

다양한 실리콘 웨이퍼 제조를 위한 와이어 전기 방전가공

문희찬^{1,2}, 최선호², 박성희², 장보윤^{1,a}, 김준수¹, 한문희^{2,b}

¹ 한국에너지기술연구원 분리변환소재연구실

² 충남대학교 에너지과학기술대학원

Wire Electric Discharge Machining Process of Various Crystalline Silicon Wafers

Hee-chan Moon^{1,2}, Sun-ho Choi¹, Sung-hee Park¹, Bo-yun Jang^{1,a}, Jun-soo Kim¹, and Moon-hee Han^{2,b}

¹ Separation and Conversion Materials Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea

² Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received February 28, 2017; Revised March 13, 2017; Accepted March 21, 2017)

Abstract: Wire electrical discharge machining (WEDM) process was evaluated to slice Silicon (Si) for various applications. Specifically, various Si workpieces with various resistances, such as single and multi crystalline Si bricks and wafers were used. As conventional slicing processes, such as slurry-on or diamond-on wire slicing, are based on mechanical abrasions between Si and abrasive, there is a limitation to decrease the wafer thickness as well as kerf-loss. Especially, when the wafer thickness is less than 150 μm , wafer breakage increases dramatically during the slicing process. Single crystalline P-type Si bricks and wafers were successively sliced with considerable slicing speed regardless of its growth direction. Also, typical defects, such as microcracks, craters, microholes, and debris, were introduced when Si was sliced by electrical discharge. Also, it was found that defect type is also dependent on resistance of Si. Consequently, this study confirmed the feasibility of slicing single crystalline Si by WEDM.

Keywords: Wire, Electrical discharge, Silicon, Wafer, Brick

1. 서론

현재, 태양광 시장의 90% 정도를 결정질 실리콘 태양 전지가 차지하고 있다. 이러한 결정질 실리콘 태양전지 제조단가의 40% 이상을 차지하고 있는 실리콘 소재 가격을 절감을 위해, 웨이퍼의 두께를 줄이고자하는 박형 태양전지에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다 [1-3].

기존의 웨이퍼절단 방식인 slurry-on wire와 diamond-on wire를 기반으로 하는 multi wire slicing공정은, 기계적 파괴를 기반으로 하기 때문에, 웨이퍼 표면에 많은 손상을 일으키고 두께 감소에 한계가 있으며, 파손률과 실리콘의 손실률(Kerf-loss)이 큰 것으로 알려져 있다 [4,5]. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 정밀 형상 및 부품 가공 기술인 WEDM (wire electric discharge machining)을 웨이퍼링 공정에 적용 시켜 보고자 하였다. 와이어 방전가공은 dielectric fluid에 잠긴 공구 전극과 전도성 소재 사이에 고전압을 부가하여 전기 방전을 연속적으로 발생시켜 workpiece의 미세한 양을 조금씩 제거하는 가공 기술이며, 우수한 정밀도 및 복잡한 형상 가공성 등의 장점을 가짐으로써 금속

a. Corresponding author; byjang@kier.re.kr

b. Corresponding author; mhhan@cnu.ac.kr

소재의 정밀한 형상을 제조하는 기술이다 [6,7]. 그러나 금속과는 달리 실리콘은 높은 저항($30 \Omega \cdot \text{cm}$) [8]으로 인해, 절단이 용이하지 않다고 알려져 있으나, 고전압과 더불어 DC전원의 펄스화를 통한 절단의 가능성에 대해 보고되었다 [9].

본 논문에서는 와이어 방전가공 적용을 위한 DC 펄스 전원과 와이어지그 등을 이용하여 결정질 실리콘의 웨이퍼링 적용 가능성을 확인하기 위해, 다양한 종류의 실리콘소재의 절단을 시도하였다. 보다 구체적으로, 2종류의 실리콘 블록과 3 종류의 실리콘 웨이퍼의 전기저항을 측정 후 절단 속도와 상관계수를 살펴보았다. 또한, 이렇게 절단된 workpiece의 대표적인 표면 결함과 종류에 따른 미세구조의 차이에 대해 알아보았다.

