

MEMS 자이로스코프 센서의 신뢰성 문제

최민석[†] · 좌성훈* · 김종석** · 정희문* · 송인섭** · 조용철**

(2004년 3월 4일 접수, 2004년 6월 18일 심사완료)

Reliability Assessment of MEMS Gyroscope Sensor

Min-Seog Choi, Sung-Hoon Choa, Jong-Seok Kim, Hee-Moon Jeong,
In-Seob Song and Yong-Chul Cho

Key Words : Gyroscope Sensor(자이로스코프 센서), Failure Mechanism(파괴 모드), Wafer Level Vacuum Packaging(웨이퍼 레벨 진공 패키징), Fatigue(피로), Shock(충격)

Abstract

Reliability of MEMS devices is receiving more attention as they are heading towards commercial production. In particular are the reliability and long-term stability of wafer level vacuum packaged MEMS gyroscope sensors subjected to cyclic mechanical stresses at high frequencies. In this study, we carried out several reliability tests such as environmental storage, fatigue, shock, and vibration, and we investigated the failure mechanisms of the anodically bonded vacuum gyroscope sensors. It was found that successful vacuum packaging could be achieved through reducing outgassing inside the cavity by deposition of titanium as well as by pre-baking process. The current gyroscope structure is found to be safe from fatigue failure for 1000 hours of operation test. The gyroscope sensor survives the drop and vibration tests without any damage, indicating robustness of the sensor. The reliability test results presented in this study demonstrate that MEMS gyroscope sensor is very close to commercialization.

1. 서 론

최근 microelectromechanical system (MEMS) 기술을 이용한 많은 제품들이 상용화 단계에 접근함에 따라 MEMS 제품들의 내구성 및 신뢰성 문제가 크게 대두되고 있다.⁽¹⁾ MEMS 제품을 상용화하는데 있어서 가장 큰 문제 중의 하나는 상용화까지 소요되는 시간이 길다는 것인데, 그 이유는 공정 기술 및 장비 개발에도 문제가 있지만, 신뢰성 문제의 해결이 어렵다는 것이다. MEMS의 신뢰성의 특징은 마크로한 영역에서 발생하는 고장과는 다른 양태를 보이고, 고장 메커니즘 자체가 복잡하여 이에 대한 이해가 현재까지는 부족한 실정이다.

특히 MEMS 관련된 재료 특성 및 공정에 대한 신뢰성 있는 데이터가 거의 없는 실정이며, 수치해석 등을 통하여 신뢰성 예측을 할 수 있는 기반이 부족하다.

MEMS 기술을 이용한 제품의 대표적인 것으로는 MEMS 자이로스코프 센서(gyroscope sensor)가 있다. 자이로스코프는 각속도를 검출하는 센서로서, 최근에는 캠코더의 손 떨림 보상용 센서, 차량 주행의 안정화 장치, 내비게이션 시스템 등에 활용하기 위하여 소형 및 저가격화에 유리한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 진동형 자이로스코프의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다.^(2,3) 실리콘 진동형 자이로스코프의 원리는 정전기적인 힘에 의해 구조물을 특정 방향으로 진동 시킨 상태에서 외부에서 검출하고자 하는 각회전(또는 각속도)이 주어지면, 진동의 직각 방향에 나타나는 코리올리 힘(Coriolis force)이 작용하게 된다. 이때 코리올리 힘에 의하여 작용된 진동을 관성체와 전극 사이의 정전 용량 변화를 통해 외부에서 가해진 각회전의

[†] 책임저자, 회원, 삼성종합기술원 MEMS Lab.
E-mail : minseog@samsung.com
TEL : (031)280-9457 FAX : (031)280-9473

* 회원, 삼성종합기술원 MEMS Lab.

** 삼성종합기술원 MEMS Lab.

정도를 측정하는 것이다. 진동형 자이로스코프의 감도를 향상시키기 위해서는 가진 방향의 고유진동수와 측정 방향의 고유진동수를 일치시키고 댐핑이 적어야 한다. 즉, 구조물이 동작하게 되면 구조물 주위의 공기 유동 및 점성에 의한 댐핑 효과, 또는 공기 감쇄 현상으로 인하여 구조물이 저항을 받게 되고, Q 값(또는 quality factor)이 감소하기 때문에 구조물을 진공 상태에서 작동시켜야 하며, 이를 위하여 고진공 패키징을 하여야 한다.⁽⁴⁾ 따라서 마이크로한 크기의 실리콘 구조물로는 매우 미약한 코리올리 힘을 검출하기가 어렵기 때문에 진공 상태에서 동작을 하여 큰 감도를 얻는다.

Q 값은 움직이는 기계 구조물의 외부 댐핑에 의한 에너지 손실의 척도이며, 움직이는 기계 구조물의 질량을 m , 강성을 k , 댐핑 상수를 c 라고 할 때, 다음과 같이 정의된다.

$$Q \cong \frac{\sqrt{mk}}{c} = \frac{1}{2\xi}$$

여기에서 ξ 는 무차원 댐핑 상수이다.

구조물의 질량과 스프링 강성이 일정하다고 가정하면 패키지 내부의 진공도 변화는 댐핑 상수 c 값을 변화시키고 결과적으로 Q 값을 변화시킨다. 즉, 댐핑 상수는 밀봉된 소자의 진공도와 밀접한 관계가 있으며, 결국 진공도의 변화는 Q 값과 밀접한 관계가 있다.⁽⁵⁾ 사용 환경 중에 Q 값 또는 주파수가 변하게 되면 자이로스코프의 성능 인자인 감도 및 정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 가령 접합 계면을 통하여 누설이 발생하면 패키징 내부의 체적이 매우 작기 때문에 패키지 내부의 압력이 크게 상승하여 Q 값이 저하된다. 또한 패키지 내부에서 outgassing 이 발생할 경우 궁극적으로 센서의 성능을 저하시킨다고 알려져 있다.^(6,7) 그러나 웨이퍼 레벨 진공 패키지 방법으로 제작된 MEMS 자이로스코프 센서의 경우 여러 환경 조건 및 시간의 경과에 따른 패키지 내부의 진공도 변화에 대한 신뢰성 문제에 대해서는 아직 해결되지 않은 문제로 남아있다. 한편 진공 패키지 외에 피로, 충격 및 진동에 대한 신뢰성 문제도 중요하다. 가령 진동형 자이로스코프의 MEMS 구조물은 수 kHz 로 진동하기 때문에 파괴 및 재료의 특성 저하가 발생할 가능성이 있다. 이러한 여러 신뢰성 문제 및 해결에 대해서는 아직 이해가 부족한 실정이며, 진공 패키징을 이용한 MEMS 자이로스코프 센서가 아직까지 양산화에 성공하지 못하는 이

유이기도 하다. 본 논문에서는 웨이퍼 레벨 진공 패키지의 파괴 메커니즘을 연구하고, 동시에 MEMS 자이로스코프 센서의 신뢰성을 향상시키기 위한 여러 기술을 제안하고자 한다.

