

# ZnO 특성 및 응용 연구 동향

정민창, 명재민  
연세대학교 금속공학과  
jmmyoung@yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

역사적으로 새로운 재료의 출현은 사회 전반에 발전을 가져왔다. 현대사회는 반도체 재료의 개발과 함께 정보화 사회로 급속히 진보해가고 있으며 이에 따라 정보통신, 정보저장 및 디스플레이 산업에 대한 중요성이 증폭되고 있다. 따라서 우리나라를 비롯하여 미국, 일본, 대만 등의 여러 국가들은 국가적 차원에서 이러한 산업에 대한 기술적 우위를 확보하고자 총력을 기울이고 있으며, 아울러 이러한 기술을 실현시키기 위해 기존의 반도체 재료의 개선 및 새로운 반도체 재료의 연구 및 개발이 진행중이다. 이러한 관점에서 ZnO는 디스플레이 산업과 정보통신 산업에 응용하기에 적합한 물리적, 화학적 특성을 지니고 있어 연구가치가 높은 재료이다. ZnO는 80년대 후반부터 이미 투명전극, 가스센서, 바리스터, SAW 소자 등 여러 분야에 널리 이용되어왔으며 최근에는 발광소자(LEDs), 레이저 소자(LDs) 등의 광학소자 분야와 스핀트로닉스 분야에 응용하기 위한 DMSs (Diluted Magnetic Semiconductors)로 주목받고 있다. 이 글에서는 ZnO의 기본적 물성과 ZnO 박막을 이용한 광학 소자 및 스핀트로닉스 분야에의 응용에 대해 살펴보고, 마지막으로 ZnO 나노와이어에 대해 개괄적으로 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. ZnO의 기본 물성

ZnO는 3.3 eV의 직접천이형 wide 밴드갭을 갖는 II-VI족 화합물 반도체이다. 기본적으로 ZnO는  $c = 5.21 \text{ \AA}$ ,

$a = 3.25 \text{ \AA}$ 인 wurtzite 결정구조를 이루고 있으며 O 이온이 hexagonal site에 위치하고 Zn 이온이 tetrahedral interstitial site에 위치한다. ZnO의 결정학적 특성은 광학소자로 상용화된 GaN와 유사하기 때문에 LEDs나 LDs 등의 소자 재료로 주목받고 있다. 하지만 최근에는 zinc-blende 결정 구조를 가지는 ZnO에 대한 연구결과가 보고되고 있어 주목을 받고 있다.<sup>1,2)</sup>

ZnO는 결정성장 과정에서 Zn 침입형 원자나 산소 공공과 같은 결함들을 결정 내에 포함하게 되어 Zn와 O의 비율이 1:1을 벗어나는 nonstoichiometry(비화학양론적) 구조를 갖게된다. 이러한 결정결함들은 음의 전하를 띠게되어 전기 전도도에 기여하게 된다. 따라서 ZnO는 성장 직후 상온에서  $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 *n*-형 전기 전도성을 가지게 되며 Hall 이동도가 약  $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 이 된다.<sup>3)</sup> 또한 Al, Ga, In과 같이 III족 원소를 도핑함으로써 쉽게 *n*-형의 ZnO 박막을 성장시킬 수 있다. 하지만 결정성장 과정에서 defect에 의해 생성되는 background carrier concentration은 ZnO의 *p*-형 도펀트와 보상효과를 일으켜 *p*-형 ZnO 박막의 제조를 어렵게 한다.

*p*-형 ZnO 박막성장에 대한 연구는 다양한 방법을 이용하여 시도되고 있으나 아직 재현성과 박막의 품질 문제로 더 많은 연구가 필요하며 *p*-형 도핑 기구에 대한 이론적인 연구도 체계적으로 정립되어 있지 않은 실정이다. Minegishi 등은 박막성장 과정에  $\text{NH}_3$ 를 Zn 수송 가스와 함께 주입시키는 방법으로 *p*-형 ZnO 박막을 성장시켰다고 보고했지만,<sup>4)</sup> 비저항이 높고 정공의 농도가 매우 낮아 소자에 적용하기에는 부적합하다. 이후에 Rouleau 등은 plasma를 이용하여 N을 ZnO 박막에 도핑하려는 시도가 있었으나 Hall 측정을 통한 *p*-형 ZnO 박

