

Cu-Cu 열압착 웨이퍼 접합부의 계면접합강도에 미치는 N₂+H₂ 분위기 열처리의 영향

장은정 · 김재원, Bioh Kim¹ · Thorsten Matthias¹ · 현승민² · 이학주² · 박영배*

국립안동대학교 신소재공학부 청정소재기술연구센터, ¹EV Group, ²한국기계연구원 나노융합기계연구본부

Effect of N₂+H₂ Forming Gas Annealing on the Interfacial Bonding Strength of Cu-Cu thermo-compression Bonded Interfaces

Eun-Jung Jang, Jae-Won Kim, Bioh Kim¹, Thorsten Matthias¹, Hak-Joo Lee²,
Seungmin Hyun² and Young-Bae Park*

The Center for Green Materials Technology, School of Advanced Materials Engineering,
Andong National University 388 Songcheon, Andong, Gyeongbuk, 760-749

¹EV Group, Arizona, USA

²Nano-Mechanical System Rearch Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Korea

(2009년 4월 29일 접수: 2009년 8월 18일 게재확정)

초 록: 3차원 소자 집적을 위한 저온접합 공정 개발을 위해 Cu-Cu 열 압착 접합을 300°C에서 30분간 실시하고 N₂+H₂, N₂ 분위기에서 전·후속 열처리 효과에 따른 정량적인 계면접착에너지를 4점굽힘시험법을 통해 평가하였다. 전 열처리는 100, 200°C의 N₂+H₂ 가스 분위기에서 각각 15분간 처리하였고, 계면접착에너지는 2.58, 2.41, 2.79 J/m²로 전 열처리 전·후에 따른 변화가 없었다. 하지만 250, 300°C의 N₂ 분위기에서 1시간씩 후속 열처리 결과 2.79, 8.87, 12.17 J/m²으로 Cu 접합부의 계면접착에너지가 3배 이상 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

Abstract: Cu-Cu thermo-compression bonding process was successfully developed as functions of the N₂+H₂ forming gas annealing conditions before and after bonding step in order to find the low temperature bonding conditions of 3-D integrated technology where the quantitative interfacial adhesion energy was measured by 4-point bending test. While the pre-annealing with N₂+H₂ gas below 200°C is not effective to improve the interfacial adhesion energy at bonding temperature of 300°C, the interfacial adhesion energy increased over 3 times due to post-annealing over 250°C after bonding at 300°C, which is ascribed to the effective removal of native surface oxide after post-annealing treatment.

Keywords: Adhesion, 4-point bending test, 3-D IC integration, pre-annealing, post-annealing

1. 서 론

전자 부품의 지속적인 소형화로 인해 소자들이 점차 경박단소화 됨에 따라 제한된 면적에 다양하고 더 많은 소자를 실장하기 위한 기술이 개발되고 있다.¹⁾ 3차원 소자 집적 기술은 소자가 실장되어있는 웨이퍼의 뒷면을 박막화(thinning) 공정으로 얇게 만든 뒤 비아(via)를 형성하고, 금속을 채워 Fig. 1과 같이 수직으로 쌓아올려 전기적, 기계적 상호연결을 가능하도록 접합하는 기술이다.^{2, 3)} 3차원 소자 집적기술이 차세대 연구 분야로써 각광을 받는 것은 소자의 성능을 높일 수 있고, 모듈(module) 응용에 적합한 폼팩터(form factor)를 효과적으로 조절 할 수 있을 뿐만 아니라 호환성 없는 다른 공정 기술을 집적 할 수 있게 하는 강점들이 있기 때문이다.

Cu는 전기적 저항이 낮아 RC delay를 현저히 감소시키

고, EM(electromigration)에 대한 저항성이 높기 때문에 3차원 소자집적 기술을 위한 적합한 재료이다. 3차원 소자 집적기술을 구현하기 위한 접합 방법은 Cu-solder-Cu 접합,⁴⁾ 폴리머 열 압착 접합⁵⁾, Cu-Cu 열 압착 접합⁶⁾ 등이 있다. Cu-solder-Cu 접합은 저온접합이 가능하고 공정이 단순하여 비용절감에 있어서는 각광 받고 있지만, Cu와 solder 접합층 사이에 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)을 형성하게 된다. 또한 접합공정과 동일한 온도에서 일정 시간 유지시 금속의 확산유량 차이로 인해 Kirkendall void가 형성되어 내부의 기계적 성질과 전기적 성질을 현저히 저하시키는 문제점이 발생한다.⁷⁾ 이에 반해 Cu-Cu 열 압착 접합은 순수한 Cu 원자 간 확산에 의해 두 층이 접합됨으로 계면에 공공(void) 또는 금속간화합물을 형성하지 않아 기계적·전기적 성질이 아주 우수하다. 하지만 Cu는 표면에 아주 쉽고 빠르게 산

*Corresponding author

E-mail: ybpark@andong.ac.kr

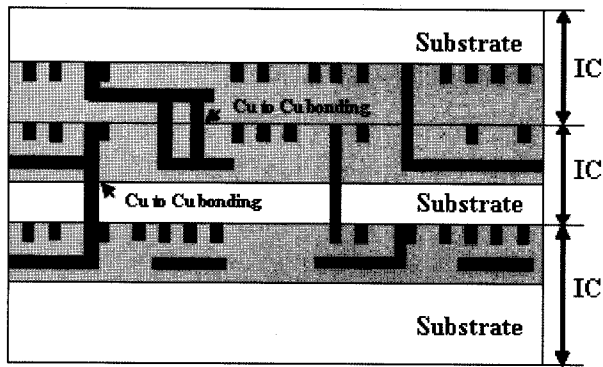


Fig. 1. Schematic of cross-sectioned 3-D IC structure with Cu-Cu thermo-compression bonding.

