



2015년 2월 석사학위논문

# GaN 기반의 자외선 발광다이오드를 위한 은 나노와이어 투명전극 연구

# 조선대학교 대학원

광기술공학과

전 종 현



# GaN 기반의 자외선 발광다이오드를 위한 은 나노와이어 투명전극 연구

Study on the silver nanowire transparent conducting electrode for GaN-based ultraviolet light-emitting diodes

2015년 02월 25일

# 조선대학교 대학원

광기술공학과 전종현



# GaN 기반의 자외선 발광다이오드를 위한 은 나노와이어 투명전극 연구

# 지도교수 권 민 기

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

# 조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과 전 종 현





# 전종현의 석사학위논문을 인준함

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

2014년 11월

# 조선대학교 대학원





# 목 차

#### ABSTRACT

제1장 서 론 1
제2장 이론적 고찰 4
제1절 UV LED(Ultraviolet Light Emitting Diode)의 개요 4
1. UV LED의 발광 원리 4
제2절 UV LED의 효율
제3절 UV LED 투명전극의 특성 10
1. Indium tin oxide(ITO) 11
2. Zinc oxide (ZnO) 12
3. SnO <sub>2</sub> 13
4. Carbon Nanotube (CNT) 14
5. Graphene 15
6. Silver nanowire 15
제3장 실험방법 및 결과
제1절 Silver nanowire 기반의 공정 기술 확보 17
1. Silver nanowire 기반의 투명전극의 전기적, 광학적 특성 17

 2. Silver nanowire 기반 투명전극 패터닝 형성 ······ 23

 제2절 UVA LED 디바이스 제작 ····· 26

 1. Silver nanowire 및 ITO 기반 투명전극을 이용한 UVA LED 제 조 공정 ····· 26





1-1. Silver nanowire 기반 투명전극을 이용한 UVA LED 제작 ······	26
1-2. ITO 투명전극을 이용한 UVA LED 및 투명전극이 없는 UVA LED…	27
2. UVA LED 들의 전기적 및 광학적 특성 평가	29
제4장 결론	32
[참고문헌]	33
[감사의 글]	36





그림 목차

그림 1.1 기술의 발전으로 디스플레이 및 조명이 LED로 대체
그림 1.2 UV LED 의 종류와 파장영역에 따른 이용분야
그림 1.3 UV조명 시장 전망 및 LED조명 시장 전망
그림 2.1 (a) PN 접합 다이오드의 구조와 (b) 회로 기호4
그림 2.2 PN 접합의 고유전위
그림 2.3 열적 평형상태에서 PN 접합 다이오드의 에너지 대역 상태6
그림 2.4 Direct bandgap 구조와 Indirect bandgap 구조····································
그림 2.5 격자상수에 대한 다양한 화합물 반도체의 밴드갭 에너지
그림 2.6 LED 효율의 정의8
그림 2.7 금속과 반도체의 접합에 따른 쇼트키 장벽9
그림 2.8 투명전극의 유, 무에 따른 발광 이미지
그림 2.9 LED 내부의 전류 흐름 및 금속 접합 시 밴드 구조 10
그림 2.10 투명전극이 포함된 LED 의 개략도
그림 2.11 (a) ITO의 결정구조, (b) ITO의 가격변동 그래프, (c) ITO의 전기적, 광학적 특성,
(d) Strain 대한 ITO 면저항12
그림 2.12 (a) ZnO의 결정구조, (b) ZnO의 광학적 특성
그림 2.13 (a) SnO2의 결정구조, (b) SnO2의 전기적 특성
그림 2.14 CNT의 구조 및 전기적, 광학적 특성
그림 2.15 Graphene 기계적, 전기적 특성15
그림 2.16 Silver nanowire의 UV영역의 투과율과 면저항을 보여주는 그래프16
그림 3.1 Silver nanowire의 길이에 따른 네트워크 형성 이미지
그림 3.2 Silver nanowire 기반 투명 전극을 증착하기 위한 장비들 (a) Spray, (b)
Roll-to-Roll, (C) Spin coater
그림 3.3 (a) Silver nanowire 기반 투명전극을 위한 스핀코팅 증착 조건에 따른 면저항 및
(b) 표면 SEM 이미지19
그림 3.4 다양한 Silver nanowire 및 ITO 기반 투명전극의 면저항에 따른 투과율의 변화 및
면저항에 대한 투과도의 변화
그림 3.5 Silver nanowire 열처리에 따른 표면 이미지
그림 3.6 Silver nanowire의 열처리에 따른 Silver nanowire의 투과율 및 면저항21
그림 3.7 Silver nanowire의 열처리에 따른 전류 전압 곡선
그림 3.8 Positive PR과 Negetive PR의 특성
그림 3.9 Lift-off 패터닝 공정순서 및 투명전극 패턴의 광학이미지