막의 전기적 특성을 직접적으로 제시하지 못했다.<sup>5)</sup> Osaka 대학의 T. Yamamoto 등<sup>6)</sup>은 *p*-형 도펀트와 *n*-형 도펀트의 Madelung 에너지 준위를 계산함으로써 co-doping에 의한 *p*-형 ZnO 박막의 제조 가능성을 제시하였고, 같은 대학의 M. Joseph 등<sup>7)</sup>은 실제로 N과 Ga의 co-doping을 통해 낮은 비저항 값과 높은 캐리어 농도를 갖는 *p*-형 ZnO 박막을 제조하는데 성공하였으나 재현성 문제와 박막의 품질 문제로 인하여 소자로 응용하는데 많은 문제가 있다. National Renewable Energy 연구소의 S. B. Zhang 등<sup>8)</sup>은 M. Joseph 등이 발표한 *p*-형 ZnO 박막에 대한 열역학적인 분석을 통해 T. Yamamoto 등과는 달리 NO 형성에 의한 새로운 N 도핑 기구를 제시하기도 하였다. 한편, Missouri 대학의 Y. R. Ryu 등<sup>9)</sup>은 PLD 법을 이용하여 GaAs 기판에 의한 As 도핑 방법을 이용하여 *p*-형 ZnO 박막을 제조하였다고 보고하였으며, RF magnetron sputter 법을 이용하여 As이 도핑된 *p*-형 ZnO 박막성장이 보고되었다.<sup>10)</sup> 그러나 *p*-형 ZnO 내의 정확한 As 도핑 기구는 아직 규명되지 않고 있다. 또한 T. Aoki 등<sup>11)</sup>은 *n*-형 ZnO 박막의 표면을 통한 P 도핑 방법을 이용하여 *p*-형 ZnO 박막을 제조하였다고 보고하였고, InP 기판 및 Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> 분위기 하에서 열처리를 이용하여 P를 도핑시킨 *p*-형 ZnO 박막 제조가 보고되었지만 As 도핑과 마찬가지로 P의 도핑 기구 또한 아직 규명되지 않았다.<sup>12)</sup> 최근 Y. M. Sun 등은 ZnO 박막의 내부 결함에 대한 에너지 준위를 계산하여 보고하였고 N. Y. Garces 등<sup>13)</sup>은 도핑하였을 경우 shallow 억셉터로 작용하는 N의 ZnO 박막내에서의 거동에 대해 조사하는 등 *p*-형 도핑 기구 해명에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

광학적 특성으로는 가시광선 영역의 투과성을 가지며 발광기구는 크게 밴드갭과 관련된 Near band edge(NBE) emission과 결함등에 관련된 emission으로 나누어 볼 수 있다. 특히, ZnO는 상온에서도 다른 화합물 반도체에 비해 약 60 meV의 큰 exciton 결합 에너지를 가지고 있으므로 상온에서도 안정되고 고효율의 레이저 방출이 용이하다.<sup>14,15)</sup> Fig. 1에 ZnO 밴드 구조내에 생성되는 에너지 준위들에 의한 발광을 나타내었다.

또한, ZnO는 Zn 와 O의 강한 결합력으로 인해 2000°C

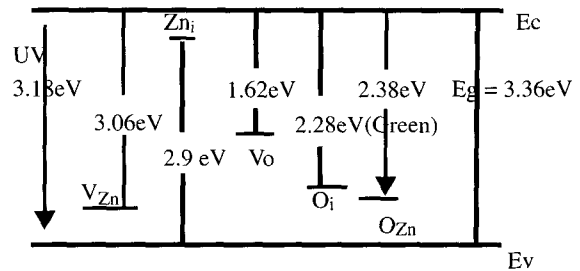


Fig. 1. ZnO 내부 결함 에너지 준위.

정도의 높은 용점을 가지며 외부 압력에 대한 저항성이 우수하고 radiation damage에 대해서도 안정한 장점을 가지고 있다.

