'96 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (1996. 7. 22~24)

주파수 조정가능한 박막미세가공 마이크로 자이로

李起邦*0, 尹浚寶**, 姜明錫*, 曺永昊*, 尹榮基*, 金忠基**
* 한국과학기술원 기계공학과, ** 한국과학기술원 전기 및 전자공학과

A Surface-micromachined Tunable Microgyroscope

Ki Bang Lee*0, Jun Bo Yoon**, Myung Seok Kang*, Young-Ho Cho*, Sung-Kie Youn*,
and Choong Ki Kim**
* Department of Mechanical Engineering, ** Department of Electrical Engineering
Korea Advanced Institute of science and Technology

Abstract - We investigate a surface-micromachined polysilicon microgyroscope, whose resonant frequencies are electrostatically-tunable after fabrication. The microgyroscope with two oscillation modes has been designed so that the resonant frequency in the sensing mode is higher than that in the actuating mode. The microgyroscope has been fabricated by a 4-mask surface-micromachining process, including the deep RIE of a 6㎛-thick LPCVD polycrystalline silicon layer. The resonant frequency in the sensing mode has been lowered to that in actuating mode through the adjustment of an inter-plate bias voltage; thereby achieving a frequency matching at 5.8kHz under the bias voltage of 2V in a reduced pressure of 0.1torr. For an input angular rate of 50°/sec, an output signal of 20mV has been measured from the tuned microgyroscope under an AC drive voltage of 2V with a DC bias voltage of 3V.
Key words : Microgyroscope, Microactuator, Microsensor, Surface-micromachining, MEMS

I. 서론

최근 박막 미세가공기술을 이용한 마이크로 자이로[1,2]가 크게 주목받고 있다. 이러한 마이크로 자이로는 CMOS공정과 호환공정을 이용함으로써 회로일체형으로 제작가능하며, 캠코더의 손떨림 방지용 센서, 가상현실용 디스플레이(Head-mounted displays), 컴퓨터 입력장치, 게임기, 자동차 ABS시스템, 자동차 항법장치 등 다양한 제품에 적용가능한 저가, 소형, 고성능 및 저전력소비형 감지소자로 주목받고 있다.

고성능의 마이크로 자이로를 제작하기 위해서는 진동구조물의 두방향의 공진 주파수를 일치시켜야 한다. 전기적 주파수 조정방법으로는 횡방향 방법[3,4]과 종방향조정방법[5]가 있으나 후자가 전자에 비하여 조정전압이 작다는 장점이 있다.

본 논문에서는 고성능의 박막미세가공 마이크로 자이로를 만들기 위해 제작후 두판사이에 수직으로 정전기를 가하여 구조물의 공진주파수를 변경시키는 방법에 관하여 연구하였다.

II. 해석 및 설계

마이크로 자이로는 그림 1에서 보는 바와 같이 두 개의 질량평판이 빗살형 액추에이터에 의해 y축을 따라 서로 반대방향으로 구동된다. 이때 입력각속도 Ω에 의해 진동하는 두 개의 질량체에는 서로 방향이 반대인 코리올리힘 F_1과 F_2이 발생하며, 이힘에 의하여 두 개의 판질량 m_1과 m_2는 각각 z방향으로 움직인다.

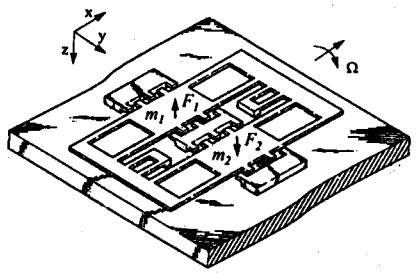


그림 1. 두 개의 질량체를 가진 주파수 조정 가능한 박막미세가공 마이크로 자이로.

이러한 마이크로 자이로를 해석하기 위하여, 기하학적으로 대칭인 우측 판구조물만을 생각한다. 구조물의 진동폭이 작다면 마이크로자이로의 우측의 구조물은 그림 2에서 보는 바와 같이 2자유도를 가진 진동시스템으로 모델링할 수 있다. 빗살형 액추에이터를 이용하여 $V_D=V_p+V_d\sin\omega t$의 전압으로 가하여 평판질량체를 y방향으로 가진한다.

