

## 실리콘 웨이퍼 직접 접합에서 기포형 접합 결함에 관한 연구

문도민 · 홍진균 · 유학도 · 정해도\*

LG 실트론 연구소

\*부산대학교 기계공학부

### A study on Bubble-like Defects in Silicon Wafer Direct Bonding

Do-Min Moon, Jin-Kyun Hong, Hak-Do Yoo and Hae-Do Jeong\*

R&D center, LG Siltron Inc.

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(2000년 10월 23일 받음, 2001년 1월 8일 최종수정본 받음)

**초 록** 실리콘 웨이퍼 직접 접합을 성공하기 위해서는 양호한 접합면을 구성하여야 하며, 이를 위해 접합면에서 발생하는 주요 결함 중 하나인 기포형 접합 결함을 억제하여야 한다. 본 연구에서는 접합면에서 발생하는 기포형 결함의 상온 접합 및 열처리 과정에서 거동을 관찰하여 내부의 압력이 증가함을 직접 관찰할 수 있었다. 또한, 대기압 하의 열처리에서 결함이 발생하지 않는 SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 접합 웨이퍼가 진공에서의 열처리에서 결함이 발생하는 현상을 통해 기포형 결함의 내부 압력과 성장과의 관계를 실험을 통하여 증명할 수 있었다.

**Abstract** The success of SDB (silicon wafer direct bonding) technology can be established by bonding on the bonded interface with no defects and preventing temperature dependent bubbles. In this research, we observed the behavior of the intrinsic bubbles by transmitting the infrared light and the increase of the bubble pressure was found. And, the SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> bonded wafer was achieved, which generates no intrinsic bubbles in the annealing under the atmospheric pressure. The intrinsic bubbles in the SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> bonded wafer were generated in the annealing in the ultra high vacuum. This experimental result shows the relation between the bubble growth and the pressure.

**Key words** : SDB(Silicon Wafer Direct Bonding), intrinsic bubble, bubble pressure, bubble growth

### 1. 서 론

반도체 공정기술을 이용한 실리콘 웨이퍼의 마이크로 가공기술에서 실리콘 웨이퍼 직접 접합기술은 두 장의 실리콘 웨이퍼를 어떠한 접착성 물질없이 상온에서 접합하는 기술로 전자 소재 및 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 제조 공정에서 널리 활용되어질 것으로 기대되고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 기존 실리콘 웨이퍼의 한계를 극복할 대안으로 부각되고 있는 SOI (Silicon On Insulator) 웨이퍼 제조 공정의 핵심기술로 직접 접합 기술이 채택되어지고 있다. SOI 웨이퍼는 산화막 (SiO<sub>2</sub>) 층 위에 단결정의 실리콘 박막이 올려져 있는 샌드위치 구조로 이루어져 있다. 이러한 구조는 소자 영역이 기판으로부터 완전히 분리되어 원하지 않는 기판의 기생 효과를 방지할 수 있으며, 또한 접합면적 감소에 따른 기생 정전 용량 감소, well 구조의 제거를 통한 집적도 향상 등의 장점으로 고속화, 저전력화, 고집적화에 대응할 수 있는 차세대 반도체 재료이다.<sup>3)</sup>

SOI 웨이퍼 제조 방법중 하나인 SIMOX (Separation by Implanted OXygen) 법은 실리콘 웨이퍼에 산소 이온을 주입하고 고온 열처리 과정을 통해 내부에 일정두께의 산화막을 형성시켜 상부 실리콘층을 분리시키는 방법이다.<sup>4,5)</sup> 그

러나, SIMOX 법은 이온 주입에 의한 손상, 장시간의 열처리 과정 및 제조할 수 있는 SOI층 및 매몰층 산화막 두께가 한정적인 단점을 지니고 있다. 이에 비해 웨이퍼 접합에 의한 제조법은 완벽한 결정 구조를 가지는 상부 실리콘 박막과 우수한 품질의 매몰층 산화막을 제공한다. 또한 이전의 단점으로 지목되었던 박막의 SOI 웨이퍼 제조는 수소 이온 주입을 이용한 박막을 전사하는 기법들이 개발되면서 접합 방법에 의한 제작이 크게 주목받고 있다.<sup>6,7)</sup>

