

실리콘 태양전지 제조공정과 열화의 상관관계 분석

차예원¹, Suresh Kumar Dhungel², 이준신² 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 성균관대학교 정보통신대학

Analysis of Correlation Between Silicon Solar Cell Fabrication Steps and Possible Degradation

Yewon Cha¹, Suresh Kumar Dhungel², and Junsin Yi²

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received September 1, 2022; Revised September 13, 2022; Accepted September 15, 2022)

Abstract: In a solar cell, degradation refers to the decrease in performance parameters caused by defects originated due to various causes. During the fabrication process of solar cells, degradation is generally related to the processes such as passivation or firing. There exist sources of many types of degradation; however, the exact cause of Light and elevated Temperature Induced Degradation (LeTID) is yet to be determined. It is reported that the degradation and the regeneration occur due to the recombination of hydrogen and an arbitrary substance. In this paper, we report the deposition of Al₂O₃ and SiN_x on silicon wafers used in the Passivated Emitter and Rear Contact (PERC) solar structure and its degradation pattern. A higher degradation rate was observed in the sample with single layer of Al₂O₃ only, which indicates that the degradation is affected by the presence or the absence of a passivation thin film. In order to alleviate the degradation, optimization of different steps should be carried out in consideration of degradation in the solar cell fabrication process.

Keywords: Degradation, Solar cell, LeTID, LID, Hydrogen

1. 서론

태양전지에서 열화(degradation)란 다양한 원인으로 인해 일어나는 결함을 통해 각종 특성 파라미터에서의 저하를 말한다 [1]. 태양전지와 모듈은 설치 후에 태양광에 의해 외부 온도 상승을 지속적으로 겪게 된다. 이로 인해

출력이 감소하게 되고 모듈의 수명뿐 아니라 전력 생산량 까지 떨어지게 된다 [2]. 태양광 발전을 통한 전력 생산은 발전소의 수익과도 직결되므로 열화는 결국 효율을 떨어 뜨리고 장기적으로 비용적 손실을 일으킬 수 있으며, 기술 개발의 한계점이 발생할 수 있다. 열화는 빛 혹은 외부 온도에 의해 여러 가지 형태로 발생하기 때문에 요인별로 각 원인을 규명하고 세분화하는 것이 중요하다. 그림 1과 같이 소재, 제조 공정, 구조에 막론하여 열화가 나타나고 여러 가지 파라미터에서의 손실을 보인다. 대표적으로 태양 전지 단에서 발생하는 열화는 LID (light induced degradation), LeTID (light elevated temperature

✉ Junsin Yi; junsin@skku.edu

Copyright ©2023 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.

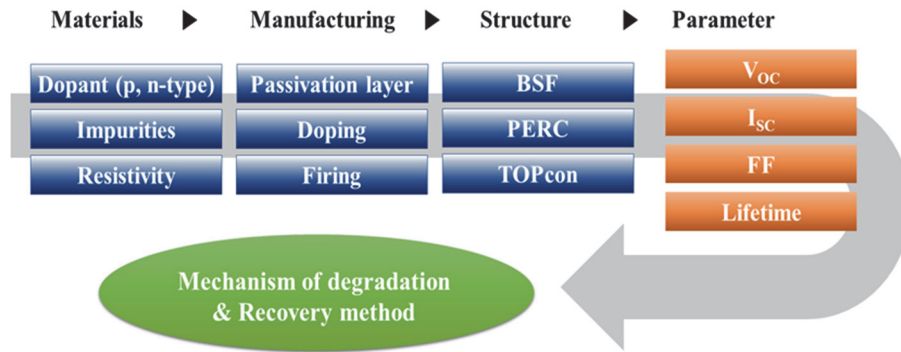


Fig. 1. Classification of degradation causes related with parameters.

