

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5506031号
(P5506031)

(45) 発行日 平成26年5月28日 (2014. 5. 28)

(24) 登録日 平成26年3月28日 (2014. 3. 28)

(51) Int. Cl.

F I

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

H O 1 L 41/09

H O 1 L 41/253 (2013. 01)

H O 1 L 41/253

H O 2 N 2/00 (2006. 01)

H O 2 N 2/00

B

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

B 8 1 B 3/00

請求項の数 14 (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2009-297877 (P2009-297877)
(22) 出願日 平成21年12月28日 (2009. 12. 28)
(65) 公開番号 特開2011-138925 (P2011-138925A)
(43) 公開日 平成23年7月14日 (2011. 7. 14)
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 藤井 隆満
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 加藤 俊哉

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 アクチュエータ素子の駆動方法、及びデバイス検査方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

圧電体と、

該圧電体を挟んで対向する電極対と、

前記電極対に挟まれた前記圧電体が接合された振動板と、

前記圧電体及び前記振動板を含んだ可動部に対向して配置されるベース基板と、

を備え、

前記電極対に駆動電圧が印加されることにより前記可動部が前記ベース基板に近づく方向に変位し、

前記圧電体の分極 (Pr) - 電界 (E) ヒステリシス特性が電界に対して偏っており、

前記電極対に前記駆動電圧とは逆方向の電圧が印加されることにより、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位し、

前記 Pr - E ヒステリシス特性における正電界側の抗電界と負電界側の抗電界のうち、前記駆動電圧の印加による駆動時の電界方向の抗電界を Ec_a、前記逆方向の電圧の印加によって前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際の電界方向の抗電界を Ec_b とするとき、

| Ec_b | > | Ec_a | であるアクチュエータ素子を駆動する駆動方法であって、

前記可動部を前記ベース基板に近づける方向に駆動する際に、前記圧電体の抗電界 | Ec_a | 以上の電界を発生させる駆動電圧を印加し、

前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記圧電体の抗電界 |

10

20

E_{c_b} | 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記駆動電圧の極性を入れ替えた電圧を印加し、前記圧電体の d_{31} 方向の伸びを利用して前記可動部を変位させることを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 において、

前記電極対のうち前記ベース基板側の電極を下部電極、その反対側を上部電極とするとき、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際に前記電極対に印加する前記電圧の向きは、前記下部電極から前記上部電極に向かう方向の電界を発生させるものであることを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。

【請求項 4】

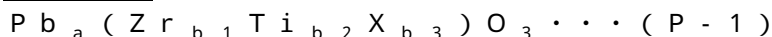
請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項において、

前記圧電体に印加される電圧と変位の関係を表す電圧 - 変位ヒステリシス特性は、負電圧側と正電圧側とにまたがる連続した範囲で略比例の関係となるリニア領域を有し、当該連続するリニア領域内で変位の方向が反転することを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項において、

前記圧電体が、下記一般式 (P - 1) で表される 1 種又は複数種のペロブスカイト型酸化物からなる (不可避不純物を含んでいてもよい。) ことを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。



(式 (P - 1) 中、X は V 族及び VI 族の元素群より選ばれた少なくとも 1 種の金属元素である。 $a > 0$ 、 $b_1 > 0$ 、 $b_2 > 0$ 、 $b_3 \geq 0$ 。 $a \geq 1.0$ であり、かつ $b_1 + b_2 + b_3 = 1.0$ である場合が標準であるが、これらの数値はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で 1.0 からずれてもよい。)

【請求項 6】

請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項において、

前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記圧電体の抗電界 | E_{c_b} | の 30 % 以上、80 % 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項において、

| E_{c_b} | > 5 | E_{c_a} | であることを特徴とするアクチュエータ素子の駆動方法。

【請求項 8】

圧電体と、

該圧電体を挟んで対向する電極対と、

前記電極対に挟まれた前記圧電体が接合された振動板と、

前記圧電体及び前記振動板を含んだ可動部に対向して配置されるベース基板と、
を備え、

前記電極対に駆動電圧が印加されることにより前記可動部が前記ベース基板に近づく方向に変位し、

前記圧電体の分極 (Pr) - 電界 (E) ヒステリシス特性が電界に対して偏っており、

前記電極対に前記駆動電圧とは逆方向の電圧が印加されることにより、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位し、

前記 Pr - E ヒステリシス特性における正電界側の抗電界と負電界側の抗電界のうち、前記駆動電圧の印加による駆動時の電界方向の抗電界を E_{c_a} 、前記逆方向の電圧の印加

10

20

30

40

50

によって前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際の電界方向の抗電界を E_{c_b} とするとき、

$|E_{c_b}| > |E_{c_a}|$ であるアクチュエータ素子のデバイス検査時に、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位するように、前記駆動電圧とは逆方向の電圧であって、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_b}|$ 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とするデバイス検査方法。

【請求項 9】

請求項 8 において、

前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記駆動電圧の極性を入れ替えた電圧を印加し、前記圧電体の d_{31} 方向の伸びを利用して前記可動部を変位させることを特徴とするデバイス検査方法。

10

【請求項 10】

請求項 8 又は 9 において、

前記電極対のうち前記ベース基板側の電極を下部電極、その反対側を上部電極とすると、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際に前記電極対に印加する前記電圧の向きは、前記下部電極から前記上部電極に向かう方向の電界を発生させるものであることを特徴とするデバイス検査方法。

【請求項 11】

請求項 8 乃至 10 のいずれか 1 項において、

前記圧電体に印加される電圧と変位の関係を表す電圧 - 変位ヒステリシス特性は、負電圧側と正電圧側とにまたがる連続した範囲で略比例の関係となるリニア領域を有し、当該連続するリニア領域内で変位の方向が反転することを特徴とするデバイス検査方法。

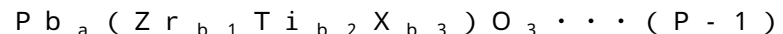
20

【請求項 12】

請求項 8 乃至 11 のいずれか 1 項において、

前記圧電体が、下記一般式 (P - 1) で表される 1 種又は複数種のペロブスカイト型酸化物からなる (不可避不純物を含んでいてもよい。) ことを特徴とするデバイス検査方法。

。



(式 (P - 1) 中、X は V 族及び V I 族の元素群より選ばれた少なくとも 1 種の金属元素である。 $a > 0$ 、 $b_1 > 0$ 、 $b_2 > 0$ 、 $b_3 \geq 0$ 。 $a + b_1 + b_2 + b_3 = 1$ であり、かつ $b_1 + b_2 + b_3 = 1$ である場合が標準であるが、これらの数値はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で 1.0 からずれてもよい。)

30

【請求項 13】

請求項 8 乃至 12 のいずれか 1 項において、

前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_b}|$ の 30% 以上、80% 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とするデバイス検査方法。

【請求項 14】

請求項 8 乃至 13 のいずれか 1 項において、

$|E_{c_b}| > 5 |E_{c_a}|$ であることを特徴とするデバイス検査方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は圧電体薄膜を用いたアクチュエータ素子に係り、特に、圧電駆動によって振動板を変位させる構造のアクチュエータ素子とその駆動方法、製造方法、及びデバイス検査方法、並びに、そのアクチュエータ素子を利用した MEMS (Micro Electro Mechanical System) スイッチの技術に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、MEMS デバイスの分野において、様々な構造のスイッチ素子やその製造技術が