2. 실험 방법

그림 1은 (a) 와이어 방전가공 장치의 모식도와 (b) 실제 형성된 아크의 사진을 나타낸 것이다. 장치 모식도에 보이는 바와 같이, 와이어 방전가공 장치는 크게 와이어 부와 수조 부로 구분된다. 와이어 부에는 두 개의 마이크로 게이지가 있고, 그 끝단에서 와이어와 전극이 연결된다. 와이어의 위치를 조절할 수 있는 마이크로 게이지는 workpiece와 와이어의 수평을 맞추기 위해 복수로 설치되었다. De-Ionize water (DIW)가 채워진 수조에 workpiece를 고정해주는 (+)전극이 위치한다. 와이어는 텅스텐 와이어를 사용하였고, workpiece는 단결정(S1) p-type <100>과 다결정(S2) p-type 브릭(brick), 단결정 p-type(S3)과 단결정 n-type(S4) <100> 웨이퍼, 그리고 단결정 p-type <111> (S5)의 웨이퍼 총 5종을 준비하였다. 이들의 크기는 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (가로 x 세로) 이었으며, 두께는 0.7(웨이퍼)~2.0 mm(브릭)로 각각 다르다. 그림 1(b)에 보이는 바와 같이, workpiece와 와이어사이에 형성된 아크를 볼 수 있으며, 이 아크는 매우 균일하게 형성되었음을 알 수 있었다.

그림 2에 WEDM공정의 흐름도를 나타내었다. 절단에 앞서서 (+)전극(Cu plate)과 workpiece를 접착형 silver paste를 이용하여 부착시켰다. 와이어 부에 와이어를 위치시키고 workpiece와 와이어가 수평해지도록 높이를 조절하였다. 와이어지그에 연결된 와이어는 전원의 (-)전극과 연결되었다. (+)전극과 workpiece와의 접촉을 위한 충분한 시간이 지난 후, 수조에 와이어와

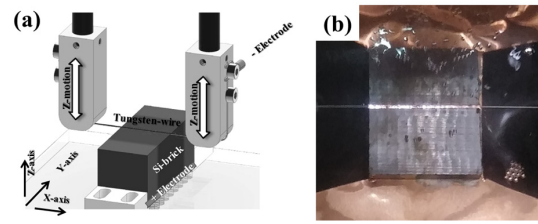


Fig. 1. (a) 3 dimensional diagram of WEDM system and (b) photo image of arc discharge between wire and workpiece.

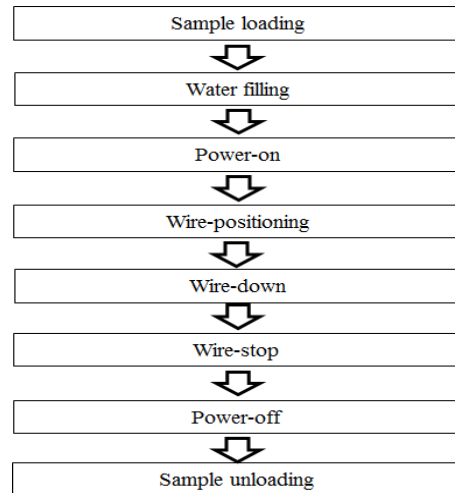


Fig. 2. Process flow chart of WEDM.

workpiece가 모두 잠기도록 DIW를 채워 넣었다. 펄스 형태의 DC 전원을 와이어에 인가하였고, 이때 사용된 제어변수는 차단전압, 인가전류 그리고 주파수로 구분되었다. 이들은 각각 90~200 V, 10 A, 20 kHz이었다. 와이어는 전동모터에 의해 0.12 mm/min속도로 하강하였으며, 최초 아크 발생시간으로부터 특정두께의 workpiece가 완전히 절단될 때까지의 시간 혹은 10분 동안 절단된 깊이 측정하고 이를 계산함으로써, 절단속도를 구하였다. 절단이 완료된 이후에는, workpiece를 (+)전극과 분리하여 미세구조에 대해 알아보았다.

