실리콘 기판 표면 형상에 따른 반사특성 및 광 전류 개선 효과

연창봉*** · 이유정*** · 임정욱*** · 윤선진***†

*한국전자통신연구원 그린소자소재연구부 박막태양광기술연구팀, **과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학과

Effect of Surface Microstructure of Silicon Substrate on the Reflectance and Short-Circuit Current

Chang Bong Yeon***, Yoo Jeong Lee***, Jung Wook Lim*** and Sun Jin Yun***†

*Convergence Components and Materials Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute, 138 Gajeongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-700, Korea

**Department of Advanced Device Engineering, University of Science and Technology, 113 Gajeongno, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Korea

(2012년 11월 9일 접수 : 2012년 12월 11일 최종수정 : 2012년 12월 12일 채택)

Abstract For fabricating silicon solar cells with high conversion efficiency, texturing is one of the most effective techniques to increase short circuit current by enhancing light trapping. In this study, four different types of textures, large V-groove, large U-groove, small V-groove, and small U-groove, were prepared by a wet etching process. Silicon substrates with V-grooves were fabricated by an anisotropic etching process using a KOH solution mixed with isopropyl alcohol (IPA), and the size of the V-grooves was controlled by varying the concentration of IPA. The isotropic etching process following anisotropic etching resulted in U-grooves and the isotropic etching time was determined to obtain U-grooves with an opening angle of approximately 60°. The results indicated that U-grooves had a larger diffuse reflectance than V-grooves and the reflectances of small grooves was slightly higher than those of large grooves depending on the size of the grooves. Then amorphous Si:H thin film solar cells were fabricated on textured substrates to investigate the light trapping effect of textures with different shapes and sizes. Among the textures fabricated in this work, the solar cells on the substrate with small U-grooves had the largest short circuit current, 19.20 mA/cm². External quantum efficiency data also demonstrated that the small, U-shape textures are more effective for light trapping than large, V-shape textures.

Key words light trapping, textured surface, V-groove, U-groove.

1. 서 론

태양전지 시장의 80 % 이상을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지와 박막 실리콘 태양전지에서 광 흡수층으로 사용되는 실리콘은 매장량이 풍부하고 가격이 저렴하며, 독성이 없어서 가장 잠재력이 큰 태양광 소재이다. 하지만 실리콘은 간접천이형 밴드갭을 가지고 있기 때문에 직접천이형 밴드갭을 가지는 다른 화합물들에 비해서 광 흡수계수가 낮은 단점이 있다. 결정질 실리콘 태양전지의 경우 광 흡수율이 낮고, 비정질 실리콘 박막의

경우 광 흡수계수가 상대적으로 높긴 하지만 비정질 실리콘 태양전지의 광 흡수층의 두께가 180~300 nm 정도로 얇기 때문에 효율향상을 위해서는 효과적인 태양광 포획이 반드시 필요하다. 최근 고효율 달성으로 큰 관심을 받고 있는 실리콘 이종접합 태양전지(Heterojunction with Intrinsic Thin layer, HIT)와 새로운 개념의 실리콘 양자점 태양전지의 경우에도 표면조직화는 매우 필수적인 공정이다.¹⁻⁴⁾

일반적으로 태양광 포획량을 증가시키기 위한 방법은 크게 두 가지가 있다. 첫째, 빛이 입사되는 표면의 거

†Corresponding author

E-Mail : sjyun@etri.re.kr (S. J. Yun, ETRI)

© Materials Research Society of Korea, 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.

칠기를 증가시킴으로써 광 산란을 통해 전 파장영역의 빛 반사를 줄이는 방법이다. 대부분 표면의 거칠기 향상을 위해 식각공정을 이용하는데 박막 실리콘 태양전지의 경우 전극층의 표면 조직화(texturing)를 통해 표면의 거칠기를 증가시키고, 결정질 실리콘의 경우 실리콘 결정면에 따른 선택적 식각을 통해 실리콘 기판의 거칠기를 증가시킨다. 둘째, 태양전지의 상층부에 반사방지막을 형성시키는 방법이다. 반사방지막은 태양전지 표면에서의 빛 반사를 줄이고, 특정한 파장영역의 투과성을 증가시키기 위해 사용된다. 본 논문에서는 위에서 제시한 방법들 중 조직화된 표면 형상에 따른 광 전류 증가와 빛 반사율의 감소 효과를 논의하고자 한다.⁵⁾

