

적외선 램프 및 핫 플레이트 온도 제어를 통한 4 Bus Bar 결정질 실리콘 태양전지 솔더링 특성에 관한 연구

이정진 · 손형진 · 김성현*

전자부품연구원 나노소재부품연구센터, 새나리로 25, 분당구, 성남시, 경기도, 13509

A Study on the Soldering Characteristic of 4 Bus Bar Crystalline Silicon Solar Cell on Infrared Lamp and Hot Plate Temperature Control

Jung Jin Lee · Hyoung Jin Son · Seong Hyun Kim*

Nano Materials & Components Research Center, Korea Electronics Technology Institute, #25, Saenari-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13509, Korea

ABSTRACT: The growth of intermetallic compounds is an important factor in the reliability of solar cells. Especially, the temperature change in the soldering process greatly affects the thickness of the intermetallic compound layer. In this study, we investigated the intermetallic compound growth by Sn-diffusion in solder joints of solar cells. The thickness of the intermetallic compound layer was analyzed by IR lamp power and hot plate temperature control, and the correlation between the intermetallic compound layer and the adhesive strength was confirmed by a 90° peel test. In order to investigate the growth of the intermetallic compound layer during isothermal aging, the growth of the intermetallic compound layer was analyzed at 85°C and 85% for 500 h. In addition, the activation energy of Sn was calculated. The diffusion coefficient of the intermetallic compound layer was simulated and compared with experimental results to predict the long-term reliability.

Key words: Solar cell, Intermetallic compounds, Sn-diffusion, Soldering, Temperature control

Nomenclature

V : voltage

N : newton

Subscript

IR : infrared

IMC : intermetallic compound

SEM : scanning electron microscopy

EDX : energy-dispersive X-ray spectroscopy¹⁾

1. 서론

태양전지모듈을 제조하는 과정에서 Tabbing & stringing 공정은 태양전지의 장기신뢰성과 출력손실에 큰 영향을 미치는 중요한 단계이다^{1,2)}. Tabbing & stringing 공정은 특히 태양전지의 신뢰성 문제를 일으키는 주요 인자로서 솔더 접합 계면에서의 금속 간 화합물(IMC)층의 형성과 성장을 꼽을 수 있다³⁾.

최근까지 진행된 연구에서는 태양전지모듈의 과도한 IMC층 성장은 접합계면의 신뢰성과 피로수명에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 이러한 성장은 장기간 야외노출 되었을 때 Ag/SnPb 접합계면에서 많이 발생한다. IMC층은 취성을 띄고 있어서 두께가 성장할수록 접착 강도에 영향을 미치는 것으로 알려졌다⁴⁻⁷⁾. IMC층은 Tabbing & stringing 공정단계에서도 시간이 길어지거나 온도가 높아졌을 때 형성 및 성장을 이루게 되는데^{8,9)}, Ribbon 안에 들어있는 Sn이 온도와 시간이 길어지면서 활성화 에너지값을 낮추기 위해 태양전지 내에서 금속층인 Ag로 확산해 금속 간 화합물 층인 Ag₃Sn을 형성하게 되면서 IMC

*Corresponding author: shkim@keti.re.kr

Received August 2, 2017; Revised September 20, 2017;

Accepted September 20, 2017

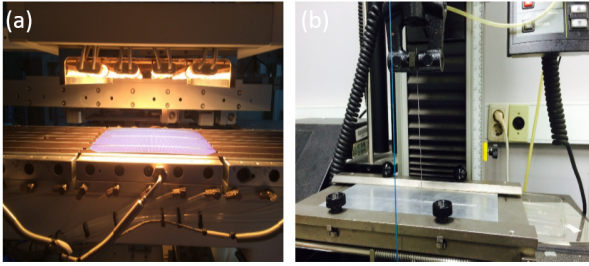


Fig. 1. (a) Setup of soldering process (b) 90° peel strength measurement equipment

층이 성장한다. 이렇듯 최근까지 진행된 많은 연구가 IMC층의 성장 동력에 특히 초점을 맞춰 진행되고 있다^{3,8,9)}.

