

패키징으로 인한 응력이 MEMS 소자에 미치는 영향 분석 및 개선

좌성훈[#], 조용철^{*}, 이문철^{**}

Effects of Package Induced Stress on MEMS Device and Its Improvements

Sung-Hoon Choa[#], Yong Chul Cho^{*}, Moon Chul Lee^{**}

ABSTRACT

In MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), packaging induced stress or stress induced structure deformation becomes increasing concerns since it directly affects the performance of the device. In the decoupled vibratory MEMS gyroscope, the main factor that determines the yield rate is the frequency difference between the sensing and driving modes. The gyroscope, packaged using the anodic bonding at the wafer level and EMC (epoxy molding compound) molding, has a deformation of MEMS structure caused by thermal expansion mismatch. This effect results in large distribution in the frequency difference, and thereby a lower yield rate. To improve the yield rate we propose a packaged SiOG (Silicon On Glass) process technology. It uses a silicon wafer and two glass wafers to minimize the wafer warpage. Thus the warpage of the wafer is greatly reduced and the frequency difference is more uniformly distributed. In addition, in order to increase robustness of the structure against deformation caused by EMC molding, a "crab-leg" type spring is replaced with a semi-folded spring. The results show that the frequency shift is greatly reduced after applying the semi-folded spring. Therefore we can achieve a more robust vibratory MEMS gyroscope with a higher yield rate.

Key Words : Package induced stress (패키지 응력), Vibratory MEMS gyroscope (진동형 맵스 자이로스코프), SiOG process (SiOG 공정), Wafer bowing (웨이퍼 휨)

1. 서론

MEMS 기술에서 패키징은 MEMS 소자의 가격, 크기 및 신뢰성을 결정하는 매우 중요한 인자로서, MEMS 소자의 상업화를 달성하기 위한 핵심 기술이다.¹ 그러나 패키징의 기술은 회사의 기밀로 취급되어 왔고, 아직까지 MEMS 패키징의 신뢰성

및 강건성에 대한 연구가 많이 수행되고 있지 않은 상태이다. MEMS 패키징은 기존의 반도체 패키징과는 많은 부분에서 차이가 있다. 즉 MEMS 소자의 경우 다이싱(dicing) 공정이나 와이어 본딩 공정 중에 구동하는 MEMS 구조물이 쉽게 파괴될 수 있으며, 또한 표준화된 반도체 패키징에서는 잘 사용하지 않는 진공 패키징을 사용하는 경우도

¹ 접수일: 2005년 7월 18일; 게재승인일: 2005년 9월 9일

[#] 교신저자: 삼성종합기술원 MEMS Lab.

E-mail shchoa@samsung.com Tel. (031) 280-9455

^{*} 삼성종합기술원 MEMS Lab.

^{**} 삼성종합기술원 Packaging Center

있다. 따라서 일반적으로 MEMS 소자에서는 2 단계의 패키징 공정이 요구된다. 즉 웨이퍼 다이싱 공정 중에 MEMS 소자의 파괴를 방지하고, 혹은 MEMS 소자의 기밀성(hermeticity)을 보장하기 위한 웨이퍼 레벨 패키징(wafer level packaging)과 그 후에 진행되는 일반적인 IC 패키징인 다이 본딩(die-bonding), 와이어 본딩(wire bonding) 및 EMC(epoxy molding compound) 몰딩 등이다.

MEMS 패키징에서 고려해야 될 중요한 요소 중의 하나는 패키징 공정으로 인하여 발생된 응력이 MEMS 소자에 영향이 없도록 해야 된다. MEMS 패키지는 서로 다른 열팽창계수와 탄성계수를 갖는 여러 가지의 재료로 구성되어 있다. 따라서 패키징 공정 중에 이종 재료간의 열팽창 계수의 차이로 인해서 열응력(thermo-mechanical stress)이 MEMS 구조물에 작용하게 된다. 또는 소자 주변 환경의 온도 변화가 발생하면 각각의 재료는 다른 비율로 변형하게 되어 그 사이에서 심한 응력이 발생하게 된다. MEMS 소자는 주로 공진 모드를 많이 사용하고 있다. 특히 공진형 MEMS 센서, 자이로스코프 및 가속도계 등은 구조물의 고유진동수를 이용하고 있는데, 고유진동수는 외부 응력에 매우 민감하게 반응한다고 알려져 있다.² 즉, 패키징 공정 중에 발생한 응력으로 인하여 MEMS 소자의 주파수 변화를 초래하거나 구조물이 파손되기도 한다.³ MEMS 소자의 공진주파수 안정성은 센서 시스템의 성능에 직접적인 영향을 미치며, 이는 미소한 공진주파수의 변동이 센서 성능, 즉 감도나 위상 지연에 매우 큰 영향을 미치기 때문이다. 한편 공진형 센서에서는 동작 공진주파수가 결정되면, 이를 조정하거나 보정하는 일이 용이하지 않다. 전기적 튜닝(tuning)법이나 정교한 피드백 제어에 의해 부분적으로 주파수의 조정이 가능하지만⁴, 우선적으로 제조 공정 단계에서 주파수 변동을 최소화시켜야 한다.

