

웨이퍼 레벨 진공 패키징된 MEMS 자이로스코프 센서의 파괴 인자에 관한 연구

좌성훈 · 김운배 · 최민석 · 김종석 · 송기무

삼성종합 기술원 MEMS Lab.

Study of Failure Mechanisms of Wafer Level Vacuum Packaging for MEMG Gyroscope Sensor

S.H. Choa, W.B. Kim, M.S. Choi, J.S. Kim, and C.M. Song

Samsung Advanced Institute of Technology, MEMS Lab

초 록: 본 연구에서는 웨이퍼 레벨 진공 패키징된 MEMS 자이로스코프 소자의 신뢰성 시험 및 분석을 통하여 웨이퍼 레벨 진공 패키징의 파괴 메커니즘을 연구하였다. 진공 패키징의 주된 파괴 모드는 누설, 가스투과, 그리고 outgassing이다. 누설은 접합 계면이나 재질의 결함을 통하여 주로 발생되며, 접합 폭을 증가시키거나 단결정 실리콘을 사용하면 누설이 감소한다. Outgassing은 실리콘 및 유리기판의 표면 및 내부에서 발생하며 주로 H₂O와, CO₂, C₃H₅ 및 유기 오염물질이었다. Epi-poly의 경우 SOI 웨이퍼보다 약 10배의 outgassing을 발생시킨다. 또한 유리기판을 샌드블라스트 공정을 사용하여 가공한 경우, 약 2.5배의 outgassing 양이 증가한다. Outgassing 제거를 위해서는 접합 전에 웨이퍼를 pre-baking하는 과정이 필수적이며, outgassing의 발생을 최대로 하기 위한 최적의 pre-baking 조건은 실리콘과 유리 웨이퍼를 400°C와 500°C 사이에서 pre-baking하는 것이다.

Abstract: In this study, we carry out reliability tests and investigate the failure mechanisms of the anodically bonded wafer level vacuum packaging (WLVP) MEMS gyroscope sensor. There are three failure mechanisms of WLVP: leakage, permeation and out-gassing. The leakage is caused by small dimension of the leak channel through the bonding interface and internal defects. The larger bonding width and the use of single crystalline silicon can reduce the leak rate. Silicon and glass wafer itself generates a large amount of outgassing including H₂O, C₃H₅, CO₂, and organic gases. Epi-poly wafer generates 10 times larger amount of outgassing than SOI wafer. The sandblasting process in the glass increases outgassing substantially. Outgassing can be minimized by pre-baking of the wafer in the vacuum oven before bonding process. An optimum pre-baking temperature of the wafers would be between 400°C and 500°C.

Keywords: Wafer level vacuum packaging, Gyroscope sensor, Reliability, Failure mode, Leakage, Outgassing.

1. 서 론

MEMS(MicroElectroMechanical System) 패키징은 MEMS 기술로 제작된 소자 및 부품을 상용화하는데 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 가령 MEMS 패키징에 소요되는 가격은 MEMS 소자 가

격의 70% 이상을 차지하는 것으로 알려져 있다. MEMS 패키징은 기존의 반도체 패키징이나 IC의 패키징과는 다르다. 즉 MEMS 소자의 경우 다이싱 공정이나 와이어 본딩 공정 중에 구동하는 MEMS 기계 구조물이 쉽게 파괴될 수 있으며, 또한 표준화된 반도체 패키징에서는 잘 사용하지 않

는 진공 패키징을 사용하는 경우도 있다. 따라서 MEMS 패키징의 신뢰성은 MEMS 소자의 장기 신뢰성 및 수명을 결정하는 매우 중요한 인자로 작용한다^{1,2)}. 특히 저가격화 및 소형화에 유리한 웨이퍼 레벨 진공 패키징의 기술 개발 및 신뢰성 문제 해결에 많은 연구가 수행되고 있다^{3,4)}.

MEMS 관성소자 중에 대표적인 것으로는 MEMS 자이로스코프 센서가 있다. 자이로스코프는 선박과 항공기 등의 이동체의 자세와 각속도를 검출하는 센서로 이용되어 왔으며, 최근에는 캠코더의 손떨림 보상, 차량 주행의 안정화 장치 등에 활용되고 있다. 한편 기존의 자이로스코프는 기계식이나 광학식 또는 압전 재료를 사용하여 제작되었으며, 정밀한 성능을 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에, 제작 비용이 많이 들고 부피가 커서 일반 산업, 가정용 전자 제품에 사용되기에는 부적합하다. 이에 따라 소형, 저가격화 및 대량 생산에서 유리한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 진동형 자이로스코프의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다^{5,6)}. 실리콘 진동형 자이로스코프의 원리는 정전기적인 힘에 의해 구조물을 특정 방향으로 진동시킨 상태에서 외부에서 각회전(또는 각속도)이 주어지면 진동과 회전 방향의 직각 방향에 나타나는 Coriolis 힘을 검출하여 각회전의 정도를 측정하는 것이다. 그러나 마이크로한 크기의 실리콘 자이로스코프 구조물로는 매우 미약한 Coriolis 힘을 검출하기가 어렵기 때문에 구조물의 공진을 이용하여 큰 감도를 얻는다. 또한 구조물이 공진하게 되면 구조물 주위의 공기 유동 및 점성에 의한 공기 감쇄 현상으로 인하여 Q 값이 감소하기 때문에 구조물을 진공 상태에서 작동시켜야 하며, 이를 위하여 고진공 패키징을 하여야 한다.

