

## 상압 플라즈마를 이용한 고속 실리콘 웨이퍼 직접접합 공정

차용원<sup>1</sup> · 박상수<sup>1</sup> · 신호준<sup>1</sup> · 김용택<sup>2</sup> · 이정훈<sup>2</sup> · 서일웅<sup>2</sup> · 좌성훈<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>주식회사 엘트린, <sup>2</sup>서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원

## High Speed Direct Bonding of Silicon Wafer Using Atmospheric Pressure Plasma

Yong-Won Cha<sup>1</sup>, Sang-Su Park<sup>1</sup>, Ho-Jun Shin<sup>1</sup>, Yong Taek Kim<sup>2</sup>,  
Jung Hoon Lee<sup>2</sup>, Il Woong Suh<sup>2</sup> and Sung-Hoon Choa<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>B173, U-Tower, Yeongdeok-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

<sup>2</sup>Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

(Received August 28, 2015: Corrected September 8, 2015: Accepted September 9, 2015)

**초 록:** 본 연구에서는 실리콘 웨이퍼의 고속 직접접합 공정을 위하여 상압 플라즈마와 함께 에어로젤 형태의 초순수 분사를 이용하여 표면처리 활성화 및 결함이 없는 실리콘 직접접합 공정을 개발하였다. 플라즈마 공정의 다양한 인자, 즉 N<sub>2</sub> 가스의 유량, CDA(clean dry air)의 유량, 플라즈마 헤드와 기관 간의 간격, 플라즈마의 인가전압이 플라즈마 활성화, 즉 친수화 처리에 미치는 영향을 접촉각 측정을 통하여 관찰하였다. 또한 열처리 온도 및 열처리 시간이 접합 강도에 미치는 영향을 연구하였으며, 접합 강도의 측정은 crack opening 방법을 이용하였다. 접합 강도가 제일 높은 최적의 열처리 조건은 400°C의 열처리 온도 및 2 시간의 열처리 시간이었다. 플라즈마 스캔 속도 및 스캔 횟수를 실험계획법을 이용하여 최적화한 결과, 스캔 속도는 30 mm/sec, 스캔 횟수는 4 회에서 최적의 접합 강도를 나타내고 있었다. 열처리 조건과 플라즈마 활성화 조건을 최적화 한 후 직접접합을 하여 적외선투과현미경 등을 이용하여 관찰한 결과, 접합된 웨이퍼에서 접합 공정으로 인한 공극이나 결함은 관찰되지 않았다. 접합된 웨이퍼의 접합 강도는 평균 2.3 J/m<sup>2</sup>의 접합 강도를 나타내고 있었다.

**Abstract:** In order to achieve a high speed and high quality silicon wafer bonding, the room-temperature direct bonding using atmospheric pressure plasma and sprayed water vapor was developed. Effects of different plasma fabrication parameters, such as flow rate of N<sub>2</sub> gas, flow rate of CDA (clear dry air), gap between the plasma head and wafer surface, and plasma applied voltage, on plasma activation were investigated using the measurements of the contact angle. Influences of the annealing temperature and the annealing time on bonding strength were also investigated. The bonding strength of the bonded wafers was measured using a crack opening method. The optimized condition for the highest bonding strength was an annealing temperature of 400°C and an annealing time of 2 hours. For the plasma activation conditions, the highest bonding strength was achieved at the plasma scan speed of 30 mm/sec and the number of plasma treatment of 4 times. After optimization of the plasma activation conditions and annealing conditions, the direct bonding of the silicon wafers was performed. The infrared transmission image and the cross sectional image of bonded interface indicated that there is no void and defects on the bonded wafers. The bonded wafer exhibited a bonding strength of average 2.3 J/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Silicon wafer, direct bonding, atmospheric pressure, plasma, bonding strength

### 1. 서 론

직접접합(direct bonding) 기술은 1960년도 초에 개발된 이래 많은 발전과 더불어 현재 여러 분야에서 활용되고 있다. 직접접합 기술은 접착제나 중간 삽입층(intermediate

layer)을 사용하지 않고 두 표면 사이의 접착력을 향상시켜 두 표면을 접합하는 기술로서 주로 실리콘과 실리콘을 직접 접합하는 공정이며, 퓨전 본딩(fusion bonding), 웨이퍼 본딩 등으로 다양하게 불려진다.<sup>1)</sup> 직접접합이 가장 많이 사용되는 공정으로는 silicon on insulator (SOI) 웨

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: shchoa@seoultech.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이퍼 제작 공정이며, MEMS 소자 공정, 반도체 적층 공정 등에도 사용되고 있다. 최근에는 반도체 패키지의 일종인 3D TSV (through silicon via) 공정에도 활용되고 있다.<sup>2,4)</sup> 또한 최근에는 동종 기판이 아닌 이종 기판의 접합에도 많이 활용되고 있다. Lehman 등<sup>5)</sup>은 gallium arsenide (GaAs)와 실리콘 기판을 직접 웨이퍼 접합 기술을 이용하여 약 140°C에서 접합을 한 사례를 보여주고 있다. 실리콘 표면은 자연 산화막(native oxide)인 두께 1 nm 정도의 SiO<sub>2</sub> 막이 형성되어 있으며, 이를 플라즈마 혹은 습식 처리를 통해 친수성(hydrophilic)으로 바꾸어 주면 친수성으로 바뀐 실리콘 웨이퍼 표면에는 -OH 기가 붙어있게 된다. 이 -OH 기 사이의 Van der Waals 결합을 이용해 상온에서 웨이퍼를 붙인 후, 열처리 과정을 통해 물 분자들을 제거하면 실리콘과 산소원자 사이의 강한 공유결합만이 남게 된다. 즉 직접접합을 위해서는 Si 표면에 O-H group을 형성시키는 산화(oxidation)공정과 hydration의 전처리 과정이 필요하다. 먼저 실리콘 기판의 표면에 산화막을 형성시킨 웨이퍼를 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 및 희석된 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 등의 용액에 넣어 표면처리를 한다. 표면 처리가 끝난 기판을 상온에서 접촉시키면 Van der Waals 또는 수소결합(hydrogen bond)에 의해 자발적으로 접합되며(spontaneous bonding), 이를 silanol 접합이라고 한다.<sup>1)</sup> 이러한 초기접합은 접합력은 작지만, 두 기판의 위치를 고정시키기에 충분하다. 이후 고온에서 열처리(annealing) 공정을 진행하면 dehydration이 발생하여 수소는 수증기로 제거되며 siloxane (Si-O-Si)의 네트워크가 형성되면서 기판이 접합된다.

