

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6308701号
(P6308701)

(45) 発行日 平成30年4月11日 (2018. 4. 11)

(24) 登録日 平成30年3月23日 (2018. 3. 23)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 B 26/08 (2006. 01)

G O 2 B 26/08 E

G O 2 B 26/10 (2006. 01)

G O 2 B 26/10 1 O 4 Z

B 8 1 B 3/00 (2006. 01)

B 8 1 B 3/00

H O 1 L 41/09 (2006. 01)

H O 1 L 41/09

H O 1 L 41/113 (2006. 01)

H O 1 L 41/113

請求項の数 14 (全 32 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2016-552089 (P2016-552089)
 (86) (22) 出願日 平成27年9月29日 (2015. 9. 29)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2015/077589
 (87) 国際公開番号 W02016/052548
 (87) 国際公開日 平成28年4月7日 (2016. 4. 7)
 審査請求日 平成29年4月4日 (2017. 4. 4)
 (31) 優先権主張番号 特願2014-201651 (P2014-201651)
 (32) 優先日 平成26年9月30日 (2014. 9. 30)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 306037311
 富士フイルム株式会社
 東京都港区西麻布2丁目26番30号
 (74) 代理人 100083116
 弁理士 松浦 憲三
 (72) 発明者 直野 崇幸
 神奈川県足柄上郡開成町牛島577番地
 富士フイルム株式会社内
 審査官 右田 昌士

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ミラー駆動装置及びその駆動方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

反射面を有するミラー部と、

前記ミラー部に連結され、前記ミラー部を回転軸の周りに回転可能に支持するミラー支持部と、

前記ミラー支持部に連結され、前記ミラー部を前記回転軸の周りに回転させる駆動力を発生させる圧電アクチュエータ部と、

前記圧電アクチュエータ部を支持する固定部と、を備えるミラー駆動装置であって、

前記ミラー支持部として、前記ミラー部を前記回転軸の軸方向の両側から支持する第一ミラー支持部と、第二ミラー支持部とを有し、

前記圧電アクチュエータ部は、駆動電圧の印加による圧電体の逆圧電効果によって変形する第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部を備え、

前記第一アクチュエータ部は、前記圧電体の膜厚方向に直交する方向であって、かつ前記回転軸の軸方向と直交する直交方向に前記回転軸を挟む前記回転軸の前記直交方向の両側のうち一方の側に配置され、前記第二アクチュエータ部は前記両側のうち他方の側に配置され、

前記第一アクチュエータ部は、前記第一ミラー支持部及び前記第二ミラー支持部の各々と連結され、前記第二アクチュエータ部は、前記第一ミラー支持部及び前記第二ミラー支持部の各々と連結されており、

前記第一アクチュエータ部と、前記第一ミラー支持部及び前記第二ミラー支持部の各々

10

20

とを連結する部材である第一接続部を有し、かつ、前記第二アクチュエータ部と、前記第一ミラー支持部及び前記第二ミラー支持部の各々とを連結する部材である第二接続部を有し、

前記第一アクチュエータ部は、前記軸方向の両側の端部にそれぞれ第一基端部を有し、前記第一アクチュエータ部の前記両側の端部のうち一方の側の第一基端部から、他方の側の第一基端部に至る可動部が前記ミラー部を迂回する形状を有し、

前記第二アクチュエータ部は、前記軸方向の両側の端部にそれぞれ第二基端部を有し、前記第二アクチュエータ部の前記両側の端部のうち一方の側の第二基端部から、他方の側の第二基端部に至る可動部が前記ミラー部を迂回する形状を有し、

前記第一基端部と前記第二基端部とが分離している構造を備え、

前記第一アクチュエータ部と、前記第一ミラー支持部及び前記第二ミラー支持部の各々との連結部分である第一連結部に対して前記第一アクチュエータ部における前記軸方向の反対側に位置する前記第一基端部が前記固定部に固定された構成によって、前記第一アクチュエータ部が両持ち梁構造で前記固定部に支持され、前記ミラー部の中心から、前記回転軸の前記軸方向に、前記第一連結部、前記第一基端部がこの順で、ミラー部から遠くなる位置関係となっており、

前記第二アクチュエータ部と前記第一ミラー支持部及び前記第二ミラー支持部の各々との連結部分である第二連結部に対して前記第二アクチュエータ部における前記軸方向の反対側に位置する前記第二基端部とが前記固定部に固定された構成によって、前記第二アクチュエータ部が両持ち梁構造で前記固定部に支持され、前記ミラー部の中心から、前記回転軸の前記軸方向に、前記第二連結部、前記第二基端部がこの順で、ミラー部から遠くなる位置関係となっており、

前記第一アクチュエータ部と前記第二アクチュエータ部とを互いに逆方向に撓ませることで前記ミラー支持部を傾き駆動させるものであり、

前記第一アクチュエータ部の上部電極は、それぞれが単数又は複数の電極で構成される第一電極部と第二電極部とを含み、

前記第二アクチュエータ部の上部電極は、それぞれが単数又は複数の電極で構成される第三電極部と第四電極部とを含み、

前記第一電極部、前記第二電極部、前記第三電極部、及び前記第四電極部の配置形態は、前記回転軸の周りの回動による前記ミラー部の傾き変位を伴う共振モード振動において前記圧電体の膜厚方向に直交する面内方向の主応力の応力分布に対応しており、

前記第一電極部及び前記第三電極部の位置に対応する圧電体部分と、前記第二電極部及び前記第四電極部の位置に対応する圧電体部分とは、前記共振モード振動において互いに逆方向の応力が生じる構成であるミラー駆動装置。

【請求項 2】

前記第一電極部、前記第二電極部、前記第三電極部、及び前記第四電極部のそれぞれは駆動電圧を印加する駆動用の電極として用いられ、

かつ、前記第一電極部、前記第二電極部、前記第三電極部、及び前記第四電極部のうち少なくとも一つの電極部は、複数の電極に分割されており、

前記複数の電極のうち、一部の電極は前記圧電体の変形に伴い圧電効果によって発生する電圧を検出する検出用の電極として用いられる請求項 1 に記載のミラー駆動装置。

【請求項 3】

前記第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部のそれぞれは、振動板、下部電極、圧電体、上部電極の順に積層された積層構造を有する圧電ユニモルフアクチュエータである請求項 1 又は 2 に記載のミラー駆動装置。

【請求項 4】

前記ミラー部、前記ミラー支持部、前記第一アクチュエータ部及び前記第二アクチュエータ部は、非駆動状態での平面視において、前記回転軸を対称軸とする線対称の形態である請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置。

【請求項 5】

前記ミラー部、前記ミラー支持部、前記第一アクチュエータ部及び前記第二アクチュエータ部は、非駆動状態での平面視において、ミラー部の中心を通り、かつ回転軸と直交する中心線を対称軸とする線対称の形態である請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置。

【請求項 6】

前記第一電極部及び前記第三電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を供給し、かつ、前記第二電極部及び前記第四電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を印加する駆動回路を備え、

前記第一電極部及び前記第三電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧と、前記第二電極部及び前記第四電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧の位相差 ϕ が $130^\circ \leq \phi \leq 230^\circ$ の範囲である請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置。

10

【請求項 7】

前記第一電極部、前記第二電極部、前記第三電極部、及び前記第四電極部を構成する複数の電極のうち、一部の電極がフローティング電位に設定され、当該フローティング電位の電極から圧電体の変形に伴い圧電効果によって発生する電圧を検出する検出回路を備える請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置。

【請求項 8】

前記圧電アクチュエータ部に駆動電圧を供給する駆動回路であって、前記ミラー部を共振駆動させる駆動電圧の電圧波形を供給する駆動回路を備える請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置。

20

【請求項 9】

前記圧電アクチュエータ部に用いられる前記圧電体は $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 厚の薄膜であり、振動板となる基板上に直接成膜された薄膜である請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置。

【請求項 10】

前記圧電アクチュエータ部に用いられる圧電体は、下記一般式 (P-1) で表される 1 種又は 2 種以上のペロブスカイト型酸化物である請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置、

一般式 $\text{ABO}_3 \cdots (\text{P}-1)$

30

式中、A：A サイトの元素であり、Pb を含む少なくとも 1 種の元素、

B：B サイトの元素であり、Ti, Zr, V, Nb, Ta, Sb, Cr, Mo, W, Mn, Sc, Co, Cu, In, Sn, Ga, Zn, Cd, Fe, Mg, Si 及び Ni からなる群より選ばれた少なくとも 1 種の元素、

O：酸素元素、

A サイト元素と B サイト元素と酸素元素のモル比は 1 : 1 : 3 が標準であるが、これらのモル比はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で基準モル比からずれてもよい。

【請求項 11】

前記圧電アクチュエータ部に用いられる圧電体は、下記一般式 (P-2) で表される 1 種又は 2 種以上のペロブスカイト型酸化物である請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置、

40

一般式 $\text{A}_a (\text{Zr}_x, \text{Ti}_y, \text{M}_{b-x-y})_b \text{O}_c \cdots (\text{P}-2)$

式中、A：A サイトの元素であり、Pb を含む少なくとも 1 種の元素、

M が、V, Nb, Ta, 及び Sb からなる群より選ばれた少なくとも 1 種の元素であり、 $0 < x < b$ 、 $0 < y < b$ 、 $0 \leq b - x - y$ をみたし、

$a : b : c = 1 : 1 : 3$ が標準であるが、これらのモル比はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で基準モル比からずれてもよい。

【請求項 12】

前記ペロブスカイト型酸化物 (P-2) は、Nb を含み、 $\text{Nb} / (\text{Zr} + \text{Ti} + \text{Nb})$ モル比が 0.06 以上 0.20 以下である請求項 11 に記載のミラー駆動装置。

50

【請求項 1 3】

請求項 1 から 1 2 のいずれか一項に記載のミラー駆動装置におけるミラー駆動方法であって、

前記第一電極部及び前記第三電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を印加し、かつ、前記第二電極部及び前記第四電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を印加し、前記第一電極部及び前記第三電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧と、前記第二電極部及び前記第四電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧の位相差 ϕ が $130^\circ \leq \phi \leq 230^\circ$ の範囲であるミラー駆動方法。

【請求項 1 4】

10

前記第一電極部、前記第二電極部、前記第三電極部、及び前記第四電極部を構成する複数の電極のうち一部の電極を、圧電体の変形に伴い圧電効果によって発生する電圧を検出する検出電極として用い、

前記ミラー部の駆動中に前記検出電極から検出信号を得る請求項 1 3 に記載のミラー駆動方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はミラー駆動装置及びその駆動方法に係り、特に、光走査に用いる光偏向器に好適なマイクロミラーデバイスの構造及びその駆動方法に関する。

20

【背景技術】

【0002】

シリコン (Si) の微細加工技術を用いて作製されたマイクロスキヤナ (以下、「MEMS (Micro Electro Mechanical System) スキヤナ」という。) は、小型かつ低消費電力であることが特徴であり、レーザープロジェクタから光干渉断層計のような光診断用スキヤナなど、幅広い応用が期待されている。

【0003】

MEMS スキヤナの駆動方式は様々であるが、その中でも圧電体の変形を利用した圧電駆動方式は、他方式に比べてトルク密度が高く、小型で高スキャン角が得られるとして有望視されている。特に、レーザーディスプレイのように高い変位角度が必要な用途では共振駆動が主に用いられており、この際に圧電駆動方式のトルクの高さは大きな利点となる。

30

【0004】

従来の圧電 MEMS スキヤナは、例えば、特許文献 1 に示されているように、2 本のカンチレバーを接続した構造のアクチュエータにおける接続部 (結合部) にトーションバーを接続し、それぞれのカンチレバーを逆位相で駆動させることによってトーションバーを傾き変位させる方式が挙げられる (特許文献 1)。

【0005】

また、非特許文献 1、2 のように、アクチュエータが円若しくは楕円の形状を有している場合もある。このような形状にすることで、直線形状のカンチレバーに比べてアクチュエータの長さを大きくすることができ、変位量を大きくすることができる。特許文献 1 及び非特許文献 1、2 の構造では、ミラーの回転軸を挟んで両側に配置された二つの板状アクチュエータを有しており、当該アクチュエータは、回転軸に対して垂直方向に離れた基端部が固定されているという点で共通している。

40

【0006】

これに対し、非特許文献 3 では、ミラーの回転軸を挟んで両側に配置された二つの板状アクチュエータを有しており、当該アクチュエータがミラーの回転軸上で固定される構造が提案されている。この構造では、特許文献 1 の構造に比べて静的駆動時のアクチュエータ変位量が大きいと、共振駆動時に得られるミラー傾き角が大きいという利点がある。

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2009-2978号公報

【非特許文献】

【0008】

【非特許文献1】Optical MEMS and Their Applications Conference, 2006. IEEE/LEOS International Conference on, 2006, 25-26

【非特許文献2】Japanese Journal of Applied Physics, The Japan Society of Applied Physics, 2010, 49, 04DL19

【非特許文献3】JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, Vol. 21, 6 (2012) 1303-1310.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、このような構造の圧電MEMSスキャナは圧電トルクを効率的に傾き変位に変換できておらず、十分な変位角度を得るために25V程度の高い電圧が必要となってしまう。ジルコン酸チタン酸鉛(PZT; lead zirconate titanate)薄膜の耐久性を考慮すると、15V程度での駆動が望ましい。

