

결정질 실리콘 태양전지를 위한 이중 반사방지막 구조

박제준^{1,3}, 정명상^{2,3}, 김진국^{3,4}, 이희덕¹, 강민구³, 송희은^{3,a}

¹ 충남대학교 일반대학원 전자·전파·정보통신공학과

² 충남대학교 녹색에너지기술대학원 녹색에너지기술학과

³ 한국에너지기술연구원, 태양에너지 연구단

⁴ 충북대학교 일반대학원 반도체공학과

Double Layer Anti-reflection Coating for Crystalline Si Solar Cell

Je Jun Park^{1,3}, Myeong Sang Jeong^{2,3}, Jin Kuk Kim^{3,4}, Hi-Deok Lee¹,
Min Gu Kang³, and Hee-eun Song^{3,a}

¹ Department of Electronic Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

² Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³ Solar Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

⁴ Department of Semiconductor Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received November 26, 2012; Revised December 10, 2012; Accepted December 11, 2012)

Abstract: Crystalline silicon solar cells with $\text{SiN}_x/\text{SiN}_x$ and $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ double layer anti-reflection coatings(ARC) were studied in this paper. Optimizing passivation effect and optical properties of SiN_x and SiO_x layer deposited by PECVD was performed prior to double layer application. When the refractive index (n) of silicon nitride was varied in range of 1.9~2.3, silicon wafer deposited with silicon nitride layer of 80 nm thickness and $n=2.2$ showed the effective lifetime of 1,370 μm . Silicon nitride with $n=1.9$ had the smallest extinction coefficient among these conditions. Silicon oxide layer with 110 nm thickness and $n=1.46$ showed the extinction coefficient spectrum near to zero in the 300~1,100 nm region, similar to silicon nitride with $n=1.9$. Thus silicon nitride with $n=1.9$ and silicon oxide with $n=1.46$ would be proper as the upper ARC layer with low extinction coefficient, and silicon nitride with $n=2.2$ as the lower layer with good passivation effect. As a result, the double layer AR coated silicon wafer showed lower surface reflection and so more light absorption, compared with SiN_x single layer. With the completed solar cell with $\text{SiN}_x/\text{SiN}_x$ of $n=2.2/1.9$ and $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ of $n=2.2/1.46$, the electrical characteristics was improved as $\Delta V_{oc}=3.7$ mV, $\Delta J_{sc}=0.11$ mA/cm² and $\Delta V_{oc}=5.2$ mV, $\Delta J_{sc}=0.23$ mA/cm², respectively. It led to the efficiency improvement as 0.1% and 0.23%.

Keywords: c-Si solar cell, Double layer anti-reflection coating, Silicon nitride, Silicon oxide, PECVD

1. 서론

a. Corresponding author: hsong@kier.re.kr

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.
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.

결정질 실리콘 태양전지의 주성분인 실리콘은 400~1,100 nm의 영역에서 3.5~4.0 사이의 굴절률을 갖는다 [1]. 이러한 큰 굴절률로 인해 입사된 빛의 일부는 내부로 흡수되지 못하고 표면에서 반사된다. 대기 중에서 입사하는 빛에 대해 반사도를 나타내는

Fresnel's law는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [2].

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (1)$$

실리콘의 굴절률은 기준파장 630 nm에서 3.88 [3] 이므로 빛이 실리콘에 수직으로 입사할 경우 공기와 실리콘 경계면에서의 반사율은 식 (1)에 의해서 약 35%이다. 태양전지 표면에서 빛의 반사를 저감시키기 위한 방법으로는 표면조직화 (texturing)와 반사방지막이 (anti-reflection coating, ARC) 있다. 단결정 실리콘 웨이퍼에 표면조직화 공정을 적용하면 반사율을 약 11%까지 줄일 수 있고, 여기에 반사방지막을 증착하면 반사율을 3% 이하로 낮출 수 있다 [4]. 이러한 반사율의 감소는 태양전지의 변환 효율에 중대한 영향을 미치는 단락 전류 (J_{sc})의 향상을 가져온다. 또한 굴절률이 서로 다른 박막을 이용하여 이층 반사방지막을 증착하면 더 넓은 파장 범위에서 반사율을 낮출 수 있어 단층 반사방지막보다 증가된 단락 전류를 기대할 수 있다 [4].