자이로스코프는 선박과 항공기 등 이동체의 자세와 각속도를 검출하는 센서로 이용되어 왔으며, 최근에는 캠코더의 손떨림 보상, 차량 주행 안정화 장치 등에 활용되고 있다. 이와 함께 소형화와 가격 경쟁력에서 유리한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 진동형 자이로스코프의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다.^{5,6} MEMS 자이로스코프의 패키징

은 MEMS 구조물 주위의 공기 유동 및 점성에 의한 공기 감쇄 현상을 최소화하여 구동변위를 최대한으로 하기 위해서 웨이퍼 레벨 진공 패키징 방법이 주로 이용되고 있다. 특히 양극접합(anodic bonding)을 이용한 웨이퍼 레벨 패키징은 그 제조 비용과 효율성 측면에서 장점이 많아 널리 사용되고 있다. 양극접합은 유리 웨이퍼와 실리콘 웨이퍼를 접합하는 공정으로서 이들 웨이퍼를 고온에서 양극접합할 경우, 이종재료간의 열팽창 계수의 차이로 인해서 응력이 실리콘 구조물에 작용하게 되며, 결과적으로 양극접합된 웨이퍼는 유리 웨이퍼가 위로 불룩한 형상으로 휘어지게 된다.⁷ 이러한 열응력은 자이로스코프 구조물의 주파수 변동을 초래하게 되어 센서의 성능이나 제조 수율을 저하시킬 가능성이 많다. 또한 양극접합 후, 와이어 본딩 및 EMC 패키징으로 인하여 발생하는 응력으로 인하여 구조물의 주파수 변동이 발생할 수도 많다.

본 논문에서는 진동형 MEMS 자이로스코프 센서의 패키지를 대상으로 하여, 패키징 공정 중에 발생된 응력이 센서의 주파수 변동이나 센서의 수율에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 분석하였다. 특히 일반적으로 잘 알려진 SOI(Silicon-On-Insulator) 공정을 이용하여 제작된 공진형 MEMS 자이로스코프를 이용하여 양극접합으로 인한 응력의 영향과 EMC 패키징에 영향에 대해서도 분석하였다. 또한 패키징으로 인한 응력을 최소화하여 고수율의 MEMS 자이로스코프를 개발하기 위하여, 새로운 패키징 공정으로서 SiOG(Silicon On Glass) 공정 및 semi-folder 타입의 센싱 콤 구조를 제안하고, 그 효과를 분석하였다.

2. MEMS 자이로스코프 제작 및 패키징 공정

본 연구에서 사용된 비연성 진동형 MEMS 자이로스코프의 대략적인 구조가 Fig.1 에 나타나 있다. 진동형 자이로스코프는 구동 스프링, 센싱 스프링과 매우 많은 수의 센싱 콤(comb) 및 구동 콤들로 이루어져 있으며, 정전기적인 힘에 의해 구조물을 특정 방향으로 진동시킨 상태에서 외부에서 각회전을 주었을 때, 진동과 회전방향의 직각 방향에 나타나는 코리올리 힘(Coriolis force)을 검출하여 각회전의 정도를 측정하도록 되어 있다.

