

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.6.423>ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)**Silicon-on-glass 공정에서 접합력 균일도 향상을 위한 고정단 설계[§]**박우성^{*†} · 안준은^{*} · 윤성진^{*}

* 국방과학연구소 제3기술연구본부 4부

Improvement of Bonding Strength Uniformity in Silicon-on-glass Process by Anchor DesignUsung Park^{*†}, Jun Eon An^{*} and Sungjin Yoon^{*}

* The 3rd(SR) R&D Institute - 4, Agency for Defense Development (ADD)

(Received January 24, 2017 ; Revised March 13, 2017 ; Accepted March 21, 2017)

Key Words: Bonding Strength Uniformity(접합력 균일도), Silicon-on-glass Micromachining(SOG 미세공정), Inertial Sensors(관성 센서), Resonant Sensors(공진형 센서)

초록: 본 논문은 silicon-on-glass(SOG) 공정에서 접합력 균일도 향상을 위한 고정단 설계에 대한 내용을 다룬다. SOG 공정은 전극이 형성된 유리 기판층과 실리콘 구조층의 양극접합을 기반으로 하며, 가속도 센서와 공진형 센서를 비롯한 고종횡비 구조를 갖는 다양한 실리콘 센서들의 제작에 널리 사용된다. 본 논문에서는 전극과 유리 기판층의 표면 사이에 발생하는 단차로 인한 불균일한 접합을 방지하기 위해, 실리콘 구조층에서 유리 기판층과 접합되는 부분과 전극과 겹쳐지는 부분을 트렌치(trench)를 이용해 분리하는 새로운 형상의 고정단을 제안한다. 본 고정단은 추가적인 공정 없이 기존의 SOG 공정으로 제작되는 디바이스들에 손쉽게 적용이 가능하다.

Abstract: In this paper, an anchor design that improves bonding strength uniformity in the silicon-on-glass (SOG) process is presented. The SOG process is widely used in conjunction with electrode-patterned glass substrates as a standard fabrication process for forming high-aspect-ratio movable silicon microstructures in various types of sensors, including inertial and resonant sensors. In the proposed anchor design, a trench separates the silicon-bonded area and the electrode contact area to prevent irregular bonding caused by the protrusion of the electrode layer beyond the glass surface. This technique can be conveniently adopted to almost all devices fabricated by the SOG process without the necessity of additional processes.

1. 서론

DRIE(Deep reactive ion etch)로 대표되는 고종횡비(high aspect ratio) 실리콘 식각 기술의 발달과 함께 수십에서 수백 마이크로에 달하는 두께를 갖는 다양한 실리콘 구조물의 제작이 가능해졌으며, 이는 관성센서(inertial sensors)를 비롯한 다양한 MEMS(micro electro-mechanical systems) 센서들에서 성능

향상을 가능하게 하였다.⁽¹⁾

이러한 과정에서, 기존에 널리 사용되던 폴리실리콘(poly-silicon)에 비해 뛰어난 기계적 물성치를 가지는 단결정 실리콘(single crystal silicon)을 구조체로 활용하기 위해 도핑(doping)된 실리콘을 식각 한계층(etch-stop)으로 사용하는 dissolved wafer process 등이 개발되었으나, 기본적으로 수십 마이크로 이상의 두께를 갖기가 어려웠고 보론(boron, B)의 확산으로 인한 응력 문제가 있었다. 이를 해결하기 위해 SiGeB 웨이퍼를 사용하는 방법도 개발되었으나 내부 Ge원소로 인해 디바이스의 Q-factor가 제한되는 문제 등을 보이며 근본적인 해결 방안이 되지 못하였다.^(2~5)

§ 이 논문은 대한기계학회 2016년도 학술대회(2016.12.14.-16., 강원랜드 컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, memspark@gmail.com

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

이에 반해, 유리(glass) 기판층(substrate) 웨이퍼(wafer)과 구조물이 형성될 실리콘 웨이퍼의 양극 접합(anodic bonding)을 기반으로 하는 silicon-on-glass(SOG) 제작 공정은 더 균일하고 더 두꺼운 실리콘 층의 제작이 가능하며, 제작 시간과 비용에 관계없이 두께의 조절이 가능하다. 이외에도 낮은 기생용량(parasitic capacitance)과 내부 전극 형성의 경로 유연성 등 다양한 장점으로 인해, 특히 관성 센서나 공진형 센서(resonant sensor) 등 다양한 센서들에 널리 활용되고 있다.⁽⁵⁻¹¹⁾

