

<용용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.929

열가압 접합 공정으로 제조된 Cu-Cu 접합의 계면 접합 특성 평가[§]

김광섭* · 이희정* · 김희연** · 김재현* · 현승민*† · 이학주*

* 한국기계연구원 나노융합·생산시스템 연구본부, ** 국가나노융합센터 넬스바이오팀

Characterization of Interfacial Adhesion of Cu-Cu Bonding Fabricated by Thermo-Compression Bonding Process

Kwang-Seop Kim*, Hee-Jung Lee*, Hee-Yeoun Kim**, Jae-Hyun Kim*, Seungmin Hyun*† and Hak-Joo Lee*

*Nano Convergence and Manufacturing Systems Research Division, KIMM,

**NEMS/Bio Team, National Nanofab Center

(Received December 31, 2009 ; Revised May 26, 2010 ; Accepted June 1, 2010)

Key Words: Adhesion(접합), Four-Point Bending Test(4 점 굽힘 시험), Cu-Cu Bonding(Cu-Cu 접합), Thermo-compression Bonding Process(열가압 접합 공정)

초록: 3 차원 패키징을 위해 열가압 공정으로 제조된 Cu-Cu 접합 계면의 접합 특성을 평가하기 위해 4 점 굽힘 실험을 수행하였다. Cu 가 코팅된 Si 웨이퍼 2 장을 350 °C 에서 1 시간 동안 15kN 의 하중으로 접합시킨 후, 동일한 온도에서 1 시간동안 어닐링을 수행하였다. 접합된 웨이퍼를 30 mm x 3 mm 크기로 잘라 시험편을 준비하였다. 시험편의 중심에 깊이 400 μm 의 노치를 가공하였다. 시험기에 광학계를 부착하여 노치에서의 크랙 발생과 계면에서의 크랙 진전을 관찰하였다. 일정한 테스트 속도로 실험을 수행하여, 이에 상응하는 하중을 측정하였다. Cu-Cu 접합 계면 에너지는 10.36 J/m² 으로 측정되었으며, 파괴된 계면을 분석하였다. 표면 분석 결과, SiO₂ 와 Ti 의 계면에서 파괴가 일어났음을 확인하였다.

Abstract: Four-point bending tests were performed to investigate the interfacial adhesion of Cu-Cu bonding fabricated by thermo-compression process for three dimensional packaging. A pair of Cu-coated Si wafers was bonded under a pressure of 15 kN at 350 °C for 1 h, followed by post annealing at 350 °C for 1 h. The bonded wafers were diced into 30 mm × 3 mm pieces for the test. Each specimen had a 400-μm-deep notch along the center. An optical inspection module was installed in the testing apparatus to observe crack initiation at the notch and crack propagation over the weak interface. The tests were performed under a fixed loading speed, and the corresponding load was measured. The measured interfacial adhesion energy of the Cu-to-Cu bonding was 9.75 J/m², and the delaminated interfaces were analyzed after the test. The surface analysis shows that the delamination occurred in the interface between SiO₂ and Ti.

- 기호설명 -

- E* : 모재의 탄성계수
- L* : 상부롤러와 하부롤러 사이의 수평 거리
- P* : 계면 파괴 하중
- b* : 시험편의 폭
- h* : 모재의 두께
- v* : 모재의 푸아송 비

1. 서론

3 차원 집적 회로를 제작하는 방법으로 여러 장의 소자층(device layer)를 쌓아 올리는 방법(stacking method) 이 이용되고 있다. 쌓아 올리는 방법으로 회로를 제작할 때 고려해야 할 중요한 사항은 각각의 소자층 사이의 상호연결(interconnection)이다. 상호연결은 전기적 특성 및 신뢰성이 우수해야 한다. 기존에는 상호연결을 위해 솔더(solder)를 사용했지만, 최근에는 솔더를 사용하는 접합 공정에 비해 공정이 단순하고, 전기적 특성 및 신뢰성 측면에서 더 우수

