

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6300402号
(P6300402)

(45) 発行日 平成30年3月28日(2018.3.28)

(24) 登録日 平成30年3月9日(2018.3.9)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 P 15/125 (2006.01)	GO 1 P 15/125 V
GO 1 P 15/13 (2006.01)	GO 1 P 15/13 B
GO 1 P 15/08 (2006.01)	GO 1 P 15/08 1 O 1 B
	GO 1 P 15/08 1 O 2 F

請求項の数 15 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2014-20341 (P2014-20341)	(73) 特許権者	504199127
(22) 出願日	平成26年2月5日(2014.2.5)		エヌエックスピー ユーエスエイ インコーポレイテッド
(65) 公開番号	特開2014-153363 (P2014-153363A)		NXP USA, Inc.
(43) 公開日	平成26年8月25日(2014.8.25)		アメリカ合衆国 テキサス州 78735
審査請求日	平成29年1月25日(2017.1.25)		オースティン ウィリアム キャノン
(31) 優先権主張番号	13/760,465		ドライブ ウェスト 6501
(32) 優先日	平成25年2月6日(2013.2.6)	(74) 代理人	100142907
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 本田 淳
		(72) 発明者	イーチェン リン
			アメリカ合衆国 12047 ニューヨーク州 コホーズ ダッチ メドーズ ドライブ 9

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スティックシオン耐性MEMS デバイスおよび動作方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

微小電気機械システム(MEMS)デバイスであって、
 基板と、
 離間された関係で前記基板の表面の上に位置づけられている可動要素と、
 前記可動要素を前記基板に相互接続させる少なくとも1つのバネ部材であって、前記可動要素の運動を可能にし、および第1の剛性を示す、少なくとも1つのバネ部材と、
 前記可動要素に対向している少なくとも1つの電極と、
 前記可動要素に対向している少なくとも1つのフォースフィードバック電極と、
 前記少なくとも1つの電極と通信状態にある電圧源であって、該電圧源は前記バネ部材の剛性を前記第1の剛性から第2の剛性にシフトさせるために前記少なくとも1つの電極にバネ軟化電圧を印加するように構成されており、前記第2の剛性は前記第1の剛性よりも小さい、電圧源と、
 前記可動要素に与えられる入力刺激に応答して電気出力信号を生成するための検知回路であって、前記少なくとも1つの電極と電氣的に通信している、検知回路と、
 前記電気出力信号に基づいて前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極に印加されるフィードバック電圧を制御するための静電氣的フォースフィードバック回路であって、前記検知回路と前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極との間に置かれている静電氣的フォースフィードバック回路と、
 前記少なくとも1つの電極と電氣的に通信している検出回路であって、前記少なくとも

10

20

1つの電極からの出力信号にตอบสนองして前記可動要素のスティクション状態を検出するように構成されている、検出回路と、

前記少なくとも1つの電極、前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極、および前記可動要素と通信しているマルチプレクサ回路であって、前記スティクション状態にตอบสนองして前記バネ軟化電圧を実質的に除去するために、前記少なくとも1つの電極、前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極、および前記可動要素の各々を均等な電圧電位に設定するように構成されている、マルチプレクサ回路とを備える、MEMSデバイス。

【請求項2】

前記少なくとも1つのバネ部材の前記第1の剛性は、前記バネ部材の所定の動作剛性の2倍よりも大きい、請求項1に記載のMEMSデバイス。

10

【請求項3】

前記第2の剛性は前記所定の動作剛性にほぼ等しく、前記所定の動作剛性は入力刺激の大きさに対する前記可動要素の感度を規定する、請求項2に記載のMEMSデバイス。

【請求項4】

前記少なくとも1つのバネ部材の前記第1の剛性は、前記バネ部材の所定の動作剛性よりも2～6倍大きい範囲内にある、請求項1に記載のMEMSデバイス。

【請求項5】

前記可動要素は、前記バネ軟化電圧が前記少なくとも1つの電極に印加されるに際し、入力刺激にตอบสนองして運動するように構成されている、請求項1に記載のMEMSデバイス。

20

【請求項6】

前記可動要素は、前記可動要素の第1の端部と第2の端部との間に位置づけられている回転軸に対して運動するように構成されており、前記可動要素の第1の部分は前記回転軸と前記第1の端部との間に形成されており、前記可動要素の第2の部分は前記回転軸と前記第2の端部との間に形成されており、前記第1の部分が有する第1の質量は前記第2の部分の第2の質量よりも大きく、

前記少なくとも1つの電極は、前記可動要素の前記第1の部分に対向している第1の電極と、前記可動要素の前記第2の部分に対向している第2の電極とを含み、前記バネ軟化電圧は、前記第1の電極および前記第2の電極の各々に印加される、請求項1に記載のMEMSデバイス。

30

【請求項7】

微小電気機械システム(MEMS)デバイスを動作させる方法であって、該MEMSデバイスは、離間された関係で基板の表面の上に位置づけられている可動要素と、前記可動要素を前記基板と相互接続する少なくとも1つのバネ部材と、前記可動要素に対向している少なくとも1つの電極とを備え、前記少なくとも1つのバネ部材は前記可動要素の運動を可能にし、前記少なくとも1つのバネ部材は第1の剛性を示し、前記方法は、

前記バネ部材の剛性を前記第1の剛性から第2の剛性にシフトさせるために前記少なくとも1つの電極にバネ軟化電圧を印加するステップであって、前記第2の剛性は前記第1の剛性よりも小さい、印加するステップと、

40

前記少なくとも1つの電極から提供される出力信号から前記可動要素のスティクション状態を検出するステップであって、前記スティクション状態は、前記可動要素が許容可能な運動範囲を超えて運動していることを示す、検出するステップと、

前記バネ部材の前記剛性を前記第2の剛性から前記第1の剛性にシフトさせて、それによって前記可動要素が前記許容可能な運動範囲内の第1の位置に戻ることを可能にするために、前記スティクション状態にตอบสนองして前記少なくとも1つの電極から前記バネ軟化電圧を除去するステップとを備え、

前記MEMSデバイスは、前記少なくとも1つの電極と電氣的に通信状態にある検知回路と、前記可動要素に対向している少なくとも1つのフォースフィードバック電極と、前記検知回路と前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極との間に置かれている静

50

電氣的フォースフィードバック回路とをさらに含み、前記方法は、

前記検知回路において、前記可動要素に与えられる入力刺激に応答して電気出力信号を生成するステップと、

前記フォースフィードバック回路において、前記電気出力信号に基づいてフィードバック電圧を制御するステップと、

前記フォースフィードバック回路から前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極に前記フィードバック電圧を供給するステップとをさらに備え、

