

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4589920号
(P4589920)

(45) 発行日 平成22年12月1日(2010.12.1)

(24) 登録日 平成22年9月17日(2010.9.17)

(51) Int.Cl.

F I

H03H 3/007 (2006.01)

H03H 3/007 M

H03H 9/24 (2006.01)

H03H 9/24 Z

B81B 3/00 (2006.01)

B81B 3/00

請求項の数 16 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2006-509524 (P2006-509524)
 (86) (22) 出願日 平成16年3月30日(2004.3.30)
 (65) 公表番号 特表2006-524020 (P2006-524020A)
 (43) 公表日 平成18年10月19日(2006.10.19)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2004/009881
 (87) 国際公開番号 W02004/095696
 (87) 国際公開日 平成16年11月4日(2004.11.4)
 審査請求日 平成19年3月27日(2007.3.27)
 (31) 優先権主張番号 10/414,793
 (32) 優先日 平成15年4月16日(2003.4.16)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 591245473
 ロベルト・ボッシュ・ゲゼルシャフト・ミ
 ト・ベシュレンクテル・ハフツング
 ROBERT BOSCH GMBH
 ドイツ連邦共和国デー70442 シュ
 トゥットガルト, ヴェルナー・シュトラ
 セ 1
 (74) 代理人 100089705
 弁理士 社本 一夫
 (74) 代理人 100076691
 弁理士 増井 忠式
 (74) 代理人 100075270
 弁理士 小林 泰
 (74) 代理人 100080137
 弁理士 千葉 昭男

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 シリコンMEMS共振器のための温度補償

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

所望の共振周波数を有する振動梁と、電極とを備える微小機械的共振器において、温度により引き起こされる周波数変化を補償する方法であって、

前記共振器の実際の動作周波数を決定するステップと、

前記電極に接続されており、前記振動梁に関して前記電極を移動させて前記電極と前記振動梁との間の動作ギャップを調整する機械的な伸張メカニズムを作動することによって、前記実際の動作周波数と前記所望の共振周波数との関係において、前記梁に補償剛度を適用するステップと、
 を備える方法。

【請求項2】

請求項1記載の方法であって、補償剛度を適用するステップが、更に、前記梁に前記電極を介して静電気力を加えるステップを備える方法。

【請求項3】

請求項2記載の方法であって、前記静電気力を加えるステップが、更に、前記電極に印加される電圧を増加させるステップを備える方法。

【請求項4】

請求項3記載の方法であって、前記共振器が更にフィードバック回路を備え、

前記実際の動作周波数を決定するステップが、更に、共振器周波数及び動作温度のうちの少なくとも1つを測定するステップと、該測定値を示す出力信号を生成するステップと

を備え、

前記電極に印加される電圧が、フィードバック回路出力信号に関連して変化させられる方法。

【請求項 5】

少なくとも 1 つの支持構造により基板上に支持された振動梁と、前記梁に近接し且つ動作ギャップにより前記梁とは分離される電極とを備える微小機械的共振器を形成する方法であって、

第 1 の熱膨張係数を有する第 1 の素材により、前記梁及び前記支持構造のうちの少なくとも 1 つを形成するステップと、

前記第 1 の熱膨張係数とは異なる第 2 の熱膨張係数を有する第 2 の素材により、少なくとも部分的に前記電極を形成するステップと、

前記電極に接続された機械的な伸張メカニズムを形成するステップであって、該機械的な伸張メカニズムは前記振動梁に関して前記電極を移動させるよう適応され、それによって前記共振周波数が温度変化に渡り実質的に安定するよう、温度変化に従って前記動作ギャップを調整する、形成するステップと、
を備える、調整される方法。

【請求項 6】

請求項 5 記載の方法であって、前記電極を形成するステップが、更に、

前記第 2 の素材とは異なる素材から、前記基板に固定される電極台を形成するステップと、

前記電極台の上に前記電極を形成するステップと、
を備える方法。

【請求項 7】

請求項 5 記載の方法であって、前記電極を形成するステップが、更に、

前記第 2 の素材とは異なる素材から電極本体を形成するステップと、

その後に、前記電極本体の一部を開けるステップと、

前記電極本体の前記開けられた部分に前記第 2 の素材を充填するステップと、
を備える方法。

【請求項 8】

請求項 7 記載の方法であって、前記第 1 の素材がシリコンであり、前記第 2 の素材が酸化ケイ素である方法。

【請求項 9】

請求項 5 記載の方法であって、前記第 1 及び第 2 の素材が、シリコン、ポリシリコン、epi-poly、LPCVD-poly、酸化ケイ素、ゲルマニウム、シリコン・ゲルマニウム化合物、窒化ケイ素及び炭化ケイ素からなる群から選択された少なくとも 1 つである方法。

【請求項 10】

微小機械的共振器であって、

共振周波数を有する梁であって、第 1 の熱膨張係数を有する第 1 の素材から形成される梁と、

動作ギャップを挟んで前記梁と近接し、前記梁に静電気力を加えるようになされた電極であって、前記第 1 の熱膨張係数とは異なる第 2 の熱膨張係数を有する第 2 の素材から少なくとも部分的に形成される電極と、

前記電極に接続された機械的な伸張メカニズムであって、該機械的な伸張メカニズムは前記振動梁に関して前記電極を移動させるよう適応される、機械的な伸張メカニズムと、
を備え、

前記機械的な伸張メカニズムと、温度範囲に渡る前記梁と前記電極との相対的な熱膨張との組み合わせの作用が、前記温度範囲に渡り前記共振周波数が実質的に安定するよう前記動作ギャップを調整する微小機械的共振器。

【請求項 11】

請求項 10 記載の共振器であって、更に、基板と、該基板上に設けられた第 1 の素材種別の活性層を備え、

前記梁が前記活性層から形成され、前記電極が、少なくとも部分的に前記活性層から形成される共振器。

【請求項 12】

請求項 11 記載の共振器であって、前記活性層が、シリコン、ポリシリコン、epi-poly、LPCVD-poly、ゲルマニウム、シリコン・ゲルマニウム化合物、窒化ケイ素及び炭化ケイ素からなる群から選択された少なくとも 1 つを備える共振器。

