

코발트실리사이드를 이용한 염료감응형 태양전지 상대전극의 신뢰성 평가

김광배, 박태열, 송오성*
서울시립대학교 신소재공학과

Reliability of a Cobalt Silicide on Counter Electrodes for Dye Sensitized Solar Cells

Kwangbae Kim, Taeyoul Park, Ohsung Song*

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

요약 염료감응형 태양전지 촉매층으로 CoSi의 신뢰성을 확인하기 위해 전자빔증착기를 이용하여 100 nm-Co/300 nm-Si/quartz의 적층구조를 형성하고, 700°C-60분의 진공열처리하여 약 350 nm-CoSi를 형성하였다. 이때 잔류 Co를 제거하기 위해 80°C-30%의 황산처리를 진행하였다. 또한 비교를 위해 100 nm-Pt/glass 상대전극을 준비하였다. CoSi 상대전극이 채용된 DSSC 소자의 신뢰성을 확인하기 위해 80°C 온도조건에서 0, 168, 336, 504, 672, 840시간동안 유지하였다. 이들을 채용한 DSSC 소자의 광전기적 특성을 분석하기 위해 solar simulator와 potentiostat을 이용하였다. CoSi 상대전극의 촉매활성도, 미세구조, 그리고 조성 분석을 확인하기 위해 CV, FE-SEM, FIB-SEM, EDS를 이용하여 분석하였다. 시간에 따른 에너지변환효율 결과, Pt와 CoSi 상대전극 모두 에너지변환효율이 504시간까지는 유지되다가 672시간 경과 후 처음의 50%로 감소하는 특성을 보였다. 촉매활성도 분석 결과, 시간이 지남에 따라 Pt와 CoSi 상대전극 모두 촉매활성도가 감소하여 각각 64%, 57%의 촉매활성도를 보였다. 미세구조 분석 결과, CoSi층은 전해질에 대한 안정성은 우수하였으나, 하부 쿼츠 기판과 CoSi층의 접촉면에 스트레스가 집중되어 국부적으로 크랙이 형성되며, 궁극적으로 μm 급의 박리현상을 확인하였다. 따라서 CoSi 상대전극은 실리사이드화 되는 과정에서 잔류응력 때문에 열화가 일어나므로 신뢰성의 확보를 위해서는 이러한 잔류응력의 대책이 필요하였다.

Abstract Cobalt silicide was used as a counter electrode in order to confirm its reliability in dye-sensitized solar cell (DSSC) devices. 100 nm-Co/300 nm-Si/quartz was formed by an evaporator and cobalt silicide was formed by vacuum heat treatment at 700°C for 60 min to form approximately 350 nm-CoSi. This process was followed by etching in 80°C-30% H₂SO₄ to remove the cobalt residue on the cobalt silicide surface. Also, for the comparison against Pt, we prepared a 100 nm-Pt/glass counter electrode. Cobalt silicide was used for the counter electrode in order to confirm its reliability in DSSC devices and maintained for 0, 168, 336, 504, 672, and 840 hours at 80°C. The photovoltaic properties of the DSSCs employing cobalt silicide were confirmed by using a simulator and potentiostat. Cyclic-voltammetry, field emission scanning electron microscopy, focused ion beam scanning electron microscopy, and energy dispersive spectrometry analyses were used to confirm the catalytic activity, microstructure, and composition, respectively. The energy conversion efficiency (ECE) as a function of time and ECE of the DSSC with Pt and CoSi counter electrodes were maintained for 504 hours. However, after 672 hours, the ECEs decreased to a half of their initial values. The results of the catalytic activity analysis showed that the catalytic activities of the Pt and CoSi counter electrodes decreased to 64% and 57% of their initial values, respectively(after 840 hours). The microstructure analysis showed that the CoSi layer improved the durability in the electrolyte, but because the stress concentrates on the contact surface between the lower quartz substrate and the CoSi layer, cracks are formed locally and flaking occurs. Thus, deterioration occurs due to the residual stress built up during the silicidation of the CoSi counter electrode, so it is necessary to take measures against these residual stresses, in order to ensure the reliability of the electrode.