§ 이 논문은 대한기계학회 2009 년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, hyun@kimm.re.kr

한 금속-금속 접합이 제안되었다.⁽¹⁾ 상호연결을 위한 금속 재료로 Cu 가 주목받고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(2,3) Fig. 1 은 Cu-Cu 상호연결로 제작된 3 차원 집적 회로의 개략도를 보여준다. 각 소자층 에 있는 Cu 범프 사이에 상호연결을 형성하기 위해 두 소자층은 고온에서 고압으로 접합된다. 이때, 접촉하는 두 Cu 범프는 용융되어 단단한 접합을 형성하게 된다. 소자층에 형성되어 있는 소자가 파괴되지 않도록, 접합 시 가해지는 온도 및 압력은 낮을 수록 좋다. 하지만 온도 및 압력이 너무 낮으면 접촉하는 Cu 범프간에 서로 확산되지 않아 좋은 상호연결이 형성되지 않기 때문에 적절한 공정 조건을 확립하는 것이 필요하다. Cu-Cu 접합에 영향을 미치는 공정 파라미터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며,⁽⁴⁻⁶⁾ 여러 가지 시험법으로 Cu-Cu 접합의 계면 접합 특성이 평가되고 있다.^(7,8) 본 연구에서는 기존의 Cu-Cu 접합이 잘 형성되는 온도로 알려진 400~450°C 접합 온도에 비해 낮은 온도인 350°C 에서 접합된 Cu-Cu 접합에 대해 4 점 굽힘 시험법(four-point bending test)을 이용하여 접합 특성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 시편

Fig. 2 는 4 점 굽힘 시험법에 사용된 Cu-Cu 접합 시편의 준비과정을 보여준다. 3 차원 집적회로 제작 시에 Si 기판이 주로 사용되며 기판과 기판 위에 제작된 소자(device) 사이의 전기적 절연을 위해 기판 위에 절연층이 존재하게 된다. 이러한 조건을 감안하여 기판으로서 직경이 100 mm 이고, 두께가 500 μm 인 Si 웨이퍼를 사용하였으며, 그 위에 300 nm 두께의 SiO₂ 박막을 열적으로 성장시켰다. Cu 박막과의 접착 특성을 향상시키기 위해 50 nm 두께의 Ti 박막을 스퍼터(sputter) 시스템을 이용하여 SiO₂ 박막 위에 증착시켰으며, 그 위에 1.5 μm 두께의 Cu 박막을 동일한 장비를 이용하여 증착시켰다.

열가압 접합법(thermo-compression bonding)을 사용하여 Cu 박막이 증착된 2 장의 웨이퍼를 접합시켰다. 350 °C 의 온도에서 1.9 MPa 의 압력으로 1 시간 동안 접합시킨 후, 압력을 제거하고 동일한 온도에서 1 시간 동안 어닐링(annealing)을 수행하였다. 접합된 웨이퍼는 다이싱(dicing) 머신을 이용하여 시험편 크기인 3 mm x 30 mm 크기로 가공되며, 각 시험편의 중앙에 크랙을 만들기 위해 400 μm 깊이의 노치를 가공하였다.

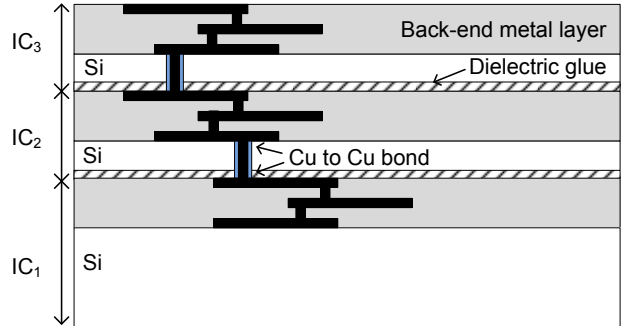


Fig. 1 Schematic diagram of 3-D integrated structure interconnected by through-Si Cu-vias

