



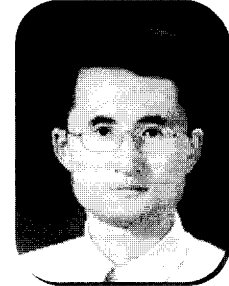
## ZnO 광대역반도체 LED개발



**강홍성**  
연세대  
전기전자공학과 박사과정



**김재원**  
연세대  
전기전자공학과 석사과정



**이상렬**  
연세대  
전기전자공학과 교수

### 1. 서론

현재 LED에 대한 관심과 투자, 수요는 날이 갈수록 증가되고 있다. 이러한 가장 큰 이유는 현재의 광원보다 에너지 절감 효과가 뛰어나고 수명이 우수하기 때문이다. 최근 질화물계 반도체를 기반으로 한 청색 및 백색 LED가 상용화되고 그 효율이 증대됨에 따라 그 응용시장이 크게 확대되면서 본격적인 LED 응용시대가 도래하고 있다.

현대와 같이 에너지 절감이 절실한 시기에 LED의 가장 큰 강점은 에너지 소비량이 기존 백열전구의 단 10분의 1에 불과하다는 점이다. 청색, 백색 LED의 제작 초기에는 휘도나 효율 면에 있어서 백열전구나 형광등에 비해 많은 문제가 있었으나 현재의 기술은 이러한 문제점을 크게 보완시켜 상용화가 가능하게 하였다. 또한 본격적인 대량 생산 체제가 갖추어지면 백열전구나 형광등에 비해 훨씬 높은 원가 절감 효과를 가져올 것이 확실하며, 이러한 효과는 현재의 많은 기업체나 연구소의 관심도, 수요 현황으로 볼 때 2007년 경에는 확연히 나타날 것으로 판단된다.

그러나 이러한 청, 백색 LED기술의 가장 큰 문제점은, 이러한 기술이 모두 질화물계 반도체에 기반을 두고 있다는 것이다. 질화물 반도체는 1971년 Pankove

(RCA, Princeton)가 blue GaN metal-insulator-semiconductor LED에 관한 보고 이후 1981년 Matsushita의 Akasaki를 비롯한 연구진에 의해 저효율의 GaN MIS LED(10 milli-Candela)가 보고되었다. 1986년 일본의 Akasaki 교수가 AlN 버퍼층을 이용하여 고품위 GaN 결정 성장을 성공하였고 1988년에는 Mg 도핑 및 LEEBI (low-energy electron beam irradiation) 후처리를 이용하여 동 연구인에 의해 GaN LED 제작시 가장 큰 어려움 이었던 p-type GaN가 제작되었다. 이 연구결과를 바탕으로 1991년에 p-n 접합식의 GaN LED를 발표하였다. 1994년에는 니치아 화학공업주식회사의 나카무라 슈지가 저온 성장된 GaN 버퍼를 사용하여 양질의 질화갈륨 박막을 성장하고, 고효율의 GaN p-n 접합 LED 및 LD를 발표하였다. 그 후 LED는 고품질의 InGaN/GaN 양자 우물 구조를 활성층으로 고휘도 청색 LED가 개발되면서 LED 연구가 급속도로 활성화 되었다. 1995년에는 고휘도 녹색 LED가 개발됨에 따라 빛의 삼원색인 적색, 청색, 녹색 LED가 이용 가능하게 되었다[1]. 현재의 백색 광원의 대부분은 이러한 GaN를 기본으로 하여 제작되고 있다. 이것이 바로 현재 LED 기술의 가장 큰 문제점이다. 이러한 GaN based LED는 물질의 제조 방법과 공정이 모두 특정 국가의 기업에 원천 특허





고휘도 백색 LED의 개발은 LED의 조명시장으로의 응용을 현실화 시킬수 있는 발판을 마련하였다.

현재 LED는 경제적 측면에서 볼때, 기존 램프류에 비해 수습배 가량 비싸다. 그러나 현재 많은 연구소와 기업체에서 기존 전구보다 40배에서 최고 100배까지 높은 조명용 LED의 생산 단가를 낮추기 위한 연구개발을 지속하고 있다. 현재의 발전속도를 보면 늦어도 2007년 정도에는 생산단가가 일반조명등 수준까지 떨어질 것이라는 게 현재 전문가들의 일반적인 견해이다.

현재의 LED 시장은 이제 시장 도입기를 지나 본격적인 도약기로 접어들고 있다. 시장조사기관인 '스트래티지스언리미티드'에 따르면 LED칩 시장이 지난 5년간 매년 58%의 성장세를 보였으며 2005년에는 30억달러에 이를 것으로 전망했다.

