

Ga₂O₃ 보호층이 적용된 수중 실리콘 태양전지의 광전 성능 및 계면 특성 분석

고성진*, 전서준*, 조예빈*, 조승희*, Md Ariful Rahman Barno*, 김준동*
인천대학교 전기공학과*

Analysis of Photovoltaic Performance and Interfacial Passivation in Ga₂O₃-coated Underwater Silicon Solar Cells

Seongjin Ko*, Seojun Jeon*, Yeban Cho*, Seunghee Cho*, Md Arifur Rahman Barno*, Joondong Kim*
Department of Electrical Engineering, Incheon National University*

Abstract - 본 연구에서는 Ga₂O₃ 보호층을 도입하여 수중 환경에서 실리콘(Si) 태양전지가 겪는 고질적인 계면 불안정성과 광학적 반사 손실을 동시에 개선하고 구동 신뢰성을 극대화하였다. 비정질 구조의 Ga₂O₃ 박막($n \approx 1.8-1.9$)은 물($n \approx 1.33$)과 실리콘 기판($n \approx 3.5$) 사이에서 단계적 굴절률 정합을 유도하여 계면 Fresnel 반사율을 크게 저감한다. 기판의 플라즈마 입자 충돌 손상(Plasma-induced damage)을 최소화하기 위해 저전력 RF 마그네트론 스퍼터링 공정으로 박막을 합성하였으며, 실험적인 두께 최적화를 통해 광학적·전기적 임계점인 20 nm를 도출하였다. 최적화된 보호층이 적용된 소자는 수중에서 최고 20.7%의 전력 변환 효율(PCE)을 달성하였으며, 이는 Bare Si 대조군 소자(19.1%) 대비 8.4%의 상대적인 성능 향상을 입증한 결과이다. 본 고찰은 외부 환경 요인에 대응할 수 있는 고성능·고신뢰성 수중 광전 플랫폼 설계를 위한 실질적인 공정 지표를 제공한 다.

1. 서 론

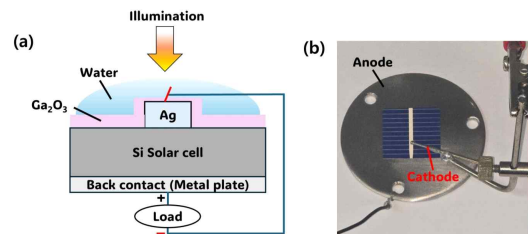
실리콘(Si) 태양전지는 높은 신뢰성을 바탕으로 광전소자 시장의 대부분을 점유하고 있으나, 광학적 반사 손실과 열화 현상에 따른 효율 저하라는 근본적인 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위한 대안으로 제시된 수중 태양광(UWPV) 기술은 물 매질이 공기와 실리콘 사이의 중간 단계 굴절률을 형성하여 자연적인 반사 방지 효과를 제공할 뿐만 아니라, 물의 높은 열전도성을 통한 자발적인 수냉 효과로 소자의 온도 상승을 억제할 수 있다. 그러나 수중 환경에서는 보호층이 없을 경우 실리콘 표면이 물과 직접 접촉하여 화학적 부식 및 전하 재결합을 가속화하는 계면 불안정성 문제가 수반된다. 본 연구에서는 이러한 수중 계면 문제를 해결하기 위해 약 4.8 eV의 광대역 밴드갭을 가지는 산화갈륨(Ga₂O₃) 보호층을 도입하였다. PC1D 시뮬레이션을 통해 물-Ga₂O₃-Si 구조의 반사 저감 및 전기적 특성 변화를 예측하고, RF 마그네트론 스퍼터링 공정을 기반으로 보호층 두께를 최적화하여 수중 광전 변환 효율과의 상관관계를 규명하고자 한다.

