

n형 양면 결정질 실리콘 태양전지의 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ 이중층 영향에 관한 연구

박형기^{1,2)*} · 박진주³⁾ · 이준신⁴⁾

¹⁾재생에너지학과, 사마르칸트 국제 기술 대학, 사마르칸트, 140110

²⁾기초과학연구소, 군산대학교, 군산, 54150

³⁾에너지융합공학과, 청주대학교, 음성, 27739

⁴⁾정보통신대학, 성균관대학교, 수원, 16419

Effect on the Double Stacked $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ Layers for n-type Bifacial Crystalline Silicon Solar Cells

Hyeong Gi Park^{1,2)*} · Jinjoo Park²⁾ · Junsin Yi³⁾

¹⁾Department of Renewable Energy, Samarkand International University of Technology (SIUT), Samarkand, 140110, Republic of Uzbekistan

²⁾The Institute of Basic Science, Kunsan National University, Gunsan, 54150, Korea

³⁾Department of Energy Convergence, Cheongju University, Eumseong, 27739, Korea

⁴⁾College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea

Received August 30, 2024; Revised September 13, 2024; Accepted September 19, 2024

ABSTRACT: This study explored the effect of double-stacked $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ layers on the passivation quality of n-type bifacial crystalline Si solar cells. SiO_x layers were deposited via PECVD under various conditions on n-type silicon wafers with a boron emitter. These layers were capped with SiN_x and thermally treated to optimize the passivation. The optimal conditions resulted in a minority-carrier lifetime of 268 μsec and an implied V_{OC} of 692 mV. The optimized SiO_x layer had a low interface defect density and high fixed negative charge. When applied to n-type solar cells, the $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ stack improved the performance, achieving a V_{OC} of 646 mV, J_{SC} of 39.3 mA/cm^2 , FF of 78.06%, and efficiency of 19.82%, demonstrating the potential for higher efficiency in n-type silicon solar cells.

Key words: n-type silicon, Passivation, $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ layers, PECVD, Solar cells, Minority carrier lifetime

Subscript

Shockley-Read-Hall (SRH)

Silicon nitride (SiN_x)

Silicon oxide (SiO_x)

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

Interface defect density (D_{it})

Boron-silicate-glass (BSG)

BSF (back surface field)

Metal-Insulator-Semiconductor (MIS)

Flat band voltage (V_{FB})

1. 서론

태양광을 흡수하여 전기를 생산하는 태양전지는 4차 산업

혁명 시대에 주목받고 있는 신재생에너지원이다. 결정질 실리콘 기반의 태양전지는 여전히 큰 비중을 차지하며 우수한 성능과 신뢰성을 담보하고 있으며 많은 연구그룹이 고효율 실리콘 태양전지에 대해 활발히 연구하고 있다¹⁻⁴⁾. 결정질 실리콘 기반의 태양전지는 광 흡수, 전하 생성, 분리 및 수집의 과정을 통해 전기 에너지를 얻는데 이러한 일련의 과정에서 우리가 고려해야 할 요소로는 재결합(Recombination)이다⁵⁾. 태양전지의 재결합은 전도대역에서 떠돌던 전자가 준안정상态(meta-stable state)로 있다가 최종적으로 valence band의 더 낮은 에너지 준위로 떨어지는데 이때 전자가 valence band로 떨어져 되돌아가면 그 결과로 정공 하나가 제거되는 과정을 의미한다. 이러한 재결합은 개방전압(Open-circuit voltage)을 포함해 전체적인 소자 성능 저하로 이어질 수 있으며 Radiative, Auger 그리고 Shockley-Read-Hall (SRH)와 같은 3가지의 재결합 매커니즘에 의한 것으로 볼 수 있다⁶⁾. 벌크 재결합 과정 외에도 표면 재결합이 있으며 주로 금속 전극과 실리콘 사이의 직접적으로 접

*Corresponding author: hspark007@gmail.com

© 2024 by Korea Photovoltaic Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

촉하는 영역과 경계면에서 일어날 수 있으며 무엇보다 중요한 것은 재결합 손실을 최소화하는 것이다.

