

NH₃ 분위기에서 후속 열처리에 의한 p형 ZnO 형성

Formation of N Doped, p-type ZnO Films by Post-annealing in NH₃ Ambient

정은수¹, 김홍승^{1,a}, 조형균²

(Eun-Soo Jung¹, Hong-Seung Kim^{1,a}, and Hyung-Kun Cho²)

Abstract

We report the preparation of N doped, p-type ZnO films by post-annealing in NH₃ ambient. The properties were examined by XRD, Hall-effect measurement, PL, and SIMS. ZnO films showed better crystallinity and electron concentration of $10^{15} - 10^{17} / \text{cm}^3$ with post-annealing in NH₃ ambient. These films were converted to p-type ZnO by activation thermal annealing process at 800 °C under N₂ ambient. The electrical properties of the p-type ZnO showed a hole concentration of $1.06 \times 10^{16} / \text{cm}^3$, a mobility of $15.8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, and a resistivity of $40.18 \ \Omega\cdot\text{cm}$. The N doped ZnO films showed a strong photoluminescence peak at 3.306 eV at 13 K, which is closely related to neutral acceptor bound excitons of the p-type ZnO:N. In the SIMS spectra, the incorporation of nitrogen was confirmed.

Key Words : p-ZnO, Post-annealing, NH₃, N doping

1. 서 론

ZnO는 육방정계 우르짜이트 (hexagonal wurtzite) 구조의 직접 천이형 II-VI족 화합물 반도체로 3.3 eV의 넓은 에너지 밴드갭 (energy bandgap)과 실온에서 60 meV의 큰 엑시톤 결합 에너지 (exciton binding energy)를 가진다. 이러한 특성 때문에 ZnO는 단파장 영역인 blue와 UV영역에서 동작하는 LED와 LD 등 광소자로의 응용에 많은 주목을 받고 있다[1]. ZnO를 기반으로 한 광소자를 개발하기 위해서는, ZnO n형 및 p형의 제작이 용이해야 한다. ZnO는 도핑을 하지 않아도 박막성장 후 산소공공 (V_O), 침입형 아연 (Zn_i) 등 내재적 결함에 의한 자유전자의 생성으로 n형 전도도를 보이고, B, Al, Ga 또는 In 등 도너 불순물을 도핑 함으로써 n형 ZnO 특성을 더욱 향상시킬 수 있다[2-5]. 반면 ZnO는 p형 형성을 위한 도핑과정에서 억셉

터 불순물의 낮은 용해도와 높은 자체 보상 (self-compensation) 효과에 의해 특성이 좋고, 재현성 있는 p형 ZnO의 구현이 어렵다[6]. ZnO는 N, P, As 등의 V족 원소를 도핑함으로써 p형의 전도 특성을 기대할 수 있다. 전자띠 구조의 이론적인 계산에 의하면 ZnO내에 얇은 억셉터 준위를 형성하기 위해서는 N이 가장 적합한 도펀트 물질이다 [7]. Minegishi 등은 NH₃를 질소 소스로 사용하여 CVD (chemical vapor deposition) 법으로 p형 ZnO를 성장시켰고[8], 또한 p형 ZnO는 N₂O 플라즈마를 도핑에 사용하여 PLD (pulsed laser deposition) 법에 의해 구현되었다[9]. Look 등은 N₂ 소스를 사용한 MBE (molecular beam epitaxy) 법에 의해 질소가 도핑된 p형 ZnO에 대해 발표하였다[10]. 그러나 산소가 질소로 치환되기 위해서는, N₂, NH₃, NO, N₂O, Zn₃N₂ 등의 질소 도펀트 물질 중 한 개의 질소만을 포함하고 있는 NO, NO₂, NH₃ 등의 물질들이 분해 에너지가 높은 N₂ (9.9 eV)를 포함한 물질보다 억셉터 준위를 형성하기가 용이하다[11].