## 2-2. ZnO의 응용

### 2-2-1. Transparent Conductive Electrode

LCD, PDP, 유기 EL 등 각종 평판 디스플레이가 발달함에 따라 투광성과 전기 전도성이 우수한 투명 전극용 재료의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 투명 전도막으로 사용되는 재료는 낮은 비저항값( $10^{-3} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ )과 가시광선 영역에서의 높은 광 투과율(90% 이상)을 가져야 하며, 또한 관련된 소자의 제조 공정중에 열에 의한 특성의 변화가 적어야 한다. 지금까지 가장 널리 사용되는 투명 전도막 재료는 ITO( $\text{In}_{x-1}\text{Sn}_x\text{O}_3$ )로 광학적 특성과 전기적 성질이 매우 우수하지만 원료 물질인 In의 생산단가가 높고, 플라즈마에 노출되는 경우 열화로 인한 특성변화가 커다란 문제점으로 지적되고 있다. 이에 반해 ZnO는 적외선 및 가시광선 영역에서의 투광성 및 전기 전도성과 플라즈마에 대한 내구성이 우수하고, 낮은 온도에서 공정이 가능하며 원료 가격이 비교적 낮아서 대면적 디스플레이의 투명전극용 또는 window용 재료로서 ITO를 대체하고 있다. 그러나 불순물이 첨가되지 않은 ZnO 박막의 경우 대기중에 장시간 노출되었을 경우 산소의 영향으로 Zn와 O의 정량비가 변함에 따라 전기적 성질의 변화가 발생하고 고온분위기에서 안정하지 못한 단점으로 인해 아직 완전히 상용화되지는 못하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Al, In, Ga, B 등의 불순물을 이용해 전기 전도도를 높이고 대기 중에서도 안정한 ZnO 박막을 제조하기 위한 연구

가 진행되어 왔으며 현재 안정된 전기적 성질을 가진 ZnO 투명 전극에 관한 상당한 연구 결과들이 보고되고 있다.<sup>16,17)</sup> 또한 스퍼터링, spray pyrolysis, MOCVD, PLD 등의 다양한 ZnO 증착 방법에 의한 연구와 함께 공정 단가를 낮추기 위한 연구도 진행되고 있어 현재 많은 성과를 거두고 있다.

### 2-2-2. LED와 LD

광학 소자로 사용하기 위한 II-VI족 화합물 반도체중 가장 널리 실용화된 것은 ZnSe이다. 1960년대에 ZnSe를 이용한 단파장 광학 소자에 대한 응용연구가 시작되었으며, Zn(Cd)S(Se)와 같은 화합물 반도체 재료를 이용하여 가시광선 전영역의 파장을 발광할 수 있는 소자가 개발되었다. ZnO의 경우 1960년대 초 Wright Patterson 미 공군 연구소의 Reynold 등<sup>18)</sup>에 의해 그 특성이 광학 소자로 연구되고 있는 다른 II-VI족 화합물 반도체 재료와 유사함을 밝힘으로써 광학 소자로의 응용 가능성이 제시되었으나 본격적인 연구는 1990년대 후반에 이루어졌다. 이는 ZnO를 에피 성장시킬 수 있는 기술이 미흡했고 p-형 거동을 보이는 ZnO 박막을 제조할 수 없었기 때문이었다. 그러나 1990년대 이후 GaN로 대표되는 질화물 반도체의 광소자 개발이 활성화 되면서 GaN와 유사한 결정학적, 광학적 특성을 나타내는 ZnO를 광소자에 응용하려는 연구가 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 활발히 진행되어 왔다. 또한 MOCVD, MBE 등의 에피성장 기술이 발달하면서 이를 ZnO 박막 성장에 이용하여 양질의 ZnO 박막 성장이 가능해짐에 따라<sup>19,20)</sup> ZnO의 광소자로서의 응용 가능성은 더욱 높아지고 있다.

ZnO는 상대적으로 큰 exciton binding energy(~60 meV)로 인해 상온에서의 자외선 레이저 방출이 용이하다. 상온에서 exciton에 의한 레이징 조건을 만족하기 위해서는 exciton binding energy가 상온에서의 thermal energy (26 meV)보다 큰 값을 가져야 한다. 따라서 ZnO가 다른 재료에 비해 2배 이상의 높은 exciton binding energy(GaN: 28, ZnSe: 22 meV)를 가지고 있다는 것은 레이저 다이오드 분야에 응용시 안정되고 고효율의 소자를 구현할 수 있음을 뜻한다. 따라서 ZnO의 자

