

3차원 소자 집적을 위한 Cu-Cu 접합의 계면접착에너지에 미치는 후속 열처리의 영향

장은정 · Sarah Pfeiffer* · Bioh Kim* · Thorsten Matthias* · 현승민** · 이학주** · 박영배†

안동대학교 신소재공학부, *EV Group, **한국기계연구원

Effect of Post-Annealing Conditions on Interfacial Adhesion Energy of Cu-Cu Bonding for 3-D IC Integration

Eun-Jung Jang, Sarah Pfeiffer*, Bioh Kim*, Thorsten Matthias*, Seungmin Hyun**, Hak-Joo Lee** and Young-Bae Park†

School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

*EV Group, Arizona, USA

**Division of Nano-Mechanical Systems Research, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

(2008년 3월 24일 접수 : 2008년 4월 10일 채택)

Abstract 1.5 μm -thick copper films deposited on silicon wafers were successfully bonded at 415°C/25 kN for 40 minutes in a thermo-compression bonding method that did not involve a pre-cleaning or pre-annealing process. The original copper bonding interface disappeared and showed a homogeneous microstructure with few voids at the original bonding interface. Quantitative interfacial adhesion energies were greater than 10.4 J/m² as measured via a four-point bending test. Post-bonding annealing at a temperature that was less than 300°C had only a slight effect on the bonding energy, whereas an oxygen environment significantly deteriorated the bonding energy over 400°C. This was most likely due to the fast growth of brittle interfacial oxides. Therefore, the annealing environment and temperature conditions greatly affect the interfacial bonding energy and reliability in Cu-Cu bonded wafer stacks.

Key word Adhesion, 3-D Integration, 4-point bending test, Cu-Cu bonding, post annealing

1. 서 론

지속적인 전자제품의 소형화로 인해 작은 면적에 더 많은 소자를 집적시키기 위한 경박 단소화를 구현하기 위한 최신 전자 패키징(electronic packaging) 기술이 매우 활발히 연구 개발되고 있다. 3차원 소자 집적기술(3-D IC Integration)은 Figure 1과 같이 실리콘 웨이퍼 또는 칩을 금속전도체 사이 또는 절연층 사이를 수직으로 접합하여 전기적, 기계적 상호연결을 가능하게 하는 접합 기술이다.^{1,2)} 차세대 연구 분야로 적층 기술이 각광을 받는 이유는 소자의 성능을 높일 수 있고, 전력소모를 줄이며, 모듈(module) 응용에 적합한 폼팩터(form factor)를 효과적으로 조절 할 수 있으며, 또한 호환성이 없는 다른 공정 기술을 집적 할 수 있게 하는 장점들이 있기 때문이다.

3차원으로 칩을 쌓는 기술은 전면(face-to-face) 접합,

플립칩(flip chip), 또는 마이크로 범프(micro bump)를 통해 간단히 수행 될 수 있다. 그 중 솔더를 사용하여 Cu를 접합 할 경우 낮은 온도에서 접합이 가능하고, 접합 시간 또한 짧은 특징을 가진다.³⁾ 하지만 솔더는 온도가 올라가면 Cu와 반응하여 취성특성이 있는 금속간 화합물(intermetallic compound, IMC)을 생성하고, 접합공정과 동일한 온도에서 일정 시간 유지하게 되면 금속간화합물 계면에 Kirkendall void가 형성되어 접합부의 기계적 성질이 현저히 저하되는 문제점이 있다.⁴⁾ 따라서 Cu를 직접 접합 할 경우 솔더나 전도성 접합물질을 사용했을 경우 보다 Cu 접합층 내부에 void나 금속간 화합물을 만들지 않아 계면의 기계적 강도가 향상되고, 전도체를 본딩층으로 직접 사용하기 때문에 전기적 특성에서 현저히 우수한 장점을 가지고 있다. Cu는 전기적 저항이 낮아 RC delay를 현저히 저하시키고,⁵⁾ Electromigration(EM)에 대한 저항성이 높아 3차원 집적회로 기술에 적합하며, 열과 압력을 가한 열 압착(thermo-compression) 접합을 통해 칩과 칩의 상호연결에 우수한 특성을 가진 재료이다.⁶⁾ 하지만 고온에서 Cu 접합을 실시할 경우 열

†Corresponding author

E-Mail : ybpark@andong.ac.kr (Y. B. Park)

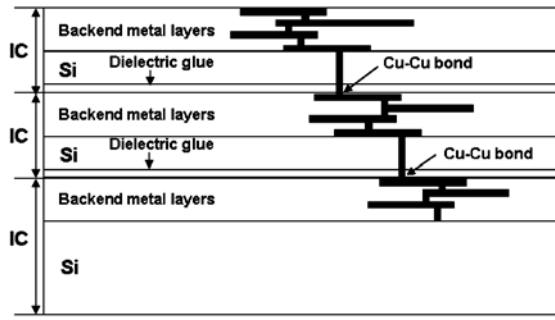


Fig. 1. Schematic of cross-sectioned 3-D IC structure with Cu-Cu bonding.

