[UCI]I804:24011-200000231613

LED용 ZnO 투명산화물 전극의 특성향상

Improvement of Characteristics of ZnO Transparent Conducting Oxide for LED Applications

2006 년 2 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단소재공학과

박 세 연

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LED용 ZnO 투명산화물 전극의 특성향상

지도교수 신 동 찬

이 논문을 공학 석사학위신청논문으로 제출함.

2005 년 10 월 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단소재공학과

박 세 연

박세연의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교 수 이 종 국

위 원 조선대학교 교 수 박 진 성

위 원 조선대학교 조교수 신 동 찬

2005 년 11 월 일

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables III

List of Figures IV

ABSTRACT VI

제 1 장 서 론 1

제 2 장 이론적 배경 3

제 2.1 절 ZnO (Zinc Oxide) 3

2.1.1 ZnO의 물리적 성질과 구조 3

제 2.2 절 LED (Light Emitting Diodes) 7

2.2.1 LED란? 7

2.2.2 LED 특징 11

제 2.3 절 TLM (Transmission Line Measurement) 12

2.3.1 TLM을 이용한 오믹 접촉 비저항 12

제 2.4 절 Hall effect 16

2.4.1 Hall effect의 원리 16

2.4.2 Van der Pauw law 19

2.4.3 Hall 계수와 Hall 이동도 측정법 22

2.4.4 RF-Magnetron Sputtering 장치 24

제 3 장 실험 방법 27

제 3.1 절 LED 소자 제작 27

3.1.1 Target 제작 27

3.1.2 기판세척과정 31

3.1.3 ZnO 증착 31

3.1.4 에칭 33

3.1.5 금속 증착 36

3.1.6 Lift-off 36

3.1.7 후열처리 조건 36

제 3.2 절 특성 분석 37

3.2.1 전기적 특성 조사 37

3.2.2 광학적 특성 조사 37

3.2.3 구조적 특성 조사 37

제 4 장 결과 및 고찰 38

4.1 전기적 특성 38

4.2 구조적 특성 44

4.3 광학적 특성 46

4.4 후열처리에 따른 접촉 비저항 52

4.5 소자 특성 54

제 5 장 결론 58

참고문헌 59

LIST OF TABLES

Table 1. Properties of ZnO.

Table 2. Composition of Al and Ga co-doped ZnO thin films.

Table 3. Deposition parameter of ZnO thin films.

Table 4. Transmittance of Al and Ga co-doped ZnO thin films.

List of Figures

Fig. 1. Crystal structure of ZnO.

Fig. 2. Injection of minority carriers in a forward-biased p-n junction leading to spontaneous emission of photons.

Fig. 3. The bandgap versus lattice constant of various semiconductors.

Fig. 4. Lateral structures of test patterns for the measurement of specific contact resistance.

Fig. 5. Correlation between transfer length and total resistance at TLM.

Fig. 6. Diagraming of arrangement for Hall effect measurement.

Fig. 7. Ohmic contact A, B, C, D.

Fig. 8. A schematic of the RF-magnetron sputtering system.

Fig. 9. Heat treatment process for ZnO target Calcination.

Fig. 10. Heat treatment process for ZnO target Sintering.

Fig. 11. Etching process of ZnO patterns.

Fig. 12. Etching images as a function of echant type.

Fig. 13. Sheet resistance as a functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

Fig. 14. Resistivity as a functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

Fig. 15. Hall mobility as functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

Fig. 16. Carrier concentration as functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

Fig. 17. Optical transmittance spectra for Al and Ga co-doped ZnO thin films deposited

using $Zn_{0.989}Al_{0.01}Ga_{0.001}$ target.

Fig. 18. Optical transmittance spectra for Al and Ga co-doped ZnO thin films deposited using $Zn_{0.976}Al_{0.01}Ga_{0.004}$ target.

Fig. 19. Optical transmittance spectra for Al and Ga co-doped ZnO thin films deposited using $Zn_{0.972}Al_{0.01}Ga_{0.008}$ target.

Fig. 20. SEM micrographs showing surface structure and grain growth behavior of Al and Ga co-doped ZnO thin films on Al_2O_3 according to RTA temperature.

Fig. 21. XRD rocking curve spectrum of an Al and Ga co-doped ZnO thin films on Al_2O_3.

Fig. 22. I-V characteristic for Al and Ga co-doped ZnO on p-GaN.

Fig. 23. Current dependence of forward voltage for Al and Ga co-doped ZnO thin films on a p-GaN.

Fig. 24. Current dependence of EL(electroluminescence) intensity for Al and Ga co-doped ZnO thin films on a p-GaN.

ABSTRACT

Improvement of Characteristics of ZnO Transparent Conducting Oxide for LED Applications

Se Yeon Park
Advisor : Prof. Dong Chan Shin
Department of Materials Engineering
Graduate School of Chosun University

Recently a number of researches have been carried out on transparent conducting oxide (TCO: ITO, ZnO) to replace metal electrode (Au/Ni) for enhancing the light extraction efficiency of LED. In this study, after co-doping Al and Ga to ZnO, the optical and electrical properties were investigated. The LED devices were fabricated using Al and Ga co-doped ZnO thin films for TCO. ZnO thin film was deposited on a (001) sapphire substrate by RF magnetron sputtering system at room temperature. The thickness of the ZnO thin film was kept to 270 nm.

Resistivity and sheet resistance at room temperature were $4x10^{-4}$ Ωcm and 26 Ω/□, respectively. Transmittance at the visible wavelength range was more than 90%.voltage was5.8

V at 20 mA current. EL intensity of the LED device with ZnO TCO increased by 40% compared to that of Ni/Au. These electrical and optical properties suggest that ZnO is a potential candidate for transparent conducting oxide for LED applications.

제 1 장 서 론

정보화 사회의 무한한 확장을 배경으로 LED, LCD, PDP, Organic EL 등 디스플레이 기술이 눈부시게 발전하고 있다. 이러한 디스플레이 장치들은 종래의 CRT가 가지고 있던 큰 부피와 화면의 굴곡 그리고 외부 전자기장에 의한 화면의 변형들의 단점들이 거의 없다. 박막 트랜지스터 및 형광, 광원 기술이 발달하면서 이러한 디스플레이 장치들은 소형화 고해상도화, 저에너지소비화 되고 있고, 이미 기존의 디스플레이 장치들의 성능을 능가하면서 그 시장의 크기를 넓혀가고 있다. 뿐만 아니라, 최첨단 휴대 전화의 정보 전달 능력이 상상을 초월할 정도로 커지면서 디스플레이 산업은 정보 산업 중에서 핵심 중의 핵심이 되어가고 있다.

투명전극[1]은 평판 디스플레이에 반드시 필요한 소재 중의 하나로, 내부 전자 소자를 디스플레이 장치 외부의 영향으로부터 보호하고, 전자 소자로 전기 신호 및 전류를 전달하면서도 나오는 빛을 흡수 없이 전달하는 부품으로, 투광성과 전기 전도성이 우수해야 하는 조건이 있다. 투명 전극으로 사용되는 재료는 낮은 비저항 값 (10^{-3} ~ 10^{-4} Ωcm)과 가시광선 영역에서 높은 광투과율을 가져야 한다.[1],[2] 그리고 디스플레이 내부 전자 소자의 제조 공정 중에 받는 열에 의한 특성의 변화가 적어야만 한다. 특히 최근 상용화되고 있는 LED에서 가장 널리 사용되고 있는 투명 전극 재료로는 ITO($In_{1-x}Sn_xO_3$)가 있다. ITO의 광학적 특성과 전기적 특성은 매우 우수하지만, 원료 물질중의 하나인 In의 생산 단가가 매우 높고, ITO가 플라즈마에 노출되는 경우 열로 인해 특성이 심하게 변화된다는 단점들을 가지고 있다.

이에 반하여, 3.3 eV의 밴드갭을 가지고 있는 ZnO는 적외선 및 가시광선의 투과율이 매우 좋고, 전기 전도성과 플라즈마에 대한 내구성이 매우 우수하다. 또한 낮은 온도에서도 성장시킬 수 있고, 생산 원가 또한 비교적 낮아서 대면적 디스플레이 투명 전극 응용에 있어서 유망한 재료로 떠오르고 있다. 하지만, ZnO에도 몇 가지 단점이 있는데, 불순물(dopant)이 첨가되지 않은 ZnO 박막의 경우 대기 중에 장시간 노출되었을 때 산소의 영향으로 Zn와 O의 정량비(stoichiometry)가 변하면서 전기적 성질이 변하고, 또 고온에서 작업을 하게 되는 경우 안정하지 못해서 아직까지 ITO를 완전히 대체하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 ZnO에 In, Ga, Al[2-12] 등의 불순물을 첨가하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 ZnO에 In과 Ga의 성분 조성비에 따른 ZnO 투명전극의 전기적 광학적 특성을 개선하고 후열처리(RTA, rapid thermal annealing)를 통해 p-GaN과 ZnO 투명전극의 ohmic 접촉을 형성하고 LED 소자 제작을 통하여 실용화에 대한 가능성을 연구하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 ZnO (Zinc Oxide)

1.1 ZnO의 물리적 성질과 구조

ZnO는 II-VI 족 화합물 반도체로서 상온에서 3.36 eV의 넓은 밴드갭을 가지는 직접 천이형 반도체이다. 결정 구조는 O 이온이 hexagonal site에 위치하고 Zn 이온이 tetrahedral interstitional site에 위치한 wurzite 구조이다.[5,13-16] 또한 ZnO는 결정구조에서 이방성, 비화학량론적 결함구조(nonstoichometric defect structure, n형 반도체), 광폭의 에너지 밴드(3.437, at 2K), 가시광선 영역에서 높은 광학적 투과도, 높은 굴절계수, 큰 압전상수 등의 우수한 특성을 갖는 재료이다.

ZnO의 결정구조를 그림 1에 나타내었고, 표 1에 ZnO 물질의 일반적인 물성을 요약 정리하였다. a=3.2495±0.00005 Å, c=5.2069±0.00005 Å의 격자 상수와 c축 방향으로 2.9×10^{-6}, c축의 수직 방향으로는 4.8×10^{-6} 1/K 의 열팽창 계수를 가진다.[17] 구조적 특징으로 인해 ZnO의 박막 성장시에는 Zn와 O의 직경이 크게 다르기 때문에 침입형(interstitial) Zn나 공공(vacancy) O가 생기게 되는데 이와 같은 결정 결함은 Zn와 O의 원자비율이 1:1로 결합된 화학량론적 조성(stoichoimetry)이 아닌 비화학량론적인 조성을 갖게 된다.[18-23]

단결정 ZnO 박막은 우수한 가시광선 영역의 투과성으로 새로운 광학, 광전자재료로서 쓰일 수 있을 뿐 아니라 투명 산화막 전극(transparent conductive oxide : TCO)으로 사용될 수 있는 물질이다. 투과율이 80%에

이를 정도로 우수하여 태양전지의 window로 사용되기도 하며 자외선 발광의 성질(Eg=3.1 ~ 3.3 eV)로 광전자 소자로 사용될 수 있다.

ZnO가 가지고 있는 뛰어난 광학적 물성 중 하나로 상온에서도 다른 화합물 반도체에 비해 3.37 eV의 넓은 밴드갭을 가지고, GaN(28 meV) 보다 상온에서 큰 엑시톤 결합 에너지(60 meV)와 열 열안정성을 가지고 있어 고온에서 낮은 문턱전압을 지닌 레이저 소자로 이용이 가능하고 빛의 방출 시간도 더 늘어날 수 있는 이점이 있어서 소자 온도 변화에도 다양하게 이용할 수 있는 실용적인 자외선 레이저로서 응용될 수 있다.[24-26] 또한 적외선에서 가시광선까지의 영역에서 투명한데다가 알루미늄을 도핑했을 경우는 전기전도성이 커지므로 태양전지와 평판 디스플레이의 투명 전극용으로도 사용된다.[26]

Table 1. Properties of ZnO.

molecular mass	81.389
specific gravity at room temp.	5.642 g/cm^2
crystal structure	wurtzite
lattice constants	a=3.250 Å, c=5.204 Å
melting point	2250 K
typical growth temperature	~ 780 K
bandgap energy at room temp.	3.37 eV
exciton binding energy (E_b)	60 meV
dielectric constant	8.75
thermal conductivity	0.006 cal/cm/K
mohs hardness	4
thermoelectric constant at 573 K	1200 mV/K
density	5.78 g/cm^3
formation enthalpy	-83.24 Kcal/mol
linear thermal expansion coefficient at room temp.	a-axis direction 4.75 c-axis direction 2.92
electron mass	0.28
hole mass	1.8

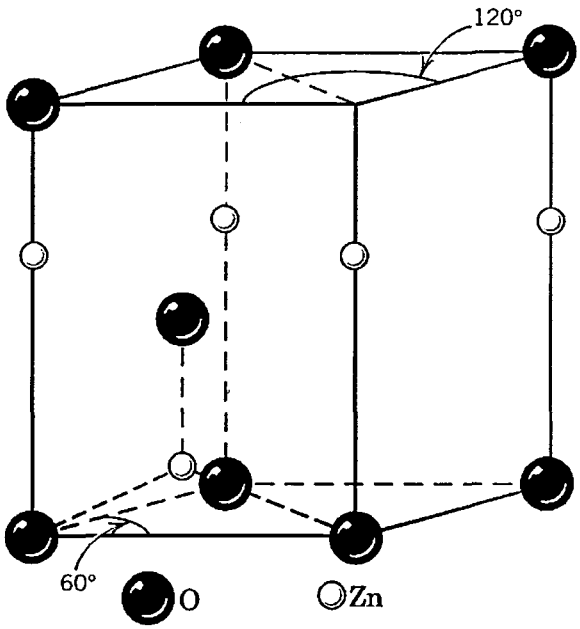


Fig. 1. Crystal structure of ZnO.