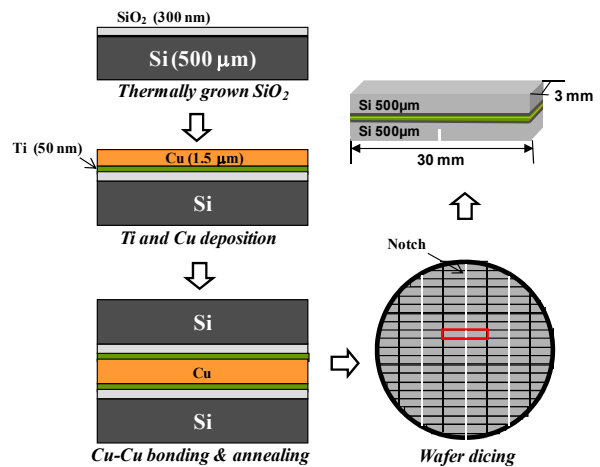
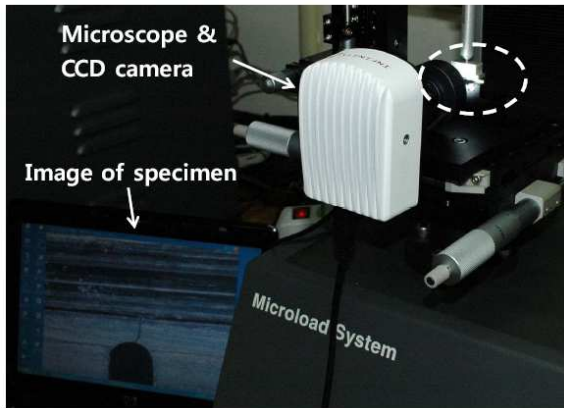


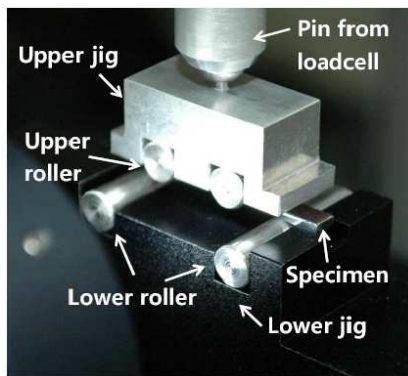
Fig. 2 Sample preparation of Cu-Cu bonding for four-point bending test

2.2 실험 장치 및 방법

Cu-Cu 접합으로 형성된 Si 웨이퍼의 계면 접합 특성을 평가하기 위해 4 점 굽힘 시험법을 수행하였다. 4 점 굽힘 시험법은 샌드위치 구조의 두 탄성체에 하중을 가해 두 탄성체의 접합 계면에 크랙을 형성 시킨 후, 그 크랙이 계면을 따라 진전할 때 측정된 하중으로부터 접합 에너지를 측정하는 시험법이다.⁽⁹⁾ Fig. 3 은 4 점 굽힘 시험기를 보여준다. Fig. 3(a)에서 보여지듯이 시험편에 하중을 가하기 위해 단순 인장 압축 시험기를 이용하였다. 또한 실험 중에 크랙의 발생 및 진전을 관찰하기 위해 현미경과 CCD 카메라를 장착하였다. 현미경으로 관찰되는 이미지는 초당 10 프레임의 속도로 연결된 컴퓨터에 저장된다. Fig. 3(b)는 시험편 지그를 보여준다. 시험편은 아래에 위치한 롤러 위에 놓여지게 되며, 그 위에 롤러가 있는 상부 지그가 놓여지게 된다. 따라서 시험편은 4 개의 롤러에 의해서만 지지되게 되며, 로드셀(load capacity: 50 N)에 연결된 핀으로 상부 지그를 눌러 시험편에 하중을 가하게 된다. 가해주는 하중은 로드셀로부터 측정된다.

