

고효율 다결정 태양전지

황 선우¹⁾, 김 희재²⁾, 이 준신³⁾

High Efficiency Multi-crystalline Solar cell

Sunwoo Hwang, Heejae Kim, Junsin Yi

Key words : Photovoltaic(광발전), Solar cell(태양전지), Silicon(실리콘), Energy(에너지)

Abstract : 태양광 주택 보급을 위해서는 기존에 고가의 실리콘 기판을 이용한 고효율 달성을 위한 연구중심의 태양전지 개발연구가 주축을 이루어왔다. 이는 개발에 성공하더라도 고가, 고난도, 복잡한 다단계 공정기술을 이용하는 단점 때문에 보급활성화를 촉진하기 위해서는 저가의 다결정 실리콘 기판을 이용한 중. 상급 태양전지 상용화 기술개발로 전환할 필요로 인하여 본 연구에서는 차세대전력용 태양광발전시스템의 요소소자인 다결정태양전지 고효율화의 열쇠가 되는 기술력 확보를 통한 저가, 대면적, 고효율, 고수율 제품 대량생산 상용화에 중점을 두었다.

1. 서론

태양전지 시장의 50%를 점유하고 있는 다결정 실리콘은 원부자재의 낮은 가격에도 불구하고, 제조공정 개선을 통해서 고효율의 품질 달성이 가능하다. 본 과제에서는 태양광 시스템 저가화의 핵심인 다결정 실리콘을 사용하여 건식 표면 텍스처, 실리콘 질화막, 측면분리, 대량생산 기술개발에 집중하였다.

표면 텍스처는 실리콘 태양전지에서 광흡수도 증가를 향상시키기 위해 사용된다. <100> 방향의 실리콘 웨이퍼 상에 임의의 피라미드형 구조를 형성하기 위한 비등방성 화학적 습식에칭 기술은 임의의 방향성 때문에 저가 다결정 실리콘 웨이퍼의 텍스처에 효과적이지 못하다. 저가 다결정 태양전지는 단결정 태양전지와 비교해 효율은 비슷하나, 텍스처하는 과정은 중요한 차이점을 가지고 있다. silicon nitride(SiN_x)와

magnesium fluoride (MgF₂)와 같은 고가의 반사방지막은 광 반사도 감소를 위해 다결정 태양전지의 전면으로 적용되어 왔다. 최근 들어, 다양한 형태의 표면 텍스처링 방법으로 laser structuring, mechanical grinding, porous-Si etching, photo-lithographically defined etching, Reactive Ion Etching(RIE) 방법이 사용되고 있다.

반사 방지막 SiN_x의 증착 후 전극을 만들기 위한 것으로 스크린 프린팅을 한다. 스크린 프린트가 끝나면 solar cell은 이미 완성된다.

-
- 1) 성균관대학교 정보통신공학부
E-mail : sunwoo300@skku.edu
Tel : (031) 290-7174 Fax : (031) 290-7159
 - 2) (주)포톤반도체에너지
E-mail : abbio7@psec.co.kr
Tel : (031) 299-6297 Fax : (031) 299-6899
 - 3) 성균관대학교
E-mail : yi@yurim.skku.ac.kr
Tel : (031) 290-7139 Fax : (031) 290-7139

하지만 완성된 solar cell을 가지고 모듈을 제작하려 하면 solar cell에 leakage가 발생하여 solar cell의 fill factor, Voc 그리고 Isc가 낮아진다. 저가의 기판을 사용하여 고효율 다결정 실리콘 태양전지를 제작하기 위한 방안중의 하나는 계면 특성이 우수한 반사방지막을 통해 패시베이션 (passivation)하는 것이다. 표면에 결함을 줄일 수 있는 수소 패시베이션을 반사방지막에 적용하면 결함이 많은 저가의 기판으로도 높은 효율을 얻을 수 있다. 또한 수소 패시베이션은 스크린 프린팅(Screen printing) 된 전극의 접촉 저항을 줄여 충실도(fill factor)를 개선하기도 한다.