센서와 작동기(actuator)의 감지(sensing) 또는 구동(actuating)에는 구조물로부터 전기적 신호를 받거나 인가하기 위한 전기적인 연결(electrical connection)이 필수적이다. 이를 위해 실리콘 구조물에 직접 와이어 본딩(wire bonding)을 하는 경우도 있지만, 전극 구조의 자유도를 위해 유리 기판층 윗면에 전극 패턴을 형성하고 구조물의 고정단(anchor)을 통해 연결하는 경우가 일반적이다. 이때 전극과 유리 기판층의 표면 사이에 발생하는 단차는 고정단과 겹쳐지는 전극 주변의 접합면에 들뜨는 부분을 만들게 되고, 이는 센서와 작동기의 장기적인 신뢰성(reliability) 하락의 원인으로 작용할 수 있다. 또한 이러한 현상은 모든 제작 공정에서 균일하게 나타나지 않기 때문에, 동일 공정으로 제작된 디바이스 간 성능 차이를 발생시킬 수 있다. 이를 해결하기 위해 유리 기판층에 전극이 형성될 부분을 전극의 두께만큼 미리 식각(etching)하여 접합면의 단차를 상쇄하기도 하는데, 이러한 방법은 문제를 일부 완화시키기는 하나, 식각 되는 깊이 또한 균일하지 않기 때문에 근본적인 해결책이 되지 못한다.^(5,11)

따라서, 본 연구에서는 이를 해결하기 위해, 유리 기판층과 접합되는 부분과 전극과 겹쳐지는 부분을 트렌치(trench)를 이용해 분리하는 새로운 형상의 고정단을 제안한다. 설계된 고정단이 적용된 실험용 시편을 제작하고, 광학식 현미경을 통한 접합부 확인과 전단 응력(shear stress) 실험을 통해 새로운 고정단의 효과를 확인하였다. 실험 결과는 새로운 고정단이 접합력 균일도를 향상시킴을 잘 보여주었으며, 이러한 향상은 접합의 질이 악화되는 환경에서 더 드러났다.

2. 설 계

본 연구에서 제안하는 고정단 구조물의 형상은 위 Fig. 1(a)와 같다. 고정단 구조물의 접합력과 함께 접촉 저항(contact resistance)의 차이 또한 확인

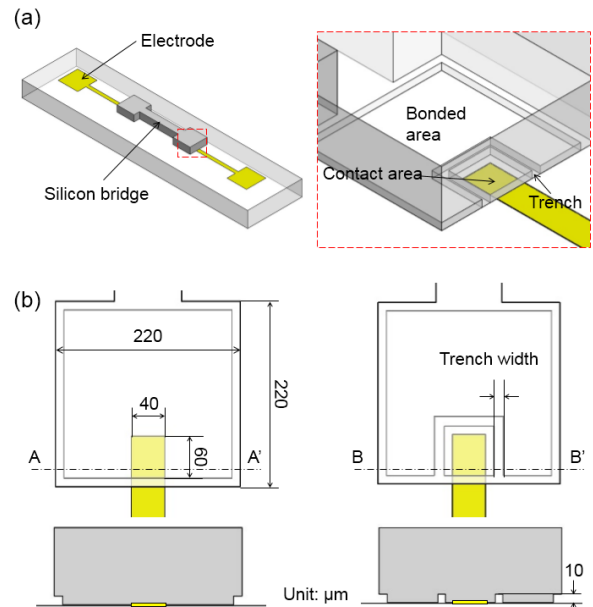


Fig. 1 (a) Schematic of a bridge structure, (b) dimensions and cross view of the normal anchor (A-A'), (c) the proposed anchor (B-B')

하기 위해 양쪽 고정단과 전극이 연결된 다리(bridge) 형태로 설계되었다. 고정단과 전극이 접촉하는 부분의 형상은 기존의 고정단, 트렌치를 포함하는 고정단 각각 Fig. 1(b), (c)와 같다. 전극 접촉부와 접합부를 구분하는 트렌치의 깊이는 10- μm 로 실리콘 구조층과 유리 기판층 사이의 간격과 같으며, 트렌치의 폭은 3 μm , 6 μm , 9- μm , 12 μm 로 나누어 설계하였다.

3. 제 작

설계된 구조물을 제작하기 위한 제작 공정은 전극 패턴이 형성된 유리 웨이퍼에 (Fig. 2(a), (b)) 접합부 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼를 접합하고 (Fig. 2(c), (d), (e)) 뒷면을 깎아내어 원하는 두께로 만든 뒤 최종적인 실리콘 구조물을 형성하는 방식 [Fig. 2(f)]으로 일반적인 SOG 공정과 유사하다.⁽¹¹⁾ Fig. 2(f)의 좌측은 일반적인 고정단을 갖는 다리 구조물이며 우측은 새로운 고정단을 갖는 다리 구조물이다.