가장 일반적으로 사용하는 결정질 실리콘 기판의 조직화 방법은 결정면에 따라 서로 다른 식각속도를 나타내는 습식 이방성 식각 용액을 이용하여 V-groove를 형성하는 방법이다. 건식 식각을 통한 정교한 표면형상 구현이 현재 연구되고 있지만 태양전지의 저가화를 위해서는 습식 식각을 통한 표면형상 구현이 더 유리하다. 이방성 식각용액으로써 KOH, NaOH와 같은 알칼리 금속 수산화물 용액 또는 tetramethylammonium-hydroxide (TMAH) 용액을 사용하여 습식 식각을 진행하는데 균일한 크기의 표면형상을 얻기 위해 isopropyl alcohol(IPA) 첨가가 필수적인 것으로 보고된 바 있다.⁶⁻⁷⁾ 한편, 등방성 습식 식각의 경우에는 일반적으로 HF와 HNO₃ 혼합용액과 같은 산 용액을 이용하여 진행한다.⁸⁻¹⁰⁾

본 논문에서는 이방성 식각용액과 등방성 식각용액을 적절히 활용하여 CZ p-type (100) 실리콘 웨이퍼 표면에 V-groove 와 U-groove 형상을 제조하고 각 형상에 따른 광 반사 특성을 연구하였다. 그리고 각 표면형상들이 광 흡수층의 광 전류 발생에 미치는 효과를 관찰하기 위하여 비정질 실리콘 박막태양전지를 각 기판들 위에 제조하여 표면 형상과 형상의 크기에 따른 단락 전류의 변화를 살펴보았다. 또한 본 논문에서는 이방성 식각 공정에서 IPA 의 첨가가 groove 형성의 균일도와 groove 크기에 미치는 영향을 잘 보여주는 결과를 제시하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 표면형상을 구현하기 위한 기판으로 CZ p-type (100) 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. V-groove 모양의 표면형상을 얻기 위해서 이방성 식각용액인 KOH 와 IPA의 혼합용액을 사용하여 70 °C에서 수십분 이상 식각하였다. 이 과정에서 KOH 농도가 높으면 IPA가 잘 용해되지 않아 균일한 혼합용액이 잘 만들어지지 않기 때문에 저농도의 KOH 용액에 IPA를 첨가하여 식각용액을

제조해야 한다. 또한 IPA의 농도를 조절하여 크기가 다른 V-groove를 형성할 수 있었다. 밑면의 길이가 10 μm 이상인 크기를 갖는 표면형상을 얻기 위해서 KOH(3 vol%) 용액에 IPA를 5 vol% 첨가하였고, 3 μm 이하의 크기를 갖는 텍스처를 얻기 위해서 KOH(3 vol%) 용액에 IPA 10 vol%를 첨가하였다. 그리고 식각과정 중 실리콘 표면에서 발생하는 H₂ gas의 방해로 인해 식각용액이 기판 표면에 불균일하게 작용하는 것을 방지하기 위해 초음파를 가하면서 식각하였다.¹¹⁾

U-groove를 갖는 표면형상을 얻기 위해서, 이방성 식각을 하여 얻어진 V-groove 시편을 등방성 식각하였다. 등방성 식각용액은 CH₃COOH, HNO₃, DIW, HF 용액을 23:40:27:10 의 비율로 혼합하여 사용하였고, 상온에서 식각 공정을 수행하였다. 이와 같이 진행하여 3 μm 이하, 10 μm 이상의 크기를 갖는 V-, U-groove 표면형상을 조절하여 구현하였다.

식각조건에 따른 기판의 표면형상 변화는 주사전자현미경(SEM) 을 이용하여 관찰하였으며, 표면의 광 산란 특성을 측정하기 위하여 표면조직화된 기판 위에 Al 300 nm를 증착한 후에 UV-Vis spectrophotometer와 555 nm 파장의 광원을 사용하는 hazemeter 이용하여 총 반사도(total reflectance; R_{total})와 확산 반사도(diffuse reflectance; R_{diffuse})를 측정하였다.

기판의 표면형상이 얼마나 효과적으로 광 포획에 기여

Fig. 1. The structure of amorphous silicon thin film solar cells fabricated in this work.

