

# Photoconductive Atomic Force Microscopy를 이용한 빛의 세기 및 파장의 변화에 따른 폴리실리콘 태양전지의 광전특성 분석

허진희<sup>†</sup>

한국기계연구원 부설 재료연구소 재료분석평가실

## Characterization of Light Effect on Photovoltaic Property of Poly-Si Solar Cell by Using Photoconductive Atomic Force Microscopy

Jinhee Heo<sup>†</sup>

Advanced Characterization & Analysis Research Group, Korea Institute of Materials Science, Changwon 51508, Republic of Korea

(Received October 18, 2018 : Revised November 1, 2018 : Accepted November 1, 2018)

**Abstract** We investigate the effect of light intensity and wavelength of a solar cell device using photoconductive atomic force microscopy(PC-AFM). A  $\text{POCl}_3$  diffusion doping process is used to produce a p-n junction solar cell device based on a poly-Si wafer, and the electrical properties of prepared solar cells are measured using a solar cell simulator system. The measured open circuit voltage( $V_{oc}$ ) is 0.59 V and the short circuit current( $I_{sc}$ ) is 48.5 mA. Moreover, the values of the fill factors and efficiencies of the devices are 0.7 and approximately 13.6 %, respectively. In addition, PC-AFM, a recent notable method for nano-scale characterization of photovoltaic elements, is used for direct measurements of photoelectric characteristics in limited areas instead of large areas. The effects of changes in the intensity and wavelength of light shining on the element on the photoelectric characteristics are observed. Results obtained through PC-AFM are compared with the electric/optical characteristics data obtained through a solar simulator. The voltage( $V_{PC-AFM}$ ) at which the current is 0 A in the I-V characteristic curves increases sharply up to  $18 \text{ W/m}^2$ , peaking and slowly falling as light intensity increases. Here,  $V_{PC-AFM}$  at  $18 \text{ W/m}^2$  is 0.29 V, which corresponds to 59 % of the average  $V_{oc}$  value, as measured with the solar simulator. Furthermore, while the light wavelength increases from 300 nm to 1,100 nm, the external quantum efficiency(EQE) and results from PC-AFM show similar trends at the macro scale but reveal different results in several sections, indicating the need for detailed analysis and improvement in the future.

**Key words** solar cell, photoconductive AFM, external quantum efficiency, wavelength, photovoltaic effect.

### 1. 서 론

최근 신재생에너지에 대한 산업적, 경제적 관심과 투자가 확대됨에 따라 대표적인 청정에너지인 태양광 소자에 대한 연구와 산업화가 활발히 이루어지고 있다. 좀 더 효율적이고 저렴한 태양전지를 개발하기 위한 연구도 그 어느 때 보다 치열하게 진행 중이다. 그 중에서도 나노스케일에서 광전효과의 거동에 대한 분석을 통해 맞

춤형 광전 재료를 개발하고 태양전지 제조공정의 최적화를 통해 경쟁력을 강화하기 위한 연구가 진행되고 있다.

태양전지 동작의 기본원리인 광전효과와 그 메커니즘을 분석하는 방법은 태양광 기술의 발전과 더불어 활발히 개발 및 개선되어왔다.<sup>1-4)</sup> 그 중에서도 photoconductive-atomic force microscopy(PC-AFM)는 최근에 태양광 소자의 특성 분석을 위해 개발된 scanning probe microscopy(SPM)분석 기법의 한 종류이다. Conductive AFM의 원리와 장치를 기반으로 구성되며, 추가적으로 태

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : pidellis@kims.re.kr (J. Heo, KIMS)

© 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.