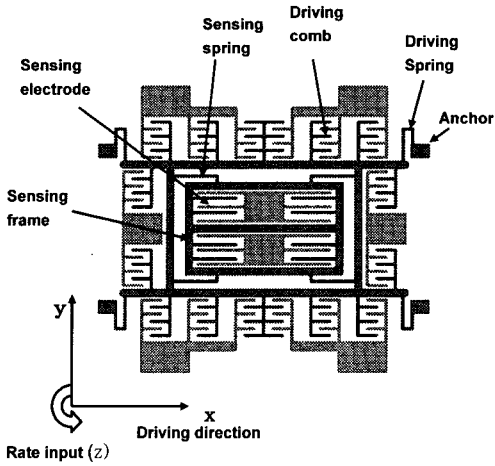


Fig. 1 Schematic drawing of the decoupled lateral vibratory MEMS gyroscope

Fig.2 는 양극접합을 한 후 제작된 진동형 자이로스코프의 단면도이다. MEMS 자이로스코프의 구조물은 4-inch SOI 웨이퍼를 이용하여 제작하였다. SOI 웨이퍼 전체 두께는 500 μm 이고 절연층으로 사용된 산화막의 두께는 3 μm 이며, 산화막 위에는 두께가 40 μm 인 실리콘 구조물층이 존재한다. 감광제(photo-resist)를 이용하여 자이로스코프 구조물의 패턴을 형성한 다음, ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching) 공정을 이용하여 실리콘 구조물 막을 바닥의 희생층까지 수직하게 식각하였다. 자이로스코프 구조물의 패키징을 위한 상부 웨이퍼는 실리콘과 열팽창 계수 차이가 상대적으로 적은 Coring Pyrex 7740 유리 웨이퍼(glass)를 사용하였으며, 두께는 350 μm 였다. 자이로스코프 구조물을 보호하고 진공 상태로 만들기 위하여, Fig. 2 와 같이 안쪽에는 동공(cavity)을 형성시켰고 전기적 배선을 위하여 유리 상판의 윗면에는 배선 구멍(via hole)을 형성시켰다. 유리 웨이퍼의 동공 및 배선 구멍은 샌드블라스팅(sandblasting) 공정을 이용하여 가공하였다. 이렇게 제작된 자이로스코프 구조물 웨이퍼와 상부 유리 웨이퍼를 정렬한 후 진공 챔버 내에서 양극접합을 실시하였다. 양극접합의 조건, 즉 접합의 온도는 대략 460 $^{\circ}\text{C}$ 이며, DC 전압은 대략 450 V 였다. 접합 후에는 웨이퍼를 진공 챔버에서 꺼내어, 유리 웨이퍼 위에 알루미늄 (Al)을 증착하여 전기적 배선을 형성하였다. 접합된 웨이퍼는 다이싱 공정을 통하여 크기가 2.7 x

2.7 mm 크기의 각각의 개별 칩으로 분리하였다. 이하 본 논문에서는 웨이퍼에서 분리된 개별 자이로스코프 소자를 ‘자이로 칩’으로 칭하였다. 패키징된 자이로 칩의 구동 및 감지 방향의 공진 주파수는 각각 7 kHz 및 7.106 Hz 였다. 그 후 자이로 칩을 Ag 에폭시(epoxy)를 이용하여 PCB 에 접착한 후 와이어 본딩하고, 그 주위를 EMC 로 패키징한다. 패키징된 자이로스코프 센서의 대략적인 형상이 Fig.3 에 나타나 있다.

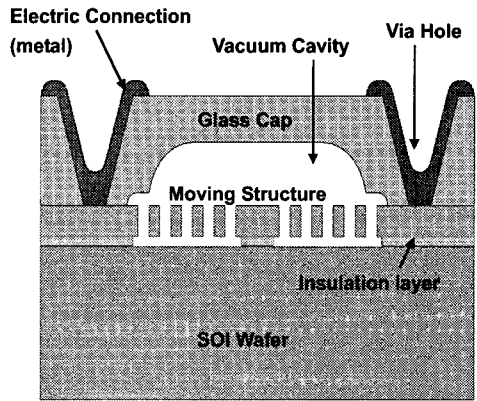


Fig. 2 Cross sectional view of vacuum packaged MEMS gyroscope using SOI process

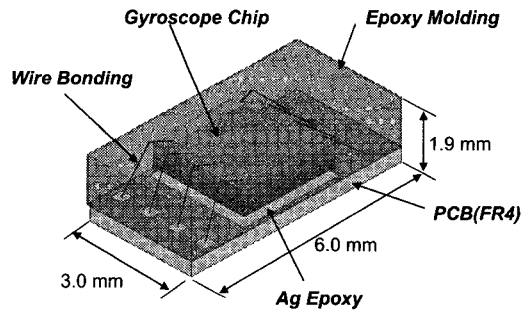


Fig. 3 Structure of MEMS gyroscope package

3. 패키징 응력의 영향 분석

자이로 칩을 패키징할 때에는 여러 공정을 거치지만, 그 중 온도 변화에 의한 변형이 발생할

수 있는 공정을 Fig. 4 에 나타내었다. 460°C에서 양극접합에 의하여 접합된 웨이퍼는 실리콘과 유리 웨이퍼의 온도에 따른 열팽창계수 차이로 인하여 상온에서 굽힘변형이 발생된다. 이러한 굽힘변형은 4-inch 웨이퍼 전체에서 최대 약 112 μm 정도이나, 웨이퍼에서 각각의 개별 자이로 칩으로 절단하였을 때는 그 보다 훨씬 작아져서 굽힘변형은 최대 0.1 μm 이하가 된다. 그 후 자이로 칩은 약 130°C 정도의 온도에서 FR4 재질의 PCB 에 Ag 에폭시로 접합 연결되며 와이어 본딩 후에는 175°C 정도의 높은 온도에서 EMC 로 몰딩을 하고 125°C 정도에서 안정시킨 후 상온으로 온도를 내리게 된다. 이 과정에서 MEMS 패키지는 전체적으로는 화학적, 기계적 수축변형을 하게 되며, 구성 재료의 열팽창계수 차이로 인하여 전체적인 굽힘변형과 국부적인 응력 집중이 발생된다. 이러한 응력 집중은 MEMS 구동 구조물의 변형을 초래하여 구동 구조물의 고유 주파수가 변하게 되므로 센서로서 원하는 성능을 얻을 수 없게 된다.

