박막태양전지의 광포획 기술 현황

박형식[1] · 신명훈[2] · 안시현[1] · 김선보[3] · 봉성재[1] · Anh Le Tuan[1] · S. Q. Hussain[3] · 이준신[1,3]*

[1]성균관대학교 정보통신대학, 전기전자컴퓨터공학과, 수원시, 440-746
[2]한국 항공대학교, 항공전자 및 정보통신공학부, 고양시, 412-791
[3]성균관대학교 에너지학과, 수원시, 440-746

Current Status in Light Trapping Technique for Thin Film Silicon Solar Cells

Hyeongsik Park[1] · Myunghoon Shin[2] · Shihyun Ahn[1] · Sunbo Kim[3] · Sungjae Bong[1] · Anh Le Tuan[1] · S. Q. Hussain[3] · Junsin Yi[1,3]*

[1]College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea
[2]School of Electronics, Telecommunications and Computer Engineering, Korea Aerospace University, Goyang, 412-791, Korea
[3] Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

ABSTRACT: Light trapping techniques can change the propagation direction of incident light and keep the light longer in the absorption layers of solar cells to enhance the power conversion efficiency. In thin film silicon (Si) solar cells, the thickness of absorption layer is generally not enough to absorb entire available photons because of short carrier life time, and light induced degradation effect, which can be compensated by the light trapping techniques. These techniques have been adopted as textured transparent conduction oxide (TCO) layers randomly or periodically textured, intermediate reflection layers of tandem and triple junction, and glass substrates etched by various patterning methods. We reviewed the light trapping techniques for thin film Si solar cells and mainly focused on the commercially available techniques applicable to textured TCO on patterned glass substrates. We described the characterization methods representing the light trapping effects, texturing of TCO and showed the results of multi-scale textured TCO on etched glass substrates. These methods can be used tandem and triple thin film Si solar cells to enhance photo-current and power conversion efficiency of long term stability.

Key words: Light trapping technique, Transparent conducting oxide, Multi-scale texturing, Silicon thin film solar cell, Multi-junction solar cell

1. 서 론

태양전지 기술은, 인류에게 필수적인 전기에너지를 환경에 무해한 방법으로 태양에서부터 직접 발생시킬 수 있다. 태양광 발전산업은 지구온난화와 환경오염에 심각한 위협을 받고 있는 지금, 무한 청정 발전기술로서 신재생에너지 산업 중에서, 최근 가장 빠르게 성장하고 있다[1]. 태양광발전 시스템은 보급량이 늘수록 제조원가가 낮아지는 독특한 특성으로, 지난 십년간 일부 국가에서는 화석연료와 경쟁 가능한 수준(피크타임 기준)까지 내려왔다. 하지만, 태양광발전이 본격적으로 기존의 화석연료를 대체하기 위해서는, 시스템 단가를 보다 낮춰야 할 필요가 있다. 태양광 발전 시스템의 원가 구성요소 중 태양전지 모듈은 비교적 큰 부분을 차지하고 있으며, 특히 전체 태양전지 시장에서 70% 이상을 차지하는 결정질 실리콘의 기판 제조부터 모듈생산에 이르는 등의 제조원가를 낮추는 것은 향후 태양전지 산업의 확대에 매우 중요하다[2]. 결정질 기반의 높은 가격의 실리콘 기판을 대신하는, 수백 나노미터에서 수 마이크로 미터의 얇은 활성층을 갖는 박막형 태양전지는 대면적 유리 기판위에 원재료 가스에서 모듈제조까지 일괄 제조가 가능하고, 국내 반도체나 디스플레이 산업과 유사한 제조 공정과 전방위 산업구조를 가지고 있어, 가까운 미래에 태양전지 및 시스템 가격을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다. 대표적인 박막형 태양전지 기술로, CdTe, Thin film silicon(실리콘 박막), CIGS (CuInGaSeS), DSSC(Dye-sensitized solar cell, 염료감응형), Ogranic(유기박막) 태양전지 등이 있다. 이들 박막 태양전지 기술들은 서로 다른 장점을 가지고 각각 서로 독립적으로 경쟁하며 발전해 오고 있다[1, 3-6].

실리콘(Si) 박막 태양전지는, 지구상에 원소가 풍부해 재료비 원가가 낮고, 전자산업 외에도 건축, 의료산업 등에 널리 사용될 만큼 환경에 안전한 실리콘 물질을 주원료로 사용한다. 또한 지

*Corresponding author: yi@skku.ac.kr
Received June 12, 2014; Revised June 12, 2014; Accepted June 12, 2014

ⓒ 2014 by Korea Photovoltaic Society
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

난 수세기 동안 반도체 및 디스플레이 기술을 통해 기본 특성과 제조공정 등이 잘 개발된 기술적, 산업적으로 인프라가 잘 갖춰져 있다. 특히 비정질실리콘(amorphous Si, a-Si), 미결정 실리콘(microcrystal Si), 그리고 게르마늄실리콘 화합물(amorpous, microcrystal SiGe) 등 활성층의 선택성이 높아서 단일박막 외에도 다층 박막 태양전지(tandem, triple, multiple solar cell)의 제조가 가능해, 기술적으로도 발전 가능성이 높다. 또한 비정질 실리콘의 경우 결정형 실리콘에 비해 높은 광흡수율을 갖는 특성 때문에 낮은 활성층 두께로도 높은 발전효율을 얻기 때문에 박막형 태양전지에 매우 적합한 물질 중의 하나이다.

