

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5385117号
(P5385117)

(45) 発行日 平成26年1月8日(2014.1.8)

(24) 登録日 平成25年10月11日(2013.10.11)

(51) Int.Cl.

F 1

H01H 57/00	(2006.01)	H01H 57/00	Z
H01H 49/00	(2006.01)	H01H 49/00	J
B81B 3/00	(2006.01)	B81B 3/00	
B81C 1/00	(2006.01)	B81C 1/00	

請求項の数 4 (全 16 頁)

(21) 出願番号

特願2009-286605 (P2009-286605)

(22) 出願日

平成21年12月17日 (2009.12.17)

(65) 公開番号

特開2011-129369 (P2011-129369A)

(43) 公開日

平成23年6月30日 (2011.6.30)

審査請求日

平成24年7月17日 (2012.7.17)

(73) 特許権者 306037311

富士フィルム株式会社

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 二瓶 靖和

神奈川県足柄上郡開成町牛島577番地
富士フィルム株式会社内

審査官 佐藤 吉信

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】圧電MEMSスイッチの製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

SOI基板上に第1下部電極が形成された電極付きSOI基板を用い、前記SOI基板の前記第1下部電極上に薄膜形成法によって第1圧電体の薄膜を成膜する工程と、

当該SOI基板上に成膜された前記第1圧電体上に第1上部電極を形成する工程と、

前記SOI基板の前記第1上部電極側に犠牲基板を接合する工程と、

前記犠牲基板が接合された前記SOI基板の裏面側に露出するシリコン(Si)層をエッチングにより除去し、前記SOI基板を二酸化シリコン(SiO₂)層まで薄層化することによって振動板を形成する工程と、

前記振動板を構成する前記二酸化シリコン(SiO₂)層上に第2下部電極を形成する工程と、

前記第2下部電極上にスパッタリング法によって第2圧電体の薄膜を成膜する工程と、

前記第2圧電体上に第2上部電極を形成する工程と、

前記第2上部電極上に絶縁層を形成する工程と、

前記絶縁層上にスイッチング用の可動接点となる可動電極を形成する工程と、

前記各工程を経て得られた前記犠牲基板から前記可動電極までの各層を含んだ積層構造体とは別に、ベース基板となるシリコン(Si)基板上に固定電極が形成されたシリコン(Si)構造体を作成しておき、前記積層構造体の前記可動電極が前記シリコン(Si)構造体の前記固定電極に対して空隙を介して対向するように、前記積層構造体と前記シリコン(Si)構造体とを接合する工程と、

10

20

前記積層構造体と前記シリコン(Si)構造体とを接合した後に前記犠牲基板を除去する工程と、

を含むことを特徴とする圧電MEMSスイッチの製造方法。

【請求項2】

SOI基板上に第1下部電極が形成された電極付きSOI基板を用い、前記SOI基板の前記第1下部電極上に薄膜形成法によって第1圧電体の薄膜を成膜する工程と、

当該SOI基板上に成膜された前記第1圧電体上に第1上部電極を形成する工程と、

その後、前記SOI基板の裏面側に露出するシリコン(Si)層の一部を二酸化シリコン(SiO₂)層までエッティング加工して凹部を形成することにより、当該凹部に露出する前記二酸化シリコン(SiO₂)層の領域にダイアフラム構造の振動板を形成する工程と、

10

前記凹部の前記二酸化シリコン(SiO₂)層上に第2下部電極を形成する工程と、

前記第2下部電極上に薄膜形成法によって第2圧電体の薄膜を成膜する工程と、

前記第2圧電体上に第2上部電極を形成する工程と、

前記第2上部電極上に絶縁層を形成する工程と、

前記絶縁層上にスイッチング用の可動接点となる可動電極を形成する工程と、

前記各工程を経て得られた前記第1上部電極から前記可動電極までの各層を含んだ積層構造体とは別に、ベース基板となるシリコン(Si)基板上に固定電極が形成されたシリコン(Si)構造体を用意し、前記積層構造体の前記可動電極が前記シリコン(Si)構造体の前記固定電極に対して空隙を介して対向するように、前記積層構造体と前記シリコン(Si)構造体とを接着する工程と、

20

を含むことを特徴とする圧電MEMSスイッチの製造方法。

【請求項3】

前記凹部は、前記シリコン(Si)層の下面から前記二酸化シリコン(SiO₂)層に向かって開口面積が徐々に小さくなるテーパー状の側面を有していることを特徴とする請求項2記載の圧電MEMSスイッチの製造方法。

【請求項4】

前記第1圧電体と前記第2圧電体は、等しい膜厚で形成されることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の圧電MEMSスイッチの製造方法。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は微小電気機械システム(MEMS:Micro Electro Mechanical System)スイッチに係り、特に、圧電体薄膜を用いた圧電駆動方式のMEMSスイッチの製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、半導体製造プロセスを応用した微小電気機械システム(MEMS)の研究・開発が盛んであり、MEMSの応用例の1つであるMEMSスイッチの分野において、各種のスイッチ構造が提案されている(例えば、特許文献1,2)。

40

【0003】

特許文献1では、可動メンブレンの表面に駆動源として、プラス(+)、マイナス(-)の電極が交互に並んだ複数の作動フィンガを設け、これら電極間の静電引力を利用してメンブレンを変形させてスイッチのオン/オフ動作を起こす構造を提案している。また、同文献1では、スイッチオフ時の強制駆動を行うために、メンブレンの裏面側にも電極群を配置する構成が提案され、電極間のエアギャップの替わりに圧電材料を満たす構成も提案されている。

【0004】

特許文献2では、基板に設置した第1のスイッチ駆動電極と、該基板上に空洞(空隙)を介在させて配置したダイアフラムに設置した第2のスイッチ駆動電極との間に電圧を印

50

加し、これら電極間に発生する静電気力によってダイアフラムを撓ませることにより、電荷蓄積電極と第1のスイッチ駆動電極とがトンネル絶縁膜を介して接触する構造となっている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特表2005-536847号公報

【特許文献2】特開2007-157511号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0006】

しかしながら、従来提案されている静電方式のMEMSスイッチには次のような問題点がある。

【0007】

(1) 駆動電荷の蓄積や誘電体損失による高速応答性の低下(スティッキング現象)