제 2 절 LED (Light Emitting Diode)

2.1 LED란? [27],[28]

Light Emitting Diode의 약어인 LED는 기본적으로 p형과 n형 반도체의 접합으로 이루어져 있으며, 전압을 가하면 전자와 정공의 결합으로 반도체의 밴드갭(bandgap)에 해당하는 에너지를 빛의 형태로 방출하는 일종의 광전자 소자 (optoelectronic device)이다. 그림 2에서 보는 바와 같이, p-n접합에 순방향으로 전압을 인가하면 n형 반도체의 전자 및 p형 반도체의 정공은 각각 p쪽, n쪽에 주입되어 소수 운반자(carrier)로서 확산된다. 이들의 소수 운반자는 확산과정에서 다수 운반자와 재결합하며, 결합하는 전자와 정공의 에너지 차에 해당하는 빛을 방출한다.

LED용 반도체 재료는 크게 직접천이형(direct transition)과 간접천이형(indirect transition)으로 구별할 수 있다. 반도체의 에너지 구조에서 전도대의 전자가 가전자대의 정공과 결합할 때 에너지가 방출하게 된다. 규소(Si)등 간접천이형 반도체 내에서는 이 에너지는 주로 열과 진동으로 소모되어 발광 효율이 크게 저하되는 반면, 질화갈륨(GaN) 등 직접천이형 반도체에서는 전자와 정공의 재결합 시 발생하는 에너지가 모두 발광 형태로 나타나기 때문에 LED를 구성하기 위한 적합한 재료라고 볼 수 있다. 이러한, 직접천이로부터 발생하는 빛의 파장은 반도체의 고유한 특성인 에너지 밴드갭(E_g)에 따라서 결정되며, 빛의 에너지와 발광파장은 다음과 같은 관계가 있다.

$$E_g = h\nu = hc/\lambda \text{ (h:플랭크상수, c:광속, } \lambda\text{:파장)} \cdots\cdots\cdots\cdots \text{2-1}$$

$$\lambda\ [nm] = 1240/E\ [eV] \quad \cdots\cdots\ 2\text{-}2$$

그림 3은 LED에 이용되고 있는 화합물 반도체의 예와 각각 반도체의 에너지갭에 따른 파장과의 관계를 보여준다. 적색 LED에서는 GaAlAs와 같은 3원계, 혹은 InGaAlP와 같은 4원계 조성의 화합물 반도체가 사용되고 있다. 녹색 LED의 경우에는 처음에 GaP로 구현되었는데, 이는 간접천이형 재료로서 효율이 떨어져서 실용적인 순녹색 발광을 얻을 수 없었다. 하지만, 추후에 InGaN 박막성장이 성공함에 따라 고휘도 청색 및 녹색 LED 구현이 가능하게 되었다. 현재, InGaN의 In 조성을 조절함에 따라 적색에서 UV 영역에 해당하는 빛을 얻을 수 있다.

LED의 발광 파장은 반도체 물질의 종류와 조성비를 조절하여 제어되며 현재 상용화된 LED는 적외선에서 자외선 영역까지 다양한 파장을 갖는다. 이러한 고휘도, 고효율, 다양한 색깔의 LED는 이미 선진국 및 국내에서 대형 전광판 비상구등, 교통신호등, 승용차/트럭 각종 표시등에 응용되고 있다. LED 는 작고, 가볍고, 내구성이 크며, 수명이 길어 향후 한층 더 광범위한 영역에서 응용되어질 것이며 많은 전문가들은 우리가 일상생활에서 접하는 기존 광원을 결국은 대체할 것으로 전망하고 있다.

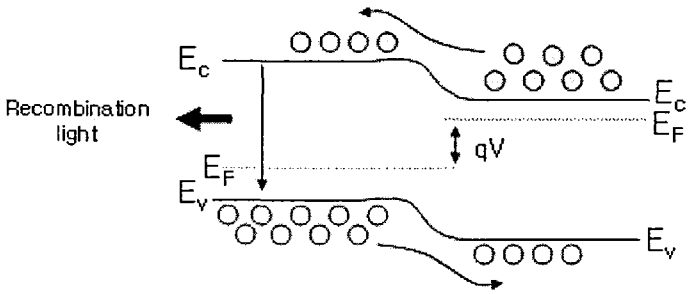


Fig. 2. Injection of minority carriers in a forward-biased p-n junction leading to spontaneous emission of photons.

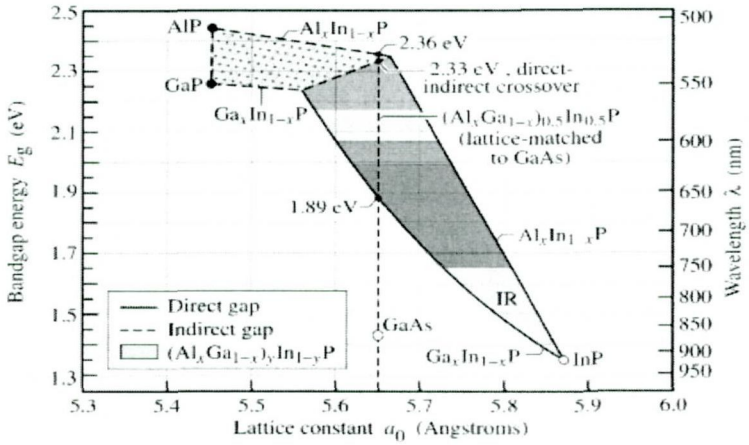


Fig. 3. The bandgap versus lattice constant of various semiconductors.

2.2 LED의 특징

단파장의 발광 Diode는 이하에 나타내는 것과 같은 뛰어난 특징을 갖고 있다. 환경 친화적이고 안전한 "새로운 고체소자 조명광원"으로서 21세기를 향하여 그 실용화가 기대된다.

1) 광변환 효율이 높기 때문에 소비전력이 매주 적다. (전구의 1/8, 형광등의 1/2)

2) 작은 광원이기 때문에 소형화, 경량화를 할 수 있다.

3) 수명이 길다. (50 ~ 100 배)

4) 열적, 방전적 발광이 아니기 때문에 예열시간이 불필요하여 점등, 소등 속도가 매우 빠르다. (200만 배)

5) 점등회로, 구동장치 등의 기구를 간이로 할 수 있어 부속품이 적게 든다.

6) Gas, Filament가 없기 때문에 충격에 강하고 안전하다.

7) 안정적인 직류 점등방식을 위한 소비전력이 적고, Pulse동작이 가능하며 또한 시신경의 피로를 저감할 수 있다.

8) Intelligent 조명광원이다.

9) 반영구적인 사용이기 때문에 쓰레기를 방생시키지 않는다.

10) 형광등과 같은 수은, 방전용 Gas를 사용하지 않기 때문에 환경 친화적인 조명광원이다.

제 3 절 TLM (Transmission Line Method)

3.1 TLM을 이용한 오믹 접촉 비저항

일반적으로 금속/반도체의 접촉저항을 구하는 방법에는 전원회로와 접합패드의 형태에 따라서 2단자, 3단자, 복수단자법 등이 있으나, 가장 보편적인 방법은 3단자법과 복수단자법을 절충한 Shockley 방법이다. 이 방법에서는 그림 4와 같이 서로 다른 거리를 갖는 직사각형의 접촉패드를 표준사진식각공정이나, 쉐도우 마스크(Shadow mask)를 사용하여 제작하고, 패드간 거리의 함수로써 전체저항을 측정하여, 이로부터 접촉저항을 구하는 방법이다. 그림 4의 수평형 구조에서 거리 d를 갖는 금속전극간의 전체저항 R_T는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_T=\rho(\frac{d}{A})+2R_c=\rho(\frac{d}{ZX})+2R_c \quad \cdots\cdots 3\text{-}1$$

여기서 R_c는 금속/반도체간의 접촉저항을 나타내며, 또한 ρ/X는 면저항(sheet resistance) R_s로서 나타낼 수 있으므로 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_T=R_s(\frac{d}{Z})+2R_c \quad \cdots\cdots 3\text{-}2$$

따라서 전체저항을 금속전극간의 거리 d의 함수로서 나타내면 d=0일 때 Y-절편의 1/2 값으로서 접촉저항을 구할 수 있다. 한 편 접촉비저항 ρ_c는 R_T=0에서 d의 교차점으로부터 구한 L_T(Transfer length)를 통해 구할 수 있

다. Shockley에 의한 접촉저항 R_c는 다음과 같다.

$$R_c=\frac{\sqrt{\rho_s\rho_c}}{Z}\coth\left(\frac{L}{L_T}\right)=\frac{\rho_c}{L_T Z}\coth\left(\frac{L}{L_T}\right) \cdots\cdots 3\text{-}3$$

여기서 $L_T=\sqrt{\rho_c/\rho_s}$ 로 나타낼 수 있으며, 금속에서 반도체 혹은 그 반대의 방향으로 흐르는 전류에 의한 전압의 크기가 최대크기의 1/e이 되는 때의 길이를 나타낸다.

위 식은 L_T의 크기에 따라서 다음의 두 가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

$$\text{즉,}\ R_c\approx\frac{\rho_c}{L\cdot Z}\quad (L\leq 0.5L_T) \cdots\cdots 3\text{-}4$$

$$R_c\approx\frac{\rho_c}{L\cdot Z}\quad (L\geq 0.5L_T) \cdots\cdots 3\text{-}5$$

첫 번째 경우는 유효접합면적(effective contact area)이 실제 접합면적(actual contact area) A=LZ와 같은 경우이다. 그러나 두 번째 경우는 유효접합 면적이 전극의 폭 Z와 transfer length L_T의 곱으로서 나타나며, 이것은 유효접합 면적이 실제접합면적보다 작다는 것을 의미한다. 이러한 경우에는 전극면에서 국부적인 전류밀도의 상승을 가져오기 때문에 전극의 degradation에 의한 소자의 신뢰성의 문제를 일으킬 수 있으며 극단의 경우에는 접합면이 타 들어가는 경우도 발생할 수 있다.

