

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11) 特許出願公表番号
特表2017-526919
(P2017-526919A)

(43) 公表日 平成29年9月14日 (2017.9.14)

(51) Int.Cl.		F I			テーマコード (参考)
GO 1 P 15/08 (2006.01)		GO 1 P 15/08	1 O 1 Z		2 G 1 O 5
GO 1 P 15/18 (2013.01)		GO 1 P 15/18			
GO 1 P 15/13 (2006.01)		GO 1 P 15/13	B		
GO 1 V 7/00 (2006.01)		GO 1 V 7/00			

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2017-511195 (P2017-511195)	(71) 出願人	301008419 ザ ユニバーシティー コート オブ ザ ユニバーシティー オブ グラスゴー イギリス国 ジー 1 2 8 キューキュー グラスゴー ユニヴァーシティ アベニュー ギルバート スコット ビルディング
(86) (22) 出願日	平成27年8月26日 (2015.8.26)	(74) 代理人	110000523 アクシス国際特許業務法人
(85) 翻訳文提出日	平成29年4月21日 (2017.4.21)	(72) 発明者	ポール・キャンプジー イギリス国ジー75・Oティージー、サウス・ ラナークシャー、グラスゴー、イースト・ キルブライド、コルビリーズ・ロード 、フリースケール・セミコンダクター
(86) 国際出願番号	PCT/EP2015/069572		
(87) 国際公開番号	W02016/030435		
(87) 国際公開日	平成28年3月3日 (2016.3.3)		
(31) 優先権主張番号	1415087.4		
(32) 優先日	平成26年8月26日 (2014.8.26)		
(33) 優先権主張国	英国 (GB)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 加速度の測定

(57) 【要約】

例えば、重力計又はグラジオメーターとして用いられるため、加速度測定装置が開示される。装置は、支持部に対する試験おもりの変位を許容するたわみ部によりお互いに結合された支持部と試験おもりを有する。支持部が、試験おもりの変位のための空間を規定する。装置は、力 - 変位曲線の少なくとも一部について、変位の増加で試験おもりの力 - 変位曲線の勾配率が減少するように構成される。これは、いわゆる反スプリング効果と呼ばれる。試験おもりの共振振動数は、少なくとも部分的に、重力に従う力の方向に対する装置の配向により決定される。試験おもりが 1 0 H z 以下の共振振動数で振動可能である。試験おもりが 1 グラム未満の質量を有する。

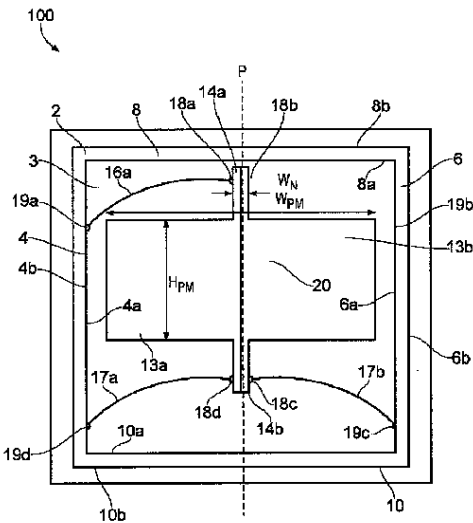


FIG. 4

【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

支持部に対する試験おもりの変位を許容する少なくとも二つのたわみ部によりお互いに結合された支持部と試験おもりを有する加速度測定装置であって、前記支持部が、前記試験おもりの変位のための空間を規定し、

前記装置は、力 - 変位曲線の少なくとも一部について、変位の増加で試験おもりの力 - 変位曲線の勾配率が減少するように構成され、

前記試験おもりの共振振動数は、前記試験おもりが 10 Hz 以下の共振振動数で振動可能であるように、少なくとも部分的に、重力に従う力の方向に対する前記装置の配向により決定され、

前記試験おもりが 1 グラム未満の質量を有する、装置。

【請求項 2】

前記試験おもりの共振振動数は、前記装置が重力に従う力の方向に直交する平面外に傾斜されるに応じて減少する、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

各たわみ部が、前記試験おもりに一端で結合され、前記支持部に他端で結合される、請求項 1 又は 2 に記載の装置。

【請求項 4】

各たわみ部の長さが、支持部の対向面間の距離の少なくとも 25 % である、請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 5】

3 つのたわみ部を含む、請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 6】

前記試験おもりが一つの面のみで振動するように前記装置が構成される、請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 7】

各たわみ部は、前記支持部から前記試験おもりに前記たわみ部の長さ方向を規定する連続した弧状に延びるレスト形状を有する、請求項 6 に記載の装置。

【請求項 8】

前記たわみ部の幅方向が、前記試験おもりの振動面における、また前記長さ方向に直交する方向として定義され、

前記たわみ部の深さ方向が、前記試験おもりの振動面に直交し、前記長さ方向に直交する方向として定義され、

次の (i)、(ii)、(iii) の少なくとも一つが当てはまる：

(i) 前記たわみ部の長さに沿う平均の、前記たわみ部の幅に対する前記たわみ部の深さの比が、少なくとも 10 : 1；

(ii) 前記たわみ部の長さに沿う平均の前記たわみ部の幅が、最大限で 10 μ m；

(iii) 前記たわみ部の長さに沿う平均の前記たわみ部の深さが、少なくとも 150 μ m、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 9】

各たわみ部は、前記たわみ部の長さ方向に直交する断面形状を有し、その断面形状が、深さと共に変化する幅を有する、請求項 7 又は 8 に記載の装置。

【請求項 10】

各たわみ部は、前記たわみ部の長さ方向に直交する実質的に矩形の断面形状を有する、請求項 7 又は 8 に記載の装置。

【請求項 11】

前記支持部と前記たわみ部が一体的に形成される、請求項 1 乃至 10 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 12】

前記支持部、前記たわみ部、及び前記試験おもりが一体的に形成される、請求項 11 に

10

20

30

40

50

記載の装置。

【請求項 13】

前記装置がモノリスからの減プロセスにより製造される、請求項 1 乃至 12 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 14】

反作用力を適用することにより前記試験おもりを逆方向に変位させるように適合される作動手段を更に含む、請求項 1 乃至 13 のいずれか一項に記載の装置。

【請求項 15】

請求項 1 乃至 14 のいずれか一項に記載の装置の使用方法であって、
(i) 重力に従う力といった力で前記試験おもりに変位を生じさせるステップと、
(ii) 前記試験おもりにかかる力、又は前記試験おもりに生じる変位を決定するステップを含む、使用方法。

10

【請求項 16】

前記試験おもりにかかる力を決定するため、反作用力を適用することにより、前記試験おもりを逆方向に変位させるステップを更に含む、請求項 15 に記載の使用方法。

【請求項 17】

前記支持部に対する前記試験おもりの位置を実質的に維持するため閉ループフィードバックシステムが用いられ、そのようにするために要求される入力の前記試験おもりにかかる力を表す信号を提供する、請求項 16 に記載の使用方法。

20

【請求項 18】

前記試験おもりの位置が、前記試験おもりに静電気力を適用することにより維持される、請求項 17 に記載の使用方法。

【請求項 19】

重力に従う力の方向に直交する平面外に前記装置を傾斜するステップを更に含み、これにより、前記試験おもりの共振振動数が減じられる、請求項 15 乃至 18 のいずれか一項に記載の使用方法。

【請求項 20】

請求項 1 乃至 14 のいずれか一項に記載の装置の製造方法であって、
モノリスからの減プロセスを介して、前記支持部、前記たわみ部、及び前記試験おもりの少なくとも一部を形成するステップを含む、製造方法。

30

【請求項 21】

前記減プロセスが、前記モノリスの選択的エッチングを含む、請求項 20 に記載の製造方法。

【請求項 22】

請求項 6 乃至 14 のいずれか一項に係る装置の 3 つ以上の組み合わせ品であって、前記試験おもりの振動面の 2 つがお互いに平行ではない態様となるように前記装置らが配向される、組み合わせ品。