본 논문에서는 NH₃ 분위기에서 후속 열처리에 의한 N이 도핑된 p형 ZnO의 구현에 대해 보고한다. 후속 열처리는 내재적 결함을 줄이고 결정성을

1. 한국해양대학교 반도체물리전공 (부산시 영도구 동삼동 1)
2. 성균관대학교 신소재공학과
a. Corresponding Author : hongseung@hhu.ac.kr
접수일자 : 2006. 5. 4
1차 심사 : 2006. 5. 25
심사완료 : 2006. 6. 15

향상시킬 수 있는 방법[12-15]인 동시에 질소를 도핑하기 위한 방법으로 본 연구에서 제안하였다. 그리고 질소 도핑을 위해 NH₃ 가스를 사용하였다. 먼저 NH₃ 분위기에서 열처리에 의한 ZnO 박막의 구조적, 전기적, 그리고 광학적 특성을 조사하였다. 다음으로 NH₃ 분위기에서 후속 열처리와 함께 활성화 열처리가 이루어 졌을 때, ZnO 박막의 특성을 연구하였다.

2. 실험

ZnO 박막은 SiO₂/Si (100) 기판위에 R.F. 스퍼터 장치를 이용하여 상온에서 증착되었다. ZnO (4N)가 타겟으로 사용되었고 증착 전 챔버는 10⁻⁵ Torr로 진공도를 유지하였다. ZnO 박막 증착을 위해 MFC (mass flow controllers)를 통해 Ar을 50 sccm 주입하여 전체 진공도를 5 mTorr로 조절하였다. 증착 시간은 40 분, 그리고 RF 파워는 200 W로 하였다. 증착된 ZnO 박막의 두께는 약 260 nm 이다. 증착이 끝난 뒤, ZnO 박막을 수평형 열산화로에 장착하여 NH₃ 분위기에서 600 ~ 700 °C 온도로 후속 열처리 하였다. 활성화 열처리는 NH₃ 분위기에서 열처리가 끝난 뒤, N₂ 분위기에서 800 °C 온도로 30 분 동안 이루어졌다. 세부적인 열처리 조건은 표 1에서 보여주고 있다.

구조적인 특성은 XRD (Rigaku D/max 2100 H, CuKα) θ -2 θ 방식으로 조사되었다. Hall 측정은 상온에서 0.51 T 의 자기장을 인가하여 van der Pauw 방식으로 측정하였다. PL 측정은 He-Cd 레이저 ($\lambda = 325$ nm)를 여기원으로 사용하여 77 K, 13 K에서 측정하였다. 박막의 구성성분은 SIMS로 분석하였다.

표 1. ZnO 박막의 열처리 조건.

Table 1. Detailed annealing conditions of ZnO films.

Sample ID	열처리 조건	
	온도 (°C)	시간 (min)
A	<i>as-dep.</i> ZnO	
B	600	30
C		60
D	700	30
E		60 (+activation annealing : N ₂ (800 °C, 30 min))

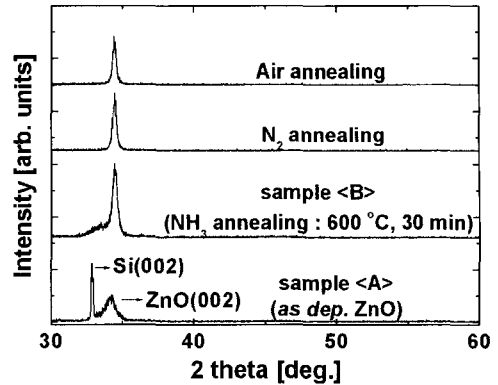


그림 1. ZnO 박막의 XRD 스펙트럼 : 샘플 <A>는 *as dep.* ZnO 그리고 샘플 는 NH₃ 분위기에서 600 °C 온도로 30 분 동안 열처리된 ZnO 박막(NH₃ 분위기에서 후속 열처리 효과를 알아보기 위해 air와 N₂ 분위기에서 후속 열처리에 의한 XRD 결과를 첨가하였다).

