-electrode gap may be reduced. The number of cells along

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

7

length 19 may then be appropriately chosen in order to produce the desired deflection magnitude, using the built-in magnification capability of the device.

One example may have $N=10-20$ and approximate dimensions of: $t_{1(\text{layer } 1)}=1$ micrometre, $t_{2(\text{layer } 2)}=2$ micrometres and $t_{3(\text{layer } 3)}=1$ micrometre, these dimensions of course being dependant upon desired performance and other requirements.

When the device 10 is connected to voltage source 5, electric/electrostatic charges accumulate as a result of capacitance between electrodes E1 and E2, giving rise to attractive electrostatic forces between the electrodes E1 and E2. This causes electrode E1 to deform or curl and its free end to deflect out-of-plane along angular direction 12 as shown in Figure 2b. The deflection magnitude is proportional to the level of applied voltage. The deflection direction is from the second electrodes to the first electrode. It can also be seen that the device's effective length along the X-axis reduces to 19a as a result of contraction by an amount 19b (explained in more detail below).

Disconnecting the power supply 5 will keep the device in its deflected state for a period of time depending on the level of electrical insulation between electrodes E1 and E2. To return the device 10 to its undeflected state, the electric charges need to be removed, for example by shorting electrodes E1 and E2 together in order for the entire structure 18 to spring back.

The total end-deflection D at 12 is the sum of the deflection caused by each individual cell 15. More specifically, each cell 15 contributes a fraction towards the total deflection D of electrode E1, and the larger the number of cells 15 the larger is the overall deflection D and length contraction 19b. This will become apparent from a consideration of Figure 3b.

The bending magnitude depends on cell dimensions, location within the device and may further depend on load type and condition. The device 10 may produce a number of motions and forces depending on the method of mounting and/or clamping used. For example, clamping at the centre will cause the ends to deflect angularly upwards while clamping the ends will cause the centre to move downwards in a translational or linear fashion along the Y-axis. By placing electrodes E2 on the opposite side of E1, the device will deflect in the opposite direction.

Among the main general features of the device 10 are the following. Unlike the prior art, the devices have high energy density and capability by maintaining close

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

8

proximity between electrodes E1 and E2 and the resulting high electric field levels. It provides unique flexibility with which the number of cells N can control the trade-off between deflection D, force F, among other variables. Generally, for a given device 10 increasing N can increase D at the expense of F and vice versa. Many prior art devices are generally forced to use high drive voltages often well beyond the desirable levels used in semiconductor integrated circuits. On the other hand, the device 10 can actively transform the high force and low relative displacement between members E1, E2 to a lower overall force F and larger overall deflection D, providing in effect mechanical magnification (and vice versa), using lower V levels.

10 Figures 3a and 3b show another embodiment of device 20 in which the second electrodes E2 do not interdigitate or otherwise overlap. Rather, these electrodes E2 are rectangular in shape and are spaced from one another by a gap 8c. If desired, an overlapping version of device 20 may be made using a number of rows of electrodes E2 with the positions of adjacent rows shifted (along the X-axis) relative to one another.

15 As can be seen in Figure 3b, the deflection caused to the first electrode E1 extends over its entire length as a result of the bias to deflection caused by its major portions being deflected by the second electrodes E2. Figure 3b also shows the upward deflection of the first electrode E1, in practice in a direction opposite the second electrodes E2.

20 Figures 4 and 5 show another embodiment of device 30 which deflects about a single axis (in this example the Z-axis). In this embodiment, the second electrodes 32 are of a cantilever type, being connected only at one end to the first electrode 31.

This device 30 comprises an electrically conductive first member 31 (forming electrode E1) of stiffness k31, electrically-conductive second members 32 (forming electrodes E2) of stiffness k32, separated by an electrically-insulating layer 33 providing a separation gap 33a between the members 31 and 32. The member 31 and each member 32 with support layer 33 form a cantilever-like cell 45. It is not necessary for the support layer 33 to be located at one end of the second member 32 as it can also be located elsewhere, for example at its centre to provide two cantilevered sides sharing common anchor pad.

30 As with the embodiment of Figures 1 to 3b, an array of one or more cells 45 sharing a common first member 31 forms a flexible structure which provides the main body of the device 30. This flexible structure, with active length 39 and width 37, is

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

9

mounted and fixed to support post 41 raised above substrate 46 by gap 44 and free to move out-of-plane along angular direction 42. The cells 45 may have any appropriate length and dimensions and may be repeated along direction 39a if desired.

Members 32 of adjacent cells are separated by gap 49.

5 Insulating landing pads 48 may be used to prevent members 31 and 32 from coming into contact with one another during deflection. The pads 48 may also have other functional purposes: for example, they can cause the second electrode E2 to change from being of a cantilever type to a bridge type upon contact with its pad or pads 48 and thus alter the type of deflection imparted to the first electrode E1. This could be useful as a
10 limit switch or sensor.

As with the previous embodiments, members 32 are connected to supply layer 36 which may be formed from the same layer as the members 32. The first member 31 can extend to location 41 where it connects to power supply 35. Like members 32, member 36 may be separated from the first member 31 (if overlapping) by anchor pads and insulating
15 spacers 33.

All members 31, 32, 33 may be made of any appropriate material.

The mechanical properties and dimensions, such as stiffness (k) and thickness (t), of the various members 31,32, the active length 39 of the device, the cantilever-length and the active length of a cell, that is between members 33 and width 37, among other relevant
20 parameters, may be chosen in dependence upon application. Members 32 of adjacent cells in 30 can also overlap if desired.

When the device 30 is connected to voltage source 35, electric/electrostatic charges accumulating on the members 31,32 will deform member 31 along angular direction 42 from member 31 to members 32. Device 30 also undergoes length contraction
25 similar to 19b of device 10 in Figure 2b.

A cantilever-type device 30 deflects in an opposite direction to a bridge type device and, depending on the type of mounting and/or clamp used, may deflect in a number of ways similar but opposite to a bridge-type device. The bending magnitude depends on cell dimensions and location within the device, and may also depend on load
30 type and condition. Cantilever devices generally have similar features to the bridge devices.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

10

It will be apparent that bridge and cantilever types can be provided in the same device and indeed on the same first electrode E1.

Figures 6 to 8 show examples of bi-directional devices. Bi-directional devices may be made using a double-sided arrangement of second members 2, 32 sharing one common member 1, 31 (respectively) in back-to-back fashion. For example, each device may have its independent electrical connection while sharing one of electrodes E1 or E2 as a common member and terminal, such that each can be turned on/off independently.

One such embodiment is shown in Figure 6, which comprises two sets of second electrodes E2 and one common electrode E1 sandwiched between the two sets of second electrodes E2 of the bridge type. In effect, this sandwich arrangement forms two devices sharing one common electrode E1 capable of producing deflections in either direction along arc 89 while the other end of the device is fixed at 85. The device 40 (alternatively clamped via electrode E1 alone) deflects up and down if the bottom or top sets of electrodes, respectively, are actuated independently. Alternatively, two single direction devices may be coupled such that each may deflect the combined device in a separate direction.

Anchor pads 3 in the top and bottom sets of second electrodes E2 may be in alignment with each other and may have the same positions in the XZ-plane.

Other bi-directional devices may be made using only two electrodes E1 and E2 (instead of the three electrodes E2, E1, E2 as in device 40 of Figure 6) as shown in Figures 7 and 8. These can use a commonly available standard fabrication process requiring only two conductive layers and one insulating layer, for example by a two structural polysilicon layer process. This flexibility allows the fabrication of different types of devices, for example some bi-directional, some upward-deflecting single-direction, some downward-deflecting single-direction or a combination of these, all using the same fabrication run or batch and/or the same substrate. Thus, one can advantageously make bridge and cantilever devices and/or devices combining both types, capable of deflecting in any single or bi-directional manner.

Figure 7 shows an example of two layer bridge-type bi-directional device fixed to support post 71 comprising an insulating anchor pad layer 73, conductive layers 74, 75 joined at point 76. For example, an upward-deflectable part 77 can be made on the left side by making or configuring layer 74 as the second electrode E2 and layer 75 as the first

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

11

electrode E1, and a downward-deflectable part 78 can be made on the right side by making layer 74 as the first electrode E1 and layer 75 as the second electrode E2. A substantially continuous first electrode E1 is formed by joining members 74 and 75 at position 76. The parts 77, 78 may have one or more independent and/or shared electrical terminal(s), and may be repeated along 79 (or other rows as in Figure 11) to make a device of any desirable size and deflection characteristics.

It is not necessary that just the first electrodes are coupled together. An alternative is to connect electrode E1 of one device to electrode E2 of another device or to any other moveable part thereof.

Figure 8 shows another embodiment of bi-directional device having both bridge and cantilever types of cell and fixed at support post 81. The device comprises an insulating anchor pad 83 and conductive layers 84 and 85. For example, an upwardly deflectable bridge part 87 can be made on the left-hand side by making layer 84 as electrode E2 and layer 85 as electrode E1; while a downwardly deflectable cantilever part 88 can be made on the right-hand side by making layer 84 as electrode E2 and layer 85 as electrode E1. The combined parts 87, 88 may have one or more independent and/or shared electrical terminal(s) and may be repeated along 89 (and/or in other rows as in Figure 11) to make a device of any desired size and deflection characteristics. Advantages include: both bridge and cantilever cells use the same material/layer for electrode E1, and the same material/layer for electrodes E2; E1 and E2 are located on the same side of the device, which may be desirable in some applications.

Although layers 74, 75 (84, 85) may be configured as electrodes E1 or E2 or both, their thicknesses, however, are usually fixed and not readily controllable in a standard MEMS fabrication process. Thus, if desired and in order to optimise layers 74,75 (or 84,85) to function as E1 or E2 or both, their effective stiffness (k) may be controlled by varying the effective width of members E1, E2, for example by making holes or slits along the width to reduce k_1 , k_2 (stiffness of electrodes E1 and E2 respectively). Electrode connections for Figure 7, 8 may be of any appropriate type, e.g. as shown in Figures 25A-29. This technique may also be used to make up/down devices in the same fabrication process.

Parts 77, 78, 87 and 88 may each comprise one or more cells.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

12

Any appropriate cell form, shape, dimension, number of overlapping parts of fingers may be used. Further examples are shown in Figures 9 and 10, in which a plurality of cells formed by members E1, E2 and 3 equivalent to those of the bridge device 10 with electrodes E2 overlapping by distance 8a. Electrode E1 is shown in an outline form solely
5 for the purposes of illustration. The cell shape is not fixed and can be of any shape to produce or promote particular deflections. They could, for example, be rectangular, square, triangular, polygonal or of chevron shape. Similarly, any appropriate electrical connection (not shown) may be used, including connections of the type shown in Figures 25A to 29.

10 In addition to being able to provide devices having a single row of cells, it is possible to provide devices having a plurality of such rows, one device being device 170 of Figure 11. A common first electrode E1 may be shared by the rows. The adjacent rows may stagger relative to one another to overlap. The rows may deflect in the same or in different directions and may be independently controllable if desired.

15

Devices Deflectable about two Axes

Figures 12a to 13b show examples of devices which are capable of deflecting about two axes on the establishment of an electrostatic force between members E1 and E2, for example about the Z-axis and about the X-axis or having deflection components about
20 these axes. In general terms, members 91 and 101 in Figures 12a and 13a are the flexible electrodes E1 (shown in outline form only for ease of understanding) and could be considered similar to a flexible diaphragm.

Figures 12a shows an example of a device 90, which can be considered similar to a bridge-type device (such as device 10 of Figure 1). Device 90 comprises members 91 and 92 (in this example there being three members 92) similar to members 1 and 2 of the
25 device 10 of Figure 1, respectively. For this purpose, members 92 have an appropriate shape, in this example hexagonal, which may also have fingers (not shown) around the edges which interdigitate with its neighbours at region 98 as with the embodiment of Figure 1. The members 92 are separate from one another and are supported on member 91
30 (in this example behind 91) in a manner similar to that of a bridge-type device via similar anchor pads, for example one or more per finger.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

13

Alternatively, members 92 may be spaced out from one another by gaps similar to the embodiment of Figures 3a and 3b. Only three cells are shown in the embodiments of Figures 12a and 13a but more may be added along lines 99 and 109, respectively, in order to make arrays of any desired size, deflection and number of cells (similar to that of Figure 24).

Instead of interdigitated fingers, members 92 may have any appropriate shape and are supported by anchor pads placed at appropriate positions such as near some or all the corners or vertices of members 92 in order to facilitate bending about two axes. Furthermore, members 92 in adjacent cells may have any desired form and degree of overlap to enhance device performance. An alternative form of members 92 is shown in Figure 12b, each comprising four fingers which mesh or interdigitate with members 92 of its adjacent cells, and providing cell overlap along two axes.

If the member 91 is fixed at its periphery, upon actuation it will deform about the X and the Z-axes forming a curved surface with electrodes E1 and E2 located at the concave and convex surfaces, respectively. Alternatively, any other fixing method may be used, such as at the centre. Among some of its applications, the device 90 may be used in MEMS micro-speakers, microphones, micro-pumps, inkjet pumps and so on.

Figure 13a shows an example of a device 100 which can be considered similar to a cantilever-type device, comprising members 101 (as E1), 102 (as E2) and 103. Members 102 are supported, such as at their centres, on members 101 via anchor pads at appropriate positions 103. In this example, both members 101 and 103 may be placed behind members 102 (103 are shown in front of 102 in Figure 13a only for ease of understanding) so that device 100 can deflect in a similar direction to that of device 30. For example, if member 101 is fixed at its periphery, then upon actuation it will deform about the X and the Z-axes forming a curved surface with electrodes E2 and E1 located at the concave and convex surfaces, respectively. This type of deflection is shown in Figure 13b, which uses square-shaped electrodes E2 and E1 with electrode E1 fixed at its corners (and it will be apparent that the embodiments of Figures 12a and 12b will deflect in like manner).

The cells may overlap if desired.

As with device 90, the region between adjacent cells in device 100 may contain one or more electrical interconnections, for example connections 108, as described herein. Similarly, the second members 92 or 102 (constituting the second electrodes E2) could be

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

14

powered together or separately in dependence upon application. Device 100 has similar applications to that of device 90.

Only three cells are shown but more cells may be added along lines 109 to make an array of any desired size and number of cells. Similarly, the devices 90 and 100 and electrodes 91, 101 may have any desirable and appropriate shapes, for example hexagonal (as in Fig. 24) circular, square, even non-symmetrical.

A bi-directional device deflectable about two axes may also be made by duplicating members 92,93 on the other side of member 91 in device 90, and duplicating members 102, 103 on the other side of member 101 in device 100.

The skilled person will recognise that techniques similar to that used in Figures 7 and 8 may also be used to make double axis devices of the bridge-like, cantilever-like or a combination of both in the same device, which are capable of deflecting in a single or bi-directional manners using a two structural electrodes fabrication process.

Other embodiments which can move about two axes may be made by using two devices which each move about a single axis coupled to one another at an angle. They may be provided with shared or independent terminals for control. For example, device 140 of Figure 14 may be modified to make a device movable about two axes by orienting one or more rows at 90° to one or more other rows in the same device. Upon actuation, each device will cause deflection about one axis. Device 180 shows another example which can also deflect about two axes. Electrodes E1 may have slits, apertures or holes to further promote or enhance operation.

Complex Devices

It is also possible to create complex devices formed of a plurality of sets of second electrodes either on a single first electrode or on a plurality of first electrodes. In the former case, the first electrode can be made to deform in complex manners to provide complex types of movement of one or more device attached thereto or for use in speakers, microphones, pumps and so on. In the latter case, intricate types of movement can be provided, for example by coupling together devices of the types described above with reference to Figures 1 to 13b and 23a to produce complex movements about one or many axes and/or translational motions along one or many axes. The number of axes about

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

15

which a device can deflect is theoretically unlimited and will be chosen in dependance upon the application and desired deflection characteristics.

The different types of cell described above can also be combined together, for example, bridge-type and cantilever-type cells can be combined; cells deflecting about one or two axes can be combined, as can reverse direction, bi-directional or any other combination, to provide movement with any desired angle and direction of motion. Furthermore, one or more sections may have separate and independent electrical terminals to be independently driven, or may share one or more electrical terminals. Such combined devices provide unique features using standard fabrication processes to provide complex articulated structures achieving functions hitherto too complex or difficult to achieve. Some examples of optical-scanners and beam-steering devices are shown in Figures 14 to 19. These find applications in 2D and 3D optical switches used in telecommunication such as all-optical-switching, fibre-optic switching and optical cross-connect (OXC).

Appropriate drive and control electronics and techniques known to those skilled in the art may be used to obtain sophisticated motions and deflections, which may be desirable in these applications and others such as micro-manipulators and robotics. The low-voltage capability allows these devices to be integrated with drive electronics monolithically with significant cost reduction such as in devices capable of optical switching between large number of fibre-optic channels. These devices may be used to deflect coherent and/or incoherent electromagnetic waves, e.g. light, about one or more axes.