두 구조물의 차이가 되는 트렌치는 실리콘 구조층과 유리 기판층 사이의 간격을 형성할 때 DRIE를 이용해 한번에 형성되었으며 [Fig. 2(d)], 이는 본 논문에서 제안하는 고정단이 추가적인 공정 없이 트렌치 패턴을 마스크에 추가하는 것만으로 손쉽게 적용될 수 있음을 나타낸다.

본 제작에서는 chemo-mechanical polishing을 이

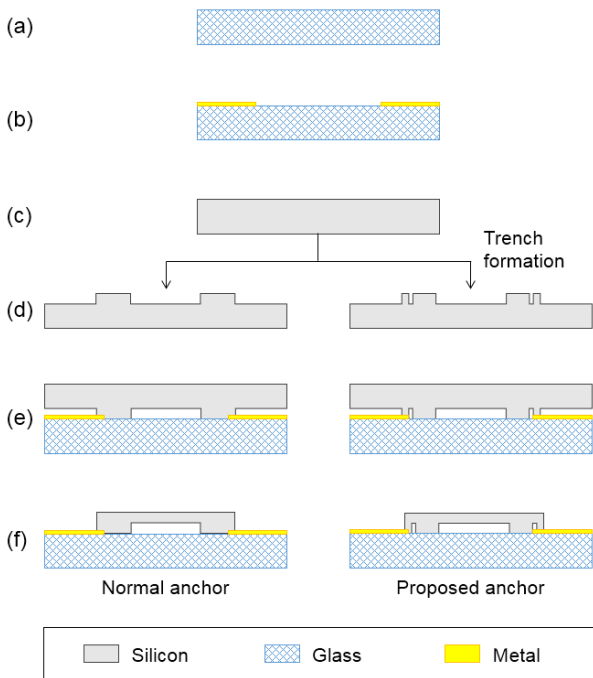


Fig. 2 Fabrication process of the bridge structure: (a) Glass wafer, (b) metallization, (c) silicon wafer, (d) anchor/anchor with trench formation (1st DRIE), (e) anodic bonding, (f) grinding and polishing backside of silicon wafer and form detailed structures (2nd DRIE)

용해 하부 기관층과 접합된 구조층을 설계된 두께로 깎아냈으나, SOI(silicon-on-insulator) 웨이퍼의 구조층을 이용한다면 KOH와 TMAH(tetramethylammonium hydroxide)와 같은 실리콘 습식 식각(wet etching)을 이용해 더욱 정교하게 구조층의 두께를 조절할 수 있다.⁽⁴⁻¹¹⁾

4. 실험

제작된 시편에서 새로운 고정단의 효과를 확인하기 위해서 먼저 현미경을 이용해 접합면의 상태를 확인하였다. 기존의 고정단의 경우 Fig. 3(a)와 같이 전극 주변으로 접합이 불완전한 면들을 확인할 수 있었으며, 이러한 불완전한 접합면의 크기는 시편들 간에 눈에 띄는 차이를 보였다.

불완전한 접합으로 인한 경계면은 희석된 HF(hydrofluoric acid)를 이용해 유리 기관층을 식각하였을 때 더 눈에 띄게 나타났다[Fig. 3(b)]. 새로운 고정단을 적용한 시편의 경우, 모든 시편에서 실리콘 구조층과 유리 기관의 접합면이 균일하게 접합됨을 확인할 수 있었으며, Fig. 3(c), (d)와 같이 트렌치의 폭에 따른 접합면의 차이는 눈에 띄게 나타나지 않았다.

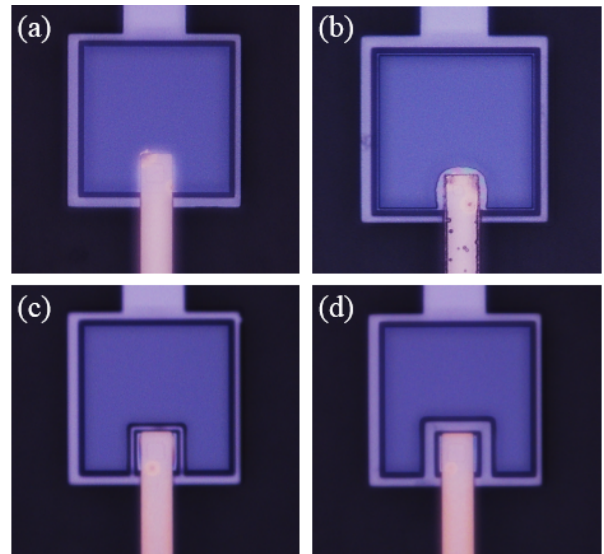


Fig. 3 Optical image of bonded area under the normal anchor: (a) before and (b) after wet etching and under the proposed anchor with trench width of (c) 3 μm and (d) 12 μm