50

提案されている（例えば、特許文献１～５）。特許文献１では、静電力方式で駆動する $r f$ （Radio Frequency）- $M E M S$ スイッチが提案されている。特許文献１は、電極間に半導体層を設けることによって電荷蓄積現象とこれによるスティッキング現象（素子の貼り付き）を防止する技術を開示している。特許文献２では、製造時におけるエッチング溶液の残留によるスティッキングを防止する観点から、王水を用いた電食反応を利用して犠牲層を除去する工程を含んだ $M E M S$ デバイスの製造方法が提案されている。

【０００３】

特許文献３では、静電力方式で駆動する $M E M S$ スイッチの製造工程中に発生するスティッキングの問題を解消するために、可動電極と吸引電極との間に設けられる擬制層を、互いに異種材料から成る第１犠牲層と第２犠牲層に分割形成する製造方法が提案されている。特許文献４では、固定電極を形成したベース基板の表面に、スティッキング防止用の絶縁膜を形成する構成が開示されている。

10

【０００４】

特許文献５では、圧電膜に鉛系の材料を用いずに、窒化アルミ（ $A l N$ ）や酸化亜鉛（ $Z n O$ ）の c 軸配向膜を用いてスティッキングの問題を解消する方法が提案されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００５】

【特許文献１】特開２００６－３２３３９号公報

【特許文献２】特開２００９－１３６９３４号公報

20

【特許文献３】特開２００９－９８８４号公報

【特許文献４】特開２００９－２４５８７７号公報

【特許文献５】特開２００８－９１１６７号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００６】

特許文献５の記載を基に従来の鉛系材料（ $P Z T$ 系）で構成された圧電膜を用いたアクチュエータについて説明すると、従来は図６、図７のような特性を持つ圧電体を用いて駆動されていた。図６は強誘電体膜に印加した電界 E と分極 $P r$ の関係を示した図であり、 $P r - E$ ヒステリシス曲線と呼ばれるものである。図７は、強誘電体に生じる電歪と印加電界 E の関係を示した図である。なお、これらの図面は特許文献５の図４、図５から引用した。

30

【０００７】

これらの図面に示された特性を持つ圧電体を用いたスイッチ素子（例えば、カンチレバー構造の素子）の場合、圧電体に逆方向の電圧を印加しても逆方向の変位が得られず、スティッキングを解消するような引き剥がし方向の駆動力が得られない。

【０００８】

すなわち、図６のヒステリシス特性は正負の電界に対して左右で対称である。また、図７では、印加電圧の符号（電界の向き）を変えると、歪（変位）は僅かに逆方向に動くものの、実質的には、印加電圧の符号（電界の向き）を変えても歪（変位）が同じ方向にしか動かないことを示している。したがって、逆電圧の印加による駆動ではスティッキングの防止（解消）にならない。

40

【０００９】

この点について、特許文献５では、鉛系（ $P Z T$ 系）の圧電体に代えて、 $A l N$ や $Z n O$ からなる圧電体を用いることを述べているが、 $A l N$ や $Z n O$ の圧電定数は $P Z T$ 系の圧電定数の $1 / 10$ 以下であり、アクチュエータの駆動によって発生する力も著しく弱い。このため、特許文献５に記載の方法では、スティッキングを防止するのに不十分である。

【００１０】

本発明はこのような事情に鑑みてなされたもので、スティッキング（素子の貼り付き、

50

固着)を効果的に防止することができるアクチュエータ素子の構成とその駆動方法、及びデバイス検査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】

【0011】

前記目的を達成するために本発明に係るアクチュエータ素子の駆動方法は、圧電体と、該圧電体を挟んで対向する電極対と、前記電極対に挟まれた前記圧電体が接合された振動板と、前記圧電体及び前記振動板を含んだ可動部に対向して配置されるベース基板と、を備え、前記電極対に駆動電圧が印加されることにより前記可動部が前記ベース基板に近づく方向に変位し、前記圧電体の分極(P_r) - 電界(E)ヒステリシス特性が電界に対して偏っており、前記電極対に前記駆動電圧とは逆方向の電圧が印加されることにより、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位し、前記P_r - Eヒステリシス特性における正電界側の抗電界と負電界側の抗電界のうち、前記駆動電圧の印加による駆動時の電界方向の抗電界をE_{c_a}、前記逆方向の電圧の印加によって前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際の電界方向の抗電界をE_{c_b}とすると、 $|E_{c_b}| > |E_{c_a}|$ であるアクチュエータ素子を駆動する駆動方法であって、前記可動部を前記ベース基板に近づける方向に駆動する際に、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_a}|$ 以上の電界を発生させる駆動電圧を印加し、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_b}|$ 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とする。

10

また、本発明に係るデバイス検査方法は、圧電体と、該圧電体を挟んで対向する電極対と、前記電極対に挟まれた前記圧電体が接合された振動板と、前記圧電体及び前記振動板を含んだ可動部に対向して配置されるベース基板と、を備え、前記電極対に駆動電圧が印加されることにより前記可動部が前記ベース基板に近づく方向に変位し、前記圧電体の分極(P_r) - 電界(E)ヒステリシス特性が電界に対して偏っており、前記電極対に前記駆動電圧とは逆方向の電圧が印加されることにより、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位し、前記P_r - Eヒステリシス特性における正電界側の抗電界と負電界側の抗電界のうち、前記駆動電圧の印加による駆動時の電界方向の抗電界をE_{c_a}、前記逆方向の電圧の印加によって前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際の電界方向の抗電界をE_{c_b}とすると、 $|E_{c_b}| > |E_{c_a}|$ であるアクチュエータ素子のデバイス検査時に、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位するように、前記駆動電圧とは逆方向の電圧であって、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_b}|$ 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とする。

20

30

また、前記目的を達成するために以下の発明態様を提供する。

【0012】

(発明1)：発明1に係るアクチュエータ素子は、圧電体と、該圧電体を挟んで対向する電極対と、前記電極対に挟まれた前記圧電体が接合された振動板と、前記圧電体及び前記振動板を含んだ可動部に対向して配置されるベース基板と、を備え、前記電極対に駆動電圧が印加されることにより前記可動部が前記ベース基板に近づく方向に変位するアクチュエータ素子であって、前記圧電体の分極(P_r) - 電界(E)ヒステリシス特性が電界に対して偏っており、前記電極対に前記駆動電圧とは逆方向の電圧が印加されることにより、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位することを特徴とする。

40

【0013】

本発明によれば、ベース基板に対して可動部を近づける方向に駆動するときの駆動電圧とは逆向きの電圧を印加することにより、可動部をベース基板から引き離す方向に駆動することができる。この引き離し方向の駆動力によって、素子の貼り付きを解消することができる。なお、可動部がベース基板側に変位している状態から上記逆向きの電圧印加によって圧電駆動を行うと、振動板が元の位置(基準の位置)に戻ろうとする力(バネ力)に加えて、圧電駆動による引き剥がし方向の駆動力が付与されるため、大きな引き剥がし力を得ることができる。

【0014】

(発明2)：発明2に係るアクチュエータ素子は、発明1において、前記P_r - Eヒス

50

テリシス特性における正電界側の抗電界と負電界側の抗電界のうち、前記駆動電圧の印加による駆動時の電界方向の抗電界を E_{c_a} 、前記逆方向の電圧の印加によって前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際の電界方向の抗電界を E_{c_b} とするとき、
 $|E_{c_b}| > |E_{c_a}|$ であることを特徴とする。