静電力による誘引、反発によるスイッチング動作の場合、電極に隣接する誘電体への電荷蓄積により、高周波数領域での高速オンオフ駆動が追随できなくなる。あるいは隣接誘電体の高周波領域での誘電損失により、高周波数領域での高速オンオフ駆動が追随できなくなるといった問題がある。

【0008】

20

(2) 静電引き寄せ接点の経時粘着現象

静電力による誘引、反発によるスイッチング動作の場合、確実なオンオフ動作保証のために、なるべく引き寄せ距離(エアギャップ)を離して、かつ引き寄せ時の駆動電圧を大きくする必要がある。その場合、引き寄せ接点部分で粘着現象が発生しやすい。ここでいう「粘着現象」とは本来意図しない接着現象を指し、永続的に接点が貼り付いてしまう現象である。

【0009】

(3) 駆動回路の消費電力、回路コスト、回路規模

特にモバイル機器のような小型装置の場合、駆動系の回路はシンプルにする必要があるが、従来の静電駆動方式の場合、駆動電圧を高くする必要があったため、消費電力が大きかった。さらに静電力による誘引、反発の動作駆動を行う場合の駆動回路は、正負両符号の電圧駆動に対応させる必要があり、駆動IC等の駆動回路は正負電圧対応とするためにコスト及び回路サイズを低減できる範囲は制限されていた。

30

【0010】

上記のような問題点に対し、本願発明者は、圧電駆動方式のMEMSスイッチを検討し、次のような技術課題に着目した。

【0011】

[1] メンブレン振動板上に薄膜形成するときの反りによるスイッチ接触不良の問題

メンブレン上に圧電体薄膜を直接成膜する場合、メンブレンサイズにも依存するが、圧電膜応力によりメンブレン振動板部分が反ってしまうという課題がある。反り量が均一であれば設定駆動電圧等で補正が可能であるが、反り量が一定でない場合はスイッチ接点の接触不良に繋がり、確実なオンオフ動作が保証できない。

40

【0012】

[2] スイッチオフ動作時の信頼性

メンブレンの片側に圧電体膜を形成し、スイッチオン時に電圧印加駆動してメンブレンを撓ませ、スイッチオフ時には圧電体駆動電圧を停止して、メンブレンのバネ力(元に戻ろうとする力)でスイッチオフ動作を行う場合、確実な接点の離間保証が難しい。さらに高速応答性も悪くなるという課題がある。

【0013】

なお、圧電体膜の場合、逆電圧を印加することで、逆方向に駆動することも可能である

50

が、一般的に、印加する電圧は、圧電体の抗電圧以下でなければ逆方向駆動は行えない。仮に、抗電圧以上の電圧を印加すると、圧電体の分極反転が生じて、再度順方向への変位駆動となってしまう。したがって、確実な接点離間動作を保証するために、大きな電圧を印加して逆方向に大きな力を発生させる余地が少ない。

【0014】

[3] オフ時強制離間のための逆電位駆動による駆動制御系のコストアップの問題
さらに逆方向に電位を与えるためには、駆動回路を正負電圧対応で設計する必要があり、駆動IC等の駆動回路のコストアップ、サイズアップとなる。

【0015】

本発明はこのような事情に鑑みてなされたもので、上記技術課題を解消し得る圧電MEMSスイッチ及びその製造方法を提供することを目的とする。 10

【課題を解決するための手段】

【0016】

前記目的を達成するために以下の発明態様を提供する。

【0017】

(発明1)：発明1に係る圧電MEMSスイッチは、ベース基板と、前記ベース基板に対して空隙を介して対向して配置される振動板と、前記振動板の前記空隙側と反対側の第1面に、第1下部電極、第1圧電体及び第2上部電極が積層形成されて成る第1圧電駆動部と、前記振動板の前記空隙側に面する第2面に、第2下部電極、第2圧電体及び第2上部電極が積層形成されて成る第2圧電駆動部と、前記ベース基板の前記空隙側に設けられた固定電極と、前記固定電極に対向して前記振動板の前記第2圧電駆動部側に固設され、前記振動板の変位に伴い前記固定電極に接離する可動電極と、を備えたことを特徴とする。
20

【0018】

本発明によれば、ベース基板に設けた固定電極に対して、可動電極を近接／離間させるための駆動源として、振動板の表裏両面(第1面及び第2面)に、第1圧電駆動部及び第2圧電駆動部を有し、これら駆動源で発生する動力で振動板を動かすことにより、接点の導通(スイッチオン動作)及び接点の離間(スイッチオフ動作)の両動作を行う。これにより、確実なスイッチオンオフ動作が保証される。

【0019】

(発明2)：発明2に係る圧電MEMSスイッチは、発明1において、前記第1圧電体及び第2圧電体は、薄膜形成法によって成膜された圧電薄膜であることを特徴とする。 30

【0020】

製造段階における振動板の反りを低減するという観点から、薄膜形成法を採用することが望ましい。薄膜形成法には、スパッタリング法に代表される物理的気相成長法(PVD)の他、化学的気相成長法(CVD)、液相成長法などがある。

【0021】

特に熱応力低減のための低温成膜可能で、かつ駆動トルクが大きい数 μm 厚以上の厚膜形成可能なスパッタ法が望ましい。

【0022】

(発明3)：発明3に係る圧電MEMSスイッチは、発明1又は2において、前記第1下部電極及び前記第1上部電極の電極間に第1電圧を印加することにより、前記振動板を前記ベース基板の方向に変位させて前記可動電極を前記固定電極に接触させるスイッチオン動作が行われ、前記第2下部電極及び前記第2上部電極の電極間に第2電圧を印加することにより、前記振動板を前記ベース基板と反対方向に変位させて前記可動電極を前記固定電極から離間させるスイッチオフ動作が行われることを特徴とする。 40

【0023】

かかる態様によれば、スイッチオン動作時に第1圧電駆動部を駆動して、振動板をベース基板に近づけ、スイッチオフ動作時に第2圧電駆動部を駆動して、振動板をベース基板から引き離す。

【 0 0 2 4 】

(発明4)：発明4に係る圧電MEMSスイッチは、発明3において、前記スイッチオン動作時に印加される前記第1電圧と前記スイッチオフ動作時に印加される前記第2電圧は同一符号の電圧であることを特徴とする。