본 논문에서는 뛰어난 광학적 특성과 우수한 패시베이션 역할을 수행하는 실리콘 질화막 (SiN_x , $n=1.9 \sim 2.3$) [6]을 사용하여 굴절률이 2.0이고, 막의 두께가 80 nm인 단층 실리콘 질화막이 증착된 결정질 실리콘 태양전지와 반사방지막 증착 공정 뒤에 오는 전극형성과 소성 공정에서의 영향을 줄이기 위해서 동일한 80 nm의 막 두께를 가지지만 서로 다른 굴절률을 가진 실리콘 질화막을 이층 구조로 증착한 태양전지의 특성에 대해 연구하였다. 또한 이층 반사방지막으로 사용하기 위해 하부 층은 2.2~2.6 사이의 굴절률 (n)을 가지고 상부 층은 1.3~1.6 사이의 굴절률을 가진 박막이 적합하므로 [7] 실리콘 질화막과 실리콘 산화막 (SiO_x , $n=1.46$)을 적용한 결정질 실리콘 태양전지의 특성에 대하여 연구하였다 (그림 1).

2. 실험 방법

2.1 실리콘 질화막과 실리콘 산화막의 굴절률에 따른 유효 반송자 수명과 소광 계수

실험에 사용된 시료는 실리콘 질화막의 굴절률에 따른 유효 반송자 수명 (effective carrier lifetime)과 소광 계수 (extinction coefficient)를 측정하기 위하여

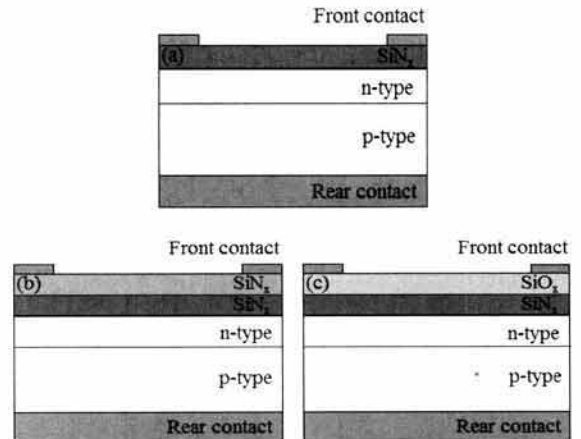


Fig. 1. Crystalline silicon solar cell deposited with three different anti-reflection coatings : (a) SiN_x , (b) $\text{SiN}_x/\text{SiN}_x$, (c) $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$.

Table 1. SiN_x/H process conditions deposited by RF PECVD.

Working pressure (Torr)		1.0
Deposition temperature (°C)		400
RF power (W)		500
Refractive index	SiH_4 (sccm)	NH_3 (sccm)
1.9	80	500
2.0		130
2.1		100
2.2		70
2.3		55

Table 2. SiO_x process conditions deposited by LF PECVD.

Working pressure (Torr)		1.0
Deposition temperature (°C)		350
RF power (W)		300
gas flow (sccm)	SiH_4	10
	N_2O	100

단면 polishing된 두께가 660~690 μm 이고, 비저항이 1~10 $\Omega\cdot\text{cm}$ 인 6 inch 크기의 (100) p형 실리콘 웨이

퍼를 사용하였다. 10%의 HF 용액에서 30초 동안 표면에 존재하는 자연 산화막을 제거한 후 13.56 MHz의 플라즈마 주파수를 사용하는 RF-PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 시스템을 이용하여 실리콘 질화막을 증착하였다. 선행 실험을 통해 실리콘 질화막의 굴절률이 1.9~2.3인 범위에서 각각 0.1 단위씩 변화하는 공정 가스량을 구한 후 실리콘 질화막을 증착하였다. 자세한 공정 조건은 표 1과 같다. 실리콘 산화막의 소광 계수를 측정하기 위하여 위와 동일한 시료에 200 kHz의 주파수를 사용하는 LF PECVD 시스템을 사용하여 실리콘 산화막을 증착하였다. 증착 공정 조건은 표 2에 나타났다.