에 민감한 폴리머나 low-k에 손상을 미치는 단점이 있어, 400°C이하의 저온공정이 필요하다.⁷⁾ 그러나 Cu는 표면에 산화막의 생성이 아주 빠르고 쉽게 생성되어 저온에서 Cu를 접합 할 경우 Cu 표면의 산화막으로 인해 접합특성에 문제를 발생시킨다.⁸⁾ 이에 따라 접합 전 추가적인 Cu 산화막의 충분한 제거와 접합 후에도 접합 조건과 동일한 온도에서 충분한 열처리 공정이 필요하다고 보고되고 있다.⁹⁾

3차원 집적회로 접합기술에 대해 최적 공정조건 및 신뢰성 확보에 관한 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있으나, 계면접착에너지에 대한 정량적 평가 및 계면신뢰성 평가 기술에 대한 연구가 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 3차원 집적회로 접합기술을 위한 Cu 웨이퍼를 직접 접합한 후 4점굽힘실험(4-point bending test)을 통하여 정량적인 계면접착에너지를 평가하고자 한다. 전처리 공정인 Cu 산화막 제거공정 없이 415°C에서 열 압착 접합 공정 후 Cu 접합층의 단면 미세구조를 관찰하여 접합

정도를 평가하였다. 또한 시험편을 대기와 10⁻⁶ Torr의 고진공 분위기에서 200°C, 300°C, 400°C, 500°C 각각에서 1시간 동안 열처리 후 4점굽힘실험을 통해 후속 열처리 조건에 따른 계면접착에너지 거동을 평가하였다.

2. 실험 방법

Cu 웨이퍼를 415°C에서 열 압착 접합 한 후 Cu 접합층의 미세구조 분석 및 계면접착에너지 평가를 위해 Figure 2와 같이 시험편을 제작하였다. 먼저 SiO₂가 도포된 500 μm의 두께를 가진 n형 <100> 4인치 실리콘 웨이퍼 2장에 동일한 1.5 μm 두께의 Cu박막을 DC 마그네트론 스퍼터로 증착하였다. EV Group의 aligner에 두 장의 실리콘 웨이퍼를 차례로 정렬 후 접합 장비로 이동을 위해 척(chuck)에 고정 시켰다. EV Group의 접합 장비에 웨이퍼가 고정된 척을 장착시키고, 분위기는 10⁻⁶ Torr의 고진공, 접합 온도는 415°C, 접합 시 압력은 25 kN으로 40분간 접합 공정 실시 후 내부 온도를 120°C까지 냉각 하도록 프로그램을 설정 하였다. 접합 장비 내부는 위와 아래에서 열을 가하도록 되어 있으며 실제 실리콘 웨이퍼와 10°C 이내의 온도 차가 발생한다. 이때 접합 공정 전 Cu 표면의 산화막 제거를 위한 전처리 공정을 실시하지 않고, 접합공정 조건 및 후속열처리 공정조건에 따른 접합능력을 평가하였다. 접합된 실리콘 웨이퍼는 다이싱(dicing) 장비에서 다이아몬드 블레이드로 30 mm×3 mm의 크기로 조각을 내었고, 아래쪽 실리콘 웨이퍼의 중심에 초기 균열 진전을 유도하기 위해 깊이 450 μm의 노치(notch)를 내었다.

Cu 접합층의 단면 미세구조 관찰을 위하여 조각난 시험편의 단면을 Focus Ion Beam (FIB)로 관찰 하였다.

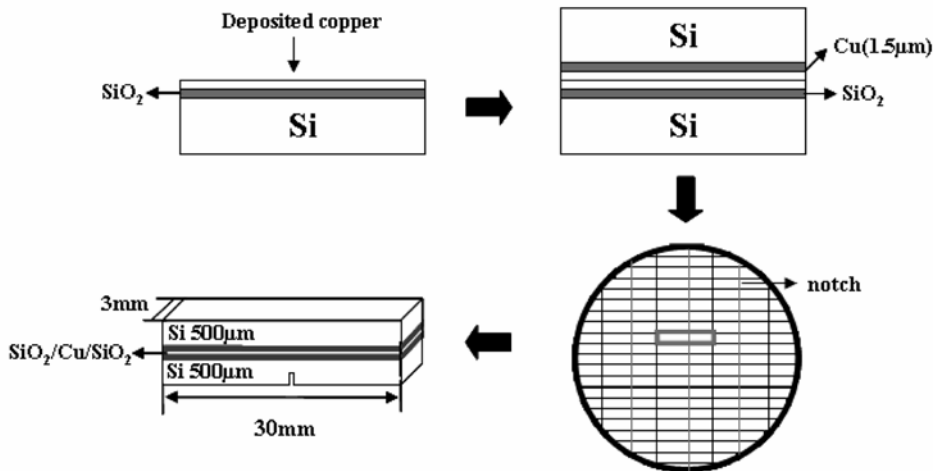


Fig. 2. Cu-Cu bonding sample preparation scheme for 4-point bending test.

