

Effect of aging on the optoelectronic properties of a single ZnO nanowire

단일 ZnO 나노선의 광전 특성에 대한 에이징 효과

김기현*, 강정민*, 정동영*, 김상식**

Kihyun Keem*, Jeongmin Kang*, Dong-Young Jeong*, Sangsig Kim**

Abstract

The effect of aging on the optoelectronic properties of a single ZnO nanowire is investigated in this study. The photoluminescence (PL), photocurrent spectrum, current-voltage characteristics, and photoresponse were measured for the as-grown ZnO nanowire and for the same nanowire exposed to air for three months. For the aged nanowire, the broad PL band is weaker, the intensity of the photocurrent is strengthened, and the photoresponse is slower, compared with the as-grown nanowire. It is suggested in this paper that the observed aging effect on the PL is due to the reduction in the number of oxygen vacancies within the nanowire and that the aging effect on the photocurrent and photoresponse originates from the formation of oxygen vacancies near the surface.

요약

본 연구는 단일 ZnO 나노선의 광전 특성에 대한 에이징(aging) 효과에 관한 것이다. 합성 직후의 ZnO 나노선에 대하여 photoluminescence (PL), 광전류 스펙트럼, 전류-전압 특성 및 광응답 특성들을 측정하였고, ZnO 나노선을 3달 동안 공기 중에 노출시킨 후에 위의 실험을 반복하였다. 에이징된 나노선은 합성 직후의 나노선과 비교하여 넓은 영역의 PL 밴드는 약해졌고, 광전류의 크기는 증가하였으며, 광응답 속도는 느려졌다. 본 연구에서 PL를 통해 관찰된 에이징 효과는 나노선 내부에 산소 공공의 수가 감소함으로 인한 것이며, 광전류와 광응답 특성에서 에이징 효과는 나노선 표면 부근에 산소 공공의 형성으로 인한 것이다.

Key words : ZnO, nanowire, optoelectronic, photoconduction, aging effect

1. 서론

반도체 나노선은 자외선 레이저 [1], LED [2], 가스 센서 [3], 전계효과 트랜지스터 [4], 자외선 광검출기 [5-6] 등과 같은 광전자 및 전자 소자 분야에서 널리 연구되어왔다. 반도체 나노선은 기존의 벌크나 예피

층과 비교하여 높은 표면대비면적 비를 가지므로, 나노선 기반의 광전자 및 전자소자의 성능이 나노선 표면 상태에 크게 의존한다. 그러므로 본 연구에서 나노선의 표면 상태를 광전도 특성 분석을 통하여 에이징에 따른 나노선의 표면상태에 대하여 연구한다 [5-7].

* 고려대학교 전기전자전공공학부

(Department of Electrical Engineering, Korea University)

★ 교신저자 (Corresponding author) : 김상식

※ 감사의 글 (Acknowledgment) : 본 연구는 2006년도 과학기술부 국가지정연구실사업, 한국학술진흥재단 중점연구과제, 산업자원부 나노기반사업, 핵심기술개발사업 지원에 의하여 수행 되었습니다.

接受日:2006年 9月 30日, 修正完了日: 2006年 12月 9日

단결정 [8-9], 결정성 박막 [10-12], 다결정성 박막 [13-15]과 같은 여러형태의 ZnO 물질에 대한 PL과 광전도 특성에 관한 연구가 많은 그룹들에 의해 보고되었다. 특히, ZnO 박막의 에이징 전후에 대한 PL 및 광전도 특성에 대한 연구가 보고된바 있다 [5-7]. 최근에 단일 ZnO 나노선의 PL 및 광전도 특성에 대한 연구가 중점적으로 보고되고 있다. 그러나 단일 ZnO 나노선의 에이징 효과에 대한 연구는 전무하다. 본 연구에서 먼저 합성 직후의 단일 ZnO 나노선에 대하여 PL, 광전류 스펙트럼, 광응답 및 전류-전압 특성을 측정하고, 3달 동안 대기중에 노출시킴으로써 에이징 시킨 후, 에이징된 ZnO 나노선에 대하여 위와 같은 실험을 반복하여 에이징 효과가 ZnO 나노선의 표면상태에 미치는 영향에 대해 보고한다.

