

실리콘 웨이퍼 직접접합에서 내인성 Bubble의 거동에 관한 연구

문도민*, 정해도**

The Behavior of Intrinsic Bubbles in Silicon Wafer Direct Bonding

Do-Min Moon*, Hae-Do Jeong**

ABSTRACT

The bonding interface is dependent on the properties of surfaces prior to SDB(silicon wafer direct bonding). In this paper, we prepared silicon surfaces in several chemical solutions, and annealed bonding wafers which were combined with thermally oxidized wafers and bare silicon wafers in the temperature range of 600~1000°C. After bonding, the bonding interface is investigated by an infrared(IR) topography system which uses the penetrability of infrared through silicon wafer. Using this procedure, we observed intrinsic bubbles at elevated temperatures. So, we verified that these bubbles are related to cleaning and drying conditions, and the interface oxides on silicon wafer reduce the formation of intrinsic bubbles.

Key Words : Bonding Interface (접합 계면), SDB:silicon wafer direct bonding (실리콘 웨이퍼 직접 접합), Thermally Oxidized Wafer (열산화막을 성장시킨 웨이퍼), Infrared Topography System(적외선 접합 계면 검사 시스템), Intrinsic Bubble (내인성 버블)

1. 서론

최근의 전기·전자, 반도체, 광학 관련 기기 및 부품은 신소재를 채택하고, 고기능화되어가며, 3차원 형상으로 복잡화되면서 종래의 기계적 가공에 의한 고정밀·고능률 가공을 기대하기가 힘들어지고 있다. 근래의 이러한 여러 가지 요인으로 인해 종래의 기계적 가공방법에서 벗어난 새로운 가공법이 필요하게 되었다. 특히 반도체 공정을 이용한 극소형 센서, 마이크로 액추에이터 등의 정밀 가공 기술은 가공 기술의 현재를 보여주고 있다.

또한, 종래의 반도체 공정 기술에 기계공학적 기초·응용기술을 활용하여 가공 기술의 한계를 넓혀가고 있다.

반도체 공정 기술을 이용한 실리콘 웨이퍼의 micromachining은 크게 bulk micromachining, surface micromachining로 분류할 수 있다⁽¹⁾. bulk micromachining은 실리콘 웨이퍼 자체를 가공하는 것을 말하며, 등방성·이방성 식각, 실리콘 웨이퍼 접합 기술 등이 여기에 포함된다. surface micromachining은 실리콘 웨이퍼 상의 박막을 가공하는 것을 말하며, 박막의 증착 기술, 이종재료

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부

의 선택적 식각 기술 등이 포함된다. 특히, 실리콘 웨이퍼 직접 접합 기술은 개념의 단순성과 여타 공정의 응용성이 뛰어나 기존의 전기·전자 소자, 센서 및 마이크로 머신 등을 제작하기 위한 공정을 개선할 수 있을 것으로 기대되어진다.

실리콘 웨이퍼 직접 접합 기술은 두 장의 실리콘 웨이퍼를 어떠한 접착성 물질없이 접합하는 기술이며, 앞에서 언급한 바와 같이 MEMS(micro-electromechanical system) 제작의 기초 공정으로 인식되어진다^(1,2)(Fig. 1). 또한 기존의 실리콘 웨이퍼의 한계를 극복할 대안으로 대두되고 있는 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼 제조 공정의 핵심 기술이기도 하다⁽³⁾(Fig. 2).

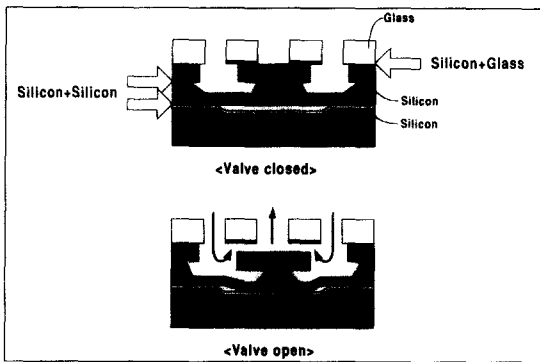


Fig. 1 Application of silicon wafer direct bonding (Electrostatically-actuated microvalve⁽⁴⁾)

