

외부 전기 인가를 통한 고품질 ZnO 나노로드 성장

Growth of ZnO Nanorod with High-quality Assisted by an External Electric Field

손민규* · 서현웅** · 김수경*** · 홍나영§ · 김병만§ · 박송이§ · 김희제†
(Min-Kyu Son · Hyunwoong Seo · Soo-Kyoung Kim · Na-Yeong Hong ·
Byung-Man Kim · Songyi Park · Hee-Je Kim)

Abstract - In this study, the ZnO nanorod is grown on the seed layered glass substrate by applying an external electric field to fabricate the ZnO nanorod with the high quality and to increase the yield of the ZnO nanorod. It is possible to grow the definite and clear hexagonal ZnO nanorod as the cathode of the high voltage is connected to the side of the seed layered glass substrate and the anode is connected to the opposite side because more Zn^{2+} ions are located around the ZnO seed layer and are accumulated easily due to the external electric field. As a result, it is succeeded to fabricate the definite hexagonal ZnO nanorod having better structural characteristics by applying the external electric field during the growth process. Therefore, it is demonstrated that the external electric field is effective to fabricate the high quality ZnO nanorod without changing any composition of the ZnO nanorod.

Key Words : ZnO nanorod, External electric field, ZnO aqueous solution

1. 서론

산화 아연(Zinc Oxide, ZnO)은 근적외선 방출, 자기 및 압전 효과, 높은 전도성으로 인해 광검출 [1], 센서 [2,3], 그리고 태양전지 [4-8] 등에 적용될수 있는 산화물 반도체로써 큰 각광을 받고 있다. 특히 ZnO는 밴드갭 에너지가 3.4eV으로써 이산화 티타늄(Titanium Dioxide, TiO_2)의 밴드갭 에너지인 3.2eV와 거의 비슷하여 차세대 태양전지로써 각광을 받고 있는 염료감응형 태양전지(Dye-sensitized Solar Cell, DSC)의 광전극 산화물인 TiO_2 를 대체할 수 있는 물질로 주목을 받고 있다 [9]. 최근 이러한 응용을 위하여 나노 입자, 나노 로드, 나노 와이어, 나노 튜브, 나노 벨트 등과 같은 많은 ZnO 나노 구조가 개발되고 있으며 이들 중, ZnO 나노 로드는 6각형의 형태와 넓은 표면적, 우수한 전자 이동도 등의 구조적 장점으로 인하여 많은 연구가 진행되고 있다.

현재까지 ZnO 나노로드는 유기 금속 화학 증착법(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) [10], 화학 증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD) [11], 기체-액체-고체 에피택시(Vapor-Liquid-Solid Epitaxy, VLSE) [12], 펄스레이저증착법(Pulsed Laser Deposition, PLD) [13] 등 다양한 방법을 이용하여 성장시켜왔다. 하지만 이러한

방법들은 비싸고 복잡한 장비가 필요할 뿐만 아니라 고온의 성장 조건이 필요하다는 단점이 부각되어 왔으며 낮은 수율로 인해 대면적의 ZnO 나노로드를 성장하는데 적합하지 않다. 이에 반해 최근 ZnO 나노로드 성장법으로 각광을 받고 있는 수용액 기반 성장법(Aqueous Solution Based Growth Method) [14,15]은 이전의 방법보다 간단하고 경제적이며 낮은 온도에서도 성장이 가능하기 때문에 ZnO 나노로드 성장법으로 널리 이용되고 있다.