응용분야도 더욱 빠르게 확산되고 있다. 휴대폰 등 모바일 IT기기류의 주광원에서 이미 뿌리를 탄탄히 내렸으며 교통신호등, 전광판, 조명, 자동차용 램프 등 컬러 애플리케이션이 쏟아지고 있다. 휴대폰 디지털 카메라 PDA 등 모바일기기 주 광원으로 사용되는 고휘도 LED 분야도 기대되는 시장이다. 모바일기기 키패드의 컬러화에 따라 R(적)G(녹)B(청) 등 개별 수요 증가와 모바일 디스플레이의 백라이트 광원으로 백색LED가 기존 램프(형광등)를 대체, 수요가 폭발하고 있다.

LED시장이 유망 부품시장으로 부상하면서 이 시장을 선점하기 위한 일본 대만 중국 한국 유럽 등 세계 각국의 움직임도 빨라지고 있다. 특히 LED영역을 확대하는 데 필수불가결한 조건인 '고휘도' 문제를 해결하기 위한 개발경쟁도 치열해지고 있다.

고휘도 LED 시장은 그 속도를 가늠하기 힘들 정도로 매년 급속하게 팽창하고 있어 향후 디스플레이 시장에 버금가는 거대한 시장을 형성할 것으로 기대되며 이에 따라 시장선점을 위한 세계 각국의 업체들간의 치열한 경쟁은 이미 시작된 것으로 봐야 한다.

### 2.3 현재 LED 시장의 문제점

이렇듯 LED시장은 날이 갈수록 성장하고, LED의 성능도 날이 갈수록 향상될 것으로 나타났다. 특히 백색 광원의 개발 및 발전, 그 시장성을 보면 국가적 차

원에서 주도하여야 할 큰 사업임을 충분히 알 수 있다. 그러나 이러한 백색 광원 기술 개발의 가장 큰 문제는 그 원천 물질 및 기술이 GaN에 집중되어 있다는 것이다. 이것은 GaN LED를 처음 개발한 Nichia 사의 특허권 문제 대두시 대처할 방법이 미흡하다는 것이다. 이 문제를 제대로 풀지 못한다면 현재 국내의 백색 광원 관련 연구소 및 기업체는 막대한 피해를 볼 것은 분명하다. 이에 국가적인 차원에서 이에 대응할 다른 물질을 연구하여 백색 광원 개발 기술을 이어가야 함은 너무나 당연한 것이다.

### 2.4 새로운 백색 광원 기반 물질로서의 ZnO

현재 GaN를 대체할 차세대 반도체로서 가장 주목 받고 있는 물질은 ZnO이다. ZnO는 상온에서 약 3.37 eV의 밴드갭을 가지는 wurzite 구조의 II-VI족 화합물 반도체로서 MBE, CVD, PLD, 스퍼터링 등 다양한 방법을 통하여 제작이 가능하다. 또한 GaN와 유사한 물리적 구조를 가지고 있어 LED 제작시 발생하는 많은 문제점들을 GaN LED의 결과를 바탕으로 빠르게 해결해 나갈 수 있다.

ZnO는 광소자 응용 분야 외에도, 높은 투명도와 전도성 때문에 투명전극으로의 응용에도 많은 연구가 이루어져 왔고, 특정 가스에 따른 저항률의 변화 특성을 이용한 센서에도 많은 연구가 이루어져 왔다. 또한 우수한 압전 특성과 열적 안정성을 이용한 SAW 소자에도 많은 연구가 이루어져 왔다[2].

ZnO의 발광소자, 레이저 다이오드로의 응용에 대한 연구는 1960년대 Wright-Patterson 공군 연구소의 Reynold 등에 의해 ZnO의 광학적 특성에 관한 연구가 이루어지면서 응용 가능성이 처음으로 예측되었다. ZnO가 광소자의 응용에 관하여 많은 연구가 이루어지기 시작한 시기는 80년대 말부터이고 90년대 중반 GaN를 기반으로 한 Blue LED가 보고된 이후 이에 대한 대체 물질로서 더욱 연구되기 시작하였다. ZnO는 GaN보다 우수한 여러 가지 장점을 가지고 있다. 먼저 GaN의 exciton binding energy (21-25 meV)보다 더 큰 60 meV의 exciton binding energy를 가져 광소자로서 상당히 우수한 이점을 가지고 있고 동종 기판의 제작이 가능하며, 화학적 에칭공정이 가능하여 상대적으로 낮은 온도에서도 여러 공정을 실시할 수 있

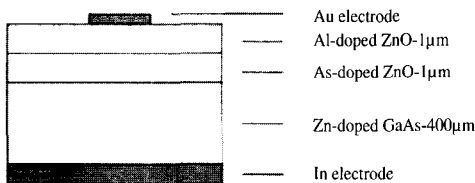
다[2]. 또한 radiation damage에 더 강한 저항력을 나타내어 여러 가지 산업에 있어서 더 넓은 응용 범위를 가진다[2]. GaN의 연구가 이미 다른 국가에 의해 특허권이 점유되어 있고 많은 연구가 이루어져 있는 상태에 있으므로 GaN 보다 여러가지 우수한 특성을 가진 ZnO를 청색 및 백색 LED 원천 물질로써 연구하는 것이 시급하다 하겠다.

