

SiO₂ 박막을 이용한 SOI 직접접합공정 및 특성

신동운 · 최두진 · 김공호*

연세대학교 세라믹공학과

*한국과학기술연구원 세라믹스부

(1997년 12월 31일 접수)

Processing and Characterization of a Direct Bonded SOI using SiO₂ Thin Film

Dong-Woon Shin, Doo-Jin Choi and Geung-Ho Kim*

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University

*Division of Ceramics, Korean Institute of Science and Technology

(Received December 31, 1997)

요 약

SiO₂ 열산화 박막과 친수화된 단결정 실리콘 웨이퍼의 직접접합(direct bonding)을 통해 SOI(silicon on insulator)를 제조하여 Si/SiO₂ 계면에서의 실리콘 적층결함에 대하여 관찰하였다. 먼저 SiO₂ 박막에 대한 산화 거동 및 산화계면 상의 적층결함 분포를 관찰하였는데 이러한 결함은 크기에 따라 두 종류가 존재하였고, 산화 시간 및 온도가 증가함에 따라 작은 결함이 큰 결함에 포획되어 궁극적으로는 그 밀도가 감소함을 알 수 있었다. 상온에서 직접접합된 SOI를 1200°C에서 1시간 열처리하고 접합계면과 산화계면 상의 결함을 관찰한 결과, 접합이 이루어진 영역에서는 높은 밀도의 적층결함이 규칙적인 환형상 분포를 이루려는 비정상적인 거동을 관찰할 수 있었다.

ABSTRACT

SOI (silicon on insulator) was fabricated through the direct bonding of a hydrophilized single crystal Si wafer and a thermally oxidized SiO₂ thin film to investigate the stacking faults in silicon at the Si/SiO₂ interface. At first, the oxidation kinetics of SiO₂ thin film and the stacking fault distributions at the oxidation interface were investigated. The stacking faults could be divided into two groups by their size, and the smaller ones were incorporated into the larger ones as the oxidation time and temperature increased. The density of the smaller ones became critically lower eventually. The SOI wafers directly bonded at the room temperature were annealed at 1200°C for 1 hour. The stacking faults at the bonding and oxidation interface were examined and there were anomalies in the distributions of the stacking faults of the bonded region to arrange in ordered ring-like fashion.

Key words : SOI (silicon on insulator), Direct Bonding, SC-I, OSF (oxidation induced stacking fault)

1. 서 론

반도체 소자 산업의 고집적화 추세에 따라 우수한 특성의 실리콘 기판이 요구되고 있으나 현 시점에서 실리콘 웨이퍼로는 더이상 안정적인 전기적 특성을 얻을 수 없는 상태에 이르렀다. 이를 위한 해결책으로서 buried insulator에 의해 전기적으로 차단된 SOI(silicon on insulator)기판으로 기존의 실리콘 기판을 대체하는 방법이 꾸준히 검토되고 있다. 이 경우 복잡한 절연(isolation) 공정이 단순화 되어 소자의 고집적화가 가능

해지며 latch up과 같은 기생 유전(parasitic capacitance) 문제가 해결 될 수 있어 기존의 실리콘형 미세 전자 소자의 단점을 크게 개선 시킬 수 있다.¹⁾

SOI는 이미 1960년대에 hetero epitaxy를 이용한 SOS(silicon on sapphire)를 통해 실리콘 소자 연구에 사용되기 시작하였고, 이후 FIPOS(full isolation by porous oxidized silicon), ZMR(zone melting refine), ELO(epitaxial lateral overgrowth) 등의 여러 공정이 SOI의 제조에 도입되었으나 상부 실리콘층이 불완전한 구조를 갖게 되는 문제점이 있었다.²⁾ 이러한 SOI 제조

공정 중 현재까지 실질적인 응용이 이루어지고 있는 것으로는 SIMOX(separation by ion implantation of oxygen)방법과 직접접합(direct bonding) 방법이 있다. 직접접합 공정은 산화막과 친수화된 실리콘 웨이퍼를 상온에서 직접접합 시킨후 고온 열처리하고 실리콘층을 기계적 연다 및 화학적 식각을 통해 박막화하는 방법을 이용하여 SOI를 제조하는 공정으로서, buried oxide 및 소자가 구현되는 실리콘층(device layer)의 두께를 자유롭게 조절할 수 있고 SIMOX 공정의 단점인 실리콘 격자의 손상도 발생하지 않는다는 잇점이 있다.³⁾