하지만 정작 공정조건에 따라 발생하는 초기 IMC층의 두께 변화 및 초기 미세구조에 관한 연구는 많이 부족하다. 우리가 장기신뢰성과 안정성을 개선하기 위해서는 공정조건에 따른 IMC층의 두께변화를 세밀하게 관찰하고 이후 IMC층의 성장과의 관계를 살펴볼 필요가 있다. 정확히 IMC층의 두께가 어느 정도 성장하였을 때 접합강도 및 장기신뢰성에 영향을 주는지 알아보기 위해서는 공정조건에 따른 초기 IMC층의 두께가 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 공정조건에 따른 IMC층의 두께를 살펴보고 이후 온도에 따라 IMC층의 두께변화를 살펴보고 IMC층 두께변화에 따른 접합강도 및 미세구조를 살펴보았다. Fig. 1과 같이 Cell 하부의 기판온도 및 IR lamp 출력을 조절하여 공정 온도를 제어하여 공정을 진행하였다. Ribbon과 Cell 간의 접합 특성을 peel test data를 통해 비교분석 하였다. Ribbon과 Cell간의 IMC층 두께변화를 살펴보기 위해 SEM (scanning electron microscopy)과 EDX (energy dispersive X-ray spectroscopy) 분석장비를 이용하여 Ag/SnPb 접합계면에서의 Sn 확산에 의한 IMC층의 성장 동향을 관측하고 이를 이론적인 성장 값을 시뮬레이션 하여 실제 성장 값과 비교분석 하였다.

2. 실험방법

2.1 솔더링 공정 및 1 cell 모듈 제작

본 실험에서는 6inch 4 bus bar 결정질 실리콘 cell을 사용하였고, 60Sn40Pb Ribbon을 사용하였다. 공정온도는 180°C~260°C 까지 20°C 간격으로 기판온도는 200°C, 공정시간은 3초로 고정하여 Tabbing & stringing 공정을 실시하였다. Cell의 양 끝 단까지 온도가 균일하게 퍼질 수 있도록 Fig. 1과 같이 4개의 IR lamp의 출력 세기를 각각 달리하여 1,4번 IR lamp는 85%의 출력, 2,3번의 IR lamp 출력은 75%로 출력의 세기를 설정하여 Tabbing & stringing 공정에서 온도에 의해 생길 수 있는 결함을 최소화하였다. 또한, IR lamp의 반사부 안쪽을 원호 형상으로 설계하여 조도 분포가 균일하도록 하였다. 온도제어 방식은 close loop

system을 사용하였고, 장비 제어 시스템을 통해 공정온도 및 기판온도 제어 및 예열 등 모든 시스템이 제어가 가능하도록 하였다. 파이로미터가 셀 하부의 온도를 측정하여 실시간으로 온도를 관찰하여 외부조건에 구애받지 않고 설정온도에 대한 재현성을 확보하였다. 또한, 가속시험 전후 셀의 효율 변화를 측정하기 위해 Tabbing 공정이 끝난 셀을 lamination (온도 140°C, 압력 75-65-55 kpa, 홀딩시간 660초)하여 1 cell 모듈을 만들었다. EVA sheet는 화승인더스트리사 HEV4F 모델 Back sheet는 SCF사 TPE-30모델을 사용하였다.

2.2 Cell 가속시험 및 peel test

Tabbing & stringing 공정 후 초기 접합강도와 등은가속시험 및 상온보관 후 접합강도를 peel test를 통해 비교하여 IMC층 성장에 따른 접합강도 변화를 살펴보았다. 가속시험을 하지 않은 셀 모듈의 peel test를 실시하고, 이후 가속시험(85°C/85% 500시간)과 상온보관(25°C 500시간) 시행하여 이후 접합 계면에서의 접합강도의 변화를 살펴보았다.

2.3 실험 시편 제작 및 분석

시편의 단면을 보기 위해 시편을 Tabbing 공정 직후 클립 (Clips)을 사용하여 세로로 고정했다. 에폭시(Epoxy)와 경화제 (Hardner)를 섞은 뒤에 틀에 넣고 굳히는 Cold Mounting 기법을 이용하여 시편을 제작하였다. 공정조건에 따른 Ag/SnPb 접합 계면의 IMC층을 변화를 살펴보기 위해 EDX를 통해 Multi-point Analysis를 하여 Sn 확산에 따른 IMC층의 두께 변화를 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