실리콘 나이트라이드 (SiNx)나 세륨 옥사이드 (CeO₂)등의 물질들은 반사방지막으로서의 적당한 굴절율을 가지고 있을 뿐 아니라 표면 패시베이션 역할이 뛰어나 반사방지막으로 적용하기에 매우 우수한 물질이다. 본 연구에서는 표면 패시베이션과 동시에 A/R 코팅 효과를 얻기 위해 우수한 패시베이션 특성을 갖는 SiNx를 태양전지의 반사방지막으로 사용하였다. 여러 표면처리 물질 중 SiNx를 선택한 것은 저온공정 가능하고, 높은 수소 농도를 가지며, SLAR(single layer Antireflection) 코팅용으로 사용하기에 적당한 굴절율을 가지기 때문이다.

2. 실험방법

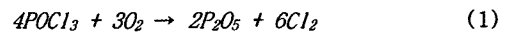
1) 다결정 실리콘 표면 처리

다결정 실리콘의 표면의 결함을 줄이고 입사광의 반사를 줄이기 위하여 화학적 표면을 처리 하였다. 이러한 표면 결함을 줄이기 위하여 실리콘 표면으로부터 20~30 μm의 실리콘이 제거 되었다. 동시에 결함도 제거가 되었다. 이러한 표면 처리를 위하여 HF와 HNO₃와 CH₃COOH가 1 : 4 : 1의 비율의 용액을 이용하였다. HNO₃는 산

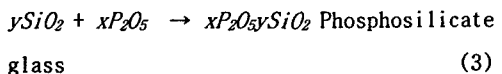
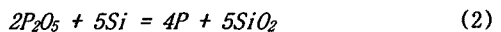
화학을 형성하게 하며 HF는 이러한 산화막을 제거하며 CH₃COOH를 통해 표면 Wetting 효과를 개선한다. 실리콘 표면의 점들이 생기는 것을 방지하기 위하여 이러한 용액을 잘 씻는다. 단결정의 경우 NaOH나 KOH를 사용하여 텍스처를 하지만 다결정인 경우 동일한 용액을 사용해도 최대 60% 이하만이 표면에 피라미드 구조보다는 사각기둥 모양의 표면조직 특성을 보였다. 표면 조직화 처리 후에 빛의 반사를 줄이기 위하여 반사방지막으로 SiN를 증착하였다. 이러한 노력을 수행하여도 단결정과 비교할 때 3% 이상 높은 반사도 때문에 효율이 떨어지는 요인으로 볼 수 있다.

2) 인 도핑 및 확산 산화막 제거

POCl₃ 용액을 사용하여 인 확산을 하였다. 2단계를 걸쳐 인 확산이 시행되었다. 첫 단계는 pre-deposition 이고 두 번째 단계는 drive-in이다. pre-deposition에서는 웨이퍼 표면에 많은 원자들 증착을 위해서 830°C에서 900°C까지 10분 정도 유지하면서 POCl₃를 주입하였다. POCl₃ 용액은 23-25°C의 온도를 유지하였고 질소 가스를 통해 운반되었다. 이러한 POCl₃은 질소와 산소의 혼합 가스와 함께 퍼니스에 투입된다. 확산 이전에 P₂O₅를 형성한다. 반응식은 식 (1)에서 보여주고 있다



확산 온도에서 실리콘 표면에서 확산 반응식은 식(2)와 같다.



Drive-in 과정에서 POCl₃ 가스가 주입되지 않는다. 높은 온도에서 불순물은 이미 실리콘 표면에 증착 되어 농도차에 의하여 웨이퍼 속으로 침투되어 간다. 이러한 과정을 Drive-in 이라고 부른다. 불순물의 농도는 실리콘 표면

에서 최대이며 웨이퍼 속으로 들어갈수록 Gaussian 분포나 error 함수를 따라 줄어든다.

