

와이어 소잉 데미지 층이 단결정 실리콘 태양전지 셀 특성에 미치는 영향

김일환 · 박준성 · 박재근*

전자컴퓨터통신공학과, 한양대학교, 서울특별시, 04763

Relation Between Wire Sawing-damage and Characteristics of Single Crystalline Silicon Solar-cells

Il-Hwan Kim · Jun-Seong Park · Jea-Gun Park*

Department of Electrics and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

Received December 8, 2017; Revised December 22 2017; Accepted January 24, 2018

ABSTRACT: The dependency of the electrical characteristics of silicon solar-cells on the depth of damaged layer induced by wire-sawing process was investigated. To compare cell efficiency with residual sawing damage, silicon solar-cells were fabricated by using as-sawn wafers having different depth of saw damage without any damaged etching process. The damaged layer induced by wire-sawing process in silicon bulk intensely influenced the value of fill factor on solar cells, degrading fill factor to 57.20%. In addition, the photovoltaic characteristics of solar cells applying texturing process shows that although the initial depth of saw-damage induced by wire-sawing process was different, the value of short-circuit current, fill-factor, and power-conversion-efficiency have an almost same, showing ~17.4% of cell efficiency. It indicated that the degradation of solar-cell efficiency induced by wire-sawing process could be prevented by eliminating all damaged layer through sufficient pyramid-surface texturing process.

Key words: Wire sawing process, saw-damage, Si solar-cell, PV characteristics

abstract

J_{sc} : Short-circuit current

V_{oc} : Open-circuit voltage

FF : Fill factor

PCE: Power conversion efficiency

1. 서론

지난 수십 년 동안 태양광(PV) 산업은 폭발적으로 성장하였다. 신재생 에너지가 각광받게 되면서 많은 연구자들은 태양전지의 셀 효율을 높이며 동시에 태양전지의 제조비용을 줄이기 위해 집중적으로 연구하고 있다^{1,2)}. 특히 태양전지의 제조비용 중 셀 제작에서 가장 높은 비율을 차지하는 것이 실리콘 웨이퍼이다. 실리콘 웨이퍼 가격이 차지하는 비율은 셀 단위에서는 70% 이상, 모듈 단위에서도 40% 이상으로 매우 높은 비중을 차지한다³⁾. 따라서 웨이퍼 가격을 감소시키기 위하여 태양광 웨이

퍼 제조사들은 잉곳(ingot) 성장부터 웨이퍼링(wafering)까지 모든 과정에서 가격경쟁력을 갖기 위해서는 많은 연구를 진행하고 있다. 최근에는 하나의 잉곳에서 더 많은 웨이퍼를 생산하기 위하여 더욱 얇은 다이아몬드 와이어를 적용하고 있다. 얇은 다이아몬드 와이어는 웨이퍼의 생산성과 품질을 향상시키며 실리콘 절단 손실(Si kerf)을 줄일 수 있다⁴⁻⁸⁾. 또한 현재 180 μm 수준인 웨이퍼 두께가 Si kerfloss를 줄이기 위하여 점차 감소되는 추세에서 얇은 다이아몬드 와이어가 필수적이다.

일반적으로, 태양광 웨이퍼를 제조하기 위하여 다이아몬드 와이어로 잉곳 브릭(brick)을 절단하게 되면 와이어의 물리적 가공에 의해 실리콘 벌크(bulk) 내에 와이어 소잉 데미지(wire sawing damage)가 발생한다⁹⁻¹²⁾. 이러한 와이어 소잉 데미지는 태양전지 셀 내의 접합(junction) 영역에서 전자-전공 쌍(electron-hole pair)의 재결합을 유발시켜 소수 캐리어 재결합 수명(minority carrier recombination lifetime)의 감소 및 태양전지 셀 성능의 저하를 일으킨다¹³⁾. 이러한 와이어 소잉 데미지는 에칭(etching) 공정 혹은 텍스처링(texturing) 공정을 통해 제거할 수 있지만, 에칭 후에도 실리콘 벌크 내에 와이어 소잉 데미지 층이 남아있다면 셀 효율을 저하시키는 요소가 될 수 있다¹²⁻¹⁴⁾.