II. 본론

1. 실험방법

ZnO 나노선을 불필 처리된 ZnO 분말을 고온에서 기화시킴으로써 알루미늄 시료위에 합성하였다 [16]. 합성된 ZnO 나노선 시료를 메탄올에 담그고, sonication 처리를 하여 메탄올에 분산하였다. 분산된 나노선 용액을 피펫을 이용하여 산화된 실리콘 기판 위에 뿌렸다. 산화막(SiO₂)의 두께는 300 nm이다. 단일 ZnO 나노선을 광사진식각 (photolithography) 공정을 이용하여 선택적으로 패터닝하고, 열증착기(thermal evaporator)를 이용하여 티타늄 (Ti)과 금 (Au)을 증착한 후 리프트오프 (lift-off) 공정을 통해 단일 나노선에 2단자 전극을 형성하였다. 전극 간격은 6 μm 이고, 광학 현미경을 통해 관찰된 ZnO 나노선의 직경은 약 100 nm이다. 제작된 단일 ZnO 나노선 소자에 대하여 PL, 광전류 스펙트럼, 전류-전압 및 광응답 특성을 측정하였다. 위의 측정이 완료된 후에 단일 ZnO 나노선 소자는 3달 동안 대기 중에 노출시켰다. 대기중에 노출된 단일 ZnO 나노선 소자에 대하여 위와 같은 특성 측정을 반복하였다. 광전 특성 측정을 위하여 325 nm 파장의 He-Cd 레이저와 633 nm 파장의 He-Ne 레이저를 광원으로써 사용하였고, 광원의 출력밀도는 각각 단위 제곱센티미터 당 1.5 mW와 7 mW이다. 광전류 스펙트럼 측정에 이용된 광원은 Xe 램프이고, 출력밀도는 단위제곱센티미터 당 0.1 mW이다.

2. 결과 및 토의

단일 ZnO 나노선의 에이징 전후에 대하여 PL 측정을 하였다. 그림 1은 PL 스펙트럼을 보여주며, 그

림 1의 삽입도는 광학 현미경을 통해 관찰된 단일 ZnO 나노선 소자를 보여준다. PL 스펙트럼에서 자유 엑시톤 피크 (free exciton peak)가 380 nm 영역에 나타나고, 넓은 영역의 발광밴드 (broad emission band)가 450 nm에서 600 nm 파장 대에서 나타난다. 에이징된 ZnO 나노선은 에이징 전보다 넓은 영역의 발광밴드의 크기가 크게 감소하였으며, 넓은 영역의 발광에 대한 상대적인 자유 엑시톤 피크의 크기가 2.3에서 9.6으로 증가하였다. 이러한 관찰은 넓은 영역의 발광밴드의 원인이 산소공극과 관련이 있기 때문에 나노선 내부에 산소 공극(oxygen vacancy)의 수가 감소함을 가리킨다. 산소공극의 수에서 감소는 자유 엑시톤 피크의 크기를 증가시킨다. 왜냐하면 산소공극으로 인해 발생된 국부 전기장(local electric field)이 자유 엑시톤을 쉽게 파괴할 수 있기 때문이다. 이러한 결과는 에이징된 ZnO 박막에서 보고되었던 자유엑시톤 피크의 증가와 넓은 영역의 발광밴드의 감소결과와 잘 일치하였다 [12].

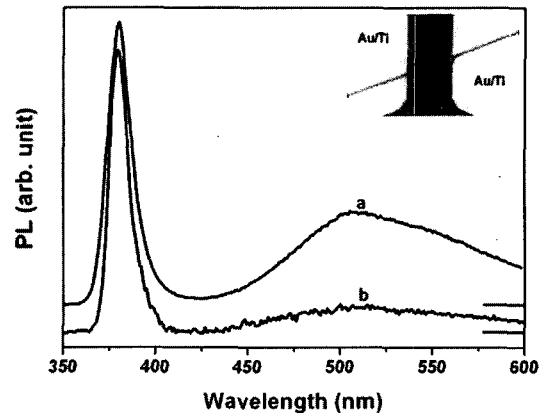


Fig. 1. Normalized photoluminescence spectra taken for (a) the as-grown ZnO nanowire patterned by photolithography and for (b) the aged ZnO nanowire (after the exposure of the as-grown ZnO nanowire to air for three months); the optical microscopic image of the single ZnO nanowire is seen in the inset
그림 1. 에이징 전후의 ZnO 나노선에 대한 정규화된 PL 스펙트럼, 삽입도는 단일 ZnO 나노선 2단자 소자