시험편을 홀더에 장착하고 20°로 기울인 뒤 Cu 접합층을 중심에 두고 너비 20 μm, 깊이 5 μm로 이온 빔을 조사하여 식각 하였다. 식각 후 20초간 Cu 층에 에칭을 실시하였고, FIB에 장착되어 있는 FE-SEM으로 미세구조를 관찰 하였다. 후속 열처리에 대한 Cu 접합층의 계면접착에너지를 평가하고자 200°C, 300°C, 400°C, 500°C의 온도에서 1시간씩 열처리를 하였다. 후속 열처리는 대기과 10⁻⁶ Torr의 고 진공분위기의 두 조건에서 실시하였고, 챔버 내부 온도는 20분간 후속 열처리 조건의 온도까지 도달하도록 하였다. 각각의 처리온도 조건에서 1시간을 유지하고 25°C로 냉각시켰다. 준비된 시험편의 계면접착에너지 측정은 LLOYD Instruments 사의 인장시험기의 4점굽힘시험기를 통해 평가하였다. Figure 3은 Cu 접합부의 계면접착에너지를 측정하기 위하여 실시한 시험편 모식도 및 단면 사진을 보여주고 있다. 시험편은 노치가 있는 웨이퍼가 아래로 향하도록 정렬하였고, 실험을 시작하기 전에 디지털 카메라를 이용하여 지그의 중심축과 시험편의 노치가 일직선에 있는지 확인하였다. 실험에 사용된 로드셀은 20 N, 로딩 속도는 0.08 μm/s, 핀 간 거리는 5 mm로 하였다.

4점굽힘시험법은 단일재료 내부에 생긴 균열이 진전 할 때 필요한 에너지 해방률(G)을 선형과괴역학적 방법으로 측정하여 박막 간 계면접착에너지를 측정하는 파괴역학 시험법이다.¹⁰⁾ 이 시험법은 두 개의 탄성 기관 사이에 샌드위치 구조로 박막을 쌓아 올린 뒤 노치를 통해 예비 균열을 발생시킨 시험편으로 이루어지며, Figure 3(a)와 같이 모멘트가 일정한 위쪽의 핀 사이의 영역에서 발생한 계면균열을 통해 정량적인 계면접착에너지를 측정 할

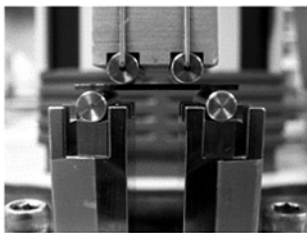
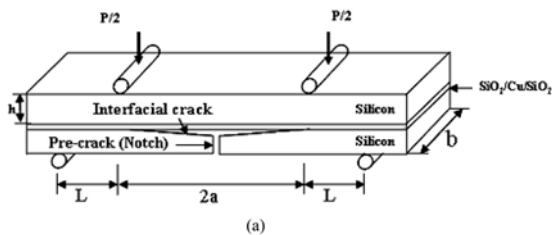


Fig. 3. (a) 4-point bending test sample structure and (b) photograph of 4-point bending tester.

수 있다.¹¹⁾ 실험은 변위 제어로 진행되고 결과는 하중과 변위 곡선으로 나타내어진다. 여기서 하중 대 변위 곡선으로부터 측정된 일정한 하중값을 다음의 식에 대입하여 균열이 생긴 영역의 계면접착에너지를 얻을 수 있다.¹²⁾

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

여기서 ν 는 기관으로 쓰이는 탄성재료의 프와송비(실리콘 웨이퍼 : 0.28), E는 탄성계수(실리콘 웨이퍼 : 130 GPa), b는 시험편의 너비(3 mm), h는 시험편 두께의 절반(500 μm)을 의미하며, 모멘트 M은 PL/2이다. P는 하중과 변위 곡선에서 일정한 구간의 하중값, L은 핀 사이의 거리(5 mm)를 나타내며, 여기서 측정된 계면접착에너지의 단위는 J/m²이다.

실험이 완료된 시험편의 표면 및 계면을 전계방출 주사전자현미경 (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) 및 FIB로 각각 관찰하였다. 박리된 파면 경로를 판단하기 위해 파면에 대한 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) 분석도 실시 하였다.