*Corresponding author: parkjgl@hanyang.ac.kr

따라서 본 연구에서는 와이어 소잉 공정으로 발생하는 데미지 층이 태양전지 셀의 전기적 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 분석을 수행하였다. 와이어 소잉 데미지가 셀 효율에 직접적으로 미치는 영향을 검증하기 위하여, 와이어 소잉 데미지 층의 깊이가 다른 3종류의 실리콘 웨이퍼들을 데미지 에칭을 하지 않고 태양전지 셀을 제작하여 개방 전압(open-circuit voltage, V_{oc}), 단락 전류(short-circuit current, J_{sc}), 곡선인자(fill factor, FF), 전력변환효율(power conversion efficiency, PCE)과 같은 셀의 전기적 특성을 비교하였다. 또한 초기 와이어 소잉 데미지 층의 깊이가 다른 실리콘 웨이퍼들을 텍스처링 공정을 통해 데미지 층을 충분히 제거한 뒤 각 웨이퍼들의 전기적 특성을 비교하여 와이어 소잉 데미지가 태양전지 셀에 어떠한 영향을 끼치는지 검증하였다.

2. 실험

Fig. 1은 초기 와이어 소잉 데미지 층의 깊이가 다른 웨이퍼를 통해 제작한 실리콘 태양전지의 제조 공정의 흐름도이다. 깊은 와이어 소잉 데미지 층을 가진 웨이퍼, 얇은 데미지 층을 가진 웨이퍼 및 데미지 층을 연마 공정을 통해 모두 제거한 웨이퍼를 각각 DDW (deep-damaged wafer), SDW (shallow-damaged wafer), PW (polished wafer)로 정의하였다. Boron으로 도핑된 200 μm 두께의 초크랄스키(Czchralski) 실리콘 웨이퍼(1-3 $\Omega\cdot\text{cm}$)를 사용하였으며, 두 종류의 태양전지 셀을 제작하여 실리콘 벌크 내 데미지가 태양전지 셀 특성에 미치는 영향을 비교하였다.

첫 번째 그룹의 웨이퍼들은 와이어 소잉 후 에칭 혹은 텍스처링 공정 없이 태양전지 셀을 제작하였다. 이는 태양전지 제조 후에 웨이퍼 표면 및 벌크에 결함이 남아 있음을 의미한다. 두 번째 그룹의 웨이퍼들은 와이어 소잉 후 모두 충분한 텍스처링 공정 후 태양전지 셀을 제작하였으며, 이는 화학적 에칭을 통해 와이어 소잉 데미지 층을 모두 제거했음을 의미한다. 텍스처링 공정

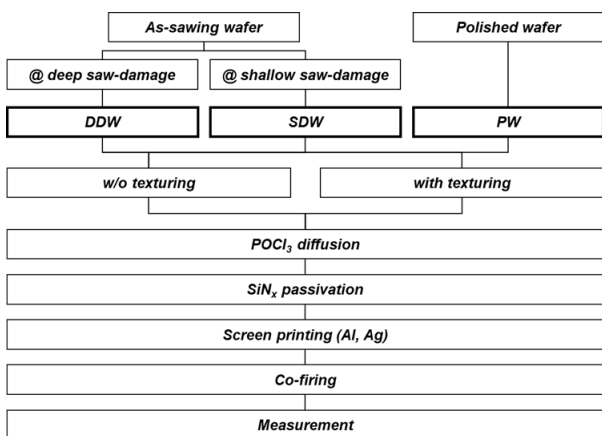


Fig. 1. Fabrication flow for silicon solar cell with different initial depth of wire-sawing silicon wafer