벌크 외에도 표면에서의 재결합을 줄이려면 passivation 특성이 뛰어난 박막을 활용하는 것이 중요하다. 주로 사용하는 박막은 Silicon nitride (SiN_x)로 반사방지막과 passivation에 활용하는데 전기적, 광학적으로 우수한 특성과 함께 SiN_x 박막은 주로 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)로 증착하고 있다⁷⁻¹⁰. 이번이 우리가 제작하려는 태양전지는 주로 n-type 웨이퍼 기판을 활용해 진행할 예정인데, 전면에 boron emitter를 형성하게 되면 positive charge를 가지는 SiN_x는 활용에 적합하지 않다. 이는 전면에서 minority carrier인 정공을 수집해야 하는데, positive charge를 가진 SiN_x를 사용할 경우 정공 수집이 어려워져 재결합이 증가하여 open-circuit voltage (V_{OC})과 Short-circuit current density (J_{SC})가 감소하여 결과적으로 효율 저하로 이어진다. 따라서 p-type의 boron emitter 표면에 negative charge를 가진 다른 passivation 물질을 사용하는 것이 필요하다. 많은 연구에서 boron emitter에 대해 negative charge를 가지는 Al₂O₃를 사용한 passivation의 효과가 검증되었는데 Al₂O₃는 높은 표면 전하 밀도와 우수한 passivation 특성으로 인해 p-type boron emitter에서의 효율 향상에 기여하는 것으로 보고되고 있다¹¹⁻¹³. 그러나 Al₂O₃를 기반의 passivation에 초점을 맞추면서 열적 안정성, 계면 품질과 수소화 한계 및 증착 과정의 복잡성은 성능저하를 비롯해 공정 시간 소요라는 단점을 가지고 있다. 그래서 이번 연구는 SiO_x/SiN_x의 이중 구조를 통해 passivation 특성 향상을 도모하고자 하는데 다양한 플라즈마 전력 조건에서 높은 안정성과 효과적인 passivation을 동시에 제공하는 것을 목표로 하며, 기존의 Al₂O₃ 기반 연구와의 차별성을 강조할 수 있어 p-type emitter의 passivation에 적합한 SiO_x 박막을 증착하여 특성 분석 및 최적화 연구를 수행하고자 한다.

2. 실험방법

SiO_x 박막을 증착하고자 13.56 MHz의 RF source가 장착된 PECVD를 활용하여 진행하였다. 단일박막 증착은 전력 100~300 W, 증착 온도 400°C, SiH₄ 가스 15 sccm, N₂O 가스를 100~500 sccm 범위까지 가변하였으며 공정 압력은 1 Torr를 고정하였다. 우선 (100) 방향의 n-type 반도체급 웨이퍼를 준비하여 표면의 유기, 무기 오염물을 제거하고자 RCA cleaning을 진행했으며 이후 HF 용액에 처리하여 native oxide를 제거한다. PECVD 챔버에 기판을 loading하여 SiO_x를 증착하였다. 증착 진행을 하기에 앞서 챔버를 NF₃ 가스를 이용해 pre-cleaning을 실시하고 이어서 pre-deposition을 통해 챔버 분위기를 형성한다. 박막 증착이 완료된 시료를 이용해 엘립소미터를 활용하여 시간에 따른 두께를 분석하여 증착을 확인 및

타겟 두께에 대한 굴절률을 확인하고자 630 nm의 파장길이를 기준으로 엘립소미터를 활용해 굴절률을 분석하였다. 박막의 charge와 계면의 defect density (D_{it})를 확인하기 위해 Thermal evaporator로 알루미늄을 증착하여 상온 상태에서 gate bias의 sweep을 +10 V ~ -10 V의 범위에서 고주파 C-V를 측정하였다. D_{it}는 다양한 주파수를 인가하여 capacitance-voltage를 측정하고 계면 결함 상태가 주파수에 어떻게 반응하는지를 전하의 트랩 반응을 통해 분석할 수 있다. 이때 아래와 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$D_{it} = \frac{C_{ox}}{q} \left(\frac{\Delta C}{\Delta V} \right)$$

여기서, C_{ox}는 산화막의 capacitance, q는 전자의 전하, ΔC는 C-V 곡선에서 나타나는 커패시턴스 차이, ΔV는 전압 차이를 의미한다. 이러한 방법을 통해 D_{it}를 추정할 수 있으며 SiH₄/N₂O gas ratio 변수에 대해 최적화를 확인하고자 RF 전력에 대한 박막의 charge와 D_{it}를 분석하여 최적화를 한 다음, SiN_x, Al₂O₃ 및 SiO_x 박막의 D_{it}를 비교 분석하였다.