【請求項 23】

請求項 1 乃至 14 のいずれか一項に係る装置のアレイ、又は、請求項 22 に係る装置の組み合わせ品のアレイを含む、グラジオメーター。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、加速度測定装置、及びその装置の動作方法に関する。本発明は、特に重力に従う加速度の決定の用途を有する。従って、装置は、重力計として使用可能である。本発明は、グラジオメーターにおける、そのような装置の組み合わせ品、またそのようなグラジオメーターの使用にも関する。

【背景技術】

【0002】

重力計は、加速度計の一種であり、地球の表面に亘り 9.81 m s^{-2} のおよその平均値の

50

約 0.5 % を上限として変化する重力に従う加速度を測定するために特に適合される。更には、固定された場所で、重力に従う局所（ローカル）加速度が、地球潮汐により、日々、およそ $2 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-2}$ だけ変化し得る。

【 0 0 0 3 】

機械式加速度計の基本原理は、スプリングがケースに取り付けられる、ケース内のスプリング上のおもりのものと同一である。ケースが加速度を受ける時、おもりの動きが、その慣性の帰結として時間遅延を受ける。ケースの参照フレーム、つまり、局所慣性フレームにおいて、スプリングがケースの加速と同一速度でおもりを加速することができるポイントまでおもりが変位され、そのポイントで（ここでも、ケースの参照フレームにおいて）、即座に、おもりが静止する。おもり及びスプリング定数が既知であるならば、この変位の測定から加速度が計算可能である。この同一原理が、先の段落で述べた地球潮汐の例に適用できる。ここで、変化する潮汐の帰結としてスプリングにかかる力の変化によって非常に低い振動数の信号が生成される（つまり、一日 2 回、すなわち、10 ~ 20 マイクロ Hz）。

10

【 0 0 0 4 】

重力計は、地球の重力場の帰結の下方の加速度に関係し、また、1 g、（約 9.81 m s^{-2} ）の地球場における僅かな変動を検出するために用い得るとするため、感度が高いことが要求される。結果として、重力計は、（地震活動といった）外部の振動源から隔離されるべきである。これは、通常、震動（vibration）隔離技術の組み合わせや、地震信号をフィルタリング除去する信号処理を用いることにより達成される。

20

【 0 0 0 5 】

加速度計の感度の一つの尺度は、 ng / Hz の単位の振幅スペクトル密度の形であり、1 秒に亘る測定の感度を提供する。この開示において、g が、質量のグラム単位を意味するのではなく、重力場強度（gravitational field strength）としても知られる重力に従う加速度を意味する。

【 0 0 0 6 】

絶対重力計と相対重力計の 2 つの基本的な種類の重力計がある。

【 0 0 0 7 】

絶対重力計は、絶対的な重力場強度を決定する。F G 5 絶対重力計は、この一例である（<http://www.microglaacoste.com/pdf/Brochure-FG5-X.pdf> [2014 年 8 月 21 日にアクセス] ）。これは、非常に簡単に作動し、真空において既知の高さからテストおもりを落下し、レーザー干渉計を用いて、落下する時のテストおもりの（重力場強度に等しい）加速度を測定する。これは、事前のキャリブレーションなしで測定を提供することができる。図 12 に示すように、F G 5 は、約 $15 \text{ ng} / \text{Hz}$ の精度で、 $2 \text{ ng} / \text{Hz}$ のオーダーの非常に感度の高い測定を提供することができるが、装置重量が 150 kg であり、非常に高価である。そのサイズと重量のため、絶対重力計は、通常、運搬することが非常に困難であり、大抵まったく携帯可能ではない。

30

【 0 0 0 8 】

相対重力計は、かなりより一般的である。これは、既知の重力場強度の比例として重力場強度の測定を提供することができ、また度々、絶対重力計を用いて事前にキャリブレーションされる。L a C o s t e R o m b e r g C G 5（<http://www.scintrexLtd.com/documents/CG-5BrochureRev1.pdf> [2014 年 8 月 21 日アクセス] ）の相対重力計は、ゼロ長スプリングを用い、できるだけ長く重力計の振動期間を確保し、感度の改善につながる。この装置のセンシングは、静電気である。これは、上述した絶対重力計よりもかなり小さく、約 8 kg の質量である。しかしながら、感度も低減する（図 12 参照）。この装置は、また、製造及び購入に高価でもある。

40

【 0 0 0 9 】

スマートフォンは、とりわけ、スクリーンの配向を検出するため、微小電気機械（MEMS（micro-electromechanical））加速度計をよく包含する。i P h o n e（登録商標）3 は、S T マイクロエレクトロニクス L I S 3 3 1 D L 加速度計を用いる。これは、数百

50

H z のオーダーの高い共振振動数を有する。そのような加速度計は、高感度とは考えられていない。

【 0 0 1 0 】

Zwahlen et al (2010) [P.Zwahlen、A-M.Nguyen、Y.Dong、F.Rudolf、M.Pastre、H.Schmid."Navigation grade MEMS accelerometer." Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)、2010 IEEE 23rd International Conference on、pp.631-634.IEEE、2010]において、MEMS 加速度計が記述される。この装置は、中間電極の両側に配された上部及び下部電極を有する。中間電極が、試験おもり (proof mass) として機能し、システムの平面外に振動できる。おもりの振動の程度が、容量センシングを用いてモニタリングされる。この装置が、たった約 2000 ng / Hz の感度を有する。

10

【 0 0 1 1 】

SERCEL 428XL は、 $10 \sim 200\text{ Hz}$ の範囲で 40 ng / Hz の感度を持つ商業的に入手可能な MEMS 加速度計である。幾つかのモデルがあり、最軽量のものが、 2.8 W の消費電力で 0.35 kg である。共振振動数が利用できなく、また、地球潮汐を測定するのに十分な安定性を持つことを示す何らの情報も発行されていない。

【 0 0 1 2 】

図 12 は、装置質量、およそその価格、 ng / Hz での感度に関する上述した加速度計及び重力計の比較を示す。バブルサイズが装置コストを表す。

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

20

【 0 0 1 3 】

本願発明者らは、相当なサイズの低減により加速度計及び重力計をよりポータブルにすることが便利であろうと考える。既知のマイクロスケールの加速度計は、例えば、上述した重力計装置と比較する時、数オーダーの度合いで重量が低減されるものの、それらの感度が相当に低減され、それらの共振振動数がかなり高いという欠点を有する。より高い共振振動数のシステムは、より低い共振振動数の同一のシステムよりも、適用されるある加速度に関してより小さいおもり変位を与える。本出願においては、「共振振動数」は、外部駆動振動数 (external driving frequency) なしで、例えば、その変位及び開放により、小さい衝撃が試験おもりに適用される時、試験おもりが振動する最低振動数を意味する。

【 0 0 1 4 】

30

本発明は、少なくとも一つの上述の問題を解決するために想到された。好適には、本発明は、上述の問題の少なくとも一つを低減、改良、回避、又は解決する。

【 0 0 1 5 】

詳細には、本発明者らは、低い共振振動数を持つ構成と小さい質量の試験おもりを組み合わせるアプローチを想到した。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 6 】

よって、第 1 の好適な側面においては、本発明は、支持部に対する試験おもりの変位を許容する少なくとも二つのたわみ部によりお互いに結合された支持部と試験おもりを有する加速度測定装置を提供する。支持部が、試験おもりの変位のための空間を規定する。装置は、力 - 変位曲線の少なくとも一部について、変位の増加で試験おもりの力 - 変位曲線の勾配率が増加するように構成される。試験おもりの共振振動数は、試験おもりが 10 Hz 以下の共振振動数で振動可能であるように、少なくとも部分的に、重力に従う力の方向に対する装置の配向により決定される。試験おもりが 1 グラム 未満の質量を有する。

40

【 0 0 1 7 】

本発明の第 2 側面は、本発明の第 1 側面の装置の使用を提供し、重力に従う力といった力で試験おもりに変位を生じさせ、試験おもりにかかる力、又は試験おもりに生じる変位を決定するステップを含む。