Keywords : dye sensitized solar cell, reliability, energy conversion efficiency, cobalt silicide, counter electrode

*Corresponding Author : Ohsung Song (University of Seoul)

Tel: +82-2-6490-2410 email: songos@uos.ac.kr

Received January 4, 2017

Revised March 2, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

1. 서론

차세대 태양전지중 하나인 염료감응형 태양전지(dye-sensitized solar cell ; DSSC)는 기존의 실리콘 태양전지 보다 가격경쟁력이 우수하고, 공정이 간단하며, 대면적화가 용이하여 석유에너지를 대체할 미래에너지로 주목받고 있다[1]. 이러한 DSSC는 작동전극부, 전해질, 상대전극부로 구성되어 있으며, 이중 상대전극부는 FTO(fluorine doped tin oxide) 기판과 환원촉매층으로 구성되어 있다. 이때 투명전극인 FTO는 전체 제작비용 중 25%를 차지하고 있고, 촉매재료인 Pt는 고가의 귀금속 재료로 전체 제작비용 중 40%를 차지하고 있다[2].

이러한 Pt는 높은 촉매활성도와 전기전도도를 나타내어 가장 많이 사용되고 있으나, $Pt(s)+2I_2(aq) \rightarrow PtI_4(s)$ 와 같이 요오드계 전해질의 산화반응으로 인해 요오드 화합물이 생성되어 시간이 지남에 따라 소자의 신뢰성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다[3]. 따라서 소자의 제작비용을 절감하고 신뢰성이 향상된 신소재를 도입하여 TCO(transparent conductive oxide)-free와 Pt-free를 구현하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

D. Bari 등[4]은 Pt 상대전극을 채용한 DSSC 소자를 60°C ~ 85°C의 온도조건에서 가속 실험하여 최대 1000시간까지 소자의 전기적인 특성을 확인하였는데, 이때 85°C 온도에서는 61시간 만에 에너지변환효율(energy conversion efficiency ; ECE)이 80%로 감소한 것을 보고하였다. Y. Noh 등[5]은 Pt 대신 Iridium을 촉매층으로 채용하고, 요오드전해질에 대한 신뢰성을 비교하기 위해 100회의 cyclic voltammetry를 확인하여, Pt와 버금가는 신뢰성을 보고하였다. 또한 H. Takada 등[6]은 Pt와 carbon 촉매층을 채용한 DSSC의 신뢰성을 확인하기 위해 85°C의 온도조건에서 1000시간 동안 ECE의 변화를 확인하였는데, Pt 촉매를 채용한 소자는 500시간이 지나면 전기적인 특성이 감소하는 반면 carbon 촉매를 채용한 소자의 경우, 전기적인 특성변화가 거의 없음을 확인하여 carbon 촉매층이 요오드전해질에 안정하여 신뢰성이 우수하다고 보고한 바 있다. B. Yoo 등[7]은 Pt 촉매층을 채용한 소자를 상온과 60°C에서 보관한 후 전기적인 특성 변화를 확인한 결과 상온의 경우 변화가 없는 반면에 60°C의 경우 확연한 감소를 나타내어 신뢰성 실험에 있어 온도 조건이 중요한 요소임을 보고한 바 있다. 그러나 지금까지 보고된 신뢰성 실험은 기존의 연구

중이던 백금족과 탄소계의 연구에 한정되어 있어, 이들을 대체할 신소재에 대한 신뢰성 연구를 진행할 필요가 있다.

최근 K. Kim 등[8]은 Co₂Si, CoSi, CoSi₂의 세 가지 상의 촉매활성도를 확인하기 위해 Co/Si wafer를 제작하고 진공 열처리하여 300°C-Co₂Si, 500°C-CoSi, 700°C-CoSi₂가 형성됨을 보고한 바 있다. 특히 제작된 코발트 실리사이드 중 CoSi 환원촉매활성도가 Pt에 비해 67% 정도로 우수하다고 보고하였다.