웨이퍼 레벨 진공 패키지 방법으로 제작된 MEMS 자이로스코프 센서의 신뢰성과 관련된 가장 중요한 것은 고속으로 장시간 구동하는 MEMS 구조물의 패키지 내부의 진공도 유지 성능이다. 특히 여러 환경 조건 및 시간의 경과에 따른 패키지 내부의 진공도 변화에 대한 신뢰성 문제에 대해서는 아직 해결되지 않은 문제로 남아 있다. 패키지 내의 진공도 변화에 영향을 미치는 주요 인자로는 누설, 투과 및 패키지 내부의 outgassing 등이 있으며, 이에 대한 메커니즘의 설명이 Fig. 1에 나타나 있다. 첫째, 누설 현상은 접합이 완료된

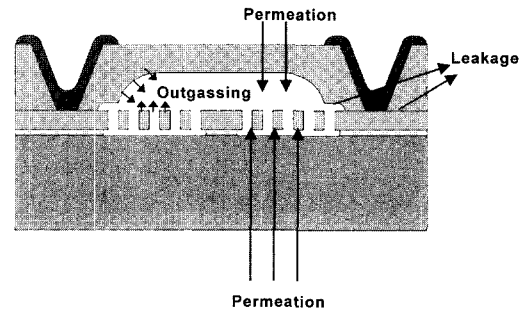


Fig. 1. Failure mechanisms of anodically bonded wafer level vacuum packaging.

후에 접합 계면의 기공(hole)이나 크랙, 또는 재질 내부의 결함을 통하여 발생된다⁷⁾. 둘째, 가스 투과 현상은 외부 가스가 고체 표면에 흡착된 후, 확산 과정을 통하여 재료의 결정 및 결정립계 등으로 침투하는 현상을 의미한다. 따라서 투과 현상은 가스와 고체의 친화성, 가스의 용해성, 및 온도 등에 많은 영향을 받는다⁸⁾. 셋째, outgassing은 접합 공정 중에, 혹은 접합 후에도 동공(cavity) 내에서 발생하는 가스를 의미한다⁹⁾. 즉 양극 접합을 이용한 진공 패키징의 경우, 접합 시 높은 전압이 가해지게 되면 유리 내부 및 접합 계면으로부터 방출된 산소 이온이 동공 내에 잔류하게 된다¹⁰⁾. Outgassing의 발생은 패키지 내부 표면의 오염물 또는 재료 표면으로부터 자체 함유된 가스가 접합 공정 중에 또는 접합 후에도 온도가 증가함에 따라 계속적으로 내부에서 방출되는 것을 의미한다. 따라서 패키지 내의 진공도 변화는 전술한 바와 같은 복잡하고 다양한 메커니즘에 의하여 영향을 받는다.

본 연구에서는 웨이퍼 레벨 진공 패키징된 자이로스코프 소자의 진공도에 영향을 미치는 인자로서 누설의 영향과 패키지 재료로부터 방출된 outgassing의 영향을 분석하였다. 이를 통하여 누설에 영향을 주는 인자들을 연구하였으며, 서로 다른 재료의 outgassing양을 비교 분석함과 동시에 최적의 pre-baking 조건을 찾아 진공 패키징된 자이로스코프 센서의 신뢰성을 향상시키는데 기여하도록 하였다.

2. 제작 공정 및 실험 방법

2.1 제작 공정

MEMS 자이로스코프의 구조물을 만들기 위해서 우선 두께 500 μm 인 N형의 실리콘 웨이퍼(비저항 0.01~0.02 $\Omega \cdot \text{cm}$)를 사용하였다. 실리콘 웨이퍼 위에 희생층으로 TEOS를 약 3 μm 두께로 증착한 후, LPCVD로 polysilicon seed 막을 증착하였으며, 그 후 약 1100°C의 열처리 공정을 통하여 50 μm 두께의 epi-poly 막을 성장시켰다. Epi-poly 막을 CMP (chemical mechanical polishing) 공정으로 평탄화하였다. 자이로 구조물의 제작은 감광제(photo-resist)를 이용하여 자이로 구조물 패턴을 형성한 다음, 감광제가 탄화되지 않도록 충분히 베이킹을 한 뒤, Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching(ICP-RIE)을 이용하여 epi-poly 막을 바닥의 희생층까지 수직하게 완전히 식각한다. 그 후 건식 에칭 장비를 이용하여 감광제를 제거하고 HF 용액에 담궈 자이로스코프의 구조물이 완전히 릴리즈 되도록 한다.