2.2 서로 다른 굴절률을 가진 이층 구조의 실리콘 질화막의 두께에 따른 반사도 및 유효 반송자 수명

표면 반사도와 유효 반송자 수명 측정을 위해 결정질 실리콘 태양전지 제작에 사용되는 두께가 200±20 μm이고, 비저항이 0.5~3 Ω·cm인 6 inch 크기의 p형 단결정 실리콘 웨이퍼에 KOH와 IPA (isopropyl alcohol) 혼합용액을 이용하여 표면조각화 (texturing) 공정을 진행하였다. 이어서 확산로 (diffusion furnace)에서 POCl₃을 주입하여 50~55 Ω/□의 면저항을 가진 에미터 층을 형성하였다. 도핑 공정 후 시료 표면에 불순물이 포함되어 있는 PSG (phosphorus silicate glass)를 10%의 HF용액에서 제거하고, RF PECVD 시스템을 사용하여 굴절률 2.2인 실리콘 질화막을 70 nm 두께로 증착하고, 챔버 내의 진공이 유지된 상태에서 연속적으로 굴절률 1.9인 실리콘 질화막을 10 nm의 두께로 그 위에 증착하였다. 이층으로 이루어진 실리콘 질화막의 두께의 합을 80 nm로 유지하면서 두 박막의 두께를 10 nm 단위 씩 가감해가며 증착하여 70/10 nm, 60/20 nm, 50/30 nm, 40/40 nm 네 가지의 조건의 시료에 대한 반사도와 유효 반송자 수명을 측정하였다. 이 때 박막의 두께에 대한 오차는 3% 이내였다.

2.3 이층 반사방지막이 적용된 태양전지 제작

2.2절과 동일한 시료를 사용하여 SiN_x, SiN_x/SiN_x, SiN_x/SiO₂ 세 가지 반사방지막 구조를 가진 태양전지를 제작하였다. 단층 실리콘 질화막 (SiN_x)은 이층 반사방지막 구조와의 비교를 위해서 굴절률 2.0이고, 막 두께 80 nm인 일반적인 증착 조건을 사용하였다 [8].

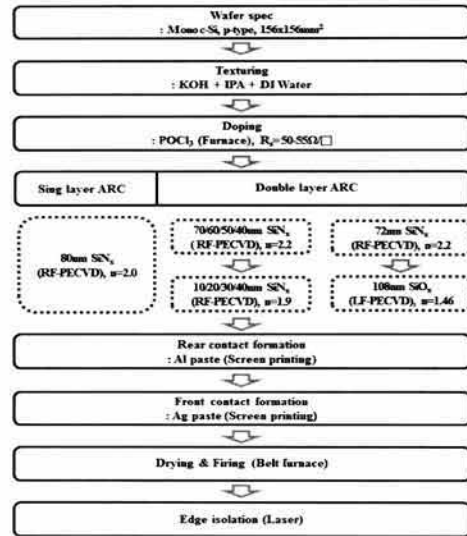


Fig. 2. Crystalline silicon solar cell fabrication procedure.

SiN_x/SiN_x 구조는 굴절률이 2.2인 실리콘 질화막을 시료의 표면에 50 nm 두께로 증착하고 이어서 굴절률이 1.9인 실리콘 질화막을 30 nm 두께로 증착하였다. SiN_x/SiO₂ 구조는 굴절률이 2.2이고 막 두께가 72 nm인 실리콘 질화막을 증착한 후에 굴절률이 1.46이고 막 두께가 108 nm인 실리콘 산화막을 증착하였다 [9]. 막 증착 후 내부에서 형성된 캐리어들의 수집을 위해 전면에는 Ag 페이스트를 사용하고 후면에는 Al 페이스트를 이용하여 스크린 프린팅 방법으로 전극을 인쇄하였고, 전면 에미터 층과 후면 베이스 층에 저항 접촉 (ohmic contact)을 형성하기 위하여 소성 공정을 거쳤다. 또한 앞선 도핑 공정이 batch 타입이기 때문에 시료의 전체 면에 대해 n+ 에미터 층이 형성되어 태양전지에서 shunt를 일으키는 원인이 되기에 측면 접합 분리 공정을 진행한 후 완성된 태양전지의 전기적 특성과 양자효율을 측정하였다 (그림 2).

