



2014년 12월 석사학위논문

# ZnO 및 Ag 나노 구조를 이용한 LED의 광 특성 향상

조선대학교 대학원

광기술공학과 최판주

# ZnO 및 Ag 나노 구조를 이용한 LED의 광 특성 향상

Improvement of optical properties of LED by ZnO and Ag nanostructure

2014년 2월 25일

조선대학교 대학원

광기술공학과 최판주

# ZnO 및 Ag 나노 구조를 이용한 LED의 광 특성 향상

지도교수 권 민 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 10월

### 조선대학교 대학원

광기술공학과 최판주

### 최판주의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박종락 인

- 위 원 조선대학교 교수 권 민 기 인
- 위 원 한국광기술원 선임연구원 김 자 연 인

2013년 11월

### 조선대학교 대학원

### 목 차

### ABSTRACT

제1장서 론	1
제2장 이론적 고찰	3
제1절 LED(Light Emitting Diode)의 개요	3
1. p-n Junction	3
2. LED 발광원리	5
제2절 LED의 구조	8
1. LED 이란?	8
2. 수평형 LED	9
3. 플립칩 LED	10
4. 수직형 LED	11
제3절 LED의 효율	12
1. 내부 양자 효율(IQE)	12
2. 광 추출 효율(LEE)	13
3. 전류 주입 효율	13
제4절 광 추출 효율 향상	14
1. 광 추출 효율 기술이란?	14
2. Patterned Sapphire Substrate(PSS)	15
3. p-GaN & n-GaN roughness	15
4. ZnO 나노 구조	17
5. Photonic Bandgap Crystal	18
6. PNS 기술	19

제3장 실험방법 및 결과	20
제1절 ZnO 나노 구조에 의한 LED 광 추출 효율 향상	20
1. ZnO 나노 구조 성장	20
2. FDTD 설계	22
3. 디바이스 제작	27
4. 전기적 및 광학적 특성 평가	29
제2절 Ag nanowire 투명전극 ······	31
1. Ag nanowire 투명전극 제조 및 특성	33
2. Ag nanowire 투명전극 제조 방법 연구	37
3 디바이스 제작	39
4 전기적 및 광학적 특성 평가	40
제4장 결론	42

[참고문헌]	 43
[감사의 글]	 47

## 그림 목차

그림.	1.1 기술 발전에 따른 반도체 조명 확보 시장 가능성
그림.	2.1 분리되어있는 p형 반도체와 n형 반도체의 구조
그림.	2.2 p-n 접합이 이루어졌을 때의 구조 4
그림.	2.3 반도체 LED의 기존 구조와 발광 형태의 band diagram 5
그림.	2.4 화합물 반도체의 격자상수(A)와 밴드갭 에너지(eV)와 파장(λ)과의 관계 6
그림.	2.5 Direct bandgap 구조와 Indirect bandgap 구조 ······ 7
그림.	2.6 LED칩의 구조 개요도
그림.	2.7 수평형 LED ····· 9
그림.	2.8 플립칩 LED ····· 10
그림.	2.9 수직형 LED ······ 11
그림.	2.10 LED 효율 ······ 12
그림.	2.11 GaN 와 Air 에서의 굴절률 차이에 의한 탈출 콘과 임계각
그림.	2.12 PSS 표면 SEM 이미지 15
그림.	2.13 p-GaN 표면 거칠기 기술
그림.	2.14 n-GaN 표면 거칠기 기술
그림.	2.15 ZnO 나노 구조를 이용한 LED의 광효율 향상
그림.	2.16 Photonic Bandgap Crystal의 구조와 이를 통한 LED 효율 향상
그림.	2.17 PNS를 이용한 LED의 구조 19
그림.	3.1 수열합성법에 의해 성장된 (a),(c) vertical ZnO nanorod와 (b),(d) flower
모양의	리 ZnO nanorod의 단면 및 표면 SEM 이미지
그림.	3.2 FDTD 시뮬레이션을 위한 LED의 계략도 23
그림.	3.3 각각 LED들에서 방출된 빛과 반사된 빛의 세기
그림.	3.4 ZnO nanorod 각도에 따른 FDTD 시뮬레이션 및 시간에 따른 방출 빛
의 세	7]
그림.	3.5 LED의 계략도 (a) w/o ZnO, (b) vertical 모양 ZnO nanorod, (c) flower

그림. 3.6 ZnO 나노구조를 포함하는 GaN 기반 LED의 표면 SEM 이미지 (a) 그림. 3.7 각각 LED들의 (a) Current-Voltage(I-V) 곡선, (b) Optical output power 그림. 3.8 절연 기판 위에 성장된 메사구조 GaN계 LED 에서의 Current crowding과 n형과 p형층의 저항, p형 접촉 저항, p-n 접합을 나타내는 이상적인 다이오드로 구성 그림, 3.10 은 나노와이어 전극의 파장에 따른 투과도 및 SEM 이미지 …………… 32 그림. 3.11 스핀 코팅 조건별 은 나노와이어의 투명 전극 표면 SEM 이미지 (a)300rpm(5s)-500rpm(10s)-1000rpm(5s), (b)300rpm(5s)-500rpm(10s)-2000rpm(5s), (b)300rpm(5s)-500rpm(5s)(c)300rpm(5s)-500rpm(10s)-3000rpm(5s), (d)500rpm(5s)-1000rpm(10s)-500rpm(5s), 그림. 3.12 다양한 스핀 코팅 조건에서 증착된 은 나노와이어 전극의 투과도 …… 35 그림. 3.15 제작한 LED의 p-GaN, ITO 및 Etching 방식의 은 나노와이어 투명전극 그림, 3.16 은 나노와이어 투명전극 LED의 전기적 특성 비교 그래프 및 빛 발광 이 그림. 3.17 각각 LED들의 입력 전력에 대한 Optical output power ...... 41

## 표 목차

표	3.1 ZnO 나노구조 수열합성법(Hydrothermal method)조건	$\cdot 21$
표	3.2 FDTD 시뮬레이션을 위한 변수들	· 23
표	3.3 각각 LED들의 측정된 emission 과 reflection 세기 및 광추출 효율	· 24
표	3.4 Glass 위에 증착된 ITO 면저항 값과 스핀 코팅 조건별에 따라 Glass	위
에	증착된 은 나노와이어 면저항 값	• 33
표	3.5 GaN LED를 위한 은 나노와이어 투명전극 제작 공정	· 37

#### ABSTRACT

### Improvement of optical properties of LED by ZnO and Ag nanostructure

By Pan Ju Choi Advisor : Prof. Min Ki Kwon, Ph.D. Department of Photonic Engineering Graduate School of Chosun University

GaN-based light-emitting diodes have attracted extensive interest for solid-state lighting due to high brightness, energy saving, long lifetime, and environmentally properties. However, the luminous efficiency of LED is still low for application. One of the current major issues for conventional planar GaN-based LEDs is low light extraction efficiency due to total internal reflections within a limited escape cone due to large refractive index difference from GaN to air. Several methods have been proposed to enhance the light extraction, including surface texturing, patterned sapphire substrate, chip shaping, and photonic crystal. On the other hand, the proposed surface texturing methods involve expensive and energy consuming processes, long fabrication times. In addition, conventional GaN-based LED is the use of non-conductive sapphire substrate because it causes the current crowding near the p-contact by lateral carrier injection. To solve these problems, indium tin oxide (ITO) has been widely used as the transparent conductive electrode in GaN-based LEDs with advantage in high electrical conductivity and high optical transparency, but ITO is costly, and shows the poor transparency in the blue and ultraviolet range and instability in the presence of acids or base. Therefore, there is a significant need for a novel electrode material that can replace ITO.

Recently, ZnO nanostructures grown by the hydrothermal method have been investigated widely to enhance the light extraction efficiency of the GaN based LEDs. because this has advantage in cost effective and However research based ZnO low-temperature process. most on nanostructures for LEDs have focused on enhancing the extraction efficiency of the LEDs. In this study, we will experimentally and numerically investigate the effect of the alignment of ZnO nano rod arrays (NRA) on the light extraction efficiency. To investigate the effect of the alignment of ZnO nano rod array on the light extraction behavior, we grow ZnO nano rod array with almost same parameters, like density, diameter and crystal quality, at the same level. The ZnO NRA with two different inclination angles, termed vertical and flower, were fabricated by the two-step hydrothermal method: forming seed and main ZnO NRA. The shape of the ZnO NRAs was controlled using the seed layers. To grow vertical ZnO NRA, the seed layer form by dipping the substrate into 0.005 M Zinc Acetate dihydrate dissolved in Ethanol at room temperature for 5 min while to grow flower shaped ZnO NRA, the seed layer form by dipping the substrate into 0.005 M zinc acetate dissolved in DI waver at 90°C for 5 min. After forming the ZnO seed layers, the main growth for the ZnO NRA was carried out in solutions of 0.05 M zinc nitrate hexahydrate and hexamethylenetetramine at 85°C for 60 min. The numerical analysis based on two-dimensional (2D) finite difference of time domain (FDTD) method shows that the extraction efficiency of LED with bare (without ZnO NRA), vertical ZnO NRA, flower shaped ZnO NRA is 37%, 60%, 49%, respectively. Current-Voltage characteristics for all of LEDs are same; however, the optical output power of LED with vertical ZnO NRA and flower ZnO NRA is improved by 50% and 30%, compared to that of LED with bare, respectively at an input current of 100 mA. This enhancement is agreed well with numerical analysis.