【0010】

また、共振駆動を利用して動作させる場合、共振モードの振動を維持するためには駆動変位をモニタリングするセンサ(応力検出部)が必要であるが、このためにはアクチュエータの一つをセンサ部として用いる必要があり、駆動力が半分程度に大幅に落ち込んでしまうという問題があった。

【0011】

本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、従来の構造に比べて変位効率を向上させることができ、センサ部を設けた場合でもなお、十分に大きな変位角度を得ることができるミラー駆動装置及びその駆動方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

前記目的を達成するために、次の発明態様を提供する。

【0013】

第1態様に係るミラー駆動装置は、反射面を有するミラー部と、ミラー部に連結され、ミラー部を回転軸の周りに回転可能に支持するミラー支持部と、ミラー支持部に連結され、ミラー部を回転軸の周りに回転させる駆動力を発生させる圧電アクチュエータ部と、圧電アクチュエータ部を支持する固定部と、を備えるミラー駆動装置であって、圧電アクチュエータ部は、駆動電圧の印加による圧電体の逆圧電効果によって変形する第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部を備え、第一アクチュエータ部は、圧電体の膜厚方向に直交する方向であって、かつ回転軸の軸方向と直交する直交方向に回転軸を挟む回転軸の直交方向の両側のうち一方の側に配置され、第二アクチュエータ部は両側のうち他方の側に配置され、第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部のそれぞれはミラー支持部と連結されており、第一アクチュエータ部とミラー支持部との連結部分である第一連結部に対して第一アクチュエータ部における軸方向の反対側に位置する第一基端部と、第二アクチュエータ部とミラー支持部との連結部分である第二連結部に対して第二アクチュエータ部における軸方向の反対側に位置する第二基端部とが固定部に固定された構成によって、第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部のそれぞれは両持ち梁構造で固定部に支持されており、第一アクチュエータ部と第二アクチュエータ部とを互いに逆方向に撓ませることでミラー支持部を傾き駆動させるものであり、第一アクチュエータ部の上部電極は、それぞれが単数又は複数の電極で構成される第一電極部と第二電極部とを含み、第二アクチュエータ部の上部電極は、それぞれが単数又は複数の電極で構成される第三電極部

10

20

30

40

50

と第四電極部とを含み、第一電極部、第二電極部、第三電極部、及び第四電極部の配置形態は、回転軸の周りの回転によるミラー部の傾き変位を伴う共振モード振動において圧電体の膜厚方向に直交する面内方向の主応力の応力分布に対応しており、第一電極部及び第三電極部の位置に対応する圧電体部分と、第二電極部及び第四電極部の位置に対応する圧電体部分とは、共振モード振動において互いに逆方向の応力が生じる構成である。

【0014】

第1態様のミラー駆動装置は、圧電アクチュエータ部の駆動時（すなわち変位時）における圧電体内の応力の方向に対応して電極部が分割された形態で配置されているため、従来構成と比較して効率よく駆動することができる。

【0015】

10

第2態様として、第1態様のミラー駆動装置について、ミラー部の中心から、回転軸の軸方向に、第一連結部、第一基端部がこの順で、ミラー部から遠くなる位置関係となっており、かつ、ミラー部の中心から、回転軸の軸方向に、第二連結部、第二基端部がこの順で、ミラー部から遠くなる位置関係となっている構成とすることができる。

【0016】

第3態様として、第1態様又は第2態様のミラー駆動装置において、第一アクチュエータ部とミラー支持部とを連結する部材である第一接続部を有し、かつ、第二アクチュエータ部とミラー支持部とを連結する部材である第二接続部を有する構成とすることができる。

【0017】

20

第4態様として、第1態様から第3態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、第一アクチュエータ部と第二アクチュエータ部は連結されており、第一アクチュエータ部と第二アクチュエータ部の連結部分にミラー支持部が連結されている構成とすることができる。

【0018】

第4態様の場合、第3態様で述べた第一接続部と第二接続部の部材要素を省略する形態が可能である。

【0019】

第5態様として、第1態様から第4態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、第一基端部と第二基端部は連結されている構成とすることができる。

30

【0020】

第一基端部と第二基端部とが一体化された一体型の基端部形状とすることができる。

【0021】

第6態様として、第1態様から第5態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部のそれぞれは、振動板、下部電極、圧電体、上部電極の順に積層された積層構造を有し、圧電ユニモルファクチュエータである構成とすることができる。

【0022】

圧電アクチュエータ部は、ユニモルフ構造に限らず、バイモルフ構造も可能であるが、ユニモルフ構造が最も簡単な構成である。圧電駆動方式は、電極間に電圧を印加するだけで駆動できるため、構成が単純で小型化に有益である。

40

【0023】

第7態様として、第1態様から第6態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、ミラー支持部として、ミラー部を回転軸の軸方向の両側から支持する第一ミラー支持部と、第二ミラー支持部とを有する構成とすることができる。

【0024】

第8態様として、第1態様から第7態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、第一アクチュエータ部は、軸方向の両側の端部にそれぞれ第一基端部を有し、第一アクチュエータ部の両側の端部のうち一方の側の第一基端部から、他方の側の第一基端部に至る可動部がミラー部を迂回する形状を有し、第二アクチュエータ部は、軸方向の両側の端部

50

にそれぞれ第二基端部を有し、第二アクチュエータ部の両側の端部のうち一方の側の第二基端部から、他方の側の第二基端部に至る可動部がミラー部を迂回する形状を有する構成とすることができる。

【0025】

第9態様として、第1態様から第8態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、ミラー部、ミラー支持部、第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部は、非駆動状態での平面視において、回転軸を対称軸とする線対称の形態である構成とすることができる。

【0026】

第10態様として、第1態様から第9態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、ミラー部、ミラー支持部、第一アクチュエータ部及び第二アクチュエータ部は、非駆動状態での平面視において、ミラー部の中心を通り、かつ回転軸と直交する中心線を対称軸とする線対称の形態である構成とすることができる。

10

【0027】

第11態様として、第1態様から第10態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、第一電極部及び第三電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を供給し、かつ、第二電極部及び第四電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を印加する駆動回路を備え、第一電極部及び第三電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧の電圧波形と、第二電極部及び第四電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧の電圧波形の位相差 ϕ が $130^\circ \leq \phi \leq 230^\circ$ の範囲である構成とすることができる。

20

【0028】

第12態様として、第1態様から第11態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、第一電極部、第二電極部、第三電極部、及び第四電極部を構成する複数の電極のうち、一部の電極がフローティング電位に設定され、フローティング電位の電極から圧電体の変形に伴い圧電効果によって発生する電圧を検出する検出回路を備える構成とすることができる。

【0029】

第13態様として、第1態様から第12態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、圧電アクチュエータ部に駆動電圧を供給する駆動回路であって、ミラー部を共振駆動させる駆動電圧の電圧波形を供給する駆動回路を備える構成とすることができる。

30

【0030】

第14態様として、第1態様から第13態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、圧電アクチュエータ部に用いられる圧電体は $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 厚の薄膜であり、振動板となる基板上に直接成膜された薄膜である構成とすることができる。

【0031】

かかる態様によれば、スパッタリング法に代表される気相成長法やゾルゲル法などの直接成膜法を用いることにより、所要の圧電性能を持つ圧電体薄膜を得ることができる。基板に圧電体の薄膜を直接成膜し、ドライエッチング若しくはウェットエッチングなどの半導体プロセスで加工することで、デバイスの作製プロセスを簡便にできる。

40

【0032】

第15態様として、第1態様から第14態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、圧電アクチュエータ部に用いられる圧電体は、下記一般式(P-1)で表される1種又は2種以上のペロブスカイト型酸化物である構成とすることができる。

【0033】

一般式 $\text{ABO}_3 \cdots (\text{P}-1)$

式中、A：Aサイトの元素であり、Pbを含む少なくとも1種の元素。

【0034】

B：Bサイトの元素であり、Ti, Zr, V, Nb, Ta, Sb, Cr, Mo, W, Mn, Sc, Co, Cu, In, Sn, Ga, Zn, Cd, Fe, Mg, Si及びNiから

50

なる群より選ばれた少なくとも1種の元素。

【0035】

O：酸素元素。

Aサイト元素とBサイト元素と酸素元素のモル比は1：1：3が標準であるが、これらのモル比はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で基準モル比からずれてもよい。

【0036】

第16態様として、第1態様から第14態様のいずれか一態様のミラー駆動装置において、圧電アクチュエータ部に用いられる圧電体は、下記一般式（P-2）で表される1種又は2種以上のペロブスカイト型酸化物である構成とすることができる。

【0037】

一般式 $A_a (Zr_x, Ti_y, M_{b-x-y})_b O_c \cdots (P-2)$

式中、A：Aサイトの元素であり、Pbを含む少なくとも1種の元素。

【0038】

Mが、V、Nb、Ta、及びSbからなる群より選ばれた少なくとも1種の元素である。
 $0 < x < b$ 、 $0 < y < b$ 、 $0 \leq b - x - y$ 。

【0039】

$a : b : c = 1 : 1 : 3$ が標準であるが、これらのモル比はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で基準モル比からずれてもよい。

【0040】

Nb等の元素をドーブしたPZTは圧電定数が高いため、小型で大きな変位が得られるデバイスの作製に好適である。なお、応力検出部に用いる圧電体についても、圧電アクチュエータ部と同じ圧電材料を用いることができる。

【0041】

第17態様として、第16態様のミラー駆動装置において、ペロブスカイト型酸化物（P-2）は、Nbを含み、 $Nb / (Zr + Ti + Nb)$ モル比が0.06以上0.20以下である構成とすることができる。

【0042】

かかる材料は、分極処理を行わなくても良好な圧電特性を示す。したがって、分極処理が不要であり、製造プロセスの簡略化、低コスト化を実現できる。

【0043】

第18態様に係るミラー駆動方法は、第1態様から第17態様のいずれか一態様のミラー駆動装置におけるミラー駆動方法であって、第一電極部及び第三電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を印加し、かつ、第二電極部及び第四電極部のうち少なくとも一方の電極部を構成する電極に駆動用の電圧を印加し、第一電極部及び第三電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧と、第二電極部及び第四電極部のうち少なくとも一方の電極部に印加する駆動電圧の位相差 ϕ が $130^\circ \leq \phi \leq 230^\circ$ の範囲であるミラー駆動方法である。

【0044】

第19態様として、第18態様のミラー駆動方法において、第一電極部、第二電極部、第三電極部、及び第四電極部を構成する複数の電極のうち一部の電極を、圧電体の変形に伴い圧電効果によって発生する電圧を検出する検出電極として用い、ミラー部の駆動中に検出電極から検出信号を得る構成とすることができる。

【0045】

例えば、検出電極から得られる検出信号に基づいて、圧電アクチュエータ部に供給する駆動電圧の周波数（駆動周波数）、振幅のうち少なくとも一方を制御する構成とすることができる。検出信号を圧電アクチュエータ部の駆動にフィードバックすることにより、安定した共振駆動を実現できる。

【発明の効果】

【0046】

本発明によれば、アクチュエータ部の変形時に圧電体内に生じる応力の分布に合わせて

10

20

30

40

50

電極部が配置されているため、効率よく駆動することができ、従来構成と比較して、より大きなミラー傾斜角を得ることができる。また、変位効率が向上しているため、一部の電極を検出用に利用する場合であっても、十分な変位角度を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0047】

【図1】図1は第一実施形態に係るマイクロミラーデバイスの構成を示す平面図である。

【図2】図2はミラー部の他の形態を示す平面図である。

【図3】図3は第二実施形態に係るマイクロミラーデバイスの要部の構成を示す平面図である。

【図4】図4は図3の4-4切断線に沿う概略断面図である。

10

【図5】図5は電圧波形の例を示した波形図である。

【図6】図6は共振駆動時における圧電体の変位及び主応力の分布を模式的に示した斜視図である。

【図7】図7は共振駆動時における圧電体内の応力方向を模式的に示した説明図である。

【図8】図8は図3のデバイス構造において、すべての電極部を駆動用の電極として用いる場合の電圧印加方法の説明図である。

【図9】図9は図3のデバイス構造において、一部の電極部をセンシングに用いる形態の説明図である。

【図10】図10は図3のデバイス構造において、電極部を構成する複数の電極のうち、一部の電極をセンシングに用いる形態の説明図である。

20

【図11】図11は実施例1のデバイスの寸法例を示す説明図である。

【図12】図12は比較例1に係るマイクロミラーデバイスの要部構成を示す平面図である。

【図13】図13は図12のデバイス構造においてセンシングを行う形態の説明図である。

【図14】図14は実施例1と比較例1について、印加電圧と光学スキャン角度の関係を示すグラフである。

【図15】図15は電圧波形の位相差と相対変位角の関係を示すグラフである。

【図16】図16は図8のデバイス構造において、4種類の電圧波形を用いる場合の説明図である。

30

【図17】図17は図10の形態における駆動制御系の例を示す説明図である。

【図18】図18は第三実施形態に係るマイクロミラーデバイスの要部の構成を示す平面図である。

【発明を実施するための形態】

【0048】

以下、添付図面にしたがって本発明を実施するための形態について詳説する。

【0049】

<第一実施形態>

図1は第一実施形態に係るマイクロミラーデバイスの構成を示す平面図である。マイクロミラーデバイス10は、ミラー部12と、ミラー支持部14と、圧電アクチュエータ部16と、固定フレーム18と、を備える。マイクロミラーデバイス10は「ミラー駆動装置」の一形態に相当する。