색 및 청색빛의 광소자와 laser diodes(LDs)로서의 응용 가능성은 높은 편이며 미국과 일본을 중심으로 현재 많은 연구가 진행 중이다. 하지만 여전히 p-형의 ZnO 박막성장은 낮은 정공농도 및 박막품질의 재현성 문제가 존재한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 앞서 살펴봤듯이 다양한 원소의 도핑을 통한 p-형 ZnO에 대한 연구가 계속 진행중이며, 동시에 n-형 ZnO와 p-형의 전기 전도성을 갖는 ZnO가 아닌 TOSs (Transparent Conducting Oxides)를 이용하여 p-n heterojunction을 구현하려는 노력이 진행중이다. 현재까지 CuAlO<sub>2</sub>, CuGaO<sub>2</sub> 등이 p-형의 전기 전도성을 보인다고 보고되었다.<sup>21,22)</sup> 특히 H. Ohta 등은 p-형 SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>과 n-형 ZnO를 접합하여 자외선을 발광하는 p-n heterojunction LED를 구현하였다.<sup>23)</sup> 하지만 격자 상수가 다른 p-형과 n-형 반도체의 접합부분의 계면 특성에 따라 소자의 효율이 감소될 수 있기 때문에 p-n homojunction 제작을 위한 p-형 ZnO의 개발을 위한 노력이 진행중이다.

GaN를 비롯한 질화물계의 반도체에 대한 연구는 이미 선진국을 중심으로 많은 연구가 이루어져왔으며, 이에 관련된 청자색 등의 발광소자 기술은 일본이 독보적인 기술개발로 현재의 시장을 석권하고 있다. 따라서 국내의 차세대 발광 소자소재 개발기술의 원천 기술 확보가 시급하며, 이를 위해 ZnO를 이용한 발광소자의 개발은 향후 선진국 수준의 연구결과를 앞설 수 있는 독창적인 분야가 될 수 있을 것이다. 청색이나 UV의 발광소자가 ZnO를 이용하여 실현될 경우, 고밀도의 정보저장과 재생을 필요로 하는 DVD 등의 정보저장 소자 산업에 기술적인 혁신을 가져올 수 있으며 기존의 청색 발광소자인 GaN를 대체할 수도 있어서 큰 파급효과가 있을 것으로 기대된다.

### 2-2-3. ZnO DMS

DMSs (Diluted Magnetic Semiconductors)는 주로 II족 또는 III족의 원소들의 일부가 전이금속인 Fe, Co, Mn에 의해 치환된 II-VI, III-V족 화합물 반도체를 의미한다. 전이금속 이온의 스핀들과 밴드 전자들의 상호작용으로 인해 이들은 Giant Faraday effect 와 같은 광

자기 특성을 가진다. 외부 전기, 자기장에 의해 band edge의 조절이 가능하고 도핑에 의해 캐리어의 농도를 변화시킴으로서 재료내의 자기적 성질을 변화시킬 수 있다는 독특한 특성으로 인해 DMSs는 지난 20년 동안 자기, 광학적 재료로서 많은 주목을 받아 왔다. 자기적 특성과 전기, 광학적 성질을 한 재료에서 모두 구현 할 수 있으므로 DMSs는 미래의 스핀전자재료 분야에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

H. Ohno는 최초로 Curie 온도가 ~110 K인 강자성 GaMnAs 박막을 성장시켰다.<sup>24)</sup> 그리고 Fig. 2와 같은 구조의 spin-LED를 구현하여 6K에서 polarized electroluminescence를 관찰하였다.<sup>25)</sup> 하지만 GaMnAs DMS는 Curie 온도가 110 K로 상온에 비해 매우 낮은 온도에서 강자성의 특성을 나타내기 때문에 상온에서 스핀트로닉스 소자로 응용이 어렵다. 이후에 많은 연구그룹들은 DMSs의 Curie 온도를 높이기 위해 많은 연구를 진행중이다. 특히 Dietl등은 강자성에 대한 Zener model을 이용하여 Mn을 도핑한 *p*-형 GaN와 ZnO가 상온에서 강자성을 갖을 수 있음을 계산을 통해 예측함으로써<sup>26)</sup> 최근에 GaN와 ZnO를 이용한 DMSs가 많은 관심을 모으고 있다(Fig. 3]. 더욱이 ZnO는 다른 DMSs에 비해 큰 전자질량(0.3 $m_e$ )을 가지고 있으므로 이동 캐리어와 전이 금속이온간의 강한 자기적 상호 작용을 일으킬 수 있다. 또한 상온에서 강한 발광 특성을 나타내며 투명하므로 광학적으로 이용 가치가 높다. 한편, heavy electron doping을 이룰 수 있고( $>10^{21}$ ), Mg등의 도핑에 의해 밴드갭을 4eV 까지 조절 할 수있으며 Mn등의 고용도가 다른 금속에 비해 10 mol%정도 더 크다는 장점을 가지고 있다. 또한 500°C 이하의 낮은 공정온도에서도 양질