【0015】

好ましくは $|E_{c_b}| > 2 |E_{c_a}|$ 、より好ましくは $|E_{c_b}| > 5 |E_{c_a}|$ である。
 $|E_{c_b}|$ と $|E_{c_a}|$ の差が大きいほど（偏りが大きいほど）、貼り付き防止の駆動時に印加できる電圧が大きくなる点で好ましい。

【0016】

（発明3）：発明3に係るアクチュエータ素子は、発明2において、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記駆動電圧の極性を入れ替えた電圧を印加し、前記圧電体の d_{31} 方向の伸びを利用して前記可動部を変位させることを特徴とする。

10

【0017】

この態様は、振動板に接合された圧電体が d_{31} 方向に伸びたときに、当該振動板を含む可動部はベース基板から離間する方向に変位する。

【0018】

（発明4）：発明4に係るアクチュエータ素子は、発明2又は3において、前記可動部を前記ベース基板に近づける方向に駆動する際に印加される前記駆動電圧は前記圧電体の抗電界 $|E_{c_a}|$ 以上の電界を発生させるものであり、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際に印加される前記電圧は、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_b}|$ 以下の電界を発生させるものであることを特徴とする。

20

【0019】

実用上な観点から、貼り付き防止駆動の際に印加する電圧による印加電界は、抗電界 $|E_{c_b}|$ の10%以上であることが好ましく、また、抗電界 $|E_{c_b}|$ の80%以下であることが好ましい。さらに好ましくは、抗電界 $|E_{c_b}|$ の30%以上、80%以下とする。

【0020】

（発明5）：発明5に係るアクチュエータ素子は、発明1乃至4のいずれか1項において、前記電極対のうち前記ベース基板側の電極を下部電極、その反対側を上部電極とするとき、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際に前記電極対に印加する前記電圧の向きは、前記下部電極から前記上部電極に向かう方向の電界を発生させるものであることを特徴とする。

30

【0021】

かかる態様によれば、通常のアクチュエータ駆動（可動部をベース基板に近づける方向の駆動）のときには、上部電極から下部電極に向かう方向の電界を印加し、貼り付き防止駆動のときには、これと逆方向の電界を印加する。

【0022】

これにより、通常の駆動時には上部電極に正電圧を印加することが可能であり、通常駆動に関して一般的な正電圧駆動用の駆動回路（ドライバ）を用いることができる。

40

【0023】

（発明6）：発明6に係るアクチュエータ素子は、発明1乃至5のいずれか1項において、前記圧電体に印加される電圧と変位の関係を表す電圧 - 変位ヒステリシス特性は、負電圧側と正電圧側とにまたがる連続した範囲で略比例関係となるリニア領域を有し、当該連続するリニア領域内で変位の方向が反転することを特徴とする。

【0024】

かかる特性を持つ圧電体は、印加電界の方向が反転しても、変位がリニアに変化する領域があり、逆方向の駆動に好適である。

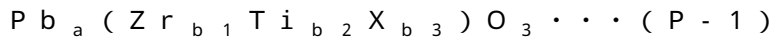
【0025】

（発明7）：発明7に係るアクチュエータ素子は、発明1乃至6のいずれか1項におい

50

て、前記圧電体が、下記一般式（ $P-1$ ）で表される１種又は複数種のペロブスカイト型酸化物からなる（不可避不純物を含んでいてもよい。）ことを特徴とする。

【0026】



式（ $P-1$ ）中、 X はⅤ族及びⅥ族の元素群より選ばれた少なくとも１種の金属元素である。 $a > 0$ 、 $b_1 > 0$ 、 $b_2 > 0$ 、 $b_3 = 0$ 。 $a = 1.0$ であり、かつ $b_1 + b_2 + b_3 = 1.0$ である場合が標準であるが、これらの数値はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で 1.0 からずれてもよい。

【0027】

かかる圧電体膜は、絶対値の小さい抗電界の極性が負であり、 P_r-E ヒステリシスが正電界側に偏った圧電特性を有している。

10

【0028】

（発明８）：発明８に係るアクチュエータ素子の駆動方法は、発明１乃至７のいずれか１項に記載のアクチュエータ素子を駆動する駆動方法であって、前記 P_r-E ヒステリシス特性における正電界側の抗電界と負電界側の抗電界のうち、前記駆動電圧の印加による駆動時の電界方向の抗電界を E_{c_a} 、前記逆方向の電圧の印加によって前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際の電界方向の抗電界を E_{c_b} とすると、前記可動部を前記ベース基板に近づける方向に駆動する際に、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_a}|$ 以上の電界を発生させる駆動電圧を印加し、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位する際には、前記圧電体の抗電界 $|E_{c_b}|$ 以下の電界を発生させる電圧を印加することを特徴とする。

20

【0029】

発明４で説明したとおり、貼り付き防止駆動時の印加電界は、抗電界 $|E_{c_b}|$ の 80% 以下であることが好ましく、さらに好ましくは、抗電界 $|E_{c_b}|$ の 30% 以上、 80% 以下とする。

【0030】

（発明９）：発明９は、発明１乃至７のいずれか１項に記載のアクチュエータ素子のデバイス検査時に、前記可動部が前記ベース基板から離れる方向に変位するように、前記駆動電圧とは逆方向の電圧を印加することを特徴とするデバイス検査方法を提供する。

【0031】

30

例えば、エージングテスト（出荷前の検査）にてスティッキングが発生している問題のある素子について、上述の貼り付き防止用の駆動によりスティッキングを解除（解消）することができ、出荷可能な素子とすることができる。これにより、歩留まりが向上する。

【0032】

（発明１０）：発明１０は、発明１乃至７のいずれか１項に記載のアクチュエータ素子を用いたMEMSスイッチであって、前記ベース基板上に固定電極が設けられ、前記可動部の一部に、前記固定電極に対して接離する可動電極が設けられ、これら固定電極及び可動電極間の距離が $20\mu m$ 以下であることを特徴とするMEMSスイッチを提供する。

【0033】

発明１乃至７に係るアクチュエータ素子における貼り付き防止の機能は、ベース基板と可動部との離間距離が小さいときに、特に、効果的である。発明１０に示した態様のよう、スイッチ用接点電極間の距離が $20\mu m$ 以下のMEMSスイッチに好適である。好ましくは、電極間の距離が $10\mu m$ 以下、さらに好ましくは $5\mu m$ 以下のスイッチ素子に有効である。

40

【0034】

発明１０は、高周波領域の低損失スイッチング素子である rf -MEMSスイッチに適用できる。 rf -MEMSスイッチは、MEMS技術でスイッチ構造体が作製され、アクチュエータ部の機械的な変位によって接点の導通（ON）と開放（OFF）を行う素子である。

【0035】

50

(発明 11) : 発明 11 は、発明 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載のアクチュエータ素子の製造方法であって、前記可動部と前記ベース基板との間に液体が浸入し得るウェットエッチング工程又は洗浄工程があることを特徴とするアクチュエータ素子の製造方法を提供する。

【0036】

発明 1 乃至 7 に係るアクチュエータ素子の用途は、上記の rf-MEMS スイッチに代表されるスイッチ素子に限らず、光変調素子など、様々な応用例がある。発明 11 は、これら各種デバイスの製造方法に適用できる。

【0037】

ウェットエッチング工程や洗浄工程によってデバイス内に残存する液はスティッキングの原因となりやすい。この点、本発明による貼り付き防止用の駆動によってスティッキングを解除でき、歩留まりが向上する。