前記除去する動作は、前記少なくとも1つの電極、前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極、および前記可動要素の各々を均等な電圧電位に設定するステップを備える、方法。

10

【請求項 8】

前記第 2 の剛性は所定の動作剛性にほぼ等しい、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 9】

前記少なくとも1つのバネ部材の前記第 1 の剛性は、前記バネ部材の所定の動作剛性の 2 倍よりも大きく、前記所定の動作剛性は入力刺激の大きさに対する前記可動要素の感度を規定する、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

前記可動要素に与えられる入力刺激に応じた入力信号を検知するステップをさらに備え、該検知動作は前記バネ軟化電圧が前記少なくとも1つの電極に印加されるに際し実行される、請求項 7 に記載の方法。

20

【請求項 11】

前記検出動作は、前記出力信号が過負荷閾値を超えることを判定するステップを備える、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 12】

前記除去する動作後、前記可動要素の前記第 1 の位置への復帰を検出するステップと、前記バネ部材の前記剛性を前記第 1 の剛性から前記第 2 の剛性にシフトさせるために前記少なくとも1つの電極に前記バネ軟化電圧を再び印加するステップとをさらに備える、請求項 7 に記載の方法。

【請求項 13】

前記可動要素は、前記可動要素の第 1 の端部と第 2 の端部との間に位置づけられている回転軸に対して運動するように構成されており、前記可動要素の第 1 の部分は前記回転軸と前記第 1 の端部との間に形成されており、前記可動要素の第 2 の部分は前記回転軸と前記第 2 の端部との間に形成されており、前記第 1 の部分は前記第 2 の部分の第 2 の質量よりも大きい第 1 の質量を有し、前記少なくとも1つの電極は、前記可動要素の前記第 1 の部分に対向している第 1 の電極と、前記可動要素の前記第 2 の部分に対向している第 2 の電極とを含み、前記印加する動作は、前記第 1 の電極および前記第 2 の電極の各々に前記バネ軟化電圧を印加する、請求項 7 に記載の方法。

30

【請求項 14】

微小電気機械システム (MEMS) デバイスであって、
基板と、

40

離間された関係で前記基板の表面の上に位置づけられている可動要素と、

前記可動要素を前記基板に相互接続させる少なくとも1つのバネ部材であって、前記可動要素の運動を可能にし、および第 1 の剛性を示す、少なくとも1つのバネ部材と、

前記可動要素に対向している少なくとも1つの電極と、

前記可動要素に対向している少なくとも1つのフォースフィードバック電極と、

前記少なくとも1つの電極と通信状態にある電圧源であって、該電圧源は前記バネ部材の剛性を前記第 1 の剛性から第 2 の剛性にシフトさせるために前記少なくとも1つの電極にバネ軟化電圧を印加するように構成されており、前記第 2 の剛性は前記第 1 の剛性よりも小さい、電圧源と、

前記可動要素に与えられる入力刺激に応答して出力信号を生成するための検知回路であ

50

って、前記少なくとも1つの電極と電氣的に通信している検知回路と、

前記出力信号に基づいて前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極に印加されるフィードバック電圧を制御するための静電氣的フォースフィードバック回路であって、前記検知回路と前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極との間に置かれている静電氣的フォースフィードバック回路と、

前記検知回路と電氣的な通信状態にある検出回路であって、前記出力信号に応答して前記可動要素のスティクション状態を検出するように構成されている、検出回路と、

前記少なくとも1つの電極、前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極、および前記可動要素と通信状態にあるマルチプレクサ回路であって、前記スティクション状態に
10 応答して前記バネ軟化電圧を実質的に除去するために、前記少なくとも1つの電極、前記少なくとも1つのフォースフィードバック電極、および前記可動要素を均等な電圧電位に設定する、マルチプレクサ回路とを備える、MEMSデバイス。

【請求項15】

前記少なくとも1つのバネ部材の前記第1の剛性は、前記バネ部材の所定の動作剛性の2倍よりも大きく、前記第2の剛性は前記所定の動作剛性にほぼ等しく、前記所定の動作剛性は前記入力刺激の大きさに対する前記可動要素の感度を規定する、請求項14に記載のMEMSデバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般的には微小電気機械システム(MEMS)デバイスに関する。より具体的には、本発明は、スティクションに対する耐性が増強されたMEMSデバイスに関する。
20

【背景技術】

【0002】

マイクロマシニングならびに他の微細加工技法および微細加工処理の進歩は、広範なマイクロ電子および微小電気機械システム(MEMS)デバイスの製造を可能にしてきた。MEMSの一般的な用途の1つは、センサデバイスの設計および製造である。MEMSセンサデバイスは、自動車、慣性誘導システム、家庭用電化製品、さまざまなデバイスのための保護システム、ならびに、多くの他の産業、科学、および工学システムなどの用途に
30 広く使用されている。そのようなMEMSデバイスは、加速、角速度、圧力、温度などのような物理状態を検知し、検知された物理状態を表す電気信号を提供するために使用されている。

【0003】

以下の図面と併せて考察して詳細な説明および請求項を参照することによって、より完全に本発明を理解することができる。これらの図面では全般に亘って同様の参照符号は類似の項目を示す。

【0004】

なお、モノリシック電極を備える加速度計について、特許文献1に記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】米国特許第8,322,216号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

プレートおよびビームなどの懸垂可動微小構造体が、さまざまな微小電気機械システム(MEMS)デバイスの製造に一般的に使用されている。懸垂微小構造は、一般的に、剛性が高く比較的大きい表面積を有する。しかしながら、そのような懸垂微小構造のための懸架バネは、用途に応じて相対的に剛性が低い場合がある。加えて、一般的に微小構造は
50

、それらの支持基板から数マイクロメートル（ミクロン）離れて作製される。これらの特性が組み合わさって、MEMSデバイスは、懸垂可動微小構造を支持基板に向かって垂直に、および/または包囲構造もしくは側方止め具に向かって側方に偏向させる可能性がある力の影響を受けやすくなる。この偏向力が十分に強い場合、可動部材は下方に存在する基板または側方構造と接触し、一時的にまたは永続的に付着し、それによって出力信号の誤りおよび/またはデバイスの故障が引き起こされる可能性がある。可動構造の意図しない付着をスティクションと称する。