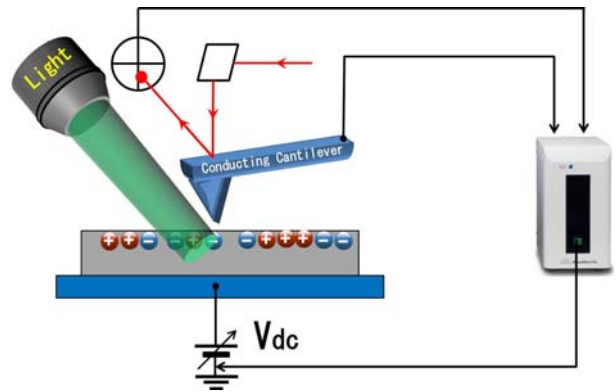
양광 소자에 빛을 조사할 수 있는 광원(light source)이 부착된 형태이다. 일반적으로 광원이 시료 아래쪽에 위치하여 투명전도막을 통해 빛이 시료에 조사되는 구조이다. 이 장치를 통해 나노 스케일에서 태양전지의 광변환 효율을 분석할 수 있으며, phase separation, charge generation, charge transport 및 charge collection에 대한 가시적인 분석이 가능하다. 또한 파장을 조절할 수 있는 monochrometer를 채용하면, 시료의 photocurrent 생성에 영향을 미치는 morphology 및 물질 구성과 빛의 파장과의 상관관계를 연구하는데 유용하게 활용되는 분석기법이다.<sup>5-7)</sup>

본 연구에서는 최근 태양광 소자의 나노 특성 분석법으로 새롭게 주목받고 있는 PC-AFM을 이용하여 대면적이 아닌 미세영역에서 직접 광전 특성을 측정하고, 소자에 조사되는 빛의 세기와 파장의 변화가 태양광 소자의 광전 특성에 어떠한 영향을 미치는지 관찰하였다. 이렇게 PC-AFM을 이용하여 측정된 결과와 solar simulator를 이용해 얻은 전기적/광학적 특성과 비교하고, 이를 통해 EQE 특성과 PC-AFM을 이용해 측정된 파장별 photocurrent 특성과의 상관관계를 확인하였다.

## 2. 실험 방법

PC-AFM을 이용하여 빛의 강도와 파장이 태양광 소자에 미치는 영향을 조사하기 위해 p-n 접합 구조의 poly-Si 웨이퍼 기반 태양전지를 제작하였다. 200 nm 두께의 poly-Si 웨이퍼를 diffusion furnace에서 POCl<sub>3</sub>와 함께 850 °C의 온도까지 가열하여 확산 공정에 의해 웨이퍼의 표면에 p-n 접합을 형성시켰다. 확산된 n-type 영역의 두께는 약 300 nm이고 sheet resistance는 약 60 Ω/□이다. 제작된 태양전지의 크기는 2 cm × 2 cm이며, PECVD 공정으로 증착된 반사 방지막(SiNx)의 두께는 76 nm이고 굴절률은 1.97이었다. SiNx 층을 증착한 후, 하부 전극과 상부 전극은 스크린 프린팅 방식으로 실버 페이스트를 사용하여 형성하였으며, 하부 전극과 상부 전극의 두께는 각각 60 μm와 20 μm였다.

제작된 전극의 ohmic contact 형성을 위해 소자는 RTP (rapid thermal processing)를 사용하여 680 °C에서 열처리하였다.<sup>9)</sup> 제작된 태양전지의 전기적 특성을 K201 solar simulator 시스템(McScience Inc., 한국)을 사용하여 측정하였으며 결과는 Table 1과 같다. 평균 개방전압 V<sub>oc</sub>는 0.59 V이고 평균 단락전류 I<sub>sc</sub>는 48.5 mA이다. 또한, 제작된 6개 소자의 fill factor 및 효율의 평균값은 각각 0.7과 약 13.6 %였다. 그리고, 외부로부터 태양전지에 주입된 에너지의 광자 수에 대한 태양전지에 의해 수집된 전하 캐리어 수의 비율인 외부양자효율(EQE)을 분석하



**Fig. 1.** Schematic of the photoconductive-AFM system. A diamond coated tip was used as an electrode, and the intensity and wavelength of light could be controlled.