직접접합은 친수화된 표면간의 수소결합에 의해서 발생되며 일단 웨이퍼 표면끼리 상온에서 접촉되면 표면의 silanol기(Si-OH)에 의해 접촉점으로부터 자발적인 수소결합이 일어나서 웨이퍼 전체가 접합된다. 일단 접합이 이루어지면 100~150 erg/cm² 정도의 접합강도를 갖는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 이러한 친수성 Si 표면을 얻기 위해 본 실험에서 사용한 SC-1(NH₄OH-H₂O₂-H₂O) 세정 방법은 70°C 정도로 매우 낮고 세정과 동시에 표면의 보호(passivation) 효과를 거둘 수 있다는 장점이 있다.⁵⁾ SC-1 세정의 화학적인 원리는 산화성 용해(oxidative dissolution)와 표면식각(surface etching)으로 요약될 수 있다. Itano 등은 SC-1 용액의 pH를 증가시킬수록 불순물 입자의 제거가 용이하다고 보고하였는데⁶⁾ 이는 zeta potential의 영향에 기인하는 것으로서 SC-1 표면 처리후 표면의 potential은 negative한 상태가 되는데, 불순물 입자 역시 alkaline 영역에서는 zeta potential이 음으로 하전되어 정전기적 반발력이 생기기 때문이다. SC-1 세정 처리를 거치고난 실리콘 표면은 화학적 산화에 의해서 화학산화물(chemical oxide)라 불리는 10~15 Å 정도되는 비정량적인 얇은 산화막을 형성하는데 이에 따른 표면의 보호 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾ 한편, Ohmi 등에 의하면 SC-1 세정 공정에서의 NH₄OH는 chemical oxide 표면의 거칠기(roughness)를 증가시킨다고 보고하였으며, 이는 직접접합을 방해하는 원인이 될 수 있다.⁸⁾

한편 buried insulator SiO₂를 제조하기 위하여 실리콘을 열산화할때, SiO₂와 Si의 격자 상수 차로 인해, 산화 계면에서 반응에 참여하지 않은 과잉의 실리콘중 일부가 실리콘 내부로 이동, 핵생성 위치로 이동하여, 산화계면 부근에 적층결함을 형성하게 된다.⁹⁾ 이러한 산화적층결함(OSF, oxidation induced stacking fault)은 1/3 (111) Frank 부분전위에 의해 둘러 쌓여 있는 외인성 결함으로서, 형성된 적층결함은 실리콘 격자내에서 고에너지 영역이 되므로 불순물 원자를 포집하여 전기적으로 활성화된 상태가 되어 누설전류의 증가 및 전하 축적시간 감소의 원인이 된다.¹⁰⁾ 산화적층결함은 온도

가 상승함에 따라 그 크기가 성장하지만, 임계온도 이상에서는 온도에 따라서 그 길이가 감소하며, 이러한 임계온도는 습식 열산화시 1340°C인 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 동일 산화온도에서도 산화 시간의 증가에 따라 산화적층결함의 길이는 임계 시간까지 증가하다가 그 이후에는 감소한다. 적층 결함의 성장은 결정배향에도 크게 의존하는 것으로 알려져 있으며 <100>면의 경우에 가장 쉽게 성장할 수 있는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 이러한 적층결함은 Si/SiO₂ 계면에서 실리콘에 국부적인 변형을 일으켜 소자응용시 많은 문제점을 일으키리라 예상된다.

본 연구에서는 직접접합 SOI를 실제 소자에 응용할 때 문제가 되리라 예상되는 Si/SiO₂ 계면에서의 실리콘 적층결함에 대하여 조사 하였다. 이를 위해 습식 열산화를 이용하여 SiO₂ 산화막을 제조한 후 이를 친수성 실리콘과 직접접합하여 SOI를 제조하였으며 접합계면과 산화계면에서 적층 결함이 어떠한 양상을 보이는 지를 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 예비 실험

SC-1 세정 공정은 전술한 바와 같이 용액의 pH에 따라 그 세정 효율에 차이가 나며 문헌에서 보고된 바에 따르면 pH가 10 이상인 경우가 세정에 적합한 것으로 알려져 있다.¹³⁾ 본 실험에서는 수정된 SC-1 용액을 친수

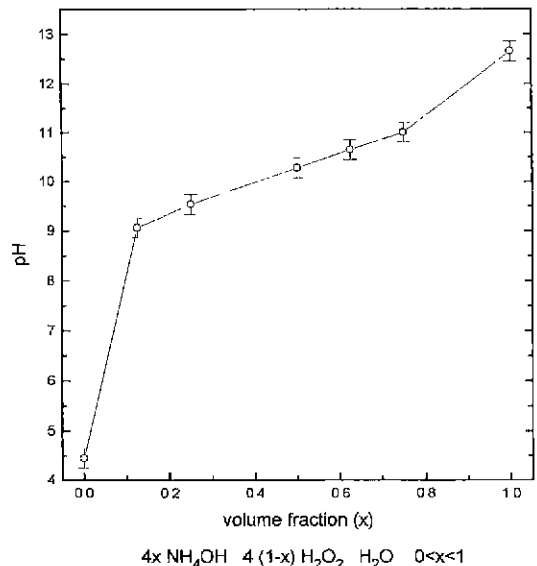


Fig. 1. The changes in pH with the variations in the compositions of modified SC-1 solution.