【 0 0 1 8 】

本発明の第 3 側面は、モノリス (monolith) からの減プロセス (subtractive process)

50

を介して、支持部、たわみ部、及び試験おもりの少なくとも一部を形成するステップを含む第 1 側面の装置の製造方法を提供する。

【 0 0 1 9 】

本発明の第 4 側面は、各装置の面が加速度を測定するように適合された各装置の振動面が、装置の別のものの振動面に対して非平行で配向される本発明の第一側面の装置の 3 つ以上の組み合わせ品を提供する。

【 0 0 2 0 】

この組み合わせ品では、装置は、一つの空間次元よりも多くの、好ましくは 3 つの空間次元における加速度を同時に測定可能であり、ここで、典型的には、単一の装置は、一時に単一の空間次元での測定に制限される。そのような装置の組み合わせ品は、例えば、装置が、慣性ナビゲーションセンサーでの使用のための加速度計として機能することを許容する。本発明の好適な実施形態においては、たわみ部が柔らかく、従って、例えば、1 g (1 g field) により、試験おもりが容易に変位可能である。従って、試験おもりが、一つの面のみで動くように実質的に制約され、より好ましくは、一つの方向に沿ってのみ動くように実質的に制約されることが望ましい。しかしながら、これは、単一の装置が一時に単一の空間次元での測定に制限されることを意味する。特に好適な実施形態においては、装置の感度の個別の方向が、直交座標に沿って配置される。

【 0 0 2 1 】

本発明の第 5 側面が、本発明の、第 1 側面に係る装置のアレイを含み、又は、第 4 側面に係る組み合わせ品のアレイを含むグラジオメーターを提供する。

【 0 0 2 2 】

このような態様で 2 つ又はより好ましくは同一の装置（又は組み合わせ品）を組み合わせることにより、慣性ノイズ及びノイズ又は震動加速度の影響が低減又は除去され、また、ある領域における重力場での非常に小さい空間変動の検出を許容する。各装置がそれ自体で重力計として機能し、グラジオメーター・アレイが、測定の精度を大きく高める。

【 0 0 2 3 】

図 1 1 は、グラジオメーターの動作原理を説明する概略的な組み合わせ品を示す。x での装置が、

$$g(x) + \alpha \ddot{x}$$

の加速度を測定し、第 2 項が、外部の地動加速度に由来する。x + dx での装置が、

$$g(x + dx) + \beta \ddot{x}$$

の加速度を測定する。及び α は、地動加速度の強度を表す定数である。（地動加速度に同等に応答するように装置らを調整することにより） $\alpha = \beta$ を確保することは、各装置への外部振動の影響が同一であることを意味し、従って、2 つの装置間の読み取りの差分が、

$$g(x + dx) - g(x)$$

を与える。もし 2 つの装置が、ベースライン L 上で離間されるならば、そのベースライン上の重力場の強度における勾配が、次のように表される。

$$\frac{dg(x)}{dL} = \frac{1}{L} (g(x + dx) - g(x))$$

【 0 0 2 4 】

これを行うため、好ましくは、装置のアレイにおいて、装置らが、スペーサーを用いてお互いに対して固定 (rigidly fixed) され、行われる如何なる測定においても一貫してそれらの相対的な間隔が一定に保たれる。より好ましくは、アレイ内の装置の相対的な間隔が温度変化で実質的に変化しないことを確保するため、このスペーサーが、低い熱膨張係数を有する材料から成る。スペーサーは、好ましくは、超低膨張ガラスから成る。

【 0 0 2 5 】

好ましくは、装置間隔が少なくとも 0 . 0 5 m である。装置間隔は、最大 0 . 2 m であり得る。例えば、約 0 . 1 m の間隔が適切である。そのような構成において、装置らは、勾配に感度があるように十分に離間されるが、測定に有害に影響することから温度及び回転加速度といった環境影響のリスクがあるまで離間されない。0 . 2 m 以下の間隔は、上述のように硬質のスペーサー、より好ましくは、超低膨張ガラススペーサーで装置が結合されることも許容する。

【 0 0 2 6 】

本発明の第 1、第 2、第 3、第 4、及び / 又は第 5 側面は、次のオプションの特徴の一つ、又は、適合する限りにおいて任意の組み合わせを持ち得る。加えて、これらの側面の任意の一つが、これらの側面の任意の他の一つに組み合わせられ得る。

10

【 0 0 2 7 】

好ましくは、試験おもりが、0 . 5 グラム未満の質量を有する。より好ましくは、試験おもりが、0 . 1 グラム未満の質量を有する。

【 0 0 2 8 】

好ましくは、試験おもりの共振振動数は、装置が重力に従う力の方向に直交する平面外に傾斜されるに応じて減少する。

【 0 0 2 9 】

試験おもりは、装置が重力に従う力の方向に直交して配向される時に最大限でも 5 0 H z の振動数を有し得る。より好ましくは、装置が、重力に従う力の方向に直交して配向される時、試験おもりは、最大限でも 2 0 H z の共振振動数を有する。幾つかの実施形態においては、装置が、重力に従う力の方向に直交して配向される時、試験おもりは、最大限でも 1 0 H z の共振振動数を有し得る。

20

【 0 0 3 0 】

装置は、たわみ部の 2 以上の組を含み得る。たわみ部の 2 以上の組が用いられる時、横及び傾斜モードといった望ましくない振動モードが抑制できる。たわみ部の 2 以上の組を用いることは、実質的に一つの自由度を持つように振動を制約できる。もちろん、たわみ部の 2 以上の組の使用は、約 3 0 ~ 4 0 倍で基本、リニアモードよりも横 / 傾斜モードが強くなる (stiffer) ことを確かにする。

【 0 0 3 1 】

「力 - 変位曲線の勾配率」は、力 F が、縦座標上にプロットされ、変位 z が、横座標上にプロットされた力 - 変位曲線の数学的な勾配率、すなわち、 $|dF/dz|$ を意味する。ここで、変位 (及び / 又は力) が、負の値に測定されるように選択できることが意図され、故に、曲線の勾配の数学的係数に依存する。たわみ部が弾性ドメインでのみ作動することが更に意図される。

30

【 0 0 3 2 】

好ましくは、たわみ部、支持部、及び試験おもりの組み合わせ品が、いわゆる「反スプリング (anti-spring)」効果に帰結する。この組み合わせ品においては、試験おもりが、より簡単に変位され、すなわち、「より軟らかい」スプリングにより支持されるように見え、変位が増加する。見かけ上のより軟らかいたわみ部が、より低い共振振動数に帰結する。従って、(試験おもりに見込まれる動きの範囲内で) よりたわみ部が荷重されると、共振振動数が低下し、装置感度が増加する。

40

【 0 0 3 3 】

装置は、好ましくは、3 つのたわみ部を含み得る。好ましくは、たわみ部の数が、ちょうど 3 つである。驚くべきことに、本発明者らは、これが、たわみ部の一つのペア (すなわち、2 つのたわみ部) 又はたわみ部の 2 つのペア (すなわち、4 つのたわみ部) を用いる場合と比較して、改善されたパフォーマンスを提供することを見出している。3 つのたわみ部を用いることは、より高い変位での (at higher displacements) 反スプリング効果を制限する態様で、支持部に向かう試験おもりの変位を促進できる。よって、これは、装置の動作不安定性を回避できる。

50

【 0 0 3 4 】

好ましくは、各たわみ部が、試験おもりに一端で結合され、支持部に他端で結合される。試験おもりと支持部の間の利用可能な空間においてできる限り長いたわみ部を確実にするため、より好ましくは、たわみ部が、支持部に最も近い試験おもりの部分よりも支持部から更に離れた位置で試験おもりに結合される。これを補助するため、試験おもりが、試験おもりから突出してたわみ部との結合を形成する少なくとも一つの突起部分を含み得る。

