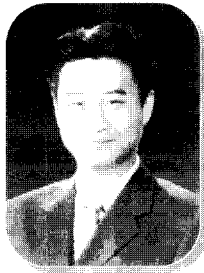


## ZnO계 소자 연구 동향



· 황득규 ·  
연세대 대학원  
금속공학과 석사과정



· 방규현 ·  
연세대 대학원  
금속공학과 석사과정



· 명재민 ·  
연세대 금속공학과 조교수

### 1. 서론

재료에 대한 연구는 그 시대에 기술 수준과 주도 산업을 반영한다. 현대 사회가 점차 정보화 사회로 발전함에 따라 통신, 저장 매체 등 정보 통신 산업과 디스플레이 산업에 대한 중요성이 점차 대두되고 있다. 따라서 미국, 일본을 비롯한 여러 선진국들은 국가적 차원에서 이러한 산업에 대한 기술적 우위를 확보하고자 총력을 기울이고 있으며 아울러 이러한 기술을 실현시키기 위한 재료에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 이러한 관점에서 볼 때 ZnO는 현대 디스플레이 산업과 정보통신 산업에 응용하기에 적합한 물리적·화학적 특성을 지니고 있어 그 응용 가치가 높은 재료중 하나이다. ZnO는 80년대 후반부터 이미 투명전극, 가스 센서, 바리스터, SAW 소자 등 여러 분야에 널리 이용되어 왔으며 최근 발광소자(LED), 레이저 소자(LD) 등의 광학소자 분야와 DMS 소자 등 스핀트로닉스 분야에의 응용에 이르기까지 잠재성이 높은 차세대 재료로서 많은 주목을 받고 있다. 이 글에서는 ZnO의 기본 물성과 ZnO를 이용한 소자에 대한 고찰을 통해 ZnO 연구 동향을 개괄적으로 살펴보고자 한다

### 2. 본론

#### 2.1 ZnO 기본 물성

ZnO는 II-VI족 화합물 반도체로서 상온에서 3.3 eV의 wide 밴드갭을 가지는 직접 천이형 반도체이다. 결정 구조는 O 이온이 hexagonal site에 위치하고 Zn 이온이 tetrahedral interstitial site에 위치한 wurzite 구조가 우세하나 최근에는 cubic structure 인 zinc-blende 결정 구조를 가지는 ZnO에 대한 연구결과가 보고되고 있어 주목을 받고 있다. 1. 2. ZnO의 두가지 결정 구조를 그림 1에 나타내었다.

ZnO는 결정 성장시 원자의 비율이 1:1을 벗어나는 nonstoichiometry(비화학양론적)인 구조를 가지고 성장하므로 Zn 침입형 원자나 산소 공공과 같은 결함들을 결정 내에 포함하고 있으며 이러한 결정 결함들은 이온화 반응을 거쳐 전자를 생성하여 전기 전도도에 기여하게 된다. 따라서 ZnO는 성장 직후  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 n형 전도성을 가지게 되며 이러한 background carrier concentration은 p형 ZnO 박막 제조시 보상효과를 야기시켜 도핑의 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 광학적 특성으로는 가시 광

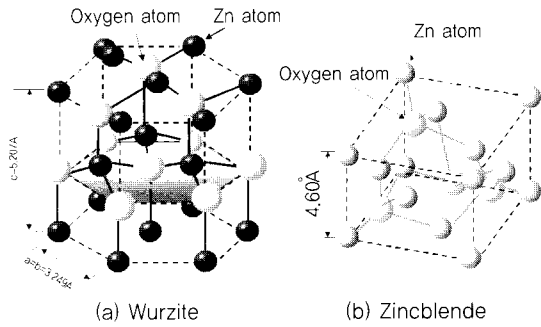


그림 1. ZnO 2가지 결정 구조.

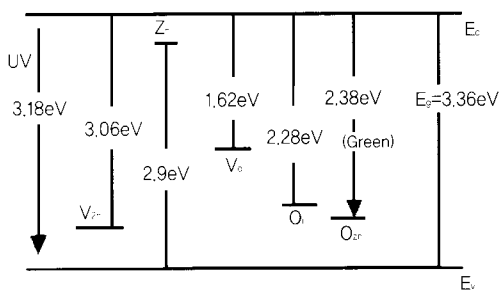


그림 2. ZnO 내부 결함 에너지 준위.