Silver (Ag) nanowire based transparent conducting electrodes have also attracted significant attention for their advantage in high transparency and conductivity and low cost fabrication. However, there is no report on characteristic of LED with Ag nanowire transparent conductive electrode. In this study, we demonstrate the characteristic of LED with Ag nanowire transparent conductive electrode deposited by spin coating method. With optimization of deposition condition, silver nanowire TCO has a sheet resistance of  $30^{-40} \Omega/sq$  and an optical transmittance over 90%, which is similar with characteristics of ITO. The electrical and optical characteristics of LED with Ag nanowire transparent conductive electrode are comparable of those of LED with ITO.

#### 제1장서 론

1962년 최초의 가시광선 LED(발광 다이오드)가 개발된 이래 1960년대를 거치 면서 적색LED가, 1970년대와 1980년대를 거치면서 녹색 LED가 개발 되었고, 1990년대 청색 LED 및 백색 LED가 개발되면서 총천연색의 구현이 가능하게 되 었으며, 이에 따라 LED의 연구개발과 활용에 대한 본격적인 붐이 조성되었다. 2000년대에 들어서면서 LED의 효율이 개선됨과 함께 생활 전반에 사용되기 시 작하여 휴대폰의 액정 표지 소자, 옥외형 대형 디스플레이 전광판, 교통 신호등, 자동차 부품, TV back light unit를 중심으로 한 가전제품 등 모든 분야에서 다 양한 용도로 사용되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

그림 1.1에서 보이듯이 2000년 이후 조명시장은 약 2천억 불 시장을 형성하고 있으며 기존 조명 시장의 약 20%를 대체하고 있다. 앞으로도 기존 광원 교체로 조명 시장 확대를 예상하면서 미국은 2025년 기존 조명기구 시장의 약 50%를 대체할 것이라고 예상하였다.



그림 1.1 기술 발전에 따른 반도체 조명 확보 시장 가능성

이렇게 LED가 기존 조명 시장을 대체 할 만큼 차세대 조명으로 각광 받는 이 유는 LED가 반도체 고체 조명으로 환경 친화적이고, 기존의 조명 기구에 비하여 에너지절약 효과가 우수하고, 장시간 사용이 가능한 반영구적인 긴 수명과 빠른 응답속도 등의 장점으로 다양한 분야에 응용이 가능하기 때문이다. 이를 위해 출력과 효율을 향상함으로 궁극적으로 일반 조명을 비롯하여 감성 조명 등 다양 한 용도로 활용하기 위해 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만, LED가 조 명 시장의 가장 큰 시장인 실내 및 실외 일반 조명을 대체하기 위해서는 아직까 지 LED의 효율이 낮아 기존 조명만큼의 출력을 내기 위해서는 가격이 증가되는 문제점이 있다.

본 연구에서는 LED의 광 효율을 향상시키기 위해 다양한 ZnO 나노 구조를 적용함으로 광 추출 효율을 향상 시키고, 또한, 투명 전극 층으로 많이 이용되지 만 가격이 비싸고, 광학적 특성 저하 및 화학적 불안정성을 갖는 Indium tin oxide (ITO)를 대체할 수 있는 Ag nanowire기반의 투명 전극을 LED에 적용하 고 그 특성은 ITO를 이용한 LED와 비교하고자 한다.

#### 제2장 이론적 고찰

#### 제1절 LED(Light Emitting Diode)의 개요

LED는 우리말로는 발광다이오드라고 표기하며, 전류를 가하면 빛을 발하는 반 도체 소자이다. 반도체는 크게 단 원소 반도체, 화합물 반도체, 그리고 유기물 반 도체로 분류되는데, LED는 화합물 반도체에 속하게 된다. 즉, 쉽게 설명하면 전 기 에너지를 빛 에너지로 변환 시켜주는 "광 반도체"이다. 여기서 화합물 반도체 란, 2종 이상의 원소로 이루어진 형태를 말하며, LED에서는 주로 갈륨질소 (GaN), 갈륨비소(GaAs), 갈륨인(GaP)을 들 수 있으며, 화합물의 조합에 따라 LED 반도체의 빛의 색깔이 바뀌게 된다.

#### 1. p-n Junction

LED는 p형 반도체와 n형 반도체의 접합으로 구성되는데 여기서, p형 반도체 내부에는 무수히 많은 hole(정공)이 존재하고, n형 반도체 내부에는 무수히 많은 electron(전자)가 존재하고 있다. 그림 2.1에서는 분리되어 있는 p형 반도체와 n 형 반도체의 내부를 보여주고 있다.



그림 2.1 분리되어있는 p형 반도체와 n형 반도체의 구조

p형 반도체와 n형 반도체를 붙일 경우 electron(전자)과 hole(정공)을 움직일 수 있다. 자유 전자는 p형 반도체 쪽으로 정공은 n형 반도체 쪽으로 움직여서 서로 쉽게 재결합이 이루어진다. 만일 반도체 내의 모든 자유 전자와 정공이 결합하면 반송자가 없어지게 된다. 반송자가 없어진다는 것은 전류가 흐르지 않는 상태를 의미한다. p-n접합에서 는 모든 전자와 정공이 결합이 되지는 않는다. 그 이유는 그림2.2에서 보이듯이 금속학적 접합면 경계면에서 일어난다. 그림의 n형 반도체 의 전자 일부는 접합면을 넘어서 p형의 정공과 결합하지만 경계면 주의의 (-)전 하로 인하여 n형의 모든 전자가 p형 쪽으로 넘어가지 못한다. 마찬 가지로 p형 의 정공 역시 일부는 접합면을 넘어가서 n형의 전자와 결합하지만, n형의 +이온 으로 인하여 전부 넘어가지는 못하게 된다. 이렇게 금속학적 접합면을 기준으로 자유전자와 정공이 결합하여 반송자가 없어진 영역을 공핍영역(Depletion Width) 또는 공간전하영역 (Space Charge layer)이라고 한다.



그림 2.2 p-n 접합이 이루어졌을 때의 구조

#### 2. LED의 발광 원리

그림 2.2와 같이 LED는 양(+)의 전기적 성질을 가진 p형 반도체와 음(-)의 전 기적 성질을 지닌 n형 반도체의 이종접합 구조로 되어있다. 이러한 양(+)의 성질 인 정공과 음(-)의 성질인 전자가 서로 만나서 그림 2.3과 같이 반도체의 밴드갭 (Band gap) 에너지만큼의 차이를 전기적 에너지가 아닌 빛의 형태의 에너지로 방출하는 광전자 소자(Optoelectronics device)에 해당한다.



그림 2.3 반도체 LED의 기본 구조와 발광 형태의 band diagram

전자(electron)가 많아 음의 성격을 띤 n형 반도체와 전자의 반대 개념인 정공 (hole)이 많아 양의 성격을 띤 p형 반도체가 얇은 층 형태로 붙어 있는데, 순방 향으로 전압을 가하면, 각 각 p형과 n형 층으로 Carrier들이 확산되면서 발광합 니다. 즉, n층의 전자가 p층으로 이동해 전자와 정공이 결합하면서 에너지를 발 산하는 것이다. 이 때, 에너지는 주로 열이나 빛의 형태로 방출이 되며, 빛의 형 태로 발산하는 것이 바로 LED이다. n층의 전자와 p층의 정공이 결합하면서 전 도대(Conduction Band, Ec)와 가전자대(Valance Band, Ev) 사이의 에너지 준위 (eV) 의 에너지를 발산하게 된다. 이 에너지 준위 차이인 밴드갭 에너지(Eg)에 따라 빛의 색상이 정해진다. 즉, 에너지의 차이가 크게 되면 단파장의 보라색 계 열의 빛이 발광하게 되고, 에너지 차이가 작으면 장파장인 적색 계열의 빛이 발 광하게 된다. 그림 2.4와 같이 빛의 색이 달리지는 이유는 앞서 설명한 화합물의 재료에 따라 격자상수 및 밴드갭 에너지와 파장이 각각 차이를 보이기 때문이다.



그림 2.4 화합물 반도체의 격자상수(A)와 밴드갭 에너지(ev)/파장(λ)과의 관계

LED용 반도체 재료는 크게 직접천이형(Direct transition)과 간접천이형 (Indirect transition)으로 구별할 수 있다. 반도체의 에너지 구조에서 Conduction Band의 전자와 Valance Band의 정공이 결합할 때 에너지가 방출하게 되는데, 그림 2.5.에서와 같이 규소 (Si)등 간접천이형 반도체 내에서는 에너지가 빛의 형 태가 아닌 주로 열이나 진동으로 소모되어 발광 효율이 크게 저하되는 반면, 질 화갈륨 (GaN)의 직접천이형 반도체에서는 전자와 정공이 서로 결합하여 거의 모 두가 빛의 발광 형태로 나타나기 때문에 LED를 구성하기에 적합한 재료에 속한 다. 이러한, 직접천이로부터 발생하는 빛의 파장은 반도체의 고유한 특성인 에너 지 밴드갭(Eg)에 따라 결정되며, 빛의 에너지와 발광파장은 다음과 같은 관계를 가진다.<sup>[8,9]</sup>

$$Eg = h\nu = \frac{hc}{\lambda} (h : 플랭크상수, c : 광속, \lambda : 파장)$$
$$\lambda[nm] = \frac{1240}{Eg[eV]}$$



그림 2.5 Direct bandgap 구조와 Indirect bandgap 구조

LED는 방출하는 빛의 종류에 따라 가시광선 LED, 적외선 LED(IR LED), 자외 선 LED(UV LED)로 구분된다. 가시광선 LED는 전체 LED 시장의 가장 큰 비 율을 차지하고 있으며, 적색, 녹색, 청색, 백색 LED등이 사용되고 있다. 적외선 LED는 일반적으로 리모컨이나 통신, 적외선 카메라나 장비 등에 사용되고 있고, 자외선 LED는 살균의 목적이나 외료분야에 활용되고 있다.