화막을 형성하기 때문에 접합공정 온도가 400°C 이상의 고온이 요구되지만⁸⁾, 사실상 여러 소자가 적층되어있어 접합 시 다른 소자나 옆에 민감한 low-k 물질의 손상이 우려된다. 보고된 문헌에 의하면 Cu-Cu 열압착 접합 후 Cu 접합부의 우수한 접합 특성을 위해서는 접합하기 전 건식 및 습식 표면 전 처리를 통해 Cu 표면의 산화막을 제거하고⁹⁾, 표면을 깨끗하게 세척하여 불순물이 존재하지 않도록 하는 것이 중요하다고 한다. 표면의 불순물은 열압착 접합시 Cu 원자의 확산에 장애물이 되기 때문이며, Cu의 녹는점에 비해 아주 낮은 저온공정 접합 시에는 온도, 시간, 분위기를 비롯하여 적절한 압력은 필수적인 요소이다. 열압착 접합 공정 후에는 접합 공정과 동일한 온도, 시간에서 추가적인 후속열처리를 통해 Cu 접합부의 접합특성을 향상시킬 수 있다고 한다.¹⁰⁾

본 연구에서는 3차원 소자 집적 기술 구현을 위해 Cu-Cu 열 압착 접합을 300°C에서 실시하였으며, 우수한 접합특성 및 공정조건을 확보 하기위해 100, 200°C에서 혼합가스 H₂+N₂를 통한 전 열처리와 250, 300°C 온도와 질소분위기에서 후속 열처리를 실시하였고, 4점굽힘실험을 통해 정량적인 계면접착에너지를 평가하였다. 도출된 결과를 통해 표면 전처리와 후속열처리가 Cu접합부에 미치는 영향을 평가하고, 저온에서의 Cu-Cu 열 압착 접합에 가장 적합한 최적의 조건을 확보하였다.

2. 실험방법

전·후 열처리 조건에 따른 Cu 접합부의 정량적인 계면접착에너지를 평가하고자 시험편을 제작하였다. 시험편의 공정 순서는 Fig. 2와 같이 웨이퍼 레벨로 제작하였고, 500 μm의 4인치 실리콘 웨이퍼 위에 Ta를 25 nm, Cu를 1.5 μm 스퍼터 증착한 후 Cu-Cu 접합 전 100와 200°C에 각각 15분간 N₂+H₂ 가스로 전 열처리 하였다. 전 열처리 후 EV Group의 aligner에 두 장의 실리콘 웨이퍼를 차례로 정렬하였고, 접합 장비로 이동을 위해 두 장의 웨이퍼를 척(chuck)에 고정 시켰다. EV Group의 접합 장비에 웨이퍼가 고정된 척을 장착시키고, 10⁻⁶ Torr의 고 진공에

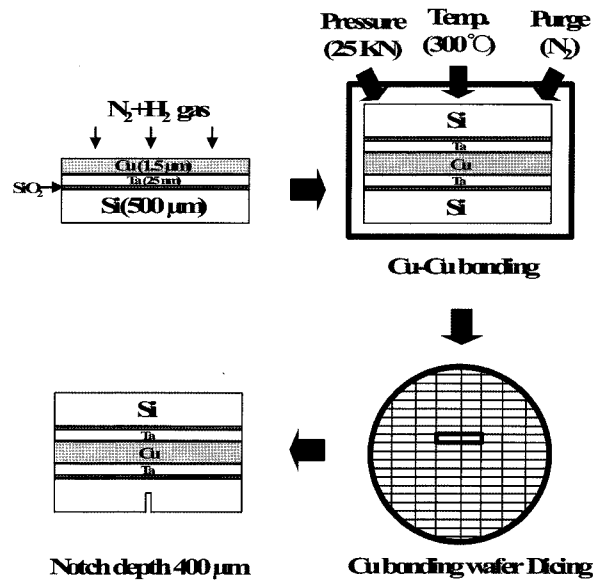


Fig. 2. Schematic of sample preparation process of Cu-Cu bonded wafers.