그림 3.10 Chemical 패터닝 공정 순서 및 투명전극 패턴의 광학이미지
그림 3.11 Chemical 에칭을 통한 투명전극 패턴의 광학이미지 및 SEM 표면 이미지25
그림 3.12 Silver nanowire 투명전극을 이용한 UVA LED의 제조 과정
그림 3.13 ITO 투명전극을 이용한 UVA LED 및 투명전극이 없는 UVA LED의 제조 공
정
그림 3.14 Silver nanowire 및 ITO 투명전극, 투명전극이 없는 UVA LED의 표면 SEM 이미
지~~~~~28
그림 3.15 Silver nanowire 투명전극, ITO 투명전극, 투명전극이 없는 UVA LED의 I-V 그래
<u>=</u> 29
그림 3.16 각각 UVA LED들의 입력 전력에 대한 Optical output power30
그림 3.17 주입 전류에 따른 Silver nanowire, ITO, No TCO UVA LED의 전류퍼짐 현상…31





#### ABSTRACT

Study on the silver nanowire transparent conducting electrode for GaN-based ultraviolet light-emitting diodes.

> By Jong-Hyun Jeon Advisor : Prof. Min Ki Kwon, Ph.D. Department of Photonic Engineering Graduate School of Chosun University

GaN-based ultraviolet light emitting diodes (UV LEDs) have attracted much attention for applications in curing, water/air purification, fluorescence-based chemical sensing, sterilization, and high-density optical data storage. In addition, UV LEDs can be used as high-color rendering index white light source which is one of the most promising candidates for solid-state lighting. However, the luminous efficiency of InGaN based or AlGaN based UV LEDs is still low for practical application becasue the efficiency of InGaN based or AlGaN based UV LEDs is lower than that of blue LEDs owing to the lack of indium-rich regions that act as localized recombination sites. In addition, one of the problems associated with conventional UV LEDs is the use of non-conductive sapphire as the substrate because it causes the current crowding effect near the p-contact by lateral carrier injection due to low hole concentration and mobility in p-layer. To solve these problems, indium tin oxide (ITO) usually have been widely used as the transparent conducting electrode(TCE) 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 ultraviolet range and instability in the presence of acids or base.

Promising candidates for ITO replacement in UV LEDs include silver nanowires, carbon nanotubes (CNTs), and graphene. Among these candidates, the silver nanowire (Ag NW) is especially promising because its conductivity  $(\sigma_{Ag}=6.3\times10^7 \text{S}\cdot\text{m}^{-1})$  is higher than that of carbon-based CNTs and graphenes and the work function is high ( $\Phi_{Ag}=4.74\text{eV}$ ) compared to several metals commonly used as electrode materials for LEDs.

In this study, we demonstrate an UV LED with a Ag NW-based TCE deposited by the simple solution based coating method. Then, we compare it with UV LEDs with ITO based TCE and without TCE.





## 제1장서 론

LED는 에너지 효율과 친환경 측면에서 갖는 장점 이외에도 일반 조명이 갖지 못하는 파장 제어, 변조, 편광, 광색 가변 등 복합적 기능들을 고루 갖추고 있어 자동차, 정보 통신, 환경, 의료, 교통, 농업, 생명 등 다양한 산업과의 융합에 의 한 고부가 가치 파생 산업을 견인하고 있다. 현재 고출력 화이트 LED의 발광효 율은 100 lm/W 이상을 나타내고 있으며, 이 값은 형광등 성능을 이미 능가한 수 치로 실내·외 조명을 대체해 나가고 있다. CRT TV는 두께가 더 얇아지고 화 질이 우수해진 LED TV로 대체가 되었고 백색 조명으로 많이 쓰였던 백열등과 형광등, 고압방전등 등은 높은 효율과 장수명의 LED조명으로 대체 되고 있 다.<sup>[1,2,3,4]</sup>



그림 1.1 기술의 발전으로 디스플레이 및 조명이 LED로 대체

일반 조명 뿐만 아니라 UV LED 또한 의료용, 환경용 조명 시장에 응용되는 기 존 UV arc 방전등 시장을 대체해 가며 크게 성장 중이며 2017년까지 UV LED 시장이 기존 UV 램프 시장의 34% 이상 점유 할 것으로 예상하고 있다.