인 확산 과정에서 O_2 의 역할은 확산 산화막의 성장을 가져온다. 일반적으로 식(3)에서 phosphosilicate glass(PSG)라고 알려진 산화막이 실리콘 표면에 성장한다. PSG층은 일반적으로 같은 시간과 온도에서 산화막을 형성했을 때보다 상대적으로 더 두껍게 증착된다. 이것은 인 도핑된 실리콘의 산화막 성장 때문이다. 이러한 phosphosilicate glass는 5% HF 용액 안에 dipping 하여 제거 한 후에 DI water로 세척한다. PSG 층의 제거는 $POCl_3$ 용액을 이용하여 인 확산을 하는 동안 산화막에 있는 원하지 않는 불순물을 동시에 제거한다. 또한 p-n 접합의 단락을 막기 위하여 플라즈마 건식식각을 사용하여 측면분리를 한다. 측면만을 식각하기 위하여 앞 뒷면을 동전을 적층하듯 쌓아 정렬하여 300~400매를 처리한다.

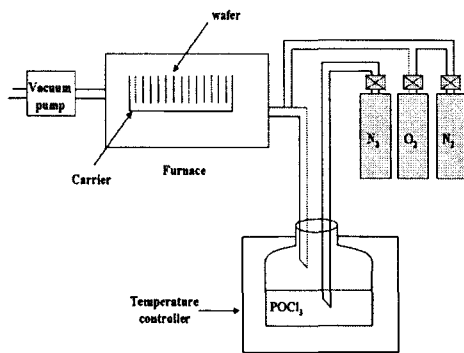


Fig. 1 $POCl_3$ 용액을 이용한 인 확산을 위한 시스템.

3) PECVD를 이용한 SiN 증착

수소를 포함하고 있는 질화막 층은 단 한번의 공정으로 반사방지막과 표면과 벌크 패시베이션 역할을 하기 때문에 다결정 태양전지 제작에 널리 쓰이고 있다. 질화막의 증착 방법에 따

라서 질화막의 화학적, 기계적, 광학적, 전기적 특성과 패시베이션의 효과가 달라진다. 태양전지의 적용을 위해서는 일반적으로 SiH_4 와 암모니아와 질소를 사용하여 화학 기상 증착법으로 증착한다. 질화막 증착을 위하여 PECVD를 사용하였다. PECVD는 긴 quartz tube 에 흑연판(graphite plates)을 전극으로 사용하였다. 이러한 전극의 구조는 박막의 균일도와 각각의 웨이퍼의 균일한 플라즈마 형성을 위하여 고안되었다. 플라즈마는 각각의 판과 판 사이에서 형성된다. 한 번의 공정시 100 mm×100 mm 기판은 120매/회, 125 mm×125 mm 40매/회, 150 mm×150 mm 16매/회 이상의 웨이퍼에 질화막을 증착할 수 있다. 또한 1.9에서 2.3의 굴절율의 질화막을 얻기 위하여 암모니아와 SiH_4 의 비율을 조절하였다. 또한 Spectroscopic Ellipsometry를 이용하여 두께와 굴절율을 측정하였다.

4) 스크린 프린트를 이용한 전극 형성

스크린 프린트를 이용하여 전면 전극인 Ag와 후면 전극인 Al을 증착하였다. Al을 위한 뒤판의 마스크는 3D-200을 사용하여 20 μ m 이상의 Al을 증착하였다. 전면전극인 Ag 증착을 위해서는 3D-325를 사용하였다. 스퀴지는 다이아몬드 스퀴지를 사용하였으며 스퀴즈 속도는 4-10 cm/s 이다. 먼저 Al paste를 증착한 후 120°C에서 5분 동안 건조를 위한 열처리 한 후 전면 전극인 Ag paste를 스크린 프린트를 사용해 인쇄 한 후 다시 120°C에서 5분 동안 열처리 건조를 수행 하였다. 그 이후 급속 열처리 공정을 이용하여 전 후면 동시 소성 하여 전극을 형성한다.