은 KOH 및 IPA 기반의 알칼리 용액을 사용하여 80°C에서 1시간 동안 진행하였으며 <111> 방향성 에칭을 통해 실리콘 표면을 충분히 덮는 피라미드 구조를 생성하였다. 두 웨이퍼 그룹은 모두 790°C에서 15분 동안 POCl_3 확산 공정을 통해 도펀트를 증착한 뒤 860°C에서 5분 동안 열처리 공정을 통해 $60 \Omega/\square$ 의 저항 값을 갖는 n^+ 도핑 층을 형성하였다. HF를 통해 phosphorous silicate glass (PSG) 막을 제거한 뒤 반사방지 코팅층(anti-reflection coating, ARC)을 형성하기 위하여 플라즈마 화학기상 증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)으로 95 nm 두께의 SiN_x 막을 형성하였다. Ag 및 Al 페이스트를 사용하여 스크린프린터를 통해 상부 및 하부 금속 전극을 형성한 뒤 680°C에서 2초간 급속 열처리(rapid thermal anneal, RTA)를 진행하여 태양전지 셀을 제조하였다.

3. 결과 및 고찰

첫째로 태양전지 셀을 제작하기 전에 각 웨이퍼의 와이어 소잉 데미지 층 깊이를 확인하기 위하여 Fig. 2와 같이 소수 캐리어 재결합 수명을 측정하였다. KOH 용액을 통한 에칭과 소수 캐리어 재결합 수명 측정을 반복적으로 수행하여 와이어 소잉 웨이퍼의 에칭 깊이에 따른 재결합 수명의 프로파일을 통해 와이어 소잉 데미지 층의 깊이를 검증하였다. 반복적인 에칭 수행 시, 와이어 소잉 데미지에 의해 저하된 재결합 수명이 급격하게 상승하다가 유지되는 구간까지의 깊이를 와이어 소잉 데미지 층으로 정의하였다^{12,14}. Fig. 2는 DDW, SDW, PW의 와이어 소잉 데미지 층의 깊이가 각각 약 7.3, 2.9 및 0 μm 임을 보여주고 있다. 이러한 와이어 소잉 데미지 층의 깊이는 와이어 소잉의 공정 조건, 공정 설비와 와이어의 품질에 의해 결정되며, 소잉 데미지 층은 태양전지 셀에서 소수 캐리어 재결합 수명의 저하를 야기하기 때문에 셀 효율을 저하시키는 요인이다. Fig. 3은 초기 데미지 층의 깊이가 다른 와이어 소잉 웨이퍼의 표면에 대한 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 이미지를 도시하였다. Fig. 3(a)와 (b)에서 DDW 및 SDW 샘플의 표면은 와이어 소잉 공정에 의해 표면 결함이 매우 많은 것을 확인할 수 있으며,

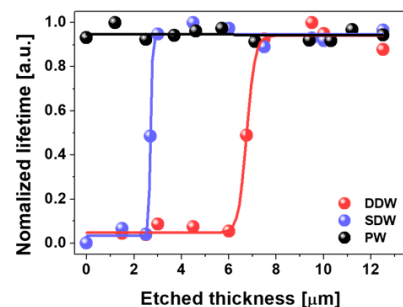


Fig. 2. Minority-carrier recombination lifetime of wire-sawing silicon wafer as a function of etched thickness

PW 샘플은 Fig. 3(c)와 같이 연마 공정을 통해 표면 결함이 모두 제거되어 매우 균일한 표면 특성을 보여주고 있다. 와이어 소잉 웨이퍼에 텍스처링 공정을 적용한 후에는 Fig. 3(d)-(f)와 같이 표면에 무작위한 {111} 피라미드 구조가 형성되었다. 초기 데미지 층의 깊이와는 무관하게 표면에 동일한 피라미드가 형성되었으며 와이어 소잉 공정에 의해 생성되었던 표면 결함은 모두 제거되었음을 검증하였다.