UV LED는 파장영역에 따라 쓰이는 용도가 다양하다. 먼저 320nm~380nm의 파 장영역인 UVA LED는 일반 조명과 공기정화기 그리고 Curing을 목적으로 사용 되고 있으며 280nm~320nm의 파장 영역인 UVB LED는 의학치료와 피부치료 및 위조지폐 감지 조명으로 많이 쓰이고 있고 마지막으로 220nm~280nm의 파장영 역인 UVC LED는 물을 정화해주거나 세균을 박멸시키는 살균작용으로 사용이 되고 있다.<sup>[5,6,7]</sup>



그림 1.2 UV-LED의 종류와 파장영역에 따른 이용분야

그 중 UVA LED는 매년 UV curing 시장이 크게 증가하고 있으며 기본 백색을 구현하는 Blue LED + Yellow phosphor 방식에 비해 고연색 구현이 가능하기 때문에 고연색을 요구하는 의료용, 백화점, 박물관, 미술관 등 특수 조명 시장에 서 요구가 증가되고 있다.



그림 1.3 UV조명 시장 전망 및 LED조명 시장 전망





UV LED 기반 백색 시장 요구가 증가되고 있지만 아직까지 UV LED + RGB Phosphor 는 색온도 높아질 수록 기존 Blue LED + Yellow phosphor 에 비해 낮은 휘도의 문제점이 있고 특히 태양광의 기준인 5000K 에서의 UV LED 기반 의 백색 LED의 휘도는 매우 낮고 또한 UV LED는 기존 UV arc 방전등을 대체 하기 위해서는 광출력당 효율이 낮아 교체 비용이 크게 증가되는 문제점 있다. 따라서 UV LED의 효율을 높이기 위한 연구가 절실한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 UV LED의 낮은 효율을 개선하기 위해 투명전극 층으 로 많이 사용되는 Indium tin oxide(ITO)의 UV 영역에 광흡수를 해결하기 위해 금속 나노와이어 기반 투명전극을 개발하며 이를 UV LED에 응용할 수 있는 공 정 기술을 개발하고자 한다.





#### 제2장 이론적 고찰

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

#### 1. UV LED의 발광 원리

PN 접합 다이오드는 그림 2.1(a)와 같이 어셉터(3가 불순물)가 도핑된 P형 반도 체와 도우너(5가 불순물)가 도핑된 N형 반도체의 접합으로 만들어진다. P형 영 역에서는 정공의 농도가 자유전자보다 매우 크며, 반대로 N형 영역에서는 전자 의 농도가 정공보다 매우 크다. 다이오드의 P형 영역에 연결된 전극을 Anode, N 형 영역에 연결된 전극을 Cathode라고 하며, 회로도에서 그림 2.1(b)와 같은 기 호로 나타낸다. 다이오드의 전류는 Anode에서 Cathode 방향으로 흐르는데, 기호 에서 삼각형 방향으로 전류가 흐른다고 생각하면 된다.



그림 2.1 (a) PN 접합 다이오드의 구조와 (b) 회로 기호

PN 접합의 두 단자가 개방되어 외부에서 전압이 인가되지 않은 상태를 열적 평 형상태라고 한다. 열적 평행상태는 PN 접합 영역의 캐리어(전자 또는 전공) 농 도차이에 의해 접합면 근처의 P형 영역의 다수 캐리어인 정공은 N형 영역으로 확산되고, 반대로 N형 영역의 다수 캐리어인 전자는 P형 영역으로 확산된다. 따 라서 접합면 근처의 P형 영역의 억셉터 원자는 정공을 잃어버려 음(-) 이온화되



고, N형 영역의 도우너 원자는 전자를 잃어버려 양(+) 이온화된다. 이와 같은 작 용에 의해 접합면 근처의 P형 영역에는 음의 억셉터 이온의 존재하고, N형 영역 에는 양의 도우너 이온이 존재하는 얇은 영역이 형성된다. 이 영역에서는 움직일 수 있는 캐리어가 없으므로 공간전하 영역 또는 공핍영역 이라고 한다. 공핍영역에는 양 이온에서 음 이온 쪽으로 향하는 전계가 발생되며, 이 전계는 더 이상의 캐리어 확산을 저지하는 역할을 한다. 즉 공핍영역에 형성되는 전계는 캐리어가 상대 영역으로 확산되는 것을 막는 전위장벽으로 작용한다. 일정한 크 기의 전위장벽이 형성된 이후에는 PN 접합 양쪽의 캐리어가 더 이상 상대 영역 으로 확산되지 못하는 열적 평형상태가 된다. 공핍영역의 폭은 P형 영역과 N형 영역의 도핑 농도에 관계된다.