자이로스코프 구조물의 패키징을 위한 상부 웨이퍼는 실리콘과 열팽창 계수 차이가 상대적으로 적은 Corning Pyrex 7740 유리를 사용하였으며, 두께는 350 μm 였다. 유리의 가공은 유리 표면에 dry film resistor (DFR)을 부착하고 패터닝한 후, 샌드블라스팅 공정을 사용하여, 먼저 자이로스코프 구조물을 보호하고 진공 상태로 만들기 위하여 Fig. 2와 같이 안쪽에는 동공을 형성시켰고 자이로스코프 구조물과 외부에 전기적 배선을 연결하기 위한 통로로 상판의 윗면에는 배선 구멍을 형성시켰다. 이렇게 제작되어진 자이로스코프 구조물과 상부 유리 웨이퍼를 진공 챔버에 넣은 후 align된 상태에서 전압을 가하면서 양극접합을 하였다. 접합된 웨이퍼를 진공 챔버에서 꺼낸 후 유리 웨이퍼 위

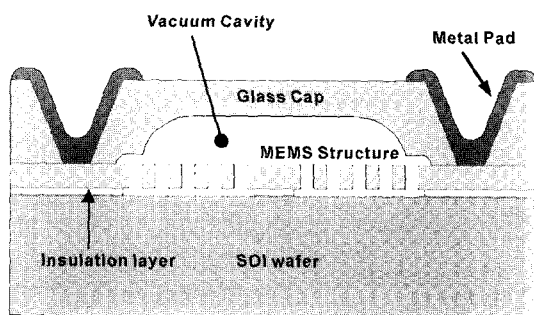


Fig. 2. Configuration of vacuum packaged MEMS gyroscope sensor.

에 알루미늄을 증착하여 전기적 배선을 형성하였다. 접합 후 동공 내부의 체적은 약 0.0007 cc였다. 접합된 웨이퍼는 다이싱 공정을 통하여 크기가 2.7×2.7 mm 크기의 개별 칩으로 절단하였으며, 이하 본 논문에서는 웨이퍼에서 분리된 개별 자이로스코프 소자를 '자이로 칩'으로 칭하였다.

2.2. 실험 방법

진공 패키징된 자이로 소자 또는 칩의 밀봉특성(hermeticity) 또는 누설특성을 평가하는 방법은 미세소자의 밀봉특성을 평가하는 규격인 MIL-STD-750D 규격¹¹⁾을 기준으로 수행하였다. 밀봉특성을 평가하기 위해서는 gross leak test와 fine leak test를 모두 수행하여야 한다. 본 연구에서는 gross leak test로서 자이로 칩을 IPA (isopropyl alcohol)에 상온 상태 하에 24시간 담가 놓은 후, 자이로 칩 내부에 IPA가 들어갔는지를 확인하였다. IPA를 사용하는 이유는 IPA가 물보다 친수성이 높기 때문에 작은 틈새에도 쉽게 침투할 수 있어 gross leak test에 적합하기 때문이다. 한편 fine leak test로서 미세소자의 누설시험에 주로 사용되는 헬륨누설시험을 수행하였다. 누설시험에서 헬륨 기체를 사용하는 이유는 헬륨은 불활성 기체 가운데 가장 가볍기 때문에 다른 불활성 기체에 비해 확산계수가 높고, 작은 틈새로도 쉽게 지나갈 수 있으며, 다른 기체나 용기와 반응하지 않기 때문이다. 헬륨 누설시험은 다음과 같은 방법으로 수행되었다. 우선 자이로 칩을 압력 챔버에 위치시킨 후 칩 외부의 오염물질의 영향을 최소화하기 위하여 헬륨을 일정 기간 흘린다. 그 다음 압력 챔버 내의 압력을 4 bar까지 증가시켜 4 시간 동안 상온에서 방치한다. 방치 후 자이로 칩을 꺼내어 Veeco MS50 mass spectrometer를 이용하여 칩에서 누설되는 헬륨의 누설량을 측정하였다. 상용된 누설측정 장비의 측정 한계는 3×10^{-11} atm-cc/sec (또는 1.12×10^{-11} atm-cc/sec air) 이었다.

자이로스코프 패키지의 주요 재질인 유리 및 실리콘 재료의 outgassing 분석은 Temperature Desorption(Mass Spectrometer (TD(MS))를 사용하였다. 샘플을 챔버에 넣은 후 적외선으로 샘플이 안착된 스테이지를 가열하고, 가열 시 재료에서 발생하는 가스를 연속적으로 질량분석계에 통과시켜 기체의 질량수에 따른 농도 변화를 시간 함수로 분석

한다. 이 분석을 통하여 재료의 내부 혹은 표면에 흡착된 오염가스 및 잔류가스의 검출이 가능하며, 한번의 측정으로 유기, 무기가스의 성분 및 발생량의 정량 분석이 가능하다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 1은 한 웨이퍼에서 무작위로 샘플링한 10개의 자이로 칩에 대한 고온보존 환경시험 (85°C) 후의 Q 값의 변화를 나타낸다. 자이로 칩을 신뢰성 환경 챔버에 놓고 85°C에서 120 시간 고온 보존시킨 후 챔버에서 샘플을 빼어서 측정한 결과 Q 값이 시험 전에 비하여 평균 14% 정도 감소하였음을 알 수 있다. 한편 동일 웨이퍼에서 15개의 자이로 칩을 선정하여 환경시험 전과 시험 후의 누설량을 측정하였다. 그 결과가 Table 2에 나타나 있다. 환경시험 전에 측정된 자이로 칩의 평균 누설량은 1.7938×10^{-9} atm-cc/sec air 였으나 환경시험 후의 평균 누설량은 2.34×10^{-9} atm-cc/sec air 로서 약 30% 정도의 누설량이 증가하였음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 환경시험 후에 누설량의 증가는 환경시험 후의 Q 값을 감소시키는 주요한 원인 중의 하나로 추정된다. 즉 환경시험에서 Q 값이 감소하는 것은 자이로 칩 내부의 진공도가 변하였음을 의미한다. 누설로 인하여 자이로 칩 외부로부터 외부 공기가 침투하고, 동공 내부의 압력이 초기 압력보다 높아짐에 따라 동공 내부