【請求項 13】

微小機械的共振器であって、

所望の共振周波数を有する梁と、

動作ギャップを挟んで前記梁に近接し、前記梁に静電気力を加えるようになされた電極と、

前記電極に接続されている機械的な伸張メカニズムと、
を備え、前記機械的な伸張メカニズムは、前記電極に接続された機械的な伸張メカニズムであり、該機械的な伸張メカニズムは第 1 の端において前記電極を支持し、該電極を移動させることにより前記動作ギャップを調整するようになされたレバーアームである、共振器。

【請求項 14】

請求項 13 記載の共振器であって、更に、

前記梁の実際の共振周波数と共振器の動作温度とのうちの少なくとも 1 つを示すフィードバック信号を生成するフィードバック回路を備える共振器。

【請求項 15】

請求項 14 記載の共振器であって、更に、

前記フィードバック信号に応じて、動作温度範囲に渡り前記所望の共振周波数が維持されるよう前記レバーアームを作動させる作動ドライバを備える共振器。

【請求項 16】

請求項 13 記載の共振器であって、更に、

前記第 1 の端の反対にある第 2 の端に近接した前記レバーアームを基板に固定する第 1 の支持であって、第 1 の熱膨張係数を有する第 1 の素材から形成される第 1 の支持と、

前記第 1 及び第 2 の端の間の支点として前記レバーアームを支持する第 2 の支持であって、少なくとも部分的に、第 2 の熱膨張係数を有する第 2 の素材から形成される第 2 の支持と、
を備え、

温度範囲に渡る前記第 1 及び第 2 の支持の相対的な熱膨張が、前記温度範囲に渡り前記共振周波数が実質的に安定するよう前記動作ギャップを調整する共振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

背景

本発明は、一般に、微小電子機械システム(MEMS)に関する。MEMSは、基板上に動作可能に配置された小型部品により形成される装置である。これらの部品は、リソグラフィ又は他の微小形成技術を用いて構成され、例えばセンサやアクチュエータをもたらす。

【0002】

多くの一般的な微小機械的構造は、加えられた力に対する梁構造の反応(例えば、振動、たわみ又はねじれ)に基づく。そのような梁構造は、通常、長方形の断面を有するか、又は有するよう形作られる。しかし、梁が実際に「長方形」である度合いは、梁を形成するために利用されたエッチング方法の異方性に依存する。梁は、鋼板の支持において、横方向振動子又はカンチレバー装置として利用される。それらは、ベアリングレス運動検出

10

20

30

40

50

器に対する自然な選択肢である。特にMEMSでは、共振器構造の中で、クロック回路及び信号フィルタリング回路の一部として梁を利用することが増加している。

【0003】

シリコンのような単結晶半導体は、共振器の梁の形成に用いる素材の明らかな選択肢である。そのような素材は、優れた機械的強度と、高い固有品質要素を有する。更に、シリコン・ベースの素材の形成及び処理は、集積回路産業の数十年の経験を利用した努力により、開発の進んでいる分野である。

【0004】

多結晶シリコン(「Poly Si」)を利用すると、例えば、幾何学的に非常に柔軟性のある共振器を設計することができる。しかし、単純だが一般的に利用されている曲げ梁及び横方向揺動梁の構造が、従来の共振器と関連付けられた性能上の懸念事項だけではなく、以下の本発明の指針を説明するために利用される。

10

【0005】

図1において、曲げ梁構造は、長方形の断面を有する特定の長さの梁1を、エンド・アンカー5を用いて半導体基板3上に支持することにより形成される。典型的に、作動電極(図示せず)は梁と関連付けられ、即ち、梁周辺の静電場に置かれる。梁は、電極により誘導された静電場により励起され、静電場の振動に共鳴して機械的に振動する。

【0006】

梁の表面に力が増えられ、その表面には応力が生じると言われている。この応力の平均値 σ は、負荷力Fをそれが適用される面積Aで割ったものとして表現され得る。即ち

20

、
【0007】

【数1】

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

である。

【0008】

応力を受けると、素材は文字通りに押されて(又は引かれて)形が崩れる。歪み ϵ は、素材の弾性の限度内におけるこの変形の測定値であり、長さの変化 ΔL を本来の長さ L_0 で割ったものと等しい。即ち、

30

【0009】

【数2】

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

である。

【0010】

関心を持たれる物質の大半は、負荷に対して線形に変形する。負荷は応力に比例し、変形は歪みに比例するため、応力と歪みとは線形の関係性を有するからである。これらの2つの測定値を関連付ける比例定数は、当該物質の弾性率又はヤング率として知られ、記号「E」で表される。ヤング率は、広範囲の物質について知られている。

40

【0011】

梁の幅「w」と平行な振動方向について計算された梁の機械的剛度 K_M は、梁のヤング率Eと、長方形の断面を持つ梁に対する長さ「L」及び高さ「h」を含む梁構造の特定の測定値とに比例する。即ち、

【0012】

【数 3】

$$k_M \approx \frac{E \cdot h \cdot w^3}{L^3} \quad \text{数式1}$$

である。

【0013】

周知の通り、関心を持たれる大抵の物質のヤング率は、既知の熱係数（ α_E ）に従って温度と共に変化する。例えば、Poly Si は 30 ppm/K° の熱係数を有する。更に、梁構造の形態も温度と共に変化し、一般には温度が増すにつれて膨張する。例えば、Poly Si は 2.5 ppm/K° の熱膨張係数 α_{exp} を有する。

10

【0014】

幾つかの梁設計及び関連する設計目的のために、等方性の熱係数を有する物質が与えられた場合、梁の幅に対する熱膨張の効果は、梁の長さに対する熱膨張の効果により実質的に埋め合わされ、結果として、梁の高さに対する残りの線形効果が生じる。

【0015】

静電気力を別として、梁の共振周波数（ f ）は、これらの想定のもとに、以下の数式により定義され得る。即ち、

【0016】

【数 4】

$$f \approx \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_M}{m_{eff}}} \quad \text{数式2}$$