서 접합 온도는 300°C, 접합 시 압력은 25000 mbar으로 30분간 접합 공정을 실시하였다. 접합 장비는 위와 아래에서 열을 가하도록 되어 있으며 실제 실리콘 웨이퍼와 10°C 이내의 온도 차가 발생한다. 3차원 소자집적을 위한 Cu-Cu 열 압착 접합부의 계면접착에너지를 평가하기 위해 제작된 시험편은 4점굽힘실험을 위해 30 mm×3 mm의 크기로 절단하였고, 두 장의 실리콘웨이퍼 중 한 장의 웨이퍼에 초기 균열을 유도하기 위한 깊이 400 μm의 노치를 형성하였다. Cu-Cu 열압착 접합부의 단면 미세구조 관찰을 위해 집속이온빔(Focus Ion Beam, FIB)에 시험편을 장착하였다. Cu-Cu 열 압착 접합부를 중심에 두고 너비 20 μm, 깊이 5 μm로 이온 빔을 조사하여 식각 후 20초간 Cu 층에 에칭 후 FIB 사진을 통해 미세구조를 관찰 하였다.

또한 후속 열처리에 따른 Cu 접합부의 정량적인 계면접착에너지를 측정하기 위해 표면 전 처리를 하지 않은 Cu 웨이퍼를 300°C에서 30분간 열 압착 접합한 뒤 250, 300°C에서 각각 1시간씩 질소분위기에서 후속 열처리하였다. 열처리가 끝난 시험편은 전처리와 동일하게 미세구조 관찰과 계면접착에너지를 평가 하였다.

전·후 열처리를 통해 제작된 시험편은 LLOYD Instruments 사의 인장 시험기에 4점굽힘실험용 지그를 설치하여 정량적인 계면접착에너지를 측정하였다. 실험에 사용된 로드셀은 20 N, 로딩 속도는 0.08 μm/s, 핀 간 거리는 5 mm로 하였다.

4점굽힘실험은 단일재료 내부에 생긴 균열이 진전 할 때 필요한 에너지 해방률(G)을 선형파괴역학적 방법으로 측정하여 박막 간 계면접착에너지를 측정하는 파괴역학 시험법이다.¹¹⁾ 이 시험법은 두 개의 탄성 기관사이에 샌드위치 구조로 박막을 쌓아올린 뒤 초기 균열을 위한 노치가 생성된 Fig. 3과 같은 시험편을 통해 이루어진다. 위·아래에 4개의 핀에 중심이 고정된 시험편은 모멘트

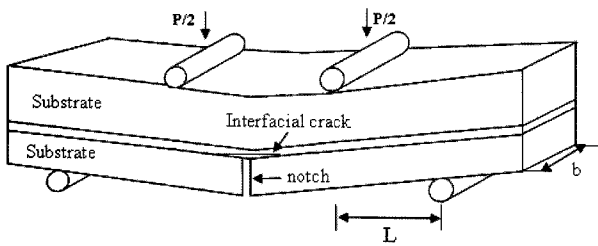


Fig. 3. Schematic illustration of the 4-point bending geometry.

가 일정한 위쪽 두 개의 핀 사이에서 발생한 내부 균열을 통해 정량적인 계면접착에너지를 측정할 수 있다. 실험은 압축모드, 변위제어로 실시하였으며 결과는 하중과 변위곡선으로 나타난다. 여기서 일정한 하중 영역을 보이는 구간의 하중 값을 아래의 유도된 식에 대입하여 정량적인 계면접착에너지를 얻을 수 있다.^{12, 13)}

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

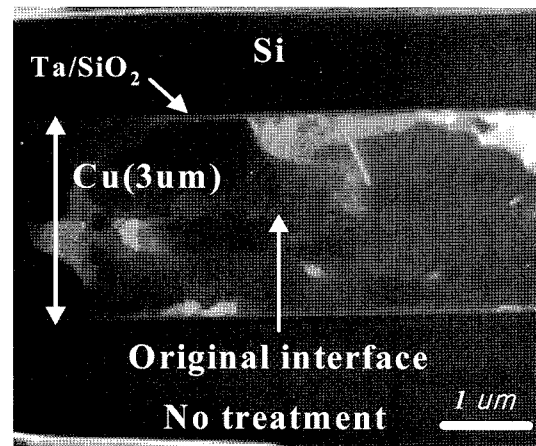
여기서 ν 는 기판으로 쓰이는 탄성재료의 프와송비(실리콘 웨이퍼 : 0.28), E는 탄성계수(실리콘 웨이퍼 : 130 GPa), b는 시험편의 너비 (3 mm), h는 시험편 두께의 절반 (500 μ m)을 의미하며, 모멘트 M은 PL/2이다. P는 하중과 변위곡선에서 일정한 구간의 하중값, L은 핀 사이의 거리 (5 mm)를 나타내며, 여기서 측정된 계면접착에너지의 단위는 J/m²이다.

4점굽힘실험이 완료된 모든 시험편은 전계방출 주사전자현미경 (Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) 투과전자현미경 Transmission electron microscope, TEM) 및 에너지 분산형 분광기 (Energy dispersive spectroscopy, EDS)로 미세구조를 관찰 및 분석하여 내부의 파괴경로를 확인하였다.