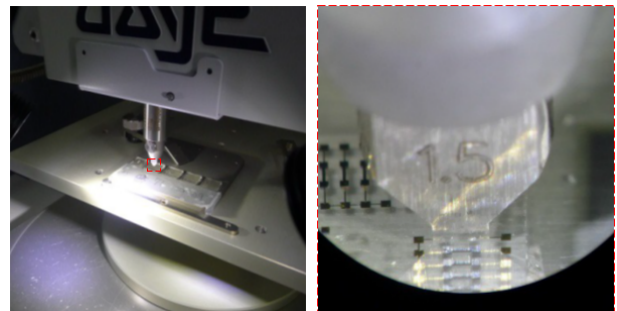


Fig. 4 Experimental setup for fracture test under shear stress test

다음으로 접합면이 전기적으로 잘 연결되었는지 확인하기 위해 다리 구조물 양쪽의 접촉 패드(contact pad)를 통해 구조물 전체의 전기 저항을 측정하였다. 기존의 고정단을 적용한 경우와 본 논문에서 제안하는 고정단을 적용한 경우 모두 40 Ω 이하의 저항이 측정되었으며 이는 접합 과정에서 전극과 실리콘 구조층 사이에서 저항성 접합(ohmic contact)이 이루어졌음을 나타낸다.

끝으로, 가장 중요한 접합력 확인을 위해서 구조물의 접합면에서 발생하는 파괴 응력(fracture stress)을 측정하는 실험이 수행되었다. 실험은 Fig. 4와 같이 접합 시험기(bond tester, Nordson DAGE 4000Plus)를 이용하여 다리 구조물의 측면에 힘을 가하고 파괴가 일어날 때의 값을 측정하는 방식으로 수행되었다.

측정 결과, Fig. 5와 같이 파괴 응력의 중간값

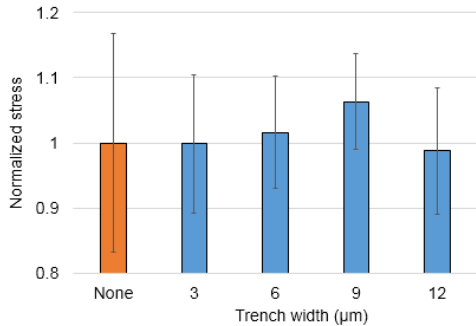


Fig. 5 Normalized shear stress of each types of anchor

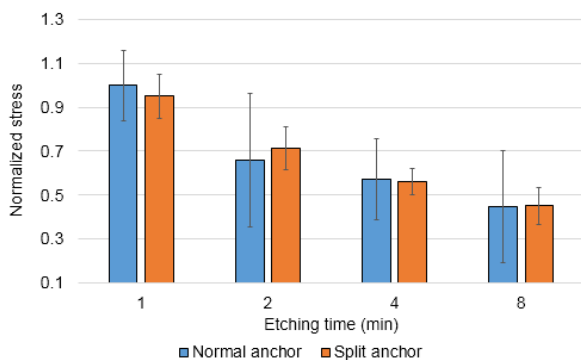


Fig. 6 Normalized shear stress of the normal and proposed anchor along etching time

(median)은 트렌치의 유무와 폭에 관계 없이 유사하게 얻어졌으나, 트렌치 고정단을 적용한 시편의 경우 기존 고정단을 적용한 시편에 비해 파괴 응력의 분산(deviation) 값이 적게 나타났다. 트렌치 고정단을 적용한 시편의 경우 70% 이상의 시편에서 측정된 파괴 응력 값이 전체 파괴 응력 평균값의 $\pm 10\%$ 이내에 포함되었으나, 기존 고정단을 적용한 시편의 경우 10% 이하의 시편만이 전체 파괴 응력 평균값의 $\pm 10\%$ 이내의 파괴 응력 값을 보였다.