ZnO 나노로드를 센서나 태양전지 등에 사용하기 위해서는 고품질 ZnO 나노로드를 성장시키는 것이 가장 중요한데 이는 고품질 ZnO 나노로드의 구조적 이점이 ZnO 나노로드 기반 센서나 태양전지의 성능을 향상시키는데 중요한 역할을 하기 때문이다. 이에 많은 연구진들이 수용액 기반 성장법을 이용하여 고품질 ZnO 나노로드를 성장시키는 것에 초점을 맞추어 연구를 진행하고 있으며 그 결과 Seed Layer의 제작 조건 및 ZnO 나노로드 성장 조건 등을 변화하여 고품질 ZnO 나노로드 성장시키는데 성공한 연구 결과가 등장하기 시작하였다 [16,17]. 하지만 ZnO 나노로드의 특성에 영향을 주는 조건들이 아직 명확하게 밝혀지지 않았기 때문에 ZnO 나노로드 기반 센서나 태양전지 분야에 있어 고품질 ZnO 나노로드 성장에 관한 연구는 여전히 연구 가치가 높다고 할 수 있다.

따라서 이러한 연구 동향에 따라 본 연구에서는 수용액 기반 성장법을 이용한 ZnO 나노로드 성장시 외부 전계를 인가하여 고품질 ZnO 나노로드를 성장시키고자 하였다. ZnO 나노로드 성장을 위한 수용액은 극성을 띄고 있는 이온들이 존재하기 때문에 외부 전기 인가는 이들에게 영향을 주어 고품질 ZnO 나노로드 성장에 도움을 줄 것으로 예상된다. 외부 전기 인가를 통하여 성장된 ZnO 나노로드는 외부 전기 인가 없이 일반적으로 성장된 ZnO 나노로드와 비교하여 ZnO 나노로드 성장에 있어 외부 전기 인가의 효과

* 정 회 원 : 부산대 공대 전자전기공학과 박사과정
** 정 회 원 : 부산대 공대 전자전기공학과 박사
*** 준 회 원 : 부산대 공대 전자전기공학과 석사
§ 준 회 원 : 부산대 공대 전자전기공학과 석사과정
† 교신저자, 시니어회원 : 부산대 전자전기공학과 교수

E-mail : heeje@pusan.ac.kr

접수일자 : 2012년 7월 24일

최종완료 : 2012년 9월 27일

를 확인하였다. 그 결과, 외부 전계 인가는 고품질 ZnO 나노로드 성장에 큰 도움을 준다는 것을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

ZnO 나노로드 성장을 위한 기판은 Fluorine-doped Tin Oxide(FTO, 13Ω/sq, Hartford Glass Co. Inc)이 사용되었으며 성장 전에 아세톤, 에탄올, 증류수 순으로 10분씩 초음파 처리를 하여 세척함으로써 기판위의 각종 불순물을 제거한다. ZnO 나노로드 성장 전에 세척된 FTO 기판에 Seed Layer를 도포해야 하는데 Seed Layer를 위한 용액은 에탄올에 0.01M Zinc Acetate Dehydrate($C_4H_6O_4Zn \cdot 2H_2O$, Fluka)를 녹여 제작한다. 이렇게 제작된 Seed Layer 용액을 세척된 FTO 기판 위에 떨어뜨리고 5,000rpm의 속도로 90초간 스핀 코팅하여 도포하고 130°C에서 120분간, 180°C에서 60분간, 260°C에서 120분간 순차적으로 소성하여 Seed Layer가 도포된 FTO 기판을 준비한다.

ZnO 나노로드 성장을 위한 수용액은 증류수에 0.02M의 Zinc Nitrate Hexahydrate($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, Sigma Aldrich)와 0.02M의 Hexamethylenetetramine(HMT, Sigma Aldrich)를 녹여 준비한다. 일반적인 ZnO 나노로드는 앞서 준비된 Seed Layer가 도포된 FTO를 준비한 수용액에 95°C의 온도에서 4시간 담구어 줌으로써 성장시키며 외부 전계 인가를 이용한 ZnO 나노로드 성장은 외부 전계를 인가한 상태에서 95°C의 온도에서 4시간 동안 Seed Layer가 도포된 FTO를 수용액에 담구어 줌으로써 완성된다. 그림 1은 외부 전계 인가 ZnO 나노로드 성장 실험 개념도이다. 그림 1과 같이 양극은 상판에, 음극은 하판에 1.5cm 간격을 두고 설치하고 고전압 직류 전원기를 이용하여 2.0kV의 고전압을 가함으로써 ZnO 나노로드가 성장하는 동안 외부 전계를 인가하여 주었다. 이후 샘플을 꺼내서 증류수에 세척하여 불순물을 없애줌으로써 ZnO 나노로드의 성장을 완료한다.