그러나 비정질 혹은 미정질 실리콘은, 빛을 흡수해서 발생한 반송자(electron, or hole carriers)들의 수명이 적게는 결정형 실리콘의 1/100에 불과하여, 불가피하게 반송자들의 이동경로 즉 활성층의 두께를 얇게 해야만 한다. 이러한 특성은 박막형 태양전지가 갖는 일반적인 단점이 되어 왔다. 얇은 활성층 두께 때문에, 재료 자체의 흡수율이 높음에도 불구하고, 결과적으로는, 입사된 태양광을 흡수되는데 필요한 두께보다 충분치 않아서, 결정형 실리콘 태양전지에 비해 변환효율이 상대적으로 낮다. 특히 활성층 재료의 광학적인 밴드갭 에너지(E_g) 근처의 장파장에서는 흡수율 또한 매우 낮아져서 상당량의 빛이 흡수되지 못하기 때문에 투과하는 손실로 작용한다. 이러한 투과손실을 줄이고자 입사광의 이동경로를 인위적으로 늘려 광을 효과적으로 포획하는 방법이 오랫동안 연구되어져 왔다. Yablonovitch는 활성층의 굴절율(refractive index) 값이 n인 경우, 광포획 기술을 통해 흡수율을 $4n^2$ 까지 올릴 수 있다는 점을 이론적으로 보여주었다[7]. 이러한 광포획 기술로 인해, 활성층의 물리적 두께를 유지하면서 광학적 두께는 증가시키는 효과를 갖는다. 또한 비정질 혹은 미정질 박막 실리콘 태양전지는 장시간 태양광에 노출이 되면, 생성된 전자와 정공이 활성층 내부 결함에 포집되어 활성층 내부 전계를 약화시켜, 반송자의 전송(transportation)을 방해함으로써, 재결합 손실을 증가시킨다. 활성층의 두께가 얇아지면, 내부전계가 강화되어 이와 같이 빛에 의해 반송자의 수명이 줄어드는 효과, 즉 광열화효과(LID, Light-induced degradation)를 완화시킬 수 있다. 광포획 기술은 비정질, 혹은 미정질 실리콘 박막 태양전지의 장기 안정화 효율을 개선시키는데 매우 중요하다[8].

광포획 기술은 태양전지의 표면을 변형시키거나, 흡수층 내부 혹은 태양전지의 빛이 입사하는 부분에 광학적인 구조물을 형성하여, 태양전지 표면에서 빛의 반사율을 낮추고, 태양전지 내부에서빛의 전반사를 유도하여, 태양전지가 입사광을 최대한 흡수할 수 있도록 한다. 가장 일반적인 방식은, 표면에 텍스쳐링 구조(혹은 피라미드 구조)를 형성 하거나, 주기적인 광학 구조를 형성하는 방법, 그리고 태양전지 전면에 반사방지막 코팅(AR, Anti-reflection coating), 후면에 고반사 코팅(HR, High-reflection coating)을 하는 방법들이 있다[9-12]. 최근 들어서 광결정구조(photonic crystal), 금속입자(metal particle) 의 플라즈모닉 구조(plasmonic structure)를 이용하는 시도들이 이어지고 있다. 그러나 낮은 제조원가가 중요한 태양전지 산업에서는 주로, 손쉽게 태양전지 표면에 텍스쳐링 구조(혹은 피라미드구조)를 형성하는 방법을 선호하고 있다[13, 14].

본 논문에서는 실리콘 박막형 태양전지에 주로 사용되고 있는 광포획 기술, 특히 산업적으로 의미가 있는 투명전도막을 이용한 기술에 대해 조사하고, 이를 평가할 수 있는 방법, 그리고 광포획 구조가 적용된 실리콘 박막 태양전지의 제조상 유의점들에 대해서 검토해 보기로 한다. 마지막으로, 광포획 기술과 관련된 본 연구실의 실험 결과에 대해 소개하고, 앞으로 나아갈 방향 등에 대해 기술하고자 한다.

2. 박막 실리콘 태양전지의 투명전도막 기판을 이용한 광포획 기술

2.1 전면 투명 전도 산화막 텍스쳐링(Front Transparent Conductive Oxide Texturing)

실리콘 박막 태양전지의 가장 널리 사용되는 광포획 기술은 결정형 실리콘 웨이퍼의 피라미드 표면 구조처럼 기판 표면부터 광경로를 증가시키는 방법이다. 이러한 목적으로 기판 표면의 거칠기를 증가시켜 효과적으로 광을 산란시킬 수 있다. 또한 기판의 거친 표면은 입사광의 반사를 감소시켜 활성층으로의 광흡수를 돕는다. 이렇게 제작된 기판은 태양전지의 전류밀도 향상에 기여하며, 일반적인 박막 태양전지에서 널리 이용되고 있다.

기판의 표면처리를 통해 광포획 기술을 평가 방법으로, 먼저 AFM(Atomic Force Measurement)을 통해 표면의 거칠기를 정량적으로 평가한다. 일반적으로 입사광 파장의 크기의 1/4정도 되는 크기 이상의 구조물에서 입사광의 산란이 효과적으로 나타난다. 형성된 표면구조물에 의한 광학적 특성은 일반적으로 빛의 산란정도를 나타내는 안개율(Haze ratio) 값을 가지고 정량적으로 표현 한다. 투과 안개율(H_T, Haze Transmittance)과 반사 안개율에 대한 정량적 표현은 식(1,2)와 같다.