태양전지 제작을 위한 구조 및 순서는 Fig. 1과 같이 진행했다. 준비된 (111) 방향의 n-type crystalline silicon (c-Si) wafer를 RCA cleaning을 실시한 다음, saw damage로 인한 웨이퍼 표면을 제거하고자 8% NaOH 용액을 80°C에서 2분간 진행한다. 이후 wafer 표면에 반사도를 줄이기 위해 식각용액에 IPA (iso-propyl alcohol) 첨가하는데 이는 texturing 공정 과정에서 발생하는 기포가 wafer 표면에 달라붙어 식각을 방해하기 때문이다. BBr₃ 소스를 이용하여 도핑 장비에서 불순물을 주입하여 junction을 형성하는데 이때 확산 공정에 따른 wafer의 표면에 BBr₃와의 반응으로 인해 Boron-silicate-glass (BSG)가 형성되는데 이들 박막은 불순물의 농도가 굉장히 높기 때문에 photon에 의해 형성된 전자 및 정공쌍의 재결합 속도를 높인

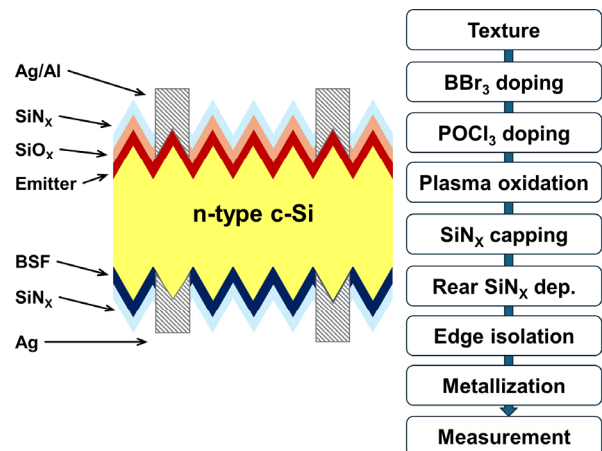


Fig. 1. The schematic of n-type bifacial silicon solar cells

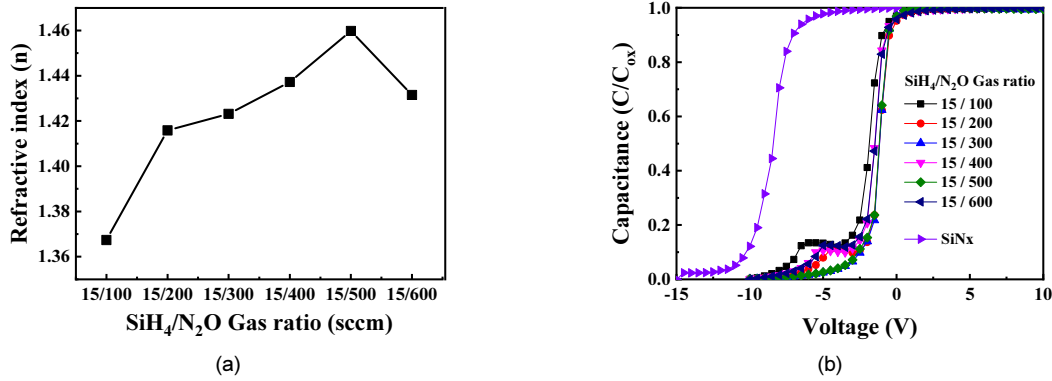


Fig. 2. (a) Refractive index and (b) Capacitance-voltage curves as a function of $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ gas ratio. We measured SiNx sample compared to the interface defect density of SiO_x samples