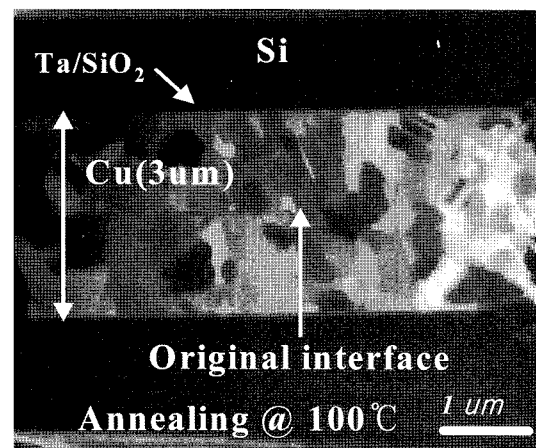
3. 결과 및 고찰

3.1. 전 열처리 효과

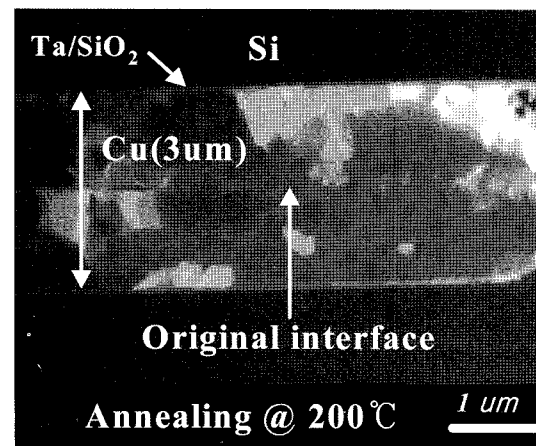
Cu-Cu 열 압착 접합 전 N₂+H₂ 혼합가스 분위기의 100, 200°C에서 각각 15분간 열처리를 실시한 뒤 300°C에서 30분 동안 열 압착 접합한 Cu 접합부의 FIB사진을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 전 열처리를 하지 않고 300°C에서 30분간 열 압착 접합 후 Cu 접합부의 미세구조를 관찰한 결과로 Cu 본래의 계면이 확연히 관찰되었고, Cu 본래의 계면 근처에서 공공(void)이 관찰되었다. Fig. 4(b), (c)는 N₂+H₂ 혼합가스 분위기에서 100, 200°C의 온도로 각각 15분간 열처리 후 300°C에서 30분간 열 압착 접합한 시험편의 Cu 접합부의 미세구조 사진이다. Cu 본래의 계면이 뚜렷이 관찰되었으며 Cu 본래의 계면 근처에서는 공공이 관찰되어 전처리를 하지 않은 Fig. 4(a)와 비교하였을 때 큰 차이점이 없었고 향상된 것이 관찰되지 않았다. Fig. 4의 FIB 사진에서 공공이 발견되



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Effect of N₂+H₂ pre-annealing conditions on the cross-sectional FIB image of Cu-Cu interface bonded at 300°C for 30 min; (a) without pre-annealing, (b) pre-annealed at 100°C for 15 min, (c) pre-annealed at 150°C for 15 min.

었는데 이것은 접합하기 전 실리콘 웨이퍼 위에 스퍼터 증착된 Cu의 표면 상태가 깨끗하지 못하거나 표면 거칠기가 커서 발생한 것으로 판단된다. Cu가 스퍼터 증착된 두 장의 웨이퍼를 접합시킬 때 서로의 표면 거칠기 값이 클 경우 불일치하는 면이 많아지면서 빈 공간이 생성되게 되며, 이러한 미세한 공간들을 소멸시킬 만한 온도

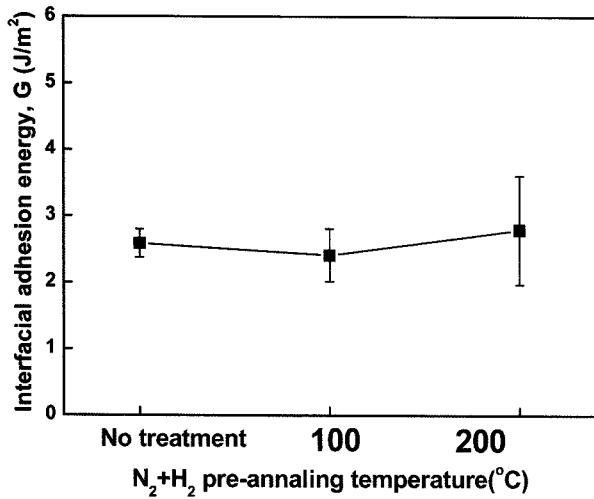
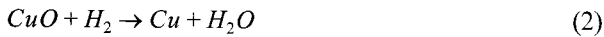


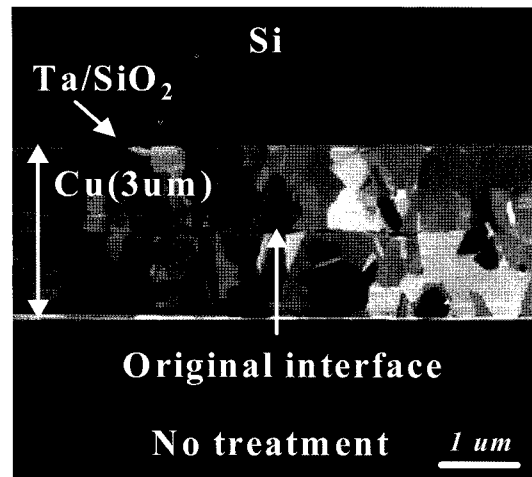
Fig. 5. Interfacial adhesion energy of Cu-Cu bonded structure as a function of pre-annealing conditions in N₂+H₂ forming gas environment.