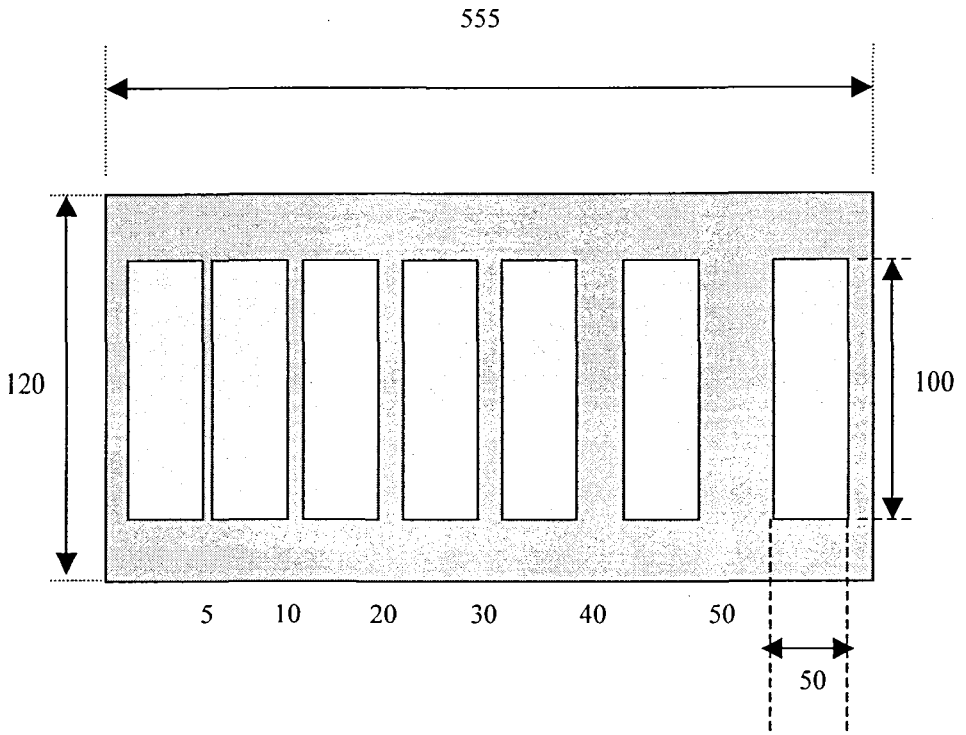


Fig. 4. Lateral structures of test patterns for the measurement of specific contact resistance.

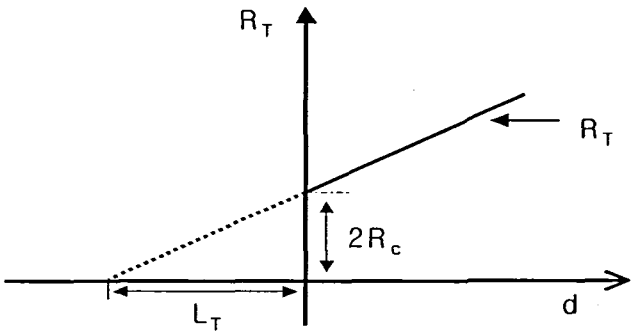


Fig. 5. Correlation between transfer length and total resistance at TLM.

제 4 절 Hall effect

4.1 Hall effect의 원리

자기장내에서 움직이는 전하는 힘(Lorentz force)을 받는다. 힘을 받은 전하는 힘의 방향으로 움직이며, 박막, 도선 등 제한된 크기의 물체 내에 있는 전하의 경우에는 전자뿐이지만, 반도체물질의 경우에는 type에 따라서 전자나 정공(전자가 있을 자리에 빠져 있는 것을 마치 +e의 양의 전하를 갖는 입자로 간주)일 수 있다. 전류와 자기장에 수직한 벽면의 전위차를 측정하며 그 극성으로부터 전하의 종류를 알 수 있다.

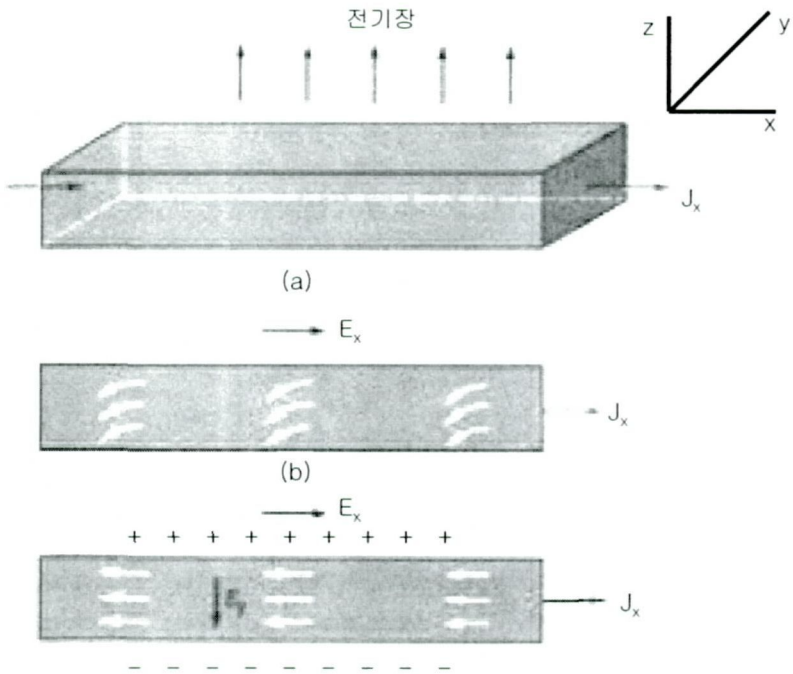


Fig. 6. Diagraming of arrangement for Hall effect measurement.

전하의 분포가 균일했던 상태에서 벗어나 한 쪽에 쌓이게 되면, 이들 전하에 의해 내부 전장이 생겨나 더 이상의 전하가 쌓이는 것을 방해한다. 결국 충분한 시간(10^{-6} ~ 10^{-11} s)이 지나면 평형상태에 도달하게 되는데, 이 때 전장 E_y에 의한 전기력과 로렌츠힘은 같은 크기(방향은 반대)가 된다. 이로부터 생겨난 전위차를 홀 전압이라고 부르며, 다음과 같이 주어진다.

$$V_H = E_g a \quad \cdots\cdots \text{4-1}$$

이고, 전하 q에 미치는 전기장의 크기는

$$F_e = q \cdot E_g \quad \cdots\cdots \text{4-2}$$

이며, 로렌츠 힘은 크기가

$$F_m = q \cdot v_d B \quad \cdots\cdots \text{4-3}$$

이므로 홀 효과에 의한 내부 전기장은

$$E_y = v_d B \quad \cdots\cdots \text{4-4}$$

또, 홀 전압은

$$V_H = v_d B \cdot d \quad \cdots\cdots \text{4-5}$$

가 된다. 홀 전압을 측정하고 자기장(B)과 y-방향으로의 크기(박막의 두께) d를 알면 전하의 드리프트 속도 v_d를 알 수 있다. 또, 드리프트 속도와 전류밀도(단위 면적당의 current) J 사이에는

$$J = nqv_d \quad \cdots\cdots \quad 4\text{-}6$$

의 관계가 있어, 홀 전압의 측정으로부터 홀 이동도의 밀도(즉, 단위 부피당 존재하는 전하 carrier의 수) n을 알아낼 수 있다.

또, 식 4-5와 식 4-6에서 홀 전압이 자기장의 크기와 전류에 비례하는 것을 알 수 있다. 만약 전류와 자기장이 서로 수직하지 않고 경사져 있는 경우에는 수직한 자기장 성분이 유효하다. 즉, 홀 전압을 전류와 자기장의 사이각 Θ에 sinΘ로 의존한다.

4.2 Van der Pauw law

모양이 일정치 않은 시료의 전기 전도도 및 홀 계수를 측정하는 방법으로서, van der Pauw가 발전시킨 conformal mapping에 이론적인 근거를 두고 있다. 그는 다음의 4개 조건이 충족된다면 전류의 pattern에 대해 모르고서도, 임의의 모양과 일정한 두께를 가진 시료의 resistivity, carrier concentration, 그리고 mobility가 결정될 수 있다는 것을 보였다.

1) contact이 sample의 경계에 있다.

2) contact이 충분히 작다.

3) sample의 두께가 일정하다.

4) sample의 표면이 singly connected되어 있다(sample의 내부에 빈 공간이 없다).

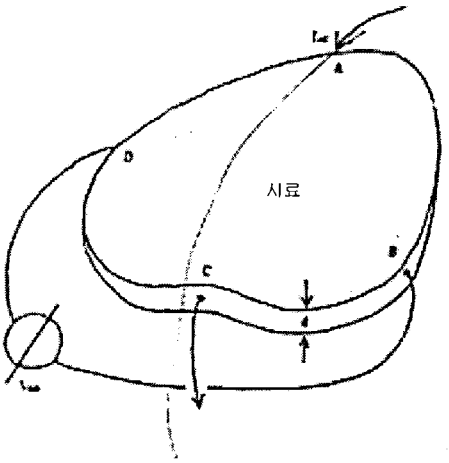


Fig. 7. Ohmic contact A, B, C, D.

그림 7에서처럼 두께가 d인 시료의 가장자리인 임의의 곳에 ohmic contact A, B, C, D를 취한다. A에서 B로 전류 I_{AB}를 흘렸을 때, C와 D간의 전위차가 V_{CD}이면 전류와 전위차의 비를

$$R_{ABCD}=[\frac{|V_{CD}|}{I_{AB}}] \cdots\cdots 4\text{-}7$$

라 하고 같은 방법으로 B에서 C로 전류 I_{BC}를 흘렸을 때 C와 A간의 전위차를 V_{CA}로 하면 그 비가

$$R_{BCDA}=[\frac{|V_{CD}|}{I_{BC}}] \cdots\cdots 4\text{-}8$$

로 된다. 이 비와 시료의 비저항 ρ사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\exp(-\frac{1}{4}\frac{d}{\frac{1}{2}}R_{ABCD})+\exp(-\frac{1}{4}\frac{d}{\frac{1}{2}}R_{BCDA})=1 \cdots\cdots 4\text{-}9$$

이 식은 해석적으로 풀리지 않으나 컴퓨터를 사용하여 ρ를 구할 수 있다.

4.3 Hall 계수와 Hall 이동도 측정법

Hall 계수를 측정할 때에는 그림 7과 같이 자기장 없이 먼저 Z에서 C로 전류 I_{AC}를 흐르게 하고 B와 D간의 전위차 V_{BD}를 측정하여 그 비

$$R_{ABCD}=[\frac{|V_{BD}|}{I_{AC}}] \cdots\cdots 4\text{-}10$$

를 구한다. 다음에 시료에 수직으로 자기장 B를 걸었을 때 B와 D간의 전위차를 V'_{BD}라 하여 그 비

$$R^{J}_{ABCD}=[\frac{|V'_{BD}|}{I_{AC}}] \cdots\cdots 4\text{-}11$$

를 구한다. 여기서

$$\triangle R_{ABCD}=R^{J}_{ABCD}-R_{ABCD} \cdots\cdots 4\text{-}12$$

라 하면

$$R_{H}=\frac{d}{|B|_{p}}\triangle R_{ABCD} \cdots\cdots 4\text{-}13$$

이 되어 Hall 계수 R_H를 구할 수 있다. 그리고 Hall 이동도 μ_H는

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{|B|_\rho} \triangle R_{ABCD} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad 4\text{-}14$$

로 표시된다.

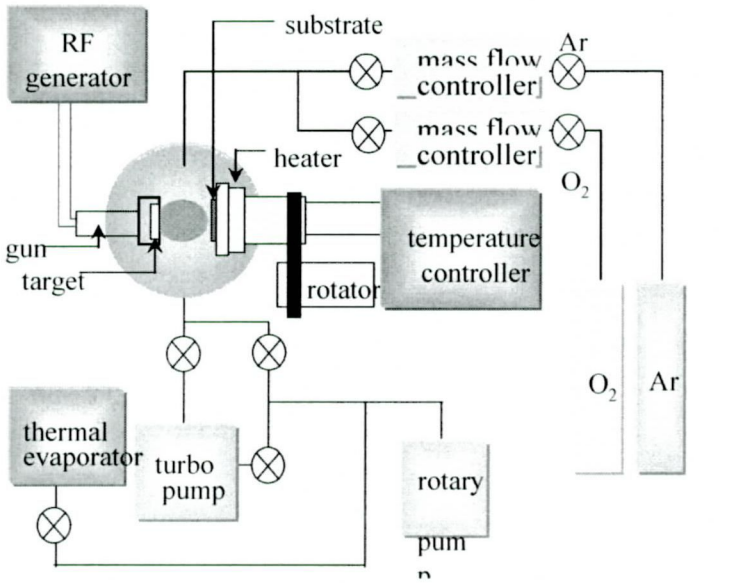
4.4 RF-Magnetron Sputtering 장치

RF-magnetron sputtering은 글로우 방전 (glow discharge)을 이용한 과정이며, 초기의 sputtering 시스템은 직류(DC) 글로우 방전이었다. DC 글로우 방전은 직류 전장 속에서 가속된 전자를 이용해 플라즈마(plasma)를 만들고자 하는 원자와 충돌시키는데, 이 과정에서 원자는 이온화되고, 따라서 이온, 전자, 그리고 원자가 공존하게 된다. 이러한 상태를 글로우 방전 또는 플라즈마라고 한다. 따라서 글로우 방전을 유지하게 되는 전장이 필요하게 되며, 전자는 양극 쪽으로 가속되고, 반대로 양이온은 음극 쪽으로 가속 된다. 따라서 음극 쪽에 증착 시키고자 하는 물질을 두면 sputtering이 일어나서 원자나 혹은 이온이 튀어나와 양극 쪽의 기판(substrate)에 증착이 일어나게 된다. 이것이 바로 DC sputtering의 원리이다. 먼저 이온이 입사되면 target 원자가 튕겨져 나오며, 동시에 입사된 이온은 반사되어져 나오거나 target물질 안으로 들어가게 된다. 만약 입사 된 이온이 target속으로 들어가게 된다면 표면층에 많은 구조적 재배열이 일어나게 된다. 그리고 입사된 이온에 의해 2차 전자(secondary electron)가 나오게 된다. 그리고 이 2차 전자는 다시 글로우 방전의 유지에 이용된다. 그런데 target 물질이 전도체인 경우에는 DC 글로우 방전을 이용하는 것이 가능하지만 절연체일 경우에는 DC 글로우 방전을 이용하는 것이 어렵다. 그 이유는 다음과 같다.