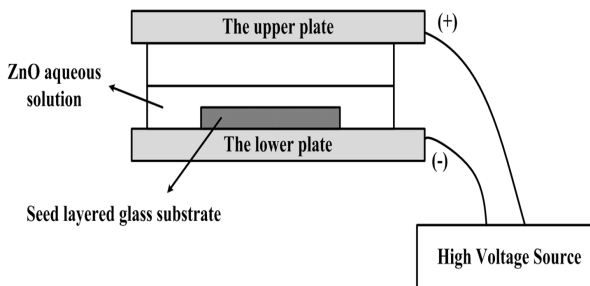


그림 1 외부 전계 인가 ZnO 나노로드 성장 실험 개념도
 Fig. 1 The brief experimental schematic for growing ZnO nanorod assisted by the external electric field

위와 같이 완성된 ZnO 나노로드는 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM, S-4200, Hitachi)을 이용하여 그 형상을 관찰하였으며 전계 인가를 통해 고품질 ZnO 나노로드가 성장되었음을 확인하고자 하였으며 SEM에 부착된 X-선 분광 분석기(Energy Dispersive X-Ray

Spectroscopy, EDX)를 이용하여 ZnO 나노로드의 구성 성분을 분석하여 전계 인가 후에도 ZnO 나노로드의 구성 성분이 바뀌지 않았음을 증명하고자 하였다.

2.2 실험 결과 분석

그림 2는 형성된 ZnO 나노로드의 형상을 나타내는 SEM 이미지이다. (a)와 (b)는 외부 전계를 인가하지 않은 일반적인 ZnO 나노로드의 형상(Sample A)이며 (c)와 (d)는 외부 전계를 인가하여 성장시킨 ZnO 나노로드의 형상(Sample B)이다. 그림 2에서와 보는 것과 같이, 외부 전계를 인가하지 않은 ZnO 나노로드의 경우 성장된 밀도가 낮으며 그 길이가 매우 짧음을 알 수 있다. 반면 외부 전계를 인가하여 성장시킨 ZnO 나노로드의 경우 일반적인 ZnO 나노로드보다 그 밀도가 높으며 그 길이도 상당히 길어졌음을 알 수 있다. 또한 외부 전계를 인가하지 않은 ZnO 나노로드의 경우 나노로드의 표면이 상당히 거칠다는 것을 확인할 수 있는 반면에 외부 전계를 인가하여 성장시킨 ZnO 나노로드의 경우 표면이 매우 깨끗하다는 것을 확인할 수 있다.

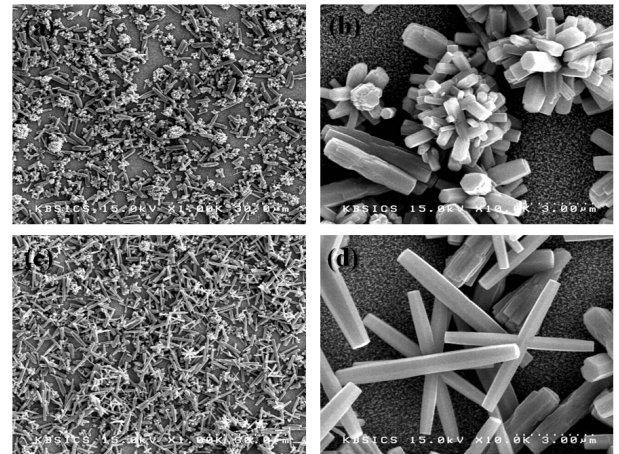


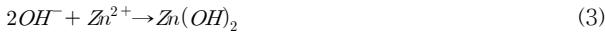
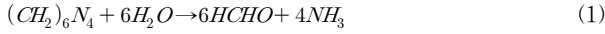
그림 2 성장된 ZnO 나노로드 형상 (a) 전계 미인가 (저배율), (b) 전계 미인가 (고배율) (c) 전계 인가 (저배율) (d) 전계 인가 (고배율)