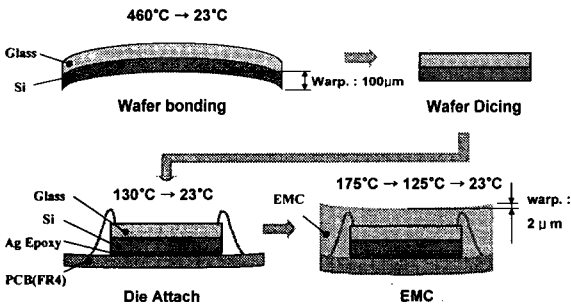


Fig. 4 Packaging process of MEMS gyroscope

자이로스코프 센서의 감도 및 위상을 결정하는 가장 중요한 인자는 구동과 감지 모드의 주파수 차로 알려져 있다.⁸ 또한 본 연구의 시험 결과 다른 인자들에 비하여 주파수 차를 조절하는 것이 매우 어렵다는 사실을 알게 되었다. 따라서 수율 및 신뢰성을 향상시키기 위해서는 공진주파수 차가 공정 오차 및 외부 응력에 상관없이 주어진 사양을 만족하는 것이 중요하다. 비록 구동 및 감지 모드 각각의 주파수 변화가 어느 정도 크더라도, 주파수 차는 가능한 작게 유지되어야 된다. 본 연구에서 주파수 차의 목표 사양은 106 ± 70 Hz로서 허용 주파수 변화가 36 Hz 에서 176 Hz 임을 나타낸

다. 즉 주파수 변화 사양의 하한 한계선(lower specification limit, LSL)은 36 Hz 이며, 상한 한계선(upper specification limit, USL)은 176 Hz 였다. 자이로 칩의 주파수 차가 이 한계를 초과할 경우 자이로 칩은 불량(fail)으로 간주하였다. 따라서 본 연구에서는 자이로스코프의 수율 및 신뢰성을 향상시키기 위하여 주파수 차의 변화를 감소시키는 것에 초점을 맞추어 수행하였다.

양극접합 후에, 휘어진 웨이퍼에서 상부 웨이퍼의 가장 높은 부분과 하부 웨이퍼의 가장 낮은 부분을 측정하여, 웨이퍼의 휨(warpage)를 측정하였다. 수십 장의 제작된 웨이퍼를 측정한 결과 접합된 웨이퍼의 휨의 정도는 평균 112 μm 였으며 유리 웨이퍼가 볼록하게 튀어나온(convex) 형태를 가졌다. Fig. 5 는 웨이퍼의 중심으로부터 같은 반경, 즉 동심원 상에 있는 자이로 칩들의 주파수 차 분포를 나타내고 있다. 반경이 증가할수록 주파수 차는 증가하며, 웨이퍼의 최 외곽 부분에서 650 Hz 의 최대값을 갖는다. Fig.6 은 자이로 칩들의 주파수 차의 통계적인 분포를 나타내고 있다. 이 웨이퍼에서 주파수 차의 평균은 190 Hz 이며, 표준편차는 174.2 Hz 였다. 개별 자이로 칩들의 주파수 차는 약 -200 Hz 부터 650 Hz 의 범위에 있다. 따라서 이 웨이퍼에 있는 자이로 칩들의 대부분은 주파수 차의 사양을 만족시키지 못하며, 수율도 매우 낮음을 알 수 있다.

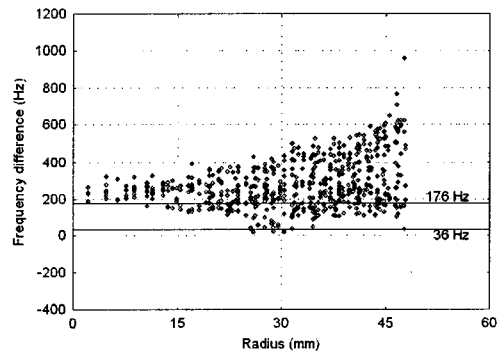


Fig. 5 The radial distribution of the frequency difference for the gyroscope dies within a wafer with increasing radius