하는지를 파악하기 위하여, 이 기관들 위에 박막 태양 전지를 제작하여 groove의 크기와 형상에 따른 광 포획 효과를 평가하였다. 본 연구에서 제조한 박막 태양전지의 표면구조를 Fig. 1에 나타내었다. Al 하부전극은 E-Beam evaporation 증착법을 사용하여 300 nm 두께로 증착하였으며, ZnO:Ga (GZO) 투명전극층은 rf-magnetron sputter 증착법을 이용하여 상부와 하부에 각각 800 nm, 300 nm를 증착하였다. GZO target은 Ga_2O_3 가 5 wt% 도핑된 4인치 크기의 ZnO 세라믹 타겟(99.99 % purity)을 사용하였다. 수소화된 비정질 실리콘 박막들은 13.56 MHz의 rf power가 인가되는 플라즈마 화학기상 증착법을 이용하여 증착하였고, 표면조각화된 기관의 경우 표면적이 크게 증가하여 실제로 증착되는 두께가 더 얇아지기 때문에 면적증가 요인을 고려하여 동일한 두께가 증착되도록 증착시간을 조절하였다.¹²⁾

실리콘 박막 태양전지는 외부양자효율(EQE) 측정장비와 솔라 시뮬레이터를 이용하여 그 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저, 이방성 식각용액인 KOH와 IPA 혼합용액에서 IPA의 첨가가 이방성 식각 특성에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 IPA 없이 KOH 농도를 2 wt%, 10 wt%, 20 wt%로 다르게 하여 70 °C에서 60분간 실리콘 기판을 식각하였다. 그 결과, KOH 농도와 무관하게 모두 비선택적 등방성 식각 특성을 나타내었기 때문에 결정면에 따른 선택적 식각에는 IPA 첨가가 반드시 필요함을 확인하였다.¹³⁾

IPA가 이방성 식각의 개시제 역할을 한다는 것을 확인한 후, IPA 농도에 따른 식각특성의 변화를 관찰하기 위한 실험을 진행하였다. KOH(3 vol%) 용액에 IPA를 각각 10 vol%, 5 vol%를 첨가하여 식각을 진행하였다. 그 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 IPA 농도가 각각 10 vol%와 5 vol% 일 때 서로 다른 크기의 V-groove가 균일하게 얻어짐을 알 수 있었다. Fig. 2(a)를 보면 IPA 농

도가 10 vol%로 높을 경우 작은 V-groove(밑면의 길이 < 3 μm)가 형성되고, Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 IPA 농도가 5 vol%일 때 상대적으로 더 큰 V-groove(밑면의 길이 > 10 μm)가 형성되었다. IPA농도가 상대적으로 높을 때 더 작은 V-groove가 형성된 이유는 IPA가 실리콘 웨이퍼 표면 (110) 방향의 식각속도를 감소시켜서¹⁴⁾ 단위면적당 선택적 이방성 식각이 개시될 확률이 더 증가하기 때문으로 생각된다. 일반적으로 이방성 식각을 통해 수 μm 정도의 작은 V-groove를 얻기 위해서 TMAH 용액을 사용하는 것으로 보고되고 있다.¹⁵⁾ 하지만 본 연구에서는 IPA의 농도를 조절하여 3 μm 이하의 크기를 갖는 작고 균일한 V-groove를 얻을 수 있었다.

이방성 식각시간에 따른 반사특성 변화를 관찰하기 위해 실리콘 기판을 KOH(3 vol%)와 IPA(5 vol%)의 혼합용액으로 70 °C에서 30분, 50분 식각 후 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 정반사도(specular reflectance)를 측정하였다. Fig. 3에 제시한 결과에서 보는 바와 같이 30분간 식각하였을 때 파장 555 nm에서 반사도가 5.7 %로서 식각하지 않은 것에 비해 38.7 % 감소하였으며, 50

Fig. 3. The surface reflectance of Si substrates textured for 0, 30, and 50 min.

Fig. 2. The SEM images of (a) small V-grooves textured by using IPA 10 vol% and (b) large V-grooves textured by using IPA 5 vol%.

Fig. 4. The SEM images of Si substrate anisotropically etched for (a) 30min and (b) 50min.

Fig. 5. The SEM images of U-grooves formed by isotropic etching of small V-grooves for (a) 2.5min, (b) 5min, and large V-grooves for (c) 5min and (d) 10min.