SOI 웨이퍼 제작 시 접합 공정의 성공 여부는 접합면에서 발생하는 버블로 불리는 기포형 결함을 제어하여 양호한 접합면을 성취하는데 달려있다. 특히 박막의 SOI 웨이퍼 제조의 열처리 과정에서 그림 1(a)의 SOI 박막의 일부가 벗겨지는 박리 현상 및 그림 2(b)와 같은 핀홀 형태의 HF 결함은 접합 공정에 의해 발생하는 SOI 웨이퍼 결함이다.

본 연구에서는 접합면에서 발생하는 기포형 결함의 상온 접합 및 열처리 과정에서의 거동을 관찰하여 내부의 압력이 증가함을 직접 관찰할 수 있었다. 또한, 대기압 하의 열처리에서 결함이 발생하지 않는 SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 접합 웨이퍼가 진공에서의 열처리에서 결함이 발생하는 현상을 통해 기포형 결함의 내부 압력과 성장과의 관계를 실험을 통하여 증명할 수 있었다.

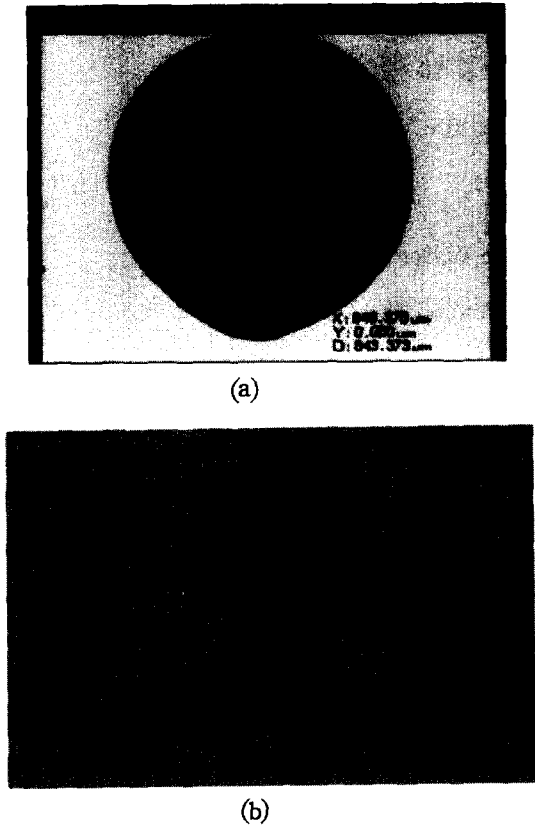


Fig. 1. Wafer bonding process induced defects on SOI wafer Flaking during annealing process Pinhole like HF defect.

2. 기포형 접합 결함

2.1 외인성 버블과 내인성 버블

접합시 발생하는 기포형 결함은 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 상온의 접합 과정에서 발생하는 외인성 (extrinsic) 버블과 접합 후 200~800℃ 온도의 열처리 과정에서 발생하는 내인성 (intrinsic) 버블로 나눌 수 있다(그림 2). 이러한 버블의 발생원인은 접합 표면의 불충분한 평탄화, 접합 시 포획된 공기, 웨이퍼 표면의 파티클, 탄화 수소계열의 물질에 의한 오염, 웨이퍼 표면의 수분 등으로 추정되어진다.<sup>8~10)</sup> 크기에 따라서, X 선에 의해 관찰되어지는 직경 500μm 이하의 X 그룹의 버블과 적외선 투과에 의해 관찰되는 1mm 이상의 IR 그룹의 버블로 나뉘어진다. 200~800℃의 열처리 과정 중에서 X 그룹의 버블은 소멸되며, IR 그룹은 성장하거나 새로 생성되어지는 것으로 알려져 있다.<sup>9)</sup>