Figure 14 shows an example of a complex device 140 capable of turning/twisting, comprising a plurality (in this example seven) devices 172 each deflectable about a single axis, connected/mounted via members 177 in series, such that each of device 172 is carried by and moveable with the preceding device. Device 172 (separated from its neighbours by gaps 176) comprises a number of cells (for example three) and is capable of deflecting in the opposite direction to its adjacent device. The complex device is mounted/fixed at 171, leaving the other end 175 free to deflect (in this example about the Z-axis). End 175 may be connected to any desirable load, for example a mirror 179, or to any other electrostatic device. When switched on, mirror 179 can be twisted/deflected by relatively larger amounts, the total angle being the sum of the number of individual devices used and the number of cells in each, and also on the magnitude of V, among other variables.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

16

Clockwise and counter-clockwise turning may be obtained depending on the device direction.

Another device, such as device 10 (or other single or multiple axes devices), may be mounted on 175 (instead of 179) in device 140 to enable the first device to deflect about a different axis depending on the turning angle imparted by 140 when appropriately actuated (10, 140 may be jointly or independently controlled). For example, if the turning angle is near 90°, then device 10 can be deflected laterally in the XZ-plane. The latter deflection types can alternatively be achieved by using a device disposed in a plane normal to the substrate (XZ-plane). Other in-plane devices are shown in Figure 23a and 23b.

Figure 15 shows another example of an "L-shaped" complex device 180 comprising two individual devices 182, 183 of any desired number of cells. Device 183 is mounted on and moveable by device 182 and both may be independently controllable. As in Figure 14, end 185 may drive an appropriate load, such as a mirror 189. When individually switched on, device 182 can twist and deflect the mirror around the Z-axis, while device 183 can deflect the mirror around the X-axis. Switching both device 182, 183 by various amounts may enable the mirror to deflect with components resolvable about all the three XYZ-axes. For example if device 182 deflects by 90 degrees, it will now enable device 183 to deflect about the Y-axis (Y-axis being normal to the page). Instead of mirror 189, one or more electrostatic devices may be mounted on device 180 (e.g. at 185) to enable even more complex motions.

Both complex devices of Figures 14, 15 and 17 to 19 may be used in light scanning/steering applications and OXC switches.

Figure 16 shows a device 160 formed from a plurality of curved cells 162 is an annular shape with one end secured to a support 168 and the other end carrying a member 165 to be moved. The member 165 may move a load attached thereto. As with the other embodiments described herein, that of Figure 16 could be formed with any type of device, including a bi-directional device. Similarly, other shapes and paths such as rectangular, triangular, spiral may also be made if desired.

The embodiment of Figure 17 comprises two complex devices 121,122, one on either side of element 125. Element 125, which may be a mirror, is mounted at the deflectable-end of elements 121,122, with other end fixed at 123. The device may comprise two parts 121a, 121b able to deflect in one or more same or opposite directions.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

17

A number of drive schemes may be used to move the mirror in a variety of ways. For example, if members 121a, 121b, 122a, 122b all deflect upwards (out of the page) by equal amounts, the mirror will move linearly upwards, while with non-equal deflections the mirror can be tilted towards the least-deflected side. Deflecting only one of members 121 or 122 tilts the mirror to one side. Mirror 125 may also be tilted towards the left and right of Figure 16 if members 121b, 122b are deflected in the opposite direction to members 121a, 122a respectively. Many other drive techniques known to those skilled in the art that may be used to achieve these drive schemes.

Figure 18 shows an even more versatile embodiment using four devices 131,132 (complex, single axis and/or bi-directional) supporting a load, for example mirror 135, at one end and fixed to frame 137 at the other ends with devices 133,134 supporting frame 137 at one end and fixed to anchor points 136 at the other end. Again, similar drive techniques as described for the embodiment of Figure 17 may be used in order to move, deflect and/or tilt mirror 135 in/about one or more axes.

Another embodiment is shown in Figure 19 comprising four devices 141 (complex, single axis and/or bi-directional), supporting, for example, mirror 145 at one end and fixed to frame 144 at the other end (144 is appropriately supported). As with the previous embodiments, mirror 145 can be moved in linear and/or angular fashion by appropriately activating one or more of 141 by techniques known to those skilled in the art. The mirrors in Figures 17 to 19 may overlay the devices thus hiding them underneath, which may be advantageous in maximising the mirrors' active areas.

The devices may also be used in fluidic applications such as pumps and inkjet printer cartridges. An example is shown in Figure 20 comprising a double (or single) axis device 281 of appropriate shape, for example circular, which is fixed at its periphery to a supporting (frame) member 282, which may be of back-etched silicon. Device 281 is preferably of the sealed-type, that is with a continuous first member E1 forming an impervious membrane without holes, which may also be capable of bi-directional actuation. E1 may preferably face cavity 285. Another member 283, which may be of glass or silicon, containing an inlet and outlet ports along 286a and 286b, (e.g. funnel shaped) respectively, is appropriately bonded at 284 to member 282 forming a cavity 285 in between.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

18

If desired, two one-way valves 287a, 287b may be used at the inlet and outlet ports, respectively, to direct fluid flow as indicated by the arrows. Membrane 281 may be capable of up and/or down motions. Upwards movement causes cavity 285 to expand and sucks fluid in, while downwards movement causes it to contract and push fluid out. Thus, the pump can move fluid from the inlet to outlet ports and through the conduits connected thereto. The device may operate in a continuous oscillating or vibrating fashion, and/or be capable of fast on/off actuation.

An additional environmental protection membrane 291 can be suspended above member 281 by member 292 without adversely interfering with the proper operation of member 281. In this and other applications, a similar environmental protection member may be used which may also be mounted on (and moveable by) the device 281 via appropriate support posts.

The device may also be used in acoustic applications such as speakers, earphones and ultrasonic generators. For example, the embodiment of Figure 20 without bottom member 283 may be used as a speaker or ultrasonic generator when driven with appropriate signals. The top protective membrane may also be used if desired, in which case it may be preferable to make the second electrodes E2 face member 291.

The embodiment of Figure 21 may alternatively be used as a speaker or ultrasonic generator (which may provide simpler fabrication) and comprises a device 301 fixed to support member 302. Member 302 is in turn fixed to substrate 303. Upon appropriate actuation, the device can deflect along direction 304 to generate acoustic waves.

The devices may be used in sensor applications such as pressure sensors and accelerometers. An example is shown in Figure 22, which comprises a double (or single) axis device 311 of appropriate shape, for example circular, which is fixed at its periphery to a supporting (frame) member 312, which may be back-etched silicon. Device 311 is preferably of the sealed-type, that is with a continuous first electrode E1 forming an impervious membrane without holes. Electrode E2 preferably faces cavity 315. Another member 313, which may be of glass or silicon, is appropriately bonded at 314 to member 312 forming a sealed cavity 315 therebetween. Cavity 315 may be maintained at a desired reference pressure, for example vacuum, by appropriate means. Device 311 is capable of deflecting up/down in response to outside pressure variation relative to cavity 315 and the pressure therewithin, leading to variation in capacitance in the device 311, which can be

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

19

used for absolute pressure measurement by an appropriate electronic detector. The cavity provides environmental protection of electrodes E2 of member 311, thus may alleviate the need for an additional protective member (291 in Figure 20), although such a member may still be used if desired. For differential pressure and gauge applications, a port 316 may be used to facilitate such pressure measurements.

Acoustic microphones and ultrasonic detectors may be made using a similar embodiment to that of Figure 22 (e.g. without member 313) to sense and detect acoustic waves. Alternatively, they may be made using similar embodiments to Figures 20 (without member 283) and 21.

Similar devices to those of Figures 21 and 22 may be used as accelerometers, which may carry an appropriate additional mass to facilitate sensing, for example formed by appropriate bulk-etched silicon. The pressure and acceleration sensor devices may also be used as force-balance sensors benefiting from the sensing and actuation capabilities of the devices of the invention, using drive techniques and methods known to the skilled person.

Other embodiments of complex device are capable of producing linear motions and forces along directions substantially parallel to their own planes using the length-contraction effect explained above. One example is device 250 of Figure 23a, which lies in the XZ-plane. Device 250 comprises a number of sections 254 connected in series such that each one is mounted on and deflects (the member 255 attached to it) in the opposite direction to the preceding one. The use of two sections deflecting in opposite directions enhances the device's in-plane movement, while reducing the out-of-plane movement. Device 250 comprises two halves (may be symmetrical), A at the bottom and B at the top. Halves A and B are used to produce more uniform and stable displacement 259, although only one may be used. Therefore, only half A is described in detail. Each section 254 comprises three devices 251a-253a connected in series and forming a twisting type device similar to that of Figure 14 (arms 251a, 253a may deflect upwardly and arm 252a downwardly). When activated, 251a-253a's angular deflections are added to produce a maximum deflection at the end of any 253a and member 255 attached thereto. Only deflection of the members 253a and 253b are shown in Figure 23b for clarity. Members 255-258 may be of any appropriate material.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

20

When activated device 250 can deform and contract in the manner shown in the side elevational view of Figure 23b. In practice, member 253a drives member 255 of the next section and so on, thus leading to device 250 wrinkling and thereby to contract. The contracted length L2 of device 250 is shorter than its undeformed length L1. Device 250
5 can be used to pull a load attached to its end 258 substantially along direction 259 when its left end is clamped at 257.

Upon deactivation, device 250 may spring back to its original length L1.

Device 250 may have additional supporting/stabilising members, such as tethers or guides, and may be appropriately attached to a load without allowing undesirable
10 deflections, for example to keep clear of the substrate. Odd and even members 254 may be capable of simultaneous actuation (sharing one or more electrical terminals) or may each be capable of independent actuation. In the latter, a differential drive may also produce additional up/down net deflections if so desired. Although three sections (251a-253a) are shown, any number may be used and each may comprise one or more cells of the type
15 taught herein. If desired, the device 250 can be maintained at a safe distance away from the substrate by making the upward-deflecting 254 members of larger deflections than the downward-deflecting ones.

Other examples of contraction-type complex devices may be made by forming devices with one or more cells deflecting in opposite directions to one another, such as
20 those of Figures 7 and 8. If desired, contraction devices may be disposed in a plane normal to the substrate.

Devices capable of in-plane linear motions or contraction along two axes substantially parallel to their plane are also envisaged. Figure 24 shows an example of a double axis device 260 disposed in the XZ-plane, comprising electrode E1 and electrodes
25 E2 of appropriate shape and anchor pads (not shown). The device may have two groups of cells, each capable of deflecting in the opposite direction to the other (using techniques similar to those of Figures 7 and 8). More cells may be added to make devices of any desired size. The device may initially be flat and deform upon actuation so as to contract substantially along two axes, in this example in the XZ-planes. Appropriate electrical
30 connections similar to those shown in Figures 25A-29 may be used. Other details may be similar to the embodiment of Figures 12a to 13a.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

21

Furthermore, a double axis length-contraction device may be made using a plurality of single axis devices. For example, one such device may comprise a common E1 electrode in the XZ-plane, having a plurality of E2 electrodes disposed radially outwards across the circumference of one or more imaginary concentric circles of progressively larger radii. Each set would lie across its own circle and deflect in the opposite direction to the adjacent inner and outer sets, so as to provide radial contraction.

Some of the applications of device 260 include: 2D linear motions for 2D actuators, artificial muscles, membranes having variable/controllable stiffness, and 2D sensors.

In both devices 250 and 260, the load acted upon may be spring-loaded or mounted such that it may spring back upon de-actuation, alternatively two devices may pull in opposite directions.

Other in-plane linear motions devices may also be made using two or more devices of the type 250 disposed at an angle to each other such as 90°, each capable of contracting substantially in a single axis.

Complex devices containing both in-plane and/or out-of-plane devices to generate complex motions, such as three dimensional (3D) motions, may be made. For example, a membrane-like device capable of substantially linear 3D movements may be made comprising electrode E1, on which a number of sets of electrodes E2 are mounted to produce in-plane motions about two axes, and some out of plane motions about a single axis. Each set may be independently controllable. This finds applications in robotics, positioning, alignment and 3D optical stages and so on.

Embodiment 250 may be used in a number of applications requiring movement in one or more axes, such as artificial muscles, solenoids, electrostatic comb-drives and thermal actuator replacements. In other applications, the linear displacement or motion may be converted into rotary motion such as by cranking of a rotary wheel, the wheel having an offset pin where the linkages from the actuators may be connected in order to impart rotation on the wheel by the actuators' linear motions. Two such actuators may be disposed at 90° to each other so when driven with appropriate voltage signals (for example, 90° out of phase sinusoidal wave) they can cause continuous rotation of the wheel. The wheel may have gear teeth that may cause other wheels/gears attached thereto to drive a load.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

22

Another form of complex device includes one or two dimensional arrays containing two or more electrostatic devices of the types described whether deflecting in-plane (e.g. linear or contraction) or out-of plane (e.g. linear and angular), which can be used in variety of applications. For example, each device may carry and move in scanning motion an element such as a transmitting or receiving antenna for wireless communications and optical arrays for directing, transmitting and receiving of electromagnetic radiation. They may also be used for the detection of signals such as acoustic waves, in which case an actuating version of the device can direct and scan a sensor version of the device or any other sensor over the reception angular range to achieve best reception conditions.

In other embodiments, one or more devices set up as actuators may be connected in parallel or series or a combination of both in the same plane. Alternatively, two or more actuator devices movable about one or more axes may be stacked on top of one another in different parallel planes such that they are appropriately supported (e.g. by using additional support member/post and/or flexible sheet or laminate of appropriate material), in adjacent devices, on top of one another without impeding each other's deflection, with the resulting device having improved performance, for example providing larger forces.

An example of another stacking embodiment comprises a device similar to that of Figure 6 except that one actuator (for example the top actuator) may be of another type, for example cantilever. Since bridge and cantilever type devices deflect in opposite directions, in this case they will both move in the same direction, thereby to produce larger forces.

Electrical Interconnections

Electrical connections/interconnections of corresponding electrodes in any cell or between the various members and devices may be made by a variety of techniques, some of which are shown in Figures 1, 4, 25A to 26C (the first electrode E1 is not shown in these Figures for the purposes of clarity). These are shown for single axis devices, but can be easily adapted or applied by those skilled in the art to double axis and complex devices, for example, by appropriately routing and distributing the electrical connections throughout the device. These connections are preferably made relatively flexible without adversely affecting the desired performance of the device or undesirably restrict useful deflection and extend from the base support of the device. They can use materials and techniques known to those skilled in the art, for example the same materials as electrodes

E1 and E2 or other materials such as a metal layer of appropriate thickness and dimensions. The interconnections may be situated between, along the sides of, above or below the cells. They may be freely-suspended or may be supported (for example, by spacers 3) at appropriate points in order to prevent them from contacting the opposite polarity electrode. Normally electrodes E1 of the cells are already connected together as a continuous member but if not (such as in a complex device) any appropriate method as that described for electrode E2 may be used.

In Figure 25A a bridge type device 200 comprises a number of cells in which electrodes E2 are interconnected by flexible member 201. Member 201 connects electrode E2 in the preceding cell via connections 202 to electrode E2 of the next cell via connection 203. Figures 25B and 25C show other examples of connections, comprising members 211 and 212 together with member 213 or member 214 of Figure 25C.

Figure 25A also shows alternative connections located on the sides of the cells such as 205 and 207 and/or 204 and 206. One or more of the latter connections may be used to facilitate connections to one or more devices, particularly in a complex device, by techniques known to the skilled person to facilitate inter-device electrical connections.

Figure 26A shows examples of flexible connections for a cantilever type device 220 using member 221 connecting electrode E2 in a preceding cell at point 222 to electrode E2 in the next cell at point 223. Members 231 or 232 in Figures 26B and 26C, respectively, show alternative connections to 221 of Figure 26A.

Figure 26A also shows connections 225 and 227 and/or one or more of 224, 226 on the side of the device, having similar functions to those shown in Figure 25A.

Figures 28 and 29 show cross-sections across a device showing two examples of implementing the electrical connections situated on the sides of the device and how they may be carried and supported. Figure 28 shows an independent connecting member 235 (similar to members 204, 206 and 224, 226), while Figure 29 shows how to use part of the material of the other electrode (for example, E1) to interconnect electrode E2 (or vice versa) via member 236.

Figures 27A to 27E show different examples of cells of the bridge type. They all include first and second members 61 and 62 and an insulating member 63 similar to the members 1, 2 and 3 of device 10 of Figure 1. Members 62 and 64 may constitute a single member or two and may have the same or different stiffnesses, thicknesses and material.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

24

Member 62 may be curved, as shown in Figure 27D. Figure 27E shows a bridge connection which provides electrode overlap of magnitude 68.

Electrical interconnections may alternatively be situated above or below the device in such a way that they are appropriately supported, preferably on electrode E2, and carried along on the device (with appropriate flexible members between the cells) for the purpose of supplying electrical connections to one or more devices, and/or one or more additional devices carried/activated/deflected by a device. Individual devices can be independently actuated in this manner.

Instead of permanent attachment to the substrate, the devices may also be detached from the substrate after fabrication and may then be appropriately assembled into any desired form (e.g. a complex device) and mounted on alternative supports or may be used individually.