다. 그리고 p-n 접합에서 전자와 정공이 재결합하지 않고 각각의 전극으로 잘 이동해야 하는데 전자들이 정공과 재결합하여 전기적 손실 때문에 BSF (back surface field)를 형성해야 한다. 이 때 POCl_3 를 이용해 후면 전계를 형성하지만 불순물 주입 과정에서 PSG (Phosphorous-silicate-glass)를 유발하며 BSG와 PSG를 제거하려면 HF dipping 및 SC-1 cleaning을 진행한다. 입사하는 광을 효과적으로 흡수하기 wafer 표면의 최적 pyramidal 구조와 반사 방지막이 필요하다. 실리콘 태양전지에서는 실리콘과 공기와의 굴절률을 감안했을 때 반사율을 최소화하면서 표면 passivation 역할을 할 수 있는 박막을 주로 SiNx 를 사용하고 있는데 boron emitter의 negative charge를 띄는 우수한 passivation 특성을 가지는 SiO_x 박막 10 nm를 하부에 적용하고자 증착하였다. 상부에는 굴절률 2의 SiNx 박막을 75 nm로 증착했고 후면 passivation을 위해 SiNx 박막을 증착하였다. 양면 bifacial solar cell을 완성하고자 스크린 프린팅으로 전면 Ag/Al 전극으로 Ag를 먼저 진행하고서 이후 Al을 그 위에 인쇄하여 전극을 형성하였다. 이후 후면에는 Ag만을 이용한 전극을 형성하여 180°C belt furnace에서 firing 공정을 진행했으며 이를 통해 solar cell의 특성을 분석하였다. Ag/Al 사용은 소자의 효율성, 안정성을 향상시키는 것으로 Ag는 높은 전도성으로 전류를 효과적으로 수집하는 것, Al은 저가 및 전극의 기계적 강도 보강을 하기 위해 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

$\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ gas ratio가 증가함에 따라 0.423 nm/sec에서 0.225 nm/sec로 증착율이 감소하는 경향과 함께 N_2O 600 sccm에서는 0.223 nm/sec로 증착율이 saturation 되는 것을 관찰하였다. 이러한 증착율 감소는 N_2O 농도의 증가로 인해 실리콘 공급원이 상대적으로 부족 및 산화 반응이 우세해짐에 따라 실리콘의 증착이 감소하고 SiO_x 형성이 주로 이루어진 것으로 사료된다¹⁴⁾. 특정 농도 이상에서는 표면 반응이 포화 상태에 이

르러 추가적인 N_2O 농도가 증착율에 큰 영향을 미치지 않으며, 이는 플라즈마 내 전자 밀도 변화와 실리콘 산화물 형성 속도의 제한적 요인에 기인한 것으로 판단된다¹⁵⁾. 10 nm의 두께로 증착된 SiO_x 박막의 굴절률을 확인하였는데 N_2O 유량 증가에 따른 굴절률 증가와 함께 500 sccm에서 1.46의 굴절률을 나타내며 600 sccm에서는 1.43으로 굴절률이 약간 감소하였다 (Fig. 2(a)). 이는 N_2O 유량 증가로 인해 박막 내 산소 함량이 증가하여 SiO_x 의 구조가 더 조밀해지고 그에 따라 굴절률이 상승한 것으로 해석된다¹⁶⁾. 그러나 600 sccm에서는 과도한 산화로 인해 박막의 구조 내 산소 농도의 불균일성이 증가하였고, 이로 인해 박막의 밀도 저하와 함께 굴절률이 다시 감소한 것으로 판단된다.

N_2O 에 따라 증착된 SiO_x 샘플은 Thermal evaporator를 이용해 알루미늄을 증착하여 1.0 MHz에서의 Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) 구조로 C-V 측정을 통해 C-V curve와 막이 가지는 D_{it} 를 계산하여 Fig. 2(b)와 같이 나타내었다. 기존 SiNx 와 비교하였을 때 SiO_x 는 비교적 negative charge region에 위치해 있는데 N_2O 500 sccm의 조건에서 가장 낮은 수준의 D_{it} 인 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 의 값을 보였고 600 sccm에서는 오히려 증가하는 경향을 보였다. 이는 N_2O 농도의 증가로 인해 SiO_x 박막의 화학적 조성 및 계면 특성이 변화함에 따라 계면 결함 밀도가 증가하였기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 SiO_x 박막의 passivation 성능이 N_2O 농도에 민감하게 영향을 받음을 시사한다.