공정조건별로 접합강도의 변화가 있는지 살펴보기 위해 공정 이후 초기 접합강도(N)와 가속시험과 대기상태에 500시간 보관 이후 접합강도에 어떠한 변화가 생기는지 알아보았다. 이후 각각의 조건 별로 90° peel test를 진행했다. Fig. 2는 180°C~260°C까지 공정 후 접합계면 사이의 초기 N값과 가속시험 이후 N값 그리고 상온보관 이후의 N값을 리본과 버스 바 간 90° peel test를 실시하여 얻은 뒤 정리한 그래프이다. Fig. 2(a) 그래프를 통해 알 수 있듯이 공정 직후 공정조건 별 접합강도는 거의 비슷한 것으로 나타났다. 이는 각각 다른 공정조건에 의해 생성된 초기 IMC층의 영향이 가속시험 전 단계에서는 거의 없는 것으로 판단된다. 하지만 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c) 그래프를 살펴보면 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후 접합강도의 차이에서는 공정 온도가 높은 260°C 조건에서 접합강도가 약해지는 것을 확인하였다. Ag/SnPb계면 사이에 화학적 변화가 일어났을 것으로 생각된다.

공정 이후 Ag/SnPb 계면 사이의 화학적 변화를 관찰하기 위

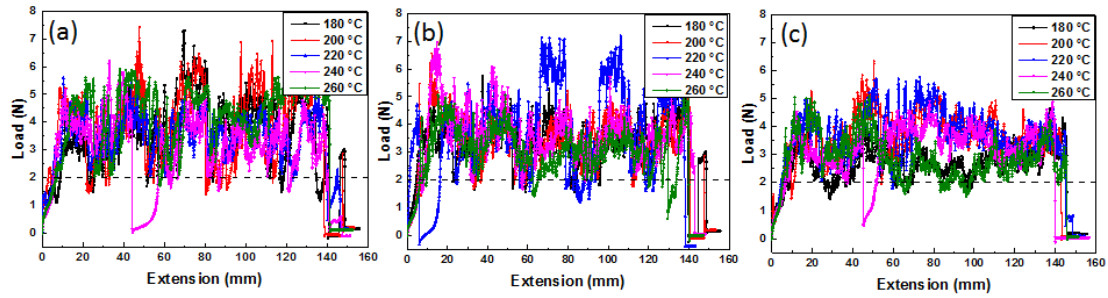


Fig. 2. Raw peel test data on the soldering process time and aging conditions (a) Immediately after the process (b) Natural aging_500h (c) 85°C/85% aging_500