20

である。ただし、 m_{eff} は、梁の実効質量であり、温度に関して一定である。

【0017】

共振器の総合的性能に対する梁の共振周波数の重要性を考えると、梁の共振周波数は、動作温度範囲に渡り比較的安定に保たれるべきである。数式2に示された関係を考慮すると、剛度が一定である場合に限り、周波数も一定に保たれる。しかし、一般には、そうであるとは限らない。温度により引き起こされるヤング率の変化は、梁の機械的剛度をも変化させる傾向があるからである。従って、温度変化による共振周波数の不可避の変化を「補償」するために、何らかの外的影響が必要とされる。

30

【0018】

従来、温度変化がある場合における共振梁の周波数の安定化の問題に取り組むための試みがなされてきた。例えば、MEMS2002（-7803-7185-2/02 IEEE）における Wan - Thai Hsu による「剛度補償された温度に影響されない微小機械的共振器」を参照されたい。しかしながら、そのような取り組みは、垂直振動補償の問題に集中し、CMOS集積には適合しない金又は類似の素材の修正的な利用を指示する。

【0019】

他の梁設計及び関連するモデル化のために、長方形の断面を有する共振梁の周波数（ f ）は、以下の数式で表され得る。即ち、

40

【0020】

【数 5】

$$f \approx \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \frac{L^2}{7t^2} S \right)} \quad \text{数式3}$$

である。ただし、「 ρ 」は梁を形成する素材の密度であり、「 S 」は梁に加えられる弾性歪みである。

【0021】

温度の上昇につれて、 L 及び t は熱膨張により増加するが、 L は t よりはるかに大きい
ため、 L の変化による影響が顕著である。その結果、温度が上昇するにつれて周波数は減

50

少し、温度が下降するにつれて周波数は増加する傾向を持つ。やはり上記の数式から明らかな通り、温度の上昇と共に梁に加えられる圧縮歪みは、温度の関数としての周波数の感度を高める。逆に、温度の上昇と共に梁に加えられる張力歪みは、温度の関数としての周波数の感度を下げる。そのような状態は、まず、温度変化 $d(T)$ の関数である周波数変化 $d(f)$ が 0 である所望の関係を想定することにより、一層よく理解され得る。式の代入及び等式により以下の数式が得られる。即ち、

【 0 0 2 2 】

【数 6】

$$\alpha_{\text{exp}} \left(1 + \frac{L^2}{7l^2} S \right) = \frac{L^2}{7l^2} \frac{dS}{dT} \quad \text{数式4}$$

10

である。

【 0 0 2 3 】

たいていの実用的な状況において、適用される歪み S は、1 よりはるかに小さい。そのような想定において、数式 4 に記載された関係は、

【 0 0 2 4 】

【数 7】

$$\frac{dS}{dT} = \frac{7l^2}{L^2} \alpha_{\text{exp}} \quad \text{数式5}$$

20

となる。

この関係から、温度により引き起こされる梁の共振周波数の変化は、梁に加えられる弾性歪み ($d(S)$) の変化により抑制 (即ち、補償) 又は強化されることが明らかである。

【 0 0 2 5 】

不運なことに、シリコンに対するヤング率の温度係数は、約 30 ppm/K である。このため、18 ppm/°C の範囲において、振動梁周波数のかなりの温度変化が引き起こされる。0.1 ~ 0.5 ppm の範囲である温度の安定性に対する公称要件と、-40 ~ +85 の範囲である一般的な動作温度特性とを考慮すると、想定される MEMS 設計者は、温度に安定な共振器の設計において大きな課題に直面することになる。

30

【 0 0 2 6 】

明らかに、動作温度範囲に渡る微小機械的共振器の周波数の安定のための効率的な補償メカニズムが必要である。そのようなメカニズムは、CMOS 集積に適合しない素材の組み込みに依存するべきではない。

【 0 0 2 7 】

発明の概要

本発明は、微小機械的共振器の温度補償の問題に取り組む。能動的及び受動的な解決方法が示される。実際には、同一の解決方法において能動的及び受動的な手法の両方を利用する例も示される。能動的解決方法は、共振器構造の外部の回路又はメカニズムから共振器に外的影響を加えることを特徴とする。受動的解決方法は、共振器構造を形成するために選択された半導体素材に固有の異なる熱膨張特性に依存する。

40

【 0 0 2 8 】

第 1 の態様において、本発明は、振動梁及び電極を含む微小機械的共振器において温度により引き起こされる周波数変化を補償する能動的方法を提供する。該方法は、所望の共振周波数と関連する梁の実際の動作周波数を決定するステップと、その後、所望の共振周波数を維持するために共振器に補償剛度を適用するステップとを備える。1 つの関連する実施の形態において、補償剛度は、電極により梁に加えられる静電気力により提供される。

【 0 0 2 9 】

特定の能動的な補償方法において、共振器周波数は、実際の動作周波数を直接検出され

50

るか、又は共振器の動作温度を検出するフィードバック回路を用いて決定され得る。フィードバック回路からの対応する出力信号に応じて電極に引加される電圧は、振動梁に補償静電気剛度を提供するように変化させられ得る。

【0030】

代わりの能動的な補償方法において、振動梁と電極との動作ギャップが、梁に加えられる補償剛度を变化させるよう調整される。

しかし、本発明の他の態様は、動作温度範囲に渡る共振器の周波数安定化に対する受動的な取り組みに対し容易に適用可能である。例えば、本発明に従って微小機械的共振器を形成する方法は、第1の素材から梁構造及び/又は関連する支持構造を形成し、少なくとも部分的に第2の素材から電極を形成する。異なる熱膨張係数を有する第1及び第2の素材が適切に選択される場合、これらの部品の温度による相対的な膨張は、梁と電極との間の動作ギャップを、梁に加えられる補償剛度を变化させるよう受動的に調整する傾向を有し、それにより、共振器周波数は指定された温度範囲に渡り実質的に安定する。

【0031】

基板、梁、及び/又は梁に対する支持構造によって異なる有効な熱膨張係数を有する電極を形成する方法は、無数に存在する。異なる熱膨張の効果を増幅するために、レバーアームが利用され得る。1つの関連する実施の形態において、電極及び梁は、半導体基板上に設けられた活性層から形成される。活性層は、第1の熱膨張係数を有する。それに従い、電極本体は、異なる熱膨張係数を有する第2の素材を組み込むよう修正される。本実施の形態及び類似の実施の形態において、第1及び/又は第2の素材は、シリコン、ポリシリコン、Epi-Poly、LPCVD-Poly、二酸化ケイ素、ゲルマニウム、シリコン・ゲルマニウム化合物、窒化ケイ素及び炭化ケイ素を含む可能な素材群から適宜に選択され得る。