직접접합 공정에서는 열처리 공정이 필수적인데, 초기 열처리 공정의 온도는 900°C 이상이였다. 열처리 과정에서 가열 온도는 접합 강도에 큰 영향을 준다. 온도가 300°C 이하에서는 초기접합에 의한 접합 강도와 유사하다. 300°C에서 dehydration이 시작하여 수증기가 발생하며, 접합 강도가 증가하지만 일정한 접합 강도 이상으로 증가하지는 못한다. 800°C의 온도에서 접합 강도가 다시 증가하기 시작하며, 1000°C에서의 접합 강도가 크게 증가한다. 그러나 900°C 이상의 높은 온도에서는 MEMS 소자 및 반도체 소자의 배선 및 소자의 파괴가 발생되며, 열팽창에 따른 효과로 인하여 웨이퍼의 warpage 및 파괴가 발생될 수 있다. 따라서 열처리 온도를 감소시키기 위한 많은 연구가 진행되었다.

열처리 온도를 감소시키기 위한 목적으로써 실리콘 표면이 높은 표면 에너지 혹은 본딩 에너지를 가질 수 있도록 하는 과정이 사용되고 있다. 이를 위하여 플라즈마 활성화 웨이퍼 본딩,<sup>6,7)</sup> 진공 본딩<sup>8,9)</sup> 및 자외선을 적용한 접합 기술<sup>10)</sup>이 개발되었다. 현재까지는 고진공 하에서의 접합이 상온에서도 가장 큰 본딩 에너지를 얻을 수 있는 것으로 나타나 있다. 그러나 고진공 접합 기술은 복잡한 시스템 및 장시간의 접합으로 인하여 실제적으로 활용되기 힘든 면이 있다. 따라서 플라즈마를 이용하여 표면에너지를 증가시키거나, 플라즈마의 이온 충돌(ion bombard-

ment)에 의한 표면 거칠기의 증가를 통하여 접합 강도를 증가시키는 방법이 많이 사용되고 있다. 한편 친수성 표면을 만들기 위하여 습식 처리, 즉 화학액을 사용한 방법도 사용되고 있다. Tong 등<sup>8)</sup>은 HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O/HF 또는 HNO<sub>3</sub>/HF 용액을 사용하여 실리콘 표면에서 높은 표면 에너지를 얻었으며, Ljungberg 등<sup>11)</sup>은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/HF와 HNO<sub>3</sub>/HF를 사용하여 상온에서 높은 표면 에너지를 얻었다고 보고하고 있다. 또한 NH<sub>3</sub>와 HF를 사용하는 경우도 있다. 한편 화학액을 사용한 습식 방법은 공정 조절이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 현재 표면에너지를 증가시키기 위한 효율적인 방법으로써 대부분 플라즈마를 사용하고 있다. 플라즈마 기술은 저압 플라즈마 활성화(low-pressure plasma activation) 방법이 Sun<sup>12)</sup> 등에 의하여 개발되었으며, 현재 이를 이용한 접합 기술의 결과, 기존 본딩에 비하여 본딩 강도가 약 40% 증가하고, 접합 온도도 400°C 정도까지 낮출 수 있었다.<sup>13,14)</sup> 한편 Tan<sup>15)</sup> 등은 plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 공정을 이용하여 결합이 없는, 432 mJ/m<sup>2</sup>의 접합 강도와 접합 온도 300°C의 직접접합 공정을 달성하였다.

한편 기존의 플라즈마 활성화 방식은 친수화를 극대화하기 위하여 진공 분위기에서 진행된다. 이 경우 활성화는 극대화되지만 진공 챔버에서 진행되기 때문에 초순수(DIW, de-ionized water) 세척과 린스(rinse) 공정 등이 별도 모듈에서 진행되어 공정 시간이 증가하게 된다. 또한 상압에서 플라즈마 처리를 할 경우 공정 시간은 단축되지만 활성화 효과가 감소될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 두 가지 단점을 극복하기 위하여 상압 플라즈마와 함께 에어로젤 형태의 초순수 분사를 접목하여 공정 시간을 단축하며, 표면처리를 극대화하였다. 즉 플라즈마 활성화 이후, 스프레이 노즐(spray nozzle)을 통해 분사되는 에어로젤 형태의 초순수를 이용하여 웨이퍼 표면을 세척함과 동시에 직접접합을 위한 OH group을 웨이퍼 표면에 형성하여 기판 표면을 활성화하였다. 플라즈마 처리 후 기판 표면은 활성화 되어 친수화 특성을 가지게 된다. 친수화된 기판의 표면 위에 초순수가 뿌려지면 H<sub>2</sub>O 분자에 의하여 O-H group이 형성되게 된다. 특히 초순수가 플라즈마 작용에 의하여 분해되면서 발생한 H 분자는 기판 표면에 남아있는 유기물들을 효과적으로 제거하여 기판 표면을 세척하게 됨으로써, 접합 시 유기물에 의한 결합 및 공극들을 제거할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 공정 시간 단축 및 고강도의 직접접합 공정을 달성하기 위하여 플라즈마 처리 및 열처리 공정에 영향을 주는 다양한 인자들을 연구하였으며, 실험계획법(DOE, design of experiment)을 사용하여 다양한 인자들의 조건을 최적화하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구의 접합 공정에서 사용된 실리콘 웨이퍼는 p-