절단 전의 workpiece의 면저항은 4-point probe (CMT-SR1000N, AIT, Korea)를, 수직 방향 저항은 디지털 테스트기(ST-3234, SAEHAN, Korea)를 이용하여 측정하였으며, 절단 이후의 절단면의 미세구조는 Scanning Electron Microscope (SEM, S-4800, Hitachi, Japan)로 표면 거칠기는 표면 조도 측정기(TR-200S, TIME, China)로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Workpiece의 종류와 절단속도

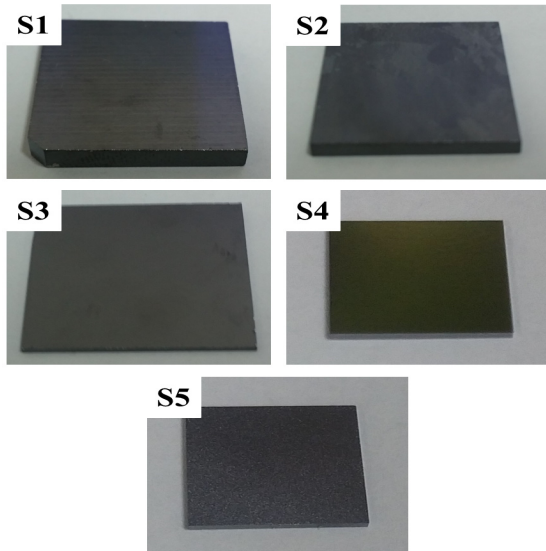


Fig. 3. Photo images of Si workpieces for WEDM.

실리콘 웨이퍼는 태양광발전을 비롯하여 반도체칩, 센서 등의 다양한 용도로 활용되고 있다. 활용용도가 다른 실리콘 workpiece에 대하여, WEDM을 이용한 절단 공정의 활용 가능성을 보기 위한 다양한 샘플들을 아래와 같이 준비하였다.

그림 3에 WEDM 공정에 사용된 서로 다른 특성을 갖는 5가지의 workpiece를 나타내었다. S1은 p-type (boron doped)의 <100> 결정성장 방위를 갖는 단결정 브릭이고, S2는 p-type 다결정브릭이다. 현재 상용화된 태양전지 제조공정에 가장 많이 사용되는 잉곳도 이와 같으며 SoG (solar graded)-Si로 명명된다 [10]. S3는 EG (electronic graded)-Si로 반도체용 웨이퍼이며 일반적으로 SoG-Si보다 높은 전기저항 특성을 나타낸다 [11]. S4는 n-type (phosphorus doped) <100>단결정 웨이퍼이며 HIT (heterojunction with intrinsic thin layer)구조를 비롯한 고효율 태양전지에 주로 사용된다 [12,13]. S5는 p-type <111> 단결정 웨이퍼로 태양전지 보다는 전자기기(electronics device)용 소재로서 주로 활용된다 [14].

그림 4는 WEDM을 통해 절단된 (a) S1 (브릭)과 (b) S3 (웨이퍼) workpiece의 대표적 형상을 나타낸 것이

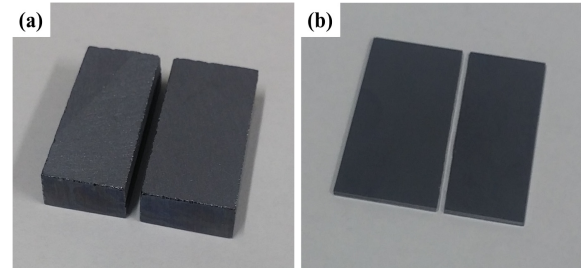


Fig. 4. Photo images of typical workpieces sliced by WEDM process.