40

【0050】

ミラー部12の上表面は、光を反射する反射面12Cとなっている。反射面12Cには、入射光の反射率を高めるために、Au（金）やAl（アルミ）等の金属薄膜が形成されている。ミラーコーティングに用いる材料や膜厚は特に限定されず、公知のミラー材料（高反射率材料）を用いて様々な設計が可能である。

【0051】

反射部として機能するミラー部12の平面視形状と、ミラーコーティングされた領域である反射面12Cの形状は一致してもいいし、異なってもよい。反射面12Cはミラ

50

一部 1 2 における上表面の面積範囲内で形成することができる。なお、本例では光を反射する反射面 1 2 C を有するミラー部 1 2 を説明するが、光に限らず、音波や電磁波などを反射する反射面 1 2 C とする形態も可能である。

【0052】

ミラー支持部 1 4 は、ミラー部 1 2 に連結されており、ミラー部 1 2 を回転軸 R_A の周りに回動可能に支持する。ミラー支持部 1 4 は、第一トーションバー部 2 0 及び第二トーションバー部 2 2 から構成される。第一トーションバー部 2 0 と第二トーションバー部 2 2 は、ミラー部 1 2 に対し、回転軸 R_A の軸方向の両側からミラー部 1 2 を支持する。第一トーションバー部 2 0 は「第一ミラー支持部」の一形態に相当し、第二トーションバー部 2 2 は「第二ミラー支持部」の一形態に相当する。

10

【0053】

圧電アクチュエータ部 1 6 は、ミラー支持部 1 4 に連結されており、ミラー部 1 2 を回転軸 R_A の周りに回動させる駆動力を発生させる。

【0054】

固定フレーム 1 8 は、圧電アクチュエータ部 1 6 を支持する部材である。圧電アクチュエータ部 1 6 にはミラー支持部 1 4 を介してミラー部 1 2 が支持されているため、固定フレーム 1 8 は、圧電アクチュエータ部 1 6 を介してミラー部 1 2 を間接的に支持する部材として機能する。また、固定フレーム 1 8 には、図示せぬ配線や電子回路が設けられる。

【0055】

以下、説明の便宜上、図 1 に直交 $x y z$ 軸を導入して説明する。圧電アクチュエータ部 1 6 が非駆動状態である場合の反射面 1 2 C の法線方向（図 1 の紙面に垂直な方向）を z 軸方向とする。 z 軸方向は、圧電アクチュエータ部 1 6 における圧電体の膜厚方向である。第一トーションバー部 2 0 及び第二トーションバー部 2 2 によって回動するミラー部 1 2 の回転軸 R_A である主軸と平行な方向（図 1 の紙面に平行な横方向）を x 軸方向とする。 x 軸及び z 軸の両軸に直交する方向（図 1 の紙面に平行な縦方向）を y 軸方向とする。 x 軸方向は、回転軸 R_A の軸方向であり、「回転軸方向」と呼ぶ場合がある。 y 軸方向は回転軸 R_A の軸方向と直交する直交方向であり、「回転軸直交方向」と呼ぶ場合がある。

20

【0056】

マイクロミラーデバイス 1 0 は、 y 軸に平行で、かつミラー部 1 2 の中心を通る中心線 CL を対称軸として概ね線対称（図 1 において左右対称）の構造を有している。また、マイクロミラーデバイス 1 0 は、回転軸 R_A を対称軸として概ね線対称（図 1 において上下対称）の構造を有している。

30

【0057】

〔ミラー部の形状について〕

本例のミラー部 1 2 は、平面視で長方形の形状となっている。ただし、発明の実施に際して、ミラー部 1 2 の形状は、特に限定されない。図 1 に例示した長方形に限らず、円形、楕円形、正方形、多角形など、様々な形状があり得る。なお、ミラー部 1 2 の平面視形状について長方形、円形、楕円形、正方形、多角形などの表現は、厳密な数学的定義での形状に限らず、全体的な基本形状として概ねそれらの形と把握できる形状であることを意味する。例えば、「四角形」という用語の概念には、四角形の角部が面取りされたもの、角部が丸められたもの、辺の一部又は全部が曲線や折れ線で構成されるもの、若しくは、ミラー部 1 2 とミラー支持部 1 4 との連結部分に連結上必要な付加的形状が追加されたものなども含まれる。他の形状表現についても同様である。

40

【0058】

また、ミラー部が取り得るその他の機能的形状の例として、非特許文献 3 に記載されているように、スキャン駆動時における反射面の動的変形を抑える変形防止フレームを有する場合が挙げられる。例えば、図 2 に示すように、反射面 1 2 C を有する反射部 1 2 D の外郭から隔離された変形防止フレーム 1 3 にミラー支持部としての第一トーションバー部 2 0 と第二トーションバー部 2 2 が接続されることにより、スキャン駆動時の反射面 1 2 C の動的変形を大幅に低減させることができる。この場合は、変形防止フレーム 1 3 と反

50

射部 1 2 D を合わせた構造を「ミラー部」とみなすことができる。図 2 におけるミラー部を、符号 1 5 で示した。ミラー部 1 5 は、反射部 1 2 D の外縁に沿って形成された溝穴 1 3 A、1 3 B を隔てて、変形防止フレーム 1 3 に第一トーションバー部 2 0 と第二トーションバー部 2 2 が接続された構造を有する。図 1 のミラー部 1 2 に代えて、図 2 のようなミラー部 1 5 を採用することができる。

【0059】

[圧電アクチュエータ部の構造について]

図 1 に示すように、圧電アクチュエータ部 1 6 は、第一アクチュエータ部 3 0 と、第二アクチュエータ部 4 0 とを備える。第一アクチュエータ部 3 0 及び第二アクチュエータ部 4 0 は、回転軸 R_A に対し、回転軸 R_A の軸方向と直交する y 軸方向の両側に、それぞれが分かれて配置されている。図 1 における圧電アクチュエータ部 1 6 の上側半分が第一アクチュエータ部 3 0 であり、下側半分が第二アクチュエータ部 4 0 である。すなわち、第一アクチュエータ部 3 0 は、回転軸 R_A から y 軸方向に回転軸 R_A を挟んで両側（図 1 において上側と下側）に分かれる領域のうち、一方の側に配置され、他方の側に第二アクチュエータ部 4 0 が配置されている。y 軸方向は、「圧電体の膜厚方向に直交する方向であって、かつ回転軸の軸方向と直交する直交方向」に相当する。

【0060】

図 1 の左側に示したように、第一アクチュエータ部 3 0 は、接続部 3 2 を介して第一トーションバー部 2 0 の一端と連結されている。第一トーションバー部 2 0 の他端はミラー部 1 2 に連結されている。また、図 1 の右側に示したように、第一アクチュエータ部 3 0 は、接続部 3 4 を介して第二トーションバー部 2 2 の一端と連結されている。第二トーションバー部 2 2 の他端はミラー部 1 2 に連結されている。接続部 3 2 と接続部 3 4 は、第一アクチュエータ部 3 0 とミラー支持部 1 4 とを連結する部材である。接続部 3 2 と接続部 3 4 のそれぞれが「第一接続部」の一形態に相当する。第一アクチュエータ部 3 0 と接続部 3 2 との連結部分 3 2 A、並びに、第一アクチュエータ部 3 0 と接続部 3 4 との連結部分 3 4 A のそれぞれが「第一連結部」の一形態に相当する。或いはまた、接続部 3 2 及び接続部 3 4 のそれぞれが「第一連結部」の一形態に相当すると解釈することもできる。

【0061】

第一アクチュエータ部 3 0 における回転軸方向（x 軸方向）の両側の基端部である第一基端部 3 6 A、3 6 B のそれぞれは、固定フレーム 1 8 に固定されている。第一アクチュエータ部 3 0 は、第一基端部 3 6 A、3 6 B のそれぞれが固定フレーム 1 8 に固定された構成によって両持ち梁構造で固定フレーム 1 8 に支持されている。「両持ち梁構造」という用語は、「両端支持梁構造」と同義である。固定フレーム 1 8 は、「固定部」の一形態に相当する。

【0062】

固定フレーム 1 8 の形状については、図 1 の例に限らず、様々な形態の設計が可能である。固定フレーム 1 8 は、第一アクチュエータ部 3 0 及び第二アクチュエータ部 4 0 のそれぞれの基端部を固定する機能を果たすことができればよい。固定フレーム 1 8 は、複数の部材に分割された構成とすることができる。

【0063】

例えば、図 1 に示した固定フレーム 1 8 に代えて、図 1 の左側に示した第一基端部 3 6 A 及び第二基端部 4 6 A が固定される第一固定部材と、図 1 の右側に示した第一基端部 3 6 B 及び第二基端部 4 6 B を固定する第二固定部材の二つの部材に分割されたフレーム構造とすることができる。他の構成例として、第一アクチュエータ部 3 0 の両端の第一基端部 3 6 A、3 6 B が固定される第一固定部材と、第二アクチュエータ部 4 0 の両端の第二基端部 4 6 A、4 6 B が固定される第二固定部材の二つの部材に分割されたフレーム構造とすることができる。更に他の構成例として、第一基端部 3 6 A、3 6 B 及び第二基端部 4 6 A、4 6 B のそれぞれが個々に固定される四つの固定部材に分割されたフレーム構造とすることができる。

【0064】

図1の左側に示した第一基端部36Aは、第一アクチュエータ部30に対する接続部32の連結部分32Aに対して、第一アクチュエータ部30におけるx軸方向の反対側に位置する。つまり、第一アクチュエータ部30における接続部32の連結部分32Aと、第一基端部36Aとの相対的な位置関係を見ると、連結部分32Aは、x軸方向に関してミラー部12に近い側である第一アクチュエータ部30の内側に位置し、第一基端部36Aは、x軸方向に関して、連結部分32Aよりもミラー部12から遠い側である第一アクチュエータ部30の外側に位置する。言い換えると、ミラー部12の中心からx軸方向に関して、ミラー部12の中心位置、連結部分32A、及び第一基端部36Aがこの順で、ミラー部12から次第に遠くなる位置関係になっている。

【0065】

10

同様に、図1の右側に示した第一基端部36Bは、第一アクチュエータ部30に対する接続部34の連結部分34Aに対して、第一アクチュエータ部30におけるx軸方向の反対側に位置する。つまり、第一アクチュエータ部30における接続部34との連結部分34Aは、x軸方向に関して、ミラー部12に近い側である第一アクチュエータ部30の内側に位置し、第一基端部36Bは、x軸方向に関して、連結部分34Aよりもミラー部12から遠い側である第一アクチュエータ部30の外側に位置する。言い換えると、ミラー部12の中心からx軸方向に関して、ミラー部12の中心位置、連結部分34A、及び第一基端部36Bがこの順で、ミラー部12から次第に遠くなる位置関係になっている。

【0066】

第一アクチュエータ部30は、x軸方向の両側に位置する第一基端部36A、36Bのそれぞれが固定フレーム18に拘束された両端固定型の両持ち梁構造の圧電アクチュエータである。

20

【0067】

第一トーションバー部20と第二トーションバー部22のそれぞれは、第一アクチュエータ部30の固定端の近く、つまり、第一アクチュエータ部30が変位し始める根元の部分である第一基端部36A、36Bの近くで、第一アクチュエータ部30に連結されている。

【0068】

第二アクチュエータ部40についても同様であり、第二アクチュエータ部40は、図1の左側に示したように、接続部42を介して第一トーションバー部20の一端と連結されている。第二トーションバー部22の他端はミラー部12に連結されている。また、図1の右側に示したように、第二アクチュエータ部40は、接続部44を介して第二トーションバー部22と連結されている。接続部42と接続部44は、第二アクチュエータ部40とミラー支持部14とを連結する部材である。接続部42と接続部44のそれぞれが「第二接続部」の一形態に相当する。

30

【0069】

第二アクチュエータ部40と接続部42との連結部分42A、並びに、第二アクチュエータ部40と接続部44との連結部分44Aのそれぞれが「第二連結部」の一形態に相当する。或いはまた、接続部42及び接続部44のそれぞれが「第二連結部」の一形態に相当するものと解釈することができる。

40

【0070】

第二アクチュエータ部40における回転軸方向(x軸方向)の両側の基端部である第二基端部46A、46Bのそれぞれは、固定フレーム18に固定されている。つまり、第二アクチュエータ部40は、第二基端部46A、46Bのそれぞれが固定フレーム18に固定された構成によって両持ち梁構造で固定フレーム18に支持されている。

【0071】

図1の左側に示した第二基端部46Aは、接続部42の第二アクチュエータ部40に対する連結部分42Aに対して、第二アクチュエータ部40におけるx軸方向の反対側に位置する。第二アクチュエータ部40における接続部42との連結部分42Aと、第二基端部46Aとの相対的な位置関係を見ると、連結部分42Aは、x軸方向に関してミラー部

50

12に近い側である第二アクチュエータ部40の内側に位置し、第二基端部46Aは、x軸方向に関して、連結部分42Aよりもミラー部12から遠い側である第二アクチュエータ部40の外側に位置する。言い換えると、ミラー部12の中心からx軸方向に関して、ミラー部12の中心位置、連結部分42A、及び第二基端部46Aがこの順で、ミラー部12から次第に遠くなる位置関係になっている。