이러한 ZnO의 가장 큰 단점은 많은 다른 II-VI족 화합물이 그러하듯이, p-type ZnO를 제작하기가 어렵다는 것이다. 대부분의 방법에 의해 증착된 ZnO 박막은 높은 n-type ZnO의 특성을 나타내어 p-type 도펀트를 넣어도 자기 보상에 의해 p-type 특성을 잘 보이지 않는다. 이것은 열에 의해 쉽게 산소를 잃는 특성과 구조적 특성에서 기인하는 것으로, 쉽게 n-type 특성에 기여하는 산소 공공이나 침입형 아연을 가지기 때문이다.

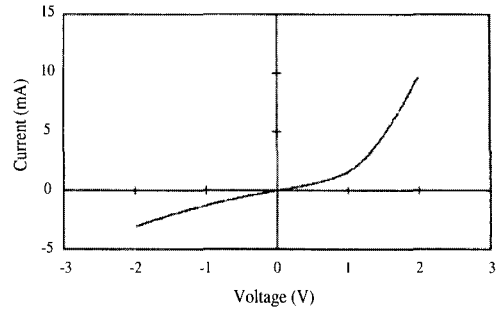
최근 여러 그룹의 연구에 의해 재현성 높은 p-type ZnO를 보고 하였지만 아직 안정적인 p-n junction을 이루지 못하고 있어서 ZnO 백색 LED 제작을 위하여 이 분야의 연구가 시급하다. 이러한 문제는 GaN에서도 오랜 문제로 대두된 것으로 그 문제 해결 이후 빠른 속도로 GaN가 발전하게 되었다. ZnO도 안정적 p-n junction을 통한 발광이 구현될 수 있다면 백색 LED 개발이 빠른 속도로 진행될 수 있을 것이다.

2.5 ZnO p-n junction 소자 개발을 위한 노력

ZnO 백색 LED 개발 기술의 가장 중요한 기술인 p-type ZnO 제작에 관한 연구는 많은 곳에서 이루어져 왔고 완전히 안정적이지는 않지만 p-type ZnO 제작에 관한 많은 보고도 이루어져 ZnO 백색 LED 개발 기술의 가능성이 점점 더 높아지고 있다.



(a)



(b)

그림 3 (a) GaAs 기판을 이용한 ZnO p-n junction의 구조, (b) 이 구조에 대한 I-V curve.

1990년대 후반 Y.R.Ryu et al 은 GaAs 기판을 이용한 p-type ZnO의 가능성을 예고하였고 2000년 thermal annealing에 의해 GaAs 기판의 As을 ZnO내부로 확산시켜 p type ZnO를 형성 시켰고 다소 leakage가 많은 ZnO p-n junction에 성공하였다. 그림 3에는 이 접합구조와 I-V 커브가 나타나있다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 GaAs 기판을 사용하였고 PLD로 ZnO를 GaAs 기판위에 증착한 후 후열처리를 통하여 As을 ZnO 내부로 도핑시켜 p-type ZnO를 형성시켰다. 얻어진 I-V 특성은 그림 3(b)에 나타나 있다. 다소 leakage가 많기는 하였으나 As의 p-type ZnO 도펀트로써의 가능성을 보여주었다.

Y.R.Ryu 는 As의 p-type 도핑 가능성을 더욱 확신하고 HBD (Hybrid beam deposition)를 이용하여 2003년에 좀더 재현성 있는  $10^{17}/\text{cm}^3$ 의 농도를 가진 p-type ZnO를 제작하였다[3]. SiC 기판위에 이 방법을 도입하여 향상된 특성을 가진 ZnO p-n junctions을 보고하였다[3]. 그림 4는 HBD를 이용하여 SiC 기판위에 제작된 ZnO p-n junction 구조이다. 향상된 I-V 특성을 나타내었으며 6~8 V의 turn on voltage를 나타내었고 diode ideal factor는 1V 이하에서 3~5, 1V 이상에서 10~25로 아직 leakage current가 많이 존재함을 알 수 있었고 electroluminescence(EL)를 나타내는 소자에 대한 보고는 아직 없다.

