電磁駆動誘導起電力検出型シリコン角速度センサ

非会員 崔 在濬*、正員 南 和幸、正員 江刺 正喜
(東北大学)

Electromagnetical excitation and induced electromotive voltage sensing
silicon angular rate sensor

Jae-joon Choi, Kazuyuki Minami, and Masayoshi Esashi(Tohoku University)

Abstract

A bulk-micromachined silicon angular rate sensor has been developed. Electromagnetic excitation is adopted for driving its resonator with a large amplitude vibration(70 μ m). The induced vibration by the Coriolis' force is detected by electromotive voltage. The sensor is composed of a silicon-glass-magnet structure and only three masks are needed for this process. The sensitivity of this sensor was 233 μ V/(deg./sec.) and highly sensitive and low cost silicon angular rate is achieved.

キーワード：電磁駆動、誘導起電力検出、シリコン、角速度センサ

(electromagnetical excitation, electromotive voltage sensing, silicon, angular rate sensor)

1. はじめに

最近、シリコンのマイクロマシニング技術を用いた角速度センサに関する研究が盛んに行われている[1-6]。角速度センサの場合、その感度を上げるためには、大きな重りを大きな駆動振幅で動かす振動子が望ましい。振動子の駆動方法には静電力を利用した静電駆動型[1-2]、ピエゾアクチュエータを利用した圧電型[3]、またローレンツ力を利用した電磁駆動型[4-5]などがある。静電駆動の場合、ほかの2つの方法とは違って外部素子がいらぬという長所があるが、大きな駆動電圧を印加した場合、その振動子に構造的アンバランスがあると振動子が対向した駆動電極にぶつかってしまう問題がある。このような問題で静電駆動の場合は大振幅の振動子を得ることは難しい。本研究ではこのために、バルクマイクロマシニングを用いた電磁駆動型シリコン角速度センサを開発した。シリコンのバルクマイクロマシニング技術を用いることにより比較的大きな重りを持った振動子が得られる。また、電磁駆動を用いる事により大振幅駆動が可能になる。検出方式には誘導起電力を利用したが、これでは容量検出のような狭いギャップが入らないため製作においても歩留まりよくまた、測定の場合のC-V変換回路を必要とせず簡単化できる。この方式を用いたシリコン振動型角速度センサの製作及びその評価に関して報告する。

2. センサ構造及び動作原理

図1にセンサの全体構造および動作原理を示す。このセンサはシリコン-ガラス-磁石の3層構造をしている。シリコン部には厚さ150 μ mの振動子が形成されている。振動子の重りは周囲からのL字型の8つのビームで支えられている。振動子上には電磁駆動及び誘導起電力検出用の金属配線(Au/Cr)が4本設けられている。このシリコンはガラスと陽極接合されており、そのギャップの部分は50 μ mである。ガラスの下にはSm-Coの永久磁石が接着されている。

図1に示すように、y方向に電流を流すとシリコン振動子の厚さ方向に印加した磁場とこの電流により振動子にはローレンツ力が発生し、x方向に振動を始める。この時z方向に角速度が印加されると、振動子はコリオリ力によりy方向に振動を始める。この振動により配線の両端には誘導起電力が発生する。この電圧から印加された角速度を知ることができる。

3. センサコンセプト

3.1 電磁駆動

センサ感度を上げるためには大振幅駆動が重要である。本研究では電磁駆動方式を採用する事により大振幅で振

動子を駆動させた。

3.2 2つの振動モード

振動型角速度センサの場合、2つの振動（駆動と検出）を用いるが、感度を上げるためにはそれぞれの振動周波数を近づける必要がある。一方センサの周波数応答特性を上げるためには、2つの振動周波数を離す必要がある[6]。この周波数の調整方法としてはレーザトリミング法[7]と直流バイアスによる調整法[8]があるが、いずれも調整しにくい。本研究では駆動と検出の振動モードが同じ面上にあり、そのため共振周波数を合わせやすくまた、片方のビーム幅を変える事により自由に振動周波数を離す事も可能である。

3.3 空気ダンピングの影響

このセンサでは誘導起電力を検出とするため容量検出のような狭いギャップ（数 μm ）を必要としない。ガラスとシリコンの間は50 μm のギャップがあり、この広いギャップと大きな駆動力により空気ダンピングの影響を受けにくく、このため真空パッケージングなどの必要性もなくなる。

3.4 簡単な製作工程

本研究で設計したセンサの製作に必要なマスクは3枚であり、製作工程が非常に簡単である。これによって低コストで生産することが可能である。

図1 センサの全体構造及び動作原理

4. 製作工程

①Thermal oxidation, patterning(mask1)