2. 공정 및 시험 방법

2.1 공정순서

본 연구에서 사용된 자이로스코프 센서의 구조는 일명 'de-coupled' 진동형 MEMS 자이로스코프로서 비슷한 구조가 여러 저자에 의하여 보고된 바 있다.^(3,8) MEMS 자이로스코프의 구조물은 SOI(Silicon On Insulation) 웨이퍼를 이용하여 제작하였다. SOI 웨이퍼 전체 두께는 500 μm 이고 절연층(insulation layer)으로 사용된 산화막의 두께는 3 μm 이다. 산화막 위의 구조물층으로 사용된 실리콘층은 P 형의 <100> 방향이며, 두께가 40 μm , 비저항 값은 0.01~0.02 $\Omega\cdot\text{cm}$ 이다. 웨이퍼를 초기 세정하고 감광제(photo-resistor)를 이용하여 자이로스코프 구조물 패턴을 형성한 다음, 감광제가 탄화되지 않도록 충분히 베이킹(baking)을 한 뒤 ICP-RIE 를 이용하여 구조물 실리콘 막을 바닥의 희생층까지 수직하게 완전히 식각한다. 그 후에 싱(ashing) 장비를 이용하여 감광제를 제거하고 HF 용액에 담구어 자이로스코프의 구조물이 완전히 릴리즈(release) 되도록 한다.

자이로스코프 구조물의 패키징을 위한 상부 웨이퍼는 실리콘과 열팽창 계수 차이가 상대적으로 적은 Corning Pyrex 7740 유리(glass)를 사용하였으며, 두께는 350 μm 였다. 우선 자이로스코프 구조물을 보호하고 진공 상태로 만들기 위하여, Fig. 1 과 같이 안쪽에는 동공(cavity)을 형성시켰고 자이로스코프 구조물과 외부에 전기적 배선을 연결하기 위한 통로로 상판의 윗면에는 배선 구멍(via hole)을 형성시켰다. 유리 웨이퍼의 동공 및 배선 구멍은 샌드블라스팅(sandblasting) 공정을 이용하여 가공하였다. 이렇게 제작되어진 자이로스코프 구조물 웨이퍼와 상부 유리 웨이퍼를 정렬(aligned)한 후 진공 챔버 내에 안착하였다. 챔버 내의 진공도를 5×10^{-5} Torr 로 한 후 양극 접합(anodic bonding)을 실시하였다. 양극 접합을 위하여 웨이퍼에 온도를 올리면서 전압을 가하였다. 접합이 완료된 후에는 웨이퍼를 진공 챔버에서 꺼내어, 유리 웨이퍼 위에 알루미늄(Al)을 증착하여 전기적 배선을 형성하였다. 접합 후의 동공 내의 체적은 대략 $7 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ 이었다. 접합된 웨이퍼는 다이싱 공정을 통하

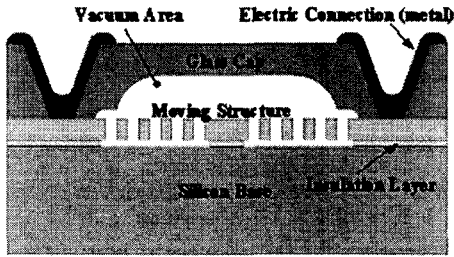


Fig. 1 Cross section view of vacuum packaged MEMS gyroscope chip

여 크기가 $2.6 \times 2.6 \text{ mm}$ 크기의 각각의 개별 칩으로 분리하였다. 이하 본 논문에서는 웨이퍼에서 분리된 개별 자이로스코프 소자를 '자이로 칩'으로 칭하였다. 자이로 칩의 Q 값은 진공 구조물의 진폭-주파수 스펙트럼을 이용하여 측정하였다. 진공 패키징된 자이로 칩의 가진 방향의 구조물의 공진 주파수는 8 kHz 이었으며, Q 값은 평균 3000 이었다.

2.2 신뢰성 시험

신뢰성 시험 및 요구 조건은 적용 제품에 따라 매우 다르다. 가령 캐코더와 같은 일반 전자제품의 경우 신뢰성 시험 항목은 기계적 스트레스(충격과 진동), 환경적인 스트레스(온도 및 습도, 열충격)와 동작 수명에 대한 것들이 있다. 본 연구에서는 위와 같은 신뢰성 스트레스 시험을 통하여 MEMS 자이로스코프 센서의 신뢰성 및 내구성을 검증하였다.

2.3 시험 방법

진공 패키징된 자이로 칩의 진공도는 Q 값 외에 누설량 및 동공 내의 outgassing 을 측정하여 평가하였다. 누설량의 측정은 미세소자의 누설시험에 주로 사용되는 helium leak detector 를 사용하였으며, 미세소자의 밀봉 특성을 평가하는 규격인 MIL-STD-750D 규격을 기준으로 평가하였다. 우선 자이로 칩을 압력 챔버에 위치시킨 후 칩 외부의 오염물질의 영향을 최소화하기 위하여 헬륨을 일정 기간 흘린다. 그 다음 압력 챔버 내의 압력을 4 bar 까지 증가시켜 4 시간 동안 상온에서 방치한다. 방치 후 자이로 칩을 꺼내어 Veeco MS50 mass spectrometer 를 이용하여 칩에서 누설되는 헬륨의 누설량을 측정하였다. 상용된 누설측정 장비의 측정 한계는 $3 \times 10^{-11} \text{ atm-cc/sec}$ (또는 $1.12 \times 10^{-11} \text{ atm-cc/sec air}$) 이었다.

