

서어보 가속도계용 실리콘 펜듈럼 설계 Design of Silicon Pendulum for Servo Accelerometer

*# 이관섭

*# K. S. Lee(kslee@krri.re.kr)

한국철도기술연구원 철도시스템연구본부

Key words : Silicon Pendulum, Accelerometer, Anisotropic Etching

1. 서론

서어보 가속도계는 Proof mass 에 해당하는 펜듈럼을 서어보 제어기를 사용하여 중립위치로 항상 유지시키면서 이에 필요한 토크의 전류를 측정함으로써 가속도량을 측정하는 계측기이며, 주로 관성항법장치 등 고정밀 가속도를 측정하는데 사용된다.

서어보 가속도계를 설계할 때, 펜듈럼(Pendulum)의 형태 및 재질, force torquer 및 pick-off 의 형태 및 방식, 제어기의 구조, 온도보상 방법 등 수많은 설계인자가 고려되어야 한다. 이 중에서 가속도를 감지하는 펜듈럼 부분은 가장 핵심 요소이며, 미국의 Q-flex 가속도계의 펜듈럼은 수정(Quartz) 재료를 이용하여 제작되고 있다. 실리콘은 Quartz 에 비해 기계적 성질은 비슷하나, 열전도성이 우수하고 기존의 반도체 제작설비 및 공정을 활용하여 대량생산이 용이하기 때문에 1990년대부터 가속도계 및 자이로스코프의 재료로 사용되기 시작하였다.

본 논문에서는 펜듈럼형 서어보 가속도계에 대해 실리콘 재질을 이용한 펜듈럼을 설계하고 실리콘 웨이퍼의 비등방성 에칭(anisotropic etching)에 의한 실리콘 펜듈럼 제작공정에 대해 기술하고자 한다.

2. 서어보 가속도계 개념

그림 1 은 서어보형 가속도계의 작동원리를 나타내는 것이며, 인가된 가속도에 따라 펜듈럼이 이탈하게 되고 구동부에서는 이탈된 펜듈럼을 다시 영점위치로 움직이는데 필요한 힘을 펜듈럼에 가한다.

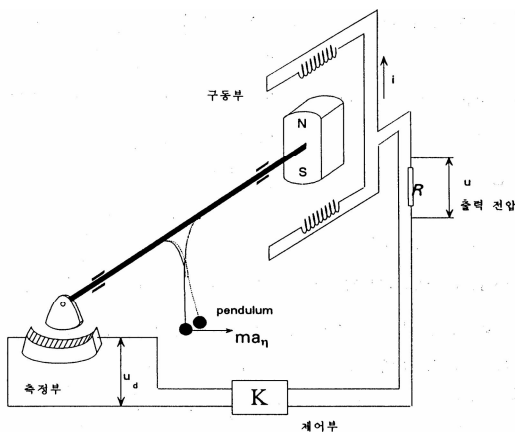


Fig. 1 Operation schematic of servo accelerometer

펜듈럼에 가해지는 힘은 토크코일에 흐르는 전류(구동부에 흐르는 전류 i 에 비례하는 성질을 가지고 있으므로)이로부터 저항 R 을 이용하여 출력전압 u 를 측정하면 이것이 가속도량이 된다. 측정부는 펜듈럼의 이탈량을 측정하고 제어부는 이탈량과 출력전압의 feedback 에 의해 토크코일에 전류를 인가한다

3. 실리콘 펜듈럼의 설계

펜듈럼 조립체는 가속도계의 핵심부분이며, 이는 일반적인 MEMS 제작기술인 에칭기술과 Lithography 기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼를 가공함으로써 제작할 수 있다. 가속도계용 실리콘 펜듈럼은 전자 소자와 같이 실리콘의 반도체적 성질을 이용하는 것이 아니라, 실리콘의 기계적 성질을 이용한다. 단결정 실리콘은 소성변형이 거의 일어나지 않는 Brittle 한 재료이지만 Young's Modulus 가 스테인레스강이나 탄소강과 유사하고 항복강도가 스테인레스강보다 3 배가 강하다. 미국의 Q-flex 가속도계에서 사용하는 수정(Quartz, SiO_2)에 비해 항복강도는 다소 작지만 열전도율이 매우 큰 재질이므로 실리콘이 가속도계의 펜듈럼으로 사용될 수 있다.