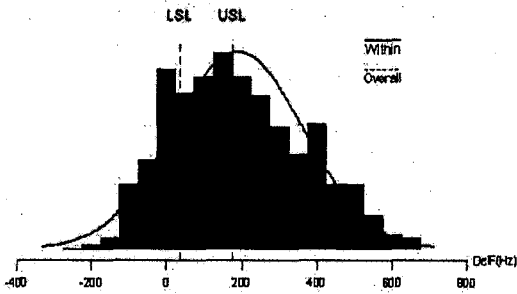


Fig. 6 The statistical distribution of frequency difference of each gyroscope die in a wafer using SOI process

한편, 약 20 장의 자이로스코프 웨이퍼를 제작, 웨이퍼 칩들의 평균값을 측정한 결과 웨이퍼의 휨 정도는 자이로 칩의 주파수 차의 산포와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. Fig.7 은 웨이퍼 휨과 주파수 차의 표준편차와의 상관 관계를 잘 나타내 주고 있다. 즉, 웨이퍼의 휨이 증가할수록 주파수 차의 표준편차는 증가하였다. 이것은 웨이퍼 휨이 클수록 본딩된 웨이퍼에 큰 응력을 초래한다는 것을 말한다.⁹ 한편, 한 웨이퍼 내에서 자이로 칩의 수율과 웨이퍼의 휨은 매우 밀접한 상관 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 웨이퍼의 휨이 증가할수록 자이로 칩의 수율은 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 SOI 의 공정으로 제작된 자이로 칩의 수율은 대부분 매우 낮았다. 즉 Fig.7 에서 표시된 고수율(high yield) 자체도 실제로는 50%를 넘지 못하는 수율을 의미한다. 결론적으로 SOI 로 제작된 자이로 칩의 주파수 차의 산포가 큰 이유는 웨이퍼의 휨에 기인한다. 따라서 자이로스코프의 수율을 높이기 위해서는 웨이퍼의 휨을 감소시키는 것이 매우 중요하다.

한편, 웨이퍼 상태에서 평균 주파수 차가 222.6 Hz 인 10 개의 자이로 칩을 Fig.4 와 같은 공정을 통하여 EMC 물딩하였을 때 발생하는 주파수 차의 변화량을 관찰한 결과, EMC 물딩을 한 후에는 평균 주파수 차가 145 Hz 로서 주파수 차가 오히려 감소하였다. 문제는 패키징의 각 공정에서 주파수 차의 변화가 계속 다르게 발생하는 것이다. 따라서 각 공정 중에 발생된 주파수 차의 변화를 최소화시켜야 한다.

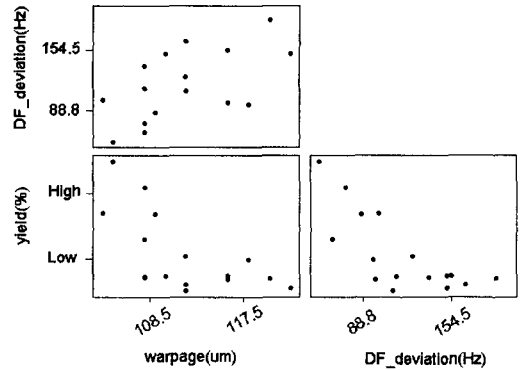


Fig. 7 The correlation graphs between warpage, yield rate and standard deviation of frequency differences (DF_deviation in the figure)

4. 패키징 응력 최소화 설계

양극접합 후 발생한 웨이퍼의 휨을 최소화하기 위하여 새로운 공정, 즉 SiOG 공정으로 제작된 자이로스코프를 개발하였다. 본 연구에서 SiOG 기술을 적용하여 제작된 자이로스코프의 공정 순서도가 Fig.8 에 나타나있다. SOI 공정으로 제작된 자이로스코프와 비교하여 볼 때, 자이로스코프 구조는 동일하나, 패키징 공정이 약간 다르다. 즉 SiOG 공정으로 제작된 자이로스코프는 한 장의 실리콘 웨이퍼와 두 장의 유리 웨이퍼를 사용하였다. 또한 2 회의 양극접합을 사용하였다. 즉 2 장의 유리 웨이퍼를 이용하여 양극접합 후 발생하는 응력이 서로 상쇄되도록 하였다. SiOG 공정으로 제작된 자이로스코프의 상판은 두께가 350 μm 인 유리 웨이퍼를 사용하였으며, 배선 구멍은 샌드블라스터 공정을 통하여 가공하였으며, 동공은 HF 용액으로 가공하였다. 다음에는 Fig.8(b)에서와 같이 두께 2 μm 의 알루미늄 박막을 식각방지막(etch stop layer)으로서 증착하였다. 유리 상판과 실리콘 구조 웨이퍼를 양극접합시킨 후, 자이로스코프 전체 두께의 조절을 위해서 실리콘 웨이퍼를 CMP (chemical mechanical polishing)를 이용하여 랩핑 및 폴리싱하였다. 양극접합의 조건은 SOI 자이로스코프 공정에 사용한 조건과 동일하였다. 즉 온도 460 $^{\circ}\text{C}$ 과 450 V 의 전압 하에서 접합이 되었다. 자이로스코프의 구동 구조물은 포토 공정과