SiN_x의 굴절률, 소광계수, 두께는 분광 분석용 엘립소미터 (spectroscopic ellipsometer)인 J.A.Woollam Co., Inc.의 V-VASE 로 측정하였고 유효 반송자 수명 측정은 quasi-steady-state photoconductance 방식인 Sinton instruments의 WCT-120을 사용하였다. 시료의 표면 반사도는 Jasco사의 V-670 분광 광도계 (spectrophotometer)를 사용하여 분석하였고, 완성된 태양전지의 전기적 특성과 양자효율은 Pasan사의 sun simulator과 PV measurements사의 QE 시스템을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

결정질 실리콘 태양전지에서 실리콘 질화막은 반사 방지막과 패시베이션의 역할을 수행한다. 굴절률에 따른 최적화된 패시베이션 특성을 찾기 위해 시료의 양면에 굴절률을 1.9~2.3의 범위 내에서 0.1 단위로 증가시키며 실리콘 질화막을 증착하였다. 서로 다른 굴절률을 가진 실리콘 질화막이 증착된 다섯 가지 시료에 대하여 소수 반송자 밀도 (minority carrier density, MCD) $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 에서의 유효 반송자 수명을 측정하였다. 그림 3과 같이 유효 반송자 수명은 굴절률이 1.9에서 2.2까지 순차적으로 증가를 하다가 굴절률 2.3에서 감소하는 경향을 보였다. 가장 높은 유효 반송자 수명은 굴절률이 2.2일 때로 $1,370 \mu\text{s}$ 였다. 유효 반송자 수명 (τ_{eff})은 표면 재결합 속도 (S_{eff})와 벌크 반송자 수명 (τ_{bulk})에 영향을 받는다 [10,11].

$$S_{eff} = \frac{W}{2} \left(\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_{bulk}} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 W 는 시료의 두께를 의미하며 측정된 모든 시료가 충분히 높은 τ_{bulk} 의 값을 가진다고 가정하면 τ_{eff} 이 높을수록 S_{eff} 가 작아짐을 알 수 있다. 그러므로 표면에서의 반송자들의 재결합이 적은 굴절률 2.2의 실리콘 질화막이 이층 반사방지막 구조의 하부 층으로 적합하다고 여겨진다. 외부로부터 태양전지에 입사되는 빛의 일부는 표면 반사방지막에 흡수되어 반송자의 생성에 기여하지 못한다. 이러한 흡수의 정도는 반사방지막의 소광계수를 측정함으로써 알 수 있다. 물질이 빛을 흡수하는 정도를 나타내는 흡광계수는 소광계수와 다음과 같은 관계에 있다 [12].

$$\alpha = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) k \quad (3)$$

식 (3)에서 α 는 흡광계수, k 는 소광계수, λ 는 파장을 의미하며 소광계수와 흡광 계수가 비례함을 알 수 있다. 즉 소광계수가 높을수록 외부로부터 입사된 빛이 표면 반사방지막에서 흡수되는 정도가 많아 태양전지 내부로 들어와야 할 빛의 손실로 작용하기 때문에 소광계수가 낮은 실리콘 질화막이 광학적 특성이 우수하여 이층 반사방지막의 상부 층으로 사용하기 적합하다.