2000년 Toru Aoki와 D.C. Look은 ZnO 단결정 기판에  $\text{Zn}_3\text{P}_2$  층을 얇게 입힌 후 KrF excimer laser를 조사하여 P를 ZnO 내부로 침투시켜 p-n junction을 구현

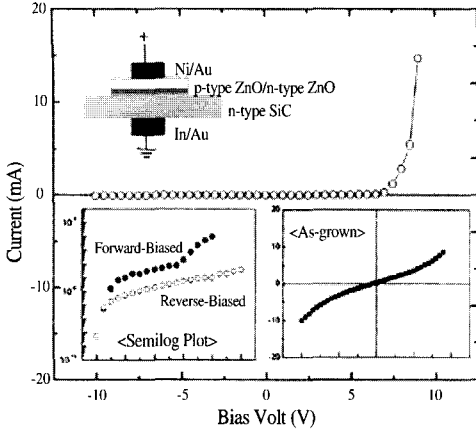


그림 4. HBD를 이용하여 SiC 기판 위에 As doped p-type ZnO를 이용하여 제작된 ZnO p-n junction의 구조와 I-V 특성.

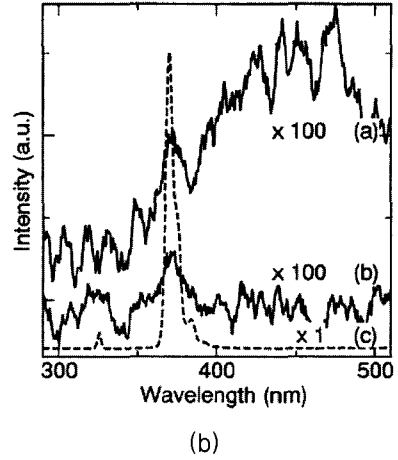
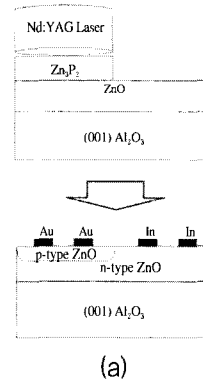


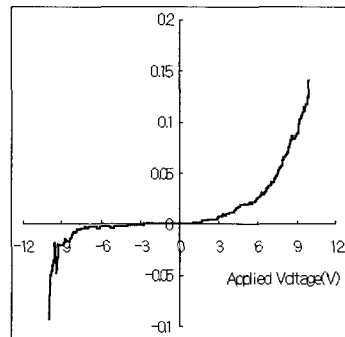
그림 5. 110K에서 측정된  $Zn_3P_2$ 와 laser procedure에 의해 제작된 ZnO p-n junction의 (a) I-V curve와 (b) EL 측정 결과

하였다[4]. 그림 5(a)는 이렇게 제작된 소자의 I-V curve이다. 그림 5(b)는 EL 측정 결과이다. white-violet EL을 나타내었으나 이것은 모두 110K에서 측정된 결과이고 아직 상온에서 관찰된 보고는 없다.

본 연구실에서는 그동안의 연구 결과를 바탕으로 [5,14,15], PLD를 이용하여 박막을 증착한뒤 레이저 어닐링을 Nd:YAG 레이저를 이용하여 실시하였고 그림 6과 같은 결과를 도출하였다. 그림 6(a)에 나타난 것처럼, 사파이어 기판위에 ZnO를 상장 후 그 위에  $Zn_3P_2$  층을 PLD를 이용하여 얇게 입힌 후 레이저 어닐링을 실시하여 그림 6(b)와 같은 결과를 얻었다. 이러한 결과는 현재 미국 특허로 등록이 되어 있는 상태이다[5].

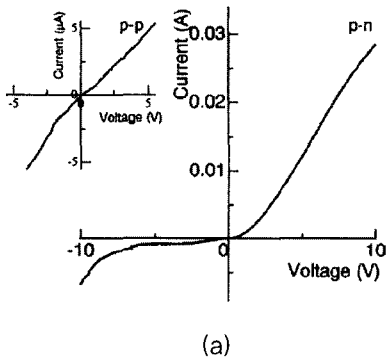


(a)



(b)

그림 6. 레이저 어닐링에 의해 제작된 p-n junction (a) 제작 과정 및 구조도 (b) 측정된 I-V curve.