진공 패키징된 자이로 칩 내부의 outgassing 분석은 Temperature Programmed Desorption - Mass Spectrometry(TPD-MS)를 사용하였다. TPD-MS 분석

의 원리는 밀폐된 챔버 내의 특수 전용 지그를 설치한 후, 실온에서 샘플을 파괴하여 방출된 기체를 연속적으로 질량분석기에 통과시켜 기체의 질량수마다 농도 변화를 시간 함수로 분석하는 기법으로, 가스 발생량의 정량 분석이 가능하였다. 실제 측정은 동공 내에서 발생하는 outgassing 의 양이 너무 작기 때문에 챔버 내에 4 개의 샘플을 동시에 넣고 실온에서 파괴하여 outgassing 량을 측정하였다.

3. 시험 결과

3.1 진공패키지의 파괴 및 개선

진동형 MEMS 자이로스코프 센서에서 Q 값은 패키지의 진공도에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 패키지의 진공도를 측정하는 주요한 인자이다. Q 값의 감소는 센서의 성능을 감소시키거나, 궁극적으로는 센서의 고장을 초래한다. Fig. 2 는 한 웨이퍼에서 랜덤하게 샘플링한 10 개의 자이로 칩에 대한 고온보존 환경시험 (85°C) 후의 Q 값의 평균 변화를 나타낸다. 자이로 칩을 신뢰성 챔버에 넣고 85°C 에서 120 시간 보존 시킨 후 챔버에서 샘플을 빼어서 측정한 결과 Q 값이 평균 35% 정도 감소하였음을 알 수 있다. 동일 샘플을 다시 85°C 에서 120 시간 고온보존 시험한 결과 Q 값이 초기 대비 약 47 % 감소가 되었다. 즉 240 시간의 고온보존 시험을 할 경우 Q 값은 초기 대비 절반 정도로 감소함을 알 수 있다. 고온보존 시험을 120 시간 더 진행한 경우, 즉 전체 360 시간 한 경우 Q 값이 거의 평균 1100 가 됨을 알 수 있다. 고온보존 시험이 진행되면서 Q 값의 감소가 다소 완화되는 경향이 있다. 그러나 보통 환경보존 신뢰성 시험의 규격이 500 시간 이상인 점을 감안하면 현재의 자이로 칩은 360 시간 이상에서 이미 Q 값이 과도하게 감소함에 따라 고온보존 환경 신뢰성 시험을 통과할 수 없음을 의미한다.

진술하였듯이 환경시험 후에 Q 값이 감소하는 것은 자이로 칩 내부의 진공도가 변하였음을 의미한다. 즉 동공 내부의 압력이 초기 압력보다 높아져서 공기의 뎀핑이 증가하고 이에 따라 Q 값이 감소한 것이다. 동공 내부의 압력이 높아진 원인은 크게 동공 내부에서 발생한 outgassing 과 누설에 의한 영향으로 나눌 수가 있다. 누설 현상은 접합이 완료된 후에 접합 계면의 기공(hole)이나 마이크로 크랙, 또는 재질 내부의 결함을 통하여 발생된다. Outgassing 은 접합 공정 중에, 혹은 접합

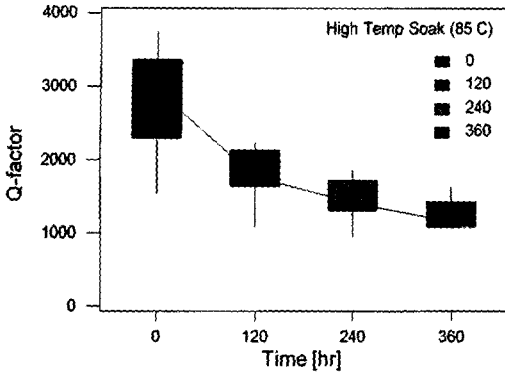


Fig. 2 Variation of Q-factor for a total of 10 gyroscope chips during high temperature storage test (85°C, 0% RH)

후에 동공 내에서 발생하는 가스를 의미한다. 접합 시 높은 전압이 가해지게 되면 유리 내부 및 접합 계면으로부터 방출된 산소 이온 및 패키지 내부 표면의 오염물 또는 재료 표면으로부터 자체 함유된 가스가 동공 내부에서 온도가 증가함에 따라 계속적으로 방출(outgassing) 되는 것을 의미한다.

환경시험 후에 누설이 발생되었는지를 파악하기 위하여 누설시험을 수행하였다. Table 1은 동일 웨이퍼에서 나온 10 개의 자이로 칩에 대한 고온보존 시험 전/후의 Helium leak detector 에 의해 검출된 누설량을 나타내고 있다. 시험 전 누설량은 평균 1.53×10^{-9} atm-cc/sec 이며, 고온보존 시험 한 샘플의 경우 누설량이 시험 전 보다 약 20% 정도 증가함을 알 수 있다. 그러나 측정된 누설량으로부터 실제 동공 내의 압력의 변화를 이론적으로 계산하였을 때 동공 내의 압력이 1 시간 이내에 대기압이 된다는 것을 알 수 있었다.⁽⁹⁾ 이것은 현실적으로 불가능한 현상이다. 이미 여러 논문들에서 언급을 하였듯이 본 연구에서 사용된 자이로스코프 동공의 부피(7×10^{-4} cm³)는 helium leak 시험을 하기에는 너무 작은 부피임을 알 수 있었다.^(10,11) 비록 누설시험기의 측정 한계가 3×10^{-11} atm-cc/sec 이더라도, background effect 등⁽¹²⁾을 고려하면 본 연구에서 측정된 누설값은 신뢰성이 없다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 helium leak detector 로서는 누설이 발생되었는지를 확인할 수는 없었다.