type의 12 inch <100>이며 두께는 775  $\mu\text{m}$ 이고, 비저항은 5~20  $\Omega\text{cm}$  이었다. 접합 공정 순서는 우선 웨이퍼를 세척한 후, 접합될 웨이퍼의 플라즈마 활성화 및 스프레이 노즐을 통한 초순수 분사, 접합을 위한 초기 접합(pre-bonding) 및 고온의 열처리(annealing) 공정의 순으로 진행되었다. 플라즈마 활성화 전에 실리콘 웨이퍼의 오염물질의 세척을 위하여 실리콘 웨이퍼는 표준 세척 공정인 RCA 공정을 사용하여 세척을 한 후, 질소( $\text{N}_2$ ) 가스로 분사 시키면서 건조하여 잔여 수분을 제거하였다. 세척이 끝나면, 접합될 2 개의 웨이퍼를 적절한 위치에 정렬(align) 시켜 겹치게 한 후, 약간의 압력을 가하여 대기 상태에서 초기 접합을 진행하였다. 초기 접합의 목적은 2 개의 웨이퍼 사이의 존재하는 공기를 빠져나가게 함이다. 웨이퍼 사이에 공기가 있을 경우, 이는 air-trap 형태로 존재하여 접합부의 공극(void)나 결함을 만들기 때문이다. 마지막으로 접합된 웨이퍼를 퍼니스(furnace)에 넣어 질소 분위기에서 열처리 공정을 통하여 두 개의 웨이퍼를 접합시켰다. 플라즈마 처리 후, 플라즈마 활성화의 정도는 표면자유에너지 접촉각의 측정을 통하여 관찰하였다. 접촉각 측정은 접촉각 측정기(KSV사, CAM-200)를 이용하여 웨이퍼 위에 물방울을 떨어뜨린 후, 물방울의 접촉각도(contact angle)를 측정하였다. 접합된 두 개의 웨이퍼의 접합 정도, 즉 접합 강도는 40  $\mu\text{m}$  steel blade를 사용한 crack opening 시험방법<sup>16,17)</sup>을 사용하여 측정하였다. Crack opening 시험 방법에서는 접합된 웨이퍼의 계면 사이에 blade를 일정한 속도로 삽입하여, 삽입된 blade에 의하여 발생한 접합 계면에서의 크랙의 길이를 측정하여 접합 강도, 즉 본딩 에너지(bonding energy)를 측정한다. 한편 접합 강도의 비교를 위하여 반도체 패키지의 접합 강도 측정을 위해서 주로 사용되고 있는 다이 전단 시험기(die shear tester, Dage 4000HS)를 이용하여 접합 강도를 측정하여 비교하였다. 접합된 전체 웨이퍼의 결함 및 공극의 검사는 적외선 투과장비(IR transmission inspection system, KP-F/20CL) 및 X-ray 분석기(Xscan-N160DCT, Xavis) 등을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼의 직접접합 공정을 최적화하기 위하여 고 친수성 상압 플라즈마 및 열처리에 영향을 미치는 다양한 인자 및 조건들에 대한 영향도 분석을 수행하였으며, 궁극적으로 다양한 인자 및 공정 조건의 최적화를 통한 고강도의 직접접합 공정을 수행하였다.

#### 3.1. 고 친수성 상압 플라즈마 공정 및 최적화

상압 플라즈마의 활성화 과정은  $\text{N}_2$ 와 반응 가스에 의해 플라즈마가 발생되며, 플라즈마의 활성화 정도는 플라즈마의 파워(power), 반응 가스의 유량, 플라즈마 헤드(head)와 기관과의 간격(gap), 플라즈마의 스캔 속도 등 다

양한 인자들에 의하여 영향을 받는다. 본 연구에서는 우선 고 친수성을 위한 플라즈마 처리 조건을 최적화하기 위하여 플라즈마 활성화에 영향을 줄 수 있는 인자로서  $\text{N}_2$  가스의 유량, 캐리어 가스인 CDA (clean dry air)의 유량, 플라즈마 헤드와 기관과의 거리 및 플라즈마 파워에 대해서, 각각의 인자들이 플라즈마 활성화에 미치는 영향을 검토하였다. 플라즈마 활성화의 정도, 즉 친수화 효과는 접촉각 측정을 통하여 확인하였다.

우선  $\text{N}_2$  가스의 유량을 최적화하기 위하여 유량 변화에 따른 친수화 효과를 확인 하였다.  $\text{N}_2$ 는 플라즈마 공정 가스로 사용되지만 비활성 가스로서 플라즈마 헤드의 냉각을 위해서도 필요하기 때문에 100 L/min 이상의 많은 양이 사용된다. 따라서  $\text{N}_2$  유량의 실험 범위는 100~500 L/min에서 진행하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이, 플라즈마 처리 전의 실리콘 웨이퍼의 접촉각은 33도 이었으며, 플라즈마 처리 후에는 150 L/min 까지는 접촉각이 매우 크나, 200 L/min 유량부터는 접촉각이 급격히 감소하면서 친수화 효과가 발생함을 알 수 있었다. 200 L/min 이상에서는 접촉각이 약간 상승하고, 400 L/min 이상의 유량에서는 친수화 처리 효과가 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는  $\text{N}_2$  가스의 사용량을 최소화하기 위하여  $\text{N}_2$ 의 유량을 200 L/min로 최적 조건을 설정하였다. 다음으로 플라즈마 공정의 캐리어 가스(carrier gas)로서 CDA 유량에 따른 친수화 정도를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. CDA 가스의 사용 목적은 CDA에 포함된  $\text{O}_2$  분자를 플라즈마에 의해 중성자 및 이온 상태로 만들어 실리콘 기관 표면의 탄소로 구성된 유기 오염 물질들을 제거하기 위함이며, CDA 가스는 플라즈마의 표면 활성화 처리 효과에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 실험은  $\text{N}_2$ 와 CDA의 혼합 비율, 즉 CDA의 유량을 증가시키면서 접촉각의 변화를 측정하였으며, 실험 결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 실험 결과,  $\text{N}_2$ 만 사용했을 때 보다 CDA를 함께 사용했을 때의 경우가 높은 플라즈마 처리 효과를 나타내고 있음을 알 수 있으며, CDA의 유량이

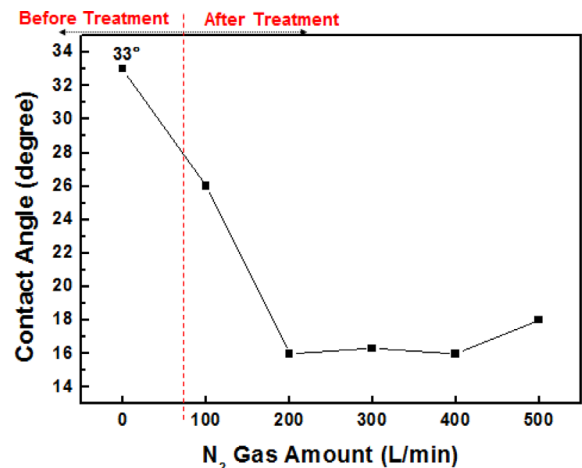


Fig. 1. Variation of contact angle depending on  $\text{N}_2$  gas flow rate.