2.2 내인성 버블의 열역학적 발생모델

열처리 과정 중에 발생하는 내인성 버블은 웨이퍼 표면에서 탈착된 가스 분자들이 모여 일정 압력 이상에 도달할 때 접합면을 파괴하며 성장할 때, 적외선에 검출가능한 크기의 버블로 성장하게 된다. 그러나, 이러한 접합면의 파괴가 진행되지 못하면 작은 크기의 버블은 열처리 과정에서 소멸되어진다. 이러한 버블의 거동을 정성적으로 설명하기 위한 열역학적 모델은 아래와 같다.<sup>9)</sup>

버블의 성장을 위한 임계 반경  $r_{crit}$ 을 계산하기 위해 버블

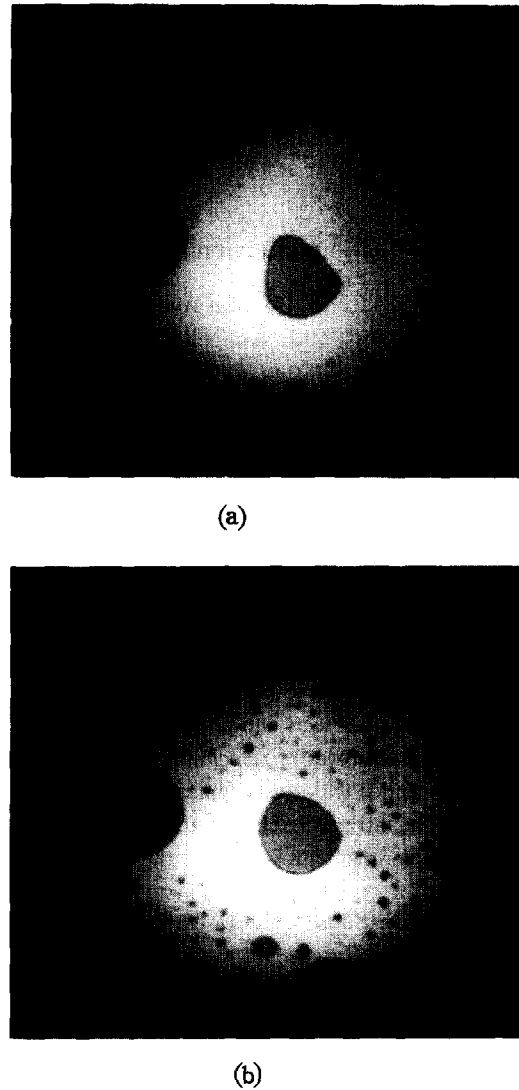


Fig. 2. Infrared topograph image of bubbles (a) Extrinsic bubbles after bonding at room temperature (b) Intrinsic bubbles after annealing at 600℃ for 1hr

내부와 외부의 압력차  $\Delta p$ 를 포함하는 자유에너지 변화량  $\Delta G$ 를 이용하며, 버블의 체적  $V_{bubble}$ 은 반지름  $r$ 을 가지며 높이가  $2h$ 인 타원형의 단면 형상으로 가정하고  $1/2 \sim 1/3$ 의 값을 가지는 기하학적 형상계수  $\alpha$ 를 고려하면 아래와 같다.

$$V_{bubble} = 2\pi\alpha r^2 h \tag{1}$$

버블의 높이  $2h$ 는 버블 내부와 외부의 압력차  $\Delta p$ , 탄성 계수  $E$  및 프와송 비  $\nu$ 와 다음의 관계를 가진다.

$$h = \frac{\Delta p r^4}{64 E r^3} \tag{2}$$

$$D = \frac{12(1-\nu)^2}{12(1-\nu)^2} \tag{3}$$

내인성 버블의  $\Delta G$ 는 체적 증가에 따른 감소, 단위면적당 표면에너지  $\gamma$  및 탄성 변형 에너지의 합에 의해 아래와 같이 계산되어진다.