였고, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

다음과 같은 실험을 수행하기 위하여 E-sweep SPM 모델(Seiko Instrument, 일본)의 원자현미경에 외부 광원 및 solar simulator를 결합한 PC-AFM 시스템을 구성하였으며(Fig. 1), 이를 이용하여 빛의 강도 및 파장의 변화가 광전 특성에 미치는 영향을 관찰하였다. 우선 solar simulator를 이용하여 태양전지에 조사되는 빛의 세기를 0 W/m<sup>2</sup>에서 1300 W/m<sup>2</sup>까지 100 W/m<sup>2</sup> 간격으로 변화시키며, I-V 특성 곡선을 측정 후, 이 결과로부터 빛의 세기에 따른 V<sub>oc</sub> 값을 추출하였다. 또한 PC-AFM 분석을 위해 0 W/m<sup>2</sup>에서 160 W/m<sup>2</sup>까지 빛의 세기를 증가시키며 AFM 시스템을 이용하여 I-V 특성 곡선을 측정하였다. 이때 전극으로 사용된 cantilever tip은 Boron이 도핑된 다이아몬드 tip을 사용하였다. PC-AFM으로 측정된 I-V 측정결과에서 전류가 0 A가 되는 전압값(V<sub>PC-AFM</sub>)을 추출하여 빛의 세기에 따른 그래프로 나타내었으며, 이 결과와 solar simulator 측정 결과를 비교하였다.

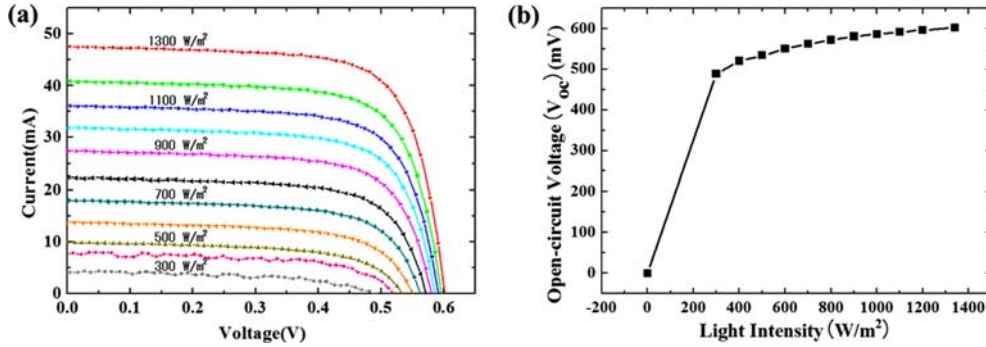
또한 태양전지에 조사되는 빛의 파장에 따른 광전 특성의 거동을 분석하기 위하여 다음과 같은 측정이 이루어졌다. PC-AFM에 장착된 monochrometer를 이용하여 300 nm에서 1100 nm까지 20 nm 간격으로 빛의 파장을 변화시키며 I-V 특성 곡선을 측정하였다. 앞서 수행한 실험과 마찬가지로 다이아몬드 tip이 사용되었으며, I-V 측정결과로부터 각 파장에서 생성된 V<sub>PC-AFM</sub> 값을 추출하여 그래프로 나타내고(Fig. 5), 이 측정 결과를 EQE 측정 결과와 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

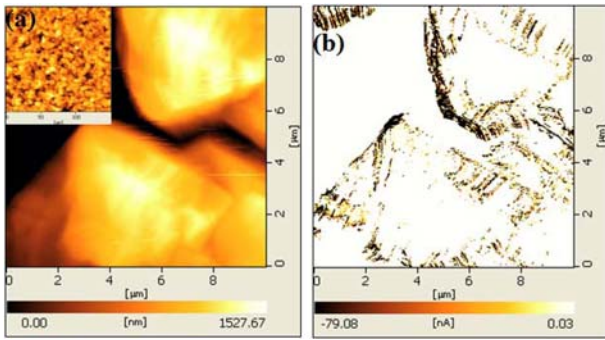
p-n 접합 구조의 poly-Si 웨이퍼 기반 태양전지는 POCl<sub>3</sub> 확산 공정을 사용하여 제작되었다. 제조된 태양광 소자

**Table 1.** Electrical properties of poly-Si solar cell devices.

$V_m$ (V)	$I_m$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (mA)	$P_{max}$ (mW)	FF	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	Efficiency(%)
0.49	41.3	0.59	48.5	20.0	0.7	32.9	13.6