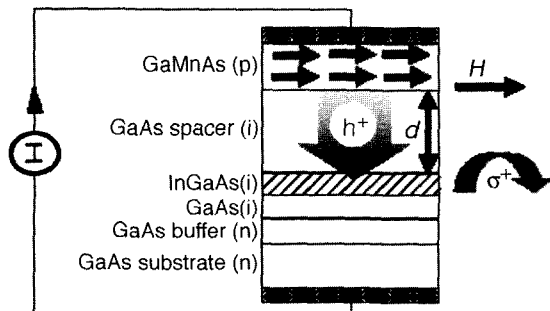


Fig. 2. GaMnAs를 이용한 spin-LED.

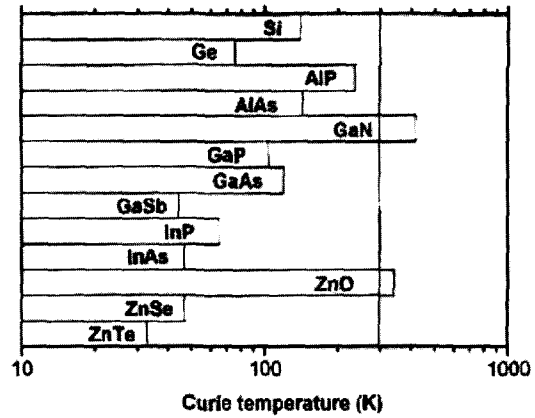


Fig. 3. *p*-형 반도체의 예상 Curie 온도.

의 에피 박막의 성장이 가능하다. 이러한 장점들을 바탕으로 ZnO는 광학적 특성과 자기적 특성을 동시에 지닌 차세대 광자기 재료로서 기대가 모아지고 있다.

ZnO DMS에 관한 연구로서 일본 Osaka 대학에서 전이 금속 원소들인 Fe, Co, Ni, Mn 등의 도핑에 의해 비교적 높은 Curie 온도를 갖는 ZnO DMS의 실현 가능성이 이론적으로 제안되었고, mean-field theory에 의해 *p*-형  $Zn_{1-x}Mn_xO$ 가 상온 강자성을 갖을 것으로 예측되었다. 이를 바탕으로 일본의 Osaka 대학과 Tokyo 대학 등에서 활발한 연구가 진행중이다. Tokyo 대학의 T. Fukumura<sup>27)</sup>는 PLD 법을 이용하여 만든 Mn-doped ZnO ( $Zn_{0.64}Mn_{0.36}O$ )의 자성을 조사한 결과 다른 II-VI DMSs 보다 높은 Curie-Weiss 온도를 가지는 강한 antiferromagnetic exchange coupling 현상을 보임을 알아냈다. 하지만 Curie-Weiss plot에 관한 정확한 정량적 분석은 아직 불확실하므로 이에 대한 앞으로의 연구가 더 필요하다. 또한 ZnO 박막의 Mn 농도에 따라 발생하는 큰 in-gap absorption 현상은 광학적으로 자기적 성질을 변화시킬 수 있다는 가능성을 보여주었고, Al 등의 도핑에 의해 다른 DMSs 보다 높은 캐리어 농도( $10^{19} \text{cm}^{-3}$ )를 가진다는 것을 발견하였다.

