

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2013-61338

(P2013-61338A)

(43) 公開日 平成25年4月4日(2013.4.4)

(51) Int.Cl.

G 0 1 C 19/5733 (2012.01)

F 1

G 0 1 C 19/56 2 3 3

テーマコード (参考)

2 F 1 0 5

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L 外国語出願 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2012-200751 (P2012-200751)  
 (22) 出願日 平成24年9月12日 (2012.9.12)  
 (31) 優先権主張番号 61/534, 146  
 (32) 優先日 平成23年9月13日 (2011.9.13)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 591060898  
 アイメック  
 I M E C  
 ベルギー、ペー 3 0 0 1 ルーヴァン、カ  
 ペルドリーフ 7 5 番  
 (74) 代理人 100101454  
 弁理士 山田 卓二  
 (74) 代理人 100081422  
 弁理士 田中 光雄  
 (74) 代理人 100100479  
 弁理士 竹内 三喜夫  
 (72) 発明者 メフメト・アキフ・エリスミス  
 ベルギー 3 0 0 1 ルーヴァン、カペルド  
 リーフ 7 5 番 アイメック内  
 Fターム(参考) 2F105 BB20 CC04 CD03 CD05

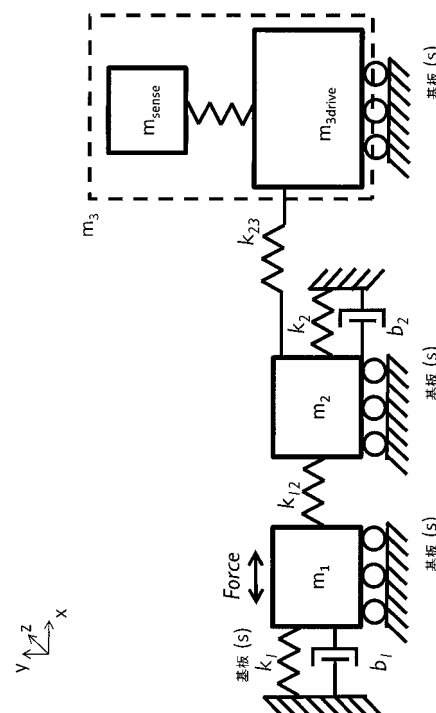
(54) 【発明の名称】 機械的に頑強なマイクロマシニングによるジャイロスコープのための三質量体連結振動の技術

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】電力消費が低下したマイクロマシニングによる  
 ジャイロスコープを提供する

【解決手段】基板と、第1方向x又はyに沿って振動する  
 ように構成された3つの質量体m1、m2及びm3と  
 を備え、第1質量体m1は基板に機械的に連結され、第  
 2質量体m2は、第1質量体m1及び基板に機械的に連  
 結され、第3質量体m3は、第2質量体m2に機械的に  
 連結され、各質量体m1、m2及びm3の重さ及びばね  
 定数k1、k2、並びに、機械的連結k12、k23が  
 、動作中に質量体m1及び質量体m3の共振周波数を充  
 分に上回る周波数で質量体m2が振動するように選択さ  
 れる。質量体m2の共振周波数は、質量体m1又はm3  
 の共振周波数より、少なくとも2倍、更には2.5倍大  
 きくてもよい。

【選択図】図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

基板と、第 1 方向に沿って振動するように構成された 3 つの質量体とを備え、

第 1 質量体は、基板に機械的に連結され、

第 2 質量体は、第 1 質量体及び基板に機械的に連結され、

第 3 質量体は、第 2 質量体に機械的に連結され、

次の関係、

$$[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] \quad ([ (k_1 + k_{12}) / m_1 ] \sim [ (k_{23}) / m_3 ] )$$

が存在し、

$m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  は、それぞれ第 1 質量体、第 2 質量体及び第 3 質量体の重さであり、

$k_1$ 、 $k_2$  及び  $k_3$  は、それぞれ第 1 質量体、第 2 質量体又は第 2 質量体と基板との間の機械的接続部のばね定数であり、

$k_{12}$ 、 $k_{23}$  は、それぞれ第 2 質量体と第 1 質量体又は第 3 質量体との間の機械的接続部のばね定数であるようにした、マイクロマシニングによるジャイロスコープ。

10

## 【請求項 2】

第 3 質量体は、基板に機械的に連結され、

次の関係、

$$[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] \quad [(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [k_3 + k_{23} / m_3]$$

が存在し、

$m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  は、それぞれ第 1 質量体、第 2 質量体及び第 3 質量体の重さであり、

$k_1$ 、 $k_2$  及び  $k_3$  は、それぞれ第 1 質量体、第 2 質量体又は第 2 質量体と基板との間の機械的接続部のばね定数であり、

$k_{12}$ 、 $k_{23}$  は、それぞれ第 2 質量体と第 1 質量体又は第 3 質量体との間の機械的接続部のばね定数であるようにした、マイクロマシニングによるジャイロスコープ。

20

## 【請求項 3】

3 つの質量体は駆動質量体であり、

第 1 質量体を駆動するための駆動手段をさらに備えた、請求項 1 又は 2 に記載のマイクロマシニングによるジャイロスコープ。

30

## 【請求項 4】

駆動手段は、平行板静電アクチュエータである、請求項 3 に記載のマイクロマシニングによるジャイロスコープ。

## 【請求項 5】

3 つの質量体は、ジャイロスコープを回転させるときに運動するように構成された検出質量体である、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載のマイクロマシニングによるジャイロスコープ。

## 【請求項 6】

この 3 質量体構成の複製組であって、第 1 方向に沿って、かつ、この 3 質量体構成と逆位相で振動するように構成された複製組をさらに備えた、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載のマイクロマシニングによるジャイロスコープ。

40

## 【請求項 7】

3 つの質量体は、直線的に振動するように構成された、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載のマイクロマシニングによるジャイロスコープ。

## 【請求項 8】

第 1 質量体、第 1 質量体と基板との間のばね定数、第 3 質量体、及び、第 3 質量体と基板との間のばね定数を、

$$[(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [k_3 + k_{23} / m_3]$$

を満たすように選択する工程と、

第 2 質量体、及び、第 2 質量体と基板との間のばね定数を、動作中に、

50

$$[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] [(k_1 + k_{12}) / m_1] > [k_3 + k_{23}] / m_3$$

を満たすように選択する工程とを含み、

$m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ は、それぞれ第1質量体、第2質量体及び第3質量体の重さであり、 $k_1$ 、 $k_2$ 及び $k_3$ は、それぞれ第1質量体、第2質量体又は第2質量体と基板との間の機械的接続部のばね定数であり、

$k_{12}$ 、 $k_{23}$ は、それぞれ第2質量体と第1質量体又は第3質量体との間の機械的接続部のばね定数であるようにした、請求項1～7のいずれか1項に記載のマイクロマシニングによるジャイロスコープを設計するための方法。

【請求項9】

10

第1質量体の運動と第3質量体の運動との間の機械的増幅率を選択する工程と、

第2質量体と基板との間のばね定数を、この所望の機械的増幅率を考慮した値とする工程とをさらに含む、請求項8に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

マイクロマシニングによるジャイロスコープは、通常、コリオリ効果と呼ばれる物理現象に従って動作する角速度センサである。コリオリ効果は、単に、回転座標系から見た運動物体の偏差である。基板に実装された物体の場合、基板が回転するときに垂直平面内で振動（例えば、揺れ、運動又は駆動）しやすい。したがって、コリオリ効果を利用すべく、マイクロマシニングによるジャイロスコープは、少なくとも1つの質量体を備えた振動部と、振動部に対して垂直な平面内で自由に運動する検出部とで構成することができる。振動部が撓むことになるので、検出部はジャイロスコープの回転によって影響を受ける。外的な回転の下、振動質量体は撓み、その偏差は検出部の運動を通じて検出される。

20

【0002】

かかる振動型ジャイロスコープの感度は、その振幅に依存する。安定して高感度を達成するためには、安定した大きい振幅が好ましい。

【0003】

一般に、大きい振動は、その共振周波数で動作する1自由度（1-DOF）振動子を使用して達成される。安定性は、安定化回路（例えば、位相ロックスープ（PLL）、比例積分（PI）コントローラ）の助けを得て、この共振周波数付近でジャイロスコープを動作させ続けることにより得られる。

30

【0004】

いくつかのケースでは、1自由度振動子を非共振周波数で動作させることができ、これにより安定化回路の必要性を低下させることができる。しかしながら、非共振周波数での振幅は、共振周波数での振幅より小さくなる。やはり、振動子が非共振周波数で振動する場合に、周波数及び品質係数の変化が振動の大きさに与える影響は、共振周波数で振動する場合に比べてより小さくなる。

【0005】

一般にジャイロスコープは、商業的用途の加速度計の10倍から20倍の電力を消費する。この電力消費の一部は、大きい振幅を得るために使用される櫛歯駆動に起因する。櫛歯駆動は、2つの櫛歯型構造の間で発生する静電気力を伴う。一つの櫛が基板に固定される一方、他方の櫛は運動可能である。櫛歯駆動によって発生する力は、2つの櫛の間の静電容量の変化に比例する。しかしながら、この静電容量は、両櫛の間の駆動電位差、櫛歯の数を反映した連結面積、及びこれらの歯の間のギャップに応じて増加する。結果として、櫛歯駆動により大きい振幅を達成するには、大きい分極電位差が必要となり、一般に商用デバイスでは12Vが必要となる。かかる大きい分極電位差は、低電力ジャイロスコープにつながらない。この電力消費の別の原因は、振動子によるジャイロスコープの電力消費の増加を安定化させるのに使用される安定化回路、例えばPLL及び/又はPIコントローラである場合があるが、これも同様に低電力ジャイロスコープにつながらない。また

40

50

、電力消費の他の原因もまた存在している。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ジャイロスコープの電力消費を低下させるための1つの選択肢は、2つの質量体を含む、したがって2つの共振周波数を有する2自由度(2-DOF)振動子を使用することである。2-DOFジャイロスコープは、2つの共振周波数の間で動作することができる。一般に、振幅応答は、種々の品質係数及び共振周波数に僅かしか依存しない。しかしながら、この応答の大きさは依然として極度に小さく、上述の1-DOF振動子の非共振応答と同程度である。