【0038】

(発明 12) : 発明 12 は、発明 1 乃至 7 のいずれか 1 項に記載のアクチュエータ素子の製造方法であって、前記ベース基板となる第 1 のシリコン (Si) ウエハと、前記圧電体の膜を形成した第 2 のシリコン (Si) ウエハの少なくとも 2 枚の Si ウエハを貼り合わせる接合工程を含み、前記接合工程の前に、前記第 2 の Si ウエハ上に前記圧電体を成膜し、当該成膜後の前記第 2 の Si ウエハと前記第 1 の Si ウエハとを貼り合わせることを特徴とするアクチュエータ素子の製造方法を提供する。

【0039】

かかる製造方法によれば、目的のデバイスを容易に作製することができる。

【発明の効果】

【0040】

本発明によれば、アクチュエータ素子の貼り付き (スティッキング) を効果的に防止することができる。また、素子の歩留まりの向上を達成できる。

【図面の簡単な説明】

【0041】

【図 1】本実施形態に用いた圧電体膜 (膜厚 4 μm) の Pr-E ヒステリシス特性を示す図

【図 2】図 1 の特性を有する圧電体膜を備えた圧電アクチュエータを駆動した場合の駆動電圧と変位の関係 (電界 変位ヒステリシス特性) を示す図

【図 3】図 2 の圧電特性を調べた圧電アクチュエータの構成図

【図 4】本発明の実施形態に係る rf-MEMS スイッチの作製プロセスを示す工程図

【図 5】図 4 の作製プロセスで製造した rf-MEMS スイッチを上から見た平面図

【図 6】従来の圧電体 (PZT 系) の Pr-E ヒステリシス特性を示す図 (特許文献 5 の図 4 から引用)

【図 7】従来の圧電体 (PZT 系) の電歪と印加電界の関係を示す図 (特許文献 5 の図 5 から引用)

【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】

< 圧電体の材料 >

まず、本発明の実施形態に用いる圧電材料について説明する。本例で用いる圧電体は、チタン酸ジルコン酸鉛 ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 、俗称「PZT」と呼ばれるもの) をベースとしている。PZT では、Zr、Ti はいずれも 4 価のイオンであり、 PbTiO_3 から PbZrO_3 まで、Ti : Zr は全ての濃度比率を取り得る。このうち、 PbTiO_3 の結晶系である正方晶、 PbZrO_3 の結晶系である菱面体のちょうど間の組成である Zr : Ti が 52 : 48、または 53 : 47 である組成が特に圧電特性が良好であり、この特性がアクチュエータ用圧電体として使われている。この組成は MPB 組成と呼ばれる

10

20

30

40

50

。

【0044】

ドーパントを何も添加しない真性PZTに対し、Nb⁵⁺などの4価よりも価数の大きいイオンを微量添加して圧電特性を向上させたものを変性PZTと言う。本実施例で用いるPZTでは、10%程度以上のNb添加が可能であり、高特性なPZT(変性PZT)が得られる。例えば、 $d_{31} = 200 \sim 300 \text{ pm/V}$ という高い圧電性が得られる。

【0045】

図1は、本実施形態に用いた圧電体膜(膜厚4 μm)のPr-Eヒステリシス特性を示したものである。ここでは、Nbをドーブした変性PZT膜を用いた。なお、図1の横軸は「駆動電圧」(単位:ボルト[V])となっているが、電圧を膜厚で除算すると電界になる。抗電界はP-Eヒステリシス特性のグラフにて、残留分極がゼロとなる点であり、本例における圧電体膜の抗電界は正電界側(E_{c+})が約35kV/cm、負電界側(E_{c-})が約7.5kV/cmである。図1中の V_{c+} は正電界側の抗電界(E_{c+})に対応した電圧(抗電界 E_{c+} と膜厚の積)、 V_{c-} は負電界側の抗電界(E_{c-})に対応した電圧(抗電界 E_{c-} と膜厚の積)である。

10

【0046】

図6で説明したとおり、従来の一般的な圧電体のPr-Eヒステリシスは、分極値を示すy軸に対して略対称であり、負電界側の抗電界 E_{c1} の絶対値と正電界側の抗電界 E_{c2} とは略一致する($|E_{c1}| \approx |E_{c2}|$)。

【0047】

これに対し、本実施形態で用いるPZTN膜は、スパッタリング法等の気相成長により成膜されたものであり、当該PZTN膜のPr-Eヒステリシスは図1のように、正電界側に偏った、すなわちy軸に対して非対称なものである。負電界側の抗電界 E_{c-} (「 E_{c_a} 」に相当)の絶対値と正電界側の抗電界 E_{c+} (「 E_{c_b} 」に相当)の絶対値が異なり、 $|E_{c+}| > |E_{c-}|$ の関係がある。このように正電界側に偏った非対称P-Eヒステリシスを有する圧電体膜では、正電界を印加した場合は抗電界 E_{c+} が大きいため分極されにくく、負電界を印加した場合は抗電界 E_{c-} の絶対値が小さいため分極されやすい。

20

【0048】

つまり、抗電界値の絶対値が小さい側の極性の電界印加(この場合、マイナス駆動)により駆動させることにより、大きな圧電性能を得ることができる。

30

【0049】

なお、本実施形態では、正電界側に偏ったPr-Eヒステリシスを有する圧電体を例に説明するが、負電界側に偏ったPr-Eヒステリシスを有する圧電体においてもその符号が異なるだけで同様の作用効果を得ることができる。

【0050】

図2は、図1のPr-Eヒステリシス特性を有する圧電体膜を備えた圧電アクチュエータを駆動した場合の駆動電圧と変位の関係を示す図である。図2では、後述する作製例において作製した圧電アクチュエータ(図3参照)を駆動して得られた「電界 変位ヒステリシス特性」を示してある。ここでは、下部電極(図3におけるTi/Irの電極層)を基準電位(グランド)として、駆動電圧の正負符号を定義した。なお、非駆動時における当該圧電アクチュエータにおける圧電体膜の分極状態は、上部電極側が+、下部電極側が-である(分極ベクトルが上向き)。また、変位量については、振動板(図3における5 μm 厚のSi層と0.3 μm 厚のSiO₂層)が下に凸の方向に変位する量を「+方向」の変位、上に凸の方向に変位する量を「-方向」の変位と定義した。

40

【0051】

駆動電圧としてマイナスの電圧を印加する場合に注目すると、0Vからマイナス電圧の絶対値を大きくしていく(図の左側の負電界側)と、印加電圧の絶対値の増加に応じて、略リニアな関係(比例関係)で変位量が増加していく。ここでは、振動板が下に凸の方向に変位する量を「+方向」の変位量とした。また、逆に、印加するマイナス電圧の絶対値を次第に小さくしていくと、印加電圧の絶対値の減少に応じて、上記同様の比例関係で変

50

位量が減少していく。図示のとおり、負電界側において殆ど履歴がなく、かつ、リニアリティの高いものとなっている（図中の符号 A で示す領域）。なお、図 1 において、履歴によるリニアリティの誤差は 1 % 以下である。

【 0 0 5 2 】

さらに、マイナス電圧から 0 V を超えてプラス電圧に転じて、しばらくはリニアな領域がある（図中の符号 B で示す領域）。すなわち、正電界側において、駆動電圧が 0 ~ 約 10 V の範囲は、印加電圧（電界）の強さに略比例して、逆方向の変位量が得られる。このように、プラス電圧を印加したとき、逆方向（上に凸の方向）に変位するリニア領域がある。