Detached devices may subsequently be appropriately attached (e.g. by bonding or gluing) to a load (or support). In some embodiments, the electrostatic device may not be attached to any substrate but may simply be connected to a power source via flexible leads.

Fabrication

Any suitable process and materials known to those skilled in the art may be used to fabricate the devices described herein, including: MEMS or MOEMS (such as multi-user MEMS Processes "MUMPs"), IC and semiconductor processes, microelectronic and silicon processes, LIGA/S-LIGA, thin film, electroplating, fabrication by printing processes, on silicon, glass, plastic or other substrates.

Figures 30A to 30C show an example of the main fabrication steps for part of an upwardly deflectable device similar to device 10 of Figure 1, using standard microelectronic techniques and processing. Some standard MUMPs processes, such as the Cronos Integrated Microsystems, may not readily provide as standard a functional insulating layer between the two moveable structural polysilicon layers. This additional layer may be formed at the appropriate stage during the fabrications process as explained below.

The process starts with a silicon substrate 270 usually having a silicon nitride layer 278a deposited by, for example LPCVD, followed by the deposition and patterning of a polysilicon layer 278b if desired. A first sacrificial layer 275 (such as phosphosilicate

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

25

glass "PSG") is then deposited, for example by LPCVD, and patterned as desired. A first structural polysilicon layer 272 is then deposited, doped, annealed and patterned in accordance with desired second member E2 pattern. A second sacrificial layer 276 (such as PSG) is deposited, for example by LPCVD. A photoresist layer 277 is then laid and patterned with openings 274. Exposed parts of layer 276 are then etched away. An insulating layer 273 is then deposited by an appropriate technique to form the anchor pads inside holes 274, followed by the removal of unwanted parts of 273, for example by lift-off after stripping 277. Layer 273 is preferably resistant to the sacrificial layer etchant. A second structural polysilicon layer 271 is then deposited, doped, annealed and patterned in accordance with desired first member E1 pattern, as shown.

Standard processes normally use additional top layers, such as gold, which may be used for additional electrical interconnections. Polysilicon layers are appropriately doped and subsequently annealed in argon to increase electrical conductivity and reduce stresses. Sacrificial layers too are annealed in argon to reduce stresses.

All sacrificial layers can be removed by appropriate wet or dry etching techniques in order to release the first and second members 271, 272. Members 271, 272 may have etch/access-holes patterned in to facilitate sacrificial layer removal. Layer 276 may be appropriately planarised and/or levelled with 273 to provide a smoother and more levelled 271 layer (for example, as in the SUMMIT process).

There are a number of other ways of laying layer 273 including thermal oxidation or forming silicon nitride with layer 272 after the removal of 277, followed by the deposition of layer 271. As shown in Figures 30A-C, the device is directly attached to the substrate which is an alternative method to that of Figure 2a. The latter attachments may be obtained by extending layer 275 under 272, 273 and then appropriately under-etching 275 around the base support (or throughout the device as well). Alternatively or in addition to this, a separate base support may be made similar to that of the anchor pads 273, prior to depositing 272.

The standard Cronos Integrated Microsystems' MUMPs fabrications process may alternatively be used by alleviating the need for an additional insulating layer between E1 and E2 by using, instead, an "under-etching" of the sacrificial layer (for example 276 in Figures 30A-C) during its removal, so as to leave parts as anchor pads. Under-etching basically relies on controlled or selective etching of the sacrificial layer (for example, 275,

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

26

276 in Figure 30A) such that the etching process may be terminated short of removing the anchor pads. If desired, anchor pad positions may additionally be treated by an appropriate technique (for example, ion beam, doping and so on) to make them more etch-resistant.

5 An appropriate etch-depth detection technique (manual/automatic) may be used to monitor/control the etching. This "under-etching" method may be facilitated by appropriate dimensioning of relevant layers and/or providing lips, overhangs and access holes (for example in E1/E2) to provide longer etching paths to the anchor pads.

Another process having three structural polysilicon members such as the Sandia's SUMMIT, SUMMIT V may be used for making two or three moveable electrode devices. 10 Bi-directional three-electrode devices similar to that of Figure 6 may be made. Also two devices in parallel may be made by this method. The third structural polysilicon may be used for additional purposes such as to form the mirror in Figure 14-19 above the actuators (or adjacent) if desired.

The devices disclosed herein can operate at low drive voltages and may thus be 15 monolithically integrated with the drive electronics and circuits using standard or modified IC processes and technologies such as CMOS, CMOS & MEMS or post-CMOS, BiCMOS for example. This can realise smart actuators and sensors by the integration with the drive and control electronics. A number of appropriate methods and techniques known to the skilled person may be used, including the use of one or more of the conductive 20 (metallisation and/or polysilicon) and insulating layers for the moveable members and anchor pads, respectively.

In applications requiring sealed cavity such pumps, pressure sensors, vacuum and fluidic devices, it may not be desirable to have access-holes in E1. Instead, appropriate access holes disposed on E2 alone can provide sufficient paths to reach E1. Any other 25 alternative known technique may be used to remove the sacrificial layers such as by using materials that decompose from solid state directly into vapour when heated like dry-release dendritic materials.

Good layer adhesion may be achieved by any appropriate known techniques including additional one or more adhesion-promotion layers and techniques. As with most 30 MEMS devices, any known anti-stiction technique may be used, for example by providing dimples to ease layer release during fabrication and/or act as bumpers during device use.

Thermal and intrinsic stresses may be managed and controlled by any suitable and appropriate known technique.

An additional membrane of appropriate flexible material such as the example of Figure 20 may be used for environmental, for example dust and moisture, protection and may also be mounted on the device so as to move and deflect with it.

Microstereolithography "MSL" fabrication may also be used especially for vertically stacked devices and also for devices disposed normal to the substrate.

The first member E1 (or E2) and/or a load member (e.g. mirror in Figure 14) may be made of single crystal silicon, for example by appropriate bulk or a mixture of surface and bulk micromachining processes.

The above description sets out many of the advantages and features of the invention taught herein in its described embodiments.

As well as actuators, the devices described herein may also be used as mechanical-to-electrical transducers and sensors deflectable about one or more axes. Mechanical deflections D cause changes in the capacitance value d(C) between electrodes E1 and E2 that can be used for sensing purposes. As in the actuation versions, the maintenance of close proximity of electrodes E1 and E2, combined with relatively large active area and capacitance, can give rise to high sensitivity which may be used to advantage in many applications such as microphones, pressure/force sensors, inertial sensors, accelerometers and gyroscopes. The same device may perform both functions, that is sensing and actuation, by using separate dedicated sections on the device, some for actuation and some for sensing. Alternatively, the same device may be used as actuator or sensor at different times by time-sharing or may even do so simultaneously by appropriate techniques known to the skilled person. Thus the movement and positions of actuators can be sensed and measured and/or used in a feedback loop to control or maintain actuator positions which find many applications, e.g. in Fibre-Optic OXC, to accurately deflect and steer optical beams between the channels and to dynamically maintain optimal steering conditions. Other applications include the force-balance sensing techniques and devices.

Actuator and sensor types of device may each have their own individual performance-optimisation parameters. They may also have integrated electronics and logic circuits to realise smart sensors and actuators. In addition, one or more sensor may be mounted on one or more actuator. Sensor sensitivity may be optimised or controlled in

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

28

variety of known ways. Such sensor devices have inherent bi-directionality, producing $d(C)$ if moved in either forward or reverse directions, although the two values may not be equal. For equal $d(C)$ values, bi-directional sensing devices similar to the bi-directional actuators described herein may be used (for example similar to that of Figure 6). In certain
5 sensing applications, at least one of electrodes E1 and E2 may be or may contain an electret material such as Teflon^(TM) or PVDF for improved performance.

The devices described herein may operate at any desirable and appropriate voltage, in an analogue and/or digital fashion, and may use smart or on-board electronic drives and circuits, and may also use voltage versus deflection linearisation techniques of
10 known type. These and other techniques may also be used to drive the device in an oscillating mode or a.c. fashion, at any desirable frequency, whether resonant or not. For example, a.c. drive at/near resonance may produce much enhanced deflections, which may be desirable in some applications.

In order to prevent contact between the electrodes E1, E2 due, for example, to
15 excessive voltage levels (snap-down, snap-over or pull-in phenomenon), any appropriate deflection-range extension/anti-collapse technique may be used. This may apply to individual cells and/or to the overall device. An external limiting or stop member may also be used, with damping/spring action to soften impact if desired. For example, stops 48 shown in connection with device 30 and a similar stop in the bridge types of device
20 (appropriately situated, for example at their centre) may be used. Preferably electrodes E1, E2 may have smooth surfaces without sharp points or protrusions to prevent voltage breakdown at higher fields.

Part of the electrostatic energy stored in the activated device may be recovered after the device returns to its undeflected state by appropriate techniques. The device may
25 alternatively be actuated by on-board electric generators such as photovoltaic devices.

Each device may use identical or different cells. The shape and dimensions, for example length, thickness, pitch, stiffness and/or materials, may be same or different from cell to cell within any one device. For example, the cells may have progressively narrower width from one end of a device to the other, which may provide an improved method of
30 loading distribution within the device itself and/or energy delivery to the output load. In another example, each cell may be so designed so as to handle an appropriate portion of force/energy for optimum load drive. In other examples, the cells near to the device

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

29

support or load may be different and may be appropriately strengthened or otherwise optimised for these tasks.

Any suitable, appropriate and desirable stiffness (k_1 , k_2) values of the first and second electrodes and/or ratio between them may be used (for example, $k_1 > k_2$, $k_1 < k_2$, $k_1 = k_2$). Ratios of k_2/k_1 greater than 1 may increase the maximum useful deflection D_{max} (prior to snap-down). Among other parameters, k may be controlled by t , material type, mechanical properties, required effective width and ridges or grooves along appropriate directions. The aspect ratio of a cell (width over length) may have any desirable value. In addition to thickness t , the effective stiffness k value may also be controlled in a variety of other ways, such as by controlling the effective width of the members, for example by making holes or slits along the width to reduce k_1 , k_2 or by making ridges or grooves to increase k_1 , k_2 . The effective stiffness k value inside cells may be made variable, if desired for example near/around the support posts in order to further control/enhance device deflection and performance. Additionally, electrode E1 may have slits or apertures to promote desired deflections. The dimensions, properties and spacing between the support posts (for example, along width) may be appropriately chosen to obtain desired performance.

Overlap between adjacent cells (as in the embodiment of Figure 1) may control and influence the magnitude of D and/or F . It may be of any suitable/appropriate value.

The intervening space between the first and second members in the devices described may contain air, vacuum, one or more of: gas, liquid, gel or deformable-solid material.

The useful work/energy is delivered mostly by the first member E1 which accordingly should have appropriate strength and properties. It may be strengthened by additional layers (for example 3 or E2) at some positions such as at the device support or load.

A laterally deflecting device, that is deflecting parallel to the substrate plane, may be made using appropriate fabrication processes to make the device lie in a plane normal to the substrate.

Although not specifically described, in some embodiments there will be provided a control unit for controlling the power supply to the electrodes E1 and E2, particularly where the electrodes are to be operated in different manners (for example two or more

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

30

electrodes E2 to be operated at different voltages to create different deflection effects in an electrode E1) and/or for on/off switching sequence and timing. The structure and features of such a control unit will be readily apparent to the person skilled in electronic control so are not described in detail herein.

5 The skilled person will readily appreciate that modifications to the above-described embodiments can readily be made within the scope of the claims and that these embodiments are intended to be covered by the claims.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

31

CLAIMS

1. An electrostatic device including a first flexible electrode able to be deflected, and at least one second electrode mounted on the first electrode so as to move therewith and to cause deflection of the first electrode upon the application of an electrical charge to the electrodes.
2. A device according to claim 1, wherein the device is mounted on a support.
3. A device according to claim 1 or 2, wherein there is provided a plurality of second electrodes located proximate one another on the first electrode.
4. A device according to claim 3, wherein the or at least some of the second electrodes are arranged in a linear array.
5. A device according to claim 3 or 4, wherein the or at least some of the second electrodes are arranged in a non-linear array.
6. A device according to claim 3, 4 or 5, wherein the second electrodes are arranged to produce deflections of the first electrode about more than one axis.
7. A device according to any preceding claim, including a plurality of first electrodes, each first electrode being provided with at least one second electrode mounted thereon.
8. A device according to claim 7, wherein the first electrodes are coupled together mechanically such that deflection of one first electrode affects the position of the or at least one other first electrode.

30

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

32

9. A device according to claim 8, wherein the first electrodes are arranged serially, in parallel, in different planes or at an angle to one another or in any combination of these.
- 5 10. A device according to any preceding claim, wherein the device is capable of movement out of and/or in its own plane.
11. A device according to claim 10, wherein deflection causes contraction of the device in one or two directions.
- 10 12. A device according to any preceding claim, including a plurality of second electrodes arranged on the first electrode or electrodes in a manner as to provide deflection of the first electrode or electrodes in opposing directions.
- 15 13. A device according to claim 12, wherein one or more second electrodes are located on a first surface of the first electrode or electrodes and one or more second electrodes are located on an opposing second surface of the first electrode or electrodes.
14. A device according to any preceding claim, wherein the or each second
20 electrode is stiffer than the first electrode on which it is mounted.
15. A device according to any preceding claim, wherein when a plurality of second electrodes is provided, at least two adjacent second electrodes overlap.
- 25 16. A device according to claim 15, wherein said at least two second electrodes are provided with fingers extending substantially in a plane thereof and which interdigitate with one another.
17. A device according to any preceding claim, wherein there is provided a
30 common supply rail for supplying the first and second electrodes with power.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

33

18. A device according to any preceding claim, wherein there is provided a plurality of supply rails for supplying the first and/or second electrodes in different manners.
- 5 19. A device according to claim 17 or 18, including a control unit operable to control electrical power applied to the first and second electrodes.
20. A device according to any preceding claim, wherein the second electrode or electrodes are mounted on the first electrode in bridge manner and/or in cantilever
10 manner.
21. A device according to any preceding claim, wherein the first and/or second electrodes are layered members including at least one conductive layer.
- 15 22. A device according to any preceding claim, wherein the first electrode or electrodes have apertures, weakness or strengthening areas to adjust the deflection properties thereof.
23. A device according to any one of claims 1 to 21, wherein the or each first
20 electrode is impervious.
24. A device according to any preceding claim, wherein a gap between the first and second electrodes is kept under a vacuum or filled with one or more of a gas, liquid, gel or deformable solid material.
25
25. A device according to any preceding claim wherein at least one second electrode is used as a part of an actuator and at least one second electrode is used as part of a sensor.
- 30 26. A device according to any preceding claim, wherein the device is used both as an actuator and a sensor on a time-sharing basis.

WO 02/49199

PCT/GB01/05349

34

27. An electrostatic device including first and second electrodes arranged in first and second planes respectively, both of which electrodes are operable to move in a direction at an angle to the plane thereof on application of an electrical charge.

5 28. An electrostatic device produced by an integrated circuit fabrication, a MEMS fabrication or a microfabrication process.

29. A mirror assembly including an electrostatic device according to any preceding claim.

10 30. A speaker, earphone, microphone, ultrasonic detector or transducer assembly including an electrostatic device according to any one of claims 1 to 28.

15 31. An optical scanner, beam steering or all-optical-switch assembly including an electrostatic device according to any one of claims 1 to 28.

32. A pressure sensor, pump or inkjet cartridge assembly including an electrostatic device according to any one of claims 1 to 28.

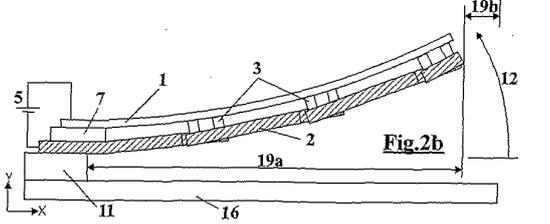
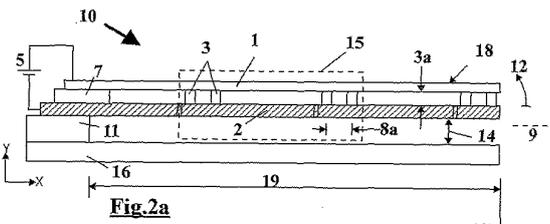
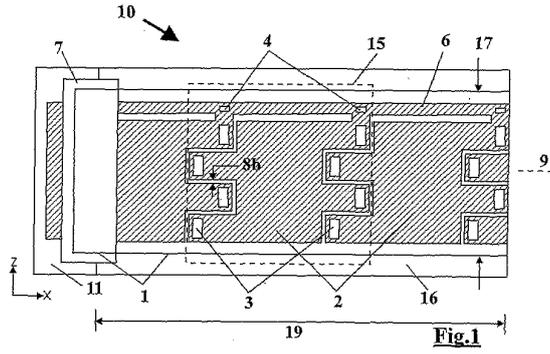
20 33. An accelerometer or sensor assembly including an electrostatic device according to any one of claims 1 to 28.