5) 태양전지 제작 공정

Fig. 1 과 같이 먼저 Si 기판(P-type 10 Ω ·cm)를 산이나 염기 용액으로 표면(polishing) 처리 한 후에 $POCl_3$ 용액으로 도핑을 하였다.

도핑후 BHF를 이용하여 PSG를 제거하였다. 건식 플라즈마를 이용하여 p-n 접합의 누설을 방지하기 위하여 가장자리 분리를 하였다. PECVD를 이용하여 SiN를 증착하였으며 스크린 프린트를 사용해 Al를 증착하고 furnace에서 120°C에서 건조한 후 전면에 Ag를 인쇄한다. 후면과 마찬가지로 120°C에서 건조한 후 RPT를 통해 전후면 동시 열처리를 하여 태양전지를 제작하였다.

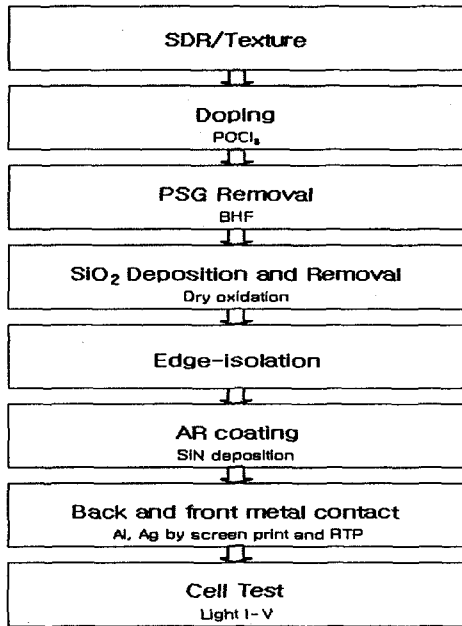


Fig. 2 태양전지 제작 순서.

3. 실험결과

1) 성장 조건에 따른 굴절율 및 FTIR 특성

연구를 통해 NH_3/SiH_4 의 가스비를 조절하여 다양한 굴절률(1.8~2.3)을 갖는 SiN_x 박막을 제조하였다. 또한 모의실험을 통해 굴절률에 따른 최소 반사율과 최적 두께를 설정하였다. 수소 패시베이션의 영향성을 살펴보기 위해 굴절률에 따른 수소포함 농도를 분석하고, 제작된 태양전지의 효율변화에 미치는 영향성을 살펴보았다. Fig. 3과 같이 태양전지 제작에 앞서 모

의실험을 통해 앞서 굴절률에 따라 최적 두께와 반사율을 구하였다. 모의실험 결과 1.99의 굴절률을 가질 때 가장 낮은 9.41%의 반사율을 보였다.

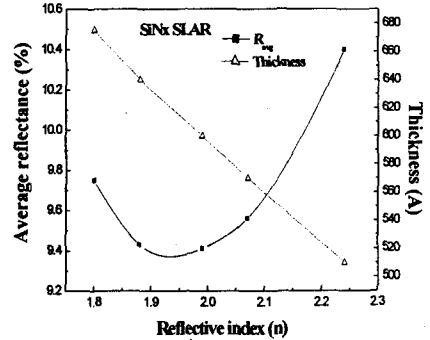


Fig. 3 실리콘 질화막의 굴절율과 최적 두께에서의 경면 처리된 실리콘 표면 도포시 반사도

박막의 bulk와 계면에 존재하는 dangling bond를 passivation 하는 역할을 한다. 하지만 N-H bond와 Si-H bond 등은 절연막에서 계면 준위 밀도를 증가시켜, 에너지 밴드갭 내에 국부적인 에너지 준위를 형성하게 되어 절연막의 전기적 성질을 열화시키는 원인이 되기도 한다. N_2/SiH_4 의 가스비가 증가함에 따라 Si-H bond에서의 수소 농도가 줄어들고 있다. N_2/SiH_4 의 가스비가 10부터는 Si-H bond에서의 수소 농도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 반면 N-H bond에서 수소 농도는 증가한다. 이러한 결과를 통해 가스비 증가에 따른 Si-H bond의 수소농도 감소와 N-H bond에서의 수소농도 증가가 누설전류에 미치는 영향성을 확인할 수 있다. 따라서 Table 1과 같이 박막내 수소의 함유량이 기판과 박막간의 패시베이션의 역할을 하면서 계면 특성에 커다란 영향을 미치는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었고, Table 2에서 기판 표면에서 패시베이션의 역할을 하는 SiN_x 의 수소 포함 농도가 태양전지 효율에 미치는 영향성을 나타냈