induced degradation), HID (hydrogen induced degradation)와 같은 다양한 형태의 열화가 보고되고 있다 [3]. LID는 태양전지에서 가장 흔하게 나타나는 현상으로 붕소로 도핑된 p-type wafer에서 나타난다. LID에 의해 일어나는 열화의 경우 첫 해 기준 2.5%를 보여주며 연간 평균 열화율의 3배가 넘는 수치이다 [4]. LID의 대표적인 원인으로는 붕소와 산소의 결합으로 인하여 단락 전류와 개방전압의 값이 낮아져 결국 효율의 저하로 이어지게 되는데, 이를 BO defect 통해 나타난 LID라 칭한다. LID는 웨이퍼 내의 불순물인 Copper나 Fe에 의해서 발생하기도 하지만, LID의 90% 이상이 BO defect에 의해 일어나는 열화이다 [5]. LID와 다르게 LeTID는 광이 없는 암 (dark) 상태에서도 열화가 일어난다. 광 없이 열에 의해서 성능 저하가 관찰되고 있다. LID 현상은 1970년 무렵 발견되어 여러 가지 연구가 이루어지고 있는 반면에 LeTID는 비교적 최근에 발견하였다. 많게는 7%까지도 실제 필드에서 발전 효율의 저하를 보이는 영향을 주기도 한다 [6]. LID에서 나타나는 BO defect와 다른 메커니즘으로 일어나는 열화 현상으로 확인되었으며, LeTID의 원인은 아직 정확한 원인은 밝혀지지 않았다. LID의 경우 열화의 가장 큰 원인인 붕소와 산소 결합을 제거하기 위해 갈륨 도핑 웨이퍼 혹은 n-type wafer를 사용하는 등 각가지 연구가 진행되고 있다 [7]. 또한, LID는 분 단위 혹은 며칠 사이로 발생하지만, LeTID 현상은 몇 년에 걸쳐 열화가 진행된다. 정확한 거동의 원인은 규명되지 않았으나, 다양한 공정에서 유입되는 수소가 원인이라는 주장이 지배적이다 [8].

태양전지 제조공정에서 수소의 개입이 일어날 수 있는 대표적인 공정은 패시베이션 박막 증착, 도핑, 소성 공정 등이 있다. 해당 공정들은 수소의 유입 혹은 확산을 일으키며 박막의 특성 변화나 벌크까지 영향을 주기도 한다. 박막 증착의 경우 박막의 종류, 조성, 두께에 따라 열화 정도가 바뀐다. SiN_x 박막의 두께를 두껍게 할 경우, 수소의 함량

이 증가하여 열화 정도를 증가시켰다는 연구결과가 있다 [9]. Al_2O_3 박막의 유무에 따라서도 열화의 영향이 달라진다 [10]. 두께를 조절하거나 박막을 추가함으로써 광학적 특성이나 패시베이션으로서의 역할을 생각할 때에 증착 조건 변화에 유의해야하는 것이 사실이다. 또한, 패시베이션 증착 이후 이루어지는 소성 공정은 이전 패시베이션 박막에서 가져온 수소 함량이 영향을 끼쳐 공정간의 상관관계에서 열화는 필수적으로 고려되어야할 사항이다. 소성 공정의 온도가 높을수록 다량의 수소 방출을 일으켜 열화 정도가 증가하게 되는데, 수소화된 박막과 밀접한 관련이 있다고 말할 수 있다 [11]. 또한 소성 공정에서 냉각 속도가 느려질수록 금속 불순물의 비활성화가 되어 열화 정도를 낮출 수 있다고 말한다 [12]. 각각의 공정의 연관관계에 의해 제어 가능한 변수는 한계가 존재하므로 이 점을 고려하여 공정 설계가 이뤄져야한다. 여러 연구결과들을 살펴봤을 때 패시베이션 박막 증착 공정이 열화에 가장 큰 영향을 준다는 가정하에 본 논문은 여러 증착 조건과 LeTID와 연관되어 제안되고 있는 원인을 조사해보았다.

소재에 의해 일어나는 열화의 경우 파라미터를 조절하거나 대체 물질을 사용할 수 있지만, 제조 공정에 따른 열화별로 제어가 가능한 변수들은 한정적이다. 즉, 제조 공정간의 정확한 이해와 각 요소에 의한 열화 특성에 대한 원인 규명이 필요하다. 이에 따른 분석을 통해 표준화된 열화 방지 및 복원 기술 방안을 마련해야 한다.