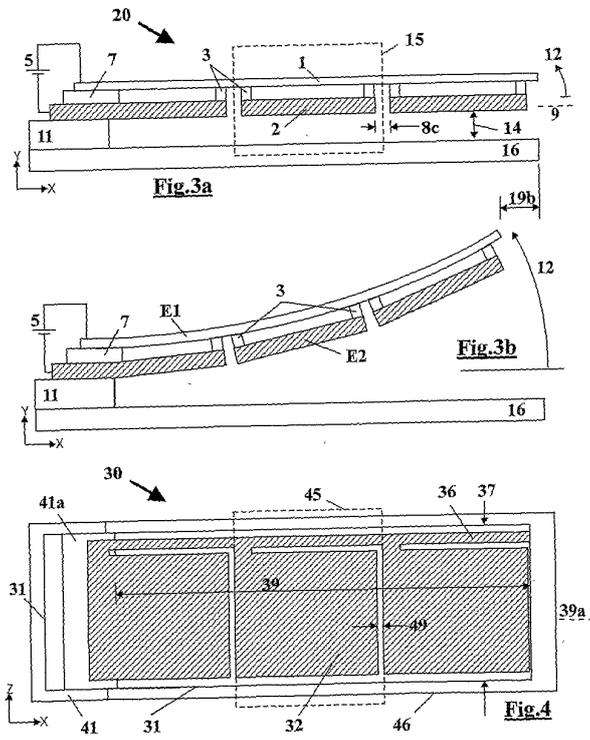
25 34. A one, two or three dimensional array of two or more electrostatic devices according to any preceding claim.

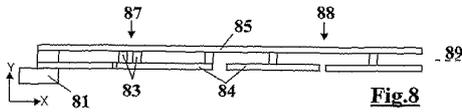
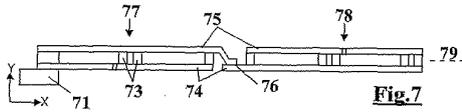
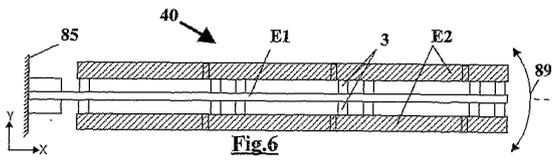
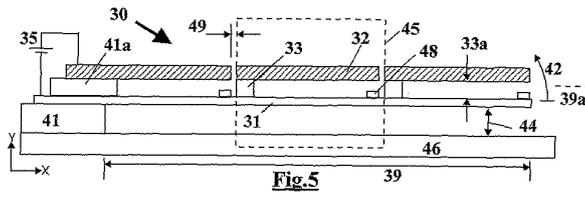
WO 02/49199

PCT/GB01/05349

1/10







4/10

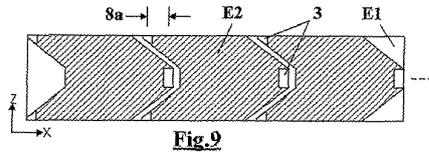


Fig.9

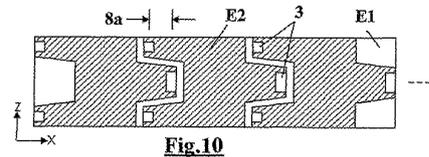


Fig.10

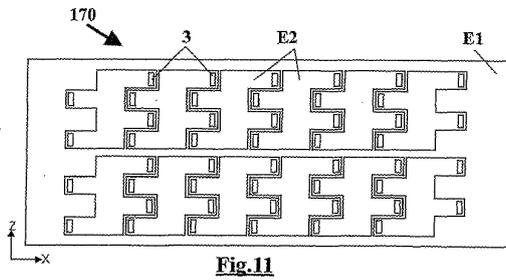


Fig.11

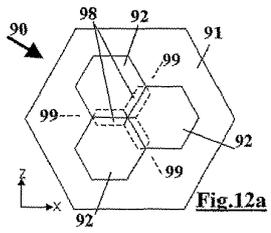


Fig.12a

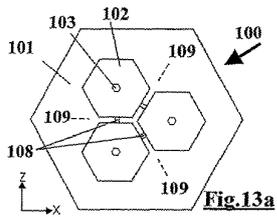


Fig.13a

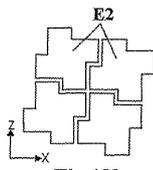


Fig.12b

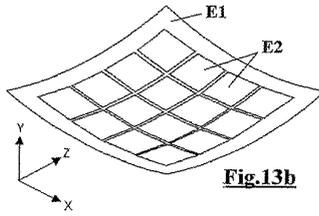


Fig.13b

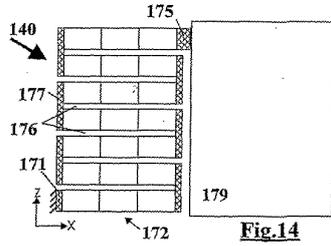
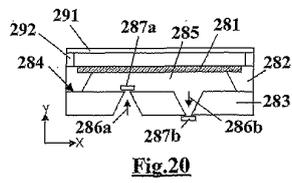
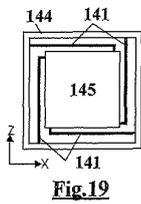
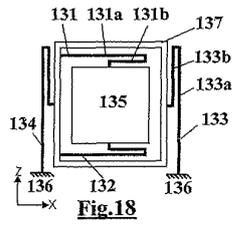
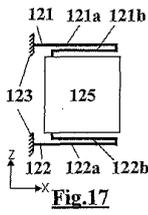
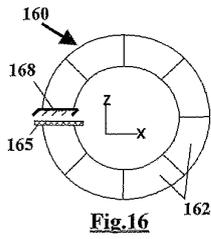
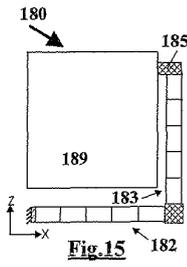
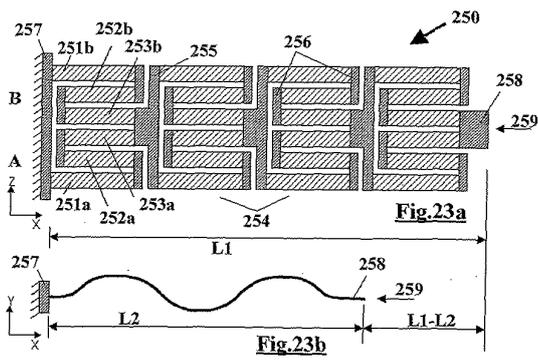
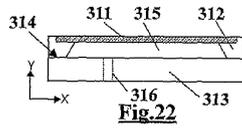
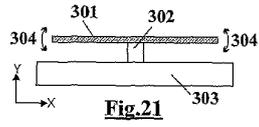


Fig.14

6/10



7/10



8/10

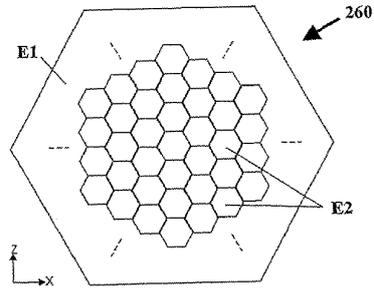


Fig.24

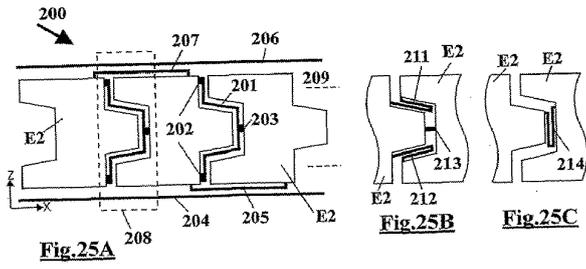
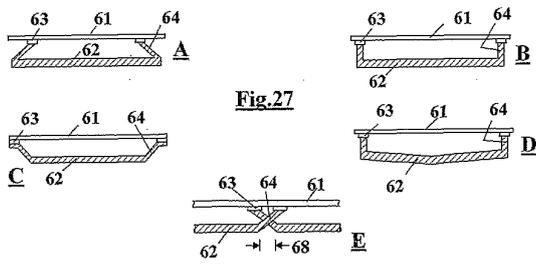
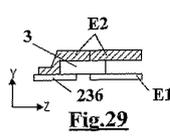
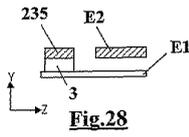
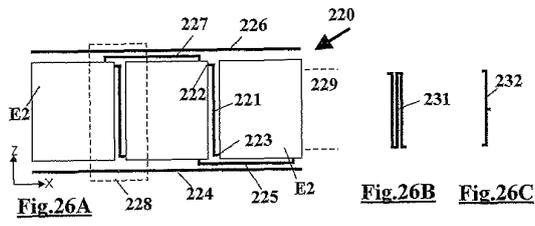


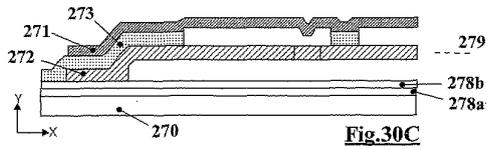
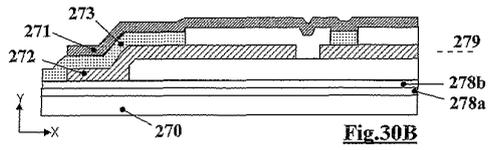
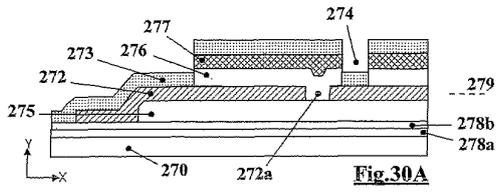
Fig.25A

Fig.25B

Fig.25C



10/10



【手続補正書】

【提出日】平成15年3月14日(2003.3.14)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【書類名】明細書

【発明の名称】静電装置

【特許請求の範囲】

【請求項1】偏向可能な第1可撓電極と、該第1可撓電極に取り付けられ、これと共に可動する少なくとも1つの第2電極とを備え、

該第2電極は、該第1及び第2電極間に静電力を発生させる電荷が電極に印加されると第1可撓電極に偏向を生じさせる静電装置。

【請求項2】偏向可能な第1可撓電極と、該第1可撓電極に取り付けられた少なくとも1つの第2電極とを備えたセンサとして設けられ、

該第2電極は、第1及び第2電極の両方又は何れか一方の偏向によって、第1電極と共に可動し、該第1及び第2電極間に計測可能な電荷を静電容量内で生じさせる静電装置。

【請求項3】前記少なくとも1つの第2電極は、該第1及び第2電極間に静電力を発生させる電荷が電極に印加されると第1可撓電極に偏向を生じさせるアクチュエータとして設けられる請求項2に記載の装置。

【請求項4】同時に、又は、別々の時に、センサ及びアクチュエータとして機能する請求項3に記載の装置。

【請求項5】前記装置がサポートに取り付けられる前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項6】複数の第2電極が互いに近接して第1電極上に設けられる前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項7】前記第2電極または少なくともそのいくつかは線形配列に配置される請求項6に記載の装置。

【請求項8】前記第2電極または少なくともそのいくつかは非線形配列に配置される請求項6又は7に記載の装置。

【請求項9】前記第2電極は、1つ以上の軸に関して第1電極に偏向を生じさせるように配置される請求項6、7、又は8に記載の装置。

【請求項10】複数の第1電極を含み、第1電極は各々、その上に取り付けられた少なくとも1つの第2電極を備える前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項11】前記第1電極は機械的に一体形成され、1つの第1電極の偏向が該第1電極又は少なくとも1つの別の第1電極の位置、偏向、及び/又は高度に影響する請求項10に記載の装置。

【請求項12】前記第1電極が、連続して、平行式に、異なる平面又は角度に互いに、あるいは、これらの任意の組合せに配置される請求項11に記載の装置。

【請求項13】前記装置が自身の面の内外で運動可能な前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項14】偏向が一方向又は二方向に装置の収縮を生じる請求項13に記載の装置。

【請求項15】対向する向きに偏向をもたらすように、1つ又は複数の第1電極に設けられた複数の第2電極を含む前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項16】1つ又は複数の第2電極が1つ又は複数の第1電極の第1表面に設けられ、1つ又は複数の第2電極が1つ又は複数の第1電極の対向する第2表面に設けられる請求項15に記載の装置。

【請求項17】前記又は各第2電極が、それが設けられた第1電極より固い前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項18】多数の第2電極が設けられる場合、少なくとも2つの隣接第2電極が一部

重複する前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 19】前記少なくとも 2 つの第 2 電極は、実質的にその平面内に伸長するフィンガを備え、該フィンガが互いに組み合わさる請求項 18 に記載の装置。

【請求項 20】第 1 及び第 2 電極に出力を供給するための共有供給レールを備える前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 21】異なる方法で 1 つ又は複数の第 1 及び第 2 電極に供給するために複数の供給レールを備えた前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 22】前記 1 つ又は複数の第 1 及び第 2 電極に付与する電力を制御するように動作可能な制御ユニットを含む請求項 20 又は 21 に記載の装置。

【請求項 23】1 つ又は複数の第 2 電極がブリッジ式、または、カンチレバー式に第 1 電極に設けられる前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 24】第 1 及び / 又は第 2 電極は、少なくとも 1 つの伝導層を含む積層部材である前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 25】前記第 1 及び / 又は第 2 電極、または前記第 1 及び / 又は第 2 電極のうち少なくとも 1 つがその偏向特性を調節するために、穴と、弱勢エリアと、強勢エリアとを有する前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 26】前記又は各第 1 電極が不浸透性である請求項 1 ~ 24 の何れかに記載の装置。

【請求項 27】前記第 1 及び第 2 電極間のギャップが真空中に保たれるか、もしくは気体、流体、ゲル、又は変形可能な固体の 1 つまたは複数で充填される前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 28】少なくとも 1 つの第 2 電極がアクチュエータの一部として使用され、少なくとも 1 つの第 2 電極がセンサの一部として使用される前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 29】前記装置は、時分割ベースでアクチュエータ及びセンサの両方に使用される前記請求項の何れかに記載の装置。

【請求項 30】集積回路製造プロセス、MEMS 製造プロセス、又はマイクロ製造プロセスによって製造される前記請求項の何れかに記載の静電装置。

【請求項 31】前記請求項の何れかに記載の静電装置を含むミラー。

【請求項 32】請求項 1 ~ 30 の何れかに記載の静電装置を含むスピーカ、イヤホン、マイクロフォン、超音波検出器又は変換器。

【請求項 33】請求項 1 ~ 30 の何れかに記載の静電装置を含むロボット装置。

【請求項 34】請求項 1 ~ 30 の何れかに記載の静電装置を含む光学式スキャナー、ビーム操縦装置、又は総 - 光スイッチ。

【請求項 35】請求項 1 ~ 30 の何れかに記載の静電装置を含む感圧センサ、ポンプ、又はインクジェット・カートリッジ。

【請求項 36】請求項 1 ~ 30 の何れかに記載の静電装置を含む加速時計、又は加速度センサ。

【請求項 37】前記請求項の何れかに記載の 2 つ又はそれ以上の静電装置の一次元、二次元、三次元アレイ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

本発明は静電装置に関し、より詳しくは、超小型電気機械システム (MEMS) またはマイクロ加工装置と一般に称される類のアクチュエータ及びセンサに関する。

【0002】

【背景技術】

通常、アクチュエータであれ、センサであれ、従来技術の静電型変換器は、ドライブ電源電圧と接続する第 1 および第 2 部材を備える。そうして生じる引き付け静電力は、これらの部材の少なくとも一方を他方に移動させる。このため、これらの部材は、帯電や放電を容易にし、適正に機能させるため、普通、金属やドーブ処理されたポリシリコンなどの導

電体で形成される。

【0003】

静止対電極の上に隙間を開けて可動電極を吊り下げた標準的なカンチレバー・アクチュエータなどの従来装置は、例えば、コバックス(1998年: WCB/McGraw-Hill)著による『超小型変換器原典(Micromachined Transducers ne Sourcebook)278~281頁に記載されている。しかし、この装置は、隙間長と有効な偏向との間に複雑な問題を抱え、後者の有効な偏向は、ギャップ(隙間)それ自体を超えることはない、かなり大きい。大きな偏向には大きなギャップ、すなわち、標準型のIC駆動回路と殆ど相容れない大電圧を必要とする。多くの場合、実際のギャップより大きな偏向を有する装置を製造することが極めて望ましい。この文献は、主にフリンジ電界によって引力を生成する多数の微小インターデジタル・フィンガを有するコムドライブ・アクチュエータを開示し、この技術は、基板平面に固有のより大きな動きを生み出す。しかし、コムドライブ・アクチュエータは、相対的に大きなサポート/スプリング受動エリア、限定された面外動作、望ましく中央平衡されたフィンガ位置の維持の困難(特に、ギャップ幅が小さい場合)といったいくつかの問題を抱えている。