ICP RIE 공정을 이용하여 Fig.8(f)와 같이 제작되었다. 한편 하판으로서 두께 350 μm 두께의 유리 웨이퍼는 별도로 제작하였다. 유리 웨이퍼에 깊이 160 μm 의 동공을 습식 공정을 통하여 형성한 후, 마지막 공정으로써 Fig.8(g)와 같이 실리콘 구조물 웨이퍼와 하부 유리 웨이퍼를 양극접합을 통하여 진공 챔버에서 접합시켰다. Fig.8(h)는 상기의 공정으로 제작된 진공 패키징된 SiOG 자이로 칩의 단면도이다.

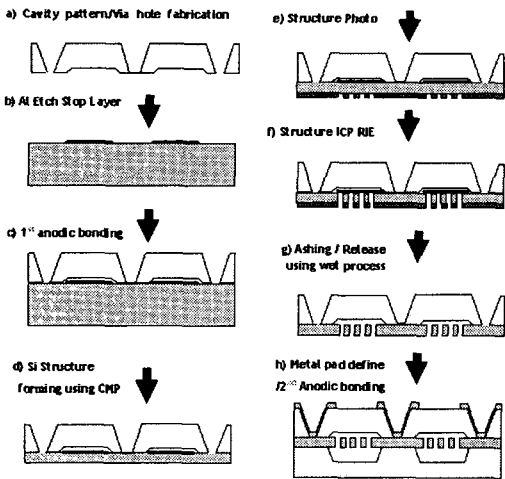


Fig. 8 Fabrication process of a packaged SiOG gyroscope

SiOG 공정의 제일 큰 장점은 대칭 구조에 의한 웨이퍼 휨의 감소이다. Table 1 은 SiOG 의 각 공정 중에 웨이퍼의 휨을 측정한 결과이다 Table 1 에서 “+” 는 위로 볼록한 형태 (convex)의 휨을 의미한다. Fig.8(a)에서 상부 유리 웨이퍼는 아래로 볼록한 형태의 휨을 나타내고 있으며 그 정도는 약 -20 μm 에서 -100 μm 사이의 값을 갖는다. 알루미늄 박막을 증착 한 후의 실리콘 웨이퍼의 휨은 약 +15 μm 였다. Fig. 8(c)에서 유리 웨이퍼와 실리콘 웨이퍼를 양극접합한 후의 웨이퍼의 휨은 유리 웨이퍼가 볼록한 형태로서 약 110 μm 였다. 이후 Fig.8(d)에서 보듯이 실리콘 웨이퍼를 두께 40 μm 로 CMP 하였을 때, 접합된 웨이퍼의 휨은 170 μm 로 증가하였다. 그러나 Fig.8(h)와 같이 실리콘 웨이퍼와 하부의 유리 웨이퍼를 양극접합하였을 때에는 접합된 웨이퍼의 휨은 -10 μm 였다. SOI 공정을 사용하여 발생한 웨이퍼 휨의 정도가 112 μm

인 것과 비교하면 웨이퍼의 휨이 매우 큰 폭으로 감소하였음을 나타낸다.

Table 1 The measured wafer warpage during each SiOG fabrication

	SiOG fabrication process in Fig. 8	Warpage (μm)
Fig. 8(a)	Top glass wafer	-20 ~ -100
Fig. 8(b)	Silicon gyroscope structure	+15
Fig. 8(c)	1 st anodic bonding of each wafer	+110
Fig. 8(d)	CMP process of silicon wafer	+170
Fig. 8(h)	2 nd anodic bonding between Si wafer (40 μm) and bottom glass wafer	-10

SiOG 공정으로 자이로스코프를 제작한 후 한 웨이퍼 내에서 존재하는 개별 자이로 칩의 주파수 차를 측정하였다. Fig.9 는 반경 방향으로의 개별 자이로 칩들의 주파수 차 분포를 나타내고 있다. 주파수 차의 분포는 SOI 자이로스코프와 비교하여 볼 때 매우 균일하게 분포하였으며, 반경이 증가함에 따라 주파수 차가 증가하는 형태도 없었다. Fig.10 은 각 주파수의 사양을 만족하는 자이로 칩들에 대한 주파수 차의 통계적인 분포를 나타내고 있다. 개별 자이로 칩의 주파수 분포는 -50 Hz 에서 250 Hz 까지 분포하고 있으며, SOI 자이로스코프와 비교하여 볼 때, 주파수 차의 사양을 만족하는 양품의 자이로 칩이 매우 증가하였음을 알 수 있다. 주파수 차의 평균은 102 Hz이며, 표준편차는 51.4 Hz 이다.