【 0 0 2 5 】

かかる態様によれば、正負電圧駆動に対応した駆動回路を採用する場合と比較して、回路コスト、回路サイズの低減を図ることができる。

【 0 0 2 6 】

(発明5)：発明5に係る圧電MEMSスイッチは、発明4において、前記スイッチオン動作時に印加される前記第1電圧と前記スイッチオフ動作時に印加される前記第2電圧は、ともに正の電圧であることを特徴とする。 10

【 0 0 2 7 】

特に、プラス電圧による駆動系を採用することにより、一層の低コスト化、小サイズ化が可能である。

【 0 0 2 8 】

(発明6)：発明6に係る圧電MEMSスイッチは、発明1乃至5のいずれか1項において、前記振動板は、可動領域の両端部が支持部材に固定された両持ち型のダイアフラム構造により支持されていることを特徴とする。

【 0 0 2 9 】

かかる態様によれば、片持ち梁構造(カンチレバー構造)と比較して、メカニカルな経時劣化変形や、材料疲労による強度低下などが少なく、信頼性の高いスイッチ素子を実現できる。 20

【 0 0 3 0 】

(発明7)：発明7は、発明1乃至6のいずれか1項に記載の圧電MEMSスイッチを製造する方法を提供する。すなわち、発明7に係る圧電MEMSスイッチの製造方法は、SOI基板上に第1下部電極が形成された電極付きSOI基板を用い、前記SOI基板の前記第1下部電極上に薄膜形成法によって第1圧電体の薄膜を成膜する工程と、当該SOI基板上に成膜された前記第1圧電体上に第1上部電極を形成する工程と、前記SOI基板の前記第1上部電極側に犠牲基板を接合する工程と、前記犠牲基板が接合された前記SOI基板の裏面側に露出するシリコン(Si)層をエッティングにより除去し、前記SOI基板を二酸化シリコン(SiO₂)層まで薄層化することによって振動板を形成する工程と、前記振動板を構成する前記二酸化シリコン(SiO₂)層上に第2下部電極を形成する工程と、前記第2下部電極上にスパッタリング法によって第2圧電体の薄膜を成膜する工程と、前記第2圧電体上に第2上部電極を形成する工程と、前記第2上部電極上に絶縁層を形成する工程と、前記絶縁層上にスイッチング用の可動接点となる可動電極を形成する工程と、前記各工程を経て得られた前記犠牲基板から前記可動電極までの各層を含んだ積層構造体とは別に、ベース基板となるシリコン(Si)基板上に固定電極が形成されたシリコン(Si)構造体を作成しておき、前記積層構造体の前記可動電極が前記シリコン(Si)構造体の前記固定電極に対して空隙を介して対向するように、前記積層構造体と前記シリコン(Si)構造体とを接合する工程と、前記積層構造体と前記シリコン(Si)構造体とを接合した後に前記犠牲基板を除去する工程と、を含むことを特徴とする。 30 40

【 0 0 3 1 】

この製造方法を用いた場合、振動板表裏面の圧電薄膜形成及び圧電駆動電極(下部電極及び上部電極)工程をフラットなウエハー状態で実施することができパターニング工程が容易に遂行できる。さらに表裏面の電極引き出しもリソグラフィ工程で容易に設計、形成することが可能である。

【 0 0 3 2 】

(発明8)：発明8は、発明1乃至6のいずれか1項に記載の圧電MEMSスイッチを製造する他の方法を提供する。すなわち、発明8に係る圧電MEMSスイッチの製造方法は、SOI基板上に第1下部電極が形成された電極付きSOI基板を用い、前記SOI基 50

板の前記第1下部電極上に薄膜形成法によって第1圧電体の薄膜を成膜する工程と、当該S O I基板上に成膜された前記第1圧電体上に第1上部電極を形成する工程と、その後、前記S O I基板の裏面側に露出するシリコン(S i)層の一部を二酸化シリコン(S i O₂)層までエッティング加工して凹部を形成することにより、当該凹部に露出する前記二酸化シリコン(S i O₂)層の領域にダイアフラム構造の振動板を形成する工程と、前記凹部の前記二酸化シリコン(S i O₂)層上に第2下部電極を形成する工程と、前記第2下部電極上に薄膜形成法によって第2圧電体の薄膜を成膜する工程と、前記第2圧電体上に第2上部電極を形成する工程と、前記第2上部電極上に絶縁層を形成する工程と、前記絶縁層上にスイッチング用の可動接点となる可動電極を形成する工程と、前記各工程を経て得られた前記第1上部電極から前記可動電極までの各層を含んだ積層構造体とは別に、ベース基板となるシリコン(S i)基板上に固定電極が形成されたシリコン(S i)構造体を用意し、前記積層構造体の前記可動電極が前記シリコン(S i)構造体の前記固定電極に対して空隙を介して対向するように、前記積層構造体と前記シリコン(S i)構造体とを接着する工程と、を含むことを特徴とする。

【0033】

この製造方法を用いた場合、両持ち振動板構造であるメンブレン構造を接着工程なしでモノリシックに形成することができるため、駆動耐久性が優位であることが特徴である。裏面側の駆動電極配線が立体配線構造となり複雑な工程となるが、高い駆動信頼性が要求される場合には本方法が望ましい。

【0034】

(発明9)：発明9に係る圧電MEMSスイッチの製造方法は、発明8において、前記凹部は、前記シリコン(S i)層の下面から前記二酸化シリコン(S i O₂)層に向かって開口面積が徐々に小さくなるテーパー状の側面を有していることを特徴とする。

【0035】

かかる態様によれば、凹部の傾斜面を利用して第2下部電極、第2上部電極の各電極の引き出し電極パターンを形成しやすい。

【0036】

(発明10)：発明10に係る圧電MEMSスイッチの製造方法は、発明7乃至9のいずれか1項において、前記第1圧電体と前記第2圧電体は、等しい膜厚で形成されることを特徴とする。