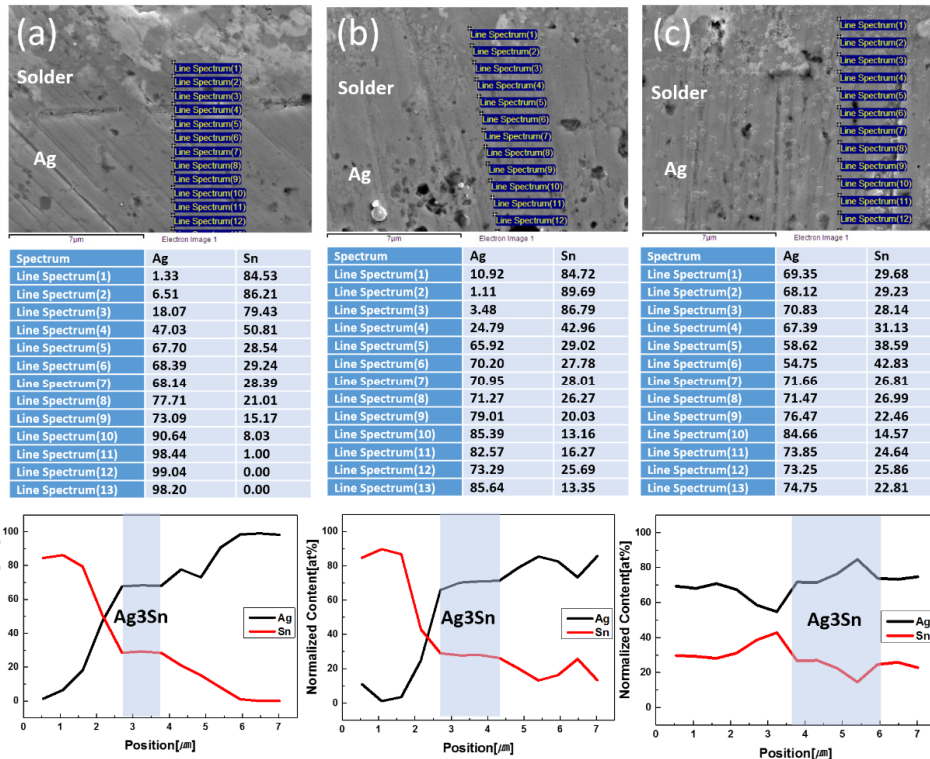


Fig. 3. SEM (1st line) and EDX line scans (2nd & 3rd line) data on cross sectional view for soldered at 200°C (a) Immediately after the process, (b) Natural aging 500h, (c) 85°C/85% aging 500h

해 EDX line scan을 실시하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 200°C와 260°C의 공정온도에서 공정 이후 IMC층 두께변화를 EDX line scan을 통해 거시적으로 나타낸 데이터이다. Tabbing & stringer 공정 이후 확인되는 Ag₃Sn 금속간화합물 층은 3:1의 원자비로 EDX line scan시 상대적으로 균일한 구간을 형성하였다. Fig. 3와 Fig. 4를 살펴보면 Ag와 Sn 원자 비가 3:1로 유지하는 범위는 시간과 온도에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 시간과 온도가 증가함으로 인해 활성화 에너지를 안정화하기 위해 Sn이 Ag 금속 층으로 확산하면서 IMC층이 형성되어 두께가 증가한 것으로 보인다. Fig. 3의 경우 초기 두께는 1.1 μm 상온보관 이후 1.8 μm 85°C/85% 가속시험 이후 2.3 μm로 측정되었다. Fig. 4의 경우 초기 두께는 1.8 μm 상온보관 이후 3 μm 85°C/85% 가속시험 이후 3.8 μm로 측정되었다. 200°C에서 공정한 셀보다 260°C에서 공

정한 셀이 초기 IMC층의 두께가 더 두꺼웠고 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후 초기 IMC층 두께에 비례하게 두께가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이는 초기 IMC층의 두께가 두꺼울 수록 IMC층 두께 증가에 영향을 끼쳤을 것으로 생각된다. Fig. 2의 결과를 통해 접합강도 측면에서 실험결과에 대해 살펴보면 공정온도 200°C의 셀의 경우 IMC층의 두께는 증가하였지만 IMC층의 두께가 3 μm를 넘지 않아 접합강도의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 반면 공정온도가 260°C인 셀의 경우 초기에는 접합강도의 영향이 없었지만, 상온보관 및 가속시험 이후 IMC층의 두께가 3 μm 이상 증가하면서 접합강도가 낮아졌다. 따라서 접합강도에 영향을 미치는 IMC층의 두께의 임계조건은 3 μm로 판단된다. 결국, 초기 IMC층 두께가 얇을수록 장기적인 관점에서 모듈효율 및 장기신뢰성이 좋아질 것으로 판단된다.