와 시간이 충분하지 못할 경우 접합공정을 완료하였을 때 공공이 그대로 남게 된다. 또한 불순물이 많을 경우 Cu 원자가 다른 원자층으로 확산될 때 장애물처럼 거동하여 확산을 방해하는 역할을 하며¹⁰⁾, 이를 설명해 주듯 Fig. 4의 모든 공공은 Cu 본래의 계면근처에 존재하고 있다. Fig. 5는 N₂+H₂ 혼합가스 분위기에서 100, 200°C에서 15분간 열처리 후 Cu-Cu 열 압착 접합한 시험편의 정량적인 계면접착에너지를 측정된 결과이며 2.58, 2.41, 2.79 J/m²로 각각 측정되었다. 계면접착에너지는 FIB 사진에서 나타난 결과와 유사한 경향으로 N₂+H₂ 혼합가스 전처리에 따라 변화 없는 값을 나타내었다. N₂+H₂ 혼합가스 분위기에서 전 어닐링을 할 경우 아래와 같은 열역학적 반응식에 의해 Cu 산화막이 효과적으로 제거된다고 보고 되어있다.¹⁴⁾

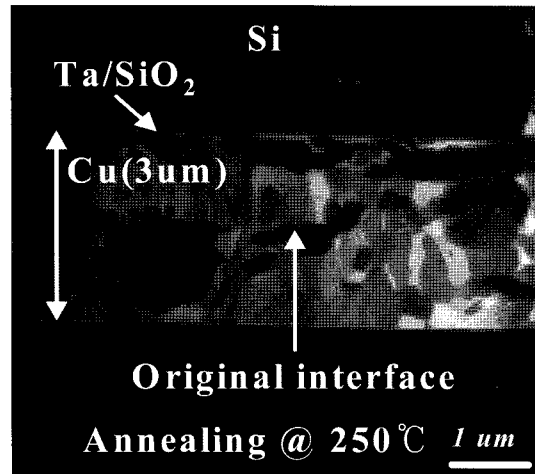


하지만 본 연구에서는 Cu 표면의 전 열처리가 Cu 산화막 제거에 큰 기여를 하지 않았으며, 보고된 문헌⁹⁾에 의하면 열역학적으로 CuO와 Cu₂O는 각각 650 K(377°C), 673 K(400°C)의 온도에서 완벽하게 Cu 산화막이 제거될 수 있다고 한다.⁸⁾ 따라서 본 연구에서 실시한 전 열처리 온도인 100, 200°C는 Cu 산화막이 완벽히 제거되기에 충분하지 못한 것으로 판단되며, 접합 온도 또한 300°C로써 Cu 산화막층을 깨고 Cu 원자가 확산하기에는 불충분하였기 때문에 계면접착에너지의 향상에 큰 효과를 얻지 못했다고 생각된다.

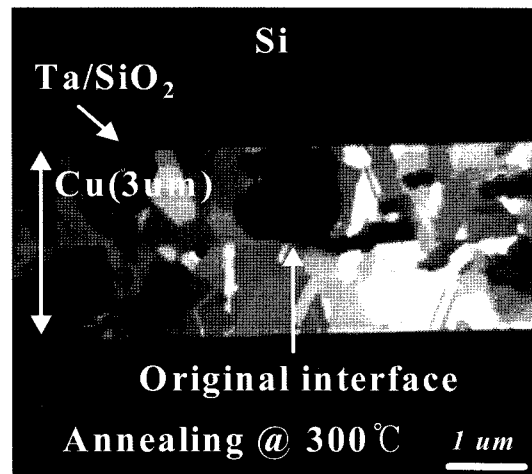
4점굽힘실험이 완료된 후 시험편의 파괴경로를 확인하기 위해 FE-SEM으로 파면을 관찰하였다. 그 결과 N₂+H₂ 혼합 가스 열처리를 하지 않은 시험편과 100, 200°C에서 각각 15분간 처리한 모든 시험편에서 Cu 미세조직들이



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Effect of N₂ post-annealing conditions on the cross-sectional FIB image of Cu-Cu interface bonded at 300°C for 30 min; (a) without post-annealing, (b) post-annealed at 250°C for 60 min, (c) post-annealed at 300°C for 60 min.

관찰되어 Cu와 Cu 사이에서 박리가 발생한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 FIB 사진에서도 확인 할 수 있듯이 Cu 층이 제대로 접합되지 않아서 따라서 Cu-Cu 열 압착