【0007】

スティクションは、MEMSデバイス作製中および通常使用中の両方で発生する可能性がある。通常使用中、機械的衝撃のような外力によって懸垂可動微小構造が一時的にまたは永続的にその基板と接触させられる場合に、スティクションが発生する可能性がある。機械的または物理的衝撃は、たとえば、衝突、落下、蹴撃などによって引き起こされる、突然の加速または減速である。加えて、または代替的に、機械的衝撃は、MEMSデバイス内のさまざまな要素の破断または破砕を引き起こし、MEMSデバイスの長期的信頼性が永続的に劣化する可能性がある。したがって、機械的衝撃は、MEMSデバイスの構造における深刻な信頼性問題を引き起こす可能性がある。

【0008】

マイクロ電子デバイス産業は、費用およびフォームファクタを低減するためにより一層複数のセンサを単一のデバイスパッケージに統合する方向に向かっていく。1つのそのようなマルチ・センサ・デバイス・パッケージにおいて、単一のMEMS半導体ダイが加速度計および角速度センサの両方を収容している場合がある。ジャイロスコープとも称する角速度センサは、低電圧動作および高い信号応答に対して高い品質係数Qを達成するために、真空雰囲気内で動作することを必要とする。逆に、単一の外力に反応してデバイスの可動要素が複数の振動を受ける可能性がある不足減衰応答を回避するために、加速度計は、減衰モードにおいて、すなわち、非真空環境において動作する必要がある。

【0009】

2つのタイプのデバイスが異なる圧力要件を有することによって、それらが単一のデバイスパッケージに統合されることに関して重大な問題を示す。たとえば、角速度センサおよび加速度計の両方を含むマルチ・センサ・パッケージにおいて、角速度センサのために高いQを達成するために必要とされる真空環境の結果として、加速度計が不足減衰モードで動作する可能性がある。加速度計の不足減衰動作モードによって、振動または機械的衝撃に起因する可動要素における振動応答が増強され、それによってスティクション障害の可能性が増大し得る。

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記問題点を解決するために、実施形態は、非給電および給電段階の両方においてスティクションに対する耐性が増強された微小電気機械システム(MEMS)デバイスを提供する。特に、実施形態は、MEMSデバイスの感度仕様が必要とする公称バネ定数よりも高い機械的バネ定数を用いて設計されているバネ部材によって基板の上に懸垂されている可動要素を有するMEMSデバイスを提供する。実施形態は、MEMSデバイスを動作させるための方法論をさらに提供し、バネ軟化効果によって可動要素の感度を増大させるために、給電段階中に相対的に高い電圧バイアスが検知電極に印加される。給電段階中の可動要素の不足減衰応答に起因する共振ピークを大幅に取り除くために閉ループフィードバック制御を利用することができる。スティクション状態が検出されると、可動要素のスティクション状態からの回復を可能にするために高電圧バイアスを除去することができる。スティクションからの回復を可能にするために、機械的バネ定数をより高くすることによって、非給電段階におけるより大きな復元力を有するより剛性のバネが提供される。加えて、可動要素は、相対的に剛性のバネに起因してより高い固有振動数を有することによって、より高い固有振動数を有していなければ可動要素を共振させることになる環境振動からの干渉の影響を受けにくくなっている。したがって、MEMSデバイスの可動要素は、

10

20

30

40

50

不足減衰応答によって他のデバイスであれば有効に動作することができない真空または低圧環境において有効に動作することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】一実施形態に応じた微小電気機械システム(MEMS)デバイスの側面図。

【図2】図1のMEMSデバイスの上面図。

【図3】図2のMEMSデバイスを含み得る半導体パッケージの側面図。

【図4】図1のMEMSデバイスのブロック図。

【図5】MEMSデバイスの種々の動作モードによるバネ剛性の変化を示すグラフ。

【図6】通常動作におけるMEMSデバイスのブロック図。

【図7】スティクション状態におけるMEMSデバイスのブロック図。

【図8】スティクション状態後の回復事象を受けているMEMSデバイスのブロック図。

【発明を実施するための形態】

【0012】

図1および図2を参照すると、図1は一実施形態に応じた微小電気機械システム(MEMS)デバイス20の側面図を示しており、図2はMEMSデバイス20の上面図を示している。MEMSデバイス20は、ヒンジまたは「シーソー」型センサとして構築される非対称容量型加速度計であってもよい。したがって、以下の説明において、MEMSデバイス20を以下、容量型加速度計20と称する。本明細書においては、説明を明瞭かつ容易にするために非対称シーソー型センサについて記載する。しかしながら、本明細書に記載のスティクション耐性を増強するための特徴は、シーソー型センサに限定される必要はなく、代替的に、可動要素と、可動要素に向き合う側方変位固定要素との間でスティクションが発生する可能性がある側方変位センサにおける使用に適用されてもよい。そのため、代替的な実施形態は、スティクションに対する耐性を増強する必要がある可動要素を有する複数のMEMSデバイス設計を含み得ることは明らかであろう。

【0013】

容量型加速度計20は基板22を含み、当該基板は当該基板22上に形成された2つの検知電極24および26の形態のうち少なくとも1つの電極を有する。容量型加速度計20は基板22上に形成されたフォースフィードバック電極28および30の形態の追加の電極を含む。一般的に「試験質量部(プルーフマス)」と称される可動要素32が、本明細書においてはバネ部材34と称するねじり懸垂要素によって基板22の上に柔軟に懸垂されている。可動要素32は、図2において双頭矢印36によって表されている回転軸を中心として回転する。多数の屈曲部、ヒンジ、および他の回転機構が、回転軸36を中心とする可動要素32の旋回運動を可能にするために利用されてもよいことは理解されるであろう。

【0014】

検知電極24は検知電極26から電氣的に絶縁されている。同様に、フォースフィードバック電極28はフォースフィードバック電極30から電氣的に絶縁されている。検知電極24および26ならびにフィードバック電極28および30は可動要素32の下方に存在する。したがって、電極が通常は可視されない図2の上面図において、電極24、26、28、および30は、可動要素32および回転軸36に対するこれらの電極の位置を示すために破線によって表されている。

【0015】

容量型加速度計20がその検知機能を実行するために、可動要素32におけるモーメント、または動きであって、回転軸36を中心とする運動を生成するモーメント、または動きが生成される必要がある。可動要素32における回転軸36と可動要素の端部40との間に延在する部分38は、可動要素32における回転軸36と可動要素32の反対の端部44との間に延在する部分42よりも相対的に大きい質量を有して形成される。回転軸36を可動要素32の幾何学的な中心からずらすことによって、より質量の大きい部分38を形成することができる。代替的な実施形態において、たとえば、部分42を貫通して延

10

20

30

40

50

在する開口を形成すること、部分 3 8 に材料を追加すること、および / またはそれらの任意の組合せによって、回転軸 3 6 が中心に置かれるときに部分 4 2 と比較してより大きい質量の部分 3 8 が作成されてもよい。