그림 2는 에이징 전후의 단일 ZnO 나노선에 대한 광전류 스펙트럼을 나타낸다. Xe 램프로부터 발생된 빛을 10 Hz의 사각 펄스형태로 600 nm에서 300 nm 까지 파장을 변화시키면서 광전류 특성을 관찰하였다. 밴드갭 (3.37 eV)보다 큰 흡수밴드에서 에이징된 나노선의 광전류 크기가 에이징 전의 나노선보다 크

고, 밴드갭보다 작은 흡수밴드에서는 에이징 전후의 나노선의 광전류 크기는 매우 작으며 큰 변화는 관찰되지 않았다. 그림 3은 325 nm 파장의 빛을 조사하였을 때와 조사하지 않았을 때의 전류-전압 특성 곡선을 보여준다. 에이징 전후의 ZnO 나노선을 비교하면 암전류(dark current)는 감소하였고, 광전류(photo current)는 증가하였다. 결과적으로 광전류 대비 암전류 비는 에이징 후에 2.25에서 4.96으로 증가하였다.

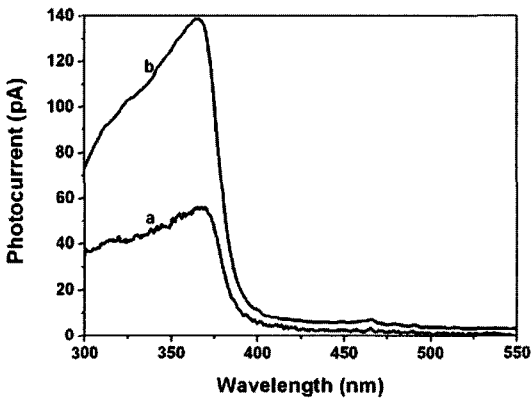


Fig. 2. Photocurrent spectra taken for (a) the as-grown ZnO nanowire patterned by photolithography and for (b) the aged ZnO nanowire under the illumination modulated at a frequency of 10 Hz from a Xe lamp

그림 2. 에이징 전후의 ZnO 나노선에 대한 광전류 스펙트럼

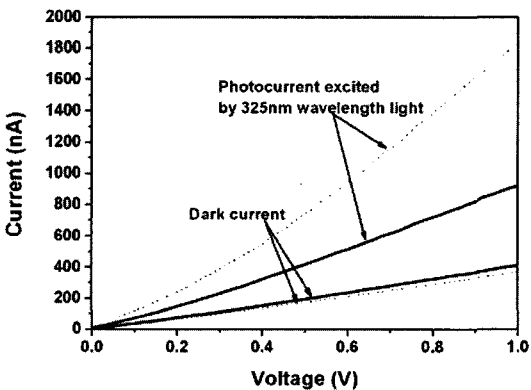


Fig. 3. I-V characteristics of photocurrent and dark current of the as-grown ZnO nanowire (solid line) and the aged ZnO nanowire (dashed line)

그림 3. 에이징 전후의 ZnO 나노선에 대한 광전류(실선)와 암전류(점선)의 특성 곡선

에이징된 나노선의 전류-전압 특성에서 암전류의 감소와 광전류의 증가, 그리고 광전류 스펙트럼에서 밴드갭보다 큰 영역에서의 광전류의 증가는 나노선 표면의 재구성에 의해 형성된 초과 산소공극(excess oxygen vacancy)과 관련이 있다 [12, 15]. 표면 재구성 과정 동안에 몇몇 산소는 표면으로 이동하므로 표면 부근에 초과 산소공극을 남긴다. ZnO는 산소를 잃고, 비화학량적(non-stoichiometric)으로 되는 경향이 있기 때문에 이러한 경향이 산소를 표면으로 이동시킨다 [15, 17]. 이 때, 산소 공극이 도너(donor)로써 작용하기 때문에 산소공극은 대기로부터 산소가 화학적으로 흡착하도록 전자를 제공한다. 표면에 흡착된 산소로 인하여 표면은 음으로 충전된다. 이러한 표면에 음으로 충전된 산소들로 인하여 ZnO 나노선의 표면에 공핍층(depletion layer)이 형성된다. 그 공핍층이 에이징 후에 더욱 확장된다. 에이징된 나노선에서 공핍층의 확장은 암전류를 감소시킨다. 또한 산소의 광학적 탈착(photodesorption)이 발생할 때, 산소가 대기중으로 떨어져 나가면서 많은 전자를 생성하므로 에이징 과정에서 산소가 많이 결합된 ZnO 나노선에서는 그림 2와 3에서 보는 바와 같이 광전류의 증가를 일으킨다.