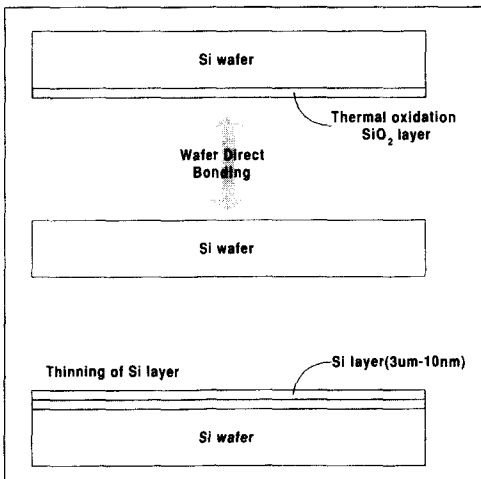


Fig. 2 Fabrication of Direct Bonded SOI wafer

이러한 실리콘 웨이퍼 직접 접합 기술이 성공적으로 이루어지기 위해서는 접합 계면의 결함이 없는 접합이 이루어져야 한다. 접합 계면에서의 결함은 접합 전 실리콘 웨이퍼 표면 조건에 따라 발생하며 void 혹은 bubble로 불리어진다. 접합시의 결함은 X-ray 및 적외선 투과에 의해 관찰된다. bubble은 발생시점에 따라 크게 상온 접합시 발생하는 외인성(Extrinsic) bubble과 200~800℃의 열처리 과정 중에 발생하는 내인성(Intrinsic) bubble로 나눌 수 있다. 이러한 bubble의 발생원인은 접합표면의 불충분한 평활화, 접합 시 포획된 공기, 웨이퍼 표면의 particle, hydrocarbon에 의한 오염⁽⁵⁾, 웨이퍼 표면의 수분⁽⁶⁾ 등으로 추정되어진다. 그리고 bubble의 크기에 따라 직경 500 μ m 이하의 X-ray 투과에 의해 관찰되어지는 X 그룹 bubble과 1mm 이상의 적외선 투과에 의해 관찰되는 IR 그룹의 bubble로 나뉘어진다⁽²⁾. 200~800℃의 열처리 과정 중 X 그룹의 bubble은 소멸되며, IR 그룹의 bubble은 성장하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 실리콘 웨이퍼 직접 접합 기술 개발을 위해 선행되어야 할 접합 계면의 결함을 제어하기 위해, 접합 조건에 따른 IR 그룹 bubble의 발생과 거동을 관찰하였다. 이를 통하여 bubble의 발생 원인과 열처리에 따른 변화를 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 웨이퍼는 (100)방향의 결정 방향을 가지는 p-type의 실리콘 웨이퍼와 1200Å의 열산화막을 성장시킨 웨이퍼이다. 웨이퍼 표면의 청정도 및 표면조건 변화를 위해 적용되어진 세정 및 건조 과정은 Fig. 3와 같다. 웨이퍼의 초기 세정은 황산(H₂SO₄)과 과산화수소수(H₂O₂) 혼합 용액을 이용하였다. 황산과 과산화수소수 혼합액을 이용한 세정은 화학적인 산화 작용을 통해 표면의 유기 오염물을 제거하게 되며, 금속원소와 같은 비유기 오염물질은 화학적 산화작용시 흡수되지 않는다⁽⁷⁾. 초기 세정후 초순수(deionized water)를 분사하여 표면의 혼합 용액을 충분히 제거한다. 초기 세정후, 표면 조건 변화를 위해 세정 조건을 두가지로 나누어 실험하였다. 첫 번째 그룹의 웨이퍼는 SC-1 (standard clean 1)으로 불리는 암모니아수(NH₄OH), 과산화수소수(H₂O₂) 및 초순수(H₂O)의 혼합 용액으로 세정하였다. 또 다른 그룹의 웨이퍼는 불산(HF)

을 초순수(H₂O)에 100대 1의 비로 희석한 용액으로 세정하였다. 각각의 세정후, 초순수로 웨이퍼 표면의 세정 용액을 충분히 제거하고, 질소 가스를 불어 건조시킨다. 건조 과정에서도 건조 조건에 따른 변화를 위해 일부 웨이퍼를 스핀 드라이어(spin dryer)에서 다시 건조시켰다. 웨이퍼 세정 및 건조 후, Class 10, 20℃의 클린룸에서 웨이퍼를 접합하였다.