【 0 0 5 3 】

先に述べた負電界側のリニア領域（図中の符号 A）と、この正電界側のリニア領域（図中の符号 B）が連続しており、負電圧側と正電圧側とにまたがる連続した範囲で略比例の関係となるリニア領域（領域 A + B の区間）が形成される。このように負電界側のリニア領域（符号 A）から連続する正電界側のリニア領域（符号 B の領域）が存在することにより、本例の圧電アクチュエータは、逆符号の電圧の印加によって逆方向（+ 方向）に変位させる駆動が可能となっている。

【 0 0 5 4 】

< 図 3 の圧電アクチュエータの作製例 >

ここで、図 1、図 2 の圧電特性を調べた圧電アクチュエータ（図 3）の作製方法を説明する。まず、ダイアフラム構造が形成されている SOI（Silicon On Insulator）基板上に、スパッタ法にて、Ti 密着層を介して 150 nm 厚の Ir 下部電極が順次積層された電極付き基板を用意した。次いでターゲットとして $Pb_{1.3}Zr_{0.43}Ti_{0.44}Nb_{0.13}O_3$ 焼結体のターゲットを用いて、真空度 0.5 Pa、Ar / O₂ 混合雰囲気（O₂ 体積分率 1.0 %）、成膜温度 525 °C、投入電力 500 W、基板ターゲット間距離 60 mm の条件下で、Nb ドープ PZT 膜（Nb - PZT 膜）4 ミクロンの厚みで成膜を実施した。

【 0 0 5 5 】

このとき、基板を浮遊状態にして、ターゲットと基板との間ではない基板から離れたところにアースを配して成膜した。得られた膜の組成を XRF により分析したところ、 $Pb_{1.03}Zr_{0.43}Ti_{0.44}Nb_{0.13}O_3$ であった。

【 0 0 5 6 】

次いで、上記 Nb - PZT 膜上に Pt 上部電極を、Ti 密着層を介してスパッタリング法にて形成し、リフトオフによりパターンニングして圧電アクチュエータを作製した（図 3 参照、各層の厚みは図中に記載した。）。

【 0 0 5 7 】

得られた圧電アクチュエータのバイポーラ分極 電界特性（Pr - E ヒステリシス特性）を測定した結果が図 1 である。図示されるように、得られた Pr - E ヒステリシス特性は、正電界側に偏った、分極を示す y 軸に対して非対称なものであり、その偏り率は 76 % であった。なお、このときの抗電界はプラス方向は 41.6 kV / cm、マイナス方向で 5.8 kV / cm であった。

【 0 0 5 8 】

次いで、得られた圧電アクチュエータのバイポーラ電界 変位特性を測定したところ、図 2 に示されるヒステリシスが得られた。図 2 に示されるように、上記 Nb - PZT 膜は、負電界側に高いリニアリティを有することが確認され、更に、正側の抗電界よりも低い電圧においても高いリニアリティを有することも確認された。

【 0 0 5 9 】

< rf - MEMS スイッチの作成プロセスの実施例 >

図 1 ~ 2 で説明した特性を持つ圧電体膜を用いて、以下のプロセスにて rf - MEMS スイッチを作成した。図 4 に作成プロセスの工程図を示す。

【 0 0 6 0 】

(工程1) シリコン (Si) ウエハ 10 上に高周波 (rf) の信号線用の電極 12 をパターンニングした (図 4 (a))。このシリコンウエハ 10 が「ベース基板」、「第 1 のシリコンウエハ」に相当し、電極 12 が「固定電極」に相当する。

【0061】

(工程2) 次に、上記シリコンウエハ 10 上にブリッジとしてフォトレジスト (例えば、商品名: SU-8) 14 を 5 μ m 厚で形成し、その上に Au-Sn 15 を形成し、これをパターンニングして柱 16 を形成した (図 4 (b))。上記工程 2 で得られたウエハ (構造体) を「下部ウエハ」18 とした。

【0062】

(工程3) その一方で、上記工程 1, 2 とは別に、図 4 (c) に示したように、SOI ウエハ 20 を基板として用意する。SOI ウエハ 20 は、シリコン層 21 の上に熱酸化膜 (SiO₂) 22 を介して活性層 (Si 層) 23 が積層された構造を有する。本例の場合、活性層 23 の厚みは 5 μ m である。活性層 23 の厚み 5 μ m の熱酸化膜 22 付きの SOI ウエハ 20 を基板として用意した。この SOI ウエハ 20 が「第 2 のシリコンウエハ」に相当する部材である。

【0063】

(工程4) この SOI ウエハ 20 の活性層 23 上に圧電体 (PZT) の下側電極 26 として TiW (膜厚 50 nm) 及び Ir (膜厚 150 nm) を積層構造で形成した (図 4 (d))。

【0064】

(工程5) 次に、下側電極 26 上に、図 1 ~ 2 で説明した圧電性能を有する圧電体 (PZT) 膜 30 を 4 μ m 厚で形成した (図 4 (e))。圧電体膜 30 は、スパッタリング法で形成した。この圧電体膜 30 の分極状態は、図 4 (e) における上側 (TiW / Au 電極側) がプラス、下側 (TiW / Ir 電極側) がマイナスに分極したものとなっている。分極電荷のプラスからマイナスに向かう方向を「分極向き」と定義すると、ここでの分極向きは「下向き」である。

【0065】

(工程6) 次に、圧電体膜 30 の上に電極 32 として TiW (膜厚 50 nm) 及び Au (膜厚 150 nm) を積層形成し、パターンニングによって、その一部は PZT 駆動用の電極 33 とし、一部は rf 信号線用の電極 34 とした (図 4 (f))。この工程 6 で得られたウエハ構造体を「上部ウエハ」38 とした。なお、上部ウエハ 38 の作成手順 (工程 3 ~ 6) と、下部ウエハ 18 の作成手順 (工程 1 ~ 2) は、独立して実施することができるため、上部ウエハ 38、下部ウエハ 18 の作製順序は問わない。

【0066】

(工程7) 次に、図 4 (g) に示すように、下部ウエハ 18 と上部ウエハ 38 を重ねて両者を張り合わせ、一つの (一枚の) ウエハ 40 を形成した。

【0067】

このとき、上部ウエハ 38 は図 4 (f) の状態から上下を反転させ、電極 32 (33, 34) を下に (下部ウエハ 18 側に) 向けて、下部ウエハ 18 上に接合した。つまり、図 4 (g) の接合状態では、圧電体膜 30 の下面に配置される符号 33 の電極が下部電極となり、圧電体膜 30 の上面に配置される符号 26 の電極が上部電極となる。このとき圧電体膜 30 の分極向きは「上向き」となる。

【0068】

(工程8) 次に、上部ウエハ 38 の Si 層 21 (犠牲層に相当する) をウエットエッチングにて取り除き、熱酸化膜 22 と活性層 23 のみを残した (図 4 (h))。この残った熱酸化膜 22 と活性層 23 とによって振動板 24 が構成される。

【0069】

(工程9) さらに、ドライエッチングにて、活性層 23 の一部を取り除き、圧電体膜 30 と振動板 24 が片持ち梁構造 (カンチレバー構造) で支持されるように構成した (図 4 (i))。レジスト 14 で構成された柱 16 は、圧電体膜 30 と振動板 24 からなる可動