그림 4는 에이징 전후의 ZnO 나노선의 광응답 특성을 나타낸다. 325 nm 파장의 빛을 조사하였을 때, 에이징 전의 나노선의 광전류가 급속하게 증가하다가 포화된다(그림 4a). 반면에 에이징된 나노선은 광전류가 포화됨이 없이 느리게 증가한다. 빛을 켜고 있을 때, 에이징 전의 나노선은 초기 감쇠(initial decay)가 에이징된 나노선과 비교하여 매우 가파르게 나타나며, 최고값에서 e⁻¹까지의 이차 감쇠(subsequent decay) 시간은 에이징 전후의 나노선에 대하여 각각 230초와 106초로 나타났다.

에이징 전후의 ZnO 나노선에 대한 광응답은 참고 문헌 15에서 보고된 다결정성 ZnO 박막과 같은 특성을 나타낸다. n형 ZnO의 광응답 특성은 일반적으로 세 가지 과정으로 설명된다. 첫 번째는 빠른 과정(fast process)으로써, 밴드갭보다 큰 빛에 의해 생성된 전하 캐리어(charge carrier)가 전도대(conduction band) 또는 가전자대(valence band)에서 직접적으로 전이하는 과정이다. 두 번째는 느린 과정으로써, 표면에 화학적으로 흡착된 산소 이온의 광학적 탈착으로 인한 과정이다. 세 번째는 매우 느린 과정으로써, 표면 이온이 에너지적으로 유리한 장소에 재분포하고, 오랜 시간 후에 초과 도너(excess donor)가 표면 부근에 형성되는 것이다. 일단 표면 이온의 재분포가 이루어지면, 광응답의 주요한 특성이 산

소 흡착과 탈착에 의해 결정된다. 에이징 전의 나노선은 표면 재구성 과정이 완료되지 않았기 때문에 광전류의 증가와 초기 감쇠가 더 빠르다. 에이징된 나노선은 산소의 흡착과 탈착에 크게 영향 받기 때문에 광전류 증가와 초기 감쇠는 느리고, 표면 부근에 초과 산소공극으로 인하여 광전류의 크기는 증가한다. 그러나 에이징된 나노선이 에이징 전의 나노선보다 이차감쇠가 더 빠르다. 이는 이차감쇠시간이 대기로부터 표면으로 산소이온이 되돌아오는 비율로 설명될 것이다. 되돌아오는 비율 (rate of return)은 표면 덮임율 (surface coverage)이 증가 할수록 감소한다. 에이징된 나노선은 표면 근처의 초과 산소공극으로 인하여 되돌아오는 비율이 더 높아진다.

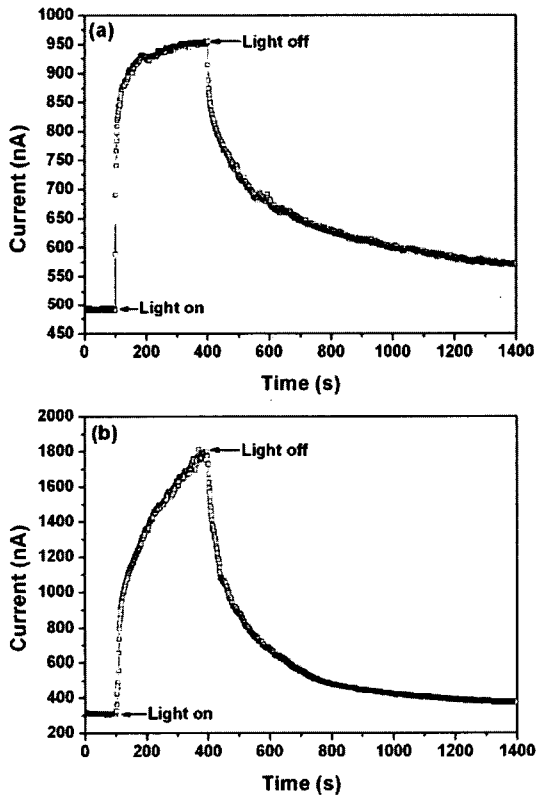


Fig. 4. Photocurrents taken for the (a) as-grown ZnO nanowire and (b) aged ZnO nanowire, excited by 325-nm wavelength light at a bias of 1 V