#### 제2절 LED의 구조

#### 1. LED 이란?

칩은 LED 개별 소자를 말하는 것으로, 칩 제작은 에피 웨이퍼에 전극 및 식각 공정 등을 통하여 발광할 수 있는 최소의 단위 칩으로 만드는 단계 이 다. 통상적으로 윗면인 p-형 반도체에 (+) 전극이 형성되고, 일반적으로 건 식 식각(Dry Etching) 방식으로 n-형 반도체 일부분까지 식각하여 (-) 전극 을 형성한다. 그림 2.6 에서는 칩의 구조에 대하여 보여주고 있다.



그림 2.6 LED칩의 구조 개요도

#### 2. 수평형 LED

수평형 LED 칩의 구조는 빛을 발광하는 하나의 활성층(MQW)과 이를 둘 러싼 두 개의 양쪽 클래딩층(p-type GaN 와 n-type GaN)으로 이루어진 기 본 형태로 구성되어 있으며. conventional LED라고 말하기도 한다. 전극에 접한 클래딩층은 각각 n-doping 되거나 p-doping 되어 있는데, 주로 기판 (Sapphire)과 접한 클래딩층 부분이 n-diping되어 n-GaN가 있고, 다른 클래 딩층 부분이 p-doping되어 있어 p-GaN가 된다. 도핑된 클래딩층 극성에 맞 게 전극을 통하여 전압을 인가하면 n-type GaN층에서는 전자(electron)를, p-type GaN층에서는 정공(hole)을 공급하여 전류가 흐르면서 이들 전자와 정공이 가운데 활성층에서 결합하여 빛을 발광한다. p형 질화갈륨층을 통해 빛을 발산하는 epi-side up 방식을 사용한다. 하지만 이러한 구조는 투명전 극(Transparent electrode)과 전극패드(Metal pad)에서 흡수 되는 빛의 손실 이 크다. 이러한 문제를 해결하기 위해 플립칩 또는 수직형 LED가 개발되 었다.<sup>[3]</sup>



그림 2.7 수평형 LED

#### 3. 플립칩 LED

플립칩 LED는 사실 수평형 LED를 거꾸로 뒤집어 실리콘 서브마운트 위 에 stud bump를 통하여 고정한 형태로, 발광의 기본 구조면에서 보면 일반 형 LED와 동일하다. 기판인 사파이어(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 통해 빛이 방출되기 때문에 일반형 LED에서 일어날 수 있는 투명전극이나 패드, 전극 연결부에서 빛의 흡수손실을 최대한 줄일 수 있다. 또한 사파이어(sapphire)와 공기(Air)의 굴 절률이 각각 1.7과 1로써 기존의 일반형 방식과 비교하여 빛의 임계각을 크 게 하여 내부 전반사를 줄일 수 있다.<sup>[4]</sup> 뿐만 아니라 은(Ag), 알루미늄(Al) 등의 반사율이 높은 금속을 사용함으로써 빛을 사파이어 쪽으로 대부분 반 사시켜 광 추출 효율을 크게 향상 시킬 수 있다.<sup>[5]</sup>



그림 2.8 플립칩 LED

#### 4. 수직형 LED

수직형 LED도 수평형 LED와 같은 발광의 기본 구조에서 식각에 의해 적 충된 일부분을 제거하지 않은 원래의 형태를 유지한다. 통상적으로 적충된 윗부분의 클래딩층에 bonding/reflector와 서브마운트 기판을 차례로 부착한 후, 전극을 형성하고 반대편의 기판을 분리한다. 반대편의 사파이어 기판과 질화갈륨층 사이는 Laser Lift Off (LLO) 방법을 통해 분리하고 전류를 수 직으로 주입하는 방식으로 구성된다. 이러한 전류 주입 방식은 수평형 LED 의 전류 밀집 현상을 극복할 수 있다. 완성된 수직형 LED의 활성층에서 발 광된 빛은 아래 면의 반사판에서 수직으로 반사되어 윗부분으로 발출되며, 방열 특성과 고출력 특성이 우수하다. 또한 밖으로 노출된 표면 n-GaN을 수평형 LED와 달리 노출시키기 위한 식각 공정이 없기 때문에 damage를 피할 수 있다. 이러한 수직형 구조는 n형 질화갈륨층의 요철 및 p형 금속 오믹전극을 통한 빛의 반사를 이용하여 광 추출효율을 극대화시킬 수 있 다.<sup>[6]</sup>



그림 2.9 수직형 LED

#### 제3절 LED의 효율

LED에서 성능을 평가하는 요소 중의 하나가 효율이다. 즉, LED에 공급된 전기적 전력이 얼마만큼의 광 에너지로 발산하는 가를 나타내는 것을 의미한다. 그림 2.10 에서는 LED의 효율을 나타내고 있으며, 효율 전체에서 내부 양자 효율과 빛 추출 효 율의 곱은 따로 외부 양자 효율이라고 칭하고 있으며, 주입된 전자의 개수 대비 출력 된 광자의 개수를 나타낸다. 다음의 식은 외부양자 효율의 식을 나타내며,

 $\eta_{\text{ext}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}} = \frac{P/(hv)}{I/e} = \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}}$ 

여기에서 I는 전류, V는 전압, h는 Plank 상수, ν는 광 주파수, e는 전자의 에너지를 나타낸다.

그림 2.10 LED 효율

#### 1. 내부 양자 효율(Internal Quantum Efficiency)

내부 양자 효율은 LED 내로 주입된 전자가 정공과 만나서 재결합을 이루어 활성 영역에서 방출되어지는 광자수를 의미 한다. 이상적인 LED의 활성층 역역은 주입된 전자 하나당 하나의 광자를 방출한다. 활성층의 구조적인 문제 및 내부 결함 등의 문 제로 인해 100%가 나오지 않고 있으며 효율 개선을 위한 많은 연구가 진행되고 있 다.

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{number of photons emitted from active region per second}}{\text{number of electrons injected into LED per second}} = \frac{P_{\text{int}} / (h\nu)}{I / e}$$

외부양자효율(External Quantum Efficiency

#### 2. 광 추출 효율(Extraction Efficiency)

광 추출 효율은 LED 내부의 활성층에서 생성된 광자들이 자유공간 속으로 다시 방출되는 것을 의미 한다. 이론적으로는 모든 광자가 빠져나와야 하지만, 역시 실제 LED에서는 굴절률 차이에 의한 전반사 현상 및 전극 표면이나 투명전극에서의 흡수 에 의해 모든 광자가 자유공간 속으로 빠져 나가지 못한다.

 $\eta_{\text{extraction}} = \frac{\text{number of photons emitted into free space per second}}{\text{number of photons emitted from active region per second}} = \frac{P/(h\nu)}{P_{\text{int}}/(h\nu)}$ 

#### 3. 전류주입 효율(Injection Efficiency)

전류 주입 효율은 LED 내부로 금속 접합에 의해 전자나 정공이 효율적으로 주입되는 지를 나타낸다. 일반적으로 금속층과 반도체 사이에 높은 일함수에 의해 전류 주입 효율이 감소되는 문제가 있고, 일함수가 큰 p형 반도체의 정공의 주입 효율이 낮다. 이를 해결 하기위해 전극의 선택 및 열처리 공정이 요구된다. 또한 p형 GaN 박막과 같이 저항이 큰 반도체에서는 균일한 전류 주입을 위해 ITO와 같은 투명 전극을 사용한다.

#### 제4절 광 추출 효율 향상

#### 1. 광 추출 효율 기술 이란?

앞서 언급한 바와 같이, LED 내부에서 발생된 빛은 전반사에 의해 갇히게 되어 낮 은 광 추출 효율의 원이 된다. 실제 GaN 기반의 LED칩으로부터 빛이 발광할 때, LED 반도체 소재(GaN)와 공기(Air)의 굴절률 차이로 인하여 활성층 내부에서 발광 된 빛이 일정 각도(임계각 = 23.6℃) 이상이 되면 공기와의 경계 면에서 내부로 전반 사(TIR) 되어 외부로 발광이 되지 않는다. 광 추출 기술은 이러한 내부로의 반사를 막아 외부로 탈출하게 하여 방출되는 빛의 양을 향상시키기 위한 기술이다.<sup>[7]</sup> 활성층 에서 발광하는 빛이 공기와 반도체의 굴절률 상관 차이에 의하여 표면에서 탈출 할 수 있는 관계를 나타낸 것인데, 광 추출 효율 면에서 보면 개략적으로 표면으로 방출 되는 양이 약 8%, 기판에서 손실이 약 20%, 칩 내부에서 가이드 되는 양이 약 72% 정도로 추정된다. 따라서 사파이어 기판을 제거하거나 LED 칩의 표면 및 측면을 가 공하여 빛을 탈출 시키면 광추출 효율이 향상 될 수 있다.