Fig. 2 The morphologies of the fabricated ZnO nanorods (a) without the electric field at low scale (b) at high scale (c) with the electric field at low scale (d) at high scale

특히 외부 전계를 인가하여 성장시킨 ZnO 나노로드의 경우 일반적인 ZnO 나노로드보다 형태가 더욱더 육각 기둥(hexagonal rod) 모양에 가까우며 그 반경이 300~400nm 정도 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 완전한 형태의 육각 기둥의 ZnO 나노로드는 센서에서의 압전 효과는 물론 태양 전지에서의 전자 이동도를 향상시킬수 있는 구조적 이점을 가져다 줄 뿐만 아니라 더 넓은 표면적을 제공해 주기 때문에 ZnO 나노로드의 응용에 상당히 유리하다고 할 수 있다. 외부 전계 인가시 같은 성장 시간에도 불구하고 더욱더 길고 품질이 우수한 ZnO 나노로드가 성장된다는 점을 볼 때 외부 전계가 고품질 ZnO 나노로드 성장에 긍정적인

인 역할을 미친다고 볼 수 있다.

일반적으로 ZnO 나노로드를 ZnO 수용액 속에서 미리 생성된 ZnO Seed Layer 위에 생성되게 되며 다음과 같은 과정을 거쳐 성장하게 된다 [18].



식 (3)과 (4)와 같이 ZnO 나노로드 성장시에는 Zn^{2+} 이온과 OH^- 이온이 필요하며 이들은 ZnO 수용액 속에서 공급된다. Zn^{2+} 이온은 ZnO 수용액의 Zinc Nitrate Hexahydrate에서 공급이 되며 OH^- 이온은 ZnO 수용액 내의 암모니아와 포르말린으로 분해되는 HMT로부터 공급이 된다. 이때 ZnO 나노로드를 형성하는 ZnO 결정은 ZnO Seed Layer가 도포된 기판과 ZnO 수용액 경계면에서 Zn^{2+} 이온과 OH^- 이온이 결합하여 생성된다. 이렇게 생성된 ZnO 결정이 축적되어 나노로드 구조로 변화됨으로써 ZnO 나노로드가 완성된다. 이러한 과정에서 외부 전계가 인가될 경우 ZnO 나노로드의 성장은 극성을 띄는 Zn^{2+} 이온과 OH^- 이온이 외부 전계에 영향을 받게 되기 때문에 나노로드 성장에 영향을 미치게 된다.

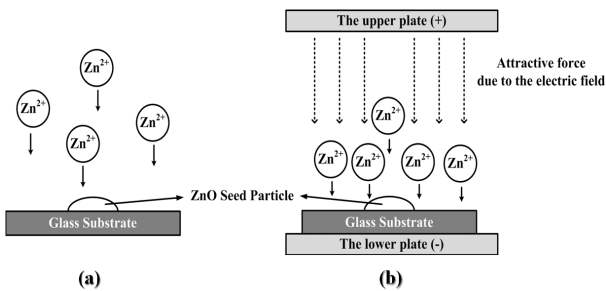
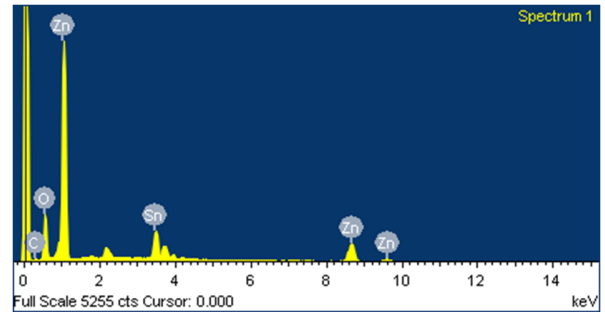