【0004】

その他の先行技術は、1993年IEEEによって刊行された東北大学のヤマグチモトハル他による『分布静電型マイクロ・アクチュエータ(Distributed Electrostatic Micro Actuator)』及び米国特許第5,206,557号がある。両文献とも、本来、面外運動ができない大きな面内ストロークを生成させるため、直列に接続された多数の部材を提案している。スタックされた部材が標準的な引張り力を備えたロングチェーンを効率的に形成する。コムドライブと共にこれらの装置を製造するには、実際可能なギャップ幅と駆動電圧レベル(及び性能)の間にトレードオフを生じる可能性のある困難な作業といった、小さなギャップを有する深型構造のマイクロ加工に対する要件を満たす必要がある。これは、標準的な集積回路の駆動電圧と製造の適合性を損なうものである。

【0005】

米国特許第5,793,560号は、基板と、該基板に設けられた磁気記憶媒体と、該磁気記憶媒体に磁氣的に保存された情報と、ヘッドユニットと、該基板に設けられた往復メカニズムとを含む記憶装置を開示し、この往復メカニズムにより、ヘッドユニットは、磁気記憶媒体表面と平行な面で往復運動し、ヘッドユニットは、往復メカニズムによって移動する一方、情報は、ヘッドユニットを見る磁気記憶媒体に記憶され、あるいは、磁気記憶媒体から再生される。

【0006】

米国特許第5,642,015号は、各々が微小電極を備える複数の弾性超小型構造を設けた基板を有する電気機械変換器を開示する。電源はそれぞれの微小電極に接続され、個々の微小電極に電気ポテンシャルを付与し、この電気ポテンシャルが、隣接する対の微小電極間の引力を交互に誘起して、微小電極の制御された時間で変動する変位をもたらす。

【0007】

米国特許第5,479,061号は、電気的にも機械的にもしっかりした微小電気機械変換器を開示し、この変換器は、両面にパターン化した導体を有するプリーツ形誘電体シートからなる。そのプリーツ(ひだ)は、間隔をおいて設けられた複数の壁を構成し、各壁はその片側に導電部位を備えている。プリーツ形誘導体シートの両面に、正と負の電圧を印加すると、静電引力により壁は、互いの向きに移動する。適当な電圧を加えると、静電反発力により、壁は互いに遠ざかるようにも動く。

【0008】

本発明は、改良された静電装置を提供することを目的とする。

【0009】

【発明の開示】

本発明の一態様によれば、偏向可能な第1可撓電極と、第1可撓電極上に設けられて第1

可撓電極と一緒に動く少なくとも一つの第2電極とを備え、両電極に電荷が印加されると、第1可撓電極を偏向させる静電装置が、本発明で提供される。

【0010】

一つまたはそれ以上の第2電極は、第1可撓電極と一緒に動くことで、静電力が発生すると、第1可撓電極の偏向を促進させるように機能する。第1電極と第2電極を近接させると、より大きな静電力を発生させ、電力密度及び効率を向上させることができ、また、低い動作電圧にて、大きな偏向を維持することができる。この装置は、半導体集積回路と同程度の駆動電圧レベルで動作可能である。また、この装置は、機これに械的倍率増大機構を組み込み、負荷適応性を改善することにより、従来装置が提供する大きい力や小さい偏向を、小さい力や大きい偏向に変換（その逆も可能）することができる。さらに、従来装置における電極間ギャップと偏向との間の解きほぐせない複雑な関係を、本発明の装置はうまく解きほぐし、それぞれを別個に最適化させている。

【0011】

偏向を高めるため、及び/又は、偏向と力のトレードオフを高めるため、あるいは弱めるための付加的なパラメータとして、セルNの数を使用することで装置設計の柔軟性を高めることができる。例えば、小さいギャップを採用した場合には（例えば、より低い駆動電圧や、より高い出力密度と効率などの理由から）、Nを増やすことで偏向を増大させることができる。

【0012】

本発明の装置は、面内運動や偏向はもとより、面外運動や偏向をも比較的大きくするものである。

【0013】

従って、先行技術による装置に比べて、単位印加電圧当たりの第1電極の運動量は増加する。これにより、本発明の装置は、集積回路（IC）で典型的に使用される電圧と同程度の低電圧でも動作する。このため、IC製造との両立性のみならず、本発明の装置はICや駆動回路と統合させることが可能で（例えば単一化が可能で）あり、大幅なコスト節減をもたらす。

【0014】

装置を多様に応用する場合、ギャップを小さく維持しながら大きな偏向をもたらす装置を作ることが極めて望ましい。さらに、より小さなギャップは、電力密度や効率を高め、及び/又は駆動電圧レベルを低くすることができるという利益をもたらす。

【0015】

好ましい実施例においては、第1電極上に互いに接近した複数個の第2電極が設けられる。多数の第2電極は第1電極の偏向を高める。

【0016】

複数個の第2電極を設ける場合、線形の配列にしてもよく、その他の形に配列させても構わない。非線形に配置させた場合には、第1電極を2つ以上の軸で偏向させることができ、アクチュエータ又はセンサに複雑な動きをさせることができる。

【0017】

ある実施例では、1つ又は複数の第1電極上に複数個の第2電極を設け、この1つ又は複数の第1電極を対向する向きに運動させる。また、ある実施例では、一つ又は複数の第2電極を第1電極の上面と呼ばれるところに位置させ、一つ又は複数の第2電極を第1電極の下面と呼ばれるところに位置させ、上面の第2電極にて第1電極を下向きに偏向または運動させ、下面の第2電極にて第1電極を上向きに偏向または運動させる。

【0018】

多数の第2電極を設ける場合、例えば、他の電極のフィンガと互いに組み合うフィンガを設けることで、第2電極を部分的に重ねることができる。別法として、第2電極の隣り合う配列を交互に配置して、別の形態で重ねることもできる。

【0019】

好ましくは、第2電極に電力を供給するための共通供給レールを設ける。異なる方法で駆

動させる多数の第2電極を設ける場合は、複数の供給レールが用意される。

【0020】

第1電極と第2電極とのギャップは、真空状態に保持されるか、あるいは気体、液体、ゲル、または変形可能な固体物質で充填した状態に保持される。

【0021】

第1電極及び/又は第2電極には、製造上の目的によるアクセスホール又はその他の穴、偏向を減少もしくは増加させる調節領域を設けることができる。また、ポンプや圧力センサとして利用する場合には、第1電極が穴を持たないこともある。

【0022】

第1電極及び/又は第2電極は、少なくとも1つの導電層を含む層状部材から構成されることができる。

【0023】

本発明の別の実施態様によれば、第1および第2平面にそれぞれ設けられた第1電極および第2電極を有する静電装置が提供され、これらの電極は両方とも電極間に電荷を印加することで、平面に対するある角度をなす方向に動くことができる。

【0024】

本発明のさらに別の実施態様によれば、集積回路またはマイクロ加工/MEMS製造技術によって作られる静電装置が提供される。

【0025】

本発明は、アクチュエータ、センサ、及び、ここに教示される静電装置を使用するアクチュエータやセンサを組み込んだ装置に拡張できる。

【0026】

本発明によれば、集積回路と同程度の低電圧で機能する新しいタイプのアクチュエータおよびセンサを提供することができる。そうしたアクチュエータは、偏向VS電圧特性が改善されると共に、偏向と力とのトレードオフも改善され、より感度の高いセンサとなる。

【0027】

さらに、本発明は、より多目的で適応性の高いアクチュエータの設計パラメータを提供する。すなわち、本発明は、面の内外で運動し、偏向することができ、従って、3つの軸で動くことができる装置を提供する。

【0028】

【実施例】

次に、本発明の実施形態を添付の図面を参照して具体例によって説明する。

【0029】

当業者であれば、本書に記載したアクチュエータがセンサとしても使用可能で、従って、『装置』なる用語がアクチュエータとセンサの両方を包括することは理解されよう。さらに、明細書全体として簡便性を目指してアクチュエータに焦点を当てているが、同等のセンサも包括するものである。

【0030】

明細書において、電極E1は以下に記載の部材1、31、91、及び101を示し、同じく、電極E2は、部材2、32、92、及び102を示す。一つ又は複数の軸線について偏向又はわん曲可能な装置をここでは、単軸装置、複軸装置などと称する。

【0031】

図1、2a及び2bに示した装置の実施例は、1つの軸線に対して偏向可能である(この実施例ではZ軸)。図1は装置の平面図、図2aは側面図である。理解しやすいように、図1は第1層の概略だけを示し、図2aと2bで中実の形態を示す。

【0032】

装置10は、分離ギャップ3aをもたらす電気絶縁層3によって互いに隔てられたスチフネスK1の導電性第1部材または層1と、スチフネスK2の導電性第2部材2とを具備する。部材1と2は、装置の第1電極E1と第2電極E2とをそれぞれ形成する。層3は、部材1と2の間のギャップ3aを維持するスペーサとして機能するサポートポスト又はア

ンカーパッドを備える。

【0033】

部材1と2及び層3は、多数のブリッジ状セル15を形成する。これらセル15の配列は共通第1部材1（電極E1）を共有し、装置の本体を成す柔構造18を構成する。

【0034】

有効長さ19と有効幅17とを有する部材18は、ギャップ14によって基板16上に持ち上げられたサポートポスト11に取り付け、又は固定される。従って、部材18は基板16上に吊るされ、その自由端（片持梁）は図2bに示すように角方向12に沿って可動する。

【0035】

第1部材1が実質的にセル15の端から端まで連続する一方、第2部材2は多数のセル15を個々に形成するように分割される。セル15は適当な長さ寸法とを有し、方向9に沿って、及び/又はZ軸に沿って横に連続する。

【0036】

図1、2a及び2bの実施例において、第2部材2（電極E2）は部材の平面に伸びる多数のフィンガを備え、隣接する部材2のフィンガが組合わさるよう配置されている。これは、後述するように第1部材1の偏向を改善する。この実施例において、隣接する部材2はギャップ8bによって隔てられ、距離8aによって互いに一部重複する。距離8aは任意の値にできるが、好ましくは、セル長さの半分より短くするのが望ましい。

【0037】

図2bは偏向状態にある装置10を示す。

部材1と2（電極E1とE2）の電気接続ターミナルは位置11にあり、電源5への接続を容易にする。各第2電極E2は、同一の層から形成される共通供給レール6に接続する。

【0038】

第1電極E1はセル15の間で共有されるため、その末端が位置11で電源5への接続に利用できる。

第2電極E2と同様、メモリ6もアンカーパッド4（3に相似）によって電極E1から隔てられる。

【0039】

装置10の長さ19、セル15の長さ、アクティブセルのブリッジ長さ（すなわち、部材3の間隔）と幅17、その他の関連パラメータなど各種の部材のスチフネス（k）や厚さ（t）といった機械的性質は、特有な活用を考慮して、また、好ましい操作特性を達成すべく、適正に選択される。殆どの静電装置に共通のように、エネルギー、出力、電力は通常、電極E1とE2間にある装置の作用面積と電界に比例する。セル幅17の増大、及び/又はセルの並列を利用して作用面積を拡大することで、出力が高められる。さらに、電界を増やしたり、所望する電圧が固定している場合は電極間のギャップを減らすことで出力密度（及び力）が高められる。次に、装置に組み込まれた拡大能力を利用して、所望する偏向規模を実現するために、長さ19に沿ったセルの数が選択される。

【0040】

一例において、 $N = 10 - 20$ 、おおよその寸法は、 t_1 （層₁）= 1マイクロメートル、 t_2 （層₂）= 2マイクロメートル、 t_3 （層₃）= 3マイクロメートルであり、これらの寸法は、当然、所望する性能やその他の要件によって変わる。

【0041】

装置10を電源5に接続させると、電極E1とE2間のキャパシタンスの結果、電荷/静電荷が蓄積される。これにより、電極E1に変形又はカールが生じ、図2bに示すように自由端が角方向12に沿って面外に偏向する。偏向規模は、印加される電圧レベルに比例する。偏向方向は、第2電極から第1電極に向かう。総計19bで収縮する結果、X軸に沿った装置の実効長さが19aに減じることになる（詳細は後述）。

【0042】

電源 5 を切ると、電極 E 1 と E 2 間の電気絶縁のレベルによって、装置は一定時間、偏向状態に保たれる。装置 10 を非偏向状態に戻すには、例えば、構造 18 全体が跳ね返るように電極 E 1 と E 2 を一緒に短絡させるなど、電荷を除く必要がある。

【0043】

符合 12 における末端偏向の総合 D は、個別セル 15 各々が生じさせた偏向の合計である。より具体的には、各セル 15 が電極 E 1 の総合偏向 D についてその一部を担い、セル 15 の数が増えるほど、全体の偏向 D と長さ収縮 19 b が大きくなる。これは図 3 b の考察から明らかである。

【0044】

曲げの大きさはセルの寸法、装置内の位置によって異なり、さらに負荷の種類と状態によっても変わる。装置 10 は、使用する取り付け方法及び/又はクランプ方法によって多くの運動と出力を生み出す。例えば、中央でクランプさせると末端は上向きの角度に偏向し、末端でクランプさせると中央は Y 軸に沿って並進又は線形に下向きに運動する。電極 E 2 を E 1 と対向する側に設置すると、装置は対向する方向に偏向する。

【0045】

装置 10 の一般的特徴を次に述べる。先行技術と異なり、電極 E 1 と E 2 間の密接な近接性と、その結果生じる高い電界レベルを保つことで、装置は高いエネルギー密度と性能を備える。本装置は、独特の適合性を備え、セル N の数と共にその他の変数において偏向 D と出力 F 間のトレードオフを制御する。一般に、装置 10 において、N が増加すると、F を犠牲にして D が増加する。逆に、N を減らすと D も減る。多くの先行技術による装置は、半導体集積回路で使用するのに望ましいレベルを超えるような高い駆動電圧を使用することが通常強いられる。一方、本発明の装置 10 においては、部材 E 1、E 2 間の高い出力と相対的に低い変位をより低い全体出力 F とより大きな全体偏向 D に変換し、事実上の機械的拡大(または、縮小)をもたらし、より低い V レベルを使用する。

【0046】

図 3 a と 3 b は、装置 20 の別の実施例を示し、このとき第 2 電極 E 2 は組み合わさらず、一部重複もしない。それどころか、これらの電極 E 2 は、長方形の形状で、ギャップ 8 c によって互いに隔てられている。必要に応じて、多くの電極 E 2 の列を使用して、隣接する列の位置を互いに(X 軸に沿って)換えることで、装置 20 を一部重複型に構成することも可能である。

【0047】

図 3 b に示すように、第 1 電極 E 1 に生じる偏向は、第 2 電極 E 2 によって偏向される主要部分により生じる偏向に対する偏倚の結果、その長さ全体に及ぶ。図 3 b は、また、第 1 電極 E 1 の上向き偏向、実際には、第 2 電極 E 2 と対向する向きへの偏向を図示する。

【0048】

図 4 と 5 は、単一の軸(この場合は Z 軸)について偏向させる装置 30 の別の実施例を示す。個の実施例においては、第 2 電極 32 はカンチレバー型で、第 1 電極 31 の一方の端だけに接続する。

【0049】

この装置 30 は、スチフネス K 31 の導電性第 1 部材 31 (電極 E 1 を形成)と、スチフネス K 32 の導電性第 2 部材 (電極 E 2 を形成)とから成り、部材 31 と 32 の間に分離ギャップ 33 a を形成する電気絶縁層 33 によって隔てられる。部材 31 と各部材 32 はサポート層 33 と共にカンチレバー型のセル 45 を構成する。必ずしもサポート層 33 を第 2 部材 32 の一方の端に設ける必要はなく、どこに設置するかは任意で、例えば、中央に設けて、共通アンカーパッドを共有する 2 つの片持梁部を有するようにしても構わない。

【0050】

図 1 ~ 3 b の実施例において、共通第 1 部材 31 を共有する 1 つ又は複数のセル 45 の配列は、装置 30 の本体を成す柔構造を形成する。有効長さ 39 と有効幅 37 とを有するこの柔構造は、ギャップ 44 によって基板 46 の上に持ち上げられたサポートポスト 41 に

取り付け又は固定され、角度方向 4 2 に沿って面外に自在に可動する。セル 4 5 は適当な長さ寸法を有し、必要に応じて方向 3 9 a に沿って再現される。

【 0 0 5 1 】

隣接セルの部材 3 2 はギャップ 4 9 によって隔てられる。

絶縁ランディングパッド 4 8 は、部材 3 1 と 3 2 が偏向中に互いに接触するのを防ぐために使用される。パッド 4 8 は、例えば、第 2 電極 E 2 がパッド 4 8 と接触するとカンチレバー型からブリッジ型に変化し、従って、第 1 電極 E 1 にもたらず偏向の種類を換えるといったその他の機能も備える。これはリミットスイッチまたはセンサとして有用である。

【 0 0 5 2 】

前述した実施例において、部材 3 2 は、部材 3 2 と同じ層から形成されるサプライ層 3 6 に接続する。第 1 部材 3 1 は電源 3 5 に接続する位置 4 1 まで伸長できる。部材 3 2 と同様に、部材 3 6 もアンカーパッドと絶縁スペーサ 3 3 とによって第 1 部材から隔てられる（一部重複する場合）。