【0032】

更に他の受動的補償方法において、微小機械的共振器は、第1の素材種別の基板上に形成される。振動梁、関連する支持構造及び/又は電極は、それに従って、第2の素材種別の活性層から形成される。支持構造及び電極に対するアンカーは、基板上のこれらの部品の相対的な熱膨張が梁と電極との間の動作ギャップを調整する傾向を持つことにより温度による梁振動の周波数変化を補償するよう、基板上の異なる横方向位置に置かれ得る。

【0033】

他の密接に関連する態様において、本発明は、アンカーにより基板上に支持される微小機械的共振器を提供する。アンカーは或る点において梁を基板に固定するが、該アンカーは、異なる熱膨張係数を有する2つ又はそれ以上の素材から形成された複合材料構造を含み得る。アンカーを形成するために利用される素材が、基板を形成するために利用される素材に関して適切に選択される場合、これらの素材間の相対的な熱膨張は、梁に圧縮歪み又は伸張歪みを加えるために利用され得る。梁に加えられる圧縮歪み又は伸張歪みを増幅するために、共振器にレバーアームが組み込まれ得る。

【0034】

以下の詳細な説明において、添付の図面が参照される。これらの図面は本発明の様々な態様を示し、適切な場合に、異なる図面において類似する構造、部品、素材及び/又は要素を示す参照符号に、同様のラベルがつけられる。構造、部品、素材及び/又は要素の特に図示された以外の様々な組合せは、意図されたものであり、本発明の範囲に含まれることが理解される。

【0035】

詳細な説明

以下の説明は、微小機械的共振器において温度により引き起こされる周波数変化が修正され得るような、表面マイクロ機械加工における幾つかの設計の可能性、方法、及び/又は機械的構造を提示する。本発明によれば、そのような共振器の製造には、半導体に適合する素材が非常に好ましい。

【0036】

以下の説明を通して、半導体に適合する素材が、教示の例として仮定される。この素材の偏りは、微小機械的構造におけるCMOS集積の現在の重要性を考慮することにより理解可能である。しかし、現在の設計上の利点は少ないとしても、そのような設計に適合しない素材も利用され得る。適合する素材は、シリコン又はシリコン・ベースの化合物に限定されず、従来の集積回路技術により形成され得る、及び/又は半導体基板に統合され得る全ての素材を含む。現在好まれるように、本発明に係る共振器は個別素子であっても、より大きなMEMS装置及び/又は集積回路（例えば、CMOS回路）を含むデバイスに容易に統合されてもよい。

【0037】

実質的に、本発明は、共振器を形成する素材のヤング率の温度係数を無視する。「共振器」という用語は、所望の機械的又は電気機械的振動を有する又は有することができる全ての構造を含む。以下の例において、共振器は、仮定として、長方形の断面を有する梁構造から形成される。この仮定は、長方形の断面を有する共振梁に関する説明が、長方形ではない梁構造に比べて理解しやすいという明らかな事実によるものである。しかしながら、本発明は、長方形の断面を有する共振梁に限定されない。

【0038】

上記の通り、共振器の周波数は、温度に応じて変化（又はドリフト）することが知られている。従って、変化する動作温度の影響下において共振器を「適正な周波数」に維持するために、何らかの補償メカニズムが必要とされる。温度補償は、処理パラメータではなく設計形状により提供されることが望ましい。更に、受動的（又は固有の）温度補償が、外部回路により達成される能動的な制御を上回ることが望ましい。しかし、本発明は、能動的な温度補償方法にも適用可能である。

【0039】

本発明の幾つかの現在好まれる実施の形態が、以下に説明される。これらの実施の形態は、本発明の利用及び作成方法を教示する例である。しかし、これらは例に過ぎず、添付の特許請求の範囲により規定される本発明の範囲を完全に制限するものではない。

【0040】

上記の数式2から想起される通り、共振器の周波数は、静電気力の影響が無い場合、共振器の機械的剛度 K_M に関連して決定され得る。温度に関係なく一定の周波数を維持するためには、共振器周波数の不可避の変化を補償する必要がある。「補償剛度」という用語は、共振器に加えられる任意の修正的な力を広く示す。共振器の内部構造に由来する機械的剛度とは異なり、補償剛度は、共振器の物理的形態に加えられる外部的な力による。

【0041】

例えば、静電気力は、共振器における補償剛度として利用され得る。電極と振動梁との間の静電気力 F_{e1} は、以下の数式により表される。即ち、

【0042】

【数8】

$$F_{e1} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{(d-x)^2} U^2 \quad \text{数式6}$$

である。ただし、 ϵ は誘電率であり、 A は梁と電極との間の面積であり、 d は梁と電極との間のギャップであり、 x は振動による偏差であり、 U は引加される電圧である。

【0043】

振動による偏差を無視してよい場合、補償静電気剛度は以下の数式により表され得る。即ち、

【0044】

【数9】

$$k_{e1} = \frac{dF_{e1}}{dx} = \epsilon \cdot A \cdot \frac{1}{d^3} U^2 \quad \text{数式7}$$

10

20

30

40

50

である。

【 0 0 4 5 】

上記の数式 2 に示される通り、機械的剛度及び外部から加えられる静電気剛度により規定される共振器周波数は、以下の数式で表され得る。即ち、

【 0 0 4 6 】

【 数 1 0 】

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_M - k_d}{m}} \quad \text{数式8}$$

10

である。

【 0 0 4 7 】

数式 7 及び 8 より、温度により引き起こされる機械的剛度の変化、及びそれによる共振周波数の変化は、静電気剛度の等しい変化により相殺又は補償され得る。誘電率及び場の面積が固定値であると仮定すると、補償静電気剛度の変化は、印加される電圧 U を変化させることにより、又は梁と電極との間の動作ギャップを変化させることにより達成され得る。