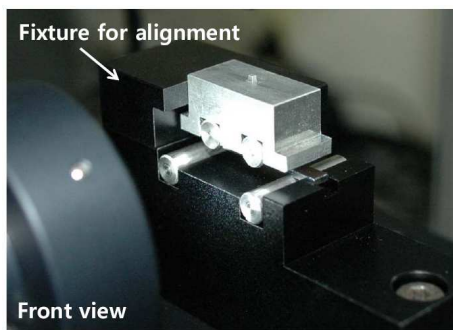


(a)



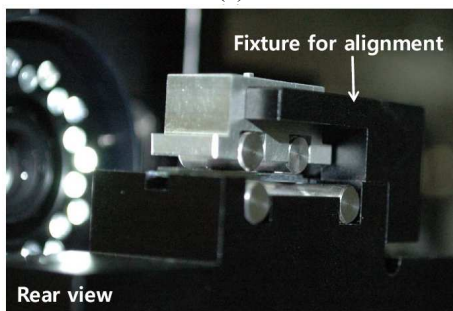
(b)

Fig. 3 Pictures of experimental apparatus for four-point bending test; (a) the apparatus and (b) the test jig



Front view

(a)



Rear view

(b)

Fig. 4 Pictures of the fixture for alignment

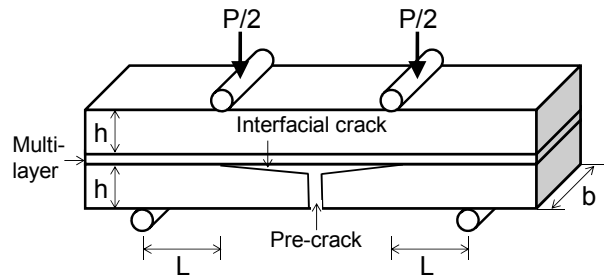


Fig. 5 Schematics of specimen for the four-point bending test

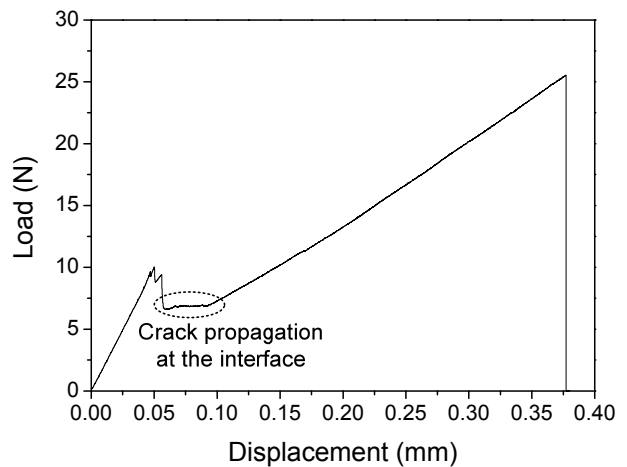


Fig. 6 Load-displacement curve of 4-point bending test

4 점 굽힘 시험은 각 롤러에 대한 시험편의 정렬 상태에 따라 결과가 크게 달라질 수 있다. 시험편 정렬을 위해 Fig. 4 에 보여지는 것과 같은 고정물 (fixture)를 제작하여 이용하였다. 고정물은 하부 롤러의 위치에 대한 시험편의 위치 및 상부 롤러의 위치를 정렬하는데 사용된다. 고정물을 하부 지그에 밀착시킨 후, 시험편과 상부 지그를 차례로 올려놓고, 이들을 고정물에 밀착시킨 후 하부 지그 및 시험편, 상부 지그의 중심이 일치하도록 고정물을 설계하였다. 정렬 후, 고정물을 하부 지그로부터 조심스럽게 제거한 후, 실험을 수행하게 된다. 시험기를 이용하여 0.005 mm/min 의 일정한 속도로 시험편을 눌러주고, 이때 시험편에 가해지는 하중을 측정하였다. 측정된 하중의 변화와 계면에서 크랙이 진전하는 현상의 상관관계를 보다 명확히 알기 위해 현미경과 CCD 카메라를 이용하여 계면을 실시간으로 관찰하였다. 계면에서 크랙이 진전할 때 측정된 하중을 바탕으로 식 (1) 을 이용하여 계면 접합 에너지(G)를 측정하였다.⁽⁹⁾

$$G = \frac{21(1-\nu^2)M^2}{4Eb^2h^3} = \frac{21(1-\nu^2)P^2L^2}{16Eb^2h^3} \quad (1)$$

