4점굽힘시험법을 이용한 함몰전극형 Si 태양전지의 무전해 Ni-P 전극 계면 접착력 평가

김정규¹ · 이은경² · 김미성² · 임재홍² · 이규환² · 박영배^{1†}

¹안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터, ²한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부

Interfacial Adhesion Energy of Ni-P Electroless-plating Contact for Buried Contact Silicon Solar Cell using 4-point Bending Test System

Jeong-Kyu Kim¹, Eun-Kyung Lee², Mi-Sung Kim², Jae-Hong Lim², Kyu-Hwan Lee² and Young-Bae Park^{1†}

¹School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong, 760-749, Korea

²Materials Processing Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, 641-010 Korea

(2012년 3월 2일 접수: 2012년 3월 15일 수정: 2012년 3월 22일 게재확정)

초 록: 고효율, 저가격의 태양전지를 위해 습식공정 중 하나인 Ni-P 무전해 도금을 이용한 실리콘 태양전지 웨이퍼를 열처리에 따른 4점굽힘시험을 통해 정량적인 계면 접착에너지를 평가하였다. 실험 결과 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막 사이의 계면접착에너지는 $14.83 \pm 0.76 \text{ J/m}^2$ 이며, 후속 열처리에 따른 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 무전해 도금은 300°C 처리 시 $12.33 \pm 1.16 \text{ J/m}^2$, 600°C 처리 시 $10.83 \pm 0.42 \text{ J/m}^2$ 로써 전반적으로 높은 계면접착에너지를 가지나 열처리 온도가 증가할수록 계면접착에너지가 서서히 감소하였다. 4점굽힘시험 후 박리된 파면의 미세구조를 관찰 및 분석하여 내부의 파괴경로를 확인하였으며, X-선 광전자 분광법을 통하여 표면화학 결합상태를 분석한 결과 열처리 시 Ni-O와 Si-O 형태의 결합이 존재하여 약한 계면을 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

Abstract: In order to develop electroless-plated Nickel Phosphate (Ni-P) as a contact material for high efficient low-cost silicon solar cells, we evaluated the effect of ambient thermal annealing on the degradation behavior of interfacial adhesion energy between electroless-plated Ni-P and silicon solar cell wafers by applying 4-point bending test method. Measured interfacial adhesion energies decreased from 14.83 to 10.83 J/m^2 after annealing at 300 and 600°C , respectively. The X-ray photoelectron spectroscopy analysis suggested that the bonding interface was degraded by environmental residual oxygen, in which the oxidation inhibit the stable formation of Ni silicide phase between electroless-plated Ni-P and silicon interface.

Keywords: Buried Contact Solar Cell, Ni-P Contact, Adhesion, 4-point bending test

1. 서 론

태양전지의 높은 변환 효율의 달성과 저가화는 태양전지의 경쟁력을 높일 수 있는 핵심 기술이다. 고효율 실리콘 태양전지의 전극 물질과 그 형성 방법의 저가화는 이러한 맥락으로 봤을 때 태양전지의 경쟁력을 높일 수 있는 좋은 방안이 될 수 있다. 현재 상업적으로 널리 쓰이고 있는 Screen-printed 기법은 제조 공정이 단순하고 비교적 저가의 공정 장비를 사용한다. 또 Ag, Al Paste 등의 적합한 전극 재료를 선택적으로 적용할 수 있고 대면적의 cell을 대량 생산이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다. 하지만 고효율을 내기 위한 태양전지의 전극형성법에 비해 Screen-printed에 사용되는 전극물질인 Ag Paste는 재료 자체가 glass frit 성분을 포함하고 있어 일반 순수

Ag에 비해 효율이 약 1/3로 떨어진다.¹⁻³⁾ Screen printing 외에도 태양전지의 전극을 형성하는 방법은 evaporation, sputtering 외에도 무전해 도금법 등이 있다. 이와 같은 방법들 중 무전해 도금법은 제작이 용이하고 저렴하며 대량 생산이 가능할 뿐만 아니라 형성되는 금속의 순도가 높아 다양한 전자 제품 제작에 적용되고 있다. 전해도금 및 photo induced deposition 등을 이용한 BCSC(Buried Contact Solar Cell)의 함몰 전극이 현재 산업체에 적용되어 사용되고 있다.¹⁾ 특히 Ni과 Cu 모두 무전해 도금법으로 쉽게 형성이 가능한 재료로서 무전해 도금법을 이용한 Ni 금속전극을 형성하게 되면 Ag Paste에 비해 실리콘 기판과 전극 사이의 낮은 접촉 저항으로 인한 높은 효율을 달성할 수 있다. 또한, Ni은 Cu가 Silicon substrate로 확산되는 것을 막아주는 Diffusion barrier 역할을 할 뿐만