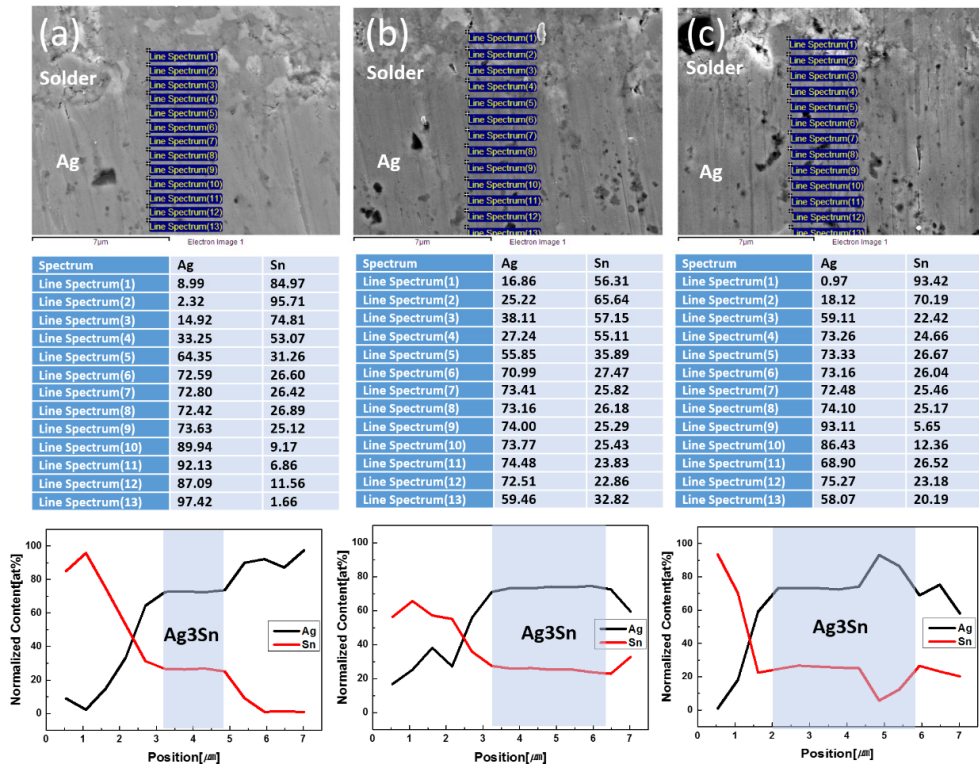


Fig. 4. SEM (1st line) and EDX line scans (2nd & 3rd line) data on cross sectional view for soldered at 260°C (a) Immediately after the process, (b) Natural aging 500h, (c) 85°C/85% aging 500h

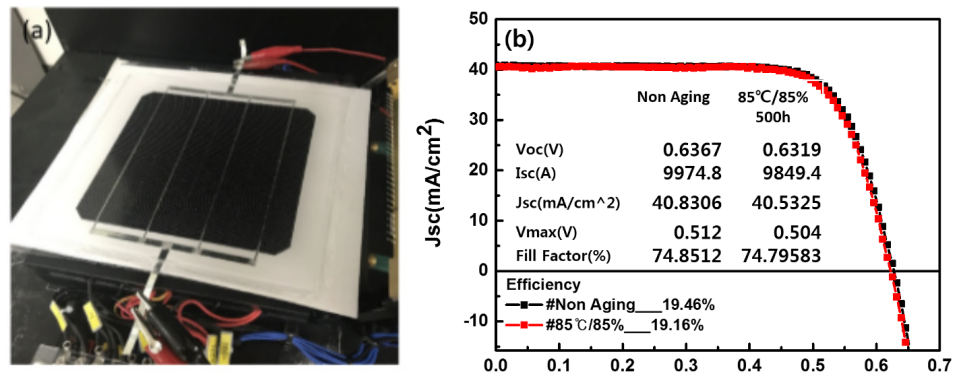


Fig. 5. (a) 4 bus bar photovoltaic module efficiency measurement image (b) Efficiency measure comparison

IMC층의 두께와 모듈효율의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 5의 (a) 그림과 같이 초기 IMC층이 얇은 공정온도 200°C 조건에서 솔더링한 샘플을 1 cell 모듈로 제작하여 초기 IMC층 두께와 85°C/85% 가속시험 이후 효율변화를 비교해 보았다. 그 결과 공정 직후의 효율보다 85°C/85% 가속시험 이후 효율이 소폭 하락하였다. Fig. 2의 결과에서 공정조건 200°C 조건에서 85°C/85% 가속시험 이후 접합강도의 변화는 없었다. 하지만 Fig. 3의 결과와 같이 IMC층의 두께가 증가하고 그 결과 직렬저항이 상승하여 모듈효율이 떨어진 것으로 판단된다.

식 (1)과 식 (2)는 60Sn40Pb solder를 사용하는 Ag₃Sn 성장에 대한 Arrhenius 방정식이다. 우리는 시뮬레이션을 통해 IMC층의 두께를 예측하고 이를 실제 IMC층 두께와 비교하기 위해 식

(1)을 통해 두께를 시뮬레이션 하였다. 식 (1)을 사용하면 특정 온도와 시간변수에 따른 IMC층 두께를 구할 수 있다⁽⁹⁾. 식 (1)에서 Q는 Ag₃Sn의 활성화 에너지, D₀는 Ag₃Sn의 확산계수, R은 기체상수, T는 절대온도, x₀는 초기 IMC층의 두께를 나타낸다. Table 1은 60Sn40Pb solder 사이의 IMC층의 금속속성을 정리한 표이다. 해당되는 값들을 식 (1)에 적용하면 온도와 시간에 따른 IMC층의 두께를 시뮬레이션 할 수 있다. 원소에 따른 활성화 에너지 Q를 얻기 위해 식 (1)에 자연 대수를 취하면 식 (2)와 같은 형태가 되는데, 식 (2)에 따라 ln(x - x₀) 및 1/T의 선형 함수 기울기를 사용하여 IMC층 성장의 활성화 에너지를 추출할 수 있는 Arrhenius 그래프를 생성할 수 있다.