그림 2.11 GaN 와 Air 에서의 굴절률 차이에 의한 탈출 콘과 임계각

#### 2. Patterned Sapphire Substrate(PSS)

PSS 표면 가공 기술은 사파이어 기판 표면에 일정한 형태의 형상과 깊이로 패터닝 을 식각하여 사파이어 기판 쪽으로 진행하는 빛이 산란되게 함으로 내부에 갇히지 않고, 추출될 수 있는 확률을 높여 준다. 일반적으로 라인, 메쉬, 반구 형태의 굴곡을 사파이어 표면에 형성한다.<sup>[10,11]</sup>



그림 2.12 PSS 표면 SEM 이미지

#### 3. p-GaN & n-GaN 표면 거칠기

p-GaN 표면 거칠기 기술은 LED p-GaN 표면 쪽에서 반사되어 내부로 재 반 사되는 광손실을 제거하여 외부로 빛을 방출시키는 기술이다.<sup>[12,13,14]</sup> 대만은 PSS 기술 대신에 p-GaN 반도체 표면에 일정한 형상 및 깊이로 거칠기를 변화시키는 효율 향상 기술을 개발 하였다. 대면적/고출력, 청색/녹색 및 power LED 제품에 적용되고 있는 기술이나, PSS 기술 보다 5~10% 정도 효율이 낮다.(그림 2.13)



P-roughening(during growth) 그림 2.13 p-GaN 표면 거칠기 기술

니치아사는 메사 식각시 n-GaN 표면을 기존의 평면 형태에서 일정한 형태를 갖는 원형을 주기적으로 반복 형성하여 광 추출 효율을 향상 하였다. 이러한 n-GaN 표면 거칠기 기술은 휘도를 30~40% 증가 시켰다. (그림 2.14)



그림 2.14 n-GaN 표면 거칠기 기술

#### 4. ZnO 나노 구조

질화갈륨(GaN)을 기반으로 하고 있는 LED는 GaN(n=2.5)와 Air(n=1)인 계면 사이 에서 큰 굴절률 차이에 의해 내부 전반사가 많이 일어나고 있어 실질적으로 빠져나 오는 빛의 각도는 23도 밖에 되지 않는다. 이는 실질적으로 광 추출 효율이 낮다는 말이다. ZnO라는 물질은 굴절률의 수치가 1.9~2.0을 나타내고 있어 GaN 와 air 의 중 간적인 굴절률 및 ITO 와 비슷한 굴절률을 가지며, 쉽게 나노 구조로 성장이 가능하 기 때문에 많은 그룹들이 ZnO 나노 구조를 ITO위에 증착시킴으로서 광 추출 효율을 증가시키고 있다. 또한, 수열합성법을 이용하여 LED의 전기적 및 광학적 특성에 영 향을 끼치지 않기 때문에 더욱더 각광받고 있는 현실이다. ZnO 나노 구조를 이용한 LED 의 광추출 효율 향상에 대한 많은 결과들을 보고하고 있지만 ZnO 나노 구조의 형상 및 방향 등에 대한 연구는 아직까지 부족한 실정이다. 본 연구에서는 ZnO 방향 에 따른 광추출 효율의 영향을 확인하고 광추출 효율 향상을 위한 최적의 ZnO 나노 구조의 방향을 제시하고자 한다.



그림 2.15 ZnO 나노 구조를 이용한 LED 의 광효율 향상

#### 5. Photonic Bandgap Crystal (PBC)

PBC 기술은 굴절률이 다른 구조를 주기적으로 반복함으로 Photonic Band gap 을 형성하여 빛이 가질 수 없는 에너지 상태를 구현하게 되어 광추출 효율을 높이는 방 법이다. 주기적인 구조를 제작하기 위하여 일반적으로 E-beam 및 hologram lithography 공정 및 식각을 위한 ICP 공정이 필요하다. 그림 2.16은 광결정 LED 의 구조 및 이에 의한 특성 향상 결과를 보여준다.

이 때, 최대 광 추출 효율은 광결정 효과에 의해 좌우 되지만 이를 위해서는 식각 공정이 필수적으로 들어가서 p-GaN 층의 전기적 특성을 저하하는 문제점이 있다. 전 기적인 특성 해결을 위한 많은 노력이 진행되고 있다.<sup>[15,16,17]</sup>



그림 2.16 Photonic Bandgap Crystal의 구조와 이를 통한 LED 효율 향상

#### 5. PNS (patterned n-type GaN substrate) 기술

PNS 기술은 위에서 설명한 n-GaN 표면 거칠기 기술에서 n-GaN 표면에 일 정한 형태를 갖는 구조체를 형성하는 것과는 달리 n형 GaN 층 내부에 SiO<sub>2</sub> Nano구조를 삽입함으로 내부 산란점의 역할을 통해 광추출 효율을 높이는 기술이다. SiO2 Nano 구조는 내부에 굴절률이 작은 부분을 형성하게 되어 빛이 내부에서 진행할 때 산란되는 효과가 발생되어 내부에 갇히지 않고 방 출시키는 역할을 한다.



- Internal Scattering Point in n-GaN(SiO<sub>2</sub> Nano-rods)

그림 2.17 PNS를 이용한 LED의 구조

#### 제3장 실험방법 및 결과

#### 제1절 ZnO 나노 구조에 의한 LED 광 추출 효율 향상

본 연구에서는 ZnO 나노 구조의 방향에 따른 LED 최적 광 추출 효율을 얻는 구조 를 도출하고자 한다. 이를 위해 수열 합성법에 의해 다양한 각도의 ZnO 나노 구조를 성장 하였고, FDTD 시뮬레이션을 이용하여 각도에 따른 광 추출 효율을 계산 하였 다. 실제 LED를 제작하여 그 특성을 비교 하였다.

#### 1. ZnO 나노 구조 성장

ZnO 나노구조를 성장시키는 여러 가지 방법 중 수열합성법(Hydrothermal method) 은 최근 많은 연구가 진행되고 있다. 그 이유는 비용 면에서 다른 공정들에 비해 이 점을 가지고 있으며, 저온에서 성장 가능하고, damage-free 공정이 가능하기 때문이 다<sup>[18,19,20,21,22]</sup>

ZnO 나노구조를 성장시키기 위해서는 Seed layer가 필요로 하는데, 이 Seed layer의 역할은 ZnO 나노구조가 잘 성장되기 위하여 뿌리 같은 역할을 하는 것이다. Seed layer 역시 수열합성법(Hydrothermal method)으로 성장 시키며, Flower 형태와 Vertical(rod) 형태가 서로 다르게 진행된다. Flower 형태의 Seed layer는 DI water에 가루 분말을 희석하여 90도씨로 가열하여 형성시키고, Vertical(rod) 형태의 Seed layer는 DI water가 아닌 Ethanol에 희석하여 온도를 올리지 않는 Room Temperature의 조건에서 형성시킨다. 그 다음 메인 성장인 ZnO 나노구조를 성장시 키는 방법은 서로 동일하며, 85도에서 1시간동안 PH 6~7을 유지시키면서 성장 시킨 다. 성장 방법에 대한 세부적인 내용은 표 3.1에서 보여주고 있다.

	Flower	Vertical
Seed layer	0.005M Zinc acetate dissolved in DI water for 5 min at 90°C	0.005M Zinc acetate dihydrate dissolved in Ethanol for 5 min at R.T
ZnO NRA	0.05M Zinc nitrate hexahydrate and 0 HMT dissolved in DI water for 60 min (PH : 6~7 )	

표 3.1 ZnO 나노구조 수열합성법(Hydrothermal method) 조건

수열합성방법에 의해 성장된 vertical 및 flower 모양 ZnO nanorod 단면 및 표면 SEM 사진을 그림 3.1에서 보여주고 있다. 그림에서 (a),(c)에 해당하는 사진은 ZnO rod의 단면과 표면의 사진을 보여주고 있고, (b),(d)에 해당하는 사진은 ZnO flower의 단면과 표면의 사진을 보여주고 있다. 성장된 vertical 및 flower 모양 ZnO nanorod 의 지름(Diameter)와 길이(Length)는 80nm±20nm, 800nm±200nm로 각각 성장 되었 다.



그림 3.1 수열합성법에 의해 성장된 (a),(c) vertical 모양 ZnO nanorod와 (b),(d) flower 모양의 ZnO nanorod의 단면 및 표면 SEM 이미지

#### 2. FDTD 설계

광 추출 효율을 효율적으로 설계하기 위해서는 다양한 수치 해석 방법들이 개발되 어 왔다. 이러한 수치해석 방법들 중 대표적인 방법들로서 평면파 방법 (Plane wave method), 시간영역 유한차분법(Finite-Difference Time-Domain), 전파 행렬 방법 (Transfer Matrix method)등이 있다. 본 연구에서는 FDTD 설계를 바탕으로 진행 하 였다. FDTD 방법은 현재 광 추출 효율을 구하기 위한 구조 설계에 있어서 가장 널 리 사용되는 분석 방법이다. 이러한 FDTD 특성은 근본적으로 다음 4개의 Maxwell 방정식에 의해 지배를 받는다.

결국 이 4개의 Maxwell 방정식을 아무런 가정이 없이 시간의 진행에 따라 풀게 되 면, 특정 시간에 전기장과 자기장의 분포를 알 수 있게 되고 또한 이 식들로부터 다 양한 광학적 특성을 도출할 수 있다. FDTD 방법은 개념적으로 간단하고 대부분의 모든 문제를 근사 없이 정확하게 풀 수 있다는 점에서 강력한 수치해석 방법이다. LED 구조에서의 추출 효율뿐만 아니라 투과율, 반사율 등을 계산할 수 있다.

우선적으로 표 3.2.에서와 같은 LED 및 ZnO의 크기 및 굴절률을 이용하여 LED를 설계하였다. ZnO rod는 일정한 크기와 구조를 주기적으로 array구조로 설정하였고, ZnO flower구조는 각각 Segment를 설정하여 제작하였다. 그리고 LED의 구조 x, y, z축으로 모든 설정 면을 PML(Perfectly Matched Layer)조건으로 설정하여 빠져나간 빛은 다시 돌아오지 못하게 설정하여 측정값에 미치는 영향을 최소화 시켰다.