【0072】

図1の右側に示した第二基端部46Bは、接続部44の第二アクチュエータ部40に対する連結部分44Aに対して、第二アクチュエータ部40におけるx軸方向の反対側に位置する。第二アクチュエータ部40における接続部44との連結部分44Aは、x軸方向に関してミラー部12に近い側である第二アクチュエータ部40の内側に位置し、第二基端部46Aは、x軸方向に関して、連結部分44Aよりもミラー部12から遠い側である第二アクチュエータ部40の外側に位置する。言い換えると、ミラー部12の中心からx軸方向に関して、ミラー部12の中心位置、連結部分44A、及び第二基端部46Bがこの順で、ミラー部12から次第に遠くなる位置関係になっている。

【0073】

第二アクチュエータ部40は、x軸方向の両側の第二基端部46A、46Bがともに固定フレーム18に拘束された両端固定型の両持ち梁構造の圧電アクチュエータである。第一トーションバー部20と第二トーションバー部22のそれぞれは、第二アクチュエータ部40の固定端の近く、つまり、第二アクチュエータ部40が変位し始める根元の部分である第二基端部46A、46Bの近くで、第二アクチュエータ部40に連結されている。

【0074】

第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40とを互いに逆方向に撓ませることにより、第一トーションバー部20と第二トーションバー部22に回転軸 R_A を回す方向の動きを与え、ミラー部12を傾き駆動させることができる。すなわち、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40とを互いに逆方向に撓ませる駆動を行うことで、第一トーションバー部20及び第二トーションバー部22に傾き変位を誘起し、ミラー部12を回転軸 R_A の周りに回転させる。すなわち、ミラー部12の反射面12Cを傾斜させる。

【0075】

<<圧電アクチュエータ部の形状について>>

本例の第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40のそれぞれは、平面視で概ね半円弧状のアクチュエータ形状を有し、両者が組み合わされて略円環形状の圧電アクチュエータ部16が構成されている。図1では、真円から僅かに扁平した楕円環状の外観形状を有する圧電アクチュエータ部16を例示しているが、アクチュエータ形状については、図示の例に限定されない。第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40のそれぞれは、真円に沿った円弧状のアクチュエータ形状であってもよいし、図1の例よりもさらに扁平率の大きい楕円弧状のアクチュエータ形状であってもよい。ただし、アクチュエータ部の面積が広い方が大きなトルクが出せるため、真円よりも楕円形状の方がより好ましい。

【0076】

<<電極部の配置形態について>>

第一アクチュエータ部30は、その上部電極として、一つの第一電極部51と、二つの第二電極部52A、52Bとを有する。つまり、第一アクチュエータ部30の上部電極は、一方の第一基端部36Aと他方の第一基端部36Bの間をつなぐ梁（ビーム）の部分に該当する可動部38の形状に沿った梁の長手方向に対して、第一電極部51と、第二電極部52A、52Bとに分かれた電極分割の形態による電極配置構造を有する。第一電極部51と第二電極部52A、52Bは、互いに独立した（つまり絶縁分離された）電極となっている。

【0077】

第一アクチュエータ部30における一方の第一基端部36Aから他方の第一基端部36

10

20

30

40

50

Bに至る可動部38の形状に沿った長さの方向を「第一アクチュエータ部30の長さ方向」と呼ぶことにすると、第一アクチュエータ部30は、第一アクチュエータ部30の長さ方向に沿って、図1の左から、第二電極部52A、第一電極部51、及び第二電極部52Bが順に並んで配置された構造を有する。第二電極部52Aと第一電極部51の間には絶縁部55が介在する。第一電極部51と第二電極部52Bの間には絶縁部57が介在する。

【0078】

第二アクチュエータ部40は、その上部電極として、二つの第三電極部63A、63Bと、一つの第四電極部64を有する。つまり、第二アクチュエータ部40の上部電極は、一方の第二基端部46Aと他方の第二基端部46Bの間をつなぐ梁（ビーム）の部分に該当する可動部48の形状に沿った梁の長手方向に対して、第三電極部63A、63Bと、第四電極部64とに分かれた電極分割の形態による電極配置構造を有する。

10

【0079】

第三電極部63A、63Bと第四電極部64は、互いに独立した（つまり絶縁分離された）電極となっている。第二アクチュエータ部40における一方の第二基端部46Aから他方の第二基端部46Bに至る可動部48の形状に沿った長さの方向を「第二アクチュエータ部40の長さ方向」と呼ぶことにすると、第二アクチュエータ部40は、第二アクチュエータ部40の長さ方向に沿って、図1の左から、第三電極部63A、第四電極部64、及び第三電極部63Bが順に並んで配置された構造を有する。第三電極部63Aと第四電極部64の間には絶縁部65が介在する。第四電極部64と第三電極部63Bの間には絶縁部67が介在する。

20

【0080】

ただし、同じ駆動電圧が印加される電極部同士については図示せぬ配線部を介して接続されていてもよい。例えば、二つの第二電極部52A、52Bの組（ペア）、二つの第三電極部63A、63Bの組、第一電極部51と第三電極部63A、63Bの組、或いは、第二電極部52A、52Bと第四電極部64の組などのように、同じ駆動電圧が印加される電極部同士については図示せぬ配線部を介して接続されていてもよい。

【0081】

圧電アクチュエータ部16における第一電極部51、第二電極部52A、52B、第三電極部63A、63B並びに第四電極部64の電極の配置形態について、詳細は後述する。

30

【0082】

<第二実施形態>

図3は第二実施形態に係るマイクロミラーデバイスの要部の構成を示す平面図である。図3に示すマイクロミラーデバイス110において、図1で説明した構成と同一又は類似する要素には同一の符号を付し、その説明は省略する。なお、図3では固定フレーム18（図1参照）の図示を省略した。マイクロミラーデバイス110は「ミラー駆動装置」の一形態に相当する。

【0083】

図3に示すマイクロミラーデバイス110は、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40とが連結され、かつ、第一基端部と第二基端部が一体化された構造となっている点で図1のマイクロミラーデバイス10と相違する。

40

【0084】

すなわち、図3に示すマイクロミラーデバイス110の圧電アクチュエータ部16は、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40とを連結された環状のアクチュエータ形状となっている。そして、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の連結部分132、134に、ミラー支持部14が連結されている。第一トーションバー部20は、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の連結部分132に連結され、第二トーションバー部22は、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の連結部分134に連結されている。

50

【0085】

図3の例では、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40とが連結された構造により、平面視で真円から僅かに扁平した楕円環状の外観（輪郭）形状を有する圧電アクチュエータ部16となっている。

【0086】

マイクロミラーデバイス110では、図1で説明した接続部32、34、42、44が省略された単純な構造となっており、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の連結部分132、134にミラー支持部14が直接連結されている。第一トーションバー部20と圧電アクチュエータ部16の連結部142が「第一連結部」の一形態に相当し、かつ、「第二連結部」の一形態に相当する。また、第二トーションバー部22と圧電アクチュエータ部16の連結部144が「第一連結部」の一形態に相当し、かつ、「第二連結部」の一形態に相当する。

10

【0087】

また、図3のマイクロミラーデバイス110では、図1で説明した第一基端部36Aと第二基端部46Aとが連結された単一の（一体型の）基端部146Aとなっている。図3の基端部146Aは、図1で説明した第一基端部36Aとしての役割を果たし、かつ、第二基端部46Aとしての役割を果たす。図3の右側の基端部146Bも同様であり、図1で説明した第一基端部36Bと第二基端部46Bとが連結された単一の（一体型の）基端部146Bとなっている。図3の基端部146Bは、図1で説明した第一基端部36Bとしての役割を果たし、かつ、第二基端部46Bとしての役割を果たす。

20

【0088】

図3に示した第二実施形態のデバイス構造は、図1で説明した第一実施形態のデバイス構造に比べて形態に比べてデバイスの形状が単純となり、製造プロセスが容易で歩留まりが高くなるという利点がある。一方、図1で説明した第一実施形態のように、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40のそれぞれが分離している構造、かつ、第一アクチュエータ部30の第一基端部36A、36Bと、第二アクチュエータ部40の第二基端部46A、46Bとが分離している構造とすることも可能である。第一実施形態のような構造を採用することで、第一アクチュエータ部30及び第二アクチュエータ部40の各アクチュエータ部にかかる応力を減少させ、ミラー部12の傾き角度が大きくなってもデバイスが破壊されるのを防ぐことができる。

30

【0089】

＜圧電アクチュエータ部の構造について＞

以下の説明では、デバイス形状が単純な第二実施形態の構造を例に説明するが、第一実施形態の構造についても同様の説明が適用される。

【0090】

図4は、図3の4-4切断線に沿う概略断面図である。図4に示すように、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40は、振動板160として機能するシリコン（Si）の基板の上に、下部電極164、圧電体166、上部電極168がこの順で積層された積層構造を有するユニモルフ型の薄膜圧電アクチュエータである。上部電極168には、第一電極部51、第二電極部52A、52B、第三電極部63A、63B、第四電極部64が含まれる。ただし、図4では、第二電極部52Bと第三電極部63Bは示されていない。

40

【0091】

下部電極164と上部電極168との間に圧電体166が介在する積層構造によって圧電変換部が構成される。圧電変換部は、圧電素子として機能する部分であり、圧電素子部、若しくは、圧電活性部という用語で言い表すこともできる。圧電変換部は、アクチュエータ部を変位させる駆動部として利用でき、かつ、センサ部として利用できる。ここでは、説明を簡単にするために、圧電変換部を駆動部として利用する形態を説明する。

【0092】

第一アクチュエータ部30と、第二アクチュエータ部40は、上部電極168と下部電

50

極 1 6 4 の間に電圧を印加することによって圧電体 1 6 6 の逆圧電効果により、図 4 の上下方向に撓み変形する圧電ユニモルフアクチュエータとして機能する。

【0093】

なお、図 4 その他の図面に示す各層の膜厚やそれらの比率は、説明の都合上、適宜変更して描いており、必ずしも実際の膜厚や比率を反映したものではない。また、本明細書では、積層構造を表現するにあたり、「Aの上にBを積層する」というときの「上」とは、Aの表面から膜の厚み方向に離れる方向を「上」として表現する。Aを水平に保持した状態でAの上面にBを重ねて構成する場合には、重力方向を下方向とするときの上下の方向と一致する。ただし、Aの姿勢を傾けたり、上下反転させたりすることも可能であり、基板や膜の姿勢に依存する積層構造の積み重ね方向が必ずしも重力の方向を基準とする上下方向と一致しない場合についても、積層構造の上下関係を混乱なく表現するために、ある基準となる部材（例えばA）の面を基準にして、その面から厚み方向に離れる方向を「上」と表現する。また、「Aの上にBを積層する」という表現は、Aに接してBをA上に直接積層する場合に限らず、AとBの間に他の1又は複数の層を介在させ、Aの上に1又は複数の層を介してBを積層する場合も有りうる。

10

【0094】

＜圧電アクチュエータ部の動作説明＞

次に、圧電アクチュエータ部 1 6 の動作について説明する。ここでは、説明を簡単にするために、第一電極部 5 1 に印加する電圧波形 V_{11} と第三電極部 6 3 A、6 3 B に印加する電圧波形 V_{21} とを同じ電圧波形 V_1 とし（ $V_{11} = V_{21} = V_1$ ）、第二電極部 5 2 A、5 2 B に印加する電圧波形 V_{12} と第四電極部 6 4 に印加する電圧波形 V_{22} とを同じ電圧波形 V_2 とする（ $V_{12} = V_{22} = V_2$ ）。また、電圧波形 V_1 と電圧波形 V_2 は互いに位相差が 180° である逆位相の関係とする（図 5 参照）。

20

【0095】

図 5 は、電圧波形 V_1 と電圧波形 V_2 の例を示した波形図である。ここでは、電圧波形 V_1 、 V_2 として正弦波形を例示した。図 5 に示すように、電圧波形 V_1 と電圧波形 V_2 は互いに逆位相（位相差 180° ）の電圧であり、図 1 から図 4 で説明した第一電極部 5 1 及び第三電極部 6 3 A、6 3 B の電極群と、第二電極部 5 2 A、5 2 B 及び第四電極部 6 4 の電極群とに対し、互いに逆位相の電圧波形 V_1 、 V_2 が印加される。

30

【0096】

電圧波形 V_1 、 V_2 はそれぞれ次のように表される。

【0097】

$$V_1 = V_{off1} + V_{1A} \sin \omega t$$

$$V_2 = V_{off2} + V_{2A} \sin (\omega t + \phi)$$

上記の式中、 V_{1A} と V_{2A} はそれぞれ電圧振幅、 ω は角周波数、 t は時間、 ϕ は位相差である。

【0098】

図 5 の例では、 $V_{1A} = V_{2A}$ 、 $\phi = 180^\circ$ を満たす電圧波形を印加した。オフセット電圧 V_{off1} 、 V_{off2} は任意である。オフセット電圧は、例えば、 V_1 、 V_2 が圧電体の分極反転電圧を超えないように設定するのが好ましい。分極反転電圧とは、抗電界に対応する電圧である。図 5 では、電圧波形 V_1 におけるオフセット電圧 V_{off1} と、電圧波形 V_2 におけるオフセット電圧 V_{off2} とは同じ電圧値 V_{off} （ $= V_{off1} = V_{off2}$ ）とした。