【 0 0 5 3 】

全ての部材 3 1、3 2、3 3 は適切な材質から成る。

【 0 0 5 4 】

その他の関連パラメータにおいて、部材 3 3 と幅 3 7 間における各種の部材 3 1、3 2 のスチフネス (k) や厚み (t)、装置の有効長さ 3 9、セルのカンチレバーの長さ及び有効長さなどの機械的性質や寸法は、用途によって決定される。必要に応じて装置 3 0 内の隣接セルの部材 3 2 を一部重複させることができる。

【 0 0 5 5 】

装置 3 0 を電圧電源 3 5 に接続させると、部材 3 1、3 2 に蓄積された電荷 / 静電荷は、部材 3 1 から部材 3 2 に角度方向 4 2 に沿って部材 3 1 を変形させる。装置 3 0 は、また、図 2 b に示した装置 1 0 の 1 9 b 同様、長さ収縮を実行する。

【 0 0 5 6 】

カンチレバー型装置 3 0 は、使用する取り付け方法やクランプ方法に従って、ブリッジ型装置と対向する向きに偏向させ、ブリッジ型装置と類似で、かつ、反対の多くの方法で偏向させる。曲げの規模は装置におけるセルの寸法と位置、及び負荷の種類と条件によって決定される。カンチレバー型装置は、通常、ブリッジ型装置と同様の特徴を有する。

【 0 0 5 7 】

ブリッジ型とカンチレバー型とが同じ装置に設けられ、かつ、同じ第 1 電極を使用できることは理解されよう。

【 0 0 5 8 】

図 6 ~ 8 は、両方向装置の実施例を示す。両方向装置は、背向式に一つの共通部材 1、3 1 を（それぞれ）共有する第 2 部材 2、3 2 の両面配置を利用して作られる。例えば、各装置は独立した電気接続を有する一方、電極 E 1 または E 2 の一方を共通部材及び共通ターミナルとして共有し、それにより、各々独立してオン / オフの切換えができる。

【 0 0 5 9 】

図 6 に示す実施例においては、ブリッジ式の 2 組の第 2 電極 E 2 と、これら 2 組の第 2 電極に挟まれた 1 個の共通電極 E 1 とから成る。事実、この挟み式配置はアーク 8 9 に沿って何れかの方向に偏向を生じさせる 1 個の共通電極 E 1 を共有する 2 つの装置を構成する一方、装置の他方の端は 8 5 で固定される。（あるいは、電極 E 1 のみでクランプされた）装置 4 0 は、電極の底面または頂面がそれぞれ独立して起動する場合、上向き及び下向き偏向を生じさせる。または、2 つの単一方向装置を組合せて、それぞれが組合せた装置を別々の方向に偏向させる。

【 0 0 6 0 】

第 2 電極 E 2 の頂面および底面におけるアンカーパッド 3 は互いに一直線に配置され、X Z 面において同一の位置を有する。

【 0 0 6 1 】

図 7、8 に示すように、2 個の電極 E 1 と E 2 のみを使用して（図 6 の装置 4 0 では 3 個

の電極 E 2、E 1、E 2 を使用)、別の両方向装置を作ることができる。こうした装置では、2つの伝導層と1つの絶縁層だけを必要とする、例えば、ポリシリコン2層構造プロセスなど、一般に普及している標準的な製造工程を利用できる。こうした融通性により、例えば、両方向型、上向き偏向単一方向型、下向き偏向単一方向型、又はこれらを組合せたものなど、全て同じ製造行程、ロット、及び/又は同じ基板を利用して異なるタイプの装置を製造することが可能となる。従って、一方向にも両方向にも自在に偏向可能な、ブリッジ型およびカンチレバー型の装置、及び/又は両者のタイプを組合せた装置を好都合に製造できる。

【0062】

図7は、絶縁アンカーパッド層73と、ポイント76で結合する伝導層74、75とを具備し、サポートポスト71に固定された2層ブリッジ型両方向装置の実施例を示す。例えば、層74を第2電極E2として、層75を第1電極E1としてそれぞれ構成して上向き偏向部77を左側に設け、層74を第1電極E1として、層75を第2電極E2としてそれぞれ構成して下向き偏向部78を右側に設ける。実質的に連続した第1電極E1は、位置76で部材74と75とを結合させて形成される。パーツ77と78は、1つ又は複数の独立及び/又は共有電気ターミナルを有し、79(又は図11に示すその他の列)に沿って再現され、任意のサイズ及び偏向特性を備えた装置が製造される。

【0063】

第1電極だけを一体化させることは不要である。代替手段として、一方の装置の電極E1を他の装置又は任意の可動部の電極E2と接続させる。

【0064】

図8はブリッジ型とカンチレバー型両方のセルを有し、サポートポスト81に固定された両方向装置の別の実施例を図示する。この装置は絶縁アンカーパッド83と伝導層84および85とを具備する。例えば、層84を電極E2として、層85を電極E1としてそれぞれ構成して上向き偏向ブリッジ部87を左手側に設け、層84を電極E2として、層85を電極E1としてそれぞれ構成して下向き偏向カンチレバー部88を右手側に設ける。組合せたパーツ87、88は、1つ又は複数の独立及び/又は共有電気ターミナルを有し、89(及び/又は図11に示すその他の列)に沿って再現され、任意のサイズ及び偏向特性を備えた装置が製造される。利点として、電極E1に対して、ブリッジセル及びカンチレバセルの両方が同じ材質/層を利用でき、同様に電極E2についても同じ材質/層が利用でき、E1とE2を装置の同じ側に配置でき、これは、いくつかの応用において好ましいことである。

【0065】

層74、75(84、85)は電極E1又はE2、あるいはその両方として構成されるが、その厚みは通常、固定していて、標準的なMEMS製造工程で即座に制御できるものではない。従って、必要に応じて、電極E1又はE2、あるいはその両方として機能する層74、75(84、85)を最適化するために、例えば、k1やk2(それぞれ電極E1、E2のスチフネス)を減らすために幅に沿って穴やスリットを設けて、部材E1、E2の実効幅を変えることで実効スチフネス(k)を制御する。図7、8における電極の結合は、例えば図25A~29に示すような任意の種類のものとする。この技術は同じ製造工程で上向き/下向き装置を製造するのにも利用できる。

【0066】

パーツ77、78、87、88はそれぞれ1つまたは複数のセルを具備する。

【0067】

セルは、任意の形状、寸法、使用するフィンガの重複部の数で形成できる。図9、10に示すさらに別の実施例では、部材E1、E2および3で構成される多数のセルは、距離8aによって一部重複する電極E2と共にブリッジ装置10のセルに相当する。電極E1は、説明のために概略だけを示す。セルの形状は自由で、独特な偏向を生じさせるために任意の形にできる。例えば、長方形、正方形、三角形、多角形、山形にできる。同様に、図25A~29に示す接続例を含めて適当な電気接続(図示省略)を任意に使用できる。

【0068】

単一のセル列を有する装置以外にも、図11に示す装置170のような多数の列を有する装置も提供できる。共通第1電極E1がそうした列で共有される。隣接する列が互いに一部重複するように互い違いにする。列は同じ又は違う方向に偏向を生じ、必要に応じて独立して制御できる。

【0069】

2つの軸について偏向可能な装置

図12a~13bは、部材E1とE2間に静電力を確立させて、例えば、Z軸とX軸のように2つの軸について偏向可能な、または、これらの軸について偏向構成要素を有する装置の実施例を示す。一般的な用語として、図12aと13aの部材91と101は、柔軟電極E1（理解を容易にするため、概略のみを図示）であり、柔軟隔膜に類似のものと解釈される。

【0070】

図12aは装置90の実施例を示し、これはブリッジ型の装置（例えば、図1の装置10）に類似のものと解釈される。装置90は、図1の装置10の部材1と2にそれぞれ類似の部材91及び92を具備する（本実施例では、部材92は3個ある）。この目的から、部材92は適当な形状を備え（本実施例では6角形）、エッジ周囲にフィンガ（図示省略）を有し、図1の実施例同様、領域98で近隣のフィンガと組み合わせる。部材92は互いに独立し、例えばフィンガにつき1個又は複数の類似のアンカーパッドによって支持されるブリッジ型装置同様、部材91上（本実施例では91の後方）に支持される。

【0071】

あるいは、図3a及び3bの実施例同様に、部材92をギャップで互いに分離させることもできる。図12aと13aでは3個のセルしか図示していないが、ライン99及び109に沿ってそれぞれセルを追加することが可能で、任意のサイズ、偏向、セルの数を有する配列を提供できる（図24の配列と類似）。

【0072】

フィンガを組合せる代わりに部材92を任意の形状とし、2つの軸について曲げを容易にするために、部材92の複数または全ての角あるいは頂点付近など、適当な位置に設けたアンカーパッドで支持することもできる。さらに、装置の機能を高めるために、隣接セルの部材92は任意の構成および重複規模とできる。隣接セルの部材92と組み合わせる又は噛合する4つのフィンガをそれぞれ有し、2つの軸について一部重複するセルを備える部材92の代替的な形状を図12bに示す。

【0073】

部材91をその周縁部に固定すると、装置の起動を受けて、それぞれ凹型、凸型表面に設置された電極E1とE2と共に湾曲した面を形成するX軸、Z軸について変形する。あるいは、中央部に固定するなど、その他の任意の固定手段を使用できる。いくつかの応用例において、装置90は、MEMSマイクロスピーカ、マイクロフォン、マイクロポンプ、インクジェットポンプなどに利用される。

【0074】

図13aは部材101（E1として）、102（E2として）、103を具備するカンチレバー型装置に類似するものと解釈される装置100の実施例を示す。部材102は、例えば、中央部など適当な位置103でアンカーパッドによって部材101上に支持される。この実施例においては、部材101と103は両方とも部材102の後方に設置されているため（理解を容易にするため、図13aでは103を102の前方に表示）、装置100は装置30と類似の方向に偏向を生じさせる。例えば、部材101が周辺部で固定されると、装置の起動を受けて、それぞれ凹型、凸型表面に設置された電極E2とE1と共に湾曲した面を形成するX軸、Z軸について変形する。正方形での電極E2とE1を使用してE1が角で固定された、このタイプの偏向を図13bに示す（図12a及び12bの実施例も同様な方法で偏向を生じることが理解されよう）。

【0075】

必要に応じてセルを一部重複させることができる。

【0076】

装置90及び装置100における隣接セル間の領域は、本書に記載するとおり、例えば接続108などの1つ又は複数の電気相互接続を含む。同様に、第2部材92又は102(第2電極E2を構成)は機能に応じて、一緒に又は独立して出力する。装置100は装置90と類似の機能を有する。

【0077】

3個のセルだけが図示されているが、任意のサイズと数のセルで配列を構成するべくライン109に沿ってセルを追加することができる。同様に、装置90と100及び電極91と101は、例えば六角形(図24参照)、円形、正方形、非対称な形など、任意の適当な形状にすることができる。

【0078】

2つの軸について偏向可能な両方向装置は、装置90において部材91の反対側に部材92、93をコピーし、装置100において部材101の反対側に部材102、103をコピーしても形成できる。

【0079】

当業者であれば、図7と8で使用された技術と類似の技術を用いてもブリッジ状、カンチレバー状、又は同じ装置にその両方を組合せた複軸装置が製造可能で、そうした装置が2電極構造の製造工程を利用して単一又は両方向に偏向可能なことが理解されよう。

【0080】

2つの軸について運動可能なその他の実施例は、角度を付けて組合せた、それぞれ単一の軸について可動する2つの装置を利用して製造できる。こうした装置は、制御用に共有又は独立したターミナルを備える。例えば、図14の装置140を応用して、同じ装置内の1つ又は複数の列を、1つ又は複数の列に90度に合わせることで、2つの軸について可動する装置を製造できる。起動されると、各装置は1つの軸について偏向を生じる。装置180も2つの軸について偏向可能な別の実施例を示す。電極E1はスリット、隙間、又は穴を有し、性能をさらに促進させる。

【0081】

複合装置

単一の第1電極または複数の第1電極上に多数の第2電極を形成した複合装置の製造も可能である。前者の場合、第1電極を複合的な方法で変形させるように製造し、これに接続する、あるいはスピーカ、マイクロフォン、ポンプなどに使用される1つまたは複数の装置に複雑な動きをもたらす。後者の場合、例えば図1～13b及び23aを参照しながら既に説明した類の装置と組合せて、1つあるいは複数の軸に関する複雑な動き、及び/または、1つあるいは複数の軸に沿った並進的な動きを提供する。装置が偏向可能な軸の数は理論上無制限であり、応用するものや、望ましい偏向特性によって決定される。

【0082】

例えば、ブリッジ型とカンチレバー型のセルを組み合わせたり、1つ又は複数の軸について偏向可能なセルを組み合わせたり、逆方向、両方向、あるいは他の任意の組合せにより、望ましい任意の角度と方向に運動するように上述した異なるタイプのセルを組み合わせることも可能である。さらに、1つまたは複数のセクションが独立して駆動するために別個の独立した電気ターミナルを備え、あるいは、1つ又は複数の電気ターミナルを備える。こうした組み合わせによる装置は、標準的な製造工程を使用して独特な特徴を備え、従来、複雑過ぎたり、困難過ぎて達成できなかった機能を達成する複合的で接続した構造を提供する。光学式スキャナーやビーム操縦装置の実施例を図14～19に図示する。これらは、総-光スイッチ、光ファイバスイッチ、及び光交差接続(OXC)など電気通信に使用される2Dや3Dの光スイッチに応用できる。

【0083】

当業者にとって公知な適当な駆動回路や制御電子回路を使用して高性能な動きと偏向が得られ、これらの応用やマイクロ・マニピュレータやロボティクス等のその他の技術にとっ

ても望ましい。低電圧の可能出力により、これらの装置は、大幅なコスト削減を実現しつつ駆動回路と完全に統合し、装置内で多数のファイバ光チャンネル間を光スイッチングできる。こうした装置は、1つ又は複数の軸に関して、例えばライトなど干渉性及び/又は非干渉性の電磁波を偏向するのに使用される。

【0084】

図14は回転/ねじりが可能で、複数の装置172(本実施例では7個)を備えた複合装置140の実施例を示し、各々が単一の軸について偏向可能で、部材177によって直列的に接続/取り付けられ、装置172の各々が前述した装置によって実行又は共に運動する。装置172(ギャップ176によって近隣部から隔てられている)は多数のセルを備え(本実施例では3個)、隣接装置に対向する向きに偏向可能である。複合装置は171で取り付け又は固定され、他方の端175は自在に偏向するようになっている(本実施例の場合、Z軸について)。端175は、例えばミラー179など任意の望ましい荷重、またはその他の任意の静電装置に接続する。スイッチを入れると、ミラー179は相対的に多大にねじり/偏向され、総角度は使用された個々の装置の数と、各装置のセル数と、Vの規模とを総括したものとなる。装置の方向によって、時計回りと反時計回りの回転が得られる。

【0085】

装置10などその他の装置(あるいはその他の単一または多軸装置)を装置140の175(179の代わりに)に取り付けることで、適切に起動させると、140がもたらす転向角によって第1装置が異なる軸について偏向を生じる(10、140は一緒に又は独立して制御される)。例えば、転向角が90度に近い場合、装置10はXZ面において側方に偏向される。後者のタイプの偏向は基板(XZ面)に対して定位の平面に配置された装置を使用して二者択一的に達成可能である。その他の面内装置を図23aと23bに図示する。

【0086】

図15は、任意のセル数を有する2つの個別装置182、183を具備する“L型”複合装置180の実施例を示す。装置183は、装置182に取り付けられ、それにより可動し、両者は独立して制御可能である。図14に示すように、端185はミラー189のように適正な荷重を駆動させる。個別にスイッチを入れると、装置182はZ軸に沿ってミラーを捻り、偏向させ、一方装置183は、X軸についてミラーを偏向させる。様々な量によって両方の装置182、183のスイッチを入れると、3つの軸XYZの全てについて解決する構成要素と共にミラーは偏向可能となる。例えば、装置182が90度偏向すると、装置183は次にY軸について偏向可能になる(Y軸はページに対して定位)。ミラー189の代わりに装置180に1つ又は複数の静電装置を取り付けるとより複雑な動作が可能となる。

【0087】

図14、15及び図17~19に図示した複合装置はいずれも、光走査/操縦及びOXCスイッチに使用できる。

【0088】

図16は、環状の湾曲したセル162多数から成り、一方の端はサポート168に固定され、部材165を支える他方の端は可動する。部材165はそこに付加された荷重を動かす。本書に記載するその他の実施例と同様、図16の実施例も両方向装置を含む任意のタイプに構成できる。同様に、必要に応じて長方形、三角形、らせん形などその他の形状や通路にも形成できる。

【0089】

図17の実施例は、2つの複合装置121、122が素子125の何れかの側部に1つずつ設けられる。ミラー素子125は、構成要素121、122の偏向端に取り付けられ、他方の端は123に固定される。これらの装置は1つまたは複数の同一方向または対向する方向に偏向可能な2個のパーツ121a、121bを具備する。ミラーを様々な方法で動かすために多くの駆動体系が使用される。例えば、部材121a、121b、122a