	Thickness	Refractive Index	Diameter & Length
n-GaN	4um	2.5	-
MQW	50nm	2.5	_
p-GaN	150nm	2.5	-
ITO	100nm	2.0	-
ZnO	_	2.0	80nm & 1um

표 3.2 FDTD 시뮬레이션을 위한 변수들

LED의 구조를 형성한 후 pulse 의 TE mode 의 특성을 갖는 source 를 설장하였다. TE polarization으로 설정 한 이유는 InGaN/GaN MQW LED에서 TE mode가 주요 광원으로 작용하기 때문이다.<sup>[23]</sup> 그리고, 마지막으로 빛을 측정할 수 있는 Receiver를 달았다. Receiver는 방출된 빛을 측정할 수 있는 방출 Receiver(I<sub>e</sub>)와 굴절률 차이에 의해 다시 반사되어 돌아오는 빛을 측정할 수 있는 반사 Receiver(I<sub>r</sub>)를 달았다. (그림 3.2)



그림 3.2. FDTD 시뮬레이션을 위한 LED의 계략도

두 개의 Receiver를 설정한 이유는 광 추출 효율을 구하는 공식을 빛 대어 설명 할 수 있다. 아래의 식을 보면 광 추출 효율은 방출 빛과 반사된 빛의 적분 합에 방출된 빛의 적분 합을 나눈 값으로 설명할 수 있다. 여기에서 I<sub>e</sub>는 위에서 설명한 것과 같이 방출된 빛의 양을 나타내고, I<sub>r</sub>은 내부로 반사된 빛의 양을 나타낸다.

# $\eta_{extraction} = \frac{\int I_{e}(t)dt}{\int I_{e}(t) + \int I_{r}(t)dt}$

그림 3.3은 시뮬레이션을 진행하여 얻어낸 시간에 대한 함수로 L와 L의 그래프의 구조이다. 광 추출 효율을 비교하기 위하여 ZnO 나노구조가 없는 일반적인 LED의 구조도 같이 진행하였다. ZnO 나노구조가 존재하지 않는 일반적인 LED의 광 추출 효율은 37%밖에 되지 않았다. 하지만, ZnO rod와 flower가 형성되어 있는 LED의 광 추출 효율은 60%와 49%의 값을 얻어 냈다. 이 결과로서 ZnO 나노구조가 GaN와 Air 계면 사이에서 내부 전반사를 줄여 주었기 때문에 광 추출 효율이 증가했다는 것을 알 수 있다. 표 3.3 에서는 시뮬레이션 그래프의 광 추출 효율의 세부적인 값을 나타내고 있다. 여기에서도 알 수 있듯이 ZnO 나노구조가 없는 일반적인 LED에서는 방출된 빛에 비해 반사된 빛이 상당히 큰 것을 알 수 있고, ZnO 나노구조가 포함된 구조에서는 그 반사된 빛이 상당히 줄었음을 보여주고 있다. 그림 3.3에서도 그래프 를 살펴 보면 일반적인 LED에 비하여 ZnO 나노구조가 있는 LED가 더 좋은 효율을 보여주고 있음을 알 수 있다.

	Emission	Reflection	Extraction
	Dimosion	Reflection	efficiency
w/o ZnO	0.84	1.42	37%
ZnO nanorod			
of vertical	2.09	1.42	60%
shape			
ZnO nanorod			
with flower	2.25	2.35	49%
shape			

표 3.3 각각 LED들의 측정된 emission 과 reflection 세기 및 광추출 효율



그림 3.3 각각 LED들에서 방출된 빛과 반사된 빛의 세기

또한, 수직 정렬된 ZnO nanorod가 다양한 각도를 갖는 flower 모양의 ZnO nanorod 에 비하여 효율이 크게 증가함을 알 수 있다. 이 이유를 알아보기 위하여 그림 3.4에 서 보는 것과 같은 추가적인 실험을 진행하였다. ZnO 나노구조의 각도가 광 추출 효율에 얼마만큼의 영향을 끼치는지를 알아보기 위하여 GaN LED위에 90도, 45도, 30 도로 ZnO 나노 구조를 설계하고 방출된 빛, 반사된 빛을 측정 하였다. 그림 3.4에서 보이듯이 90도에서는 ZnO와 GaN계면에서 완벽히 waveguide되는 모습을 관찰 할 수 있다. ZnO 나노 구조의 각도가 90에서 30도로 각도가 줄어듦에 따라 바로 위에 방출 되는 빛과 ZnO을 따라서 waveguide되는 빛으로 구분되며, 점점 반사에 세기뿐만 아니라 반사의 양도 증가하는 것을 관찰 할 수 있다. 그림 3.4 (d)에서는 각 ZnO 나노 구조의 각도가 줄어듦에 따라 반사의 세기 반사의 수기 적도 한다. 그림 3.4 (d)에서는 각 ZnO 나노 구조의 각도에 따른 시간함수로 반사되는 빛의 세기 그래프를 나타내고 있는데, 여기 액서도 각도가 줄어듦에 따라 반사의 양과 세기가 증가하고 있다는 것을 한 번 더 확인할 수 있다. 이로 인하여 수직 정렬된 ZnO nanorod의 형태가 다양한 각도의 flower의 형태의 ZnO nanorod에 비해 광 추출 효율을 더 많이 증가시킬 수 있다는 결과를 얻어냈다.



시간에 따른 방출 빛의 세기

#### 3. 디바이스 제작

LED 구조는 사파이어 기판위에 MOCVD에 의해 성장 되었다. LED는 2µm 두 께의 Si이 도핑된 GaN 층과 MQW 활성층은 InGaN/GaN로 5주기를 가지고 있 으며, 0.15um의 두께의 Mg이 도핑된 GaN층으로 이루어져 있다. Mg이 도핑된 p-GaN의 정공(Hole) 농도는 3×10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup> 을 가진다. p-GaN층은 Inductively coupled plasma(ICP)를 이용하여 n-GaN층까지 식각을 하였다. p-GaN층 위에는 Indium Tin Oxide(ITO) 투명전극을 올렸고, e-beam evaporation을 이용하여 Cr/Au의 n-pad와 p-pad를 증착시켰다. 그 후 앞에서 설명한 수열합성법의 조건 으로 LED의 표면위에 ZnO 나노구조의 형태를 성장 시켰다. 먼저 ZnO flower의 형태는 ZnO 나노구조를 성장시키기 전에 Negative PR를 도포 시켰고 Mask를 이용하여 Photo lithography를 통해 선택적으로 전극 부분을 가리고 ITO층만 노 출 시켰다. 그 다음 ZnO seed layer 와 ZnO 메인 나노구조를 성장시켰다. 하지 만, ZnO rod의 형태는 Seed laver를 성장 시킬 때, Ethanol을 사용하기 때문에 PR과 Photo lithography 공정을 사용하지 않고, 바로 ZnO seed layer와 ZnO 메 인 나노구조를 성장 시켰다. 이렇게 성장시킨 GaN 기반 LED의 구조를 보여주 고 있다. 그림 3.5 (a)는 ZnO 나노구조가 없는 일반적인 LED의 모식도를 보여주 고 있으며, (b)와(c)는 각각 ITO위에 선택적으로 잘 올라가져 있는 수직 정렬된 ZnO nanorod와 flower 모양의 ZnO nanorod를 보여주고 있다.

최종적으로 만들어진 수직 정렬된 ZnO nanorod와 flower 모양의 ZnO nanorod 의 표면 SEM 사진을 그림 3.6에서 보여주고 있다. SEM 사진에서 보이듯이 ITO 투명전극위에 두 구조 모두 선택적으로 잘 올라가져 있음을 확인할 수 있 다. 여기서 그림 3.6 (a)는 수직 정렬된 ZnO nanorod가 LED 표면 위에 성장된 모습이고, (b)는 flower 모양의 ZnO nanorod가 LED 표면 위에 성장된 모습을 보여주고 있다. ZnO rod는 표면 전체에 골고루 잘 성장되어져 있는 모습을 보이 고, flower 모양의 ZnO nanorod는 군데 리어져 있는 모습을 보여주고 있 다. 이는 flower형태를 형성하기 때문에 수직 정렬된 ZnO nanorod와 다르게 일 정한 주기를 갖지 않기 때문으로 볼 수 있다.



그림 3.5 LED의 계략도 (a) w/o ZnO, (b) vertical 모양 ZnO nanorod , (C) flower 모양 ZnO nanorod



그림 3.6 ZnO 나노구조를 포함하는 GaN 기반 LED의 표면 SEM 이미지 (a) vertical shaped ZnO nanorod, (b) flower shaped ZnO nanorod

#### 4. 전기적 및 광학적 특성 평가

모든 공정이 끝난 LED를 평가하는 것 또한 중요한 요소이다. 전기적 및 광학적 특성 평가는 LED chip tester를 이용하여 측정 하였다. 그림 3.7 (a)에서는 Current-Voltage (*I-V*) 특성을 보여주고 있다. 먼저 ZnO 나노구조가 없는 일반 적인 LED에서는 Forward Voltage가 20mA의 전류를 주입하였을 때 3.1V를 나 타냈다. 이와 비교하여 ZnO 나노구조가 포함된 LED의 Forward Voltage는 20mA에서 3.08V를 나타내었다. 저온을 통한 수열합성법(Hydrothermal method) 으로 성장시킨 ZnO 나노구조가 LED에 영향을 미치지 않았음을 의미 한다. 높은 온도에서 성장된 ZnO와 Sputter를 이용하여 성장시킨 ZnO의 나노구조는 LED에 전기적으로 영향을 미치고 있다는 보고가 있기 때문에 수열 합성 방법이 ZnO 나노 구조를 LED 구조에 성장하기에 적합한 방법으로 판단된다.<sup>[24]</sup>

그림 3.7 (b)에서는 Optical Output Power(*L-I*)를 보여주고 있다. 수직 정렬된 ZnO nanorod와 flower 모양의 ZnO nanorod를 갖는 LED의 광 출력 파워는 ZnO 나노구조가 형성되어 있지 않은 일반적인 LED에 비하여 100mA의 전류를 각각 주입 하였을 때 50%와 30%로 크게 향상되었음을 보여주고 있다. 이러한 결과는, 앞서 보여준 FDTD 시뮬레이션 결과와도 일치되는 모습을 보여준다. 이 는 수직 정렬된 ZnO nanorod가 flower 모양의 ZnO nanorod에 비해 waveguide 효과가 더 크기 때문에 내부 전반사를 크게 줄여주어서 더 높은 효율을 나타내 기 때문이다. 본 실험은 ZnO 나노 구조의 방향이 광 추출 효율 향상에 중요한 변수임을 알수 있고 또한 수직 정렬이 최적 구조임을 알 수 있다.