한편 EMC 후에 발생된 변형, 혹은 주파수 차의 변동은 EMC 재질의 개선을 통하여 개선할 수가 있다. 가령 좀더 유연성이 있는 폴리머 재질을 EMC 에 첨가함으로써 응력이 적은 EMC 를 제작할 수 있다.¹⁰ 또한 MEMS 구조물을 응력으로부터 분리하기 위하여 visco-elastic 재료 위에 MEMS 구조물이 놓이도록 한다.¹¹ 그러나 EMC 재질을 선택하는 과정이 너무 어렵고, 또한 재질이 변경되서 또 다른 열적 신뢰성 또는 다른 기계적인 신뢰성 문제가 발생된다. 따라서 MEMS 구조물을 응력에 강건하도록 설계하는 방안을 많이 사용하고 있다.¹² 본 연구에서는 FEM (finite element method) 해

석을 통하여 주파수 변동을 초래하는 가장 큰 인자가 무엇인지를 살펴보았으며, 패키징 재료들의 열팽창으로 인한 응력의 발생만을 고려하였다. Fig.11 은 패키징된 자이로스코프의 변형률(strain) 분포도이다. 수치해석 결과 EMC 패키징 후에 자이로스코프 구조물 중에서 센싱 콤을 지지해주는 스프링들이 가장 쉽게 변형되었다. 특히 스프링의 변형은 주파수 변동에 직접적인 영향을 미침을 알 수 있었다.

따라서 Fig. 12 와 같이 현재 사용된 “crab-leg” 타입의 스프링 구조를 변형에 강건한 구조인 “semi-folder” 스프링으로 구조 설계를 변경하였다. 그 결과 Table 2 에서 보인 바와 같이 EMC 후의 주파수 차는 64 Hz로서 EMC 전의 상태와 큰 차이가 없었으며 “crab-leg” 타입의 스프링에 비해서 상당히 개선되었음을 알 수 있었다.

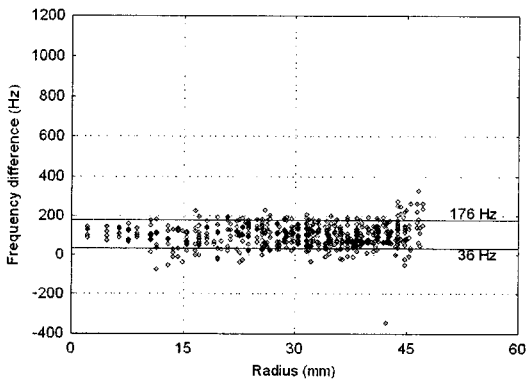


Fig. 9 The radial distribution of the frequency difference for the gyroscope dies within a wafer with increasing radius

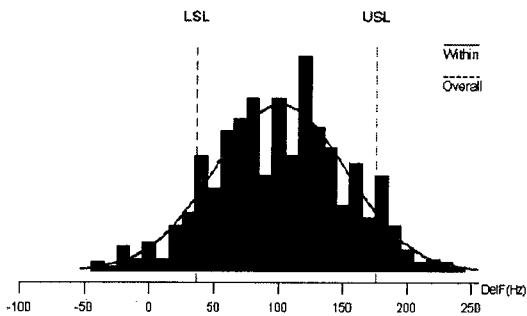


Fig. 10 The statistical distribution of frequency difference of the gyroscope dies within a wafer using packaged SiOG process

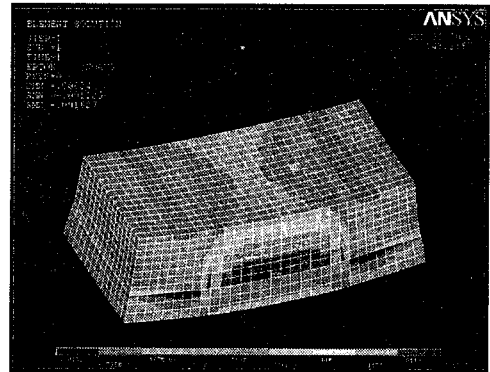
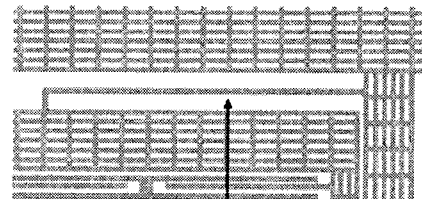
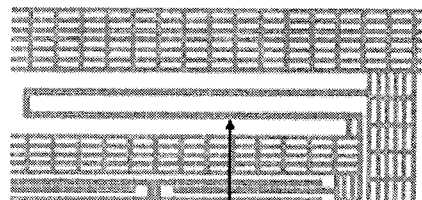