10

【0007】

したがって、電力消費が低下したマイクロマシニングによるジャイロスコープが好ましい。かかるマイクロマシニングによるジャイロスコープは、アクチュエータと駆動部との間に高い機械的増幅率が存在する安定した振動周波数範囲を有することが好ましい。

【課題を解決するための手段】

【0008】

通常のジャイロスコープと比較して、電力消費が低下したジャイロスコープが開示されている。開示されているジャイロスコープは、安定化回路を必要とせず、駆動回路及び制御回路に対する必要性が低下するように設計され、それゆえジャイロスコープの電力消費が低下する。

20

【0009】

一態様では、マイクロマシニングによるジャイロスコープが開示されている。そのマイクロマシニングによるジャイロスコープは、基板と、少なくとも3つの質量体( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ )とを備える。第1質量体 $m_1$ は、機械的接続部 $k_1$ を介して基板に機械的に連結され、第2質量体 $m_2$ は、接続部 $k_{12}$ を介して第1質量体 $m_1$ に機械的に連結され、機械的接続部 $k_2$ を介して基板に連結され、第3質量体 $m_3$ は、機械的接続部 $k_{23}$ を介して第2質量体 $m_2$ に機械的に連結されている。3つの質量体は、それぞれ第1方向 $x$ 又は $y$ に沿って振動するように構成されている。

【0010】

質量体 $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ 及び機械的接続部 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{23}$ の間に、次の関係、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] \quad ([ (k_1 + k_{12}) / m_1 ] \sim [ (k_{23}) / m_3 ])$ が存在する。

30

【0011】

いくつかの実施形態では、第3質量体 $m_3$ は、機械的接続部 $k_3$ を介して基板にも機械的に連結されている。

【0012】

質量体 $m_1$ ,  $m_2$ 及び $m_3$ は、第1方向 $x$ に沿って振動するように構成されたジャイロスコープの駆動質量体とすることができる。この目的のために、ジャイロスコープは、これらの駆動質量体を刺激するためのアクチュエータをさらに備えてもよい。これらのアクチュエータは、平行板アクチュエータでもよい。

40

【0013】

別の実施形態では、マイクロマシニングによるジャイロスコープは、これらの3質量体構成の複製組 $m_1'$ ,  $m_2'$ 及び $m_3'$ をさらに備えてもよく、この複製組は、第1方向に沿って且つこれらの3質量体構成 $m_1$ ,  $m_2$ 及び $m_3$ と逆位相で振動するように構成されている。

【0014】

質量体 $m_1$ ,  $m_2$ 及び $m_3$ は、ジャイロスコープの検出質量体とし、ジャイロスコープが回転する際には、 $y$ 方向に沿って振動するように構成されるようにすることができる。

【0015】

いくつかの実施形態では、3つの質量体 $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ は、直線的に振動するように

50

構成することができる。

【0016】

別の態様では、基板と、検出質量体に機械的に連結される駆動質量体とを備え、両質量体は直交する方向に運動可能であり、コリオリ力の影響の下に動作する場合は、駆動質量体は検出質量体を駆動し、駆動質量体又は検出質量体のうち少なくとも1つが3つの質量体  $m_1$  ,  $m_2$  ,  $m_3$  の接続部として構成され、第1質量体  $m_1$  は、基板に機械的に連結され、第2質量体  $m_2$  は、第1質量体  $m_1$  及び基板に機械的に連結され、第3質量体  $m_3$  は、第2質量体  $m_2$  に機械的に連結され、次の関係、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2]$   $([(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [(k_{23}) / m_3])$  が存在し、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  は、それぞれ質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  の重量であり、 $k_1$ 、 $k_2$  (及び  $k_3$ ) は、それぞれ質量体  $m_1$ 、 $m_2$  又は  $m_3$  と基板との間の機械的接続部のばね定数であり、 $k_{12}$ 、 $k_{23}$  は、それぞれ質量体  $m_2$  と質量体  $m_1$  又は質量体  $m_3$  との間の機械的接続部のばね定数であるようにした、マイクロマシニングによるジャイロスコープが開示されている。

10

【0017】

さらに別の態様では、基板と、第1方向  $x$  又は  $y$  に沿って振動するように構成された3つの質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  とを備え、第1質量体  $m_1$  は基板に機械的に連結され、第2質量体  $m_2$  は、第1質量体  $m_1$  及び基板に機械的に連結され、第3質量体  $m_3$  は、第2質量体  $m_2$  に機械的に連結され、各質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  の重量及びばね定数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、並びに、機械的連結  $k_{12}$ 、 $k_{23}$  が、動作中に質量体  $m_1$  及び質量体  $m_3$  の共振周波数を十分に上回る周波数で質量体  $m_2$  が振動するように選択されるようにした、マイクロマシニングによるジャイロスコープが開示されている。

20

【0018】

いくつかの実施形態では、質量体  $m_2$  の共振周波数は、質量体  $m_1$  又は  $m_3$  の共振周波数より、少なくとも2倍、更には2.5倍大きくてもよい。

【0019】

さらに別の態様では、マイクロマシニングによるジャイロスコープを設計するための方法が開示されている。このマイクロマシニングによるジャイロスコープは、基板と、第1方向  $x$  又は  $y$  に沿って振動するように構成された少なくとも3つの質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  とを備え、第1質量体  $m_1$  は、基板に機械的に連結され、第2質量体  $m_2$  は、第1質量体  $m_1$  及び基板に機械的に連結され、第3質量体  $m_3$  は、第2質量体  $m_2$  に機械的に連結され、次の関係、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2]$   $([(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [(k_{23}) / m_3])$  が存在し、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  は、それぞれ質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  の重さであり、 $k_1$ 、 $k_2$  (及び  $k_3$ ) は、それぞれ質量体  $m_1$  又は  $m_2$  又は  $m_3$  と基板との間の機械的接続部のばね定数であり、 $k_{12}$ 、 $k_{23}$  は、それぞれ質量体  $m_2$  と質量体  $m_1$  又は質量体  $m_3$  との間の機械的接続部のばね定数である。

30

【0020】

その方法は、 $[(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [(k_3 + k_{23}) / m_3]$  を満たすように  $m_1$ 、 $m_3$ 、 $k_1$  及び  $k_3$  を選択する工程と、ジャイロスコープの動作中に、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2]$   $[(k_1 + k_{12}) / m_1] > [(k_3 + k_{23}) / m_3]$  を満たすように  $m_2$ 、 $k_2$  を選択する工程とを含む。

40

【0021】

その方法はさらに、質量体  $m_1$  の運動と質量体  $m_3$  の運動との間の機械的増幅率を選択する工程と、 $k_2$  をこの所望の機械的増幅率を考慮した値とする工程とを含む。

【図面の簡単な説明】

【0022】

例示的な実施形態が、図面の参照図中に示されている。本明細書で開示した実施形態及び図面は、例示的であり、限定的でないと考えらるべきである。

【0023】

【図1】一実施形態に係る、3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  と1つの検出質量体  $m_s$  とを備えたマイクロマシニングによるジャイロスコープと機械的に等価な概略図

50

を示す。

【図 2】一実施形態に係る、3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  と1つの検出質量体  $m_{sense}$  とを備え、質量体  $m_3$  が基板に連結されているマイクロマシニングによるジャイロスコープと機械的に等価な概略図を示す。

【図 3】一実施形態に係る、図 2 に示すジャイロスコープの共振挙動を示す。正規化した変位応答（単位なし）対周波数（Hz）を示す。

【図 4】一実施形態に係る、3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  と1つの検出質量体  $m_{sense}$  とを備え、検出質量体は駆動質量体  $m_3$  から分離しているマイクロマシニングによるジャイロスコープと機械的に等価な概略図を示す。

【図 5】一実施形態に係る、3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  と3つの検出質量体  $m_{sense-2}$ 、 $m_{sense-3}$  とを備え、検出質量体は駆動質量体  $m_3$  から分離しているマイクロマシニングによるジャイロスコープと機械的に等価な概略図を示す。

【図 6】一実施形態に係る、音叉構成で配置された駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  と、1つの検出質量体  $m_{sense}$  とを備えたマイクロマシニングによるジャイロスコープと機械的に等価な概略図を示す。

【発明を実施するための形態】

【0024】

本開示は、特定の実施形態を包含し、特定の図面を参照するが、それに限定されることはない。記載した図面は概略的なものに過ぎず、限定的でない。図面において、いくつかのエレメントの大きさは、説明目的のため誇張し、また、スケールどおり描いていないことがある。寸法及び相対寸法は、開示の実施に対する実際の縮小には対応していない。この明細書を通じて「一実施形態(one embodiment又はan embodiment)」が意味するのは、その実施形態と関連して説明される特定の特徴、構造又は特性は、本開示の少なくとも1つの実施形態に含まれる、ということである。したがって、本明細書を通じてさまざまな所で現れるフレーズ「一実施形態では」は、必ずしも同じ実施形態を指すのではなく、異なる実施形態を指してもよい。さらに、特定の特徴、構造又は特性は、この開示から当業者に明らかなように、1つ以上の実施形態において好適な方法で組み合わせることができる。さらに、説明及び請求項での用語「上(top)」「底(bottom)」「～の上(over)」「～の下(under)」等は、説明目的で使用しており、必ずしも相対的な位置を記述するためのものでない。こうして用いた用語は、好適な状況下で交換可能であって、本明細書で説明した開示の特定の実施形態が本明細書で説明又は図示した以外の他の向きで動作可能であると理解すべきである。請求項で使用する用語「備える、有する、含む(comprising)」は、それ以降に列挙された手段に限定されるものと解釈すべきでなく、他のエレメント又は工程を除外していない。それゆえ、記述した特徴、整数、工程又はコンポーネントの存在を、参照したように特定するよう解釈する必要があるが、1つ以上の他の特徴、整数、工程又はコンポーネント、或いはこれらのグループの存在又は追加を除外していない。したがって、「コンポーネントA及びBを含むソリューション」という表現の範囲は、コンポーネントA及びBだけからなるソリューションに限定すべきでない。本開示に関して、A及びBが、関連するソリューションのコンポーネントであることを意味するに過ぎない。