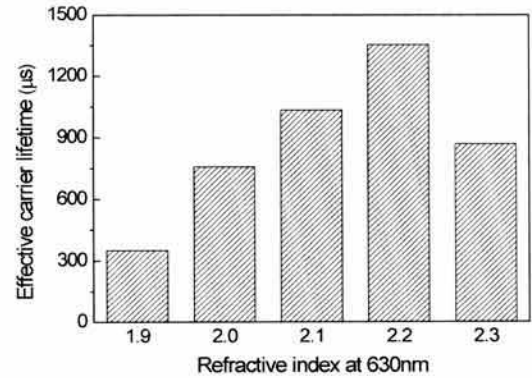


Fig. 3. Effective carrier lifetime for SiN_x:H-deposited silicon wafer as refractive index change.

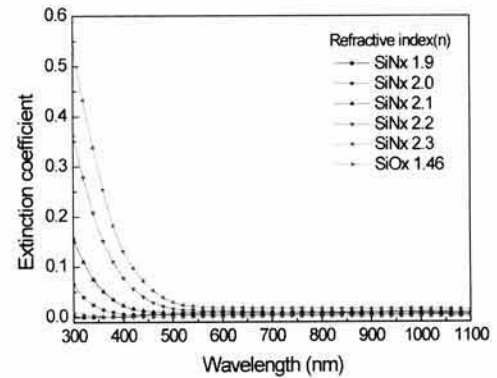


Fig. 4. Extinction coefficient spectra of SiN_x:H and SiO_x on silicon wafer with $n = 1.9 \sim 2.3$ and 1.46, respectively.

그림 4는 300~1,100 nm 파장 범위에서 다양한 굴절률을 가진 실리콘 질화막과 실리콘 산화막의 소광계수를 보여준다. 실리콘 질화막은 굴절률이 2.3일 때 가장 높은 소광 계수 값을 가지며 굴절률이 감소할수록 소광 계수도 감소하는 경향을 보인다. 굴절률이 1.9일 때 소광계수가 0에 가까운 낮은 값을 가지며, 실리콘 산화막의 경우도 소광 계수가 300~350 nm를 제외한 전 파장 범위 내에서 굴절률 1.9의 실리콘 질화막보다 더 낮은 값을 가지기 때문에 실리콘 산화막 또한 이층 구조의 반사방지막의 상부 층으로 적합하다. SiN_x/SiN_x 구조의 두께에 따른 반사도를 알아보기 위하여 반사방지막의 하부 층으로는 좋은 패시베이션 특성을 가진 굴절률이 2.2인 실리콘 질화막을 사용하였고, 상부 층으로는 소광 계수가 낮은 굴절률 1.9인 실리콘 질화막을 사용하였다. 일반적인 결정질 실리콘 태양전지는 굴절률 2.0의 80 nm의 두께를 가

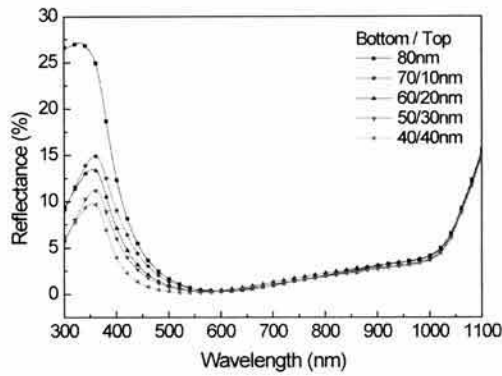


Fig. 5. Reflectance of single layer SiN_x:H and various thicknesses of double layer with SiN_x/SiN_x.

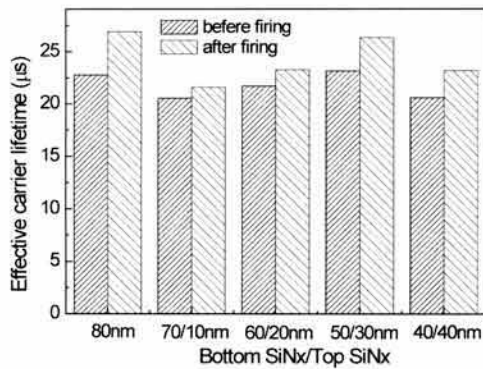


Fig. 6. Carrier lifetime of silicon wafer with various thickness of SiN_x/SiN_x layer before and after firing.