【 0 0 3 5 】

好ましくは、各たわみ部の長さが、支持部の対向面 (opposing sides) 間の距離の少なくとも 25 % である。たわみ部が、支持部の対向面間の距離の最大限でも 50 % であり得る。長いたわみ部は、同一の断面形状で、同一材料から成る短いたわみ部よりも低い共振振動数に帰結するため有益である。好ましくは、2つのたわみ部が同一である。装置は、中央面に関して対称であり得、一つのたわみ部がその面の各側にある。例えば、4つのたわみ部が設けられる場合、好ましくは、対称面の両側に2つの実質的に同一のたわみ部がある。このようにして、試験おもりが制約され、実質的にリニアな軌道に沿って振動し、簡単な測定プロセスを許容する。これは、4つのたわみ部の装置の実施形態と呼ばれる。

【 0 0 3 6 】

発明者により、4つのたわみ部の実施形態の動作が、(力 - 変位曲線の係数がゼロに向かう) 連続的に減少する共振振動数に帰結し得ることが見出されている。大きい地動加速度の下、試験おもりは、幾つかの状況において、下方フレームに衝突することで、不安定になり得る。しかしながら、特に、低い共振振動数でも安定した動作点に装置を維持するべく閉ループフィードバックシステムを用いて装置が動作される場合、この構成は、まだ顕著な関心である。これが、以下、より詳細に記述される。

【 0 0 3 7 】

4つのたわみ部の配列 (geometry) の代替として、本発明者らは、簡単に上述したように、3つのたわみ部の配列を提案する。この実施形態においては、2つのたわみ部が用いられて反スプリングを形成し、他方、第3のたわみ部が、事実上、案内片持ち梁として作動する (これは、図4を参照して以下に更に論述される)。この種類の装置の利点は、試験おもりがその平衡 (equilibrium) 位置から変位される時、幾何的な反スプリングがまだ形成されることにあり、従って、共振振動数を低減する。しかしながら、装置が更に変位される時、第3の案内たわみ部が、装置の長手軸 P から離れるように試験おもりを押し、幾何的な反スプリングの最大の柔軟さを制限する。このように、装置は、最低の共振振動数を有するが、同時に、安定である。これは、望まれるならば、閉ループフィードバックシステムが省略されることを許容する。これは、装置の製造及び動作を簡素化する。もしこの最低の動作共振振動数が重力場に平行に選定されるならば、装置は、最低の共振振動数が重力計の動作点に一致する利益を有する。従って、安定し、また、フィードバック・ループを必要としない系 (system) を提供するため、4つよりむしろ3つのたわみ部を用いることができる。これは、片持ち梁構造がフィードバック・ループと同様に作動する時、より低い振動数に達せられることを許容する：変位力が漸近的にゼロに近づく時、隔離されたたわみ部が系をその鉛直位置 (vertical position) から押し離す。この横方向の力が、系を平衡にさせる。

【 0 0 3 8 】

装置は、好ましくは、実質的に一つの平面内でのみ振動することを試験おもりに許すように構成される。これと、(「重力荷重 (gravitational loading)」とも呼ばれる) たわみ部がより大きく荷重されることにより反スプリング効果がより顕著になる事実を組み合わせると、これは、試験おもりの共振振動数が、振動面と重力に従う力の方向の間の傾斜角の調整により選択される振動数に調整可能であることを意味する。地球の重力場において装置を傾斜することにより、共振振動数が、 $f_{\text{tilt}} / f_{\text{perp}}$ まで減じられ、ここで、 f_{tilt} は、地球の重力場に対して傾斜又は平行な時の装置の共振振動数であり、 f_{perp} が、地球の重力場に対して直交する時の装置の共振振動数である。好ましくは、 $f_{\text{tilt}} / f_{\text{perp}}$ が、最大限で 0.9 である。より好ましくは、 $f_{\text{tilt}} / f_{\text{perp}}$ が最大限で 0.8 であり

10

20

30

40

50

、最大限で0.7であり、最大限で0.6であり、最大限で0.5であり、最大限で0.4である。本発明の好適な実施形態においては、 $f_{\text{tilt}} / f_{\text{perp}}$ が、0.07の低さまで測定されている。好ましくは、重力に従う力の方向が振動面に在る時、 $f_{\text{tilt}} / f_{\text{perp}}$ の最低値が達成される。本発明者らは、センサー精度を犠牲にし、外部地動加速度に過剰に応答することなく、試験おもりを支持部及び／又はたわみ部に衝突させることなく、傾斜の最適値が、試験おもりの共振振動数を最小化するものであると知っている。

【0039】

他の既知の装置が、使用前にそれらのたわみ部を事前に荷重し、これにより、反スプリング効果を提供するが、これらは、加熱ヒーター及びラチェットを用いて行う。更には、これらの装置は、本発明の好適な実施形態のように、できるだけ低い振動数、及び／又はできるだけ小さい構成（フォーマット（format））を達成できない。

10

【0040】

好ましくは、各たわみ部は、支持部から試験おもりへたわみ部の長さ方向を規定する連続した弧状に延びるレスト形状を有する。「レスト形状」により、振動面が重力に従う力の方向に直交するように、すなわち、追加の重力荷重なしで、装置が配向される時のたわみ部の形状が意味される。たわみ部の幾何形状が、本発明の所望の効果を生じさせる。たわみ部の幅方向が、試験おもりの振動面における、また長さ方向に直交する方向として定義される。深さ方向が、試験おもりの振動面に直交し、長さ方向に直交する方向として定義される。

20

【0041】

好ましくは、たわみ部の幅に対するたわみ部の深さの比が、少なくとも10:1、より好ましくは、少なくとも15:1、またより好ましくは、約20:1又はこれよりも高いものであり得る。これは、試験おもりの振動面において、受けた力又は加速度にตอบสนองしてたわみ部が簡単に曲がることを許すが、深さ方向の厚みのため、試験おもりは、所望の面において実質的に振動するように構成される。

【0042】

好ましくは、たわみ部の長さに沿う平均のたわみ部の幅が、最大限で25 μm であり、より好ましくは最大限で15 μm であり、より好ましくは最大限で10 μm であり、またより好ましくは最大限で7 μm である。

30

【0043】

好ましくは、たわみ部の長さに沿う平均のたわみ部の深さが、少なくとも50 μm であり、より好ましくは、少なくとも100 μm であり、またより好ましくは、少なくとも150 μm である。たわみ部の深さが、例えば、少なくとも200 μm 又は少なくとも300 μm に相当に大きくなることも可能である。

【0044】

各たわみ部は、たわみ部の長さ方向に直交する断面形状を有し得、その断面形状が、深さと共に変化する幅を有する。好ましくは、断面が、深さ方向においてテーパ形状を有する。このようにして、振動面外へのたわみ部の硬さ（stiffness）が十分に高く維持できる。しかしながら、これに加えて、テーパの断面により、たわみ部の全体の柔軟性が高められる。より柔軟なたわみ部は、振動面内の共振振動数の低下に帰結し、また、試験おもりをを用いたより簡単な重力事前荷重を許容する。断面で、たわみ部は、例えば、実質的に三角形を有し、又は、より好ましくは台形を有し得る。この場合、断面の一边が、試験おもりの振動面に実質的に平行であり得る。例えば、断面が台形の場合、一边が、約7 μm の幅を有し、反対の平行な辺が、約4～5 μm の幅を有し得る。

40

【0045】

代替として、たわみ部は、実質的に矩形の断面を有し得る。好ましくは、この場合、矩形の短辺が試験おもりの振動面に実質的に平行であり、長辺が、その平面に実質的に直交する。