、122bの全てが上向きに(アウトページに)等量で偏向すると、ミラーは直線的に上方へ動く。一方、偏向が等しくない場合は、ミラーは最も偏向が少ない側に傾斜する。部材121と122の一方のみを偏向させると、ミラーは一方の側に傾く。図16において、部材121b、122bをそれぞれ部材121a、122aと対向する向きに偏向させると、ミラー125は左右に傾く。これらの駆動体系を達成するために、当業者に公知のその他の駆動技術が広く利用される。

【0090】

荷重をサポートする4つの装置131、132(複合、単軸方向及び/又は両方向)を利用する、より多目的な実施例を図18に示す。この実施例では、例えば、ミラー135は一方の端をフレーム137に、他方の端を装置133、134に固定され、これらの装置133、134は一方の端でフレーム137を支持し、他方の端はアンカーポイント136に固定される。ここで再び、図17の実施例で述べた駆動技術と同様の技術を使用して、ミラー135を1つ又は複数の軸に沿って運動、偏向、傾斜させることができる。

【0091】

図19は、例えば、ミラー145を一方の端で支持し、他方の端がフレーム144に固定された(144は適正に支持される)4つの装置(複合、単軸方向及び/又は両方向)を具備する実施例を示す。上述した実施例と同様、当業者に公知の技術を用いて141の何れか又は複数を適当に起動させることで直線的及び/又は傾斜を伴ってミラー145を可動させる。図17~19に示すミラーは装置をオーバーレイし、従って下に隠すため、ミラーの作用面積を最大限とするのに好都合である。

【0092】

この装置は、ポンプやインクジェット印刷用カートリッジなどの純流体として利用することもできる。図20に示す実施例では、例えば円形など適当な形状の複軸(又は単軸)装置281を具備し、これはバックエッチシリコン製の支持(フレーム)部材282にその周縁部が固定される。装置281は、好ましくは密閉型で、連続第1部材E1と共に穴のない不透水膜を形成し、両方向に起動できる。E1は、好ましくはフェースキャビティ285である。別の部材283は、ガラス又はシリコン製で、286a、286bに沿って、それぞれ吸込口、吐出口(例えば漏斗型)を備え、284で部材282と適切に結合し、間にくぼみ285を形成する。

【0093】

必要に応じて、2個の一方向バルブ287a、287bを吸込口と吐出口でそれぞれ使用し、矢印で示す方向に流体を導く。膜281は上下動が可能である。上向きの動きでは、くぼみ285が膨張して流体を吸い上げ、下向きの動きでは、収縮して流体を吐出する。従って、ポンプは、結合した溝を介して流体を吸込口から吐出口へ移動させることができる。装置は連続振動状態で動作し、及び/又は即時オン/オフ起動が可能である。

【0094】

部材292によって、部材281の上方にその機能を損なうことなく付加的な環境保護膜291をぶら下げることができる。この実施例、または他の応用例において、適当なサポートポストを介して装置281上に(可動式に)取り付けられた同様の環境保護部材が使用される。

【0095】

装置は、スピーカ、イヤホン、超音波発生器などの音響関係にも利用される。例えば、図20の実施例から底部部材283を除いたものが適当な信号で駆動されるスピーカ又は超音波発生器として使用される。必要に応じて上部保護膜も使用され、この場合、第2電極E2をフェース部材291とすることが望ましい。

【0096】

図21の実施例も、支持部材302に固定された装置301を具備する、(より手軽に製造できる)スピーカ又は超音波発生器として使用される。適切な起動により、装置は方向304に沿って偏向し、音波を発生させる。

【0097】

装置は、感圧センサや加速度計などのセンサとしても使用できる。図22に示す実施例では、例えば円形の適当な形状の複軸（又は単軸）装置311を備え、周縁部で支持（フレーム）部材312に固定され、バックエッチシリコンで形成される。装置311は、好ましくは密閉型で、連続第1電極E1と共に穴のない不透水膜を形成する。電極E2は、好ましくはフェースキャビティ315である。別の部材313はガラス又はシリコン製で、314で部材312と結合し、間に密閉型キャビティ315を形成する。キャビティ315は適当な手段で、例えば真空など、好ましい基準圧に維持される。装置311は、キャビティ315やその内圧に関連する外部圧力の変動に対応して上下方向に偏向可能で、装置311の静電容量の変動に導き、適当な電子検出器によって絶対圧の計測に使用できる。キャビティは部材311の電極E2に環境保護をもたらすので、付加的な保護部材（図20における291）の必要性は減少するが、必要に応じて、そうした保護部材を使用しても構わない。差圧や差圧計として利用する場合、ポート316はそうした圧力の計測を補助するのに使用される。

【0098】

図22の実施例（部材313を除く）と同様の実施例を使用して、音波を感知したり検知する音響マイクロフォンや超音波検出器が製造される。あるいは、図20（部材283を除く）や21の実施例と同様の技術も使用される。

【0099】

図21や22の装置と類似の装置は、感知を助ける付加的な質量を備えた加速度計として利用され、例えば、適当なバルクエッチド・シリコンによって形成される。感圧センサや加速センサは、当業者に公知の駆動技術と手法を利用して、本発明による装置の感知性能及び起動性能の恩恵を受ける力平衡センサとしても使用できる。

【0100】

複合装置のその他の実施例では、上述した長さ収縮効果を利用して自身の平面に実質的に平衡な方向に沿って直線運動と力を生じさせる。一例として、図23aのXZ面に配置された装置250が挙げられる。装置250は、直列的に接続する多数のセクション254を備え、各セクションは先行するセクションに取り付けられ、かつ、それと対向する向きに偏向する（部材255はこれに付着）。互いに対向する向きに偏向する2つのセクションを使用することで、装置の面内動作が高められる一方、面外動作は減少する。装置250は、底部Aと頂部B（対称）とに二分割される。二分割AとBは、より均一で安定した偏位259を生成するのに使用されるが、何れか一つのみが用いられる。従って、片方のAのみを詳述する。各セクション254は、直列的に接続され、図14のそれと類似のねじり型装置を形成する3個の装置251a~253a（アーム251aと253aは上向きに偏向し、アーム252aは下向きに偏向する）から成る。起動させると、251a~253a角度偏向が加わって、何れかの253aの端とそれに結合する部材255に最大限の偏向を生じさせる。分かりやすくするために、図23bにおいては、部材253aと253bの偏向のみを図示する。部材255~258は任意の適当な材質とする。

【0101】

起動させると、装置250は、図23bの側面図に示すように変形及び収縮する。事実上、部材253aが次のセクションの部材255を次々に駆動させ、装置250にリンクリングをもたらす、そのため収縮が起きる。装置250の収縮長さL2は、変形以前の長さL1より短い。装置250は、左端部が257でクランプすると、実質的に方向259に沿って、末端258に結合する荷重を引っ張るのに使用できる。

【0102】

活動を停止させると、装置250は本来の長さL1に即座に復帰する。

【0103】

装置250は、つなぎやガイドなどの付加的な支持部材/固定部材を備え、例えば基板を望ましくない偏向から守るために荷重に適正に結合する。奇数及び偶数の部材254は同時起動が可能（1つ又は複数の電気ターミナルを共有）か、あるいは、それぞれ独立して起動する。後者の場合、必要に応じて、示差駆動が付加的な上下方向の正味偏向を生じさ

せる。3つのセクション(251a~253a)が図示されているが、任意の数が使用でき、それぞれが本書に記載したタイプの1つ又は複数のセルを備える。必要に応じて、上向き偏向部材254の偏向を下向き偏向部材のそれより大きくすることで、装置250を基板から安全な距離に保つことができる。

【0104】

収縮型複合装置のその他の実施例によれば、図7と8に示すように互いに対向する方向に1つ又は複数のセルが偏向する装置が形成される。必要に応じて、収縮装置は、基板に対して正位の平面に設置される。

【0105】

面内の直線運動、またはその平面に実質的に平衡な2軸に沿った収縮が可能な装置を考察する。図24はXZ面に設けられた複軸装置260の実施例を示し、これは適当な形状の電極E1及びE2とアンカーパッド(図示省略)とを備える。装置は2つのグループのセルを備え、それぞれが互いに対向する向きに偏向可能である(図7、8の技術と同様の技術を使用)。任意の好ましいサイズの装置を製造するためには、より多くのセルが追加される。装置は初期的には平坦で、起動させると変形するが、本実施例ではXZ面において実質的に2本の軸に沿って収縮する。図25A~29で図示したものと同様の適当な電気接続が使用される。その他の詳細は、図12a~13aの実施例と同様である。

【0106】

さらに、複数の単軸装置を使用して複軸長さ収縮装置が提供される。例えば、そうした装置は、徐々に半径の拡大する1つ又は複数の虚同心円の周縁を横切って外側へ放射状に配置された多数のE2電極を有する共通E1電極をXZ面に備える。各セットは自身の円を横切るように設置され、隣接する内側および外側のセットと対向する向きに偏向し、放射状の収縮をもたらす。

【0107】

装置260の応用には、2Dアクチュエータ用の2D直線運動と、人工筋肉と、可変/可制御スチフネスを有する膜と、2Dセンサとが含まれる。

【0108】

装置250と260の双方において、印加される荷重は負荷スプリング形または負荷マウント形で、停止時に即座に復帰するか、あるいは、2つの装置は対向する向きに引っ張られる。

【0109】

例えば互いに90度の角度になるよう配置され、各々が実質的に単軸に沿って収縮できる2つまたはそれ以上の250のようなタイプの装置を使用して、その他の面内直線運動装置が製造される。

【0110】

例えば、三次元(3D)運動のように面内及び/面外装置の両方を備えて複合的運動を生成する複合装置が製造される。例えば、実質的に直線的な3D運動の可能な膜形装置が製造でき、これは電極E1を備え、その上には多数のセットの電極E2が取り付けられ、複軸については面内運動を生じ、単軸については、一部、面外運動を行う。各セットは、独立して制御可能である。これは、ロボティクス、位置決め、アラインメント、3D光学的ステージ等に応用される。

【0111】

250の装置は、例えば、人工筋肉、ソレノイド、静電式コムドライブ、サーマルアクチュエータ交換など単軸又は複軸の運動が求められる多くのケースで使用される。その他の実施例では、例えば、アクチュエータからのリンケージが接続する場所にオフセット・ピンを有し、アクチュエータの線形運動によって車輪の回転が伝わる回転輪をクランクさせることで、線形変位または線形運動を回転運動に変換させる。2つのこうしたアクチュエータを互いに90度になるよう配置することで、適当な電圧信号で駆動する場合(例えば、90度の位相外れ正弦波)、車輪に連続回転を生じさせる。車輪は歯を有し、噛合するその他の車輪/歯車に荷重を駆動させる。

【0112】

複合装置のその他の形態は、面内偏向か面外偏向かを表示するタイプの2つ以上の静電装置を備える一次元アレイ（例えば、線形または収縮）又は二次元アレイ（例えば、線形または角度付き）を含み、様々な応用例で使用できる。例えば、各装置は無線通信用の送受信アンテナや電磁放射線の管理、伝達、感受用の光学的アレイなどのエレメントの走査を実現させる。また、これらは、音波などの信号検知に使用され、装置の作動バージョンが、装置の感知バージョン、あるいは、その他のセンサの管理と走査とを受信範囲にわたって行い、最良の受信条件を達成する。

【0113】

その他の実施例においては、アクチュエータとして設定された1つ又は複数の装置が並列、直列、又はその両方の組合せで同じ面に接続する。あるいは、単軸又は複軸について可動する2つまたはそれ以上のアクチュエータ装置が異なる平衡面で互いに積み重なりあって、適切に支持され（例えば、適当な素材による付加的な支持部材/サポートポスト及び/又は可撓シート又は可撓ラミネートを使用）、隣接の装置では互いの偏向を妨害することなく互いに積み重なり、その結果、より大きな出力が得られるなど、装置の性能が改善される。

【0114】

その他の積み重ね型実施例では、1つのアクチュエータ（例えばトップアクチュエータ）がカンチレバー型など別のタイプであることを除いて図6の装置と同様のものを具備する。ブリッジ型とカンチレバー型装置では、互いに対向する向きに偏向されるため、この実施例では両方とも同じ方向に動いて、より大きな出力を生成できるようにした。

【0115】

電氣的相互接続

セルや、様々な部材間、装置間において、対応する電極の電氣的接続/相互接続は、多様な技術をもって確立され、そのうちのいくつかは、図1、4、25A~26Cに図示されている（分かりやすくするために、これらの図には第1電極E1が省略されている）。これらは単軸装置として示されているが、当業者であれば、例えば、装置全体に適切な電氣的接続の経路を設けるか分布するかして、容易に複軸装置や複合装置に適用または応用できる。これらの接続は、好ましくは、装置の望ましい性能と逆行するような影響を与えず、あるいは、有用な偏向や装置のベースサポートからの伸長を不都合に制限することなく、相対的に柔軟性をもって確立される。こうした接続には、当業者にとって公知の素材や技術が使用でき、例えば、電極E1やE2と同じ材質、または適当な厚みと寸法の金属のレイヤーといったその他の材質が使用できる。相互接続は、セル間、セルの側部、上下に設けられる。適当な位置に自由に吊り下げたり、支持する（例えばスペーサ3により）ことで逆の極性を備えた電極との接触を防げる。普通、セルの電極E1は連続部材として既に接続されているが、（複合装置のように）未接続の場合は、E2で説明したような適当な方法を用いる。

【0116】

図25Aにおいて、ブリッジ型装置200は多数のセルを備え、電極E2は可撓部材201によって相互接続する。部材201は、接続202を介して先行セル内の電極E2を、接続203を介して後続セルの電極E2に接続させる。図25Bと25Cは、部材213と共に、又は、図25Cの部材214と共に部材211と212とを備えたその他の接続例を示す。

【0117】

図25Aは205と207及び/又は204と206といったセルの側部に配置された別の接続例を図示する。後者の1つ又は複数の接続は、1つ又は複数の装置への接続を容易にするのに使用され、特に複合装置においては、当業者に公知の技術による装置内電氣的接続を容易にする。

【0118】

図26Aは、部材221を使用して、先行セル内のポイント222にある電極E2を後続

セル内のポイント 2 2 3 にある電極 E 2 に接続させるカンチレバー型装置の可撓接続の実施例を示す。図 2 6 B 及び 2 6 c における部材 2 3 1 又は 2 3 2 はそれぞれ、図 2 6 A の 2 2 1 に代わる接続を示す。

【0119】

図 2 6 A は、さらに、図 2 5 A に示したものと同様の機能を有する接続 2 2 5 と 2 2 7 と、及び / 又は装置の側部に設けられた接続 2 2 4、2 2 6 の 1 つ又は複数を示す。

【0120】

図 2 8 と 2 9 は装置の側部に設けられた電気接続を実行する 2 つの実施例と、それがどう実行され、支持されるかを示す装置の断面図である。図 2 8 は独立した接続部材 2 3 5 (部材 2 0 4、2 0 6 及び 2 2 4、2 2 6 に類似) を図示し、図 2 9 はその他の電極 (例えば E 1) の材質の一部をどう利用して部材 2 3 6 を介して電極 E 2 (あるいは逆) と相互接続するかを示す。

【0121】

図 2 7 A ~ 2 7 E はブリッジ型のセルの異なる実施例を示す。これらは、図 1 の装置 1 0 における部材 1、2、3 と同様、全て第 1 及び第 2 部材 6 1 と 6 2、及び絶縁部材 6 3 を含む。部材 6 2 と 6 4 は 1 つまたは 2 つの部材を構成し、同じまたは異なるスチフネスと、厚みと、材質を有する。部材 6 2 は図 2 7 D に示すように湾曲している。図 2 7 E は電極規模の重複 6 8 をもたらずブリッジ式の接続を示す。

【0122】

電氣的相互接続は装置の上下何れかに配置され、好ましくは電極 E 2 の上に適切に支持され、(セル間の適当な可撓部材と共に) 装置に沿って伝えられる。それにより、電氣的接続が 1 つ又は複数の装置に供給され、及び / 又は 1 つ又は複数の付加的な装置が実行 / 動作 / 偏向する。個々の装置をこの手法で個別に起動させることができる。

【0123】

基板に恒久的に固定する代わりに、製造後に装置を基板から外して、(例えば複合装置など) 望ましい形態に組立てて代用のサポートに取り付けたり、または、個別に使用したりできる。

【0124】

取り外した装置は引き続き荷重 (又はサポート) に結合させる (例えば、接合又はガイドにより)。いくつかの実施例においては、静電装置は如何なる基板にも結合せず、可撓リード線を介して単に電源に接続する。

【0125】

製造

本書に記載した MEMS 又は MOEMS (マルチユーザ MEMS プロセス “MUMP” など)、IC 及び半導体プロセス、マイクロ電子及びシリコンプロセス、LIGA / S-LIGA、薄型フィルム、電気めっき、印刷プロセスによるシリコン、ガラス、プラスチックまたはその他の基板への製造、を含む装置を製造するのに当業者に公知の任意の工程と材質が使用される。