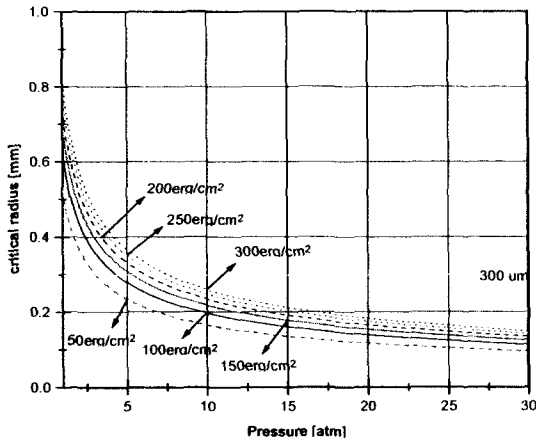


Fig. 3. Critical radius vs pressure of bubbles based on (5) [1~30atm] When the interface surface energy increases, the critical radius of bubble increases and bubbles are harder to nucleate

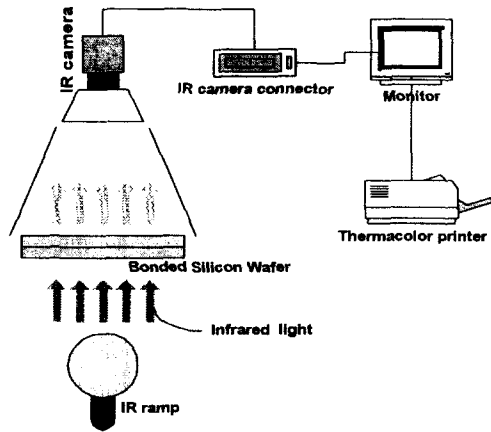


Fig. 4. Infrared topograph system for bonded wafer

$$\begin{aligned} \Delta G &= -\Delta q V_{bubble} + \pi \gamma r^2 + 2E_{elastic}(\tau, \Delta p) \\ &= -\frac{\pi \alpha \Delta p^2 r^6}{64D} + \pi \gamma r^2 \end{aligned} \quad (4)$$

버블 성장의 임계 반경의 크기  $r_{crit}$ 는  $\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 0$ 의 조건에서 아래의 식과 같이 계산된다.  $r < r_{crit}$ 인 경우 bubble은 성장하지 못하고 수축되며,  $r > r_{crit}$ 인 경우 버블은 성장할 수 있게 된다.

$$r_{crit} = \left( \frac{16\gamma Et^3}{9\alpha(1-\nu^2)\Delta p^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

그림 3은 식 (5)에 대해 접합 웨이퍼의 표면 에너지가 50~300erg/cm<sup>2</sup>인 경우, 압력의 변화에 따른 bubble 성장의 임계 크기인  $r_{crit}$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림 3에서 버블의 반경이 곡선의 아래에 위치하면 버블은 성장할 수 없으며, 반대로 곡선의 위쪽에 위치하면 성장이 가능하게 된다. 열처리 과정에서 살펴보면 열처리 온도가 올라가면 표면 에너지가 증가하여, 임계 반경의 크기가 커지므로 버블의 성장이 힘들어지게 되지만, 버블 내부의 압력도 증가하게 되어 임계 반경이 작아져 성장이 쉬워지게 된다. 즉 열처리

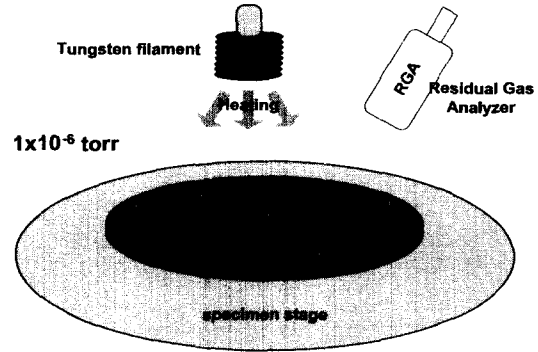


Fig. 5. Experimental setup for annealing in vacuum and analyzing released gases

온도에 따른 표면에너지와 내부 압력의 변화에 따라 버블의 성장 조건은 결정되어 진다.