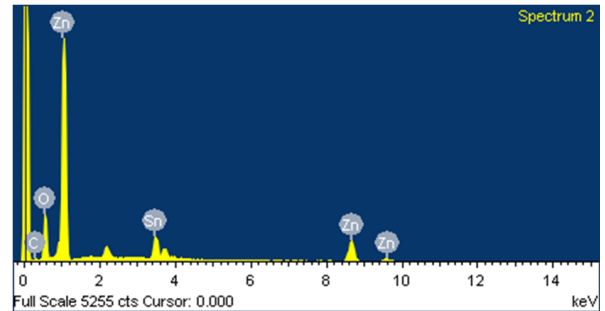
그림 3 (a) 외부 전계 미인가시 (b) 외부 전계 인가시 ZnO 나노로드 성장에 관한 개략도

Fig. 3 Graphical representation of the ZnO nanorod growth (b) without the external electric field (b) assisted by an external electric field

그림 3은 외부 전계가 미인가 되었을 때와 인가되었을 때 ZnO 나노로드 성장에 관한 개략도를 비교한 것이다. Zn^{2+} 이온은 외부 전계가 인가되지 않은 일반적인 상태에서는 그림 3(a)처럼 ZnO 수용액 속에 균일하게 퍼져있게 된다. 하지만 외부 전계가 인가될 경우 그림 3(b)처럼 Zn^{2+} 이온이 기판이 위치하고 있는 하판의 음극에 의해서 발생한 인력에 의해서 ZnO 수용액과 하부 기판 사이의 경계면 사이로 쉽게 끌리게 된다. 이로 인해 ZnO Seed Layer가 도포된 기판의 경계면의 Zn^{2+} 이온의 밀도가 높아지게 된다. 이는 Zn^{2+} 이온이 경계면에 집중되기 때문에 ZnO 나노로드가 성장되는 경계면에서 ZnO 결정의 합성이 더욱더 활발해지고 빨라짐을 의미한다. 그러므로 ZnO 나노로드 성장시 외부에서 전계가 인가될 경우 고품질의 ZnO가 빠르게 성장할 수 있게 되는 것이다.



(a)



(b)

그림 4 성장된 ZnO 나노로드 구성 성분 스펙트럼 (a) 외부 전계 미인가 (b) 외부 전계 인가

Fig. 4 The compositional spectra of fabricated ZnO nanorod (a) without the external electric field (b) assisted by the external electric field

그림 4는 EDX로 분석한 외부 전계 미인가시 성장된 ZnO 나노로드와 외부 전계 인가시 성장된 ZnO 나노로드의 구성 성분을 나타낸 그래프이며 표 1은 EDX로 분석한 ZnO 나노로드의 구성 성분을 수치로 표현한 것이다. 그림 4처럼, 두 경우 모두 대부분 Zn과 O로 이루어져 있으므로 ZnO 나노로드가 올바르게 성장되었음을 알 수 있다. 그림에서 보이는 Sn 성분은 FTO 기판에서 나타나는 성분이며 C 성분은 EDX 샘플 홀더위에 샘플을 붙이기 위하여 이용한 탄소 테이프에서 나타나는 성분이므로 ZnO 이외의 다른 불순물이 나타나지 않았음을 알 수 있다. 표 1에 나타나 있듯이, 외부 전계 미인가시 성장된 ZnO 나노로드의 경우 36.90%의 Zn과 49.69%의 O로 이루어져 있음을 확인 할 수

표 1 성장된 ZnO 나노로드 구성 성분 비율 비교

Table 1 The comparison of the element ratio of fabricated ZnO nanorod from EDX data

구성 성분	외부 전계 미인가 ZnO 나노로드	외부 전계 인가 ZnO 나노로드
Zn	36.90	38.61
O	49.69	48.90
Sn	5.83	4.91
C	7.58	7.59
Total	100.00(%)	100.00(%)

있으며 외부 전계 인가시 성장된 ZnO 나노로드의 경우 38.61%의 Zn과 48.90%의 O로 이루어져 있어 외부 전계 미인가시 성장된 ZnO 나노로드와 거의 비슷한 구성 성분을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 외부 전계 인가가 ZnO 고유의 성질을 변화를 야기하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 외부 전계 인가가 ZnO 성질에는 영향을 미치지 않으면서 고품질의 ZnO 나노로드의 빠른 성장에 도움을 준다는 것을 의미한다.