추가적으로, 접합 상태가 악화되었을 때 접합력과 접합력 균일도를 확인하기 위해 희석된 HF 용액으로 식각 후 전단 응력 실험을 수행하였다. Fig. 6과 같이 식각 시간이 증가할수록 파괴 응력은 점점 작아지는 걸 확인하였으며, 동일 시간 식각 시 트렌치 고정단을 적용한 시편과 기존 시편을 적용한 시편에서 전단 응력의 큰 차이는 보이지 않으나, 전체적으로 식각 시간이 증가하며 접합의 질이 악화됨에 따라 트렌치 고정단을 적용한 시편과 기존 시편을 적용한 시편에서 전단 응력의 분산 차이는 더욱 크게 확인되었다. 식각 후, 트렌치 고정단을 적용한 시편의 경우 50% 이상의 시편에서 측정된 파괴 응력 값이 전체 파괴 응력 평

균값의 $\pm 10\%$ 이내에 포함되었다.

반면 기존 고정단을 적용한 시편의 경우 5% 이하의 시편만이 전체 파괴 응력 평균값의 $\pm 10\%$ 이내의 파괴 응력 값을 보였으며, 이러한 결과는 본 논문에서 제안하는 고정단이 접합의 질이 열악한 경우 접합력 균일도 향상에 더 큰 효과가 있음을 잘 보여준다.

5. 결론

본 논문에서 제안하는 트렌치를 이용한 분리형 고정단은 기존의 고정단과 비교 시 유사한 크기의 접합력을 보였으나, 시편 간 접합력의 균일도에서는 큰 향상을 보였다. 특히 접합의 질이 악화되었을 때 새로운 고정단과 기존의 고정단 간 접합력 균일도의 차이는 더욱 크게 나타났다. 지금까지의 실험 결과는 새로운 고정단을 통해 접합력 균일도를 향상시킬 수 있음을 성공적으로 보여주며, 이는 본 고정단의 적용이 관성 센서과 공진기에서 장기적인 신뢰성 향상에 기여할 수 있음을 나타낸다. 이어, 고정단의 형상에 기반한 트렌치의 상세 설계와 이를 적용한 관성 센서에서 성능 향상 분석이 수행될 계획이다.

참고문헌

(References)

- (1) Yazid, N., Ayazi, F. and Najafi, K., 1998, "Micro-machined Inertial Sensors," *Proc. IEEE*, Vol. 86, pp. 1640~1659.
- (2) Gianchandani, Y. and Najafi, K., 1992, "A Bulk Silicon Dissolved Wafer Process for Microelectromechanical Devices," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 1, pp. 77~85.
- (3) Borenstein, J. T., Gerrish, N. D., White, R., Currie, M. T. and Fitzgerald, E. A., 2000, "Silicon Germanium Epitaxy: a New Material for MEMS," *Mater. Res. Soc. Symp.* 657 7.4.1.
- (4) Tez, S. and Akin, T., 2012, "Comparison of Two Alternative Fabrication Processes for a Three-Axis Capacitive MEMS Accelerometer," *Procedia Engineering*, Vol. 47, pp. 342~345.
- (5) Sawyer, W. D., Prince, M. S. and Brown, G. J., 2005, "SOI Bonded Wafer Process for High Precision MEMS Inertial Sensors," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 15, pp. 1588~1593.
- (6) Cabuz, C. and Ridley, J. A., 2003, SOI/Glass Process for Forming Thin Silicon Micromachined Structures, *US Patent*, US 6,582,985 B2.
- (7) Chen, S., Chien, H. T., Lin, J. Y. and Hsu, Y. W., 2008, "A Method for Fabricating MEMS Accelerometers," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 17, pp. 1000~1008.

- eters,” *Electronic Materials and Packaging*, pp. 84~87.
- (8) Alper, S. E., Temiz, Y. and Akin, T., 2008, “A Compact Angular Rate Sensor System using a Fully Decoupled Silicon-on-glass MEMS Gyroscope,” *J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 17, pp. 1418~1429.
- (9) Ding, H., Liu, X., Lin, L., Chi, X., Cui, J., Kraft, M., Yang, Z. and Yan, G., 2010, “A High-Resolution Silicon-on-glass z-Axis Gyroscope Operating at Atmospheric Pressure,” *IEEE Sens. J.*, Vol. 10, pp. 1066~1074.
- (10) Torunbalci, M. M., Tatar, E., Alper, S. E. and Akin, T., 2011, “Comparison of Two Alternative Silicon-on-glass Microfabrication Processes for MEMS Inertial Sensors,” *Proc. Eurosensors XXV*, pp. 900~903.
- (11) Park, U., Rhim, J., Jeon, J. U. and Kim, J., 2014, “A Micromachined Differential Resonant Accelerometer Based on Robust Structural Design,” *Microelectronic Eng.*, Vol. 129, pp. 5~11.