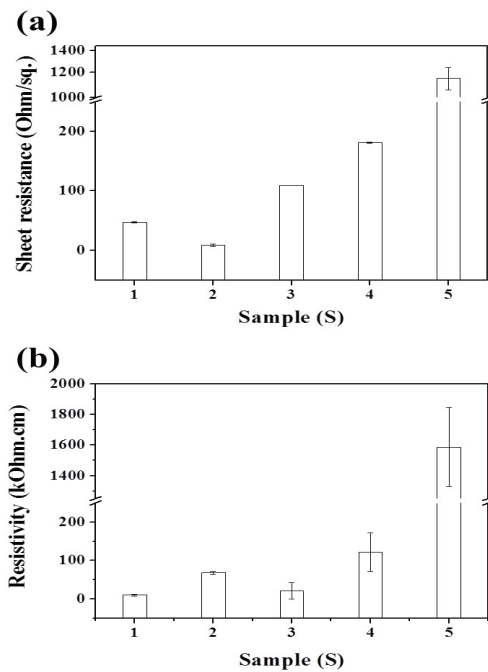


Fig. 5. (a) Sheet resistances and (b) resistivities of 5 workpieces.

다. 기존의 WEDM은 브릭 혹은 웨이퍼의 절단면과 와이어가 수직방향에 위치함으로써 특정한 형상을 제작함에 있어서 효과적이었다 [15]. 그러나, WEDM이 반도체나 태양전지용 웨이퍼 제조공정으로 활용되기 위해서는, 절단하고자 하는 workpiece와 수평한 방향의 절단이 가능해야만 그 활용가능성을 확인할 수 있다.

그림 5는 앞서 열거한 5 가지의 웨이퍼의 전기저항을 나타낸 것이다. (a)는 면저항(sheet resistance)으로 브릭 형태인 workpiece S1, S2는 각각 46.9, 8.5 (Ohm/sq.)이고, 웨이퍼형태인 S3, S4, S5의 면저항은 각각 108.9, 181.18, 및 1,148 (Ohm/sq.)의 값을 나타내었다. (b) 비저항(specific resistivity)의 경우, S3, S4, 그

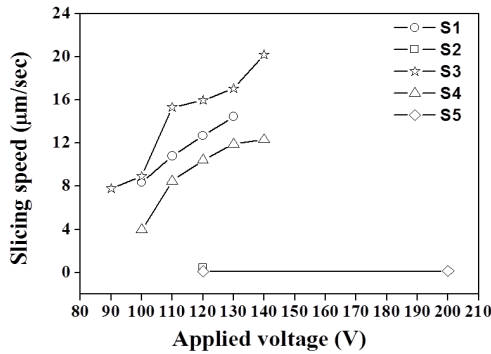


Fig. 6. Slicing speeds of 5 workpieces with various applied voltages.

리고 S5는 면저항과 동일한 경향성을 나타내었으나, S1과 S2는 대폭 감소되었다. 이러한 원인은 4-point probe 방식의 저항측정의 특성에 기인한 것이다. 즉, 측정된 면저항 결과를 토대로 workpiece의 크기와 두께의 수치를 대입하여 계산을 통해 산출되기 때문에, 비교적 두꺼운 S1과 S2의 비저항이 S3, S4, S5보다 낮게 나타나는 이유이다.