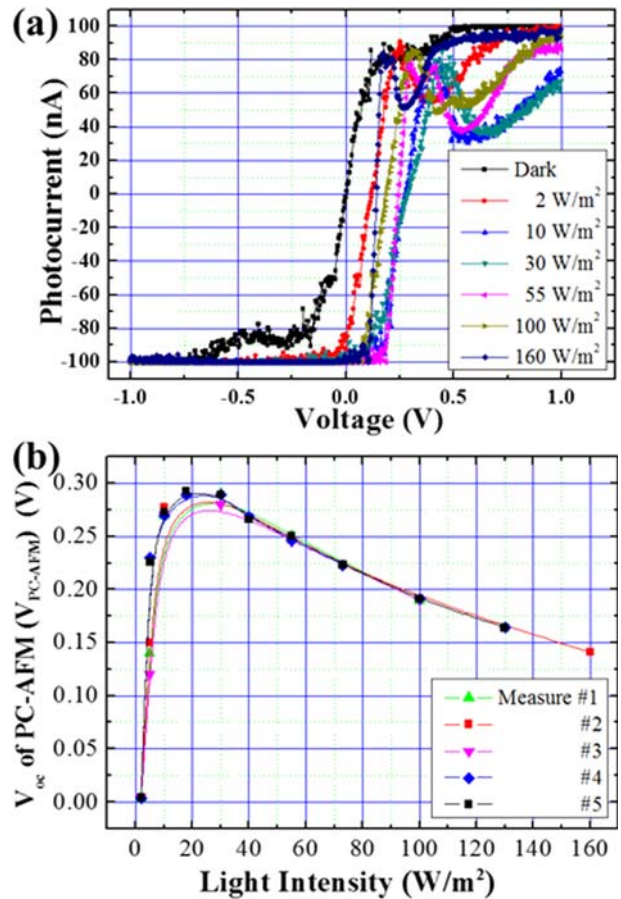
**Fig. 2.** (a) I-V characteristics of poly-Si solar cell devices, (b) open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) with various light intensities.



**Fig. 3.** (a) Topographic and (b) current mapping images of surface of solar cell devices which were attained by conductive-AFM. Inset in (a) shows a 150  $\mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  scanned topography image.

의 전기적 특성을 측정한 결과를 Table 1에 나타내었으며, 개방 전압  $V_{oc}$ 은 0.59 V이고 단락전류  $I_{sc}$ 는 48.5 mA이다. 또한, 소자의 fill factor 및 효율 값은 각각 0.7과 약 13.6%이다. 그리고 540 nm의 파장을 가지는 빛을 광전 소자에 조사한 경우, EQE의 최대 값(95%)을 얻었으며, 우리는 제작된 모든 디바이스가 유사한 전기적 및 광학적 특성을 가짐을 확인했다.<sup>8)</sup>

Fig. 2는 조사되는 빛의 세기를 다양하게 변화시키면서 측정한 poly-Si 태양전지의 I-V 특성 곡선이다. 인가된 전압이 0 V인 경우,  $I_{sc}$  값은 빛의 세기에 따라 선형적으로 증가하였으며, 광전류가 0 A일때의 개방전압  $V_{oc}$ 의 값은 0.5 V와 0.6 V 사이에서 유지되고 있음을 Fig. 2(b)에서 확인할 수 있다. Poly-Si 기반 태양전지의 표면 형상은 PC-AFM을 사용하여 관찰하였다. Topography와 current mapping image는 Fig. 3과 같이 빛을 조사한 상태에서 DC전압을 시료와 도핑된 다이아몬드 tip 사



**Fig. 4.** (a) I-V characteristics and (b)  $V_{PC-AFM}$  result from PC-AFM measurement with various light intensities.

이에 인가하면서 동시에 측정하였다. Current mapping image에서 보이는 밝은 영역은 어두운 영역 또는 점과 비교하여 상대적으로 더 많은 수직 전류가 소자의 표면

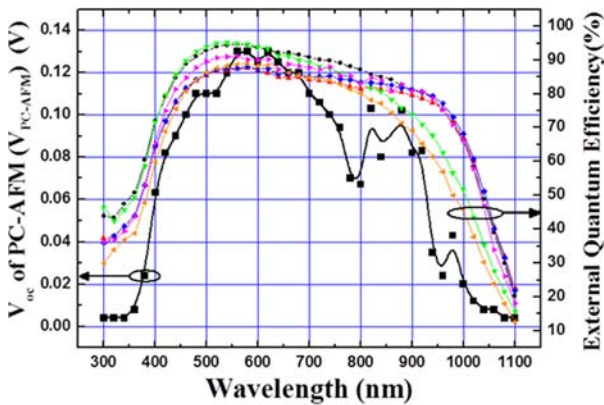


Fig. 5. External quantum efficiency (EQE) curves and  $V_{PC-AFM}$  value with light wavelength of poly-Si solar cell devices.