선 영역의 투과성을 가지며 발광기구는 크게 밴드갭과 관련된 Near band edge(NBE) emission과 결함에 관련된 emission으로 나누어 볼 수 있다. 그림 2에 ZnO 밴드 구조내에 생성되는 에너지 준위들에 의한 발광을 나타내었다.

한편, ZnO가 가지고 있는 뛰어난 광학적 물성중 하나로 상온에서도 다른 화합물 반도체에 비해 60meV의 큰 엑시톤 결합 에너지를 가지고 있으므로 상온에서도 안정되고 고효율의 레이저 방출이 용이하다(3, 4). 또한 ZnO는 Zn와 O의 강한 결합력으로 인해 2000°C 정도의 높은 용점을 가지며 외부 압력에 대한 저항성이 우수하고 radiation damage에 대해서도 안정하다.

## 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( $10^{-4} \sim 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ )과 가시광선 영역에서의 높은 광 투과율(90% 이상)을 가져야 하며, 또한 관련된 소자의 제조 공정 중에 열에 의한 특성의 변화가 적어야 한다. 지금까지 가장 널리 사용되는 투명 전도막 재료는 ITO(In, Sn, O<sub>2</sub>)로 광학적 특성과 전기적 성질이 매우 우수하지만 원료 물질인 In의 생산단가가 높고, 플라즈마에 노출되는 경우 열화로 인한 특성 변화가 커다란 문제점으로 지적되고 있다. 이에 반해 ZnO는 적외선 및 가시광선 영역에서의 투

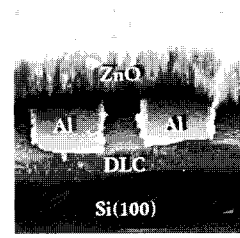


그림 3. ZnO-SAW device 단면도.

광성 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 대기 중에 장시간 노출되었을 경우 산소의 영향으로 Zn와 O의 정량비가 변화에 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 불순물 도핑에 의해 전기 전도도를 높이고 대기 중에서도 안정한 ZnO 박막을 제조하기 위한 연구가 진행되어 왔고 현재 안정된 전기적 성질을 가진 ZnO 투명 전극에 관한 상당한 연구 결과들이 보고되고 있다(5, 6). 또한 스퍼터링, spray pyrolysis, MOCVD, PLD 등의 다양한 증착 방법에 의한 연구와 함께 공정 단가를 낮추기 위한 연구도 진행되고 있어 현재 많은 성과를 거두고 있다.

### 2.2.2 SAW(surface acoustic wave) device

SAW 필터를 비롯한 SAW소자는 표면 탄성파, 즉 표면에 발생하는 기계적인(또는 탄성적인) 파동의 생성을 이용하여 소자의 표면에 전압차를 발생시켜 소자의 작동 주파수를 결정하는 장치로 TV, 라디오등 저주파 대역과 이동통신 분야등 고주파 대역 필터에 널리 응용되는 장치이다.

ZnO는 c축 배향성이 우수하므로 LiNbO<sub>3</sub>에 상응하는 높은 기계 결합 계수를 갖고 ST-cut(y축 방향에 42.75°가 되도록 자른 면) quartz에 해당하는 우수한 열적 안정성을 가지므로 SAW소자에 적합한 재료이다. 1970년대 중반 비압전기판 위에 압전 박막의 구조를 이용한 SAW 필터의 응용 가능성이 발표된 이후 기존의 단결정을 이용한 SAW 필터를 대체하여 ZnO 박막을 이용한 대역 통과 SAW 필터의 연구가 진행되어 왔으며 그중 TV용 VIF 대역 통과 필터는 이미 상용화되어 있다(그림 3). 한편 고주파 대역의 SAW소자에 응용하기 위해서는 평활한 표면과 우수한 c축 배향성과 높은 비저항을 가지는 ZnO 박막의 제조가 필요하며 현재 이에 대한 연구는 상당히 진행되어 있다(7, 8). ZnO 박막의 제조는 rf 마그네트론 스퍼터링법을 이용하며 증착 시에는 Target의 조성, 가스의 종류와 압력, rf power, 증착온도 등에 따라서 박막의 물성이 크게 변화하므로 ZnO 박막의 정확한 물성 조절이 이루어져야 한다.

