니켈실리사이드 상대전극을 이용한 염료감응형 태양전지의 물성 연구

김광배·노윤영·최민경·송오성*

서울시립대학교 신소재공학과

Properties of a Counter Electrode with Nickel Silicides in a Dye Sensitized Solar Cell

Kwangbae Kim, Yunyoung Noh, Minkyung Choi, and Ohsung Song*

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Seoul 02504, Republic of Korea

Abstract: Nickel silicide was used as a counter electrode to replace the Pt catalytic layer of a dye-sensitized solar cell (DSSC) device. 50 nm Si/ 50 nm Ni was formed on glass or quartz by sputtering, and nickel silicides were formed by vacuum heat treatments at 450 and 800 °C for 30 min. X-ray diffraction (XRD) and Auger electron spectroscopy (AES) depth profiling analysis was used to confirm the formation of nickel silicides. Also, cyclic voltammetry (CV) analysis was employed to confirm the catalytic activity, and photovoltaic properties were confirmed using a simulator and potentiostat. The XRD and AES results revealed that NiSi and NiSi₂ were formed by annealing at 450 and 800 °C, respectively. The results of the CV analysis showed that both NiSi and NiSi₂ exhibited catalytic activity. The energy conversion efficiencies (ECE) of DSSCs with NiSi and NiSi₂ catalysts were 1.31% and 3.86%, respectively, while the device employing the Pt catalyst showed an ECE of 5.49%. This result implies that NiSi₂ can replace Pt when the processing condition is optimized.

(Received January 14, 2016; Accepted February 28, 2016)

Keywords: solar cells, annealing, phase transformation, X-ray diffraction, catalytic activity

1. 서 론

염료감응형 태양전지(dye sensitized solar cell, DSSC)는 작동 전극부, 전해질, 상대전극부로 구성되어 있으며, 이 중 상대전극부의 촉매재료로는 높은 전기전도도와 촉매활성도를 가진 백금(Pt)이 주로 사용되고 있다. 그러나 이러한 Pt는 2015년 \$32.21/g로 염료감응형 태양전지 전체 제작비용의 40% 이상을 차지하고 있으며, 장시간 요오드계 전해액과 접촉하는 경우 Pt와 요오드(I)의 산화반응으로 PtI₄, H₂PtI₆ 등의 요오드화합물이 생성되어 소자의 내구성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다 [1,2].

이를 극복하기 위한 상대전극부의 연구가 활발하게 진행되고 있는 가운데, 특히 비표면적 증가와 새로운 신소재 도입에 관한 연구가 보고되고 있다. 먼저, 비표면적 증가를 위한 엔지니어링의 경우 Y. Jhang 등 [3]은 평탄한 유리 기판에 요철모양의 나노구조를 이용하여 상대전극과 전해질 계면의

반응표면적을 증가시켜 기존의 5.64%에서 7.18%로의 효율 증가를 확인하였으며, Y. Xiao 등 [4]은 Pt촉매 하부에 단일 벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWCNT)를 사용함으로써 비표면적을 증가시켜 Pt 단일 층을 사용한 경우 4.74%의 효율을 나타낸 데 비해 5.96%의 효율을 보고한 바 있다.

다음으로 새로운 신소재 도입을 위한 엔지니어링의 경우, Y. Noh 등 [5]은 백금족 원소인 루테튬(Ru)을 촉매로 사용하여 기존 Pt 사용 시 효율이 약 6%인 것에 비해 Ru 사용 시 약 3%로 Pt에 비해 낮은 에너지변환효율을 보였으나, Ru의 두께가 증가될수록 촉매활성도가 향상되는 것을 확인하여 상대전극 물질로의 가능성을 보고한 바 있다. 또한 K. Mokurala 등 [6]은 백금족 원소인 이리듐(Ir)을 촉매로 채용하여 기존 Pt 채용 시 효율이 8.2%인 것에 비해 Ir 채용 시 7.2%로 Pt에 비해 낮은 에너지변환효율을 확인하여 Pt를 대체할 가능성을 보고한 바 있다. D. W. Zhang 등 [7]은 Pt를 대신 할 새로운 상대전극으로 그래핀 나노시트(graphene