2. 본 론

2.1 소자 제작 및 실험 방법

본 실험에서는 상용 p-type 단결정 실리콘(Si) 태양전지 기판을 사용하여 수중 구동 소자를 설계하였다. 박막 증착에 앞서 기판 표면의 잔류 오염물을 제거하기 위해 아세톤, 메탄올, 증류수 순으로 각각 10분간 초음파 세척을 진행한 후 고압 질소(N₂) 가스로 건조하였다. 다기능 보호층으로 사용될 산화갈륨(Ga₂O₃) 박막은 PVD 방식의 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템(RF Magnetron Sputtering System)을 이용하여 실온에서 증착하였다. 챔버의 초기 기저 압력은 4.0×10^{-6} Torr 이하로 유지하였으며, 공정 중에는 고순도 Ar 가스(50 sccm)를 주입하여 5 mTorr의 작업 압력을 형성하였다. 실리콘 기판의 플라즈마 손상(Plasma-induced damage)을 최소화하면서 최적의 박막 품질

을 확보하기 위해 RF 전력은 75 W, 기판 회전 속도는 5 rpm으로 고정하였으며, 해당 조건에서의 증착률은 약 1.33 nm/min으로 확인되었다. 보호층의 전기적 특성을 평가하기 위해 FTO 기판 위에 동일 조건으로 Ga₂O₃ 박막을 증착하여 Hall 효과 측정(HMS-5300, Ecopia)을 수행하였고, 박막의 단면 두께와 비정질(Amorphous) 결정 구조는 각각 주사전자현미경(SEM)과 투과전자현미경(TEM) 회절 패턴을 통해 분석하였다. 수중 환경에서의 광학적 반사도(Reflectance)는 석영 수소(Quartz glass box)와 UV-Vis-NIR 분광광도계를 결합하여 300~1100 nm 파장 영역에서 측정하였다. 최종 제작된 소자의 수중 구동 개념도 및 실제 전기적 특성 평가를 위한 측정 시스템의 구성은 <그림 1>과 같다.



〈그림 1〉 수중 구동 실리콘 태양전지 소자의 (a) 개략도 및 (b) 전기적 특성 평가를 위한 실제 실험 측정 셋업

2.1.1 PC1D 시뮬레이션 모델링

실제 소자 제작에 앞서 물-Ga₂O₃-실리콘 구조의 물리적 타당성을 검증하기 위해 PC1D 수치 해석을 수행하였다. 계면 패시베이션 효과를 반영하기 위해 표면 재결합 속도(SRV)를 6.1 cm/s, 유효 수명을 2.1 ms로 설정하여 모델링을 진행하였으며, 상세한 구동 환경별 계산 및 실험 결과는 <표 1>에 구체적으로 비교 및 정리하였다.

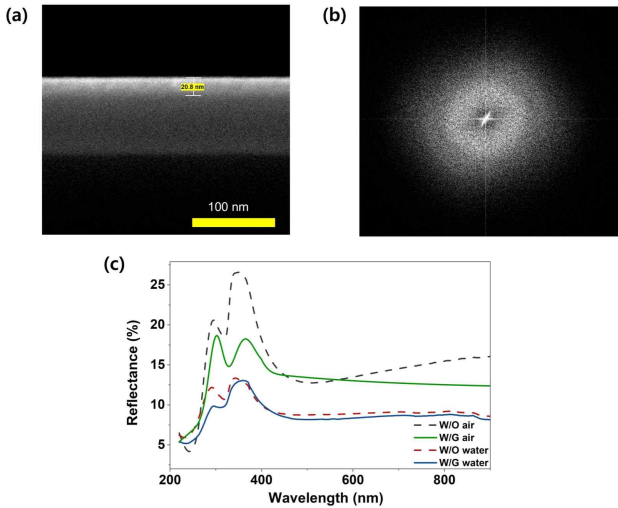
〈표 1〉 구동 환경 및 보호층 적용 여부에 따른 태양전지 소자의 광전 특성 비교