### 2.2.3 Varistor

바리스터는 전기적으로 절연체이나 임계 전압 이상에서는 저항성이 급격히 감소하여 도체로 변화되는 특성을 갖는 비오염성 소자이며 번개 또는 spark와 같은 외부적 요인, 전자 회로 자체 요인에 의해 기인하는 순간적인 과전압으로부터 회로를 보호하는 용도에 사용된다. ZnO 바리스터는 ZnO 일계에 위치한 전위 장벽 때문에 매우 높은 비선형성 전류-전압 곡선 특성을 보이며 장차의 용이성 및 저렴한 가격으로 인해 수 V에서부터 수백 kV까지의 다양한 바리스터 제작이 가능하다. 초기에의 ZnO 바리스터는 전압 안정화 소자 등과 같은 저전압 저에너지 흡수용으로 이용되었으며, 최근 SiC 계열의 바리스터 제작의 어려움과 응답 속도의 지연 등과 같은 문제점이 야기되어 SiC를 대체하는 고전압 고에너지 흡수용 소자로 연구되었다. 이에 따라 실제로 사용되고 있는 ZnO 바리스터는 전력 수송 시스템을 위한 수 m 크기에서 전자 회로를 위한 수 mm 크기에 이르기까지 매우 다양하다. ZnO 바리스터의 이러한 비선형 전류-전압 특성은 1950년대 M. S. Kosman 등에 의해 최초로 이루어졌으며 Matsuoka [9]는 ZnO에 여러 가지 불순물을 첨가하여 전류-전압특성이 뛰어난 바리스터를 제조하였다. 그 후 전기적 특성을 개선시키는 다양한 종류의 첨가물들이 발견되었고 바리스터의 미세구조와 물성에 대한 연구가 체계적으로 이루어짐에 따라 [10, 11] 다양한 ZnO 바리스터가 제조되었고 그 응용분야도 넓어졌다(그림 4). 최근에는 반도체 소자의 수요가 급증함에 따라 개폐 surge 등 저전압 고에너지 흡수형 바리스터에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 상업적으로 사용되고 있는 ZnO 바리스터는 일반적으로 성형·소결을 통해 제조되며 혼합 분말의 순도, 미세도와 균일성은 바리스터의 품질을 결정하는 중요한 인자가 된다. 상업적으로 분말의 균일성과 용이한 성형을 위해 일반적으로 spray drying 방법으로 구형 조립 분말을 얻는 공정을 채택하고 있다.

### 2.2.4 Gas Sensor

가스센서는 대기중에 존재하는 각종 가스의 유무 및 특정 가스종을 검출하는 소자로서 1962년 Seiyama 등 [12]이 환원성 가스에 의해 n-type 산화물 반도체의 전기 전도도가 변하는 성질을 이용하여 산화물 반도체 가스센서를 발표한 이래 감지하고자 하는 가스의 종류와 용도에 따라 소결형·박막형·후막형 등 여러 종류의 가스센서가 개발되어 왔다. ZnO는 SnO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 더불어 환원

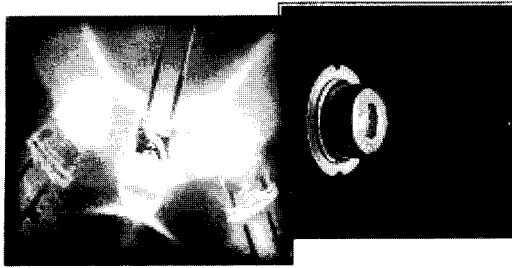


그림 4. ZnO varistor.