[†]Corresponding author

E-mail: ybpark@andong.ac.kr

아니라 Nickel monosilicide(NiSi)를 형성하여 실리콘 기판과 Cu 전극 사이에서 접착력을 좋게 하기 때문에 Silicon substrate와 전극의 기계적 · 전기적 특성을 향상시킨다.^{3,4)} Ni silicide는 열처리 온도에 따라 3가지의 형태를 가지는데 약 200~300°C의 열처리 온도에서는 Ni_2Si 의 형태로 존재하고 약 300°C부터 Ni_2Si 가 NiSi의 형태로 변하기 시작하여 약 700°C까지 NiSi를 형성한다. 그리고 700°C 이상의 온도에서는 더 많은 실리콘을 소비하여 NiSi_2 의 형태를 띠게 된다. 또한 900°C 이상의 높은 온도로 열처리를 했을 경우에는 실리콘 표면에서 NiSi_2 의 응결현상이 일어나 면저항이 급격히 증가한다. Ni film은 약 $18.4 \mu\Omega\text{cm}$, Ni_2Si 는 약 $24 \mu\Omega\text{cm}$, NiSi는 약 $14 \mu\Omega\text{cm}$, NiSi_2 는 약 $50 \mu\Omega\text{cm}$ 의 비저항을 가지므로 Ni silicide로 NiSi를 사용 할 경우 낮은 비저항으로 인해 고효율의 태양전지를 만들 수 있다.^{5,6)}

하지만, 습식공정을 통한 Ni 전극을 형성하는데 있어 도금의 온도와 시간에 따라 Ni silicide를 형성하는 공정에서 Ni 전극이 박리되는 문제가 발생한다.⁷⁾ 이러한 문제는 습식공정을 통한 전극 계면 사이에서 실제 사용 중 온도 및 습도 변화 등에 의한 이종 소재 사이의 계면의 접착력 저하가 발생하여 전체 부품의 신뢰성이 급격하게 저하되는 문제가 발생된다. 또한 전극 계면 사이의 밀착성이 낮을 때 계면에서 파괴가 일어나게 되어 계면신뢰성을 저하시키고 비저항을 증가시킨다. 이에 따라 습식공정을 통한 태양전지 전극 계면 접착력 평가가 필요한 실정이다. 계면접착력 측정 방법은 측정하고자 하는 접합체의 형상 등에 따라 매우 다양한 방법을 이용하고 있다. Choi와 Lee에 의하면 ASTM규약에는 약 50가지 이상의 접착력 측정방법이 있다.⁸⁾ 그 중 일반적으로 4점굽힘 시험법(4-point bending test)은 산업체에서 많이 사용되고 있고, 굽힘을 통하여 tensile test와 비슷한 상황을 만들어 줌으로써 박막의 정량적인 계면접착력 평가에 용이하게 사용되고 있다.⁹⁻¹²⁾

본 논문에서는 고효율, 저가격의 태양전지를 위해 습식 공정 중 하나인 Ni-P 무전해 도금을 이용하여 실리콘 태양전지 웨이퍼를 열처리에 따른 Ni 전극과 Si substrate사이의 계면접착에너지를 4점굽힘시험을 통해 정량적으로 측정하였으며, 박리된 계면을 분석하여 Ni-P 무전해 도금의 열처리 따른 계면 평가를 하였다.

2. 실험방법

본 실험은 boron으로 doping된 p-type, 두께는 $180 \mu\text{m}$ 를 가진 결정질 실리콘 태양전지 웨이퍼를 사용하였으며, 무전해 Ni-P도금 전에 태양전지 웨이퍼 표면의 AR film과 산화막을 제거하기 위해 2%HF용액을 이용하여 제거하였다. Ni solution은 NiCl_2 (Nickel chloride)를 주성분으로 하고 $\text{NaH}_2\text{PO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ (Sodium hypophosphite)를 환원제로 사용하였으며, 또한 완충제 역할의 ammonium citrate와 pH

Fig. 1. (a) Schematic diagram and (b) cross-sectional SEM image of electroless-plated Ni-P contact on Si solar cell wafer.