Fig. 1. XRD spectra of ZnO films : *as dep.* ZnO denoted sample <A> and ZnO film annealed in NH₃ ambient at 600 °C for 30 min denoted sample(To check the effect of post-annealing in NH₃ ambient, XRD results of post-annealing in air and N₂ ambient were added).

3. 결과 및 고찰

그림 1은 *as dep.* ZnO 박막과 NH₃ 분위기에서 열처리된 ZnO 박막의 θ -2 θ XRD 스펙트럼이다. 이 때, NH₃ 분위기에서 후속 열처리의 효과를 알아보기 위해, air와 N₂ 분위기에서 후속 열처리에 의한 XRD 측정결과[14,15]를 첨가하였다. *as dep.* ZnO 박막과 NH₃ 분위기에서 열처리된 ZnO 박막 모두 $2\theta = 34.4^\circ$ 에서 피크가 관찰되었고, 이것은 육방정 (hexagonal) ZnO 결정 구조의 (002)면에 의한 피크와 일치하는 것이며, ZnO 박막이 Si (100) 기판 면에 대해 c-축으로 수직방향임을 의미한다. (002) 피크 강도는 분위기에 상관없이 후속 열처리에 의해 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 air와 N₂ 분위기 뿐 만 아니라 NH₃ 분위기에서 후속 열처리에 의해서도 박막의 결정성이 향상되어 짐을 보여준다. 32.98°에서 관찰된 피크는 Si (100) 기판에 의한 것이다.

ZnO 박막의 전기적 특성은 Hall 측정에 의해 조사되었고, 그 결과를 표 2에 요약하였다.

ZnO 박막을 NH₃ 분위기에서 열처리 하였을 때, 박막은 여전히 n형 전도도를 보였다. 그러나 *as dep.* ZnO 박막과 비교하면, 전자의 농도는 열처리 시간 (30 분, 60 분)과 온도 (600 °C, 700 °C)의 증가에 따라 점점 감소하였고, 비저항은 점차적으로 증가하기 시작하였다. 이러한 현상은 ZnO 박막 내에 질소의 결함에 의한 것이라고 생각된다. n형 전도도를 보이던 박막은 NH₃ 분위기에서 열처리 후 N₂ 분위기에서 800 °C 온도로 30 분 동안 활성화 열처리 (activation annealing)에 의해 전도도가 p형으로 반전되었다. p형 ZnO 박막 (샘플 E)은 $1.06 \times 10^{16} /\text{cm}^3$ 의 정공농도, 15.8 cm²/V·s의 이동도, 그리고 40.18 Ω·cm의 비저항을 보였다. 이러한 변화는 활성화 열처리에 의해 질소와 함께 결합된 수소가 제거되면서 질소가 활성화 되어 액셉터로 작용한 것으로 생각된다.

그림 2는 NH₃ 분위기에서 열처리에 의한 (a) 캐리어 농도와 (b) 비저항의 변화를 보여준다. p형 ZnO 박막 (샘플 E)의 농도와 비저항은 그림 2에서 #으로 표시하였다.

그림 3(a)는 NH₃ 분위기에서 각각의 온도와 시간에 따라 열처리된 ZnO 박막의 77 K 에서의 PL 스펙트럼이다. 모든 샘플은 3.2 eV 이상에서 UV 발광을 보였다. 그러나 *as dep.* ZnO 박막과 600 °C에서 열처리된 샘플 B와 C는 약한 발광을 보인 반면, 700 °C에서 열처리된 샘플 D와 E는 상당히 강한 발광을 보였다. 또한 700 °C에서 열처리된 샘플 D와 E의 UV 발광 피크 위치가 점점 큰 에너지 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 특히, NH₃

표 2. NH₃ 분위기에서 열처리된 ZnO 박막의 전기적 특성.