Fig. 4(a)는 초기 데미지 층의 깊이 및 텍스처링 적용 유무에 따른 와이어 소잉 웨이퍼의 표면 반사율을 보여주고 있다. 텍스처링을 적용하지 않은 PW는 표면 연마가 되어있기 때문에 균일한 표면 특성으로 인해 높은 반사도를 보이고 있으며, DDW와 SDW는 와이어 소잉에 의해 생성된 표면 결함으로 인하여 PW에 비해서는 낮은 반사도를 보이고 있다. 텍스처링을 적용한 샘플은 초기 데미지 층의 깊이와 무관하게 동일한 트렌드를 보이고 있으며, 표면에 생성된 피라미드 구조에 의해 모든 파장에 대해 낮은 표면 반사도를 보이고 있다. Figs. 3 및 Fig. 4(a)를 통해 와이어 소잉 웨이퍼에 충분한 텍스처링 공정을 적용한다면 초기의 데미지 깊이와는 무관하게 소잉 공정에 의해 생성된 표면 결함을 모두 제거할 수 있음을 검증하였다.

Fig. 4(b)와 Table 1은 각 웨이퍼 조건에 따른 J-V curve 및 J_{sc} , V_{oc} , FF, PCE와 같은 태양전지 셀의 전기적 특성을 나타내었다. 우선 텍스처링 공정을 적용하지 않아 피라미드 구조를 가지지 않으며 잔여 데미지 층이 있는 DDW 및 SDW를 통해 제조한 태양전지 셀은 각각 11.99, 12.48 mA/cm²의 J_{sc} 특성을 보이고 있다. 이러한 수치는 일반적인 실리콘 태양전지 셀과 비교하였을

때 매우 낮은 수치며, 실리콘 웨이퍼 벌크 및 표면 내에 존재하는 미세결함에 의해 셀 특성이 저하되었다. DDW 및 SDW를 통해 제조한 태양전지 셀의 FF는 각각 57.20% 및 69.62%, PCE는 각각 3.93% 및 4.97%로 매우 낮은 셀 효율을 보이고 있다. SDW는 DDW에 비해 실리콘 웨이퍼의 PN 접합 영역 내에 결함층의 두께가 상대적으로 얇아 FF 값이 다소 향상되었지만 일반적인 실리콘 태양전지 셀에 비해서는 매우 낮은 값을 보이고 있다. 와이어 소잉에 의해 생성된 결함을 모두 제거한 PW를 통해 제조한 태양전지 셀의 경우 약 20.12 mA/cm²의 J_{sc} 및 76.66%의 FF, 8.94%의 PCE를 보이고 있다. 이는 피라미드 표면 구조를 가지지 않아 높은 표면 반사율에 의해 일반적인 실리콘 태양전지 셀에 비해 낮은 J_{sc} 를 보이지만, FF는 유사한 수준의 값을 보이고

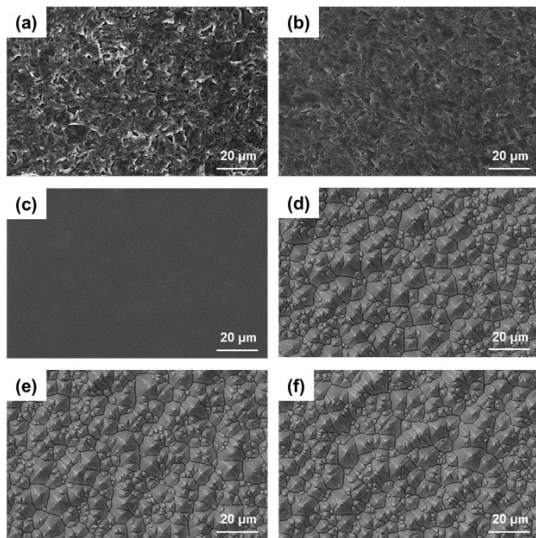


Fig. 3. Surface morphology of wire-sawn silicon wafer with different condition measured by SEM: (a) deep saw-damaged wafer without texturing, (b) shallow saw-damaged wafer without texturing, (c) polished wafer without texturing, (d) deep saw-damaged wafer with texturing, (e) shallow saw-damaged wafer with texturing, and (f) polished wafer with texturing