10

20

30

40

50

部を片持ち支持する支持台として機能するとともに、電極（１２，３４）間のギャップＧを確保する空隙（空洞）４４を形成する壁部材（スペーサ部材）として機能する。なお、スイッチ接点用の電極（１２，３４）の距離（ギャップＧ）は、２０μｍ以下、好ましくは、１０μｍ以下、さらに好ましくは５μｍ以下である。

【００７０】

こうして、符号１２で示した固定電極に対し、符号３４で示した可動電極が空隙（ギャップ）４４を介して対向するｒｆ－ＭＥＭＳスイッチ５０を作製した。

【００７１】

（工程１０）最後に、工程９で活性層２３上に付与したレジスト（不図示）をリムーバーにて取り除き、水洗した。なお、洗浄等の工程は、この工程１０に限らず、他の工程でも必要に応じて実施されるが、説明を省略している。

10

【００７２】

上記の手順で作製されたｒｆ－ＭＥＭＳスイッチ５０は、圧電駆動により可動電極３４が固定電極１２に対して接離し、スイッチングのオンオフ動作が行われる。

【００７３】

なお、本発明の実施に際して、スイッチの作製工程（製造方法）やスイッチの構造は上記実施形態に限定されない。

【００７４】

スイッチ作製工程やスイッチの構造は上記以外のものでもかまわない。

【００７５】

20

< ｒｆ－ＭＥＭＳスイッチの動作について >

図５はｒｆ－ＭＥＭＳスイッチ５０を上から見た平面図である。図５中の破線で示した符号５２の部分が圧電駆動によって変位するカンチレバー部分（「可動部」に相当）である。このカンチレバー５２の下に電極（図４中図示を省略、図で説明した符号３４、以下「可動電極」という。）が設けられている。

【００７６】

また、当該カンチレバー５２に対向する下部ウエハ１８上には、信号用の電極１２Ａ、１２Ｂが所定の絶縁ギャップ５５を介して配置されている。この電極１２Ａ、１２Ｂは高周波（ＲＦ）の信号を流す信号ライン（以下「ｒｆ信号ライン」という。）であり、カンチレバー５２を駆動させることで、信号線（電極１２Ａ，１２Ｂ）同士の連結（オン）／分離（オフ）の切替が可能である。

30

【００７７】

すなわち、カンチレバー５２が上に上がっているときは、可動電極３４は電極１２Ａ，１２Ｂから離れており、電極１２Ａ，１２Ｂ間が開放（接点間が開放）され、「オフ」（非導通）の状態となる。その一方、カンチレバー５２が下に下がり、可動電極３４が電極１２Ａ、１２Ｂに接触すると、電極間が繋がって「オン」（導通）状態になる。

【００７８】

このｒｆ－ＭＥＭＳスイッチ５０について、表１に示す印加電圧の組合せで駆動した。なお、ここでは圧電体（ＰＺＴ）を駆動する電極として、図４（ｉ）における振動板２４側（上面のＳｉウエハ側）のＩｒ電極（符号２６）を「上部電極」と呼び、ｒｆ信号ライン（１２Ａ，１２Ｂ）に面する側のＡｕ電極（符号３３）を「下部電極」と呼ぶ。図４（ｉ）に示したスイッチ構造の場合、圧電体膜３０がｄ３１方向に縮んだときにスイッチはＯＮになり、圧電体膜３０がｄ３１方向に伸びたときにスイッチが電極１２から離れる方向に動く。

40

【００７９】

【表 1】

		上部電極		
		プラス	接地	マイナス
下部電極	プラス	-	スティッキング防止 (抗電界の 80%まで)	スティッキング防止 (抗電界の 80%まで)
	接地	ON	-	スティッキング防止 (抗電界の 80%まで)
	マイナス	ON	ON	-

10

【 0 0 8 0 】

表 1 に示したとおり、下部電極を接地し、上部電極にプラスの電圧を印加すると、カンチレバー 5 2 は下に変位し、スイッチオン (ON) となる。また、この下部電極を接地した状態で、上部電極にマイナスの電圧を印加すると、カンチレバー 5 2 は上方向に変位する。なお、このとき上部電極に印加するマイナス電圧の値は、圧電体膜内の電界が抗電界 (E_{c+}) の値以下となる値とし、好ましくは、抗電界 (E_{c+}) の 80% 以内の電界となる電圧値とする。このマイナス電圧の印加による駆動動作は、カンチレバー 5 2 を rf 信号ライン (電極 1 2 A, 1 2 B) から引き離す方向の動きであり、スティッキング防止の作用をもたらす。表 1 において「スティッキング防止」と記載している駆動形態は、カンチレバー (片持ち梁) が上方向に移動するのをレーザードップラー変位計にて確認した。また、それぞれの動作が良好であることを確認した。

20

【 0 0 8 1 】

駆動電圧を印加する形態は、上記に限らない。上記と同様の印加電界を実現できる電位の組合せにより、同様の駆動が可能である。例えば、次のような形態でもよい。すなわち、上部電極を接地し、下部電極にマイナスの電圧を印加すると、カンチレバー 5 2 は下に変位し、スイッチオン (ON) となる。また、この上部電極を接地した状態で、下部電極にプラスの電圧を印加すると、カンチレバー 5 2 は上方向に変位する。このとき下部電極に印加するプラス電圧の値は、圧電体膜内の電界が抗電界 (E_{c+}) の値以下となる値とし、好ましくは、抗電界 (E_{c+}) の 80% 以内の電界となる電圧値とする。このプラス電圧の印加による動作はカンチレバー 5 2 を rf 信号ラインから引き離す方向の動きであり、スティッキング防止の作用をもたらす。

30

【 0 0 8 2 】

その他、下部電極にマイナス電圧、上部電極にプラス電圧を印加することにより、カンチレバー 5 2 は下に変位し、スイッチオン (ON) となる。逆に、下部電極にプラス電圧、上部電極にマイナス電圧を印加すると、カンチレバー 5 2 は上方向に変位し、スティッキングを防止できる。なお、このときの電極間の電位差は、圧電体膜内の電界が抗電界 (E_{c+}) の値以下となる値とし、好ましくは、抗電界 (E_{c+}) の 80% 以内の電界となる電位差とする。

【 0 0 8 3 】

以上説明したとおり、圧電体膜の駆動の方法は、表 1 に示した様々な組合せが可能である。適当な駆動回路を選択することにより、どのような組合せでも可能である。

40

【 0 0 8 4 】

図 4 の作製プロセスで製造した複数の rf - MEMS スイッチにおいて、これら複数のデバイスのうち一部のものは初期状態から rf 信号ラインがオンになっており、PZT の部分の片持ち梁 (カンチレバー) が下部ウエハに貼り付いているものが存在した。

【 0 0 8 5 】

その貼り付いたデバイスに関して、表 1 の「スティッキング防止」の効果がある電圧の組合せで圧電体を駆動したところ、貼り付き (スティッキング) が解消された。なお、本例の圧電膜の場合、約 7 V (抗電界の 70%) の電圧を印加した。こうして、貼り付きを

50

解除した後は、良好にデバイスを駆動することができた。

【 0 0 8 6 】

本デバイスのスティッキング防止用の駆動は、デバイス検査時に行うことで、以後はスティッキングを起こすことはなかった。このように、出荷前の検査でスティッキングを解除し、正常な（出荷可能な）素子にすることができる、これにより、歩留まりの向上を達成できる。