다. 또한 Fig. 4에서 가스비에 따른 FT-IR 스펙트럼으로 Si-H, N-H bond의 변화를 관찰하였다.

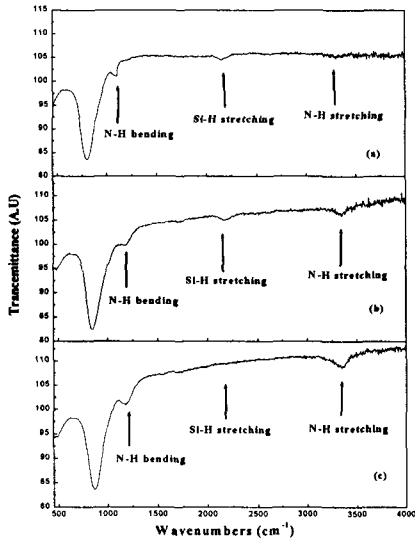


Fig. 4 가스비에 따른 FT-IR 스펙트럼 (a) NH_3/SiH_4 ratio=0.5 (b) 1.0 (c) 5

Table 1 굴절률에 따른 Si-H, N-H 결합내에 함유된 수소 농도.

굴절률(n)	Si-H bond (cm^{-3})	N-H bond (cm^{-3})	Total H content (cm^{-3})
1.80	1.05×10^{21}	1.21×10^{22}	2.05×10^{22}
1.88	3.83×10^{21}	1.48×10^{22}	2.18×10^{22}
1.99	8.31×10^{21}	1.62×10^{22}	2.45×10^{22}
2.09	9.14×10^{21}	1.80×10^{22}	2.39×10^{22}
2.24	10.57×10^{21}	1.94×10^{22}	2.27×10^{22}

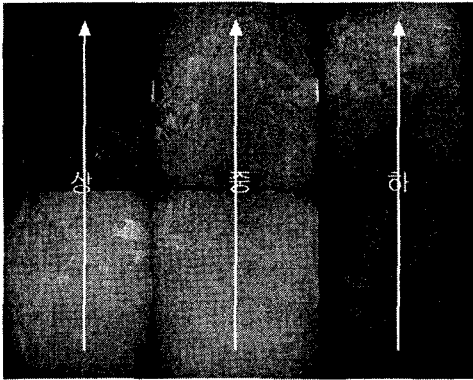
Table 2 굴절률에 따른 태양전지 특성

Refractive index(n)	J_{sc} (mAcm^{-2})	V_{oc} (V)	P_M (mWcm^{-2})	FF (%)
1.80	27.5	0.599	10.68	64.89
1.88	26.5	0.596	10.63	67.29
1.99	27.0	0.591	11.49	71.98
2.09	25.5	0.593	10.65	70.30
2.24	26.5	0.594	10.13	64.31

이상적인 경우 $\text{Air}/\text{SiN}_x/\text{Si}$ 구조에서는 1.9의 굴절율이 최적이며 모듈로 된 경우에는 2.3에서 최적이다. 결국 만들어진 모든 태양전지는 모듈에 싸여지기 때문에 2.3의 굴절율 값이 실제적으로 중요하다. 그러나 SiN 층의 소광계수가 증가하면 할수록 SiN 층에 빛의 흡수가 일어난다. 이와 같이 SiN 층에 흡수된 빛은 태양전지의 전류에 기여하지 못한다. 즉 SiN 를 증착하는 동안 NH_3 와 SiH_4 의 비율에 따라 굴절율과 소광계수가 달라진다. NH_3/SiH_4 비율이 낮은 수록 소광계수와 굴절율이 높아진다. 높은 굴절율에서는 반사도의 손실이 줄어들지만 SiN 층의 흡수로 인하여 결국 반사도에는 변함이 없다. 이러한 이유로 심지어 모듈을 고려하여 태양전지를 제작할 때도 굴절율은 2.0 전 후로 한다.