최근에 Curie 온도가 350K 이상인 Co를 도핑한 ZnO 박막이 보고되었다.<sup>28,29)</sup> 또한 University of Florida의 D. P. Norton은 Mn과 Sn을 co-doping한 ZnO 박막이 ~250 K까지 강자성을 갖는다고 보고함으로써<sup>30)</sup> 계속적인 연구를 통해 상온 강자성 특성을 갖는 ZnO DMS의

실현이 가능할 것으로 보인다. 그러나, 이런 연구결과는 실용화 단계에 이르기에는 이론적, 기술적 체계가 아직 미흡하다. 무엇보다 전자와 정공이 박막 내부에서 거동하거나 또는 박막의 경계를 통과할 때 강자성을 유지해야만 스핀트로닉스로 그 응용이 가능하다. 이외에도 실제 응용을 위해서는 양질의 박막성장 및 두께제어, quantum well 구조를 만들 경우의 자성층 사이의 계면 제어, 자성 소자를 만들 경우 소자의 크기 감소에 따른 스위칭 제어 등의 문제 등을 해결해야 한다. 또한 반도체 공정에서 사용하는 열처리 온도가 보통 400~500°C 정도임을 고려하면 이에 상응하는 Currie 온도를 가진 ZnO DMS를 만들기 위해서는 앞으로 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다. 현재 미국, 독일, 일본 등에서 ZnO DMS를 비롯한 다양한 스핀전자재료에 대한 기초 연구가 국가적 차원에서 지원하에 이루어지고 있다. 이 기술은 기존의 반도체 기술의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 떠오르고 있어 그 산업적 중요성은 매우 크다 할 수 있으며, 우리 나라도 1990년대 후반부터 몇몇 대학, 연구소, 기업들을 중심으로 DMSs 재료에 관한 기초 연구가 진행중이다.

#### 2-2-4. ZnO 나노와이어

반도체 나노와이어는 박막에 비해 성장이 비교적 쉽고 성장 직후 우수한 결정성을 가질 뿐 아니라 물리적 크기 제한으로 인해 양자크기효과(quantum size effect)가 나타나는 특징이 있다. 따라서 양자 제한(quantum confinement)이 가능하게 되어 bulk 상태 보다 큰 밴드갭을 구현할 수 있게 된다. 이러한 반도체 나노와이어를 레이저 소자로 응용할 경우 고효율 및 낮은 문턱 전압을 기대할 수 있고, bulk 상태보다 단파장의 레이저를 발진시킬 수 있다. 많은 연구가 진행되어온 Si의 경우 나노와이어의 전단계인 나노결정으로부터 적색 계열의 발광이 보고되었다(Fig. 4). 이러한 연구 결과는 물리적 크기를 줄임으로써 양자제한으로 인한 밴드갭 변화를 얻을 수 있음을 시사하였다.<sup>31)</sup>

반도체 나노와이어는 비단 레이저 소자 뿐 아니라 waveguide, 광검출소자 등의 여러 분야에도 응용될 수 있기 때문에 Si 외에도 기존 반도체 재료인 GaN, ZnO,



Fig. 4. Green laser가 조사된 Si nanocrystal의 발광.

CdS, GaAs등을 나노와이어 형태로 성장시키는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 대표적인 나노와이어 성장방법에는 촉매를 사용한 VLS process<sup>32)</sup>와 촉매를 사용하지 않는 VS process<sup>33)</sup>가 있으며, ZnO 역시 동일한 방법을 이용하여 나노와이어 형태로 성장시킬 수 있다.<sup>34,35)</sup>

ZnO 나노와이어는 우수한 결정성을 가지고 있기 때문에 그간 고품위 박막, 특히 p-형 박막 제조의 어려움으로 인해 구현이 어려웠던 LDs 및 기타 광소자를 실현할 수 있는 대안이 될 수 있다. 미국 캘리포니아 대학의 Yang 연구팀은 Au를 촉매로 사용한 VLS process를 이용하여 기판으로부터 수직인 방향의 ZnO 나노와이어를 성장시키는데 성공하였고(Fig. 5), 이 나노와이어로부터 문턱전압 40 kW/cm<sup>2</sup>, 385 nm UV 레이저 발진을 얻을 수 있었으며, 기존 박막형태 ZnO로 구현한 UV 레이저의 문턱전압인 300 kW/cm<sup>2</sup>에 비해 매우 낮은 값을 보였다. 이때 나노와이어 하나가 cavity가 되고, 기판인 사파이어와 성장된 나노와이어의 끝단이 mirror 역할을 하

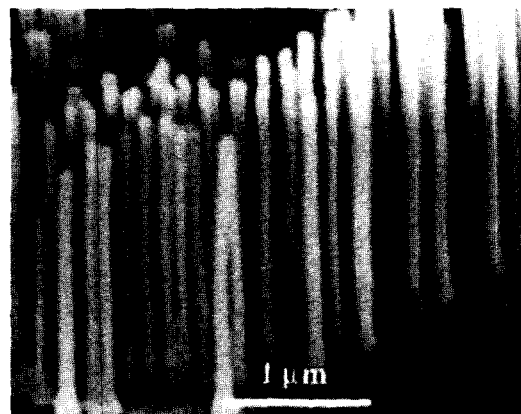


Fig. 5. ZnO 나노와이어.