【0046】

好ましくは、装置の支持部とたわみ部が一体的に形成される。より好ましくは、支持部、

50

たわみ部、及び試験おもりの少なくとも一部が、一体的に形成される。試験おもりは、試験おもりの質量を増加するために追加される追加の要素を含み得る。

【0047】

モノリスからの減プロセス (subtractive process) により装置が製造されることが好適である。ここでは、「減プロセス」は、制御された態様でモノリスから選択的に材料が除かれる任意のプロセスを意味する。好ましくは、エッチングにより装置が製造される。適切なエッチング工程が、リソグラフィー工程、好ましくは、フォトリソグラフィー工程を含み、エッチングされるべき形状を画定する。好ましくは、モノリスは、シリコンを含み、またより好ましくは、モノリスは、シリコンウェハー又は基板である。装置がシリコンウェハー又は基板からモノリシックに形成される時、集積回路内に、又は、チップ上に簡単に組み込み可能である。シリコンウェハーのリソグラフィー及び選択的エッチングは、よく確立された技術であり、非常に小さい幅で、相対的に長い長さで、また、シリコンウェハーの厚みにより規定される深さでたわみ部が形成される。

10

【0048】

好ましくは、たわみ部は、例えば、モノリスからの減プロセスにより、その湾曲した弧形状に形成される。この場合、装置を形成するために用いられるパターンが、たわみ部の意図した形状に対応する湾曲した弧形状を含む。

【0049】

装置は、支持部に対する試験おもりの変位を決定するための変位決定手段を含み得る。

20

【0050】

装置は、好ましくは、反作用力を適用することにより試験おもりの逆方向の変位 (counter displacement) を生じさせるように適合される作動手段を更に含む。例えば、重力場強度が異なる領域に装置が動かされ、試験おもりにかかる重力に従う力に変化がある時、異なる重力場強度は、試験おもりの変位を生じさせる傾向がある。好ましくは、装置は、反作用力を測定するための手段を含む。好ましくは、試験おもりの位置を維持するために要求される反作用力を表す値の測定値が、重力に従う局所的な力 (local force) を決定するために用いられる。このように、装置は、可動部品無しで動作し、これが、装置の安定性と信頼性を向上する。作動手段は、反作用力を適用するための静電気要素を含み得る。作動手段は、別の種類のサーボ制御機構を含み得る。

30

【0051】

上述したように、装置の使用は、好ましくは、試験おもりにかかる力を決定するため、反作用力を適用することにより、試験おもりを逆方向に変位させるステップを更に含む。好ましくは、閉ループフィードバックシステムが用いられ、支持部に対する試験おもりの位置を維持し、そのようにするために要求される入力、試験おもりにかかる力を表す信号を提供する。より好ましくは、この位置が、試験おもりに静電気力を適用することにより維持される。先に述べたように、これは、装置の4つのたわみ部の実施形態にとって特に好適であり得る。

【0052】

好ましくは、装置の使用が、重力に従う力の方向に直交する平面外に装置を傾斜するステップも含み、これにより、試験おもりの共振振動数が減じられる。このようにして、装置は、特定の測定のために装置に望まれる感度に依存して所望の共振振動数に「調整」できる。可能な場合、最小の共振振動数は、鉛直配列 (vertical arrangement) に一致することを確保することが望ましく、装置が、重力計として動作可能である。これは、例えば、3つのたわみ部の実施形態に好適である。

40

【0053】

測定は、好ましくは、少なくとも1秒、より好ましくは少なくとも10秒、またより好ましくは少なくとも30秒の時間尺度に亘り実行される。ランダムノイズが占められるため、測定される加速度の変化速度が非常に遅いならば、より長い時間尺度で装置を用いて測定を実行することは、より正確な結果を明らかに生成し、対ノイズ信号比を高める。これは、より短期間の震動ノイズ (seismic noise) をフィルタリングで除外することにより

50

地上で動作することを装置に許容する。

【 0 0 5 4 】

好ましくは、装置は、最大 40 ng / Hz 、より好ましくは、最大 30 ng / Hz 、より好ましくは最大 20 ng / Hz 、より好ましくは最大 10 ng / Hz 、また、より好ましくは最大 5 ng / Hz の測定感度を有する。

【 0 0 5 5 】

本発明の更なるオプションの特徴が以下に提示される。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 5 6 】

ここで、本発明の実施形態が、添付図面を参照して例示として記述される。

10

【 図 1 】 図 1 は、本発明の第 1 側面に係る装置の好適な実施形態の平面図を示す。これは、4 つのたわみ部の実施形態である。

【 図 2 】 図 2 は、図 1 に示された装置の試験おもりの上部のクローズアップした斜視図を示す。

【 図 3 】 図 3 は、図 1 に比較して簡素化された図面を示す。

【 図 4 】 図 4 は、本発明の第 1 側面に係る装置の修正された実施形態の平面図を示す。これは、3 つのたわみ部の実施形態である。

【 図 5 】 図 5 は、図 4 に示された装置の試験おもりの上部のクローズアップした斜視図を示す。

【 図 6 】 図 6 は、図 4 と比較して簡素化された図面を示す。

20

【 図 7 】 図 7 は、本発明の 4 つのたわみ部の実施形態について、試験おもりの振動面と重力に従う力の方向に直交する平面の間の角度に依存する試験おもりの共振振動数の変化のグラフを示す。

【 図 8 】 図 8 は、3 つのたわみ部の実施形態について、試験おもりの振動面と重力に従う力の方向に直交する平面の間の角度に依存する試験おもりの共振振動数の変化のグラフを示す。最低の共振振動数が第 3 案内たわみ部から生じ、安定した低共振振動数の装置に帰結する。

【 図 9 】 図 9 は、本発明の第 4 側面の実施形態に係る、第 1 側面の実施形態に係る 3 つの装置から構築される組み合わせ品の斜視図を示す。これは、4 つのたわみ部の実施形態を示すが、3 つのたわみ部の実施形態でも同様の組み合わせ品が可能である。

30

【 図 10 】 図 10 は、本発明の第 4 側面の実施形態に係る 2 つの組み合わせ品を備えるグラジオメーター構造の模式図を示す。これは、4 つのたわみ部の実施形態を示すが、3 つのたわみ部の実施形態でも同様の組み合わせ品が可能である。

【 図 11 】 図 11 は、グラジオメーターの動作原理を図示する概略図を示す。

【 図 12 】 図 12 は、既知の先行技術の重力計及び加速度計のコスト、質量、及び感度の比較を示し、また、本発明に係る装置の値も同様に示す。

【 図 13 】 図 13 は、装置の 3 つのたわみ部の実施形態で測定された地球潮汐の測定結果を示す。装置は、重力計構造において動作され、地球の重力場の鉛直成分 (vertical component) を測定する。月と太陽の相対的な引力による、地球の重力場における一日 2 回の変化が明瞭に見える (地球潮汐)。装置は、震動分離なしで地上で動作し、震動ノイズが、30 秒間、出力フィルターを用いてフィルタリングされた。

40

【 図 14 】 図 14 は、重力荷重 (ここでは追加の質量の荷重) における変化での 4 つのたわみ部の装置について共振振動数のプロットを示す。最低の共振振動数が最大の質量の荷重に対応し、これは、重力場に対して平行に傾斜される装置に同様の影響を有する。

【 図 15 】 図 15 は、本発明の 3 つのたわみ部の実施形態に係る装置の全振動数帯域幅のプロットを示す。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 5 7 】

図 1 は、本発明に係る加速度測定装置 100 の実施形態を示す。この装置 100 は、 $220 \mu\text{m}$ 厚の単結晶シリコンウェハーから製作される。これは、4 つのたわみ部の実施形態

50

である。図 4 は、3 つのたわみ部の実施形態を示す。各実施形態において、同様の特徴が、同一の参照記号で示される。

【0058】

装置の支持部は、4 つの部材 4, 6, 8, 10 から構成された矩形フレーム 2 により形成される。部材 4, 6 は、反対及び平行であり、約 11.5 mm だけ隔てられる。部材 8, 10 も反対及び平行であり、約 11 mm だけ隔てられる。本実施形態においては、部材 4, 6, 8, 10 が一体的に形成され、全体の装置（以下に記述の試験おもりの部分は別とする）が、シリコンウェハーから選択的エッチングされる。部材 4 は、内面 4 a と外面 4 b を有する。部材 6 は、内面 6 a と外面 6 b を有する。部材 8 は、内面 8 a と外面 8 b を有する。部材 10 は、内面 10 a と外面 10 b を有する。表面 4 a が表面 6 a の反対であり、表面 8 a が表面 10 a の反対になるように矩形フレーム 2 が構成され、以下の記述の装置の特徴のための空間 3 を形成する。