3. 결과 및 고찰

415°C에서 열 압착 접합 한 뒤 Cu 접합 층을 FIB로 미세구조를 관찰한 결과를 Figure 4에 나타내었다. 그림을 보면 Cu는 접합 공정 전 Cu 표면의 산화막 제거를 하지 않았음에도 불구하고 본래의 접합계면이 사라지고 하나의 박막처럼 연속적이고 안정되게 접합 된 것을 알 수 있다. 또한 Cu의 결정들을 보면 약 0.8 μm 정도의 결정립 크기를 갖고, 결정내 쌍정(twin)이 관찰 되어 매우

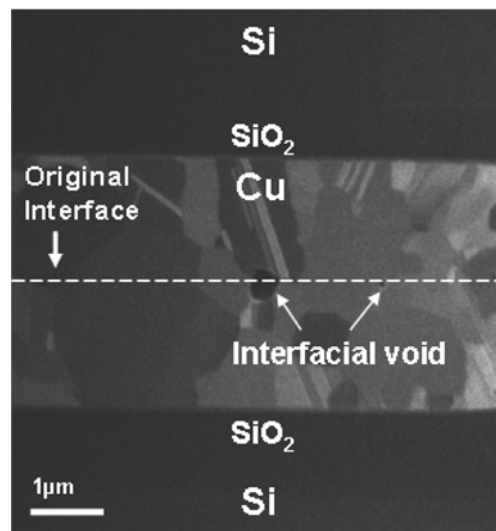
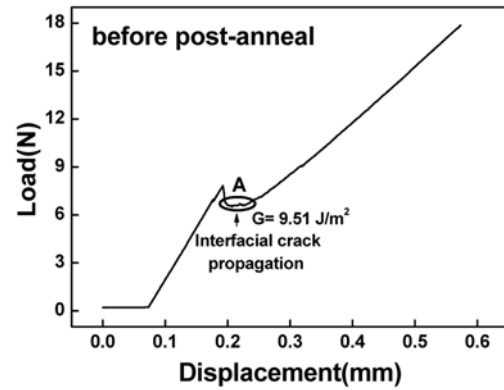


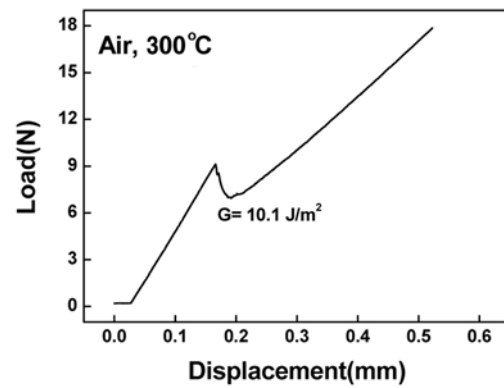
Fig. 4. Cross-sectional FIB image of Cu bonded layer at 415°C by thermo-compression bonding method.

안정화된 미세구조를 나타내었다. 이것은 415°C의 고온과 25 kN의 매우 큰 압력 조건으로 인해 Cu 원자가 Cu의 접합층 사이의 계면 산화막층을 깨고 본연의 계면을 넘어 충분히 확산 할 수 있었기 때문으로 생각된다.⁹⁾ 그리고 Cu 접합 층 사이의 Cu 본연의 계면에서 일부 고립된 공공(void)들이 결정립 삼중점(triple point) 부근에서 관찰되었다. 이러한 공공들이 Cu 본연의 계면에 전반적으로 발생한 것인지 확인하기 위해 2차 폴리싱을 실시하였다. 그 결과 1차 폴리싱 후 관찰된 Figure 4의 위치에 있던 공공은 사라졌고, 2차 폴리싱을 실시한 뒤 다른 위치에서 비슷한 크기의 공공이 나타났다. 따라서 Figure 4의 FIB 사진에서 관찰된 공공들은 Cu 본연의 계면에 전반적으로 생성된 국부적인 결함이라고 생각되며, 접합 전 Cu의 불균일한 표면 상태에 의해 발생한 현상으로 판단된다.³⁾ 따라서 본 실험에서 사용한 Cu-Cu 접합조건으로 충분한 접합상태를 확보할 수 있으나, 접합 전 Cu 표면 산화막 제거를 위한 효과적인 전처리 공정이 추가로 적용된다면¹³⁾ 접합 온도 및 압력 조건을 다소 완화시키더라도 계면에 발생하는 공공을 보다 효과적으로 제거하고 좋은 접합강도를 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 효과적인 표면전처리 기술 도입에 따라, Cu 접합기술의 단점인 높은 접합온도를 최대한 낮춰서도 우수한 접합강도를 확보할 수 있다면, 접합된 웨이퍼 내 소자의 특성저하 및 웨이퍼 휨(warp)에 따른 패키지 신뢰저하를 최소화 할 수 있을 것으로 생각된다.