그림 4. 325 nm 파장의 빛을 조사하였을 때 (a) 에이징 전의 ZnO 나노선 (b) 에이징 후의 ZnO 나노선에 대한 광응답 특성

에이징된 나노선에서 관찰된 광전류의 향상과 느린

광응답은 표면 근처의 초과 산소공극의 형성과 관련이 있다. 반면 약한 넓은 영역의 PL 밴드는 나노선 내부에 산소공극 수의 감소로 인한 것이다. 이것은 산소공극이 나노선 내부에서 표면으로 이동하는 것을 의미한다. 더욱이 이러한 초과 산소공극의 형성은 넓은 영역의 PL 밴드에 기여하지 않는다. 그 이유는 초과 산소공극에 의해 생성된 국부 상태 (local state)가 표면상태에 속하기 때문이다. 나노선 내부의 전도대에 있는 광전자 (photogenerated electron)는 공핍층의 밴드 구부러짐 (band bending) 때문에 국부상태에 도달할 수 없다.

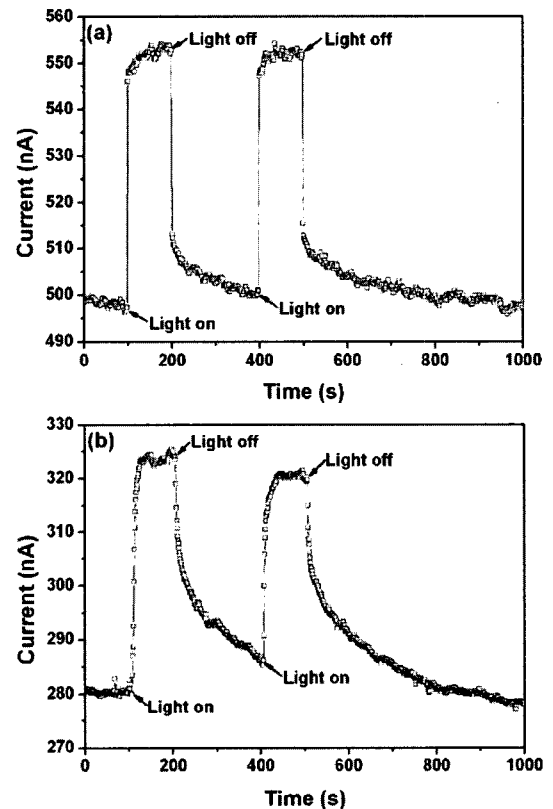


Fig. 5. Photocurrents taken for the (a) as-grown ZnO nanowire and (b) aged ZnO nanowire, excited by 633-nm wavelength light at a bias of 1 V