화에 사용하였으며 Fig. 1과 같이 용액의 조성 변화에 따른 pH 측정을 통해 적정조성인 pH 10.5~11.0의 용액을 선택하였다. 이때 NH₄OH:H₂O₂:H₂O의 부피비는 5:3:2로 하였다.

2.2. 실리콘의 열산화

비저항 1.72~2.58 ohm·cm의 *p*-type (100) Si wafer를 3.5 cm×3.5 cm 크기로 절단하여 사용하였다. 각 시편은 1,1,2,2-tetrachloroethylene, acetone, methyl alcohol, DI(de-ionized) water 순서로 세척하여 유기물을 제거한후 HF로 자연산화막을 제거하고 DI water rinse 후 dry N₂ gas로 건조하였다. 세척된 시편을 quartz tube furnace에 넣어 1000~1250°C 범위에서 50°C 간격으로 산화 시켰다. Carrier gas로는 100 sccm(standard cubic centimeter per minute)의 dry O₂를 사용하였으며, 항온조의 온도는 산소와 수증기의 분압이 1:1인 83.1°C로 고정하였다. 생성된 산화막의 두께는 He-Ne laser($\lambda=6328 \text{ \AA}$) Ellipsometer(Gaertner, L117)를 사용하여 측정하였다.

2.3. 직접접합에 의한 SOI의 제조

먼저 비저항 1.72~2.58 ohm·cm의 *p*-type (100) Si wafer를 3.5 cm×3.5 cm 크기로 절단하여 전술한 방법에 의해 1100°C에서 1시간 산화하여 산화막을 제조하였고 또다른 접합용 Si wafer를 표준 RCA 세정을 행한 후 53°C 5 NH₄OH(29 w/w%)-3 H₂O₂(30%)-2 H₂O의 수 정된 SC-1 용액으로 3분간 친수화 처리하였다. 다음으로 산화막과 친수화된 Si 표면을 (110) 방향끼리 정렬하여 겹쳐둔후 중심의 한 점에 트위저로 국부적인 압력을 가하여 초기 접합을 유도하였다. 웨이퍼 전체가 충분히 수소 결합을 이룰 수 있도록 10초간 유지한 후 고압의 N₂ blowing을 통해 잔여 수분을 제거하였다. 마지막으로 접합된 웨이퍼쌍을 200 sccm의 건식 산소 분위기로 1200°C에서 1시간 후열처리 하였다. 접합된 시료의 접합정도 및 접합계면은 각각 적외선투과 카메라와 투과 전자현미경(TEM, transmission electron microscopy)에 의해 관찰하였다.

2.4. 적층 결합의 관찰

선택식각액을 통해 Si/SiO₂ 계면에서의 실리콘 적층결합을 관찰하였다. 선택식각은 Schimmel 법을¹⁴⁾ 따랐는데 산화된 시편을 1분간 HF에 담가 산화막을 제거한 후 선택식각액에 넣어 2분간 저어주면서 식각하였으며 선택식각액으로는 0.75 M chromic acid solution(CrO₃)과 HF를 1:2로 사용하였다. 식각된 시편 표면의 적층 결합은 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실리콘의 산화거동

Fig. 2는 1000~1250°C의 온도 범위에서 시간에 따른 산화막의 두께를 도시한 것으로 Deal-Grove 식으로부터¹⁵⁾ 산화막의 두께 x_o 를 $(t+\tau)/x_o$ 대해 plot 하여 그 기울기로부터 포물속도 상수(parabolic rate constant) B를 각 산화 온도에 대해 구할 수 있었으며 그 활성화 에너지를 계산해본 결과 그 값은 90 kJ/mol로서 이는 문헌상의 값과¹⁶⁾ 잘 일치하였다.