(a)

P를 이용한 p-type ZnO 제작의 대표적인 방법으로 앞서 설명한  $Zn_3P_2$ 를 이용한 방법[4,5]과  $P_2O_5$ 가 섞인 ZnO 타겟을 이용한 경우[6]가 있다.  $P_2O_5$ 가 섞인 ZnO 타겟과 rf sputtering을 이용하여 p-type ZnO를 제작하였고, 제작된 p-ZnO는  $1.0\sim 1.7 \times 10^{17}/cm^3$ 의 acceptor 농도를 가지며  $0.53\sim 3.51 cm^2/Vs$ 의 이동도를 가졌다. P를 이용한 p-type ZnO도 역시, 아직 p-n junction에 의한 EL 결과를 얻지 못하고 있어 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

2000년대 초반, 이론적으로 가능한 ZnO의 p-type 도펀트들의 p-type 도핑 가능성에 대하여 체계적으로 고찰되었다. ZnO의 p-type 도펀트들로서 가능한 것은 Zn를 대체하는 1족 물질인 Li, Na, K과 산소를 대체하는 5족 물질인 N, P, As이 대표적이다. Yamamoto와 Yoshida는 ZnO가 p-type 도핑이 어려운 이유는, 먼저 acceptor들의 높은 활성화 에너지, acceptor 도펀트들의 낮은 용해도, 그리고 다른 광대역 반도체에서도 잘 나타나는 강항 자기 보상 유발 때문으로 설명하였다[7]. C.H.Park, Su-Huai Wei 등은 이러한 도펀트들 중, Li, Na, K과 같은 1족 원소들은 도핑후 ZnO 내에서 shallow acceptor를 형성하나 대부분이 interstitial의 상태를 형성하여 실제의 도핑이 어렵고, V족의 원소들중 As과 P는 deep acceptor를 형성하기 때문에 도핑된 도펀트들이 활성화되기 어렵다고 설명하였다[8]. 그러나 N은 ZnO 내에서  $N_{Zn}$ 와 같은 antisite를 형성하지 않을 뿐 아니라 deep acceptor를 형성하지 않으므로 p-type 도핑에 가장 적합한 물질이라고 이론적으로 설명하였다. Yamamoto와 Yoshida는 이러한 ZnO 도펀트들이 더 잘 도핑되도록하기 위한 방법으로 codoping 법을 제안하였다[7]. codoping의 효과는 마델롱 에너지를 감소시켜 acceptor의 반발력을 감소시키고 acceptor의 에너지 준위를 낮아지게 하며 캐리어 농도를 증가시킬 수 있는 것으로 보고 되고 있다. codoping 물질로는 Li과 F, Ga과 As, Ga과 N이 알려졌다. Ga과 N이 가장 좋은 것으로 알려져 codoping을 이용한 많은 N 도핑이 보고되었다.

이러한 N 도핑의 높은 가능성을 이용하여 Kawai 등은  $N_2O$  가스를 electron cyclotron resonance (ECR)를 이용하여 N을 분해하여 ZnO에 도핑시키는데 성공하였다[9]. 이들은 이동도  $1cm^2/Vs$  이하,  $10^{18}/cm^3$ 이

상의 acceptor를 가지는 p-type ZnO를 제작하였으며, Ga이 도핑된 ZnO 타겟과 ECR을 이용한 Ga과 N의 codoping 법을 이용한 연구에서는 그림 7[9]과 같은 ZnO p-n junction에 의한 I-V curve를 얻었다. K.Nakahara, A.Yoshida 등도 Ga과 N의 codoping을 이용한 p-type ZnO를 제작하였으나 이들 모두 아직 제대로 된 EL 결과를 얻지는 못하고 있다.

p-type ZnO를 만들기 위한 N 도핑의 방법에서 언급한 ECR을 이용한 방법과 codoping을 이용한 방법 외에 seeded chemical vapor transport (SCVT) 프로세스를 이용한 Li diffused, bulk, semi-insulating ZnO 기판 위에  $O_2$ 와  $N_2$ 가스를 이용한 molecular beam epitaxy (MBE)를 이용하여 p-type ZnO를 제작하는 방법이 있다[10]. 이것은 D.C.Look 등과 Eagle-Picher사의 연구에 의해 보고되었으며 Eagle-Picher사에 의해 상용화된 p-type ZnO의 경우,  $10^{18}/cm^3$  정도의 acceptor농도와  $2cm^2/Vs$ 의 이동도를 가진다.

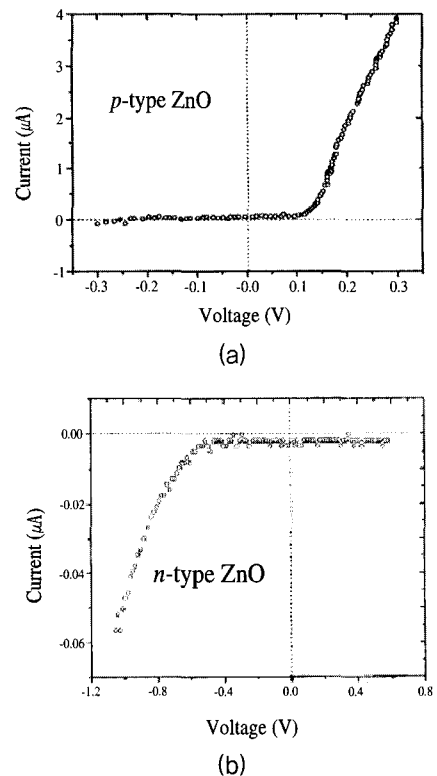


그림 7. Ga과 N의 codoping 법에 의한 ZnO p-n junction의 I-V curve.