공기의 댐핑이 증가하고 이에 따라 Q 값이 감소한 것이다. 물론 고온 환경시험 중에 동공 내부에서 발생한 outgassing의 영향도 무시할 수 없다. 그러나 본 연구에서는 환경시험 중에 동공 내부에서 발생한 outgassing에 대해서는 정확한 분석이 불가능하여 outgassing이 Q 값의 감소에 어느 정도 기여를 했는지에 대한 연구는 하지 못하였다.

환경시험 후에 증가된 누설의 원인을 찾기 위하여 광학현미경, Scanning Acoustic Microscopy (SAM), X-ray 등의 여러 방법으로 자이로 칩 외부 및 유리-실리콘 접합면 등을 관찰하여 보았다. 그러나 누설의 직접적인 원인이라고 판단되는 마이크로 크랙이나 결함 등은 찾지 못하였다. 또한 환경시험 전과 시험 후의 샘플들에 대해서 gross leak 이 발생되었는지를 파악하기 위하여 각 샘플을 IPA에 24시간 동안 담근 후, 동공 내부에 IPA의 침투에 의한 거품이 발생되는 지를 관찰하였으나 거품 발생은 없었으며, 샘플을 다시 건조시킨 후 Q 값을 재 측정하였을 때 Q 값의 변화는 없었다. 따라서 gross leak은 발생되지 않았음을 알 수 있었다.

미세소자에서 발생하는 fine leak의 경우 일반적인 광학 및 전자현미경으로는 관찰이 불가능하다고 알려져 있다⁸⁾. 즉 fine leak의 경우에 누설이 발생하는 leak channel이 매우 작기 때문에 fine leak에서 발생하는 누설을 통상 molecular leak이라고 한다. 이 경우 누설을 발생시키는 마이크로 크랙

Table 1. Q-factor before/after high temperature storage test (85°C, 0% RH) for the gyroscope chips.

Sample No.	Initial Q-factor	Q-factor after storage test (85°C, 120 hr)	ΔQ (%)
1	1000	720	-28.0
2	1042	825	-20.8
3	962	858	-10.8
4	1000	907	-9.3
5	943	821	-12.9
6	833	753	-9.6
7	926	836	-9.7
8	877	756	-13.8
9	1020	883	-13.4
10	1020	924	-9.4
Avg.	962	828	-13.8
Std.	68	68	6.1

Table 2. Leakage rate before/after high temperature storage test (85°C, 0% RH) for the gyroscope chips.

Before storage test		After storage test (85°C, 120 hr)	
SPL No	Leak rate $\times 10^{-9}$ (atm-cc/sec air)	SPL No	Leak rate $\times 10^{-9}$ (atm-cc/sec air)
1	1.6524	6	2.04
2	1.5825	7	2.11
3	1.5407	8	2.17
4	1.8170	9	2.30
5	1.9352	10	2.36
		11	2.46
		12	2.49
		13	2.49
		14	2.52
		15	2.64
Average	1.7938	Average	2.34

이나 격자결합 등이 매우 작기 때문에 현미경 상으로는 관찰이 불가능하다. 본 연구에서도 현미경 뿐만이 아니라 주로 반도체 소자나 IC 소자의 결합 및 크랙을 관찰하는 SAM 및 X-ray 측정에서도 관찰이 불가능하였다. 양극접합을 한 웨이퍼 레벨 진공 패키지에서 fine leak 메커니즘으로 인하여 누설이 발생할 수 있는 곳은 실리콘과 유리 접합부의 계면 상의 결합이나 동공 제작공정(샌딩 공정)으로부터 발생된 유리 표면의 마이크로 크랙 등의 매우 미세한 결함이며 이곳을 통하여 누설이 발생된다고 추정된다. 또한 확산 현상의 일종인 permeation 현상으로 실리콘 혹은 유리 재질 자체로부터 누설이 발생할 가능성도 있다. 그러나 유리의 투과계수는 대략 10^{-17} 에서 $10^{-19} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{Pa})$ 의 값이며, 특히 실리콘의 경우는 10^{-20} 에서 $10^{-22} \text{ m}^2/(\text{s}\cdot\text{Pa})$ 의 매우 낮은 값을 갖기 때문에¹²⁾ 투과 현상에 의한 외부로부터의 공기 또는 다른 가스의 침투량은 매우 작다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 진공 패키징된 자이로 칩의 누설에 가장 영향을 미치는 그리고 현실적으로 개선이 가능한 인자인 접합면의 폭, 그리고 재질이 다른 웨이퍼인 SOI (silicon-on-insulator) 웨이퍼 또는 실리콘 웨이퍼에 대해서 누설의 양, 즉 leak channel의 크기를 비교하여 누설이 최소가 되는 최적의 조건을 찾아보았다. 우선 Fig. 3에 나타난 바와 같이 동공 내부의 기계 구조물로부터 발생하는 outgassing의 영향을 배제하기 위하여 (즉 누설 측정에 노이즈로 작용될 수 있는) 불필요한 MEMS 구조물은 제거하였다. 상부 웨이퍼는 두께 350 μm 인 Pyrex 유리 웨이퍼를 사용하였으며, 하부 구조 웨이퍼로는 두께가 500 μm 인 여러 종류의 웨이퍼를 사용하였다. 사용된 웨이퍼의 종류는 기존