【 0 0 4 8 】

従って、能動的補償方法として広く特徴付けられる本発明の 1 つの態様は、(1) 共振器の実際の動作周波数を決定するステップと、(2) 動作温度範囲に渡り所望の共振周波数を維持するよう必要に応じて梁に補償剛度を適用するステップとに要約され得る。実際の動作温度を決定するステップは、共振周波数を直接測定する、又は温度のような他の測定パラメータと関連する動作周波数を間接的に決定する、従来の多数のフィードバック回路のうちの任意の 1 つにより達成され得る。多くの例において、そのようなデータは、共振器の意図された利用のうちに既に存在し、有利なことに共振器の温度補償のために利用され得る。

20

【 0 0 4 9 】

この概念は、図 2 A 及び 2 B に示された例を考慮することにより、更によく理解され得る。図 2 A において、振動梁 1 は、基板 3 に固定され且つ高さ L_1 を有する支持構造 7 及び 8 により、対向する端において支持される。高さ L_2 を有する電極 2 もまた、基板 3 上に梁 1 に隣接して形成され、動作ギャップ d を横切って梁 1 に静電気力を及ぼす (図 2 A 及び 2 B) 。

30

【 0 0 5 0 】

「高さ」という用語は、図 2 A 及び 2 B の平面図により示された長方形の例に関する任意の表現であり、共振器の「高さ」と「幅」とにより、異なる直交方向の軸を規定するに過ぎない。

【 0 0 5 1 】

支持構造 7 及び 8、電極 2、及び共振器 1 は、全て、CMOS に適合するシリコン・ベースの素材から形成されることが望ましい。これらの要素は、半導体基板上に設けられた 1 つの活性層から、又は別個に設けられた複数の層から形成され得る。「設けられた」という用語は、基板上への活性層の配置を示すに過ぎず、処理又は形成方法に特有のものではない。

40

【 0 0 5 2 】

支持構造 7 及び 8、電極 2、及び梁 1 は、構成素材の熱膨張係数に従って膨張 (及び収縮) する。例えば、支持構造 7 及び 8 は、基板に固定された位置から離れて、即ち図 2 のベクトル 10 の方向に膨張すると想定される。電極 2 は、ベクトル 11 の方向に膨張すると想定される。熱膨張ベクトル 10 及び 11 は、図 2 の例において方向的に一致するように示されているが、これは、必ずしもそうでなくてもよい。しかし、これらの要素の膨張ベクトルが同じ方向にある場合であっても、膨張の大きさは、構成素材の注意深い選択 (又は変更) により制御され得る。

50

【 0 0 5 3 】

動作例において、共振器の動作期間における温度補償を達成するために、設計中に以下のパラメータが操作され得る。即ち、(a) 支持構造の高さ L_1 と電極の高さ L_2 との比率、(b) 支持構造 7 及び 8 を実現するために利用される素材の (第 1 の) 熱膨張係数と電極 2 を実現するために利用される素材の (第 2 の) 熱膨張係数との比率、及び (c) 動作ギャップの距離、である。更に、印加される電圧 U は、温度により引き起こされる周波数変化を補償するために、共振器の動作中の温度に関連して変化させられ得る。当然、異なる共振器の形状は、周波数の温度補償を実行するために操作され得る異なるパラメータと、要素間の関係とをもたらし。

【 0 0 5 4 】

10

上記の能動的補償方法に加えて、上記のパラメータ (a) ~ (c) は、例えば、支持構造及び電極をそれぞれ実現するために利用される異なる構成素材の注意深い選択により、動作中に受動的に調整され得る。本明細書において使われる「受動的 (又は受動的に)」との用語は、1 つ又はそれ以上のパラメータが設計内部の 1 つ又はそれ以上の要素の変化 (例えば、熱膨張) の影響により変化するような処理、方法又は適応を示す。受動的調整は、外部的な力又は影響を加えることを必要とする「能動的」調整と区別される。

【 0 0 5 5 】

数式 8 に示された周波数、機械的剛度 K_M 及び補償静電気剛度 K_{e1} の関係によれば、周波数 f を安定に保つため、 K_M における任意の増加は、 K_{e1} における同等の (又は同等に近い) 増加により整合させられなければならない。数式 1 に示すように、シリコン・ベースの素材で形成された共振器の機械的剛度 K_M は、ヤング率 E の増加に関連して増加する。この K_M の増加を相殺するため、増加する K_{e1} が導かれなければならない。

20

【 0 0 5 6 】

再び数式 7 を参照し、誘電率 ϵ 及び場の面積 A が固定であると仮定すると、印加される電圧 U を増加させることにより、及び / 又は共振器と電極との動作ギャップ d を低減させることにより、 K_{e1} が増加させられ得る。印加される電圧 U を増加することは、単純な能動的方法である。従来のフィードバック回路 (図 2 には示さず) が、共振器に関連して提供され得る。フィードバック回路の検出された温度に基づいて、任意の合理的な温度変化を補償するよう、印加される電圧 U が調整され得る。

【 0 0 5 7 】

30

図 2 は、電極 2 が基板 3 に固定されると仮定する。しかし、電極が梁 1 に関して移動可能であれば、共振器の温度又は実際の動作周波数を検出するフィードバック回路を用いる能動的に制御された方法において、動作ギャップを低減 (又は増加) することができる。図 3 に示す通り、電極 2 と基板 3 とを接続するために、引張ばね、硬い支持部材又は熱アクチュエータ (例えば、適用される電流を介して梁 / レバーアーム構造を熱するアクチュエータ) のような伸張メカニズム 12 が利用され得る。伸張メカニズム 12 は、関連する作動ドライバ 14 により、電氣的又は機械的に刺激され得る。これらの例としての又は類似のメカニズムのうちの任意の 1 つを利用して、動作温度の増加に応じて、電極 2 と梁 1 との間の動作ギャップが調整され、それにより、電極 2 により梁 1 に適用される静電気剛度が増加 (又は適切に低減) させられる。熱膨張係数の注意深い比較と、期待される動作温度範囲に渡る静電気剛度範囲の計算とにより、共振器周波数の温度変化の影響を能動的に緩和することができる。