Table 2. Electrical properties of ZnO films annealed in NH₃ ambient.

Sample ID	Type	캐리어 농도 [cm ⁻³]	이동도 [cm ² /V·s]	비저항 [Ω·cm]
A	n	6.40×10^{21}	3.15	3.45×10^{-3}
B	n	2.25×10^{17}	27.54	1.63
C	n	2.66×10^{16}	27.75	9.70
D	n	1.73×10^{15}	44.41	389.98
E	p	1.06×10^{16}	15.8	40.18

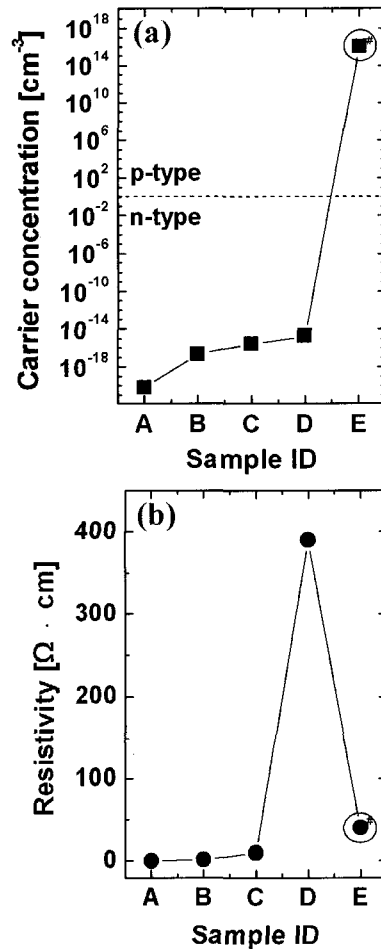


그림 2. NH₃ 분위기에서 열처리에 의한 (a) 캐리어 농도와 (b) 비저항. p형 박막의 정공농도와 비저항은 #로 표시하였다.

Fig. 2. (a) Concentration and (b) resistivity with annealing in NH₃ ambient. The concentration and resistivity of p-type film were marked by #.

분위기에서 열처리 후에 활성화 열처리가 함께 이루어진 샘플 E는 다른 샘플들에 비해 UV 발광 피크 위치가 상당히 큰 에너지 쪽으로 이동한 것을 볼 수 있었다. UV 발광이 강해지고 피크 위치가 큰 에너지로 이동한 것은 열처리에 의해 양질의 ZnO 박막이 얻어진 것으로 생각된다. 위의 PL 결과에서 UV 발광 피크 위치가 상당히 큰 에너지 쪽으로 이동한 샘플 E의 발광 원인을 확인하기 위해 13 K에서 PL 측정을 하였고 그 결과는 그림 3