【0059】

矩形フレーム 2 により画定される空間 3 に試験おもり 12 が配される。試験おもり 12 は、平面視において矩形であり、 $W_{PM} \times H_{PM}$ の寸法を持つ。ある実施形態においては、 W_{PM} が 7 mm であり、 H_{PM} が 6.5 mm である。しかしながら、図示の実施形態において、大きい変位時のたわみ部と試験おもり間の接触を回避するため、 $W_{PM} : H_{PM}$ の比が相対的に大きいことが有利であることが見出されている。試験おもり 12 は、反対端で (at opposing ends) 個別に 2 つの突起部 14 a 及び 14 b を有する。これらの突起部 14 a, 14 b の幅 W_N は、約 0.5 mm であり、試験おもり 12 の幅 W_{PM} よりも相当に小さい。試験おもりの中央部 20 が、試験おもり 12 の表面からページの面外に延びる。中央部 20 は、試験おもり 12 の質量を増加するために加えられ、ページの面におけるその寸法を増加する必要がない。これらの寸法を増加することは、適用された衝撃に応答して試験おもり 12 が震動することができる程度を制限するだろう。更には、もし試験おもり 12 が、フレーム 2 により画定される中央空間 3 のサイズよりも顕著に小さくない寸法をページの面において有するならば、重力の方向に直交する平面から更に離れるように装置が傾斜される時、試験おもり 12 が、フレーム 2 の底部材 10 の内面 10 a 又はたわみ部 17 a, 17 b に接触し得る。これは、明らかに望まれない影響である。

【0060】

装置は、2 組のたわみ部 16 a, 16 b 及び 17 a, 17 b を有し、これらは、フレーム 2 と試験おもり 12 に一体的に形成される。ある動作モードにおいては、装置が重力に従う力の変化を受ける時、試験おもり 12 が変位される傾向にあり、たわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17 b がより撓む。

【0061】

たわみ部 16 a, 16 b は、お互いに反対に置かれ、たわみ部 17 a, 17 b が、お互いに反対に置かれる。フレームの個別の内面 4 a, 6 a に一体的に形成される各たわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17 b の端部は、たわみ部の残部よりも幅広である。これらのフレーム取付部 19 a, 19 b, 19 c, 19 d が、たわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17 b とフレーム 4 a, 6 a の内面の間で高められた結合力を提供し、特に、さもなくば装置の欠陥につながるクラック核生成及び伝搬 (crack nucleation and propagation) の可能性を低減する。図 1 に図示の装置 100 の実施形態においては、取付部が実質的に台形である。

【0062】

個別のフレーム取付部分 19 a, 19 b, 19 c, 19 d の反対の各たわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17 b の端部が、個別の突起部 14 a, 14 b に結合される。たわみ部 16 a, 16 b が突起部 14 a に結合され、たわみ部 17 a, 17 b が突起部 14 b に結合される。たわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17 b それぞれは、たわみ部の取付部 18 a, 18 b, 18 c, 18 d により、これらの個別の突起部 14 a, 14 b に結合される。フレーム取付部分 19 a, 19 b, 19 c, 19 d と同様、これらは、たわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17 b の幅広部であり、個別のたわみ部 16 a, 16 b, 17 a, 17

bと突起部14a, 14bの間の高められた結合信頼性を提供する。たわみ部16a, 16b, 17a, 17bの突起取付部18a, 18b, 18c, 18dそれぞれは、漸広の湾曲した形状を有し、実質的に矩形部において終端し、これが、2つの反対の平行面を有し、それぞれが直角又は直角付近で突起部14a, 14bに接続する。たわみ部16a, 16b, 17a, 17bを、試験おもり12の外周13a, 13bではなく突起部14a, 14bに結合することで、たわみ部16a, 16b, 17a, 17bがより長くなることができ、従って、重力下でより簡単に曲がる。

【0063】

この実施形態において、たわみ部16a, 16b, 17a, 17bは、連続した弧状形状を有し、フレーム2と首部14a, 14bの間で延びる。増加する重力場の存在において、及び/又は、重力に従う力の方向に対して振動面が実質的に平行になるように装置100が配向される時、行われる如何なる測定も妨害するため、下方位置に変位される時にたわみ部16a, 16b, 17a, 17bが試験おもり12に接触しないような弧状形状である。

10

【0064】

同一の実施形態の簡素化された図面が図3に示されるが、より少ない参照記号により装置の特徴の識別を支援する。

【0065】

ここで図1に戻ると、装置100は、対称面Pに関して対称である。2組のたわみ部16a, 16b, 17a, 17bを有するこの対称構成の結果として、試験おもり12は、回転又は傾斜振動モードが実質的に抑制され、実質的に直線的に振動することができるのみに制約される。

20

【0066】

図2は、突起部14aを周囲する装置の部分のクローズアップ図を示す。本図面は、より詳細に、取付部18a, 18bの構造、特に、そのテーパ形状を示す。図2は、また、この実施形態におけるたわみ部16a, 16bの相対的な寸法をより明らかに示す。装置100のこの実施形態においては、4つのたわみ部16a, 16b, 17a, 17bの全てが実質的に同一であり、一つに関する寸法の記述が等しく残余の3つに当てはまる。「深さ方向」が「d」軸により示され、「幅方向」が「w」軸により示され、「長さ方向」が「l」軸により示される。図2において、たわみ部16aの幅が W_{flex} により示され、深さが D_{flex} により示され、全長が図示されない。長さは、弧状のたわみ部16aの全弧状長に対応し、この実施形態では、約5mmである。図2では、たわみ部16aの断面形状が三角形、又は、より好ましくは、台形（又はほぼ台形）であり、 $W_{flex} = 7 \mu m$ により示される底辺と、装置が製作されたシリコンウェハの厚みに対応する $D_{flex} = 220 \mu m$ の最大限を有する。三角又は台形形状は、深さ方向において $7 \mu m$ から $7 \mu m$ 未満に先細りになる。

30

【0067】

図4は、本発明に係る加速度測定装置100の好適な実施形態を示す。この装置100は、 $220 \mu m$ 厚の単結晶シリコンウェハから製作される。これは、3つのたわみ部の実施形態である。4つのたわみ部の実施形態と同様の言及がここにも当てはまる。4つのたわみ部の実施形態からたわみ部の一つを省略して3つのたわみ部の実施形態に到達することの利益は、上述したとおりであり、更に以下に論述される。図2及び3が図1に当てはまるように、図5及び6が図4に当てはまり、更にはここでは論述されない。

40

【0068】

図7は、振動面の角度（この場合、これは、フレーム2の前面（front surface）に平行である）がゼロから大きくなるに応じた（ここで、ゼロは、重力に従う力の方向に直交することに対応する）、図1の実施形態のフレーム2に関する試験おもり12の共振振動数の変化のグラフを示す。グラフは、傾斜角の増加で共振振動数が減少する傾向を明確に示す。傾斜がない位置では（すなわち、振動面が水平である）、共振振動数が約15Hzであり、装置が 14° で傾斜される時、5Hzの直下まで減少する。これは、装置が 90°

50

まで傾斜される際に継続する傾向であり、 90° で、たわみ部 16a, 16b, 17a, 17b が最大限に荷重され、従って、それらの「最高の柔軟さ」で、最低の共振振動数を与える。図 14 は、別の 4 つのたわみ部の実施形態について、 90° まで傾斜することに対応して、追加の重力荷重についての対応のプロットを示す。