그림 6은 90~200 V, 10 A, 그리고 20 kHz 조건하에서 5 종류의 workpiece가 절단된 속도를 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 절단속도가 증가한 S1, S3, 그리고 S4의 경우, 최저 인가전압 이하에서는 아크가 발생하지 않았으며, 최대 인가전압 이상에서는 와이어의 단선이 발생함으로써 절단이 지속되지 않았다. 절단속도 순서로 나열하자면, S3, S1, S4, S2, 그리고 S5의 순서인데, S1이 더욱 저항이 낮았음에도 불구하고, S3가 가장 높은 절단속도를 보였다. 그 원인으로는, 하부의 (+)전극과의 거리는 S1과 S3는 각각 2, 0.7 mm이고, 평균 비저항과 고려하면, 수직방향의 저항(resistance, ohm)은 S1과 S3는 각각 1.9, 1.5 k Ω 이다. 실제 절단공정에서 workpiece는 0.4 k Ω 만큼 낮은 저항을 보임으로써, 절단속도가 비교적 높은 것이다. 동일한 두께인 웨이퍼 workpiece들을 비교해보면, 절단속도는 S3~S5로 갈수록 감소하고 저항은 정확히 그 반대이다. S5와 더불어 S2는 높은 인가전압조건에서도 거의 절단되지 않았다. 그림 5의 (b)에서, S2는 가장 낮은 비저항을 보였음에도 불구하고 이와 같은 절단속도를 보인 이유는 다결정 브릭에 존재하는 결정립계(grain boundary)에 의한 전도성이 극감되기 때문이다. 실제로 전기저항의 측정과정에서 probe가 결정립의 경계에 위치할 경우, 극도로 낮은

전도도로 인해 측정이 불가능하였다. 반면에, 한 개의 결정립에 probe가 위치할 경우에만 측정이 가능하였다. 다결정 브릭은 낮은 저항 특성을 나타내는 결정립을 나타내었으나, 결정립계의 영향에 의해 실제 절단공정에서는 높은 저항을 보이는 것이다. 정리하면, WEDM 웨이퍼의 종류에 따른 절단속도를 결정하는 핵심공정변수는 workpiece의 저항과 (+)전극과의 거리임이 명확하다.

3.2 절단면의 미세구조

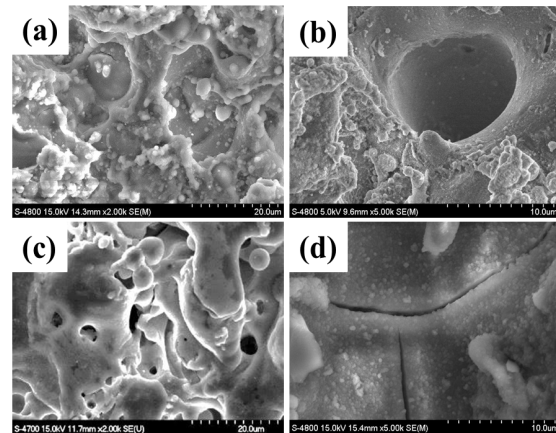


Fig. 7. SEM images of typical defects on Si's surface sliced by WEDM process. (a) debris, (b) crater, (c) micro hole, and (d) micro crack.

절단면의 품질은 WEDM을 통해 제작되는 웨이퍼의 품질을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 반도체공정에 사용되는 웨이퍼의 경우, lapping과 CMP공정을 통해 수 nm수준의 거칠기를 보여야만 회로를 구성할 수 있다 [16]. 이에 반해, 태양전지는 수 μ m수준의 거칠기만 확보된다면, texturing 공정을 통해 광 흡수층(light trapping layer)을 만들 수 있다 [17]. 웨이퍼의 절단면을 관찰함으로써, WEDM공정을 통해 제작될 웨이퍼의 활용가능성을 가늠할 수 있다.

그림 7은 실리콘 절단 후 절단면에 나타나는 대표적인 결함들을 보여주는 SEM 이미지이며, S1을 대표로 하여 분석한 것이다. 대표적인 결함에는 (a) debris, (b) crater, (c) micro-hole, 및 (d) micro-crack이 있다. 방전가공에서 전기방전이 발생한 위치는 국부적으로 약 3,000~6,000°C의 고온상태이다 [18]. 이때, 발생된 열은 수 μ sec만에 workpiece를 휘발시키고, 주변 DIW에 의해 냉



Fig. 8. SEM images of 5 workpieces' surfaces sliced by WEDM process.