조절을 위해 ammonium chloride, ammonium hydroxide를 첨가하여 pH 8~10을 유지한 상태에서 Ni-P 박막을 Fig. 1(a)와 같이 형성하였으며, Fig. 1(b)와 같이 Ni-P 무전해 도금의 두께는 약 $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 열처리 후 Ni-P와 실리콘 웨이퍼의 계면 특성을 알아보기 위해 대기 중에서 열처리를 진행하였으며, 온도는 각각 300°C, 600°C에서 10분간 열처리를 하였다. 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막의 계면접합에너지를 평가하기 위해 상, 하 웨이퍼에 에폭시 레진을 도포하여 150°C에서 1시간 유지시켜 본딩을 하였다. 시험편을 4점굽힘시험을 위해 $30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 의 크기로 다이싱 하였고, 하부 웨이퍼에 초기 균열(initial crack)을 유도하기 위해 깊이 $140 \mu\text{m}$ 의 노치를 형성하였다. 시험편은 LLOYD Instruments사의 인장 시험기에 4점굽힘시험용 지그를 설치하여 정량적인 계면접착에너지를 측정하였다. 실험에 사용된 로드셀은 20 N, 로딩 속도는 $0.08 \mu\text{m}/\text{min}$, 핀 간 거리는 5 mm로 하였다. 4점굽힘 시험시 크랙이 진전되는 순간을 확인하기 위해 CCD 카메라를 이용하여 Fig. 3(a)와 같이 실시간으로 관찰하였다. 4점굽힘시험은 하나의 재료로 가정하고 재료 내부에 생긴 균열이 진전 할 때 필요한 에너지 해방률(G)을 선형 파괴역학적 방법으로 측정하여 박막 간 계면접착에너지를 측정하는 파괴역학시험법이다.⁹⁻¹²⁾ 이 시험법은 두 개의 탄성 기판사이에 접합된 박막을 쌓아올린 샌드위치 구조에 초기 균열을 유도하기 위한 노치가 생성된 Fig. 2

Fig. 2. Schematic illustration of the 4-point bending test geometry.

와 같은 시험편을 통해 이루어진다. 위와 아래에 4개의 핀의 중심에 고정된 시험편은 일정한 위쪽 두 개의 핀 사이에서 발생한 내부 균열을 통해 정량적인 계면접착에너지를 측정할 수 있다. 실험은 압축모드, 변위제어로 실시하였으며, 결과는 하중과 변위곡선으로 나타난다. 여기서 재료 파괴 시 정상상태로 크랙이 전파되면서 생성되는 일정한 하중 영역을 보이는 구간의 하중 값을 아래의 유도된 식에 대입하여 정량적인 계면접착에너지를 얻을 수 있다.¹³⁻¹⁴⁾

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

여기서 ν 는 기판으로 쓰이는 탄성재료의 프와송비(실리콘 웨이퍼 : 0.28), E 는 탄성계수(실리콘 웨이퍼: 130 GPa), b 는 시험편의 너비(3 mm), h 는 시험편 두께의 절반(725 μ m)을 의미하며, 모멘트 M 은 $PL/2$ 이다. P 는 하중과 변위곡선에서 일정한 구간의 하중값, L 은 핀 사이의 거리(5 mm)를 나타내며, 여기서 측정된 계면접착에너지의 단위는 J/m^2 이다.

4점굽힘시험이 완료된 시험편은 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM) 및 에너지 분산형 분광기(Energy dispersive spectroscopy, EDS)로 미세구조를 관찰 및 분석하여 내부의 파괴경로를 확인하였으며, X-선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)을 통하여 표면화학 결합상태를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막을 형성하여 4점굽힘시험을 이용한 하중 대 변위 그래프로 나타낸 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 변위가 증가함에 따라 시험편에 일정하게 하중이 가해져 선형적으로 일정하게 증가하다가 하중이 아주 약간 감소하였다가 다시 증가하는 노치에 실날같은 초기 크랙이 생성되었다. 이후 하중이 다시 일정하게 증가하다가 급격히 하중이 감소하였고, 그 후 변위가 증가하여도 하중이 일정하게 유지되는 구간을 관찰하였다. 이때 계면에서 박리가 시작되어 크랙이 전진되는 것이 관찰되었다. 4점굽힘시험시 하중 대 변

(a)

Fig. 3. (a) Microscopic image of 4-point bending test specimen, (b) typical load-displacement curve during 4-point bending test.