3.2. 산화에 의한 적층결합

Fig. 3은 각 산화 온도 및 시간에 대해 광학 현미경으로 적층결합을 관찰한 결과이다. 이를 도시한 결과가 Fig. 4에 나타나 있는데, 동일한 온도에서는 산화 시간이 증가할 수록 산화 적층결합의 길이가 증가하는 경향을 관찰할 수 있으며 Fig. 3의 (d)와 같이 고온에서 장시간 산화할 경우에는 산화 적층결합의 재수축이 발생함을 알 수 있다. 습식산화 시의 적층 결합을 관찰한 결과 다음의 사실을 확인할 수 있었다. 첫째, 동일한 시료 내에서 산화 적층결합들간에 길이의 편차가 존재하며, 그 크기에 따라 크게 두 종류의 집단이 존재하였다. 이 둘 간에는 현저한 크기 차이가 관찰 되지만, 서로 크기가 유사한 산화 적층결합간의 크기는 고른 분포를 나타내었다. 둘째, 그림 13처럼 산화가 진행될 수록 큰 산화 적층결합은 그 크기가 더욱 증가하는데 반해, 작은 산화 적층결합은 점차 소멸함을 알 수 있었다. 셋째, Fig. 3의 (e)와 같이 환형 적층결합(ring-like distributed OSF)이 1200°C에서 관찰되었으며, 이는 고온에서 산화하는 동안 적층결합이 안정화 되기 위해 모여 들기 때문인 것으로 생각 된다.

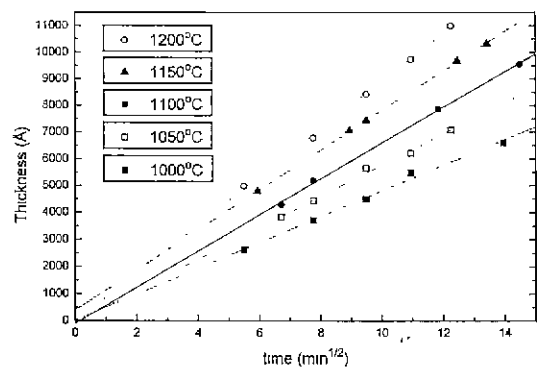


Fig. 2. Oxide thickness vs. time for wet oxidation performed in the range of 1000~1200°C with the bubbler temperature fixed at 83.1°C.

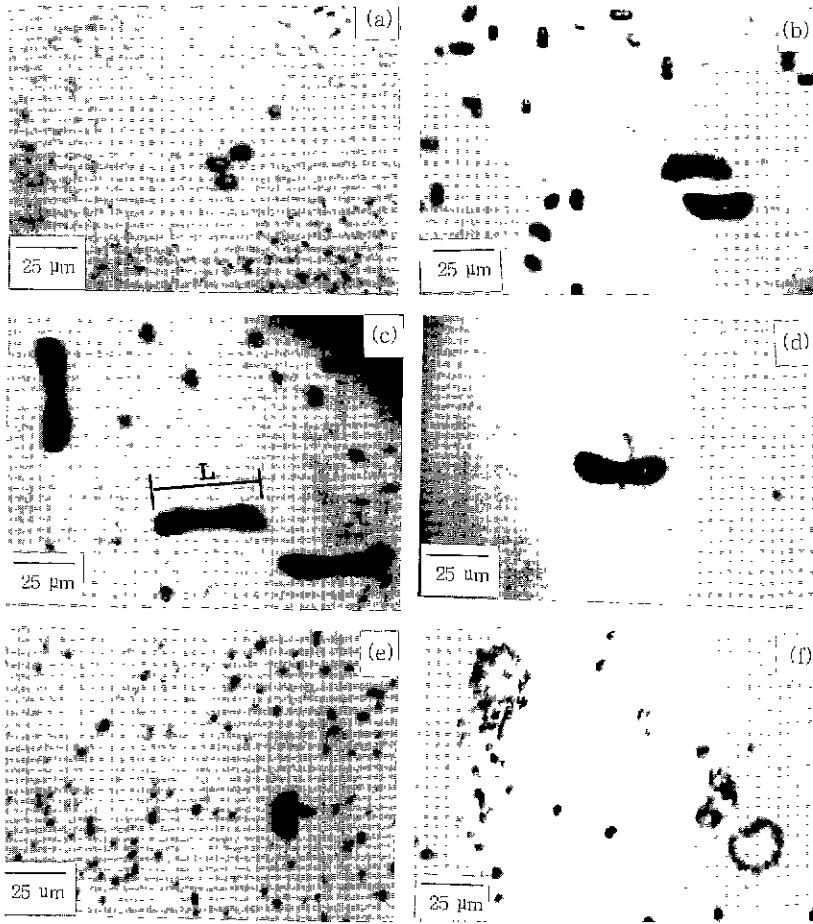


Fig. 3. The optical microscope showing the variation of OSF length with different oxidation time and temperature. (a) 1150°C 35 min, (b) 1150°C 90 min, (c) 1150°C 180 min, (d) 1150°C 210 min, (e) 1200°C 30 min and (f) 1200°C 35 min.