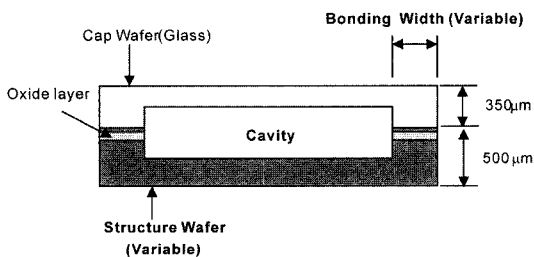


Fig. 3. Layout of wafer level vacuum packaging without moving structure and via hole for leakag test.

의 epi-poly 웨이퍼 외에 SOI 웨이퍼와 일반 실리콘 웨이퍼였다. SOI 웨이퍼의 전체 두께는 500 μm 이고, 절연막 (산화막)의 두께는 epi-poly 웨이퍼의 TEOS 막 두께와 같은 3 μm 이다. 또한 절연막 위의 상위 실리콘 층은 P 형의 두께가 40 μm , 비저항 값은 0.01~0.02 $\Omega\cdot\text{cm}$ 이다. 따라서 기본적인 두께는 기존의 epi-poly 웨이퍼의 두께와 동일하게 제작되도록 하였다. 실리콘 웨이퍼의 두께 또한 500 μm 였다. 동공의 가공은 유리 웨이퍼의 경우 HF 용액을 이용한 습식 식각을 이용하였으며, 실리콘 웨이퍼의 경우는 ICP-RIE를 사용하여 일정 부피가 되도록 동공을 형성하였다. 상부와 하부 웨이퍼를 양극접합으로 접합시킨 후, 헬륨누설시험기를 사용하여 누설량을 비교하여 보았다. 이때 동공의 체적은 기존 자이로 칩 동공 체적의 두 배인 0.0014 cc로 모든 샘플에 대하여 일정하도록 가공하였다.

접합폭의 변화에 대한 누설량의 변화가 Fig. 4(a)에 나타나 있다. 접합폭이 크면 클수록 누설량이 감소함을 알 수 있다. 이는 leak channel의 길이가 크면 누설량이 감소하는 것을 의미한다. 그러나 접합폭이 100 μm 에서 600 μm 로 6배가 증가되었

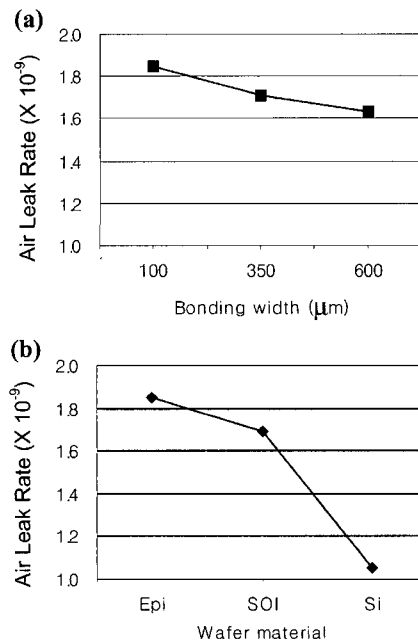


Fig. 4. Leak rate (a) for various bonding widths and (b) for various wafer materials.

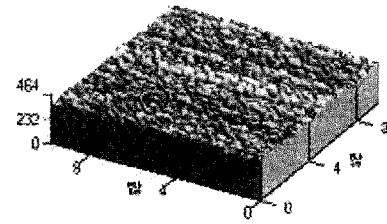
음에도 누설량의 감소는 그다지 크지 않다고 하겠다. Fig. 4(b)는 SOI, epi-poly, 실리콘 웨이퍼를 각각 사용하였을 경우의 누설량을 나타내고 있다. 이 실험에서는 접합폭을 $100\mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다. 각 웨이퍼 별 누설량은 epi-poly 웨이퍼를 사용한 경우가 가장 누설이 많았으며 SOI 웨이퍼가 그 다음, 그리고 실리콘 웨이퍼를 사용한 경우가 가장 작았다. 각 웨이퍼 별로 누설량이 차이가 나는 것은 재료의 미세구조, 즉 결정들의 크기 및 결정립계의 존재 유무와 관련이 있다고 추정된다. Epi-poly 웨이퍼의 경우 결정 및 결정립계의 존재로 인하여 단결정 구조인 실리콘 웨이퍼에 비하여 누설량이 많은 것으로 추정된다. 또한 SOI 웨이퍼는 실리콘과 산화막을 접합시켜 제작한 것임으로 실리콘과 산화막의 접합 계면을 통하여 누설이 발생되었다고 생각된다.