절연체의 경우, 절연체가 전기적으로 고립된 probe와 같은 역할을 하므로 floating surface에서 sheath가 형성되는 것과 비슷한 일이 일어난다. 일단 DC 글로우 방전이 형성되면 음극으로 작용하는 target에 양이온이 부딪히게 된다. 그런데, 양이온은 표면에서 전자를 받아들이게 되어 중성화되는데. 절연체의 경우 전압을 걸어주더라도 전자를 이동시킬 수 없어

target의 표면은 점점 floating potential까지 charge up이 되는 것이다. 결국에는 글로우 방전을 유지 할만한 power를 전달할 수 없어서 글로우 방전은 꺼지고 만다.

그런데, RF 방전을 이용하면 절연체 표면에 음극의 자체 bias가 형성된다. 즉, 양이온의 무게가 전자의 무게보다 무거우므로, 전자의 이동 속도가 양이온의 이동속도보다 빠르다. 따라서 RF로 교류 field를 음극 쪽에 가하게 되면 상대적으로 이동 속도가 빠른 전자가 target 표면에 charging이 되고, 음극 쪽에 DC offset이 형성되어 지속적으로 글로우 방전이 일어날 수 있다. 효율 면에서는 DC 방전이 100 mTorr에서 일어나는 반면 AC를 쓸 경우에는 10 mTorr에서 플라즈마를 일으킬 수 있으므로 효율을 증가시킬 수 있다. 또한 target표면에 전자의 밀도를 높이게 되면 그 만큼 양이온이 target을 때리게 되는 에너지와 개수가 증가한다. 따라서 target표면에 전자를 가두어 두기 위한 목적으로 자석을 이용하면, target표면에 helical motion을 하면서 움직이며 전자의 밀도가 증가하게 된다. 이와 같이, AC 전장과 자기장을 이용하는 sputtering 방법을 RF-magnetron sputtering이라고 하고 그림 8에 RF-magnetron sputter를 도식화하였다.



Schematic diagram for RF sputtering

Fig. 8. A schematic of the RF-magnetron sputtering system.

제 3 장 실험 방법

제 3.1 절 LED 소자 제작

3.1.1 Target 제작

스퍼터링용 Al과 Ga이 도핑된 ZnO target은 순도 99.99%(4N)의 ZnO와 Al_2O_3, Ga_2O_3를 분말재료로 사용하여 표 2와 같은 성분조성비율로 혼합하고 핸드밀(hand mill-막자사발에 손으로 직접 교반하는 작업)을 실시하였다. 분말 속에 포함된 습기와 불순물을 제거하기 위해서 1차 하소작업을 하였고 전기로에서 800℃, 4시간 동안 처리한 온도 프로파일을 그림 9에 나타내었다. 그 후에 또 다시 핸드밀을 실시하고 얻어진 분말을 3인치 규격에 맞는 몰리브덴 몰드를 준비하여 압착기를 이용해 10톤의 압력으로 압착을 하였다. 그리고 그림 10에서처럼 1300℃의 공기 중에서 약 4시간 소결처리를 한 뒤 노냉하였다.

Table 2. Composition of Al and Ga co-doped ZnO thin films.

Sample Name	Composition (wt.%)		
	ZnO	Al	Ga
$Zn_{0.989}Al_{0.01}Ga_{0.001}$	98.9	1	0.1
$Zn_{0.986}Al_{0.01}Ga_{0.004}$	98.6	1	0.4
$Zn_{0.982}Al_{0.01}Ga_{0.008}$	98.2	1	0.8

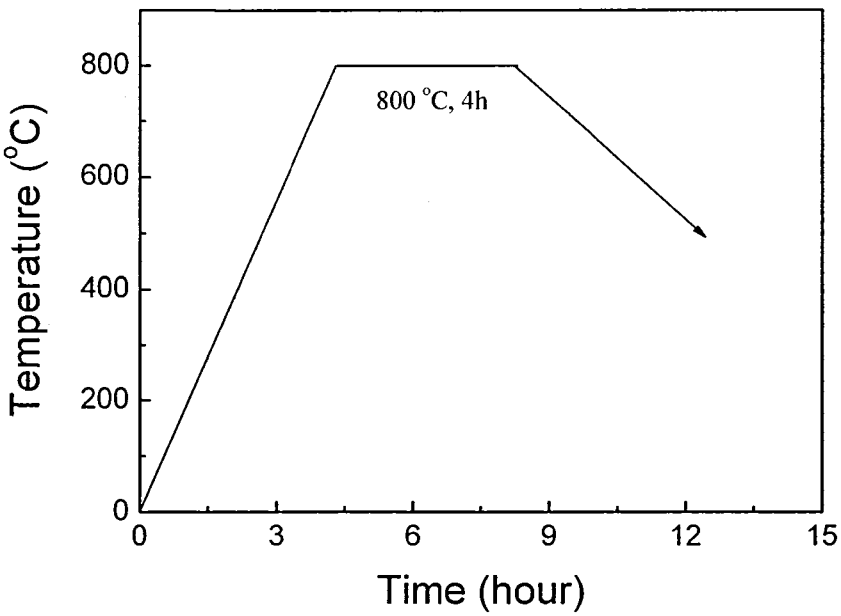


Fig. 9. Heat treatment process for ZnO target Calcination.

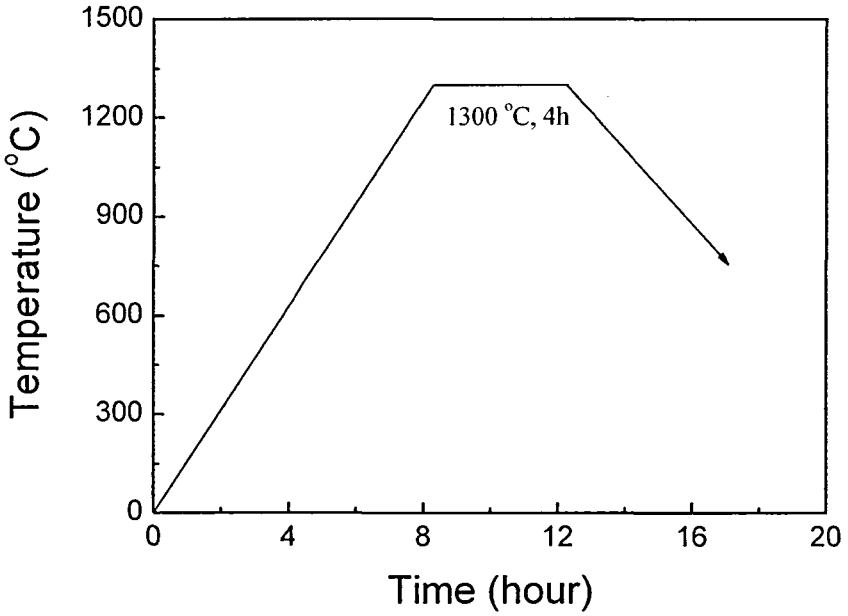


Fig. 10. Heat treatment process for ZnO target Sintering.

3.1.2 기판세척과정

기판표면의 불순물과 산화막은 박리, 핀홀 등의 현상과 막의 부착성을 저하시키므로 기판의 불순물들을 제거하기 위하여 (0001) Al_2O_3 기판을 BOE(buffed oxide echant)와 DI(deionized) water로 세척 한 다음 N_2 gun으로 blowing해서 표면처리를 하였다. 세척된 기판은 현미경을 이용하여 기판 표면에 이물질이 남아 있는지 확인하고 그 후 바로 증착 공정을 수행하였다.

3.1.3 ZnO 증착

ZnO 박막은 (0001) Al_2O_3 기판 위에 RF-magnetron sputtering 시스템을 이용하여 증착하였다. ZnO target은 Al과 Ga이 동시 도핑된 ZnO를 사용하였고 반응가스인 Ar(Argon)은 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 챔버 내로 주입하였다. 박막 증착 시 초기 진공은 $1x10^{-6}$ Torr 이하로 유지하였으며, 5 mTorr에서 증착하였다. 기본적인 증착변수를 표 3에 나타내었다.

Table 3. Deposition parameter of ZnO thin films.

기판	(0001) Al_2O_3
기판온도	상온
sputtering 가스	Ar 가스
기판과 target의 간격	40 mm
초기 진공도	$1x10^{-6}$ Torr
증착 진공도	$5x10^{-3}$ Torr
RF 입력 전력	120 W

3.1.4 에칭

Al_2O_3 기판 위에 Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 도핑 된 ZnO를 증착한 후 에칭률을 알아보기 위한 실험을 실행하였고 그림 11에 도식화하였다. PR(photoresist)은 AZ5214를 사용하여 코팅하였다. 코팅 후 95 ℃에서 1분 동안 건조시키고 mesa 마스크를 사용하여 6.2 초 동안 노광하였다. 노광 되지 않은 부분의 PR을 지우기 위해 CD 30 용액을 사용하여 45 ~ 60 초 동안 PR이 지워질 때까지 현미경으로 관찰하면서 확인한 뒤 DI water에 충분히 세척하였다. ZnO 에칭 용액으로는 BOE, HCl, HF 용액 중에 가장 적합한 것으로 선택하였는데 그림 12에 에칭 용액에 따라서 에칭 되는 모습을 나타내었다. 먼저 BOE는 NH_4와 HF를 6:1로 혼합한 것으로 ZnO를 에칭하는 동안 별모양의 패턴이 잔존하여 완벽하게 에칭 되지 못하는 단점이 있었다. HCl의 경우는 산성이 강해서 HCl:DI water를 1:40의 비율로 희석하여 에칭에 사용하였는데 패턴의 모양이 균일하게 에칭 되지 않는 단점이 있었다. HF 용액 또한 HCl 용액과 마찬가지로 희석하여 사용하였는데 빠른 에칭 속도로 인해 에칭 조절이 어려운 단점이 있었지만 세 가지의 에칭 용액 중에서 원하는 패턴 모양을 유지하는데 가장 적합하여 HF 용액을 에칭 용액으로 선택하였다. 에칭 후 남은 PR은 EKC 830 용액으로 제거한 뒤 DI water를 사용하여 충분히 세척하였다.

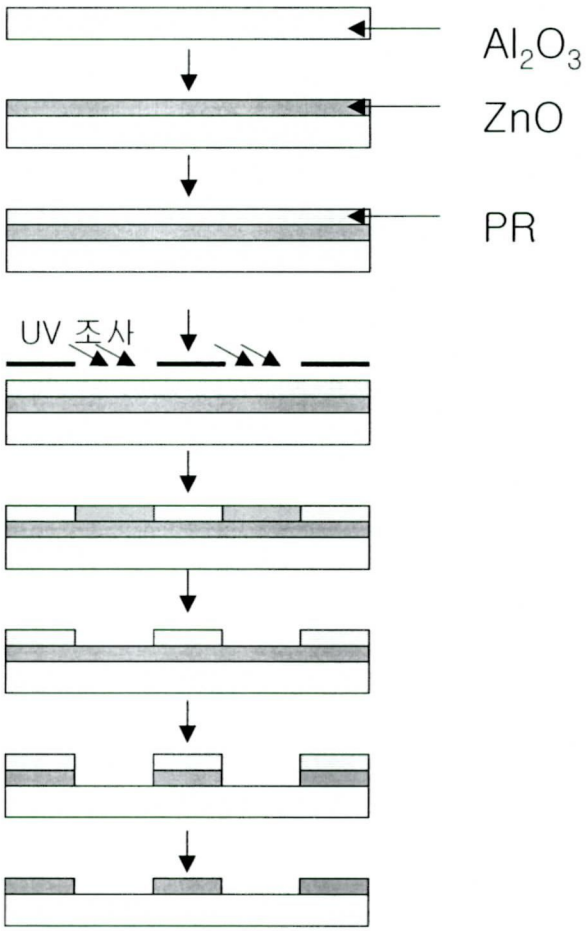


Fig. 11. Etching process of ZnO patterns.