【 0 0 1 6 】

回転軸 3 6 の片側の質量が不均衡であることに起因して、回転軸 3 6 を中心として可動要素 3 2 を回転させるように、矢印 4 6 によって表される入力加速度 A_{IN} によって回転モーメントが生成される。可動要素 3 2 が回転すると、検知電極 2 4 および 2 6 ならびにフォースフィードバック電極 2 8 および 3 0 に対する可動要素 3 2 の位置が変化する。回転変化の結果として、可動要素 3 2 と検知電極 2 4 および 2 6 の各々との間の電気容量が変化する。図 1 に示す、C 1 とラベリングされているキャパシタ 4 8 および C 2 とラベリングされているキャパシタ 5 0 がそれぞれこれらの容量を表している。キャパシタ 4 8 および 5 0 はこの容量を象徴するものであり、加速度計 2 0 の物理的構成要素ではないことを理解されたい。したがって、参照符号 4 8 および 5 0 は以下、容量信号を指す。

10

【 0 0 1 7 】

それゆえ、対応する検知電極 2 4 および 2 6 と可動要素 3 2 との間に形成される、容量信号 4 8 と容量信号 5 0 との間の差分容量信号を検出することによって、検知機能が実現される。したがって、検知電極 2 4 および 2 6 は検知信号、すなわち、容量信号 4 8 および 5 0 を検出し、これらは関連する特定用途向け集積回路、すなわち I / O 回路チップ 5 2 において受信される。

20

【 0 0 1 8 】

一実施形態において、システムは、可動要素 3 2 の線形動作範囲内においてその基準位置のおおよそ中心に可動要素 3 2 を保持するように機能する閉ループアーキテクチャである。すなわち、MEMS デバイス 2 0 は、負フィードバック技法を使用して、容量信号 4 8、C 1 を容量信号 5 0、C 2 に等しく維持するようにする。I / O 回路チップ 5 2 上の回路によって容量信号 4 8 と 5 0 との間に容量不整合が検出されると、 V_{FF+} および V_{FF-} とラベリングされているフォースフィードバック電圧 5 6 がフォースフィードバック電極 2 8 および 3 0 に印加される。フォースフィードバック電圧 5 6 は静電気によるフォース（力）を生成し、これは次いで、可動要素 3 2 を回転させて容量信号 4 8 と 5 0 との間の容量不整合を相殺する回転モーメントを生成する。したがって、閉ループシステムが適切に動作しているとき、可動要素 3 2 の位置（すなわち可動要素 3 2 の回転）は固定位置に能動的に調整されている。フィードバックループは可動要素 3 2 の位置を能動的に調整し、それによって、入力加速度 4 6 によって生成されるモーメントが、フォースフィードバック電極 2 8 および 3 0 においてフォースフィードバック電圧 5 6 によって生成されるモーメントによって相殺される。フォースフィードバック信号は適切に処理されて、 A_{OUT} とラベリングされている出力加速度信号 5 4 が得られる。MEMS デバイス 2 0 にフォースフィードバックアーキテクチャを実装することによって、可動要素 3 2 が不安定になり回転する可能性が低くなる。

30

【 0 0 1 9 】

たとえば、機械的衝撃に起因する過剰な入力加速度 4 6 が、可動要素 3 2 の公称動作範囲外の過剰な旋回運動を引き起こす可能性がある。可動要素 3 2 のこの旋回運動は、いずれかの部分 3 8 または 4 2 が下方に存在する基板 2 2 に接するとき停止され得る。代替的に、可動要素 3 2 は、可動要素 3 2 の底面の下に延在する止め具（図示せず）を含んでもよい。したがって、可動要素 3 2 のこの旋回運動は、止め具が下方に存在する基板 2 2 に接するとき停止され得る。この下方に存在する基板 2 2 との接触の結果として、スティクションと称される付着であって、可動要素 3 2 の基板 2 2 に対する一時的または永続的な付着が生じる場合がある。

40

【 0 0 2 0 】

一実施形態に応じて、 V_S とラベリングされているバネ軟化電圧 5 8 が、I / O 回路チップ 5 2 から検知電極 2 4 および 2 6 に印加される。概して、バネ部材 3 4 は相対的に剛性である。バネ軟化電圧 5 8 が検知電極 2 4 および 2 6 に印加されて、バネ部材 3 4 の初

50

期剛性（非給電モードにおける）が、当該バネ部材 3 4 の初期剛性よりも小さい動作剛性（給電モードにおける）に変化またはシフトする。したがって、スティクション障害の可能性を低減するために、真空環境内などの不足減衰モードにおいて加速度計 2 0 が動作されるときに、バネ部材 3 4 のこの剛性の変化または低減が容易に実施されることができ

【 0 0 2 1 】

一実施形態において、MEMS デバイス 2 0 は、検知電極において容量信号 4 8 および 5 0 が検出されてバネ軟化電圧 5 8 が印加される検知電極 2 4 および 2 6 を含む。加えて、MEMS デバイス 2 0 は、フォースフィードバック電極においてフォースフィードバック電圧 5 6 が印加されるフォースフィードバック電極 2 8 および 3 0 を含む。代替的な実施形態において、検知、バネ軟化、およびフォースフィードバック動作は、たとえば、時間インターリーブによって同じ電極対上で組み合わせられてもよい。時間インターリーブのシナリオにおいて、システムは、検知段階、フォース段階、および軟化段階を通じて反復して進行する。

10

【 0 0 2 2 】

図 3 は、容量型加速度計 2 0 を含んでもよい半導体パッケージ 6 0 の側面図を示す。半導体パッケージ 6 0 は、加速度計 2 0 がその中に位置してもよい環境を示すために設けられている。概して、半導体パッケージ 6 0 は、加速度計 2 0 および角速度センサ 6 2 が基板に位置する基板 2 2 を含む。キャップ 6 4 が基板 2 2 の表面 6 6 に結合されている。示されている実施形態において、キャップ 6 4 はキャップの中に形成されている空洞（キャピティ）6 8 を含む。キャップ 6 4 は、空洞 6 8 が密閉され外部環境から分離されるように、基板 2 2 の表面 6 6 に接合または他の様態で結合されている。したがって、空洞 6 8 は、加速度計 2 0 および角速度センサ 6 2 の適切な機能および信頼性を維持するように、水蒸気および / または異物の侵入を大幅に防止するために適切に封止されている。