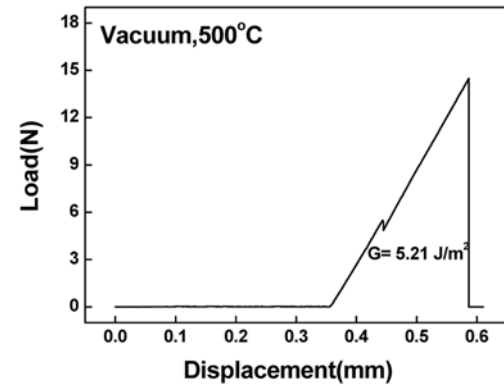
열 압착 접합된 Cu 접합부의 계면접착에너지를 4점굽힘실험으로 측정하여 Figure 5에 하중과 변위 곡선으로 나타내었다. Figure 5(a)는 후속 열처리를 하지 않은 시험편의 하중-변위 곡선이고, Figure 5(b)와 5(c)는 각각 대기 중에서 300°C, 진공 분위기에서 500°C, 1시간의 조건으로 후속 열처리한 시험편을 통해 얻은 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. Figure 5의 하중-변위 곡선들은 4점굽힘실험의 전형적인 하중-변위 결과 거동을 보여주고 있는데, 시험편에 가해지는 응력이 선형탄성적으로 증가하다가, 예비균열을 위한 노치에 집중 되고 첫 번째 실리콘 웨이퍼의 노치가 깨어지면서 하중은 급격히 감소하게 된다. 이때에 첫 번째 최대 하중점을 나타내며, 동시에 균열은 시험편 내부의 계면으로 진전되어 계면을 박리시킨다. 그 뒤 균열은 모멘트가 일정하게 작용되는 영역을 벗어나면서, 인장 방향으로 가해지는 하중에 의해 노치가 없는 두 번째 웨이퍼로 진전되고 결국 파손되어 Figure 5(c)처럼 두 번째 최대 하중점을 나타낸다. 이때 계면이 박리되면서 두 재료 사이의 접착력에 의해 Figure 5(a)의 A와 같은 하중이 일정한 구간을 보이는데, 이때 하중 P를 위의 식 (1)에 대입하면 계면접착에너지(G)를 구할 수 있다.¹⁰⁾ 일정한 하중 구간이 명확히 보이지 않는 Figure 5(c)의 경우에는 계면을 통한 균열진전이 매우 짧은 구간



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Load-displacement curves of 4-point bending test; (a) before post-anneal, (b) post-anneal at 300 for 1hr in air condition, (c) post-annealing at 500°C for 1hr in vacuum condition.

에서만 발생하고 두 번째 웨이퍼로 바로 균열이 진전되었기 때문인데, 이 경우에는 감소한 지점에서의 최소하중값을 사용하여 계면결합에너지를 구했다. Fig 5(a), (b), (c)에서 얻어진 G 값은 각각 9.51 J/m², 10.1 J/m², 5.21 J/m²이다. 또한 Figure 5(a)와 5(b)의 하중-변위 곡선이 하중값 18 N 이상에서 실험이 중단된 것처럼 보이는 것은 실험에 사용된 로드 셀의 용량 제한에 의해 노치로부터 진전된

균열이 계면을 박리시키고 두 번째 실리콘 웨이퍼를 깨지 못하여 나타난 결과이다. 여기서 Cu 접합층의 계면접착에너지 측정에 필요한 하중값은 구간 A에서 얻을 수 있으므로 노치가 없는 두 번째 실리콘 웨이퍼가 깨어지지 않은 것은 중요한 의미를 갖지는 않는다. 따라서 본 실험을 위해 제작한 4점굽힘장치 및 시험편을 통해 Cu 웨이퍼 접합층의 정량적인 계면결합에너지를 성공적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