을 통과함을 나타낸다.

빛의 세기에 따른 광전효과를 PC-AFM으로 분석하기 위해서 태양전지에 2, 5, 10, 18, 30, 40, 55, 73, 100, 130, 160  $W/m^2$  세기의 빛을 조사한 상태에서 다이아몬드 tip을 전극으로 사용하여 I-V 특성을 측정하였다. 이 결과에서  $V_{PC-AFM}$ 을 추출하여 빛의 세기에 따른 그래프로 나타내었다(Fig. 4). Solar simulator로 분석한 결과와 PC-AFM 분석결과를 비교한 결과 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다. 우선 solar simulator 측정결과는 빛의 세기가 0  $W/m^2$ 에서 300  $W/m^2$ 까지 증가할 때  $V_{oc}$  값이 급격히 상승하였으며, 이후 빛의 세기가 증가하더라도 완만한 기울기로 상승하며 거의 포화되는 경향을 보였다. 또한 300  $W/m^2$ 에서  $V_{oc}$  값은 0.47 V 이고 최대  $V_{oc}$  값은 0.58 V였다. 반면 PC-AFM 측정결과에서는  $V_{PC-AFM}$ 이 18  $W/m^2$ 까지 증가하여 최대값을 보인 이후, 빛의 세기가 증가하면서 점점 감소하는 경향을 보였다. 이 경우 18  $W/m^2$ 에서  $V_{PC-AFM}$ 의 값은 0.29 V 였으며, 이는 동일한 빛의 세기에서 solar simulator로 측정한 평균  $V_{oc}$  값의 59%에 해당하는 수치이다. 이렇게 PC-AFM으로 측정한  $V_{PC-AFM}$  값이 낮은 원인은 cantilever tip과 시료 표면 사이의 접촉 영역에 생성된 접촉 저항이 solar simulator 측정을 위한 전극의 ohmic contact 저항보다 크기 때문이라고 판단된다. 그리고 PC-AFM에서 추출된  $V_{PC-AFM}$  값이 빛의 세기가 커질수록 감소하는 경향은, 태양전지 표면을 통해 다이아몬드 tip으로 전류가 흐르면서 Si 표면에  $SiO_2$  산화막이 형성되는 현상 때문인 것으로 판단된다.<sup>9-12)</sup> Cantilever tip이 시료 표면의 동일한 위치에 contact된 상태에서 반복적으로 I-V 특성 곡선을 측정할 때, 산화막 생성이 누적되면서 contact resistance가 증가함에 따라 전압 강하도 증가하였기 때문에  $V_{PC-AFM}$ 이 서서히 감소하는 경향을 보인 것으로 추측된다.

다음으로, EQE 측정 결과와 PC-AFM으로 측정한 빛

의 파장에 따른 광전 특성 거동을 분석하기 위해 다음과 같은 측정을 수행하였다. 태양전지에 조사되는 빛의 파장을 300 nm에서 1100 nm까지 20 nm 간격으로 변화시키며 I-V 특성 곡선을 측정 후, 앞선 분석과 마찬가지로  $V_{PC-AFM}$ 을 추출하였다. Fig. 5는 EQE 측정 결과와 PC-AFM 분석결과를 동일한 파장 영역에 대하여 함께 나타낸 그래프이다. 두 측정 모두 300 nm에서 1100 nm 범위의 파장에서 측정되었으며, 300 nm에서 700 nm 사이에서는 EQE값과  $V_{PC-AFM}$  값이 거의 동일한 변화 경향을 보임을 확인할 수 있다. 하지만  $V_{PC-AFM}$ 의 경우 700 nm 이상의 영역에서 EQE 결과보다 감소하는 비율이 크고, 특히 800 nm에서 950 nm 사이에서는  $V_{PC-AFM}$  값이 진동하는 거동을 보여 EQE 결과와는 다소 차이를 보이는 경향을 보인다.