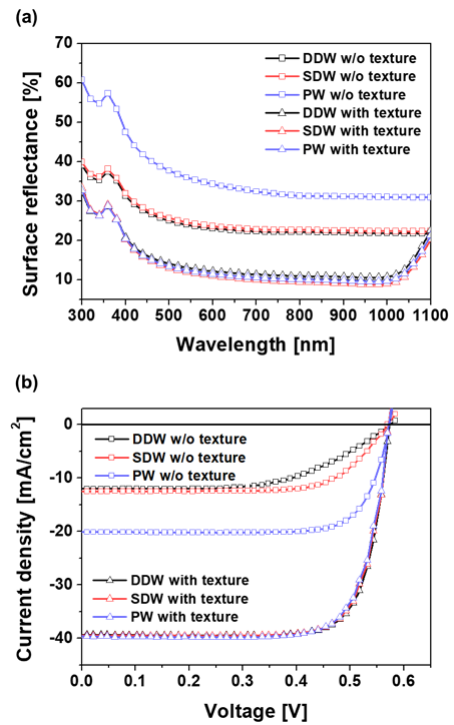


Fig. 4. (a) Dependency of surface reflectance of wire sawing silicon wafer on the initial damaged depth and surface structure as a function of wavelength. (b) J-V curve of the fabricated silicon solar cell with different initial damaged depth and surface structure

Table 1. PV characteristics of fabricated silicon solar cell with different initial damaged depth and surface structure

Sample	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
DDW w/o texture	0.57	11.99	57.20	3.93
SDW w/o texture	0.57	12.48	69.62	4.97
PW w/o texture	0.57	20.12	77.65	8.94
DDW with texture	0.57	39.27	78.05	17.53
SDW with texture	0.57	39.46	77.35	17.46
PW with texture	0.57	39.60	76.66	17.35

있다. 이를 통해 실리콘 벌크에서 와이어 소잉 공정에 의해 생성되는 데미지 층이 태양전지 셀의 FF에 크게 영향을 미침을 검증하였다.

이에 비해 텍스처링을 통해 피라미드 구조를 형성한 태양전지 셀의 전기적 특성은 Fig. 4(b) 및 Table 1에서 확인할 수 있듯이, 텍스처링을 적용한 DDW, SDW 및 PW를 통해 제조한 태양전지 셀의 J_{sc} 는 각각 39.27, 39.46, 39.60 mA/cm²이며, FF의 경우 78.05, 77.35, 76.66%, PCE의 경우 17.53, 17.46 및 17.35%로 초기 데미지 층의 깊이와는 무관하게 동일 수준의 J_{sc} , FF 및 PCE를 보이고 있다. 이를 통해, 와이어 소잉 공정에 의해 결함을 포함한 데미지 층이 실리콘 벌크 내에 생성되더라도 충분한 에칭 및 텍스처링 공정을 통해 모든 데미지 층을 제거함으로써 와이어 소잉 공정으로부터 기인되는 태양전지 셀 효율의 저하를 방지할 수 있음을 검증하였다.

4. 결론

우리는 와이어 소잉 공정으로 인해 생성되는 실리콘 내 데미지 층에 대한 실리콘 태양전지 셀의 전기적 특성의 의존성에 대해 연구를 수행하였다. 초기 와이어 소잉 데미지 층의 깊이가 깊을수록 와이어 소잉 데미지 층을 제거하지 않고 제조한 태양전지 셀의 J_{sc} 및 FF 값이 감소하여 셀 효율의 저하를 야기하였다. 이는 실리콘에 잔재되어 있는 와이어 소잉 데미지 층 및 결함으로 인해 태양전지의 J_{sc} 및 FF 값에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 또한, 초기 와이어 소잉 데미지 층의 깊이가 다르더라도 충분한 텍스처링을 적용하여 제조한 태양전지 셀들은 모두 동일한 수준의 전기적 특성을 보유하고 있다. 이를 통해, 실리콘 표면 및 벌크 내에 생성되는 데미지 층은 와이어 소잉 공정에 의해 필연적으로 발생하지만 후속 에칭 공정을 통해 소잉 데미지를 완벽하게 제거하여 셀 효율의 저하를 막을 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지핵심기술사업(No.20163030013390) 및 한국연구재단의 BK21 PLUS 사업을 통해 수행한 연구과제입니다.