대기 중과 10^{-6} Torr의 고 진공분위기에서 온도에 따른 후속 열처리를 실시하여 Cu 접합층의 계면접착에너지를 측정한 결과를 Figure 6에 나타내었다. 후속 열처리 전의 계면접착에너지는 $10.4 \pm 0.8 \text{ J/m}^2$ 이고, 대기 중에서 200°C, 300°C, 400°C, 500°C 조건으로 1시간 열처리 후 계면접착에너지는 각각 $12.57 \pm 1.4 \text{ J/m}^2$, $11.94 \pm 0.35 \text{ J/m}^2$, 0.08 J/m^2 , 0.28 J/m^2 으로 측정되었다. 열처리 전과 비교하여 200°C, 300°C에서 계면접착에너지는 약간 증가하였으나, 계면접착에너지의 변화는 크지 않은 것으로 생각된다. 하지만, 400°C와 500°C에서는 계면접착에너지가 거의 0에 가까운 매우 큰 감소가 발생한 것은 대기중의 산화분위기와 연관이 많은 것으로 판단된다. 일반적으로 Cu는 산화가 잘 일어나는 물질이고 고온 산화 시에는 산소의 영향으로 Cu 산화막(CuO)을 쉽게 형성하며¹⁴⁾ 계속적으로 성장하게 된다. 따라서, 후속 열처리를 하는 동안 Cu 표면 산화막층 두께가 증가하는 거동과¹⁵⁾ 계면접착에너지의 급격한 저하와는 밀접한 상관관계가 있을 것으로 생각된다. 한편 10^{-6} Torr의 고 진공분위기에서 후속 열처리 후 계면접착에너지를 평가한 결과, Figure 6에서 볼 수 있는 바와 같이 300°C까지의 거동은 대기 중 열처리와 유사하게 오차범위에서 큰 변화가 없었지만, 500°C 열처리 조건에서는 열처리 전에 비해 절반 정도의 계면접착에너지를 보여주고 있다. 400°C에서는 측정 중 시험편의 파손으로 계면결합에너지 값을 얻을 수 없었다. Cu/SiO₂/Si 시스템을 고 진공에서 고온 열처리를 할 경우 소량의 Cu가 SiO₂ 내부로 확산되어 Cu 산화막을 형성한다고 보고되며,¹⁶⁾ 이를 통하여 명확한 해답을 명시하기는 어려우나 본 연구에서도 고온 열처리에 의한 Cu 산화막의 증가로 인해 계면접착에너지가 감소한 것으로 판단된다. 고 진공 분위기에서의 계면접착에너지 거동은 300°C 이하에서는 큰 차이를 보이지 않지만, 500°C의 고온에서 계면접착에너지 차이를 확연히 나타내고 있다. 이것은 산소 공급 정도 차이에 따른 Cu 표면에서의 고온산화 거동 차이의 영향이 큰 것으로 생각된다. 또한 진공 분위기에서 500°C, 1시간 후속 열처리 후 4점굽힘실험 결과를 나타낸 Figure 5(c)의 하중과 변위 곡선에서는 Figure 5(a)의 A구간과 같이 계면이 박리 되면서 발생하는 일정 하중영역을 았았다. 이러한 거동을 보이는 것도 취성특성을 갖는 Cu 표면산화막층의 성장과 밀접한 연관이 있는 것으로 생각되나, 차

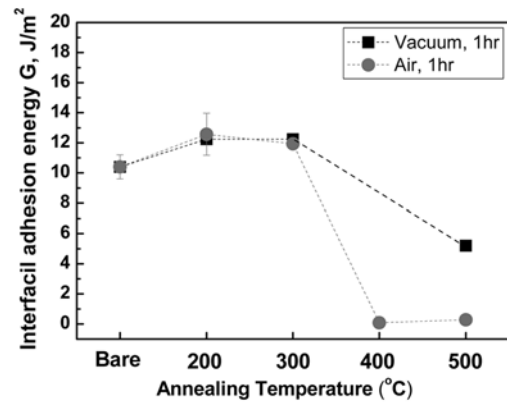


Fig. 6. Effects of post-bonding anneal conditions on interfacial adhesion energy.

후 보다 정밀한 측정분석 및 시편계면분석을 통해 규명해야 할 것이다.

4점굽힘실험 후 파괴 경로 확인과 파면의 미세구조 관찰 및 표면 조성 분석을 위한 FE-SEM과 EDS 분석결과를 Figure 7과 8에 나타내었다. Figure 7은 후속 열처리를 하지 않은 시험편의 양쪽 파면에 대한 FE-SEM과 EDS분석 결과이다. Figure 7(a)와 같이 상부 웨이퍼 파면사진에서는 Cu의 미세조직들로 보이는 형상들이 관찰되었고, EDS로 표면 성분 분석 결과 Figure 7(b)와 같이 Si 4.69 at.%, Cu 95.31 at.%로 나타나 깨끗한 Cu 표면으로 판단된다. Figure 7(c)와 같이 하부 웨이퍼 파면 사진에서는 특별한 미세조직이 보이지 않고 매끈한 표면 형상을 보여주고 있다. EDS로 표면 성분을 분석한 결과 Figure 7(d)와 같이 Si 99.96 at.%, Cu 0.04 at.%를 나타내어 하부 웨이퍼의 SiO₂ 표면으로 판단된다. 따라서 후속 열처리 하지 않은 시험편으로 측정된 박리면은 Cu와 Cu 접합계면이 아닌, 하부 웨이퍼의 SiO₂ 층과 Cu계면에서 발생한 것으로 판단된다. 이것은 Figure 4와 같은 Cu 접합층의 단면구조 사진에서 알 수 있는 바와 같이 본 실험에서 사용한 접합조건에서는 Cu-Cu 접합계면이 사라지고 안정된 단일 결정구조를 보이는 구조로 변하기 때문에, 4점굽힘실험을 실시하는 동안 노치로부터 발생한 균열이 Cu 내부로 진전되지 못하고, 상대적으로 Cu 접합층 보다 계면접착에너지가 약한 SiO₂와 Cu 사이 계면에서 박리가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 열처리 전 Cu-Cu 계면접착에너지는 본 실험에서 측정한 $10.4 \pm 0.8 \text{ J/m}^2$ 보다 높은 매우 좋은 접합특성을 보이는 것을 다시 한번 확인할 수 있다. 대기 중에서 400°C, 1시간 동안 후속 열처리 한 시험편의 파면을 관찰하고 분석한 결과를 Figure 8에 나타내었다. 후속 열처리한 시험편은 열처리 전의 시험편과 다르게, 양 파면 모두 Figure 7(c)의 SEM 사진처럼 특별한 미세조직이 보이지 않고 매끈한