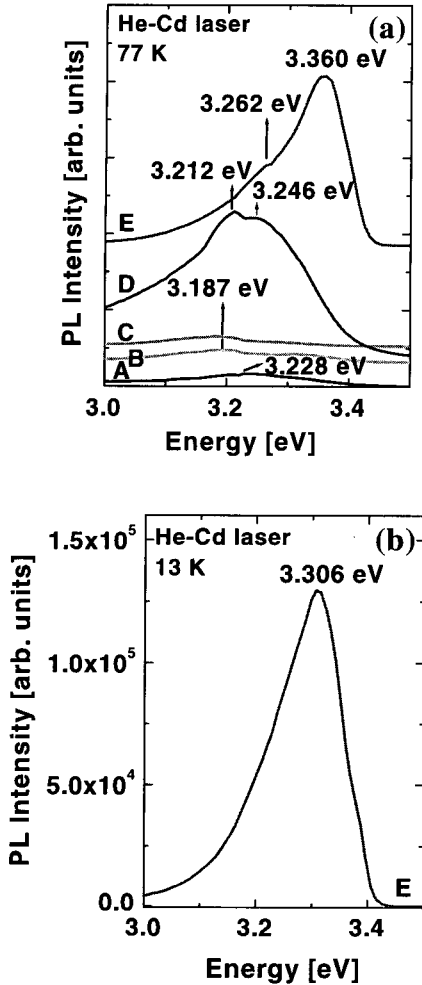


그림 3. NH₃ 분위기에서 열처리 조건에 의한 PL 스펙트럼 : (a) ZnO 박막의 77 K에서 PL 스펙트럼, (b) NH₃ 분위기에서 700 °C 온도로 1 시간 동안 열처리되고 N₂ 분위기에서 800 °C 온도로 30 분 동안 열처리 (활성화 열처리)된 ZnO 박막의 13 K에서 PL 스펙트럼.

Fig. 3. PL spectra of ZnO films with annealing conditions in NH₃ ambient : (a) PL spectra at 77 K of ZnO films, (b) PL spectra at 13 K of ZnO film annealed in NH₃ ambient at 700 °C for 1 hr and in N₂ ambient at 800 °C for 30 min (activation annealing) denoted sample <E>.

(b)에서 보여준다. 일반적으로 양질의 ZnO 박막의 저온 PL에서는 내재적인 불순물이나 얇은 준위의 결함들로부터 생성된 도너에 의해 neutral donor bound excitons (D⁰X) 발광이 우세하다. 그러나 상당량의 억셉터가 도핑된 ZnO 박막에서는 neutral acceptor bound excitons (A⁰X) 발광이 관찰된다. D⁰X 발광이나 A⁰X 발광은 3.34 ~ 3.38 eV 범위에서 관찰되지만 그 발광 위치에 대해서는 종래 연구마다 약간의 견해 차이가 존재한다. Kaminska 등[16]은 열산화 (thermal oxidation) 법으로 N이 도핑된 ZnO 박막을 형성하였고, 3.360 eV에서 관찰된 피크를 N 억셉터에 의한 A⁰X 발광으로 설명하였지만, Rodina 등[17]은 이 피크를 D⁰X 발광으로 설명하였다. 반면 LooK 등[10]과 Römmeluère 등[18]은 각각 3.318 eV와 3.315 eV에서 관찰된 피크를 A⁰X 발광으로 설명하였다. 본 실험에서는 3.306 eV에서 매우 강한 발광 피크를 관찰하였고, 이는 홀 측정 결과를 바탕으로 N 도핑에 의한 neutral acceptor bound excitons (A⁰X)에 의한 발광으로 생각된다.

위의 Hall 측정 결과와 PL 측정 결과를 바탕으로, ZnO 박막내에 N의 함유여부를 알아보기 위해 SIMS 측정을 하였다. SIMS를 이용할 시 표준 시료를 통한 정량화를 하지 않으면 각 성분에 대한 정량화된 결과를 얻을 수는 없지만 어떠한 성분들이 존재하는지에 대한 정성적인 분석을 할 수 있다. 그림 5에서는 SIMS에 의해 분석된 (a) *as dep.* ZnO와 (b) 샘플 E의 Zn, O, N에 대한 atomic profile이다. *as dep.* ZnO와 샘플 E에서 O는 가장 큰 이차 이온양을 가지고 전체 두께에 걸쳐 일정한 값을 나타내고 있고 Zn는 두께에 대해 이차 이온양이 감소하는 특성을 보여 주고 있었다.

그러나 N는 *as dep.* ZnO 경우 가장 낮은 이차 이온양 값을 가지고 전체 두께에 걸쳐 균일한 값을 보이고 있었고 샘플 E는 N의 이차 이온양이 Zn의 1/10 정도 차이를 가지지만 전체 두께에 걸쳐 같은 감소 특성을 보여 주고 있었다. 위 결과에서 *as dep.* ZnO에서는 N의 이차 이온양은 SIMS의 노이즈 수준으로 보이며 따라서 N이 거의 함유되어 있지 않다고 볼 수 있다. 반면, 샘플 E의 경우에는 N이 Zn와 같은 경향으로 감소하는 것으로 보아 N이 ZnO 박막 내에 함유되어 있는 것으로 보인다.