한편 양극접합시 중요한 인자 중의 하나인 웨이퍼의 표면조도를 측정하여 보았으며 그 결과가 Table 3에 나타나 있다. Fig. 5에는 각 표면의 topography가 나타나 있다. 표면조도는 AFM (Atomic Force Microscope)을 이용하여 측정하였으며, 측정 조건은 접촉 모드를 사용하여 접촉력이 10.4 nN , 측정 주파수는 1 Hz 로 하였다. 측정 결과 실리콘 웨이퍼의 표면조도가 제일 낮았으며, 그 다음으로는 SOI 웨이퍼였고, epi-poly 웨이퍼는 표면이 가장 거칠었다. 이 결과는 앞에서 수행된 누설량의 결과와 상관 관계가 있음을 보여 준다. 즉 표면이 가장 거친 epi-poly 웨이퍼가 가장 많은 누설량을 보여 주고 있으며, 표면이 가장 매끄러운 실리콘 웨이퍼가 가장 적은 누설량을 나타내고 있다. 즉 접합시 표면의 거칠기가 크면 비교적 큰 leak channel이 형성되어 누설이 증가한다고 생각된다. 따라서 웨이퍼의 표면조도를 가능한 낮추어야 접합력도 증가하고 그에 따라 누설량도 감소된다.

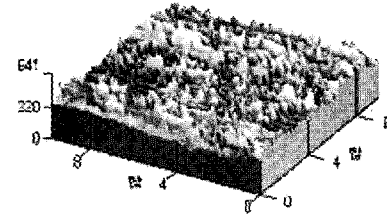
자이로 칩에서 사용된 웨이퍼, 즉 SOI, epi-poly

Table 3. Surface roughness of each wafer used.

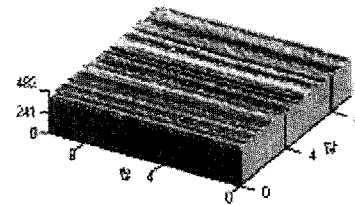
Wafer Material	R_a (Å)	R_{rms} (Å)
Si	8.97	11.6
SOI	14.8	19
Epi-poly	32.1	42.3
Glass	10.2	12.9



(a) SOI Structure wafer



(b) Epi-poly Structure wafer



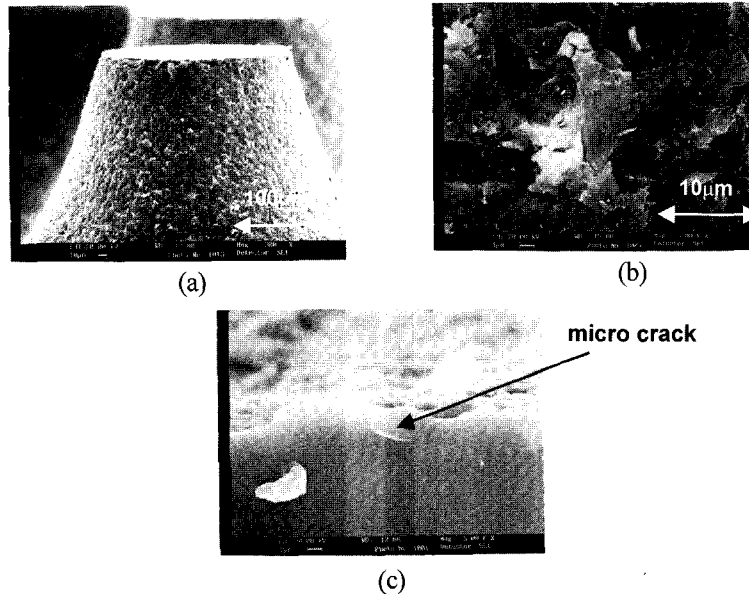
(c) Si Bare wafer

Fig. 5. AFM images of the surface for each wafer materials used.

및 유리 웨이퍼 자체에서 어느 정도의 outgassing이 발생되는지를 알기 위하여 실리콘 및 유리 웨이퍼의 outgassing을 TD-MS를 이용하여 측정하였다. 상온에서 600°C 까지 온도를 증가시키면서 웨이퍼에서 발생하는 outgassing의 양을 측정하였으며, 그 결과가 Table 4에 나타나 있다. 웨이퍼에서 발생된 outgassing의 성분은 주로 H_2O 이었으며, CO_2 , C_3H_5 및 기타 유기 오염물질이었다. SOI 웨이퍼에 비하여 epi-poly 웨이퍼가 약 10배 정도 outgassing이 많았다. Epi-poly 웨이퍼에서 많은 양의 outgassing이 발생한 이유는 epi-poly 웨이퍼를 제작하기 위해서는 도핑공정 및 CMP 공정을 거치기 때문이다. 즉 도핑공정 중의 가스, 그리고 CMP 공정 중의 슬러리 및 슬러리 용액 등과 같은 오염물질이 완전히 제거 되지 않고 재료의 표면 및 내부에 존재한다. 유리 웨이퍼에서도 많은 양의 outgassing이 발생하였는데, 특히 H_2O 가 매우