그림 3.7 각각 LED들의 (a) Current-Voltage(I-V) 곡선, (b) Optical output power

#### 제2절 Ag nanowire 투명전극

일반적인 LED의 광 특성 향상에 문제점을 일으키는 또 하나의 원인은 LED는 사파이어 기판을 사용하는데, 이 사파이어 기판은 절연 특성을 나타내므로 p와 n전극 사이가 가까운 메사의 가장자리 근처에 전류의 흐름이 집중되는 것을 알 수 있다. (그림 3.8)



그림 3.8 절연 기판 위에 성장된 메사구조 GaN계 LED에서의 current crowding 과 n형과 p형 층의 저항, p형 접촉 저항, p-n 접합을 나타내는 이상적인 다이오 드로 구성된 등가회로

이러한, 문제점을 해결하기 위하여 indium tin oxide(ITO)라는 투명전극을 p형 박막 위에 중착하여 사용한다. ITO는 전기적 특성이 우수하고 또한 높은 투과도 를 보유하여 전류 밀집의 문제를 해결할 수 있는 전극이다. 하지만, 그림 3.9에서 보는 것처럼 ITO를 구성하는 회귀 금속인 인듐의 수요가 급격히 증가 하면서, 가격이 급등하게 되었다. 또한 ITO는 Ultraviolet 영역과 blue 영역 쪽에서 흡수 가 일어나며 산, 염기 등에 노출시 화학적 불안정성을 갖는다.

ITO의 문제점을 해결하기 위하여 여러 그룹에서 대체 물질을 찾기 위해 연구 를 하고, 대표적인 물질이 Graphene(그래핀)이다. Graphene은 High mobility, Thermal conductivity, High optical transmittance등의 이점을 가지고 있기 때문 에 ITO 대체 물질로 각광 받고 있다. 하지만, Graphene 역시 높은 Sheet Resistance와 p형 GaN와 work function의 차이로 인하여 Ohmic contact의 문제 점을 나타내고 있다. 이 문제점은 LED에서 전기적 특성 및 광 효율의 저하로 나 타나게 된다.<sup>[25,26,27]</sup>



그림 3.9 indium의 가격 변동성 및 파장에 따른 ITO 의 투과도

본 연구에서는 다양한 물질들이 ITO를 대체하는 물질로 거론되고 있지만, 그림 3.10에 보이는 것처럼 ITO와 비슷한 전기적 특성과 높은 투과도, Ohmic 접합을 이룰 수 있는 은 나노와이어 전극에 대해 연구하고 LED에 적용하여 그 특징을 ITO를 갖는 LED와 비교하고자 한다.<sup>[28]</sup>



그림 3.10 은 나노와이어 전극의 파장에 따른 투과도 및 SEM 이미지

#### 1. Ag nanowire 투명전극 제조 및 특성

은 나노와이어 투명전극을 만들기 위해서 0.5w%를 가지는 수분산액을 ㈜나노 픽시스에서 구매하여 사용하였다. 본 연구에서는 LED에 은 나노와이어 투명전극 을 도포하기 위하여 스핀코팅 방법을 이용 하였다.

첫 번째로 ITO와 비슷한 Sheet resistance를 갖는 은 나노와이어를 얻기 위하 여 Glass 위에 여러 가지 스핀코팅 조건을 통하여 실험을 진행 하였다. 아래 표 3.5는 ITO의 저항 값과 은 나노와이어의 저항 값을 맞추기 위하여 다양한 회전 속도 및 시간에 대한 스핀 코팅 조건과 측정된 은 나노와이어 전극의 면 저항 특성을 보여준다. Glass위에 은 나노와이어 수분산액을 골고루 도포한 후 스핀코 팅을 시작 하고, 첫 스핀코팅이 끝난 후 에는 약 50℃에서 1분간 건조를 시켰다. 반복 횟수는 건조가 끝난 후, 다시 도포하여 스핀 코팅 한 횟수이다.

ITO/Glass 25 ~ 35 Ω/sq				단위:Ω/sq	
Spin-Coating Spee	d / time	1 time	2 times	3 times	1
300rpm (5s) 500rpm (10 1000rpm (5s)	s)	38.0	15.17	10.2	
300rpm (5s) 500rpm (10 2000rpm (5s)	s)	67.8	33.8	20.2	
300rpm (5s) 500rpm (10s 3000rpm (5s)	)	103.5	57.3	45.9	
500rpm (5s) 1000rpm (10s) 500rpm (5s)		315.7	156.4	98.7	
500rpm (5s) 2000rpm (10s) 500rpm (5s)	)	405.4	211.0	102.7	

표 3.4 Glass 위에 증착된 ITO의 면저항 값과 스핀 코팅 조건별에 따라 Glass 위에 증착된 은 나노와이어 면저항 값

표 3.4에서도 알 수 있듯이 300rpm-500rpm-2000rpm의 조건을 통하여 1번 반복

후, 재 차 반복하여 얻어낸 결과 면저항이 33.8Ω/sq을 갖는다. 이는 ITO의 면 저 항과 유사한 값을 보인다.

스핀 코팅의 조건을 잡은 다음 표면에 증착된 은 나노와이어의 모습을 보기 위 하여 FE-SEM 촬영을 진행 하였다. 조건은 위의 표3.5에서의 스핀 코팅 조건과 동일하며, 최적의 조건으로 잡은 저항 값인 2번 반복시킨 것과 동일하게, 모든 조건에서 2번 반복하여 샘플을 제작 하였다. 맨 위의 첫 번째 조건 그림3.11 (a) 부터 차례로 아래로 순서를 갖는다. 샘플 (b)는 300rpm(5s) - 500rpm(10s) -2000rpm(5s) 최적의 조건을 갖는다. 아래의 그림 3.11은 제작한 샘플의 FE-SEM 표면 이미지를 보여준다. 그림 3.11과 위의 표3.5를 매치해서 보면 면저항 값이 커질수록 표면의 은 나노와이어의 밀도가 적은 것을 볼 수 있다. 실질적으로 FE-SEM 표면 이미지에서도 (a)에서 (e)로 갈수록 표면에 은 나노와이어의 모습 이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 은 나노와이어의 밀도가 증가 될수 록 면 저항은 감소한다는 것을 알 수 있다.



그림 3.11 스핀 코팅 조건에 따른 나노와이어 투명 전극 표면 SEM 이미지 (a)300rpm(5s)-500rpm(10s)-1000rpm(5s), (b)300rpm(5s)-500rpm(10s)-2000rpm(5s), (c)300rpm(5s)-500rpm(10s)-3000rpm(5s), (d)500rpm(5s)-1000rpm(10s)-500rpm(5s), (d)500rpm(5s)-2000rpm(10s)-500rpm(5s), (모든 시편 2회 코팅)

그 다음으로 은 나노와이어의 광 투과도 특성을 알아보기 위하여 위의 조건과 동일하게 시편을 제작하였다. 그림 3.12는 스핀 코팅 조건별 광학적 투과도 특성 비교 그래프를 보여 주고 있다. 첫 번째 조건에서는 ITO의 조건보다 좋지 않거 나 비슷한 것을 볼 수 있으며, 세 번째 조건과 4~5번째 조건은 ITO보다 투과도 의 특성이 월등하지만, 위의 표면 SEM 이미지를 보면 은 나노와이어의 분포가 적어 면 저항이 ITO에 비해 상당히 큰 것을 알 수 있다. 최적의 조건인 300rpm-500rpm-2000rpm 2회 반복한 조건은 ITO의 투과도 특성과 거의 비슷하 고 blue 영역과 UV 영역 쪽에서는 투과도가 더 높은 것을 알 수 있었다.



그림 3.12 다양한 스핀 코팅 조건에서 증착된 은 나노와이어 전극의 투과도

스핀 코팅 조건별 광학적 투과도의 그래프를 보면 저항과의 밀접한 관련이 있 다는 것을 또한 알 수 있다. 저항의 값이 커지면 커질수록 투과도 역시 같이 증 가하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 저항과 광 투과도는 비례하는 결과를 알 수 있고, 저항과 은 나노와이어의 분포도는 반비례하는 결과를 얻을 수 있다.

마지막으로 ITO film과 최적의 조건으로 만들어진 은 나노와이어 투명 전극의 광 투과도를 비교하였다. 만들어진 은 나노와이어 투명 전극은 ITO와 거의 비슷 한 광학적 투과도를 나타내고 있으며, 본 연구에서 사용한 InGaN/GaN LED는 blue영역대의 파장 대를 보이기 때문에, 450nm의 파장 영역을 확대 비교하여 보 았다. 그림 3.13에서 확인 할 수 있듯이 ITO에 비해 은 나노와이어 투명전극이 살짝 더 높은 것을 볼 수 있으며, 그 수치는 450nm영역에서 ITO : 91%, Ag nanowire : 93%를 나타내고 있으며, 약 2%의 차이를 보이고 있다. 삽입된 그림 은 Glass 위에 만들어진 은 나노와이어 투명전극이 투명한 것을 보여준다.