성 가스센서에 응용되는 대표적인 재료이다. 최근 생활 주변에서 발생하는 악취 성분 가스 검출에 대한 관심이 고조되면서 ZnO 가스센서 개발을 통해 검출하고자 하는 연구가 진행되었다. Nato 등 [13]은 유리 기판상에 ZnO 박막을 증착하여 (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>N 가스 감지 특성을 제시함으로써 박막 가스 센서의 가능성을 제시하였다. 한편, ZnO는 일산화탄소 유입시 발생하는 표면 저항의 변화를 이용하여 일산화탄소를 검출하는데도 사용될 수 있으며 다공성 ZnO는 환원성 가스 센서로서의 응용 가능성이 매우 높은 재료로서 일반적으로 CO를 비롯한 알코올, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 등 환원성 가스 및 가연성 가스를 검지하는데 사용된다. ZnO를 이용한 반도체식 가스센서에는 가스 검출에 비교적 높은 감도를 가지나 감응특성을 더욱 향상시킬 필요가 있으며 주변 가스의 간섭 현상, 에너지 효율 문제, 시간 응답 특성 등 해결해야 할 문제점들이 있다. ZnO 가스센서의 감응특성 향상을 위해 가장 많이 쓰이는 방법 중의 하나는 Pt, Pd 등 귀금속 촉매를 첨가하여 가스의 반응을 촉진시켜 반응 속도를 높여서 감도를 높이는 것으로 장시간 사용후에 촉매의 특성이 열화하여 감도가 둔화되는 단점이 있다. n-p 이종 접촉형 ZnO 세라믹을 제조하여 특정 가스에 대한 선택성 및 감도를 높인 방식이 있으나 접촉의 불안정성으로 인해 상용화 되기는 어려운 실정이다. 다른 방법으로는 센싱 모듈질에 다른 산화물을 첨가시켜 만든 복합체 형태가 제시되었다. ZnO에 TiO<sub>2</sub>를 5wt% 첨가하면 감도가 증가한다는 보고가 있으며 SnO<sub>2</sub>를 첨가한 ZnO 세라믹 복합체는 복합체 계면에 환원성 가스 감응특성이 있어 일산화탄소에 대한 감도가 상당히 높은 것으로 나타났다. 하지만 아직 복합체 세라믹에 대한 구체적인 감응 기구를 완전히 밝히지는 못한 실정이며, 체계적인 연구가 더 필요한 실정이다.

### 2.2.5 LED & LD

ZnO의 광학 소자에의 응용 가능성은 1960년대 초 Wright Patterson 미 공군 연구소의 Reynold 등 [14]에 의해 제시 되었으나 본격적인 연구는 1990년대 후반에 이루어졌다. 이는 ZnO를 에피성장시킬 수 있는 기술이 미흡했고 p형 저동을 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 [15, 16] ZnO의 광소자로서의 응용 가능성은 더욱 높아지고 있다(그림 5). 앞에서 언급했듯이 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 (26meV)보다 큰 값을 가져야 한다. 따라서 ZnO가 다른 재료에 비해 2배 이상의 높은 exciton binding energy(GaN : 28, ZnSe :



Blue-LED

LD(Laser Diode)

그림 5. 청색 LED 및 LDs.

22meV)를 가지고 있다는 것은 레이저 다이오드 분야에 응용 시 안정되고 고효율의 소자를 구현 할 수 있음을 뜻한다. 따라서 ZnO의 자색 및 청색빛의 광소자와 laser diodes(LDs)로서의 응용 가능성은 높은 편이며 미국과 일본을 중심으로 현재 많은 연구가 진행 중이다.

한편, p형 ZnO 박막의 제조에 대한 연구는 다양한 방법을 통한 시도가 이루어지고 있으나 아직 재현성과 품질에 관한 문제로 더 많은 연구가 필요하며 p형 도핑 기구에 대한 이론적인 연구도 체계적으로 정립되어 있지 않은 실정이다. Osaka 대학의 T.Yamamoto등 [17]은 ab initio band calculation 방법을 통해 p형 도펀트와 n형 도펀트의 에너지 준위를 계산함으로써 co-doping에 의한 p형 ZnO 박막의 제조 가능성을 제시하였고 같은 대학의 M. Joseph등 [18]은 실제로 N과 Ga의 co-doping을 통해 낮은 비저항 값과 높은 캐리어 농도를 갖는 p형 ZnO 박막을 제조하는데 성공하였으나 재현성 문제와 박막의 품질 문제로 인해 실제 소자에 응용하는 데는 많은 문제가 있었다. National Renewable Energy 연구소의 S. B. Zhang등 [19]은 M. Joseph등이 발표한 p형 ZnO 박막에 대한 열역학 적인 분석을 통해 T.Yamamoto 등과는 달리 NO 형성에 의한 새로운 N 도핑 기구를 제시하기도 하였다. 한편, Missouri 대학의 Y.R. Ryu등 [20]은 PLD 법을 이용하여 GaAs 기판에 의한 As 도핑 방법을 이용하여 p형 ZnO 박막을 제조하였다고 보고하였다. 그러나 p형 ZnO 내의 정확한 As 도핑 기구에 대해서는 아직 규명되지 않고 있다.