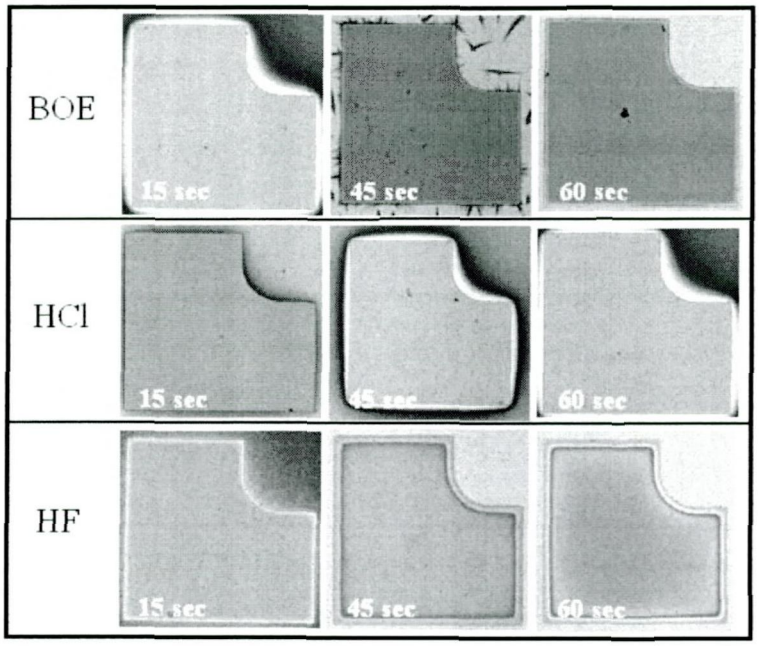


Fig. 12. Etching images as a function of echant type.

3.1.5 금속전극 증착

n,p-metal 증착을 위해 e-beam evaporation 장비를 사용하여 Cr을 200 Å, Ni을 250Å 그리고 Au를 5000Å 두께로 증착하였다.

3.1.6 Lift-off

Lift-off란 박막 증착 이전에 PR patterning을 하고 그 위에 박막 증착을 한 후 PR을 제거함으로서 패턴을 형성시키는 방법을 말한다. PR을 용제에 녹이는 과정에서 PR 위에 증착된 박막은 제거되고 기판 위에 증착된 박막만이 남게 되는 것이다. 증착한 금속 박막을 부분적으로 제거하여 최종적인 형태의 패턴을 완성하였다. 금속 박막의 에칭을 위해서 50℃로 가열 된 아세톤에 10분 동안 담근 후 아세톤으로 blowing을 한 다음 DI water에 충분히 세척하였다.

3.1.7 후열처리 조건

Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 도핑된 ZnO의 접촉저항 특성 향상을 위해 후열처리를 시행하였다. 후열처리는 400℃ ~ 600℃의 범위에서 온도를 변화시키며 1분간 N_2 분위기에서 행하였다. 열처리 공정 중에 산소에 대한 노출을 막기 위해 filtering을 통해 얻어진 고순도 N_2를 사용하였다.

제 3.2 절 특성 분석

3.2.1 전기적 특성 조사

Al과 Ga을 동시 도핑한 ZnO 박막의 전기적 특성을 측정하기 위해 van der Pauw 방법을 이용하였다. 시료는 박막을 5mm × 5mm 크기의 정사각형으로 자르고 네 가장자리를 Indium으로 soldering하였고 전기적 특성을 측정하기 위해서 Hall Effect Measurement System (Accent Optical Technologies, HL 5500PC)을 사용하였다.

32.2 광학적 특성 조사

Al과 Ga이 동시 도핑 된 ZnO 박막의 광 투과도 측정은 HR-UV-VIS-spectrophotometer(Varian, Carry 500 Scan)를 사용하여 200 nm ~ 800 nm의 파장 영역에서 측정하였다.

3.2.3 구조적 특성 조사

시편의 표면 형상과 결정 성장을 관찰하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscope, Hitach, S-4700)을 사용하여 박막의 미세한 표면 조도 및 표면 형상을 구하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 전기적 특성

Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 도핑 된 ZnO 시편 세 가지 종류의 면저항과 저항을 측정한 결과를 각각 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 상온에서 400℃까지 범위에서는 큰 변화가 없다가 400℃ 이상의 온도에서 저항이 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 열처리 온도 증가에 따라 저항이 증가하는 이유는 산소 공공이나 입자 크기, 혹은 Al, Ga과 ZnO의 용해도에 따른 과잉 Ga에 의한 결과로 판단되어진다. 후열처리 온도가 증가하면 입자 크기가 증가하게 되고, 열처리가 이루어지는 분위기가 진공이 아닌 질소 분위기이기 때문에 산소 공공에 의한 영향도 더 높아진다. 그리고 Ga 조성이 높아질수록 ZnO 내부에 Ga이 전부 용해되지 못하고 과잉되기 때문에 입자 내부 혹은 입계에 Ga이 존재하게 되고 그 결과 저항이 높아지게 된다. 열처리 온도가 증가함에 따라 저항이 증가하는 결과로 보아 입자 크기나 산소 공공에 의한 영향은 미비하고 과잉 Ga에 의한 영향이 크다고 생각된다. 그리고 ZnO의 상변화가 550℃에서 일어나기 때문에 저항이 낮아지는 것으로 생각되고 550℃ 부근에서 ZnO의 특성에 대한 연구가 더 필요하다 판단된다.

홀 이동도와 전자 농도를 나타내는 그래프를 그림 15와 16에 나타내었다. 열처리 온도가 증가함에 따라 과잉 Ga이 입자 내부 혹은 입계에 존재하게 됨으로 홀이 이동하는 경로에 장애가 되고 홀 이동도는 감소한다고 생각된다.

Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 도핑 된 ZnO 세 가지 종류의 시편을 각각 400℃, 500℃, 550℃, 600℃에서 열처리 한 뒤 전기적 특성을 분석한

결과 각 열처리 온도 증가에 따른 경향성이 비슷한 것으로 보아 열처리 온도에 의한 영향이 있다고 생각된다.

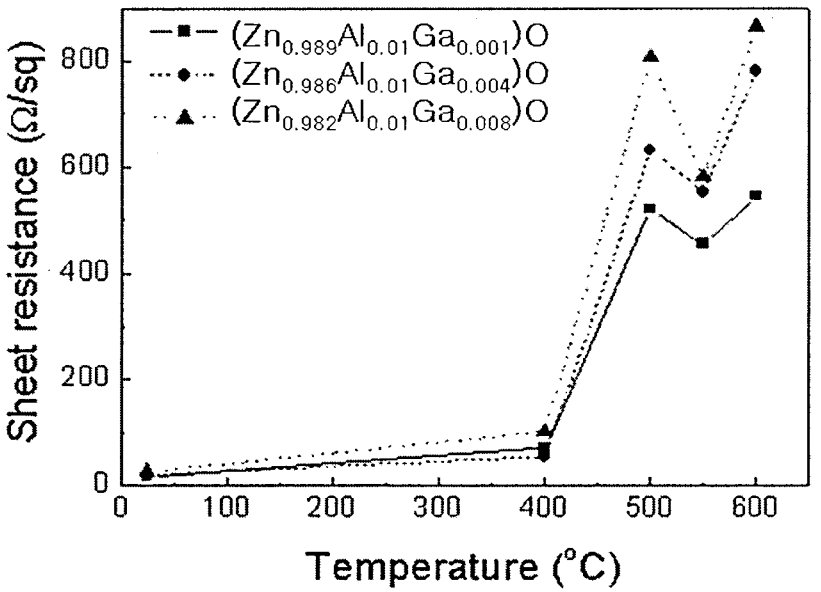


Fig. 13. Sheet resistance as a functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

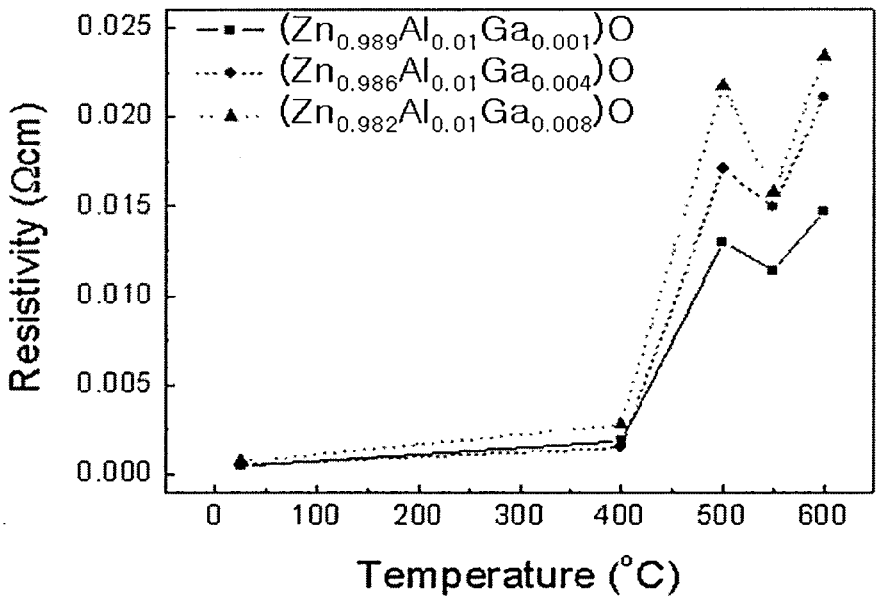


Fig. 14. Resistivity as a functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

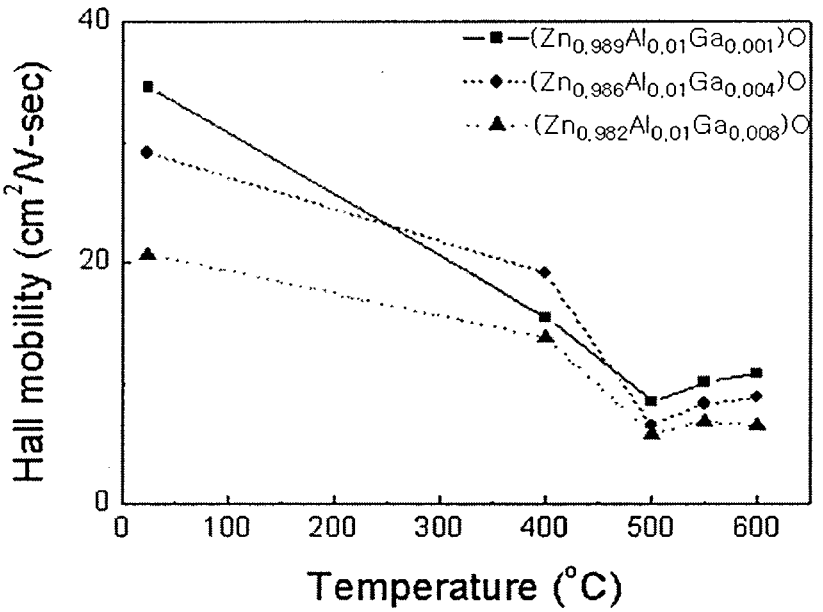


Fig. 15. Hall mobility as a functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

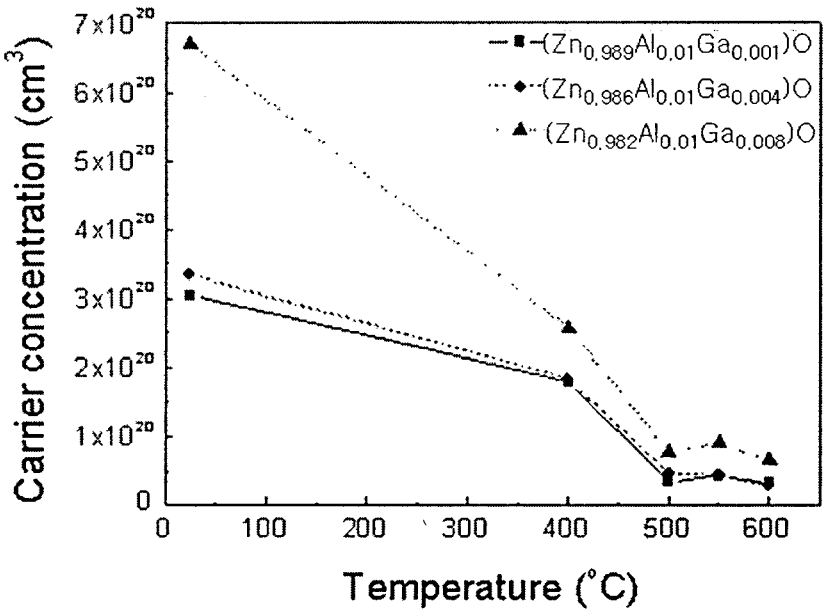


Fig. 16. Carrier concentration as a functions of RTA temperature for Al and Ga co-doped ZnO thin films.