이것으로 NH₃ 분위기에서 열처리와 N₂ 분위기에서 활성화 열처리에 의해 N이 박막 깊숙이 확산되어 박막내에 함유되어 있다고 생각되어 진다.

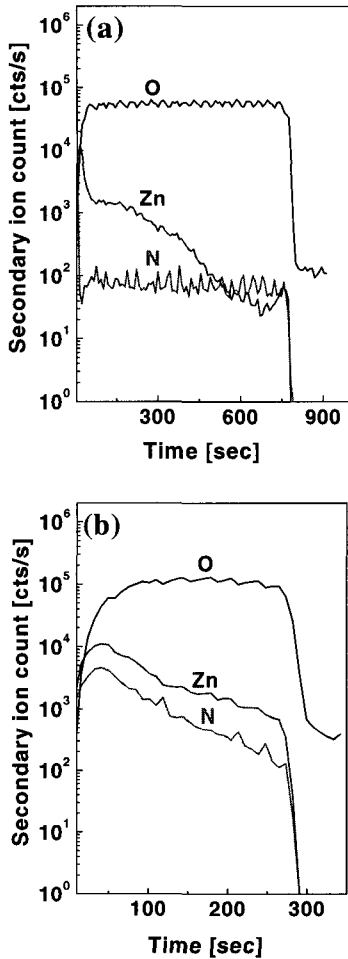
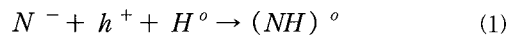


그림 4. ZnO 박막의 Zn, O, N 원소에 대한 atomic profile : (a) as dep. ZnO, (b) NH₃ 분위기에서 700 °C 온도로 1 시간 동안 열처리되고 N₂ 분위기에서 800 °C 온도로 30 분 동안 열처리(활성화 열처리)된 ZnO 박막.

Fig. 4. Atomic profiles of Zn, O, and N in ZnO films : (a) as dep. ZnO denoted sample <A>, (b) ZnO film annealed in NH₃ ambient at 700 °C for 1 hr and in N₂ ambient at 800 °C for 30 min (activation annealing) denoted sample <E>.

위의 결과를 바탕으로, 본 논문에서는 질소 소스로써 NH₃ 가스를 사용한 질소 도핑 메커니즘을 제안하고자한다. NH₃ 가스를 질소 소스로 사용하여

N이 도핑된 p형 ZnO를 제작한 다른 그룹의 연구에 의하면, 비록 NH₃ 가스가 ZnO 박막 내에 확산되더라도 NH₃ 가스는 N 원자의 형태로 완전히 분리되지 않는다고 한다[8,20]. 이러한 현상은 질소 소스로써 NH₃ 가스를 사용하여 성장시킨 질소가 도핑된 ZnSe 박막에서 일어나는 현상에 의해 설명될 수 있다. 질소 도핑과정에서 수소 원자는 질소 원자와 함께 결합되어 질소 원자에 의해 생성된 자유 정공을 중성화 시키고 강한 N-H 결합을 형성한다. 이러한 현상을 수소 패시베이션 (passivation) 이라 하고, 질소가 도핑된 ZnSe 박막에서 수소 패시베이션의 보상 메커니즘은 아래와 같다 [19] :