*Corresponding Author: Ohsung Song

[Tel: +82-2-6490-2410, E-mail: songos@uos.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

nanosheet)를 채용하여 기존 Pt 채용 시 7.59%에 비해 다소 감소된 6.81%의 에너지변환효율을 보고한 바 있으며, S. Ghani 등 [8]은 Pt 상대전극 대신 폴리아닐린(polyaniline, PANI)에 금(Au) 나노 입자를 첨가하여 제작한 촉매층을 이용하여 기존의 Pt 촉매 채용 시 6.18%에 비해 Au/PANI를 촉매 층으로 채용한 경우 최대 6.71%로 다소 증가된 에너지변환효율을 보고한 바 있다. 그러나 이러한 비표면적 증가와 새로운 신소재 도입을 통한 상대전극부의 엔지니어링은 가격 경쟁력, 내구성, 효율 등 아직까지 해결하지 못한 문제점을 가지고 있어 꾸준한 연구가 필요한 실정이다.

니켈실리사이드(nickel silicide)는 광택이 나는 흰색 실리사이드로 전기전도도가 낮고 내식성이 우수한 특성을 가지고 있다. 니켈실리사이드의 경우 제작 시 열처리 온도에 따라 각기 다른 물성을 나타내는데, 600 °C 이하의 온도에서 열처리할 경우 $15 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 갖는 NiSi가 주로 형성되며, 800 °C 이상 열처리할 경우 $34 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 갖는 NiSi₂가 주로 형성된다 [9]. 또한 니켈(Ni)과 실리콘(Si)의 가격은 Pt에 비해 각각 1/3333, 1/2500로 매우 경제적이며, 이를 이용한 니켈실리사이드를 염료감응형 태양전지의 촉매 재료로써 이용이 가능할 경우 우수한 가격경쟁력과 내구성을 가질 것으로 기대된다.

따라서, 본 연구에서는 나노급 Ni, Si 이중층을 준비하고 이들의 열처리를 통해 NiSi, NiSi₂를 형성하고 이를 상대전극부의 촉매재료로 채용하여 소자의 광전기적 특성과 촉매 특성을 확인하고 Pt 촉매의 대체 가능성을 확인해 보았다.

2. 실험방법

본 연구에서는 염료감응형 태양전지의 NiSi, NiSi₂ 상대전극 도입에 따른 광전기적 특성을 평가하기 위해 평탄한 유리(glass) 기판과 쿼츠(quartz) 기판 전면에 50 nm Si/50 nm Ni를 코팅하여 준비하였다. 이때 Si와 Ni 박막증착은 E-gun evaporator(ZZZ550-2/D, 마에스텍)를 이용하여 E-beam power 10 kV, 기저압력 5×10^{-6} Torr의 조건으로 박막을 증착하였다. 이 후 NiSi와 NiSi₂의 형성을 위해 유리/50 nm Si/50 nm Ni와 쿼츠/50 nm Si/50 nm Ni의 시편을 진공열처리로(DE/KR-1706, Heraeus)를 이용하여 각각 450 °C, 800 °C 온도 조건에서 30분 열처리를 진행하였다. 한편 비교를 위해 유리기판 위에 100 nm의 Pt 박막을 증착하여 상대전극을 제작하였다. 이때 Pt 박막증착은 RF 스퍼터(radio frequency sputter, MHS-1500, 무한진공)를 이용하였으며, 타겟으로는 99.99% Pt

를 사용하고 반응기체는 40 sccm Ar를 사용하여 상온(RT)에서 5 mTorr 공정 압력으로 박막을 생성시켰다.