그림 2와 같은 진동계에서 질량평판이 y방향으로 가진되고 질량평판의 y방향의 공진주파수와 z방향의 공진주파수가 일치하면, 입력각속도 Ω에 대한 마이크로 자이로의 최대응답 z_{max}는 다음과 같다.

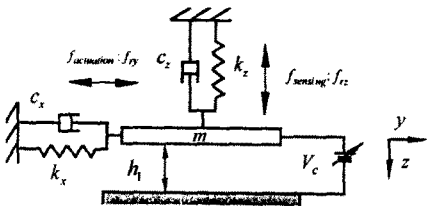


그림 2. 마이크로 자이로의 동역학적 모델.

$$z_{max} = 2 f_0 \frac{mQ\omega}{k_y k_z} Q_y Q_z \qquad (1)$$

여기서 f_0, m, k_y, k_z, Q_y, Q_z는 각각 y방향의 가진력, 판의 질량, y방향과 z방향의 스프링상수, y방향과 z방향의 Q factor를 나타낸다. 그러나 실제 마이크로 자이로에서는 제작공정의 오차로 인하여 미소구조물의 설계치수대로 제작할 수 없어 y방향과 z방향의 공진주파수가 일치되지 않고, 식(1)의 최대출력 z_{max}을 얻는 것은 극히 곤란하다.

본 논문에서는 박막미세가공에 의해 제작된마이크로 자이로의 공진주파수를 전기적으로 일치시키기 위해 정전력을 이용한 유효스프링상수의 변화를 꾀하였다. 그림 2에서 조정전압 V_C를 조정하면 윗판과 기판사이의 간격을 초기간격 h_0에서 평형위치 h_1으로 변화시킬 수 있다. 이 평형위치 h_1에서의 유효스프링상수 k_{ze}는 다음과 같다

$$k_{ze} = k_z (3 - 2\frac{h_0}{h_1}) \qquad (2)$$

여기서 k_z는 제어전압 V_c=0V 일 때 z방향 스프링의 스프링 상수이다. 힘의 평형식에서 판간격 h_1을 유지하기 위한 제어전압 V_c를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_c = \sqrt{2\frac{k_z}{\varepsilon A} h_1^2 (h_0 - h_1)} \qquad (3)$$

식(3)에서 ε과 A는 유전율과 판의 유효면적을 각각 나타낸다.

질량평판이 h_1에서 평형을 이루기 위해 제어전압 V_c를 가한 경우, 마이크로 자이로 구조물의 z방향의 공진주파수는 다음과 같다.

$$f_{rz} = f_{rz0}\sqrt{3 - 2\frac{h_0}{h_1}} \qquad (4)$$

여기서 $f_{rz0}=\sqrt{(k_z/m)}/2\pi$는 제어전압이 0V일 때 z방향의 공진주파수이며, h_1은 주어진 제어전압에 대한 판사이의 간격을 나타낸다. 식(2), (3), (4)에 의해 제어전압 V_c를 제어하므로써 구조물의 z방향의 공진주파수를 조정할수 있다.

그림 3은 제어전압이 변할 때 공진주파수의 변화를 시뮬레이션한 것이다. 마이크로자이로는 y방향과 z방향의 공진주파수가 각각 5.0kHz와 6.4kHz로 각각 설계되었으며, V_c=2.3V의 제어전압에 의해 z방향의 공진주파수가 y방향의 공진주파수인 5.0kHz로 변화되도록 설계하였다. 따라서 두방향의 공진주파수가 일치된 마이크로 자이로는 주어진 입력각속도에 대해 최대의 출력을 얻을 수 있다.