2. LeTID 메커니즘 모델

금속-실리콘 인터페이스에서의 재결합 손실은 산업용 결정질 실리콘(c-Si) 태양 전지의 효율성을 제한하는 핵심 요소이다 [13]. 이 손실 메커니즘을 조절할 수 있는 방법은 접촉 비율을 줄이는 것이며, PERC (passivated emitter

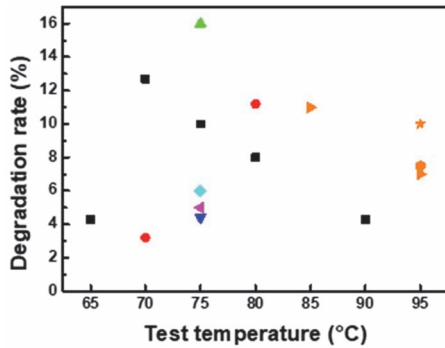


Fig. 2. Degradation rate due to LeTID [16-31].

and rear cell) 구조의 태양전지가 등장하게 되었다. PERC 구조는 접촉 영역에서 캐리어 재결합을 줄이는 데 효율적인 것으로 밝혀진 반면, 열화 현상으로 인한 성능 저하 현상이 발견되었다 [14]. Yang et al. [15]는 150°C 이상에서 라이트 소킹 또는 다크 어닐링시 샘플의 표면 패시베이션 변화를 보고했으며, 250°C 이상의 온도에서 라이트 소킹 또는 어닐링된 샘플에서 표면 패시베이션의 개선이 관찰되었다. 그림 2의 다양한 레퍼런스 연구결과를 살펴보면 LeTID에 의한 열화 현상은 많게는 약 16%까지 발생한다고 보고된다.

가장 흔하게 관찰되는 열화는 BO-LID로 일컬어지는 활성화된 BO defect으로 발생하는 LID이다. 많은 연구들이 BO-LID가 약 200°C에서 조명을 적용함으로써 영구적으로 억제될 수 있고 효율적으로도 이득을 얻을 수 있다는 것을 증명했다 [10]. 이 처리는 수소가 재생에서 중요한 기여를 한다고 말할 수도 있다.

BO-LID를 억제하기 위해 붕소가 도핑되지 않은 웨이퍼를 사용했음에도 불구하고 열화가 발생하였고, 이를 빛과 고온에 의한 열화(LeTID)로 명명하게 되었다. BO-LID 또는 철-붕소(FeB)에 의한 열화와 또 다른 메커니즘을 보여 LeTID라는 열화 현상으로 규명시켰다. LeTID로 인한 열화는 붕소 불순물을 포함하는 것에 국한되지 않으며 거의 모든 실리콘 태양전지에서 나타난다고 말한다. 수소는 재생 과정에 도움을 줄 수 있는 반면, 불순물과의 재결합으로 인한 열화로 작용될 수 있다. 연소된 수소가 풍부한 태양전지는 열화 정도와 수소 함량 사이에 명백한 상관관계를 나타냄을 입증되었다. 패시베이션, 도핑, 소성 공정 등에 크게 기인하게 있으며, 공정 중에 수소의 관여가 이루어진다. SiNx:H 층의 두께를 조절하여 총 수소 함량과 결합 농도 사이의 상관관계가 있음을 밝혔다 [9]. 동시에 LeTID는 수소에 의해 유발될 뿐만 아니라 소성 과정과 불가분의 관계가 있음을 발견되었다. 소성 과정 중 피크 온도와 냉각 속

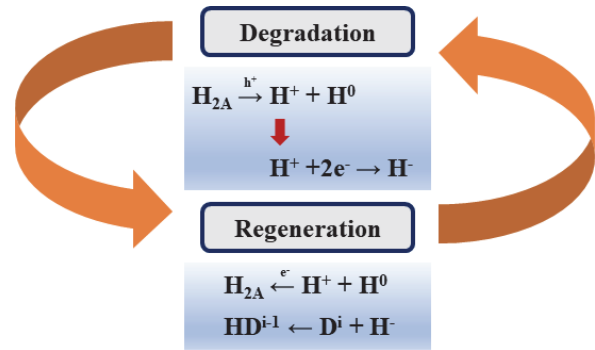


Fig. 3. Mechanism equation of LeTID caused by hydrogen.

도는 열화 정도에 중요한 요소이다. 스크린 프린팅 공정에서 소성 온도가 열화에 크게 기여한다는 많은 연구 결과들이 있다. 더 높은 소성 온도가 더 높은 열화율을 보여주고 있으며, 저온(<600°C)에서 공정을 진행하면 열화율이 확연히 낮아지면서 소성하지 않은 샘플은 열화가 보이지 않는다 [32,33]. 소성 중 방출된 수소로 인한 열화가 연관 관계가 있다고 가정하는데, 이는 수소화된 표면 박막과 결국 밀접한 관련이 있다고 볼 수 있다.