2) 대면적 태양전지 제작을 위한 균일도

본 연구를 통해 NH_3/SiH_4 의 가스비를 조절하여 다양한 굴절률(1.8~2.2)을 갖는 SiN_x 박막을 제조하였다. 다음과 같이 다양한 공정 파라미터를 변환함으로써 균일도 및 굴절율에 영향을 미치는 요소를 태양전지 적용을 위한 최적의 SiN_x 를 획득하였으며, 조건에 접근하는 과정을 상세히 기술하였다. 화살표 방향으로 gas가 흐르고 공정조건은 아래의 표와 같았다. 전반적으로 증착두께를 균일하게 하기 위해서 지금까지의 실험으로 나타난 최적의 압력(630 mTorr)과 전극거리(15mm) power(200W), power on/off ratio에 온도를 300°C로 올리고 실험한 결과 전반적으로 약 1000 Å 정도의 두께로 증착시키는데 성공하였다.



Gas	SiH4	NH3	N2
	10sccm	50sccm	24sccm
pressur e	Base	20mTorr	
	Working	630mTorr	
Temperature	300℃		
Power	200W		
Wafer position	중앙		
Treatment time	7min		
power on/off ratio	3		
Electrode Gap	Top	Center	Bottom
	15mm	15mm	15mm

Fig. 5 Test결과 사진 및 조건표

3) 대면적, 고효율 다결정 실리콘 태양전지

도핑된 웨이퍼는 edge-isolation을 거쳐 우선 50A 두께의 Si-rich nitride 층(n=2.3)을 증착과 10분간의 암모니아 플라즈마 표면 처리 후 2.0의 굴절율을 가진 SiNx:H 반사방지막을 700A 증착 시켰다. 또한 양산용 고성능 스크린 프린터를 이용한 전면전극(Ag), 후면전극(Al) 형성 후 RTP(Rapid thermal processing)에 의해 firing 되었다. 실리콘 질화막의 열처리 공정은 셀 전면전극(Ag)이 고온 공정 동안 도핑된 에미터층의 contact을 만들기 위해 질화막 층을 통해 열처리 되기 때문에, 이를 'firing-through' 공정이라 한다. firing 단계를 위한 온도 Profile은 에미터와 전면전극 사이에 우수한 contact을 획득하기 위해 선택되었다. Fig. 6은 본 연구에서 개발된 125mm×125mm 면적의 다결정 태양전지의 Internal Quantum Efficiency(IQE)

를 나타낸 것이다. SiNx 단일 반사방지막을 사용한 경우, UV 영역에서는 높은 값을 나타내지만 IR 영역으로 갈수록 점차 감소하고 있음을 알 수 있었고, MgF₂/SiNx 이중 반사방지막의 경우 전 파장대에 걸쳐 높은 IQE를 나타내어 MgF₂ 박막을 증착시킴으로서 장파장대의 IQE가 개선됨을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7과 같이 150mm×150mm 면적의 다결정 태양전지의 Internal Quantum Efficiency(IQE)에서는 SiNx 단일 반사방지막으로도 전 파장대에 걸쳐 우수한 특성을 획득하였고, DIV(dark current-voltage) 측정 결과 낮은 암전류에 의해 높은 Voc를 이끄는 집합에서의 누설성분을 알 수 있었다. Fig. 8

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 125mm×125mm, 150mm×150mm 면적의 웨이퍼에 제작한 태양전지 Light illuminated current-voltage(LIV) 특성으로서 SiNx와 MgF₂/SiNx 이중 반사방지막의 특성을 비교분석하였다. 또한 본 연구 수행중에 제작된 SiNx 반사방지막을 이용한 다결정 실리콘 태양전지를(좌: 100mm×100mm, 중간: 125mm×125mm, 우: 150mm×150mm) Fig. 11에서 나타내었다.