$$H_T = \frac{T_D}{T_T} \times 100 \quad (1)$$

$$H_R = \frac{R_D}{R_T} \times 100 \quad (2)$$

투과 안개율은 총 투과도에 대한 산란 투과도의 비를 나타낸 것으로 실제 측정은 Fig. 1과 같은 방법으로 나타낸다. 먼저 적분

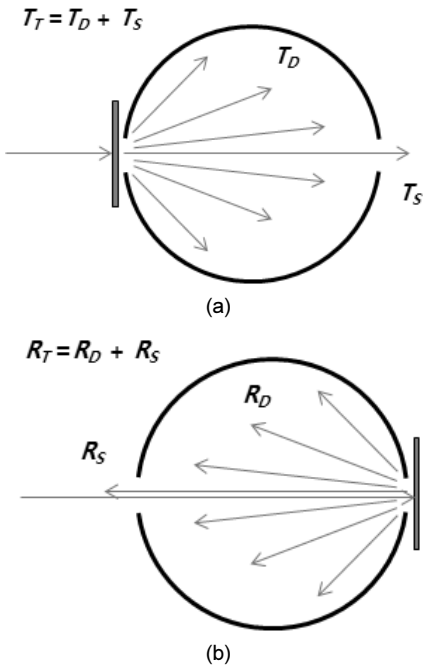


Fig. 1. (a)투과 안개율과 (b)반사 안개율 측정방법

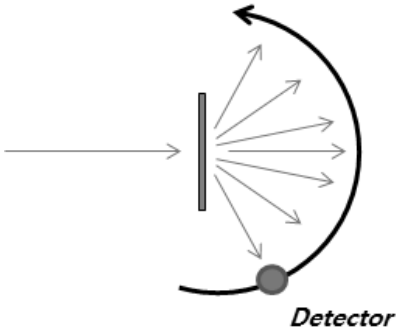


Fig. 2. 산란광의 방사패턴 측정방법

구 시스템에서 샘플을 투과한 총 투과율(T_T)을 측정하고, 투과 성분중 직진성분(T_S)을 제외한 산란 투과율(T_D)을 측정한다. 비슷한 방법으로 반사 안개율(H_R)은 총 반사율(RT)을 먼저 측정하고 반사 성분 중에서 직진성분(R_S)을 제외한 산란 반사율(R_D)을 측정한다. 구해진 값들의 각각의 비가 바로 투과 및 반사 안개율을 나타낸다.

입사광의 산란정도를 평가하는 또 다른 방법으로 산란구조물에 의해 발생하는 광의 산란 각도를 측정하기도 하며, 이는 Fig. 2에서와 같이 방사 패턴 측정장치를 사용하여 측정한다[15]. Fig. 2와 같은 장치는 레이저 혹은 OLED에서도 광원의 산란정도를 측정하는 방법과 동일하다. 샘플을 중심에 두고, 외부의 입사광이 박막형 샘플에 투과하면서 발생하는 산란정도를 측정하는데, 광을 측정하는 디텍터가 회전하면서 샘플에서 방사되는 빛의 각도에 따를 분포를 측정하게 된다. 일반적으로 원에 가까운 방사 패턴을 가장 이상적인 산란구조라고 보고 있다.

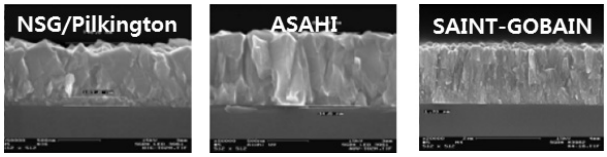


Fig. 3. 대표적인 투명전도막 제조회사 별 기판 (a) FTO, (b) FTO (VU-type), (c) BZO

기판표면에 빛을 산란할 수 있는 구조를 만들기 위해 산업계에서는 주로 전면 투명전도막(Front transparent conducting oxide, Front-TCO)에 무작위 텍스쳐링 구조(random texturing structure)를 형성해서 사용하고 있다. 즉 유리기판상에 투명전도층이 빛을 산란하는 역할을 하게 된다. 이러한 역할을 하는 투명전도층은 박막태양전지에서 발생한 전류를 이송하면서 입사된 빛을 손실 없이 산란해야 한다. 따라서 투명전도막은 높은 전도성, 높은 투과도, 높은 산란율(혹은 투과 안개율)의 특성을 가지고 있어야 한다. 전도성과 빛의 투과도가 높은 재료로 흔히 사용되고 재료에 주석산화물(SnO_2)과 아연산화물(ZnO)이 있다. 높은 전도도를 가지려면 투명산화막의 두께가 두껍고, 전도성 도핑량이 많아야 한다. 그러나 그렇게 되는 경우, 투명산화막의 흡수에 의해 빛의 투과율이 떨어지고, 도핑이 많은 경우 900nm 이상의 장파장에서 자유 전자에 의한 흡수율이 급격하게 커져 다층박막 태양전지에는 적합하지 않아, 태양전지의 전류량에 적합한 두께와 도핑량이 사용되어야 한다.

전면 투명전도막에 무작위 텍스쳐링 구조가 형성된 기판을 만드는 방법으로는 화학기상증착법(CVD)이 있다. 일본판유리(NSG, Nippon Sheet Glass), 아사히 글라스(Asahi Glass), 상고방(SAINT-GOBAIN)와 같은 업체에서는 고온의 판유리 제작 공정 중에 글래스에 남아있는 잠열을 이용, 상압에서 화학적 기상방법(APCVD)으로 플루오린이 도핑된 주석산화물(SnO_2:F) 투명전도막을 형성한다[16-18]. 이때 박막성장 동안 주석산화물 결정이 무작위로 형성이 되는 특성 때문에 비교적 거친 텍스쳐링 박막을 형성하게 된다. 아연산화물의 경우에도 이와 유사하게, 비교적 낮은 진공상태에서 170도의 저온에서 화학적 기상방법(LPCVD)의 방법으로도 형성된다. 주석산화물과 아연산화물 투명전도막은 대부분의 태양전지 관련 연구그룹들이 가장 많이 활용하고 있으며, 전기적(Sheet resistance: 10 Ω/sq)특성과, 광학적 특성($T_{400\sim800nm}$: 82%)이 우수하고, 판유리 제작 공정 중에 성막을 할 수 있어, 제조 공정도 낮출 수 있다. Fig. 3은 앞서 이야기한 대표적인 투명전도막 유리기판 제조업체의 제품 단면사진이다.