【0025】

この開示では、マイクロマシニングによるジャイロスコープを開示している。かかるマイクロマシニングによるジャイロスコープは、既に説明したコリオリ効果に従って動作する角速度センサである。かかるマイクロマシニングによるジャイロスコープは、半導体プロセスの製造工程を使用して製造する。

【0026】

特に、機械的に連結され、第1方向  $y$  に沿って振動する3質量体構成を備えたマイクロマシニングによるジャイロスコープを開示している。かかる三質量体振動スキームでは、図1で示すように、質量体  $m_1$  は質量体  $m_2$  及び基板に連結され、質量体  $m_2$  は質量体  $m_3$  及び基板に連結される。また、質量体  $m_3$  は、検出部  $m_{sense}$  を駆動する。質量体  $m_3$  は、第2質量体  $m_2$  を介してのみ質量体  $m_1$  に機械的に連結されている。

## 【 0 0 2 7 】

質量体  $m_1$  はアクチュエータによって駆動されるが、通常は静電的に駆動される。低電圧では櫛歯アクチュエータを使用可能であるが、より低電圧で動作するので、平行板アクチュエータを使用するのが好ましい場合もある。かかる平行板アクチュエータは、電力効率に優れるが、非線形挙動に起因して大きな変位を提供することができない。しかしながら、後述するように、質量体  $m_1$  の運動と質量体  $m_3$  の運動との間の機械的増幅率に起因して、平行板アクチュエータの小さい変位を増幅して、適度に大きい第3質量体  $m_3$  の振幅が得られる。増加した振幅は、例えば数マイクロメートルである場合がある。

## 【 0 0 2 8 】

第3質量体  $m_3$  は、外的な回転の際にコリオリ力を作り出す振動質量体として使用することができる。質量体  $m_3$  の偏差は、駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  が振動する方向に沿った方向  $x$  に垂直な方向  $y$  方向に運動する質量体  $m_{sense}$  によって検出する。この質量体  $m_{sense}$  は、図1に示す構成では質量体  $m_{drive}$  に直接連結され、それ自体は駆動質量体  $m_3$  の一部である。

## 【 0 0 2 9 】

質量体  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  の質量、ばね定数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_{12}$ 、 $k_{23}$  並びに減衰レベル  $b_1$  及び  $b_2$  の値は、質量体  $m_3$  についての、大きくて周波数範囲（例えば50 Hz以上）で平坦な変位応答、及び、質量体  $m_3$  の平坦な周波数応答での質量体  $m_1$  と  $m_3$  との間の機械的増幅率が得られるように設計される。したがって、質量体  $m_1$  の振幅は小さくてもよく、通常200 nm未満であり、さらに100 nm未満でもよい。上述のように、この  $m_1$  の小さい振幅はアクチュエータ（例えば平行板アクチュエータ又は櫛歯アクチュエータ）の低電圧駆動を可能にする。したがって、質量体  $m_3$  のアクチュエータに対する応答は、いかなる外部回路も必要とすることなく頑強となり、全体の電力消費が低下することとなる。

## 【 0 0 3 0 】

図1では、質量体  $m_3$  は基板に連結されなかったが、図2は、質量体  $m_3$  が基板にも機械的に連結される別の実施形態を示す。この連結は、ばね  $k_3$  及び減衰  $b_3$  によってモデル化される。このような構成は、マイクロマシニングによるジャイロスコープの製造に起因する欠陥に適合するであろう。ばね  $k_1$  及び  $k_3$  が同様の形状で設計され、さらに、プロセスに関連する欠陥がある場合、すべてのばね  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_{12}$ 、 $k_{23}$  が同程度の影響を受ける。さらに、すべての質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  を基板に固定することで、一端が飛び出した質量体の座屈／屈曲に関する機械的応力が最小化すると共に、より大きく、より平坦なデバイスが可能となる。

## 【 0 0 3 1 】

図2に示す機械的なシステムは、下記の3つの式（1）でモデル化することができる。

## 【 0 0 3 2 】

## 【 数 1 】

$$Force = m_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial t^2} + b_1 \frac{\partial x_1}{\partial t} + k_1 x_1 + (x_1 - x_2) k_{12}$$

$$0 = m_2 \frac{\partial^2 x_2}{\partial t^2} + b_2 \frac{\partial x_2}{\partial t} + k_2 x_2 + (x_2 - x_1) k_{12} + (x_2 - x_3) k_{23}$$

$$0 = m_3 \frac{\partial^2 x_3}{\partial t^2} + b_3 \frac{\partial x_3}{\partial t} + k_3 x_3 + (x_3 - x_2) k_{23}$$

## 【 0 0 3 3 】

これらの3つの式から、各質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  の変位応答を下記の式（2）のように解析的に得ることができる。

## 【 0 0 3 4 】

10

20

30

40

【数 2】

$$X_1 = \frac{\text{Force}}{k_1 + k_{12} + j\omega b_1 - m_1 \omega^2 - \frac{k_{12}^2}{k_{12} + k_2 + k_{23} + j\omega b_2 - m_2 \omega^2 - \frac{k_{23}^2}{k_{23} + k_3 + j\omega b_3 - m_3 \omega^2}}}$$

$$X_2 = \frac{X_1 k_{12}}{k_{12} + k_2 + k_{23} + j\omega b_2 - m_2 \omega^2 - \frac{k_{23}^2}{k_{23} + k_3 + j\omega b_3 - m_3 \omega^2}}$$

10

$$X_3 = \frac{X_2 k_{23}}{k_{23} + k_3 + j\omega b_3 - m_3 \omega^2}$$

【0035】

図3は、連結した三質量体の振動構成の共振挙動を示す。駆動力の周波数は掃引され、駆動された質量体の変位はDC変位に関連して測定される。したがって、図3のy軸は、振動ピークの品質係数を表す。応答ピークf1とf3との間で、実質的に平坦な応答領域が得られる。これら2つの共振ピークf1及びf3は、質量体m2の共振周波数が両共振ピークのいずれより大きいように選択された場合には、質量m1及びm3によって決定する。

20

【0036】

質量体m3の平坦で大きい応答、及び、質量体m1と質量体m3との間の機械的増幅率を達成するために、次の設計方法を適用する。第1に、質量体m2は非運動剛体であり、k2は無限であると仮定する。このとき、質量体m1の運動と質量体m3の運動とは別個に決定することができる。次に、質量体m1及び質量体m3のそれぞれの共振周波数f1及びf2は、下記の式(3)に示すように質量体m2が全く影響を与えないことを仮定して、互いに等しいとみなされる。

30

【0037】

【数3】

$$\frac{k_1 + k_{12}}{m_1} = \frac{k_{23} + k_3}{m_3}$$

【0038】

減衰レベルb1及びb2が充分小さく、かつ、基板に連結されている(b3)場合、有限のk2の値は、質量体m1の共振周波数f1及び質量体m3の共振周波数f3が互いに分離し、両者の間で頑強な応答プラトーを形成すると共に、質量体m1と質量体m3との間に機械的増幅率を形成する。質量体m1及び質量体m3の共振周波数の分離と、プラトーでの質量体m3の応答レベルは、k2の値に依存する。k2が大きいほど、分離は小さく、応答は大きくなる。

40

【0039】

この機械的増幅率は、ジャイロスコープが動作する環境の真空レベル、又は個々のピークの品質係数を増加させることにより、さらに向上させることができる。

【0040】

機械的増幅率は質量体m1から質量体m3に向かって最も大きくなるが、質量体m1の反共振周波数の位置は、k1を変化させることにより調整することができる。平行板アク

50



チュエータを使用して質量体  $m_1$  を駆動する場合、 $k_1$  の値を容易に調整することができる。しかしながら、アプリケーションの観点から、質量体  $m_1$  の反共振周波数で動作しない方が好ましい場合もある。なぜなら、質量体  $m_1$  が不安定となるからである。その場合、ジャイロスコープは、質量体  $m_1$  の反共振周波数から僅かに隔てた周波数で動作し、質量体  $m_1$  から質量体  $m_3$  までの機械的増幅率は、真空レベルに関わらず約 20 ~ 30 であろう。

#### 【0041】

減衰レベル  $b_1$  ,  $b_2$  (及び存在する場合は  $b_3$ ) 又は各共振ピーク  $f_1$  及び  $f_3$  の品質係数は、ジャイロスコープの動作に重要な役割を担っている。品質係数が十分に大きくない場合、連結は生じず、プラトーを形成することもできない。

10

#### 【0042】

共振周波数  $f_1$  及び  $f_2$  の品質係数の選択は、設計基準である。 $k_2$  が大きいほど、両方の共振周波数の品質係数は大きい必要がある。質量体  $m_2$  を介して連結される場合、これらの品質係数の値は、ばね定数  $k_2$  の有限の値に起因して、質量体  $m_1$  及び質量体  $m_3$  の共振周波数  $f_1$  と  $f_3$  との間のプラトーの平均周波数に対する質量体  $m_2$  の共振周波数の比、よりも大まかに言って 1 桁大きい必要がある。

#### 【0043】

質量体  $m_1$  の反共振周波数の位置は、プラトーの中間地点である必要はない。この位置は、質量  $m_1$  の質量  $m_3$  に対する比に依存するが、 $k_1$  を変化させることで調整可能である。それゆえ、初期の設定段階で、質量体  $m_1$  の共振周波数及び質量体  $m_3$  の共振周波数は互いに  $f_1 \sim f_3$  に一致するが、質量体  $m_2$  が非運動物体であると仮定すると、最終的には変化した  $k_1$  に起因して式 (3) が有効である必要はない。