20

【 0 0 2 3 】

角速度センサ 6 2 が、たとえば、懸架バネ（図示せず）によって基板 2 2 の上に懸垂されている 1 つ以上の可動要素を含み得ることは明らかであろう。加えて、角速度センサ 6 2 は付加的に、1 つ以上の示されていない固定電極および移動電極を含んでもよい。実際に、角速度センサ 6 2 の特定の構造および構成は変化してもよい。しかしながら、本発明の実施形態を可能にするかまたは完全に説明するために角速度センサ 6 2 の特定の構造および構成の説明は必要ではなく、したがってさらに詳細には説明されない。

30

【 0 0 2 4 】

上述のように、いくつかの MEMS デバイスは、低電圧動作および高い信号応答に対して高い品質係数 Q を達成するために、真空雰囲気内で動作することを必要とする。逆に、単一の外力に応答してデバイスの可動要素が複数の振動を受ける可能性がある不足減衰応答を回避するために、他の MEMS デバイスは、減衰モードにおいて、すなわち、非真空環境において動作する必要がある。異なる空洞圧力要件を有するこれらの MEMS デバイスは、それらが同じ空洞内に収容されると重要な問題を示す。たとえば、空洞 6 8 の真空環境は一方の MEMS デバイスにとっては適切であり得るが、もう一方の MEMS デバイスにおいては不足減衰応答および不安定性を引き起こす可能性がある。著しい不安定性は、MEMS デバイスの可動要素を、下方に存在する基板に接するまで運動させるか、または回転させる可能性があり、結果として可動要素の下方に存在する基板または外側面に対する一時的または永続的な付着、すなわちスティクション障害を引き起こす。したがって、空洞 6 8 の真空環境はいくつかの従来技術の MEMS デバイスにおいては故障による重大な危険性を示す。

40

【 0 0 2 5 】

半導体パッケージ 6 0 は、同じ空洞 6 8 内に収容される角速度センサおよび加速度計であって、異なる空洞圧力要件を有する角速度センサ 6 2 および加速度計 2 0 を含む。剛性バネ部材 3 4、バネ軟化電圧 5 8 によるバネ軟化能力、フォースフィードバック電圧 5 6 を使用した閉ループ制御、およびスティクション状態検出（後述）の機能によって、給電

50

モードまたは非給電モードのいずれにあるときもスティクションに対する耐性が增強されたMEMSデバイス、たとえば、加速度計20が提供される。

【0026】

半導体パッケージ60は同じ空洞68内に收容された加速度計20および角速度センサ62を示しているが、いくつかのパッケージ設計は、基板の上に各センサが形成されるが、キャップ内に異なる複数の空洞を有し、各センサが異なる空洞内に收容される基板を企図してもよい。それらのセンサが別個の空洞内に收容されるにもかかわらず、MEMSデバイスがその中に位置づけられる空洞内の圧力は依然として低く、結果として不足減衰応答を引き起こす場合がある。それにもかかわらず、剛性バネ部材34、バネ軟化能力、フォースフィードバック電圧を使用した閉ループ制御、およびスティクション状態検出の機能を依然として実装し、給電モードまたは非給電モードのいずれにあるときもスティクションに対する耐性が增強されたMEMSデバイス、たとえば、加速度計20を提供することができる。

10

【0027】

図4は、図1のMEMSデバイス、すなわち加速度計20のブロック図を示す。加速度計20は、1つ以上の加速度計および1つ以上の角速度センサを含むマルチセンシング慣性センサパッケージ内に含まれてもよい。そのようなマルチセンシング慣性センサパッケージの構成要素は本明細書においては明瞭にするために示されていない。加速度計20のI/O回路チップ52は、マルチプレクサ回路70と、検知回路72と、検出回路74と、静電氣的フォースフィードバック回路76とを含む。回路70、72、74、および76は、説明を容易にするために別個の要素として示されている。要素70、72、74、および76の機能はさまざまな構成のうちのいずれかに組み合わせられてもよいことを当業者であれば理解するであろう。

20

【0028】

電圧源71が、マルチプレクサ回路70および検知回路72を通じて検知電極24および26と通信している。すなわち、バネ軟化電圧58が共通モード電圧 V_{ICM} として検知回路72に入力される。一実施形態において、容量信号48に対応する V_{SP} とラベリングされている検知電圧78、および容量信号50に対応する V_{SN} とラベリングされている検知電圧80は「仮想グランド」である。すなわち、検知回路72内の増幅器(図示せず)が検知電極24および26の検知電圧78および80の各々を入力 V_{ICM} 、すなわちバネ軟化電圧58と同じ値に保持する。したがって、バネ軟化電圧58が通常動作モード中に検知電極24および26に印加される。バネ軟化電圧58の印加は図4において、バネ軟化電圧58を供給する電圧源71と検知回路72の V_{ICM} に対する入力との間のスイッチ要素であって、マルチプレクサ回路70内のスイッチ要素の左側の位置によって表されている。バネ軟化電圧58が検知電極24および26に印加される結果として、検知電極24および26において可動要素32とは異なる電位が生じる。この異なる電位が、バネ部材34の剛性、すなわち機械的バネ定数を有効に低減して、バネ部材34の所定の動作剛性を満たす。ここで、動作剛性は入力刺激、すなわち入力加速度46の大きさに対する可動要素32の感度を規定する。

30

【0029】

検知回路72は検知電極24および26に電氣的に結合されている。検知回路72は、可動要素32と下方に存在する検知電極24および26との間で生成される容量信号48および50を受信するように構成されている。システムは閉ループであるため、I/O回路チップ52は容量信号48を容量信号52に等しく維持しようとする。このために、検知回路72における増幅器は、検知電圧78および80(容量信号48および50に対応する)を V_{ICM} 、すなわちバネ軟化電圧58に等しくなるように駆動する。検知電圧78および80は同じ電位に保持されているため、検知電圧78および80をバネ軟化電圧58に保持するために必要とされる電荷の差を測定することによって、 V_O とラベリングされている出力電圧信号を得ることができる。電圧出力信号82は、従来通りに適切に処理される信号調整要素84に通信されて、入力加速度46に比例する出力信号、たとえば

40

50

、出力加速度信号 54 が生成され得る。

【0030】

静電的フォースフィードバック回路 76 が検知回路 72 とフォースフィードバック電極 28 および 30 との間に置かれている。フォースフィードバック回路 76 は、電圧出力信号 82 に応答してフォースフィードバック電極 28 および 30 に印加されるフォースフィードバック電圧 56 (V_{FF+} および V_{FF-}) を制御するために実装され、電圧出力信号 82 は容量信号 48 および 50 に基づく、すなわち、容量信号 48 および 50 信号から導出される。したがって、加速度計 20 は、給電されるに際し加速度計 20 の共振ピークを大幅に取り除くように構成されている「閉ループ」設計である。加えて、「閉ループ」設計はパッケージ応力によって引き起こされる任意の温度および / または時間に応じたオフセットを大幅に相殺することができ、それによって、可動要素 32 の位置は実質的に一定である。