Table 4. Amounts of gas evolution for each wafer measured with TD-MS

m/z	Gas species	Amounts of gas evolution ($\mu\text{l}/\text{cm}^2$)			
		SOI wafer	Epi-poly	Glass	Glass after sanding
18	H ₂ O	0.01760	0.29272	0.28156	1.02051
41	C ₃ H ₅ ⁺	0.01070	0.02167	0.00528	0.02453
44	CO ₂	0.00423	0.02461	0.02522	0.01636
71	C ₄ H ₇ O ⁺	0.00233	0.00788	0.00049	0.03595
78	Benzene	0.00045	0.00100	0.00030	0.00051
91	Organic gas	0.00100	0.00172	0.00055	0.00125
Total		0.03631	0.34959	0.31340	1.09911

**Fig. 6.** SEM micrograph of glass wafer for (a) sandblasted via hole, (b) magnified view of glass wall, and (c) sectional view of glass wall showing microcracks.

많이 발생함을 알 수 있다. 한편 배선 구멍이나 동공 형성을 위하여 유리 웨이퍼를 샌드블라스트 공정을 사용하여 가공한 경우, 가공 전보다 약 2.5배의 outgassing 양이 증가했음을 알 수 있다. 이는 가공 과정 중에 감광제의 찌꺼기나 세정공정 중의 수분 등이 완전히 제거 되지 않고 계속 남아 있어 오염의 원인이 됨을 알 수 있다. 유리 웨이퍼를 샌딩공정을 통하여 가공하였을 경우 Fig. 6에 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 오염물질이 침투하여 잔류할 수 있으며, 또한 유리 표면이 거칠어짐에 따라 표면

적이 넓어짐으로써 표면에 흡착할 수 있는 가스의 양이 증가되어, 이에 따라 outgassing 양이 증가된다고 생각된다.

양극접합 후 동공 내에서 발생하는 outgassing을 줄이기 위하여 접합공정 전에 웨이퍼를 pre-baking 하여 기존의 outgassing을 최대한 발생시킨 후 접합하는 것이 바람직하다. 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, Fig. 7은 H₂O가 발생하는 경향을 보여 주고 있다. SOI 및 epi-poly 웨이퍼의 경우, 온

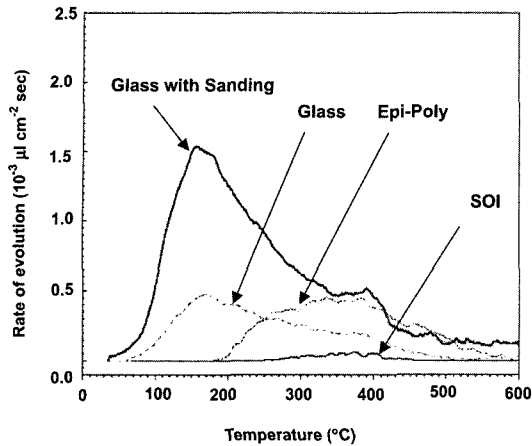


Fig. 7. Evolution of H_2O from various wafers with increasing temperature.

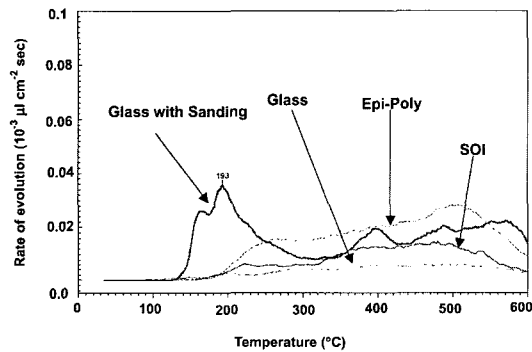


Fig. 8. Evolution of C_3H_5 from various wafers with increasing temperature.

도가 약 200°C 정도에서부터 H_2O 가 발생하기 시작하며, 약 400°C에서 발생량이 최대가 됨을 알 수 있다. 따라서 pre-baking을 400°C 이상에서 하는 것이 좋다는 것을 의미한다. 한편 유리 웨이퍼의 경우는 초기 가열 시부터 발생량이 급격히 증가하기 시작하여, 온도가 약 150°C 정도에서 발생량이 최대가 된다. 그 후 발생량은 감소하기 시작하여 400°C 이상이 되면 발생량은 급격히 감소한다. 다른 outgassing 성분의 발생량은 H_2O 의 발생에 비하여 미미하였다. C_3H_5 가스의 경우, 온도에 따른 발생 경향은 Fig. 8에서 보듯이 H_2O 의 발생 경향과 유사하나 온도가 500°C 이상에서 발생량이 최대가 되며 600°C에서는 급격히 감소함을 알 수 있다. 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-baking 할 수도 있으나, 유리의 strain point가 510°C이며 annealing point도 560°C 임으로, 500°C 이상에서 pre-baking을 하는 것은 유리 미세 조직의 변화를 발생시킬 가능성이 있으므로 가급적 피해야 한다.