그림 3.13 은 나노와이어와 ITO 투명전극의 광 투과도

#### 2. Ag nanowire 투명전극 제조 방법 연구

ITO와 유사한 특성을 보이는 은 나노와이어 투명전극의 최적의 조건을 확보하 여 LED에 적용하기 위해, 투명전극의 패턴을 Etching 방법을 선택하였다.

우선적으로 스핀코딩 방법으로 은 나노와이어 투명전극을 먼저 증착시킨 다음 Positive PR을 전면에 증착시키고 포토리소그라피를 진행한다. 그 후, Etching 용액을 사용하여 표면에 은 나노와이어를 제거 시킨 후, 나머지 PR을 제거시켜 은 나노와이어 투명전극 패턴을 완성 시킨다. PR을 제거하기 위한 용액으로는 Acetone을 공통적으로 사용하였고, 은 나노와이어 Etching용액은 질산과 DI water의 혼합액을 사용하여 제거 하였다. 표 3.5은 Etching 방식을 서로 나누어 적어놓은 실험방법이다.

	Etching
Experiment	Ag NW spin-coating 증착 -> Positive PR 증착 Soft baking -> Develop 진행
	Ag NW etchant dipping -> PR remove 진행

표 3.5 GaN LED를 위한 은 나노와이어 투명전극 제작 공정

위의 표 3.5에 적어진 투명 전극 제조 방법의 이해를 더 쉽게 하기 위하여 그림 3.14에서는 Etching 방식을 통하여 만들어진 투명전극의 제조 과정과 광학 이미 지를 보여주고 있다. 선택적인 Ethcing 방법을 통하여 p-GaN 위의 원하는 위치 에만 은 나노와이어 투명 전극을 형성 하였고, 은 나노와이어 투명전극을 형성 후 에 광학이미지를 찍은 사진을 찍어 본 결과, p-GaN 위의 투명 전극 층에만 증착이 된 모습을 볼 수 있다.



그림 3.14 은 나노와이어 투명전극 제조 과정과 광학 이미지

#### 3. 디바이스 제작

위의 실험을 통하여 은 나노와이어 투명 전극의 저항 및 투과도를 확보하였고, 또한 리소그래피 조건을 확보하여, 최종적으로 은 나노와이어 투명 전극을 이용 한 InGaN/GaN LED를 제작하였다. LED구조의 제작은 위에서 언급한 ZnO 나노 구조를 성장시킨 LED의 구조와 동일하게 만들어졌으며, 아무것도 성장시키지 않 은 p-GaN의 구조와 ITO film을 성장시킨 ITO LED와 Etching 방식으로 이루어 진 은 나노와이어 투명전극 이렇게 3가지 패턴으로 디바이스를 제작 및 비교를 하였다. 그림 3.15는 제작한 LED의 각각의 패턴별 표면 SEM 이미지를 보여주 고 있다. 그림에서도 확인할 수 있듯이 p-GaN 위에는 아무것도 형성되지 않은 모습을 보여주고 있고, ITO film은 표면 전체에 고루고루 퍼진 것을 확인 할 수 있다. 또한, Etching 방법을 통한 은 나노와이어 투명 전극도 고루고루 잘 분포 되어있음을 확인할 수 있다.



그림 3.15 제작한 LED의 p-GaN, ITO 및 Etching 방식의 은 나노와이어 투명 전극 표면 SEM 이미지

#### 4. 전기적 및 광학적 특성 평가

모든 공정이 끝난 LED를 평가하는 것 또한 중요한 요소이다. 전기적 및 광학적 특성 평가는 LED chip tester를 이용하여 측정 하였다. 그림 3.16은 은 나노와이 어 투명전극 LED와 ITO film 및 p-GaN의 Current-Voltage (*I-V*) 특성을 보여 주고 있다. 20mA의 입력 전류에서 Forward Voltage는 p-GaN 4.40V, ITO 3.02V, Ag nanowire 3.50V를 나타내고 있다. 비록 *I-V*커브를 봤을 때에는 현재 상용화중인 ITO가 은 나노와이어 투명전극에 비하여 더 좋은 전기적 특성과 빛 발광 이미지를 확보하고 있는 모습을 볼 수 있다. 하지만, p-GaN에 비해서는 월 등히 좋은 모습을 보여주고 있으며, 빛 발광 이미지에서도 볼 수 있듯이 p-GaN 의 샘플은 p전극 부분에서는 발광이 일어나는 모습을 볼 수 있지만, 은 나노와이 어 투명 전극에 경우는 Current Spreading효과가 일어나 LED의 표면 전체에서 빛이 발광하는 모습을 볼 수 있다.



그림 3.16 은 나노와이어 투명전극 LED의 전기적 특성 비교 그래프 및 빛 발광 이미지

그림 3.17에서는 입력 전류에 따른 Optical output power (L-I) 그래프의 특성 을 보여주고 있다. 은 나노와이어 투명전극의 optical output power는 p-GaN 광 학적 특성보다 약 3배정도의 향상을 보여주고 있지만, 여전히 ITO film보다는 20% 정도 광 출력 파워가 낮은 상태 이다.

현재로서는 ITO film이 은 나노와이어 투명전극 보다 좋은 효율을 보여주고 있 지만, 은 나노와이어 투명전극은 ITO와 비슷하거나 또는 더 높은 전도도와 투과 도를 보이기 때문에 공정조건이 최적화 된다면 ITO를 이용한 LED의 전기적 및 광학적 특성 보다 뛰어난 LED의 구현이 가능할 것으로 판단된다.



그림 3.17 각각 LED들의 입력 전력에 대한 Optical output power

#### 4장 결론

본 논문에서는 사파이어 기반의 질화갈륨 LED 칩의 광학적 특성 향상을 효율 개선을 위해 ZnO 및 Ag 나노구조를 이용하여 연구를 진행 하였다. 먼저 LED의 광 추출 효율 개선을 위하여, ZnO 나노 구조를 LED 표면에 형성 하였고, 최적 구조를 도출 하였다. ZnO 나노구조는 가격이 저렴하며, 저온에서 형성시킬 수 있는 수열합성법을 사용 하였다. 만들어진 ZnO 나노구조의 지름 및 길이는 약 80±20nm 와 800±200nm이다. FDTD 시뮬레이션을 통하여 ZnO 나노구조가 일반 적인 LED에 비하여 상당한 광추출 효율의 향상을 보여주는 것을 확인할 수 있 었고, 또한 수직 정렬된 구조의 ZnO 나노 구조가 광 추출 효율 향상에 최적 구 조임을 확인 하였다. 이를 토대로 ZnO 나노구조를 형성시킨 LED를 만들었을 때 ZnO 나노구조가 없는 것과 있는 LED의 전기적특성은 거의 비슷하게 나타나 ZnO를 성장시킬 때 전기적 영향이 없는 것으로 나타났으며, 광학적 특성은 100mA에서 ZnO가 없는 구조에 비해 수직 정렬된 ZnO nanorod 구조는 약 50% 가 향상 하였고, flower 모양의 ZnO nanorod 는 약 30%의 향상을 보였다.

두 번째로 현재 투명전극으로 사용 중인 ITO는 전기적 및 광학적 특성이 우수 하지만, 희귀금속인 Induim에 의해 가격이 비싸고, Ultraviolet 영역과 blue 영역 쪽에서 흡수에 의해 LED의 광 특성이 저하되는 단점을 가지고 있어, 이를 대체 하기 위하여 ITO와 비슷한 특성을 갖는 은 나노와이어 투명전극을 연구하고 LED에 적용하였다. Spin-Coating 방법에 의해 은 나노와이어 투명 전극을 제작 하였고, ITO의 전기적 및 광학적 특성과 비슷한 수치를 확보하였다. 은 나노와 이어 투명 전극을 이용한 LED를 제작하였고, 투명 전극이 없는 구조에 비해 전 류 퍼짐 특성 및 Forward voltage, 광 출력이 크게 증가되어 투명 전극으로 활 용 가능함을 확인 하였다. ITO를 이용한 LED와 비교하여 전기적 및 광학적 특 성이 약간 낮지만 공정이 최적화되면 이와 유사하거나 능가하는 특성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### [참고문헌]

- "Lihgt Emitting Diodes (LEDs) for Generating Illumination," OIDA Technology Roadmap Update 2002, (2002).
- [2] Manning Fan, Meng Liang, Debo Guo, Fuhua Yang, Liangchen Wang, Guohong Wang, and Junmin Li, "Color filter-less technology of LED back light for LCD-TV", Proc. SPIE, 6841, 68410G, (2007).
- [3] J. J. Wierer, D. A. Steigerwald, M. R. Krames, J. J. O'Shea, M. J. Ludowise, G. Christenson, Y. C. Shen, C. Lowery, P. S. Martin, S. Subramanya, W. Gotz, N. F. Gardner, R. S. Kern, and S. A. Stockman, "High-power AlGaN filp-chip light-emitting diodes," Appl. Phys. Lett., 78, 3379 (2001).
- [4] C E Lee, Y C Lee, H C Kuo, M R Tsai, T C Lu and S C Wang, "High brightness GaN-based flip-chip light-emitting diodes by adopting geometric sapphire shaping structure," Semicond. Sci. Technol. 23, 025015 (2008)
- [5] J-Y Kim, S-I Na, G-Y Ha, M-K Kwon, I-K Park, J-H Lim, S-J Park, M-H Kim, D-Y Choi and K-G Min, "Thermally stable and highly reflacetive Agal ally for enhancing light extraction efficiency in GaN light-emitting diodes," Appl. Phys. Lett., 88, 043507 (2006).
- [6] T Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, " Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening," Appl. Phys. Lett., 84, 855 (2004).
- [7] Coffey, Valerie C, "Microlens arrays improve the extraction efficiency of nitride LEDs," Laser Focus World., 44, 1, 29 (2008).
- [8] E. Fred Schubert, Light-Emittind Diodes (2003).
- [9] Masayuki Fujita, "Slicon Photonics: Nanocavity brightens silicon," Nature Photonics., 7, 264 (2013).
- [10] Kazuyuki Tadatomo, Hiroaki Okagawa, Youichiro Ohuchi, Takashi

Tsunekawa, Yoshiyuki Imada, Munehiro Kato and Tsunemasa Taguchi, "High output Power InGaN Ultraviolet Light-Emitting Diodes fabricated on patterned substrates using metalorganic vapor phase epitaxy," Jpn. J. Appl. Phys., 40, L583 (2001).