본 연구에서 실리콘 펜듈럼을 설계할 때 고려한 사항은 다음과 같다.

- 기계적 가공이 어려운 복잡한 3 차원 형상을 가지는 펜듈럼은 단결정 실리콘 웨이퍼의 비등방성 에칭(Anisotropic etching)을 이용하여 제작
- 실리콘 펜듈럼의 경우 2 점 지지 flexure(or suspension)는 인장력에는 강하나 좌굴강도가 약해 외부 충격과 진동에 매우 취약하므로 4 점 지지의 flexure 를 사용하여 인장과 압축하중에 동시에 강하도록 설계
- flexure 와 frame 을 연결하는 부위에 집중응력이 발생하지 않도록 형상을 smooth 하도록 제작
- 부품수와 조립공정의 최소화를 하기 위해 pick-off 의 exciting 기능을 보상력을 만드는 force torquer 에서 동시에 수행하도록 설계
- 펜듈럼의 frame 과 접촉하는 케이스의 재료를 동일한 단결정 실리콘 사용
- 실리콘 케이스와 펜듈럼 조립체간 열팽창의 차이로 인한 상대거리 변화를 최소화하기 위해 기계적 온도보상기를 사용

이와 같은 고려사항을 반영하여 실리콘 펜듈럼은 그림 2 와 같은 형상으로 설계되었다. flexure 의 두께는 16micron, 폭이 1mm, 길이가 2.2mm, 펜듈럼의 크기는 20x20mm 이다.

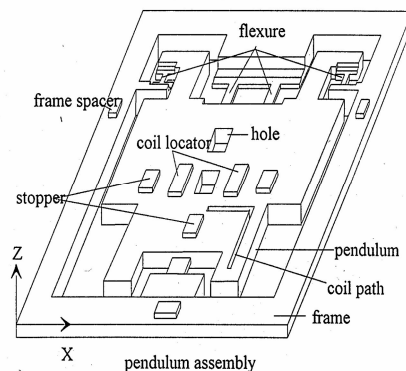


Fig. 2 Shape of silicon pendulum

4. 실리콘 펜듈럼의 제작

펜듈럼의 제작은 단결정 실리콘 웨이퍼를 Cleaning → Oxidation → Lithography → HF 용액에서 etching(SiO₂ 막 제거) → Cleaning → KOH 용액에서 anisotropic etching (Si 식각) 등의 일반적인 실리콘 에칭공정을 기본으로 한다..

통상적인 비등방성 에칭(anisotropic etching)을 하게 되면 frame 과 flexure 를 연결하는 16 micron 크기의 서스펜션의 목 부분이 그림 3a)와 같이 날카롭게 (sharp-edge) 식각되어 이상적인 smooth 형상이 되지 않는다. 따라서 응력 집중을 방지하기 위해 그림 3b)와 같이 <100>면과 <111>면이 smooth 하도록 식각하는 것이 필요하다. 이를 위해 그림 4 와 같이 2 단계 에칭공정을 적용하여 실리콘 펜듈럼의 flexure 부위를 제작하였다.

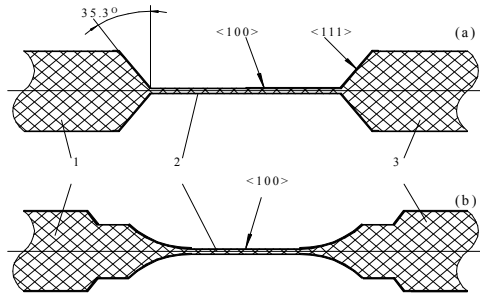


Fig. 3 Flexure part of silicon pendulum

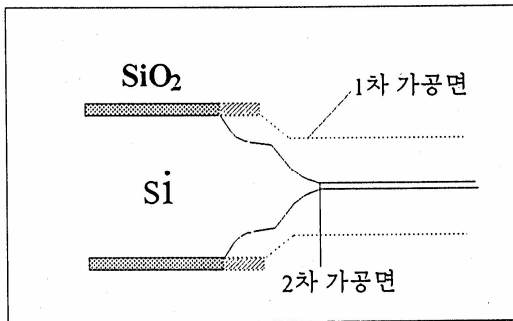


Fig. 4 Etching process for silicon flexure

이러한 기본 공정을 6 장의 Photo mask 를 이용하여 6 단계의 식각 과정을 거쳐서 그림 2 와 같은 실리콘 펜듈럼이 제작되었다. 그림 5 는 Lithography 공정에 사용된 6 장의 각 단계별 Photo mask 의 형상을 나타낸다.

