

Epi poly를 이용한 MEMS 소자용 웨이퍼 단위의 진공 패키징에 대한 연구

석선호* · 이병렬** · 전국진***

A Study on Wafer Level Vacuum Packaging using Epi poly for MEMS Applications

Seon Ho Seok*, Byeung Leul Lee**, and Kukjin Chun***

ABSTRACT

A new vacuum packaging process in wafer level is developed for the surface micromachining devices using glass silicon anodic bonding technology. The inside pressure of the packaged device was measured indirectly by the quality factor of the mechanical resonator. The measured Q factor was about 5×10^4 and the estimated inner pressure was about 1 mTorr. And it is also possible to change the inside pressure of the packaged devices from 2 Torr to 1 mTorr by varying the amount of the Ti gettering material. The long-term stability test is still on the way, but in initial characterization, the yield is about 80% and the vacuum degradation with time was not observed.

Key words : Vacuum Packaging (진공 패키징), MEMS(멤스)

1. 서 론

MEMS(micro electro mechanical systems) 제작기술은 실리콘 웨이퍼를 가공하는 몸체미세가공(bulk micromachining)기술과 박막의 증착과 식각을 반복하는 표면미세가공(surface micromachining)기술로 나누어진다. 실리콘의 결정학에 기반을 둔 몸체미세가공기술은 IC(integrated circuit)와 더불어 개발되어 왔다. 이에 비해 상대적으로 늦게 개발된 표면미세가공기술은 몸체미세가공기술에 비해 성능이 낮고, 박막의 특성의 조절이 어려운 것이 단점으로 지적되어 왔으나 최근 10년간 활발한 연구가 진행되어 왔으며 아날로그 디바이스사의 경우 폴리 실리콘을 구조물로 사용하여 표면미세가공기술로 제작된 가속도계를 상용화하는 단계에 왔을 만큼 기술적으로 안정화가 되었다[1].

MEMS의 대표적인 소자인 가속도계나 자이로스코

프, 또는 기계적인 공진기(mechanical resonator)의 경우 공기 감쇄에 의한 성능의 저하 때문에 진공상태에서의 동작이 필요하다. 또한 재연성 및 생산성, 생산 단가면에서 웨이퍼 단위의 패키징은 MEMS의 양산화를 위한 기반 기술로 대두되어 활발한 연구가 진행되고 있으나 아직 해결되지 못한 분야이다.

최근 패키징 방법에 있어서의 미세가공 기술은 다양한 방향으로 발전하였다. 다양한 미세가공 기술들이 제시되면서 접합재료로 실리콘이 아닌 다양한 재료를 요구하게 되었으며, 이러한 요구에 있어서 직접 접합, 양극 접합, intermediate-layer 접합 등의 다양한 접합방법을 통하여 미세 구조물을 제작하게 되었다[2]. 대표적인 진공 패키징하는 방법은 2가지로 나누어진다. 첫번째 방법은 박막을 증착하는 방법[3]이며 두번째 방법은 cap 웨이퍼를 접합하는 방법[4]이다. 이 방법들의 단점으로는 여러장의 마스크를 사용해야 하며 공정이 복잡한 것과 소자 제작에 있어서 제약이 있는 단점들이 존재한다.

본 논문에서는 새로운 MEMS 구조물 재료인 epi poly에 일반적인 표면미세가공 기술을 적용하여 소자를 제작하고 glass 웨이퍼를 가공하여 cavity를 형성

*서울대학교 전기컴퓨터공학부
**서울대학교 전기컴퓨터공학부
***서울대학교 전기컴퓨터공학부

한 후 양극 접합을 하여 진공 패키징하는 방법을 제안하였으며 제작 결과에 대하여 기술한다. 또한 양극 접합시의 outgassing문제를 해결하기 위해 titanium을 게더링(gettering) 물질로 사용한 결과에 대해서도 논하였다.

2. 웨이퍼 단위 진공 패키징

2.1 Epi poly를 이용한 진공 패키징 제안

Fig. 1은 제안된 진공 패키징의 개념도이다. 기본적인 공정은 일반적인 표면미세가공기술을 사용한다 새롭게 제안된 방식으로는 구조물로 쓰이는 epi poly를 두껍게 증착 후 구조물과 cap glass웨이퍼와 접합이 될 부분인 side rim을 함께 형성한다. 이후 CMP(chemical mechanical polishing)공정을 통하여 epi poly표면을 평탄화시켜 바닥 전극에 의한 단차를 극복하여 진공 누설의 요인을 제거하며 실리콘 웨이퍼와 glass 웨이퍼를 진공상태에서 양극 접합함으로써 cavity 내부에 진공을 유지하는 것이다. 이 방법은 표면을 평탄화하는 CMP공정을 제외하고는 일반적인 표면미세가공 기술로 제작이 가능한 것이 장점이다.