40

【0099】

このように逆位相の電圧波形 V_1 、 V_2 を印加することにより、圧電体 1 6 6 の逆圧電効果により、第一アクチュエータ部 3 0 と第二アクチュエータ部 4 0 とに撓み変形が生じる。電圧波形の周波数を、第一トーションバー部 2 0 及び第二トーションバー部 2 2 に傾き変位が生じるような共振モードに対応する共振周波数と一致させることにより、ミラー部 1 2 に大きな傾き変位が生じ、広い範囲をスキャンすることができる。

【0100】

50

なお、図4の例では、圧電体層を電極部の単位で分離（分割）せずに、1枚の（単一）の圧電体膜として用いているが、発明の実施に際しては、電極部の分割形態に合わせて、圧電体166も分割されていてもよい。圧電体166は上下の電極で挟まれている部分が駆動力発生部若しくは応力検出部（センサ部）として機能するため、このような圧電変換部（圧電素子部）としての動作に直接的に寄与しない不要な圧電体部分（上部電極が存在しない部分など）を除去することができる。不要な圧電体部分を除去して圧電変換部の単位で圧電体を分離することにより、アクチュエータ部の剛性が低下し、アクチュエータ部が変形しやすくなる。

【0101】

＜共振モード振動における駆動時の応力分布と電極部の配置形態の関係について＞

10

図6は共振駆動時における第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の圧電体の変位分布を模式的に示した斜視図である。図6では、第一アクチュエータ部30は「+z軸方向」に変位し、第二アクチュエータ部40は「-z軸方向」に変位している様子が示されている。図6中の矢印 B_1 と矢印 B_2 で示した部分はz軸方向のアクチュエータ変位が最も大きくなる部分である。

【0102】

図6では、図示の都合上、z軸方向の相対的な変位量をドットスクリーンのパターンの違いで示した。図6中、z軸方向の相対的な変位量の表記に関して、+z軸方向の最大変位量（つまり最大値）を100%、-z軸方向の最大変位量（つまり最小値）を-100%として記載した。

20

【0103】

また、図7は、図6に示した共振駆動時における第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の圧電体における主応力の方向の分布を模式的に示したものである。

【0104】

共振モード振動による駆動状態において第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40とが図6及び図7に示した撓み変形の状態にある場合、第一アクチュエータ部30と第二アクチュエータ部40の内部の圧電体166には引っ張り方向の応力（引張応力）がかかる部分（符号171、173A、173B）と、圧縮方向の応力（圧縮応力）がかかる部分（図7の符号172A、172B、174）とが生じる（図6参照）。このような応力分布に基づき、互いに逆方向の応力が発生する圧電体領域の区分けに対応させて、上部電極が分割され、各電極部（51、63A、63B、52A、52B、64）が配置される。

30

【0105】

ここでいう「圧縮応力」、「引張応力」とは、互いに直交する三つの主応力ベクトルの中から圧電体166の膜厚方向に略直交する平面内の二つの主応力を選び出し、そのうち絶対値が大きい方の方向（最大主応力の方向）で定義する。膜厚方向をz軸に取った場合において、膜厚方向に略直交する平面内の二つの主応力とは、x-y平面内に生じる応力であり、図7において σ_1 と σ_2 が該当する。これらx-y平面内の主応力ベクトルのうち、成分の絶対値が最も大きい方向は、図7では σ_2 の方向である。応力方向の表記方法としては、外に向かう方向のベクトルを引張方向、内に向かう方向のベクトルを圧縮方向と定義する。

40

【0106】

このように定義する理由は、概して圧電MEMSデバイスではアクチュエータ部の寸法が平面的であり、膜厚方向の応力 σ_3 がほぼ0とみなせるためである。「寸法が平面的」とは、平面方向の寸法に比べて高さが十分小さいことを意味する。「互いに逆方向の応力」とは、上記の定義に基づいて判断されるものである。上述した「x-y平面」の面方向が「圧電体の膜厚方向に直交する面内方向」に相当する。

【0107】

なお、図7において、引張方向の応力が生じる部分である引張応力領域171、173A、173Bと圧縮方向の応力が生じる部分である圧縮応力領域172A、172B、1

50

74との境界の部分（符号176, 177, 178, 179）には応力の方向が徐々に（連続的に）変化していく過渡的な領域である中間領域が存在する。

【0108】

図7に示すような、応力分布に対応して、応力方向が異なる圧電体部の領域（符号171, 172A, 172B, 173A, 173B, 174）に対して、それぞれ第一電極部51、第二電極部52A, 52B、第三電極部63A, 63B、第四電極部64が配置される。

【0109】

すなわち、図7における引張応力領域171に対して第一電極部51が設けられ、圧縮応力領域172Aに対して第二電極部52Aが設けられ、圧縮応力領域172Bに対して第二電極部52Bが設けられる。同様に、引張応力領域173Aに対して第三電極部63Aが設けられ、引張応力領域173Bに対して第三電極部63Bが設けられ、圧縮応力領域174に対して第四電極部64が設けられる。各中間領域176、177、178、179に対応してそれぞれ絶縁部55、57、65、67（図3参照）が形成される。

【0110】

共振モード振動による動作時（共振駆動時）の応力分布については、公知の有限要素法のソフトウェアを用い、デバイス寸法、材料のヤング率、デバイス形状等のパラメータを与え、モード解析法を使って解析することができる。デバイスの設計に際しては、共振モードによる駆動時の圧電体内の応力分布を解析し、その解析結果を基に、応力分布における圧縮応力領域、引張応力領域の区分に対応させて、上部電極の領域を区分けして、第一電極部51、第二電極部52A, 52B、第三電極部63A, 63B、第四電極部64の配置形態が決定される。

【0111】

また、応力方向が共通する領域に対応した電極部のグループという観点で、電極部を二つのグループに分けることができる。第一電極部51と第三電極部63A, 63Bは第一グループ（第一電極群）に属し、第二電極部52A, 52Bと第四電極部64は第二グループ（第二電極群）に属す。

【0112】

このように分割された電極部の配置形態において、同じ応力方向の領域に対応する電極部に対して同位相の駆動電圧を印加し、異なる応力方向（逆方向の応力）の領域に対応する電極部に対しては、異なる位相の（好ましくは逆位相の）駆動電圧を印加することにより、最も効率よく、圧電力を傾き変位に変換することができる。

【0113】

第一アクチュエータにおいて、図7のように、発生応力方向が異なる部分に対応させて第一電極部と第二電極部を配置することにより、最も効率良く圧電力を変位に変換できる。また、第二アクチュエータにおいても同様に、発生応力方向に応じて第三電極部、第四電極部を配置することにより、最も効率良く圧電力を変位に変換できる。

【0114】

なお、図3及び図4では、第一電極部51と第三電極部63A, 63Bに対して電圧波形 V_1 を印加し、第二電極部52A, 52Bと第四電極部64に対して、 V_1 と逆位相の電圧波形 V_2 を印加する例を示したが、第一電極部51と第三電極部63A, 63Bに対して電圧波形 V_2 を印加し、第二電極部52A, 52Bと第四電極部64に対して電圧波形 V_1 を印加することも可能である。

【0115】

また、第一電極部51、第二電極部52A, 52B、第三電極部63A, 63B及び第四電極部64のすべてを駆動用の電極として用いる態様の他、これらのうち一部の電極部をセンシング用（検出用）の電極として利用する態様も可能である。また、各電極部（51, 52A, 52B, 63A, 63B, 64）は、それぞれが単数の電極から構成される態様に限らず、電極部（51, 52A, 52B, 63A, 63B, 64）のうち、少なくとも一つの電極部が複数の電極から構成されていてもよい。

【0116】

<デバイスの利用形態及び変形例について>

以下、本発明の実施形態によるマイクロミラーデバイスの駆動方法の例を説明する。

【0117】

〔利用例1〕

図8は、第一電極部51、第二電極部52A、52B、第三電極部63A、63B及び第四電極部64のすべての電極部を駆動用の電極として用いる例である。上部電極168としての各電極部(51、52A、52B、63A、63B、64)と、下部電極164(図4参照)との間に圧電体166が介在する部分がそれぞれ圧電素子部として動作する。本例では、すべての電極部を駆動用の電極(駆動電極)として用い、各圧電素子部がす

10

【0118】

この場合、図8に示すように、第一アクチュエータ部30の第一電極部51、第二アクチュエータ部40の第三電極部63A、63Bの電極群に対して同じ電圧波形 V_1 を印加し、第一アクチュエータ部30の第二電極部52A、52B、第二アクチュエータ部40の第四電極部64の電極群に対して、 V_1 と逆位相の電圧波形 V_2 を印加する。各電極部(51、52A、52B、63A、63B、64)に対応したそれぞれの圧電素子部をすべて駆動力発生部として用いることにより、大きな変位角を実現できる。

【0119】

なお、「同位相」という表現は、位相差 0° に限らず、実用上問題にならない程度に実質的に同位相として取り扱うことができる位相差(例えば、 $\pm 10^\circ$)の許容範囲を含むものである。また、「逆位相」という表現についても、位相差 180° に限らず、実用上問題にならない程度に実質的に逆位相として取り扱うことができる位相差(例えば、 $180^\circ \pm 10^\circ$)の許容範囲を含むものである。

20

【0120】

駆動力発生部として機能する複数の圧電素子部について、素子間で動作性能を調整するために、各圧電素子部に印加する駆動電圧の電圧振幅や位相差を適宜調整することがある。このような調整の範囲で電圧振幅や位相差を変更する場合も本発明の実施の範囲に含まれる。

【0121】

〔利用例2〕

図9は、第一電極部51、第二電極部52A、52B、第三電極部63A、63B及び第四電極部64のうち一部の電極部を応力検出のためのセンシング(検出)用の電極として用いる例である。圧電変換部の電極対としての上部電極と下部電極の間を電氣的開放状態(すなわち、「オープン状態」と同義)に設定すれば、圧電体166の正圧電効果によって発生する電位差を検出することで、駆動中の応力を検出することができる。

30

【0122】

図9では、第二電極部52A、52Bと第三電極部63A、63Bを検出用の電極として用い、他の電極部を駆動用の電極として用いる例を示した。

【0123】

検出用の電極はフローティング電位とし、圧電体166の圧電効果(正圧電効果)によって発生する電圧を検出する。図9において「 s_1 」と「 s_2 」で示した電極はセンシング用の信号を取り出すための検出電極であり、フローティング電位に設定されている電極を表している。フローティング電位に設定することは、電氣的開放状態に設定することと同義である。

40

【0124】

このように、複数の電極部のうち一部の電極部を電圧検出部として用いれば、圧電体の正圧電効果によって発生した電圧を検出することができ、その検出した電圧信号(検出信号)からアクチュエータ部の応力を検出することができる。つまり、電圧検出部は応力検出部として機能する。これにより、ミラー部12の駆動中に、ミラー部12の駆動状態を

50

モニタリングし、共振状態の維持などを可能とするフィードバック駆動回路を構成することができる。

【0125】

図9で例示したように、圧電アクチュエータ部16を構成する各アクチュエータ部(30、40)について、それぞれ少なくとも一つの電圧検出部を設ける形態が好ましい。このように、アクチュエータ部ごとに電圧検出部を設けることにより、アクチュエータ部ごとに動作状態を把握することができるため、検出信号を基に適切な駆動電圧の印加制御が可能となり、より安定した共振駆動を実現できる。

【0126】

〔利用例3〕

図10は、図8で説明した第一電極部51と第四電極部64のそれぞれをさらに複数の電極に分割した例である。図10では、第一電極部51を第一アクチュエータ部30の長さ方向に三つの電極51A、51B、51Cに分割し、第四電極部64を第二アクチュエータ部40の長さ方向に三つの電極64A、64B、64Cに分割した例が示されている。

【0127】

第一電極部51を構成している複数の電極51A～51Cのうち、中央に配置される電極51Bをフローティング電位として電圧検出部(センシング用電極)として用い、残りの(左右両側の)電極51A、51Cを駆動電圧印加部(すなわち、駆動力発生部)として用いる。

【0128】

同様に、第四電極部64を構成している複数の電極64A～64Cのうち、中央に配置される電極64Bをフローティング電位として電圧検出部(センシング用電極)として用い、残りの(左右両側の)電極64A、64Cを駆動電圧印加部(すなわち、駆動力発生部)として用いる。

【0129】

これにより、電圧検出部に割く電極領域を最小限に抑え、高いスキャン角度を保ちつつ、応力検出が可能となる。

【0130】

図10では、第一電極部51と第四電極部64のそれぞれをさらに分割する形態を説明したが、これに代えて、又は、これと組み合わせて、第二電極部52A、52Bや第三電極部63A、63Bをさらに複数の電極に分割する形態も可能である。このように、第一電極部51から第四電極部64のいずれかをさらに分割し、その中のいずれかを応力検出部とし、残りを電圧印加部として用いることで、応力検出に割く部分を最小限に抑え、高いスキャン角度を保ちつつ応力検出が可能となる。

