

박막 실리콘 태양전지의 광열화현상 연구: 비정질 실리콘 태양전지 및 나노양자점 실리콘 박막 태양전지

김가현[†]

청주대학교 에너지광기술융합학부, 조교수

Study of Light-induced Degradation in Thin Film Silicon Solar Cells: Hydrogenated Amorphous Silicon Solar Cell and Nano-quantum Dot Silicon Thin Film Solar Cell

Ka-Hyun Kim[†]

Division of Energy & Optical Technology Convergence, Cheongju University, Professor

[†]Corresponding author: kahyunkim@cju.ac.kr

Abstract

Light induced degradation is one of the major research challenges of hydrogenated amorphous silicon related thin film silicon solar cells. Amorphous silicon shows creation of metastable defect states, originating from elevated concentration of dangling bonds during light exposure. The metastable defect states work as recombination centers, and mostly affects quality of intrinsic layer in solar cells. In this paper we present results of light induced degradation in thin film silicon solar cells and discussion on physical origin, mechanism and practical solutions of light induced degradation in thin film silicon solar cells. In-situ light-soaking IV measurement techniques are presented. We also present thin film silicon material with silicon nano-quantum dots embedded within amorphous matrix, which shows superior stability during light-soaking. Our results suggest that solar cell using silicon nano-quantum dots in absorber layer shows superior stability under light soaking, compared to the conventional amorphous silicon solar cell.

Keywords: 수소화된 비정질 실리콘(hydrogenated amorphous silicon), 박막 실리콘 태양전지(thin film silicon solar cells), 나노양자점 실리콘 박막 태양전지(nano-quantum dot silicon thin film solar cell), 광열화현상(light-induced degradation)

1. 서론

비정질 실리콘(Hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H)은 박막 실리콘계 태양전지의 광 흡수층 재료로 각광받는 재료이다. 대표적인 이유로는 첫 번째로 결정질 실리콘에



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.39, No.1, pp.1-9, February 2019
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.1.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 17 January 2019

Revised: 28 January 2019

Accepted: 29 January 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

비해 높은 광흡수계수(absorption coefficient)를 가진다는 점에 있으며, 두 번째로는 플라즈마 화학기상증착(PECVD, plasma enhanced chemical vapor deposition) 공정을 통한 저온공정으로 대면적화 및 양산화에 유리하다는 점이다.

상기한 장점에도 불구하고 비정질 실리콘 태양전지 기술은 현재 상용화에 큰 어려움을 겪고 있으며, 주된 요인은 광열화현상(Light-induced degradation) 및 이로 인한 낮은 효율이다. 비정질 실리콘의 광열화현상은 1977년 Staebler와 Wronski에 의해 처음 보고되었기 때문에 Staebler-Wronski effect (SWE)라고 부른다^{1,2)}. 비정질 실리콘의 광열화현상은 기본적으로는 빛 조사에 의한 박막 내 준안정 결함밀도 (metastable defect density)의 증가이며, 이 결함밀도가 재결합 센터의 역할을 하기 때문에 실리콘 박막의 전기적 품질을 열화시킨다³⁾. 가장 널리 알려진 메커니즘은 실리콘-수소결합 전환 모델 (Si-H bond switching model)으로써, 광 조사시 광여기 전하의 재결합에너지에 의해 박막 내 존재하는 Si-H 결합의 상태가 변하여 땀글링 본드 (dangling bond)를 형성한다는 설명이다⁴⁾. 이후 비정질 실리콘 내 수소함량을 저감하여 박막의 안정성을 개선하려는 시도가 있었다. 또한 실리콘 나노결정의 경우 결정립 내 수소함량이 거의 없기 때문에 나노결정질, 또는 미세결정질 실리콘 태양전지를 구현할 경우 광 안정성이 크게 개선되는 보고가 있었다. 하지만 미세결정질 실리콘 태양전지를 구현할 경우 실리콘 박막의 전기적/광학적 물성이 저품질의 결정질 실리콘과 유사한 방향으로 변하여 낮은 개방전압 및 낮은 흡수계수를 가지는 문제점 또한 지적되고 있다⁵⁾.