②Si etching 50μm by TMAH, bottom SiO2 removal

③Au/Cr sputter and patterning(mask2)

④Photography for the etch through(mask3)

⑤Etch through the thickness by ICPRIE

⑥Attach lead wires Glue Sm-Co permanent magnet

図2 製作工程

図2にセンサの製作工程を示す。

- ①厚さ200 μm のシリコンを熱酸化した後、裏面の酸化膜のパターニングを行う。
- ②熱酸化膜をマスクとして裏面からTMAHを用いてシリコンを50 μm エッチングする。この時、シリコン振動子の厚さは150 μm となる。
- ③振動子駆動および検出用の金属配線としてAu/Crのスputタをし、そのパターニングを行う。
- ④シリコン振動子の貫通エッチングのためレジスト(PMER900cP、東京応化)を用いてパターニングを行う。

- ⑤ ICPRIE(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching)を用いてシリコンの貫通エッチングを行う。エッチング時間は 35 分でありエッチング速度は約 $4\mu\text{m}/\text{分}$ であった。
- ⑥ リード線を取り付け、Sm-Co の永久磁石をガラスに接着材で付ける。

図 3 に製作したセンサの光学顕微鏡写真を示す。振動子の大きさは 7mm である。この振動子の下にはパイレックスガラスと Sm-Co の永久磁石が設けられてある。

図 3 製作後のセンサ

5. 振動特性

図 4 に振動特性の測定回路を示す。ネットワークアナライザからの交流の駆動信号がシリコン振動子に印加される。これにより振動子の駆動配線に流れた電流は 1.5mA である。この電流と Sm-Co の永久磁石によりシリコン振動子は振動を始める。この振動により発生した信号はオペアンプにより増幅され、ネットワークアナライザに戻ってくる。この測定によって駆動と検出の 2 つの共振ピークが観測された。なお、測定はすべて大気中で行われた。

図 5 に測定結果を示す。駆動、検出モードはそれぞれ 548Hz と 562Hz であった。2 つの振動の共振周波数のずれは約 2 % であった。このずれは貫通 RIE の時、エッチング速度の不均一性があり、エッチング速度が早い所では、遅い所が貫通される間オーバエッチングされる。この時、入射されたイオンがステージから反射する事により、振動子ビームが細くなったためである。

図 4 振動特性測定回路

a) 駆動振動の共振ピーク

b) 検出振動の共振ピーク

図 5 振動特性測定結果

図 6 に各振動の真空中依存性を示す。センサを真空チャンバに入れ、その真空度を $4 \times 10^{-4} \sim 0.2 \text{ Torr}$ まで変えながら、それぞれの共振ピークの Q 値及び共振周波数の変化を調べた。

2つの振動のQ値と共振周波数共に、真空度に対して急激な変化は見られなかった。容量検出型センサの場合、感度を上げるために狭いギャップを必要とする。これにより振動子は空気ダンピングの影響を受けやすく[9]、その結果真空パッケージングを必要とする[10]。しかし、このセンサの場合、そのような狭いギャップを必要としないので空気ダンピングの影響が少なく真空パッケージングを必要としない。このセンサは大気中でも1500程度のQ値を示した。

a) 共振ピーク 1

b) 共振ピーク 2

図6 各振動の真空度依存性

6. 角速度センサとしての評価

図7に角速度測定回路を示す。センサと測定回路共にターンテーブル上にセットされ、角速度が印加された。シリコン振動子の駆動周波数は548Hzであり、 $12V_{p-p}$ ($I=60mA$)と $20V_{p-p}$ ($I=100mA$)の電圧が印加された。それぞれの印加電圧に対する振動子の駆動振幅は40と $70\mu m$ (測定値)であった。センサをつけたターンテーブルを回し、角速度を印加すると、振動子はコリオリ力によりx方向に振動を始める。これにより発生した誘導起電力はオペアンプにより500倍増幅される。この検出信号は駆動信号により同期検波され、角速度に対する最終出力が得られる。図8にその結果を示す。

図7 角速度測定回路

図8 測定結果

角速度は $-150 \sim +150 \text{ deg./sec.}$ 間で測定され、それぞれの印加電圧に対して 140 と $233 \mu\text{V}/(\text{deg./sec.})$ のセンサ感度が得られた。また、図に示すように非線形特性が見られているが、これは大振幅効果によるものである。この非線形性はビーム幅 $25 \mu\text{m}$ に対して検出振幅が $2 \mu\text{m}$ 以上の時に見られた。表1に測定結果をまとめる。角速度に対するセンサ感度の測定値と理論値はよく一致している事がわかる。この測定は図7に示すように2本の検出配線の内1本を用いて行ったため、実際には表1に示す感度の2倍のセンサ感度が得られる。