SiO₂ 막의 층 두께, 에칭 용액의 농도 및 온도, 에칭시간 등은 펜듈럼의 식각 두께에 따라 각 단계별로 다르게 설정되었다. 에칭 과정 중에는 실리콘과 용액이 반응하여 가공표면에 작은 기포가 많이 생기게 되어 표면거칠기에 나쁜 영향을 주게 된다. 이를 방지하기 위하여 실리콘 웨이퍼가 용액에 침투되는 각도를 <100>면에 직각이 되도록 하고 대부분의 KOH 용액의 농도는 33%, 온도는 87 °C 로 일정하게 유지하였다. 그림 6 은 모든 공정을 마치고 완성된 실리콘 펜듈럼의 시제품을 나타낸다.

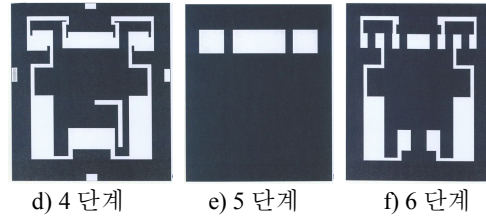
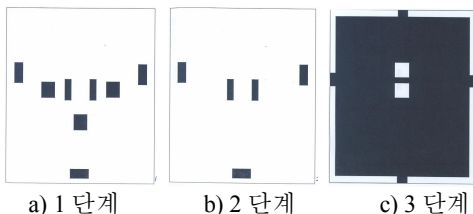


Fig. 5 Photo mask for lithography

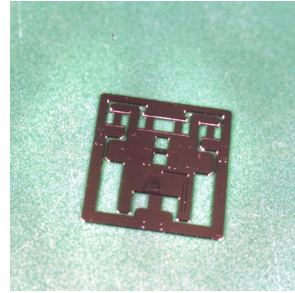


Fig.6 A manufactured prototype of silicon pendulum

그림 7 은 그림 6 의 실리콘 펜듈럼을 이용하여 실제로 제작 조립한 서어보 가속도계의 시제품을 나타낸다.

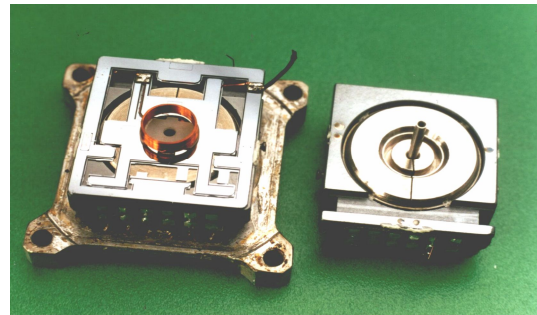


Fig. 7 A manufactured prototype of silicon servo accelerometer

5. 결론

실리콘 웨이퍼로 서어보 가속도계용 펜듈럼을 설계, 제작하였으며, 이를 이용한 서어보 가속도계를 설계, 제작 및 시험을 실시하였다. 제작된 가속도계는 ±20g 의 측정범위와 10⁻⁵ ~10⁻⁶ g 의 sensitivity 를 가지고 약 100g 의 충격하중을 견딜 수 있었다.

실리콘 펜듈럼의 설계시 고려한 사항들이 제작과 시험을 통해 좋은 결과를 도출할 수 있게 되어 설계의 타당성이 입증되었다. 또한, flexure 연결부의 2 단계 에칭은 집중하중을 제거하는데 효과적인 것으로 확인하였으며, 이러한 공정은 다른 실리콘 구조물의 에칭공정에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1 K.S.Lee, S.F. Konovalov, USA Patent No. 6073490, "Servo Accelerometer", 1994
2. Salychev O.S., Inertial systems in navigation and geophysics", Moscow-BMSTU press, p352, 1998
3. E.D. Jacobs, USA Patent No. 3702073, "Accelerometer", 1969
4. S.F.Konovalov, A. Trunov, "Silicon accelerometer", Int. conference on Navigation and Gyroscopic system, 2001
5. 서재범, 심규민, 문홍기, 오문수, 이관섭, "실리콘 펜듈럼 서어보 가속도계의 제작 및 성능평가", 한국항공우주학회지, 제 25 권 제 5 호, p126, 1997.