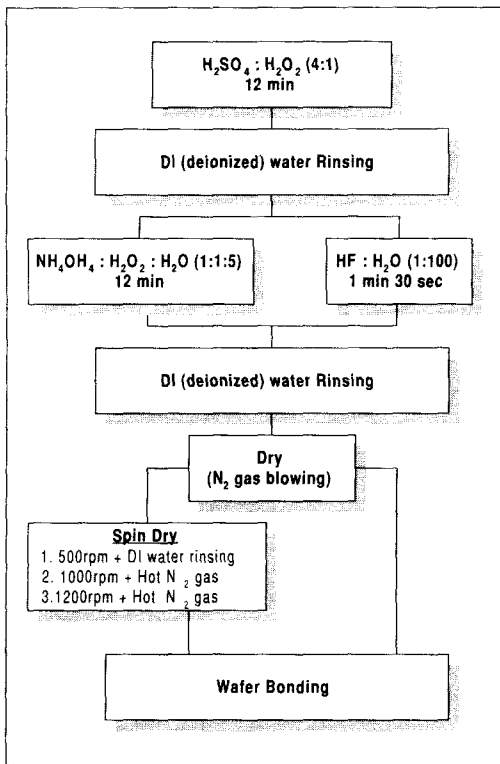


Fig. 3 Cleaning and drying process

Table 1 Wafer bonding cases

Si-Si bonding	p-type Si sub + p-type Si sub
Si-SiO ₂ bonding	p-type Si sub + 1200Å top SiO ₂ / p-type Si sub
SiO ₂ -SiO ₂ bonding	1200Å top SiO ₂ / p-type Si sub + 1200Å top SiO ₂ / p-type Si sub

Table 1의 조건과 같이 1200Å의 열산화막을 성장시킨 실리콘 웨이퍼와 bare 실리콘 웨이퍼를 조합하여 접합하였으며, 접합 후에 웨이퍼를 튜브형 furnace에서 600~1000℃의 온도에서 열처리하였다. 접합 계면의 평가는 적외선의 실리콘에 의한 투과성을 이용하여, 적외선 topography 시스템을 이용하여 관찰하였다(Fig 4). 조사된 적외선은 접합계면의 미접합부분, particle 및 bubble에서 굴절하여 간섭상인 fringe 상을 형성하게 되어, 접합 웨이퍼 전체에서 접합 결함을 검출하게 된다.

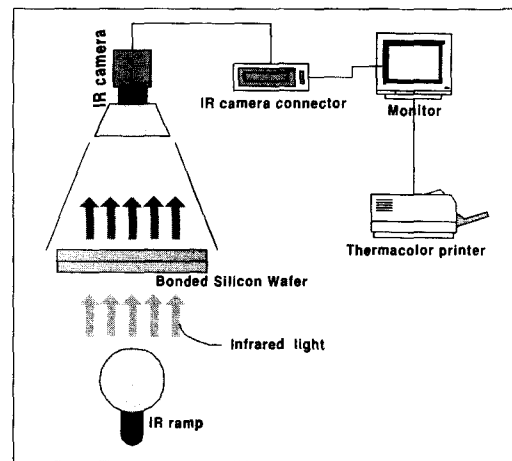


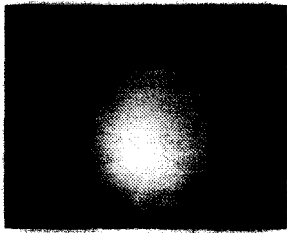
Fig. 4 Schematic illustration of the infrared topography system

3. 실험결과 및 분석

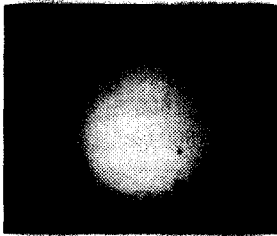
3.1 세정 및 건조조건에 따른 접합계면의 변화

상은 접합 후, 접합 계면을 관찰한 결과는 Fig. 5와 같다. SiO₂ 적외선의 투과가 Si에 비해 뛰어나지 못하기 때문에 두 장의 bare 웨이퍼를 접합한 Si-Si 접합이 비교적 밝은 상을 볼 수 있다.