20

#### 【0044】

質量体  $m_1$  と質量体  $m_3$  との間の機械的増幅率は動作周波数に依存する。動作周波数が質量体  $m_1$  の反共振位置での周波数である場合、増幅率は最大となる。しかしながら、この状況は、質量体  $m_1$  の運動に不安定性をもたらす可能性がある。反共振から僅かに隔てて動作することが提案されている。この場合、機械的増幅率は現実的に 20 ~ 30 が可能である。

#### 【0045】

図 4、図 5 及び図 6 は、代替の実施形態を示す。振動するジャイロスコープ内で 1 - D OF 振動子を使用する場合であれば、提案した三質量体連結振動技術を使用可能である。分離した、又は分離していない検出スキーム及び駆動スキーム並びに音叉トポロジーを使用可能である。さらに、この三質量体振動トポロジーをジャイロスコープの検出部内で使用して、大きいバンド幅及び増幅された感度を達成可能である。

30

#### 【0046】

図 4 は、3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  を備え、 $m_1$  は基板に ( $k_1$ ,  $b_1$ )、及び、質量体  $m_2$  に ( $k_{12}$ ) 連結され、 $m_2$  は基板に ( $k_2$ ,  $b_2$ )、及び、質量体  $m_3$  に ( $k_{23}$ ) に連結され、質量体  $m_3$  は、分離質量体  $m_{\text{decoupling}}$  を介して検出質量体  $m_{\text{sens}}$  を駆動するようにしたマイクロマシニングによるジャイロスコープを示す。

40

#### 【0047】

図 5 は、3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  を備え、 $m_1$  は基板に ( $k_1$ ,  $b_1$ )、及び、質量体  $m_2$  に ( $k_{12}$ ) 連結され、 $m_2$  は基板に ( $k_2$ ,  $b_2$ )、及び、質量体  $m_3$  に ( $k_{23}$ ) 連結され、質量体  $m_3$  は、分離質量体  $m_{\text{decoupling}}$  を介して検出質量体  $m_{\text{sens}}$  を駆動するようにしたマイクロマシニングによるジャイロスコープを示す。この実施形態ではまた、検出質量体  $m_{\text{sens}}$  は、3つの質量体  $m_{\text{sens}_1}$ 、 $m_{\text{sens}_2}$ 、 $m_{\text{sens}_3}$  が連結されたものとして構成され、質量体  $m_{\text{sens}_2}$  は、基板及び質量体  $m_{\text{sens}_2}$  に連結され、質量体  $m_{\text{sens}_2}$  は、基板及び質量体  $m_{\text{sens}_3}$  に連結されている。この構成では、駆動質量体についての安定した振動周波数範囲が得られ、質量体  $m_1$  の運動は質量体  $m_3$  に向かって機械的に増幅されると

50

共に、安定な検出周波数帯が得られ、質量体  $m_{sens\_1}$  の運動は質量体  $m_{sens\_3}$  に向かって機械的に増幅される。

【0048】

図6は、音叉構成で3つの駆動質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  を備え、質量体  $m_1$  は基板に  $(k_1, b_1)$ 、及び、質量体  $m_2$  に  $(k_{12})$  連結され、 $m_2$  は、基板に  $(k_2, b_2)$ 、及び、質量体  $m_3$  に  $(k_{23})$  連結され、質量体  $m_3$  は、分離質量体  $m_{decoupling}$  を介して検出質量体  $m_{sens}$  を駆動するようにしたマイクロマシニングによるジャイロスコープを示す。それはさらに、第2の組の、3つの駆動質量体  $m_1'$ 、 $m_2'$  及び  $m_3'$  を備え、 $m_1'$  は基板及び質量体  $m_2'$  に  $(k_{12}')$  連結され、 $m_2'$  は基板及び質量体  $m_3'$  に  $(k_{23}')$  連結され、質量体  $m_3'$  は検出質量体  $m_{sens'}$  を駆動する。機械的に連結した  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  と、 $m_1'$ 、 $m_2'$  及び  $m_3'$  の両方の組が、同じアクチュエータによって駆動される。

10

【0049】

多くの実施形態の例が考慮される。1つの実施形態の例では、マイクロマシニングによるジャイロスコープは、基板と、第1方向に沿って振動するように構成された3つの質量体とを含んでもよい。第1質量体  $m_1$  は、基板に機械的に連結されてもよく、第2質量体  $m_2$  は、第1質量体及び基板に機械的に連結されてもよく、第3質量体  $m_3$  は第2質量体  $m_2$  に機械的に連結されてもよい。ジャイロスコープは、次の式、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] \sim [(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [(k_{23}) / m_3]$  のように規定してもよい。ここで、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  は、それぞれ質量体  $m_1$ 、 $m_2$  及び  $m_3$  の重さであり、 $k_1$ 、 $k_2$  は、それぞれの質量体と基板との間の機械的接続部のばね定数であり、 $k_{12}$ 、 $k_{23}$  は、それぞれ第2質量体と第1質量体、第2質量体と第3質量体との間の機械的接続部のばね定数である。

20

【0050】

いくつかの実施形態では、第3質量体  $m_3$  は基板に機械的に連結されてもよく、次の関係、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] \sim [(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [k_3 + k_{23}) / m_3]$  が存在してもよい。ここで、 $k_3$  は、質量体  $m_3$  と基板との間の機械的接続部のばね定数である。

【0051】

いくつかの実施形態では、3つの質量体は駆動質量体である。ジャイロスコープはさらに、第1質量体  $m_1$  を駆動するための駆動手段を含んでもよい。駆動手段は、例えば、1つ以上の平行板静電アクチュエータでもよい。

30

【0052】

いくつかの実施形態では、3つの質量体はジャイロスコープが回転する際に運動するように構成された検出質量体でもよい。

【0053】

いくつかの実施形態では、ジャイロスコープはさらに、3質量体構成の複製組を含んでもよい。その複製組は、3質量体構成と逆位相で第1方向に沿って振動するように構成してもよい。

【0054】

いくつかの実施形態では、質量体が直線的に振動するように構成してもよい。

40

【0055】

別の実施形態の例では、マイクロマシニングによるジャイロスコープの設計方法が、 $[(k_1 + k_{12}) / m_1] \sim [k_3 + k_{23}) / m_3]$  を満たすように  $m_1$ 、 $m_3$ 、 $k_1$  及び  $k_3$  を選択する工程を含んでもよい。その方法はさらに、動作中に、 $[(k_2 + k_{12} + k_{23}) / m_2] \sim [(k_1 + k_{12}) / m_1] > [k_3 + k_{23}) / m_3]$  を満たすように  $m_2$ 、 $k_2$  を選択する工程を含んでもよい。

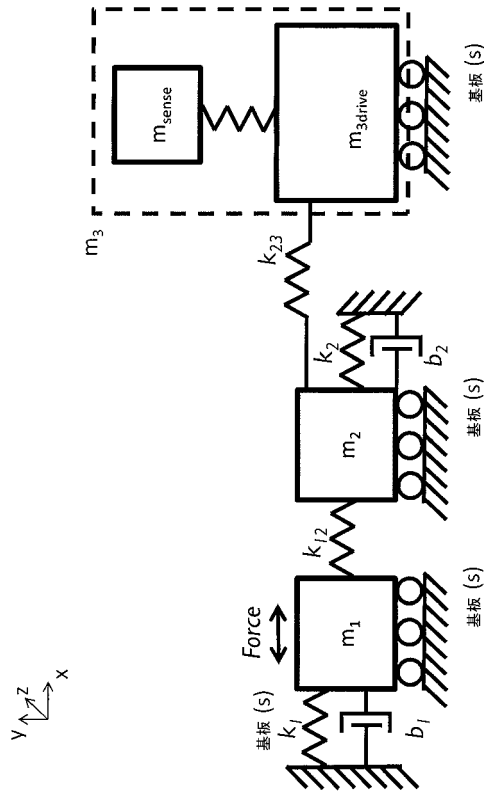
【0056】

いくつかの実施形態では、その方法はさらに、質量体  $m_1$  の運動と質量体  $m_3$  の運動との間の機械的増幅率を選択する工程と、 $k_2$  をこの所望の機械的増幅率を考慮した値とす