최근, Y. M. Sun등은 ZnO 박막의 내부 결함에 대한 에너지 준위를 계산하여 보고하였고 N. Y. Garces등 [21]은 도핑 시 shallow 역셉터로 작용하는 N의 ZnO 박막내에서의 거동에 대해 조사하는 등 p형 도핑 기구 해명에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

GaN를 비롯한 질화물 계의 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 이용

하여 실현될 경우, 고 밀도의 정보저장과 재생을 필요로 하는 DVD 등의 정보저장 소자 산업에 기술적인 혁신을 가져올 수 있으며 기존의 청색 발광소자인 GaN를 대체할 수도 있어서 큰 파급 효과가 있을 것으로 기대된다.

## 2.2.6 DMS(diluted magnetic semiconductor)

DMS(diluted magnetic semiconductor)는 II 족의 원소들의 일부가 전이 금속인 Fe, Co, Mn에 의해 치환된 II-VI, III-V 족 화합물 반도체이다. 전이 금속 이온의 스핀들과 밴드 전자들의 상호 작용으로 인해 이들은 Giant Faraday effect와 같은 광자기 특성을 가진다. 외부 전기, 자기장에 의해 band edge의 조절이 가능하고 도핑에 의해 캐리어의 농도를 변화시킴으로서 재료내의 자기적 성질을 변화시킬 수 있다는 독특한 특성으로 인해 DMS는 지난 20년 동안 자기, 광학적 재료로서 많은 주목을 받아 왔다. 자기적 특성과 전기, 광학적 성질을 한 재료에서 모두 구현 할 수 있으므로 DMS는 미래의 스핀전자재료 분야에서 중요한 역할을 할 것으로 기대되며 밴드갭 엔지니어링 등에도 많은 응용이 기대된다. 최근에는 ZnO가 DMS 재료로서 많은 관심을 모으고 있다. ZnO는 다른 DMS에 비해 큰 전자질량(0.3m)을 가지고 있으므로 이동 캐리어와 전이금속이온간의 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<sup>21</sup>) Mg등의 도핑에 의해 밴드갭을 4eV 까지 조절 할 수 있으며 Mn등의 고용도가 다른 금속에 비해 10mol%정도 더 크다는 장점을 가지고 있다. 또한 500°C 이하의 낮은 공정온도에서도 양질의 에피 박막의 성장이 가능하다. 이러한 장점들을 바탕으로 ZnO는 광학적 특성과 자기적 특성을 동시에 지닌 차세대 광자기 재료로서 기대가 모아지고 있다.

현재까지 일본 Osaka 대학에서 전이금속 원소들인 Fe, Co, Ni, Mn 등의 도핑에 의해 비교적 높은 Curie 온도를 갖는 ZnO DMS가 실현 가능하다는 것이 이론적으로 제안되었고, mean-field theory에 의해 p-type Zn<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>O가 예측되었다. 이를 바탕으로 일본의 Osaka 대학과 Tokyo 대학 등에서 활발한 연구가 진행중이다. Tokyo 대학의 T. Fukumura [22]는 PLD 법을 이용하여 만든 Mn-doped ZnO (Zn<sub>0.94</sub>Mn<sub>0.06</sub>O)의 magnetization을 조사한 결과 다른 II-VI DMS보다 높은 Curie-Weiss 온도를 가지는 강한 antiferromagnetic exchange coupling 현상을 보임을 알아냈다. Curie-Weiss plot에 관한 정확한 정량적 분석은 아직 불확실하므로 이에 대한 앞으로의 연구가 더 필요하다. 또한 Mn content에 따라 발생하는 큰 in-gap absorption 현상은 광학적으로 자기적 성질을 변화시킬 수 있다는 가능성을 보여주었고, Al 등의 도핑에 의해 다른 DMS 보다 높은 캐리어 농도(10<sup>21</sup>cm<sup>-3</sup>)를 가진다는 것을 발견하였다. 그러나, 이런 연구결과는 실용화 단계에 이르기에는 이론적, 기술적 체계가 아직 미흡하다. 실제 응용을 위해서는 양질의 박막 성장 및 두께제어, quantum well 구조를 만들 경우의 자성층 사이