분류 (Source)	구동 조건 (Condition)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	PCE (%)
PC1D 수치해석 모델	Bare Si (대기 환경)	0.639	37.1	18.72
	Si (수중 환경)	0.641	38.1	19.34
	Si + Ga ₂ O ₃ (수중 환경)	0.645	39.0	20.04
본 연구 실험 데이터	Si (대기 환경)	0.587	46.51	17.8
	Si (수중 환경)	0.593	49.9	19.1
	Ga ₂ O ₃ 적용 소자 (수중 환경)	0.609	52.4	20.7

2.2 결과 및 고찰

RF 스퍼터링 공정 최적화 결과, 75 W의 저전력 영역에서 고 에너지 입자 충돌에 의한 플라즈마 손상이 효과적으로 억제되어 $46 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 의 최대 이동도를 기록하였다. 보호층의 구조적 특성을 규명하기 위해 수행한 단면 SEM 및 TEM 분석 결과는 <그림 2>에 나타내었다. 단면 SEM 분석을 통해 약 20 nm 두께의 보호층이 균일하게 형성됨을 확인하였고, TEM 전자 회절 패턴의 확산된 헤일로 링(Halo ring) 형태를 통해 박막이 비정질(Amorphous) 구조임을 규명하였다. 이러한 비정질 구조는 결정립계가 존재하지 않아 수증기 구동 시 외부 이온이나 수분의 침투 경로를 효과적으로 차단하는 물리적 장벽 역할을 수행하며, 표면 결함을 패시베이션하여 계면 재결합 손실을 억제한다.

광학적으로 물($n \approx 1.33$)- Ga_2O_3 ($n \approx 1.8\text{--}1.9$)-Si($n \approx 3.5$) 구조는 단계적 굴절률 정합을 형성하여 Fresnel 반사 손실을 극적으로 감소시킨다. <그림 2>의 반사도 스펙트럼 분석에서도 Ga_2O_3 보호층 적용 시 Bare Si 대비 전 파장 영역, 특히 자외선(UV) 영역에서 반사도가 효과적으로 억제되었다.



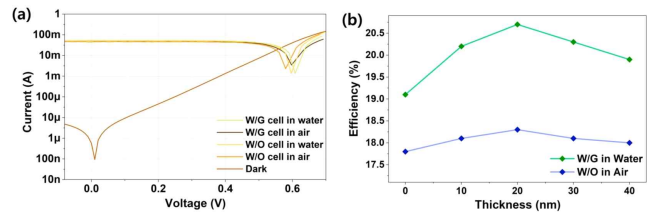
<그림 2> (a) Ga_2O_3 보호층의 단면 SEM 이미지, (b) TEM 전자 회절 패턴에 따른 비정질 헤일로 링(Halo ring) 구조 분석, (c) 대기 및 수증 환경에서 조건별 태양전지의 광학 반사도(Reflectance) 스펙트럼 비교

2.2.1 두께 최적화 및 시뮬레이션 데이터 비교 고찰

AM 1.5G 광조사 조건 하에서 측정된 소자의 전류-전압(I-V) 특성 및 보호층 두께 변화에 따른 정량적인 수증기 성능 매커니즘은 <그림 3>의 특성 곡선과 <표 1>의 데이터 셋을 통해 상세히 확인할 수 있다. 실험 결과, 보호층이 없는 Bare Si 소자는 대기 중에서 17.8%의 효율을 보였으나, 수증기 환경에서는 물 매질의 자연적인 반사 완화 효과로 인해 19.1%로 성능이 소폭 향상되었다. 여기에 20 nm 두께의 Ga_2O_3 보호층을 도입했을 때 단락 전류 밀도($J_{sc} = 52.4 \text{ mA}/\text{cm}^2$)와 개방 전압($V_{oc} = 0.609 \text{ V}$)이 동시에 극대화되면서, 수증기 환경 내 최고치인 20.7%의 전력 변환 효율(PCE)을 달성하였다.