10

【0031】

検知回路 72 は付加的に検出回路 74 に電氣的に結合されており、検出回路 74 はマルチプレクサ回路 70 に電氣的に結合されている。電圧出力信号 82、すなわち V_0 が検出回路 74 に通信されて、可動要素 32 がスティクション状態であるか否かが判定されてもよい。スティクション状態は、回転軸 36 を中心とする可動要素 32 の旋回運動が運動の所定の限界または範囲を超えるために十分な機械的衝撃または振動を可動要素 32 が受けており、それによって、可動要素 32 が少なくとも一時的に基板 22 に付着しているシナリオを指す。したがって、可動要素 32 が基板 22 に永続的に付着すると、センサ機能劣化およびその結果としてスティクション状態が故障に寄与する可能性がある。

20

【0032】

検出回路 74 は、スティクション状態、すなわち、結果としてスティクションを引き起こす機械的衝撃事象から迅速に回復することを保証するように検出および制御を提供する。一実施形態において、検出回路 74 は、電圧出力信号 82 を基準電圧 86 と比較してもよい。電圧差信号 82 が所定の時間に亘って基準電圧 86 を超えるとき、検出回路 74 はスティクション状態を検知し、ディセーブル信号 88 をマルチプレクサ回路 70 に送る。ディセーブル信号 88 は電圧源 71 を有効にディセーブルにするか（無効にする）、または機能停止し、それによって、バネ軟化電圧 58 が検知電極 24 および 26 から除去される。特に、電極 24、26、28、および 30 のすべてが可動要素 32 と同じ電位に設定される。バネ軟化電圧 58 を除去し、電極 24、26、28、および 30 ならびに可動要素 32 のすべてを均等な電圧電位に設定することは、図 4 において、マルチプレクサ回路 70 内のいくつかのスイッチ要素が右側にスイッチングされることによって明示されており、たとえば、すべての端子 24、26、28、30、および 32 がグランドに設定されてもよい。すべての端子 24、26、28、30、および 32 を同じ電位に設定することによって、バネ部材 34 がその初期の剛性、または非給電剛性に帰ることが可能になり、それによって、可動要素 32 がそのデフォルト位置に戻ってスティクション状態から回復することが可能になる。

30

【0033】

図 5 は、MEMS デバイス、すなわち加速度計 20 (図 1) の種々の動作モードによるバネ剛性の変化を示すグラフ 90 を示している。より詳細には、グラフ 90 は、所定のバネ剛性に対して所定量のバネ変位 94 (すなわち、ねじれ) を達成するために必要とされる、加えられる力 92 の大きさを示しており、バネ剛性はバネ部材 34 のバネ定数によって定義される。加速度計 20 の非給電モード 96 において、加えられる力 92 に応答したバネ変位 94 が実線 98 によって表されている。加速度計 20 の給電モード 100 において、加えられる力 92 に応答したバネ変位 94 が点線 102 によって表されている。グラフ 90 は、バネ部材 34 に対する使用可能範囲であり、かつ線形範囲内のバネ剛性を表している。極端に変形するとバネ剛性が非線形になることを当業者であれば認識するであろう。

40

【0034】

50

概して、弾性バネ、たとえば、バネ部材 3 4 のバネ定数は、バネに加えられる力とその結果としての変位との比である。当業者には知られているように、これはバネに関するフックの法則に見られる比例定数 k である。K 1 とラベリングされているバネ定数 1 0 4 は、バネ軟化電圧 5 8 (図 1) が検知電圧 2 4 および 2 6 の各々に印加されていないときの非給電モード 9 6 におけるバネ部材 3 4 の実際の剛性、または初期の剛性を規定する。K 2 とラベリングされているバネ定数 1 0 6 は、バネ軟化電圧 5 8 (図 1) が検知電圧 2 4 および 2 6 の各々に現在印加されているときの給電モード 1 0 0 におけるバネ部材 3 4 の有効剛性を規定する。

【 0 0 3 5 】

加速度計 2 0 は、公称バネ定数目標、すなわち、加速度計 2 0 の感度仕様に必要とされる所定の動作剛性よりも極めて高い機械的バネ定数を有するバネ部材 3 4 を含むように設計されている。たとえば、バネ定数 9 8 からもたらされるバネ部材 3 4 の初期剛性は、バネ部材 3 4 の所定の動作剛性よりも少なくとも 2 倍大きい(また、2 ~ 5 倍大の範囲内であってもよい)。したがって、バネ部材 3 4 の初期剛性は実線 9 8 によって明示されている。

10

【 0 0 3 6 】

バネ軟化電圧 5 8 (図 1) はバネ部材 3 4 を「軟化」する、すなわち、その剛性をより低くするために十分高い。一実施形態において、非給電 9 6 モードにおけるバネ定数 1 0 4 から給電モード 1 0 0 におけるバネ定数 1 0 6 にシフトする、すなわちバネ部材 3 4 の剛性が低減される。一実施形態において、バネ定数 1 0 6 は、バネ部材 3 4 の有効剛性が、加速度計 2 0 の感度仕様によって必要とされる所定の動作剛性にほぼ均等であるように低減されることができる。したがって、有効剛性および所定の動作剛性は点線 1 0 2 によって明示されている。したがって、グラフ 9 0 は、外部刺激、たとえば、入力加速度 4 6 (図 1) からのより低い印加される力 9 2 に応答した、バネ部材 3 4 (図 1) のより大きい変位 9 4 を結果として引き起こす、給電モード 1 0 0 におけるバネ軟化効果 1 0 8 を例示している。

20

【 0 0 3 7 】

図 6 ~ 図 8 を続けて参照すると、図 6 ~ 図 8 は、図 1 の MEMS デバイス、すなわち加速度計 2 0 の動作方法を示している。より詳細には、図 6 は通常動作 1 1 0 を受けている加速度計 2 0 のブロック図を示しており、図 7 はスティクション状態 1 1 2 を受けている加速度計 2 0 のブロック図を示しており、図 8 はスティクション状態 1 1 2 後の回復事象 1 1 4 を受けている加速度計 2 0 のブロック図を示している。