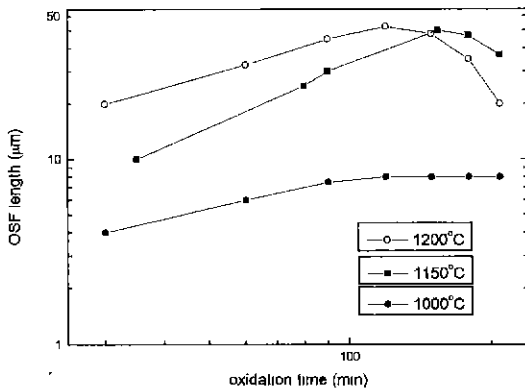


Fig. 4. The growth and retrogrowth behavior of OSF.

3.3. 친수성 실리콘의 표면특성

수정된 SC-1(5:3:2 NH₄OH-H₂O₂-H₂O) 용액으로

친수화를 시킨 silicon 표면상의 상태를 FT-IR을 통해 관찰한 결과가 Fig. 5에 나타나 있으며 비교를 위해 열산화막에 대한 FT-IR 결과를 함께 도시하였다. 이 경우 강도상의 차이는 있으나 피크가 1:1로 대응함을 알 수 있다. 파수 1070 cm⁻¹의 피크는 Si-O-Si stretching mode이고, 860 cm⁻¹의 피크는 Si-O bending mode이며, 약한 460 cm⁻¹의 피크는 Si-O rocking mode이다.¹⁷⁾ 3700 cm⁻¹에 존재하는 흡수단은 표면층의 Si-OH에 기인한 것이다. 파수 620 cm⁻¹의 피크는 기판의 Si-Si 결합에서 기인한 것이다.¹⁸⁾ 이로 부터 친수화된 실리콘 표면에는 silanol(-OH)기와 siloxane(Si-O-Si)기가 병존한다는 사실을 알 수 있었고 따라서 친수화된 실리콘 표면에는 화학반응에 의해 생성된 산화막이 존재한다는 사실을 알 수 있었다. 대기 및 건식 산소 분위기에서 생성된 일반적인 자연산화막이 소수성을 갖는 데 반해 화학산

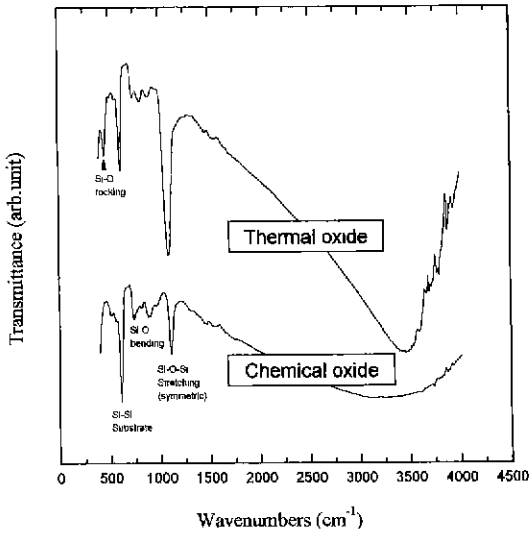


Fig. 5. FT-IR transmission spectra of the thermal oxide and the chemical oxide formed by SC-1 solution.

화막이 친수성을 갖는 이유는 전자의 경우 수소에 의해 표면이 덮이게 되는데¹⁹⁾ 비해 후자의 경우에는 -OH기에 의해 표면이 덮이기 때문이라 생각된다.

한편 웨이퍼 표면 거칠기가 클 경우는 직접접합이 효과적으로 일어날 수가 없는데 SC-1 용액의 경우 NH₄OH 용액에 의한 산화막의 식각작용이 보고되고 있기 때문에 본 실험에서 생성된 화학산화막의 거칠기를 AFM (atomic force microscope)으로 측정하였으며 그 Rms (root mean square roughness) 값은 6.2 Å이었다. 이는 SC-1 용액의 경우 NH₄OH는 산화막에 대한 식각작용을 갖는데 반해 H₂O₂는 실리콘에 대한 산화작용을 갖기 때문에 실리콘 표면상의 산화막이 반복적으로 산화-식각됨에 따라 실리콘의 거칠기가 증가하기 때문이라 생각된다. 또한 본 실험에서 산화막의 거칠기는 1.9 Å으로서 이는 접합이 가능한 표면 거칠기의 상한인²⁰⁾ 10 Å 보다 작은 값이었다.

