

선형접합기를 이용한 Si || 1.3 μ m-SiO₂/1.3 μ m-SiO₂ || Si SOI 기판의 직접접합

송오성·이영민·이상현·이진우·강춘식*

서울시립대학교 재료공학과 *서울대학교 재료공학부

Direct Bonding of Si || 1.3 μ m-SiO₂/1.3 μ m-SiO₂ || Si SOI substrates prepared by FLA method

O. S. Song, Y. M. Lee, S. H. Lee, J. W. Lee, *C. S. Kang

Department of Materials Science and Engineering, The University of Seoul
90 Cheonnong-dong, Tongdaemoon, 130-743, Seoul, Korea

*School of Materials Science and Engineering, Seoul National University
Shillimdong, Kwanaku, 151-742, Seoul, Korea

Abstract

10cm-diameter Si(100) || 1.3 μ m-SiO₂/1.3 μ m-SiO₂ || Si(100) wafers were prepared using a fast linear annealing (FLA) equipment. 1.3 μ m-thick SiO₂ films were grown by dry oxidation process. After cleaning and pre-mating the wafers in a class 100 clean room, they were heat treated using with the FLA and conventional electric furnace. Bonded area and bond strength of wafer pairs were measured using a infrared (IR) camera and razor blade crack opening method, respectively. It was confirmed that the bonded area by FLA was around 99% and the bond strength value reached 2172mJ/m², which is equivalent to theoretical bond strength. Our result implies that thick SiO₂ SOI may be prepared more easily by using SiO₂/SiO₂ bonding interfaces than those of Si/SiO₂'s.

1. 서 론

SOI (Silicon-on-Insulator) 기판은 MOSFET 소자 하부의 누설전류를 차단하여 단순히 속도를 향상 시키고자 하는 노력뿐 아니라 MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) 분야에서도 기존 반도체 공정을 이용한 기본소재로 자리잡고 있다. 정보·통신 및 광학용 MEMS 소자 개발에 있어서 전기적

신호를 재료의 특성에 맞게 원활히 조종할 수 있어야 하는데, 접합제와 같은 중간층에 의한 물성은 전기적 신호에 역작용하므로 신중히 선택되어야 한다. 여러 중간층의 물성과 실리콘기판 자체의 도핑 안정성을 고려할 때 기존의 SIMOX, Anodic bonding 등의 방법은 각각 중간층의 열악한 물성과 실리콘 기판의 물성을 변화시킬 수 있어, 여러 SOI 기판의 제조방법 중 MEMS 용 기술로는

상기 문제점을 극복할 수 있는 직접접합법이 유망하다.

직접접합법은 접합시키고자 하는 실리콘기판을 cleaning에 의해 표면을 활성화시키고 표면의 수소결합상태를 이용하여 가접시키고 적절한 열에너지에 의해 공유결합으로 접합을 강화시키는 공정이다¹⁾. 현재 직접접합법의 문제점인 열에너지를 이용한 가열공정에서 기판쌍내의 계면에서의 기포 발생에 의한 비접합 면적의 발생현상과 기판쌍 자체의 휨현상 및 도펀트의 재분포를 적극적으로 방지하고자하는 저온접합의 요구가 커지고 있다.

이러한 배경에서 최근 500℃정도의 표면온도를 유지시키면서 고밀도 할로겐램프를 반사경으로 집속하여 기판쌍 표면을 특정온도로 주사시켜 열처리를 실시함으로써 접합시 생기는 기상불순물을 용이하게 외부로 제거하며 저온에서 접합시키는 선형가열법이 제시되었다²⁾. 선형가열법은 Si || SiO₂, Si || Si 등의 직접접합에 효과적으로 적용될 수 있다고 보고되었으나 Si || SiO₂/SiO₂ || Si의 기판쌍에는 아직 알려진 바 없다.

최근 MEMS분야에서는 미세기능성구조물을 만들기 위해 2.6μm정도의 두꺼운 SiO₂ 절연후막을 가진 SOI기판을 요구하고 있다³⁾. 2.6μm의 dry O₂로 열산화 SiO₂를 기존의 1200℃정도의 furnace에서 제작하기 위해서는 216시간 이상의 시간이 걸리는 문제점이 있다. 온도를 올려 시간을 단축하는 방법이 있지만 기판의 thermal stress에 대한 영향을 고려하고 두꺼운 후막의 정확한 두께 측정을 위한 분석면에서 어려운 점이 있기 때문에, 공정적으로 가능하다면 1.3μm의 SiO₂열산화막을 만든 후 SiO₂층간의 직접접합을 유도하는 방법의 개발이 필요하다.