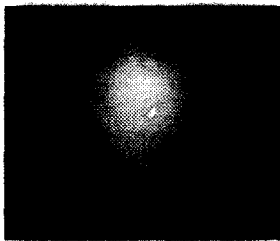
세정 조건에 따라 평가해보면, SC-1 처리보다는 HF에 의한 세정을 했을 때의 접합 계면이 더 양호하였으며, 접합시 웨이퍼의 조합에 따라 평가해보면, Si-Si 접합이나 Si-SiO₂ 접합보다는 SiO₂-SiO₂ 접합의 접합 계면이 더 뛰어남을 알 수 있다. 또한 단순한 질소 분사에 의한 건조보다는 스핀 드라이어를 이용한 추가 건조가 훨씬 더 나은 접합 계면을 얻을 수 있었다.



(a) SiO₂-SiO₂ bonding(HF cleaning/Spin Dry)



(b) Si-Si bonding(HF cleaning/Spin Dry)



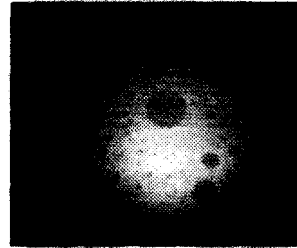
(c) Si-SiO₂ bonding(SC-1 cleaning/N₂ blowing)

Fig. 5 IR images of bonded wafers after room-temperature bonding

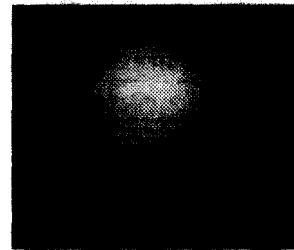
상온에서 웨이퍼를 접합한 후, 600~900℃의 범위에서 열처리하였다. 600℃ 열처리 후, 접합 계면을 관찰한 결과는 Fig. 6과 같다. 열처리 시 발생하는 내인성 bubble은 HF에 의한 세정을 한 경우보다는 SC-1 처리를 한 경우에서, 특히 스핀 드라이어를 이용한 추가 건조를 하지 않은 표면에서 더 많이 발생하였다. 그러나, HF에 의한 세정을 한 경우에서 SiO₂-SiO₂ 접합 조건에는 이후의 열처리 과정에서 외인성 bubble만이 약간 성장할 뿐, 내인성 bubble은 발생하지 않았다.

1000℃까지 열처리한 후 접합 계면을 관찰한 결과는 Fig. 7과 같다. HF에 의한 세정을 한 경우에는 열처리 과정 중 발생하는 내인성 bubble은 전부 소멸하였다. 그러나 상온 접합 시 발생하는 외인성 bubble은 소멸하지 않았다. SC-1 처리를

한 경우에는 1000℃까지 열처리했음에도 불구하고 내인성 bubble이 소멸하지 못하고 남아있었다.

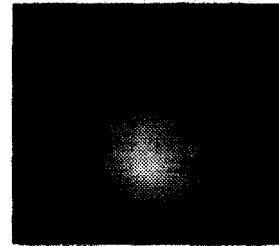


(a) Si-Si bonding(HF cleaning/Spin Dry)



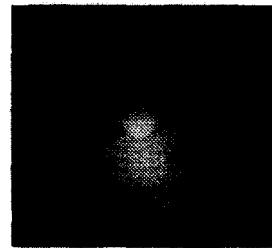
(b) Si-SiO₂ bonding(SC-1 cleaning/N₂ blowing)

Fig. 6 IR images of bonded wafer after 600℃ annealing



(a) Extrinsic bubble

SiO₂-SiO₂ bonding (HF cleaning/Spin Dry)



(b) Extrinsic and intrinsic bubble
Si-SiO₂ bonding(SC-1 cleaning/Spin Dry)