4. 결 론

양극접합 공정을 이용하여 웨이퍼 레벨 진공 패킹된 자이로스코프 소자의 진공도, 즉 Q 값에 영향을 미치는 인자는 누설 현상과 가스 투과 현상 및 패키지 내부의 outgassing이다. 누설을 감소시키기 위해서는 leak channel을 최소화해야 되며, 따라서 접합폭이 크면 누설량은 감소한다. 재질에 따른 누설량은 단결정인 실리콘 웨이퍼가 가장 낮으며, SOI 웨이퍼는 그 다음으로 많으며, 다결정 구조인 epi-poly 웨이퍼가 가장 크다. 한편 실리콘과 유리 자체의 투과율이 매우 낮기 때문에 가스 투과에 의한 누설의 영향은 매우 미미하다고 할 수 있다.

유리 및 실리콘 웨이퍼에서 발생한 outgassing을 측정 한 결과, 많은 양의 H_2O 와 CO_2 , C_3H_5 및 기타 유기 오염 물질이 존재함을 알 수 있었다. 도핑 및 CMP 과정을 거친 epi-poly 웨이퍼가 SOI 웨이퍼에 비하여 약 10배 정도 outgassing이 많았으며, 유리 웨이퍼를 샌드블라스트 공정을 사용하여 가공한 경우, 약 2.5배의 outgassing양이 증가한다. 이는 웨이퍼 가공 및 세정공정이 outgassing 발생에 많은 영향을 미침을 의미한다. Outgassing 제거를 위해서는 접합 전에 웨이퍼를 pre-baking하는 과정이 필수적이며, pre-baking시 outgassing의 발생량은 온도 및 웨이퍼의 종류에 따라 경향이 약간씩 다르다. 실리콘 웨이퍼의 경우, 온도에 따라 H_2O 가 발생되는 경향은 200°C에서 발생하기 시작하여 약 400°C에서 최대가 된다. 유리 웨이퍼의 경우는 약 150°C에서 발생량이 최대가 되며, 400°C 이상에서 급격히 감소한다. 다른 outgassing 성분의 발생량은 500°C 이상에서 발생량이 최대가 되며 600°C에서는 급격히 감소한다. 결론적으로 양극접합 전에 pre-baking 공정을 통하여 웨이퍼의 outgassing 발생을 최대로 하기 위한 최적의 pre-baking 조건은 실리콘과 유리 웨이퍼를 400°C와

500°C 사이의 온도에서 pre-baking 하는 것이다.

참고문헌

1. K. Persson, "Fundamental Requirements on MEMS Packaging and Reliability", 8th International Symposium on Advanced Packaging Materials, pp. 1-7 (2002).
2. 심영대, 신규호, 좌성훈, 김용준, "Forced Potential Scheme 미세 가열기를 이용한 부분 가열 저온 Hermetic 패키징", 마이크로전자 및 패키징 학회지, 10(2), pp. 1-5 (2003).
3. R. Gooch, T. Schimert, W. McCardel, B. Ritchey, D. Gilmour, and W. Koziarz, "Wafer-level vacuum packaging for MEMS", J. Vac. Sci. Technol. A, 17(4), pp. 2295-2299 (1999).
4. 박윤권, 이덕중, 박홍우, 송인상, 김정우, 송기무, 이윤희, 김철주, 주병권, "비전도성 에폭시를 사용한 RF-MEMS 소자의 웨이퍼 레벨 밀봉 실장 특성", 마이크로전자 및 패키징 학회지, 8(4), pp. 11-15(2001).
5. Y. S. Oh, B. L. Lee, S. S. Baek, H. S. Kim, J. G. Kim, S. J. Kang, and C. M. Song, "A tunable vibratory microgyroscope", Sensors and Actuators, A. 64, pp. 51-56 (1998).
6. S. L. Lee, S. W. Hong, Y. K. Kim, and S. K. Lee, "A planar vibratory gyroscope using electromagnetic force", Sensors and Actuators, A. 65, pp. 101-108(1998).
7. M. Nese, R.W. Bernstein, I. Johansen, and R. Spooren, "New method for testing hermeticity of silicon sensor structures", Sensors and Actuators, A. 53, pp. 349-352 (1996).
8. H. Greenhouse, Hermeticity of Electronic Packages, William Andrew Publishing, New York, (1999).
9. S. Mack, H. Baumann, U. Gösele, H. Werner, and R. Schlögl, "Analysis of Bonding-Related Gas Enclosure in Micromachined Cavities Sealed by Silicon Wafer Bonding", J. Electrochem. Soc. 144(3) pp. 1106-1110 (1997).
10. S. Mack, H. Baumann, and U. Gösele, "Gas development at the interface of directly bonded silicon wafers: investigation on silicon-based pressure sensors", Sensors and Actuators, A. 56, pp. 273-277 (1996).
11. Department of Defense, "Test Method Standard for Semiconductor Devices", MIL-STD-750D, Method 1071.6.
12. A. Gerlach, W. Keller, J. Schulz, and K. Schumacher, "Gas permeability of adhesives and their application for hermetic packaging of microcomponents", Microsystem Technologies, 7, pp. 17-22 (2001).