최적화된 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ gas ratio (15/500) 조건을 통해 실리콘 표면의 damage를 최소화하면서 passivation 효과를 가지는 조건을 찾자 RF 전력 100~300 W로 가변하여 C-V를 측정한 결과를 Fig. 3과 같이 나타냈다. 100 W에서 200 W로 전력이 증가함에 따라 음의 flat band voltage (V_{FB})를 보였으나 300 W에서는 0.4 V의 V_{FB} 로 negative charge region으로 shift되는 것을 확인하였다. 전력 증가와 함께 plasma 발생에 따른 실리콘 표면과의 반응으로 인해 damage가 발생하여 계면에서의 defect에

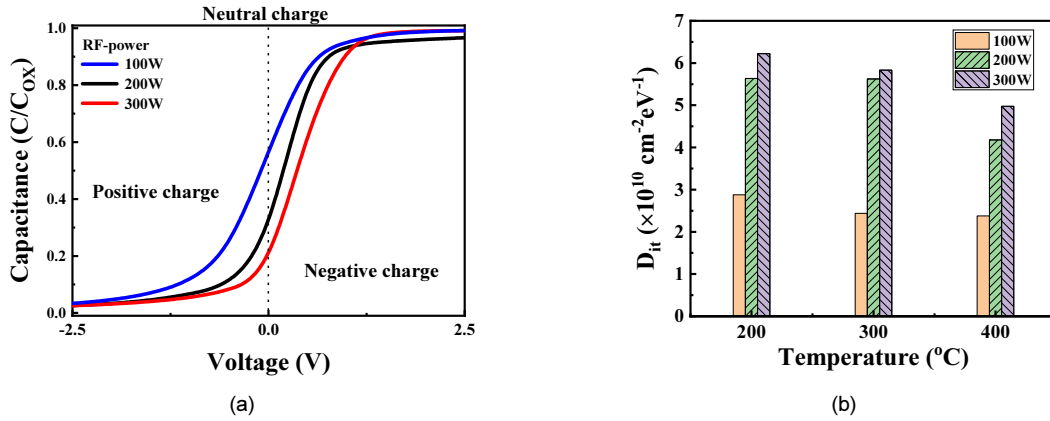


Fig. 3. (a) C-V curve and (b) interface defect density (D_{it}) as a function of RF-power

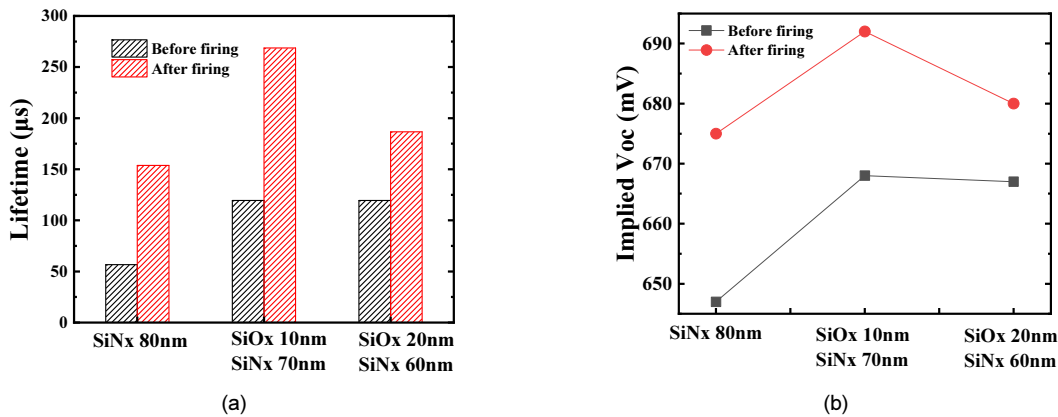


Fig. 4. (a) minority carrier lifetime and (b) implied open-circuit voltage (iV_{oc}) of SiNx and SiO_x thin films before and after firing