駆動	電圧	12V	20V
	磁束密度	0.5T	0.5T
	駆動力	$90 \mu\text{N}$	$150 \mu\text{N}$
	周波数	548Hz	-
	振幅	$40 \mu\text{m}$	$70 \mu\text{m}$
検出	周波数	562Hz	-
	振幅	35nm	58nm
	(測定値)	$/(\text{deg./sec.})$	$/(\text{deg./sec.})$
	振幅	25nm	42nm
	(設計値)	$/(\text{deg./sec.})$	$/(\text{deg./sec.})$
	感度	$140 \mu\text{V}$	$233 \mu\text{V}$
	(測定値)	$/(\text{deg./sec.})$	$/(\text{deg./sec.})$
	感度	$100 \mu\text{V}$	$166 \mu\text{V}$
	(設計値)	$/(\text{deg./sec.})$	$/(\text{deg./sec.})$

表1 結果まとめ

7 まとめ

電磁駆動、誘導起電力検出型シリコン角速度センサがマイクロマシニングにより製作された。これにより大振幅駆動が得られセンサ感度を上げる事ができる。空気ダンピングの影響を受けにくい（真空パッケージングがいらない）事と簡単な製作工程により低価額の角速度センサが可能である。

謝辞

本研究は一部高橋産業経済研究財団の援助によった。また東北大学ベンチャービジネスラボラトリーで行われた。

(平成10年1月20日受付,平成10年7月21日再受付)

文献

- [1] J.Choi, K.Minami and M.Esashi, "Rotating vibration type silicon angular rate sensor by deep ICPRIE and XeF₂ gas etching", 電気学会 (センサ・マイクロマシン部門総合研究会), pp.33-36 (1997)
- [2] K.Tanaka, Y.Mochida, M.Sugimoto, K.Moriya, T.Hasegawa, K.Atsuchi and K.Ohwada "A micromachined vibrating gyroscope", Proceedings of IEEE MEMS'95, pp.278-281
- [3] K.Maenaka, Y.Konishi, T.Fujita and M.Maeda, "Analysis and design concept of highly sensitive silicon gyroscope", Transducers95, pp.612-615 (1995)
- [4] F.Paoletti, M.-A.Gretillat and N.F.de Rooji, "A silicon micromachined vibrating gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation", Proc.IEEE MEMS Workshop, pp.162-167 (1996)
- [5] M.Lutz, W.Golderer, J.Gerstenmeier, J.Marek, B.Maihofer, S.Mahler, H.Munzel and U.Binschof, "A precision yaw rate sensor in silicon micromachining", Transducers97, pp.847-850 (1997)
- [6] 前中一介, "シリコンジャイロの現状", 電学論 E, 116 巻 4 号, pp.131-135 (平 8)
- [7] M.Ono, N.Wakatsuki and Y.Takahashi, "LiTaO₃ 単結晶を用いた音さ形圧電ジャイロ", 電気情報通信学会論文誌 C- II Vol.J79-C- II, pp.610-617 (1996)
- [8] J.Choi, K.Minami and M.Esashi, "Silicon angular rate sensor by deep reactive ion etching", International Symposium on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, pp.29-32 (1995)
- [9] M.Andrews, I.Harris and G.Turner, "A comparison of squeeze-film theory with measurements on a micro structure", Sensors and Acyectors, pp.79-87 (1993)
- [10] H.Henmi, S.Shoji, Y.Shoji, K.Yoshimi and M.Esashi, "Vacuum packaging for microsensors by using glass-silicon anodic bonding", Dig. of Tech. Paper, Transducer93, pp.584-587 (1993)

崔 在濬

(非会員) 平成10年
東北大学大学院博士課
程修了. マイクロマシー
ニングの基礎研究に従
事. 現在、SAMSUNG 勤
務.

南 和幸

(正員) 昭和60年東
北大学大学院修士課程
機械工学専攻修了. 平
成2年同大学工学部助
手、平成6年同講師.
立体マイクロマシーニング、マイクロア
クチュエータの基礎研究に従事.

江刺 正喜

(正員) 昭和51年東北
大学大学院博士課程修
了. 同年同大学工学部助
手、56年同助教授、平
成2年同教授(機械電子
工学科)、平成10年同
大学未来科学技術共同研究センター教授、
現在に至る. 半導体センサ、マイクロマシ
ーニングによる集積化システムの研究に
従事.