Fig. 4. Effect of annealing on interfacial adhesion energies (electroless-plated Ni-P contact).

위 그래프에서 계면접착에너지를 정의할 때 접착력이 약한 계면(weaken interface)에 초기 크랙이 열리면서 하중이 급격히 감소하다가 다시 일정하게 유지되는 구간(plateau)을 계면접착에너지(G)로 계산을 하였다.

실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막의 계면 특성을 알아보기 위해 열처리 전과 300°C, 600°C의 계면접착에너지 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 열처리 전의 실리콘 태양

Fig. 5. SEM image and EDS analysis results of debonded surfaces after 4-point bending test.

전지 웨이퍼와 Ni-P 박막 사이의 계면접착에너지는 $14.83 \pm 0.76 \text{ J/m}^2$ 이고, 300°C 처리 시 $12.33 \pm 1.16 \text{ J/m}^2$, 600°C 처리 시 $10.83 \pm 0.42 \text{ J/m}^2$ 로써 열처리 전의 계면접착에너지가 매우 높았으며, 열처리 온도가 증가할수록 계면접착에너지가 서서히 감소하는 거동을 나타내었다. 4점굽힘시험 후 박리된 단면을 SEM과 EDS 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 열처리 전 시험편의 파면은 상, 하부 태양전지 웨이퍼의 양 파면 모두 피라미드형 구조가 컵-콘 형상을 가지고 있는 것을 볼 수 있었다. EDS결과 상부 웨이퍼에는 C, O, Si의 조성이 많이 검출되었으며, 하부 웨이퍼는 Ni와 P의 조성이 많은 것으로 검출되었다. 이 결과에서 보면 하부에는 에폭시 레진과 무전해 Ni-P박막 사이 계면에서 박리가 발생한 것으로 판단된다. 열처리 시험편의 파면의 SEM은 열처리 전과 같이 상, 하부 모두 피라미드형 구조인 컵-콘 형상을 가지지만, EDS결과 열처리 전과 상반된 스펙트럼이 검출된 것을 볼 수 있다. 상부 웨이퍼에는 Ni와 P의 조성이 많이 검출되었으며, 하부에는 Si의 조성이 매우 많이 검출되었다. 이는 무전해 Ni-P박막과 실리콘 태양전지 웨이퍼 사이 계면에서 박리가 발생한 것으로 판단되며, 열처리를 하였을 경우 동일한 계면에서 박리가 일어난 것으로 확인되었다.

박리가 일어난 후 파면 및 파괴경로를 명확히 분석하기 위해 XPS를 통해 파면 분석을 실시하였다. 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막 시험편을 4점굽힘시험 후 박리된 상부 웨이퍼와 하부 웨이퍼의 파면을 XPS로 분석한 결과를 열처리 전후에 대해 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었으며, 검출된 성분 비율을 Table 1에 나타내었다. Fig. 6(a)는 상부 웨이퍼 박막의 파면을 XPS분석한 결과이고, Fig. 6(b)는 하부 웨이퍼의 파면을 XPS분석한 결과이다. 상부 웨이퍼 박막의 파면을 분석한 결과(Fig. 6(a)) C 1s,

Fig. 6. XPS wide-scan spectra of debonded surfaces before annealing; (a) upper side of wafer surface and (b) lower side of wafer surface.

Fig. 7. XPS wide-scan spectra of debonded surfaces after annealing at 600°C for 10 min (a) upper side of wafer surface and (b) lower side of wafer surface.

O 1s의 XPS peak이 각각 86.56%, 13.44%의 성분 비율을 가지는 것으로 검출되었다. 이는 에폭시 레진에서 나온 peak으로 판단된다. 하부 웨이퍼 박막의 파면을 분석한 결과(Fig. 6(b)) Ni 2p, P 2p, O 1s, C 1s의 XPS peak은 각각 25.98%, 20.44%, 16.31%, 31.41%의 성분 비율이 검출되었다. 여기서 Ni 2p, P 2p peak은 Ni-P박막에서 나온 peak으로 판단된다. 따라서, XPS분석 결과 시편의 4점굽힘시험 후 박리된 파괴경로는 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P박막 보다 상대적으로 약한 에폭시 레진과 Ni-P박막 사이 계면에서 파괴가 진행되었다.