30

【 0 0 3 8 】

図 6 に示す通常動作 1 1 0 において、バネ部材 3 4 の剛性をバネ定数 1 0 4 (図 5) からバネ定数 1 0 6 (図 5) にシフトするように(この場合はバネ部材 3 4 の剛性を低減するために)バネ軟化電圧 5 8 が、検知回路 7 2 (図 4) における共通モード電圧 V_{ICM} を通じて検知電極 2 4 および 2 6 に印加される。この例において、バネ軟化電圧 5 8 は約 7 ボルトであってもよい。通常動作 1 1 0 中、可動要素 3 2 は基板 2 2 に接していない基準またはデフォルト位置 1 1 6 に存在する。入力加速度 4 6 に応答して、可動要素 3 2 を中心としてモーメントが生成され、このモーメントは、その位置を基準位置 1 1 6 に維持するためのフォースフィードバック電圧 5 6 によって相殺される。可動要素 3 2 を基準位置 1 1 6 に維持するために必要とされるフィードバック電圧 5 6 の量は、入力加速度 4 6 に比例し、出力加速度信号 5 4 を生成するために適切に処理されることができる。したがって、この検知機能は、バネ軟化電圧 5 8 が検知電極 2 4 および 2 6 に印加される際に実行される。

40

【 0 0 3 9 】

通常動作 1 1 0 中、フォースフィードバック電圧 5 6 がフォースフィードバック電極 2 8 および 3 0 に印加される。共振ピーク、すなわち機械的共振は、機械的なシステムの振動の周波数が他の周波数におけるよりも、システムの固有振動数(すなわち、その共振周波数または共鳴周波数)に一致するときにより大きい振幅において応答するという、機械

50

的なシステムの性質である。可動要素 3 2 の共振ピークの結果として、可動要素 3 2 の振動がスティクションを引き起こすために十分な振動になる可能性がある。したがって、フォースフィードバック回路 7 6 (図 4) の閉ループ検知アーキテクチャおよびフォースフィードバック電圧 5 6 の印加によって、加速度計 2 0 が給電モード 1 0 0 (図 5) にあるときに可動要素 3 2 の共振ピークを取り除き、スティクションの可能性を低減することができる。

【 0 0 4 0 】

図 7 に示すスティクション状態 1 1 2 は、加速度計 2 0 が、衝撃事象と称され、太い実線 1 1 8 によって表されている突然の加速または減速を受けている状況を表している。スティクション状態 1 1 2 は、たとえば、衝突、落下、蹴撃などからの機械的または物理的衝撃にตอบสนองして加速度計 2 0 が基板 2 2 に接するときに発生する可能性がある。スティクション状態 1 1 2 は、スティクション検出、および、スティクション状態 1 1 2 が検出されたときに検出回路 7 4 (図 4) によってトリガされるリセットを明示するために提供されている。上述のように、スティクション状態 1 1 2 は、検知回路 7 2 (図 4) において容量信号 4 8 および 5 0 から導出される電圧信号 8 2 (図 4) が所定の期間よりも長い時間に亘って過負荷閾値、すなわち、基準電圧 8 6 (図 4) を超えるときに判定されることができる。図 5 に示す過負荷閾値 1 2 0 は、バネ部材 3 4 の最大変位を表しており、これを超えると、可動要素 3 2 は適切な動作のために許容可能な運動範囲外に動くことになる。

【 0 0 4 1 】

スティクション状態 1 1 2 が検出されるとすべての端子 2 4、2 6、2 8、3 0、および 3 2 が同じ電位に設定され、検知電極 2 4 および 2 6 からバネ軟化電圧 5 8 が実質的に除去される。バネ軟化電圧 5 8 を除去し、すべての電極 2 4、2 6、2 8、および 3 0 を可動要素 3 2 と同じ電位に設定することは、図 7 においては電極 2 4、2 6、2 8、および 3 0 ならびに試験質量部 3 2 に 0 V を印加することによって示されている。バネ部材 3 4 の剛性をバネ定数 1 0 6 (図 5) からバネ定数 1 0 4 (図 5) にシフトするように (この場合はバネ部材 3 4 の剛性を増大させるために) この例では検知回路 7 2 (図 4) によって、検知電極 2 4 および 2 6 がグランド、すなわち 0 V にプルされる。

【 0 0 4 2 】

非給電モード 9 6 においてバネ部材 3 4 の剛性がより大きくなることによって、バネ部材 3 4 のより高いバネ定数 1 0 4 の結果生じる復元力 1 2 2 (図 5 参照) が可動要素 3 2 に与えられることが可能になる。このより高い復元力 1 2 2 によって、可動要素 3 2 が基準位置 1 1 6 (図 6) に戻ることが可能になり、それによって、可動要素 3 2 の永続的なスティクション状態に対する耐性が増強される。したがって、バネ軟化を実施する利点は、非給電モード 9 6 におけるバネ定数 1 0 4 が給電モード 1 0 0 におけるバネ定数 1 0 6 よりも高いことである。これは、スティクションの確率が低減すること、すなわち、スティクションに対する耐性が増強されること、および非給電構成要素において衝撃耐性がより高くなること、ならびに、給電構成要素におけるスティクション状態 1 1 2 からの回復につながる。

【 0 0 4 3 】

図 8 に示す回復事象 1 1 4 は、可動要素 3 2 が基準位置 1 1 6 に戻る期間を表している。回復事象 1 1 4 の間、フォースフィードバック回路 7 6 (図 4) からのフォースフィードバック電圧 5 6 が、フォースフィードバック電極 2 8 および 3 0 に供給されてもよい。フォースフィードバック電圧 5 6 は、電氣的減衰を提供することができ、それによって、基準位置 1 1 6 に戻る間の可動要素 3 2 の共鳴または振動が抑制される。バネ部材 3 4 の剛性をバネ定数 1 0 4 (図 5) からバネ定数 1 0 6 (図 5) にシフトし、すなわち、バネ部材 3 4 の剛性を低減し、それによって加速度計 2 0 を通常動作 1 1 0 (図 6) に戻すために、バネ軟化電圧 5 8 が検知電極 2 4 および 2 6 に再び印加されることができる。

【 0 0 4 4 】

要約すると、本発明の実施形態は、非給電および給電段階の両方においてスティクショ

10

20

30

40

50

ンに対する耐性が增強された微小電気機械システム（MEMS）デバイスを提供する。特に、実施形態は、MEMSデバイスの感度仕様が必要とする公称バネ定数よりも高い機械的バネ定数を用いて設計されているバネ部材によって基板の上に懸垂されている可動要素を有するMEMSデバイスを提供する。実施形態は、MEMSデバイスを動作させるための方法論をさらに提供し、バネ軟化効果によって可動要素の感度を増大させるために、給電段階中に相対的に高い電圧バイアスが検知電極に印加される。給電段階中の可動要素の不足減衰応答に起因する共振ピークを大幅に取り除くために閉ループフィードバック制御を利用することができる。スティクション状態が検出されると、可動要素の過負荷状態からの回復を可能にするために高電圧バイアスを除去する。スティクションからの回復を可能にするために、機械的バネ定数をより高くすることによって、非給電段階におけるより大きな復元力を有するより剛性のバネが提供される。加えて、可動要素は、相対的に剛性のバネに起因してより高い固有振動数を有することによって、より高い固有振動数を有していなければ可動要素を共振させることになる環境振動からの干渉の影響を受けにくくなっている。したがって、MEMSデバイスの可動要素は、不足減衰応答によって他のデバイスであれば有効に動作することができない真空または低圧環境において有効に動作することができる。