진 단층 실리콘 질화막을 사용하기 때문에 이를 기준으로 하여 굴절률 2.2인 실리콘 질화막을 70 nm의 두께에서 10 nm씩 줄어가며 40 nm 두께까지 증착하였고, 이와 반대로 굴절률 1.9인 실리콘 질화막은 10 nm의 두께에서 10 nm씩 늘려가며 40 nm 두께까지 증착하여 굴절률이 서로 다른 두 실리콘 질화막의 두께의 합이 80 nm가 되게 하였다. 그 결과 그림 5에 나타난 것과 같이 SiN_x/SiN_x 구조가 단층 구조의 실리콘 질화막보다 580 nm이하의 단파장 영역 내에서 더 낮은 반사도를 보였다. 또한 이중 반사방지막 구조의 상부층으로 사용된 굴절률 1.9인 실리콘 질화막의 두께가 10 nm부터 40 nm까지 증가할수록 반사도가 낮아지는 경향을 나타냈다.

실리콘 질화막을 이중으로 증착했을 때 반사도 측면에서는 40/40 nm의 이중 반사방지막 구조가 가장 우수하지만 그림 6에서 유효 반송자 수명이 고온의

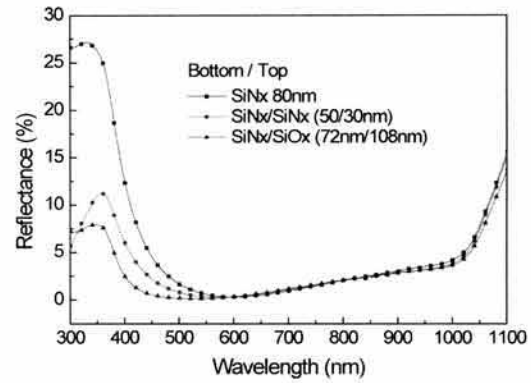


Fig. 7. Reflectance of SiN_x:H, SiN_x/SiN_x and SiN_x/SiO_x-coated silicon wafer.

Table 3. Refractive index and weighted reflectance of SiN_x, SiN_x/SiN_x, and SiN_x/SiO_x-deposited silicon wafer.

	Refractive index	Weighted reflectance(%)
SiN _x	2.0	4.7
SiN _x /SiN _x	2.2/1.9	3.9
SiN _x /SiO _x	2.2/1.46	3.4

소성 공정 전·후 모두 50/30 nm의 구조에서 가장 높은 값을 가지며 40/40 nm 구조에서는 하락하였기 때문에 패시베이션 특성을 고려하면 서로 다른 굴절률을 가진 실리콘 질화막으로 구성된 이중 반사방지막 구조로는 50/30 nm가 적합하다고 여겨진다.

그림 7은 SiN_x/SiN_x (50/30 nm) 구조와 SiN_x/SiO_x (72/108 nm) 구조 그리고 SiN_x (80 nm) 구조의 반사도 차이를 보여준다. 이중 반사방지막의 상부 층으로 실리콘 산화막을 사용했을 경우 굴절률 1.9인 실리콘 질화막보다 320~600 nm의 단파장 영역과 900~1,100 nm의 장파장 영역 내에서 더 낮은 반사도가 관찰됐다. 또한 두 가지 이중 반사방지막 구조 모두 단층 반사 방지막보다 단파장 영역과 장파장 영역에서 더 낮은 반사도를 보였다. 외부로부터 입사되는 태양광은 각 파장에 따른 방사 조도가 다르다. 이러한 점이 고려된 반사도를 weighted reflectance라고 부른다.