본 연구에서는 이를 개선하기 위해 박막 내 전기적/광학적 특성을 비정질 실리콘에 가깝게 유지하면서 나노양자점을 함유하는 실리콘 나노양자점 박막 태양전지를 구현하고 비정질 실리콘과의 광 열화현상을 비교하였다. 특히, 기존의 나노결정질(nc-Si:H) 또는 미세결정질($\mu\text{c-Si:H}$) 태양전지와는 차별화된 실리콘 나노양자점 재료를 제작하여 태양전지에 응용하였다. 기존의 나노/미세결정질 태양전지는 사일렌(SiH_4)으로 대표되는 가스 전구체를 플라즈마 등으로 분해하여 기체상의 이온종(ion species) 및 라디칼(radicals)을 기판에 흡착하는 방식으로 증착하는 과정에 수소(H_2) 가스를 첨가하여 수소 가스에 의한 결정성장이 이루어지는 방식으로 성장한다. 본 과정은 필연적으로 비정질 상의 부화층(incubation layer/seed layer)을 수반하며 결정성장이 전구체 희석비(dilution ratio) 및 박막 두께에 동시에 의존한다. 반면에, 본 연구에서 사용된 실리콘 나노양자점 박막은 플라즈마 공정 중 공정변수(특히 압력)를 조절하여 플라즈마 공정조건을 기존의 미세결정질 실리콘 공정과 분말 발생(powder formation) 조건의 경계선에서 유지하여 플라즈마 상에서 실리콘 나노양자점을 발생시키고 이것을 기판에 흡착시키는 방법으로 증착된다. 따라서, 본 연구에서 사용된 실리콘 나노양자점 박막은 미세구조가 박막 두께에 의존하지 않아 바닥층부터 표면까지 균질한 특성을 보이는 재료를 증착할 수 있다^{5),6)}.

본 연구에서는 상기한 방법으로 제작한 실리콘 나노양자점 박막을 이용하여 태양전지를 구현하고 비정질 실리콘과의 광 열화현상을 비교하였다.

2. 실험

본 연구에서는 플라즈마 화학기상증착법을 이용하여 박막 실리콘 재료와 태양전지를 증착하였다. 태양전지는 상부기판(superstrate) 구조로써, 아사히 VU type 불소 도핑된 산화주석($\text{SnO}_2:\text{F}$) 기판을 사용하였다. 소자 구조는 $\text{SnO}_2:\text{F}/\text{p}$ 형 비정질 실리콘 카바이드(a-SiC:H)/실리콘 카바이드 버퍼층/진성 광흡수층/ n 형 비정질 실리콘/알루미늄(Al) 후면전극 순으로 적층되었다. 도핑층의 두께는 p 형의 경우 13 nm, n 형의 경우 15 nm 수준이며 광 흡수층의 두께는 250 nm 수준으로 통제하였다. 실험 중 사용된 비정질 실리콘의 경우 희석되지 않은 순수한 사일렌을 이용하여 증착하였으며 상대적으로 낮은 압력(50 mTorr) 및 낮은 RF 파워밀도($5 \text{ mW}/\text{cm}^2$)에서 증착하였다. 나노양자점 박막의 경우 수소희석비($R=\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{H}_2)$) $R=0.17$ 정도의 가스 유량비를 이용하여 상대적으로 높은 압력(1 Torr) 및 높은 RF파워밀도($45 \text{ mW}/\text{cm}^2$)를 이용하여 증착하였다.

나노양자점 합성 중 플라즈마 임피던스의 변화를 유추하기 위하여 플라즈마 매칭박스의 매칭 캐패시턴스 중 Load 변화를 플라즈마 공정압력에 따라 관찰하였다. 합성된 나노양자점 박막의 단면분석을 위해 JEOL 사의 JEM-2100F 투과전자현미경(TEM, transmission electron microscope)을 이용하였다. 투과전자현미경은 200 kV의 가속전압으로 측정하였으며, 시편 가공을 위해 집속 이온 빔(FIB, focused ion beam)을 이용하여 시편을 가공하였다. 제작된 태양전지의 광 안정성 실험을 위해 Oriel-Apex 사의 제논 아크 램프(Xe arc lamp)를 이용하여 태양전지를 $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 조도의 광량에 노출시키고 태양전지 표면 온도를 섭씨 50°C 수준으로 유지하였다. 태양전지 측정 시에는 표면온도 25°C , 1 sun, AM1.5 스펙트럼 조건에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나노양자점 실리콘 박막 증착