여 stimulation이 일어남으로써 ZnO 나노와이어의 레이저 발진이 가능하다고 보고하였다.<sup>36)</sup> 또한 베이징 대학의 Kong은 불규칙적인 성장 방향을 갖는 ZnO 나노와이어의 상온 PL spectra 연구를 통해 3.27eV 부근에서 UV 발광을 관찰하였다.<sup>37)</sup> 그러나 bulk ZnO의 밴드갭인 3.3eV와의 차이는 아직 밝혀지지 않고 있다.

최근 전세계적으로 많은 연구단체에서 반도체로 사용되고 있는 재료를 대상으로 나노와이어를 연구하고 있다. 하지만 ZnO 나노와이어를 비롯한 대부분의 반도체 나노와이어의 성장 기구가 아직 명확하게 밝혀지지 않은 상태이고, 선택적 방향으로의 성장 역시 어려운 실정이다. 따라서 실제 광소자로서의 응용을 위해서는 명확한 성장기구의 규명과 선택적 성장조건 확립이 우선되어야 하며, 더불어 나노와이어 하나의 움직임을 조절할 수 있는 기술 확보도 해결해야 할 과제로 남아있다.

### 3. 미래의 개발 동향과 전망

현재의 전자·광학 소자의 소형화·경량화 추세는 이제 마이크로를 넘어 나노 스케일의 소자를 제조하는 신개념의 기술을 요구하는 단계에 이르렀으며, 반도체를 비롯한 디스플레이, 정보 통신 산업 전반에 걸쳐 나노 소자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. ZnO를 이용한 블루 및 UV LEDs와 LDs에 대한 연구와 더불어 전자의 spin-polarization을 이용한 spin-LEDs의 실용화 가능성 및 높은 Curie 온도를 갖는 ZnO DMS의 특성이 밝혀지고, bulk ZnO에서만 발견되었던 상온에서의 UV emission과 lasing 현상이 ZnO film 및 nano 입자에서도 발견됨에 따라 ZnO를 광학소자에 응용하려는 연구가 시도되고 있다. 그러므로 ZnO를 이용한 발광재료 및 소자가 산업 전반에 미치는 파급효과를 고려한다면 잠재성이 무한한 연구분야라 할 수 있다.

새로운 시대는 새로운 재료를 요구한다. ZnO가 가지고 있는 여러 물성들을 고려해볼 때 분명 ZnO는 현 시대의 디스플레이 산업과 정보통신 산업에 있어 그 응용 가능성이 충분한 재료이며 미래의 산업에서도 중요한 입지를 차지할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