3.4. 직접접합 특성

Fig. 6은 접합된 웨이퍼쌍에 대하여 적외선을 투과시켜 접촉이 이루어지지 않은 영역을 관찰한 것으로서, 세 시편 모두가 1100°C에서 1시간 열산화시켜 실리콘 웨이퍼와 접합한 뒤 이를 1200°C에서 후열처리하여 제조된 것이다. 이때 미접촉영역은 공극(void)의 높이 편차에 따른 빛의 간섭 현상으로 인해 간섭띠를 나타내고 있다. 시편의 열처리 조건이 동일함에도 접합 면적이 상이한 것으로 볼 때 초기의 상온 접합이 최종적인 접합면적에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 시편에

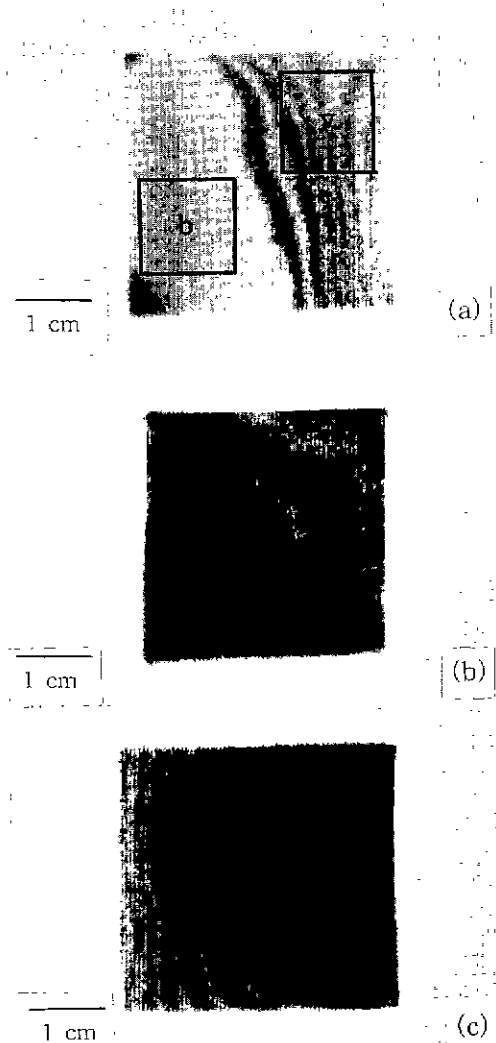


Fig. 6. Void detection by Transmission IR camera. The fringes of Newtonian ring suggest unbonded area (void) in the region. Symbol 'v' and 'b' in the figure stand for the void region and the bonded region respectively. Specimen (a), (b) and (c) were all fabricated under the same annealing conditions of 1200°C, 1 hr.

대해 반복하여 재열처리를 행하더라도 접촉 영역은 크게 증가하지 않았으며, 따라서 열처리를 장시간 행할 경우에도 미접합된 영역을 제거할 수 없음을 유추할 수 있었다. Fig. 7은 SOI 구조에 대한 투과전자현미경에 의한 명시야상으로서 가운데의 흰 선이 SiO₂ 산화막이고 그 양쪽으로 Si/SiO₂ 계면이 위치하고 있는데 직접접합에 의한 접합계면과 산화막의 산화계면 모두가 평탄한 계면을 이루고 있음을 알 수 있었다.

3.5. 직접접합시의 적층결함

접합된 wafer쌍을 HF에 담가 debonding 시킨 후, 이



Fig. 7. Bright field TEM image of the SOI structure.

를 전술한 Schimmel Etch법을 이용하여 선택 식각한 후 적층결함을 관찰하였다. 이를 위해 전술한 방법으로 제조한 SOI 시편을 사용하였으며, 관찰할 대상 영역은 Fig. 6(a)와 같이 선택하였다. Fig. 8의 (a)~(f)는 산화계면과 접합계면 상에서의 접합 및 미접합 영역(void)에 대해 적층 결함을 광학 현미경으로 관찰한 것으로, Fig. 8의 (a)와 (e)에서 알 수 있듯이 산화계면과 접합계면 두 경우 모두, 접합영역에서는 결함이 규칙적으로 모이는 경향이 있으며, 현형으로 적층결함을 형성하려는 경향이 있음을 알 수 있다. 이러한 적층결함의 특이한 거동은 박막이 자유롭게 노출된 미접합된 부분과는 달리 접합된 부위에서는 박막의 상하 평면 모두가 기판에 의해 구속되어 구조적인 제약이 걸림에 따라 극부적인 응력이 생성되고 이에 따라 응력 완화를 위해 고온에서 생성된 점결함이 응력에 따른 이동현상(stress induced