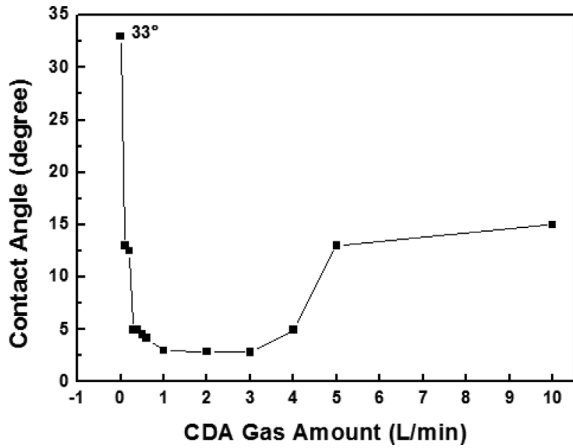


Fig. 2. Variation of contact angle depending on CDA gas flow rate.

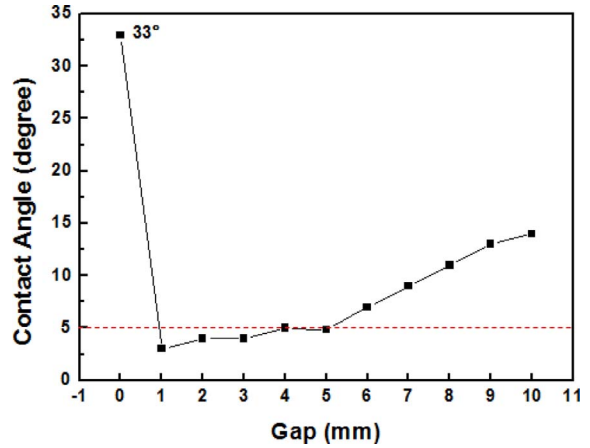


Fig. 3. Variation of contact angle depending on plasma head gap.

1~3 L/min 사이에서 접촉각이 3도 미만으로서 친수성에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. CDA의 유량이 4 L/min 이상에서는 접촉각이 다시 증가하기 시작하여 4 L/min에서는 플라즈마의 친수화 효과가 감소함을 알 수 있었다. 이는 CDA의 유량이 증가한 대신에, 플라즈마 처리에 필수적인 N<sub>2</sub> 가스의 비율이 크게 저하된 이유로 판단된다.

플라즈마 헤드와 기관과의 거리는 플라즈마 형성에 매우 중요한 요소이다. 즉 상압 플라즈마의 경우 플라즈마 헤드에서 생성된 플라즈마는 헤드 하단으로 방출된다. 방출된 플라즈마에 의하여 기관 표면이 활성화되기 때문에 기관과 헤드와의 간격은 플라즈마 활성화에 중요한 요소가 될 수 있다. 따라서 플라즈마 헤드와 기관과의 간격을 최적화하기 위하여 플라즈마 헤드와 기관의 거리가 플라즈마 표면 처리에 주는 영향을 검토하였다. 실험은 앞서 최적화한 실험 조건을 토대로 가스의 유량은 고정하고 즉, N<sub>2</sub> 유량을 200 L/min, CDA의 유량을 2 L/min으로 고정 한 후, 간격을 1 mm에서 10 mm까지 가변하면서 표면 접촉각을 측정하였다. 실험 결과, Fig. 3과 같이 간격이 1 mm에서 가장 작은 접촉각을 나타내고 있으며, 간격이 5 mm 이하에서 접촉각이 5도 이하로 나타났다. 간격이 1~5 mm 범위에서는 접촉각의 변화는 크지 않다. 간격이 5 mm 이상에서는 간격이 증가할수록 접촉각이 계속 증가함에 따라 플라즈마 처리 효과가 감소되는 것을 볼 수 있다. 7 mm부터는 표면 처리 능력이 크게 감소되는 경향을 나타내고 있다. 이는 간격이 과도하게 크면 기관 표면이 방출된 플라즈마에서 벗어나며 표면 처리 정도가 감소되는 것으로 판단된다. 한편 간격이 1 mm의 경우, 가장 높은 친수 효과를 나타내었으나, 플라즈마 헤드가 기관을 스캔하는 과정에서 기관과의 충돌 위험 등을 고려하여 헤드와 기관과의 거리는 3 mm로 최적화하였다. Fig. 4는 간격의 변화에 따른 플라즈마 형상을 나타낸 것으로 기관과의 간격이 증가함에 따라서 플라즈마 발생 영역이 점점 감소함을 알 수 있다. 다음으로 플라즈마 인가전압 변화에 따른 플라즈마 활성화 정도를 파악하기 위한 시

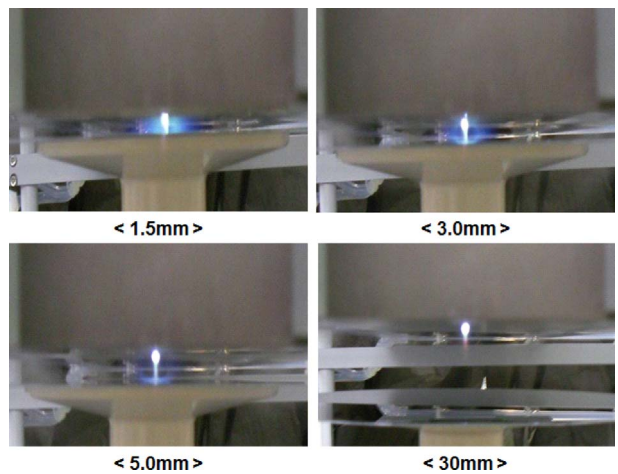


Fig. 4. Plasma shape depending on the variation of the plasma head gap.