이와 같은 현상이 NH₃ 가스를 사용하여 질소를 도핑시킨 ZnO 박막에서도 일어난다[8,20]. 따라서 NH₃ 분위기에서 열처리에 의해 산소공공이 질소 원자로 바로 치환되지 않고 N-H 혼합 분자 형태로 ZnO 박막 내에 결합되어 ZnO 박막 내에 Zn-N-H 결합을 만들게 된다. 이런 경우, 질소는 수소 패시베이션 때문에 전기적으로 활성화 되지 못 한다. 따라서 p형 반전이 일어나지 않고 비저항이 증가하게 되는 것이다. 질소가 엑셉터로 활성화되기 위해서는, N-H 결합을 분리 시켜야하고[20], 이것은 후속 열처리에 의해 가능하다[21]. 본 연구에서도 N₂ 분위기에서 800 °C 온도로 활성화 열처리를 수행하였고 그 결과 p형 ZnO를 형성하였다. 결과적으로 p형 ZnO는 활성화 열처리 과정을 통해 질소 엑셉터를 활성화 시켜 줌으로써 구현될 수 있다.

4. 결론

NH₃ 분위기에서 열처리에 의해 p형 ZnO 박막의 형성에 대해 연구하였다. ZnO 박막의 XRD, PL 측정 결과로부터 NH₃ 분위기에서 열처리에 의해 더 좋은 결정성을 가진 ZnO 박막을 얻을 수 있었고 전자의 농도가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 NH₃ 분위기에서 열처리에 의해 질소가 ZnO 박막 내에 결합되었음을 보여준다. 전도도의 반전이 일어나지 않은 ZnO 박막은 N₂ 분위기에서 800 °C 온도로 활성화 열처리 (activation thermal annealing) 해줌으로써 p형으로 반전되었다. p형 ZnO 박막은 1.06 × 10¹⁶ /cm³의 정공농도, 15.8 cm²/V · s의 이

동도, 그리고 $40.18 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 보였다. 이러한 변화는 활성화 열처리에 의해 질소와 함께 결합된 수소가 제거되면서 질소가 활성화 되어 엑셉터로 작용한 것으로 보인다. 질소가 도핑된 p형 ZnO 박막의 13 K에서 측정된 PL 스펙트럼에서 3.306 eV 위치에서 피크를 관찰할 수 있었고, 이것은 p형 ZnO의 neutral acceptor bound excitons에 의한 발광과 관련이 있다. 그리고 SIMS 측정을 통해 질소의 함유 여부를 확인하였다. 이러한 결과들은 NH_3 가스를 사용한 질소 도핑 과정에서 활성화 열처리가 중요한 역할을 하고 p형으로 반전은 열처리 과정을 통해 박막 내에서 엑셉터를 활성화 시켜줌으로써 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 정보통신 연구 진흥원에 2005년 기초 기술연구지원사업의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] C. C. Lin, S. Y. Chen, S. Y. Cheng, and H. Y. Lee, "Properties of nitrogen-implanted p-type ZnO films grown on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ by radio-frequency magnetron sputtering", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, p. 5040, 2004.
- [2] B. J. Lokhande, P. S. Patil, and M. D. Uplane, "Studies on structural, optical and electrical properties of boron doped zinc oxide films prepared by spray pyrolysis technique", *Physica B*, Vol. 302-303, p. 59, 2001.
- [3] H. Kims, C. M. Gilmore, J. S. Horwitz, A. Pique, H. Murata, G. P. Kushto, R. Schlaf, Z. H. Kafafi, and D. B. Chrisey, "Transparent conducting aluminum-doped zinc oxide thin films", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, p. 259, 2000.
- [4] D. J. Kwak, K. Park, B. S. Kim, S. H. Lee, S. J. Lee, and D. G. Lim, "Argon gas pressure and substrate temperature dependences of ZnO:Al film by magnetron sputtering", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 45, p. 206, 2004.
- [5] J. Y. Hwang, C. R. Cho, S. A. Lee, and S. Y. Jeong, "Epitaxial growth and structural characterization of transparent conducting ZnO : Al thin film deposited on GaN substrate by RF magnetron sputtering", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 47, p. S288, 2005.
- [6] J. L. Zhao, X. M. Li, J. M. Bian, W. D. Yu, and C. Y. Zhang, "Growth of nitrogen-doped p-type ZnO films by spray pyrolysis and their electrical and optical properties", *J. Crystal Growth*, Vol. 208, p. 495, 2005.
- [7] M. Kasuga and S. Ogawa, "Electronic properties of vapor-grown heteroepitaxial ZnO film on sapphire", *Jan. J. Appl. Phys.*, Vol. 22, p. 794, 1983.
- [8] K. Minegishi, Y. Koiwai, Y. Kikuchi, K. Yano, M. Kasuga, and A. Shimizu, "Growth of p-type zinc oxide films by chemical vapor deposition", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 36, p. L1453, 1997.
- [9] X. L. Guo, H. Tabata, and T. Kawai, "Pulsed laser reactive deposition of p-type ZnO film enhanced by an electron cyclotron resonance source", *J. Crystal Growth*, Vol. 223, p. 135, 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] 서효원, 정연식, 최원국, "ZnO 박막을 이용한 광재료 개발 현황", 전기전자재료학회지, 17권, 5호, p. 13, 2004.
- [12] B. Lin, Z. Fu, and Y. Jia, "Green luminescent center in undoped zinc oxide films deposited on silicon substrates", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, p. 943, 2001.
- [13] J. D. Ye, S. L. Gu, S. M. Zhu, F. Qin, S. M. Liu, W. Liu, X. Zhou, L. Q. Hu, R. Zhang, Y. Shi, and Y. D. Zheng, "Production of high-quality ZnO films by the two-step annealing method", *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, p. 5308, 2004.
- [14] J. Y. Lee, H. S. Kim, J. H. Chang, M. Yang, H. S. Ahn, and S. O. Ryu, "Structural and luminescence characteristics of post-annealed ZnO films on Si (111) in H_2O ambient", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 44, p. L205, 2005.