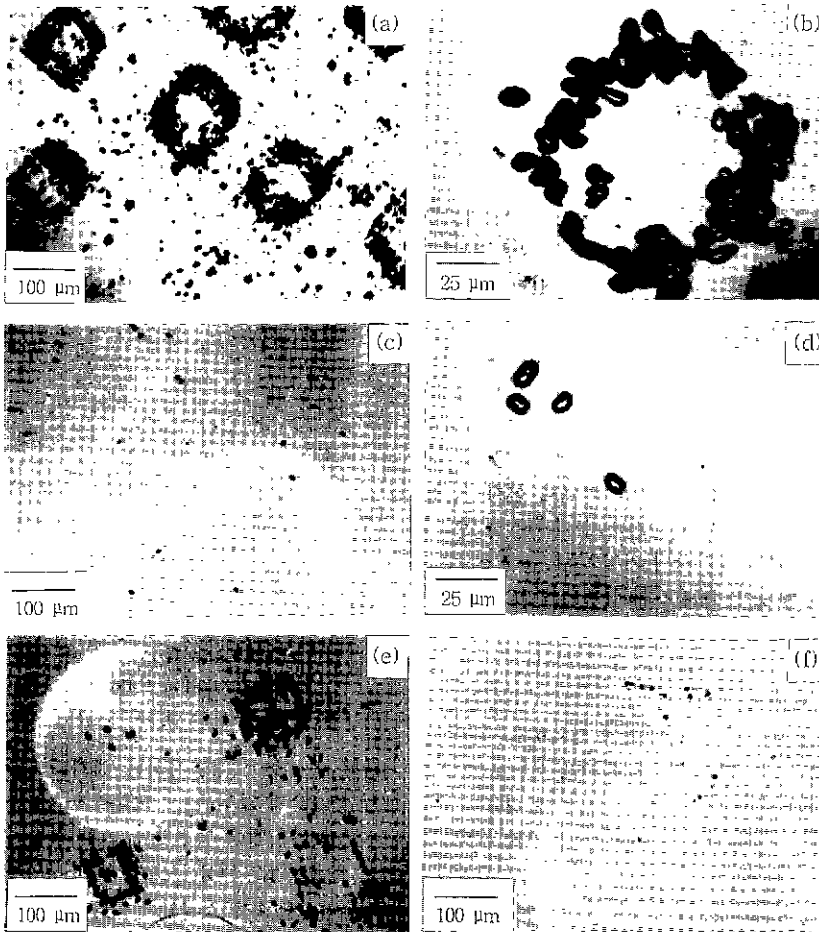


Fig. 8. The distributions of the stacking faults in SOI wafer. (a) At the oxidation interface (bonded region), (b) The magnified image of (a), (c) At the oxidation interface (void region), (d) The magnified image of (c), (e) At the bonding interface (bonded region) and (f) At the bonding interface (void region).

migration)을 일으키기 때문인 것으로 생각된다. 이때, 고온의 열처리 과정에서 Si 내부의 용존 산소에 의한 산화 석출물이 형성될 경우 그 주위로 적층 결함이 응집 (gettering)될 가능성이 매우 크며, 그 결과 이러한 환경의 적층 결함이 생긴 것으로 생각된다. 이는 대직경의 CZ(Czochralski) 웨이퍼의 경우 고온 열처리시 적층결함의 원형 분포가 관찰되며 이 경우 적층결함환의 중심에 산소 석출물이 존재한다는 기존의 보고와도²¹⁾ 일치한다. 이와는 달리 미접합 영역에서는 관찰된 결함이 일반적인 산화 공정시 관찰되는 적층결함과 크게 다르지 않음을 알 수 있었고 결함의 밀도도 접합 영역에 비해 현저히 작음을 알 수 있었는데 이는 열처리중 미접합 영역의 틈새로 산소원자가 공급되어 지속적으로 산화가 일어나기는 하지만 1200°C의 고온에서 열처리를 함에 따라 미접합된 공간을 통한 지속적인 산화와 산화 적층결함의 재수축이 일어났기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

직접접합법으로 제조한 SOI에서 Si/SiO₂ 계면의 실리콘 적층 결함을 관찰하여 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 1000~1200°C에서 습식 열산화 공정을 행한 후 Schimmel Etch와 광학 현미경을 통해 산화에 의한 적층 결함의 성장 및 분포를 관찰한 결과 동일한 온도에서는 산화 시간이 증가할수록 산화 적층결함의 길이가 증가하였고, 고온에서 장시간 산화할 경우에는 산화 적층결함의 재수축이 발생함을 알 수 있었다. 또한 결함은 그 크기에 따라 두 가지 종류가 존재하며, 산화 시간 및 온도가 증가함에 따라 작은 결함이 큰 결함에 포획되어 그 밀도가 현저히 낮아짐을 알 수 있었다.