험을 수행하였다. 플라즈마 인가전압은 1 kV부터 사용된 플라즈마 장비 사양의 최대치인 11 kV까지 전압을 인가 하였다. Fig. 5는 플라즈마 인가전압에 따른 접촉각의 변화를 나타낸 그림이다. 실험 결과, 인가전압을 상승시킬수록 처리효과는 상승하였으며, 8 kV 이상부터 접촉각이

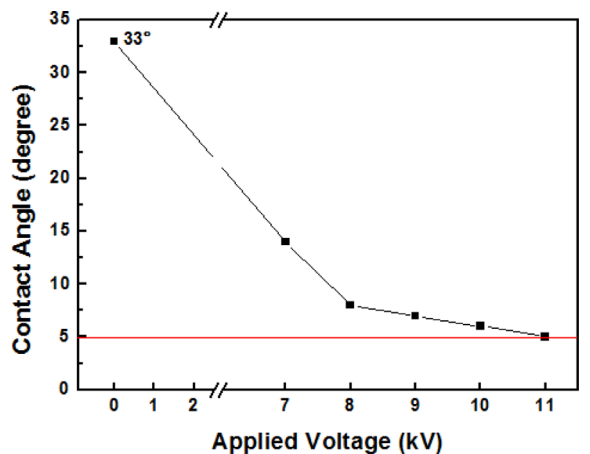


Fig. 5. Variation of contact angle for different plasma applied voltages.

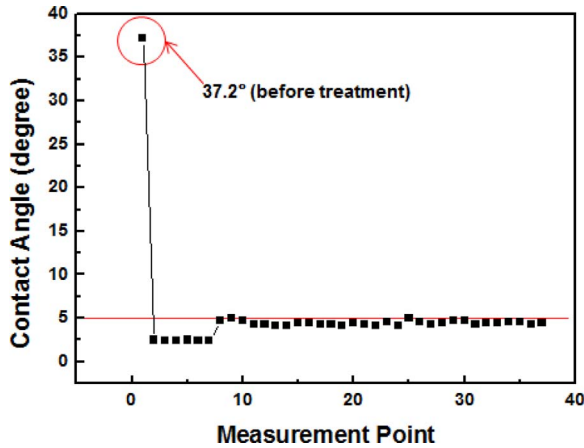


Fig. 6. Measurements of contact angle on silicon wafer after plasma activation.

다. 11 kV의 경우에 접촉각이 5도 미만으로 나타났으며 친수화 처리 효과가 충분한 것으로 판단되었다.

앞서 각 요소에 대하여 최적화한 조건을 토대로 플라즈마 처리 후 기판 표면의 친수화 정도를 확인하였다. 즉 N<sub>2</sub> 유량을 200 L/min, CDA의 유량을 2 L/min, 플라즈마 헤드와 기판과의 거리는 3 mm, 플라즈마의 인가전압을 11 kV로 하여 플라즈마 처리를 한 후 실리콘 기판의 표면 접촉각을 측정하였다. 기판의 크기는 300 mm 웨이퍼를 사용하였으며, 플라즈마 처리의 균일도를 확인하기 위하여 총 37 포인트를 측정하였다. Fig. 6과 같이 실험 결과, 37 포인트 모두 5도 미만의 접촉각을 나타낸 것을 볼 때 실리콘 웨이퍼의 모든 표면이 충분히 균일하게 친수화가 된 것으로 판단되었다.

**3.2. 플라즈마 공정 및 열처리 조건에 따른 접합 강도의 최적화**

웨이퍼 직접접합 공정에서 가장 중요한 요소는 직접접합 공정 후, 두 웨이퍼 간의 접합 강도이다. 접합 강도 측정을 통하여 접합 계면의 기계적인 안정성 및 내구성을 파악할 수 있다. 웨이퍼 직접접합의 경우 두 기판 간에 접합 시 어떠한 접합 물질을 사용하지 않고 단지 O-H group에 의한 공유결합에 의하여 접합이 이루어진다. 직접접합 공정은 크게 두 가지 단계로 이루어진다고 할 수 있다. 먼저 플라즈마 처리 후 본딩 챔버에서 초기접합이 진행된다. 초기접합은 접합될 두 웨이퍼를 정렬 시킨 후, 약간의 힘을 가하여 접합하는 공정으로서 두 기판이 O-H 원자끼리만 결합되어 있는 상태이기 때문에 접합은 이루어졌으나 비교적 낮은 접합 강도를 가진다. 따라서 초기접합이 이루어진 접합된 기판은 열처리 공정을 거쳐 높은 접합 강도를 갖게 해야 한다. 즉 고온의 열처리 공정에서 O-H 원자들은 H 원자나 물분자 상태로 기판 내로 흡수되거나 밖으로 방출되어 Si-Si 이나 Si-O-Si의 결합상태를 갖게 되면서 높은 접합 강도를 갖게 된다. 본 연구에서는 앞서 최적화한 플라즈마 처리 조건을 기준으로 높

은 접합 강도를 위한 최적의 플라즈마 처리 조건 및 최적의 열처리 조건을 구하고자 실험을 진행하였다. 열처리 조건에서는 열처리 온도와 시간이 가장 중요한 변수이므로, 열처리 조건은 열처리 온도와 시간이 접합 강도에 미치는 영향을 고찰하였으며, 최적의 열처리 조건을 찾자 하였다. 열처리 조건에서 열처리 온도는 100°C, 300°C, 500°C로 하고, 열처리 시간은 1 시간, 3 시간, 5 시간으로 실험 조건은 열처리 온도와 열처리 시간에 대한 2 요인 3 수준의 실험계획법(DOE)을 이용하여 최적화하였다. 각 조건에 대해서 접합을 실시한 후, 접합 강도 측정은 blade를 이용한 crack opening 방법을 이용하여 측정하였다. 실험 결과, Fig. 7의 주인자 효과(main effect)에서와 같이 접합 강도는 열처리 시간보다는 열처리 온도에 직접적인 영향을 받았으며, 300°C 이상부터 안정적인 접합 강도를 나타냄을 알 수 있다. 또한 열처리 시간이 증가함에 따라서 접합 강도도 서서히 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서는 높은 접합강도를 위한 고속의 접합공정이 목표이기 때문에 최적의 열처리 조건은 열처리 온도는 400°C, 열처리 시간은 2 시간으로 최적화하였다. 플라즈마 공정에서 플라즈마의 스캔 속도 및 스캔 횟수는 표면 처리의 정도 및 접합 강도에 직접적으로 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 플라즈마의 스캔 속도, 스캔 횟수 및 기판과의 간격이 접합 강도에 미치는 영향을 파악하고, 접합 조건을 최적화하기 위하여 실험계획법을 사용하여 실험을 수행하였다. 최적화 요소로서 스캔속도, 스캔 횟수, 기판과의 간격을 설정하였으며, 3 요인 3 수준으로 DOE 설계에 기준하여 실험을 하였으며 실험 조건이 Table 1에 나타나 있다. 스캔 속도는 10, 30, 50 mm, 스캔 회수는 1, 4, 7회, 그리고 기판과의 간격은 1, 2, 3 mm로 각각 설정하여 15 가지 실험을 진행하였으며, 각 접합 조건에 대해서 접합 강도를 측정하여, 각 인자가 접합 강도에 미치는 요인에 대해 분석하였다. Fig. 8의 주요인 분석에서 나타나듯이, 스캔 속도 30 mm/sec에서 가장 높은 접합 강도를 나타내고 있으며, 스캔 속도가 50 mm/sec로 빨라질 경우 플라즈마 효과가 감소함을 알 수 있었다. 스캔 횟수의 경우 4 회에서 최적의 접합 강도를 나타내고 있으며, 횟수가 많아지면 오히려 플라즈마 효과가 감소함을 알 수 있었다. 기판과의 거리 즉 간격은 2~3 mm 조건에서 진행 시 가