【0037】

かかる態様によれば、製造段階における振動板の反りを低減することができ、スイッチオンオフ動作の信頼性が向上する。

【発明の効果】

【0038】

本発明によれば、スイッチ接点の接離動作を行う駆動源として、圧電駆動方式を採用し、振動板の表裏両面に圧電駆動部を設けた構成により、従来の静電方式と比較して高周波応答性(追従性)が高く、スイッチオフ時における振動板(メンブレン)の戻り方向にも強い駆動力を発揮できる。このため、接点の固着や粘着現象を低減することができる。

【0039】

また、本発明によれば、振動板の両面に圧電体膜を形成したため、製造時における基板の反り(初期反り)を低減できる。このため、確実なスイッチオンオフ動作が可能となり、信頼性の向上を実現できる。

【0040】

さらに、本発明によれば振動板の引き寄せ動作と、戻し動作を同一符号の電位(例えば、正の電位のみ)で駆動できるため、駆動I C回路系の単純化、低コスト化が可能である。

【図面の簡単な説明】

【0041】

【図1】本発明の実施形態に係る圧電MEMSスイッチの構造を示す断面図

10

20

30

40

50

【図2】第1実施例による圧電MEMSスイッチの作成プロセスを示す工程図

【図3】第1実施例による圧電MEMSスイッチの作成プロセスを示す工程図

【図4】駆動電圧波形とスイッチ電流の挙動を示す波形図

【図5】比較例として作成したMEMSスイッチの構成図

【図6】比較例における駆動電圧波形とスイッチ電流の挙動を示す波形図

【図7】第2実施例による圧電MEMSスイッチの作成プロセスを示す工程図

【発明を実施するための形態】

【0042】

以下、添付図面に従って本発明の実施形態について詳細に説明する。

【0043】

<圧電MEMSスイッチの構造>

図1は本発明の実施形態に係る圧電駆動方式のMEMSスイッチの構造を示す断面図である。このMEMSスイッチ10（「圧電MEMSスイッチ」に相当）は、ベース基板12上に固定電極（固定接点）14が配置され、この固定電極14に対向して設けられたスイッチング用の可動電極（可動接点）18を固定電極14に対して接離動作させることにより、スイッチオンオフ動作を行うものである。なお、図1では1つのスイッチ素子のみを図示したが、ベース基板12上に同様のスイッチ素子を複数形成することができる。

【0044】

可動電極18が設けられた振動板20は、支持部材22に支持され、ベース基板12に対して空隙（空洞）24を介して対向して配置される。振動板20とベース基板12の間に支持部材22が介在する構造によって、ベース基板12と振動板20の間に空隙24が形成され、可動電極18と固定電極14間に所定量の間隙（エアギャップ）Gが形成される。

【0045】

本例の振動板20は、変位し得る領域（可動領域）の両端部が支持部材22に固定（拘束）された両持ち構造のダイアフラム構造（メンブレン構造）となっている。なお、振動板20と支持部材22はそれぞれ別々の部材として構成し、これらを接合してもよいし、振動板20と支持部材22を一体に形成した単一の部材（部品）として構成することも可能である。振動板20の可動領域の周囲全周が支持部材22によって拘束されているダイアフラム構造に限らず、可動領域を挟んで対向する両端部のみを支持部材22によって拘束する梁持ち梁構造を採用することも可能である。

【0046】

本実施形態に係るMEMSスイッチ10は、振動板20を変位させる駆動源として、振動板20の表裏面に圧電駆動部（30, 40）を備える。すなわち、振動板20の表面20A（図1における上面、「第1面」に相当）及び裏面20B（図1における下面、「第2面」に相当）には、それぞれ下部電極（32, 42）、圧電体（34, 44）及び上部電極（36, 46）が積層構造で配置されている。

【0047】

振動板20の上側の表面20Aには、第1下部電極32、第1圧電体34、及び第1上部電極36の各層が順次積層されており、電極（32, 36）間に第1圧電体34を介在させた層構造により第1圧電駆動部30が構成される。第1下部電極32と第1上部電極36との間に電位差を与えると（電圧を印加すると）、これら電極間に介在する第1圧電体34が変形する。第1下部電極32は振動板20に固定されているため、振動板20上に拘束（固着）された第1圧電体34に横方向（面方向）の圧縮応力が働くことにより、振動板20は図1の下方向（下に凸の状態）に撓む。このように、振動板20上に第1圧電駆動部30を設置した構成により、d31モードの圧電歪みを利用して動作するユニモルフ型の圧電アクチュエータが形成されている。

【0048】

振動板20の裏面側も同様に、当該裏面20Bから図1の下方向に向かって、第2下部電極42、第2圧電体44、及び第2上部電極46の順に各層が積層形成されている。こ

10

20

30

40

50

これら電極(42, 46)間に第2圧電体44を介在させた層構造により第2圧電駆動部40が構成される。また、この第2上部電極46の上(図1において下面)には絶縁膜48を介して可動電極18が設けられている。この可動電極18は、既述のとおり、スイッチングの接点部となる。

【0049】

なお、図1において、振動板20の下面に第2下部電極42が形成され、第2下部電極42の下面に第2圧電体44、さらにその下面に第2上部電極46が形成される積層構造であり、「上」、「下」の用語の意味が図1の記載と相違している。これは振動板20を挟んで上下に配置される第1圧電駆動部30と第2圧電駆動部40の対称的な関係から、部材(要素)の機能の共通性に注目した名称付けである。説明の便宜上、「上」、「下」という表現を用いるが、これら用語は、図1に示したMEMSスイッチ10の上下方向に限定して解釈すべきではなく、MEMSスイッチ10の姿勢を変えた場合、或いは、見る方向を変えた場合などについて、本願の技術思想を逸脱しない範囲で合理的に解釈すべきものである。

10

【0050】

当該振動板20の裏面20Bに配置した電極(42, 46)間に駆動電圧を印加して第2圧電体44に面方向(横方向)の圧縮応力が発生すると、振動板20は図1の上方向(上に凸の状態)に撓む。このように、振動板20上に(図1において振動板20の下面に)第2圧電駆動部40を設置した構成により、d31モードで動作するユニモフル型の圧電アクチュエータが形成されている。

20

【0051】

本実施形態のMEMSスイッチ10は、共通の振動板20を挟んで上下に第1圧電駆動部30、第2圧電駆動部40を配置した構造により、各圧電駆動部(30, 40)が生み出す強い圧電駆動力によって、振動板20を下方向及び上方向の両方向に変位させることが可能である。