4.2 구조적 특성

Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 도핑된 ZnO 세 종류의 시편을 상온, 400℃, 600℃에서 후열처리 하였고 SEM(Scanning Electron Microscope, Hitach, S-4700)을 사용하여 표면 형상을 조사하고 그 결과를 그림 20에 나타내었다. target 조성에 따른 큰 변화는 볼 수 없었으나 후열처리 온도 증가에 따른 입자 크기 변화를 확인할 수 있었다. 후열처리를 하지 않은 ZnO 시편과 400℃, 600℃에서 후열처리를 한 ZnO 시편의 SEM 사진을 보면 입자크기가 후열처리 온도 증가에 비례하여 증가하는 모습을 관찰 할 수 있다.

Al과 Ga을 도핑한 후 열처리한 ZnO 시편의 결정성을 평가하기 위하여 XRD rocking curve(X-ray diffractometer, X'pert PRO, PAnalitical)를 측정하였고 그 결과를 그림 21에 나타내었다. 후열처리 온도가 400℃, 600℃로 증가함에 따라서 피크의 강도도 증가하고 반치폭(FWHM, full width at half maximum) 또한 감소하는 것으로 보아 후열처리 온도 증가에 따라 결정성이 향상된다고 생각된다.

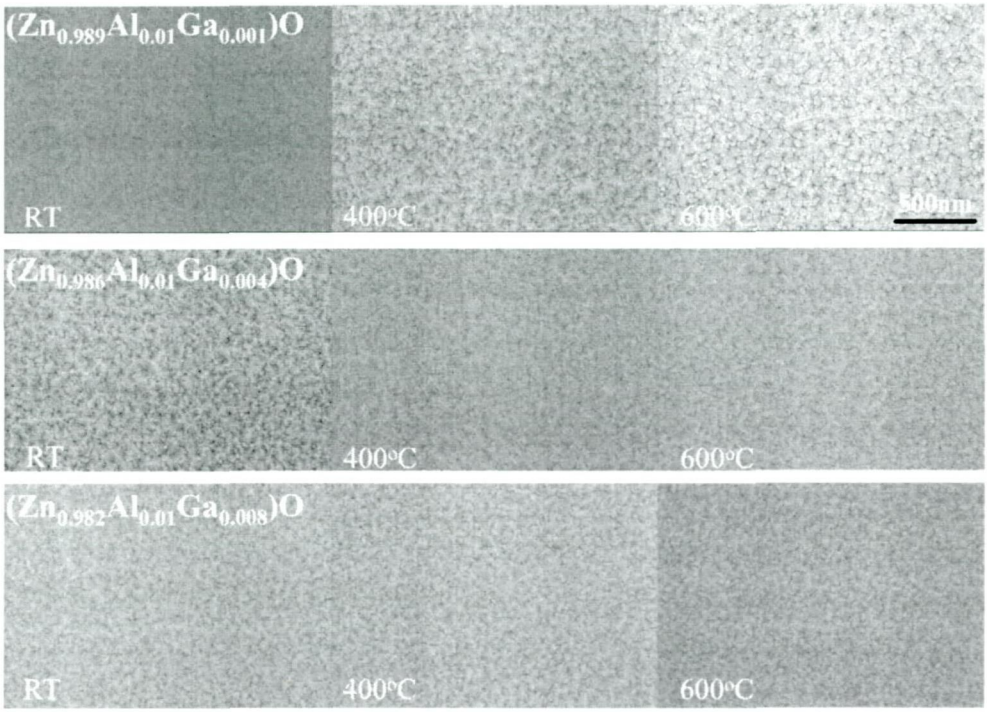


Fig. 20. SEM micrographs showing surface structure and grain growth behavior of Al and Ga co-doped ZnO thin films on Al_2O_3 according to RTA temperature.

4.3 광학적 특성

Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 증착 된 ZnO의 200 ~ 800 nm 파장대의 투과도를 HR-UV-VIS-spectrophotometer(Varian, Carry 500 Scan)를 사용하여 그림17, 그림 18, 그림 19에서 나타내었다. 그리고 표 4에 460 nm 파장 영역에서 target 조성이 각각 다른 시편의 투과도를 나타내었다.

대부분의 박막들은 400 nm 이상의 파장 영역에서 90 % 이상의 평균 투과율을 나타내고 있으며 그 이하의 파장 영역에서는 투과율이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 투과율은 두께에 따른 영향이 있으므로 본 실험에서는 각 기판의 두께를 270 nm로 최적화한 뒤 투과도 측정을 실시하였다. ZnO의 투과도 측정 결과 target의 조성 변화에도 가시광 영역에서 90 % 이상의 투과도를 나타내었다. 이것은 Ni/Au의 투과도 70 %와 비교하였을 때 20 % 이상 향상되었다는 것을 알 수 있다. 그리고 일반적으로 ZnO 투명전극은 가시광 영역에서의 응용은 가능하였으나 ZnO의 투과도가 400 nm 이하에서는 70% 이하로 현저히 낮아지기 때문에 자외선 영역에서의 응용이 어렵다고 알려져 있다.[30] 하지만 본 실험에서 ZnO에 Al과 Ga을 도핑한 target을 사용한 결과 자외선 영역의 380 nm에서도 85 % 이상의 투과도를 나타내어 UV-LED에 적용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

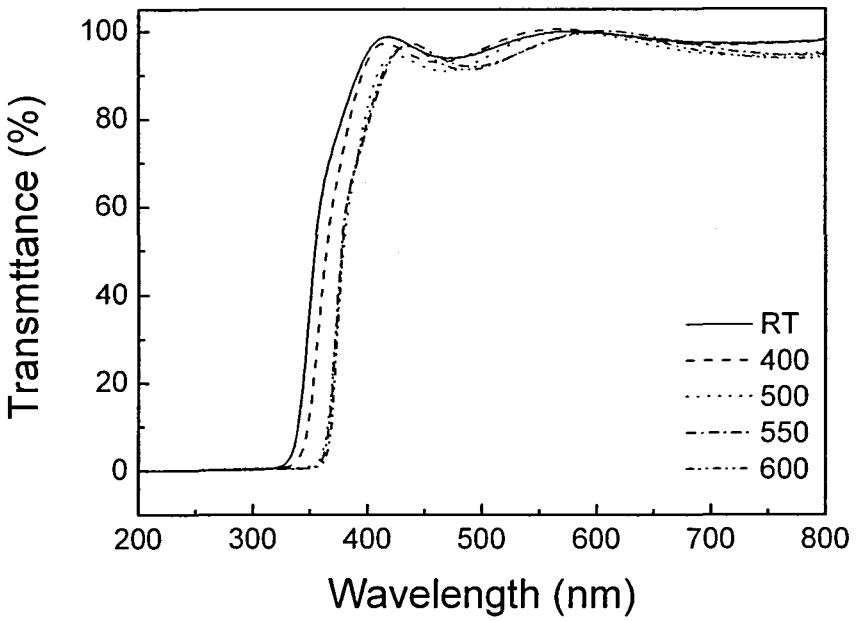


Fig. 17. Optical transmittance spectra for Al and Ga co-doped ZnO thin films deposited using $Zn_{0.989}Al_{0.01}Ga_{0.001}$ target.

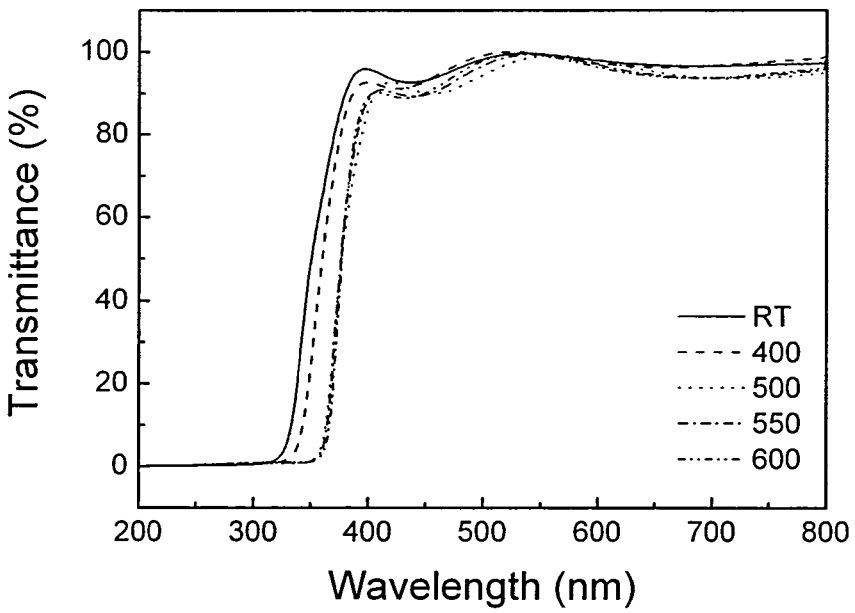


Fig. 18. Optical transmittance spectra for Al and Ga co-doped ZnO thin films deposited using $Zn_{0.986}Al_{0.01}Ga_{0.004}$ target.

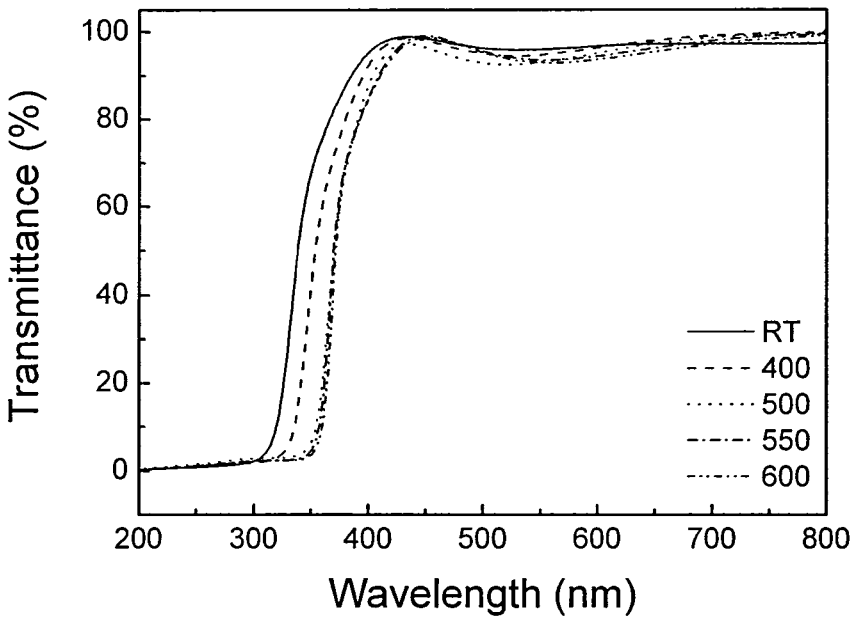


Fig. 19. Optical transmittance spectra for Al and Ga co-doped ZnO thin films deposited using $Zn_{0.982}Al_{0.01}Ga_{0.008}$ target.

Table 4. Transmittance of Al and Ga co-doped ZnO thin films.