또한 양극 접합시 생기는 outgassing에 의한 진공도의 저하를 방지하기 위하여 titanium을 게더링물질로 사용하여 진공도를 향상시키는 방법을 고려하였다. Fig. 2는 관통된 실리콘 웨이퍼를 shadow 마스크로 사용하여 Ti를 glass 웨이퍼의 cavity 내부에 선택적으로 증착하는 방법을 보여준다.

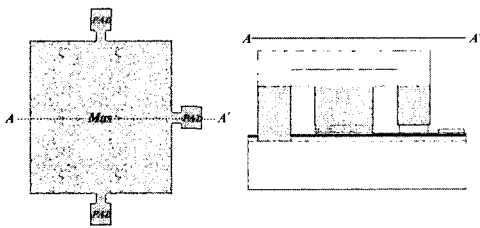


Fig. 1. 제안된 진공 패키징의 개념도.

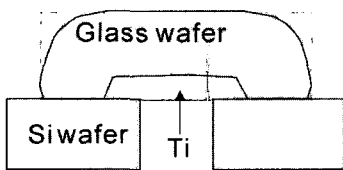


Fig. 2. Shadow 마스크를 사용하여 Ti를 glass 웨이퍼에 선택적으로 증착.

2.2 Q-factor vs Pressure

일반적인 기계적인 공진기는 다음 Fig. 3과 같이 2차 계 시스템으로 표현될 수 있다.

위의 시스템 지배 방정식으로부터 공진자의 변위에 대한 의존성이 다음 식과 같이 주어진다.

결국, 변위는 Q의 함수가 되며 Q는 위과 같이 b에 반비례하므로 고진공이 될수록 b는 작아지므로 Q는 커지게 되어 작은 힘 즉, 작은 구동전압에 의해서도 구동이 될 수 있게 된다. 이와 같은 원리에 의해 Q는 진공도에 비례하는 함수가 되므로 진공도를 측정하기 위해서는 공진기의 Q를 진공도에 따라 조사한 뒤 진공 패키징한 후 소자의 Q를 측정하면 내부의 진공도를 알아 낼 수 있다. 기계적인 공진기의 압력에 대한 Q factor의 의존성은 Fig. 4와 같이 3가지 영역으로 구분 할 수 있다. 첫번째 영역인 점성 영역(viscous region)에서 기체는 마치 점성이 있는 유체처럼 작용을 하며 이 영역에서 미세 구조물을 구동하는 경우 기체에 의한 심한 감쇄가 생긴다. 두번째 영역인 분자 영역(molecular region)에서는 기체 분자들이 희박해져 기체 분자 상호간의 작용은 없어진다. 이 영역에서 감쇄계수는 압력에 비례하게 되므로 압력의 변화에 대해 Q factor는 급격하게 변하게 된다. 마지막으로 진성 영역(intrinsic region)에서는 압력이 매우 낮아져서 기체에 의한 감쇄는 거의 무시할 수 있게 되므로 Q는 최고치에 도달하며 압력에 대해서 Q는 일정한 값이 된다.

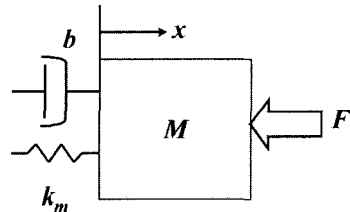


Fig. 3. 공진기의 모델링.

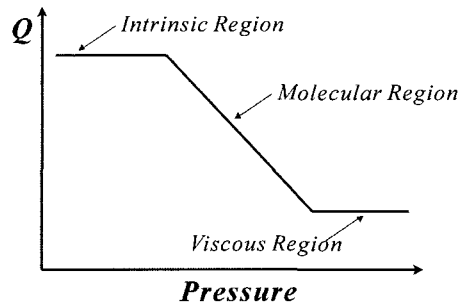


Fig. 4. Q-factor vs Pressure.