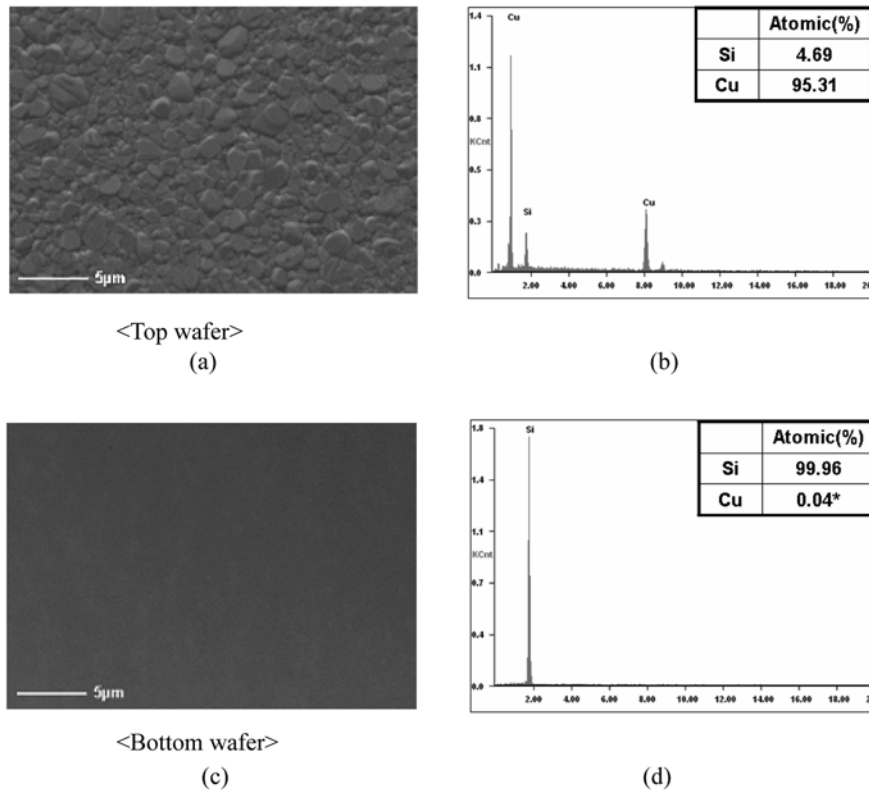


Fig. 7. Microstructures and compositions of delaminated interfaces before post-annealing; (a) SEM images and (b) EDS compositions of top wafer surface, (c) SEM images and (d) EDS compositions of bottom wafer surface.

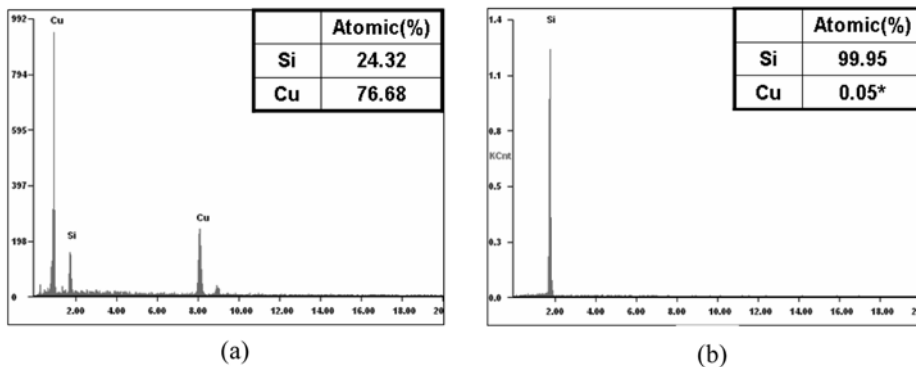


Fig. 8. EDS compositions of delaminated interfaces after post-annealing at 400°C for 1hr in air condition; (a) top wafer surface and (b) bottom wafer surface.