공핍영역의 이온화된 원자들에 의해 발생되는 전위차를 PN 접합의 고유전위라 고 하며, 평형상태의 PN 접합에 발생되는 고유전위는 그림 2.2와 같다.



그림 2.2 PN 접합의 고유전위

PN 접합 다이오드의 동작은 에너지 대역 개념을 이용하면 비교적 쉽게 이해될 수 있다. 열적 평형상태에서 PN 접합의 에너지 밴드 다이어그램은 그림 2.3과 같다. P형 영역과 N형 영역 사이에 고유전위에 의한 전위장벽이 형성되어 있다. P형 영역의 다수 캐리어인 정공은 PN 접합의 전위장벽에 갇혀서 N형 영역으로



이동하지 못하며, N형 영역의 다수 캐리어인 전자도 전위장벽에 갇혀서 P형 영 역으로 이동하지 못한다. 따라서 열적 평형상태의 PN 접합에는 전류가 흐르지 않는다.<sup>[8]</sup> 전위 장벽 이상의 전압을 걸어주게 되면 전자가 P형 영역으로 전공이 N형 영역으로 이동하게 되어 밴드갭 크기의 광자가 방출된다.



그림 2.3 열적 평형상태에서 PN 접합 다이오드의 에너지 대역 상태

LED는 크게 직접천이형(Direct transition)과 간접천이형(Indirect transition) 구별할 수 있다. 반도체의 에너지 구조에서 전도대의 전자가 가전자대의 정공과 결합할 때 에너지가 방출하게 된다. 규소(Si)등 간접천이형 반도체 내에서는 발 생하는 에너지는 주로 열과 진동으로 소모되어 발광 효율이 크게 저하되는 반면, 질화갈륨(GaN) 등 직접천이형 반도체 에서는 전자와 정공의 재결합시 발생하는 에너지가 모두 발광 형태로 나타나기 때문에 LED를 구성하기 위한 적합한 재료 라고 볼 수 있다. 즉, 직접천이로 부터 발생하는 빛의 파증은 반도체의 고유한 특성인 에너지 밴드갭에 따라 결정되며, 빛의 에너지와 발광파장은 다음과 같은 관계가 있다. (그림 2.4)

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

Collection @ chosun





그림 2.4 Direct bandgap 구조와 Indirect bandgap 구조

LED 에서는 광 효율을 향상 시기키 위해 PN 접합 사이에 빛이 발생하는 부분 에 밴드갭이 작은 활성층을 밴드갭이 큰 클래드 층으로 감싸는 구조로 전자와 전공을 가둠으로 전자와 전공의 농도를 높여 재발광 결합속도를 높임으로 광 효 율을 높이는 구조를 사용한다.<sup>[9]</sup>

그림 2.5은 다양한 파장을 구현하기 위해 LED에 활성층에 이용되고 있는 화합물 반도체의 예와 각 반도체의 에너지갭에 따른 파장과의 관계를 보여준다. InGaN 의 In 조성을 조절함에 따라 적색에서 UVA에 해당하는 빛을 얻을 수 있 다. AlGaN 의 Al 조성을 조절함에 따라 UVB, UVC 에 해당하는 빛을 얻을 수 있다.



그림 2.5 격자상수에 대한 다양한 화합물 반도체의 밴드갭 에너지<sup>[10]</sup>

Collection @ chosun



#### 제2절 UV LED 의 효율

UV LED에서 성능을 평가하는 요소 중의 하나가 효율이다. 즉, LED에 공 급된 전기적 전력이 얼마만큼의 광자로 발산하는 가를 나타내는 것을 의미 한다. 그림 2.6은 LED의 효율을 나타내며 전류주입효율, 내부양자효율, 광추 출효율의 곱으로 나타낼 수 있다.