- [15] E. S. Jung, J. Y. Lee, and H. S. Kim, "Structural and optical characteristics of ZnO films with oxygen content", *J. Korean Phys. Soc.*, Vol. 47, p. S480, 2005.
- [16] E. Kaminska, A. Piotrowska, J. Kossut, A. Barcz, R. Butkute, W. Dobrowolski, E. Dynowska, R. Jakiela, E. Przewdziecka, R. Lukasiewicz, M. Aleszkiewicz, P. Wojnar, and E. Kowalczyk, "Transparent p-type ZnO films obtained by oxidation of sputter-deposited Zn_3N_2 ", *Solid State Communications*, Vol. 135, p. 11, 2005.
- [17] A. V. Rodina, M. Stassburg, M. Dworzak, U. Haboek, A. Hoffman, A. Zeuner, H. R. Alves, D. M. Hofmann, and B. K. Meyer, "Magneto-optical properties of bound excitons in ZnO", *Phys. Rev. B*, Vol. 26, p. 125206, 2004.
- [18] J. F. Rommeluère, L. Svob, F. Jomard, J. Mimila-Arroyo, A. Lusson, V. Sallet, and Y. Marfaing, "Electrical activity of nitrogen acceptors in ZnO films grown by metalorganic vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, p. 287, 2003.
- [19] A. Kamata, H. Mitsuhashi, and H. Fujita, "Origin of the low doping efficiency of nitrogen acceptors in ZnSe grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 63, p. 3353, 1993.
- [20] Z. Z. Ye, J. G. Lu, H. H. Chen, Y. Z. Zhang, L. Wang, B. H. Zhao, and J. Y. Huang, "Preparation and characteristics of p-type ZnO films by DC reactive magnetron sputtering", *J. Crystal Growth*, Vol. 253, p. 258, 2003.
- [21] K. I. Ogata, D. Kawaguchi, T. Kera, and S. Fujita, "Effects of annealing atmosphere and temperature on acceptor activation in ZnSe:N grown by photoassisted MOVPE", *J. Crystal Growth*, Vol. 159, p. 312, 1996.