### 3. 실험 방법

#### 2.1 직접 접합 웨이퍼의 제작

본 연구에서는 (100) 결정 방향을 가지는 p형의 경면 웨이퍼와 위에 1200 Å의 열산화막을 성장시킨 산화막 웨이퍼를 사용하였다. 1차로 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 부피비로 4대 1의 혼합액에 12분간 습식 세정한 후, 초순수(deionized water)로 표면의 세정 용액을 충분히 제거하였다. 1차 세정후, 불산(HF)을 초순수(H<sub>2</sub>O)에 100대 1의 비로 희석한 용액으로 1분 30초 동안 2차 세정하고, 초순수로 세정 용액을 충분히 제거하였다. 세정 후 건조는 질소 가스를 불어 1차로 건조시킨 후, 스핀 드라이어에서 다시 건조시켰다. 세정 및 건조 후, 클린룸(Class 10, 20°C)에서 웨이퍼를 접합하였다.

#### 2.2 열처리 과정

모든 접합 웨이퍼는 튜브형 열처리로에서 질소가스 분위기로 600~1000의 온도로 열처리하였다. 접합 및 열처리 후, 접합 계면의 상태는 적외선의 실리콘에 대한 투과성을 이용하여 적외선 램프 및 적외선 카메라로 구성된 검사장치를 이용하여 검사하였다(그림 4). 그리고, 내인성 버블의 압력과 성장 조건에 따른 관계를 실험적으로 규명하기 위해서 상압의 열처리에서 내인성 버블이 발생하지 않도록 SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 접합 웨이퍼를 이용하였다. 일부 웨이퍼는 1x10<sup>-6</sup> torr의 고진공에서 텅스텐 필라멘트에 전류를 흘려 복사열을 이용한 열처리를 시행하며, 이후 대기압에 질소가스 분위기로 600~1000°C 온도의 열처리하였다. 진공 열처리 상태에서 접합면에서의 확산현상을 확인하기 위해 RGA(Residual Gas Analyzer)를 이용하였다(그림 5).

### 4. 결과 및 고찰

초기 발생시 형태와 거동에 따라 내인성 버블은 크게 2가지 형태로 나눌 수 있었다. 버블에서 적외선 간섭에 의해 발생한 줄무늬 2개 이상의 상대적으로 크기가 큰 버블은 Si-Si 및 Si-SiO<sub>2</sub> 접합에서 600°C 및 진공 열처리에서 먼저 발생하였으며, 추가 열처리 시 줄무늬의 증가를 관찰할

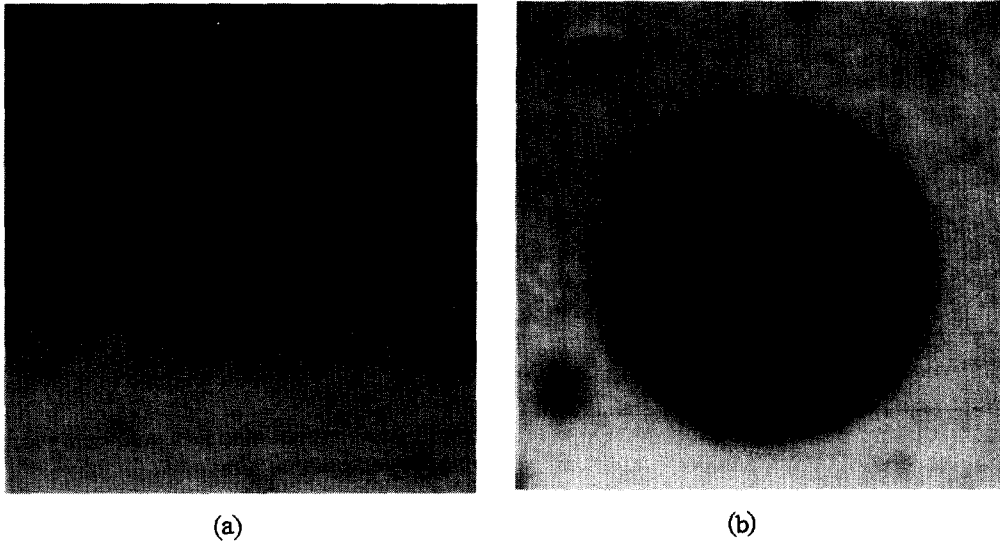


Fig. 6. Increase of fringe number after annealing in atmosphere (a) After annealing at 600°C for 1hr (b) After annealing at 800°C for 1hr