제작된 나노급 NiSi와 NiSi₂ 박막의 물성을 확인하기 위해 X-선 회절 분석(high resolution X-ray diffraction, HRXRD, X'pert-pro, PANalytical사)을 이용하였다. X선 소스(source)는 Ni 필터(filter)를 통과시켜 얻은 CuK α 로 파장은 1.5405 Å이며, 이 때 튜브(tube) 전류는 30 mA, 가속전압은 40 kV 이었다. 나노급 박막측정에 유리한 저각모드로 θ 를 2°로 고정시켰고, 회절범위는 joint committee powder diffraction standards(JCPDS) 카드 상에 나타나있는 Si(No. 05-0565), Ni(No. 45-1027), SiO₂(No. 05-0490), NiSi(No. 38-0844), 그리고 NiSi₂(No. 43-0989)를 고려하여 2θ 를 30~80° 범위에서 생성된 니켈실리사이드의 결정상을 확인하였다.

제작된 나노급 니켈실리사이드 박막의 조성비를 확인하기 위해 오제전자분광분석기(Auger electron spectroscopy depth profiling, AES, PHI 700 Xi, PHYSICAL ELECTRONICS)를 이용하여 Ni, Si의 조성변화를 표면부부터 측정하여 비교하였으며, 이때의 스퍼터링 속도는 SiO₂ 기준으로 1스텝(step)당 약 6 nm, 빔 파워(beam power) 10 kV, 빔 전류 10 nA를 유지하며 측정하였다.

나노급 박막인 NiSi와 NiSi₂ 각각의 촉매활성도 분석을 위해 DY2113 potentiostat(Digi-Ivy, Austin, TX)의 CV(cyclic voltammetry) 측정을 이용하였다. 스위프(sweep) 조건을 50 mV/s로 하고 기준전극(Ag/AgCl)과 전해질(3-methoxypropionitrile; MPN) solution에 0.1 M LiClO₄, 0.5 mM I₂ 그리고 5 mM LiI을 써서 촉매활성도에 대한 주기적인 전압전류곡선을 확인하였다.

작동전극(working electrode)의 블로킹층(blocking layer) 제작은 titanium (IV)bis(ethyl aceto acetato)-diisopropoxide와 1-Butanol을 혼합한 혼합액을 준비하고 이들을 교반기를 이용하여 30분 이상 교반 후 500 rpm-10초, 2000 rpm-40초 조건으로 스핀코팅(spin coating)하고 500 °C, 15분간 열처리하여 300 nm 두께를 가진 블로킹층을 제작하였다.

제작된 블로킹층 위에 닥터블레이드(doctor blade) 방법으로 20 nm 입도를 가진 이산화 티타늄 페이스트(TiO₂ paste, Dyesol DSL 18NR-T of 10)를 코팅 후 500 °C, 30분간 열처리하여 8 μm 두께를 가진 TiO₂ 필름을 만들었다 [10,11]. 이 후 0.5 mM cis-vis bis-ruthenium (II) bis-tetrabutylammonium (N719)을 흡착시켜 유리/FTO/blocking layer/TiO₂/dye(N719)의 구조를 갖는 작동전극을 완성하였다.

제작된 작동전극부와 상대전극부를 고정 클립(clip)으로

Fig. 1. Illustration of the cross sectional structure of the proposed DSSC.

고정한 후, 전해질을 주입하여 최종적으로 그림 1과 같이 유리/FTO/blocking layer/TiO₂/dye(N719)/electrolyte/100 nm (Pt, NiSi, NiSi₂)/유리 or 퀴츠의 수직단면을 가진 유효면적 0.45 cm² DSSC 소자를 완성하였다.