그림 5. 633 nm 파장의 빛을 조사하였을 때 (a) 에이징 전의 ZnO 나노선 (b) 에이징 후의 ZnO 나노선에 대한 광응답 특성

그림 5는 633 nm 파장의 빛이 조사될 때, 단일 ZnO 나노선의 광응답 특성을 나타낸다. 325 nm 파장

의 빛이 조사되었을 때와 달리 에이징 전후의 나노선은 광전류의 급속한 증가와 감쇠를 보여준다. ZnO 밴드갭보다 작은 에너지의 빛 (633 nm 파장의 빛)이 조사되었을 때, 광전류의 증가는 밴드갭 보다 큰 에너지의 빛 (325 nm 파장의 빛)이 조사되었을 때보다 빠르고, 조사된 빛을 켜는 때의 광전류의 감쇠도 밴드갭보다 작은 빛에 대하여 훨씬 빠르게 나타났다. 그러나 밴드갭 보다 작은 빛에 의한 광전류의 크기는 밴드갭보다 큰 에너지의 빛을 조사하였을 때보다 에이징 전의 나노선은 1/9, 에이징된 나노선은 1/30 만큼 더 작게 나타났다. 이러한 차이는 밴드갭보다 작은 빛에 의해 생성된 전하 캐리어의 광전류 메카니즘이 밴드갭보다 큰 에너지의 빛에 의해 생성된 전하 캐리어의 광전류 메카니즘과 다르기 때문이다. 밴드갭보다 작은 에너지의 빛이 조사될 때, 흡착된 산소이온과 관련 있는 표면상태에 포획된 전자들이 전도대로 여기 되므로 광전류의 빠른 응답을 초래한다. 밴드갭보다 작은 빛이 조사되는 도중에 화학적으로 흡착된 산소이온들이 나노선 표면에 물리적으로 흡착상태로 변하게 된다. 그러나 밴드갭보다 작은 에너지의 빛은 에너지적으로 너무 작아서 산소이온을 탈착시키기 어렵다. 그 이유는 다음과 같다. 나노선의 가전자대에 자유정공들이 존재한다면, 자유정공들은 나노선 표면에 음으로 충전된 산소이온들을 탈착시킬 것이다 [18-19]. 이 때, 자유정공들은 밴드갭보다 큰 에너지의 빛에서 쉽게 생성될 것이다. 반대로 밴드갭보다 작은 에너지의 빛은 전자들을 가전자대에서 표면상태로 여기시킴으로써 자유정공을 형성할 것이다. 표면상태에서의 상태밀도가 전도대의 상태밀도보다 매우 작기 때문에 자유정공들이 밴드갭보다 작은 빛에 대하여 쉽게 생성되지 않을 것이다. 그래서 밴드갭보다 작은 빛은 산소이온들을 쉽게 탈착시키지 못한다. 이런 결과로 보아 밴드갭보다 작은 에너지의 빛에서 광전류 메카니즘에 대하여 산소의 흡착과 탈착이 쉽게 일어나지 못하고, 밴드갭보다 큰 에너지의 빛에서 광전류 메카니즘에 대하여 산소의 흡착과 탈착이 잘 일어나게 된다는 것을 알 수 있었다.

III 결론

단일 ZnO 나노선 2단자 소자를 제작하고, 3달 동안 대기중에 노출시킴으로써 에이징을 시켰다. 에이징 전후의 시료에 대하여 광전 특성을 관찰하였다. 에이징된 ZnO 나노선에 대하여 넓은 영역의 PL 밴드가 감소하였는데, 이는 나노선 내부의 산소공극의 수가 감소하였음을 의미한다. 이러한 감소가 자유 엑시

톤 발광을 향상시킨다. 밴드갭보다 큰 에너지의 빛에 의한 광응답에서 에이징된 ZnO 나노선의 표면 재구성이 광전류의 느려진 증가와 초기감쇠에 대한 원인을 제공하였다. 더욱이 에이징된 나노선의 표면 근처에 초과 도너의 형성이 광전류를 약화시키고, 광전류를 강화시켰다. 그러나 밴드갭보다 작은 에너지의 빛에서의 광응답에서 광전류의 급속한 증가와 감쇠가 에이징된 나노선에서 관찰되었다. 이는 밴드갭보다 작은 에너지의 빛에서 광전류 메카니즘에 대하여 산소의 흡착과 탈착이 쉽게 일어나지 못하고, 밴드갭보다 큰 에너지의 빛에서 광전류 메카니즘에 대하여 산소의 흡착과 탈착이 잘 일어나게 된다는 것을 의미한다.

참고문헌

- [1] P. Yang, H. Yan, S. Mao, R. Russo, J. Johnson, R. Saykally, N. Morris, J. Pham, R. He, and H. Choi, "Controlled growth of ZnO nanowires and their optical properties," *Adv. Funct. Mater.* Vol.12, pp.323-331, 2002
- [2] O. Hayden, A. B. Greytak, and D. C. Bell, "Core-shell nanowire light-emitting diodes," *Adv. Mater.* Vol.17, pp.701-704, 2005
- [3] Z. Fan and J. G. Lu, "Gate-refreshable nanowire chemical sensors," *Appl. Phys. Lett.* Vol.86, pp.123510, 2005
- [4] Y. Huang, X. Duan, Y. Cui, and C. M. Lieber, "Gallium nitride nanowire nanodevices," *Nano Lett.* Vol.2, pp.101-104, 2002
- [5] Z. Fan, P. Chang, and J. G. Lu, "Photoluminescence and polarized photodetection of single ZnO nanowires," *Appl. Phys. Lett.* Vol.85, pp.6128-6130, 2004
- [6] K. Keem, H. Kim, G. Kim, J. S. Lee, B. Min, K. Cho, M. Sung, and S. Kim, "Photocurrent in ZnO nanowires grown from Au electrodes," *Appl. Phys. Lett.* Vol.84, pp.4376-4378, 2004
- [7] Q. H. Li, T. Gao, Y. G. Wang, and T. H. Wang, "Adsorption and desorption of oxygen probed from ZnO nanowire films by photocurrent measurements," *Appl. Phys. Lett.* Vol.86, pp.123117, 2005
- [8] C. H. Seager and S. M. Myers, "Quantitative comparisons of dissolved hydrogen density and the electrical and optical properties of ZnO," *J.*