Table 1. Material properties of constitutive elements and IMCs

Solder	IMC	Q[kJmol ⁻¹]	D ₀ [m ² s ⁻¹]
Sn60Pb40	Ag ₃ Sn	129.7	1.44

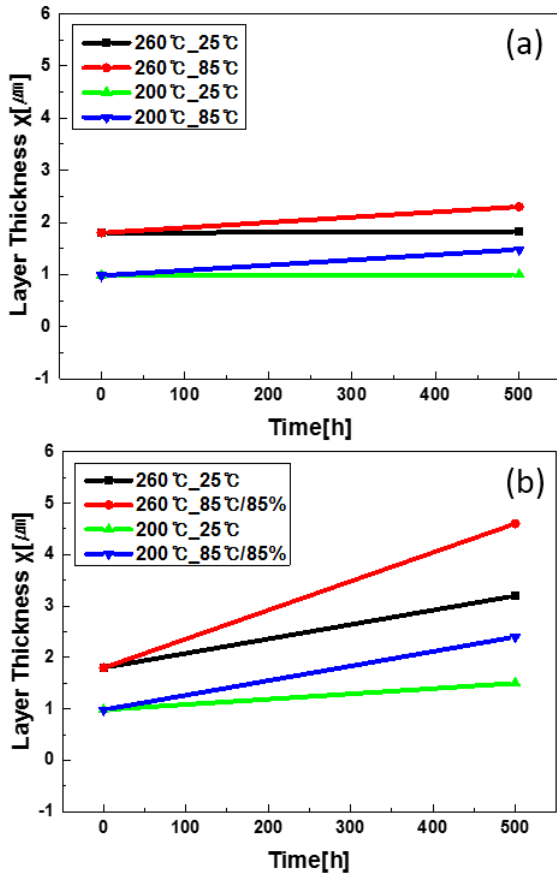


Fig. 6. (a) simulated phase growth for 500h (b) Measured phase growth of 500h

$$\chi = \sqrt{2 \cdot D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot t + \chi_0} \quad (1)$$

$$\ln(\chi - \chi_0) = \ln(2D_0t) - \frac{Q}{2R} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

식 (1)을 사용하여 IMC층 두께를 시뮬레이션하고 이를 실제 IMC층 두께 값과 비교하여 시뮬레이션 값과 실제 값과의 차이를 살펴보았다. Fig. 6는 공정온도 200°C와 260°C 셀을 식 (1)을 사용하여 온도와 시간에 따른 IMC층 두께를 시뮬레이션하고 실제 IMC층 두께와 비교한 데이터이다. Fig. 6의 (a) 그래프와 (b) 그래프를 통하여 시뮬레이션과 실제 IMC층 두께를 비교하였을 때 IMC층의 두께가 서로 큰 차이를 보인다. 이는 Fig. 6의 (a) 그래프에서는 습도의 영향을 고려하지 못한 점과 실제 IMC층 두께를 측정하는 과정에서 가속시험이 질소 분위기에서 이루어지지 않았기 때문에 영향이 있을 것으로 생각된다. Fig. 6의 (b) 그래프를 통해 공정온도 200°C 셀과 260°C 셀의 가속시험