40

【 0 0 5 8 】

能動的な温度補償は、温度変化にリアルタイムに適応可能である点で魅力的である。しかし、能動的補償の仕組みは、作動ドライバ及び / 又は伸張メカニズムの形をとる幾つかの重要な追加のオーバーヘッドという代償を払う。従って、多くの適用において、受動的な温度補償方法が望ましい。

【 0 0 5 9 】

図 4 A は、受動的な温度補償のもう 1 つの例を示す。図 4 A において、図 3 の伸張メカニズム及び / 又は作動ドライバは、電極 20 を基板 3 に接続する台 21 により置き換えられ

50

る。支持構造 7 及び 8 を形成するために利用される構成素材に関連する台 2 1 及び電極 2 0 の構成素材の注意深い選択により、異なる熱膨張係数を有する素材の熱膨張の計算された相対的な影響によって、梁と電極との間の動作ギャップを調整することができる。

【 0 0 6 0 】

同様の流れにおいて、図 4 B に示す例は、異なる熱膨張係数を有する 2 つ（又はそれ以上）の構成素材 2 3 及び 2 4 から形成される電極 2 2 を備える。構成素材の実際の選択肢はかなり幅広く、例えば、ポリシリコン（L P C V D - P o l y、E p i - P o l y 等）、S O I ウエハーを用いる単結晶シリコン、複数の S i / G e 比率を有するシリコン・ゲルマニウム、酸化ケイ素（例えば、S i O₂）、窒化ケイ素（例えば、S i₃N₄）、及び様々な種別の炭化ケイ素（S i C）を含む。

10

【 0 0 6 1 】

図 4 B に示される例において、電極 2 2 は、中央をくりぬいて S i O₂ 2 4 を充填し、E p i P o l y で蓋をした E p i P o l y 本体 2 3 から形成され得る。S i O₂ は非常に低い熱膨張係数（E p i P o l y の 2 . 5 p p m に対し 0 . 5 p p m）を有するため、電極 2 2 本体への S i O₂ の導入は、電極 2 2 全体の熱膨張係数を下げる。この例では、電極の表面が導電性でなければならぬため、E p i P o l y の外壁が必要とされる。ひび割れの無い厚い S i O₂ 層を形成するのは比較的難しいため、電極 2 2 は、その後に S i O₂ を充填される細く開けられた（例えば、エッチングされた）溝を用いて、又は E p i P o l y 電極本体に開けられた穴に複数の S i O₂ 層を設けることにより、形成されることが望ましい。

20

【 0 0 6 2 】

図 5 に示される関連する例において、横方向振動梁 1 は、基板アンカー 7 A 及び 8 A に取り付けられた個々の支持 7 及び 8 により、両端で固定される。電極 2 8 は、アンカー 2 8 A により基板に固定される。この例において、梁 1、支持 7 及び 8、支持アンカー 7 A 及び 8 A は、基板上に設けられた E p i P o l y 層で形成されると想定される。電極 2 8 も E p i P o l y で形成されるが、電極の一部が開けられて（例えば、1 つ又はそれ以上の従来のエッチング処理により取り除かれて）、例えば S i O₂ である第 2 の素材 2 8 B により充填される。第 2 の素材が実際に S i O₂ であると仮定すると、結果として生ずる電極 2 8 は、E p i P o l y で形成された部品（例えば、梁、支持及びアンカー）よりも低い熱膨張係数を有する。第 2 の（充填）素材が E p i P o l y より高い熱膨張係数を有する素材群から選択される場合、電極 2 8 は、比較的高い熱膨張係数を有する。例えば、ゲルマニウムは 4 . 5 p p m の熱膨張係数を有する。電極の固く形成された空隙部分は、S i O₂ による充填に適するが、注意深く操作された熱膨張係数を有する電極の 1 つの構成例に過ぎない。

30

【 0 0 6 3 】

図 6 は、図 5 に示される共振器構造の断面図である。S i O₂ が所望の充填素材である場合、S i O₂ は、例えば窒化ケイ素層 3 0 により、活性層の H F 放出から保護されなければならない。

【 0 0 6 4 】

上記の例は、共振器構造の他の関連部品を形成する（第 1 の）主となる素材の熱膨張係数とは異なる熱膨張係数を有する少なくとも 1 つの追加の（第 2 の）素材から形成される電極構造を示した。しかし、本発明は、また、同様の方法による支持構造、アンカー及び／又は梁の同様の変更をも企図する。これらの部品のうちの任意の 1 つが、充填され又は他の方法で組み合わせられた素材の組合せにより形成されることは必須ではない。むしろ、異なる熱膨張係数を有する素材は、共振器の個々の部品を形成するために利用され得る。例えば、梁、支持構造及びアンカーは E p i P o l y から形成され、電極はゲルマニウムから形成され得る。

40

【 0 0 6 5 】

更に、動作ギャップの調整を実行する相対的な部品膨張の方向及び大きさは、1 つ又はそれ以上のレバーアームの利用により増幅され得る。図 7 は、そのような利用の一例を示

50

す。レバーアーム 38 は、電極 40 と梁 1 との間の動作ギャップを調整するように移動する。レバーアーム 38 の移動方向は、第 2 の支持 32 がレバーアーム 38 の支点である場合に、第 1 の支持 31 及び第 2 の支持 32 の熱膨張（ベクトル 10 及び 11）の差により制御される。この移動の大きさは、熱膨張の差と、レバーアームに沿った長さ a（第 1 の長さ）及び長さ b（第 2 の長さ）の比率とにより制御される。

【0066】

基板上の相対的なアンカーの位置もまた、電極と梁との分離ギャップを調整するために利用され得る。この結果は、設計プロセスの期間に、基板と基板上に設けられた 1 つ又はそれ以上の活性層との熱膨張係数の差を考慮することにより達成され得る。この手法は、図 8 に示される。

10

【0067】

ここで、電極 29 は、動作ギャップにより梁 1 と分離される。電極 29 は、アンカー 29A で基板に固定される。これに対し、支持 7 及び 8 は、個々のアンカー 7A 及び 8A において梁 1 を基板に固定する。例えば、基板がシリコン・オン・サファイア（SOI）であり、活性層が EpiPoly であると仮定すると、梁の熱膨張の方向に測定されたそれぞれのアンカー間の側面の距離 L3 は、動作温度範囲に渡り動作ギャップを調整する。