LED 효율 = ()injection • ()internal • ()extraction 외부양자효율(External Quantum Efficiency

그림 2.6 LED 효율의 정의

1. 내부 양자 효율(Internal Quantum Efficiency)

내부 양자 효율은 아래식과 같이 LED 내로 주입된 전자가 정공과 만나서 재결합을 이루어 활성영역에서 방출되어지는 광자수를 의미 한다. 여기에서 I는 전류, V는 전압, h는 Plank 상수, v는 광 주파수, e는 전자의 에너지를 나타낸다. 이상적인 LED의 활성층 역역은 주입된 전자 하나당 하나의 광자 를 방출한다. 내부의 결함 및 표면 재결합 등 많은 비발광재결합이 발생함 으로 내부양자효율은 낮다.

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

2. 광 추출 효율(Extraction Efficiency)

활성층 영역에서 생성되어 방출된 광자들은 LED로부터 빠져 나가야 한



다. 광 추출 효율은 방출된 광자들이 자유공간 속으로 다시 방출되는 것을 의미 한다. 이론적으로는 모든 광자가 빠져나와야 하지만, 역시 실제 LED에 서는 모든 광자가 자유공간 속으로 빠져 나가지 못한다. 전극 표면이나 투 명전극에서의 흡수, 반도체 내부에서의 내부 전반사에 의해서 빛이 갇히게 되되어 광 추출 효율이 낮게 된다. 이를 개선하기 위해 표면 거칠기, PSS (patterned sapphire substrate), Chip shaping 등의 기술이 보고 되고 있다.

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

3. 전류주입 효율(Injection Efficiency)

전류 주입 효율은 LED 내부로 금속 접합에 의해 전자나 정공이 효율적으로 주입되는 지를 나타낸다. 일반적으로 P형 반도체는 높은 일함수를 가지고 있어 전극에 쓰이는 물질과 일함수 차이가 커서 높은 쇼트키 장벽을 형성하 게 된다. (그림 2.7) 따라서 정공의 주입 효율이 낮아지게 된다. 이를 개선하 기 위해서는 적절한 금속 물질을 선택함으로써 쇼트기 장벽을 낮춰 주어야 한다. 또한 P형 반도체는 홀의 농도 및 이동도가 낮아 전공이 주입 되었을 때 전류 퍼짐 현상이 좋지 않다. 이러한 문제는 전류 밀집 현상의 주요 원 인이 된다. 따라서 이를 해결하기 위해 ITO 등과 같은 투명 전극을 사용한 다. (그림 2.8)



그림 2.7 금속과 반도체의 접합에 따른 쇼트키 장벽







#### 제3절 UV LED 투명전극의 특성

UV LED 에피박막 성장 시 P형 GaN의 도핑 원료인 Mg이 운반 가스인 수소와 반응하여 Mg-H 복합물을 형성하게 되는데 이는 Mg의 이온화를 어 렵게 한다. 이 때문에 MOCVD 에피 성장에서는 정공농도를 ~10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> 이 상 높이기가 매우 힘들다. P형 GaN 박막은 N형 GaN 박막의 전자 농도에 비해 보통 10배 정도 낮은 전공 농도를 갖는다. 또한 전자에 비해 전공은 5 배 이상 크기 때문에 이동도가 낮아지고 이는 전도도가 감소되는 원인 된 다. 이외에도 p형 GaN의 일함수가 6.5 eV 이상으로 이보다 큰 일함수를 갖 는 금속이 존재하지 않아 높은 쇼트키 장벽을 형성하게 된다. 그러므로 이 론적으로는 P형 GaN에 대한 Ohmic contact 형성이 거의 불가하다. 이러한 문제점들로 인해 P형 GaN 박막으로 전공이 주입 시 높은 저항을 느끼게 되 어 Current crowding이 발생하게 되고 이는 효율 및 수명이 저하되는 원인 이 된다. 그림 2.9는 LED 내부의 전류 흐름과 금속 접합 시 밴드 구조를 보 여준다.



그림 2.9 LED 내부의 전류 흐름 및 금속 접합 시 밴드 구조





따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 P형 GaN 박막에 비해 저항이 작아 전류를 잘 퍼지게 할 수 있는 구조의 도입이 필수적이다. 이러한 문제 점을 해결하기 위해 많은 연구 그룹에서 P형 GaN 상부에 투명 전극층을 도 입하고 있다.



그림 2.10 투명전극이 포함된 LED의 개략도

이러한 투명전극이 갖추어야 할 조건은 면저항이 10<sup>3</sup>Ω/□ 이하로 전기 전도 도가 우수하고 투과율이 80% 이상이며 비접촉 저항이 10<sup>-4</sup>Ωcm 이하로 낮아 야 한다.