완성된 소자의 계면저항 확인을 위해 솔라 시뮬레이터 (solar simulator, PEC-L11, Peccell)와 퍼텐쇼 스탯(potentiostat, Iviumstat, Ivium)를 이용하여 임피던스(impedance)를 측정하였다. 임피던스 분석은 10 mHz ~ 1 MHz의 주파수 범위에서 각각의 교류전압의 인가에 대한 전류응답의 결과를 측정하여 내부 임피던스를 분석하였다. 임피던스 측정 결과로 나온 나이퀴스트 선도(Nyquist plot)를 통해 투명 전도성 산화물(Transparent conductive oxide : TCO) 기판의 면저항과 상대전극의 면저항에 주로 기인하는 실수항의 저항과 TCO/전해질 계면의 저항을 나타내는 R_b, TCO/TiO₂ 계면의 저항과 전해질/상대전극 계면의 전하이동 저항을 나타내는 R_i, 전자 이동 저항과 TiO₂/전해질 계면의 전자 재결합 저항을 나타내는 R₂, 전해질 내 산화-환원 종의 확산에 의한 와버그 임피던스를 나타내는 R₃ 세 개의 반원을 확인하였으며, 이를 통해 각각의 계면저항을 확인하였다.

DSSC 소자의 광전기적 특성 확인을 위해 솔라 시뮬레이터와 퍼텐쇼 스탯을 이용하여 전류-전압(I-V)을 측정하였다. 이때 광원은 100 W 제논 램프(xenon lamp)를 사용하여, 1 sun(100 mW/cm²) 조건으로 분석하였다. I-V 분석은 단락전류밀도(short circuit current density, J_{sc}), 개방전압(open circuit voltage, V_{oc}), 필팩터(fill factor, FF), 에너지변환효율(energy conversion efficiency, η)을 함께 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2에는 450 °C, 800 °C의 진공열처리를 통해 형성된

Fig. 2. XRD patterns of NiSi₂ and NiSi counter electrodes.

NiSi, NiSi₂ 박막에 대해 θ 를 2° 기울여 저각모드로 측정된 XRD 특성 피크를 나타내었다. NiSi 박막의 경우, 45.9°, 51.9°, 76.5°에서 각각 (112), (103), (222) 면방향을 가진 NiSi의 특성 피크(peak)를 확인할 수 있으며, 이는 M. Bhaskaran 등 [12]이 보고한 NiSi 특성 피크와 일치하였다.

반면 NiSi₂ 박막의 경우, 47.3°, 68.0°에서 (220), (400) 면방향을 가진 NiSi₂ 피크가 확인되었다. 또한 42.0°, 46.0°에서 (200), (201) 면방향을 가진 퀴츠 피크가 확인되어 성공적으로 퀴츠 기판 위에 NiSi₂가 형성된 것을 확인하였다. 다만, NiSi와 동일하게 44.6°에서 (011) 면방향을 가진 잔류 Ni 피크가 확인되었다. 따라서, 50 nm Si/50 nm Ni의 이중층을 450 °C, 800 °C에서 진공 열처리하여 목적인 바와 같이 NiSi와 NiSi₂가 제작된 것을 확인하였다.

그림 3은 450 °C와 800 °C에서 진공 열처리한 시편의 AES 분석을 실시한 데이터이다. 이때 같이 분석된 O를 제거하고 C, Si, Ni 원소를 100%로 하여 분석하였다. (a)는 50 nm Si/50 nm Ni 구조를 450 °C 열처리한 시편의 분석결과이며, 박막 전체에서 Si와 Ni의 조성이 1:1로 확인되어 NiSi가 형성된 것으로 판단되었다. 이는 H. F. Hsu 등 [13]이 Si 웨이퍼 위에 100 nm Ni을 증착하고 400 ~ 700 °C의 열처리를 통해 NiSi가 형성된다고 보고한 바와 일치하였다.

또한 (b)의 50 nm Si/50 nm Ni 구조를 800 °C 열처리한 시편의 경우 박막 전체에서 Si와 Ni의 조성이 약 2:1로 확인되어 NiSi₂가 형성된 것으로 판단되었으며, 이는 R. T. Tung 등 [14]이 Si wafer 위에 Ni을 증착하여 800 °C 이상의 온도에서 열처리를 통해 NiSi₂를 형성하였다고 보고한 바와 일치하였다.