수소 외에도 LeTID 거동의 메커니즘에 관련된 다른 가설이 있다. 다른 방법에 의해 관찰된 열화 거동은 일관성이 없지만, 결과적으로 모두 유사하게 벌크 내의 불순물에 존재함을 밝혔다. 여러 금속 불순물(Fe, Co, Ni, Ti)이 LeTID에 기여하는 불순물로 보고되었다 [34]. 그러나 현재 제안되고 있는 LeTID 메커니즘 모델에는 이 결합 유형에 대한 구체적인 단서가 없으며 수소와 상호 작용하고 LeTID 동작에 참여하는지 여부에 연구가 더욱 집중되어 있다.

보다 최근에는 열화 거동이 빛 흡수 또는 전압 바이어스를 적용하여 변경될 수 있음이 입증되었다. 이는 캐리어가 LeTID 거동의 역학에서 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다. LeTID 메커니즘에 대한 빛 흡수의 영향은 비교적 포괄적인 연구 기반을 가지고 있지만, LeTID에 대한 전하 주입의 영향에 대한 조사는 거의 없다. 특히 상업용 태양전지의 경우, 소성 공정과 LeTID 억제를 위한 전하 주입의 조합은 양산 과정에서 주목받고 탐구할 가치가 있다. LeTID 거동에 대한 수소와 캐리어에 대한 이론적 메커니즘 모델을 그림 3과 같이 제안했다 [35]. P형 반도체에서 SiNx 박막의 양전하 특성으로 인해 수소는 주로 H⁺ 형태로 존재한다. 즉 H⁺를 가두는 도핑 원자가 있어 BH(붕소-수소)와 같은 형태의 결합이 일어난다. 고온 소성 후에는 H_{2A} 형태로 수소가 발생하고, 다크 어닐링 후에는 BH와 H_{2A}에서 H⁺가 해리 되면서 재생에 기여하게 된다. 우리가 제안하는 모델은 수소가 재생과 열화 모두에 영향을 준다는 것이 핵심이

다. H^+ 는 태양전지 초기 제작 과정에서 대량으로 방출된다. 캐리어 농도가 증가함에 따라 $H^+ + 2e^- \rightarrow H^-$ 의 반응이 촉진된다. 다량의 H^- 는 실리콘 벌크로 균일하게 분포되면서 D^i (Defect precursor)와 결합하여 HD^{i-1} 복합체를 형성한다. 캐리어의 지속적인 주입은 표면의 전계 패시베이션 효과를 저하시킬 수 있는데 이는 표면 열화로 직결된다.

같은 불순물들의 농도가 떨어지면서 O/Al의 화학양론적으로 ratio가 1.5에 가까워지게 된다 [38]. 온도 상승에 이러한 이점에 있음에도 불구하고, 수소는 passivation에서 중요한 역할과 다양한 물질과 반응하여 열화로 나타나기도 한다. 이러한 양면성을 고려하여 ALD 공정 조건에 대한 최적화가 이루어져야 한다.

3. 증착 공정과 열화의 상관관계

3.1 Al₂O₃ 증착 공정과 열화의 상관관계

ALD를 통한 증착 공정은 원자층 단위로 박막을 증착시킬 수 있는 방법이다. 1 cycle 당 4가지 프로세스가 진행된다. precursor(전구체)의 주입, purge, reactant(반응체) 주입, purge이다. 그림 4와 같이 precursor를 주입함으로써 증착을 원하는 물질이 포함된 전구체를 기판 표면에 흡착시킨다. 반응하고 남은 부산물을 날린다. 다시 reactant를 주입시켜 기판에 흡착되어 있는 precursor와 표면 화학 반응을 일으킨다. 이렇게 원자층 증착은 표면에서의 반응을 이용하고 물질들을 교대로 주입하기 때문에 증착 속도가 느리다는 단점이 존재함에도 불구하고 단차피복성 (step coverage)을 보여주는 한편, 표면 반응을 통하여 증착이 진행되므로 적절한 전구체와 반응체의 선택을 통해 비교적 저온에서 고품질의 박막 증착이 가능하다 [36].