본 연구는 이러한 배경에서 1.3μm의 SiO₂열산화막을 가진 두 개의 실리콘기판쌍을 선형열처리를 이용하여 표면온도 500℃에서 직접접합하고 이들의 절연층의 접합강도 및 접합상태를 확인하여 보았다.

2. 실험방법

2.1. 시편의 준비

직경 10cm의 p-type (100) 실리콘기판을 채용하였다. 열산화막을 형성시키기 위하여 O₂를 불어 넣어 주면서 dry O₂ 방법으로 두께 1.3μm의 열산화막을 실리콘 기판 전면에 성장하였다. 완성된 열산화막의 두께는 Ellipsometer로 확인하였다.

직경 10cm의 p-type (100) 실리콘 기판과 준비된 SiO₂/Si 기판 모두 H₂SO₄:H₂O₂=1:4인 SPM (Sulfuric Peroxide Mixture)와 초순수를 이용하여 세척하고 스핀건조기로 건조시켰다. 건조 후 즉시 30분내에 실온에서 SiO₂상부층을 서로 마주보게 하고 접촉시켰다. 접촉된 기판의 계면은 계면의 수소결합으로 계속 접합상태를 유지하였다.

본 연구에 사용된 선형가열장비 (FLA: Fast Linear Annealing)는 할로겐램프의 선형열원을 반사경으로 시편 표면에 집속하고 특정속도로 표면부를 주사하여 열처리하도록 설계되었다. Fig. 1에 본 연구에서 사용된 FLA 장비를 도식적으로 나타내었다. 그림과 같이 본 장비는 반타원형으로 된 길이 200mm 반사경과 그 내부의 초점에 할로겐 램프가 위치하고, 반사경 전체는 일정속도로 램프길

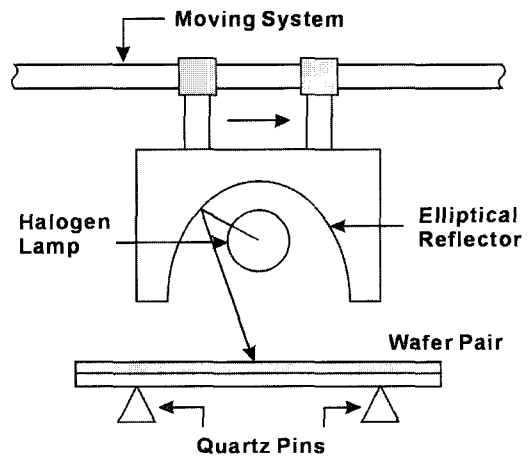


Fig. 1. Schematic illustration of the Fast Linear Annealing Equipment.

이의 수직 방향으로 이동할 수 있도록 구동장치에 연결되었다. 반타원형의 재료는 SUS304를 채용하고 반타원의 장축길이 50mm, 단축길이는 43.3mm가 되도록 설계되었다. 반사경 내부에는 수냉식 냉각 수로를 이용하여 가열도중 과열을 방지하였다. 할로겐 램프는 대기중에서도 가열이 가능하고 시편에 오염을 일으키지 않으며 투명한 quartz 챔버를 이용하면 분위기 및 진공환경에서도 같은 표면처리를 수행할 수 있는 잇점이 있다. 그림에서와 같이 제 1초점의 할로겐 램프에서 발생한 빛은 반타원형의 반사면에서 반사되어 타원의 제 2초점에 놓인 기판에 집속되도록 하였다. 본 FLA에 사용된 램프의 용량은 2kW이었고 220V의 입력전원에 연결되어 작동하였다.