다음으로 환경시험 후에 동공 내에 outgassing 이 발생되었는지를 조사하였다. 동공 내의 outgassing 분석은 TPD-MS 를 이용하여 측정하였으며, 기존 사용된 웨이퍼에서 자이로 칩을 선별하였다. 그 결과가 Table 2 에 나타나 있다. 동공 내의 존재하

Table 1 Leakage rate before/after high temperature storage test (85°C, 0% RH) of 10 gyroscope chips

Before storage test		After storage test (85°C, 0%RH, 120hr)	
SPL No	Leak rate x10 ⁹ (atm-cc/s air)	SPL No	Leak rate x10 ⁹ (atm-cc/s air)
1	2.06	11	2.06
2	1.72	12	2.06
3	1.55	13	1.91
4	1.72	14	1.91
5	1.64	15	1.92
6	1.29	16	1.92
7	1.38	17	1.76
8	1.29	18	1.75
9	1.29	19	1.70
10	1.38	20	1.68
Average	1.53	Average	1.85

는 가스의 성분은 주로 H₂O, N₂, O₂ 과 Ar 이었다. O₂ 의 발생은 이미 기존 연구들에서 보고되고 있는데, 즉 양극 접합을 이용한 진공 패키징의 경우, 접합 시 높은 전압이 가해지게 되면 유리 내부 및 접합 계면으로부터 방출된 산소(oxygen) 이온이 동공 내에 잔류하게 된다.⁽¹³⁾ 또한 매우 많은 양의 H₂O 와 N₂ 가스가 발생하였는데, 이는 유리 와 실리콘 웨이퍼로부터 발생하였거나, 접합 계면으로부터 발생된 것으로 추측된다. Table 2에서 보듯이 120 시간의 고온시험 후에 동공 내의 가스의 발생이 약 10% 정도 상승했음을 알 수 있다. 따라서 고온시험 후에 가스의 증가는 동공 내의 압력의 증가를 초래하였으며, 그 결과 Q 값이 감소하였다고 판단된다. 고온시험 후의 가스의 증가는 두 가지 메커니즘에 의하여 초래된다. 즉, 실리콘과 유리 웨이퍼 표면에 흡착되었던 오염 물질 또는 오염 가스 성분이 고온시험 중에 탈착되었거나, 또는 실리콘 또는 유리 웨이퍼 속에 존재하는 가스가 외부 표면으로 확산(out-diffusion)되어 발생된 현상으로 판단된다.⁽¹⁴⁾

자이로 칩에서 사용된 웨이퍼, 즉 SOI 와 유리 웨이퍼 자체에서 어느 정도의 outgassing 이 발생하는지를 알기 위하여 실리콘 및 유리 웨이퍼의 outgassing 을 TPD-MS 를 이용하여 측정하였으며 그 결과가 Table 3 에 나타나 있다. 상온에서 600°C 까지 온도를 증가시키면서 웨이퍼에서 발생하는 outgassing 의 양을 측정하였다. 웨이퍼에서 발생된 outgassing 의 성분은 주로 H₂O 이었으며, CO₂, C₃H₅ 및 기타 유기 오염 물질이었다. SOI 웨이퍼에 비하여 유리 웨이퍼가 약 10 배 정도 outgassing 이 많았으며, 따라서 유리 웨이퍼가 동공 내의 outgassing 의 주요 원인을 알 수 있었다. 유리 웨이퍼에서는 H₂O 가 매우 많이 발생하였는데,

Table 2 Amounts of gas evolution inside the cavity measured with TPD-MS before/after high temperature storage test

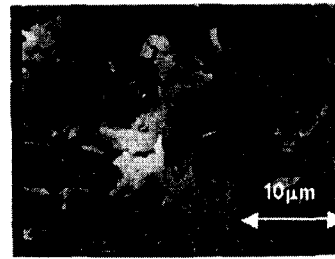
Gas species	Amount of gas evolution (ul)	
	Before storage Test	After storage Test (85 °C, 120 hr)
H ₂ O	2.814457	2.973787
N ₂	0.042052	0.163977
O ₂	0.000012	0.008141
Ar	0.001080	0.001945
Total	2.857602	3.147849
Average per one sample	0.714401	0.786962

Table 3 Amounts of gas evolution for used SOI wafer, glass wafer, and glass wafer after fabricated with sandblaster

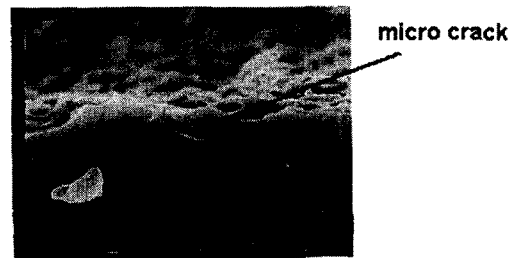
Gas species	Amount of gas evolution (μl/cm ²)		
	SOI wafer	Glass wafer	Glass wafer after sanding
H ₂ O	0.01760	0.28156	1.02051
C ₂ H ₆ *	0.01070	0.00528	0.02453
CO ₂	0.00423	0.02522	0.01636
C ₄ H ₈ O*	0.00233	0.00049	0.03595
Benzene	0.00045	0.00030	0.00051
Organic gas	0.00100	0.00055	0.00125
Total	0.03631	0.31340	1.09911

특히 웨이퍼를 샌드블라스트 공정을 사용하여 가공한 경우, 가공 전 보다 약 2.5 배의 outgassing 량이 증가했음을 알 수 있다. 이는 가공 과정 중에 감광제의 찌꺼기나 세정 공정 중의 수분 등이 완전히 제거되지 않고 계속 남아 있어 outgassing의 원인이 됨을 알 수 있었다.⁽¹⁵⁾ 유리 웨이퍼를 샌딩 공정을 통하여 가공하였을 경우 Fig. 3에 나타난 것과 같이 유리 표면에 많은 손상이 발생하고, 유리 표면에 유리 부스러기 및 마이크로한 크랙이 발생할 가능성이 있다. 따라서 마이크로 크랙 사이에 H₂O 및 기타 오염 물질이 침투하여 잔류할 수 있으며, 또한 유리 표면이 거칠어짐에 따라 표면적이 넓어짐으로써 표면에 흡착할 수 있는 가스의 양이 증가되어, 이에 따라 outgassing 양이 증가된다고 생각된다.