- [11] Lung-Chien Chen and Wen-Fang Tsai, "Properties of GaN-based light-emitting diodes on patterned sapphire substrate coated with silver nanoparticles prepared by mask-free chemical etching," Nanoscale Research Letters., 8, 157 (2013).
- [12] I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau, T. J. Gmitter, and A. Scherer, "30% external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diode," Appl. Phys. Lett., 63, 2174 (1993)
- [13] Chun Hun, Kug-Seung Lee, Eun-Jeong Kang, and Seong-Ju Park, "Improved light-output and electrical performance of InGaN-based light-emitting diode by microroughening of the p-GaN surface," J. Appl. Phys., 93, 9383 (2003).
- [14] Seok-In Na, Ga-Young Ha, Dae-Seob Han, Seok-Soon Kim, Ja-Yeon Kim, Jae-Hong Lim, Dong-Joon Kim, Kyeong-Ik Min, and Seong-Ju Park, "Selective Wet Etching of p-GaN for Efficient GaN-Based Light-Emitting Diodes" IEEE Photon Technol. Lett., 18, 1512 (2006).
- [15] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and R. Bhat, "Inhibited and Enhanced Spontaneous Emission from Optically Thin AlGaAs/GaAs Double Heterostructures," Phys. Rev. Lett., 61, 22 (1988).
- [16] J. Y. Kim, M. K. Kwon, S. J. Park, S. H. Kim, and K. D. Lee, "Enhancement of light extraction from GaN-based green light-emitting diodes using selective area photonic crystal," Appl. Phys. Lett., 96, 251103 (2010).
- [17] M. K. Kwon, J. Y. Kim, I. K. Park, K. S. Kim, G. Y. Jung, S. J. Park, J. W. Kim, and Y. C. Kim, "Enhanced emission efficiency of GaN/InGaN multiple quantum well light-emitting diode with an embedded photonic crystal," Appl. Phys. Lett., 92, 25 (2008).

- [18] S. Dalui, C. C. Lin, H. Y. Lee, C. H. Chao, and C. Y. Lee, "Light output enhancement of GaN-based Light-Emitting Diodes using ZnO nanorod arrays produced by aqueous solution Growth Technique," IEEE Photon. Technol., 22, 16 (2010).
- [19] X. Fang. I. Li. D. Zhao, Shen. Li. Wang, D. В. and Х. ZnO nanorods "Phosphorus-doped p-type and ZnO nanorod p-n homojunction LED fabricated by Hydrothermal method," J. Phys. Chem. C., 113, 50 (2009).
- [20] K. S. Kim, S. M. Kim, H. Jeong, M. S. Jeong and G. Y. Jung, "Enhancement of light extraction through the wave-guiding effect of ZnO sub-microrods in InGaN blue light-emitting diodes," Adv. Funct. Mater., 20 (2010).
- [21] J. W. Kang, M. S. Oh, Y. S. Choi, C. Y. Cho, T. Y. Park, C. W. Tu and S. J. Park, "Improved light extraction of GaN-based green light-emitting diodes with an antireflection layer of ZnO nanorod Arrays," Electrochem. Solid-state Lett., 14, 3 (2011).
- [22] K. Dai, C. B. Soh, S. J. Chua, L. Wang, and D. Huang, "Influence of the alignment of ZnO nanorod arrays on light extraction enhancement of GaN-based light-emitting diodes," J. Appl. Phys., 109, 8 (2011).
- [23] S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, E. F. Schubert, "High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals," Phys. Rev. Lett., 78, 17 (1997).
- [24] S. J. An, J. H. Chae, G. C. Yi, and G. H. Park, "Enhanced light output of GaN-based light-emitting diodes with ZnO nanorod arrays," Appl. Phys. Lett., 92, 12 (2008).
- [25] S Chandramohan, Ji Hye Kang, Y S Katharria, Nam Han, Yun Seon Beak, Kang Bok Ko, Jong Bae Park, Beo Deul Ryu, Hyun Kyu Kim, Eun-Kyung Suh and Chang-Hee Hong, "Chemically modified mlutilayer graphene with metal interlayer as an efficient current spreading electrode for InGaN/GaN

blue light-emitting diodes," J. Phys. D: Appl. Phys., 45, 145101 (2012).

- [26] Tae Hoon Seo, Tae Su Oh, Seung Jin Chae, An Hyun Park, Kang Jea Lee, Young Hee Lee, and Eun-Kyung Suh "Enhanced Light Output Power of GaN Light-Emitting Diodes with Grahene Film as a Transparent Conducting Electrode," Jpn. J. Appl. Phys., 50, 125103 (2011).
- [27] Chu-Young Cho, Minhyeok Choe, Sang-Jun Lee, Sang-Hyun Hong,, Takhee Lee, Wantae Lim, Sung-Tae Kim, and Seong-Ju Park, "Near-ultraviolet light-emitting diodes with transparent conducting layer of gold-droped multi-later graphene," J. Appl. Phy., 113, 113102 (2013).
- [28] Liangbing Hu, Han Sun Kim, Jung-Yong Lee, Peter Peumans, and Yi Cui, "Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes," ACS Nano, 4, 5 (2010)

#### [감사의 글]

처음 3학년 때 실험실의 초기 멤버로 들어온 지가 어제 같은데, 석사 2년을 포 함하여 벌써 4년이라는 시간이 훌쩍 지나가버렸습니다. 새로운 길에 접어선 저로 서는 조선대학교 광기술공학과에서 6년 동안 배운 모든 것들이 제가 앞으로 나 아가야 하는 저의 길을 인도해 줄 것이라고 확신 합니다. 실험실에 들어가야겠다 고 결심하고 나서 처음으로 교수님과 함께 실험실을 꾸려 갔습니다. 실험실을 하 나하나 꾸려가면서 많은 좋은 일과 안좋은일들이 반복이 되었습니다. 그러면서 항상 이게 옳은 일인지에 대한 의구심이 많이 들기 시작했습니다. 하지만, 이 모 든 것들이 지금 와서 생각해 보면, 다 헛된 생각들이었습니다. 석사과정의 2년여 의 시간은 어떻게 보면 정말 힘든 시간 이었지만, 어떻게 보면 정말 뜻 깊은 시 간이었습니다. 지도교수님의 가르침아래에 겸손하고 열정적인 자세로 공부를 하 게 되었고, 지금의 결실을 얻게 되었습니다. 제가 이렇게 성장할 수 있도록 도와 주신 모든 분들에게 이렇게 감사의 글을 보내려고 합니다.

먼저 처음부터 지금까지 저를 항상 뒤에서 보살펴 주신 권민기 교수님께 진심 으로 감사의 말씀을 드립니다. 아무것도 몰랐던 저에게 반도체란 무엇이며, LED 가 무엇인지 알게 해주셔서 감사합니다. 제가 힘들어 할 때 항상 옆에서 지켜봐 주시고 좋은 말씀 해주셔서 제가 여기까지 성장할 수 있었던 것 같습니다. 교수 님의 지도아래 좋은 학회도 많이 다녔고, 국외 구두 발표 및 여러 학회의 포스터 발표로 인하여 제가 점점 성장해가는 모습을 보면서 마음가짐의 변화가 많이 생 겼습니다. 지난 학부와 석사를 포함하여 6년간 저를 더욱더 성장시키게 도와주시 고 가르쳐주신 김진태 교수님, 김현수 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님, 주 기남 교수님께 깊은 감사드립니다.

학부 시절 처음 실험실을 같이 꾸려나가면서 항상 도움을 주었던 나의 동기 최 유민, 나 보다 대학원은 후배이지만, 사회로서는 선배이면서 모든 게 미안한 승 종이형, 광 기술원에 파견을 일찍이 가서 나의 석사 실험을 도와줘서 참 고마운 동생 종현이, 참 내가 많이 도와주지 못해서 미안한 동생 두형이, 실험실을 나중 에 들어온 나의 친구 선율이, 파견을 떠나기 전까지 저를 항상 옆에서 도와주고 같이 실험실을 이끌어 갔던 고마운 선배 호준이형, 저의 실험이면실험 아이디어 이면아이디어 모든 것을 공유하며 함께하고 힘들 때 옆에서 아무런 말없이 복 돋아주었던 너무나도 말로는 표현을 다 할 수 없는 고마운 선배 용진이형 모든 분들에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그 밖에도 이름들을 하나하나 거론하 지 못한 소중한 인연 분께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 제 뒤에서 항상 응원해주셨던 저의 부모님과 하나밖에 없는 저의 동생에서 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

항상 많은 도움을 주셨던 분들을 기억하며, 사회에 나가서도 초심을 잃지 않고 열심히 하는 사람이 되겠습니다.

2013 年 12 月

崔判柱