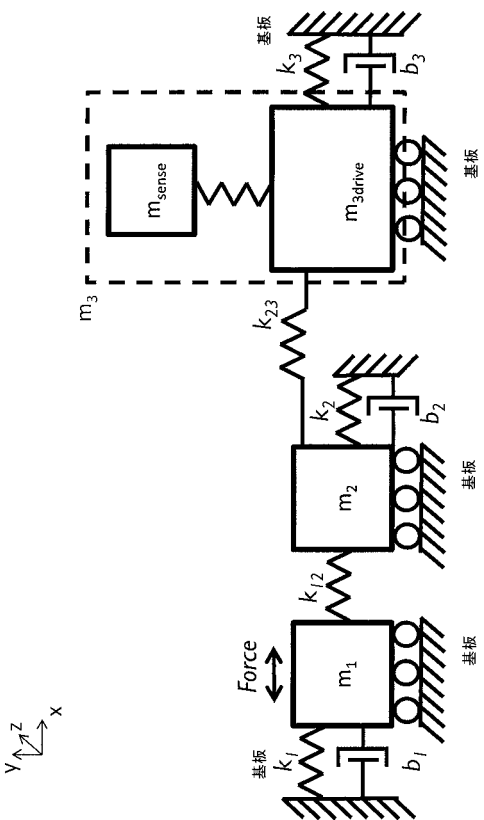
50

る工程とを含んでもよい。

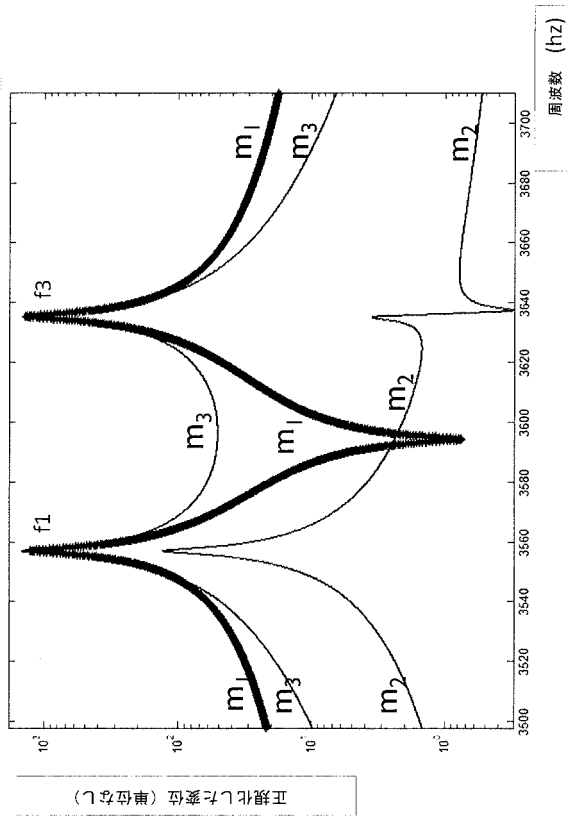
【 図 1 】



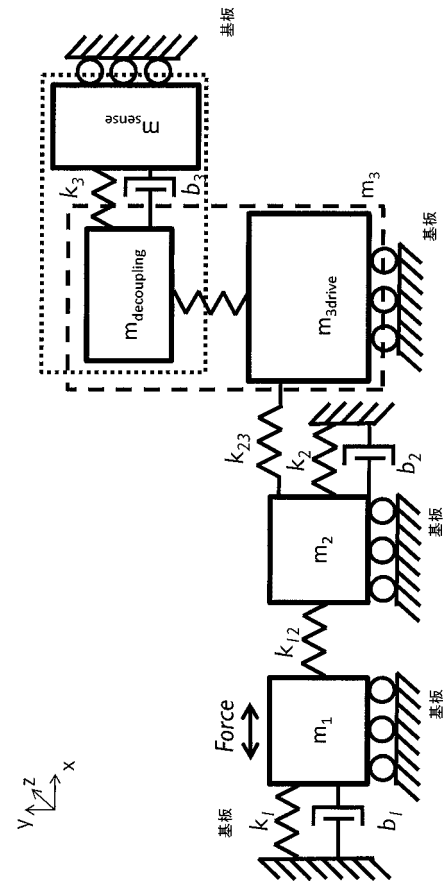
【 図 2 】



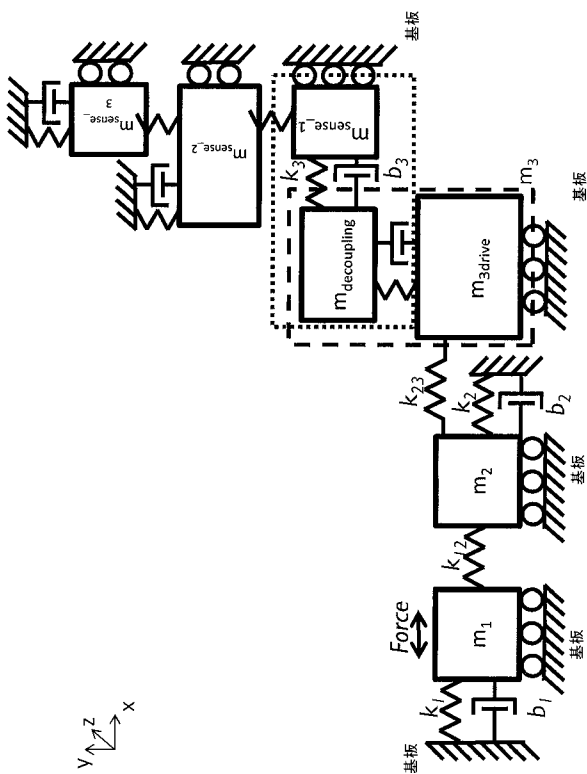
【図 3】



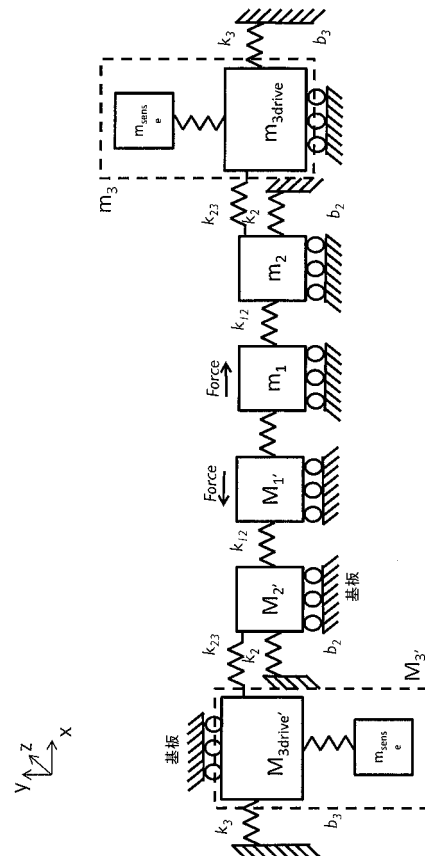
【図 4】



【図 5】



【図 6】



## 【 外国語明細書 】

**THREE-MASS COUPLED OSCILLATION TECHNIQUE FOR MECHANICALLY  
ROBUST MICROMACHINED GYROSCOPES****BACKGROUND**

[0001] Micromachined gyroscopes are angular rate sensors that typically operate according to a physical phenomenon called the Coriolis Effect. The Coriolis Effect is, simply, the deflection of moving objects viewed from a rotating frame. For an object mounted to a substrate, the object tends to oscillate (e.g., vibrate, move, or drive) in a perpendicular plane when the substrate rotates. Hence, in order to make use of the Coriolis Effect, micromachined gyroscopes may be composed of an oscillating part comprising at least one mass, and a sensing part which is free to move in a perpendicular plane of the oscillating part. The sensing part is affected by the rotation of the gyroscope, as the oscillating part will be deflected. Under an external rotation, the oscillating mass deflects, and that deflection is sensed via the movement of the sensing part.

[0002] The sensitivity of such an oscillating gyroscope depends on its oscillation magnitude. In order to achieve a stable and large sensitivity, stable and large oscillation amplitude is desirable.

[0003] Typically, a large oscillation is achieved by using a one-degree-of-freedom (1-DOF) oscillator that is operated at its resonant frequency. Stability is then obtained with the help of stabilization circuitry (e.g., phase lock loops (PLLs), proportional integral (PI) controllers, etc.) to keep the gyroscope operating near this resonance frequency.

[0004] In some cases, the 1-DOF oscillator may be operated at non-resonance frequency, thereby reducing the need for stabilisation circuitry. However, a magnitude of the oscillation at non-resonance frequencies will be less than a magnitude of the oscillation at the resonance frequency. When the oscillator is oscillating at non-resonance frequencies, though, changes in the frequency, as well as the quality factor, will have a lesser effect on the oscillation magnitude, as compared to when the oscillator is oscillating at the resonance frequency.

[0005] Typical gyroscopes consume 10 to 20 times more power than a typical accelerometer in commercial applications. Some of this power consumption results from the comb-drive actuation used in typical gyroscopes to obtain large oscillation magnitudes. Comb-drive actuation involves electrostatic forces being generated between two comb-like structures. One comb is fixed to the substrate while the other comb is movable. The force developed by the comb-drive actuator is proportional to the change in capacitance between the two combs. However, this capacitance increases with driving voltage difference between both combs, with the coupling area reflected by the number of comb teeth, and the gap between these teeth. As a result, achieving large oscillation magnitudes with comb-drive actuation requires large polarization voltage differences, typically 12V in commercial devices. Such high polarization voltage differences are not conducive to a low-power gyroscope. Another source of this power consumption may be stabilization circuitry, such as PLLs and/or PI controllers, used to stabilize the oscillation increase power consumption of the gyroscope, which is similarly not conducive to a low-power gyroscope. Other sources of power consumption exist as well.

[0006] One option for reducing the power consumption of a gyroscope is to use a two-degree-of-freedom (2-DOF) oscillator that includes two masses and, accordingly, has two resonance frequencies. The 2-DOF gyroscope may be operated in between the two resonance frequencies. The amplitude response typically has minimal dependency on the varying quality factor and the resonance frequencies. However, the magnitude of this response is still very small and comparable to the non-resonance response of the 1-DOF oscillator discussed above.

[0007] Accordingly, a micromachined gyroscope with reduced power consumption may be desirable. It may be desirable for such a micromachined gyroscope to have a stable oscillation frequency range with a high mechanical amplification between the actuator and the driving part.

## SUMMARY

[0008] Disclosed is a gyroscope with reduced power consumption, as compared to typical gyroscopes. The disclosed gyroscope is designed without the need of stabilization circuitry, and with a reduced need for driving and controlling circuitry, thereby reducing the power consumption of the gyroscope.

[0009] In one aspect, a micromachined gyroscope is disclosed. The micromachined gyroscope comprises a substrate and at least three masses ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ). The first mass  $m_1$  is mechanically coupled to the substrate via a mechanical connection  $k_1$ , the second mass  $m_2$  is mechanically coupled to the first mass  $m_1$  via a connection  $k_{12}$  and to the substrate via a mechanical connection  $k_2$ , and the third mass  $m_3$  is mechanically coupled to the second mass  $m_2$  via a mechanical connection  $k_{23}$ . The three masses are each configured to oscillate along a first direction  $x$  or  $y$ .

[0010] The following relationships exist between the masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , and the mechanical connections  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{23}$ :  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] \sim [(k_{23})/m_3]$

[0011] In some embodiments, the third mass  $m_3$  is also mechanically coupled to the substrate via a mechanical connection  $k_3$ .

[0012] The masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  can be the driving masses of the gyroscope configured to oscillate along a first direction  $x$ . To this end, the gyroscope may further comprise actuators for stimulating these driving masses. These actuators may be parallel plate actuators.

[0013] In another embodiment, the micromachined gyroscope further comprises a duplicate  $m_1'$ ,  $m_2'$  and  $m_3'$  of these 3 mass configuration and this duplicate is configured to oscillate along the first direction  $x$  but in opposite phase with these 3 masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$ .