양극접합 후 동공 내에서 발생하는 outgassing을 줄이기 위하여 접합 공정 전에 웨이퍼를 pre-baking 하여 기존의 outgassing을 최대한 발생시킨 후 접합하는 것이 바람직하다.⁽¹⁶⁾ Pre-baking 시에 웨이퍼로부터 가능한 많은 양의 outgassing을 발생시키도록 하기 위해서는 적절한 pre-baking 온도와 시간의 선택이 중요하다. 따라서 각 웨이퍼에서 온도가 증가함에 따라 outgassing이 발생하는 경향을 측정하여 보았으며 그 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 유리 웨이퍼의 경우 H₂O의 발생은 초기에



(a)



(b)

Fig. 3 SEM micrograph of glass wafer for (a) magnified view of glass wall, (b) sectional view of glass wall (with micro cracks)

점진적으로 증가하다가 150°C 부근에서 최대가 되며, 그 후 500°C까지는 서서히 감소한다. 샌드블라스트 공정을 거친 유리 웨이퍼의 경우에 H₂O의 발생은 초기 가열 시부터 발생량이 급격히 증가하기 시작하여, 온도가 약 150°C 정도에서 발생량이 최대가 된다. 그 후 발생량은 감소하기 시작하나, 400°C 이상에서도 많은 양의 H₂O가 발생되고 있다. 비록 본 논문에서는 그 결과를 포함시키지 않았지만, C₃H₈와 같은 다른 가스들의 발생 경향도 H₂O의 발생 경향과 비슷하다. 그러나 600°C에 도달할 때까지 어느 정도의 가스가 발생되고 있음을 알 수 있었다. 결론적으로 pre-baking 시에 outgassing을 최대화하기 위해서는 pre-baking의 온도를 400°C와 500°C 사이에서 행하는 것이 좋다. 물론 온도를 500°C 이상으로 높여서 pre-baking할 수도 있으나, 유리의 strain point가 510°C이며 annealing point도 560°C인 점을 감안하면, 500°C 이상에서 pre-baking을 하는 것은 유리 미세 조직의 변화를 발생시킬 가능성이 있으므로 가급적 피해야 한다. 동공 내의 존재하는 가스를 줄이는 효과적인 또 다른 방법은 게터(getter) 물질로서 동공 내부에 금속 코팅을 하는 것이며,

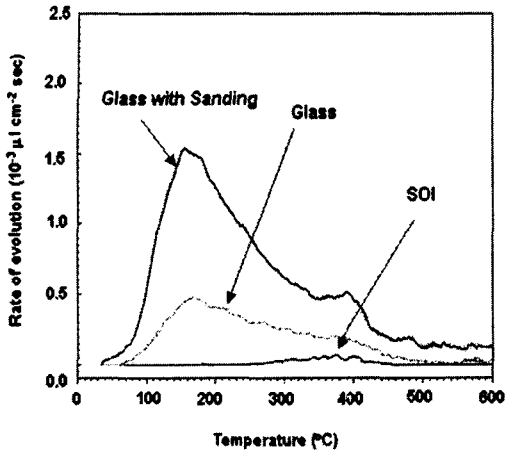


Fig. 4 Evolution of H₂O with increasing temperatures for SOI, glass, and glass wafer with sandblasting process

Table 4 Amounts of gas evolution inside the cavity measured with TPD-MS after applying Ti/Au coating layer on the surface of glass wafer

Gas species	Amount of gas evolution (ul)
H ₂ O	0.671802
N ₂	0.095802
O ₂	0.000506
Ar	0.001243
Total	0.767000
Average per one sample	0.191750

이미 여러 저자들에 의하여 시도되어진 바 있다.^(17,18) 게터 물질로서 금속 코팅의 사용은 두 가지 효과가 있다. 첫째는 금속 코팅막이 원자의 확산 방지막 역할을 하여 외부로부터 가스가 유입되는 것을 방지시킨다. 둘째는 티타늄(titanium)과 같은 금속은 일정 온도에서 활성화되어 가스를 흡착할 수 있는 능력이 있다. 따라서 이러한 금속 코팅막은 본딩 공정 중에 발생된 outgassing 및 동공 내에 존재하는 가스들을 감소시킬 수 있다고 판단된다. Table 4 는 동공 내부의 유리 웨이퍼 표면에 Ti/Au 코팅을 한 후 outgassing 의 양을 측정 한 결과로서 outgassing 의 양이 큰 폭으로 감소하였음을 알 수 있다. 실리콘 웨이퍼 및 유리 웨이퍼를 400°C 에서 1 시간 동안 pre-baking 시킨 후, 동공 내의 유리 표면에 Ti/Au 코팅막을 형성하여 자이로 칩을 제작하여 500 시간 동안 고온보전 시험을 실시하였으며 그 결과가 Fig. 5 에 나타나 있다. 고온보전 시험 전/후의 Q 값의 변화가 매우

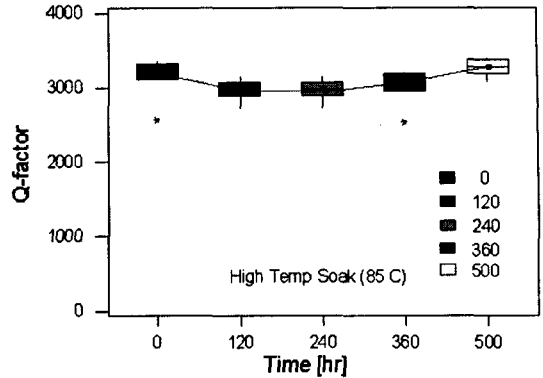


Fig. 5 Variation of Q-factor during high temperature storage test (85 °C) after improvement and re-fabrication of another set of gyroscope chips