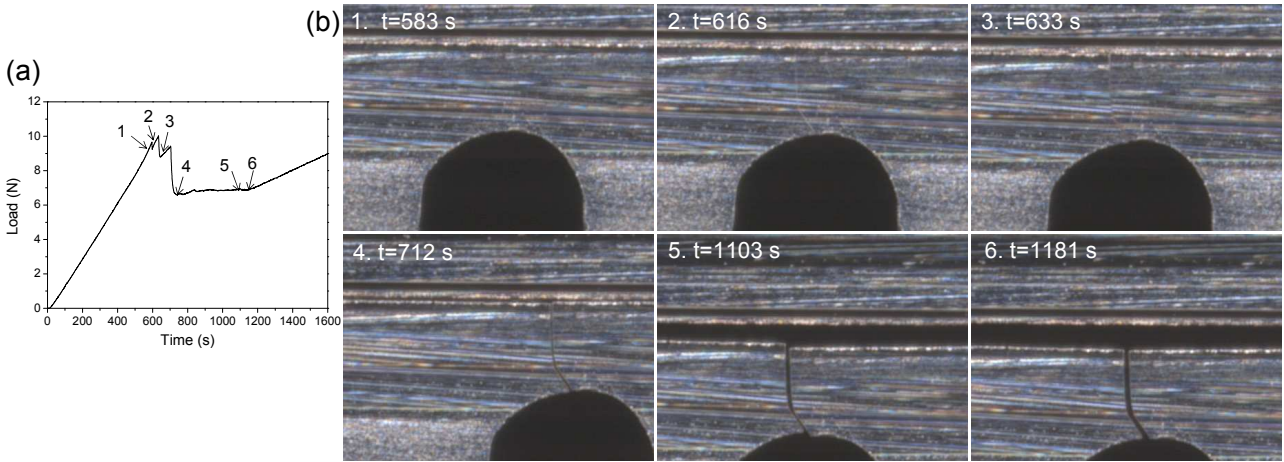


Fig. 7 (a) Load-time curve and (b) captured images corresponding to the marks on the curve

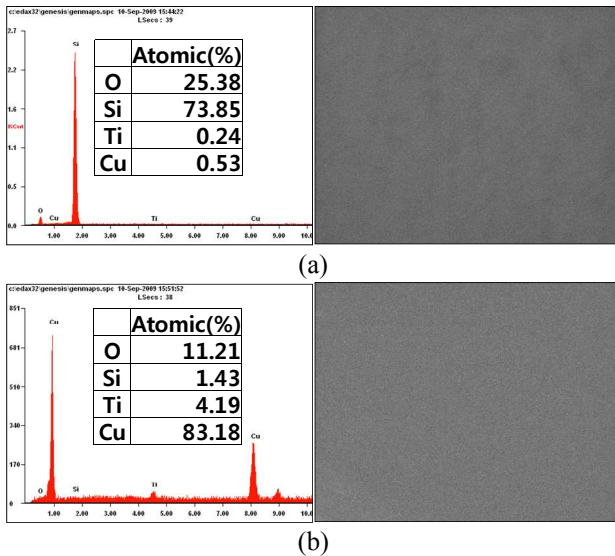


Fig. 8 EDS composition analyses and SEM images of a delaminated interfaces of specimen after the test: (a) fractured surface on the top wafer and (b) fractured surface on the bottom wafer

여기서 v 는 기판으로 쓰이는 탄성재료의 푸아송비 (Si 웨이퍼: 0.28), E 는 탄성계수 (Si 웨이퍼: 130 GPa), b 는 시험편의 너비 (3 mm), h 는 시험편 두께의 절반 (500 μm), L 은 롤러 사이의 거리 (5 mm)를 나타내며, 시험편의 형상은 Fig. 5 와 같다. Cu 접합부를 구성하는 다층구조의 두께는 약 3 μm 로 기판의 두께인 500 μm 에 비해 매우 작으므로 다층구조의 재료 상수와 두께 영향은 계면 접합 에너지 계산에서 무시될 수 있다.