Gang Xiong, S.Tuzemen 등은 Reactive sputtering 을 사용하고 Zn 금속 타겟과 O<sub>2</sub>/Ar의 비율조절을 통하여 p-type ZnO를 성장시켰다[11]. 별도의 p-type 도펀트 없이 산소 과잉 상태를 만들어 p-type ZnO를 성장시켰다. 제작된 박막은  $9 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 의 acceptor 농도와  $2 \sim 130 \text{cm}^2 / \text{Vs}$ 의 이동도를 가졌다. 그림 8은 p-type을 나타내는 reactive sputtering의 산소비율과 이렇게 제작된 p-type ZnO 박막을 이용하여 구현된 ZnO p-n junction의 I-V 결과이다. turn on voltage는 약 1V 였고 junction area는 대략  $0.5 \text{cm}^2$ 이하였다. ZnO의 band gap energy가 3.3eV임을 감안할 때 turn on voltage가 너무 작은 값을 나타내어서 이에 대한 좀더 체계적인 설명이 필요하고, I-V curve에서 나타나는 큰 leakage current를 줄이는 것이 연구과제로 남아있다.

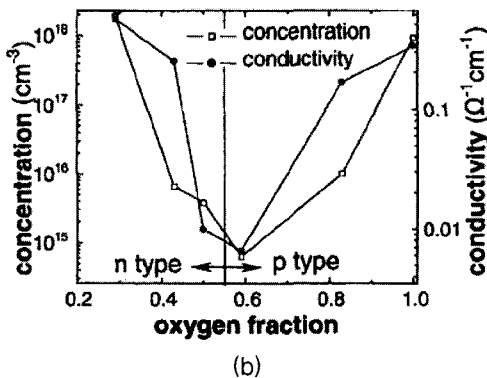
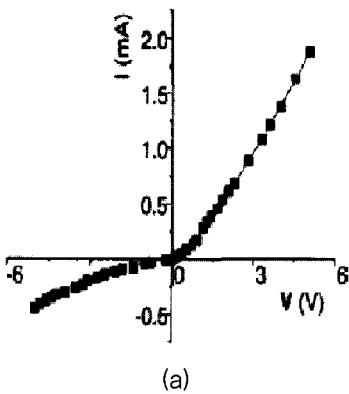


그림 8. Reactive sputtering에 의해 제작된 ZnO p-n junction의 I-V curve.

상용화 가능한 p-ZnO의 구현이 어려워 이중 구조를 이용하여 p-n junction을 구현한 연구그룹도 있다. H.Ohta, H. Hosono 등은 ZnO와 밴드갭의 크기가 유사하면서 투명하고 p-type을 잘 나타내는 SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (SCO)를 이용하여 p-n junction 소자를 구현하였다 [12]. 박막 증착법은 pulsed laser deposition (PLD)을 이용하였다. Tetragonal 구조를 나타내고 p-conducting 특성을 잘 나타내는 SCO는 n-type ZnO위에서 domain matching epitaxy[12]를 이루며 잘 성장된다. 그림 9은 이렇게 제작된 소자의 구조이고 그림 10은 이러한 소자의 I-V 특성과 EL 결과이다. 약 3V 가량의 turn on voltage를 나타내었고, 약 382 nm에서 상당히 우수한 EL 특성이 관찰되었다. 그러나 external efficiency가 10<sup>-3</sup>%이하로 낮은 값을 나타내어 상용화 하기 위해서는 효율 향상 문제를 해결해야 할 것으로 보인다.

H.Ohta, H. Hosono 등은 SCO를 이용한 것 외에도 UV detector에 응용하기 위하여 Li 도핑된 p-type NiO를 이용하여 p-n heterojunction diode를 제작하였다. 증착법은 solid phase epitaxy와 결합된 PLD를 이용하였다[13]. Mesa 구조로 제작되었으며 그림 11(inset)에 나타난 바와 같이 Au/n-ZnO/p-NiO:Li/YSZ의 구조로 제작되었다. 그림 11은 이러한 구조로 제작된 p-n heterojunction diode의 I-V curve가 나타나 있다. turn on voltage는 ~1V였다. ideal factor는 약 2 이하로 나타났다. UV-response 특성은 360nm에서  $\sim 0.3 \text{AW}^{-1}$ (-6V biased)를 나타내어 상용화된 GaN UV detector의  $\sim 0.1 \text{AW}^{-1}$ 과 비교할 만한 결과를 나타내었다.