【0131】

＜実施例1の製造方法＞

実施例1として以下に示す製造方法により、マイクロミラーデバイスを作製した。

【0132】

〔手順1〕 ハンドル層350マイクロメートル[μm]、ボックス層1マイクロメートル[μm]、デバイス層24マイクロメートル[μm]の積層構造を持つSOI(Silicon On Insulator)基板上に、スパッタ法で基板温度350℃にてTi層を30ナノメートル[nm]、Ir層を150ナノメートル[nm]形成した。Ti層(30nm)とIr層(150nm)の積層体による導電層が図4で説明した「下部電極164」に相当する。

【0133】

〔手順2〕 手順1で下部電極(Ti/Ir)が積層形成された基板上に、高周波(RF; radio frequency)スパッタ装置を用いて圧電体(PZT)層を2.5マイクロメートル[μm]成膜した。

【0134】

成膜ガスは97.5%Arと2.5%O₂の混合ガスを用い、ターゲット材料としては

10

20

30

40

50

$Pb_{1.3}((Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.88}Nb_{0.12})O_3$ の組成のものを用いた。成膜圧力は2.2 ミリトル [mTorr] (約0.293 Pa)、成膜温度は450℃とした。得られたPZT層は、Nbが原子組成比で12%添加されたNbドーピングPZT薄膜であった。

【0135】

作成したPZT薄膜中に含まれるPb組成比を蛍光X線元素分析法(XRF; X-ray Fluorescence Analysis)によって測定したところ、 $Pb/(Zr+Ti+Nb)$ モル比として1.05であった。つまり、このときの化学式は、 $Pb_a(Zr_x, Ti_y, Nb_{b-x-y})_bO_c$ で表される「 $b=1$ 」として、 $a=1.05$ である。

【0136】

このように、実際に得られたペロブスカイト構造のPZT薄膜中に含まれるPb量「a」の割合は、格子間原子や欠陥などの存在により、「1.00」以外の値を取り得る。また、同様の理由により、O原子の割合cについても、「3.00」以外の値を取り得る。

【0137】

〔手順3〕手順2によりPZT層が形成された基板上に、リフトオフ法によってPt/Tiの積層構造による上部電極をパターン形成し、ICP(inductively coupled plasma; 誘導結合プラズマ)ドライエッチングによってPZT薄膜をパターンエッチングした。

【0138】

〔手順4〕その後、シリコンのドライエッチプロセスによってデバイス層をパターンエッチングし、アクチュエータ部、ミラー部、及び固定フレームの形状を加工した。

【0139】

〔手順5〕次に、基板の裏面からハンドル層を深堀エッチング(Deep RIE; Reactive Ion Etching)した。

【0140】

〔手順6〕最後に、裏面からボックス層をドライエッチングにより除去することにより、図3のような構成のマイクロミラーデバイスを作製した。

【0141】

本実施例では、PZT薄膜をスパッタ法により基板に直接成膜し、その後ドライエッチング加工することで形成している。このように、圧電体を薄膜化することで作製プロセスを簡便にし、かつ微細なパターンニングが可能になる。これによって歩留まりが大幅に向上するとともにデバイスのさらなる小型化に対応することができる。

【0142】

ただし、本発明の実施に際して、アクチュエータ部の圧電体は、薄膜圧電体に限ったものではなく、バルク圧電体を振動板に貼りつけてユニモルフアクチュエータを形成したり、二つの極性の異なる圧電体を貼りあわせてバイモルフアクチュエータとしても良い。

【0143】

<実施例1の寸法例>

実施例1に係るデバイスの形状の一例として、図11に実施例1の各寸法の具体例を示す。図11に示した各寸法a~gについて、 $a=0.05\text{mm}$ 、 $b=1.0\text{mm}$ 、 $c=4.0\text{mm}$ 、 $d=1.32\text{mm}$ 、 $e=2.96\text{mm}$ 、 $f=0.08\text{mm}$ 、 $g=0.48\text{mm}$ である。このとき、スキャンに用いる共振モードの共振周波数は3400Hz周辺である。

【0144】

寸法aは基端部(164A, 164B)のx軸方向の長さである。寸法bはアクチュエータ部(30, 40)におけるビーム(梁)部分のx軸方向の幅寸法である。寸法cはトーションバー部(20, 22)のx軸方向の長さである。寸法dはミラー部12のx軸方向の幅寸法である。寸法eはミラー部12のy軸方向の長さである。寸法fはトーションバー部(20, 22)のy軸方向の幅寸法である。寸法gは基端部(146A, 146B)のy軸方向の幅寸法である。

【0145】

<比較例1>

実施例1と全く同じ基板(SOI基板)、製造プロセス方法にて、図12に示すような

比較例 1 に係るマイクロミラーデバイスを作製した。

【0146】

図 1 2 に示すデバイス 2 1 0 において、図 3 の構成と同一又は類似する要素には同一の符号を付し、その説明を省略する。図 1 2 に示す比較例 1 のデバイス 2 1 0 は、第一アクチュエータ部 3 0 と第二アクチュエータ部 4 0 のそれぞれの上部電極がそれぞれ単一の電極部 2 5 1、2 6 4 しか持たない構造となっている。図 1 2 は、これら二つの電極部 2 5 1、2 6 4 を駆動用の電極として用いる例である。第一アクチュエータ部 3 0 の電極部 2 5 1 に対して電圧波形 V_1 を印加し、第二アクチュエータ部 4 0 の電極部 2 6 4 に対して、 V_1 と逆位相の電圧波形 V_2 を印加する構成とすることができる。

【0147】

図 1 2 のようなデバイス形態において応力検出を行う場合は、図 1 3 に示すように、二つの電極部 2 5 1、2 6 4 のうちいずれか一方の電極部を検出用（センシング）として利用する。図 1 3 では、第二アクチュエータ部 4 0 の電極部 2 6 4 をセンシングに用いる例が示されている。センシングに用いる電極部 2 6 4 はフローティング電位に設定され、圧電体の正圧電効果によって生じる電圧を検出する。図 1 3 において「s」で示した電極はセンシング用の信号を取り出すための検出電極であり、フローティング電位に設定されている電極を表している。

【0148】

＜デバイスの動作評価実験＞

実施例 1 で作製したデバイスと比較例 1 で作製したデバイスの動作性能を比較する実験を行った。図 1 4 は実験対象のデバイスにおける駆動電圧とスキャン角度の関係を示したグラフである。

【0149】

実験対象として「実施例 1（駆動のみ）」、「実施例 1（角度センシングあり）」、「比較例 1（駆動のみ）」、「比較例 1（角度センシングあり）」の 4 種類のデバイスを評価した。「実施例 1（駆動のみ）」は図 8、「実施例 1（角度センシングあり）」は図 9、「比較例 1（駆動のみ）」は図 1 2、「比較例 1（角度センシングあり）」は図 1 3 の形態にそれぞれ対応している。

【0150】

また、デバイスの寸法については、いずれも図 1 1 で例示したものである。

【0151】

各デバイスにおいて駆動用の電極部に電圧振幅 V_{PP} の正弦波による電圧波形 V_1 、 V_2 を入力し、ミラー部 1 2 の回転運動を伴う共振振動を誘起させ、ミラー部 1 2 の機械振れ角をレーザーのスキャン角度で測定した。駆動電圧の印加方法について、「実施例 1（駆動のみ）」と「実施例 1（角度センシングあり）」のデバイスは、それぞれ図 8、図 9 の説明に準ずる。「比較例 1（駆動のみ）」と「比較例 1（角度センシングあり）」のデバイスは、それぞれ図 1 2、図 1 3 の説明に準ずる。

【0152】

実験の結果を図 1 4 に示す。図 1 4 の横軸は電圧振幅（単位はボルト[V]）、縦軸は光学スキャン角度（単位は度[deg]）を示している。

【0153】

図 1 4 から明らかなように、一つのアクチュエータ部内に複数の電極部を内包する実施例 1 のデバイスは、比較例 1 のデバイスに比べて高いスキャン角度が得られている。また、一部の電極部をセンシングに利用する応力検出部を設けた場合でも、実施例 1 のデバイスは比較例 1 のデバイスと比較して高いスキャン角度が保たれていることが確認できた。

【0154】

＜圧電材料について＞

本実施形態に好適な圧電体としては、下記の一般式（P-1）で表される 1 種又は 2 種以上のペロブスカイト型酸化物を含むものが挙げられる。

【0155】

一般式 $ABO_3 \cdots (P-1)$

式中、A：Aサイトの元素であり、Pbを含む少なくとも1種の元素。

【0156】

B：Bサイトの元素であり、Ti, Zr, V, Nb, Ta, Sb, Cr, Mo, W, Mn, Sc, Co, Cu, In, Sn, Ga, Zn, Cd, Fe, Mg, Si及びNiからなる群より選ばれた少なくとも1種の元素。

【0157】

O：酸素元素。

【0158】

Aサイト元素とBサイト元素と酸素元素のモル比は1：1：3が標準であるが、これらのモル比はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で基準モル比からずれてもよい。

10

【0159】

上記一般式 (P-1) で表されるペロブスカイト型酸化物としては、チタン酸鉛、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT)、ジルコニウム酸鉛、チタン酸鉛ランタン、ジルコン酸チタン酸鉛ランタン、マグネシウムニオブ酸ジルコニウムチタン酸鉛、ニッケルニオブ酸ジルコニウムチタン酸鉛、亜鉛ニオブ酸ジルコニウムチタン酸鉛等の鉛含有化合物、及びこれらの混晶系；チタン酸バリウム、チタン酸ストロンチウムバリウム、チタン酸ビスマスナトリウム、チタン酸ビスマスカリウム、ニオブ酸ナトリウム、ニオブ酸カリウム、ニオブ酸リチウム、ビスマスフェライト等の非鉛含有化合物、及びこれらの混晶系が挙げられる。

20

【0160】

また、本実施形態の圧電体膜は、下記一般式 (P-2) で表される1種又は2種以上のペロブスカイト型酸化物 (P-2) を含むことが好ましい。

【0161】

一般式 $A_a (Zr_x, Ti_y, M_{b-x-y})_b O_c \cdots (P-2)$

式中、AがAサイトの元素であり、Pbを含む少なくとも1種の元素である。

【0162】

Mが、V、Nb、Ta、及びSbからなる群より選ばれた少なくとも1種の元素である。

。

【0163】

$0 < x < b$ 、 $0 < y < b$ 、 $0 \leq b - x - y$ 。

30

【0164】

$a : b : c = 1 : 1 : 3$ が標準であるが、これらのモル比はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で基準モル比からずれてもよい。

【0165】

ペロブスカイト型酸化物 (P-2) は、真性PZT、或いはPZTのBサイトの一部がMで置換されたものである。被置換イオンの価数よりも高い価数を有する各種ドナーイオンを添加したPZTでは、真性PZTよりも圧電性能等の特性が向上することが知られている。Mは、4価のZr、Tiよりも価数の大きい1種又は2種以上のドナーイオンであることが好ましい。かかるドナーイオンとしては、 V^{5+} 、 Nb^{5+} 、 Ta^{5+} 、 Sb^{5+} 、 Mo^{6+} 、及び W^{6+} 等が挙げられる。

40

【0166】

$b - x - y$ は、ペロブスカイト構造を取り得る範囲であれば特に制限されない。例えば、MがNbである場合、 $Nb / (Zr + Ti + Nb)$ モル比が0.05以上0.25以下であることが好ましく、0.06以上0.20以下であることがより好ましい。

【0167】

上述の一般式 (P-1) 及び (P-2) で表されるペロブスカイト型酸化物からなる圧電体膜は、高い圧電歪定数 (d31定数) を有するため、かかる圧電体膜を備えた圧電アクチュエータは、変位特性の優れたものとなる。

【0168】

50

また、一般式（P-1）及び（P-2）で表されるペロブスカイト型酸化物からなる圧電体膜を備えた圧電アクチュエータは、リニアリティの優れた電圧-変位特性を有している。これらの圧電材料は、本発明を実施する上で良好なアクチュエータ特性、センサ特性を示すものである。なお、一般式（P-2）で表されるペロブスカイト型酸化物の方が一般式（P-1）で表されるものよりも圧電定数が高くなる。

【0169】

本実施形態における圧電体の一具体例として、例えば、Nbを原子組成百分率で12%ドープしたチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）薄膜を用いることができる。スパッタリング法等によってNbを12%ドープしたPZTを成膜することにより、圧電定数 $d_{31} = 250 \text{ pm/V}$ という高い圧電特性を持つ薄膜を安定的に作製できる。

10

【0170】

なお、本実施例ではアクチュエータ部（駆動力発生部、応力検出部）に用いる圧電体材料としてPZTを選択したが、この材料に限定する必要はない。例えば、BaTiO₃、KNaNbO₃、BiFeO₃などの非鉛圧電体を用いることもできるし、AlN、ZnO₂などの非ペロブスカイト圧電体を用いることも可能である。

【0171】

<成膜方法について>

圧電体の成膜方法としては気相成長法が好ましい。例えば、スパッタリング法その他、イオンプレーティング法、有機金属気相成長法（MOCVD; Metal Organic Chemical Vapor Deposition）、パルスレーザー堆積法（PLD; Pulse Laser Deposition）など、各種の方法を適用し得る。また、気相成長法以外の方法（例えば、ゾルゲル法など）を用いることも考えられる。気相成長法やゾルゲル法などにより基板上に圧電薄膜を直接成膜する構成が好ましい。特に、本実施形態の圧電体166としては、1 μm以上10 μm以下の膜厚の薄膜であることが好ましい。