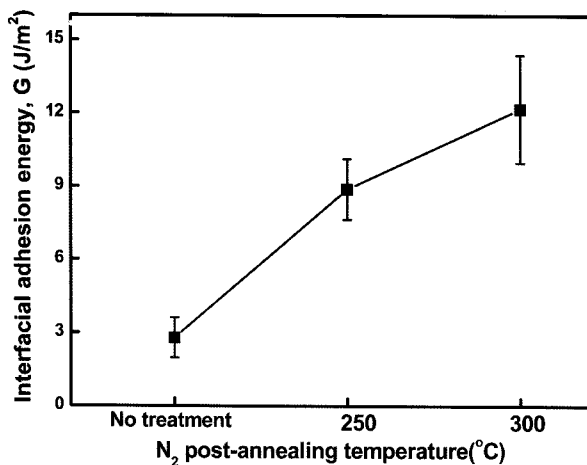


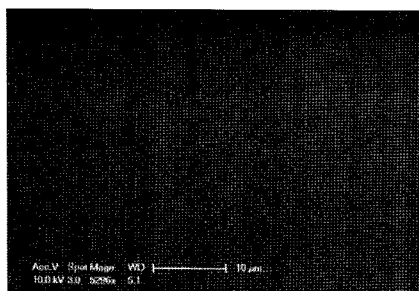
Fig. 7. Interfacial adhesion energy of Cu-Cu bonded structure as a function of post-annealing conditions in N₂ forming gas environment.

전 N₂+H₂ 혼합 가스 건식 표면처리를 통해 Cu 표면에 존재하는 산화막을 효과적으로 제거하여 Cu 접합부의 기계적인 특성을 향상시키고자 하였지만 효과가 없는 것으로 판단되었다.

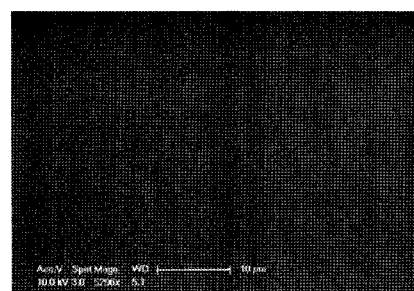
3.2. 후속 열처리 효과

Cu-Cu 열 압착 접합 후 Cu접합부의 계면 특성을 향상시키고자 300°C에서 30분간 Cu-Cu 열 압착 접합한 시험편을 250, 300°C의 온도와 질소분위기에서 각각 1시간 동안 열처리 하였다. Fig. 6은 250, 300°C 온도와 질소분위기에서 각각 1시간씩 후속 열처리 후 Cu 접합부의 미세구조의 FIB 사진을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)은 표면 전 처리 없이 300°C에서 30분간 접합한 시험편의 Cu 접합부 미세조직으로 Cu 본래의 계면이 확연히 관찰되었고, 본래의 계면 사이에 공공이 발견되었다. Fig. 6(b), (c)는 250, 300°C의 온도와 질소분위기에서 1시간씩 후속 열처리 후 Cu 접합부의 미세구조를 각각 나타내었다. Fig. 6(b), (c)는 확연히 Cu 본래의 계면에서 미세구조의 변화가 있었으며, 250, 300°C 모두 Cu본래의 계면이 사라지는 않았지만 열처리를 하지 않았을 때와 비교하였을 때 공공도 사라질 뿐만 아니라 깨끗한 접합부를 얻을 수 있었다. 앞서 설명한 바와 같이 Cu-Cu 열 압착 접합 시 일반적으로

공정온도를 낮추기 위해서는 표면 전처리, Cu-Cu 접합 압력, 시간, 분위기, 후속열처리 모두가 중요한 공정 변수를 적용되는데⁹⁻¹⁰⁾, 본 연구에서 실시한 300°C에서 저온 접합 후 실시한 후속 열처리는 낮은 온도에서 접합 시 미처 확산하지 못한 시험편의 Cu 원자가 다른 Cu 층으로 충분히 확산할 수 있는 환경을 제시하였고, 이에 따라 어닐링 후 Cu 접합부의 미세구조 특성이 향상된 것이라고 판단된다. Fig. 7은 300°C에서 열 압착 접합한 뒤 250, 300°C 온도와 질소분위기에서 각각 1시간 동안 후속 열처리 후 Cu 접합부의 계면접착에너지를 측정한 결과이다. 후속 열처리를 하지 않았을 경우 2.79 J/m²이었지만 250, 300°C에서 열처리한 시험편의 계면접착에너지는 8.87, 12.17 J/m²로 평가되었다. 후속열처리를 하지 않은 시험편에 비해 250, 300°C에서 1시간 열처리 한 경우에는 각각 약 3, 4배 정도 증가한 것을 알 수 있었다. 3차원 소자집적 기술을 구현하기 위해서는 Cu-Cu 열 압착 접합 후 다음 공정에서 균열이 발생하지 않으려면 최소 5 J/m²을 넘어야 한다고 보고되어 있다.⁹⁾ 따라서 Cu 표면 전처리를 실시하지 않고 300°C에서 Cu-Cu 열 압착 접합 공정은 Cu 접합부의 Cu 원자들이 Cu 표면의 산화막 층을 깨고 충분히 확산을 할 수 있는 에너지를 제공하지 못하였지만, 후속열처리를 통해 추가적인 에너지를 제공함으로써 Cu 접합부의 계면특성을 향상 시킨 것으로 생각된다. 250, 300°C에서 후속열처리 후 계면접착에너지평가가 완료된 시험편의 파괴경로를 확인하기 위해 FE-SEM으로 파면을 관찰한 결과를 Fig. 8(a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fig. 8 (a)는 250°C에서 후속 열처리한 시험편의 파면사진으로 양쪽 파면 모두 뚜렷한 미세구조는 관찰되지 않았으며 실리콘 산화막 표면처럼 매끈한 형상을 보였다. 이와 동일하게 300°C에서 어닐링한 시험편의 파면 또한 Fig. 8(b)의 FE-SEM 사진처럼 아무런 형상이 관찰 되지 않았으며, 모든 파면은 육안으로 파단면을 관찰하여도 실리콘웨이퍼 표면을 보는 것과 유사하였다. 또한 FE-SEM 사진으로는 실리콘 산화막 층 내부인 것으로 판단되나 자세한 분석을 위해서 TEM 분석을 실시하였다. Fig. 9는 후속열처리를 하기 전과 300°C의 질소분위기에서 1시간 동안 후속 열처리한 시험편의 박막 층의 변화를 관찰한 TEM 사진과 EDS 분석 결과이다. Fig. 9(a)을 보면 Cu와 Ta 그리고



