

## 표면처리 공정 조건에 따른 SoQ 접합의 접합 특성에 관한 연구

김종완\*, 송은석\*, 김용권\*, 백창욱\*\*

서울대학교 전기컴퓨터공학부\*, 중앙대학교 전자전기공학부\*\*

### A study on bonding characteristics of SoQ bonding according to surface treatment process conditions

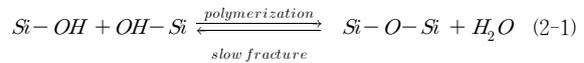
Jong-Wan Kim\*, Eun-Seok Song\*, Yong-Kweon Kim\*, and Chang-Wook Baek\*\*

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University\*

School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University\*\*

**Abstract** - Plasma treatment time was optimized to maximize the bonding strength between silicon and quartz. Bonding strength between the silicon and quartz is related to a surface energy which can be calculated by contact angle measurement. It was found that optimized time to get maximized surface energy was 15 sec. Silicon and quartz wafers were treated with O<sub>2</sub> plasma under different time splits and then bonded together. Bonding strength of the bonded wafers was measured by shear test. It was verified that the highest bonding strength was obtained when the silicon and quartz wafers were treated for 15 seconds. The maximum bonding strength exceeded the fracture strength of silicon.

실리콘/수정 웨이퍼를 RCA1 용액으로 표면 처리하고, 각 웨이퍼 표면에 O<sub>2</sub> 플라즈마 처리를 한다. 플라즈마 처리가 끝난 후, 각 웨이퍼를 초순수(DI water)로 세척, 건조한 후 접촉시킨다. 플라즈마 처리된 면끼리 접촉하면 각 표면에 있던 OH기가 만나면서 중합반응(polymerization)을 일으켜 식 (2-1)과 같은 중합 반응이 일어나고, [4, 6] 이를 초기 접합이라 한다.



초기 접합 시에 중합반응은 상온이며 수분이 남아 있는 상태이므로 가역적이다. 남아있는 수분을 제거하고 접합 에너지를 증가시키기 위한 열처리를 하면 SOQ 접합 공정이 종료된다.

## 1. 서 론

수정은 열탄성 감쇠에 의한 Q값이 실리콘 보다 크기 때문에 MEMS 기반의 관성센서로 제작될 경우 바이어스 안정도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 최근에는 반도체 공정 장비의 향상으로 수정 건식 식각이 가능해짐에 따라, 고품상비의 수정 식각을 통해 수정 MEMS 구조물을 구현하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 수정 건식 식각 공정에 필요한 마스크의 재료로 금속, 감광제 등을 이용하려는 시도가 있었으나, 수심  $\mu\text{m}$  이상의 깊은 식각이 요구될 경우에는 금속 박막은 두껍게 증착하는데 공정이 복잡하고, 감광제는 수정과의 선택비가 매우 낮은 문제점이 있다 [2, 3]. 이러한 단점을 극복하기 위해 단결정 실리콘 웨이퍼를 수정 웨이퍼에 접합한 후 마스크로 사용한다면 건식 식각의 선택비를 향상시킬 수 있으며, 실리콘의 MEMS 공정 기술을 응용하여 웨이퍼 레벨에서 수정 관성센서를 제작할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해서는 접합의 안전성을 최소한으로 보장할 수 있도록 수정 또는 실리콘의 파단 강도보다 강한 접합력을 갖는 수정/실리콘 웨이퍼의 접합이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 수정을 기반으로 한 관성센서의 제작을 위한 일환으로서 수정/실리콘 웨이퍼의 접합력을 극대화시키기 위해 접합력에 영향을 주는 요인 중 하나인 O<sub>2</sub> 플라즈마의 처리시간을 최적화하였다. 이를 위해 플라즈마의 처리 시간에 따른 수정/실리콘의 표면 에너지를 분석하고, 수정/실리콘 웨이퍼를 접합하여 플라즈마의 처리 시간에 따른 접합력을 측정하고 두 결과를 비교하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실리콘과 수정 접합(SOQ 접합)의 과정