Fig. 11 An example of strain plot in x-direction for EMC encapsulated gyroscope



(a) “Crab Leg” type spring



(b) Semi-folded spring

Fig. 12 Sectional view of gyroscope structure (a) crab leg type spring, (b) semi-folded spring

Table 2 Change of frequency before and after EMC encapsulation

Spring type	Test condition	Δf (fy-fx)
(i) crag-leg type spring	Before EMC encapsulation	222.6
	After EMC encapsulation	145
(ii) semi-folded spring	Before EMC encapsulation	70.2
	After EMC encapsulation	64.1

5. 결론

본 논문에서는 비연성 공진형 MEMS 자이로스 코프의 제조 수율과 성능에 영향을 미치는 패키징으로 인한 응력에 대해서 기술하였다. 우선 MEMS 자이로스코프를 SOI 웨이퍼와 유리 웨이퍼의 양극 접합에 의해 패키징하였다. 그 결과 양극접합된 웨이퍼는 112 μm 휨이 발생하였고, 자이로스코프에서 중요한 설계 변수인 주파수 차의 분포가 매우 넓게 나타났다. 또한, 웨이퍼의 휨은 주파수 차의 산포와 웨이퍼 상에서의 수율과 밀접한 상관관계가 있음을 실험을 통해서 검증하였다. 웨이퍼의 휨이 증가할수록 주파수 차의 산포가 증가하며, 결과적으로 자이로 칩의 수율이 저하되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 샌드위치 패키징 형태를 갖는 SiOG 공정을 제안한 결과, 웨이퍼의 휨은 10 μm 로 크게 줄어들었음을 알 수 있었다. SiOG 자이로스 코프는 SOI 자이로스코프에 비해서 주파수 차의 산포가 매우 균일함을 보였고, 표준편차는 SOI 의 174.2 Hz 의 비하여, 51.4 Hz 로 대폭 향상되었음을 보였다. 또한 자이로스코프 구조물 중에서 주파수 변동에 가장 큰 영향을 미치는 스프링의 구조를 crab-leg 타입에서 semi-folder 타입으로 변경함으로써 EMC 패키징 후의 주파수 차의 변동을 감소시킬 수 있었다. 결과적으로 패키징으로 인한 응력을 최소화함으로써 높은 제조 수율과 강건한 구조의 자이로스코프를 개발하였다.

참고문헌

- Brand, O. and Baltes, H., "Microsensor packaging," *Microsystem Technologies*, Vol.7, pp. 205-208, 2003.
- Liu, R. L., Paden, B. and Turner, K., "MEMS resonators that are robust to process-induced feature width variations," *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, pp. 403-408, 2002.
- Li, G. and Tseng, A., "Low stress packaging of a micromachined accelerometer," *IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 24, No.1, pp.18-25, 2001.
- Painter, C. C. and Shkel, A. M., "Active structural error suppression in MEMS vibratory rate integrating gyroscopes," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 3, pp. 595-606, 2003.
- Oh, Y. S., Lee, B. L., Baek, S. S., Kim, H. S., Kim, J. G., Kang, S. J. and Song, C. M., "A tunable vibratory microgyroscope," *Sensors and Actuators*, Vol. A64, pp. 51-56, 1998.
- Hong, Y. S., Lee, J. and Kim, S., "Performance analysis of a vibrating microgyroscope using angular rate of dynamic model," *J. Korean Soc. Precision Engineering*, Vol. 18, pp. 89-97, 2001.
- Rogers, T. and Kowal, J., "Selection of glass, anodic bonding conditions and material compatibility for silicon-glass capacitive sensors," *Sensors and Actuators*, Vol. A 46, pp.113-120, 1995.
- Hwang, K. H., Lee, K. H., Park, G. J., Lee, B. L., Cho, Y. C. and Lee, S. H., "Robust design of a vibratory gyroscope with an unbalanced inner torsion gimbal using axiomatic design," *J. Micromech. Microeng.*, Vol.13, pp. 8-17, 2003.
- Hsu, T. R., *MEMS Packaging*, EMIS Processing Series, No. 3, Inspec Press, pp.33, 2004.
- Wu, J. and Wong, C., "Development of new stress epoxies for MEMS device encapsulation," *IEEE Trans. on Component and Packaging Technologies*, Vol. 25, No. 2, pp. 278-282, 2002.
- Ko, W., "Packaging of microfabricated devices and systems," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 42, pp.169-175, 1995.
- Hammond, J., McNeil, A., August, R. and Koury, D., "Inertial transducer design for manufacturability and performance at Motorola," *12th Inter'l Conf. on Solid State Sensors*, Boston, pp. 85-90, 2003.