플라즈마 증착공정에는 실험적으로 두 가지의 플라즈마 방전 모드가 존재하는데, 이온 밀도가 낮은 알파-모드(α -mode, α -regime)와 이온 밀도가 높은 감마-모드(γ -mode, γ -regime)가 그것이다. 이 두 가지 방전 모드는 플라즈마 방출광의 밝기와 형태만으로도 구분할 수 있지만, 더 근원적으로는 플라즈마 쉬스(plasma sheath)에서의 이온화 과정과 플라즈마 전류 밀도에서 차이를 가진다.

낮은 전류 방전(Low-current discharge)라고도 불리는 알파-모드는 일반적으로 전류 밀도가 낮으며, 플라즈마가 유지되는 메커니즘은 벌크 이온화(bulk-ionization)에 의존한다. 감마-모드와 비교하여, 알파-모드는 상대적으로 넓은 영역에 플라즈마가 발생하고 쉬스(sheath)가 두터운 것이 특징이다. 이에 반하여, 감마-모드는 전류 밀도가 높고, 전극의 이차전자 방출(secondary electron emission)에 의한 이온화에 의해 플라즈마가 유지된다. 상대적으로 좁은 영역에서 방전이 이루어지며 쉬스가 얇게 형성되는 특징이 있다.

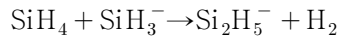
두 가지 방전 모드는 전극으로부터의 이차전자 방출에 의해 쉬스까지 이온화가 이루어짐에 따라 알파-모드에서 감마-모드로 전이(transition)된다. 이와 같이 글로우 방전이 쉬스까지 침투하는 현상을 알파-감마 전이

($\alpha - \gamma$ transition)라고 부르며, 이 전이를 통하여 플라즈마가 급격하게 변화하고 각각의 모드에서 플라즈마의 특성도 급격히 변화한다.

플라즈마 반응기에서 사일렌(SiH_4)를 분해하여 박막 실리콘 증착에 사용하는 경우, 감마-모드의 플라즈마에서는 높은 확률로 이차 반응(secondary reactions)이 발생하게 된다. 이차 반응을 통해 이온화된 프리커서의 응집반응(agglomeration)이 일어나게 되는데, 응집반응을 통해 원자 단위의 사일렌 라디칼은 점차 실리콘 나노양자점으로 성장하게 된다. 응집반응이 유발되는 메커니즘에 대해서는 크게 두 가지 의견이 있는데, 첫 번째 학파는 SiH_4 와 SiH_2 두 종류의 중성 라디칼이 반응하여 다이사일렌(Si_2H_6)을 형성한다고 설명한다. 화학식은 아래와 같다.



두 번째 학파는 SiH_4 과 SiH_3 이온의 반응이 다이사일렌과 H_2 를 배출한다고 설명한다. 그 화학식은 아래와 같다.



플라즈마 상에서 나노양자점이 성장하는 세부적인 메커니즘에 대해서는 두 학파 간의 논의가 아직도 이루어지고 있으나, 높은 압력과 높은 RF파워 등의 조건에서 나노양자점의 성장이 이루어진다는 점에서는 공통점을 가지고 있다.

플라즈마 상에서 나노양자점이 합성되면, 더스티 플라즈마(dusty plasma)라고 불리는, 새로운 플라즈마의 형태로 발전하게 된다. 더스티 플라즈마에 들어있는 입자들은 원자 스케일의 가스 소스보다 훨씬 큰 질량을 가지고 있으며, 플라즈마에 의해서 대전되어 전하를 띠고 있다. 나노양자점의 질량에 따라, 대전되어 있는 전하의 크기와 종류에 따라, 그리고 플라즈마의 전극간 포텐셜의 변화에 따라 대단히 복잡한 거동을 보이며, 각각의 조건에 따라 천차만별의 물성을 가진 박막을 증착할 수 있다.