실리콘 태양전지와 Ni-P 박막 구조의 시편을 600°C에서 10분 동안 열처리를 하고 4점굽힘시험 후 박리된 상부 웨이퍼와 하부 웨이퍼의 파면을 XPS로 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 상부웨이퍼 박막의 파면을 XPS분석한 결과이고, Fig. 7(b)는 하부웨이퍼의 파면을 XPS분석한 결과이다. 상부웨이퍼 박막의 파면을 분석한 결과(Fig. 7(a)) Ni 2p, P 2p, O 1s, C 1s의 XPS peak이 18.32%, 17.69, 33.28, 30.73%의 성분 비율이 검출되었다. 여기서 Ni 2p, P 2p peak은 Ni-P박막에서 나온 peak으로

Table 1. XPS atomic concentrations on the upper and lower sides of Si solar cell wafers deposited with electroless-plated Ni-P film before and after annealing at 600°C for 10 min.

Annealing	Sample	Atomic Concentration (%)				
		Ni 2p	P 2p	O 1s	C 1s	Si 2p
As-deposited	Upper side	-	-	13.44	86.56	-
	Lower side	25.98	20.44	16.31	31.41	-
600°C	Upper side	18.32	17.69	33.28	30.73	-
	Lower side	-	-	8.32	87.05	4.63

판단된다. 하부 웨이퍼 박막의 파면을 분석한 결과(Fig. 7(b)) Si 2p, C 1s, O 1s의 XPS peak은 4.63%, 87.05%, 8.32%의 성분 비율을 가지는 것으로 검출되었다. C 1s의 성분이 비교적 높으나 이것은 표면 불순물에서 나온 peak으로 판단되고, Si 2p peak은 실리콘 태양전지의 웨이퍼 표면에서 나온 peak으로 판단된다. 따라서, 600°C에서 10분 동안 열처리 시편의 XPS분석결과 시편의 4점굽힘시험 후 박리된 파괴경로는 Ni-P박막과 실리콘 태양전지의 웨이퍼 사이 계면에서 파괴가 진행되었다. 파면의 SEM과 EDS로 관찰한 결과 Fig. 5와 XPS분석 결과인 Fig. 6

Fig. 8. XPS Gaussian peak fitting of debonded surfaces after annealing at 600°C for 10 min.; (a) upper side with Ni 2p₃ core-level peak and (b) lower side with Si 2p core-level peak.

과 Fig. 7 모두 열처리 전, 후에 따라 서로 다른 파괴경로가 이루어지는 것으로 보아 계면접착에너지 저하에 밀접한 관계가 있는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막 구조의 시편을 600°C에서 10분 동안 열처리를 하고 4점굽힘시험 후 박리된 부분을 계면 결합 상태를 규명하기 위해 상부 웨이퍼의 Ni 2p_{3/2} peak과 하부 웨이퍼의 Si 2p peak을 나타내었다. 그 결과, 상부 웨이퍼에는 metallic Ni(853.3 eV)과 Ni-O(854.2 eV) 결합이 존재하였으며¹⁵⁾, 하부 웨이퍼에는 Si(99.40 eV)와 Si-O(103 eV)결합이 존재하는 것으로 나타났다.¹⁶⁾ 대기 중에서 열처리로 인하여 이러한 NiO와 SiO₂로 인하여 계면접착력의 저하가 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 잔류 산화막들은 열처리시 산소와 반응하여 계면에 생성되는 것으로 판단되며, 열처리시 환원 분위기에 따른 열처리가 중요하다.