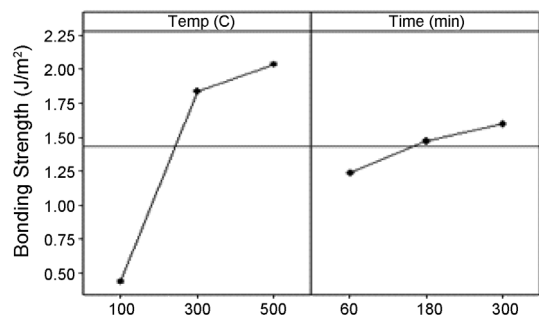


Fig. 7. Main effect plot for optimization for annealing conditions.

**Table 1.** DOE Matrix for scan speed, scan time, and gap height

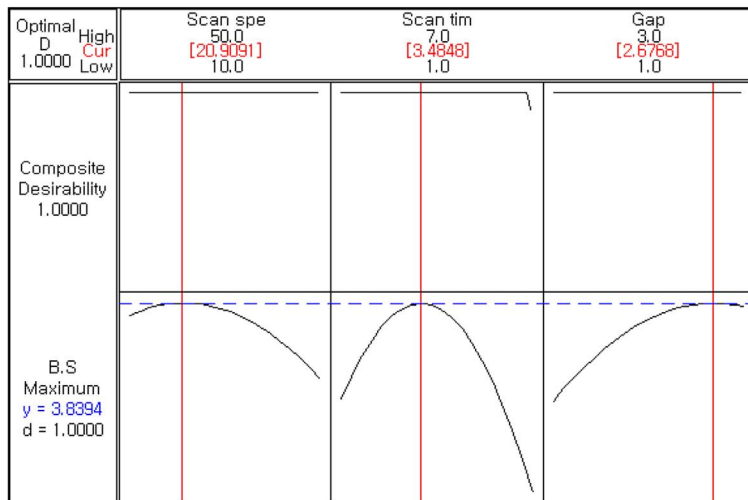
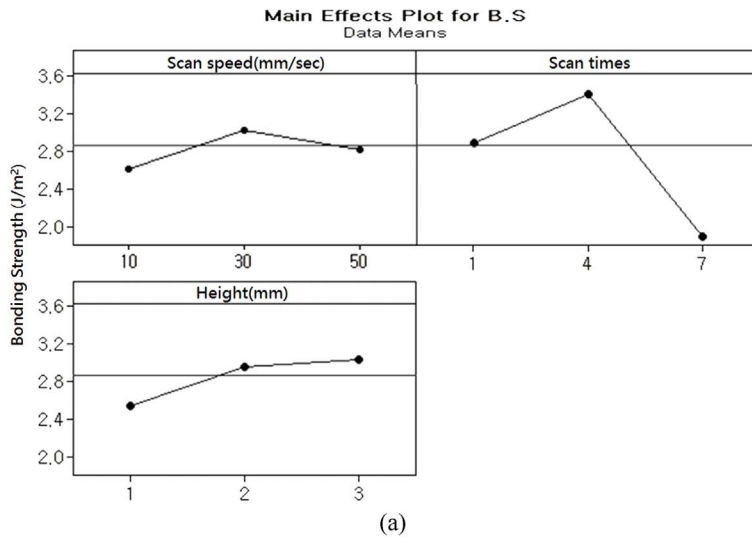
	Low	Medium	High
Scan speed (mm/sec)	10	30	50
Scan time (time)	1	4	7
Gap height (mm)	1	2	3

장 높은 접합 강도를 갖는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 스캔 속도는 30 mm/sec, 스캔 횟수는 4 회, 기관과의 거리는 2 mm로 최적화 조건을 정하여 시험하였다. 열처리 조건과 플라즈마 활성화 조건을 최적화 한 후 직접접합을 하여 접합 강도를 측정하였다. 접합된 3 장의 웨이퍼의 접합 강도를 blade를 이용한 crack opening 방법으로 측정한 결과 평균 2.3 J/m<sup>2</sup>의 접합 강도를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이 수치는 기존의 플라즈마를 이용한 직접접합 공정의 접합 강도<sup>18,19</sup>)와 거의 유사한 접합 강도이다.

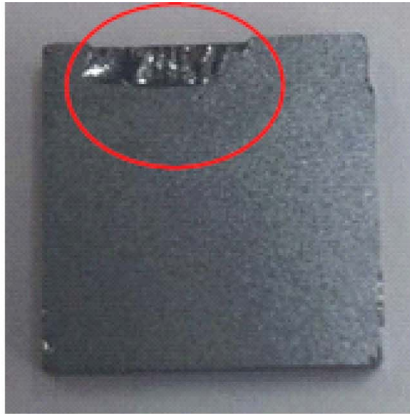
또한 반도체 패키지의 접합 강도를 측정하는 표준화된

측정방법으로서 다이전단 시험기를 이용하여 웨이퍼의 접합 강도를 측정하여 blade에 의한 접합 강도 측정과 비교하였다. 측정 방법은 JIS Z3198-7 규격<sup>20</sup>)에 의거하여 측정하였다. 접합된 웨이퍼를 10 × 10 mm<sup>2</sup>로 절단한 후 shear tester 장비를 이용하여 접합강도를 측정하였다. 접합 강도 측정에 사용된 샘플은 모두 5 개였다. 이때 shear test의 속도는 200 μm/sec 이었다. 5 개의 샘플을 측정한 결과 평균 15 MPa의 전단 강도를 보여주고 있으며, 특히 Fig. 9에서 보듯이 시험 중에 접합부가 아닌 실리콘 웨이퍼가 파괴될 정도로 높은 접합 강도를 보여주고 있다.