CoSi는 안정한 실리사이드로 요오드전해질과의 안정성이 높을 것으로 예상되지만 요오드계 전해질과의 시간에 따른 신뢰성 연구는 아직까지 보고된 바 없다.

따라서, 본 연구에서는 quartz 기판에 나노급 두께로 100 nm-Co/300 nm-Si 구조의 이중층을 형성시킨 후 진공 열처리를 통해 약 350 nm CoSi를 형성시키고, 이를 DSSC 소자에 채용하여 80°C의 온도조건에서 시간에 따른 나노급 촉매재료로서의 신뢰성을 확인하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 CoSi의 염료감응형 태양전지 촉매층으로 채용가능성 및 신뢰성을 확인하기 위해 100 nm-Co/300 nm-Si/quartz 구조로 적층하고 최종 두께 약 350 nm의 CoSi를 제작하였다.

이때 100 nm-Co/300 nm-Si 이중층은 E-gun evaporator(ZZZ550-2/D, maestech)를 이용하여 전자빔 파워 10 kV, 기저압력 3×10^{-6} torr의 조건으로 가로 2 cm, 세로 1.5 cm 크기의 quartz 기판 위에 증착하였다. 준비된 100 nm-Co/300 nm-Si/quartz 시편을 진공로(DE/KR-1706, Heraeus)를 이용하여 700°C-60분간 열처리 후 표면에 잔류한 Co를 제거하기 위해 30% H₂SO₄에 80°C-10분간 침지시켜 Fig. 1 (a)와 같이 CoSi/quartz를 형성하였다. 이때 물성 비교를 위한 100 nm-Pt/glass 시편은 RF 스퍼터(MHS-1500, 무한진공)를 이용하여 준비하였다.

준비된 CoSi 상대전극이 탑재된 실제 DSSC 소자의 신뢰성을 확인하기 위해, Fig. 1 (b)와 같이 glass/FTO/blocking layer/TiO₂/dye(N719)/electrolyte/CoSi/quartz 구조의 DSSC 소자를 제작하였다. 비교를 위해 Pt/glass 상대전극이 채용된 동일한 구조의 DSSC 소자도 준비하

였다. 이후 완성된 DSSC 소자들은 신뢰성 확인을 위해 80°C의 온도조건에서 0시간, 168시간, 336시간, 504시간, 672시간, 840시간동안 가속실험 후 각각의 광전기적 특성 분석을 수행하였다.

DSSC 소자의 광전기적 특성 확인을 위해 solar simulator(PEC-L11, Peccell)와 potentiostat(Iviumstat, Ivium)을 이용하여 측정하였다. 이때 광원은 100 W 제논 램프를 사용하여, 1 sun (100 mW/cm²) 조건으로 분석하였다.

80°C 온도조건에서 요오드 전해질에 침지한 CoSi 상대전극의 시간에 따른 환원촉매활성도를 확인하기 위해 DY2113 potentiostat (Digi-Ivy, Austin, TX)의 CV (cyclic voltammetry)을 이용하였다[9].

시간에 따른 상대전극의 미세구조를 확인하기 위해 FE-SEM(field emission scanning electron microscope, S-4300, Hitachi사)를 이용하였다.

또한 상대전극의 단면구조변화 관찰을 위해 FIB-SEM (focused ion beam scanning electron microscope, nanolab 650, Helios)을 이용하였다. 이때 시편의 손상 방지를 위해 Pt를 증착하고 FIB milling을 통해 소자를 길이 5 μm, 깊이 1 μm로 식각한 후 기판을 52° 기울여 식각된 부분의 단면 이미지를 자세히 관찰하였다. 그리고 요오드화합물 형성여부를 확인하기 위해 EDS(energy dispersive spectrometry, JSM-6010LA, JEOL사)를 이용하였다. 이때 가속전압은 20 kV로 유지하고, 1,000배율로 확대한 후 구성원소의 함량을 정량적으로 분석하였다.