이러한 성능 변화는 보호층 두께 변화와 밀접한 상관관계를 보인다. 보호층이 10 nm 이하로 너무 얇은 구간에서는 불완전한 계면 패시베이션 및 불충분한 광학적 정합으로 인해 효율 향상이 미미했다. 반대로 30 nm 이상으로 두꺼워지는 영역에서는 비정질 박막 자체에서 발생하는 내부 광 흡수 손실과 전하 수송 저항의 증가가 지배적으로 작용하여 소자 효율이 피크(Peak) 형태를 그리며 다시 감소하였다. 이를 통해 20 nm가 광학적 반사 차단과 전기적 전하 효율이 최적의 균형을 이루는 임계 두께임을 실험적으로 증명하였다. 실제 20 nm 실험 데이터와 PC1D 시뮬레이션 경향을 비교했을 때, 실험 소자의 비이상적 요소(계면 트랩, 직렬저항 등)로 인한 정량적 차이는 존재하나 V_{oc} , J_{sc} , 효율이 모두 증가하는 방향성은 완벽히 일치하여 본 연구의 단계적 굴절률 구조 및 계면 패시베이션 전략의 타당성을

뒷받침한다.



<그림 3> Ga_2O_3 보호층 적용에 따른 (a) 대기 및 수증기 환경에서의 소자별 전류-전압(I-V) 특성 곡선, (b) 보호층 두께 변화에 따른 수증기 전력 변환 효율(PCE) 경향성 곡선

3. 결론

본 연구에서는 수증기 환경에서 실리콘 태양전지의 효율 및 안정성을 동시에 확보하기 위해 다기능 Ga_2O_3 보호층을 도입하고 그 유효성을 검증하였다. 물- Ga_2O_3 -실리콘으로 이어지는 단계적 굴절률 정합 구조를 통해 전면 반사 손실을 획기적으로 개선하였으며, 비정질 박막 특유의 우수한 계면 패시베이션 효과를 통해 수분 침투 차단 및 V_{oc} 향상을 유도하였다. 두께 최적화를 통해 20 nm에서 최대 수증기 광전 변환 효율 20.7%를 달성하였으며, 이는 대기 중 Bare Si 소자(17.8%) 대비 약 16.3% 향상된 결과로 수증기 환경에 최적화된 고효율 광전 소자 설계를 위한 실질적인 공정 가이드를 제시한다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-0034883, RS-2023-00283263).

[참고 문헌]

- [1] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 3, pp. 510-519, 1961.
- [2] Y. Wang, Z. Fang, L. Zhu, Q. Huang, Y. Zhang, and Z. Zhang, "The performance of silicon solar cells operated in liquids", Applied Energy, Vol. 86, No. 7-8, pp. 1037-1042, 2009.
- [3] D. A. Clugston and P. A. Basore, "PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers", Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 207-210, 1997.
- [4] T. G. Allen and A. Cuevas, "Plasma enhanced atomic layer deposition of gallium oxide on crystalline silicon: demonstration of surface passivation and negative interfacial charge", physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters, Vol. 9, No. 4, pp. 220-224, 2015.
- [5] M. A. Green, et al., "Solar cell efficiency tables (Version 62)", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 31, No. 7, pp. 651-663, 2023.
- [6] M. A. R. Barno, M. Patel, S. U. Gupta, S. Hossain, S. V. Thi, C. S. Hee, and J. Kim, "Aqua-powered hybrid solar cell using amorphous conformal Ga_2O_3 thin-film", Materials & Design, Vol. 259, p. 114754, 2025.
- [7] S. J. Ko, S. J. Jeon, Y. B. Cho, S. H. Cho, M. A. R. Barno, M. Y. Choi, and J. D. Kim, "Multifunctional Ga_2O_3 Protective Layer for Enhanced Underwater Silicon Solar Cells", Journal of the Korean Solar Energy Society, In press.