4 점 굽힘 실험 후, 전계방출 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope: FE-SEM) 및 에너지 분산형 분광기(Energy dispersive spectroscopy: EDS) 을 이용하여 계면을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6 은 4 점 굽힘 시험에서 변위에 따라 측정된 하중을 보여준다. 변위가 증가함에 따라 시험편에 가해진 하중이 일정하게 증가하다가 급격히 감소하는 현상이 발생하였으며, 그 후 변위가 증가하여도 하중이 일정하게 유지되는 구간이 관찰되었다. 이때 시험편의 노치에서 발생한 크랙이 계면을 따라 진전하는 것으로 관찰되었다. 이는 Fig. 7 을 보면 보다 명확하게 알 수 있다.

Fig. 7 은 시간에 따라 측정된 하중 및 하중이 급격히 변화한 시점에서 캡처된 계면 사진을 보여준다. 하중이 일정하게 증가하다가 약 600 s 부근에서 약간 급격히 감소하는데, 이때 아래에 위치한 Si 기판을 가로질러 노치에서 계면으로 실날같은 크랙이 형성되었다(Fig. 7(b-2)). 그 이후 다시 하중이 증가하다가 급격히 감소하는데, 이때는 크랙이 좀더 명확하게 관찰되었다 (Fig. 7(b-3)). 다시 하중이 약간 증가한 후, 크게 감소하여 일정하게 유지되는 구간이 나타나며, 이때는 Fig. 7(b-4-6)에서 보여지는 것과 같이 계면을 따라 크랙이 진전하여 두 Si 기판 사이가 점점 벌어졌다. 따라서 크랙이 계면을 따라 진전할 때 일정하게 유지된 하중을 바탕으로 계산된 계면 접합 에너지는 $10.36 \pm 1.01 \text{ J/m}^2$ 이었으며, 이것은 3 차원 직접회로 공정을 위해 필요한 최소 계면 접합 에너지인 5 J/m^2 (10)보다 상당히 큰 수치이다.

Fig. 8 는 4 점 굽힘 시험 후에 측정된 파괴면에 대한 SEM 사진 및 EDS 분석 결과를 보여준다. Fig. 8(a) 와 (b)는 각각 위에 놓여져 있는 Si 웨이퍼의 파괴면과 아래에 놓여져 있었던 웨이퍼의 파괴면에 대한 분석 결과이다. EDS 성분 분석 결과, 윗면에는 Si 와 O

의 성분비율이 높게 나타나고, Ti 와 Cu 는 거의 나타나지 않은 반면, 아랫면에서는 Si 와 O 의 성분비율이 감소하고 Ti 와 Cu 가 높게 나타났다. 즉, 크랙은 접착층으로 사용된 Ti 와 절연층으로 사용된 SiO₂ 의 계면을 따라 진전하였으며, 이로부터 본 Cu-Cu 접합 시스템에서 가장 취약한 계면은 Ti 와 SiO₂ 의 계면인 것으로 확인 되었다. 만일 Cu-Cu 접합 계면이 Ti 와 SiO₂ 의 계면 보다 취약하다면, 이 계면에서 균열이 진전해야 하지만, 실험에서는 Cu-Cu 계면이 박리된 경우는 시험편에 이상이 있는 경우 외에는 없었다. 이러한 사실로부터 기존의 400 °C 보다 낮은 350 °C 의 접합 온도와 1.9 MPa 의 접합 압력 하에서 열가압 접합 공정으로 제조된 Cu-Cu 접합 계면은 Ti 와 SiO₂ 사이의 계면 보다 강한 접합 강도를 가졌다.