20

【0172】

<駆動電圧の波形について>

上述した実施例1においては、駆動電圧の電圧波形V₁、V₂として、図5に示したように、互いに逆位相（φ = 180°）としたが、位相差は180°からある程度シフトしていても良い。例えば、目的とする共振振動以外の成分（ノイズ振動）が生じた場合、これを消去するためにV₁、V₂間の位相差を180°から少量シフトさせることが有効な場合がある。

30

【0173】

図15にV₁、V₂間の位相差と相対変位角の関係を示す。変位角は、V₁とV₂の位相差が180°（互いに逆位相）の際に最大となり、位相差0°（互いに同位相）の際に最小となる。一般的には、変位角を十分に得るために位相差を90° ≤ φ ≤ 270°の範囲にすることが好ましい。また、位相差を130° ≤ φ ≤ 230°の範囲とすることがさらに好ましい。

【0174】

本発明の実施に際して、駆動波形の種類は2種類以上であってもよい。例えば、図16に示すように、第一電極部51に印加する電圧波形をV₁₁、第二電極部52A、52Bに印加する電圧波形をV₁₂、第三電極部63A、63Bに印加する電圧波形をV₂₁、第四電極部64に印加する電圧波形をV₂₂とすることができる。

40

【0175】

これら4種類の駆動電圧として、例えば、下記の波形を用いることができる。

【0176】

$$V_{11} = V_{off11} + V_{11A} \sin \omega t$$

$$V_{12} = V_{off12} + V_{12A} \sin (\omega t + \phi)$$

$$V_{21} = V_{off21} + V_{21A} \sin \omega t$$

$$V_{22} = V_{off22} + V_{22A} \sin (\omega t + \phi)$$

上記の式中、V_{11A}、V_{12A}、V_{21A}、V_{22A}はそれぞれ電圧振幅、ωは角周

50

波数、 t は時間、 ϕ は位相差である。位相差 ϕ は、 $90^\circ \leq \phi \leq 270^\circ$ の範囲であり、より好ましくは $130^\circ \leq \phi \leq 230^\circ$ の範囲とする。

【0177】

V_{11A} 、 V_{12A} 、 V_{21A} 、 V_{22A} は、0以上の任意の値を取りうる。 V_{11A} 、 V_{12A} 、 V_{21A} 、 V_{22A} は、すべて異なる値に設定することが可能であるし、一部又は全てを同じ値に設定することも可能である。また、上式では V_{11} と V_{21} の位相は一致し、 V_{12} と V_{22} の位相は一致しているが、これらの位相は完全に一致している必要はなく、 $\pm 10^\circ$ 程度のわずかな位相ずれは許容される。

【0178】

また、印加電圧は正弦波に限定されず、方形波、三角波などの周期波形も適用可能である。

10

【0179】

＜駆動電圧の供給手段（駆動制御部）について＞

図17はデバイスの駆動に用いられる制御系の構成例を示す図である。ここでは、図10で示したデバイス形態の制御系を例示した。図10で説明したデバイス形態の場合、図17に示すように、駆動用に用いられる第一アクチュエータ部30の第一電極部51における電極51A、51C、第二電極部52A、52B、並びに、第二アクチュエータ部40の第三電極部63A、63B、第四電極部64の電極64A、64Cのそれぞれは、駆動回路310の対応する電圧出力端子に接続される。第一アクチュエータ部30の第一電極部51の電極51A、51Cと第二アクチュエータ部40の第三電極部63A、63B

20

【0180】

第一アクチュエータ部30の第二電極部52A、52B、並びに、第二アクチュエータ部40の第四電極部64の電極64A、64Cには駆動回路310から駆動用の電圧波形 V_2 が供給される。なお、図17では、同じ駆動電圧を印加する電極部を並列に接続しているが、電極部ごとに個別に駆動電圧を供給する構成を採用してもよい。

【0181】

駆動回路310は、ミラー部12（図3参照）が回転軸 R_A を中心に回転運動を行う共振モードの共振周波数 f_x の付近でミラー部12を共振駆動させる駆動電圧の電圧波形 V_1 、 V_2 を供給する。なお、共振駆動においては、駆動電圧の周波数をデバイスの共振周波数に完全に一致させたときに変位量が最も大きくなる。しかしながら、この場合、振動が安定化するまでに時間がかかる、温度などの影響で共振周波数がわずかに変化したときに大きく変位量が低下する、などの欠点も存在する。このことを鑑みて、必要な変位量を確保できる範囲で、共振周波数からわずかにシフトさせた周波数で駆動する場合もある。「共振周波数 f_x の付近」とは、共振周波数 f_x と一致する周波数、又は、必要な変位量を確保できる範囲で、共振周波数 f_x からわずかにシフトさせた周波数を含むことを意味する。

30

【0182】

また、センシングに用いる第一アクチュエータ部30の電極51Bと、第二アクチュエータ部40の電極部64Bのそれぞれは、検出回路312に接続されている。なお、下部電極164は駆動回路310及び検出回路312の共通端子（ V_0 端子、例えば、グランド端子）に接続される。それぞれの電極は、図示せぬ基板上のパターン配線部やワイヤーボンディングなどの配線部材を介して駆動回路310又は検出回路312に接続される。

40

【0183】

センシング用の電極51Bと電極64部Bから検出回路312を介して電圧信号を検出し、その検出結果は制御回路314に通知される。制御回路314は、検出回路312から得られる信号を基に、共振を維持するように、駆動回路310に対して制御信号を送り、第一アクチュエータ部30及び第二アクチュエータ部40への駆動電圧の印加を制御する。

【0184】

例えば、圧電アクチュエータ部に印加した駆動電圧の波形と、応力検出部（センサ部）

50

から検出した波形の位相が所定の値になるように、駆動回路 310 にフィードバックをかけ、共振を維持する。制御回路 314 は、ミラー部 12 の応力検出部から得られる検出信号を基に、圧電アクチュエータ部に印加する電圧若しくは駆動周波数を制御する。

【0185】

このようなフィードバック制御回路を検出回路 312 内に組み込むことができる。また、駆動回路 310、検出回路 312、及び制御回路 314 をまとめて、ASIC (Application Specific Integrated Circuit) のような集積回路で構成することができる。

【0186】

＜実施形態の作用効果について＞

上述した実施形態によれば、アクチュエータ部の変形時に圧電体内に生じる応力の分布に合わせて電極部が配置されているため、アクチュエータ部を効率よく駆動することができ、従来構成と比較して、より大きなミラー傾斜角を得ることができる。

【0187】

また、本発明の実施形態によれば、従来構成と比較して、変位効率が向上しているため、一部の電極を応力検出用に利用する場合であっても、十分な変位角度を得ることができる。

【0188】

＜圧電アクチュエータ部の他の形態例について＞

図 18 は、第三実施形態に係るマイクロミラーデバイスの要部の構成を示す平面図である。図 18 に示すマイクロミラーデバイス 410 において、図 1 で説明した構成と同一又は類似する要素には同一の符号を付し、その説明は省略する。なお、図 18 では固定フレーム 18 (図 1 参照) の図示を省略した。マイクロミラーデバイス 410 は「ミラー駆動装置」の一形態に相当する。

【0189】

図 18 に示すマイクロミラーデバイス 410 の第一アクチュエータ部 30 は、x 軸方向の両側の端部である第一基端部 36A と 36B との間をつなぐ可動部 38 が概ね等脚台形の上底と二つの脚に対応した三辺に沿った形状を有している。同様に、マイクロミラーデバイス 410 の第二アクチュエータ部 40 は、x 軸方向の両側の端部である第二基端部 46A と 46B との間をつなぐ可動部 48 が概ね等脚台形の上底と二つの脚に対応した三辺に沿った形状を有している。

【0190】

図 18 のようなアクチュエータ形状の第一アクチュエータ部 30 及び第二アクチュエータ部 40 を採用することができる。

【0191】

第一アクチュエータ部 30 及び第二アクチュエータ部 40 のアクチュエータ形状については、様々な形態が可能である。図 1、図 3 及び図 18 で例示したように、第一アクチュエータ部 30 における x 軸方向の両側の基端部のうち一方の側の第一基端部 36A から、他方の側の第一基端部 36B に至る可動部 38 がミラー部 12 を迂回する形状を有し、かつ、第二アクチュエータ部 40 における x 軸方向の両側の基端部のうち一方の側の第二基端部 46A から、他方の側の第二基端部 46B に至る可動部 48 がミラー部 12 を迂回する形状を有する構成の様々な形態を設計可能である。

【0192】

＜ミラー支持部の変形例について＞

上述した実施形態では、第一トーションバー部 20 と第二トーションバー部 22 は、ミラー部 12 の回転軸 R_A と一致する位置に接続されており、ミラー部 12 の外側に向かって回転軸 R_A の軸方向に延設される形態となっている。また、図 3 では、ミラー部 12 の回転軸 R_A と一致する位置に第一トーションバー部 20 と第二トーションバー部 22 を接続した例を示したが、トーションバー部の接続位置は厳密に回転軸 R_A と一致していなくてもよく、また、必ずしも 1 箇所接続されている形態に限定されず、複数箇所接続されていてもよい。

10

20

30

40

50

【0193】

例えば、ミラー部12の長手方向の略中央部分（設計上の真の中央点に限らずその周辺近傍）が回転軸 R_A となる場合に、回転軸 R_A と略一致する位置の一箇所にトーションバーを接続し、これを支持する態様の他、当該略中央部分と把握される範囲内で回転軸 R_A の位置を挟んで軸対称に2箇所以上の位置でトーションバーを接続する構造も可能である。

【0194】

<応用例>

本発明のミラー駆動装置は、レーザー光等の光を反射して光の進行方向を変える光学装置として様々な用途に利用できる。例えば、光偏向器、光走査装置、レーザープリンタ、バーコード読取機、表示装置、各種の光学センサ（測距センサ、形状測定センサ）、光通信装置、レーザープロジェクタ、光干渉断層画像診断装置などに広く適用することができる。また、本発明は、光を反射する用途に限らず、音波を反射する用途のミラーデバイスにも応用できる。

10

【0195】

なお、本発明は以上説明した実施形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で当該分野の通常の知識を有するものにより、多くの変形が可能である。

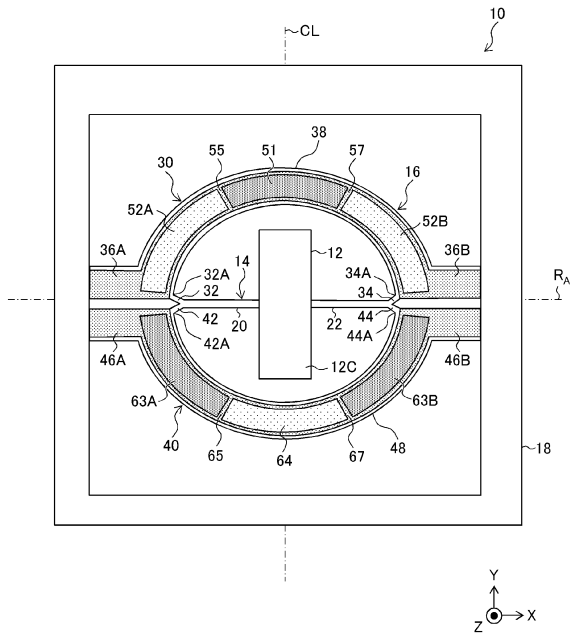
【符号の説明】

【0196】

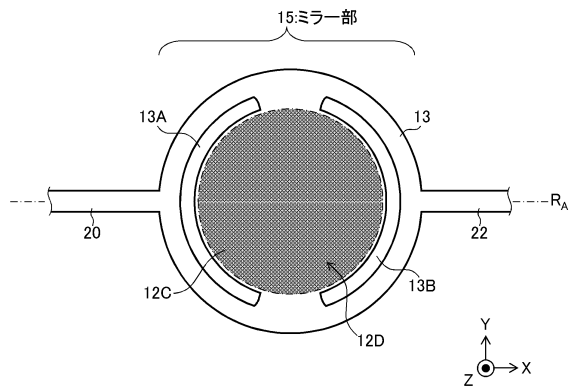
10…マイクロミラーデバイス、12…ミラー部、12C…反射面、13…変形防止フレーム、14…ミラー支持部、15…ミラー部、16…圧電アクチュエータ部、18…固定フレーム、20…第一トーションバー部、22…第二トーションバー部、30…第一アクチュエータ部、32, 34…接続部、32A, 34A…連結部分、36A, 36B…第一基端部、38…可動部、40…第二アクチュエータ部、42, 44…接続部、42A, 44A…連結部分、46A, 46B…第二基端部、48…可動部、51…第一電極部、52A, 52B…第二電極部、63A, 63B…第三電極部、64…第四電極部、110…マイクロミラーデバイス、132, 134…連結部分、142…連結部、144…連結部、160…振動板、164…下部電極、166…圧電体、168…上部電極、310…駆動回路、312…検出回路、314…制御回路、410…マイクロミラーデバイス