무작위 텍스쳐링 구조를 형성하는 또 다른 방법으로 연구실 수준에서는 아연산화막을 스퍼터링으로 성막하고 이를 염산계열에 표면을 식각해서 만드는 방법들이 이용되고 있다. 이 경우,

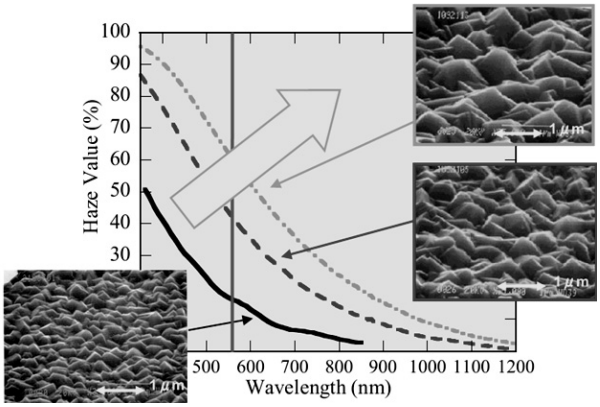


Fig. 4. 랜덤 피라미드 Grain 크기에 따른 안개율 변화(A. Takahashi, Asahi Glass Co. Ltd)

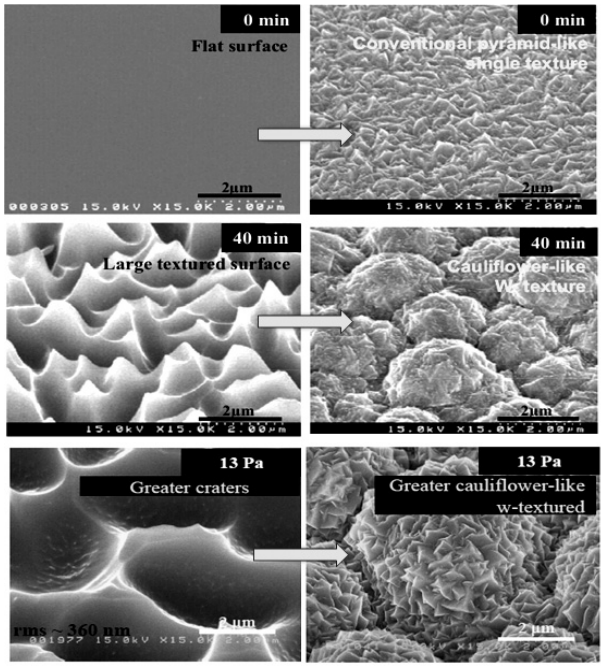


Fig. 5. 건식 식각을 이용한 유리 기판 거칠기 변화 및 투명전도막 증착 형상(M. Konagai Group,Tokyo Tech Institute)

식각 방법에 따라 다양한 크기의 표면구조로 조절할 수 있어 특정파장에 적합한 산란구조를 형성하는데 적합하며. 특히 스퍼터링 공정이 재료사용량이 높고 대면적 기판에 성막하는 공정이 저렴하여, 일부 태양전지 제조업체들도 태양전지 모듈의 원가를 낮추고자, 전면 투명전도막을 이러한 방식으로 직접 제작하기도 한다.

이러한 방식으로 제작된 텍스쳐링 구조의 전도성 산화막의 안개율은 Fig. 4에서처럼 태양광 파장이 증가할수록 급격히 감소하는 한계를 가지고 있다. 장파장에서의 투과 안개율을 높이기 위해서는 투명산화막의 텍스쳐링 구조의 크기를 키워야 하고 이는 성막공정의 특성상 전체 산화막 두께를 키워야 하기 때문에 전체적인 투과율 감소를 가져온다. 특히, 장파장으로 갈수록 활성층의 흡수율이 떨어지기 때문에 장파장 영역까지 이용

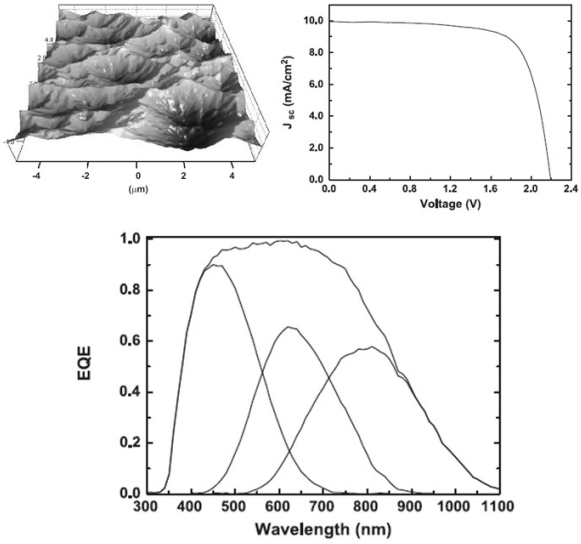


Fig. 6. 투명전도막을 이용한 최적화된 광 포획 표면 구조 및 삼중접합 실리콘 박막 태양전지 L-I-V 결과, 분광반응 특성 (LG Electronics)

해야하는 다층박막 태양전지에는 전도성 산화막의 단순 텍스쳐링 구조만으로는 투과 안개율이 부족하다.

광학적・전기적 특성을 동시에 만족하기 위해서는 유리 기판 자체의 표면 텍스쳐링 구조를 만들고 그 위에 또 다른 구조의 텍스쳐링된 투명전도막을 성막함으로써 기존보다 높은 안개율 확보와 전기적 특성을 동시에 확보하는 연구들이 진행되어 왔다. 아사히 글래스에서는 텍스쳐링 구조가 2중구조인 W-texture type 투명전도막 기판을 제작하였다. 일본 동경공대의 M. Konagai 연구팀은 건식 방식을 이용해 수 마이크로 크기로 표면 거칠기를 만든 다음, MOCVD를 이용해 BZO를 증착하여 기존의 단일 피라미드형의 텍스쳐 구조에서 Cauliflower형의 이중 텍스쳐 구조(Fig. 5)를 만들어 800nm 파장 길이에서 안개율 90% 이상의 우수한 결과를 얻었으며, 비정질/마이크로 탠덤형 실리콘 태양전지 적용을 통해 전류 개선 효과가 발생되어 13.3%의 고효율을 얻었다. 또한 유리 기판을 종류별로 적용하였을 때, EAGLE-XG 유리 기판으로 태양전지 적용한 것이 11%의 고효율을 보고한 바가 있다[19].