#### 1. Indium tin oxide (ITO)

ITO는 InO<sub>3</sub>에 SnO<sub>2</sub>를 5-10wt% 첨가한 재료로서 가시광선 영역에서는 투 율이 우수하고 비교적 낮은 면저항을 갖는 장점 때문에 현재 가장 보편적으 로 사용되고 있다. 일반적으로 ITO박막은 밴드갭이 3.5-4.3 eV 정도인 N형 반도체이며 고진공의 스퍼터, e-beam evaporation 공정으로 진행된다. 일반 적으로 가시광선 파장대에서 투과율이 90% 이상으로 높고 접촉 저항은 10<sup>-4</sup> ûcm 이하이며 가격도 저렴한 편이다. 하지만 인듐의 희소성 때문에 가격 변동이 크고 자외선 파장대에서 투과율이 급격하게 감소되는 문제점이 있 다.<sup>[11,12]</sup> 이외에도 세라믹 특성상 2-3%의 낮은 변형률을 갖기 때문에 작은 응력에도 쉽게 부서져 플렉시블 전극으로 응용이 어렵다.







그림 2.11 (a) ITO의 결정구조, (b) ITO의 가격변동 그래프, (c) ITO의 전기적, 광학적 특성, (d) Strain에 의한 ITO의 면저항

#### 2. Zinc oxide (ZnO)

ZnO는 hexagonal wurtzite 구조로 약 3.4 eV 밴드갭을 갖는 전형적인 N형 반도 체로 ITO와 마찬가지로 가시광선 및 근자외선 영역에서 약 90% 이상의 투과성 을 가지며 저항률 또한 10<sup>-4</sup> Ωcm 이하이다. 또한 ZnO 박막은 도핑이 용이하여 좁은 전도대역을 가지기 때문에 도핑물질에 따라 Ohmic contact, 전기적, 광학적 성질의 조절이 가능하다.<sup>[13,14]</sup> 뿐만 아니라 ZnO의 원료인 Zn(아연)은 In에 비해 매장량이 매우 많아 낮은 비용으로 제작이 가능하고 ITO 만큼의 높은 투과율과 전기 전도성을 갖고 있어서 투명전극 재료로 상용화에 충분한 자격을 갖추고 있 다. 하지만 ZnO 는 스퍼터링 공정으로 증착되어 P형 GaN 박막 위에 성장 시 플





라즈마에 의해 물리적인 충격이 발생함으로 P형 GaN 박막의 전기적 특성이 저하되는 문제점이 있다.



그림 2.12 (a) ZnO의 결정구조, (b) ZnO 의 광학적 특성

#### 3. $SnO_2$

SnO<sub>2</sub>는 기계적인 성질이 우수하며 원료의 가격이 싸다. 순수한 SnO<sub>3</sub> 박막의 밴 드갭은 3.8-4.3 eV이고, 가시광선 영역에서는 80% 이상의 높은 투과율을 나타낸 다. 또한 기판에 화학적으로 증착되기 때문에 접착 강도가 매우 뛰어나 내산, 내 염기성에 우수하다. 이러한 장점들 때문에 ITO를 대체할 수 있는 새로운 물질로 활발이 연구되고 있다. 하지만 SnO<sub>2</sub> 박막의 내식성 및 내마모성으로 인해 에칭 이 어렵기 때문에 투명전극으로 사용할 때에는 공정이 상대적으로 복잡한 리프 트오프(Lift-off) 방법을 사용하는 단점이 있다. 또한 SnO<sub>2</sub> 박막은 결정화 온도가 다른 투명전극에 비해 높기 때문에 증착 시 다른 층에 영향을 줄 수 있고 ITO 및 ZnO에 비해 높은 면저항을 가지고 있는 단점이 있다.<sup>[15,16]</sup>







그림 2.13 (a) SnO<sub>2</sub>의 결정 구조 및 (b) SnO<sub>2</sub> 전기적 특성<sup>[16]</sup>

#### 4. Carbon Nanotube (CNT)

탄소원자를 둥글게 말린 형태의 CNT는 우수한 기계적 강도, 열과 전기 전도도, 낮은 밀도를 가지고 있으며 고분자, 탄소 섬유 그리고 금속의 장점들을 모두 갖고 있는 이상적인 재료이다.<sup>[17,18]</sup> 현재 양산되고 있는 CNT는 약 300요/□ 수준의 면저항과 85%의 투과도를 나태내고 있다. ITO 에 비해 UV 부터 가시광 영역까지 높은 투과도를 보이고 있는 장점을 보이고 있지만 아직까지 높은 면저항으로 인해 전기적 특성 저하 등의 문제점이 있고<sup>[19]</sup> 투명전극 증착 시 CNT의 엉킴, 뭉침 현상 현상에 의해 부분적으로 특성이 달라지는 문제점이 있다.