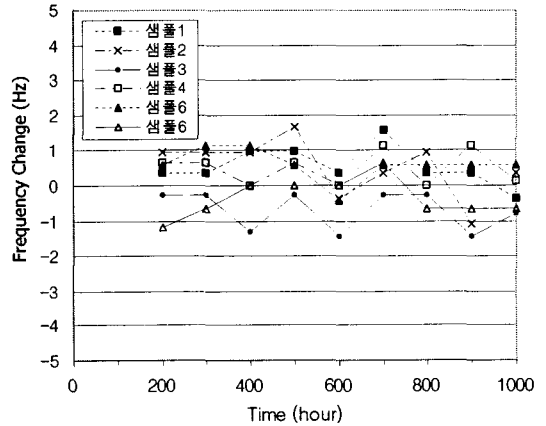


Fig. 6 Ratio of resonant frequency changes of gyroscope comb structure for 1000 hours operation test

미미하여 자이로 칩의 진공도 유지가 매우 향상되었음을 알 수 있었다. 또한 500 시간의 고온고습보전 시험(60°C, 95% RH) 및 24 사이클의 열충격 또는 온도사이클 시험(- 40°C (30 min.) ↔ 85°C (30 min.))을 수행한 결과 Q 값의 변화는 매우 미미함을 알 수 있었다.

3.2 피로 파괴

MEMS 자이로 센서의 또 다른 파괴모드는 피로 파괴이다. 피로 파괴는 항복응력 이하의 응력이 가하여졌을 때 주로 발생되며 벌크(bulk) 재료의 피로 파괴 특성에 대해서는 잘 알려져 있지만, MEMS 분야에서는 현상에 대한 연구가 미미한 실정이다. 실리콘 재료는 일반적으로 피로 파괴에 덜 취약한 것으로 알려져 있으나 박막 실리콘의 경우, 상온 대기 상태에서 주기적 하중이 가하여

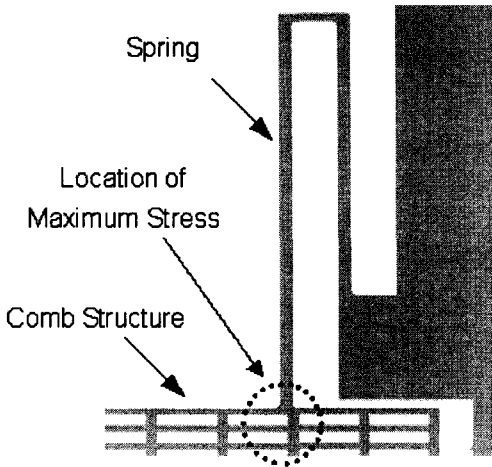


Fig. 7 Schematic drawing of spring and comb structure in partial view of MEMS gyroscope

졌을 때 피로강도가 감소하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 본 연구에서는 MEMS 자이로 센서 구조물인 콤 구조물의 피로 파괴 평가를 해석 하기 위하여, 자이로 칩을 PCB 에 부착한 후 패키징을 완료한 6 개의 자이로스코프 센서를 제작하여 동작수명 시험을 수행하였다. 자이로 콤을 공진 주파수인 8 kHz 에서 진동 시킨 후 1000 시간 동안 동작수명 시험을 수행하였으며, 이는 콤 구조물이 약 2.8×10^{10} 번 진동하는 것에 해당한다. 피로 파괴의 발생 여부는 시험 시 주기적으로 자이로 센서의 공진 주파수의 변화를 측정함으로써 판단하였다. 시험 결과 1000 시간의 동작수명 시험 중이나 시험 후에 공진 주파수의 변화가 2 Hz 미만으로 측정오차 이하이므로 주파수의 변화는 없음을 알 수 있었으며 그 결과가 Fig. 6 에 나타나 있다.

동작수명 시험에 대한 결과를 검증을 위하여 마이크로 자이로스코프의 동작 시 콤 구조물에 발생하는 최대 응력을 유한요소법을 이용하여 구하였다. 마이크로 자이로스코프의 동작은 자이로스코프 구조물이 구동 스프링에 연결 되어 일정한 진폭으로 선형 왕복 운동을 하게 되며, 구조물의 최대 응력은 Fig. 7 과 같이 자이로스코프 구조물의 변위가 최대일 때 구동 스프링 부분에서 발생하게 된다. 피로 파괴 평가를 위한 최대 응력을 계산하기 위해, Fig. 8 과 같이 구동 스프링을 포함하는 국소 모델을 사용하여 최대 스프링 변위 경계 조건이 3, 6, 9 μm 로 각각 주어졌을 경우에 대해 해석을 수행 하였다. 해석의 정확성을 위해 육면체 요소를 사용하여 요소 생성을 하였다. 해석 수행 시, 각 성분 별 응력, 주응력 그리고 등가 응력에 대한 응력 분포를 구하였으며 각 주어진 최대 진

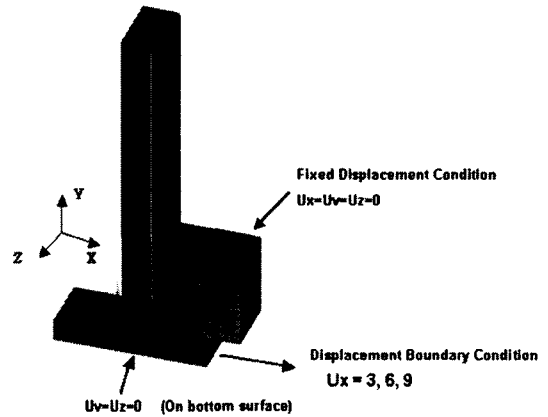


Fig. 8. Schematic drawing of displacement boundary condition and coordinate system for stress analysis