[0014] The masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  can be the sensing masses of the gyroscope, which are configured to oscillate along a first direction  $y$  when the gyroscope is rotating.

[0015] In some embodiments, the 3 masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  can be configured to oscillate in a linear way.

[0016] In another aspect, a micromachined gyroscope is disclosed comprising a substrate, a driving mass mechanically coupled to a sensing mass, both masses being movable in perpendicular directions and, when in operation under the influence of the Coriolis force, the driving mass causes the driving of the sensing mass, whereby at least one of the driving mass or of the sensing mass is configured as a connection of 3 masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , whereby the first mass  $m_1$  is mechanically coupled to the substrate, the second mass  $m_2$  is mechanically coupled to the first mass  $m_1$  and to substrate, and the third mass  $m_3$  is mechanically coupled to the second mass  $m_2$ , whereby the following relationship exist  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] \sim [(k_{23})/m_3]$  with  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  being the weight of respectively mass  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$ , with  $k_1$ ,  $k_2$  (and  $k_3$ ) being the spring constant of the mechanical connection between of the respective mass  $m_1$  or  $m_2$  or  $m_3$  and the substrate, and with  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  being the spring constant of the mechanical connection between mass  $m_2$  and mass  $m_1$  or mass  $m_3$  respectively.

[0017] In yet another aspect, a micromachined gyroscope is disclosed comprising a substrate, 3 masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$ , configured to oscillate along a first direction  $x$  or  $y$ , whereby the first mass  $m_1$  is mechanically coupled to the substrate, the second mass  $m_2$  is mechanically coupled to the first mass  $m_1$  and to substrate, and the third mass  $m_3$  is mechanically coupled to the second mass  $m_2$ , whereby the weight and the spring constants  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  of the respective masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  and mechanical couplings  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  are selected, such that, during operation mass  $m_2$  oscillates at a frequency substantially above the resonance frequencies of mass  $m_1$  and mass  $m_3$ .

[0018] In some embodiments, the resonance frequency of mass  $m_2$  is at least 2 times, or even 2.5 times, higher than the resonance frequency of mass  $m_1$  or  $m_3$ .

[0019] In yet another aspect, a method for designing a micromachined gyroscope is disclosed. This micromachined gyroscope comprises a substrate, at least 3 masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  being configured to oscillate along a first direction  $x$  or  $y$ , whereby the first mass  $m_1$  is mechanically



coupled to the substrate, the second mass  $m_2$  is mechanically coupled to the first mass  $m_1$  and to substrate, and the third mass  $m_3$  is mechanically coupled to the second mass  $m_2$ , whereby the following relationship exist  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] \sim [(k_{23})/m_3]$  with  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  being the weight of respectively mass  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$ , with  $k_1$ ,  $k_2$  (and  $k_3$ ) being the spring constant of the mechanical connection between of the respective mass  $m_1$  or  $m_2$  or  $m_3$  and the substrate, and with  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  being the spring constant of the mechanical connection between mass  $m_2$  and mass  $m_1$  or mass  $m_3$  respectively.

[0020] The method comprises: selecting  $m_1$ ,  $m_3$ ,  $k_1$  and  $k_3$  whereby  $[(k_1+k_{12})/m_1] \sim [(k_3+k_{23})/m_3]$ , and selecting  $m_2$ ,  $k_2$  such that during operation of the gyroscope  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] > [(k_3+k_{23})/m_3]$ .

[0021] The method further comprises selecting a mechanical amplification between the movement of mass  $m_1$  and mass  $m_3$  and dimensioning  $k_2$  in view of this desired mechanical amplification.

#### **BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS**

[0022] Exemplary embodiments are illustrated in referenced figures of the drawings. It is intended that the embodiments and figures disclosed herein are to be considered illustrative rather than restrictive.

[0023] Figure 1 shows a schematic mechanical equivalent of a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  and 1 sensing mass  $m_{\text{sense}}$ , in accordance with an embodiment.

[0024] Figure 2 shows a schematic mechanical equivalent of a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  and 1 sensing mass  $m_{\text{sense}}$ , in which mass  $m_3$  is coupled to the substrate, in accordance with an embodiment.

[0025] Figure 3 shows the resonance behavior of the gyroscope shown in Figure 2: normalized displacement response (unitless) vs. frequency (Hz), in accordance with an embodiment.

[0026] Figure 4 shows a schematic mechanical equivalent of a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  and 1 sensing mass  $m_{\text{sense}}$  whereby the sensing mass is decoupled from the driving mass  $m_3$ , in accordance with an embodiment.

[0027] Figure 5 shows a schematic mechanical equivalent of a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  and 3 sensing mass  $m_{\text{sense-2}}$ ,  $m_{\text{sense-3}}$  whereby the sensing masses are decoupled from the driving mass  $m_3$ , in accordance with an embodiment.

[0028] Figure 6 shows a schematic mechanical equivalent of a micromachined gyroscope comprising the driving masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  are arranged in a tuning fork configuration and 1 sensing mass  $m_{\text{sense}}$ , in accordance with an embodiment.

#### **DETAILED DESCRIPTION**

[0029] The present disclosure contains particular embodiments and with reference to certain drawings but the disclosure is not limited thereto. The drawings described are only schematic and are non-limiting. In the drawings, the size of some of the elements may be exaggerated and not drawn on scale for illustrative purposes. The dimensions and the relative dimensions do not correspond to actual reductions to practice of the disclosure. Reference throughout this specification to “one embodiment” or “an embodiment” means that a particular feature, structure or characteristic described in connection with the embodiment is included in at least one embodiment of the present disclosure. Thus, appearances of the phrases “in one embodiment” or “in an embodiment” in various places throughout this specification are not necessarily all referring to the same embodiment, but may refer to different embodiments. Furthermore, the particular features, structures or characteristics may be combined in any suitable manner, as would be apparent to one of ordinary skill in the art from this disclosure, in one or more embodiments. The terms top, bottom, over, under and the like in the description and the claims are used for descriptive purposes and not necessarily for describing relative positions. It is to be understood that the terms so used are interchangeable under appropriate circumstances and that

the embodiments of the disclosure described herein are capable of operation in other orientations than described or illustrated herein. It is to be noticed that the term “comprising”, used in the claims, should not be interpreted as being restricted to the means listed thereafter; it does not exclude other elements or steps. It is thus to be interpreted as specifying the presence of the stated features, integers, steps or components as referred to, but does not preclude the presence or addition of one or more other features, integers, steps or components, or groups thereof. Thus, the scope of the expression “a solution comprising components A and B” should not be limited to solution consisting only of components A and B. It means that with respect to the present disclosure, the only relevant components of the solution are A and B.

**[0030]** In this disclosure a micromachined gyroscope is disclosed. Such a micromachined gyroscope is an angular rate sensor that operates according to the Coriolis Effect described above. Such a micromachined gyroscope is manufactured using semiconductor process manufacturing steps.

**[0031]** More particularly, a micromachined gyroscope is disclosed comprising a configuration of 3 masses mechanically coupled to oscillate along a first direction  $y$ . In such a 3-mass oscillation scheme, illustrated by Figure 1, mass  $m_1$  is coupled to mass  $m_2$  and to the substrate, mass  $m_2$  is coupled to mass  $m_3$  and to the substrate, while mass  $m_3$  drives the sensing part  $m_{\text{sense}}$ . Mass  $m_3$  is only mechanically coupled to mass  $m_1$  via the second mass  $m_2$ .

**[0032]** Mass  $m_1$  is driven by actuators, which are typically electrostatically actuated. Although comb-drive actuators, when operated at lower voltages, can be used, it may be desirable to use parallel plate actuators, as they operate at lower voltages. Such parallel-plate actuators are more power-efficient, although they cannot provide large displacements due to their non-linear behavior. However, thanks to the mechanical amplification between the movement of mass  $m_1$  and mass  $m_3$  as discussed below, the small displacement of the parallel-plate actuators can be

amplified, resulting in an appropriately higher oscillation amplitude of the third mass  $m_3$ . For example, the amplitude increase from peak to peak may be several micrometers.

**[0033]** The third mass  $m_3$  is used as the oscillating mass which creates the Coriolis force upon external rotation. The deflection of mass  $m_3$  is sensed by the mass  $m_{\text{sense}}$  moving in a direction  $y$  perpendicular to the direction  $x$  along which the driving masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  oscillates. This mass  $m_{\text{sense}}$  is, in the configuration illustrated by Figure 1, directly coupled to mass  $m_{3\text{drive}}$  and as such is part of the driving mass  $m_3$ .

**[0034]** The values of the masses  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , spring constants  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{23}$ , and the damping levels  $b_1$  and  $b_2$  are designed to result in a large, and flat (e.g., constant) over a frequency range (e.g., 50Hz or above), displacement response for mass  $m_3$ , and a mechanical amplification between mass  $m_1$  and mass  $m_3$  at this flat frequency response of mass  $m_3$ . Hence, the amplitude of the oscillation of mass  $m_1$  can be small, typically less than 200nm, or even 100nm. As discussed above, this small oscillation amplitude of mass  $m_1$  allows low voltage actuation of actuators (e.g., parallel-plate actuators or comb-drive actuators). Hence, the response of mass  $m_3$  to the actuators will be robust without needing of any external circuitry, and overall power consumption will drop.

**[0035]** Whereas in Figure 1 mass  $m_3$  was not coupled to the substrate, Figure 2 illustrates another embodiment where mass  $m_3$  is mechanically coupled to the substrate as well. This coupling is modeled by a spring  $k_3$  and a damping  $b_3$ . Such a configuration would accommodate for the imperfections coming from the fabrication of the micromachined gyroscope. If the springs  $k_1$  and  $k_3$  are designed in a similar shape, then even, if there is a process related imperfection, all springs  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  are affected to the same degree. Moreover, anchoring all masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  to the substrate minimizes the mechanical stress related to buckling/bending of the cantilevered masses and allows a larger and flatter device.