2.2 중간반사층(Intermediate reflection layer)

복층(Tandem)혹은 3중(Triple)구조와 같은 다층 박막 태양전지에서는 상부전지(top cell)와 하부전지(bottom cell)사이에 중간반사층을 집적하여 상부층의 비정질 실리콘의 흡수율을 높이는 기술들이 사용되고 있다. 중간반사층이 사용된 복층 태양전지에서는 상부 활성층의 두께를 30% 이상 줄일 수 있어, 상부층 제조에 생산성을 높일 뿐만 아니라, 상부 비정질 실리콘셀의 광열화특성이 10% 미만으로 줄어, 태양전지 모듈의 광안정화 효율을 개선시켜 준다. 일본의 KANEKA 그룹에서 중간반사층

을 적용한 태양전지 모듈을 양산한 것을 시초로 복층 태양전지를 제조하는 대부분의 업체에서 이를 적용하려고 하고 있다[20]. 국내 연구그룹에서도, 광 포획 구조인 랜덤 텍스쳐 구조인 습식식각 방법을 이용해 crater 크기 조절과 삼중접합 태양전지를 이용해서 최고 변환 효율인 16%를 달성하였다[21]. 하지만, 태양전지 초기 효율뿐만 아니라 안정화 또한 중요한 요소로 태양전지 효용성과 관련이 있다. 안정화 효율 확인은 NREL 기관을 통해 확인하였고, 이 때 안정화 최고 효율인 13.4%를 확보하였다.

중간반사막 물질로는 스퍼터링을 이용한 아연산화물 혹은 CVD를 이용한 실리콘산화물이 사용되고 있다. 아연산화물은 전기 전도도가 높고, 광흡수 손실율이 낮은 반면에 상부층을 성막시키는 CVD 공정 중에 CVD 시스템 바깥에서, 스퍼터링을 이용, 성막해야만 한다. 또한 높은 전도율 때문에, 일반 비정질 실리콘 단일박막 태양전지 양산에 사용되는 3회 레이저 패터닝이 아닌 4회 레이저 패터닝 공정이 사용되어야 하고, 그에 따른 비발전부분 면적 손실을 피할 수 없다. 반면 실리콘산화물을 이용하는 경우 CVD 내부에서 상부층, 중간반사막, 하부층을 연속해서 성장시킬 수 있고, 일반 비정질 단일박막 태양전지에서와 같은 3회 레이저 패터닝을 이용할 수 있다. 이러한 이유로 많은 업체들이 실리콘 계열의 중간반사막 기술을 확보하고자 노력하고 있다.

2.3 주기적인 텍스쳐링 구조(Periodic texturing structure)

일정한 패턴의 균일한 구조의 표면 텍스쳐링구조에 대한 연구도 진행되어 왔다. 주기적인 구조를 갖는 경우 특정 파장대에서는 Yablonovitch가 추정한 값 이상으로 유효흡수율 향상이 이뤄질 수 있다고 보고되고 있다. 그러나, 부가적인 패터닝 공정이

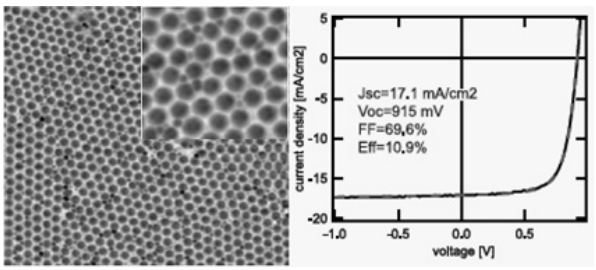


Fig. 7. Periodic pattern 형상에 의한 표면 구조 및 실리콘 박막 태양전지 적용 결과(C. Ballif Group, EPFL)

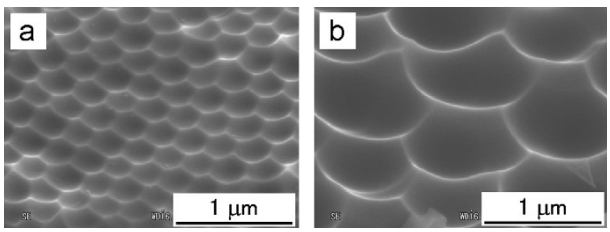


Fig. 8. Aluminium Anodic oxidation(AAO)를 이용한 Honeycomb 형상의 표면 구조(M. Kondo Group, AIST)

필요하다는 점과, 무작위 텍스쳐링에 비해서 전파장대역에서 균일하고 높은 유효흡수율 향상을 이루기 위해선 주기성이 변형된 복잡한 광학적 설계가 필요하다는 점에서 아직 양산에 적용되고 있지 못하다. 대표적인 EPFL 그룹에서 개발하여 비정질 단일 접합 태양전지에서 10.9%의 높은 효율을 얻었는데, 기존 reference cell과 비교해서 약 5 mA/cm^{2}의 전류밀도 개선효과를 확인하였다[22].

주기적인 구조물은 특히 후면 반사전극에서 분산되먹임반사체(DBR, Distributed back reflector)에 적용한 연구들이 보고되고 있다. 또한 주기적인 구조물은, 후면 반사체에 주기적인 구조물을 먼저 형성하고 그 위에 활성층을 거꾸로 성막하는, substrate-type 혹은 n-i-p 구조에 주로 적용되어 보고되었다. 일본 AIST의 M. Kondo 그룹의 벌집구조(honeycomb pattern) 기반의 n-i-p μc-Si:H를 이용한 연구에서 Asahi-U glass와 비교하였을 때, 전류밀도가 1.1 mA/cm^2 개선과 변환 효율 10.6%를 확보하였다[10]. 이는 벌집구조물이 근적외선(Near infrared)영역에서는 전면 텍스처에 의한 광 포획 개선효과와 가시광영역은 텍스처 표면의 전반사 감소 효과를 함께 이용할 수 있는 장점이 있다.