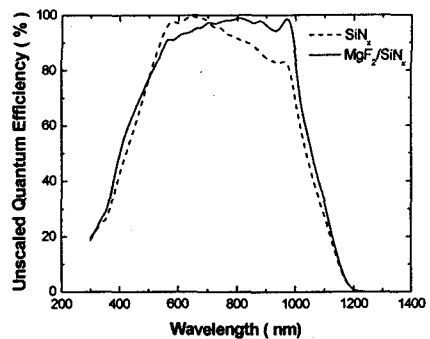


Fig. 6 125mm×125mm 면적의 다결정 태양전지의 Internal Quantum Efficiency (IQE)

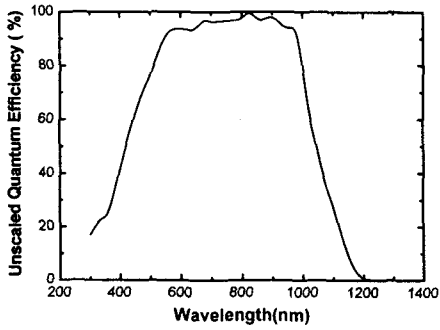


Fig. 7 150mm x 150mm 면적의 다결정 태양전지의 Internal Quantum Efficiency (IQE)

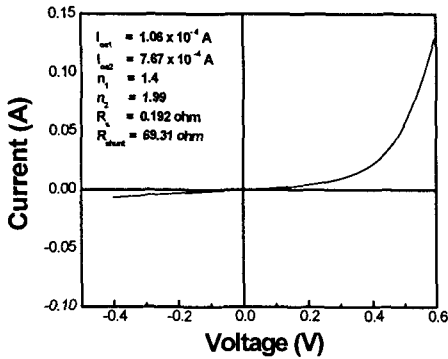


Fig. 8 150mm x 150mm 면적의 다결정 태양전지의 DIV(dark current-voltage) 특성곡선

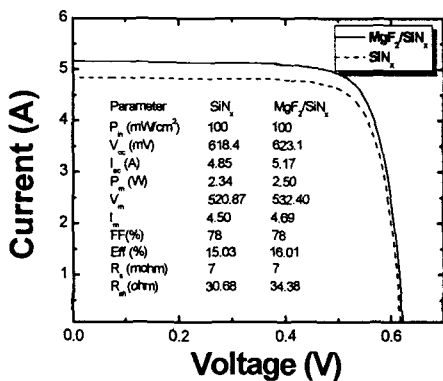


Fig. 9 반사방지막 SiNx, MgF₂/SiNx의 Light illuminated current-voltage(LIV) 특성 (면적 : 125 mm x 125 mm)

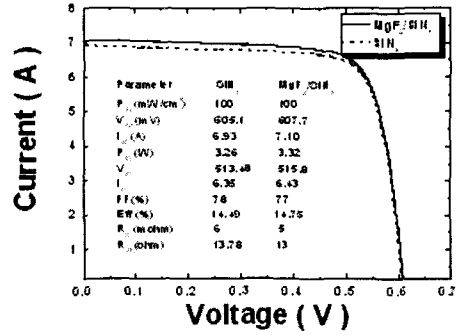


Fig. 10 반사방지막 SiNx, MgF₂/SiNx의 Light illuminated current-voltage(LIV) 특성 (면적 : 150 mm x 150 mm)