영향을 주는데 300 W의 높은 전력임에도 불구하고 SiNx와 비교했을 때 10배 차이의 defect이 덜 발생되는데 SiNx의 경우 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 이며 300 W는 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 의 수준으로 낮은 값을 알 수 있다. SiO_x 박막이 실리콘 기반 태양전지의 전면 passivation 층으로서 높은 전력 조건에서도 안정적인 성능을 제공할 수 있음을 의미한다.

Fig. 3(b)는 기판 온도에 따른 플라즈마 전력조건에서 측정된 D_{it} 의 변화를 나타낸 것이다. 200 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 W는 $2.88 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 에서 전력이 증가할수록 D_{it} 값이 증가하는 경향을 보였는데 300 W에서 $6.22 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 로 나타났다. 이는 플라즈마 전력 상승에 따른 전하 트랩 활성화가 증가한 것으로 해석된다. 300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 W에서 $2.44 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 200 W와 300 W는 각각 $5.62 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, $5.83 \times 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 로 D_{it} 값 차이는 상대적으로 적게 나타났는데 이는 중간 온도에서의 플라즈마 전력에 의한 영향이 일정 수준 이상에서 포화되는 현상이 있음을 해석할 수 있으며 400 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 D_{it} 값이 전반적으로 낮아지는 경향을 보였는데 이는 고온에서 열적 효과가 인터페이스 결함 밀도를 줄이는데 기여했을 것으로 보고 있다. 플라즈마 전력의 증가는 D_{it} 의 상승을 유도하지만, 고온 조건에서는 상대적으로 낮은 D_{it} 값이 관찰되었는데 고온 열처리와

플라즈마 전력 조건의 조합이 인터페이스 결함 밀도에 중요한 영향을 미치며, 특히 고온에서 열적 효과가 passivation 특성 향상에 기여할 수 있음을 보여준다.

기존의 결정질 실리콘 태양전지에서는 SiNx 혹은 SiO_x 박막을 passivation 층으로 사용하여 태양전지의 성능을 향상시키는 연구가 진행중인데 SiO_x/SiNx를 적층하여 post-annealing을 통해 개선된 passivation 효과를 Fig. 4에 나타냈다. Passivation 특성을 확인하기 위해 n-type의 solar grade wafer의 양쪽 면에 증착하여 865 $^{\circ}\text{C}$ 에서 post-annealing을 진행하고 quasi-steady-state photoconductance (QSSPC)를 통해 측정하여 lifetime 및 implied V_{oc} 를 비교 분석하였다. SiNx 80 nm의 단일 박막을 증착하여 56.8 μsec 이지만 post-annealing 후 lifetime은 153.8 μsec 로 약 3배가량 개선되었으며 SiO_x 10 nm/SiNx 70 nm 샘플에서 post-annealing 후 lifetime은 268.72 μsec 이며 SiO_x 20 nm/SiNx 60 nm 구조의 샘플을 post-annealing 하고서 측정한 lifetime은 186.65 μsec 의 결과를 얻었으며 세 종류의 샘플 모두 post-annealing 하였을 때 lifetime이 개선되는 것을 알 수 있다.

Implied V_{oc} 의 경우도 SiO_x 10 nm/SiNx 70 nm 샘플에서도 post-annealing 하기 전 668 mV에서 post-annealing 후 692 mV로 증가하는 것을 확인하였는데 이는 Passivation이 향상되는