선형가열은 대기중에서 실시하였다. 우선 전처리 과정으로 초기접합된 기판의 한쪽 끝에 상부의 반사경에서 반사되어 기판에 집속된 빛에 의한 선형의 고온대를 형성하여, 할로겐 램프의 입열량을 790W로 고정시키고 고온대의 온도가 정상상태에 도달하면 열원을 0.1mm/sec의 일정속도로 이동시켜 기판전역을 지나 기판 끝까지 도달할 수 있도록 하였다. 기판 끝에 열원이 도달하면 전원을 차단하고, 가열된 기판을 대기중에 공냉시켰다. 열처리 과정 중 기판상의 하부에 R-type의 열원쌍의 접점을 물리적으로 접촉시키고 최고온도를 측정하였다. 선형가열하부 측정결과 표면 최고온도는 500 $^{\circ}$ C를 유지하였다.

비교를 위해 전처리공정을 같게한 기판쌍을 전기로를 사용하여 +10 $^{\circ}$ C/min의 조건으로 승온하여 900 $^{\circ}$ C에서 2시간 동안 열처리하고 다시 -10 $^{\circ}$ C/min의 상태로 감온시켜 시편을 준비하고 선형열처리로 제작된 시편과 비교하였다.

2. 2. 접합강도 및 접합률의 측정

접합율을 측정하기 위해 비파괴 방법인 IR camera 법을 이용하였다. IR법은 적외선이 완전 접합된 곳은 투과하고 접합이 이루어지지 않은 곳

에서는 다시 반사되는 성질을 이용한 것이다⁴⁾. 이러한 IR camera의 해상도는 0.27mm 정도로 IR파장의 약 1/4에 해당된다. 기판의 접합계면의 비접합 영역은 다수의 동심원으로 구성된 프린지를 나타낸다. 이러한 프린지를 이용하여 접합부와 명암도가 다른 어두운 부분의 비접합부를 확인할 수 있게 된다. 전체기판을 촬영한 IR 이미지를 Image ProTM 소프트웨어를 이용하여 정확하게 접합률을 확인하였다.

접합강도를 측정하기 위해 Razor Blade Crack opening 법을 이용하였다. 이 방법은 W. P. Maszara 등⁴⁾에 의해 실리콘 기판에 처음으로 적용된 방법으로 실리콘 기판쌍에 면도날을 삽입하여 생성된 균열의 길이로부터 기판의 표면에너지를 산출하는 방법이다. Fig. 2와 같이 면도칼을 기판쌍의 가장자리부의 접합계면에 삽입하고 이때 생기는 크랙의 길이를 IR 카메라로 확인한 후 Eq. (1)의 식에서 계면에너지를 산출하였다.

$$\gamma = \frac{3Et_w^3t_b^2}{32L^4} \tag{1}$$

이 때 E는 기판쌍의 Young's modulus, t_w는 기판의 두께, t_b는 면도칼 두께의 반, L은 균열의 길이이다.

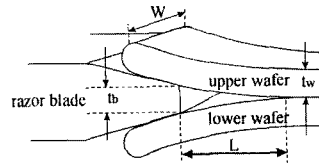


Fig. 2. Schematic illustration of Razor blade crack method.

3. 실험결과 및 토의

Fig. 3에 7개 기판쌍을 IR camera로 분석한 결과를 도시하였다. FLA로 접합된 경우 흰색 원으로 표시한 몇몇 부분의 결함을 제외하고 전반적으