표 3은 위의 세 가지 구조에 대한 weighted reflectance를 300~1,100 nm 파장 범위 내에서 수치화시켜 나타냈다. 그림 7에서 나타난 경향과 동일하게 단층 SiN_x의 weighted reflectance가 4.7%로 가장

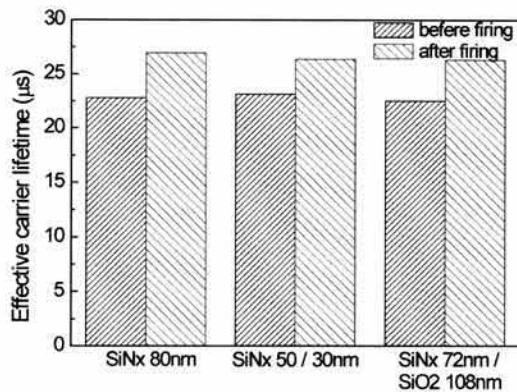


Fig. 8. Carrier lifetime of SiN_x:H, SiN_x/SiN_x and SiN_x/SiO_x - coated silicon wafer before and after firing.

Table 4. Electrical characteristics for the crystalline silicon solar cells with various anti-reflection coatings.

	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
SiN _x /SiO _x (3 aver.)	631.5	35.53	78.57	17.63
SiN _x /SiN _x (3 aver.)	630.0	35.41	78.45	17.50
SiN _x (3 aver.)	626.3	35.30	78.70	17.40

높고 SiN_x/SiO_x 구조가 3.4%로 가장 낮음을 확인할 수 있다.

그림 8은 SiN_x, SiN_x/SiN_x, SiN_x/SiO_x 세 가지 구조의 유효 반송자 수명을 나타낸다. MCD가 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 에서 단층 SiN_x의 유효 반송자 수명은 22.8 μs이고 SiN_x/SiN_x와 SiN_x/SiO_x의 유효 반송자 수명은 각각 23.1 μs와 22.5 μs로 큰 차이가 없었다. 고온의 소성 공정 후의 유효 반송자 수명 역시 각각 26.9 μs, 26.4 μs, 26.3 μs로 큰 변화는 관찰되지 않았다. 선행 실험에서 굴절률 2.2인 실리콘 질화막이 굴절률 2.0인 실리콘 질화막보다 유효 반송자 수명이 높기 때문에 굴절률 2.2의 실리콘 질화막을 하부 층으로 사용한 이중 반사방지막 구조가 굴절률 2.0인 실리콘 질화막을 사용한 단층 반사방지막 보다 유효 반송자 수명이 높게 나타날 것이라고 예상했지만 박막 증착 공정을 두 번 진행하는 이중 반사방지막 구조는 공정 중의 플라즈마 데미지에 의해서 반송자 수명이 일정 부분 감소하여 굴절률 2.0인 실리콘 질화막이 증착된 구조와 비슷한 유효 반송자 수명이 측정됐다고 생각된다.

표 4는 SiN_x, SiN_x/SiN_x, SiN_x/SiO_x 세 조건의 반

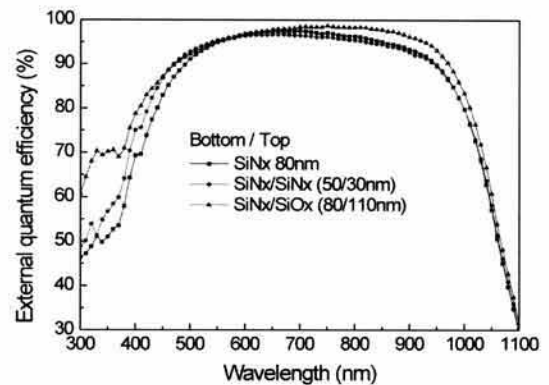


Fig. 9. External quantum efficiency of crystalline silicon solar cell deposited with SiN_x:H, SiN_x/SiN_x and SiN_x/SiO_x as anti-reflection coating.

사방지막으로 제작된 태양전지의 전기적 특성을 나타냈다. SiN_x가 단층으로 증착된 태양전지보다 SiN_x/SiN_x와 SiN_x/SiO_x의 이중 반사방지막을 적용한 태양전지의 변환 효율의 평균값이 각각 0.1%, 0.23% 더 높게 측정됐다. 이는 단파장 영역에서의 반사손실이 줄어들어 태양전지 내부로 흡수되는 빛이 증가하여 광에 의해 생성되는 반송자의 수가 증가했기 때문이라고 여겨진다. 이것은 그림 9에 나타난 단파장 영역에서의 상대적으로 높은 양자 효율과 35.30 mA/cm²에서 35.53 mA/cm²으로 향상된 전류 밀도의 증가로도 뒷받침될 수 있다.