2.4 다중 텍스쳐링 구조(mutiple texturing structure)

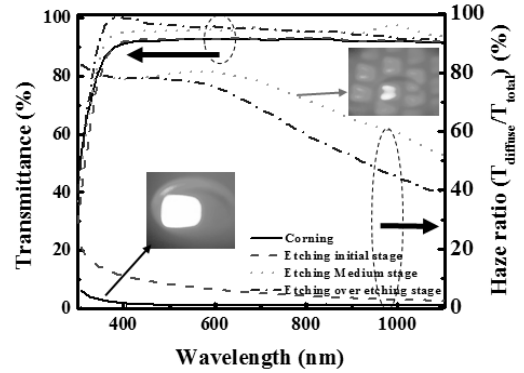
일반적인 단일구조의 텍스쳐링은 제조공정이 저렴한 장점이 있으나, 입사광의 파장이 증가할수록 감소하는 특징을 지니는 단점을 가지고 있다. 특히 600nm 이상의 파장에서 투과 안개율은 10% 이하가 되며 900nm 이상에서는 효과적인 빛의 산란이 거의 일어나지 않게 된다. 단일구조의 텍스쳐링에서 장파장영역까지 투과 안개율을 높이려면 표면 거칠기의 크기가 매우 커져야 하고, 이 경우 투명전도막의 광학적 손실 뿐만 아니라 그 위에 활성층을 성장시킬 때 전류 누설(shunt)이 발생할 가능성이 많아진다.

다중 텍스쳐링은 글래스 기판 표면과 투명전도막 표면, 혹은 고 투과 코팅 유기재 표면과 투명전도막 표면에 각각 크기가 서로 다른 텍스쳐 구조물을 형성하여 단파장과 장파장 영역에서 고른 투과 안개율을 높이고 있다. 특히 활성층을 성장 표면에서의 거칠기를 조절하여 전류 누설발생을 줄일 수 있다. 이와 같은 방법을 위해 글래스 기판을 먼저 에칭하고 그 위에 투명전도막을 형성하거나 글래스 기판 위에 글래스와 유사한 굴절율을 갖는 투명 폴리머재료를 인쇄기법(Imprinting)을 사용해서 텍스쳐링을 형성하고, 그 위에 다시 무작위 투명 전도막 텍스쳐링을 형성한다. 인쇄기법을 사용, 후면셀의 흡수층 두께를 낮추면서 상부셀과 전류 정합이 가능한 수준의 향상된 전류량을 얻을 수 있다.

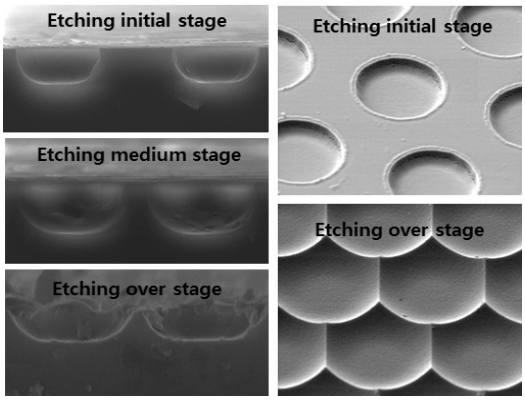
3. 주기적인 벌집구조의 유리기판 텍스쳐링을 이용한 다중 텍스쳐링 연구

3.1 유리기판 패터닝을 통한 다중 텍스쳐링

본 연구실에서는 기존에 조사한 광 포획 기술경향 조사를 기반으로 광 포획이 용이한 구조인 Honeycomb 구조를 가지고 제작된 구조물에 대한 광학 특성과 구조적 특성 등에 대해 분석하고자 하며, 박막 실리콘 태양전지 적용에 대해서 이야기 하고자 한다.



(a)



(b)

Fig. 9. Honeycomb pattern을 이용한 식각 반응 단계에 따른 광학 특성 결과(J. Yi Group, SKKU) 및 구조체의 단면 및 표면 형상 사진

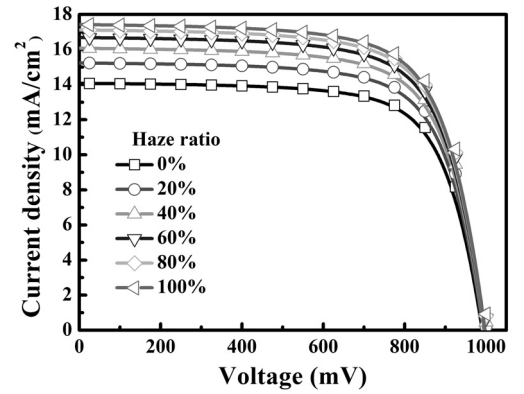


Fig. 10. Honeycomb pattern을 이용한 안개율 변화에 따른 실리콘 박막 태양전지의 L-I-V 특성

실험에 사용된 기판은 Corning Eagle-XG Glass로 기판 위에 Hard mask를 증착하여 리소그래피 방식으로 honeycomb pattern 제작하였고, 습식 식각 방법을 이용해 구조물을 제작하였다.