【0068】

相対的なアンカー構成も、共振梁の周波数変化の温度補償を実行するために利用され得る。圧縮歪みは梁の共振周波数を低減する傾向があり、伸張ゆがみは共振周波数を増加させる傾向があるため、基板とは異なる熱膨張係数を有するアンカーが、梁に圧縮又は伸張歪みを与えるために利用され得る。この手法は、図 9A 及び 9B に示される。

20

【0069】

ここで、曲げ（又は浮かされた）梁 1 は、アンカー 50 及び 52 により基板 3 の上方に支持される。組合せにより基板の熱膨張係数とは異なる熱膨張係数を有する 2 つ又はそれ以上の素材でアンカーを形成することにより、梁 1 に圧縮歪み又は伸張歪みが加えられ得る。上記の通り、基板 3 は、シリコン及びゲルマニウムを含むがそれらに限定されない多数の従来の素材により形成され得る。

【0070】

アンカー 50 及び 52 は、それぞれ、アンカー・ポイント 50A 及び 52A で基板 3 に固定される。例えば、EpiPoly のアンカー本体の選択的に開けられた部分に SiO₂ を充填することにより、複合材料アンカーが形成されても良い。これは、EpiPoly の梁及び / 又はシリコン・ベースの基板と比べて低い全体としての熱膨張係数を有する複合材料アンカー 50 及び 52 をもたらす。アンカー・ポイントと梁との間で測定された複合材料アンカーの長さ L4 は、選択された素材の異なる熱膨張により梁 1 に加えられる圧縮又は伸張歪みの影響力をもたらす。

30

【0071】

共振梁の周波数変化の温度補償を実行するために、相対的な梁の合成もまた利用され得る。この場合、図 9C 及び 9D に示されるとおり、梁 1 は、異なる熱膨張係数を有する複数の素材 1a 及び 1b（例えば、シリコン、ゲルマニウム、酸化ケイ素及び / 又は窒化ケイ素）により構成され得る。例えば、梁 1 は、シリコンの内部コアと、酸化ケイ素の外部層とにより構成され得る。代わりに、梁 1 は、シリコン、ゲルマニウム及び酸化ケイ素（それぞれ 1a、1b、1c。図 9E 参照。）により構成されても良い。実際、梁 1 を構成するために、本明細書に記載された任意の素材（又は他の素材）が利用可能である。

40

【0072】

図 9C に図示された発明は、図 9A 及び 9B に示された発明に組み込まれてもよい。この場合、梁 1 は、それぞれが異なる熱膨張係数を有する複数の素材により構成され、アンカー 50 及び / 又は 52 は、組合せにより基板とは異なる熱膨張係数を有する 2 つ又はそれ以上の素材により構成され得る。

【0073】

図 10 において、複合材料アンカー 61 及び 62 は、レバーアーム 60A 及び 60B、

50

並びに圧縮／膨張バー 6 4 と組み合わせられて、共振梁 1 に伸張力又は圧縮力を加える。即ち、アンカー 6 1 及び 6 2、圧縮／膨張バー 6 4、梁 1 及び／又は基板 3 のための異なる熱膨張係数を有する複合材料を選択することにより、温度により引き起こされる周波数変化を補償するために適切な圧縮歪み又は伸張歪みが梁 1 に加えられ得る。

【 0 0 7 4 】

上記の説明を通して、選択された曲げ梁又は横方向振動梁構造が例に用いられた。しかし、説明された周波数補償方法は、例示された構造に限定されるものではなく、MEMS において有効な全ての梁に適用される。更に、例としての部品を構成するための様々な素材が提案された。再度言うが、これらは現在好ましい例を示すに過ぎない。共振器部品が適切に設計され、十分に異なる熱膨張係数を有する素材で形成される以上、本明細書に教示された受動的及び／又は能動的周波数補償方法は達成され得る。

10

【 0 0 7 5 】

更に、本明細書に説明及び例示された受動的及び能動的な方法は、受動的及び能動的な補償方法の両方を利用する解決方法を提供するために、組み合わせられ又は統合され得る。例えば、図 3 の実施の形態と図 4 A 及び／又は 4 B の実施の形態とは、受動的及び能動的な方法の両方を提供するために統合され得る（例えば、図 1 1 参照）。

【 0 0 7 6 】

本出願全体を通じて、「補償」及び「補償する」という用語（又は類似する用語）は、共振器の安定性に悪影響を与える状況の主要な部品又は要素が対処及び／又は改善される修正的な処理を示すために利用される。他の問題は、例えば外形（例えば、高さ及び／又は幅）の変化のような熱膨張に関連する問題であったとしても、補償に対する全体の影響においては重要ではない。更に、本明細書における取り組みは、限られた温度変化範囲（例えば、所定の温度範囲）において共振器の安定性に悪影響を与える状況に対処し、補償及び／又は改善するために適切である。