【0069】

図 8 は、振動面の角度（この場合、これは、フレーム 2 の前面に平行である）がゼロから大きくなるに応じた（ここで、ゼロは、重力に従う力の方向に直交することに対応する）、図 4 の実施形態のフレーム 2 に関する試験おもり 12 の共振振動数の変化のグラフを示す。グラフは、傾斜角の増加で共振振動数が減少する傾向を明確に示す。傾斜がない位置では（すなわち、振動面が水平である）、共振振動数が約 26 Hz であり、装置が 87° で傾斜される時、1.9 Hz の直下まで減少する。これは、幾何学的な反スプリング効果を明らかに示す。装置が $87^\circ \sim 90^\circ$ に傾斜される時、案内たわみ部 16a は、装置にその共振振動数を増加させる幾何的な反スプリングを制限することを開始する。従って、装置の 3 つのたわみ部の実施形態が、固有に安定した低共振振動数を生成する明らかな観察がある。

10

【0070】

図 9 は、3 つの装置 100a, 100b, 100c の組み合わせ品の実施形態を示す。これらの装置は、お互いに同一である。これらは、 $W_{PM} : H_{PM}$ の比においてだけ図 1 の装置 100 と異なる。この実施形態は、本発明の第 4 側面に対応する。それぞれの装置が、振動面において振動するように試験おもりが制約される方向によって規定される感度軸を有する。図 4 では、これらの感度軸のいずれもが一致しない。結果として、組み合わせ品 200 は、3 つの空間次元において加速度に感度を持つ。組み合わせ品 200 の幾何形状をより明らかに規定するため、装置 100a, 100b, 100c が、円柱 50 の一面上に示され、それぞれが、直角三角形プリズム 52a, 52b, 52c の斜面を形成する。図 9 は、4 つのたわみ部の装置を用いた実施を示すが、3 つのたわみ部の装置も対応のように機能する。

20

【0071】

この実施形態においては、装置 100a, 100b, 100c の 3 つの下部部材 4 のそれぞれの間の角度が、 60° である。このようにして、装置 100a, 100b, 100c の下部部材 4 が、等辺の三角形パターンを形成する。各装置と円柱 50 の一面の間の角度は、この場合、等しく、また、約 60° である。[実際には、この角度は、逆タンジェント（ルート（2））= 54.7° である] このような態様で、3 つの装置 100a, 100b, 100c が、 $(90 - \quad)^\circ$ の角度で中央軸 A から外側に傾斜される。

30

【0072】

図 10 は、図 9 に示した装置 100a, 100b, 100c の 2 つの組み合わせ品 200a, 200b から成るグラジオメーター構造を示す。これらは、超低膨張スペーサー 54 により離間される。このようにして、グラジオメーターは、スペーサーの長さに沿う重力場における勾配を測定するように構成され、重力場の絶対値がそれから計算できる。図 10 は、4 つのたわみ部の装置を用いる実施を示すが、3 つのたわみ部の装置も対応のように機能する。

40

【0073】

図 13 は、図 4 に図示される単一の装置で引力の地球潮汐の測定結果を示す。2014 年 12 月 ~ 2015 年 3 月まで、システムが連続動作に置かれた。装置は、2.2 Hz の共振振動数を有する鉛直構成（vertical configuration）で動作した。試験おもりの位置が光学センサーで読み出される間、シリコンウェハーの温度は、目標動作温度の 1 mK 内に維持されるように閉ループヒーターにより維持した。装置は、振動分離なしで地上において動作した。結果において地球潮汐が明らかに見える。結果は、2015 年 3 月 13 日と 19 日の間のデータを示す。これは、MEMS 重力計でこのような測定が報告される初めてのことであると思われる。

【0074】

50

図 15 は、本発明の 3 つのたわみ部の実施形態に係る装置の全振動数帯域幅のプロットを示す。これは、 10^{-5} Hz での潮汐信号、 0.17 Hz でのマイクロ震動ピーク、及び、 2.2 Hz での共振を示す。 10^{-3} Hz のピークが、装置が受ける熱制御のアーチファクトであることに留意されたい。このプロットは、装置の顕著な安定性と帯域幅を実証する。

【 0 0 7 5 】

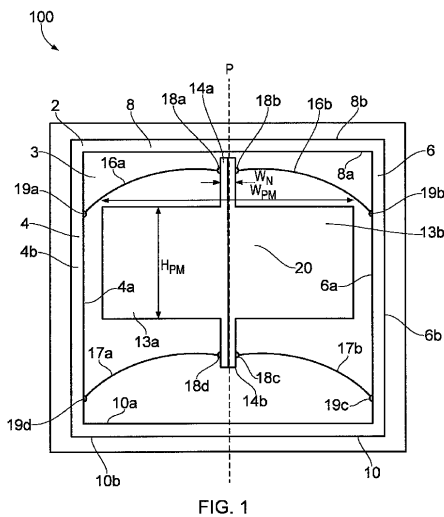
上述のように例示の実施形態と一緒に本発明を記述したが、この開示が与えられる時、多数の均等の変更及びバリエーションが当業者には明らかになる。従って、上述した本発明の例示の実施形態が、例示であり、限定ではないものと考えられる。記述した実施形態への様々な変更が、本発明の精神及び範囲から逸脱することなくなされ得る。

10

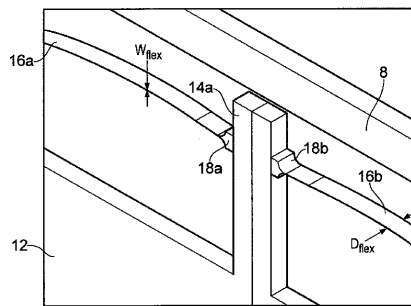
【 0 0 7 6 】

上述した全ての参考文献が、参照により本明細書に組み込まれる。

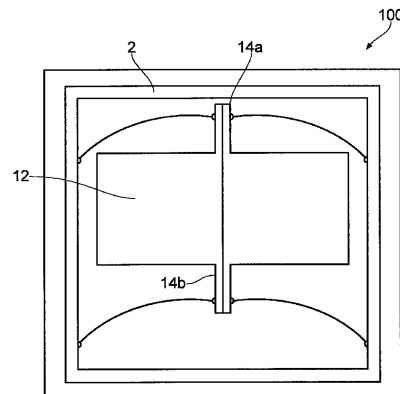
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】

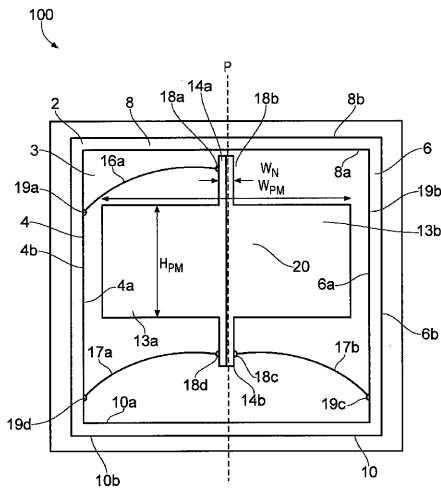


FIG. 4

【 図 5 】

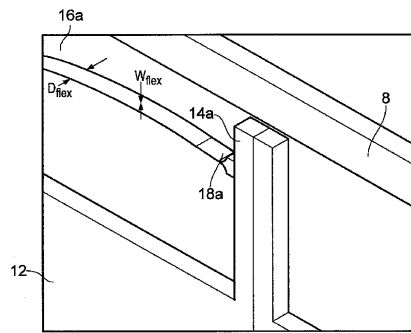


FIG. 5

【 図 6 】

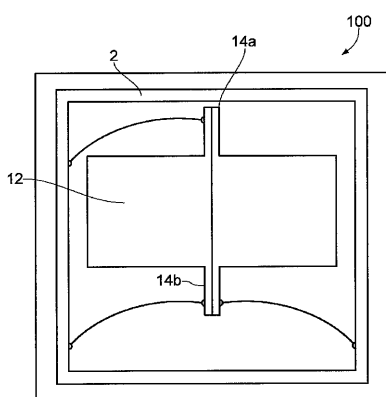
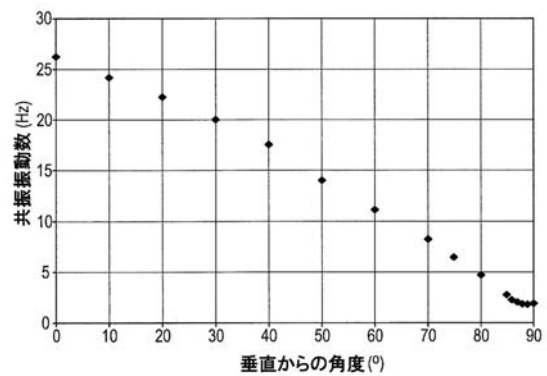
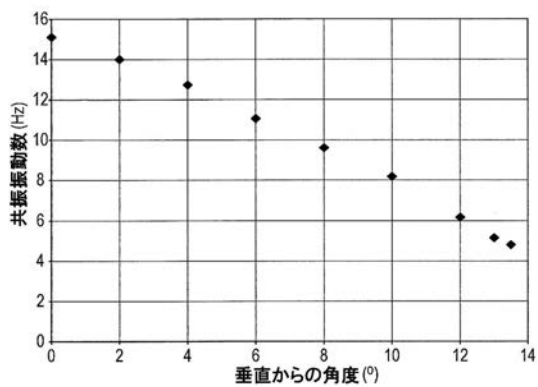