Fig. 9는 식각 단계에 따른 구조물의 투과도와 Haze ratio 특성을 나타낸 것인데, 반응 단계가 초기($T_{Average}$: 92.6%)에서 과도 반응 단계($T_{Average}$: 96.8%)로 갈수록 전체적인 투과도가 개선되는 것을 알 수 있으며, 이는 reference substrate로 사용하는 Corning EAGLE-XG($T_{Average}$: 92.2%) 혹은 ASAHI Glass($T_{Average}$: 82.98%)보다 광학적 이득이 높다는 점과 특히 600nm 까지의 파장 영역에서 투과도 개선이 크다는 것을 관찰하였다. 그리고 Haze ratio의 경우, 중간 반응($Haze_{average}$: 71.56%)단계에서 높은 Haze ratio를 확인하였으며, 과도 반응 단계에서 도 Haze ratio가 63.9%의 결과를 확인하였다. 이는 우리 구조체가 광학적으로 빛의 회절 및 산란을 증가 시키는 특성이 Fig. 6에서 보는 것과 같다는 것을 알 수 있다.

우리가 확보한 결과 중에서 과도 반응 단계 구조를 이용해 그 위에 투명전도막(ITO, AZO)을 증착하여 이를 적용해 보았다. ITO의 경우, 130nm 두께에서 투과도가 air base 기준으로 88.45%를 얻었는데, 이는 FTO의 투과도보다 5%의 광학 이득 효과를 얻었으며, haze ratio 또한 73.07%를 확보하였다. AZO 박막의 경우, 700nm 두께로 증착하여 적용한 결과에서도 기존 대비 2%의 광학 이득 효과를 확보하였다. 우리가 확보한 결과를 바탕으로 안개율 변화에 따라 비정질 실리콘 박막 태양전지의 시뮬레이션을 진행했는데, 안개율 증가에 따른 단락전류가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 입사한 빛이 구조체를 통해 광 포획 된 결과로 보인다.

3.2 다중 광포획 기술을 이용한 태양전지의 도전과제

고효율 다층 실리콘 박막태양전지를 개발하기 위해서는 앞서 기술한 여러 가지 형태의 광포획기술들이 함께 적용되어야 한다. 특히 빛이 입사되는 전면부 투명전도막에 투과율과 투과 안개율을 함께 향상 시킬 수 있는 다중 텍스쳐링 구조의 개발이 중요하다. 이를 위해서는 투광성이 높고, 전도도가 낮은 새로운 투명전도막의 재료 및 구조의 개발이 필요할 것이다. 투명 전도막을 얇게 하여 투광성은 높이고 부족한 전기 전도도를 광손실이 낮고, 금속표면의 산란효과를 이용할 수 있는 그리드가 삽입된 구조도 하나의 대안이 될 수 있다.

다중 텍스쳐링을 위해 자주 사용되는 리소그라피 방식의 패터닝은 원가 절감 효과를 얻기 어렵다. 그래서, 리소그라피를 사용하지 않고도 균일한 형상의 구조체를 만들 수 있는, 양산 가능한 다양한 형태의 직접 패턴공정(PMMA, Nano imprint, Ink jet, Spray, Laser, Metal shadow RIE등)에 대해 연구가 필요하다. 이

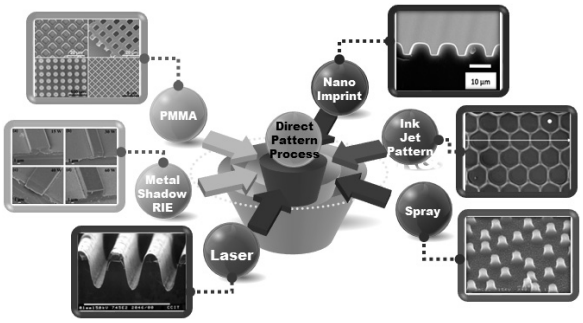


Fig. 11. 양산화 기법을 위한 직접 패턴 공정 기술의 분류

Table 1. 양산화를 위한 직접 패턴 방식 기술에 대한 장·단점

Process	Advantage	Disadvantage
PMMA	높은 투과성(93%), 내후성, 착색성	내충격성,내습성 취약
Nano Imprint	단순공정, 저비용, 대면적에 용이	정기적인 스탬프 공급, 미세 패턴(나노), 공정 및 비용상의 부담, 마스크 정렬,
Ink Jet	마스크 미사용, 패턴가변 가능, 저비용, 대량생산가능	잉크재료의 적합성 및 공정온도, 미세선폭 제어 어려움
Spray	대면적 용이, 공정 시간 줄임,	까다로운 공정 조건,재료 물성제어 어려움, 부피가 큼
Laser	형태변형 및 마모현상 없음, 가공뒤 후처리 공정 불필요, 화학약품 사용 안함, 자동화 공정 가능	해상도, 신뢰성, 생산 공정속도의 한계
Metal Shadow	경제성, 생산성	패턴 가변이 어려움, 대면적 다소 어려움.

들 직접 패턴 공정의 종류와 장단점에 대해 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

4. 결 론

태양전지에서의 광 포획기술은 흡수율을 높일 수 있는 매우 중요한 요소 기술 중에 하나로, 박막 태양전지에서는 특히 기술적 중요도가 점점 더 커지고 있다. 실리콘 박막태양전지에서는 단순히 태양광의 흡수율만을 높이는 것만이 아니라, 광열화율을 줄여, 안정화 효율을 높일 수 있다는 점에서 특히 더 의미가 있다고 하겠다. 기존 광 포획과 관련한 많은 국내・외 연구그룹들의 기술 경향을 확인함에 따라 전류밀도 개선 효과 있음을 알 수 있었다.

본 연구자의 실험 결과에서 우수한 광학 특성(투과도, 안개율)과 함께 박막 실리콘 태양전지 에 적용하게 되면 높은 변환 효율 특성을 확보할 것이라고 본다. 아직 양산화와 관련된 기술 연구에 대해 좀 더 세밀하고 깊이 있는 연구와 꾸준한 기술 교류를 통해 광 포획 구조 기법의 양산화 실현과 고효율이 함께 실현될 것으로 본다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC)육성사업의 연구결과입니다.

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No. 20133030010930).