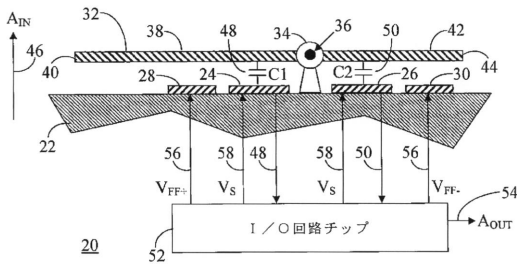
10

【0045】

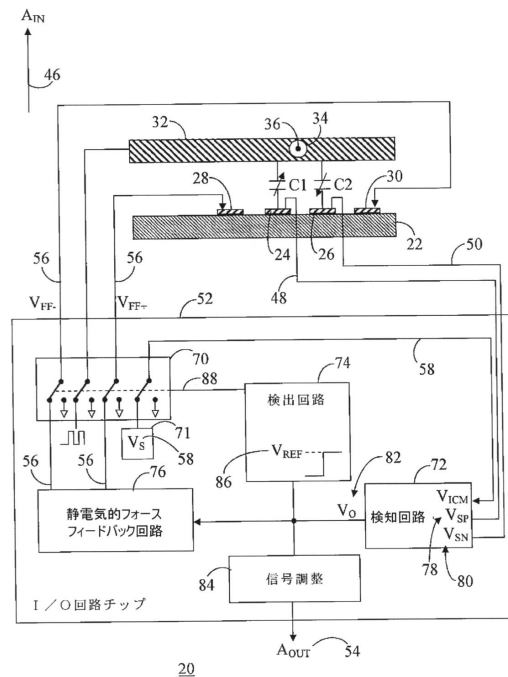
本発明の好ましい実施形態が詳細に例示および記載されてきたが、本発明の精神または添付の特許請求項の範囲から逸脱することなく、そこにさまざまな改変を行うことができることを当業者であれば容易に理解するであろう。すなわち、例示的な実施形態は一例に過ぎず、本発明の範囲、適用性または構成を限定することは意図されていないことが理解されるべきである。たとえば、感度仕様によって必要とされるよりも高い機械的バネ定数を有するバネ部材および上述の閉ループシステムは、下方に存在する基板の側方に、すなわち基板に実質的に平行に運動するように構成されている懸垂された可動要素を有するMEMSデバイス内に実装されてもよい。

20

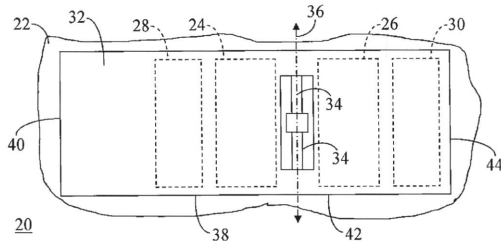
【図1】



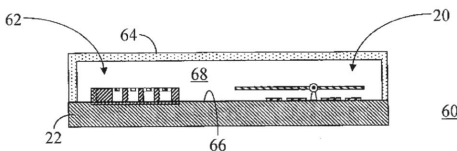
【図4】



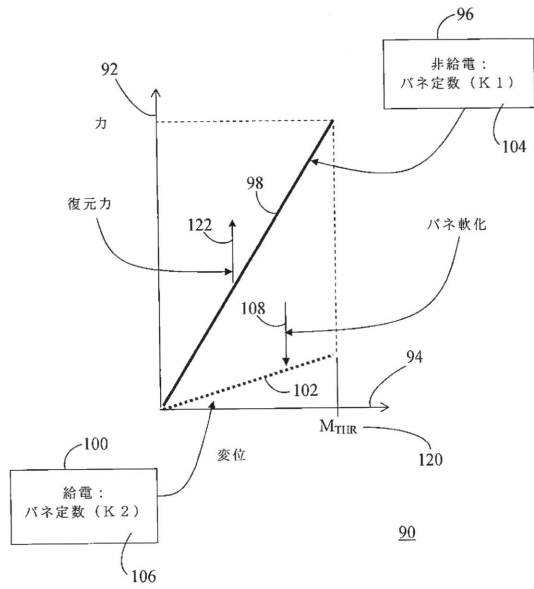
【図2】



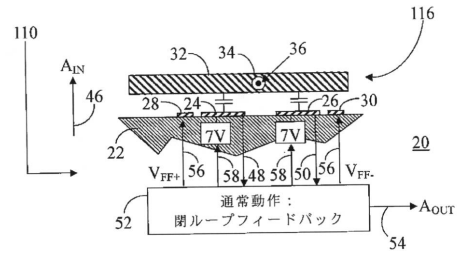
【図3】



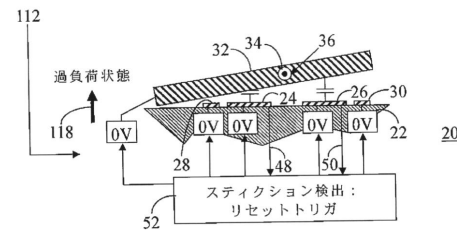
【図5】



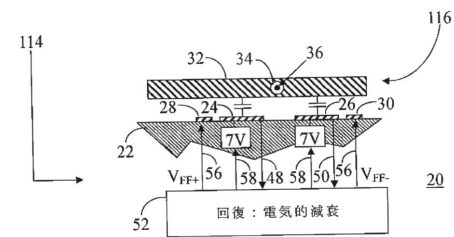
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 アンドリュー シー・マクニール
アメリカ合衆国 85225 アリゾナ州 チャンドラー イースト カーラ ビスタ プレイス
2163

(72)発明者 マーク イー・シュラーマン
アメリカ合衆国 85286 アリゾナ州 チャンドラー サウス チョヤ プレイス 2463

審査官 森 雅之

(56)参考文献 特開2005-43098(JP,A)
特開2011-185828(JP,A)
特開2004-347499(JP,A)
特開2004-361388(JP,A)
特許第4705229(JP,B2)
特許第5337874(JP,B2)
特許第5557336(JP,B2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01P15

G01C19

H01L29/84

B81B3