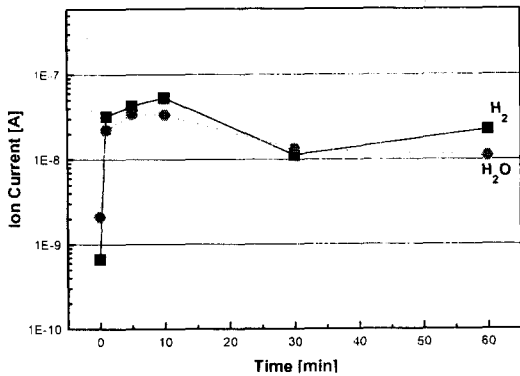


Fig. 7. Released gas amounts depending on vacuum annealing durations

수 있었다(그림 6). 상대적으로 작은 크기의 버블은 900°C 이상의 열처리에서는 모두 소멸하였다. 적외선 이미지에서 줄무늬의 증가는 적외선에 대해 렌즈처럼 작용하는 버블의 곡률이 열처리 과정에서 작아졌음을 의미하며, 내부의 압력이 증가하여 버블의 높이가 높아진 것이다.

접합 웨이퍼의 진공 열처리에서 접합면에서의 확산현상을 RGA를 이용하여 관찰하였다. 그림 7은 진공에서 열처리 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 초기 상태에서 열처리 시작 시, 급격하게 수소와 물분자가 배출되는 것을 확인할 수 있었다. 초기의 이러한 급격한 변화는 접합면에서 확산뿐만 아니라, 웨이퍼 표면에 흡착되어 있는 분자들이 탈착하면서 큰 변화를 보인 것으로 사료되어진다. 이후, 시간이 경과함에 따라 표면에서의 탈착 효과는 무시되어지며, 순수한 접합면에서의 확산은 초기보다는 조금 감소하지만 계속 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 앞에서 언급한 실험 조건으로 접합한 SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 접합에서는 이러한 버블은 상압, 600~900°C의 열처리에서 전혀 발생하지 않았다. 이는 산화막층의 가스 흡착 효과에 의해, 탈착된 가스가 충분한 압력을 가지지 못하므로 접합면의 파괴가 이루어지지 않은 것으로 추정되어진다. 그러나, 초기 진공 열처리 과정을

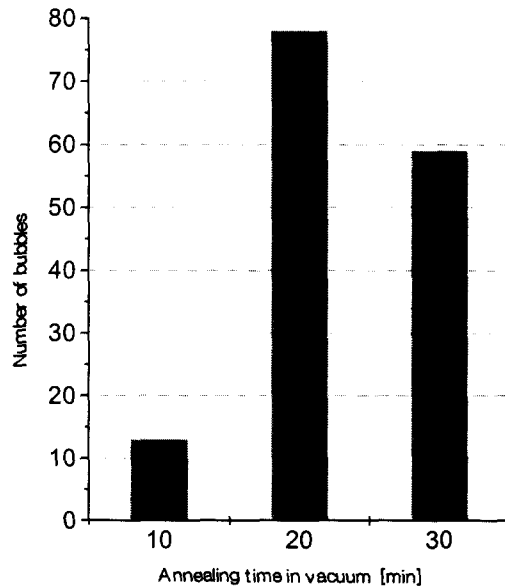


Fig. 8. Number of intrinsic bubbles after annealing in vacuum and at 600°C for 1hr in atmosphere