20

【図面の簡単な説明】

【 0 0 7 7 】

【図 1】図 1 は、従来の曲げ梁構造を示す。

【図 2 A】図 2 A は、本発明に従う横方向の振動梁を含む例としての微小機械的共振器の平面図を示す。

【図 2 B】図 2 B は、本発明に従う横方向の振動梁を含む例としての微小機械的共振器の平面図を示す。

30

【図 3】図 3 は、本発明の 1 つの例としての態様において図 2 に示される動作ギャップを調整するようになされた伸張メカニズムを示す。

【図 4 A】図 4 A は、本発明において利用されるようになされた例としての複合材料電極を示す。

【図 4 B】図 4 B は、本発明において利用されるようになされた例としての複合材料電極を示す。

【図 5】図 5 は、本発明において利用されるようになされた例としての複合材料電極を示す。

【図 6】図 6 は、本発明の範囲内で利用されるようになされた例としての複合材料電極を示す。

40

【図 7】図 7 は、本発明の他の例としての態様におけるレバーアームの更なる組み込み又は利用を示す。

【図 8】図 8 は、本発明の更に他の態様における横方向におかれたアンカーの利用を示す。

【図 9 A】図 9 A は、本発明の更に他の態様における横方向におかれた複合材料アンカーの利用を示す。

【図 9 B】図 9 B は、本発明の更に他の態様における横方向におかれた複合材料アンカーの利用を示す。

【図 9 C】図 9 C は、本発明の更に他の態様における横方向におかれた複合材料アンカー

50

【図 4 B】

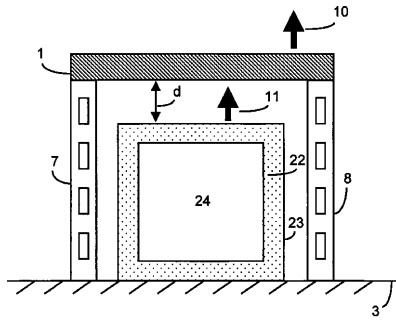


FIGURE 4B

【図 5】

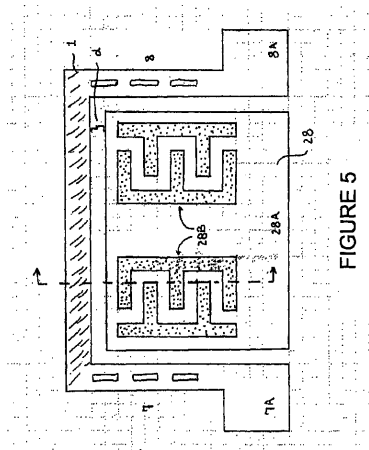


FIGURE 5

【図 7】

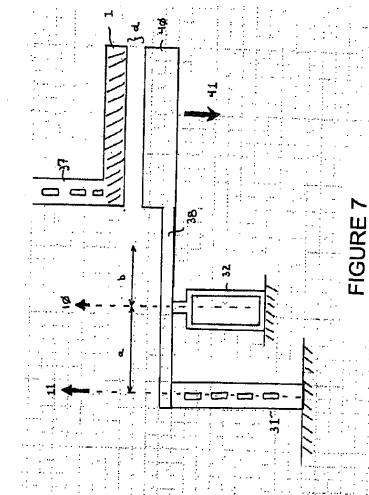


FIGURE 7

【図 6】

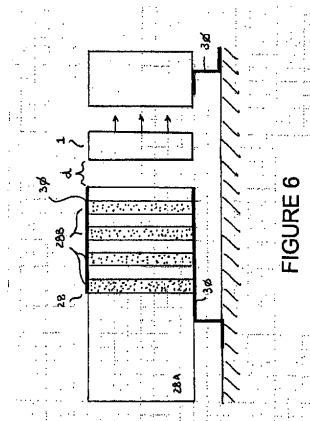


FIGURE 6

【図 8】

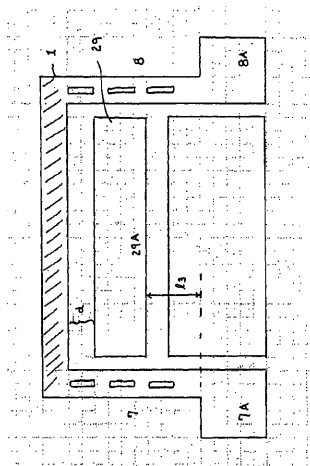


FIGURE 8

【図 9 A】

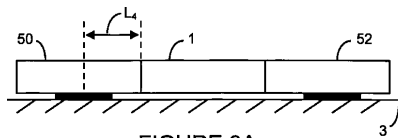


FIGURE 9A

【図 9 B】

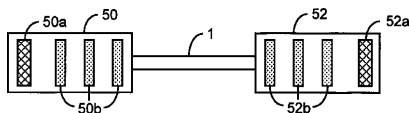
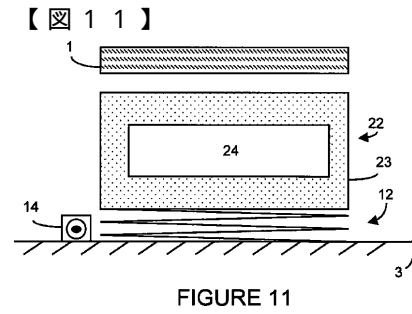
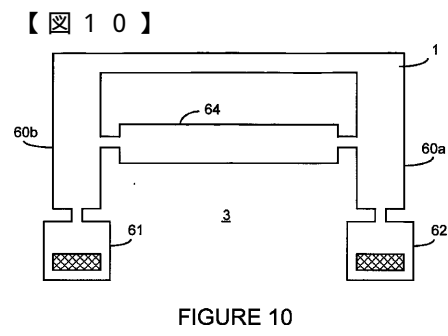
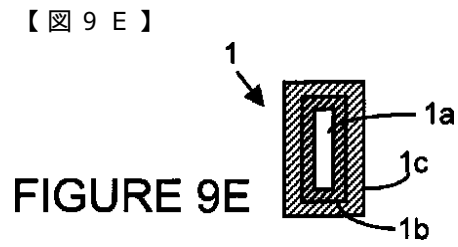
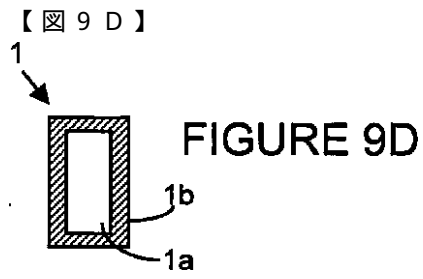
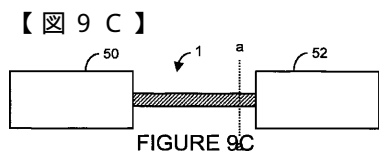


FIGURE 9B



フロントページの続き

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(72)発明者 ルッツ, マルクス

アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 4 3 0 6 , パロ・アルト, マヌエラ・アベニュー 4 2 1 4

(72)発明者 パートリッジ, アーロン

アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 4 3 0 1 , パロ・アルト, ノース・カリフォルニア・アベニュー 2 2 4

審査官 崎間 伸洋

(56)参考文献 国際公開第 0 3 / 0 1 7 4 8 2 (W O , A 1)

特表 2 0 0 5 - 5 0 0 7 7 9 (J P , A)

特表 2 0 0 1 - 5 0 7 8 8 5 (J P , A)

米国特許第 0 6 2 3 6 2 8 1 (U S , B 1)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H03H3/007-H03H3/10、H03H9/00-9/76、B81B3/00