4. 결론

실리콘 질화막 (SiN_x)과 실리콘 산화막 (SiO_x)을 사용하여 SiN_x, SiN_x/SiN_x, SiN_x/SiO_x의 세 가지 구조를 적용한 결정질 실리콘 태양전지를 제작하였다. 이중 반사방지막의 하부 층으로는 패시베이션 특성이 좋은 굴절률 2.2인 실리콘 질화막을 사용하였고 상부 층으로는 우수한 광학적 특성을 가진 굴절률 1.9인 실리콘 질화막과 굴절률 1.46인 실리콘 산화막을 사용하였다. 이중 반사방지막 구조는 단층 반사방지막 구조에 비해 반사손실이 적고 특히 단파장 영역에서의 반사도가 낮기 때문에 태양전지에 흡수되는 빛의 양이 증가한다. 그 결과 단층 실리콘 질화막이 증착된 태양전지에 비해 SiN_x/SiN_x 구조는 V_{oc}가 3.7 mV, J_{sc}가 0.11 mA/cm² 만큼 상승하였고 SiN_x/SiO_x 구조는 V_{oc}가 5.2 mV, J_{sc}가 0.23 mA/cm² 증가하였다. 그로 인해 변환 효율 역시 각각 0.1%, 0.23%씩 향상되었다.

SiN_x/SiO_x 구조로 된 태양전지는 SiN_x/SiN_x의 구조로 된 태양전지보다 더 우수한 전기적 특성을 보인다. 하지만 SiN_x/SiN_x 구조는 태양 전지 제작에서 있어서 기존 생산 라인에서의 추가적인 공정 설비가 필요 없기 때문에 공정의 단순화와 비용적 측면에서 이점이 있어 두 구조 모두 향상된 태양전지 제작을 위한 공정에 적합하다고 여겨진다.

REFERENCES

- [1] I. G. Kavakli and K. Kantarli, *Turk. J. Phys.*, **26**, 349 (2002).
- [2] M. Ohring, *Materials Science of Thin Films*, 2nd ed. (Academic Press, San Diego, 2001) p. 568-569.
- [3] S. J. Fang, W. Chen, T. Yamanaka, and C. R. Helms, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2837 (1996).
- [4] M. A. Green, *Solar Cells Operating Principles, Technology, and System Applications*, (Prentice-hall, New Jersey, 1982) p. 161-165.
- [5] C. Chen, Y. Lin, C. Lai, C. Kuo, and S. Ho, *IEEE Photo. Spec. Conf.*, *37th*, 2133 (2011).
- [6] W. Soppe, H. Rieffe, and A. Weeber, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, **20**, 551 (2005).
- [7] S. K. Dhungel, J. Yoo, K. Kim, S. Jung, S. Ghosh, and J. Yi, *J. Korean Phys. Soc.*, **49**, 885 (2006).
- [8] F. Duerinckx and J. Szlufcik, *Sol. Energ. Mat. Sol.*, **C72**, 231 (2002).
- [9] B. Kumar, T. B. Pandian, E. Sreekiran, and S. Narayanan, *IEEE Photo. Spec. Conf. 31st*, 1205 (2005).
- [10] M. J. Kerr and J. Schmidt, A. Cuevas, *Semicond. Sci. Tech.*, **16**, 164 (2001).
- [11] J. Seiffe, L. Gautero, M. Hofmann, J. Rentsch, and R. Preu, *J. Appl. Phys.*, **109**, 034105 (2011).
- [12] K. D. Lee, S. S. Dahiwal, Y. D. Kim, S. Kim, S. Bae, S. Park, S. J. Tark, and D. Kim, *Curr. Appl. Phys.*, **13**, 241 (2013).