3. 결 론

본 연구에서는 고품질의 ZnO 나노로드를 성장시키기 위하여 수용액 기반 성장법을 이용한 ZnO 나노로드 성장시 외부 전계를 인가하였다. 아울러 외부 전계 인가가 ZnO 나노로드 성장에 미치는 영향을 확인하기 위하여 외부 전계를 인가하지 않고 일반적인 방법으로 성장시킨 ZnO 나노로드와 외부 전계를 인가하여 성장시킨 ZnO 나노로드의 형상과 구성 요소를 SEM과 EDX를 이용하여 비교하였다. 그 결과, ZnO 나노로드 성장시 외부 전계를 인가한 경우가 긴 길이와 깨끗한 표면을 가진 완전한 육각 기둥 모양의 ZnO 나노로드가 성장되는 것을 확인하였으며 외부 전계가 인가되더라도 ZnO 나노로드 자체의 구성 성분은 크게 변하지 않음을 확인 하였다. 이를 통해 외부 전계 인가가 ZnO 나노로드의 고유 성질은 변화시키지 않으면서 ZnO 나노로드의 품질 및 성장 속도를 향상 시키는데 도움을 준다는 것을 확인하였다. 하지만 외부 인가 전압 크기, 상판 및 하판의 거리, 성장 온도 등 다양한 파라미터에 대한 ZnO 나노로드 특성의 변화는 아직 확인되지 않았으므로 앞으로 이들을 최적화하기 위한 연구가 반드시 필요할 것으로 보인다. 이러한 연구가 완성된다면 외부 전계 인가 고품질 ZnO 나노로드 성장 기술은 ZnO 나노로드를 이용한 센서나 태양전지 분야에 큰 도움을 줄 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20110001295).

참 고 문 헌

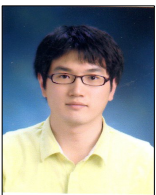
[1] Y. Lu, I. Dajani, R. J. Knize, "Ultrafast laser assisted fabrication of ZnO nanorod arrays for photon detection applications", *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 7851-7854, 2007.
 [2] O. Lupan, G. Chai, L. Chow, "Fabrication of ZnO nanorod-based hydrogen gas nanosensor", *Microelectronics Journal*, Vol. 38, pp. 1211-1216, 2007.
 [3] L. Gu, K. Zheng, Y. Zhou, J. Li, X. Mo, G. R. Patzke, G. Chen, "Humidity sensors based on ZnO/TiO₂ core-shell nanorod arrays with enhanced sensitivity", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 159, pp.