플라즈마의 베타-모드와 더스티 플라즈마 모두 일반적인 비정질 실리콘 증착조건의 플라즈마에 비해 확연히 다른 물성을 보이는데, 그 중 직관적으로 판별할 수 있는 플라즈마의 물성 중 하나는 플라즈마 임피던스이다. 더스티 플라즈마 상태에서는 플라즈마 상에 존재하는 전자들이 나노양자점에 흡착되어 전자 밀도(electron density)를 감소시키고 또한 하전된 나노양자점들이 스크리닝(screening)효과를 내어 전기적 특성의 변화를 유발하기 때문이다.

플라즈마의 임피던스는 아래와 같이 표현할 수 있다⁷⁾.

$$Z_p = R_p + jL_p\omega$$

이때, R_p 는 플라즈마의 저항, L_p 는 플라즈마의 인덕턴스, 그리고 ω 는 플라즈마의 excitation frequency로서 RF인 경우 $2\pi \times 13.56$ MHz 이다. 특히 저항 R_p 는 전자 충돌 빈도 (electron collision frequency)에 크게 의존하는데, 플라즈마 상의 나노양자점을 고려하면 전자 충돌 빈도는 아래와 같이 표현할 수 있다⁸⁾.

$$\nu_e = N_p \sigma_{e-p} \overline{v_e}$$

여기서 N_p 는 나노양자점의 농도, σ_{e-p} 는 전자-나노양자점간 충돌단면적, $\overline{v_e}$ 는 전자의 평균 열속도(averaged thermal electron velocity)이다. 나노양자점이 생성되면 나노양자점 농도와 충돌단면적이 증가하여 플라즈마 임피던스에 영향을 미치는 것을 알 수 있다^{7,8)}.

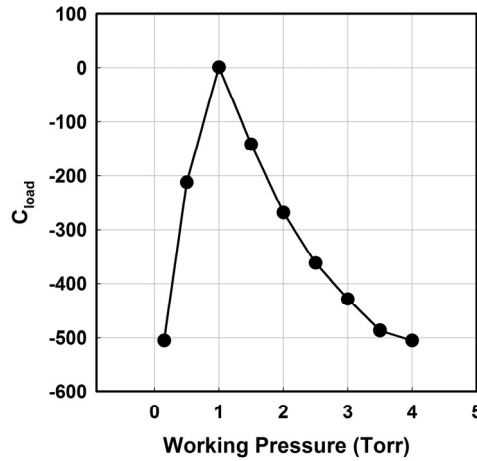


Fig. 1 Change of matching capacitance, C_{load} as a function of working pressure of silicon thin film deposition

플라즈마를 이용한 나노양자점의 합성을 테스트하기 위해 공정압력 변화에 따른 플라즈마 임피던스의 변화를 관찰하였다. 장비 특성상 플라즈마 임피던스를 직접 관찰하는 것이 어렵기 때문에 매치박스(match box)의 매칭 캐패시턴스(matching capacitance) 변화를 관찰하였다. 매치박스는 RF 발생기의 출력단과 플라즈마 음극 사이에 위치하고 있으며, RF 발생기의 출력 임피던스와 플라즈마의 입력 임피던스 미스매칭을 방지하기 위하여 존재한다. RF 발생기의 출력 임피던스는 동일하기 때문에, 매칭 캐패시턴스 값이 변하는 이유는 플라즈마 임피던스가 변하기 때문으로 설명할 수 있다. Fig. 1은 실리콘 박막 증착시 플라즈마의 공정압력에 대한 매칭 캐패시턴스, C_{load} 값의 변화를 보여준다. 압력이 0 Torr에서 1 Torr로 증가할 때 C_{load} 값이 급격히 변화하는 것을 알 수 있고, 1 Torr 이상으로 압력을 증가시키면 C_{load} 값이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 0 Torr에서 1 Torr로 압력이 증가할 때 C_{load} 값이 급격히 변화하는 것은 플라즈마상에서 나노양자점이 형성되기 때문인 것으로 생각된다. 나노양자점이 형성되면, 플라즈마 상의 나노양자점 농도 (N_p)와 전자-나노양자점간 충돌단면적 (σ_{e-p})