**[0036]** The mechanical system illustrated by Figure 2 can be modeled by three equations (1):

$$\begin{aligned}
Force &= m_1 \frac{\partial^2 x_1}{\partial x^2} + b_1 \frac{\partial x_1}{\partial x} + k_1 x_1 + (x_1 - x_2)k_{12} \\
0 &= m_2 \frac{\partial^2 x_2}{\partial x^2} + b_2 \frac{\partial x_2}{\partial x} + k_2 x_2 + (x_2 - x_1)k_{12} + (x_2 - x_3)k_{23} \\
0 &= m_3 \frac{\partial^2 x_3}{\partial x^2} + b_3 \frac{\partial x_3}{\partial x} + k_3 x_3 + (x_3 - x_2)k_{23}
\end{aligned}$$

[0037] From these 3 equations, the displacement responses of each mass m1, m2 and m3 can be derived analytically (2):

$$\begin{aligned}
X_1 &= \frac{Force}{k_1 + k_{12} + j\omega b_1 - m_1 \omega^2 - \frac{k_{12}^2}{k_{12} + k_2 + k_{23} + j\omega b_2 - m_2 \omega^2 - \frac{k_{23}^2}{k_{23} + k_3 + j\omega b_3 - m_3 \omega^2}}} \\
X_2 &= \frac{X_1 k_{12}}{k_{12} + k_2 + k_{23} + j\omega b_2 - m_2 \omega^2 - \frac{k_{23}^2}{k_{23} + k_3 + j\omega b_3 - m_3 \omega^2}} \\
X_3 &= \frac{X_2 k_{23}}{k_{23} + k_3 + j\omega b_3 - m_3 \omega^2}
\end{aligned}$$

[0038] Figure 3 illustrates the resonance behavior of the 3 mass coupled oscillation configuration. The frequency of the actuating force is swept and the displacement of the actuated mass is measured with respect to the DC displacement. Hence, the y-axis of Figure 3 is representative for the quality factor of the oscillation peaks. In-between response peaks f1 and f3 a substantially flat response region is obtained. These two resonance peaks f1 and f3 are determined by the mass m1 and mass m3, when the resonance frequency of mass m2 is selected to be higher than either of both resonance peaks.

[0039] In order to achieve a flat and large mass m3 response and a mechanical amplification between mass m1 and mass m3, the following design method is applied. First, mass m2 is

considered to be a non-moving rigid body whereby  $k_2$  is assumed to be infinitive. Hence, the motion of mass  $m_1$  and mass  $m_3$  can be determined separately. Then, the resonant frequencies  $f_1$  and  $f_2$  of respectively mass  $m_1$  and mass  $m_3$  are equated to each other, assuming that mass  $m_2$  had no impact, as shown in equation (3).

$$\frac{k_1 + k_{12}}{m_1} = \frac{k_{23} + k_3}{m_3}$$

[0040] If the damping levels  $b_1$  and  $b_2$ , and when coupled to the substrate  $b_3$ , are low enough, the finite  $k_2$  value will cause the resonant frequencies  $f_1$  of mass  $m_1$  and  $f_3$  of mass  $m_3$  to separate from each other and form a robust response plateau in-between and a mechanical amplification between mass  $m_1$  and mass  $m_3$ . The separation of mass  $m_1$  and mass  $m_3$  resonant frequencies and the response level of mass  $m_3$  at the plateau depend on the value of  $k_2$ . The higher  $k_2$  is, the smaller the separation and the larger the response will be.

[0041] This mechanical amplification can be further improved by increasing the vacuum level of the environment in which the gyroscope operates or the quality factor of the individual peaks.

[0042] The position of the anti-resonance frequency of mass  $m_1$ , where the mechanical amplification is the highest from mass  $m_1$  towards mass  $m_3$ , can be tuned by changing  $k_1$ . The value of  $k_1$  can be easily tuned if parallel plate actuators are used to actuate mass  $m_1$ . However, from the application point of view, one might prefer to not operate at the anti-resonance frequency of mass  $m_1$ , because that will be unstable for mass  $m_1$ . In that case, the gyroscope is operated slightly off the anti-resonance frequency of mass  $m_1$  and the mechanical amplification ratio from mass  $m_1$  to mass  $m_3$  will be around 20-30 regardless of the vacuum level.

[0043] The damping levels  $b_1$ ,  $b_2$  (and  $b_3$  when present) or the quality factors of each resonant peak  $f_1$  and  $f_3$  have an important role on the operation of the gyroscope. If the quality factors are not large enough, the coupling cannot occur and the plateau cannot be formed.

[0044] The selection of the quality factors of the resonance frequencies  $f_1$  and  $f_2$  is a design criterion. The larger  $k_2$  is, the larger the quality factors of both resonance frequencies should be. As a rule of thumb, these quality factor values should be one order of magnitude larger than the ratio of mass  $m_2$  resonant frequency to the average frequency of the plateau between the resonance frequency  $f_1$  and  $f_3$  of mass  $m_1$  and  $m_3$  when coupled via mass  $m_2$  due to the finite value of spring  $k_2$ .

[0045] The position of the anti-resonance of mass  $m_1$  does not have to be at the mid-point of this plateau. This position depends on the ratio of mass  $m_1$  to mass  $m_3$ , but can be tuned by altering  $k_1$ . So, although during the initial design phase the resonant frequencies of mass-1 and mass-3 are equated to each other  $f_1 \sim f_3$ , thereby assuming mass  $m_2$  to be a non-moving body, at the end, equation (3) does not have to hold due to changed  $k_1$ .

[0046] The mechanical amplification between mass-1 and mass-3 depends on the operating frequency. If the operating frequency is at the anti-resonance of mass  $m_1$ , the amplification ratio will be the maximum. However, this situation can bring instability to the mass  $m_1$  motion. It is proposed to operate slightly off anti-resonance. In this case the mechanical amplification ratio can realistically be 20-30.

[0047] Figures 4, 5 and 6 show alternative embodiments. The proposed 3-mass coupled oscillation technique can be used wherever a 1-DOF oscillator is used within vibrating gyroscopes. Decoupled or non-decoupled sense and drive schemes and a tuning fork topology can be used. Moreover, this 3-mass oscillation topology can be used in the sensing part of the gyroscope to achieve a large bandwidth and an amplified sensitivity.

[0048] Figure 4 illustrates a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  with mass  $m_1$  is coupled ( $k_1$ ,  $b_1$ ) to the substrate and to ( $k_{12}$ ) mass  $m_2$ ,  $m_2$  is coupled to the substrate ( $k_2, b_2$ ) and to ( $k_{23}$ ), while the mass  $m_3$  and mass  $m_3$  drives the sensing mass  $m_{\text{sens}}$  via the decoupling mass  $m_{\text{decoupling}}$ .

[0049] Figure 5 illustrates a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  with mass  $m_1$  being coupled ( $k_1, b_1$ ) to the substrate and to ( $k_{12}$ ) mass  $m_2$ ,  $m_2$  is coupled to the substrate ( $k_2, b_2$ ) and to ( $k_{23}$ ) the mass  $m_3$  and mass  $m_3$  drives the sensing mass  $m_{sens}$  via the decoupling mass  $m_{decoupling}$ . In this embodiment also the sensing mass  $m_{sens}$  is configured as a connection for 3 mass  $m_{sens\_1}$ ,  $m_{sens\_2}$ ,  $m_{sens\_3}$ , whereby mass  $m_{sens\_2}$  is coupled to the substrate and to mass  $m_{sens\_2}$ ,  $m_{sens\_2}$  is coupled to the substrate and the mass  $m_{sens\_3}$ . In this configuration a stable oscillation frequency range for the driving masses is obtained whereby the movement of mass  $m_1$  is mechanically amplified to mass  $m_3$ , but also a stable sensing frequency range is obtained whereby the movement of mass  $m_{sens\_1}$  is mechanically amplified to mass  $m_{sens\_3}$ .

[0050] Figure 6 illustrates a micromachined gyroscope comprising 3 driving masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  in a tuning fork configuration with mass  $m_1$  being coupled ( $k_1, b_1$ ) to the substrate and to ( $k_{12}$ ) mass  $m_2$ ,  $m_2$  being coupled to the substrate ( $k_2, b_2$ ) and to ( $k_{23}$ ) the mass  $m_3$  and mass  $m_3$  driving the sensing mass  $m_{sens}$  via the decoupling mass  $m_{decoupling}$ . It further comprises a second series of 3 driving masses  $m_1'$ ,  $m_2'$  and  $m_3'$  with mass  $m_1'$  being coupled to the substrate and to ( $k_{12}'$ ) mass  $m_2'$ ,  $m_2'$  being coupled to the substrate and to ( $k_{23}'$ ) the mass  $m_3'$  and mass  $m_3'$  driving the sensing mass  $m_{sens}'$ . Both series of 3 mechanically coupled driving mass  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  and  $m_1'$ ,  $m_2'$  and  $m_3'$  are actuated by the same actuators.

[0051] A number of example embodiments are contemplated. In one example embodiment, a micromachined gyroscope may include a substrate and 3 masses configured to oscillate along a first direction. The first mass  $m_1$  may be mechanically coupled to the substrate, the second mass  $m_2$  may be mechanically coupled to the first mass  $m_1$  and to substrate, and the third mass  $m_3$  may be mechanically coupled to the second mass  $m_2$ . The gyroscope may be defined as follows:  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg \{[(k_1+k_{12})/m_1] \sim [(k_{23})/m_3]\}$ , where  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  are the weights of, respectively, the masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  being the spring constant of the



mechanical connection between of the respective mass and the substrate, and  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  being the spring constant of the mechanical connection between mass 2 and mass 1 and mass 3 respectively.

**[0052]** In some embodiments, the third mass  $m_3$  may be mechanically coupled to the substrate and the following relationship may exist:  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] \sim [k_3+k_{23})/m_3]$ , where  $k_3$  is the spring constant of the mechanical connection between of the mass  $m_3$  and the substrate.