1-7, 2011.
 [4] C. Y. Chou, J. S. Huang, C. H. Wu, C. Y. Lee, C. F. Lin, "Lengthening the polymers solidification time to improve the performance of polymer/ZnO nanorod hybrid solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, pp. 1608-1612, 2009.
 [5] Y. Tang, X. Hu, M. Chen, L. Luo, B. Li, L. Zhang, "CdSe nanocrystal sensitized ZnO core-shell nanorod array films: Preparation and photovoltaic properties", *Electrochimica Acta*, Vol. 54, pp. 2742-2747, 2009.
 [6] R. S. Kumar, P. Sudhagar, P. Matheswaran, R. Sathyamoorthy, Y. S. Kang, "Influence of seed layer treatment on ZnO growth morphology and their device performance in dye-sensitized solar cells", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 172, pp. 283-288, 2010.
 [7] Q. Huang, L. Fang, X. Chen, M. Saleem, "Effect of polyethyleneimine on the growth of ZnO nanorod arrays and their application in dye-sensitized solar cells", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 9456-9459, 2011.
 [8] Y. M. Lee, H. W. Yang, "Optimization of processing parameters on the controlled growth of ZnO nanorod arrays for the performance improvement of solid-state dye-sensitized solar cells", *Journal of Solid State Chemistry*, Vol. 184, pp. 615-623, 2011.
 [9] R. S. Mane, W. J. Lee, H. M. Pathan, S. H. Han, "Nanocrystalline TiO₂/ZnO thin films: Fabrication and application to dye-sensitized solar cells", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 109, pp. 24254-24259, 2005.
 [10] W. I. Park, D. H. Kim, S. W. Jung, G. C. Yi, "Metal organic vapor-phase epitaxial growth of vertically well-aligned ZnO nanorods", *Applied Physics Letters*, Vol. 80, pp. 4232-4234, 2002.
 [11] T. Hirate, S. Sasaki, W. Li, H. Miyashita, T. Kimpara, T. Satoh, "Effect of laser-ablated impurities on aligned ZnO nanorods grown by chemical vapor deposition", *Thin Solid Films*, Vol. 487, pp. 35-39, 2005.
 [12] M. H. Huang, Y. Wu, H. Feick, N. Tran, E. Weber, P. Yang, "Catalytic growth of zinc oxide wires by vapor transport", *Advanced Materials*, Vol. 13, pp. 113-116, 2001.
 [13] Y. Sun, G. M. Fuge, M. N. R. Ashfold, "Growth of aligned ZnO nanorod arrays by catalyst-free pulsed laser deposition methods", *Chemical Physics Letters*, Vol. 396, pp. 21-26, 2004.
 [14] Q. Li, V. Kumar, Y. Li, H. Zhang, T. J. Marks, R. P. H. Chang, "Fabrication of ZnO nanorods and nanotubes in aqueous solutions", *Chemistry of Materials*, Vol. 17, pp. 1001-1006, 2005.
 [15] K. Prabakar, H. Kim, "Growth control of ZnO

nanorod density by sol-gel method”, Thin Solid Films, Vol. 518, pp. e136-e138, 2010.

- [16] M. Guo, P. Diao, S. Cai, “Hydrothermal growth of well-aligned ZnO nanorod arrays: Dependence of morphology and alignment ordering upon preparing conditions”, Journal of Solid State Chemistry, Vol. 178, pp. 1864-1873, 2005.
- [17] H. Gao, G. Fang, M. Wang, N. Liu, L. Yuan, C. Li, L. Ai, J. Zhang, C. Zhou, S. Wu, X. Zhao, “The effect of growth conditions on the properties of ZnO nanorod dye-sensitized solar cells”, Materials Research Bulletin, Vol. 43, pp. 3345-3351, 2008.
- [18] M. Wang, C. H. Ye, Y. Zhang, H. X. Wang, X. Y. Zeng, L. D. Zhang, “Seed-layer controlled synthesis of well-aligned ZnO nanowire arrays via a low temperature aqueous solution method”, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 19, pp. 211-216, 2008.

저 자 소 개



손민규 (孫珉圭)

1982년 6월 7일생. 2008년 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 졸업. 2010년 부산대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 박사과정 재학중.



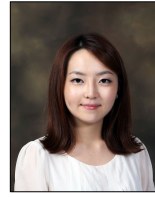
서현웅 (徐鉉雄)

1980년 10월 25일생. 2006년 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 졸업. 2008년 부산대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2011년 부산대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(박사). 현재 규슈대학교 플라즈마 나노 계면공학 센터 조교수 재직 중.



김수경 (金壽慶)

1998년 8월 8일생. 2009년 호주 Griffith University Visual Communication Design학과 졸업. 2012년 부산대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(석사).



홍나영 (洪那營)

1988년 12월 21일생. 2011년 부산대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업. 현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학중.



김병만 (金炳晩)

1985년 8월 4일생. 2011년 동아대학교 자연과학대학 신소재 물리학과 졸업. 현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학중.



박송이 (朴송이)

1989년 8월 16일생. 2012년 부산대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업. 현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학중.



김희제 (金熙濟)

1955년 10월 23일생. 1980년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 전기공학과 교수 재직 중.