이 급격히 증가하여 전자 충돌 빈도와 플라즈마의 저항 R_p 가 증가하게 된다. 1 Torr 이상으로 압력을 증가시키면 C_{load} 값이 서서히 감소하는데, 그 이유는 다음의 세 가지 메커니즘으로 설명할 수 있다. 첫 번째로는 압력이 증가하면서 나노양자점들이 서로 응집작용을 하여 점점 더 큰 나노양자점으로 성장하게 되는데, 이렇게 되면 나노양자점들의 농도 (N_p)가 감소하면서 플라즈마의 저항 R_p 이 감소한다. 반면, 나노양자점의 크기가 커짐으로써 나노양자점에 대전된 전하량이 증가하게 되는데, 이는 전자-나노양자점간 충돌단면적 (σ_{e-p})이 증가하는 원인이 된다. 나노양자점 농도의 감소와 충돌단면적의 증가가 서로 상충하며 서서히 임피던스의 감소를 초래하는 동안, 나노양자점의 크기가 일정 이상이 되어 질량이 증가하면 플라즈마 반응기 내부의 가스 흐름에 따라 배출될 확률이 증가하게 된다. 이에 따라 나노양자점의 농도는 더욱 감소하여 압력이 1 Torr 이상에서 증가할수록 임피던스가 감소하는 것으로 생각된다. Fig. 2는 증착된 나노양자점 박막의 투과전자현미경 단면도를 나타내며, Fig. 3은 본 물질을 이용하여 제작된 태양전지의 초기 IV곡선을 나타낸다.

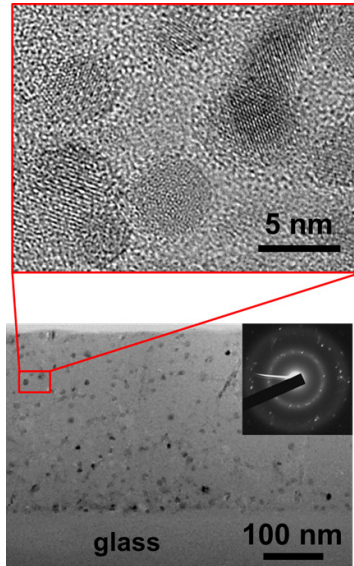


Fig. 2 TEM crosssection of silicon nanocrystalline quantum dot thin film. The image is also found in the ref. [6]

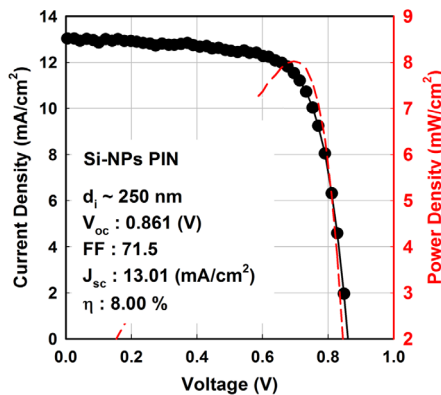


Fig. 3 Initial IV characteristics of thin film solar cells using silicon nanocrystalline quantum dot thin film

3.2 박막 실리콘 태양전지의 광열화현상

Fig. 4는 표준 비정질 실리콘 태양전지와 실리콘 나노양자점 태양전지의 열화 특성 변화를 보여준다. 각 태양 전지의 두께는 250 nm이며, 실리콘 나노양자점 태양전지의 경우 광 흡수층이 세 가지 다른 가스유량비 (H_2/SiH_4)를 이용하여 증착되었고 범례에 구분되어있다. 나노양자점 광 흡수층은 상기한 바와 같이 일정 이상 성장된 나노양자점이 공정가스 유량에 따라 배출되며 물성변화를 보이는데, 본 연구에 사용된 세 가지의 다른 가스유량비는 0.17 정도의 가스희석비(R)을 유지하며 가스 체류시간을 다르게 하여 서로 다른 양자점의 물성을 보이는 박막을 제작하기 위해 설정하였다. 제작된 세 종의 나노양자점 박막은 수소함량 및 미세구조에서 차이를 보인다.