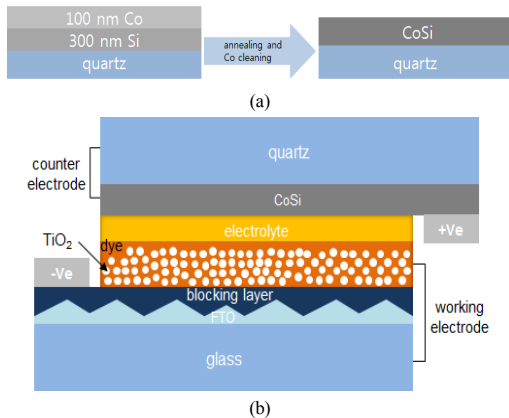


Fig. 1. Illustration of (a) the cross sectional structure of CoSi counter electrode and (b) the integrated DSSC device with CoSi counter electrode

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 Pt 상대전극과 CoSi 상대전극을 채용한 DSSC 소자의 시간에 따른 ECE의 변화율을 나타내었다.

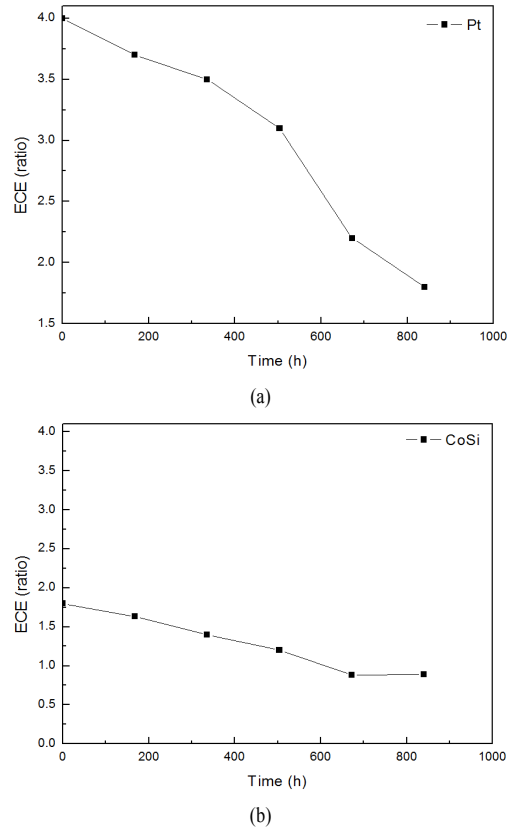


Fig. 2. Energy conversion efficiency ratio data of (a) Pt counter electrode and (b) CoSi counter electrode

(a)는 Pt 상대전극을 채용한 DSSC 소자의 ECE 변화율을 나타낸 그래프이다. 시간이 경과함에 따라 ECE가 약 8%씩 감소하는 것을 확인하였으며, 504시간 이후 급격하게 감소하여 최종적으로 840시간 후에는 기존 대비 55% 감소된 것을 확인하였다. 이는 E. Olsen 등[3]이 Pt와 요오드 전해질이 장시간 접촉하게 될 경우 $Pt(s)+2I_2(aq) \rightarrow PtI_4(s)$ 산화반응으로 인해 신뢰성이 떨어진다는 보고 일치하는 결과였다.

(b)는 CoSi 상대전극을 채용한 DSSC 소자의 ECE 변화율 그래프이다. 시간이 경과함에 따라 ECE가 10%씩 감소하는 것을 확인하였으며, 672시간 이후에는 ECE의 감소율이 줄어 최종적으로 840시간 후에는 기존 대비

51% 감소된 것을 확인하였다.

따라서, Pt 상대전극과 CoSi 상대전극을 채용한 소자의 ECE가 모두 비슷하게 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 3에는 Pt 상대전극과 CoSi 상대전극의 요오드전해질과 반응시간에 따른 촉매활성도 변화를 나타내었으며, 이때 환원촉매활성도의 자세한 변화량을 비교하기 위해 좌하단의 그래프를 확대하여 나타내었다.