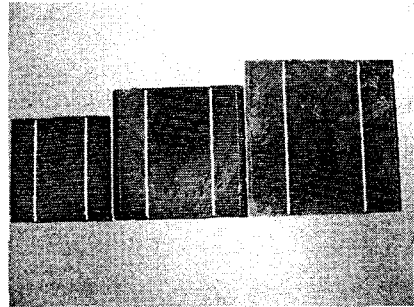


Fig. 11 본 연구 수행 중에 제작된 SiNx 반사방지막을 이용한 다결정 실리콘 태양전지 (좌 : 100 mm x 100 mm 다결정 태양전지, 중 : 125mm x 125mm 다결정 태양전지, 우 : 150 mm x 150 mm 다결정 태양전지)

4. 결론

본 논문에서는 이상적인 경우 Air/SiNx/Si 구조에서는 1.9의 굴절율이 최적이며 모듈로 된 경우에는 2.3에서 최적이다. 결국 만들어진 모든 태양전지는 모듈 형태로 이용되기 때문에 2.3의 굴절율 값이 실제적으로 중요한데, 본 연구과제에서 NH₃/SiH₄ 비율을 조절하여 2.1이상의 굴절율을 가지는 실리콘 질화막을 획득하였고,

우수한 전기적, 광학적 특성을 확보하였다. 또한, 증착된 실리콘 질화막의 균일도를 elipsometer (Model : SE-MF -1000)를 이용하여 웨이퍼 측정 위치에 따라 측정된 결과, 전면적에 걸쳐 총 9개의 위치에서 1% 이내의 우수한 균일도를 획득할 수 있었고 최적의 실리콘 질화막을 이용하여 면적 125mm×125mm 다결정 태양전지에서 15.1% 이상, 150mm×150mm 다결정 태양전지에서 14.5%의 변환효율 및 우수한 전기적 특성을 얻을 수 있었다.

Reference

- [1] Shin-ichi muramatsu, Tsuyoshi uematsu, Hiroyuke Ohtsuka, Yoshiaki Yazawa, Terunori Warabisako, Hiroshi Nagayoshi, Kouichi kamisako, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65, 2001 pp. 599-606.
- [2] K. Juki, K. Okada, Y. Inomata, H. Takahashi, S. Fujii, Y. Fukawa, K. Shirasawa, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 48, 1997, pp. 219-228.
- [3] Santo Martimuzzi, Isabelle Perichaud, Francois Warchol, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 80 2003 pp.343-353.
- [4] Jan Schmade, Mark Kerr, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65, 2001 pp.585-591.
- [5] Alexander Hauser, Markus Spiege., Peter Fath, Ernst Bucher, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 75, 2003, pp.357-362.
- [6] M. Spiegel, C.Zechner, B. Bitnar, G. Hahn, W. Jooss, P. Fath, G. Willeke, E. Bucher, H. U. Hofs, C. Habler, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 55, 1998, pp.331-340.
- [7] Armin G. Abere and Rudolf Hezel, *Progres in Photovoltacis: Research and Applications*, 5, 1997 pp. 29-50.
- [8] Li Cai, Ajeet Hohatgi, *IEEE Transection on Electron Devices*, 44 (1), 1997 97-103.
- [9] F. Duerinckx, J. Szlufcik, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 72, 2002 pp.231-246.
- [10] B.L. Xopori, X. Deng, J.P. Benner, A. Rohatgi, P.Sana, S.K. Estreicher, Y.K. Park, M.A. Roberson, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 41/42, 1996 pp.159-169.
- [11] Christoph Boehme, Gerald Lucovsky, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 299-302, 2002 pp.1157-1161.
- [12] J. Wohlgemuth and S. Shea, *Rinal Subcontract Report*, NREL/SR-520-32066, 4May 1998-30 November 2001.
- [13] B. Sopori, m.I. Symco, R. Reddy, K. Jones, and R. matson, NREL/CP-520-23578, The 26th IEEE Photovoltaci Specialists Conference September 29-October 3, 1997, Anaheim, California.
- [14] A. Rohatgi, V. Yelun, J. Jeong, A. Ebong, M. D. Rosenblum, J. I. Hanoka, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 74, 2002, pp.117-126.