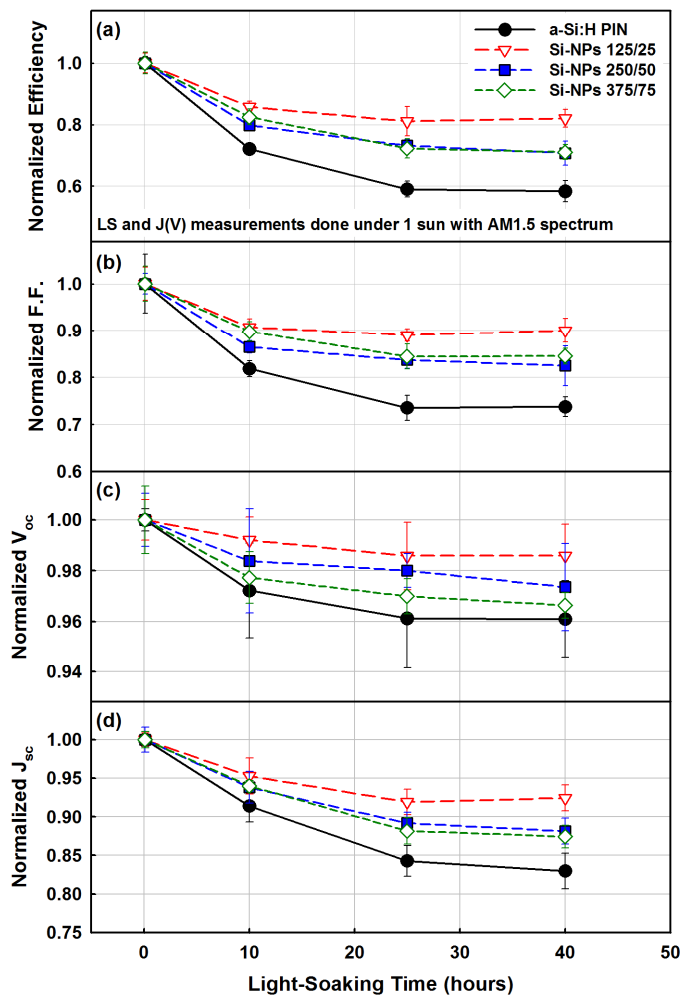


Fig. 4 Light-induced degradation results of various thin film silicon solar cells

우선 실리콘 나노양자점 태양전지의 경우 표준 비정질 실리콘 태양전지에 비해 빠르게 열화하여 안정화되고, 초기치 대비 안정화율도 높은 것을 관찰할 수 있다. 나노양자점 태양전지는 40시간 동안 빛 조사 후 열화율 약 17%로 양호한 특성을 보이는 반면, 표준 비정질 실리콘의 경우 40%가 넘는 열화특성을 나타내었다.

본 실험결과에서 관찰되는 나노양자점 태양전지의 광열화 현상은 비정질 실리콘에 비해 안정하며 이완된 것으로 나타나는데, 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 첫째, 비정질 반도체에 나노양자점이 분포하게 되면 태양전지 내 재결합이 나노양자점 표면에서 일어난다⁹⁾. 박막 실리콘 태양전지의 재결합은 실리콘-수소결합을 변화시켜 땀글링 본드를 발생하게 하여 열화현상의 직접적인 원인이 되는 것으로, 재결합의 발생을 나노양자점 표면으로 유도하게 되면 비정질 상에서의 재결합이 상대적으로 저감된다고 설명할 수 있다. 또한, 실리콘 나노결정 내부에는 비정질 상에 비해 실리콘-수소결합의 농도가 현저히 낮기 때문에 광열화현상 자체가 억제되어 일어나게 된다.