References

1. T. Matsui, M. Kondo, “Advanced materials processing for high-efficiency thin-film silicon solar cells”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vo1. 119, pp. 156-162, 2013.
2. B. Stannowski, O. Gabriel, S. Calnan, T. Frijnts, A. Heidelberg, S. Neubert, S. Kirner, S. Ring, M. Zelt, B. Rau, J.-H. Zollondz, H. Bloess, R. Schlatmann, B. Rech, “Achievement and challenges in thin film silicon module production”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 119, pp. 196-203, 2013.
3. A. Duchatelet, T. Sidali, N. Loones, G. Savidand, E. Chassaing, D. Lincot, “12.4% Efficient Cu(In Ga)Se_2 solar cell prepared from one step electrodeposited Cu-In-Ga oxide precusor layer”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 119, pp. 241-245, 2013.
4. P. Sinha, “Life cycle materials water management for CdTe photovoltaics”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 119, pp. 271-275, 2013.
5. H. M. Upadhyaya, S. Senthilarasu, M. -H. Hsu, D. K. Kumar, “Recent progress and the status of dye-sensitised solar cells (DSSC) technology with state-of-the-art conversion efficiencies”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 119 pp. 291-295, 2013.
6. J. E. Carle, F. C. Krebs, “Technological status of organic photovoltaics (OPV)”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 119 pp. 309-310, 2013.
7. E. Yablonovitch, “Statistical ray optics,” J. Opt. Soc. Am., Vol. 72, No. 7, pp. 899 - 907, 1982.
8. T. Matsui, H. Sai, K. Saito, M. Kondo, “Amorphous-Silicon-Based Thin-Film Solar Cells Exhibiting Low Light-Induced Degradation” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 51, pp.10NB04, 2012.
9. H. Park, S. Kwon, J. S. Lee, H. J. Lim, S. Yoon, D. Kim, “Improvement on surface texturing of single crystalline silicon for solar cells by saw-damage etching using an acidic solution”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 93, pp. 1773-1778, 2009.
10. H. Sai, K. Saito, M. Kondo, “Investigation of Textured Back Reflectors With Periodic Honeycomb Patterns in Thin-Film Silicon Solar Cells for Improved Photovoltaic Performance”, IEEE. J. Photovolt., Vol. 3, No. 1, pp.5-10, 2013.
11. D. W. Kang, J. Y. Kwon, J. Shim, H. M. Lee, M. K. Han, “Al_2O_3 antireflection layer between glass and transparent conducting oxide for enhanced light trapping in microcrystalline silicon thin film solar cells”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol.

101, pp. 22-25, 2012.

12. E. Moulin, U. W. Paetzold, K. Bittkau, M. Ermes, L. Ding, L. Fanni, S. Nicolay, J. Kirchhoff, D. Weigand, A. Bauer, A. Lambertz, C. Ballif, R. Carius, "Thin-film silicon solar cells applying optically decoupled back reflectors", Mater. Sci. Eng. B, Vol. 178, pp.645-650, 2013.
13. R. B. Wehrspohn, J. Upping, "3D photonic crystals for photon management in solar cells", J. Opt. Vol. 14 pp. 024003, 2012.
14. S. Pillai, K. R. Catchpole, T. Trupke, M. A. Green, "Surface plasmonic enhanced silicon solar cells", J. Appl. Phys. Vol. 101, pp. 093105, 2007.
15. K. Jager, O. Isabella, R. A. C. M. M. van Swaaij, M. Zeman, "Angular resolved scattering measurements of nano-textured substrates in a broad wavelength range", Meas. Sci. Technol., Vol. 22, pp.105601, 2011.
16. M. Kambe, M. Fukawa, N. Taneda, K. Sato, "Improvement of a-Si solar cell properties by using SnO_2:F TCO films coated with an ultra-thin TiO_2 layer prepared by APCVD", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 90, No. 18-19, pp. 3014-3020, 2006.
17. S. Kim, S. Kasashima, P. Sichanugrist, M. Konagai, "Application of SnO_2 substrate to top cell for spectrum splitting type solar cell", PVSC, IEEE 39th, pp. 0572-0574, 2013.
18. H. M. Yates, P. Evans, D. W. Sheel, J. L. Hodgkinson, P. Sheel, U. Dagkaldiran, A. Gordijn, F. Finger, Z. Remes, M. Vanecek, "Optimization of Solar Cell Performance using Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition deposited TCOs", ECS Trans., Vol. 25, No. 8, pp.789-796, 2009.
19. B. Janthong, Y. Moriya, A. Hongsingthong, P. Sichanugrist, M. Konagai, "Management of light-trapping effect for a-Si:H/ μc-Si:H tandem solar cells using novel substrates, based on MOCVD ZnO and etched white glass", Sol. Energy Mater. Sol. Cells Vol. 119, pp. 209-213, 2013.
20. K. Yamamoto, A. Nakajima, M. Yoshimi, T. Sawada, S. Fukuda, T. Suezaki, M. Ichikawa, Y. Koi, M. Goto, T. Meguro, T. Matsuda, M. Kondo, T. Sasaki, Y. Tawada, "A high efficiency thin film solar cell and module", Sol. Energy, Vol. 77, pp. 939-949, 2004.
21. S. Kim, J. -W. Chung, H. Lee, J. Park, Y. Heo, H. -M. Lee, "Remarkable progress in thin-film silicon solar cells using high efficiency triple-junction technology", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 119, pp. 26-35, 2013.
22. C. Battaglia, C. -M. Hsu, K. Soderstrom, J. Escarre, F. -J. Haug, M. Charriere, M. Boccard, M. Despeisse, D. T. L. Alexander, M. Cantoni, Y. Cui, C. Ballif, "Light Trapping in Solar Cells: Can Periodic Beat Random?", ACS Nano Vol. 6, No. 3, pp. 2790-2797, 2012.