3. 제 작

3.1 제작 순서

전체공정은 일반적인 표면미세가공기술을 이용한 기계적 공진기 구조물 제작, cap glass 웨이퍼 가공, 구조물 웨이퍼와 glass 웨이퍼의 진공상태에서의 양극 접합으로 이루어진다. Fig. 5는 기계적 공진기 구조물 제작 공정을, Fig. 6는 cap glass 웨이퍼 가공 및 구조물 웨이퍼와 glass 웨이퍼의 진공상태에서의 양극 접합공정을 보여준다.

기판 웨이퍼로는 양면 폴리싱된 P(100)을 사용하였다. 절연층으로 사용할 열산화막을 1[μ m] 두께로 성장시킨 뒤 3000[\AA]의 질화막을 LPCVD로 증착하였다. 양극 접합을 하기 위해서 뒷면의 산화막과 질화막을 모두 식각한 후 ground전극으로 사용될 부분을 패터닝한다. 폴리 실리콘 5000[\AA]을 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition)로 증착후 건식 식각하여 바닥 전극을 형성한다.

희생층으로 사용될 2.5[μ m]의 TEOS(TetraEthyl OrthoSilicate)를 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)로 증착한 후 뒷면에 align key를 패

터닝 한다. 구조물이 지지되는 앵커부분을 정의한 후 구조물로 사용될 epi poly를 증착한다. CMP를 한 후에는 뒷면의 align key로 구조물 마스크를 사진공정 한 후 deep silicon etcher로 epi poly 40[μ m]를 식각하여 구조물과 접합면을 형성한다.

패드를 형성하기 위해 후막 PR(photo resister)을 사진공정 한 후 불산(49%)으로 산화막을 식각한다. 식각 마스크로 쓰였던 PR을 제거하지 않은 상태에서 Cr/Au를 각각 1000[\AA]/5000[\AA] e-gun evaporator 장비를 사용하여 증착한 후 PR stripper로 lift off 하여 패드이외의 부분의 Cr/Au를 제거한다. 구조물을 릴리즈 하기 위해 불산(49%)에 10분간 담그어 둔 후 구조물과 바닥면과의 점착현상을 방지하기 위하여 DDMS(dichlorodimethylsilane)코팅을 한다[6]. 이 후 식각된 Pyrex #7740 glass 웨이퍼와 실리콘 웨이퍼를 양극 접합을 한 후 다이싱을 한다. 마지막으로 각각의 소자들을 와이어 본딩을 함으로써 전체 공정이 끝난다. Fig. 7은 제작된 소자와 PCB 기판과의 와이어 본딩이 끝난 후의 사진이다.

4. 측 정

진공 패키징이 된 소자의 진공도를 측정하기 위한

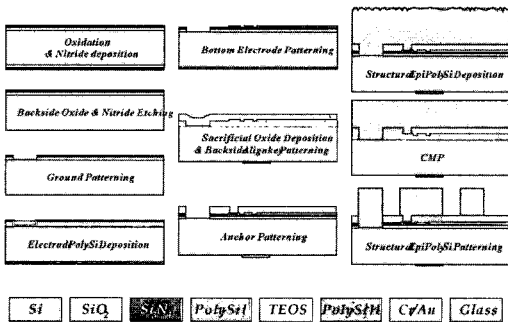


Fig. 5. 진공 패키징 소자의 제작 공정 I.

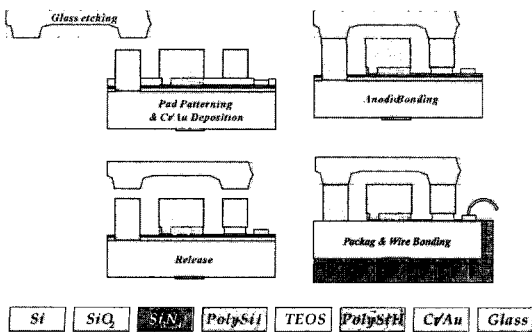


Fig. 6. 진공 패키징 소자의 제작 공정 II.

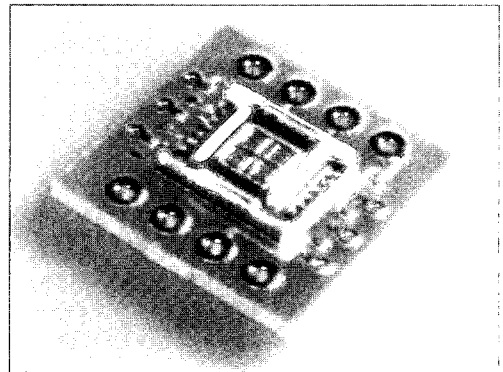


Fig. 7. PCB와 와이어 본딩된 소자 사진.