하지만 세계적 선도기관(EPFL, AIST등)의 연구결과와 비교할 때, 나노결정질 실리콘 태양전지의 열화현상은 10% 이내로 억제 가능하지만 본 연구결과와 광열화현상은 17% 정도로 세계적 수준에는 미치지 못한다. 그 이유는 본 연구결과에 사용된 태양전지의 구조상 상부기판형이기 때문인 것으로 판단된다. 나노양자점 실리콘 태양전지의 구조로 상부기판형을 채택한 경우 광 흡수층의 결함밀도 증가로 인한 광열화현상(SWE)외에도, 추가적으로 박막 소자 자체의 박리로 인한 열화현상이 발생하게 된다¹⁰⁾. 이를 극복하기 위해 하부기판형(substrate) 구조의 태양전지를 사용하게 되면 소자박리로 인한 열화현상을 저감할 수 있다고 알려져 있으며,¹¹⁾ 추후 본 연구에 사용된 태양전지에서도 태양전지 소자구조 개선을 통해 추가적인 안정화 효율의 개선이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 플라즈마를 통해 합성한 실리콘 나노양자점 박막과 나노양자점 박막 태양전지를 제작하였다. 박막과 태양전지의 특성분석, 효율 개선을 위해 플라즈마 임피던스 분석, TEM단면분석 및 광열화실험 등을 수행하였다. 플라즈마 임피던스의 변화 및 TEM단면분석을 통해 플라즈마 상에서 실리콘 나노양자점이 합성되는 것을 확인하였으며, 실리콘 나노양자점과 표준 비정질 실리콘 태양전지의 광열화 현상 테스트를 통하여 실리콘 나노양자점 태양전지의 광 안정성이 표준 비정질 실리콘 태양전지보다 우수한 것을 확인하였다. 향후 소자구조 개선 등을 통해 개선된 박막 실리콘 태양전지를 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

후기

이 논문은 2018-2019학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

REFERENCES

1. Staebler, D. L. and Wronski, C. R., Reversible Conductivity Changes in Discharge-produced Amorphous Si, Applied Physics Letters, Vol. 31, p. 292, 1977.

2. Staebler, D. L. and Wronski, C. R., Optically Induced Conductivity Changes in Discharge-produced Hydrogenated Amorphous Silicon, 3. *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, p. 3262, 1980.
3. Fritzsche, H., Development in Understanding and Controlling the Staebler-Wronski Effect in a-Si:H, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 31, p. 47, 2001.
4. Stutzmann, M., Jackson, W., and Tsai, C., Light-induced Metastable Defects in Hydrogenated Amorphous Silicon: A Systematic Study, *Physical Review B*, Vol. 32, p. 23, 1985.
5. Kim, K. H., Johnson, E. V., Abramov, A., and Roca i Cabarrocas, P., Light Induced Electrical and Macroscopic Changes in Hydrogenated Polymorphous Silicon Solar Cells, *EPJ Photovoltaics*, Vol. 3, p. 30301, 2012.
6. Kim, K. H., Johnson, E. V., Kazanskii, A. G., Khenkin, M. V., and Roca i Cabarrocas, P., Unravelling a Simple Method for the Low Temperature Synthesis of Silicon Nanocrystals and Monolithic Nanocrystalline Thin Films, *Scientific Reports*, Vol. 7, p. 40553, 2017.
7. Dutta, J., Hofmann, H., Houriet, R., Hofmeister, H., and Hollenstein, Ch., Growth, Microstructure and Sintering Behavior of Nanosized Silicon Powders, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 127, p. 263, 1997.
8. Andujar, J. L., Bertran, E., Canillas, A., Roch, C., and Morenza, J. L., Influence of Pressure and Radio Frequency Power on Deposition Rate and Structural Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Films Prepared by Plasma Deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 9, p. 2216, 1991.
9. Kiriluk, K. G., Fields, J. D., Simonds, B. J., Pai, Y. P., Miller, P. L., Su, T., Yan, B., Yang, J., Guha, S., Madan, A., Shaheen, S. E., Taylor, P. C., and Collins, R. T., Highly Efficient Charge Transfer in Nanocrystalline Si:H Solar Cells, *Applied Physics Letters*, Vol. 102, p. 133101, 2013.
10. Kim, K. H., Johnson, E. V., and Roca i Cabarrocas, P., Current-induced and Light-induced Macroscopic Changes in Thin Film Solar Cells: Device Degradation Mechanism, *Solar Energy*, Vol. 143, p. 86, 2017.
11. Kim, K. H., Kasouit, S., Johnson, E. V., and Roca i Cabarrocas, P. Substrate Versus Superstrate Configuration for Stable Thin Film Silicon Solar Cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 119, p. 124, 2013.