【0052】

<圧電体膜について>

本例における第1圧電体34及び第2圧電体44は、ともにスパッタリング法に代表される薄膜形成法(薄膜形成プロセス)によって形成されたものである。薄膜形成法としては、スパッタリングに代えて、蒸着やCVD法などを用いてもよい。薄膜形成法を採用することにより、粉末を焼結して形成する場合のような研磨工程や分極処理工程が不要となり、製造が容易となる。

30

【0053】

また、薄膜形成法によって、振動板20の表裏両面に略同等の膜厚で圧電体膜(第1圧電体34、第2圧電体44)を形成することにより、振動板20の反りを抑制することができる。なお、反り防止の観点から、特に、第1圧電体34、第2圧電体44について、同一の圧電材料(組成)で成膜する場合は、上記のように表裏両面の圧電体膜の膜厚を同一厚とすることが好ましいが、表裏の圧電体膜を含めて振動板全体が厚くなると、圧電駆動によって振動板が変位しにくくなることも懸念される。

【0054】

40

スイッチ素子の主たる動作はオン動作であること、並びに、接点を離間駆動するための裏面側の圧電体膜は、スイッチオフ動作の信頼性向上(離間保証)を主目的として設けられた補佐的な役割であること、等の観点から、裏面側の圧電体膜を表側よりも薄くする構成を採用することも可能である。ただし、振動板の表裏で圧電体膜の膜厚を異ならせると、表裏の応力差に起因する反りの問題が発生するため、このような反りを低減する観点から、振動板の表裏面で圧電材料の組成を変えたり、成膜条件を変えたりするなどの手法によって、両面での応力をなるべく揃えるようにすることが好ましい。

【0055】

具体的な方法としては、例えば、鉛、ジルコニア、チタンの三成分のうち、特に、鉛の量を少し(数%)調整することで応力を制御できる。

50

【0056】

<スイッチオン動作について>

上記構成のMEMSスイッチ10は、第1下部電極32及び第1上部電極36の電極間に所定の電位差（「第1電圧」に相当）を印加することにより、振動板20が図1の下方向に変位し、可動電極18が固定電極14に接触する。このように第1圧電駆動部30を駆動し、振動板20をベース基板12に引き寄せる動作を行うことにより、可動電極18と固定電極14とが導通し、スイッチオン（接点閉）の状態となる（図1（b）参照）。

【0057】

上記スイッチオンの状態からスイッチオフ（接点開）の状態にする場合は、第1圧電駆動部30への電圧印加を解除する一方、第2圧電駆動部40に電圧を印加する。すなわち、第2下部電極42及び第2上部電極46の電極間に所定の電位差（「第2電圧」に相当）を印加し、振動板20を図1の上方向に変位させる。このように第2圧電駆動部40を駆動し、振動板20をベース基板12から引き離す動作を行うことにより、可動電極18を固定電極14から強制的に離間させ、スイッチオフ（接点開）の状態とする。

【0058】

本実施形態のMEMSスイッチ10によれば、オン動作及びオフ動作のいずれの動作においても、第1圧電駆動部30又は第2圧電駆動部40によって振動板20に強い動力（トルク）を与えることができる。これにより、確実なオン／オフ動作が可能であり、信頼性の高いスイッチを実現できる。

【0059】

<駆動電圧の極性について>

第1圧電体34及び第2圧電体44の各圧電体層は、層面に垂直な方向に分極しており、分極方向（分極の向き）によって、駆動電圧（電位）の符号と振動板20が変位する方向の関係が規定される。

【0060】

第1圧電駆動部30を駆動するために印加する駆動電圧（「第1電圧」に相当）と第2圧電駆動部40を駆動するために印加する駆動電圧（「第2電圧」に相当）は同一符号の電圧であることが望ましい。

【0061】

正（プラス）又は負（マイナス）のいずれか一方の極の電位で第1圧電駆動部30と第2圧電駆動部40を駆動する構成を採用することにより、正負両極の駆動電圧を利用する構成と比較して、駆動回路（駆動IC）の低コスト化、回路サイズ（規模）の小型化を達成することができる。

【0062】

プラス電圧のみによる駆動、或いは、マイナス電圧のみによる駆動のいずれの構成も可能であるが、特に、プラス電圧で駆動する構成が好ましい。通常、プラス電圧で動作させる回路が汎用的であり、マイナス用のIC（集積回路）はプラス駆動用よりも回路サイズが大きいためである。

【0063】

<MEMSスイッチの製造方法：第1実施例>

次に、本発明の実施形態に係るMEMSスイッチの作成プロセスについて具体的な実施例で説明する。図2～図3は第1実施例に係る作成プロセスを示す工程図である。

【0064】

（手順1）まず、成膜基板として、SOI（Silicon On Insulator）基板60上に30nm厚のTi密着層70と150nm厚のPt下部電極71とが順次積層された電極付き基板を用意した（図2（a）参照）。SOI基板60は、シリコン（Si）層61, 62の間に酸化膜層（SiO₂層）63が介装された構造を有する。Ti密着層70とPt下部電極71の積層構造により下部電極72（「第1下部電極」に相当）が構成される。

【0065】

10

20

30

40

50

(手順2) 次いで、 $Pb_{1.3}Zr_{0.52}Ti_{0.48}O_3$ のターゲットを用い、高周波 (RF) スパッタリング装置により、 $5 \mu m$ 厚の PZT 壓電体膜 74 (「第1圧電体」に相当) を成膜した(図2(b)参照)。成膜条件は以下の通りとした。

【0066】

- ・基板温度：525 °C
- ・ターゲット印加電圧： $2.5 W/cm^2$
- ・基板 - ターゲット間距離： $60 mm$
- ・真空度： $0.5 Pa$
- ・成膜ガス： Ar/O_2 混合ガス (O_2 分圧 1.3 モル%)

(手順3) その後、通常のフォトリソグラフィー法により上部電極 76 (「第1上部電極」に相当) をパターン形成した(図2(b)参照)。上部電極 76 は、 $50 nm$ 厚の Ti 層と $200 nm$ 厚の Pt 層との積層構造とした。