4. 결 론

습식 무전해 도금 공정을 이용한 실리콘 태양전지 합물 전극 형성 기술을 적용하기 위한 기초 실험으로써 무전해 도금 Ni-P 전극을 형성하였으며, 이때 실리콘 태양전지 웨이퍼와 접촉 저항을 낮추기 위한 후속 열처리 공정에 따른 무전해 Ni-P 도금 박막과 실리콘 태양전지 웨이퍼를 4점굽힘시험을 통해 정량적인 계면접착에너지를 평가하였다. 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 박막 사이의 계면접착에너지는 14.83±0.76 J/m²로써, 습식공정을 통한 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 무전해 도금이 높은 계면접착에너지를 가지는 것을 알 수 있었다. 후속 열처리에 의한 실리콘 태양전지 웨이퍼와 Ni-P 무전해 도금은 300°C 처리 시 12.33±1.16 J/m², 600°C 처리 시 10.83±0.42 J/m²로써 열처리 온도가 증가할수록 계면접착에너지가 서서히 감소하는 거동을 보였다. 이는 파면 관찰 결과에서 볼 수 있는 Ni-O와 Si-O 형태의 결합이 존재하여 약한 계면을 형성하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 Ni silicide를 형성 하는 열처리 공정에서 환원 분위기에서의 열처리가 중요한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 주요사업(융합신소재 기술개발 사업)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. I. S. Moon, D. S. Kim, E. J. Lee and S. H. Lee, "New Method for Patterning front and Rear Contacts of High-Efficiency Solar Cells with Mechanical Scribe", 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC) Munich, 22, (2001).
2. M. A. Green, "Silicon Solar Cells : Advanced Principles Practice", pp.117, Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales, Sydney (1995).
3. E. J. Lee, D. S. Kim and S. H. Lee, "Ni/Cu Metallization for Low-Cost High-Efficiency PERC Cells", Sol. Energ. Mat. Sol. C, 74, 65 (2002).
4. F. d'Heurle, C. S. Petersson, J. E. E. baglin, S. J. La Placa and C. Y. Wong, "Formation of Thin Films of NiSi - Metastable Structure, Diffusion Mechanisms in Intermetallic Compounds", J. Appl. Phys., 55, 4208 (1984).
5. E. G. Colgan, M. Maenpaa, M. Finetti and MA. Nicolet, "Electrical Characteristics of Thin Ni₂Si, NiSi, and NiSi₂ Layers grown on Silicon", J. Electron. Mater., 12, 413 (1983).
6. Y. Hu and S. P. Tay, "Spectroscopic Ellipsometry Investigation of Nickel Silicide Formation by Rapid Thermal Process", J. Vac. Sci. Technol. A 16, 1820 (1998).
7. J. D. Lee, H. K. Kwon and S. H. Lee, "Study of Ni/Cu front Metal Contact Applying Selective Emitter Silicon Solar Cells", Kor. J. Met. Mater., 49, 905 (2011).
8. S. R. Kim and H. Y. Lee, "Measurement of Adhesion", Journal of Adhesion and Interface., 4, 21 (2003).
9. 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).
10. J. W. Kim, K. S. Kim, H. J. Lee, H. Y. Kim, Y. B. Park and S. M. Hyun, "Characterization and Observation of Cu-Cu Thermo-Compression Bonding Using 4-point Bending Test System", J. Microelectron. Packag. Soc., 18(4), 11 (2011).
11. E. J. Jang, J. W. Kim, B. Kim, T. Matthias and Y. B. Park, "Annealing Temperature Effect on the Cu-Cu Bonding Energy for 3D-IC Integration", Met. Mater. Int. 17, 105 (2011).
12. J. W. Kim, K. S. Kim, H. J. Lee, H. Y. Kim, Y. B. Park and S. M. Hyun, "The Effect of Plasma Pre-Cleaning on the Cu-Cu Direct Bonding for 3D Chip Stacking", proc. 18th IEEE International Symposium on the Physical & Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), Incheon, 102, IEEE Reliability/CPMT/ED (2011).
13. R. Shaviv, S. Roham and P. Woytowicz, "Optimizing the Precision of the Four-Point Bend Test for the Measurement of Thin Film Adhesion", Microelectronic Engineering 82, 99 (2005).
14. K. N. Chen, A. Fan, C. S. Tan and R. Reif, "Morphology and Bond Strength of Copper Wafer Bonding", Electrochemical and Solid-State Letters, 7(1), G14 (2004).
15. K. J. Min, M. H. Jeong, K. H. Lee, Y. S. Jeong and Y. B. Park, "Effect of Temperature/Humidity Treatment Conditions on Interfacial Adhesion of Electroless-Plated Ni on Polyimide", Kor. J. Met. Mater., 47, 675 (2009).
16. C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis and J. F. Moulder, "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy", pp.56-84, Perkin-Elmer, U.S.A (1978).

1. I. S. Moon, D. S. Kim, E. J. Lee and S. H. Lee, "New Method for Patterning front and Rear Contacts of High-Efficiency