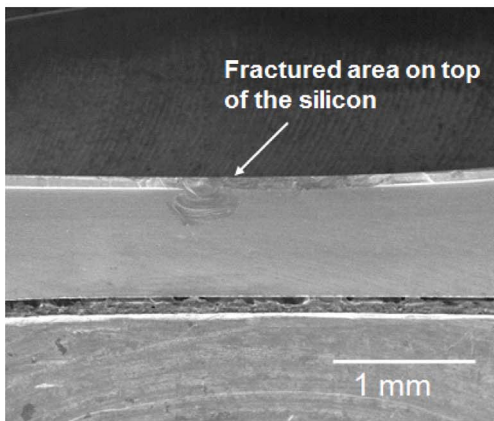
웨이퍼의 직접접합 후의 접합의 상태, 즉 공극 및 결함의 존재를 검사하기 위하여 적외선 투과장비를 이용하여 평가하였다. 접합 후 나타나는 공극은 크게 외인성 공극(extrinsic void)과 내인성 공극(intrinsic void)로 구분된다. 외인성 공극의 경우 접합 전 접합 계면에 제거되지 않은 오염 입자들에 의해 발생한 공극이다. 외인성 공극의 경우 입자 크기의 약 50 배 이상으로 나타나기 때문에 접합 공정에서 오염 입자의 관리는 매우 중요한 요소이다. 내



**Fig. 8.** (a) Main plot of DOE. (b) Optimization using DOE.



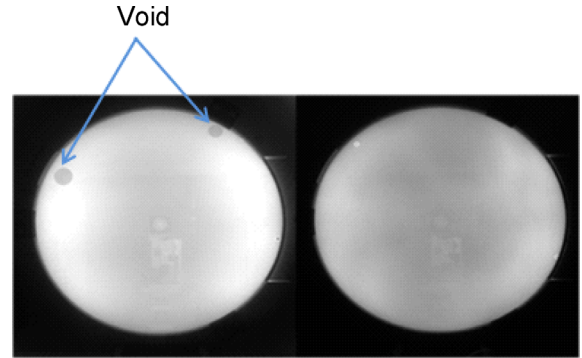
(a)



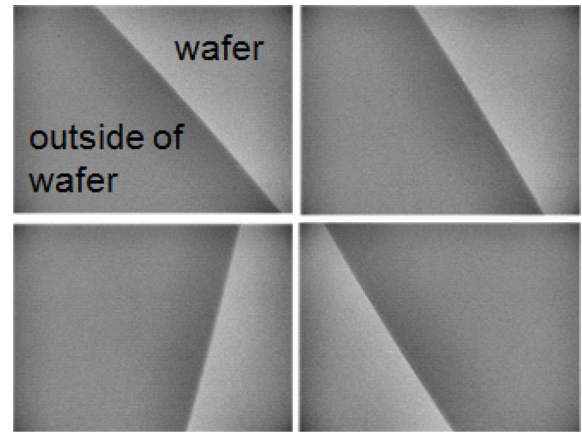
(b)

**Fig. 9.** (a) Fracture images of bonded wafer after shear test. (b) Cross sectional SEM images. Top surface of the bonded wafer was fractured after shear test.

인성 공극의 경우 플라즈마 처리 공정, 린스 및 세척 공정이나 접합 공정 시 나타나는 공극이다. 두 가지 공극 모두 접합이 되지 않은 상태이기 때문에 양산 적용 시 수율을 감소시키는 요소가 된다. Fig. 10은 적외선투과장비를 이용하여 접합된 웨이퍼 쌍에 대해서 적외선을 투과시켜 접착이 이루어지지 않은 영역을 관찰한 사진이다. 이때 미접착 영역은 공극의 높이 편차에 따른 빛의 간섭 현상으로 인해 간섭띠 혹은 다른 색깔을 나타내고 있다. 본 연구에서 최종적으로 접합한 결과, 웨이퍼의 엣지(edge), 즉 외곽 부분에서 2 개의 외인성 공극이 나타났으며, 내인성 공극은 나타나지 않았다. 본 연구는 반도체 공정 클린룸 수준인 아닌 클래스 1,000~10,000 수준의 클린룸 수준에서 공정이 진행되었기 때문에 어느 정도 입자에 의한 오염을 피할 수는 없었다. 따라서 반도체 공정의 수준에서 공정이 진행된다면 외인성 공극의 발생도 없을 것으로 판단된다. 한편 적외선투과장비 이외에 X-ray 분석기를 이용하여 웨이퍼의 결함의 존재를 자세히 확인하였다. X-ray 측정 시 전체 웨이퍼를 X-ray로 검사할 경우 정밀도가 떨어지기 때문에 웨이퍼의 여러 부분을 부분적으로 측정하였다. Fig. 11은 웨이퍼를 X-ray로 측정된 결과의 일부이다. 특히 웨이퍼의 외곽 부분을 측정하였는데 Fig. 11



**Fig. 10.** Infrared (IR) transmission images of bonded Si/Si wafer.



**Fig. 11.** X-ray images of bonded wafer.

에서 밝은 부분이 웨이퍼 부분이다. 총 18 포인트를 X-ray로 측정된 결과 웨이퍼 내에 공극이나 결함은 발견되지 않았다. 따라서 직접접합이 잘 수행된 것을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구에서 수행한 상압 플라즈마 처리 공정과 열처리 공정의 최적화를 통하여 고강도의 실리콘 웨이퍼 직접접합을 이룰 수가 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상압 플라즈마를 이용한 고속 직접접합 공정을 위하여 상압 플라즈마와 함께 에어로젤 형태의 초순수 분사를 이용하여 표면처리 활성화 및 결함이 없는 실리콘 웨이퍼의 직접접합 공정을 개발하였다. 또한 플라즈마 처리 및 열처리 공정에 영향을 주는 다양한 인자들을 연구하였으며, 이를 통하여 최적의 직접접합 공정을 위한 다양한 인자들의 최적화를 수행하였다. 플라즈마 활성화에 영향을 줄 수 있는 인자로서 N<sub>2</sub> 가스 유량의 경우 200 L/min 부터는 접촉각이 급격히 감소하면서 친수화 효과가 발생하였으며, 400 L/min 부터는 친수화 효과가 감소하였다. CDA의 유량의 경우 1~3 L/min 사이에서 접촉각이 3도 미만으로서 친수화 효과가 크지만, 4 L/min 이상에서는 플라즈마의 표면 처리 효과가 감소하였다. 플라즈마 헤드와 기판 사이의 간격의 경우 1~5 mm