Qin-Yi Tong 등은 Si, SiO<sub>2</sub> 웨이퍼를 RCA1(NH<sub>4</sub>OH : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 1 : 5)용액으로 처리한 후, 상온에서 접촉시켜 접합한 후, 초기 접합된 웨이퍼를 열처리 하여 접합력을 증가시켰다 [4]. 또한 Gertrud Kriuter 등은 상온에서 Si/Si 접합시 O<sub>2</sub> 플라즈마로 표면 처리하여 접합 에너지를 증가시켰다 [5]. 이는 모두 수정 및 실리콘 웨이퍼의 표면 에너지를 활성화하여 반데르 발스 힘을 이용한 접합 방법이었다. 따라서 본 연구에서는 수정/실리콘의 접합력을 최대도 하기 위해 두 방법을 동시에 사용하여 그림 1과 같이 실리콘과 수정 웨이퍼의 접합 공정을 확립하였다.



<그림 1> SOQ 접합의 순서도

### 2.2 표면 에너지(surface energy)와 접합력의 관계

SOQ 접합에서는 O<sub>2</sub> 플라즈마 처리의 효과는 2가지로, 실리콘/수정 웨이퍼의 표면 에너지가 증가하여 웨이퍼의 표면을 활성화(activate)시키는 것과 [6], 실리콘 및 수정의 표면에 식 (2-1)의 반응 시 필요한 Si-O (silanol groups)의 수를 늘리는 것이다[5]. O<sub>2</sub> 플라즈마 처리는 표면의 에너지를 높여서 수정과 실리콘 접합 시 접합력을 증가시키지만, 지나치게 오랜 시간 처리하는 경우에는 표면에 손상을 일으켜 오히려 접합력을 감소시키는 것으로 알려져 있다[7].

표면 에너지와 접합력 간에는 비례관계가 성립하므로 [7], 플라즈마 처리시간을 변화시킨 실리콘/수정의 표면 에너지를 측정하여 그 표면 에너지를 최대도 하는 플라즈마 처리시간을 조사하였다. 그 후 플라즈마 처리 시간을 달리한 수정/실리콘 웨이퍼를 접합하고 그 접합력을 측정하여, 플라즈마 처리 시간에 따른 표면 에너지 및 접합력의 경향성을 비교, 분석하였다.

#### 2.2.1 표면 에너지와 접촉각(contact angle)과의 관계

표면 에너지의 경향성을 관찰하기 위하여 실리콘/수정 표면의 접촉각을 측정하였다. Young은 표면 에너지와 접촉각과의 관계를 식 2-2와 같이 규명하였다 [8].

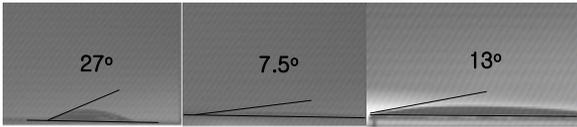
$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta_c = \gamma_{SG} \quad (2-2)$$

( $\gamma_{SL}$  : 고체와 액체 사이 표면 에너지,  $\gamma_{LG}$  : 액체의 표면 에너지,  $\theta_c$  : 접촉각  $\gamma_{SG}$  : 고체의 표면 에너지)

식 2-2에 의하면 접촉각은 액체 및 고체의 표면 에너지에 따라 달라지며, 접촉각이 낮을 때 고체의 표면 에너지( $\gamma_{SG}$ )가 높으므로, 최소의 접촉각을 야기하는 플라즈마 처리 시간이 수정/실리콘 표면의 표면 에너지를 가장 극대화한다고 설정하였다.

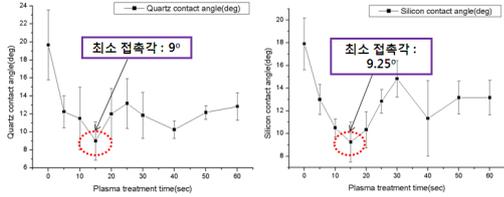
#### 2.2.2 접촉각 측정 및 표면 에너지의 경향성 분석

표면 에너지의 경향성을 분석하기 위해 물방울의 sessile drop을 이용한 접촉각 측정을 실시하였다. O<sub>2</sub> 플라즈마 처리 시간을 0~60초 사이에서 변화시켜가며 웨이퍼를 표면 처리한 후 측정된 수정 표면의 접촉각을 그림 3에 나타냈다. O<sub>2</sub> 플라즈마의 처리에 따른 접촉각의 경향성은 수정 표면의 경우 플라즈마 처리를 하지 않았을 때(그림 3-a)는 16.5 - 27.0도로 측정되었으며, 15초 처리하였을 때(그림 3-b)는 7.5 - 10.5도, 60초 처리하였을 때의 접촉각(그림 3-c)은 10.5 - 15도로 측정되었다.