(a)



(b)

Fig. 8. Microstructures of delaminated interface after post-annealing for 60 min in N₂ environment : (a) 250°C (b) 300°C.

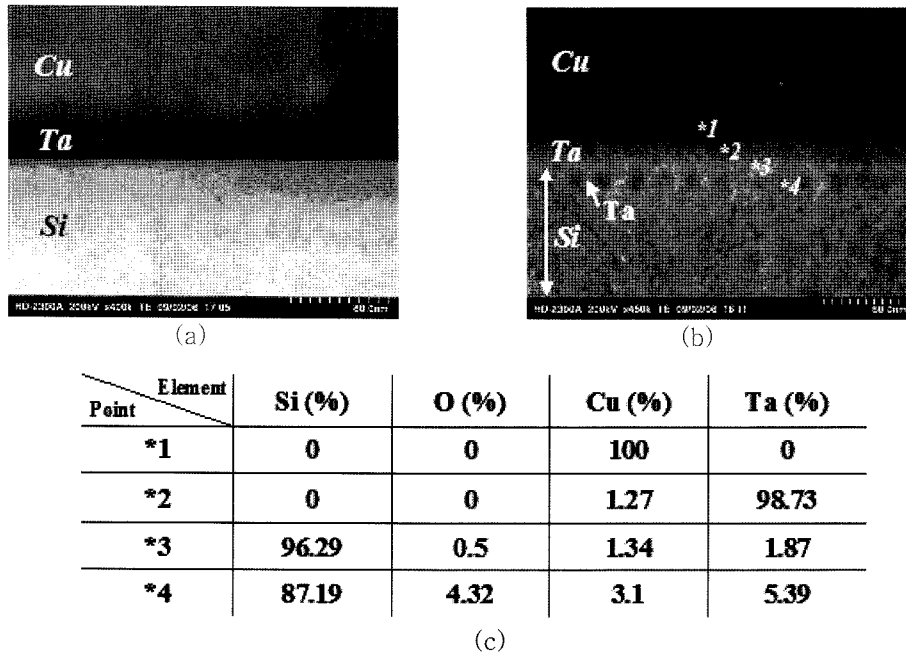


Fig. 9. Cross-sectional TEM images of the interface between Si and Cu; (a) without post-annealing and (b) post-annealed at 300°C for 60 min in N₂ environment (c) atomic percent of post-annealed film later at 300°C for 60 min in N₂ environment.

실리콘 웨이퍼의 계면이 뚜렷이 존재하였으며 Ta층 아래에 얇은 경계선이 보이는데 이것은 실리콘 산화막으로 판단되어진다. 실리콘 산화막은 비정질임으로 TEM 사진으로 보았을 때 얇은 경계선을 기점으로 유무를 판단할 수 있다. Fig. 9(b)은 300°C에서 1시간 후속 열처리 후의 미세구조를 관찰한 사진으로 Ta층과 실리콘 웨이퍼 사이에 검고 둥근 불순물과 같은 형상이 관찰되었다. 이러한 형상은 국부적인 것이 아닌 시험편 전면에 걸쳐 균일하게 관찰되었고 정확한 물질 판단을 위해 EDS mapping 분석을 실시한 결과를 Fig. 9(c)에 나타내었다. EDS mapping 결과 중 4지점의 원자량 분석 결과를 테이블로 정리하였는데 *1의 Cu 층에서는 100% Cu 만이 검출되었지만 *2의 Ta 층에서는 소량의 Cu의 검출을 확인할 수 있었다. 그리고 Ta층 아래의 검은 불순물이 있는 지점인 *4에서는 Si 87.19%, O 4.32%, Cu 3.1%, Ta 5.39%가 검출되어 소량의 Ta와 Cu가 Si 내부로 확산한 것으로 판단된다. 소량이긴 하지만 Ta와 Cu 검출로 보아 이런 입자들이 계면신뢰성에 영향을 준 것으로 생각되어진다. 따라서 열처리를 하지 않은 시험편은 Cu와 Cu사이에서 박리가 일어났고, 250, 300°C에서 1시간동안 후속열처리 결과 확산방지층으로 쓰인 Ta와 Si 기판 사이에서 박리가 일어났을 가능성이 높다고 판단된다. 이는 열처리하는 동안 Cu와 Cu사이의 추가적인 확산으로 Cu 접합부의 계면 특성은 향상되고, 소량의 Ta가 실리콘 산화막 내부로 확산되어 상대적으로 Ta층과 기판 사이가 취약해졌다고 생각되나, 차후 보다 정밀한 측정분석 및 시편계면분석을 통해 규명해야 할 것이다.