표면형상을 보였다. EDS로 양 쪽 파면을 분석한 결과를 Figure 8(a)와 (b)에 나타내었다. Figure 8(a)는 상부 실리콘 웨이퍼 조각 표면을 분석한 것으로 Si 24.32 at.%, Cu 76.68 at.%로 나타나 Cu위에 Cu-Si-O 산화막층이 있는 것으로 생각된다. 이를 육안으로 관찰하기 위해 파면의 표면을 핀셋으로 긁은 결과 산화막층 안쪽에 Cu층이 있는 것을 확인 하였다. 그리고 Figure 8(b)와 같이 하부 웨이퍼 파면을 분석한 결과 Si가 99.95 at.%로 나타나

SiO₂ 표면으로 생각된다. 이는 대기 중에서 400°C, 1시간 동안 후속 열처리 한 후에도 Cu-Cu 접합계면에서 박리가 일어나지 않았고, Cu 하부 산화막층 부근에서 박리가 일어난 것으로 판단된다. 따라서, 산소공급이 충분한 대기 분위기에서 400°C이상 온도에서 열처리 하는 경우, Cu 표면 산화막층의 두께증가에 따른 취성파괴가 발생하여 계면접착에너지의 급격한 저하가 발생하는 것으로 생각된다. 하지만 SEM과 EDS분석으로는 정밀한 분석에 한계

가 있으므로, 차후 접합 단면에 대한 TEM 미세구조 및 조성 분석 및 XPS 결합분석이 필요하다. 또한 Cu-Cu 접합층 자체의 계면접착에너지를 구하기 위해서는 Cu증착 전 Ta 등의 계면접착층을 증착하여 Cu-Cu 접합층이 가장 접합에너지가 낮은 계면이 되게 유도하여, 보다 정확한 접합부의 계면접착에너지를 평가하는 것이 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

3차원 소자 집적을 위한 Cu-Cu 접합부에 대한 정량적인 계면접착에너지 측정 및 후속열처리의 영향을 평가하였다. 본 실험을 위해 제작한 4점굽힘장치 및 시편구조를 통해 Cu 웨이퍼 접합층의 정량적인 계면접착에너지를 성공적으로 평가할 수 있었다. Cu 표면 산화막 제거 공정 없이 415°C에서 열 압착 접합한 결과, 접합계면이 사라지고 충분히 강한 접합상태를 확보할 수 있었다. 이에 따라 Cu 접합계면이 아닌 Cu와 SiO₂ 사이 계면에서 박리가 발생했고, 10.4 J/m² 이상의 매우 높은 계면접착에너지를 얻을 수 있었다. 300°C까지는 열처리 분위기에 상관없이 계면접착에너지의 변화가 크지 않았지만, 400°C 이상에서는 열처리 분위기에 따른 산소공급여부가 계면접착에너지 저하에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 서울테크노파크의 차세대패키징 공정·장비 실용화 사업의 일환으로 산업자원부 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. R. Tadepalli, Ph. D. Thesis, p. 13-17, Massachusetts Institute of Technology, USA (2006).
2. K. N. Chen, C. S. Tan, A. Fan and R. Reif, Appl. Phys. Lett., **86**, 011903 (2005).
3. W. Ruythooren, A. Beltran and R. Labie, in proceedings of the Electronics Packaging Technology Conference (Singapore, December 2007) p.51
4. J. M. Koo, B. Q. Vu, Y. N. Kim, J. B. Lee, J. W. Kim, D. U. Kim, J. H. Moon and S. B. Jung, JEM., **37**(1), 118 (2007).
5. A. Fan, A. Rahman and R. Reif, Electrochemical and Solid-Sate Letters., **2**(10), 534 (1999).
6. K. N. Chen, S. M. Chang, L. C. Shen and R. Reif, J. E. M., **35**(5), 1082 (2006).
7. C. S. Tan, R. Reif, N. D. Theodore and S. Pozder, Appl. Phys. Lett., **87**, 201909 (2005).
8. K. N. Chen, A. Fan, C. S. Tan and R. Reif, J. E. M., **32**(12), 1371 (2003).
9. K. N. Chen, A. Fan, C.S. Tan and R. Reif, J. E. M., **35**(2), 230 (2006).
10. R. Shaviv, S. Toham and P. Woytowitz, Microelectronic Eng., **82**, 99 (2005).
11. H. Zhenyu, Z. Suo, X. Guanghai, H. Jun, J. H. Prevost and N. Sukumar. Eng. Fracture Mech., **72**, 2584 (2005).
12. P. G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans and R. M. McMeeking, J. Appl. Mech., **111**, 77 (1989).
13. R. Tadepalli and C. V. Thompson, Appl. Phys. Lett., **90**, 151919 (2007).
14. S.M. Yi, J. U. An, S. S. Hwang, J. R. Yim, Y. H. Huh, Y. B. Park and Y. C. Joo, Thin Solid Films., **516**, 2325 (2008).
15. N. Tomesakai, M. Suzuki and J. Komeno, J. Electrochem. Soc., **140**, 2432 (1993).
16. K. Hirodawa, Y. Yokokawa and M. Oku, S. I. A., **3**(2), 81 (1981).