20

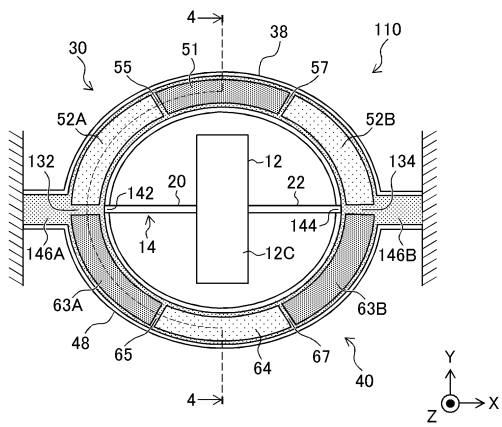
【図 1】



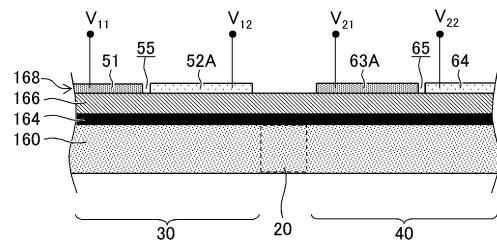
【図 2】



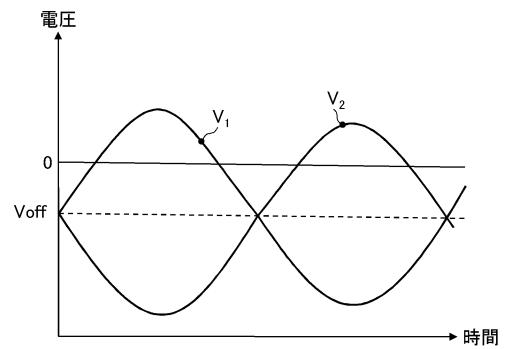
【図 3】



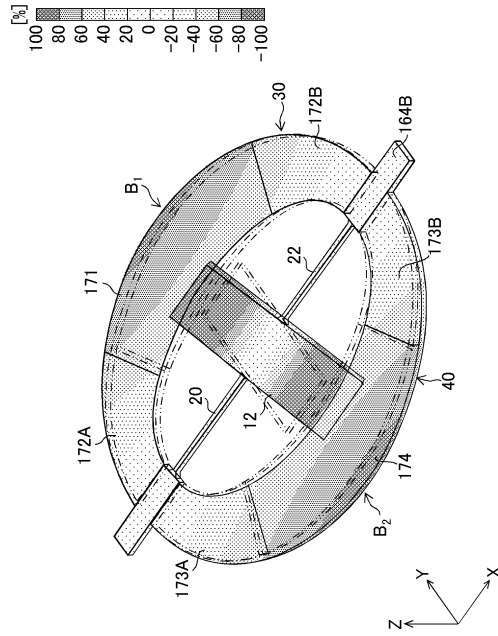
【図 4】



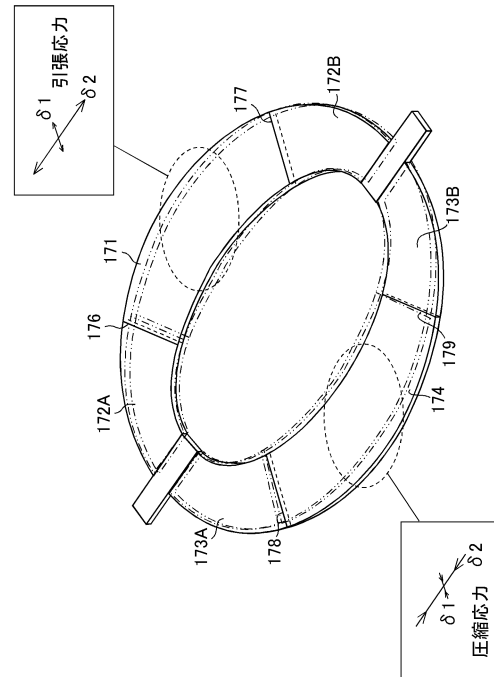
【図 5】



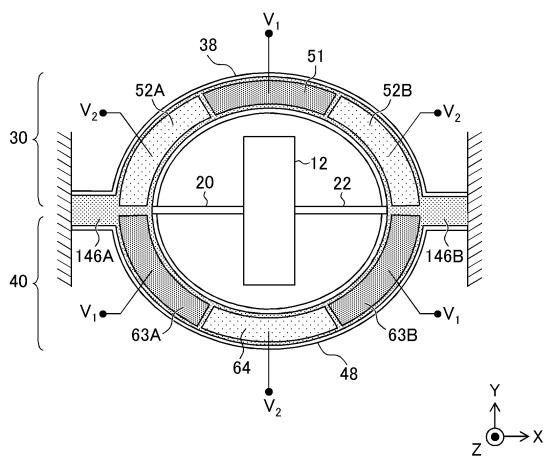
【図 6】



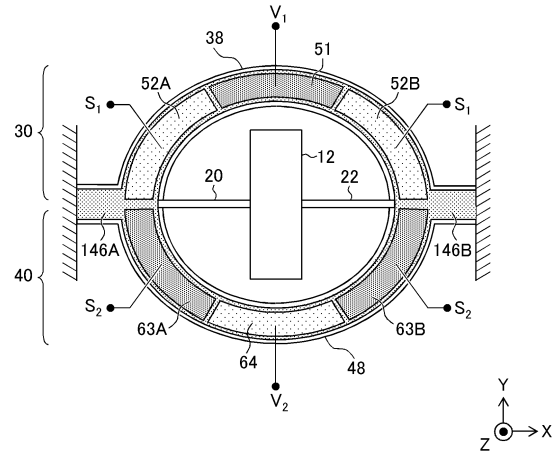
【図 7】



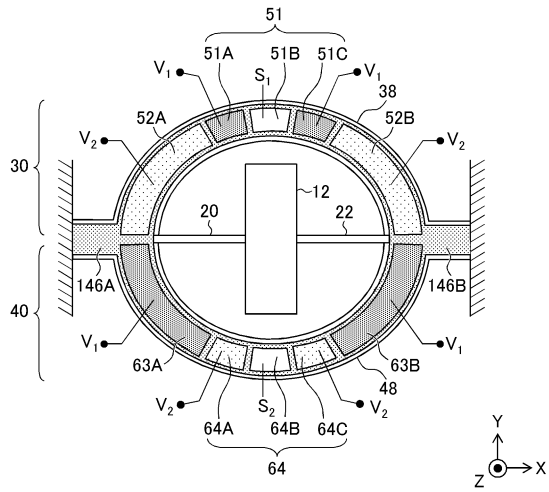
【図 8】



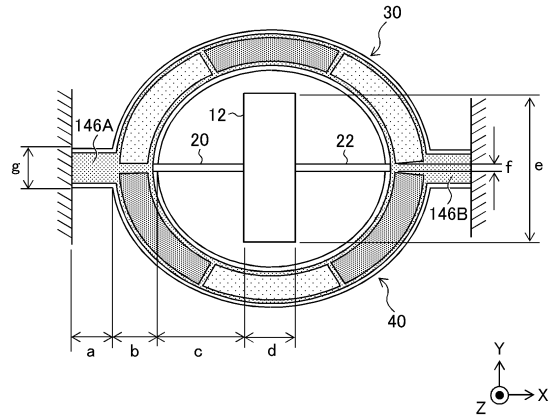
【図 9】



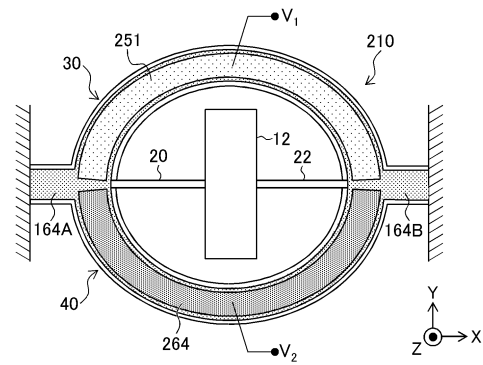
【図 10】



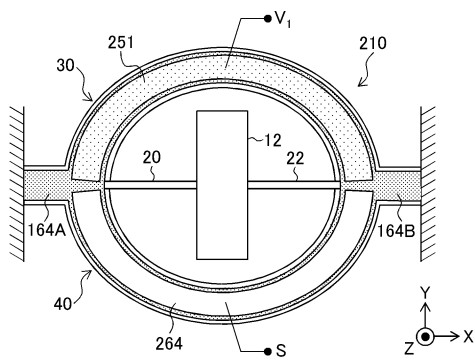
【図 11】



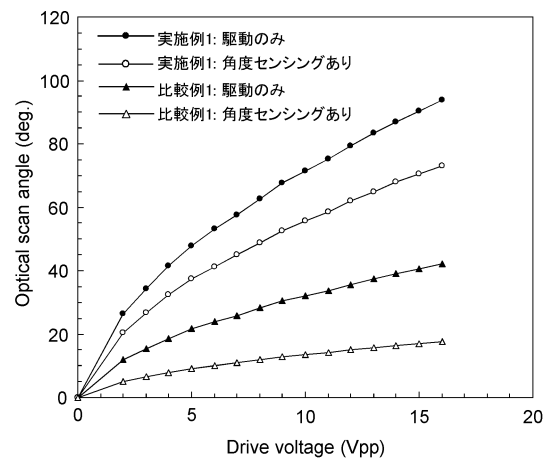
【図 12】



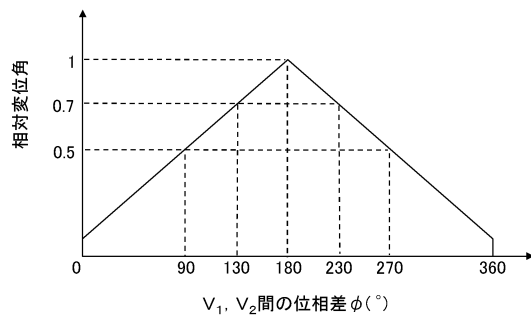
【図 13】



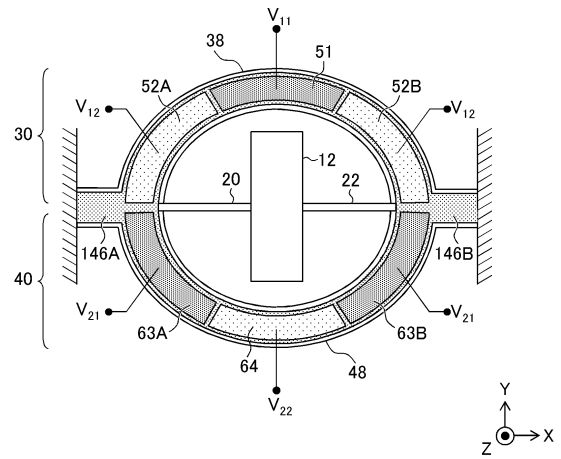
【図 14】



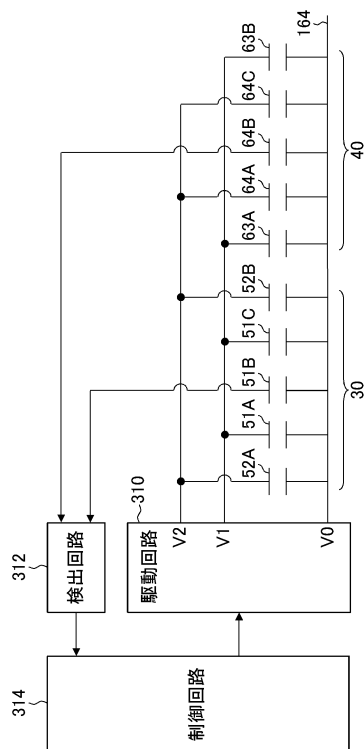
【図 15】



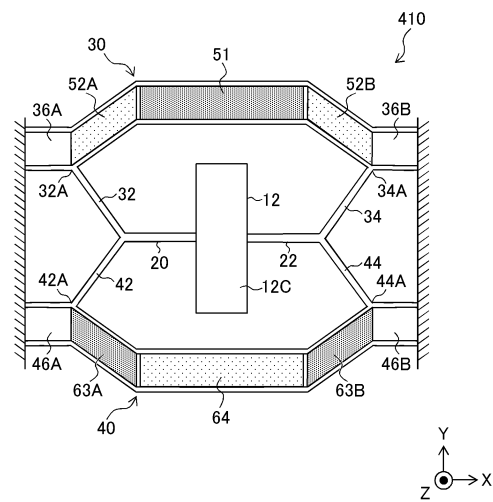
【図 16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 41/187 (2006.01) H 0 1 L 41/187

(56)参考文献 特開 2 0 1 0 - 1 9 7 9 9 4 (J P, A)
特開 2 0 1 0 - 0 8 5 5 0 6 (J P, A)
特開 2 0 0 5 - 1 2 8 1 4 7 (J P, A)
国際公開第 2 0 1 2 / 0 1 4 6 6 6 (W O, A 1)
特開 2 0 1 2 - 2 0 8 3 5 2 (J P, A)
特開平 1 1 - 1 1 2 0 4 8 (J P, A)
特許第 5 0 5 5 8 3 2 (J P, B 2)

(58)調査した分野(Int.Cl., D B名)
G 0 2 B 2 6 / 0 8
G 0 2 B 2 6 / 1 0
B 8 1 B 3 / 0 0
H 0 1 L 4 1 / 0 9
H 0 1 L 4 1 / 1 1 3
H 0 1 L 4 1 / 1 8 7
H 0 2 N 2 / 0 0