4. 결 론

3차원 소자 집적 기술을 구현하기위해 표면 전·후속 열처리 효과에 따라 Cu-Cu 열 압착 접합 한 Cu 접합부의 계면접착에너지를 4점굽힘실험을 통해 정량적으로 평가하였다. Cu-Cu 열 압착 접합 전 N₂+H₂ 혼합가스로 100, 200°C에서 각각 15분씩 열처리 후 300°C에서 30분간 열 압착 접합한 결과 열처리 전과 후 모든 Cu 접합부의 미세구조에서 Cu 본래의 계면이 뚜렷이 나타났으며 계면 접착에너지 값도 큰 차이가 없었다. 따라서 Cu-Cu 열 압착 접합 전 N₂+H₂ 혼합가스 열처리는 Cu접합부의 계면 특성을 향상시키는데 효과가 없는 것으로 판단된다. 하지만 표면 처리 없이 300°C에서 Cu-Cu 열 압착 접합 후 250, 300°C의 온도의 질소분위기에서 각각 1시간씩 후속 열처리를 한 결과 열처리 온도가 250°C 이상일 경우 Cu 본래의 계면과 공공이 사라지는 거동을 보였으며 계면접착에너지도 3배 이상 증가하였다. 이에 따라 Cu-Cu 저온 접합 공정을 위해서는 Cu 산화막을 제거하는 표면 전 처리 보다는 저온에서 접합 후 추가적인 후속 열처리가 효과적으로 Cu 접합부의 계면 특성을 향상시킬 수 있다고 생각된다.

감사의 글

본 논문은 서울테크노파크의 차세대패키징 공정·장비 실용화사업의 일환으로 지식경제부 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. G. T. Lim, B. J. Kim, K. W. Lee, M. J. Lee, Y. C. Joo and Y. B. Park, "Study on the intermetallic compound growth and interfacial adhesion energy of Cu pillar bump", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 15(4), 17 (2008).
2. E. J. Jang, S. Pfeiffer, B. Kim, T. Matthias, S. Hyun, H. J. Lee and Y. B. Park, "Effect of post-annealing conditions on interfacial adhesion energy of Cu-Cu bonding for 3-D IC integration", *Kor. J. Mater. Res.*, 18(4), 204 (2008).
3. S. W. Seo and G. S. Kim, "The film property and deposition process of TSV inside for 3D interconnection", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 15(3), 47 (2008).
4. H. Tilmans, D. Van de Peer, and E. Beyne, "The intend reflow sealing technique, a method for fabrication of sealed cavities for MEMS devices", *J. Microelectromech. Syst.*, 9, 206 (2000).
5. J.-Q. Lu, Y. Kwon, R. P. Kraft, R. J. Gutman, J. F. McDonald, and T. S. Cale, "Stacked Chip-to-Chip interconnections using wafer bonding technology with dielectric bonding glues", *Proceedings of the IEEE International Interconnect Technology Conference*, 219 (2001).
6. R. Tadepalli, Ph. D. Thesis, "Characterization and requirements for Cu-Cu bonds for three-dimensional integrated circuits", Massachusetts Institute of Technology (2007).
7. M. S. Yoon, M. K. Ko, O. H. Kim, Y. B. Park, W. D. Nix and Y. Chang. Joo, "In-Situ observation of electromigration in eutectic SnPb solder lines : atomic migration and hillock formation", *J. Electron. Mat.*, 37, 118 (2007).
8. R. Tadepalli, K. T. Turner, C. V. Thompson, "Mixed-mode interface toughness of wafer-level Cu-Cu bonds using a symmetric chevron test", *J. Mech. Phys. Solids*, 56, 707 (2008).
9. K. N. Chen, C. S. Tan, A. Fan and R. Reif, "Copper bonded layers analysis and effects of copper surface conditions on bonding quality for three-dimensional integration", *J. Electron. Mat.*, 34, 1464 (2005).
10. K. N. Chen, S. M. Chang, L. C. Shen, and R. Reif, "Bonding parameters of blanket copper wafer bonding", *J. Electron. Mat.*, 35, 1082 (2006).
11. H. Zhenyu, Z. Suo, X. Guanghai, H. Jun, J. H. Prevost and N. Sukumar, "Initiation and arrest of an interfacial crack in a four-point bend test", *Eng. Fracture Mech.*, 72, 2584 (2005).
12. R. H. Dauskardt, M. Lane, Q. Ma and N. Krishna, "Adhesion and debonding of multi-layer thin film structures", *Eng Fract Mech.*, 61, 141 (1998).
13. P. G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans and R. M. McMeeking, "A test specimen for determining the fracture resistance of bimaterial interfaces", *J. Appl. Mech.*, 111, 77 (1989).
14. K. N. Chen, A. Fan, C. S. Tan and R. Reif, "Temperature and duration effects on microstructure evolution during copper wafer bonding", *J. Electron. Mat.*, 32, 1371(2003).