ALD의 증착 공정 특성상 자기제한적 반응을 가지고 있기 때문에 일정 시간 이상 지날 경우에는 precursor와 reactant(Al/O)가 충분히 반응하고 부산물만이 남게 된다. Purge time 또한 부산물이 제거될 수 있는 최소 시간을 찾는 것이 핵심이다. 변수 중 가장 크게 작용한 것은 온도이며 여러 가지 특성에 영향을 끼칠 수 있다 [37]. 온도가 상승하게 되면 수소는 박막에서 덜 머무르게 되어 수소 농도는 떨어지게 된다. 상대적으로 온도가 높아지면 carbon

3.2 SiNx:H 증착 공정과 열화의 상관관계

PERC cell에서 passivation 박막으로 사용되는 SiNx:H은 대표적으로 수소를 대량 포함하고 있다. LeTID에 대한 원인으로는 수소와 불순물의 결합으로 가정하고 있기 때문에 SiNx:H은 열화에 영향을 줄 수 있다고 말할 수 있다. 열화 원인에 대한 가설은 샘플 내 수소의 이동에 있다. SiNx:H와 같은 수소가 풍부한 passivation 층이 있는 웨이퍼가 소성될 때 박막에서 방출된 수소의 일부는 실리콘 벌크로 확산되고 일부는 주변으로 방출된다는 것은 잘 알려져 있다 [39]. SiNx:H 박막이 두꺼울수록 수소 함량이 높아 고온 소성 시 대량으로 방출된다. 두께가 증가할 때마다 defect 농도에 증가하였고, 결국 이는 수명 저하가 초래되었음을 나타낸다. 특히나 SiNx:H 두께가 증가한다는 것은 수소 함량의 증가로 설명될 수 있다. τ_{eff} 의 회복은 수소원으로 작용하는 것으로 알려진 SiNx 층이 있는 샘플에서만 관찰할 수 있다는 사실을 감안할 때 이후의 열화 또는 재생은 수소와 관련이 있다고 추측된다.

3.3 증착 조건 가변에 따른 열화 실험 결과

샘플은 Boron-doped wafer 1 $\Omega.m$, Ga-doped wafer 0.4 $\Omega.m$ 를 준비하였다. SDR 프로세스로 에칭 시킨 샘플을 15분간 진행하고 직후에 ALD 챔버에 로딩시킨다. Al₂O₃ 증착시 TMA (trimethylaluminium)와 H₂O가 전구체 및 반응체 물질로 사용하였다. 20 cycles씩 양면 증착

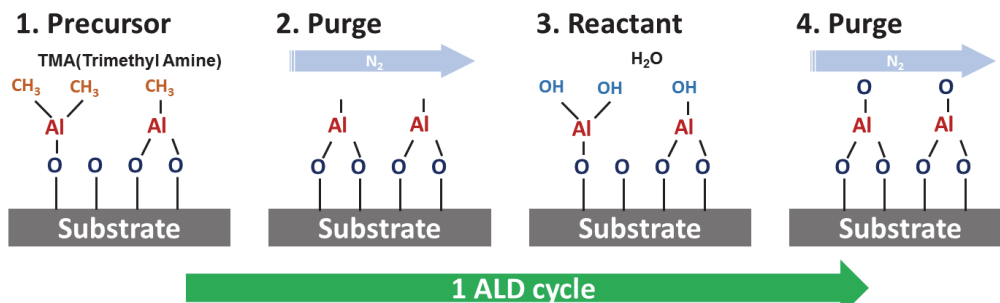


Fig. 4. Schematic diagram of aluminium oxide deposition process by ALD.

시켰으며, 증착 두께는 ellipsometer로 측정하여 약 20 nm로 확인하였다. 샘플(크기 $4 \times 4 \text{ cm}^2$)에 대한 증착 후 어닐링은 470°C 에서 FGA (forming gas annealing)을 진행하였으며, 혼합가스는 아르곤(85%)과 수소(15%) 가스로 이루어져있다. 어닐링 처리는 다양한 불순물과 결합으로 인한 재결합을 비활성화하여 실리콘 태양전지의 전기적 특성을 개선하는 것으로 나타나며 Al_2O_3 증착 시 막 활성화를 위한 필수 공정이다. 또한 양면에 passivation과 반사방지막으로 SiN_x 70 nm를 증착하였으며, 전극 칩투를 위해서는 소성 과정이 필수이므로 이와 유사한 과정으로 최대온도 865°C 에서 소성 공정을 진행하였다. 일부 샘플에는 200°C 에서 15분동안 dark annealing 처리를 했고, 처리하지 않은 샘플을 구분하였다. Lifetime을 측정하는데 모든 측정 값은 Sinton WCT-120으로 측정되었다. 또한, 모든 과정은 상온에서 진행되었다. 단일 Al_2O_3 박막으로 증착된 샘플과 SiN_x 까지 double layer로 증착한 샘플을 각각 준비하여 열화시켰다. 빛과 열 조건은 0.7sun, 135°C 으로 셋팅하였다.