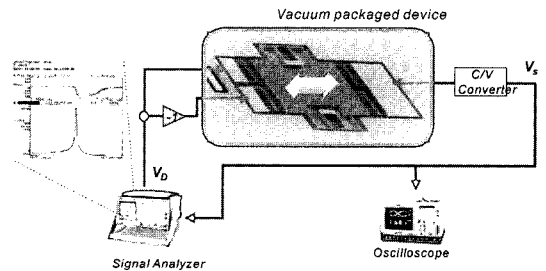


Fig. 8. Q factor 측정 장치 개념도.

테스트 소자인 기계적 공진기를 제작하였으며, 진공도의 측정방법은 패키징을 하지 않은 소자를 진공 챔버에 넣어서 진공도에 따른 Q factor를 측정한 후 진공 패키징이 된 소자의 Q factor를 비교하여 내부 진공도를 판별하는 방법을 사용하였다[7].

제작된 소자의 Q factor를 측정하기 위해 Fig. 8과 같은 측정 장치를 구성하였다.

구동 전압에 의한 잡음을 줄이기 위해 180°의 위상차로 구동시키며, 출력측의 정전용량 변화를 charge amp. 방식의 C/V 컨버터를 이용하여 전압으로 바꾼다. 전압으로 변환된 출력신호를 신호 분석기를 이용하여 공진 곡선을 읽은 후 Q factor를 측정한다. 이런 방법으로 측정된 Q factor와 미리 진공도에 따라 측정해 놓은 Q factor를 비교함으로써 내부 진공도를 판별한다.

진공 패키징을 하지 않은 소자를 진공 챔버에 넣은 후 진공도에 따른 Q factor를 측정된 결과는 다음과 같다. Fig. 9는 진공도에 따른 출력 공진 곡선의 첨예도 변화를 보여준다. 고진공이 될수록 공기에 의한 감쇠가 줄어들어 대역폭은 좁아지며 출력전압은 크게 나오는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9의 공진 곡선에서 대역폭을 측정하여 $Q = \frac{f_r}{2BW}$ 에 의해 기계적 공진기의 Q factor를 측정할 결과이다. 진공도의 상승에 따라 Q factor가 단조적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

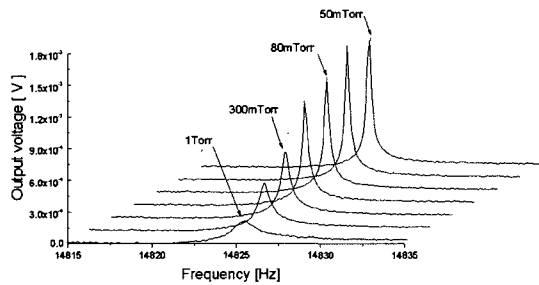


Fig. 9. 진공도에 따른 공진 곡선.

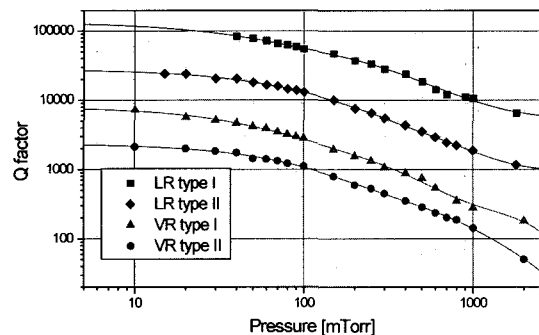


Fig. 10. 진공도에 따른 Q factor의 변화.

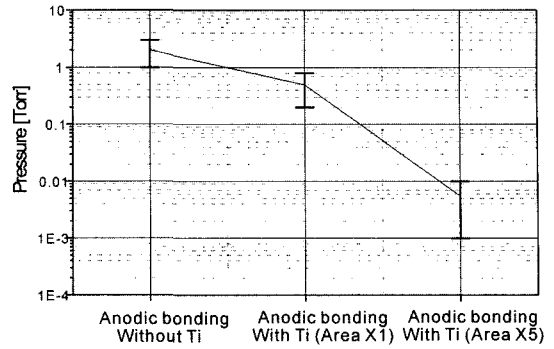


Fig. 11. 진공도 측정 결과.