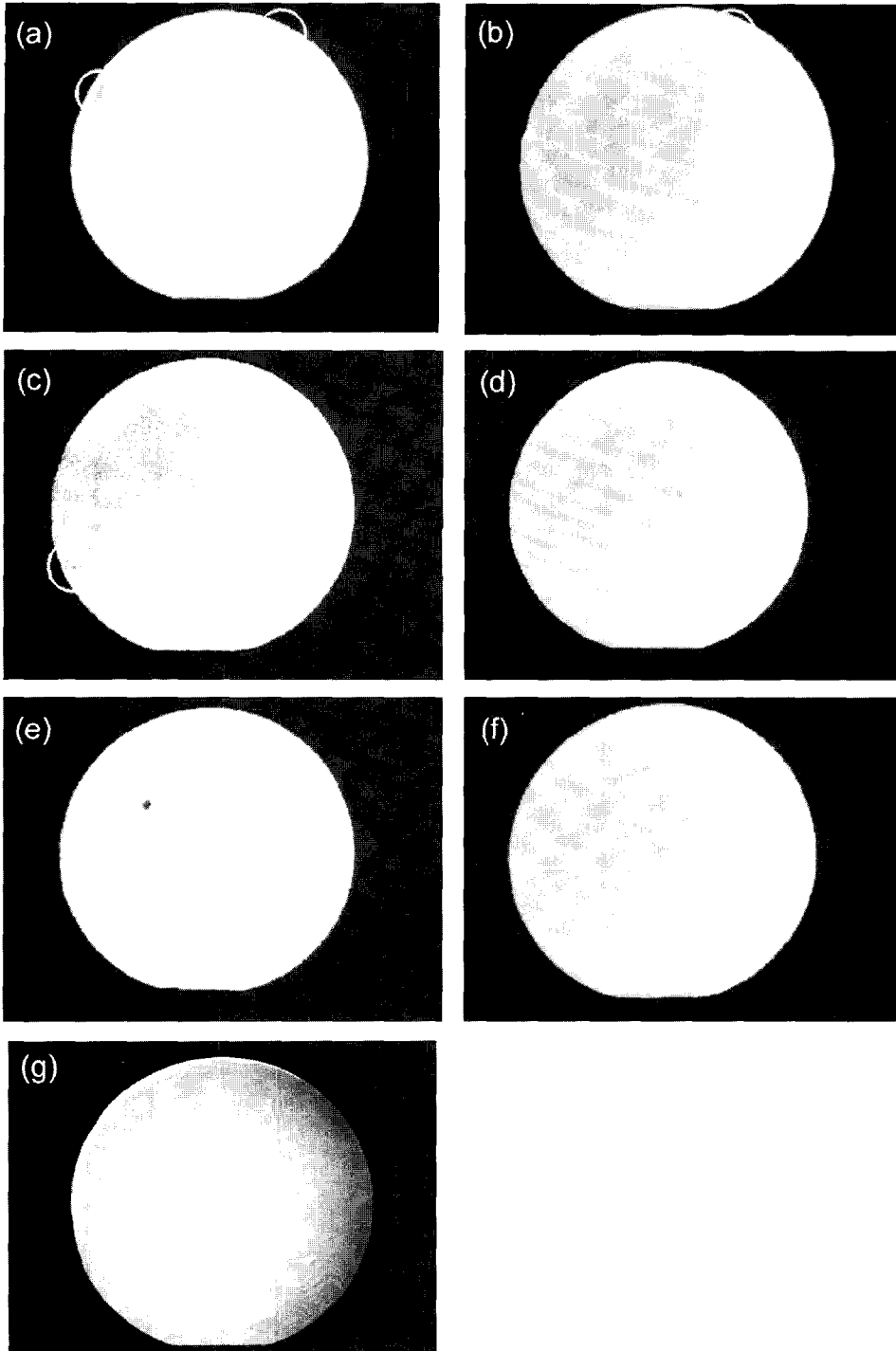


Fig. 3. IR images of Si // 1.3 μ m-SiO₂/1.3 μ m-SiO₂ // Si wafer pairs heat treated by FLA (a~f) and electric furnace (g). White circles indicate defects in wafer pairs (a~f).

로 균일한 명암을 보여 6개 시편 모두 높은 접합율을 보인다고 판단되었다. 특히 시편 (f)의 경우 내부결합 없이 완벽한 접합이 실시되었다고 판단되었다. 전기로로 준비된 기판쌍을 Fig. 3. (g)에 나타내었다. 이 경우는 상하단부에 큰 비접합면을 보여 접합면의 전면에 접합강도를 현저히 저하시킬수 있는 결함을 보인다고 예상되었다.

Fig. 4에 6개 기판쌍의 접합율을 Image ProTM 소프트웨어를 이용하여 계산한 결과를 나타내었다. 모두 99% 이상의 접합율을 확보하였다. 이는 기존의 로를 이용한 직접 접합의 90% 이상에 비하여 매우 우수한 결과이다²⁾.

반면 전기로에서 준비된 시판쌍은 약 70%의 접합율을 보여 1000℃이하의 저온열처리의 경우 2시간정도의 단시간 공정으로 내부기포의 제거 및 비접합부의 개선이 매우 불리함을 확인하였다.