각된다. 이러한 일련의 과정이 20 kHz의 빈도로 반복됨으로써 절단이 이루어진다. (a)의 debris는 workpiece의 휘발과 응고로 인해 생성되었으며, 실리콘 절단면에 부착되어 있는 상태로 실리콘과 화학적으로 결합되어있지는 않다. (b)의 craters와 (c)의 micro-holes의 경우, 아크가 workpiece에 닿은 위치이며 아크의 에너지밀도가 국부적으로 높은 경우 craters가 형성되며, 반대의 경우 micro-holes이 형성된다. 실리콘과 같이 높은 취성 특성을 보이는 workpiece의 경우, 국부적인 용융과 응고가 반복됨에 따라 고-액간 열팽창계수차에 의해, 표면에 (d)와 같이 micro-crack이 발생한다. 이러한 미세구조의 차이는, 절단과정에서 전기방전의 에너지밀도를 판단할 수 있는 근거로서 활용될 수 있다. WEDM의 태양전지용 웨이퍼 제조에 활용하기 위해서는 이러한 미세구조 분석을 통한 결함제어가 매우 중요한 부분을 차지할 것이다.

그림 8은 120 V, 10 A, 20 kHz의 WEDM 공정조건에서 절단된 5종류의 workpiece의 절단면을 관찰한 SEM 이미지이다. 절단속도가 빠른 S3와 S1는 debris, craters, micro-hole, 그리고 micro-crack이 모두 관찰되었다. 또한, debris의 형태는 구형에 가까웠다. S1의 경우, S3에 비해 절단면의 굴곡이 더욱 증가한 형태

를 보였다. S4는 debris, craters, 및 micro-holes가 관찰되었으며 표면에 부착된 debris로 인해 절단면의 micro-crack은 확인할 수 없었다. 절단속도가 느린 S2와 S5는 표면에 debris만 관찰되었다. WEDM공정에서 절단속도는 전기방전의 에너지밀도와 비례한다. 또한, 이러한 에너지 밀도는 workpiece의 저항에 반비례한다. 에너지 밀도의 관점에서 보면, 높은 에너지밀도를 갖는 전기방전은 workpiece에 더 높은 온도를 형성함으로써, 보다 크고 많은 hole과 micro-crack을 유발한다. 그리고, 아크 주변의 DIW를 더 많이 휘발시킨다. 휘발된 DIW는 bubble의 형태로 debris와 함께 절단면으로부터 상대적으로 더 쉽게 이격된다. Debris의 크기 증가도 같은 맥락으로 설명 될 수 있는데, 동일 시간에서 보다 많이 휘발된 workpiece 물질은 bubble내에서 응고과정을 거칠 때 더 큰 입자를 만들게 된다. 이러한 큰 입자들은 자중에 의해 bubble을 이탈하여 다시 workpiece의 표면에 부착된다. 이러한 일련의 과정을 거친 S3와 S1의 절단면의 경우, craters와 micro-crack이 두드러진 반면에 debris의 밀도는 감소하였다. 반면, S2와 S5는 상대적으로 크기가 작은 debris만 관찰된 것으로 미루어 보아 아크의 낮은 에너지밀도가 절단이 불가능할 정도로 낮았음을 의미한다. WEDM을 이용한 절단공정을 통해 제작된 S3과 S1 절단면의 평균 거칠기(Ra)는 각각 4.2와 3.8 μm 이었으며, 이는 상용화된 슬러리방식의 다중와이어 절단을 통해 제작된 웨이퍼의 평균 거칠기(2~5 μm)에 포함된다. 따라서, WEDM공정은 태양광 발전용 결정질 실리콘의 절단공정에 활용될 수 있음이 확인되었다.