Fig. 11는 진공 패키징 후의 내부진공도를 측정할 결과이다. 약 5×10^{-5} [Torr] 진공 도에서 패키징한 결과 2 [Torr]의 진공이 cavity내부에 형성되었다. 이는 폴리 실리콘면과 glass면의 양극접합시 outgassing으로 인하여 진공도의 차이가 생긴 것이다. 진공도 향상을 위해 게터 링 물질인 Ti를 glass내부에 1.44[mm²] 면적으로 증착한 결과 내부 진공도는 500[mTorr]이었으며 Ti면적을 5배 증가시 1[mTorr]로 향상이 됨을 알 수 있었다.

웨이퍼 내에서의 수율은 약 80%이었다. 패키징이 실패한 원인을 보면 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 glass 가공시 접합부분의 손상과 양극접합시 glass 부분의 파손이 진공의 누설 원인이며, 두 번째 원인으로는 측정 소자인 기계적 공진기가 사진/식각 공정이나 릴리즈 공정에서 손상을 입어 동작을 하지 않는 경우이다.

시간에 따른 내부 진공도의 변화에 대한 측정은 진행중에 있다. 지금까지의 결과로는 진공도의 변화는 없었으며, 이것은 향후 계속 진행돼야 할 부분이다.

5. 결 론

본 논문에서는 MEMS의 표준기술로 정착되고 있는 표면미세가공기술로 새로운 구조물 재료인 epi poly를 이용한 MEMS소자의 진공패키징에 대한 새로운 방식과 구현하기 위한 공정기술을 제안하였다. 제안된 새로운 방식은 epi poly를 40 μm이상 두껍게 증착한 후 CMP를 이용하여 바닥전극의 단차를 제거한 후 진공 상태에서 폴리 실리콘면과 glass면을 양극접합하는 것이다.

지금까지의 MEMS소자의 패키징 방법은 공정이 복잡하였으며 여러 제한 요소들이 존재하는 반면, 본 연구에서 제안된 패키징 방법은 이미 기술적으로 안정된

표면미세가공기술을 사용하였으며 이로 인해 소자 설계에 제약이 없고 웨이퍼 단위의 패키징을 사용하여 일괄 공정이 가능하다.

진공 패키징 후의 내부 진공도는 양극접합시 outgasing으로 인하여 2[Torr]정도의 진공이 유지되었다. 게더링 물질인 Ti를 glass내부에 1.44[mm²]면적으로 증착한 결과 내부 진공도는 500[mTorr]였으며 Ti면적을 5배 증가시 1[mTorr]로 향상되었다. 웨이퍼 내에서의 수율은 약80%이었다.

제안된 패키징 공정을 이용하면, 가속도계나 자이로스코프와 같은 관성 센서에 직접 적용이 가능하며 웨이퍼 단위의 패키징을 함으로써 MEMS소자의 양산화가 가능하게 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 국방 과학 연구소 지원하에 서울대학교 자동제어 특화 연구소(AC-41)에 의해 지원되었음.

참고문헌

1. K.H.-L. Chau, et al., "An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-g applications", *Sensors and Actuators*, A54, 472-476 (1996).
2. Martin A. Schmidt, "Wafer-to-wafer bonding for microstructure formation", *Proceedings of the IEEE*, 86(8), pp 1575-1584, Aug. (1998).
3. Kyle S, et al., "Vacuum encapsulation of resonant devices using permeable polysilicon", *Twelfth International Conference on Micro Electro Mechanical System (MEMS '99)*, pp 470-475 (1999).
4. Tetsuzo H, et al., "A New Fabrication Method for Low-Pressure Package with Glass-Silicon-Glass Structure and Its Stability", *The 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators*, pp. 1316-1319 (1999).
5. Byeungleul Lee, et al., "A dynamically tuned vibratory micromechanical gyroscope accel-erometer", *SPIE*, 3242, pp. 86-95 (1997).
6. Bong Hwan Kim, Taek Dong Chung, Chang Hoon Oh, and Kukjin Chun, "A New Organic Modifier for Anti-Stiction", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10(1), March, pp33-40 (2001).
7. Byeungleul Lee, et al., "A Novel Resonant Accelerometer; Variable Electrostatic Stiffness Type", *The 10th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators* (1999)

1. K.H.-L. Chau, et al., "An integrated force-balanced