한편, (a)와 (b) 모두 우측의 Ni 영역으로 표시한 부분을 보

Fig. 3. AES depth profile of (a) NiSi and (b) NiSi₂.

Fig. 4. CV curves of Pt, NiSi, and NiSi₂ counter electrodes measured using the electrolytes of MPN solutions containing 0.1 M LiClO₄, 5 mM LiI, and 0.5 mM I₂ at a scan rate of 50 mV/s.

면 실리사이드 박막과 기판과의 계면에 모두 잔류 Ni이 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞서 보인 XRD 분석 결과와 일치하는 결과이다. 그러나 이러한 Ni층의 존재는 NiSi와 NiSi₂의 경우 각각 전체 두께의 17%, 14% 정도로 매우 얇은 나노 두께로 존재하며, 실리사이드 박막과 기판과의 계면에 위치하기 때문에 환원촉매활성도에는 영향이 없을 것으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 50 nm Si/50 nm Ni의 이중층을 450 °C, 800 °C에서 진공 열처리하여 목적인 바와 같이 NiSi와 NiSi₂ 촉매층이 제작된 것으로 판단하였다.

그림 4는 제작한 NiSi와 NiSi₂ 상대전극의 촉매활성도 비교를 위한 CV 데이터이다. CV 그래프는 I₃/I₂ 산화환원에 따라 두 가지 루프(loop)가 나타나는데 우상단의 루프는 요오드 화물이 순차적으로 3I⁻ → I₃⁻ + 2e⁻와 2I₃⁻ → 3I₂ + 2e⁻의 산화반응을, 좌하단의 루프는 요오드에서 3I₂ + 2e⁻ → 2I₃⁻와 I₃⁻ +

Fig. 5. Nyquist plots of Pt, NiSi, and NiSi₂ counter electrodes employed DSSCs. Inset is Nyquist plot with specified parameters.

2e⁻ → 3I⁻로의 환원반응을 나타낸다.

이때 DSSC의 촉매반응은 주로 환원반응과 관련되어 좌하단의 면적을 통해 환원촉매활성도를 확인할 수 있는데, NiSi의 경우 Pt 상대전극 대비 약 60% 수준, NiSi₂의 경우 약 70% 수준으로 환원촉매활성도를 나타내어 이를 DSSC의 촉매재료로 채용 시 작동 가능성을 확인하였다. 따라서 CV 분석 결과 NiSi와 NiSi₂가 환원촉매재료로써 활용이 가능함을 확인하였다.

그림 5에는 각각의 유리/Pt, 유리/NiSi, 그리고 쿼츠/NiSi₂ 상대전극을 적용한 DSSC 소자에 인가된 주파수에 대한 실수항과 허수항으로 이루어진 나이퀴스트 선도를 나타내었다. 또한 우상단에는 일반적인 DSSC 소자의 나이퀴스트 선도에 나타나는 각각의 R_b, R₁, R₂, R₃의 내부저항을 나타내었다.

R_b 값은 TCO 기판의 면저항과 상대전극의 면저항에 기인하는 실수항의 저항과 TCO/전해질 계면의 저항을 나타내는

Table 1. Photovoltaic performances and energy conversion efficiencies of DSSCs with Pt, NiSi, and NiSi₂

Sample	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{V})$	FF	$\eta(\%)$
Pt	12.01	0.70	0.66	5.49
NiSi	6.64	0.70	0.28	1.31
NiSi ₂	10.52	0.70	0.53	3.86

Fig. 6. Current-voltage (I-V) characteristics of DSSCs with Pt, NiSi, and NiSi₂.

요인으로 Pt, NiSi, 그리고 NiSi₂의 R_h 값은 각각 10.3 Ω , 26.6 Ω , 35.3 Ω 로 나타내었다. 이는 촉매재료의 비저항이 상대전극의 면저항에 영향을 미쳐 나타난 결과로 Pt, NiSi 그리고 NiSi₂의 비저항이 각각 $0.1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, $15 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, $34 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 로 나타나는 경향과 일치하였다.