그림 5를 살펴보면 모든 샘플에서 열화 현상이 발생하였으며 100분 부근까지는 미미한 차이를 보이나, 100분 이후부터 붕소와 갈륨 도핑 웨이퍼의 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 샘플은 단일 Al_2O_3 박막을 증착한 샘플에 비해 낮은 열화율을 보였다. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 샘플의 안정성 차이가 어디에서 발생하는지 명확하지 않아 향후 연구에서는 이 문제를 명확히 규명하는 것이 핵심이 될 수 있다. Al_2O_3 층은 완전히 방지해주진 못하나 표면 재결합 속도는 다소 늦춰지게 한다. 이는 다른 밴드 구조와 관련이 있을 수 있다고 추측된다 [40]. SiN_x 층이 양전하로 인해 전자를 끌어당기는 반면, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 샘플은 Al_2O_3 층의 음전하로 인해 표면에 정공을 밀어내게 된다. 단일 Al_2O_3 박막으로는 충분한 passivation

효과를 얻지 못하지만, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 샘플은 passivation과 열화에서 유리할 수 있다고 결론지을 수 있다. 수소 이온과 같은 다른 전하 입자는 유전층의 고정 전하 부호에 따라 축적되거나 표면에서 멀어지게 할 수 있음 또한 설명할 수 있다.

4. 결론

LeTID는 아직 원인이 정확히 규명되지 않았으며 수소와 임의의 물질과의 재결합으로 인해 성능의 손실이 발생하는 것으로 제기되고 있다. 태양전지 제조과정을 살펴보면 수소의 유입, 이동, 확산과 같은 활동이 필수적으로 발생하는 공정과정이 있어 해당 공정과 열화와의 상관관계 분석 연구가 이루어지고 있다. 대표적으로는 수소 제어와 가장 관련이 깊은 공정은 패시베이션, 소성 공정등이 있다. $\text{SiN}_x:\text{H}$ 층의 두께가 증가한다는 것은 수소 함량의 증가이며 LeTID의 열화 범위가 증가된다. 이는 수소가 LeTID의 메커니즘과 깊은 연관이 있으며, 부정적인 영향을 가하고 있다고 말할 수 있다. 소성 피크 온도를 낮추거나 냉각 속도를 늦출 경우, 금속 불순물의 재결합을 막아 열화 범위를 감소시킬 수 있다. 열화를 복원할 수 있는 방법은 빛을 가하거나, 소성 피크 온도 감소, 소성 공정의 냉각 속도 감소, $\text{SiN}_x:\text{H}$ 층 두께 조절 및 조성 변화, 사전 및 사후 소성 어닐링 공정 적용 등이 있다. 복원 방법은 다양하게 소개되고 있지만, 시간적 혹은 공정 환경에 대한 한계가 있기 때문에 실제 생산 라인에 적용할 수 있는 여부도 고려되어야 한다.

ORCID

Junsin Yi

<https://orcid.org/0000-0002-6196-0035>

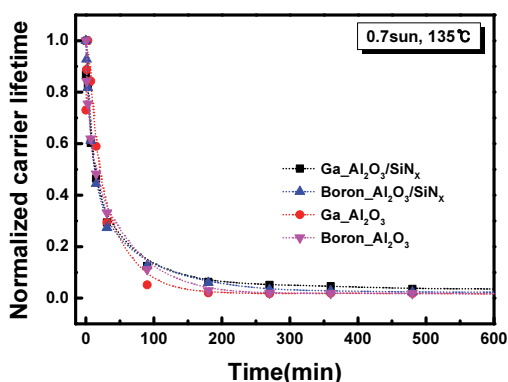


Fig. 5. Normalized carrier lifetime graph at 0.7 sun and 135°C of boron and gallium doped wafer sample deposited with Al_2O_3 or $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$.