Fig. 5에는 6개 기판쌍의 접합강도를 Crack opening법으로 측정된 결과를 나타내었다. 시편 모두 2200mJ/m² 이상의 높은 접합강도를 보였으며 Crack opening 법이 간접적인 방법으로 약 10% 이상의 측정오차를 갖는다고 가정⁵⁾하더라도 1980mJ/m² 이상의 높은 접합강도라고 판단되었다. 이러한 접합강도는 R. Stengl 등이⁶⁾ 실리콘 산화막은 이상적인 석영 (quartz) 구조라고 가정하고 석영의 표면에너지는 980mJ/m²이라 하면 최

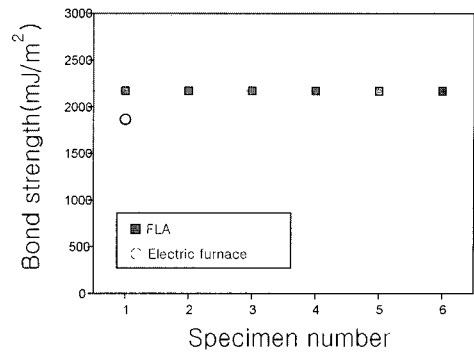


Fig. 5. bond strength of 7 Si || SiO₂/SiO₂ || Si wafer pairs heat treated by FLA (■) and electric furnace (○).

대접합강도는 이론적으로 980×2=1960mJ/m²이 된다고 보고한 바와 같이 이론 강도에 근접한 수준의 접합강도라고 판단되었다. 한편 전기로에서 준비된 기판쌍의 강도는 1843mJ/m²으로 선형가열법에 비해 16% 이상 감소하였다.

이진우²⁾ 등에 의하여 같은 선형열처리기를 이용하여 Si(100)/SiO₂ || Si(100) 직접접합에 대해 1500mJ/m²의 강도가 보고된 것에 비하여 본 연구의 강도는 34% 정도 증가한 것으로써 기존 SiO₂를 채용한 SOI 기판 제작시 Si/SiO₂보다 SiO₂/SiO₂ 직접접합을 이용하는 것이 강도면에서 유리하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

선형열처리기를 이용하여 치밀한 구조의 1.3 μ m 급 SiO₂ 열산화 막을 가진 2개의 기판을 접합시켜 Si(100) || 1.3 μ m-SiO₂ || Si(100) 구조의 SOI 기판쌍을 성공적으로 접합시켰다. IR 카메라와 razor blade crack opening 법으로 접합율과 접합강도를 확인한 결과 99% 이상의 접합면과 이론강도에 근접한 강도인 2000mJ/m²의 접합강도를 확인하였다. 이는 기존의 SiO₂/Si 직접접합에 의한 SOI 제조보다 접합강도면에서 우수한 것으로 향후 후막절연막을 가진 SOI 제조에서 SiO₂/SiO₂ 직접접

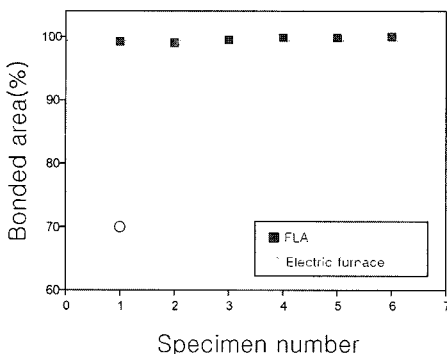


Fig. 4. Bonded area(%) of 7 Si || SiO₂/SiO₂ || Si wafer pairs heat treated by FLA (■) and electric furnace (○).

합을 이용하는 것이 강도면에서 더욱 유리함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 대학산업기술지원단실장검증센터의 제2차 2000년도 대학기술이전사업의 연구비지원으로 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. J. Haisma, T. M. Michielsen, and Gijsbertus. A. C. M. Spierings : Jpn. J. Appl. Phys., 28 (1989) 725
2. J. W. Lee, PhD : thesis, Seoul National University (1999)
3. S. M. Sze : Semiconductor Sensor, John Wiley & Sons, Inc., Ny (1994)
4. W. P. Maszara, G. Goetz, A. Caviglia, J. B. Mckitterich : J. Appl. Phys., 64, (1988) 4943
5. T. Martini, J. Steinkirchner and U. Gosele : J. Electrochem. Soc., 144, (1997) 1354
6. Stengl, T. Tan, and U. Gosele : Jpn. J. Appl. Phys., 28, (1989) 969