Appl. Phys. Vol.94, pp.2888-2894, 2003

- [9] B. Lin and Z. Fu, "Green luminescent center in undoped zinc oxide films deposited on silicon substrates," *Appl. Phys. Lett.* Vol.79, pp.943-945, 2001
- [10] J. W. Tomm, B. Ullrich, X. G. Qiu, Y. Segawa, A. Ohtomo, M. Kawasaki, and H. Koinuma, "Optical and photoelectrical properties of oriented ZnO films," *J. Appl. Phys.* Vol.87, pp.1844-1848, 2000
- [11] T. Koida, S. F. Chichibu, A. Uedono, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, T. Sota, Y. Segawa, and H. Koinuma, "Correlation between the photoluminescence lifetime and defect density in bulk and epitaxial ZnO," *Appl. Phys. Lett.* Vol.82, pp.532-534, 2003
- [12] F. K. Shan, G. X. Liu, W. J. Lee, G. H. Lee, I. S. Kim, and B. C. Shin, "Aging effect and origin of deep-level emission in ZnO thin film deposited by pulsed laser deposition," *Appl. Phys. Lett.* Vol.86, pp.221910, 2005
- [13] P. Sharma, K. Sreenivas and K. V. Rao, "Analysis of ultraviolet photoconductivity in ZnO films prepared by unbalanced magnetron sputtering," *J. Appl. Phys.* Vol.93, pp.3963-3970, 2003
- [14] D. H. Zhang, "Fast photoresponse and the related change of crystallite barriers for ZnO films deposited by RF sputtering," *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol.28, pp.1273-1277, 1995
- [15] D. H. Zhang and D. E. Brodie, "Photoresponse of polycrystalline ZnO films deposited by r.f. bias sputtering," *Thin Solid Films* Vol.261, pp.334-339, 1995
- [16] J. Lee, K. Park, M. Kang, I.W. Park, S. W. Kim, and S. Kim, "ZnO nanomaterials synthesized from thermal evaporation of ball-milled ZnO powders," *J. Cryst. Growth* Vol.254, pp.423-431, 2003
- [17] W. H. Hirschwald, "Zinc oxide: A outstanding Example of a binary compound semiconductor," *Acc. Chem. Res.* Vol.18, pp.228-234, 1985
- [18] H. Kind, H. Yan, B. Messer, M. Law, and P. Yang, "Nanowire ultraviolet photodetectors and optical switches," *Adv. Mater.* Vol.14, pp.158-160, 2002
- [19] C. Li, D. Zhang, X. Liu, S. Han, T. Tang, J.

Han, and C. Zhou, "In₂O₃ nanowires as chemical sensors," *Appl. Phys. Lett.* Vol.82, pp.1613-1615, 2003

저 자 소 개

김 기 현 (정회원)



2001년 : 고려대학교 전기전자전공
공학부 졸업 (공학사)
2003년 : 고려대학교 대학원 전기
공학과 (공학석사)
2003년 3월~현재 : 고려대학교 대
학원 전기공학과 (박사과정)
<주관심분야>
나노선 전자 소자

강 정 민 (학생회원)



2005년 : 서남대학교 전자공학과
졸업 (공학사)
2005년 3월 ~ 현재 : 고려대학교
대학원 미세소자협동과정 (석사과
정)
<주관심분야>
나노선 전자소자

정 동 영 (정회원)



1990년 : 고려대학교 물리학과 졸
업 (이학사)
1994년 : 고려대학교 대학원 물리
학과 (이학석사)
2000년 : 고려대학교 대학원 물리
학과 (이학박사)
2000 ~ 2004년 : 서울시립대 양자
정보처리 연구단 박사후 연구원
2004 ~ 현재 : 고려대학교 BK연구교수
<주관심분야>
나노선 전자소자

김 상 식 (정회원)



1996 : Columbia University,

반도체 물리 (공학박사)

1996 ~ 1998 : University of
Illinois at Urbana-Champaign
박사후연구원

1998.7.~1999.2 : University of
Illinois at Urbana-Champaign

전문연구원

1999.3.~현재 : 고려대학교 전기전자전파공학부
부교수

<주관심분야>

나노선 및 나노입자를 이용한 전자소자 개발