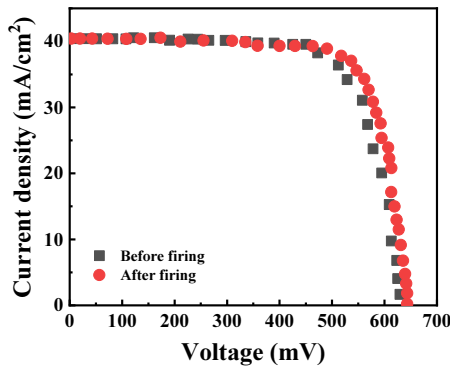


Fig. 5. Current-voltage curve of n-type bifacial crystalline silicon solar cells

구조 SiO_x 10 nm/ SiN_x 70 nm가 개방전압이 개선되는 것을 확인하였고 이를 바탕으로 n-type c-Si 기판을 준비하여 전면에는 앞서 언급한 적층 구조를 후면에는 BSF와 SiN_x 구조를 활용하여 태양전지를 제작하였고 post-annealing 전후에 대한 결과를 Fig. 5과 같이 비교하였다. post-annealing 전 태양전지의 특성은 V_{oc} 627 mV, J_{sc} 39.1 mA/cm², FF 74.6%로 18.38%의 변환효율을 보였다. 최적화된 post-annealing 온도를 이용한 태양전지의 특성은 V_{oc} 646 mV, J_{sc} 39.3 mA/cm², FF 78.06%로 19.82%의 변환효율을 나타냈다. 결과적으로 SiO_x 10 nm/ SiN_x 70 nm 구조가 post-annealing과 함께 passivation으로 인해 개방전압 개선 효과가 있음을 알 수 있는데 전면의 negative charge를 가지는 SiO_x 의 전계 효과로 인한 것이다. 구체적으로 SiO_x 의 fixed negative charge가 정공과 인장력을 형성하여 정공은 전극으로 수집되고 전자는 반발력에 의해 후면으로 이동하면서 전자-정공 재결합이 줄어들어 전하수집율이 증가하게 되고 그 결과로 인해 약간의 전류 개선 및 전압 증가 효과를 나타낸다. 또한 post-annealing 후 특성이 향상된 이유는 SiO_2 내의 fixed charge 농도가 증가하여 전계 효과가 더욱 강화되기 때문인데 이는 전자와 정공의 분리가 더욱 효율적으로 일어나 재결합이 억제되었기 때문이다.

4. 결론

태양전지의 전면 passivation 적용을 위해 PECVD를 통해 증착된 SiO_x 층을 적용하여 특성을 분석하고 최적화를 진행하였다. Boron emitter에 적용하기 위한 최적의 박막 특성을 확인하고자 SDR 공정을 거쳐 n-type 실리콘 웨이퍼의 양면에 $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ gas ratio 및 RF-power와 온도를 포함해 두께를 조정하여 $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ 를 각각 증착하고 열처리하여 lifetime과 iV_{oc} 를 비교 분석하였다. 실험 결과, SiH_4 15 sccm, N_2O 500 sccm의 gas ratio, 1Torr의 공정 압력, 300 W의 RF power 및 기판 온도 400°C에서 268 μsec 의 lifetime과 최고 692 mV의 implied V_{oc}

를 확인하였다. 최적화된 SiO_x 막은 10 nm 두께에서 5×10^{10} eV⁻¹cm⁻²의 낮은 D_{it} 특성을 나타내었으며, 측정된 1.24 V의 V_{FB} 로부터 $Q_f - 1.71 \times 10^{11}$ cm⁻²의 negative charge를 갖는 것을 확인하였다. n-type 태양전지 제작하여 전면 boron emitter의 passivation 층으로 적용하였는데 V_{oc} 646 mV, J_{sc} 39.3 mA/cm², FF 78.06%로 19.82%의 효율을 얻었다. 이번 연구에서 n-type 결정질 실리콘 태양전지의 전면 passivation층으로 plasma 기반의 negative charge SiO_x 층을 적용하여 개선된 passivation 특성을 활용하면 더 높은 효율의 태양전지를 제작할 수 있을 것으로 기대한다.