(a) 0초 (b) 15초 (c) 60초  
**<그림 3> 플라즈마 처리 시간에 따른 물방울 모양의 변화**

그림 4는 측정 결과를 정리한 데이터로, 실리콘 및 수정 표면 모두, 플라즈마의 처리시간이 15초였을 때 접촉각이 가장 낮게 측정된 것을 알 수 있다.



**<그림 4> 플라즈마 처리 시간에 따른 수정(좌)과 실리콘(우)의 접촉각 변화 그래프**

측정한 접촉각을 바탕으로 표면 에너지를 분석하였다. 식 (2-2)를 통해 표면 에너지( $\gamma_{SG}$ )를 계산하기 위해서는 고체와 액체 사이 표면 에너지( $\gamma_{SL}$ )를 알아야한다. 때문에 Neumann et al.이 제안한 식 (2-3)을 사용하였다 [9].

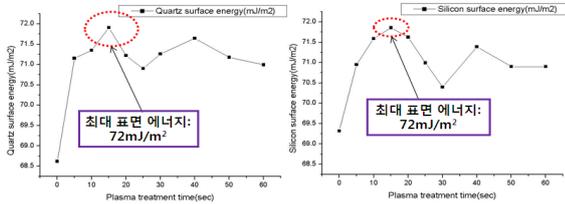
$$\gamma_{SL} = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - 2\sqrt{\gamma_{LV}\gamma_{VS}}e^{-\beta(\gamma_L - \gamma_S)} \quad (2-3)$$

식 (2-3)을 식 (2-2)에 대입한 후 정리하면 식 (2-4) 를 얻는다.

$$\gamma_{SV} = \frac{\gamma_{LV} \times (1 + \cos\theta)^2}{4} \quad (2-4)$$

( $\gamma_{SV}$ : 고체의 표면에너지,  $\gamma_{LV}$ : 액체의 표면에너지,  $\theta$ : 접촉각)

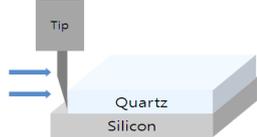
수정과 실리콘 각각의 표면에너지는 그림 5에서 볼 수 있듯이  $O_2$  플라즈마를 15초 처리한 경우 표면 에너지가  $72 \text{ mJ/m}^2$ 로 가장 크게 계산되었다.



**<그림 5> 플라즈마 처리 시간에 따른 수정(좌)과 실리콘(우)의 표면 에너지 변화**

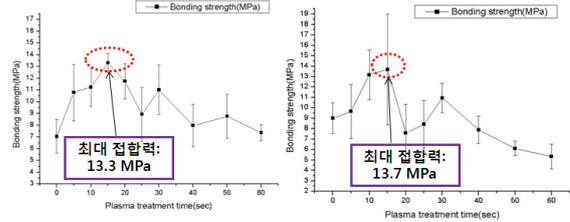
### 2.3 접합력 측정

플라즈마 처리에 따른 표면 에너지의 경향성과 실제 접합시 접합력의 경향이 부합하는지 확인하기 위하여 그림 6과 같은 전단 시험(shear test)을 통해 실리콘/수정 접합 웨이퍼의 접합력을 측정하였다. 이 때, 접합력의 크기는 접합된 두 부분이 분리되거나, 두 부분 중 한 부분에 크랙이 가는 등 접합에 손상이 일어났을 때를 기준으로 판단하였다.