폭 조건에 대한 응력값을 구하였다. 해석 결과, 최소 압축 응력은 구동부 스프링 사이의 연결부에서 최대 변위 9 μm 인 경우 -540 MPa 로 나왔으며, 최대 인장 응력은 구동부 스프링과 자이로스코프 구조물의 연결 부위에서 동일 변위에 대해 524 MPa 로 계산이 되었다. 계산된 최대 응력값과 동작 수명을 Muhlstein 등⁽²⁰⁾에 의하여 대기 상태에서 측정된 단결정 실리콘 재질에 대한 S-N 곡선 또는 피로응력-수명곡선과 비교하여 보면 본 연구의 최대 응력은 실리콘 재질의 피로 한계(fatigue limit)인 2 GPa 보다 낮으며, 또한 파괴 응력인 4 GPa 보다 매우 낮다. 따라서 자이로 구조물은 1000 시간의 구동에 피로 파괴 현상으로부터 안전하다고 할 수 있다. 한편 박막의 경우 피로 수명에 대한 습기 및 대기 상태의 고려가 중요하다. Brown 등⁽²¹⁾은 실리콘 박막의 피로 파괴는 습기 환경에서 실리콘 표면에 발생한 산화막으로부터 크랙이 전파되어 발생된다고 보고하고 있다. 최근에 Muhlstein 등⁽²²⁾은 대기 상태 보다는 진공 상태에서 크랙의 전파 속도가 느려지게 되며 따라서 피로 수명도 길어지게 된다는 것을 실험적으로 증명하였다. 결론적으로 수분 및 O_2 의 양이 매우 적은 진공 상태에서 동작하는 현재의 자이로 구조물은 피로 파괴 현상으로부터 매우 안전하다고 할 수 있다.

3.3 충격 및 진동

MEMS 소자에 대한 진동 및 충격의 신뢰성 문제에 대해서는 그 동안 많은 연구가 수행되었다.^(23,24) 연구 결과에 의하면 MEMS 소자는 매우 취약해 보이지만, MEMS 구조물 자체의 질량이 매

우 작기 때문에 충격에도 매우 강건하며, 진동에 의하여 가해진 응력으로 인한 재질의 파괴 현상도 미미하다고 알려져 있다. 자이로스코프 센서의 충격에 대한 강건성을 관찰하기 위하여 자유 낙하 시험 및 진동 시험을 각각 수행하였다.

자유 낙하 시험에서는 총 10 개의 자이로 칩을 1 m 높이에서 일반 경질의 바닥에 낙하 시킨 결과, 구조물의 주파수 변화가 거의 발생되지 않았다. 다음에는 개별 자이로 칩을 ASIC 칩과 함께 와이 어 본딩을 이용하여 PCB 보드에 연결한 후 DIP (dual in-line) 메탈 패키징한 자이로스코프 센서에 대하여 충격 시험을 실시 하였으며, 센서의 주파수 변화 및 육안 관찰을 통하여 신뢰성을 검증하였다. 기존 캠코더의 신뢰성 시험 기준에 따라 자이로 센서를 캠코더에 장착한 후, 높이 20cm 에서 각 면당 3 회씩 총 18 회 낙하를 실시하였으며, 시험한 4 개의 샘플로부터 센서의 감도 및 위상 지연 등의 성능을 나타내는 인자들을 측정된 결과, 시험 전후 성능에 큰 차이가 없는 것으로 확인되었으며 변화량은 시험오차 범위 미만임을 확인하였다. 가령 감도의 경우는 성능 규격이 시험 후 $\pm 10\%$ 미만이었으나, 실제 시험 후 감도의 변화량은 $\pm 2\%$ 미만이었다.

진동 시험은 최대 진폭이 1.5 mm 인 일정 진폭을 가하고 10~55 Hz 의 주파수로 1 분 이내에 가변 하면서, X,Y,Z 축의 3 방향으로 40 분씩 2 시간 동안 실시한 후 시험 전후의 자이로 칩의 주파수를 측정하여 보았다. 시험 결과 주파수의 변화는 1% 미만으로 매우 미미하였다. 자이로 센서의 경우 진동 시험은 진동판에 양면 테이프를 이용하여 샘플을 고정시키고 동일한 방법으로 진동 시험을 하였으며, 시험 후 센서의 성능을 측정된 결과 10% 미만의 변화량이 관찰되었으며 이는 센서의 진동 신뢰성 기준을 만족하는 것이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 양극 접합을 이용한 진공 패키지 된 MEMS 자이로스코프 센서의 신뢰성 시험을 수행하였으며, 고장 모드 및 그 해결 방안에 대한 연구를 수행하였다. 고온보전 시험 후에 발생한 Q 값의 저하는 주로 동공 내의 outgassing 에 의하여 발생된다. 물론 누설에 의한 영향도 있을 것으로 판단되나 동공의 체적이 너무 작기 때문에 분석이 불가능하였다. 동공 내에서 발생한 outgassing 의 성분은 주로 H₂O, N₂, O₂, 및 Ar 이었다. 유리 웨이퍼는 SOI 웨이퍼 보다 10 배의 outgassing 량이 많

았으며, 특히 샌드블라스트 공정을 사용하여 가공한 경우, outgassing 양이 매우 증가한다. 이는 웨이퍼 가공 및 세정 공정이 outgassing 발생에 많은 영향을 미침을 의미한다. Outgassing 제거를 위해서는 접합 전에 웨이퍼를 pre-baking 하는 과정이 필요하며, pre-baking 시 outgassing 의 발생량은 온도 및 웨이퍼의 종류에 따라 경향이 약간씩 다르다. 웨이퍼의 outgassing 발생을 최대한으로 하기 위한 최적의 pre-baking 조건은 실리콘과 유리 웨이퍼를 400°C 와 500°C 사이의 온도에서 pre-baking 하는 것이다. 게터 물질로서 Ti/Au 코팅을 한 경우 동공 내의 outgassing 이 매우 감소함을 알 수 있었다. Pre-baking 과 Ti/Au 코팅을 동시에 적용한 결과 환경시험 후에도 Q 값이 감소하지 않았으며, 따라서 자이로 칩의 진공도가 잘 유지되고 있음을 알 수 있었다. 본 연구의 자이로 구조물은 1000 시간의 동작수명 시험 후에도 피로 파괴가 발생하지 않았다. 또한 충격 및 진동 시험에도 어떤 파손이나 성능의 저하가 발견되지 않았다. 본 신뢰성 시험의 결과로 MEMS 자이로스코프 소자의 내구성 또는 강건성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구의 일부는 과학기술부 국가자정 연구실 사업의 “마이크로 관성계측 시스템 기술개발” 과제의 지원으로 연구가 수행되었음을 알려드립니다. 또한 샘플 제작에 많은 도움을 주신 삼성종합기술원 MEMS lab의 여러분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) Müller-Fiedler, R., Wanger, U., Bernhard, W., 2002, “Reliability of MEMS-a Methodical Approach”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, pp. 1771~1776.
- (2) Putty, M., Najafi, K., 1994, “A Micromachined Vibrating Ring Gyroscope,” In: Technical Digest, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, USA, pp. 213~220.
- (3) Hwang, K. H., Lee, K. H., Park, G. J., Lee, B. L., Cho, Y. C., Lee, S. H., 2002, “Robust Design of the Vibratory Gyroscope with Unbalanced Inner Torsion Gimbal Using Axiomatic Design,” *Trans. of KSME (A)*, Vol. 26, No. 2, pp. 914~923.
- (4) Kobayashi, S., Hara, T., Oguchi, T., Asaji, Y., Yaji, K., Ohwada, K., 1999, “Double-Frame Silicon Gyroscope Packaged Under Low Pressure by Wafer Bonding,” In: *Transducers '99*, Sendai, Japan, pp. 910~913.
- (5) Corman, T., Enoksson, P., Stemme, G., 1997, “Gas