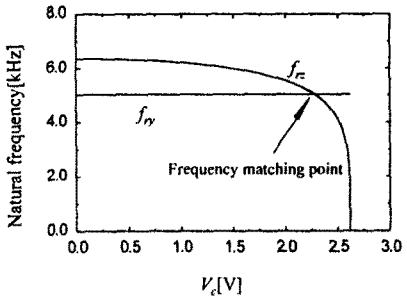


그림 3. 2.3V의 제어전압을 가할 때 공진주파수의 일치(f_{ry}=f_{rz}).

III. 제조공정

설계된 마이크로 자이로는 그림 4에 도시된 바와 같이 4장의 마스크를 사용하여 박막미세가공(Surface-micromachining)으로 제작했다. 실리콘기판위에 2㎛두께의 열산화막(thermal oxide), 2000 A 두께의 LPCVD질화막과 2000 A 두께의 LPCVD 다결정실리콘(POLY1)을 형성한후 첫 번째 마스크를 이용하여 POLY1을 식각한다. 그위에 2.1㎛두께의 PSG를 형성하고 두 번째 마스크를 이용하여 PSG를 식각한다. 그림 4(d)공정에서 도핑하지 않은 6㎛두께의 다결정실리콘층(POLY2)을 605°C에서 형성하고 POLY2위에 1.5㎛두께의 PSG를 증착한후 950°C에서 한시간동안 어닐링한다. 그림 4(e)공정에서는 PSG위에 세번째 마스크로 구조물의 패턴을 함으로써 PSG식각한후 Cl_2 플라즈마를 이용한 RIE로 POLY2를 이방성식각을 하면, 최소선폭이 3.3㎛인 1:2의 높은 고단면비(High aspect ratio)를 가지는 미세구조물을 얻었다. 그림 4(f)공정에서 희생층 PSG를 HF용액에서 제거하여 떠있는 구조물을 제작한다. 마지막으로 전기접속을 하기 위해 네 번째 마스크인 샤도우마스크를 이용하여 알루미늄전극을 형성한다.

그림 5은 제작된 미소자이로를 나타낸 것으로 구동부의 전체적인 크기는 약 1mm^{2}정도이다.

IV. 시험 및 측정

주파수조정이 끝난 마이크로 자이로를 회전판(rate table)위에 올려놓고 회전시키며 성능을 측정하였다. 성능측정시 빗살구동부에서 DC바이어스전압 3V와 AC구동정압 2V를 가하여 판을 y방향으로 구동시켰다. 그림 6은 공진주파수를 일치시킨 마이크로 자이로를 회전판(rate table)위에 올려놓고 측정한 출력을 나타낸다. 일치된 공

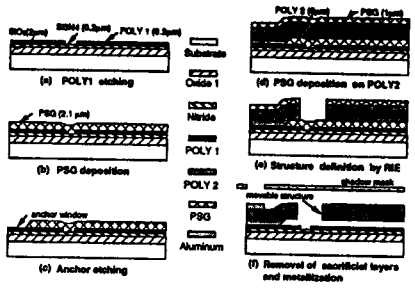


그림 4. 제작공정.

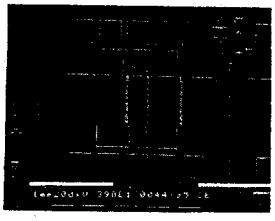


그림 5. 제작된 마이크로자이로의 SEM사진.

진주파수는 제어전압 2.0V에서 5.8kHz이었다. 그림 6(a)는 입력각속도 Ω=0°/s가 입력될 때 측정된 것으로써 160mV$_{p\text{-}p}$의 출력이 감지되었다. 그림 6(b)는 Ω_0=50°/s의 각속도가 주파수 f=4Hz로 입력될 때 출력되는 신호를 나타내는 것으로, 그림 6(a)의 160mV$_{p\text{-}p}$의 출력에 20mV$_{p\text{-}p}$의 신호가 실려서 나오는 것을 볼 수 있다. 이 신호는 5.8kHz의 캐리어주파수(즉 판질량체의 구동 주파수 ω/π)와 4Hz의 입력각속도 주파수가 진폭변조(Amplitude modulation)된 신호이다.