이러한 두 측정결과의 거동 차이에 대한 원인은 아직 확실히 규명되지 않았다. 그 원인이 tip이 contact되는 국소 영역(local area)에 따른 전기, 광학적 특성 차이에서 기인한 것인지 아니면 기계적 진동 또는 광학적 불안정한 요인이 반복적인 I-V 특성 곡선 측정 과정에 영향을 미친 것인지는 좀 더 자세한 연구가 필요한 부분이다. 이를 극복하기 위해서는 시료에 조사되는 빛의 파장을 일정범위 sweep하면서 직접적으로  $V_{PC-AFM}$  값을 추출할 수 있는 측정방법을 개발할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고, 본 실험결과를 통해 PC-AFM 측정결과가 거시적으로 EQE 분석결과와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었으며, 향후 나노스케일에서 일어나는 빛의 파장 변화에 따른 광전 특성 측정 및 분석에 매우 유용한 분석기법으로 활용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는  $POCl_3$  확산 도핑 공정을 이용하여 poly-Si 웨이퍼를 기반으로 p-n 접합 구조의 태양광소자를 제작하였다. 제작된 태양광소자의 전기적 특성 중  $V_{oc}$ 는 0.59 V이고  $I_{sc}$ 는 48.5 mA였으며, fill factor와 변환 효율은 각각 0.7과 13.6% 였다. 우리는 이 소자의 광전 특성을 solar simulator와 PC-AFM 측정법으로 분석하였다. 조사되는 빛의 세기가 증가할 때  $V_{oc}$  값과 PC-AFM 결과인  $V_{PC-AFM}$  값의 변화 거동을 비교하여 PC-AFM 측정 시 tip과 시료 표면의 contact resistance와 전류에 의한 산화막 생성이 특성 분석에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한 빛의 파장이 300 nm에서 1100 nm까지 변할 때 두 측정결과가 거시적으로 유사한 경향을 보이지만 일부 구간에서 상이한 결과를 보였으며, 향후 좀 더 구체적인 분석과 보완이 필요함을 알 수 있었다. 이

리한 연구를 통해 PC-AFM 분석법이 기존의 solar simulator 분석과 일정한 상관관계를 유지하고 있으며, 특히 나노스케일의 특정 국소영역에서 일어나는 광전효과를 직접 관찰하고 비교 분석할 수 있는 유일한 방법으로서 장점을 가지고 있음을 확인하였다. 이는 향후 태양광 소자 기술의 발전을 위해 필수적인 새로운 광전 재료의 개발과 공정최적화를 위한 광전 메커니즘 분석에 PC-AFM이 필수적으로 활용될 수 있음을 의미한다.

## Acknowledgement

This study was supported by the Fundamental Research Program of the Korean Institute of Materials Science (PNK5780).

## References

1. S. Sadewasser and M. C. Lux-Steiner, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **28**, C4D29 (2010).
2. K. Maturová, M. Kemerink, M. M. Wienk, D. S. H. Charrier and R. A. J. Janssen, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 1379 (2009).
3. D. C. Coffey, O. G. Reid, D. B. Rodovsky, G. P. Bartholomew and D. S. Ginger, *Nano Lett.*, **7**, 738 (2007).
4. O. G. Reid, G. E. Rayermann, D. C. Coffey and D. S. Ginger, *J. Phys. Chem. C*, **114**, 20672 (2010).
5. B. H. Hamadani, S. Jung, P. M. Haney, L. J. Richter and N. B. Zhitenev, *Nano Lett.*, **10**, 1611 (2010).
6. D. C. Coffey and D. S. Ginger, *Nat. Mater.*, **5**, 735 (2006).
7. C. Groves, O. G. Reid and D. S. Ginger, *Acc. Chem. Res.*, **43**, 612 (2010).
8. J. Heo and Y. Rhyim, *J. Korean Phys. Soc.*, **60**, 1322 (2012).
9. J. A. Dagata, J. Schneir, H. H. Harary, C. J. Evans, M. T. Postek and J. Bennett, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 2001 (1990).
10. E. S. Snow, P. M. Campbell and P. J. McMarr, *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 749 (1993).
11. F. Perez-Murano, G. Adabal, N. Barniol, X. Aymerich, J. Servat, P. Gorostiza and F. Sanz, *J. Appl. Phys.*, **78**, 6797 (1995).
12. R. Garcia, M. Calleja and F. Perez-Murano, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2295 (1998).