Fig. 7 IR images of bonded wafers after 1000℃ annealing

실리콘 웨이퍼 직접 접합에서 내인성 bubble의 발생 원인은 정확하게 밝혀진 바는 없으나, 웨이퍼 표면의 물분자 혹은 hydrocarbon에 의한 오염이 내인성 bubble 발생의 주원인으로 지목되고 있다. 본 실험에서는 먼저 hydrocarbon을 포함한 유기 오염 물질을 제거하기 위하여 황산(H₂SO₄)과 과산화수소수(H₂O₂)를 혼합한 용액으로 초기 세정하고, HF에 의한 세정으로 표면의 자연산화막 및 열산화막의 표면 일부를 에칭하여 새로운 순수 표면을 형성하였다. 이러한 세정 조건은 hydrocarbon, 파티클 제거를 위해 적용한 SC-1 세정 조건¹⁷⁾보다 훨씬 양호한 접합 계면을 얻을 수 있었다. 또한 질소 가스의 분사에 의한 단순한 건조 조건보다 웨이퍼를 1000rpm 이상으로 회전시키면서 약 80℃의 질소 가스를 분사하여 건조하였을 때 더 양호한 접합을 이룰 수 있었다.

특히, HF 세정 및 스핀 드라이어를 사용한 추가 건조 조건을 적용하여 SiO₂-SiO₂ 접합을 행한 경우, 열처리 과정 중에 내인성 bubble이 전혀 발생하지 않았다. 이는 접합 계면을 중심으로 양쪽에 위치한 열산화막층이 내인성 bubble의 발생을 억제하는 완충재 역할을 하는 것으로 추정되어지며, 한쪽 면만 열산화막층이 존재하는 SiO₂-Si 접합에서는 이러한 효과를 얻을 수 없었다.

3.2 내인성 Bubble의 열처리에 따른 내부 압력 상승

상온 접합 후와 열처리 온도에 따른 접합 계면을 살펴보면 열처리 온도가 상승함에 따라 불규칙한 형상의 bubble은 원형의 형태로 변화하였으며, fringe수가 1~1.5개에 정도의 작은 bubble은 열처리시 발생하는 내인성 bubble로 비교적 완전한 원형의 형태를 가지며 900℃ 이상의 열처리에서는 모두 소멸하였다. 접합 계면의 내인성 bubble은 Fig. 8과 같이 열처리 온도가 올라감에 따라 크기의 변화없이 fringe수는 증가하다가 900℃ 이상의 온도에서는 소멸하였다.

Fig. 9는 이러한 bubble의 fringe 증가를 설명한 것으로, 접합 계면에서의 bubble의 형상은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$g = R - \sqrt{R^2 - l^2} \quad (1)$$

R: bubble의 곡률
l: bubble의 반지름

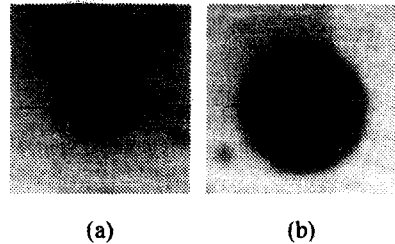


Fig. 8 Increase of fringe number with subsequent annealing at 600℃ and after additional annealing at 800℃

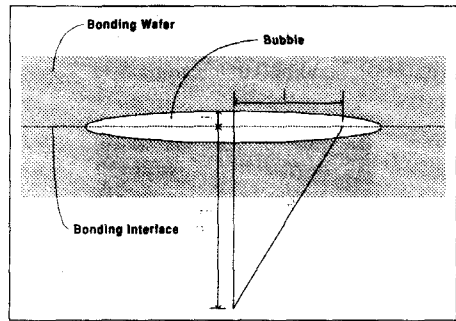


Fig. 9 Schematic of bubble at the bonding interface

bubble은 적외선에 대해 곡률 R의 렌즈 역할을 하게 된다. 파장이 λ인 적외선은 bubble의 두께 (2g)에 따른 간섭 현상을 일으켜 bubble을 통과한 후 환원의 fringe 상을 형성하게되며,

$$2g/\lambda = m \quad (m=0,1,2,3,\dots) \quad (2)$$

2g: bubble의 두께

λ: 적외선의 파장

m: bubble의 적외선 상에서 fringe의 수

이때, bubble의 형상과 bubble의 적외선 fringe와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{2}{m\lambda} \left(\frac{m^2 \lambda^2}{16} + l^2 \right) \quad (3)$$