【0126】

図 3 0 A ~ 3 0 C は、標準的なマイクロ電子技術と処理を用いて、図 1 の装置 1 0 と同様の上向き偏向装置のパーツを製造する主要ステップを例示する。クロノス総合マイクロシステムなどの標準 MUMP プロセスのいくつかは、標準として、2 層の可動構造ポリシリコンレイヤー間の機能的な絶縁層をすぐには提供しない。この付加的な層は、以下に説明するように製造工程の適当なステージで形成される。

【0127】

製造プロセスは、例えば LPCVD で溶着し、必要に応じてその後、ポリシリコン層 2 7 8 b を溶着して成形する窒化珪素層 2 7 8 a を通常有するシリコン基板 2 7 0 から始まる。次に、第 1 防食層 2 7 5 (リン化シリケートガラス “PSG” など) が、例えば LPCVD によって溶着され、任意に成形される。第 1 構造ポリシリコン層 2 7 2 が次に溶着、ドーブ処理、焼きなましされ、第 2 部材 E 2 の望ましい基本型に従って成形される。第 2

腐食層 276 (PSG など) が例えば LPCVD によって溶着される。フォトレジスト層 277 が次に敷かれ、開口部 274 が成形される。次に、層 276 の露出部がエッチングされる。次に適当な技術によって絶縁層 273 が溶着され、開口部 274 内にアンカーパッドが形成され、ストリッピング 277 の後で、例えばリフトオフにより 273 の不要部が除去される。層 273 は、好ましくは、腐食層のエッチング液に対して耐性をもつ。第 2 構造ポリシリコン層 271 が次に溶着、ドーピング処理、焼きなましされ、図示するように、第 1 部材 E1 の望ましい基本型に従って成形される。

【0128】

標準プロセスでは通常、金など付加的な最上層を使用し、これは付加的な電氣的相互接続に使用される。ポリシリコン層は適当にドーピング処理され、続いてアルゴンで焼きなましされ、導電性を高め、応力を減少させる。腐食層もアルゴンで焼きなましされて応力を減少させる。

【0129】

全ての腐食層は、第 1 及び第 2 部材 271、272 を開放するために適当なウエットまたはドライエッチング技術によって除去できる。部材 271、272 は、成形されたエッチ/アクセスホールを有し、腐食層の除去を助ける。層 276 は、273 と共に適当に平面化及び/又は水平化され、より平滑で、より水平な層 271 を提供する (例えば、SUMMIT プロセス)。

【0130】

熱酸化または 277 の除去後に層 272 に窒化珪素を形成し、層 271 に溶着などを含めて層 273 を積層させる方法はたくさんある。図 30A ~ 30C に示すように、装置は直接基板に結合し、これは図 2a で図示した結合方法に代用できる。後者の結合は層 272、273 の下に層 275 を伸長させ、次に、ベースサポートの周囲 (もしくは装置全体) で 275 を適当にアンダーエッチングすることで達成される。これに代えて、または、これに加えて、層 272 を溶着する前に、アンカーパッド 273 のそれと同様に別個のベースサポートが形成される。

【0131】

E1 と E2 の間に付加的な絶縁層を設ける必要性を緩和することで、標準クロノス総合マイクロシステムによる MUMP の製造工程が代わりに使用される。すなわち、代わりに、除去の間、腐食層 (例えば、図 30A ~ 30C の 276) の “アンダーエッチング” を利用し、パーツをアンカーパッドとして残す。アンダーエッチングは、基本的に腐食層 (例えば、図 30A の 275、276) の制御可能な、又は、選択的なエッチングに依存するので、エッチング工程はアンカーパッド除去の不足を解消させる。必要に応じて、アンカーパッドの位置を適当な技術 (例えば、イオンビーム、ドーピング処理など) で付加的に処置して、エッチングへの耐性を増すことができる。エッチングを監視/制御するために、適当なエッチ深さ検出技術 (手動/自動) が使用される。この “アンダーエッチング” 方法は、関連する層を適正なサイズにしたり、及び/又は、アンカーパッドにより長いエッチング路を設けるために、リップ、オーバーハング、アクセスホール (例えば、E1/E2) を提供することで容易になる。

【0132】

2 つ又は 3 つの可動電極装置を製造するのに、サンディアの SUMMIT、SUMMIT V などの 3 層構造ポリシリコン部材を有する別のプロセスが使用される。図 6 の実施例と類似の両方向 3 電極装置が製造される。また、平衡に設けた 2 つの装置もこの方法で製造される。3 番目の構造ポリシリコンは、必要に応じて、アクチュエータの上 (又は付近) に図 14 ~ 19 におけるミラーを形成するなど、付加的な目的のために利用される。

【0133】

ここに開示する装置は低駆動電圧で動作し、従って、CMOS、CMOS と MEMS またはポスト CMOS、BiCMOS などの技術や標準または改良 IC プロセスを使用した駆動回路や電子回路と一体に集積される。これにより、駆動回路及び制御回路の統合によるスマートアクチュエータとセンサが実現される。可動部材やアンカーパッド用の伝導層 (

金属被覆及び／又はポリシリコン)や絶縁層をそれぞれ1つ又は複数使用することを含む、当業者に公知の適当な方法や技術が広く使用される。

【0134】

ポンプ、感圧センサ、真空装置、及び流体装置など真空キャビティを必要とするアプリケーションにおいて、E1にアクセスホールを設けることは望ましくない。その代わりに、E2のみにアクセスホールを設けることでE1に到達する効果的な経路が提供される。ドライリリース樹状素材のように加熱すると固体から、直接、蒸気に分解するな素材を用いるなど、その他の代替周知技術を使用して腐食層が除去される。

【0135】

良好な層の接着は、付加的な1つ又は複数の接着増進層および技術を含む任意の適当な周知技術によって達成される。大部分のMEMS装置同様、層の取り外しを容易にするために、例えば、製造中にへこみを設ける、及び／又は、装置の使用バンパのように機能するといった、裏に接着剤を用いない任意の先行技術が使用される。

【0136】

熱応力や真性応力が任意の相応しい先行技術によって取り扱われ、制御される。

【0137】

図20の実施例に示したような可撓素材の付加的な膜が、ほこりや湿気などを対象にした環境保護のために使用され、装置に取り付けられて、移動や偏向を行う。

【0138】

マイクロステレオ・リソグラフィの“MSL”製造は、特に、垂直に重ねられた装置や基板に対して直角に配置された装置にも使用される。

【0139】

第1部材E1(又はE2)及び／又は荷重部材(例えば図14のミラー)は、例えばバルクマイクロ加工プロセス、あるいは、表面マイクロ加工プロセスとバルクマイクロ加工プロセスとの組合せにより単結晶シリコンから作られる。

【0140】

上記説明は、記載した実施例が教示する本発明の効果及び特徴を基にしている。

【0141】

アクチュエータだけでなく、本書に記載の装置も、単軸又は複軸について偏向可能な機械電気変換器およびセンサとして使用される。機械的偏向Dは、感知目的に使用できる電極E1とE2間の容量値 $d(C)$ に変化を生じさせる。作動バージョン同様、相対的に大きな作用面積およびキャパシタンスと組合せて、電極E1、E2の緊密な近接性を維持することで、マイクロフォン、感圧/出力センサ、慣性センサ、加速度計、及びジャイロスコープなど多くのアプリケーションで役立つ良好な感度が得られる。装置上に作動と感知それぞれ別個の専用セクションを設けて、同じ装置が作動と感知の両方の機能を実行する。もしくは、同じ装置を時分割によって違う時にアクチュエータ又はセンサとして使用したり、あるいは、当業者に公知の技術を用いて同時に両方の機能を果たすようにもできる。従って、アクチュエータの動き及び位置が感知、計測、及び／又はフィードバックループで使用され、光ファイバOXCなど多くのアプリケーションで見られるように、チャンネル間の光ビームを正確に検知・操縦するために、また、最適な操縦条件を動的に維持するために、アクチュエータ位置が制御、維持される。その他のアプリケーションには、力平衡の感知技術及び装置が含まれる。

【0142】

アクチュエータやセンサ型の装置はそれぞれ個別に性能最適化パラメータを備える。さらに、集積された電子回路及び論理回路を備え、スマートセンサ及びアクチュエータを実現する。また、1つ又は複数のセンサが1つ又は複数のアクチュエータに取り付けられる。センサの感度は、多くの公知技術により最適化又は制御される。そうしたセンサ装置は本来、両方向性で、前方または後方の何れかの向きに移動する時に $d(C)$ を生じるが、両者の値は等価ではない。等価の値 $d(C)$ を得るために、本書で述べた両方向アクチュエータに類似の両方向センサが使用される(例えば、図6のアクチュエータ)。所定の感知

アプリケーションにおいては、E 1、E 2の少なくとも一方がテフロン（登録商標）またはP V D F等のエレクトレット素材であるか、これを備える。

【0143】

本書に記載した装置は、アナログまたはデジタル形式で任意の電圧で操作され、スマート駆動回路及び電子回路、または、オンボード駆動回路及び電子回路を使用し、既知の電圧対偏向線形化技術を用いている。これらの又はその他の技術を使用して、共振か非共振の何れか、任意の振動数、振動モード、あるいは、交流モードで装置が駆動される。例えば、共振またはこれに近い交流駆動は偏向をより高め、いくつかのアプリケーションで好都合である。

【0144】

例えば、過度の電圧（スナップダウン、スナップオーバー、又はプルイン現象）に起因する電極E 1、E 2間の接触を阻止するために、任意の偏向領域伸長（deflection-range extension）/反崩壊（anti-collapse）技術が使用される。この技術は、個別のセル及び/又は装置全体に適用される。必要に応じて、衝撃を緩和するために、外部制限または停止部材が制動機能/スプリング機能と共に使用される。例えば、装置30に関連して図示されているストッパ48やブリッジ型の装置における類似のストッパ（例えば中央部に配置）が使用される。好ましくは、電極E 1、E 2は鋭いポイントや突起のない平滑な表面を有して、高電界における電圧の降伏を防止する。

【0145】

起動装置に収容された静電エネルギーの一部は、適当な技術により、偏向前の状態に復帰した後に回復する。装置は光電装置などのオンボード発電器によって起動される。

【0146】

各装置は同一の又は異なるセルを使用する。形状及び、長さ、厚み、ピッチ、スチフネス、及び/又は材質などの寸法は、同じ1つの装置内のセルであっても、同じであったり、違っていたりする。例えば、装置の一方の端から他方の端に行くに従って、セルの幅が徐々に狭まり、これは、装置内の荷重分布法、及び/又は、出力荷重へのエネルギーの供給を改善する。別の実施例では、各セルは最適な荷重駆動のために出力/エネルギーの分配を取り扱う。その他の実施例では、装置のサポート又は荷重に近いセルが異なり、強化されるか、あるいは、その作業用に最適化される。

【0147】

第1及び第2電極の任意の相応しく、好ましいスチフネス（ k_1 、 k_2 ）値及び/又は両者の比率が使用される（例えば、 $k_1 \neq k_2$ 、 $k_1 \neq k_2$ 、 $k_1 = k_2$ ）。 k_2 / k_1 の比率が1より大きいと最大有効偏向 D_{max} が増大する（スナップダウンに先駆けて）。その他のパラメータの中で、 k は t 、材質のタイプ、機械的性質、求められる有効幅及びリッジ、又は適当な方向に沿った溝によって制御される。セルのアスペクト比（長さに対する幅）は、任意の望ましい値をとる。厚み t に加えて、例えば、幅に沿って穴又はスリットを設けて k_1 、 k_2 の値を減らし、又はリッジや溝を設けて k_1 、 k_2 の値を増やすなど、部材の有効幅を制御することにより有効スチフネス k 値がその他の多様な方法で制御される。セル内の有効スチフネス値 k は変数であり、必要に応じて、例えばサポートポスト近辺で変位し、装置の偏向と性能をさらに制御/促進させる。さらに、電極E 1は、望ましい偏向を生じるために、スリット又は穴を設ける。寸法、特性、及びサポートポスト間の空間（例えば、幅に沿って）は、望ましい性能を得るために適宜選択される。

【0148】

隣接セル同士の重複（図1の実施例参照）は、 D 及び/又は F の規模を制御し、これに影響する。任意の適当な値を取る。

【0149】

本書に記載した装置の第1及び第2部材間の介在スペースは空気を含むか、真空か、次のうち1つ又は複数を含む：気体、流体、ゲル、又は変形可能な固体。

【0150】

有効な作業/エネルギーは、ほぼ、第1電極によって提供され、従って、これは適切な強度及び特性を備える。装置の支持部又は荷重などいくつかの位置において付加的な層(例えば、3又はE2)によって強化される。

【0151】

基板面に対して平衡な偏向、すなわち、横方向に偏向を生じる装置は、基板に対して直角な平面に装置を設ける製造工程を使用することで製造される。

【0152】

特別な言及はしないものの、いくつかの実施例において、特に、電極が異なる方法で操作されるか、及び/又はオン・オフ切替の連続とタイミングで操作される場合、電源を制御するための制御ユニットを電極E1とE2に設けている(例えば、2つ又はそれ以上の電極E2が異なる電圧で操作され、電極E1に異なる偏向効果を生じさせる)。そうした制御ユニットの構造と特徴は、電気制御の当業者にとっては自明のことなので、本明細書では説明しない。

【0153】

当業者であれば、本発明のクレームの範囲を逸脱しないで上記の実施例に容易に修正を加えられることは容易に理解されよう。

【図面の簡単な説明】

【図1】

静電駆動器の実施例を示す平面図。

【図2a及び2b】

静電駆動器の実施例を示す側面図。

【図3a及び3b】

別の静電駆動器の実施例を示す側面図。図3bは、偏向位置にあるアクチュエータを示す。

【図4】

別の静電駆動器の実施例を示す平面図。

【図5】

別の静電駆動器の実施例を示す側面図。

【図6~8】

休止位置に関して対向する2つの向きに偏向できるアクチュエータの3つの異なる実施例を示す側面図。

【図9及び10】

多数の第2電極を線形配列に設けたアクチュエータの2つの実施例を示す。

【図11】

複合的な静電装置の別の実施例を示す。

【図11】

複合的な静電装置の別の実施例を示す。

【図12a、12b、13a、13b】

2つの別の軸線について偏向可能なアクチュエータの2つの異なる実施例を示す。

【図14~16】

複合的な静電装置の異なる実施例を示す。

【図17~24】

アクチュエータ又はセンサの異なる実施例を示す。

【図25A~26C】

供給レールと電極間の接続例を示す。

【図27A~27E】

ブリッジサポートの異なる実施例を示す。

【図28及び29】

第1導体と第2導体間の異なる接続例を示す。

【図30A~30C】

本書に記載したアクチュエータの製造方法の実施例を示す。

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		Intern. Application No. PCT/JP 01/05349
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H02N1/00		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 H02N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, WPI Data, PAJ		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 793 560 A (MIZOSHITA YOSHIFUMI ET AL.) 11 August 1998 (1998-08-11) column 4, line 28 -column 6, line 34 figure 3	1-11, 27, 28
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents: *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *E* earlier document but published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claims) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone ** document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art *S* document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 24 May 2002		Date of mailing of the international search report 03/06/2002
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2000, Tx. 31 651 epo nl Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Ramos, H

Form PCT/ISA210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT				Intern. Application No. PCT/us 01/05349	
Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date	
US 5793560	A	11-08-1998	JP	2549775 B2	30-10-1996
			JP	5073850 A	26-03-1993
			JP	2582508 B2	19-02-1997
			JP	5325442 A	10-12-1993
			JP	2612993 B2	21-05-1997
			JP	6084106 A	25-03-1994
			JP	2763988 B2	11-06-1998
			JP	6084269 A	25-03-1994
			DE	69227660 D1	07-01-1999
			DE	69227660 T2	22-04-1999
			EP	0533095 A2	24-03-1993
			KR	9611843 B1	03-09-1996
			US	5400192 A	21-03-1995

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 1992)

フロントページの続き

(31)優先権主張番号 0126233.6

(32)優先日 平成13年11月1日(2001.11.1)

(33)優先権主張国 英国(GB)

(81)指定国 AP(GH,GM,KE,LS,MW,MZ,SD,SL,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,MD,RU,TJ,TM),EP(AT, BE,CH,CY,DE,DK,ES,FI,FR,GB,GR,IE,IT,LU,MC,NL,PT,SE,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,ML,MR,NE,SN, TD,TG),AE,AG,AL,AM,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BR,BY,BZ,CA,CH,CN,CO,CR,CU,CZ,DE,DK,DM,DZ,EC,EE,ES,FI,GB,GD,GE, GH,GM,HR,HU,ID,IL,IN,IS,JP,KE,KG,KP,KR,KZ,LC,LK,LR,LS,LT,LU,LV,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MZ,NO,NZ,PL,PT,R O,RU,SD,SE,SG,SI,SK,SL,TJ,TM,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VN,YU,ZA,ZW