**[0053]** In some embodiments, the three masses may be driving masses. The gyroscope may further include driving means to drive the first mass  $m_1$ . The driving means may be, for example, one or more parallel plate electrostatic actuators.

**[0054]** In some embodiments, the three masses may be sensing masses configured to move when the gyroscope rotates.

**[0055]** In some embodiments, the gyroscope may further include a duplicate of the three-mass configuration. The duplicate may be configured to oscillate along the first direction in opposite phase with the three-mass configuration.

**[0056]** In some embodiments, the masses may be configured to oscillate linearly.

**[0057]** In another example embodiment, a method for designing a micromachined gyroscope may include selecting  $m_1$ ,  $m_3$ ,  $k_1$  and  $k_3$  such that  $[(k_1+k_{12})/m_1] \sim [k_3+k_{23})/m_3]$ . The method may further include selecting  $m_2$ ,  $k_2$  such that during operation  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] > [k_3+k_{23})/m_3]$ .

**[0058]** In some embodiments, the method may further comprises selecting a mechanical amplification between the movement of mass  $m_1$  and mass  $m_3$ , and dimensioning  $k_2$  in view of this desired mechanical amplification.

**CLAIMS**

1. A micromachined gyroscope comprising: a substrate and 3 masses configured to oscillate along a first direction, whereby the first mass being mechanically coupled to the substrate, the second mass being mechanically coupled to the first mass and to the substrate, and the third mass being mechanically coupled to the second mass, whereby the following relationship exist  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] \sim [(k_{23})/m_3]$ , with  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  being the weight of respectively the first, the second and the third mass, with  $k_1$ ,  $k_2$  and  $k_3$  being the spring constant of the mechanical connection between of the respectively the first, the second or second mass and the substrate, and with  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  being the spring constant of the mechanical connection between the second mass and respectively the first or the third mass.
2. The micromachined gyroscope of claim 1, wherein the third mass is mechanically coupled to the substrate and whereby the following relationship exists:  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] \sim [k_3+k_{23})/m_3]$ , with  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  being the weight of respectively the first, the second and the third mass, with  $k_1$ ,  $k_2$  and  $k_3$  being the spring constant of the mechanical connection between of the respectively the first, the second or second mass and the substrate, and with  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  being the spring constant of the mechanical connection between the second mass and respectively the first or the third mass.
3. The micromachined gyroscope of claim 1 or 2, wherein the 3 masses are the driving masses and further comprising driving means to drive the first mass.
4. The micromachined gyroscope of claim 3, wherein the driving means are parallel plate electrostatic actuators.
5. The micromachined gyroscope of any of the claims 1 to 4, wherein the 3 masses are the sensing masses configured to move when rotating the gyroscope.
6. The micromachined gyroscope of any of the claims 1 to 5, further comprising a duplicate of this 3 mass configuration, this duplicate being configured to oscillate along the first direction but in opposite phase with this 3 mass configuration.

7. The micromachined gyroscope of any of the claims 1 to 6, wherein the 3 masses are configured to oscillate in a linear way.
  
8. A method for designing a micromachined gyroscope according to any of the foregoing claims, the method comprising:  
 selecting the first mass, the spring constant between the first mass and the substrate, the third mass, and the spring constant between the third mass and the substrate whereby  $[(k_1+k_{12})/m_1] \sim [k_3+k_{23})/m_3]$ , and,  
 selecting the second mass and the spring constant between the second mass and the substrate, such that, during operation,  $[(k_2+k_{12}+k_{23})/m_2] \gg [(k_1+k_{12})/m_1] > [k_3+k_{23})/m_3]$ , with  $m_1, m_2, m_3$  being the weight of respectively the first, the second and the third mass, with  $k_1, k_2$  and  $k_3$  being the spring constant of the mechanical connection between of the respectively the first, the second or second mass and the substrate, and with  $k_{12}, k_{23}$  being the spring constant of the mechanical connection between the second mass and respectively the first or the third mass.
  
9. A method according to claim 8, further comprising selecting a mechanical amplification between the movement of first mass and the third mass, and dimensioning the spring constant between the second mass and the substrate in view of this desired mechanical amplification.

**THREE-MASS COUPLED OSCILLATION TECHNIQUE FOR MECHANICALLY  
ROBUST MICROMACHINED GYROSCOPES**

**ABSTRACT**

A micromachined gyroscope is disclosed comprising a substrate, 3 masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$ , configured to oscillate along a first direction  $x$  or  $y$ , whereby the first mass  $m_1$  is mechanically coupled to the substrate, the second mass  $m_2$  is mechanically coupled to the first mass  $m_1$  and to substrate, and the third mass  $m_3$  is mechanically coupled to the second mass  $m_2$ , whereby the weight and the spring constants  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  of the respective masses  $m_1$ ,  $m_2$  and  $m_3$  and mechanical couplings  $k_{12}$ ,  $k_{23}$  are selected, such that, during operation mass  $m_2$  oscillates at a frequency substantially above the resonance frequencies of mass  $m_1$  and mass  $m_3$ . The resonance frequency of mass  $m_2$  may be at least 2 times, or even 2.5 times, higher than the resonance frequency of mass  $m_1$  or  $m_3$ .

Figure 1

Figure 1

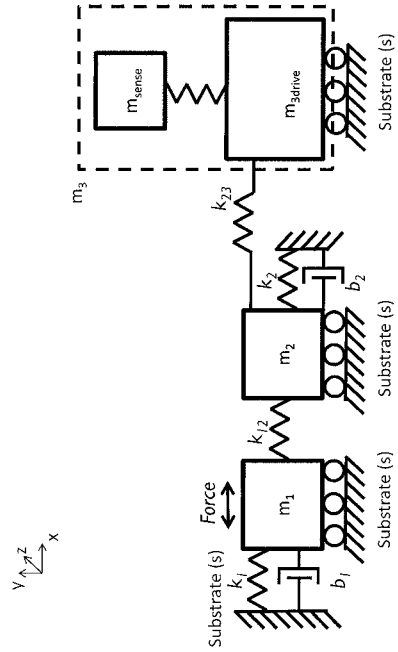


Figure 2

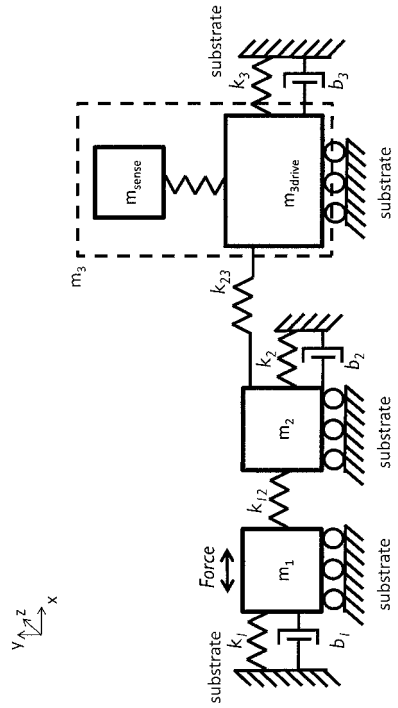


Figure 4

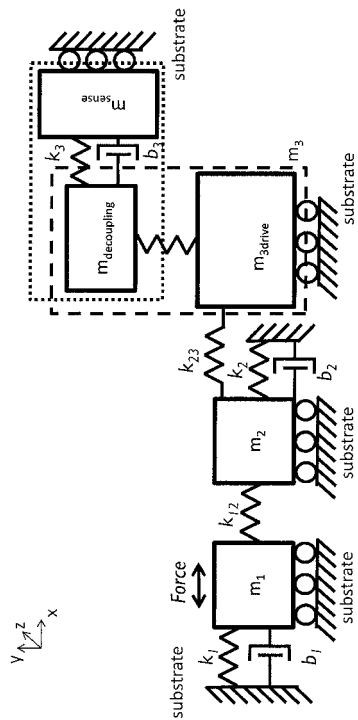


Figure 3

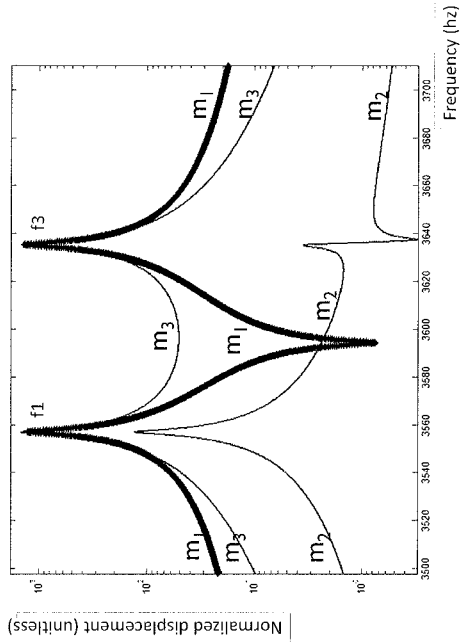


Figure 5

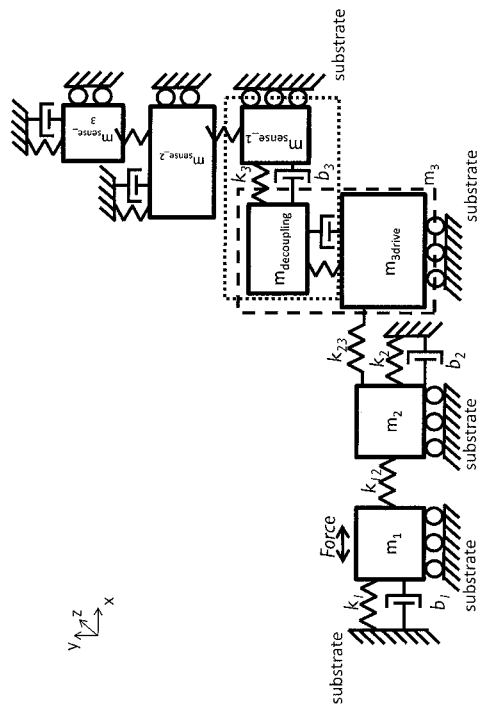


Figure 6