2. SOI를 제조하기 위해 친수화된 Si와 SiO₂ 열산화 박막을 직접접합 시켜 1200°C에서 1시간 열처리하였으며, 접합계면에 접촉 영역과 비접촉 영역이 존재함을 투과형 IR camera로 관찰 할 수 있었다.

3. 화학적 식각을 통해 산화막을 제거하고 접합계면과 산화계면 상의 결함을 관찰한 결과, 동일한 계면상에서도 접촉 영역과 비접촉 영역은 적층결함의 분포 거동이 상이하게 나타남을 알 수 있었다. 접촉 영역에서는 높은 밀도의 적층결함이 규칙적인 환형상 분포(ring-like distribution)를 이루려는 거동이 관찰된 반면, 비접촉 영역에서는 산화 공정상에서 일반적으로 관찰되는 직선적 배향의 적층결함 분포 거동이 관찰되었다.

감사의 글

이 논문은 1997년도 교육부 학술연구조성비(신소재

분야)에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. A. K. Sharma, *Semiconductor Memories: Technology, Testing and Reliability*, IEEE press, New York, NY, 1997.
2. J. P. Colinge, *Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI*, pp. 38-52, Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, The Netherlands, 1991.
3. W. P. Maszara, "Silicon-On-Insulator by Wafer Bonding: A Review," *J. Electrochem Soc* **138**(1), 341-347 (1996).
4. Q. Y. Tong, U. Goesele, *et al.*, "The Role of Surface Chemistry in Bonding of Standard Silicon Wafers," *J. Electrochem. Soc.*, **144**(1), 384-389 (1997).
5. S. M. Sze, *ULSI Technology*, pp. 63-64, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1996.
6. M. Itano, W. Kern, Jr. *et al.*, "Particle Removal from Silicon Wafer Surface in Wet Cleaning Process," *IEEE Transact. Semicon. Manufact.* **6**(3), 258-267 (1993).
7. Werner Kern, *Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology, Science, Technology, and Applications*, pp. 20, NOYES Publications, Park Ridge, NJ (1993).
8. T. Ohmi, M. Miyashita, *et al.*, "Dependence of Thin Oxide Films Quality on Surface Microroughness," *IEEE Transact. Elec. Dev.* **39**(3), 537-544 (1992).
9. S. T. Dunfam and J. D. Plummer, "Point Defect Generation During Oxidation of Silicon in Dry Oxygen I. theory" *J. Appl. Phys.* **59**(7), 2541-2550 (1986).
10. K. V. Ravi, C. J. Varker and C. Volk, "Electrically Active Stacking Faults in Silicon," *J. Electrochem. Soc.* **120**(4), 533 (1973).
11. S. P. Murarka *et al.*, "Oxygen Partial-pressure Dependence of the Oxidation Induced Surface Stacking Faults in (100) Silicon," *J. Appl. Phys.* **48**(12), 5025 (1977).
12. Bernard Leroy, "Kinetics of Growth of the Oxidation Stacking Faults," *J. Appl. Phys.* **50**(12), 7996-8005 (1979).
13. S. M. Sze, *ULSI Technology*, pp. 65, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1996.
14. D. G. Schimmel, "Defect Etch for <100> Silicon Evaluation," *J. Electrochem Soc.* **126**(3), 479 (1979).
15. B. E. Deal and A. S. Grove, "General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon," *J. Appl. Phys.* **36**(12), 3770-3778 (1965).
16. B. E. Deal, "The Oxidation of Silicon in Dry Oxygen, Wet Oxygen and Steam," *J. Electrochem. Soc.* **110**(6), 527-533 (1963).
17. C. J. Brinker, G. W. Scherer, *Sol-gel Science: the Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, pp. 581, Academic Press, Boston, 1990.
18. W. C. Choi, *et al.*, "Visible Luminescence from Thermally Grown Silicon Dioxide thin Films," *Appl. Phys.*

- Lett.* **69**(22), 3403 (1996).
19. S. M. Sze, ULSI Technology, pp. 83-84, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1996.
20. Q. Y. Tong, U. Goesele, *et al.*, "A Model of Low-Temperature Wafer Bonding and its Applications," *J. Electrochem. Soc.* **143**(5), 1773-1779 (1996).
21. K. Marsden and S. Sadamitsu, "Observation of Ring-OSF Nuclei in CZ-Si using Short time Annealing and Infrared Light Scattering Tomography," *J. Electrochem. Soc.* **142**(3), 996 (1995).