4. 결 론

4 점 굽힘 시험법을 이용하여 열접합 공정으로 제조된 Cu-Cu 접합 계면의 접합 특성을 평가하였다. 파괴면의 성분 분석 결과, 접착층으로 사용된 Ti 와 절연층으로 사용된 SiO₂ 사이의 계면이 가장 취약한 계면으로 확인되었으며, 이 계면의 계면 접착에너지는 10.36 J/m² 으로 측정되었다. 350 °C 의 온도에서 1.9 MPa 의 압력으로 1 시간 동안 본딩 공정을 수행한 후, 동일한 온도에서 1 시간 동안 어닐링을 수행하여 접합된 Cu-Cu 접합은 Ti/SiO₂ 계면보다는 높은 접합 강도를 갖었으며, 이는 이러한 접합 조건에서도 Cu-Cu 계면에서 확산(diffusion)이 이루어져 Cu-Cu 접합이 강하게 형성되었기 때문으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부, 산업기술연구회의 협동 연구사업 일환인 "차세대 반도체 MCP 핵심기술 개발 사업"의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Fan, A., Rahman, A. and Reif, R., 1999, "Copper Wafer Bonding," *Electrochemical and Solid-State Letters*, Vol. 2, No. 10, pp. 534~536.
- (2) Ruythooren, W., Beltran, A. and Labie, R., 2007, "Cu-Cu Bonding Alternative to Solder Based Micro-Bumping," *9th Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 315~318.
- (3) Swinnen, B., Ruythoore, W., De Moor, P., Bogaerts, L., Carbonell, L., De Munck, K., Eyckens, B., Stoukatch, S., Sabuncuoglu Tezcan, D., Tokei, Z., Vaes, J., Van Aelst, J. and Beyne, E., 2006, "3D Integration by Cu-Cu Thermo-Compression Bonding of Extremely Thinned Bulk-Si die Containing 10 um Pitch Through-Si vias," *Electron Devices Meeting, IEDM '06, IEEE International*, pp.1~4
- (4) Tadepalli, R. and Thompson, C. V., 2003, "Quantitative Characterization and Process Optimization of Low-Temperature Bonded Copper Interconnects for 3-D Integrated Circuits," *Interconnect Technology Conference, Proceedings of the IEEE 2003 International*, pp. 36~38.
- (5) Chen, K. N., Tan, C. S., Fan, A. and Reif, R., 2005, "Copper Bonded Layers Analysis and Effects of Copper Surface Conditions on Bonding Quality for Three-Dimensional Integration," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 34, No. 12, 1464~1467.
- (6) Tan, C. S., Chen, K. N., Fan, A. and Reif, R., 2005, "The Effect of Forming Gas Anneal on the Oxygen Content in Bonded Copper Layer," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 34, No. 12, 1598~1602.
- (7) Tadepalli, R., Turner, K. T. and Thompson, C. V., 2008, "Effect of Patterning on the Interface Toughness of Wafer-Level Cu-Cu Bonds," *Acta Materialia*, Vol. 56, pp. 438~447.
- (8) Jang, E. J., Park, Y. B., Pfeiffer, S., Kim, B., Matthias, T., Hyun, S. and Lee, H. J., 2009, "Effect of Post-Annealing Conditions on Cu-Cu Wafer Bonding Characteristics," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 54, No. 3, pp. 1278~1282.
- (9) Charalambides, P. G., Lund, J., Evans, A. G. and McMeeking, R. M., 1989, "A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 56, pp. 77~82.
- (10) Scherban, T., Sun, B., Blaine, J., Block, C., Jin, B. and Andideh, E., 2001, "Interfacial Adhesion of Copper-Low k Interconnects," *Interconnect Technology Conference, Proceedings of the IEEE 2001 International*, pp.257~259.