【0067】

(手順4) その後、SOI 基板 60 の上部電極 76 側にシリコン(Si)の犠牲基板 78 を直接圧着接合した(図2(c))。この犠牲基板 78 はハンドリングを容易にするために接合される。なお、犠牲基板 78 の接合に際して、接着剤による接合も考えられる。ただし、本例では、成膜時に基板温度を 525 °C とする高温のプロセスを採用しているため、接着剤を用いず、電極とシリコンの直接接合の方式を採用している。成膜温度が 300 °C 程度以下のプロセスであれば、ポリイミド系など有機系の高温対応粘着剤を使用することが可能である。

【0068】

(手順5) 次に、SOI 基板 60 裏面側をリアクティブイオンエッティングして Si 層 61 を除去する(図2(d)参照)。SOI 基板 60 の埋め込み酸化膜(SiO₂ 層) 63 がストップ層となり、エッティングがストップする。なお、ドライエッティングが一般的であるが、ウエットエッティングでもよい。

【0069】

SOI 基板 60 の Si 層 61 を SiO₂ 層 63 までエッティングして、SOI 基板 60 を薄層化することにより、残った SiO₂ 層 63 とその上のシリコン層 62 とで振動板 80 が形成される。本例の場合、振動板 80 の厚みは $10 \mu m$ 程度とした。

【0070】

(手順6) 振動板 80 の裏面側についても、表面側と同様に、裏下部電極 92 (「第2下部電極」に相当)、PZT 壓電体膜 94 (「第2圧電体」に相当)、裏上部電極 96 (「第2上部電極」に相当) を形成した(図2(e)参照)。

【0071】

各電極(92、96)、圧電体膜 94 とともに、材料系や厚みなど設計仕様は、手順1～3で説明した表側の形成工程と同一とした。振動板 80 の裏面に表側と同一の仕様の電極(92、96)、圧電体(94)を形成したことにより、当初反っていた振動板 80 基板の反りが改善されたことが確認された。

【0072】

(手順7) 次に、図3(f)に示すように、裏上部電極 96 の下面に絶縁層 98 を形成し、さらにその下面にスイッチ用配線電極 100 と可動電極(接点電極) 118 を形成した。

【0073】

絶縁層 98 はポリイミドなどのポリマー材料でもよいし、SiO₂ などの無機膜でもよい。ただし、メンブレン変位(振動板 20 の変位)を低下させないためには、絶縁層 98 厚みは薄い方が望ましく、かつクラック等の生じにくい柔らかい材料系が望ましい。

【0074】

例えば、感光性ポリイミドを使用した場合、絶縁層 98 の厚みは約 $3 \mu m$ 、SiO₂ を用いた場合は厚み約 $500 nm$ とした。

【0075】

10

20

30

40

50

(手順8) 上記手順1～7とは別の工程で、予めシリコン(Si)基板をエッチング加工して、支持部材122となる部分や固定電極114及び必要な配線電極を含んだスイッチ回路を形成したSi構造体130を作成しておき、手順1～7を経て得られた積層構造体140とSi構造体130とを接着剤にて接合し、メンブレンスイッチ構造とした(図3(g)参照)。本例ではメンブレン構造の高さ(スイッチ接点距離G)は5μmとした。

【0076】

(手順9) その後、犠牲基板78を除去した(図3(h)参照)。

【0077】

<MEMSスイッチの動作確認>

10

図2及び図3で説明した第1実施例の作成プロセスによって得られた素子のスイッチ動作を確認した。振動板80の表側の圧電体膜74に駆動電圧10Vを印加したところ、スイッチ接点が接触し、スイッチオン動作が確認された。また、オフ位相時に裏面側の圧電体膜94に5～10Vの駆動電圧を印加する事で、スイッチ接点が離間し、確実なオフ動作が確認された。

【0078】

図4は、駆動電圧波形とスイッチ動作の関係を示す波形図である。図4(a)は、振動板80の表側の圧電体膜74に印加した電圧(表圧電駆動における駆動電圧)を示し、図4(b)は振動板80の裏側の圧電体膜94に印加した電圧(裏圧電駆動における駆動電圧)を示している。なお、横軸は時間、縦軸は下部電極の電位を基準とした電圧値[V]を表している。図4(c)は、スイッチ接点が閉じた時(可動電極118が固定電極114に接触した時)に回路に流れるスイッチ電流の電流値を示している。

20

【0079】

図4に示すとおり、表側の圧電体膜74に駆動電圧を印加したタイミングで接点が閉じてスイッチONとなり、スイッチ電流が流れる。その後、表側の圧電体膜74への駆動電圧の印加を解除するタイミングで裏側の圧電体膜94に駆動電圧を印加することで、接点が離間してスイッチOFFとなり、スイッチ電流が遮断される。このように、振動板80における表裏両側の圧電駆動により、オン動作及びオフ動作の両動作について振動板80にトルクを与えて可動接点(可動電極118)を接離させる構成を採用したため、確実なスイッチオンオフ動作が保証される。

30

【0080】

図4(a)(b)では、表圧電駆動における駆動電圧と、裏圧電駆動における駆動電圧を同じ電圧値としているが、異なる電圧値とすることも可能である。特に、オフ動作時には振動板80が元の状態に戻ろうとする戻り力(復元力)も作用するため、裏圧電駆動における駆動電圧を表圧電駆動における駆動電圧よりも低い電圧値に設定することが可能である。

30

【0081】

<比較例>

比較例として、図5のように振動板80の上部側(片側)のみに圧電駆動部(下部電極72, 圧電体膜74, 上部電極76)を形成した構成を作成した。この比較例では、振動板80の片側にのみ圧電体膜74が形成されているため、圧電体膜の膜厚と垂直方向の引っ張り応力による振動板80の上方向凸の反りが確認された。この方向の反りは、反り量によっては駆動電圧を印加してもスイッチ接点が接触しない方向であり、スイッチオンオフ動作保証の信頼性を著しく落とすことが判明した。

40

【0082】

さらに、図5のスイッチ素子に対して、図6(a)に示す駆動波形を圧電体膜74に印加し、スイッチオフ時の駆動時は振動板80の戻り力のみで動作させたところ、特に高周波領域においてスイッチ電流の切れが悪くなった(図6(b)参照)。