**<그림 6> Shear test 모식도**

전단 시험 방법은 한 쪽 물질(실리콘 혹은 수정)에만 전단력을 가하여 측정해야 하므로, 측정 장비의 tip이 한 쪽 부분에만 전단력을 가할 수 있도록 시험에 단차를 만들었다. 그림 7는 접합력을 측정된 결과로, 이 결과에 따르면 플라즈마 처리 시간인 15초일 때 가장 강한 접합력을 가지는 것을 알 수 있다. 플라즈마 처리를 15초한 경우가 표면 에너지가 높아 접합력이 높을 것이라는 예측과 일치하였다. 이론적인 실리콘의 파단강도는  $7.7 \text{ MPa}$ 이고 [10], 실리콘과 수정 접합시 그림 7에서 최대 접합력이  $13 \text{ MPa}$  이상이므로, 실리콘의 파단강도 이상의 접합력이 가능하다는 것을 확인하였다.



**<그림 7> 수정 면에 전단력을 가해 접합력을 측정된 결과(좌) 및 실리콘 면에 전단력을 가한 접합력을 측정된 결과(우)**

접합력을 측정하는 경우에도, 접합된 웨이퍼가 분리되기 이전 실리콘 또는 수정 웨이퍼 자체에 크랙이 생기는 등의 손상이 일어났다. 실리콘과 수정 사이 접합력이 실리콘의 파단 강도보다 높다는 것을 실험적으로도 확인하였다.

### 3. 결 론

접촉각 및 접합력을 측정하는 것을 통해 실리콘과 수정 접합시 접합력을 극대화하는 플라즈마 처리 시간에 대하여 조사하였다.  $O_2$  플라즈마 처리를 15초 하는 경우에 표면 에너지가 가장 높은 값을 가졌고, 예상한 바와 같이  $O_2$  플라즈마 처리를 15초 수행한 경우의 접합력이 가장 강하였다.  $O_2$  플라즈마 처리를 15초 동안 수행한 경우에는 실리콘과 수정 사이 접합력이 실리콘의 파단 강도보다 강하였다. 제안된 SoQ 접합 공정을 통해 수정 관성센서 제작시 실리콘 웨이퍼를 수정 웨이퍼에 접합하여 헐들링 레이어 또는 마스크로서의 이용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청 지정 국방 MEMS 특화센터의 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] David T. Chang, Frederic P. Stratton, Randall L. Kubena, Richard J. Joyce, "Optimized DRIE Etching of Ultra-Small Quartz Resonators", Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, pp.829-832, 2003
- [2] Takekazu Ujiie, Toshiaki Kikuchi, Takatori Ichiki and Yasuhiro Horiike, "Fabrication of Quartz Microcapillary Electrophoresis Chip Using Plasma Etching", Jpn J. Appl Phys, Vol. 39, pp. 3677-3682, 2000
- [3] H Chen and C Fu, "An investigation into the characteristics of red reactive ion etching of quartz using SU-8 as a mask", J. Micromech. Microeng. 18, 2008
- [4] Qin-Yi Tong, Giho Cha, Roman Gafiteanu, and Ulrich Gosele, "Low Temperature Wafer Direct Bonding", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 3, No. 1, pp.29, 1994
- [5] Gertrud Kriuter, Andreas Schumacher, Ulrich Gosele, "Low temperature silicon direct bonding for application in micromechanics: bonding energies for different combinations of oxides", Sensors and Actuators A, 70, pp.271-275, 1998
- [6] Andreas PloÈùl, Gertrud KraÈuter, "Wafer direct bonding: tailoring adhesion between brittle materials", Materials Science & Engineering R., 25, pp.1-88, 1999.
- [7] Donato Pasquariello, Mikael Lindeberg, Christer Hedlund, Klas Hjort, "Surface energy as a function of self-bias voltage in oxygen plasma wafer bonding", Sensors and Actuators, 82, pp.239, 2000
- [8] Good Robert J, Mittal, K, L, "Contact angle, wettability and adhesion", pp 28-35, 1993
- [9] Milojka Gindl, Gerhard Sinn, Wolfgang Gindl, Alexander Reiterer, Stefanie Tschegg, "A comparison of different methods to calculate the surface free energy of wood using contact angle measurement", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 181, pp.282, 2001
- [10] K. Komai, K. Minoshima and S. Inoue, "Fracture and fatigue behavior of single crystal silicon microelements and nanoscopic AFM damage evaluation", Microsystem Technologies, Vol 5, pp.30-37, 1998