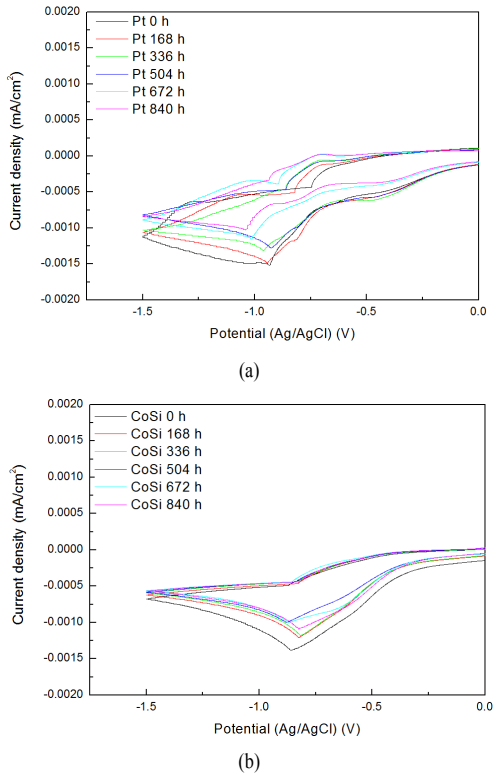


Fig. 3. CV curve of (a) Pt and (b) CoSi counter electrodes measured using electrolytes of MPN solution containing 0.1 M LiClO₄, 5 mM LiI, and 0.5 mM I₂ at a scan rate of 50 mV/s

(a)는 Pt 상대전극과 요오드전해질의 신뢰성 실험에 따른 촉매활성도 변화를 나타내었다. 신뢰성 실험 전 Pt 상대전극의 좌하단 면적을 기준으로 비교한 결과, 약 2%씩 감소하다가 504시간 이후에 급격하게 감소하여 최종적으로 840시간 신뢰성 실험 후 좌하단 면적이 36% 감소되어, 기존 촉매활성도 대비 64%의 촉매활성도를 확인하였다.

(b)는 CoSi 상대전극과 요오드전해질의 신뢰성 실험에 따른 촉매활성도 변화를 나타내었다. 신뢰성 실험 전

CoSi 상대전극의 좌하단 면적을 기준으로 비교한 결과, 약 10%씩 감소하는 것을 확인하였으며, 최종적으로 840시간 신뢰성 실험 후 좌하단 면적이 43% 감소되어, 기존 촉매활성도 대비 57%의 촉매활성도를 확인하였다.

따라서, Pt와 CoSi 상대전극의 요오드전해질과 반응시간에 따른 환원촉매활성도를 비교해본 결과 Pt와 CoSi 모두에서 환원촉매활성도가 점차 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 상대전극의 촉매활성도 감소는 DSSC 소자의 ECE 변화에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단하였다.

Fig. 4에는 80℃에서 0시간, 840시간 요오드전해질과 반응시킨 Pt 상대전극의 단면과 표면의 미세구조 변화를 각각 FIB-SEM과 FE-SEM을 이용하여 확인한 결과를 나타내었다.

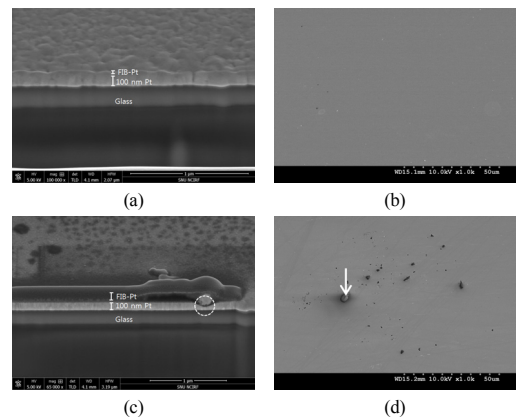


Fig. 4. SEM images of Pt layer (a), (b) at 0 hours and (c), (d) after 840 hours

(a)는 요오드계 전해질과 0시간 반응시킨 후 Pt 상대전극의 FIB-SEM 단면 이미지이다. 목적인 바와 같이 Pt가 100 nm의 두께로 균일하게 증착된 것을 확인할 수 있다.