분 식각했을 때는 모든 영역의 파장에서의 반사도가 거의 0%에 가까움을 알 수 있었다. 식각 시간에 따른 표면형상을 보여주는 Fig. 4의 SEM 사진에서 30분동안 식각을 진행했을 때에는 groove가 형성되지 않은 영역이 많이 관찰되었으나, 50분 식각을 진행했을 때는 대부분의 영역에 groove가 형성되었음을 볼 수 있다. 따라서 모든 표면 영역에서 균일하게 groove가 생성되기 위해서는 충분한 식각시간이 필요하다는 것을 알 수 있었다. Fig. 3의 UV-Vis spectrophotometer 측정 결과는 표면에서 수직인 방향에서의 반사도만을 보여주므로 확산반사도($R_{diffuse}$)를 알아보기 위하여 Fig. 4(b)와 유사하게 50분

이상 식각하여 기관의 모든 영역에 균일하게 V-groove가 형성되어 있는 웨이퍼 표면을 hazemeter를 이용하여 555 nm 파장에서의 반사도를 측정하였다. 그 결과 총 반사도(R_{total}) 값은 식각 전 30.1%에서 식각 후 20%이하로 감소하였고 $R_{diffuse}$ 는 0.1%에서 16% 이상으로 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 이 결과는 편평한 표면에 비해 V-groove의 표면이 입사된 빛의 산란을 크게 증가시킴을 잘 보여준다.

또 다른 표면형상인 U-groove를 얻기 위해서 V-groove 시편을 등방성 습식식각하였다. 이 공정에서 groove의 크기에 따라 적절한 U-groove가 형성되는 식각시간을 알

기 위하여 식각시간에 따른 표면형상 변화를 관찰하였다. 등방성 식각에 사용된 기판은 V-groove 크기가 $3\text{ }\mu\text{m}$ 이하를 갖는 것(small V-groove 기판)과 $10\text{ }\mu\text{m}$ 이상을 갖는 것(large V-groove 기판)을 사용하였다. Fig. 5는 small V-groove와 large V-groove 기판의 등방성 식각시간에 따른 표면형상 변화를 보여준다. Fig. 5(a), (b)는 small V-groove 기판을 이용하여 등방성 식각을 각각 2분 30초와 10분 진행했을 때의 표면형상이고, Fig. 5(c), (d)는 large V-groove 기판을 이용하여 등방성 식각을 각각 5분과 20분 진행했을 때의 표면형상이다. 광 포획 특성을 결정하는 중요한 요인 중의 하나는 표면 형상의 opening angle이다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(c)의 경우에는 opening angle이 60° 를 갖는 U-groove가 관찰되었고, Fig. 5(b)와 Fig. 5(d)의 U-groove들은 각각 105° 와 120° 의 opening angle을 보여주고 있다. 이 결과로부터 등방성 식각이 진행될수록 opening angle이 증가하는 정도를 알 수 있었으며, 동일한 opening angle을 얻기 위해서 large V-groove가 small V-groove보다 식각시간이 2배 더 소요되었다. Opening angle, $\theta < 54^\circ$ 일 때 표면반사 횟수가 2번 이하로 감소하지만, $54^\circ < \theta < 60^\circ$ 를 갖는 경우 3번 이상의 표면반사가 발생한다고 보고되고 있다.¹⁶⁾ 그리고 opening angle이 60° 이상 커질수록 표면반사 횟수가 오히려 감소한다. 즉, 편평해진 영역으로 인해 정반사도가 증가한다. 따라서 opening angle 60° 를 갖는 Fig. 5(a)와 Fig. 5(c) 표면형상을 적정한 U-groove 조건으로 판단하였다.

본 연구에서 실리콘 박막태양전지용 기판으로 사용할 V-groove 기판들과 opening angle 60° 인 U-groove 기판들의 광 산란 특성을 평가하기 위하여 먼저 UV-Vis spectrophotometer를 사용하여 표면 반사도를 측정하였다. Fig. 6은 위에서 얻어진 서로 다른 크기의 V-groove와 U-groove 기판 위에 Al 전극을 올린 후 측정된 반사도 결과이다. Fig. 6(a)는 수직방향으로 반사한 빛, 즉 정반사

된 빛만을 감지한 결과이며, Fig. 6(b)는 구면체 감지기를 이용하여 확산 반사도까지 함께 측정한 결과이다. Fig. 6(a)는 시편들의 표면형상과 크기에 관계없이 groove들이 형성된 시편들의 경우 모든 파장영역에서 정반사가 거의 없음을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 6(b)는 동일한 시편의 총 반사도를 측정한 결과인데, 편평한 기판은 총 반사도가 모두 정반사도에 해당한다는 것을 보여주었다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에서 편평한 시편의 반사도가 다소 다른 것은 두 장치가 서로 다른 mirror 배열과 감지기를 가지고 있기 때문으로 생각된다. 한편 groove를 형성한 표면의 경우 빛의 정 반사도는 거의 0이었으므로, Fig. 6(b)의 반사도는 대부분 확산반사도임을 알 수 있다. 확산반사도가 크다는 것은 광 산란이 많이 발생한다는 것을 의미하므로 V-, U-groove의 경우 모두가 효과적인 광 포획 특성을 보일 것으로 짐작할 수 있다. 또 한 Fig. 6(b)에 의하면, U-groove 기판이 V-groove 기판에 비해 훨씬 큰 확산 반사도를 보이며, 같은 표면형상인 경우에는 small-groove가 확산반사도 값이 더 크다.