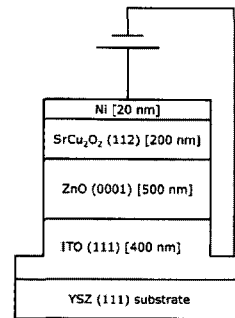
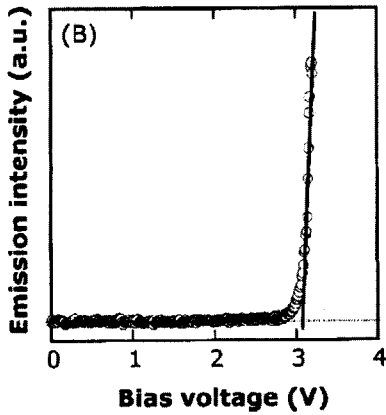
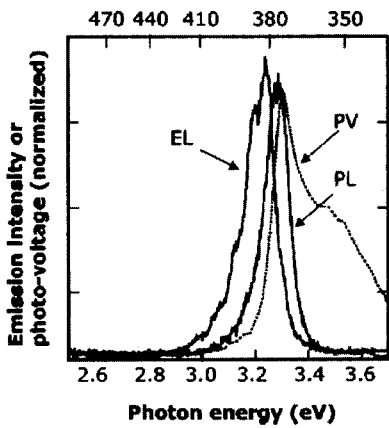


그림 9. p-SCO/n-ZnO LED의 구조.



(a)



(b)

그림 10. p-SCO/n-ZnO LED의 I-V curve와 EL 특성.

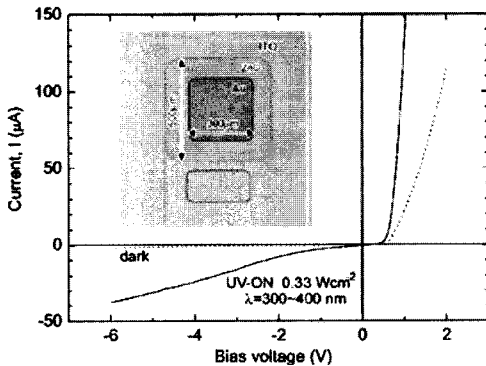


그림 11. p-NiO/n-ZnO의 구조를 이용한 heterojunction의 구조(inset)와 I-V curve.

ZnO를 이용한 이러한 p-n junction 소자의 개발은 아직 미흡한 단계에 있지만 그 가능성을 충분히 보여주고 있다. 이러한 ZnO LED의 연구 개발 마저 GaN 처럼 다른 국가에 뒤진다면 더 이상 광산업에서의 발전을 피할 수 없을 것으로 보여진다.

GaN LED를 연구하는 동안 많은 문제가 발생하였고 이를 해결하기위한 노력을 아직도 하고 있다. GaN와 ZnO가 물리적 특성이 거의 비슷하다는 점을 감안할 때 현재의 GaN의 고효율 LED 기술은 ZnO에 반영되어 GaN 보다 더 빠른 발전을 이룩할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 결론

앞으로 청색 및 백색 LED를 이용한 응용 분야는 엄청나게 확대 될 것이고 몇 년 안에 거의 모든 광원을 대체할 것으로 보인다. 이러한 추세로 볼 때 국가적으로 광산업에 관한 연구와 투자가 절실한 시기이다. 그러나 현재 국내외의 상용화된 청색 및 백색 LED의 대다수가 특정 국가에 특허권이 속해 있는 GaN를 이용한 것이기 때문에 이러한 문제 해결을 위해서는 그 대체 물질로서 가장 주목받고 있는 ZnO LED 개발 및 상용화를 위한 연구가 가장 중요하다고 할 수 있다. ZnO는 최근, 가장 어려운 부분인 p-type ZnO가 제작되어 보고 되고 있어 그 실현 가능성이 나날이 증대 되고 있다. 우리가 청색 및 백색 LED의 시장에서 우위를 차지하기 위해서는 GaN의 대체 물질 연구가 필수적이며 그 물질로서 ZnO의 연구가 가장 가능성 높다고 보여진다. 재현성과 효율 높은 ZnO p-n junction만 제대로 이루어진다면 ZnO는 GaN의 선행 연구를 바탕으로 더 빠른 발전을 이룩할 수 있을 것으로 판단되며 이러한 ZnO의 연구에 박차를 가해야 함은 앞으로의 광산업 발전을 위해서 매우 중요하다고 하겠다.