4. 결론

WEDM을 이용한 실리콘 웨이퍼링 공정을 개발하기 위하여, 다양한 실리콘 소재에 적용하여 그 활용 가능성을 확인하였다. 보다 구체적으로, 2종의 실리콘 블록과 3종의 실리콘 웨이퍼의 저항특성을 측정하고, 저항에 따른 절단속도 측정을 통해, WEDM의 적용 가능성을 검토하였다. 또한, 절단된 실리콘의 절단면의 미세구조 분석을 통해 대표적 결함을 정리하였으며, 각 소재별 결함 종류의 차이를 분석하였다. 결론적으로, WEDM은 단결정 p-type의 실리콘의 절단에 매우 적합하여, 결정성장 방향이나, 두께에는 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알

수 있었다. 기존의 기계적 분쇄가 아닌 아크라는 새로운 에너지를 이용한 실리콘 웨이퍼 제조기술의 가능성을 확인 할 수 있었다. 또한, 다중와이어를 적용한 실리콘 웨이퍼 제조 및 웨이퍼 표면의 결함제어에 대한 추가 연구가 진행 중이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(No. 20163020010890)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] T. M. Bruton, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **72**, 3. (2002). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(01\)00145-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(01)00145-3)]
- [2] M. R. Swanson, *Prog. Photovolt*, **14**, 443 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.709>]
- [3] T. Saga, *NPG Asia Mater.*, **2**, 96 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/asiamat.2010.82>]
- [4] S. Bhagavat and L. Kao, *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, **48**, 95 (2008). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.009>].
- [5] R. Steeman, J. Yang, O. Mjos, and S. Adolphus, *Energy Procedia*, **15**, 20 (2012). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.003>]
- [6] Y. F. Luo, C. G. Chen, and Z. F. Tong, *J. Mater. Sci.*, **27**, 5805 (1992). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01119742>]
- [7] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, and K. Popov, *J. Mater. Process. Technol.*, **149**, 50 (2004). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.02.008>]
- [8] W. Y. Peng and Y. S. Liao, *J. Mater. Process. Technol.*, **140**, 274 (2003). [DIO: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00718-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00718-0)]
- [9] W. Wang, Z. D. Liu, Z. J. Tian, H. Y. Huang, and Z. X. Liu, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**, 3149 (2007) [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.029>]
- [10] B. Iryna, L. Oleksandr, V. Timur, B. Sergey, and M. K. Frank, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **159**, 128 (2017) [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.038>]
- [11] C. Lihan, R. Xianpei, F. Baodian, Z. Jincheng, and C. Chao, *Optik*, **125**, 3918 (2014). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.01.159>]
- [12] K. Praveen, P. Michael, W. Benjamin, E. Oliver, J. K. Lejo, D. M. Valentin, and K. Radovan, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **157**, 200 (2016). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.027>]
- [13] X. Yupeng, H. Peide, W. Shuai, L. Peng, L. Shishu, Z. Yuanbo, H. Shaoxu, Z. Huishi, Z. Chunhua, and M. Yanhong, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **51**, 1697 (2015). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.035>]
- [14] V. D. Dzung, H. P. Phan, Q. Afzaal, and D. Toan, *Roy. Soci. Chem.*, **6**, 21302 (2016). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA28164D>]
- [15] Q. Li, J. Bai, Y. Fan, and Z. Zhang, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **82**, 1089 (2016). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7412-8>]
- [16] L. Jing, W. Yao, Y. He, Z. Cheng, J. Yuan, and J. Luo, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **82**, 523 (2016). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7370-1>]
- [17] F. Hu, S. Yun, J. Zha, K. Chen, S. Zou, F. Liang, and X. Su, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **159**, 121 (2017). [DIO: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.032>]
- [18] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, and B. M. Schumacher, *Mechanic. Mater. Eng.*, **54**, 599 (2005).