	RT	400℃	500℃	550℃	600℃
$(Zn_{0.989}Al_{0.01}Ga_{0.001})$	94.2	92.9	91.1	94.5	93.3
$(Zn_{0.986}Al_{0.01}Ga_{0.004})$	94.0	94.4	90.0	90.7	91.6
$(Zn_{0.982}Al_{0.01}Ga_{0.008})$	98.0	97.4	95.6	98.7	98.5

(Ni/Au : 70% @460nm)

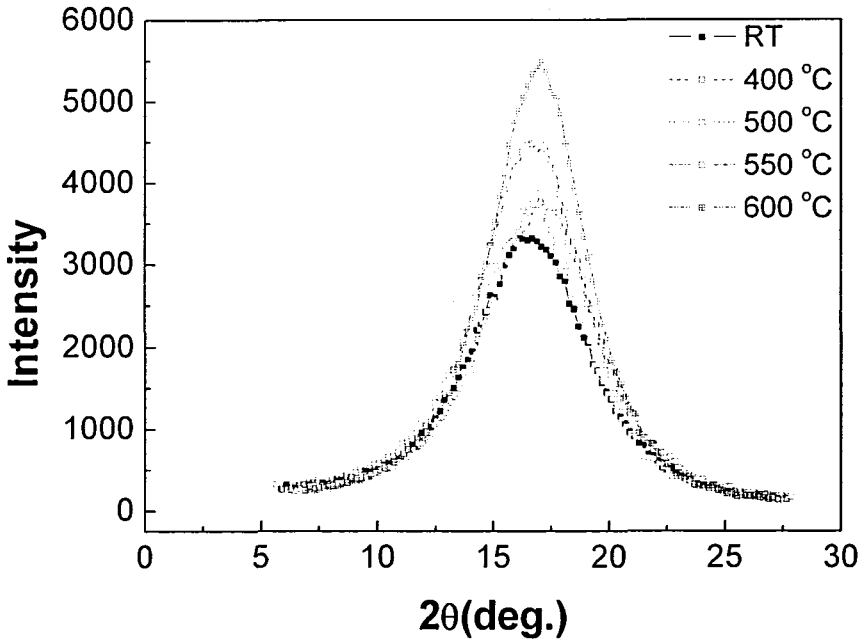


Fig. 21. XRD rocking curve spectrum of an Al and Ga co-doped ZnO thin films on Al_2O_3.

4.4 후열처리에 따른 접촉 저항

그림 22는 Al과 Ga이 서로 다른 조성으로 동시 도핑 된 ZnO 시편의 후열처리 온도에 따른 전류-전압 곡선이다. 접촉비저항의 측정은 5 μm, 10 μm, 20 μm, 30 μm, 40 μm 그리고 50 μm의 서로 다른 갭을 가진 ohmic 패드에서 측정한 저항 값을 갭에 대하여 plot한 다음 선형 외삽하여 값을 구하고 그 값을 그림 22 내에 나타내었다. 후열처리 온도가 400℃와 500℃ 일 때에는 전류-전압 곡선은 schottky 특성이 나타났고 550℃와 600℃ 온도로 후열처리를 한 경우 ohmic 특성이 나타났다. Ohmic 특성을 나타낸 두 시편의 접촉 비저항을 측정한 결과 후열처리 온도가 550℃일 때 4.5×10^{-2} Ωcm^2로 측정 되었고 600℃ 온도에서는 4.3×10^{-2} Ωcm^2로 측정 되어 고온에서 열처리한 경우 접촉 저항이 감소함을 알 수 있었다. 이 결과는 앞의 X-ray 결과와 비교하면 결정성이 향상되어 전체적인 저항값의 감소가 일어났다고 판단된다.

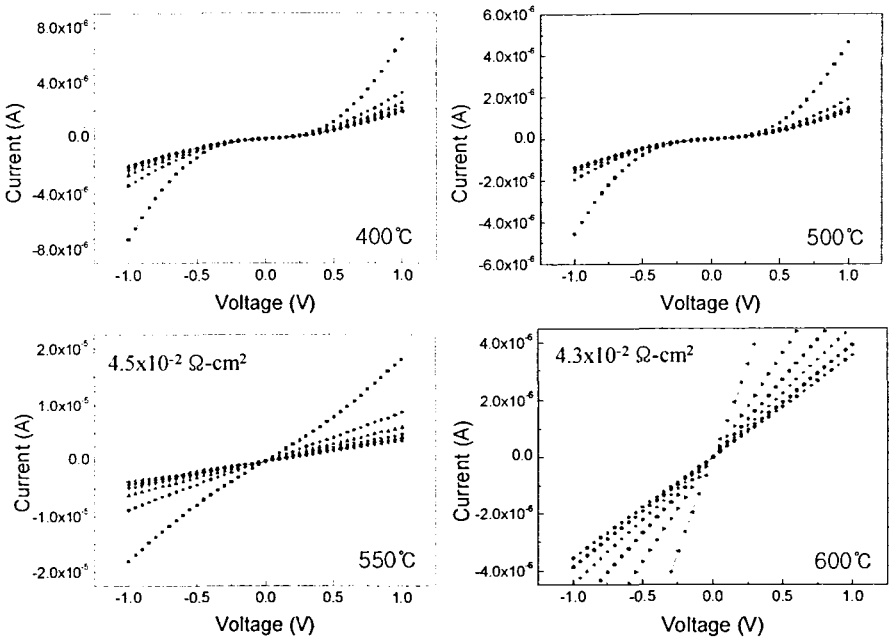


Fig. 22. I-V characteristic for Al and Ga co-doped ZnO on p-GaN.

4.5 소자 특성

LED용 투명전극으로 ZnO를 적용하여 소자 제작을 한 뒤 Forward voltage 값을 측정하여 그림 23에 나타내었다.

주입 전류를 0 ~ 100 mA까지 변환하면서 Forward voltage를 측정한 결과 LED용 전극으로 Ni/Au를 적용한 경우 20 mA의 전류를 흘려주었을 때 Forward voltage가 3.8 V로 가장 적은 값을 나타냈다. ZnO 투명전극을 사용한 경우 후열처리 온도에 따라서 각각 다른 값을 나타내었는데 400℃에서 후열처리 한 ZnO 시편의 경우의 측정값이 5 V로 측정되었다. 가장 낮게 측정 되었고 500℃, 550℃, 600℃에서 각각 7.1 V, 6.1 V, 5.8 V로 열처리를 한 경우 400℃에서 가장 낮은 Forward voltage 값을 나타내었다. 아직 Ni/Au 수준으로 적은 값은 아니지만 앞으로 특성 개선을 한다면 값이 낮아질 것으로 예상한다.

Al과 Ga을 동시 도핑 한 ZnO 시편의 발광특성을 알아보기 위해 EL(electroluminescence) Intensity 값을 측정한 결과를 그림 24에 나타내었다. 주입 전류를 0 ~ 100 mA까지 변화를 주면서 EL intensity 값을 측정한 결과 LED용 전극으로 Al과 Ga이 동시 도핑 된 ZnO 투명전극을 사용하여 20 mA의 전류를 흘려주었을 때 때 EL intensity 값이 Ni/Au를 전극으로 사용한 경우보다 높았다. 후열처리를 한 경우에는 열처리 온도에 따라서 각각 다른 값을 나타내었는데 400℃와 500℃에서 열처리 한 경우에는 Ni/Au와 비교했을 때 더 낮은 값을 나타내었지만 550℃와 600℃ 온도에서 열처리한 경우 EL intensity 값이 40 % 이상 더 높은 것을 확인 할 수 있다.

이러한 결과는 ZnO의 굴절률이 커서 빛이 나오는 영역이 Ni/Au에 비해 상대적으로 넓고, 가시광 영역에서의 투과도가 90 % 이상으로 높아서

추출효율이 증가하기 때문이라고 판단된다.

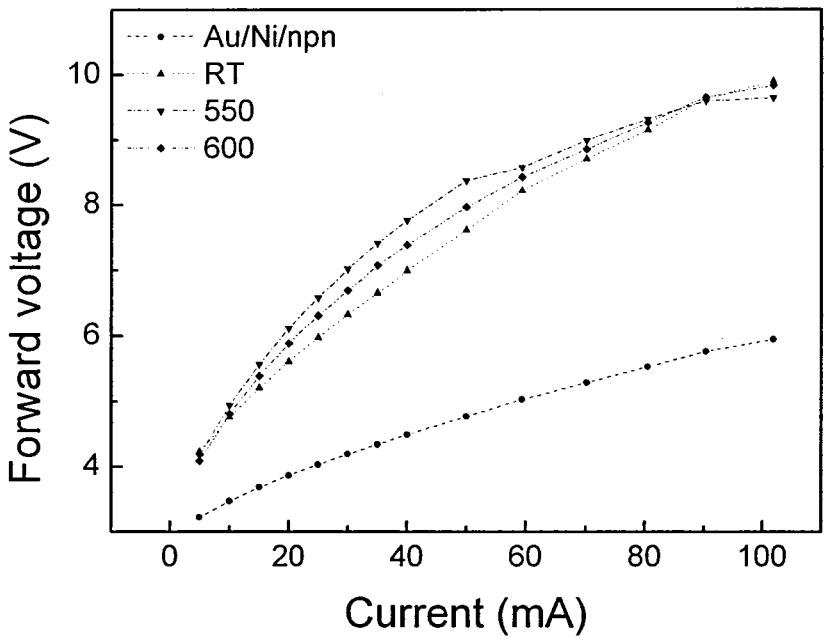


Fig. 23. Current dependence of forward voltage for Al and Ga co-doped ZnO thin films on a p-GaN.

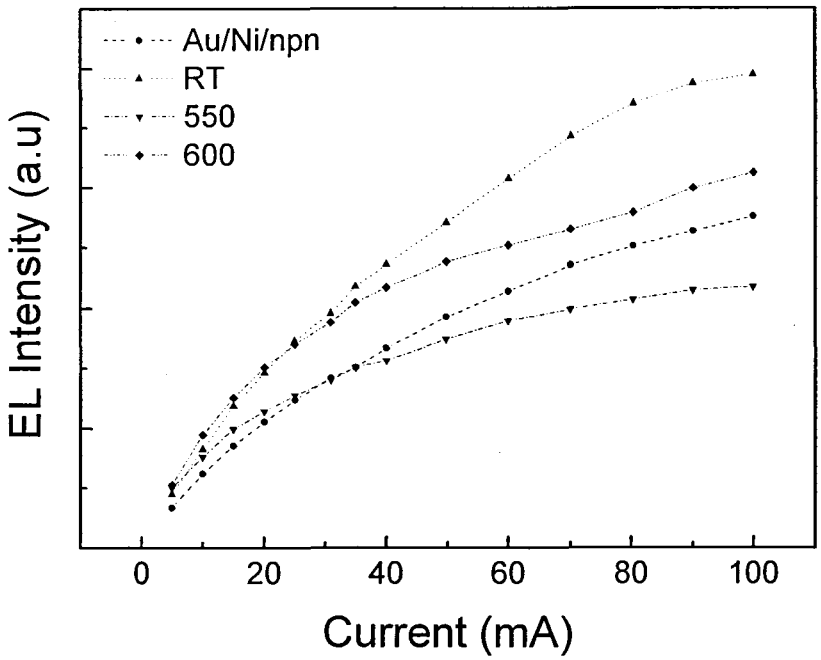


Fig. 24. Current dependence of EL(electroluminescence) intensity for Al and Ga co-doped ZnO thin films on a p-GaN.

제 4 절 결론

본 연구에서는 ZnO에 Al과 Ga을 동시 도핑하여 후열처리를 한 뒤 전기적, 광학적, 구조적 특징을 조사하였다. 그리고 ZnO와 p-GaN에 대한 접촉 비저항의 ohmic contact 형성 방안을 모색하고 LED용 투명전극으로 적용하여 소자 제작을 하였다.

전기적, 광학적, 구조적 특성을 관찰한 결과 낮은 저항, 가시광 영역에서 90%이상의 투과도를 나타내었다.

p-GaN 위에 ZnO를 형성 했을 때 ohmic 특성이 나오지 않았으나 본 연구에서는 Al과 Ga을 ZnO에 동시 도핑한 뒤 후열처리를 온도 변화에 따라 시행한 결과 550℃ 이상의 온도에서 ohmic 특성을 얻어냈다. 하지만 p-GaN과의 접촉 저항이 소자나 제품을 만들기에는 높은 값이므로 더 깊은 연구가 필요하다고 생각된다.

LED용 투명전극으로 ZnO를 적용하여 소자를 제작하였고, Ni/Au를 투명전극으로 사용한 것과 비교했을 때 소작 특성이 향상되는 결과를 얻었다. 소자의 특성을 고려해 볼 때 Al과 Ga을 동시 도핑 한 ZnO를 600℃에서 후열처리 하여 LED용 투명전극으로의 사용이 가능함을 보여준다.