본 연구에서 제조한 V-groove 기판과 U-groove 기판들의 모양과 크기에 따른 광 포획 효과를 평가하기 위하여 식각된 표면의 결함 등 형상 이외의 요인들이 소자 특성에 미치는 효과를 최소화할 수 있는 실리콘 박막 태양전지를 이용하여 형상에 따른 단락전류의 변화를 살펴 보았다. 각 기판은 Al 금속 전극과 TCO reflector를 증

Table 1. The performances of amorphous silicon thin film solar cells fabricated on flat and textured substrates.

Surface morphology		Jsc(mA/cm ²)	Eff(%)
Small	Flat	17.71	5.27
	V	19.05	7.40
	U	19.20	7.03
Large	V	18.65	6.51
	U	18.93	7.04

Fig. 6. (a) The specular reflectance and (b) the total reflectance of flat and textured substrates.

Fig. 7. The EQE data of amorphous silicon solar cells fabricated on (a) flat, small V-, and small U-groove substrates and (b) large V-, and large U-groove substrates.

착하고, 그 위에 실리콘 박막태양전지를 제조함으로써 표면 형상만이 단락전류에 영향을 미치도록 하였다. Table 1은 크기가 다른 V-groove 기판과 U-groove 기판 위에 제조한 실리콘 박막 태양전지의 단락전류 값을 편평한 기판 위에 형성한 셀과 비교하여 보여준다. Table 1에 의하면, 확실히 편평한 기판보다 groove가 형성된 기판 위에 제조한 셀들의 단락전류가 전체적으로 향상되었다. 또한 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 large-groove보다는 small-groove가, V-groove 표면형상보다는 U-groove 표면형상이 더 높은 단락전류 값을 보여 광 산란을 통한 광 포획 효과가 더 크음을 알 수 있었다. 그 이유를 Fig. 7의 외부양자효율 자료를 통해서도 확인할 수 있었다. 본 실험에서 제조한 비정질 실리콘 태양전지는 광 흡수층 패터닝을 하지 않았으므로 상부전극만 패터닝된 구조이며, 또한 표면조직화된 크기에 따라 표면적이 넓어지기 때문에 단락전류 밀도값이 다소 크게 측정되었다. 하지만 단락전류 밀도값의 과측정된 정도가 유사하고, 실제 측정된 EQE 값을 이용하여 계산한 계산값과 솔라시뮬레이터를 이용하여 측정된 값을 normalize한 결과가 동일한 경향성을 보였다.

Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 표면 조직화된 기판들은 편평한 기판에 비해서 전 파장영역에서 외부 양자효율이 증가했다. 그리고 small groove에서의 표면형상을 비교한 Fig. 7(a)는 U-groove가 V-groove보다 광 이용 측면에서 훨씬 유리하다는 것을 보여주며, large groove의 경우에도 장파장 영역에서 U-groove의 양자효율이 더 크다는 것을 Fig. 7(b)를 통해 알 수 있었다. 이상의 연구 결과들로부터 groove의 크기가 작거나 큰 경우 모두, U-groove 형상이 V-groove 형상에 비해 광 포획에 더 효과적임을 확인하였다.

Table 1과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 같은 표면형상에서 small-groove의 경우 Small U-groove가 small V-groove

에 비해 더 큰 단락전류와 외부양자효율을 나타내고도 효율은 오히려 감소하였는데, 그 이유는 박막이 증착될 때 뽀족해진 표면형상 때문에 micro void가 쉽게 형성되기 때문이다.¹⁵⁾ 따라서 별도의 후속 표면처리를 통해 효율을 더 개선할 수 있을 것이다.¹⁷⁻¹⁸⁾