그림 2.14 CNT 의 구조 및 전기적, 광학적 특성





#### 5. Graphene

Graphene은 2차원으로 이루어진 탄소원자가 벌집 모양으로 배치를 이루고 있는 탄소구조체이며, Graphene을 다시 층층이 쌓으면 흑연이 된다. 투과율이 높고 매우 높은 전도도를 가지며 또한 높은 열전도도 등 많은 우수한 성질을 가지고 있어 기존의 투명전극 재료를 대체할 수 있는 잠재력이 매우 높은 재료이다. 이 외에도 유연성을 가지고 있어서 투명전극으로 이용 하였을 때 플렉시블 소자에 응용할 수 있다.<sup>[20,21,22]</sup> 하지만 현재 CNT와 마찬가지로 투과율을 높이기 위해서 는 면저항이 급속히 증가되는 문제점이 있어 LED에 적용 시 전기적 특성이 저 하되는 문제점이 많이 보고 되고 있다.



그림 2.15 Graphene 기계적, 전기적, 광학적 특성

#### 6. Silver nanowire

Silver nanowire 기반 투명전극은 보통 직경은 20~100nm, 길이는 5~35µm로 랜 덤하게 네트워크를 통해 형성된다. 우수한 가시광선부터 자외선까지 높은 투과도 를 보이는 광학적 특성과 ITO에 필적할 만한 높은 전도성을 가지고 있어 ITO를 대체할 수 있는 투명전극 물질로 주목받고 있다.<sup>[23-27]</sup> 특히 Silver nanowire 기 반 투명전극은 ITO 투명전극과 유사한 면저항을 가지고 있으며 (15~100Ω/□)









그림 2.16 Silver nanowire의 UV 영역의 투과율과 면저항을 보여주는 그래프





### 제3장 실험방법 및 결과

#### 제1절 Silver nanowire 기반의 공정 기술 확보

#### 1. Silver nanowire 기반의 투명전극의 전기적, 광학적 특성

Silver nanowire 기반의 투명전극을 만들기 위해서는 먼저 Silver nanowire 합 성하여야 한다. 다양한 합성 조건에 따라 지름 및 길이가 달라지게 된다. 본 연 구에서는 투명전극을 구성하기 위해 Silver nanowire의 원활한 네트워크가 필요 하고 이를 위해 지름이 50nm 이고 길이가 30µm 인 Silver nanowire 용액을 그 림 3.1과 같이 합성하였다.



그림 3.1 Silver nanowire의 길이에 따른 네트워크 형성 이미지

DI water 에 희석된 Silver nanowire 용액을 이용하여 투명 전극을 Spray법, Roll-to-Roll법, 스핀코팅법등 다양한 방법으로 LED 위에 투명전극 층으로 증착 할 수 있다. 우선 Spray 증착방법은 균일하게 넓은 면적을 한번에 증착할 수 있 다는 장점이 있다. 하지만 Silver nanowire 용액들이 스프레이시 압력에 의해 변 형되거나 노줄을 막히게 할 수 있다는 단점이 있다. Roll-to-Roll 증착방법은 투





명전극의 대량생산에 주로 사용되는 방법이나 고가의 장비를 구축해야 하고 GaN LED가 성장된 사파이어 기판의 경우 플렉시블한 기판이 아니기 때문에 적 용하기 불가능하였다. 따라서 본 연구에서는 균일하고 신뢰성이 있는 투명전극층 을 얻기 위해 스핀 코팅 법을 이용하였다. 스핀 코팅법은 GaN LED가 성장된 사파이어등 평편한 기판의 수평을 맞추어 흔들리지 않게 고정한 후 적당량의 코 팅 용액을 기판에 균일하게 캐스팅한 후 기판을 300 rpm 에서 8000 rpm 정도로 회전시키는 방법으로 코팅 용액은 용액과 기판 사이의 인력과 기판의 회전으로 인한 원심력으로 인해 회전 속도에 따라 두께를 조절 할 수 있게 해준다. 코팅 속도가 빠르고 재현성이 뛰어나며 필름 두께 조절이 용이한 장점이 있다. 하지만 스핀 코팅은 코팅액의 소모가 많고 대면적의 필름 제조가 어려운 단점을 가지고 있다.