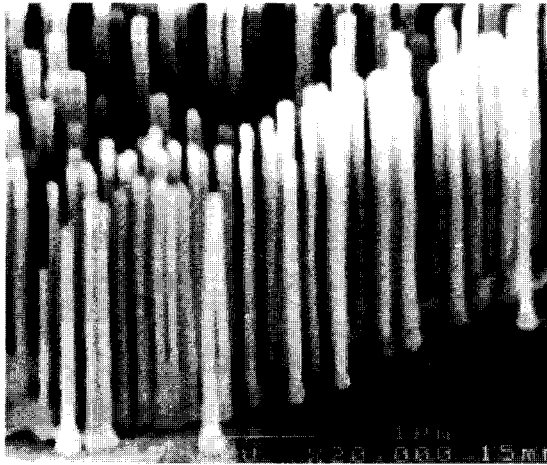


그림 6. Vapor-liquid solid(VLS) 법으로 사파이어 기판 위에 성장된 ZnO nanowire.

의 계면제어, 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 Curie 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 지원 하에 이루어지고 있다. 이 기술은 기존의 반도체 기술의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 떠오르고 있어 그 산업적 중요성은 매우 크다할 수 있으며, 우리나라도 1990년대 후반부터 몇몇 대학 연구소, 기업들을 중심으로 DMS 재료에 관한 기초 연구가 진행중이다.

### 3. 미래의 개발 동향과 전망

현재의 전자·광학 소자에의 소형화·경량화 추세는 이제 마이크로를 넘어 나노 스케일의 소자를 제조하는 신개념의 기술을 요구하는 단계에 이르렀으며, 반도체를 비롯한 디스플레이, 정보통신 산업 전반에 걸쳐 나노 소자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 bulk ZnO에서만 발견되었던 상온에서의 UV emission 과 lasing 현상이 ZnO film과 nano 입자에서도 발견됨에 따라 ZnO의 나노 와이어를 광학소자에 응용하려는 연구(23, 24)가 시도되고 있다(그림 6). 아직 초기 단계의 연구이기는 하지만 ZnO를 이용한 나노 레이저의 실현으로 인해 산업 전반에 미치는 파급효과를 고려한다면 잠재성이 무한한 연구분야라 할 수 있다.

새로운 시대는 새로운 재료를 원한다. 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.

### 참고 문헌

1. A. B. M. Almamun Ashrafi, A. Ueta, A. Avramescu, H. Kumano, I. Suemune, Y. W. Ok, and T. Y. Seong, "Growth and characterization of hypothetical zinc-blende ZnO films on GaAs(001) substrates with ZnS buffer layers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, p. 550, 2000.
2. T. Sekiguchi, K. Haga, and K. Inaba, "ZnO films grown under the oxygen-rich condition", *J. Crystal Growth*, Vol. 174/175, p. 68, 2000.
3. P. Zu, Z. K. Tang, G. K. L. Wong, M. Kawasaki, A. Ohtomo, H. Koinuma, and Y. Segawa, "Ultraviolet spontaneous and stimulated emissions from ZnO microcrystallite thin films at room temperature", *Solid State Commun.*, Vol. 103, p. 459, 1997.
4. D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu, T. Yao, M. Y. Shen, and T. Goto, "Room temperature excitonic stimulated emission from zinc oxide epilayers grown by plasma-assisted MBE", *J. Crystal Growth*, Vol. 184/185, p. 605, 1998.
5. M. Hiramatsu, K. Imaeda, N. Horio, and M. Nawata, "Transparent conducting ZnO thin films prepared by XeCl excimer laser ablation", *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 16, No. 2, p. 669, 1998.
6. M. Chen, Z. L. Pei, C. Sun, J. Gong, R. F. Huang, and L. S. Wen, "ZAO: an attractive potential substitute for ITO in flat display panels", *Materials Science and Engineering B*, Vol. 85, No. 2/3, p. 212, 2001.
7. N. W. Emanetoglu, C. Gorla, Y. Liu, S. Liang, and Y. Lu, "Epitaxial ZnO piezoelectric thin films for saw filters", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 2, No. 3, p. 247, 1999.
8. Y. Yoshino, T. Makino, Y. Katayama, and T. Hata, "Optimization of zinc oxide thin film for surface acoustic wave filters by radio frequency sputtering", *Vacuum*, Vol. 59, No. 2/3, p. 538, 2000.
9. M. Matsuoka, "Nonohimic Properties of Zinc Oxide Ceramics", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 10, No. 6, p. 736, 1971.
10. L. M. Levinson and H.R. Philipp, "Zinc oxide varistors-A review", *Ceram. Bull.*, Vol. 65 p. 639, 1986.
11. T. K. Gupta, "Application of zinc oxide varistors", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, p. 1817, 1990.
12. T. Seiyama, A. Kato, K. Fujiiishi, and M. Nagatani, "A new detector for gaseous components using semiconductive thin films", *Anal. Chem.*, Vol. 34, p. 1502, 1962.
13. H. Nanto, H. Sokooshi, and T. Usuda, "Smell sensor using