References

1. M. A. Fazal, S. Rubaiee, Progress of PV cell technology: Feasibility of building materials, cost, performance, and stability, Sol. Energy. 258, 203-219 (2023).
2. M. Lu, K. R. Mikeska, C. Ni, Y. Zhao, F. Chen, X. Xie, Y. Xu, C. Zhang, Screen-printable contacts for industrial N-TOPCon crystalline silicon solar cells, IEEE J. Photovolt. 12, 469-473 (2022).
3. S. W. Glunz, B. Steinhauser, J. I. Polzin, C. Luderer, B. Grübel, T. Niewelt, A. M. O. M. Okasha, M. Bories, H. Nagel, K. Krieg, F. Feldmann, A. Richter, M. Bivour, M. Hermle, Silicon-based passivating contacts: The TOPCon route, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 31, 341-359 (2021).
4. H. Ullah, S. Czapp, S. Szultka, H. Tariq, U. B. Qasim, H. Imran, Crystalline silicon (c-Si)-Based Tunnel Oxide passivated contact (TOPCon) solar cells: A review, Energies. 16(2), 715 (2023).
5. J. Zheng, Z. Ying, Z. Yang, Z. Lin, H. Wei, L. Chen, X. Yang, Y. Zeng, X. Li, J. Ye, Polycrystalline silicon tunnelling recombination layers for high-efficiency perovskite/tunnel oxide passivating contact tandem solar cells, Nat. Energy. 8, 1250-1261 (2023).
6. H. Lin, G. Wang, Q. Su, C. Han, C. Xue, S. Yin, L. Fang, X. Xu, P. Gao, Unveiling the mechanism of attaining high fill factor in silicon solar cells, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 32(6), 359-371 (2024).
7. A. G. Aberle, R. Hezel, Progress in low-temperature surface passivation of silicon solar cells using remote-plasma silicon nitride, Prog. Photovoltaics Res. Appl. 5(1), 29-50 (1997).
8. G. Krugel, A. Sharma, W. Wolke, J. Rentsch, R. Preu, Study of hydrogenated AlN as an anti-reflective coating and for the effective surface passivation of silicon, Phys. Status Solidi RRL. 7(7), 457-460 (2013).
9. J. A. Silva, S. Quozola, E. Hernandez, L. Thomas, F. Massines, Silicon carbon nitride films as passivation and antireflective coatings for silicon solar cells, Surf. Coat. Technol. 242, 157-163 (2014).
10. S. Tahir, R. Saeed, A. Ashfaq, A. Ali, K. Mehmood, N.

- Almoussa, E. A. Shokralla, R. R. Macadangdang Jr., A. H. Soeriyadi, R. S. Bonilla, Optical modeling and characterization of bifacial SiNx/AlOx dielectric layers for surface passivation and antireflection in PERC, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 32(2), 63-72 (2024).
11. J. Benick, B. Hoex, M. C. M. van de Sanden, W. M. M. Kessels, O. Schultz, S. W. Glunz, High efficiency n-type Si solar cells on Al₂O₃-passivated boron emitters, *Appl. Phys. Lett.* 92(25), 253504 (2008).
 12. B. Hoex, J. Schmidt, P. Pohl, M. C. M. van de Sanden, W. M. M. Kessels, Silicon surface passivation by atomic layer deposited Al₂O₃, *J. Appl. Phys.* 104, 044903 (2008).
 13. J. Y. Hyun, S. Bae, Y. C. Nam, D. Kang, S.-W. Lee, D. Kim, J. Park, Y. Kang, and H.-S. Lee, Surface passivation of boron emitters on n-type silicon solar cells, *Sustainability.* 11(14), 3784 (2019).
 14. V. A. Dao, V.-D. Nguyen, J. Heo, H. Choi, Y. Kim, N. Lakshminarayan, J. Yi, Effect of N₂O/SiH₄ flow ratios on properties of amorphous silicon oxide thin films deposited by inductively-coupled plasma chemical vapor deposition with application to silicon surface passivation, *Vacuum.* 84(3), 410-414 (2010).
 15. E. Gil, J.B. Park, J.S. Oh, G.Y. Yeom, Characteristics of SiO_x thin films deposited by atmospheric pressure chemical vapor deposition as a function of HMDS/O₂ flow rate, *Thin Solid Films.* 518, 6403-6407 (2010).
 16. W. Gleine, J. Müller, Low-pressure chemical vapor deposition silicon-oxynitride films for integrated optics, *Appl. Opt.* 31(12), 2036-2040 (1992).