【 0 0 8 7 】

なお、デバイス検査の工程を経て、貼り付きのないデバイスが得られた場合も、その後の実際のデバイス駆動中に、何らかの理由で r f 信号線が常時 ON となり、貼り付いてしまうことも想定される。その際には、当該貼り付いたデバイスに対して、上記のスティッキング防止効果のある電圧（この例では約 7 V の電圧）を印加することで、貼り付きを剥がすことが可能である。

【 0 0 8 8 】

上述した実施形態では、圧電体の d 3 1 方向の歪みを利用して振動板を撓ませるユニモルフ型のアクチュエータとなっているが、圧電体の圧電定数 d 3 1 (p m / V) は高い方が好ましい。好ましくは 1 0 0 p m / V 以上、さらに好ましくは 2 0 0 p m / V 以上である。1 0 0 p m / V 以下であれば本発明のスティッキング防止のための力の発生が十分でない可能性があるためである。

【 0 0 8 9 】

< 貼り付き（スティッキング）防止動作時の印加電圧と抗電界の関係について >

デバイスの貼り付き（スティッキング）を解消するための駆動時に印加する電圧の抗電界に対する割合とスティッキング防止効果の関係を調べた。評価実験では、図 1 で説明した特性を持つ圧電体膜を用い、ヒステリシスのプラス方向側に駆動するように電圧を印加して、カンチレバーがスイッチ電極から離れる方向に駆動して、スティッキング防止効果を調べた。表 2 にその結果を示す。

【 0 0 9 0 】

【表 2】

駆動電圧の抗電界に対する割合	スティッキング防止効果
150%	×
100%	△
80%	○
70%	○
50%	○
30%	○
10%	△
0%	×

【 0 0 9 1 】

抗電界よりも大きな印加電界となる電圧をかけたもの（抗電界に対する割合が 1 5 0 % 、ここでは 5 2 . 5 k V / c m の電界に相当する電圧）は、スティッキング防止効果がなく、評価を「 × 」とした。

【 0 0 9 2 】

抗電界と同じ電界（抗電界に対する割合が 1 0 0 % ）ではスティッキング効果が確認さ

れたものの、当該駆動を繰り返し、カンチレバーが電極と離れる方向に駆動を進めると徐々に変位量が落ちていったため、スティッキング防止効果はあるものの、信頼性が若干劣るとして「 Δ 」とした。

【0093】

抗電界に対する割合が80%（本実施例では約28kV/cm）ではスティッキング防止効果は現れ、繰り返しの状況も良好であり、「 Δ 」の評価とした。抗電界の10%（約3.5kV/cm）で駆動したものは、サンプルによってはスティッキングできるものできないものがあり、十分効果がないとして「 Δ 」とした。0%ではカンチレバーが全く動かず、スティッキング防止とならなかったため「 \times 」であった。

【0094】

以上の結果から、スティッキング防止のための駆動時には、抗電界の10%～100%の範囲で駆動することが好ましく、さらに好ましくは抗電界の30%～80%の範囲で駆動することが好ましい。

【0095】

<Pr-Eヒステリシス特性の「偏り」について>

図1で説明したPr-Eヒステリシス特性の電界に対する「偏り」は、例えば、正電界側の抗電界と負電界側の抗電界の絶対値の違いに注目して定義できる。偏りが大きい程、正電界側に偏ったPr-Eヒステリシス特性の場合、負電界側の抗電界 E_{c1} と正電界側の抗電界 E_{c2} から次式で「偏り率」を定めることができる。

【0096】

$$(E_{c2} + E_{c1}) / (E_{c2} - E_{c1}) \times 100 \quad (\%)$$

なお、負電界側に偏ったPr-Eヒステリシス特性を有している圧電体においては、上式で得られる値の絶対値となる。

【0097】

本発明によるアクチュエータ素子の駆動方法は、20%以上の偏り率を有するPr-Eヒステリシスを有する圧電体を備えたアクチュエータについて特に好ましく適用することができ、その偏り率が大きいほど効果的である。図1に示されるPr-Eヒステリシスの偏り率は76%である。

【0098】

<変形例>

本発明の実施に際しては、上述した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。

【0099】

また、上述の実施形態では、ベース基板上に複数の固定電極（12A, 12B）を配置し、可動電極34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を導通させるスイッチ構造を例示したが、本発明の実施に際しては、1つの固定電極に対して、可動電極を接触/離間させるスイッチ構造を採用してもよい。

【0100】

さらに、上述の実施形態では、片持ち梁（カンチレバー）構造を例示したが、本発明の適用範囲はこれに限らず、両持ち構造、ダイヤフラム構造にも適用できる。

【0101】

<圧電体膜の組成について>

本発明の実施に用いることができる圧電体膜として、下記一般式（P）で表される1種又は複数種のペロブスカイト型酸化物からなる圧電体膜（不可避不純物を含んでいてもよい。）が挙げられる。かかる圧電体膜は、プラズマを用いるスパッタリング法により基板上に成膜することができる。この圧電体膜（一般式（P））は、絶対値の小さい抗電界の極性が負であり、正電界側にPr-Eヒステリシスが偏った圧電特性を有している。

【0102】

一般式 $A_a B_b O_3 \cdots (P)$

式中、AはPbを主成分とするAサイト元素、BはBサイトの元素であり、Ti, Zr, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, Sc, Co, Cu, In, Sn, Ga, Zn, Cd, Fe, 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は酸素である
 $a = 1.0$ かつ $b = 1.0$ である場合が標準であるが、これらの数値はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で 1.0 からずれてもよい。

【0103】

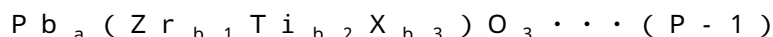
上記一般式(P)で表されるペロブスカイト型酸化物としては、チタン酸鉛、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)、ジルコニウム酸鉛、ニオブ酸ジルコニウムチタン酸鉛等が挙げられる。圧電体膜は、これら上記一般式(P)で表されるペロブスカイト型酸化物の混晶系であってもよい。

10

【0104】

また、本発明の実施に際しては、特に、下記一般式(P-1)で表される1種又は複数種のペロブスカイト型酸化物からなる(不可避不純物を含んでいてもよい。)圧電体膜がより好ましい。

【0105】



式(P-1)中、XはV族及びVI族の元素群より選ばれた少なくとも1種の金属元素である。 $a > 0$ 、 $b_1 > 0$ 、 $b_2 > 0$ 、 $b_3 = 0$ 。 $a = 1.0$ であり、かつ $b_1 + b_2 + b_3 = 1.0$ である場合が標準であるが、これらの数値はペロブスカイト構造を取り得る範囲内で 1.0 からずれてもよい。

20

【0106】

上記一般式(P-1)で表されるペロブスカイト型酸化物は、 $b_3 = 0$ のときチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)であり、 $b_3 > 0$ のとき、PZTのBサイトの一部をV族及びVI族の元素群より選ばれた少なくとも1種の金属元素であるXで置換した酸化物である。

【0107】

Xは、VA族、VB族、VIA族、及びVII族のいずれの金属元素でもよく、V, Nb, Ta, Cr, Mo, 及びWからなる群より選ばれた少なくとも1種であることが好ましい。

【0108】

一般式(P-1)で表される、ドーパントを含むPZT系酸化物からなる圧電体膜は、Pr-Eヒステリシス特性の正電界側への偏り率が大きいものとなるため、上記本発明の圧電アクチュエータの駆動方法を用いることにより得られる効果を良好に得ることができる。