aluminium-doped zinc oxide thin film prepared by sputtering technique", Sensors and Actuators B., Vol. 10, p. 79, 1993.

- [14] Y. S. Park, C. W. Litton, T. C. Collins, and D. C. Reynolds, "Exciton Spectrum of ZnO", Phys. Rev., Vol. 143, p. 512, 1966.
- [15] J. Narayan, K. Dovidenko, A. K. Sharma, and S. Oktyabsky, "Defects and interfaces in epitaxial ZnO/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN/ZnO/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterostructures", J. Appl. Phys., Vol. 84, p. 2597, 1998.
- [16] P. Fons, K. Iwata, S. Niki, A. Yamada, and K. Matsubara, "Growth of high-quality epitaxial ZnO films on  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", J. Crystal Growth., Vol. 201/202, p. 627, 1999.
- [17] T. Yamamoto and H. K. Yoshida, "Solution using a codoping method to unipolarity for the fabrication of p-type ZnO," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, p. L166, 1999.
- [18] M. Joseph, H. Tabata, and T. Kawai, "p-Type Electrical Conduction in ZnO Thin Films by Ga and N Codoping", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, p. 1205, 1999.
- [19] S. B. Zhang, S. -H. Wei, and Y. Yan, "The thermodynamics of codoping: how does it work?", Physica B., Vol. 302/303, p. 135, 2001.
- [20] Y. R. Ryu, W. J. Kim, and H. W. White, "Fabrication of homostructural ZnO p-n junctions", J. Crystal Growth, Vol. 219, p. 419, 2000.
- [21] N. Y. Garces, N. C. Giles, L. E. Halliburton, G. Cantwell, D. B. Eason, D. C. Reynolds, and D. C. Look, "Production of nitrogen acceptors in ZnO by thermal annealing", Appl. Phys. Lett., Vol. 80, p. 1334, 2002.
- [22] T. Fukumura, Zhengwu Jin, M. Kawasaki, T. Shono, T. Hasegawa, S. Koshihara, and H. Koinuma, "Magnetic properties of Mn-doped ZnO", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, p. 958, 2001.
- [23] Y. Li, G. W. Meng, L. D. Zhang, and F. Phillipp, "Ordered semiconductor ZnO nanowire arrays and their photoluminescence properties", Appl. Phys. Lett., Vol. 76, p. 2011, 2000.
- [24] Y. C. Kong, D. P. Yu, B. Zhang, W. Fang, and S. Q. Feng, "Ultraviolet-emitting ZnO nanowires synthesized by a physical vapor deposition approach", Appl. Phys. Lett., Vol. 78, p. 407, 2001.

## 저 자 약 령

**성명 : 황 득 규**

**❖ 학 령**

- 2001년 2월 연세대 금속공학과 공학사
- 현재 연세대 대학원 금속공학과 석사과정

**성명 : 방 규 현**

**❖ 학 령**

- 2001년 2월 연세대 금속공학과 공학사
- 현재 연세대 대학원 금속공학과 석사과정

**성명 : 명 재 민**

**❖ 학 령**

- 1997년 12월 University of Illinois at Urbana-Champaign 재료공학박사

**❖ 경 령**

- 1998년 - 2000년 University of Illinois at Urbana-Champaign 전기전자공학과 박사후 과정
- 2000년 - 현재 연세대 금속공학과 조교수