fringe 수의 증가는 렌즈 역할을 하는 bubble 형상의 곡률이 열처리를 통해 더 작아졌음을 나타

내는 것이며, 이는 bubble 내의 압력이 열처리 온도가 상승함에 따라 증가함을 알수 있는 것이다. 또한 앞에서 언급한 불규칙한 형상의 bubble이 원형으로 변하는 것도 온도가 bubble 내의 압력이 증가하므로 일어나는 현상인 것이다. 이러한 내인성 bubble의 압력 증가는 생성 초기부터 진행되어진 것으로 추정되어지며, 초기 접합되어진 영역에서 온도가 올라감에 따라 표면에 흡착되어있던 가스 분자들이 탈착되어 접합 계면 내에서 접합력 이상의 압력에 도달하여 접합 계면 사이에 bubble이 발생하면 가스 분자들이 bubble에 계속적으로 모이면서 압력이 증가하는 것이다.

4. 결론

실리콘 웨이퍼 직접 접합이 성공적으로 이루어지기 위해서는 접합 계면의 결함이 없는 접합이 이루어져야 한다. 특히 접합계면에서 발생하는 bubble은 가장 중요한 결함 중의 하나로 본 연구에서는 세정 및 건조 조건을 변화하여 bubble의 거동을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 황산(H_2SO_4)과 과산화수소수(H_2O_2)를 혼합한 용액으로 hydrocarbon을 비롯한 유기 오염물을 초기 세정하고, HF에 의한 세정으로 표면의 자연산화막 및 열산화막의 표면 일부를 에칭하여 새로운 순수 표면을 형성하는 실리콘 웨이퍼 직접 접합을 위한 세정 과정을 얻을 수 있었으며, 질소 가스 분사에 의한 건조 조건과 스핀 드라이어를 이용한 건조 조건을 비교하여 웨이퍼 접합을 위해서는 충분한 건조과정을 거쳐야 함을 알 수 있었다.

2. 적외선의 실리콘에 의한 투과성을 이용하여, 접합계면의 bubble에서 적외선이 굴절하여 간섭상인 fringe상을 형성하게 된다. 열처리 온도가 상승에 따른 fringe 수 증가를 관찰하여 bubble 내부의 압력 증가를 실험으로 확인할 수 있었다.

3. 앞에서 언급한 세정 조건 및 스핀 드라이어를 이용한 추가 건조 조건을 적용하여 1200Å의 열산화막을 성장시킨 웨이퍼를 양쪽으로 접합한 경우, 열처리 과정 중에 내인성 bubble이 전혀 발생하지 않았다. 이러한 내인성 bubble이 발생하지 않는 접합 기술의 성공은 상온 접합 후, 1000°C 전후의 고온에서 내인성 bubble을 소멸시키는 기존의 열처리 과정을 개선하여 접합 웨이퍼의 저온 열처리 기술을 개발하는 토대가 될 수 있다.

참고문헌

1. S. M. Sze, "Semiconductor Sensors," John Wiley & Sons, pp. 42-74, 1994.
2. K. Mitani, U. M. Gosele, "Formation of Interface Bubbles in Bonded Silicon Wafers: A Thermodynamic Model," Applied Physics letter A, vol 54, pp. 543, 1992.
3. Sorin Cristoloveanu, Sheng S. Si, "Electrical Characterization of Silicon On Insulator Materials and Device," Kluwer Academic, pp. 16-22, 1995.
4. M. Mehregany, Wen H. Ko, Andrew S. Dewa, Chung-Chiun Liu, "Micro-Electromechanical Systems Course," SEMICON/WEST 95, pp. 98-99, 1995.
5. K. Mitani, V. Lehmann, R. Stengl, D. Feijoo, U. M. Gosele, H. Z. Massoud, "Cause and Prevention of Temperature-Dependent Bubbles in Silicon Wafer Bonding," Japanese J. of Applied Physics, vol 30, pp. 615, 1991.
6. M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda, T. Tanzawa J. Appl. Phys. 60, 1986.
7. Werner Kern, "Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology," Noyes, pp. 19-20, 1993.
8. J. Warren Blaker, William M. Roseblum "Optics," Macmillan, pp. 217-219, 1993.