범위에서는 접촉각의 변화는 크지 않으나, 간격이 7 mm 부터는 표면 처리 능력이 크게 감소되었다. 플라즈마 인가 전압의 경우 8 kV 이상부터 접촉각이 급격히 감소하였으며, 11 kV 경우 접촉각이 5도 미만으로 나타났다. 열처리 조건의 경우 접합 강도는 열처리 시간보다는 열처리 온도에 직접적인 영향을 받았으며, 300°C 이상부터 안정적인 접합 강도를 나타냄을 알 수 있었다. 따라서 최적의 조건으로서 열처리 온도는 400°C, 열처리 시간은 2 시간으로 설정하였다. 플라즈마 스캔 속도는 30 mm/sec에서 가장 높은 접합 강도를 나타내고 있으며, 속도가 50 mm/sec로 증가할 경우 플라즈마 효과가 감소함을 알 수 있었다. 스캔 횟수의 경우 4 회에서 최적의 접합 강도를 나타내고 있었다. 열처리 조건과 플라즈마 활성화 조건을 최적화한 후 직접접합을 하여 접합 강도 및 공극, 결함 등을 관찰한 결과 평균 2.3 J/m<sup>2</sup>의 접합강도를 나타내고 있으며, 접합 공정으로 인한 공극이나 결함은 관찰되지 않았다.

### 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

1. M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda and K. Tanzawa, "Silicon-to-silicon Direct Bonding Method", *J. Appl. Phys.*, 60, 2987 (1986).
2. C. T. Ko and K. N. Chen, "Low Temperature Bonding Technology for 3D Integration", *Microelectronics Reliability*, 52, 302 (2012).
3. Y. H. Cho, S. E. Kim and S. Kim, "Wafer Level Bonding Technology for 3D Stacked IC", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 20(1), 7 (2013).
4. S. Kang, J. Lee, E. Kim, N. Lim, S. Kim, S. Ki and S. E. Kim, "Fabrication and Challenges of Cu-to-Cu Wafer Bonding", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 19(2), 29 (2012).
5. V. Lehmann, K. Mitani, R. Stengl, T. Mii and U. Gösele, "Bubble-free Wafer Bonding of GaAs and InP on Silicon in a Microcleanroom", *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, 28(12), L2141 (1989).
6. Z. X. Xiong and J. P. Raskin, "Low-temperature Wafer Bonding: a Study of Void Formation and Influence on Bonding Strength", *J. Microelectromech. Syst.*, 14(2), 368 (2005).
7. T. Suni, K. Henttinen, I. Suni and J. Makinen, "Effects of Plasma Activation on Hydrophilic Bonding of Si and SiO<sub>2</sub>", *J. Electrochem. Soc.*, 149(6), G348 (2002).
8. Q. Y. Tong, W. J. Kim, T. H. Lee and U. Gösele, "Low Vacuum Wafer Bonding", *Electrochem. Solid-State Lett.*, 1(1), 52 (1998).
9. Y. W. Bo, T. C. Ming, W. Jun, D. S. Sheng and H. G. Yu, "Effect of Medium Vacuum on Low Temperature Wafer Bonding", *J. Micromech. Microeng.*, 15(5), 1001 (2005).
10. R. Malik, T. Shi, Z. Tang and S. Liu, "Effect of Ultra Violet Process and Annealing on Reliability in Low Temperature Silicon Wafer Direct Bonding", *Adv. Sci. Lett.*, 4(3), 774 (2011).
11. K. Ljungberg, U. Jansson, S. Bengtsson and A. Soderberg, "Modification of Silicon Surfaces with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:HF and HNO<sub>3</sub>:HF for Wafer Bonding Applications", *J. Electrochem. Soc.*, 143, 1709 (1996).
12. G. L. Sun, J. Zhan, Q. Y. Tong, S. J. Xie, Y. M. Cai and S. J. Lu, "Cool Plasma Activated Surface in Silicon Wafer Direct Bonding Technology", *Le Journal de Physique Colloques*, 49(C4), 79 (1988).
13. M. Reiche, K. Gutjahr, D. Stolze, D. Burcyk and M. Petzold, "The Effect of Plasma Pretreatment on the Si/Si Bonding Behavior", *Electrochem. Soc. Proc.*, 97-36, 437 (1997).
14. P. Amirfeiz, S. Bengtsson, M. Bergh, E. Zanghellini and L. Borjesson, "Formation of Silicon Structures by Plasma-activated Wafer Bonding", *J. Electrochem. Soc.* 147(7), 2693 (2000).
15. C. S. Tan, A. Fan, K. N. Chen and R. Rief, "Low-temperature Thermal Oxide to Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition Oxide Wafer Bonding for Thin-film Transfer Application", *Appl. Phys. Lett.*, 82, 2649 (2003).
16. Q. Y. Tong and U. Gösele, *Semiconductor Wafer Bonding*, Wiley & Sons, New York (1999).
17. W. P. Maszara, G. Goetz, A. Caviglia and J. B. Mckitterick, "Bonding of Silicon Wafers for Silicon-on-insulator", *J. Appl. Phys.*, 64(10), 4943 (1988).
18. M. Eichler, B. Michel, M. Thomas, M. Gabriel and C.-P. Klages, "Atmospheric-pressure Plasma Pretreatment for Direct Bonding of Silicon Wafers at Low Temperatures", *Surface & Coatings Technology*, 203, 826 (2008).
19. Drago Resnik, Danilo Vrtačnik, Uroš Aljančič and Slavko Amon, "Study of Low-temperature Direct Bonding of (111) and (100) Silicon Wafers under Various Ambient and Surface Conditions", *Sensors and Actuators*, 80, 68 (2000).
20. JIS Z 3198-7, "Test Methods for Lead-free Solders - Part 7: Shear Test of Soldered Joints of Chip Component", Translated and Published by Japanese Standards Association (2003).