R_1 값은 10^3 - 10^5 Hz에서 TCO/TiO₂ 계면의 저항과 전해질/상대전극 계면의 전하이동 저항과 관련된 계면저항으로 Pt와 NiSi₂를 상대전극으로 채용한 소자의 R_1 값은 각각 1 Ω , 3 Ω 을 나타내어 NiSi₂의 R_1 값이 Pt와 거의 비슷하게 나타내는 것을 확인하였다. 이는 NiSi₂가 촉매재료로써 우수한 환원촉매활성도를 가지고 있는 것을 나타내며, 이러한 결과는 앞서 보인 CV 결과와 일치하였다. 한편, NiSi의 경우 R_1 값이 매우 크게 나타나 R_2 값과 중첩되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

R_2 값의 경우 1 - 10^3 Hz에서 TiO₂에서의 전자이동 저항과 TiO₂/전해질 계면의 전자 재결합 저항을 나타내는 요인으로 Pt와 NiSi₂를 상대전극으로 채용하였을 경우 모두 약 9 Ω 을 나타내었는데, 이는 동일한 작동전극부를 사용하였기 때문에 같게 나타나는 것으로 확인되었다.

한편, R_3 값은 10^6 Hz 이상에서의 전해질에서 산화-환원종의 확산과 관련된 와버그(warburg) 임피던스를 나타내는 값으로 Pt의 경우 2.8 Ω , NiSi₂의 경우 2.5 Ω 으로 오차범위 내

에서 측정되었는데, 이는 동일한 작동전극과 동일한 전해질을 이용하여 나타난 결과로 판단된다. 따라서 NiSi와 NiSi₂의 임피던스 데이터를 Pt와 비교해 볼 때, NiSi보다 NiSi₂가 Pt를 대체할 촉매재료로써 가능성이 있음을 확인하였다.

그림 6은 Pt, NiSi, 그리고 NiSi₂ 상대전극을 이용한 태양전지 소자의 I-V 데이터이다. NiSi를 채용한 DSSC 소자의 경우 낮은 단락전류밀도와 필팩터를 나타내는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞선 CV 결과와 임피던스 결과에서 비교적 낮은 촉매활성도와 높은 계면저항 값을 나타낸 결과와 일치하였다. 특히 NiSi₂를 이용한 경우 NiSi를 이용한 소자에 비해 매우 우수한 단락전류밀도와 필팩터를 나타내었으며, Pt를 이용한 경우와 비교하여도 일정 수준의 단락전류밀도와 필팩터를 나타내어 우수한 촉매특성을 나타내는 것을 확인하였다.

표 1에는 그림 6의 I-V결과를 자세히 나타내었다. 단락전류밀도(J_{sc})의 경우 DSSC 소자에 NiSi를 채용 시 6.64 mA/cm^2 를 나타내는 데 반해 NiSi₂와 Pt를 이용 시 각각 10.52 mA/cm^2 , 12.01 mA/cm^2 의 값을 나타내었다. 이는 앞서 CV 결과에서 확인한 바와 같이 NiSi의 경우 외부 회로를 통해 이동한 전자를 홀에 전달해주는 환원촉매활성도가 낮은 반면에, NiSi₂와 Pt의 경우 비교적 우수한 환원촉매활성도를 나타내어 높은 단락전류밀도를 나타내는 것으로 판단되었다.

개방전압(V_{oc})의 경우, 전해질의 산화-환원준위와 반도체 산화물의 페르미준위(Fermi level)의 영향을 받는 요소로써 본 실험에서는 0.70 V로 측정되었는데, 이는 동일한 전해질과 TiO₂를 이용하여 나타난 결과로 판단되었다.