30

【0109】

また、上記一般式(P)及び(P-1)で表されるペロブスカイト型酸化物からなる圧電体膜30の偏り率は、Pbが多いほど大きくなる。一般式(P)及び(P-1)で表されるペロブスカイト型酸化物において、Pbの組成aが $1.02 < a = 1.3$ の範囲内である場合に、偏り率を20%以上となることから、上記本発明の圧電アクチュエータの駆動方法を用いることにより得られる効果を良好に得ることができる。

【0110】

従って、一般式(P-1)で表されるペロブスカイト型酸化物からなる圧電体膜30において、Pb組成の大きいものほど、上記本発明の圧電アクチュエータの駆動方法を用いることにより得られる効果が大きいものとなる。

40

【0111】

既述のとおり、上記一般式(P)及び(P-1)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(d_{31} 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(アクチュエータ素子)は、変位特性の優れたものとなる。

【0112】

また、一般式(P)及び(P-1)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、図2で説明したように、駆動電圧範囲において、リニ

50

アリティの優れた電圧 変位特性を有している。

【 0 1 1 3 】

なお、上記説明では、P Z T について説明したが、圧電体の性質としてヒステリシスが偏っている材料であれば、同様の作用効果が得られる。本発明の実施に際しては、上記説明した組成の物以外の材料組成や、非鉛圧電体なども用いることができる。

【 0 1 1 4 】

< 他の応用例 >

上述した圧電特性を持つ圧電体膜を利用したアクチュエータ素子は、従来のアクチュエータと比較して、より大きな変位量が得られるので、スイッチ素子に限らず、光変調素子その他の様々な用途に広く利用可能であり、各種の圧電薄膜素子、M E M S デバイスに適用できる。

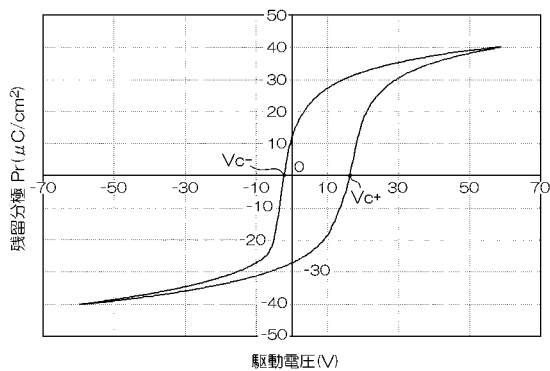
10

【符号の説明】

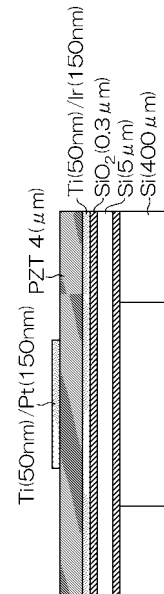
【 0 1 1 5 】

1 0 ... シリコン (S i) ウエハ、1 2 , 1 2 A , 1 2 B ... 電極 (固定電極)、1 8 ... 下部ウエハ、2 0 ... S O I ウエハ、2 4 ... 振動板、2 6 ... 電極 (上部電極)、3 0 ... 圧電体膜、3 3 ... 電極 (下部電極)、3 4 ... 電極 (可動電極)、3 8 ... 上部ウエハ、5 0 ... r f - M E M S スイッチ、5 2 ... カンチレバー

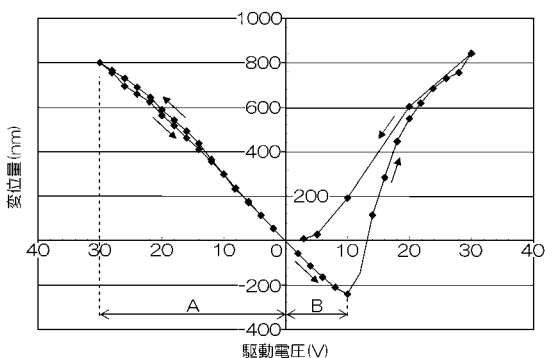
【 図 1 】



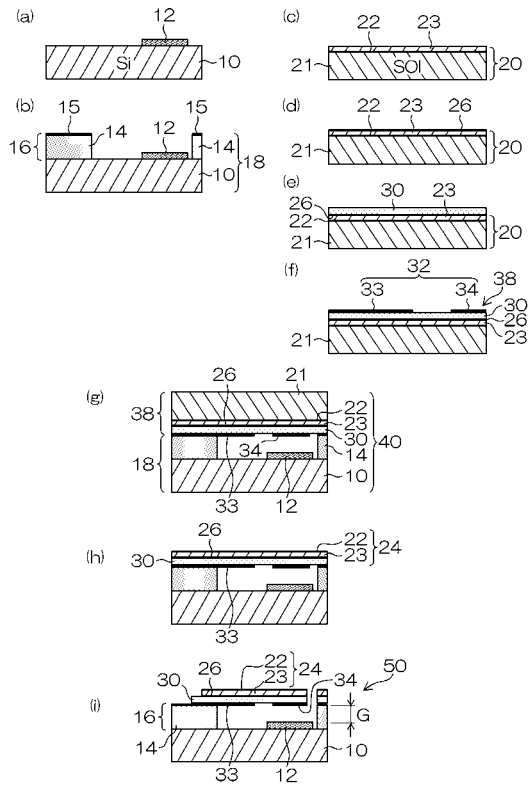
【 図 3 】



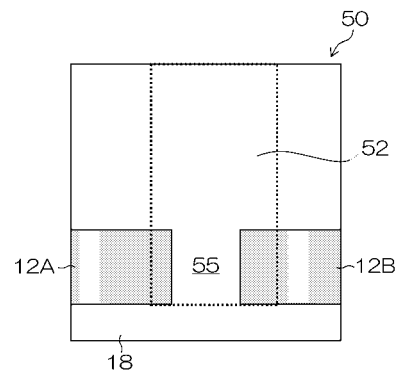
【 図 2 】



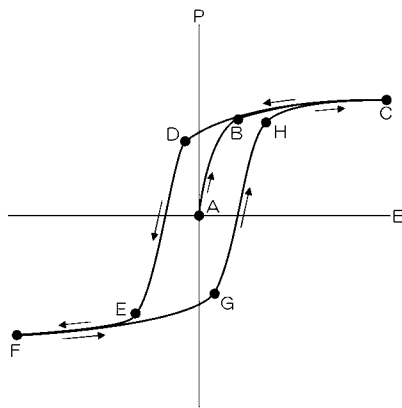
【図 4】



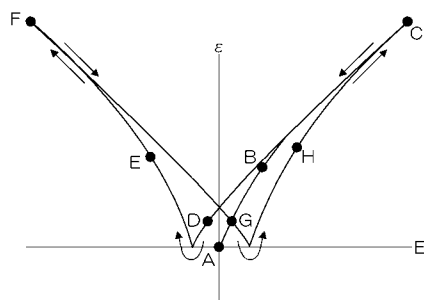
【図 5】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平 1 1 - 3 4 8 2 8 5 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 0 9 1 1 6 7 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 2 1 8 5 4 7 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 2 1 0 2 5 0 (J P , A)
特開 2 0 0 3 - 2 4 3 7 4 1 (J P , A)
特開 2 0 0 4 - 1 8 0 4 9 6 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
H 0 1 L 4 1 / 0 9
B 8 1 B 3 / 0 0
H 0 1 L 4 1 / 2 5 3
H 0 2 N 2 / 0 0