조건에 따른 IMC층 두께의 차이를 비교했다. 그 결과 260°C에서 공정한 셀이 200°C에서 공정한 셀보다 가속시험에 따른 IMC층 두께차이가 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 통해 볼 수 있듯이 초기 IMC층의 두께에 따라 IMC층의 두께가 비례하게 성장했기 때문에 각각의 가속시험조건에 따라 IMC층 두께에서도 차이가 나타나는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구는 IR lamp 및 hot plate 온도제어를 통해 솔더링 특성 변화에 관한 실험을 진행하고 공정조건에 따른 초기 IMC층 변화와 가속시험 및 상온보관 이후 IMC층의 두께 변화의 추이를 통해 적정 초기 IMC층 두께 및 접합강도 변화에 영향을 끼치는 IMC층 두께에 대해 분석하였다. Peel test 실험결과와 솔더링 공정 직후에는 공정조건에 따른 접합강도가 서로 비슷하였다. 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후에는 공정온도 200°C 조건의 셀은 공정 직후의 접합강도와 비교하였을 때 접합강도의 변화가 없었다. 반면 공정온도 260°C 조건은 공정 직후 접합강도와 비교하였을 때 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후 접합강도가 낮아졌다. IMC층의 두께는 공정온도 200°C 조건에서보다 공정온도 260°C 조건의 셀이 초기 IMC층의 두께가 더 두꺼웠다. 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후에는 두 조건 모두 IMC층이 성장하였고 초기 IMC층의 두께와 비례하게 IMC층이 성장하였다. 결국, 공정온도 260°C에서 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후 IMC층의 두께가 초기 IMC층의 두께와 비례하게 성장하면서 접합강도가 낮아지는 IMC층 두께의 임계조건에 도달한 것으로 판단된다. IMC층 두께에 따른 효율의 영향을 살펴보면 공정 직후와 85°C/85% 가속시험 이후 접합강도의 차이가 없던 공정온도 200°C 조건에서도 85°C/85% 가속시험 이후 IMC층 두께 증가하면서 모듈효율이 하락하였다. 이는 접합강도의 영향보다 IMC층의 두께 증가가 모듈효율에 더 직접적인 영향을 주는 것으로 판단된다. Arrhenius 방정식을 이용하여 시뮬레이션 두께 값과 실제 IMC층 두께 측정값을 비교하였다. 실험결과 공정온도 200°C에서 실험한 IMC층의 두께가 시뮬레이션 결과와 유사하였다. 이는 실제 측정 결과에서 상온보관 및 85°C/85% 가속시험 이후 초기 IMC층의 두께에 비례하여 IMC층의 두께가 증가하였기 때문에 공정온도 200°C에서 IMC층의 두께가 비교적 얇아 실제 결과가 시뮬레이션 결과와 유사한 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술혁신사업의 에너지기술 개발 사업 연구비 지원(과제번호:20143030011830)으로 수행되었습니다.

References

1. Hsieh, H. H., et al. "The effects of temperature and solders on the wettability between ribbon and solar cell." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, No. 6, pp.864-868, 2009.
2. Kim, S. J., et al. "Soldering Process of PV Module Manufacturing and Reliability." *Korean Solar Energy Society Conference Proceedings*, 2011.
3. So, A. C. K. and Yan, C. C. "Aging studies of Cu-Sn intermetallic compounds in annealed surface mount solder joints." *Electronic Components and Technology Conference*, 1996. *Proceedings.*, 46th. IEEE, 1996.
4. Yang, T. L., et al. "Growth kinetics of Ag 3 Sn in silicon solar cells with a sintered Ag metallization layer." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123 pp.139-143, 2014.
5. Gao, W., et al. "Effect of glass phase on solder joint reliability in crystalline silicon photovoltaic modules." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 26, No. 10, pp.7811-7814, 2015.
6. Che, F. X., John H. L. P. "Characterization of IMC layer and its effect on thermomechanical fatigue life of Sn-3.8 Ag-0.7 Cu solder joints." *Journal of Alloys and Compounds*, 541, pp.6-13, 2012.
7. Jeong, J. S., Park, N.C., and Han, C.W. "Field failure mechanism study of solder interconnection for crystalline silicon photovoltaic module." *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, No. 9, pp.2326-2330, 2012.
8. Chuang, C. M., and Lin, K. L. "Effect of microelements addition on the interfacial reaction between Sn-Ag-Cu solders and the Cu substrate." *Journal of Electronic Materials*, Vol. 32, No. 12, pp.1426-1431, 2003.
9. Geipel, T., et al. "Intermetallic compounds in solar cell interconnections: Microstructure and growth kinetics." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, pp.370-388, 2017.
10. Wassink, R. J. K. *Soldering in Electronics* (Ayr, Scotland: Electrochemical Publications Ltd., pp.149-159. 1989.