- Damping of Electrostatically Excited Resonators," *Sensors and Actuators*, Vol. A 61, pp. 249~255.
- (6) Esashi, M., Ura, N., Matsumoto, Y., 1992, "Anodic Bonding for Integrated Capacitive Sensors," In: *Proc. Micro Electro Mechanical Systems '92*, pp. 43~48.
- (7) Mack, S., Baumann, H., Gösele, U., 1996, "Gas Development at the Interface of Directly Bonded Silicon Wafers: Investigation on Silicon-Based Pressure Sensors," *Sensors and Actuators*, Vol. A56, pp. 237~277.
- (8) Lee, B. L., Lee, S. W., Jung, K. D., Choi, J. H., Chung, T. R., and Cho, Y. C., 2001, "A De-Couple Vibratory Gyroscope Using a Mixed Micro-Machining Technology," In: *Proc. 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, pp. 3412~3416.
- (9) Greenhouse, H., 1999, *Hermeticity of Electronic Packages*, William Andrew Publishing, New York.
- (10) Nese, M., Bernstein, R. W., Johansen, I. R., Spooen, R., 1996, "New Method for Testing Hermeticity of Silicon Sensor Structures," *Sensors and Actuators*, Vol. A53, pp.349~352.
- (11) Jourdain, A., De Moor, P., Pamidighantam, S., Tilmans, H. A. C., 2002, "Investigation of the Hermeticity of BCB-Sealed Cavities for Hours (RF-) MEMS Devices," *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 677~680.
- (12) Tao, Y., Malshe, A. P., Brown, W. D., 2004, "Selective Bonding and Encapsulation for Wafer-Level Vacuum Packaging of MEMS and Related Micro System," *Microelectronics Reliability*, Vol. 44, pp. 251~258
- (13) Mack, S., Baumann, H., Gösele, U., Werner, H., Schlögl, R., 1997, "Analysis of Bonding-Related Gas Enclosure in Micromachined Cavities Sealed by Silicon Wafer Bonding," *J. Electrochem.*, Vol. 144, No. 3, pp. 1106~1110.
- (14) Cheng, Y. T., Hsu, W. T., Najafi, K., Nguyen, C. T. C., Lin, L., 2002, "Vacuum Packaging Technology Using Localized Aluminum/Silicon-to-Glass Bonding," *J. of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, No. 50, pp. 556~565.
- (15) Gendt, S. D., Snee, I., Cornelissen, I., Lux, M., Vos, R., Mertens, P. W., Knotter, D. M., Heyns, M. M., 1998, "A Novel Resist and Post-etch Residue Removal Process Using Ozonated Chemistries," In: *1998 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, pp. 168~169.
- (16) Cheng, Y. T., Hsu, W. T., Najafi, K., Nguyen, C. T. C., Lin, L., 2002, "Vacuum Packaging Technology Using Localized Aluminum/Silicon-to-Glass Bonding," *J. of Microelectromechanical systems*, Vol. 11, No. 50, pp. 556~565.
- (17) Minami, K., Moriuchi, T., Esashi, M., 1995, "Cavity Pressure Control for Critical Damping of Packaged Micro Mechanical Devices," In: *Transducer '95 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, Stockholm, Sweden, June, pp. 240~243.
- (18) Benvenuti, C., Chiggiato, P., Cicoira, F., L'Aminot, Y., 1998, "Nonevaporable Getter Films for Ultrahigh Vacuum Applications," *J. Vac. Sci. Technol*, Vol. 16, No. 1, pp. 148~154.
- (19) Muhlstein, C. L., Brown, S. B., Ritchie, R. O., 2001, "High-Cycle Fatigue and Durability of Polycrystalline Silicon Thin Films in Ambient Air. Sensors and Actuator," Vol. A 94, pp. 177~188.
- (20) Muhlstein, C. L., Brown, S. B., Ritchie, R. O., 2001, "High-Cycle Fatigue of Single-Crystal Silicon Thin Films," *J. of Microelectromechanical Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 593~600.
- (21) Brown, S. B., Van Arsdell, W., Muhlstein, C. L., 1997, "Material Reliability in MEMS Devices," In: *Proc. of Transducer '97, Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, USA, April, pp. 591~593.
- (22) Muhlstein, C. L., Howe, R. T., Ritchie, R. O., 2004, "Fatigue of Polycrystalline Silicon for Microelectromechanical System Applications: Crack Growth and Stability Under Resonant Loading Conditions," *Mechanics of Materials*, Vol. 36, pp. 13~33.
- (23) Tanner, D. M., Walraven, J. A., Helgesen, K. S., Irwin, L.W., 2000, "MEMS Reliability in a Vibration Environment," In: *Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium*, San Jose, CA, April, pp. 139~145.
- (24) Wagner, U., Franz, J., Schweiker, M., Bernhard, W., Müller-Fiedler, R., Michel, B., Paul, O., 2001, "Mechanical Reliability of MEMS-Structures Under Shock Load. *Microelectronics Reliability*," Vol. 41, pp. 1657~1662