### 참고 문헌

- [1] Shuji Nakamura, "The Blue Laser Diode", Springer (1997).
- [2] Hong Seong Kang, Jeong Seok Kang, Jae Won Kim, and Sang Yeol Lee, "Annealing effect on the property of ultraviolet and green emissions of ZnO"





- thin films", J. Appl. Phys. Vol. 95, p. 1246, 2004.
- [3] Y. R. Ryu, T. S. Lee, J. H. Leem, and H. W. White, "Fabrication of homostructural ZnO p-n junctions and ohmic contacts to arsenic-doped p-type ZnO", Appl. Phys. Lett., Vol. 83, p. 4032, 2003
- [4] Toru Aoki, Yoshinori Hatanaka, and David C. Look, "ZnO diode fabricated by excimer-laser doping", Appl. Phys. Lett., Vol. 76, p. 3257, 2000.
- [5] Young Chang Kim and Sang Yeol Lee, "Method of forming p-n junction on ZnO thin film and p-n junction thin film", 등록번호 6624-442, 등록일 2003. 9. 24. (U.S.A).
- [6] Kyoung-Kook Kim, Hyun-Sik Kim, Dae-Kue Hwang, Jae-Hong Lim, and Seong-Ju Park, "Realization of p-type ZnO thin films via phosphorus doping and thermal activation of the dopant", Appl. Phys. Lett., Vol. 83, p. 63, 2003.
- [7] Tetsuya Yamamoto and Hiroshi Katayama-Yoshida, "Physics and control of valence states in ZnO by codoping method", Physica B, Vol. 302-303, p. 155, 2001.
- [8] C. H. Park, S. B. Zhang, and Su-Huai Wei, "Origin of p-type doping difficulty in ZnO: The impurity perspective", Phys. Review B, Vol. 66, p. 073202, 2002.
- [9] M. Joseph, H. Tabata, H. Saeki, K. Ueda, and T. Kawai, "Fabrication of the low-resistive p-type ZnO by codoping method", Physica B, Vol. 302-303, p. 140, 2001.
- [10] D. C. Look, D. C. Reynolds, C. W. Litton, R. L. Jones, D. B. Eason, and G. Cantwell, "Characterization of homoepitaxial p-type ZnO grown by molecular beam epitaxy", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, p. 1830, 2002.
- [11] Gang Xiong, John Wilkinson, Brian Mischuck, S. Tuemen, K. B. Ucer, and R. T. Williams, "Control of p- and n-type conductivity in sputter deposition of undoped ZnO", Appl. Phys. Lett., Vol. 80, p. 1195, 2002.
- [12] Hiromichi Ohta, Ken-ichi Kawamura, Masahiro Orita, Masahiro Hirano, Nobuhiko Sarukura, and Hideo Hosono, "Current injection emission from a transparent p-n junction composed of p-SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / n-ZnO", Appl. Phys. Lett., Vol. 77, p. 475, 2000.
- [13] Hiromichi Ohta, Masao Kamiya, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, and Hideo Hosono, "UV-detector based on pn-heterojunction diode composed of transparent oxide semiconductors, p-NiO<sub>y</sub>-ZnO", Thin Solid Films, Vol. 445, p. 317, 2003.
- [14] Sang Hyuck Bae, Sang Yeol Lee, Beom Jun Jin, and Seongil Im, "Growth and characterization of ZnO thin films grown by pulsed laser deposition", Appl. Surf. Sci., Vol. 169-170, p. 525, 2001.
- [15] Hong Seong Kang, Jeong Seok Kang, Seong Sik Pang, Eun Sub Shim, and Sang Yeol Lee, "Variation of light emitting properties of ZnO thin films depending on post-annealing temperature", Materials Science and Engineering B, Vol. 102, p. 313, 2003.

## · 저 · 자 · 약 · 력 ·

## 성명 : 강홍성

## ◆ 학력

- 2001년 명지대 전기전자공학부 공학사
- 2003년 연세대 대학원 전기전자공학과 공학석사
- 2003년 - 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

## 성명 : 김재원

## ◆ 학력

- 2003년 연세대 전기전자공학과 공학사
- 2003년 - 현재 연세대 대학원 전기전자공학과 석사과정

## 성명 : 이상렬

## ◆ 학력

- 1986년 연세대 전기공학과 공학사
- 1990년 State Univ. of New York at Buffalo, M.S.
- 1992년 State Univ. of New York at Buffalo, Ph.D.

## ◆ 경력

- 1990년 - 1992년 State Univ. of New York at Buffalo, Research Assistant
- 1993년 - 1995년 한국전자통신연구소 선임연구원
- 2002년 - 2003년 Los Alamos National Lab (USA) 초빙연구원
- 1990년 - 현재 연세대 전기전자공학과 교수