(b)는 (a)의 FE-SEM 표면 이미지로 Pt가 전반적으로 균일한 증착표면을 가짐을 보였다.

(c)는 요오드계 전해질과 80℃의 온도에서 840시간 반응시킨 후 Pt 상대전극의 FIB-SEM 단면 이미지이다. 전체적인 Pt의 두께는 약 100 nm로 확인되었으나 흰색 점선으로 표시한 바와 같이 부분적으로 요오드계 전해질과 반응하여 열화되는 것을 확인할 수 있었다.

(d)는 요오드계 전해질과 80℃의 온도에서 840시간 반응시킨 후 Pt 상대전극의 FE-SEM 표면 이미지이다.

흰색 화살표로 표시한 부분에서 주위와 콘트라스트 차이를 확인하였으며, EDS 분석 결과 요오드 원소의 존재가 확인되었다. 이는 E. Olsen 등[3]이 보고한 바와 같이 요오드화합물이 생성되어 나타난 결과로 판단하였으며, 요오드화합물은 밀도($0.006 \text{ ea}/\mu\text{m}^2$)로 생성되어 Pt 상대전극 열화의 주요 원인으로 판단하였다.

따라서, 요오드전해질과 Pt의 산화반응으로 인하여 촉매활성도가 감소하는 것을 확인하였으며, 최종적으로 DSSC 소자에 채용 시 시간이 지남에 따라 ECE에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 5에는 80°C 에서 0시간, 504시간, 840시간동안 요오드계 전해질과 반응시킨 CoSi 상대전극의 미세구조 변화를 나타내었다.

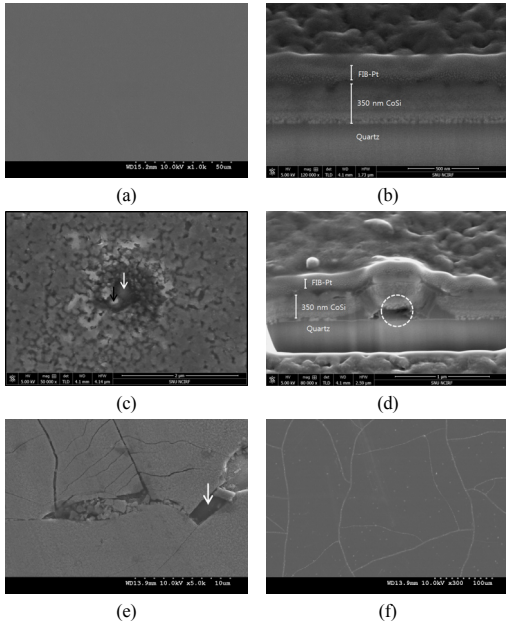


Fig. 5. SEM images of CoSi layer (a), (b) at 0 hours and (c), (d) after 504 hours, and (e), (f) after 840 hours

(a)는 요오드계 전해질과 0시간 반응시킨 후 CoSi의 표면을 FE-SEM을 이용하여 1,000배 확대한 이미지이다. 목적한 바와 같이 CoSi가 전반적으로 균일하게 코팅된 것을 확인할 수 있었다. (b)는 (a)와 동일한 시편의 단면을 FIB-SEM을 이용하여 120,000배 확대한 이미지이다. 단면 이미지에 표시한 바와 같이 약 350 nm의 CoSi가 균일하게 형성된 것을 확인할 수 있었다.