감사의 글

본 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의(과제번호: 20203030010060)와 한국전력공사의 2021년 선정 기초연구개발 과제연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R21X001-22).

REFERENCES

- [1] M. Rabelo, H. Park, Y. Kim, E. C. Cho, and J. Yi, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **22**, 575 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-021-00359-4>]

- [2] V. Sharma and S. S. Chandel, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **27**, 753 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.046>]
- [3] A. C. née Wenham, S. Wenham, R. Chen, C. Chan, D. Chen, B. Hallam, D. Payne, T. Fung, M. Kim, S. Liu, S. Wang, K. Kim, A. Samadi, C. Sen, C. Vargas, U. Varshney, B.V. Stefani, P. Hamer, G. Bourret-Sicotte, N. Nampalli, Z. Hameiri, C. Chong, and M. Abbott, *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)* (pp. 0001-0008). [DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8548100>]
- [4] M. Seok, J. Kim, Y. Lee, Y. Kim, Y. Kim, and S. Kim, *Energies*, **14**, 19 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.3390/en14196352>]
- [5] J. Lindroos and H. Savin, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **147**, 115 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.11.047>]
- [6] F. Kersten, F. Fertig, K. Petter, B. Klöter, E. Herzog, M. B. Strobel, J. Heitmann, and J. W. Müller, *Energy Procedia*, **124**, 540 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.260>]
- [7] B. Hallam, A. Herguth, P. Hamer, N. Nampalli, S. Wilking, M. Abbott, S. Wenham, and G. Hahn, *Appl. Sci.*, **8**, 10 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3390/app8010010>]
- [8] A. Inglese, A. Focareta, F. Schindler, J. Schön, J. Lindroos, M. C. Schubert, and H. Savin, *Energy Procedia*, **92**, 808 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.073>]
- [9] U. Varshney, M. Abbott, A. Ciesla, D. Chen, S. Liu, C. Sen, M. Kim, S. Wenham, B. Hoex, and C. Chan, *IEEE J. photovolt.*, **9**, 601 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2896671>]
- [10] U. Varshney, B. Hallam, P. Hamer, A. Ciesla, D. Chen, S. Liu, C. Sen, A. Samadi, M. Abbott, C. Chan, and B. Hoex, *IEEE J. Photovolt.*, **10**, 19 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2945199>]
- [11] D. Kang, H. C. Sio, D. Yan, J. Stuckelberger, X. Zhang, and D. Macdonald, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **234**, 111407 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111407>]
- [12] J. Schmidt, D. Bredemeier, and D. C. Walter, *IEEE J. Photovolt.*, **9**, 1497 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2937223>]
- [13] A. Cuevas, P.A. Basore, G. Giroult-Matlakowski, and C. Dubois, *J. Appl. Phys.*, **80**, 3370 (1996). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.363250>]
- [14] M.A. Green, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **143**, 190 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.055>]
- [15] Y. Yang, P.P. Altermatt, Y. Cui, Y. Hu, D. Chen, L. Chen, G. Xu, X. Zhang, Y. Chen, P. Hamer, R.S. Bonilla, Z. Feng, P.J. Verlinden, *AIP Conf. Proc.*, **1999**, 040026 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5049289>]
- [16] D. Skorka, A. Zuschlag, and G. Hahn, *AIP Conf. Proc.*, **1999**, 130015 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5049334>]
- [17] C. E. Chan, D.N.R. Payne, B. J. Hallam, M. D. Abbott, T. H. Fung, A. M. Wenham, B. S. Tjahjono, and S. R. Wenham, *IEEE J. Photovolt.*, **6**, 1473 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2606704>]
- [18] X. Zheng, C. Zhou, X. Jia, E. Jia, and W. Wang, *Sol. Energy*, **162**, 372 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.027>]
- [19] T. Luka, S. Eiternick, S. Frigge, C. Hagendorf, H. Mehlich, and M. Turek, *Proc. 31st Eur. Photovoltaic Sol. Energy Conf. Exhib.*, **2BV.8.12**, 826 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20152015-2BV.8.12>]
- [20] K. Ramspeck, S. Zimmermann, H. Nagel, A. Metz, Y. Gassenbauer, B. Brikmann, and A. Seidl, *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, **2DO.3.4**, 861 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012-2DO.3.4>]
- [21] K. Petter, K. Hubener, F. Kersten, M. Bartzsch, F. Fertig, B. Klöter, and J. Müller, *9th Int. Work. Cryst. Silicon Sol. Cells*, **6**, 1 (2016).
- [22] H. Deniz, J. Bauer, and O. Breitenstein, *Sol. RRL*, **2**, 1800170 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/solr.201800170>]
- [23] C. Sen, C. Chan, P. Hamer, M. Wright, C. Chong, B. Hallam, and M. Abbott, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **209**, 110470 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110470>]
- [24] N. E. Grant, J. R. Scowcroft, A. I. Pointon, M. Al-Amin, P. P. Altermatt, and J. D. Murphy, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **206**, 110299 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110299>]
- [25] M. Wagner, F. Wolny, M. Hentsche, A. Krause, L. Sylla, F. Kropfgans, M. Ernst, R. Zierer, P. Bönisch, P. Müller, N. Schmidt, V. Osinniy, P. Hartmann, R. Mehnert, and H. Neuhaus, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **187**, 176 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.06.009>]
- [26] K. Krauß, A. A. Brand, F. Fertig, S. Rein, and J. Nekarda, *IEEE J. Photovolt.*, **6**, 1427 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2598273>]
- [27] F. Fertig, K. Krauß, and S. Rein, *Phys. Status Solidi RRL*, **9**, 41 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssr.201409424>]
- [28] F. Kersten, P. Engelhart, H.-C. Ploigt, A. Stekolnikov, T. Lindner, F. Stenzel, M. Bartzsch, A. Szpeth, K. Petter, J. Heitmann, and J. W. Müller, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **142**, 83 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.015>]
- [29] M. Padmanabhan, K. Jhaveri, R. Sharma, P. K. Basu, S. Raj, J. Wong, and J. Li, *Phys. Status Solidi RRL*, **10**, 874 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssr.201600173>]
- [30] F. Kersten, F. Fertig, K. Petter, B. Klöter, E. Herzog, M. B. Strobel, J. Heitmann, and J. W. Müller, *Energy Procedia*, **124**, 540 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.260>]
- [31] K. Nakayashiki, J. Hofstetter, A. E. Morishige, T.T.A. Li, D. B. Needleman, M. A. Jensen, and T. Buonassisi, *IEEE J. Photovolt.*, **6**, 860 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2556981>]
- [32] C. Vargas, K. Kim, G. Coletti, D. Payne, C. Chan, S. Wenham, and Z. Hameiri, *IEEE J. Photovolt.*, **8**, 413 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2782273>]

- doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2783851]
- [33] D. Kang, H.C. Sio, D. Yan, J. Stuckelberger, X. Zhang, and D. Macdonald, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **234**, 111407 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111407>]
- [34] Z. Hu, D. Lin, X. Yu, C. Seiffert, A. Kuznetsov, and D. Yang, *Appl Phys. Express*, **14**, 115502 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ac2ae6>]
- [35] S. Li, X. Xi, G. Liu, L. Wang, Y. Jiang, and L. Chen, *Silicon*, **14**, 11443 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01831-3>]
- [36] J.J. Guo, D. Wang, Y.T. Xu, X.P. Zhu, K.L. Wen, G.H. Miao, W.W. Cao, J.H. Si, M. Lu, and H.T. Guo, *AIP Adv.*, **9**, 095303 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5113671>]
- [37] G. Dingemans, M.C.M. van de Sanden, and W.M.M. Kessels, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **13**, H76 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3276040>]
- [38] G. Dingemans, F. Einsele, W. Beyer, M.C.M. van de Sanden, and W.M.M. Kessels, *J. Appl. Phys.*, **111**, 093713 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4709729>]
- [39] C. Sen, P. Hamer, A. Soeriyadi, B. Wright, M. Wright, A. Samadi, D. Chen, B. V. Stefani, D. Zhang, J. Wu, F. Jiang, B. Hallam, and M. Abbott, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **235**, 111497 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111497>]
- [40] D. Sperber, A. Graf, D. Skorka, A. Herguth, and G. Hahn, *IEEE J. Photovolt.*, **7**, 1627 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2755072>]