4. 결 론

실리콘 기판에 이방성 식각을 진행하여 V-groove 표면형상을 구현하였고, 식각조건을 변화시켜 3 μm 이하, 10 μm 이상의 크기를 갖는 groove를 조절하여 형성하였다. U-groove 표면형상을 제작하기 위해서 V-groove 기판을 등방성 식각하였는데, 식각 시간을 조절하여 opening angle이 60° 정도의 값을 갖는 U-groove 형상을 제조하였다. 표면 반사도는 V-groove, U-groove 기판 모두 편평한 기판에 비해서 R_{diffuse} 값이 크게 향상되었으며, U-groove가 V-groove 보다 더 큰 R_{diffuse} 값을 얻었다. 또한 표면형상에 관계없이 크기가 작을수록 광 산란 특성 향상에 유리하였다. R_{diffuse} 값의 증가가 태양전지의 광 전류 증가효과를 확인하기 위하여 3 μm 이하의 크기를 갖는 V-groove와 U-groove, 10 μm 이상의 크기를 갖는 V-groove와 U-groove 기판 위에 실리콘 박막 태양전지를 제작하였다. groove의 모양과 크기에 관계없이 편평한 기판 위에 형성한 태양전지에 비하여 단락전류의 향상을 나타내었는데 3 μm 이하의 크기를 갖는 groove의 경우 10 μm 이하의 크기를 갖는 것보다 J_{sc} 값이 더 증가하였다. 또한 표면형상에 따른 J_{sc} 값의 변화로부터 U-groove가 V-groove 형상에 비해 우수한 광 포획 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

본 연구 결과를 향후 HIT 태양전지를 비롯한 실리콘 양자점 태양전지, a-Si:H/c-Si 하이브리드형 태양전지 등에 적용함으로써 고효율화에 크게 기여할 수 있을 것으

로 생각된다. 또한, 이 결과는 비정질 실리콘 박막 태양전지에 적합한 기관의 조직화에도 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원의 신재생 에너지 기술개발사업(Contract No:2011-8520010-040)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

1. C. Leendertz, R. Stangl, T. F. Schulze, M. Schmidt and L. Korte, *Phys. Status Solidi C*, **7**, 1005 (2010).
2. S. K. Kim, J. C. Lee, S. J. Park, Y. J. Kim and K. H. Yoon, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 298 (2008).
3. M. G. Kang, S. J. Tark, J. Lee, C. S. Kim, D. Y. Jung, J. C. Lee, K. H. Yoon and D. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **21**(2), 120 (2011) (in Korean).
4. M. Edwards, S. Bowden, U. Das and M. Burrows, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 1373 (2008).
5. Y. -J. Kim, J. -S. Cho, J. C. Lee, J. -S. Wang, J. S. Song and K. H. Yoon, *Kor. J. Mater. Res.*, **19**(5), 245 (2009) (in Korean).
6. I. Zubel, K. Rola and M. Kramkowska, *Sens. Actuators A*, **171**, 436 (2011).
7. I. Zubel and M. Kramkowska, *Sens. Actuators A*, **101**, 255 (2002).
8. D. Iencinella, E. Centurioni, R. Rizzoli and F. Zignani, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **87**, 725 (2005).
9. H. Park, J. S. Lee, S. Kwon, S. Yoon, H. Lim and D. Kim, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **46**, 835 (2008).
10. K. E. Bean, *IEEE Trans. Electron Dev.*, **25**, 1185 (1978).
11. J. M. Kim and Y. K. Kim, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **81**, 239 (2004).
12. L. Fesquet, S. Olibet, J. Damon-Lacoste, S. De Wolf, A. Hessler-Wyser, C. Monachon and C. Ballif, in *Proceedings of the 34th IEEE PVSC(Philadelphia, PA, June 2009)* p. 754.
13. Y. Tsunomura, Y. Yoshimine, M. Taguchi, T. Baba, T. Kinoshita, H. Kanno, H. Sakata, E. Maruyama and M. Tanaka, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 670 (2009).
14. T. Mueller, S. Schwertheim, N. Mueller, K. Meusinger, B. Wdowiak, O. Grewe and W. Fahrner, in *Proceedings of the 35th IEEE PVSC(Honolulu, HI, June 2010)* p. 683.
15. M. G. Kang, S. Tark, J. C. Lee, C. S. Son, D. Kim, *J. Cryst. Growth*, **326**, 14 (2011).
16. T. Maruyama, J. Bandai and S. Osako, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **64**, 261 (2000).
17. J. Ge, Z. P. Ling, J. Wong, T. Mueller and A. G. Aberle, *Energy Procedia*, **15**, 107 (2012).
18. U. K. Das, M. Z. Burrows, M. Lu, S. Bowden and R. W. Birkmire, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 063504 (2008).