(c)는 요오드계 전해질과 504시간 반응시킨 후 CoSi의 표면을 FIB-SEM을 이용하여 50,000배 확대한 이미지이다. 검은색 화살표로 표시한 약 244 nm 크기의 응집체 부분과 흰색 화살표로 표시한 주위와 콘트라스트 차이가 나타나는 것으로 볼 때 미세구조 변화가 발생된 것을 확인할 수 있었다. 한편 이러한 부분의 EDS 결과 요오드화합물을 나타내는 요오드 원소의 검출은 없었다. (d)는 (c)에 검은색 화살표로 표시한 부분의 단면을 FIB-SEM을 이용하여 80,000배 확대한 이미지이다. 단면 이미지를 확인해 본 결과 CoSi의 두께는 변화하지 않아 금속간 화합물인 CoSi가 요오드전해질에는 안정한 것을 확인하였다. 다만, 하부 쿼츠 기판과 CoSi의 계면이 떨어져 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 실리사이드 열처리화 중에 압축응력을 받고 있던 CoSi 박막이 스트레스가 해소되면서 하부 기판과의 박리현상이 나타난 것으로 판단되었다.

(e)는 요오드계 전해질과 840시간 반응시킨 후 CoSi의 표면을 FE-SEM을 이용하여 5,000배 확대한 이미지이다. 가속실험에 의해서 형성된 미세구조 변형이 결국 CoSi 표면의 완전한 박리로 이어진 것을 확인하였으며, 박리된 부분은 5,000배 이미지 전체의 약 10%로 확인되었다. 이는 (d)에서 확인한 바와 같이 부풀어 오른 부분에 스트레스가 집중적으로 가해지면서 나타난 현상으로 판단하였다. 또한 화살표로 표시한 박리된 부분을 분석한 EDS 결과 58.86%의 Si, 41.14%의 O만이 확인되고, Co의 성분이 분석되지 않는 것으로 나타나 CoSi 층이 완전히 박리된 것으로 확인되었다.

(f)는 (e)와 동일한 시편의 다른 부분을 300배 확대한 이미지이다. CoSi 표면에 전반적으로 약 32 nm 폭을 가진 크랙이 불규칙하게 형성된 것을 확인하였으며, 이러한 크랙과 박리부가 CoSi 열화의 주된 원인임을 알 수 있었다.

따라서 80°C 에서 가속실험을 진행할 경우, CoSi는 Pt와는 달리 요오드계 화합물이 아닌 자체적인 박막 스트레스 때문에 열화가 일어났고, 이것이 DSSC 소자에 채용 시 시간이 지남에 따른 ECE 감소의 원인임을 확인하였다. 또한 CoSi를 안정적으로 DSSC에 채용하기 위해서는 기판과의 잔류응력을 저감시킬 수 있도록 실리사이드 공정 이후 열처리 또는 중간층을 삽입하여 신뢰성을 높일 수 있는 대책이 필요하였다.

4. 결론

염료감응형 태양전지의 기존 Pt를 대신할 촉매층으로 CoSi의 신뢰성을 확인하기 위해 100 nm-Co/300 nm-Si/quartz 구조로부터 실리사이드화 처리를 거쳐 약 350 nm 두께의 CoSi 상대전극을 준비하였다. 실제 소자에 CoSi 촉매층을 채용하고 840시간까지 ECE 변화를 확인한 결과, 51%의 ECE 감소(Pt의 경우 55% 감소)를 확인하였다. 이는 촉매활성도 감소와 일치하는 결과였다. 이러한 CoSi 상대전극을 채용한 소자의 시간에 따른 ECE 감소는 CoSi를 형성하기 위한 실리사이드 공정 시 기판과의 잔류응력 때문에 크랙과 박리부가 형성되어 나타난 것으로 확인하였다. 따라서 실리사이드 공정 이후 열처리 또는 중간층을 삽입하여 기판과의 잔류응력을 저감시켜 신뢰성을 높인다면 CoSi를 안정적으로 DSSC에 채용할 수 있을 것으로 판단되었다.