References

1. M. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, A. W. Y. Ho-Baillie, "Solar cell effi-

- ciency tables (version 50)", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 25, pp. 668-676, 2017.
2. H. J. Moller, C. Funke, M. Rinio, S. Scholz, "Multicrystalline silicon for solar cells", *Thin Solid Films*, Vol.487, pp. 179-187, 2005.
3. A. Louwen, W. van Sark, R. Schropp, A. Faaij, "A cost roadmap for silicon heterojunction solar cells", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 147, pp. 295-314, 2016.
4. B. Sopori, S. Devayajanam, S. Shet, D. Guhabiswas, P. Basnyat, H. Moutinho, L. Gedvilas, K. Jones, J. Binns, "Characterizing damage on si wafer surfaces cut by slurry and diamond wire sawing", *J. Appel, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 0945-0950, 2013.
5. C. W. Hardin, J. Qu, J. Shih, "Fixed abrasive diamond wire saw slicing of single-crystal silicon carbide wafers", *Mater. Manuf. Process*. Vol. 19, No. 2, pp. 355-367, 2004.
6. K. Chen, Y. Liu, X. Wang, L. Zhang, X. Su, "Novel texturing process for diamond-wire-sawn single-crystalline silicon solar cell", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* Vol. 133, pp. 148-155, 2015.
7. N. Watanabe, Y. Kondo, D. Ide, T. Matsuki, H. Takato, I. Sakata, "Characterization of polycrystalline silicon wafers for solar cells sliced with novel fixed-abrasive wire", *Prog. Photovolt: Res. Appl.* Vol. 18, pp. 485-490, 2010.
8. X. Yu, P. Wang, X. Li, D. Yang, "Thin Czochralski silicon solar cells based on diamond wire sawing technology", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* Vol. 98, pp. 337-342, 2012.
9. A. Kumar, S. Kaminski, S. N. Melkote, C. Arcona, "Effect of wear of diamond wire on surface morphology, roughness and subsurface damage of silicon wafers", *Wear*, Vol. 364, pp. 163-168, 2016.
10. W. Chen, X. Liu, M. Li, C. Yin, L. Zhou, "On the nature and removal of saw marks on diamond wire sawn multicrystalline silicon wafers", *Mater. Sci. Semicond. Process* Vol. 27, pp. 220-227, 2014.
11. J. M. Kim, Y. K. Kim, "Saw-damage-induced structural defects on the surface of silicon crystals", *J. Electrochem. Soc.* Vol. 152, No. 3, pp. G189-G192, 2005.
12. B. Sopori, S. Devayajanam, P. Basnyat, "Surface characteristics and damage distributions of diamond wire sawn wafers for silicon solar cells", *AIMS Materials Science* Vol. 3, No. 2, pp. 669-685, 2016.
13. H. Seogneur, E. J. Schneller, N. S. Shiradkar, W. V. Schoenfeld, "Effect of diamond wire saw marks on solar cell performance", *Energy Procedia* Vol. 92, pp. 386-391, 2016.
14. P. Fath, G. Wileke, E. Bucher, J. Szlufcik, R. M. Murti, K. De Clercq, J. Nijs, R. Mertens, "Mechanical wafer engineering for high efficiency solar cells: an investigation of the induced surface damage", *Proc. 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, Vol. 2, pp. 1347-1350, 1994.