참 고 문 헌

[1] M. Chen, Z. L. Pei, C. Sun, J. Gong, R. R. Huang and L. S. Wen, "ZAO: an attractive potential substitute for ITO in flat display panels" *Mster. Sci. & Engin. B,* 85:212 (2001)

[2] Z. L. Pei, C. Sun, M. H. Tan, J. Q. Xiao, D. H. Guan, R. F. Huang and L. S. Wen, "Optical and electrical poperties of direct-current magnetron sputterd ZnO:Al films" *J. Appl. Phy.,* 90:3432-3436 (2001)

[3] K. Postava, H. Sueki, M. Aoyama, T. Yamaguchi, K. Murakami and Y. Igasaki, "Doping effects on optical properties of epitaxial ZnO layers determined by spectroscopic ellipsometry" *Appl. Surf. Sci.,* 175-176:543-548 (2001)

[4] M. Miki-Yoshida, F. Paraguay-Delgado, W. Estrada-Lopez and E. Andrade, "Structure and morphology of high quality indium-doped ZnO films obtained by spray pyrolysis" *Thin Solid Films,* 376:99-109 (2000)

[5] Al. Salam, "Electrons in Crystalline Solids" *International Atomic Energy Agency, Vienna,* (1973)

[6] R. J. Cava, Julia M. Phillps, J Kwo, G. A. Thomas, R. B. van Dover, S. A. Carter, J. J. Krajewski, W. F. Peck, Jr., J. H. Marshall and D. H. Rapkine, "$GaInO_2$: A new transparent conducting oxide" *Appl. Phys. Lett.,* 64:2071-2072 (1994)

[7] K. J. Suh, A. Wakahara and A. Yoshida, "Effect of Ga Addition on the Electrical and Structural Properties of (ZnO, Ma)O Transparent Electrode Films" *Korean Journal of Materials Research,* 15:491-495 (2005)

[8] J. S. Bea, B. K. Moon, B. C. Choi, J. H. Jeong, S. S. Yi, I. W. Kim and J. S. Lee, "Photoluminescence behaviors in $ZnGa_2O_4$ thin film phosphors deposited by a pulsed laser ablation" *Thin solid Films,* 424:291-295 (2003)

[9] B.-Y. Oh, M. -C. Jeong, W. Lee and J. -M. Myoung, "Properties of transparent conductive ZnO:Al films prepared by co-sputtering" Journal of Crystal Growth, 274:453-457 (2005)

[10] H. Mondragon-Suarez, A. Maldonado, M. de la L. Olvera, A. Reyes, R.

Castanedo-Perez, G. Torres-Delgado and R. Asomoza, "ZnO:Al thin films obtained by chemical spray: effect of the Al concentration" *Appled Surface Surface Science,* 193:52-59 (2002)

[11] J. -H. Lim, D. -K. Hwang, H. -S. Kim, J. -Y. Oh and J. -H. Yang, "Low-resistivity and transparent indium-oxide-doped ZnO ohmic contact to *p*-type GaN" *Appl. Phys. Lett.,* 85:6191-6193 (2004)

[12] T. Minami, T. Kakumu, Y. Takeda and S. Takata, "Preparation of transparent conducting $Zn_2In_2O_5$ films by d.c. magnetron sputteirng" *Thin Solid Films,* 317:326-329 (1998)

[13] T. Minami, S. Takata, T. Kakumu and H. Sonohara, "New transparent conducting $MgIn_2O_4$-$Zn_2In_2O_5$ thin films prepared by magnetron sputtering" *Thin Solid Films,* 270:22-26 (1995)

[14] Y. Kashiwaba, K. Haga, H. Watanabe, B. P. Zhang, Y. Segawa and K. Wakatsuki, "Structures and Photoluminescence Properties of ZnO Films Epitaxially Grown by Atmospheric Pressure MOCVD" *phys. stat. sol. (b),* 229:921-924 (2002)

[15] J. Ye, S. Gu, S. Zhu, T. Chen, L. Hu, F. Qin, R. Zhang, Y. Shi and Y. Zheng, "The growth and annealing of single crystalline ZnO films by low-pressure MOCVD" *J. Cryst. Growth,* 243:151-156 (2002)

[16] X. Wang, S. Yang, J. Wang, M. Li, X. Jiang, G. Du, X. Liu and R. P. H. Chang, "Nitrogen doped ZnO film grown by the plasma-assisted metal-ogarnic chemical vapor deposition" *J. Cryst. Growth,* 226:123-129 (2001)

[17] S.-H. Jeong, B.-S. Kim and B.-T. Lee, "Photoluminescence dependence of ZnO films grown on Si(100) by radio-frequency magnetron sputtering on the growth ambient" *Appl. Phys. Lett.,* 82:2625-2627 (2003)

[18] S. Cho, J. Ma, Y. Kim, Y. Sun, G. K. L. Wong and J. B. Ketterson, "Photoluminescence and ultraviolet lasing of polycrystalline ZnO thin films prepared by the oxidation of the metallic Zn" *Appl. Phys. Lett.,* 75:2761-2763 (1999)

[19] B. Lin and Z. Fu, "Green luminescent center in undoped zinc oxide films deposited on silicon substrates" *Appl. Phys. Lett.,* 79:943-945 (2001)

[20] K. -I. Ogata, T. Kawanishi, K. Maejima, K. Sakurai, S. Fujita and S. Fujita, "Improvements of ZnO Qualities Grown by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy Using a Molecular Beam Epitaxy Grown ZnO Layer as a Substrate" *Jpn. J. Appl. Phys.,* 40:L657-L659 (2001)

[21] J.-M. Myoung, W. -H. Yoon, D. -H. Lee, I. Yun, S. -H. Bae and S. -Y. Lee, "Effects of Thickness variation on Properties of ZnO Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition" *Jpn. J. Appl. Phys.,* 41:28-31 (2002)

[22] N. Ohashi, T. Ishigaki, N. Okada, T. Sekiguchi, I. Sakaguchi and H. Haneda, "Effect of hydrogen doping on ultraviolet emission spectra various types of ZnO", *Appl. Phys. Lett.,* 80:2869-2871 (2002)

[23] A. Zeuner, H. Alves, D. M. Hofmann, B. K. Meyer and M. Heuken, "Structural and optical properties of epitaxial and bulk ZnO" *Appl. Phys. Lett.,* 80:2078-2080 (2002)

[24] K. Ogata, S. -W. Kin, Sz. Fujita and Sg. Fujita, "ZnO growth on Si substrates by metalorganic vapor phase epitaxy" *J. Cryst. Growth,* 240:112-116 (2002)

[25] T. Matsumoto, H. Kato, K. Miyamoto, M. Sano, E. A. Zhukov and T. Yao, "Correlation between grain size and optical properties in zinc oxide thin films" *Appl. Phys. Lett.,* 81:1231-1233 (2002)

[26] K. Ogata, T. Kawanishi, K. Maejima, K. Sakurai, Sz. Fujita and Sg. Fujita, "ZnO growth using homoepitaxial technique on sapphire and Si substrates by metalorganic vapor phase epitaxy" *J. Gryst. Growth,* 237-239:553-557 (2002)

[27] K. Kaiya., K. Omichi, N. Takahashi, T. Nakamura, S. Okamoto and H. Yamamoto, "Epitaxial growth of ZnO thin films exhibiting room-temperature ultraviolet emission by atmospheric pressure chemical vapor deposition" *Thin Solid Films,* 409:116-119 (2002)

[28] 김상수, 김용배, 김현재, 이신두, 이종덕, 임성규, 장진, 정태형, 디스플레이 공학 I, 청범 출판사 (2000)

[29] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentals of physics (1993)

[30] Z.W. Li, W. Gao and Roger J. Reeves, "Znic oxide films by thermal oxidation of zinc thin films" *Surface & Coatings Technology,* 198:319-323

(2005)

감사의 글

벌써 2년이란 시간이 훌쩍 흘러버렸네요.
처음에 대학원 진학을 결심했을 때 2년이란 시간을 후회 없이 보내자는 다짐을 했었는데 이제와 생각해보니 부족한 부분이 많았던 것 같습니다.

본 논문이 완성되기까지 많은 관심과 지도를 해주신 신동찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님께서 지도 해주신 것들 잊지 않고 앞으로 힘들 때마다 삶의 지침으로 생각하고 전진하겠습니다. 더 좋은 논문이 되게 도와주신 이종국 교수님과 박진성 교수님께도 깊은 감사드립니다. 항상 지켜봐주신 이현규 교수님, 양권승 교수님, 이은구 교수님께도 감사드립니다. 교수님들의 관심과 가르침이 있었기에 지금의 제가 있다고 생각합니다.

본 연구를 진행하는데 정말 많은 도움 주신 한국광기술원 모든 분들께도 감사의 뜻 전해드리고 싶습니다. 백종협, 김광철, 전성란 박사님과 김상묵 선임님. 그리고 승재씨, 윤석씨, 태훈씨, 성훈씨 항상 편하게 생활할 수 있게 도와주시고 마음 써주신 점 감사드립니다. 특히 너무 자상하게 작은 부분까지 신경써주시고 본 연구가 잘 마무리 될 수 있게 도와주신 이상헌 박사님께 진심으로 감사드립니다. 또 명숙, 현진, 윤희언니~~ , 미선이(이제 말 놓을게^^) 언니들이랑 미선이가 있어서 광기술원 생활이 더 즐거웠어요^^* 그 외 너무 많아서 이름 다 못 부르는 절 용서하시고 6층 모든 LED 사업단 분들께 감사의 마음 전해드립니다.

졸업동기인 오빠들 항상 날 동생처럼 챙겨준 용이 오빠 , 1 학년 때부터 추억이 너무 많은 대성이 오빠, 종재 오빠.. 2년 동안 많이 도와준 거 너무 고마워~~,

정신적 지주 동석이 오빠, 너무 무서운ㅋ 효섭이 오빠, 동환, 동명이 오빠 남은 대학원 생활 마무리 잘하구~~, 멋쟁이 상우랑 하늘같은 후배 혁아^^ 너희들은 어디를 가더라도 성공할 놈(?)들이니깐 걱정 안 된다. ^^ 너무 예쁜 영화도 오빠들이랑 실험실 생활 즐겁게 하궁..

이쁜 미경이랑 은주 ^^* 어쩜 너희를 보면 꼭 나랑 세원이를 보는 것 같아서 더 애착이 가고 더 예뻐 보였었는데 많이 챙겨주지 못해서 미안하구 세상은 넓고 우리가 할 일은 많으니 너무 고민하지 말고 젊음을 즐겨 ^^*

사랑하는 내 동기들 순동이랑 영복이.. 졸업하는 마지막까지 너희들이 있어서 외롭지 않다 ^^* 역시 동기가 최고더라.

그리고 항상 뒤에서 세심하게 챙겨주신 오 박사님 너무 감사드려요. 또 항상 날 웃게 만들어준 상진이 오빠.. 오빠랑 더 많은 시간 같이 보냈으면 더 좋았을텐데 아쉽네~~ 진짜 오빠가 있어서 내가 웃었던 것 같아 ^^* 너무너무 고마운 울 명순 언니~~ 내 푸념도 다 들어주고 항상 다독여주는 언니 덕에 이렇게 졸업하게 되었어요.^^ 정말 언니 너무 고마워요~~ 종종 콩나물 국밥 먹으러 가게요

ㅋ

소중한 내 친구 세원이.. 대학교 4년 내내 같이 다녀도 한 번도 싸우지 않았던 건 아마도 네가 많이 참은 것 같아ㅋ 세원아 너무 당연하게 내 옆에 있어서 잘 몰랐던 것 같아 넌 정말 소중한 내 친구야~~ 항상 고마워

그리고 현주.. 네가 있어서 너무 행복하다. 대학원 생활뿐만 아니라 너를 빼고는 나의 25년을 얘기할 수 없을 만큼 정말 가족 같은 내 친구 현주야~~ 사랑해 널 말로 표현하기가 힘들다ㅋ 어쨌든 네가 있어서 지금의 나도 있는 거야. 내가 힘들고 지칠 때마다 항상 내 옆에 있어준 사람은 너였잖니.. 앞으로도 잘 부탁한다. ^^*

마지막으로 25년 동안 너무 고생 많이 한 우리 이뿐 엄마^^* 항상 든든하게

날 믿어준 엄마. 그리고 날 너무 예뻐 해주는 우리 아빠^^* 착한 내 동생 세진이^^ 시간이 지날수록 가족이라는 이름이 너무나 소중하고, 고맙게 느껴지네요. 너무 화목한 우리 가족을 만나게 된 게 나에게는 가장 큰 행복인 것 같아요. 고맙습니다. 이 영광을 사랑하는 우리 가족에게 돌립니다.