FIG. 6

【 図 8 】



【 図 7 】



【図 9】

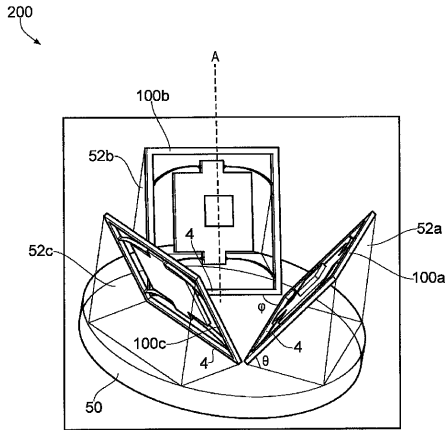
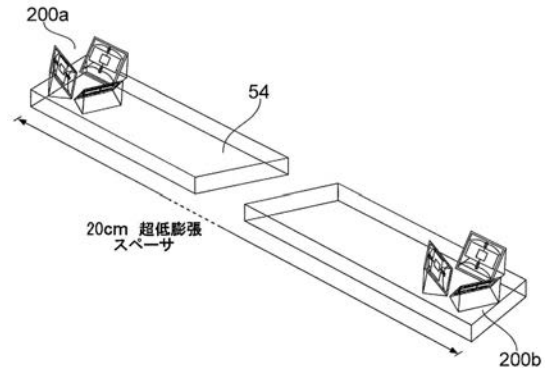


FIG. 9

【図 10】



【図 11】

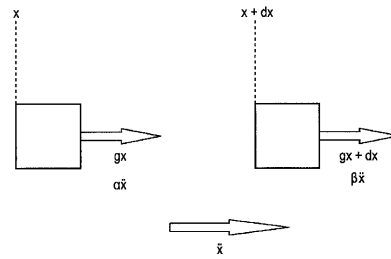
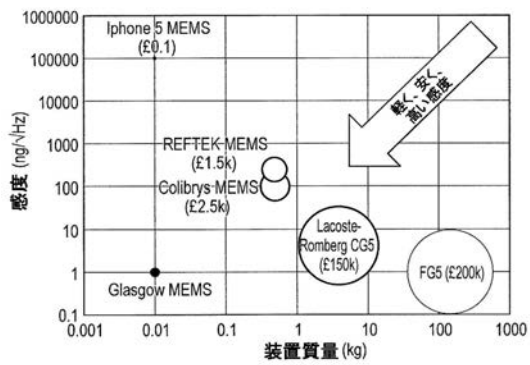
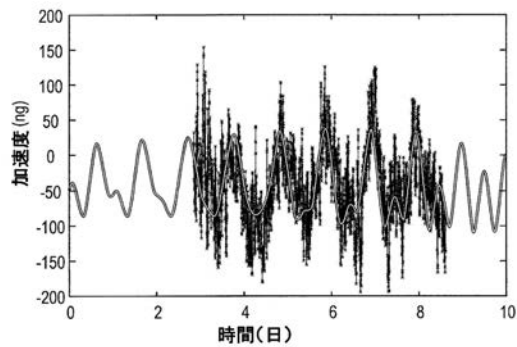


FIG. 11

【図 12】



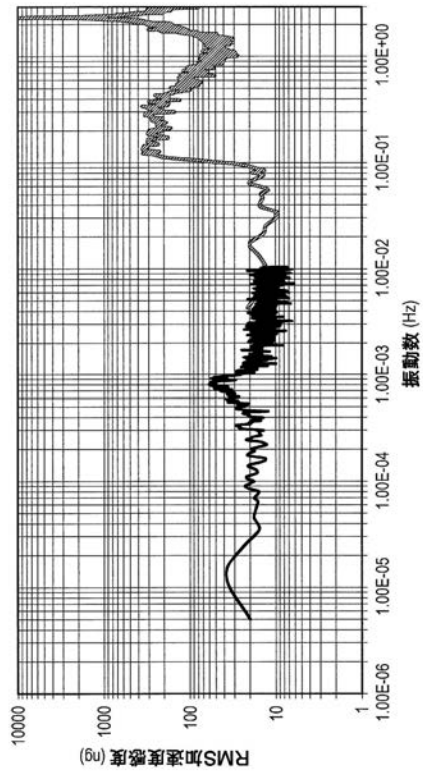
【図 13】



【図 14】



【図 15】



【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/069572

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01V7/00
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01V G01P G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2011/132088 A1 (JENKINS LYLE J [US] ET AL) 9 June 2011 (2011-06-09)	1-10, 14-19
Y	paragraph [0002] paragraph [0004] paragraph [0009] paragraph [0010] paragraph [0022] paragraph [0036] paragraph [0044] figures 3,4	11-13, 20-23
Y	----- US 5 165 279 A (NORLING BRIAN L [US] ET AL) 24 November 1992 (1992-11-24) column 1, line "Summary of the Invention" column 3, line 9 - line 12 ----- -/--	11-13, 20,21

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 January 2016

Date of mailing of the international search report

01/02/2016

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel: (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hippchen, Sabine

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2015/069572

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2006/207326 A1 (MOODY MARTIN V [US] ET AL) 21 September 2006 (2006-09-21) paragraph [0077]; figure 3b -----	22,23
A	US 2009/228235 A1 (CARR DUSTIN WADE [US]) 10 September 2009 (2009-09-10) paragraph [0006] paragraph [0013] paragraph [0020] claim 8 -----	1-23

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/069572

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2011132088	A1	09-06-2011	NONE
US 5165279	A	24-11-1992	DE 69005611 D1 10-02-1994 DE 69005611 T2 28-04-1994 US 5165279 A 24-11-1992
US 2006207326	A1	21-09-2006	NONE
US 2009228235	A1	10-09-2009	NONE

フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

(72)発明者 ジャイルズ・ドミニク・ハモンド

イギリス国ジー１２・８キューキュー、グラスゴー、ユニバーシティ・オブ・グラスゴー、ケルビン・ビルディング、スクール・オブ・フィジクス・アンド・アストロノミー

(72)発明者 リチャード・ポール・ミドルミス

イギリス国ジー１２・８キューキュー、グラスゴー、ユニバーシティ・オブ・グラスゴー、ケルビン・ビルディング、スクール・オブ・フィジクス・アンド・アストロノミー

(72)発明者 ダグラス・ジョン・ポール

イギリス国ジー１２・８エルティー、グラスゴー、ユニバーシティ・オブ・グラスゴー、オークフイールド・アベニュー、ランキン・ビルディング、スクール・オブ・エンジニアリング

(72)発明者 アントニオ・サマレッリ

イギリス国ジー１２・８キューキュー、グラスゴー、ユニバーシティ・オブ・グラスゴー、ケルビン・ビルディング、スクール・オブ・フィジクス・アンド・アストロノミー

Fターム(参考) 2G105 FF04 FF16