거쳐 600°C 열처리를 시행한 경우에는 크기가 작은 내인성 버블이 발생하였다(그림 8). 이러한 현상은 버블 내외부의 압력차  $\Delta p$ 와 성장과의 관계를 보여주는 결과이다. 즉, 진공에서 열처리를 거칠 경우, 버블 내부와 외부의 압력차  $\Delta p$ 에서 외부의 압력이 없어져 대기압 상태에서보다 1atm 커지므로 입계 반경의 크기가 더 작아지게 된다. 이러한 현상을 열역학적 모델에 적용해보면, 그림 3에서 입의 반경 300 $\mu$ m의 X 그룹 버블이 존재한다고 가정할 때, 접합면의 표면 에너지가 50erg/cm<sup>2</sup>인 경우,  $\Delta p$ 가 3atm 전후에서 4atm 전후로 1atm 증가하여도 입계 반경은 260 $\mu$ m까지 이르게 되므로, 300 $\mu$ m의 bubble은 성장할 수 있게 된다. 표면 에너지가 300erg/cm<sup>2</sup>인 경우에도 버블의 내외부 압력차가 8atm 이상이 되면 입계 반경은 300 $\mu$ m이하가 되므로 성장이 가능하다. 그러나, 이러한 버블들은 연속적으로 압

력이 증가하거나, 일정 압력 이상이 유지될 때 성장이 가능하며, 열처리가 진행되면서 접합면 사이에서 확산현상으로 압력이 감소할 경우 다시 성장을 멈추며 소멸할 수도 있다. 이러한 크기가 상대적으로 작은 내인성 버블은 주변의 표면 에너지와 내부 압력 증가의 관계에 따라 성장 및 소멸 과정을 반복하게 된다.

상대적으로 높은 온도의 열처리 후에 발생하는 것으로 여겨지는 것은 초기 성장에서는 겨우 임계 반경을 넘는 정도이며, 이후 계속적으로 성장하여 적외선에 검출될 수 있는 크기로 성장하기 때문인 것이다.

## 5. 결 론

열처리 과정에서 발생하는 내인성 버블은 온도가 올라가면 내부의 압력이 증가하는 것을 적외선 간섭에 의한 줄무늬가 증가하는 현상을 통하여 알 수 있었다. 진공 열처리 실험을 통해 접합면으로부터 확산을 확인할 수 있었으며, 기포형 결함이 없는 접합 실리콘 웨이퍼를 이용하여 진공 열처리와 대기압 하에서의 열처리 실험 결과를 통해 외부 압력 1atm의 변화에도 성장이 가능한 낮은 내부 압력 상태에서 성장이 시작됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. M.A. Schmidt, "Wafer to Wafer Bonding for Microstructure Formation", *98 Proceedings of the IEEE, Integrated Sensors, Microactuators & Microsystems*, (1998).
2. S.M. Sze, "Semiconductor Sensor", JOHN WILEY & SONS, INC, pp. 42-74. (1994).
3. Sorin Cristoloveanu. "Electriccal characterization of silicon on insulator materials and devices", Kluwer Academic Publishers, pp. 1-44, (1995).
4. K. Izumi, M. Doken, H. Ariyoshi, "CMOS devices fabricated on buried SiO<sub>2</sub> layers formed by oxygen implantation into silicon", *Electron Lett.* **14**, 593 (1978).
5. S. Cristoloveanu, S.S. Li, "Electrical characterization of silicon on insulator materials and devices", Kluwer Academic, Boston (1995).
6. M. Bruel, "Silicon on insulator material technology", *Electron. Lett.*, **31**, 1201 (1995).
7. Xiang Lu, S. Sundar Kumar Iyer, Chenming Hu, Nathan W. Cheung, Jing Min, Zhineng Fan, Paul K. Chu, "Ion cut silicon on insulator fabrication with plasma immersion ion implantation", *Appl. Phys. Lett.* **71**, 19 (1997).
8. K. Mitani, Volker Lehmann, R. Stengl, D. Feijoo, U. M. Gosele, H.Z. Massoud, "Cause and Prevention of Temperature-Dependent Bubbles in Silicon Wafer Bonding", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. **30**, 4 (1991).
9. K. Mitani, U.M. Gosele, "Formation of Interface Bubbles in Bonded Silicon Wafers: A Thermodynamic Model", *Appl. Phys. A* **54** (1992).
10. Q. Y. Tong, G. Kaido, L. Tong, M. Feiche, F. Shi, J. Steinkircchner, T.Y. Tan, U. Gosele, "A Simple Chemical Treatment for Preventing Thermal Bubbles in Silicon Wafer Bonding", *J. Electrochem. Soc.* vol. **142**, 10 (1995).