【0083】

<MEMSスイッチの製造方法：第2実施例>

50

次に、本発明の実施形態に係るMEMSスイッチの作成プロセスの第2実施例を説明する。図2～3で説明した作成プロセスに限らず、下記のようなプロセスを採用してもよい。図7は第2実施例に係る作成プロセスを示す工程図である。なお、図7中、図2～図3で説明した構成と同一又は類似の要素には同一の符号を付し、その説明は省略する。

【0084】

(手順1)まず、図2で説明した第1実施例の手順1～3と同様の手順により、図7(a)に示すように、SOI基板60上に、下部電極72、PZT圧電体膜74、上部電極76を積層形成する。

【0085】

(手順2)次に、図7(b)に示すように、SOI基板60の下側のSi層61をエッティング加工(例えば、ドライエッティング)して凹部150を形成し、メンブレン構造(ダイアフラム構造)を形成する。エッティングの際には、削りたくない部分をレジスト160でマスクし、プラズマをあてる。これにより、レジスト160のマスクパターンの開口部分についてエンチングが行われる。本例では、埋め込み酸化膜(SiO₂層)63がストップ層となり、凹部150に露出したSiO₂層63とその上のシリコン層62とで振動板80が形成される。10

【0086】

当該凹部150は、図示のように、シリコン層61の下面からSiO₂層63に向かって開口面積が徐々に小さくなるテーパー状の側面150Aを有している。このように凹部150の内側の側面を傾斜面とすることにより、後の工程(図7(c)参照)で、凹部150の内側から外部に配線を引き出すための配線電極のバターニングが容易となる。なお、傾斜した側面150Aを持つ凹部150は、エンチングの条件及び/又はマスクパターンの形状をコントロールすることによって実現できる。例えば、[1]基板面に対して斜め方向からプラズマを当てる、[2]基板を傾斜回転させる、[3]レジスト160によるパターン形状を工夫する、或いはこれらを適宜組み合わせることにより、傾斜面を有する凹部を形成することが可能である。20

【0087】

(手順3)次に、レジスト160を除去し、振動板80の裏面側、すなわち、凹部150の内側に裏下部電極92、圧電体膜94(第2圧電体に相当)、裏上部電極96を形成する。裏下部電極92の配線パターン192は図7の左側の斜面に沿って形成され、図7の左側に配線が引き出される。裏上部電極96の配線パターン196は、図7の右側の斜面に沿って形成され図7の右側に配線が引き出される。このように、裏下部電極92と裏上部電極96は、それぞれ互い違いに配線を引き出すように配線パターンが形成される。30

【0088】

(手順4)次に、裏上部電極96の下面に絶縁層98を形成し、さらにその下面にスイッチ用配線電極100と可動電極(接点電極)118を形成する(図7(d)参照)。

【0089】

(手順5)その一方で、上記の手順1～4を経て得られた積層構造体140'とは別に、ベース基板となるシリコン(Si)基板132上に固定電極114が形成されたシリコン(Si)構造体130を用意し、積層構造体140'シリコン(Si)構造体130とを接着する(図7(d)参照)。40

【0090】

<本発明の実施形態による作用効果>

上述した本発明の実施形態によれば、次のような作用効果を奏する。

【0091】

<1>圧電駆動方式を採用したことにより、静電駆動方式と比較して、高周波対応が可能であり、高周波での高速オンオフ駆動が可能である。

【0092】

<2>スイッチの接点を離間させる際の戻り方向についても圧電駆動により強い力を与えることができるため、接点の固着や粘着現象を低減することができる。また、スイッチオ50

フ動作において、接点を確実に離間させることができ、信頼性の高いスイッチ動作を保証することができる。

【0093】

<3>表裏両側の圧電駆動部を同じ符号の電位で駆動させることができ、駆動IC等の駆動回路を正電圧対応又は負電圧対応のいずれかの回路構成とすることができます。このような直流駆動により、回路コストの低減及び回路サイズの低減が可能である。

【0094】

<4>振動板20の表裏両面に圧電膜を形成したことにより、振動板20の反りを低減することができる。これにより、基材の反りに起因する接触不良等を防止することができ、確実なスイッチオンオフ動作が保証され、スイッチ動作の信頼性が向上する。

10

【0095】

<5>本発明の実施に際して、振動板20の支持構造として、片持ち梁構造（カンチレバー構造）を採用する態様も可能である。ただし、片持ち梁構造の場合、支点が片側になるため、剛性が低くなり、スイッチング動作に伴う経時劣化変形、材料疲労による強度低下など、確実なスイッチング動作が保証できなくなる場合も想定される。そのため、図1～7で説明したように、両持ち構造のダイアフラム型がより望ましい形態である。

【0096】

<その他の作用効果>

上述の実施形態では、振動板20の表裏面に設けた第1圧電駆動部30と第2圧電駆動部40を同一符号の駆動電圧で駆動することの利点を述べたが、仮に、これらの第1圧電駆動部30と第2圧電駆動部40に対して、正負の電位を印加できる駆動系を採用した場合には、表裏圧電体の同時駆動による駆動力（トルク）の増大を達成することができる。

20

【0097】

例えば、表側の第1圧電駆動部30に正の電圧を印加すると同時に、裏側の第2圧電駆動部40に負の電圧を印加することで、表裏面両方の圧電駆動部（30, 40）によって振動板20を同じ方向に駆動する力を与える。このような構成によって、より一層の駆動力アップが可能であり、より確実なオンオフスイッチ動作を実現できる。

【0098】

<他の変形例>

本発明の実施に際しては、図2乃至図4で説明した第1実施例、図7で説明した第2実施例における圧電体の材料、電極の材料、成膜条件、膜厚寸法、駆動電圧等の条件に限定されず、様々な条件で実施することが可能である。

30

【0099】

また、上述の実施形態では、1つの固定電極14に対して、可動電極18が当接する構造を例示したが、本発明の実施に際しては、ベース基板上に複数の固定電極（例えば、第1固定電極、第2固定電極）を配置し、可動電極がこれら複数の固定電極に接触することによって複数の固定電極間が導通（スイッチオン）し、可動電極が複数の固定電極から離間することによって固定電極間が非導通（スイッチオフ）の状態となるスイッチ構造を採用してもよい。