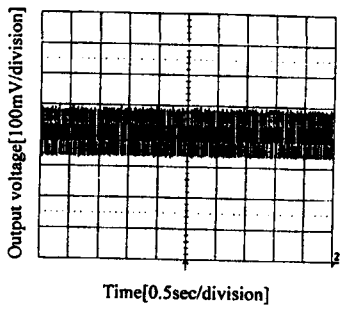
V. 결론

박막미세가공으로 제작된 구조물의 공진주파수를 전기적으로 조정할수 있는 다결정실리콘 마이크로 자이로를 연구하였다. 공진주파수를 조정하기 위해 미소구조물과 바닥전극사이의 정전력에 의한 유효스프링상수의 변화를 이용하였다.

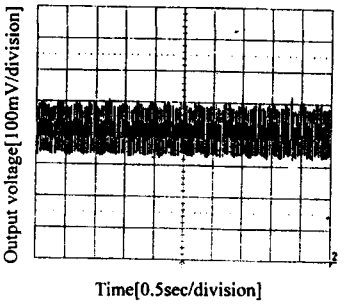
마이크로 자이로의 감지 및 구동방향의 공진주파수는 6.3kHz와 5.0kHz로 감지방향의 공진주파수를 구동방향의 공진주파수보다 높게 설계하고, 제작후 제어전압을 조정하므로써 감지방향의 공진주파수를 구동방향의 공진주파수에 일치시킬 수 있게 하였다.

마이크로 자이로는 4장의 마스크를 이용한 박막미세가공공정으로 제작하였으며, 6㎛두께의 LPCVD다결정 실리콘층을 RIE로 이방성 식각하여 단면비가 1대2인 미소구조물을 만들었다. 제어전압 2.0V를 가하여 제작된 마이크로 자이로의 구동방향과 감지방향의 공진주파수를 5.8kHz로 일치시킬 수 있었다.

공진주파수가 일치된 자이로에 3V의 AC구동전압과 2V의 DC바이어스 전압을 가하며 0.1torr의 저압공기중에서 성능실험을 수행한 결과, 50°/s의 입력각속도에 대하여 20mV의 출력을 얻었다.



a) Ω=0°/s



b) $\Omega=\Omega_0 \sin 2\pi ft$, ($\Omega_0$=50°/s, f=4Hz)

그림 6. 주파수일치된 마이크로 자이로의 출력: 2.0V의 제어전압에서 공진주파수($f_{ry}=f_{rz}$).

본 논문에서는 박막미세가공에 의해 제작된 두 방향으로 진동하는 마이크로 자이로의 성능을 높이기 위해 제작이 완료된 구조물의 공진주파수를 전기적으로 조정할 수 있는 방법을 제시하였고 이를 실험으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 삼성종합기술원의 위탁기술개발 과제의 일부로 수행된 것이다.

참고문헌

[1] J. Bernstein, S. Cho, A.T. King, A. Kourepenis, P. Maciel, and M. Weinberg, "A Micromachined Comb-Drive Tuning Fork Rate Gyroscope," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Ft. Lauderdale, pp.143-148, 1993.

[2] K. Tanaka, Y. Mochida, S. Sugimoto, K. Moriya, T. Hasegawa, K. Atsuchi, and K. Ohwada, "A Micromachined Vibrating Gyroscope," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Amsterdam, pp.278-281, 1995.

[3] S.G. Adams, F.M. Bertsch, K.A. Shaw, P.G. Hartwell, N.C. MacDonald, F.C. Moon, "Capacitance Base Tunable Micromechanical Resonators," *Proc. 8th Inter. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95)*, Stockholm, pp. 438-441, 1995.

[4] S.G. Adams, F.M. Bertsch, N.C. MacDonald, "Independent Tuning of the Linear and Nonlinear Stiffness Coefficients of a Micromechanical Device," *Proc. Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, San Diego, pp.32-37, 1996.

[5] J.J. Yao and N.C. MacDonald, "A Micromachined, Single-crystal Silicon, Tunable Resonator , " *J. Micromech. Microeng.* Vol.6, pp.257-264, 1996.