필팩터(FF)의 경우 소자의 계면저항에 영향을 받는 요소로 NiSi 채용 시 0.28로 가장 낮은 값을 나타내었고, NiSi₂와 Pt의 경우 각각 0.53, 0.66을 나타내어 비교적 높은 값을 나타내었다. 이는 각각의 촉매재료의 환원촉매활성도 차이로 인해 전해질/상대전극 계면저항이 변화하여 나타나는 결과로 앞선 임피던스 결과에서 나타난 R_1 값의 변화와 일치하였다.

최종 에너지변환효율(η)의 경우 NiSi, NiSi₂, 그리고 Pt 이용 시 각각 1.31%, 3.86%, 5.49%를 나타내었으며, 이는 각각의 촉매재료의 환원촉매활성도 변화에 따라 단락전류밀도와 필팩터가 변화하여 나타난 결과였다.

따라서, NiSi와 NiSi₂가 DSSC 촉매재료로써 사용가능함을 확인할 수 있었으며, 특히 NiSi₂의 경우 Pt와 비슷한 수준의 환원촉매활성도를 나타내어 Pt를 대체할 촉매재료로써의 우수성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

염료감응형 태양전지의 상대전극 촉매층으로 NiSi와 NiSi₂를 채용하고자 Si/Ni 이중층을 각각 450 °C와 800 °C 진공열처리를 진행하여 니켈실리사이드를 제작하였다. XRD와 AES 분석의 결과 NiSi와 NiSi₂의 존재를 확인하였으며, CV 결과 NiSi와 NiSi₂의 환원촉매재료로써의 가능성을 확인하였다. 광전기적 특성 결과 NiSi₂의 경우 낮은 계면저항, 높은 단락전류밀도와 필팩터를 나타내어 최종적으로 3.85%의 에너지변환효율을 나타내었다. 따라서 진공열처리공정을 통해 제작한 NiSi₂의 환원촉매재료로써 가능성을 확인하였으며, 기존 DSSC의 Pt 촉매층을 대체할 가능성을 확인하였다.

REFERENCES

1. Z. Li, B. Ye, X. Hu, X. Ma, X. Zhang and Y. Deng,

- Electrochem. Commun.* **11**, 1768 (2009).
2. E. Olsen, G. Hagen and S. E. Lindquist, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.* **63**, 267 (2000).
3. Y. Jhang, Y. Tsai, S. Hsu, T. Huang, C. Lu, M. Chen and C. Wu, *Org. Electron.* **13**, 1865 (2012).
4. Y. Xiao, J. Wu, G. Yue, J. Lin, M. Huang and Z. Lan, *Electrochim. Acta* **56**, 8545 (2011).
5. Y. Noh, B. Yu, K. Yoo, M. Ko and O. Song, *Korean J. Met. Mater.* **50**, 243 (2012).
6. K. Mokurala, A. Kamble, P. Bhargava and S. Mallick, *J. Electron. Mater.* **44**, 4400 (2015).
7. D. W. Zhang, X. D. Li, H. B. Li, S. Chen, Z. Sun, X. J. Yin and S. M. Huang, *Carbon* **49**, 5382 (2011).
8. S. Ghani, R. Sharif, S. Bashir, A. Ashraf, S. Shahzadi, A. A. Zaidi, S. Rafique, N. Zafer and A. H. Kamboh, *Mat. Sci. Semicon. Proc.* **31**, 588 (2015).
9. E. G. Colgan, M. Maenpaa, M. Finetti and M. A. Nicolet, *J. Electron. Mater.* **12**, 413 (1983).
10. J. Kim and Y. Han, *Met. Mater. Int.* **20**, 571 (2014).
11. Y. Noh and O. Song, *Korean J. Met. Mater.* **53**, 214 (2015).
12. M. Bhaskaran, S. Sriram, T. S. Perova, V. Ermakov, G. J. Thorogood, K. T. Short and A. S. Holland, *Micron* **40**, 89 (2009).
13. H. F. Hsu, C. L. Tsai, H. Y. Chan and T. H. Chen, *Thin Solid Films* **518**, 1538 (2009).
14. R. T. Tung, *Mater. Chem. Phys.* **32**, 107 (1992).