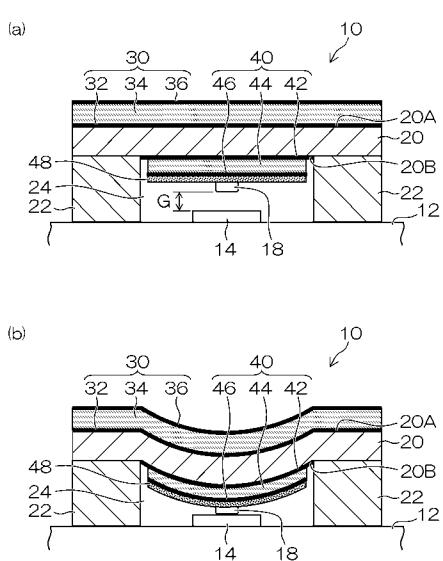
【符号の説明】

40

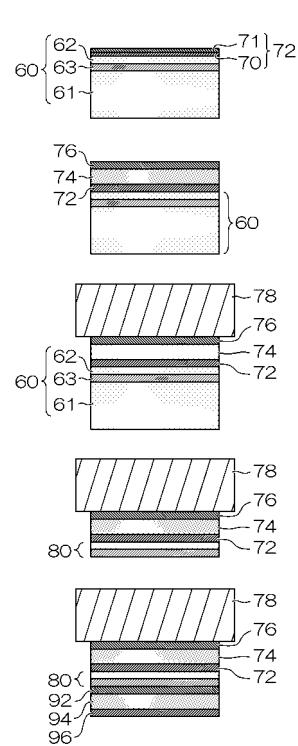
【0100】

10...MEMSスイッチ、12...ベース基板、14...固定電極、18...可動電極、20...振動板、22...支持部材、24...空隙、30...第1圧電駆動部、32...第1下部電極、34...第1圧電体、36...第1上部電極、40...第2圧電駆動部、42...第2下部電極、44...第2圧電体、46...第2上部電極、48...絶縁膜、60...SOI基板、61...シリコン(Si)層、62...シリコン(Si)層、63...酸化膜(SiO₂)層、72...下部電極、74...圧電体膜、76...上部電極、78...犠牲基板、80...振動板、92...裏下部電極、94...圧電体膜、96...裏上部電極、98...絶縁層、114...固定電極、118...可動電極

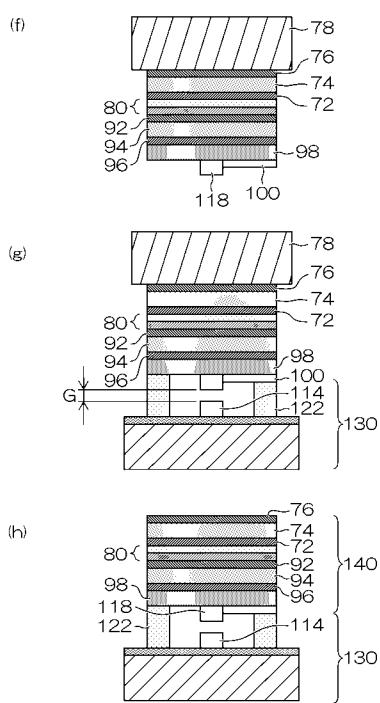
【図1】



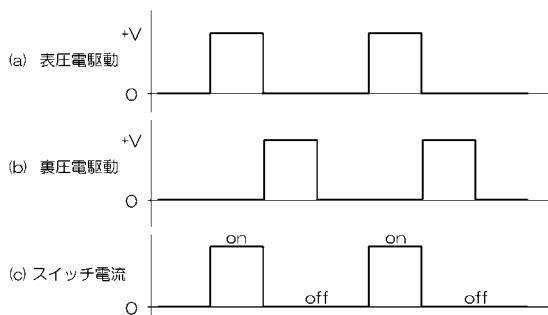
【図2】



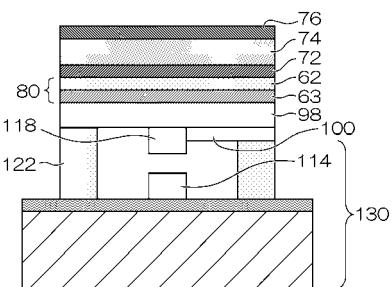
【図3】



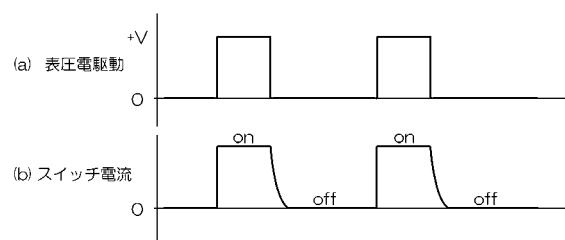
【図4】



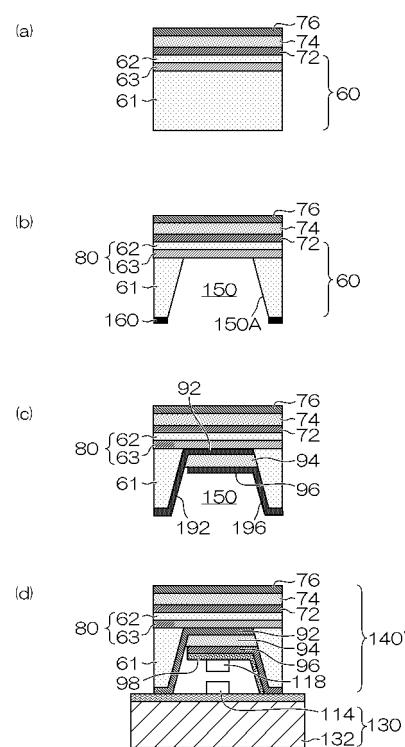
【図5】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭61-156618(JP,A)
特開2006-221956(JP,A)
特表2006-515953(JP,A)
特開2003-179085(JP,A)
実開昭59-109166(JP,U)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 01 H	57 / 00
H 01 H	49 / 00
B 81 C	1 / 00
B 81 B	3 / 00