References

- [1] B. O'Regan, M. Grätzel, "A low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", *Nature*, vol. 353, pp. 737-740, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1038/353737a0>
- [2] Z. Li, B. Ye, X. Hu, X. Ma, X. Zhang, Y. Deng, "Facile electropolymerized-PANI as counter electrode for low cost dye-sensitized solar cell", *Electrochem. Commun.*, vol. 11, pp. 1768-1771, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2009.07.018>
- [3] E. Olsen, G. Hagen and S. E. Lindquist, "Dissolution of platinum in methoxy propionitrile containing Li/I₂", *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, vol. 63, pp. 267-273, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00033-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00033-7)
- [4] D. Bari, N. Wrachien, R. Tagliaferro, S. Penna, T. M. Brown, A. Reale, A. Di Carlo, G. Meneghesso, A. Cester, "Thermal stress effects on Dye-sensitized Solar cells", *Microelectronics Reliability*, vol. 51, pp. 1762-1766, 2011.
- [5] Y. Noh, K. Yoo, J. Kim, O. Song, M. J. Ko, "Iridium catalyst based counter electrodes for dye-sensitized solar cells", *Curr. Appl. Phys.*, vol. 13, pp. 1620-1624, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.06.007>
- [6] H. Takada, Y. Obana, R. Sasaki, M. Kuribayashi, M. Kanno, C. Zhu, T. Bessho, Y. Takagi, K. Hinokuma, K. Noda, "Improved durability of dye-sensitized solar cell with H₂-reduced carbon counter electrode", *J. Power Sources*, vol. 274, pp. 1276-1282, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.148>
- [7] B. Yoo, M. K. Lim, K. Kim, "Application of Pt sputter-deposited counter electrodes based on micro-patterned ITO glass to quasi-solid state dye-sensitized solar cells", *Curr. Appl. Phys.*, vol. 12, pp. 1302-1306, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2012.03.018>
- [8] K. Kim, Y. Noh, O. Song, "Catalytic Properties of the Cobalt Silicides for a Dye-Sensitized Solar Cell", *Korean J. Mater. Res.*, vol. 26, no. 8, pp. 401-405, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3740/MRSK.2016.26.8.401>
- [9] K. Kim, Y. Noh, M. Choi, O. Song, "Properties of the Counter Electrode with Nickel Silicides in a Dye Sensitized Solar Cell", *Korean J. Met. Mater.*, vol. 54, no. 8, pp. 615-620, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3365/KJMM.2016.54.8.615>
- [10] G. Ghosh, G. V. Narasimha Rao, V. S. Sastry, A. Bharathi, Y. Hariharan and T. S. Radhakrishnan, "X-ray powder diffraction data of CoSi", *Power Diffraction*, vol. 12, no. 4, pp. 252-254, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0885715600009842>
- [11] F. sen, Y. Karatas, M. Gulcan, M. Zahmakiran, "Amylamine stabilized platinum(0) nanoparticles: active and reusable nanocatalyst in the room temperature dehydrogenation of dimethylamine-borane", *RSC Advances*, vol. 4, pp. 1526-1531, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1039/C3RA43701A>
- [12] M. Son, H. Seo, S. Kim, N. Homg, B. Kim, S. Park, K. Prabakar, H. Kim, "Improved long-term durability of a parallel-type dye-sensitized solar cell module using a platinum metal grid fabricated by direct current magnetron sputtering with heat treatment", *J. Power Sources*, vol. 222, pp. 333-339, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.08.080>

김 광 배(Kwangbae Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 박사과정

<관심분야>

태양전지, 반도체재료

박 태 열(Taeyeul Park)

[정회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 석사과정

<관심분야>

태양전지, 반도체 재료

송 오 성(Ohsung Song)

[종신회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학 (공학박사)
- 1996년 3월 : MIT 기초연구원
- 1997년 8월 : 삼성전자 CPU 기술팀
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

태양전지, 반도체 재료, 자성재료, 세라믹재료, 주얼리소재