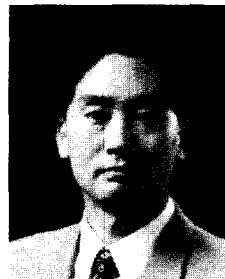
1. A. B. M. Almamun Ashrafi, A. Ueta, A. Avramescu, H. Kumano, I. Suemune, Y. W. Ok, and T. Y. Seong, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 550 (2000).
2. T. Sekiguchi, K. Haga and K. Inaba, *J. Crystal Growth*, **174/175**, 68 (2000).
3. A. R. Huston, *Phys. Rev.*, **108**, p.222 (1957).
4. K. Minegishi, Y. Koiwai, Y. Kikuchi, K. Yano, M. Kasuga, and A. Shimizu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2, **36**, L1453 (1997).
5. C. Rouleau, S. Kang, and D. Lowndes (unpublished).
6. T. Yamamoto and H. K. Yoshida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L166 (1999).
7. M. Joseph, H. Tabata, T. Kawai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 1205 (1999).
8. S. B. Zhang, S. -H. Wei, and Y. Yan, *Physica B.*, **302/303**, 135 (2001).
9. Y. R. Ryu, W. J. Kim, and H. W. White, *J. Crystal Growth*, **219**, 419 (2000).
10. D. K. Hwang, K. H. Bang, M. C. Jeong, J. M. Myoung, *J. Crystal Growth*, **254**, 449 (2003).
11. T. Aoki, Y. Hatanaka, D. C. Kook, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3257 (2000).
12. K. H. Bang, D. K. Hwang, M. C. Park, Y. D. Ko, I. Yun, and J. M. Myoung, *Appl. Surf. Sci.*, **210**, 177 (2003).
13. N. Y. Garces, N. C. Giles, L. E. Halliburton, G. Cantwell, D. B. Eason, D. C. Reynolds, and D. C. Look, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1334 (2002).
14. P. Zu, Z. K. Tang, G. K. L. Wong, M. Kawasaki, A. Ohtomo, H. Koinuma and Y. Segawa, *Solid State Commun.*, **103**, 459 (1997).
15. D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu, T. Yao, M. Y. Shen, and T. Goto, *J. Crystal Growth*, **184/185**, p. 605 (1998).
16. M. Hiramatsu, K. Imaeda, N. Horio, and M. Nawata, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **16**(2), 669 (1998).
17. M. Chen, Z. L. Pei, C. Sun, J. Gong, R. F. Huang, and L. S. Wen, *Materials Science and Engineering B*, **85**(2/3), 212 (2001).
18. Y. S. Park, C. W. Litton, T. C. Collins, and D. C. Reynolds, *Phys. Rev.*, **143**, 512 (1966).
19. J. Narayan, K. Dovidenko, A. K. Sharma, S. Oktyabsky, *J. Appl. Phys.*, **84**, 2597 (1998).
20. P. Fons, K. Iwata, S. Niki, A. Yamada, and K. Matsubara, *J. Crystal Growth*, **201/202**, 627 (1999).
21. H. Kawazoe, M. Ysukawa, H. Hyodo, M. Kurita, H. Yanagi, and H. Hosono, *Nature (London)*, **389**, 939

- (1997).
22. H. Yanagi, H. Kawazoe, A. Kudo, M. Yasukawa, and H. Hosono, *J. Electroceram*(to be published).
  23. H. Ohta, K. Kawamura, M. Orita, M. Hirano, N. Sarukura, and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 475 (2000).
  24. H. Ohno, *Science*, **281**, 951 (1998).
  25. Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, D. D. Awschalom, *Nature*, **402**, 790 (1999).
  26. T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, and D. Ferrand, *Science*, **287**, 1019 (2000).
  27. T. Fukumura, Z. Jin, M. Kawasaki, T. Shono, T. Hasegawa, S. Koshihara and H. Koinuma, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 958 (2001).
  28. H.-J. Lee, S.-Y. Jeong, C. R. Cho, and C. H. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4020 (2002).
  29. S. W. Lim, D. K. Hwang, and J. M. Myoung, *Solid State Commun.*, **125**, 231 (2003).
  30. D. P. Norton, S. J. Pearton, A. F. Hebard, N. Theodoropoulou, L. A. Boatner, and R. G. Wilson, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 239 (2003).
  31. L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, and F. Priolo, *Nature*, **408**, 440 (2000).
  32. R. S. Wagner and W. C. Ellis, *Appl. Phys. Lett.*, **4**, 89 (1964).
  33. G.W. Sears, *Acta Metall.*, **3**, 268 (1956).
  34. M. H. Huang, Y. Wu, H. Feick, N. Tram, E. Weber, and P. Yang, *Adv. Mater.*, **13**, 113 (2001).
  35. Z. W. Pan, Z. R. Dai, and Z. L. Wang, *Science*, **291**, 1947 (2001).
  36. M. H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, and P. Yang, *Science*, **292**, 1897 (2001).
  37. Y. C. Kong, D. P. Yu, B. Zhang, W. Fang, and S. Q. Feng, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 407 (2001).



**정민창**

- 2002년 연세대학교 공과대학 금속공학과 졸업(학사)
- 2002년 연세대학교 공과대학 금속공학과 대학원 통합과정  
~현재



**명재민**

- 1997년 University of Illinois at Urbana-Champaign 재료공학박사
- 1998년 University of Illinois at Urbana-Champaign 전기전자공학과 박사후 과정
- 2000년 연세대학교 금속공학과 조교수
- 2003년 연세대학교 금속공학과 부교수  
~현재