그림 3.2 Silver nanowire 기반 투명 전극을 증착하기 위한 장비들 (a) Spray, (b) Roll-to-Roll, (C) Spin coater

증착된 투명전극의 전기적, 광학적특성은 Silver nanowire solution의 증착 횟 수와 D.I Water의 회석비율, Spin coater의 RPM 에따라 달라지게 된다. 그림 3.3에 보는 것과 같이 회전속도가 증가함에 따라 면저항이 증가되었으며 증착횟 수를 증가함에 따라 다시 면저항이 감소되는 경향을 보였다. 이러한 이유는 회전 속도가 증가함에 따라 증착된 투명전극층이 얇아지게 되기 때문이며 증착횟수를 증가함에 따라 다시 투명전극층의 두께가 증가되기 때문이다. 다양한 증착조건을 통해 LED 에 활용되는 투명전극의 면저항인 25-33 Ω/□ 와 유사한 면저항을 갖는 Silver nanowire 기반 투명전극이 얻어 질 수 있음을 확인하였다.



그림 3.3(b)는 다양한 면저항을 갖는 투명전극층의 SEM 이미지를 보여 준다. 그림에서 보는 것과 같이 면저항이 작을수록 Silver nanowire 의 밀도가 조밀해지며 면저항이 클수록 Silver nanowire 의 밀도가 작아짐 을 확인 할 수 있다.

(a)

Spin-Coating conditions	1 time	2 times	3 times
300rpm 5s 500rpm 10s 1000rpm 5s	38.0	15.17	10.2
300rpm 5s 500rpm 10s 2000rpm 5s	67.8	48.2	30.2
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

(b)



그림 3.3 (a) Silver nanowire 기반 투명전극을 위한 스핀코팅 증착 조건에 따른 면저항 및 (b) 표면 SEM 이미지



그림 3.4는 Silver nanowire 기반 투명전극의 다양한 면저항 조건에 대한 파장에 따른 투과도를 보여준다. 비교를 위해 33 요/□ 를 갖는 ITO 의 투과도를 측 정하였다. 그림에서 보는 것과 같이 면저항이 커질수록 Silver nanowire 의 밀도가 감소하기 때문에 투과도가 높아지는 것을 알 수 있다. Silver nanowire 기반 투명전극의 경우 금속이기 때문에 전 파장에서 투과도가 85% 이상으로 높은 것을 확인할 수 있다. 반면 ITO 시편의 경우 가시광 선 영역에서는 90% 이상의 높은 투과도를 보이지만 400 nm 이하의 파 장에서는 투과도가 급격히 감소됨을 알 수 있다. 반면 Silver nanowire 전극의 경우 밴드갭이 없기 때문에 전 파장대에서 대부분 85% 가 넘는 높은 투과도를 보이는 것을 알 수 있다. ITO의 면저항과 유사한 Silver nanowire 기반 투명전극의 투과율과 비교해 보면 385 nm 파장대에서 ITO 는 약 80%로 Silver nanowire 기반 투명전극이 약 7% 이상 높은 것을 알 수 있고 이러한 현상은 파장이 짧아질수록 격차가 더 커짐을 알 수 있다.



그림 3.4 다양한 Silver nanowire 및 ITO 기반 투명전극의 면저항에 따른 투과율의 변화 및 면저항에 대한 투과도의 변화

마지막으로 Silver nanowire를 이용한 UVA LED의 Ohmic Contact 특성을 향상 시키기 위해 열처리 조건을 잡아야 한다. Silver nanowire를 스핀코팅법을 이용



하여 증착을 하게 되면 P형 GaN 표면 위에 Silver nanowire가 떠있는 모습을 그림 3.4를 통해 알 수 있다. 일반적으로 P형 GaN 와 Ag 금속의 Ohmic 을 형 성하기 위해서는 열처리 공정을 통해 P형 GaN 와 Ag 금속 간의 Ga 원자와 Ag 원자의 확산을 통해 Ga 공극이 생김을 유도함으로 계면의 홀농도를 증가시켜 tunneling 을 유도함으로 Ohmic 접합을 형성하게 한다. 따라서 열처리 조건을 통해 Ohmic 접합이 형성되도록 유도하였다.

실제로 그림 3.5 는 Silver nanowire의 150℃ 열처리 전과 후 표면 SEM 이미지 이다. 그림에서 보는 것과 같이 Silver nanowire 들은 열처리 후 p-GaN 계면과 완전히 밀착됨을 확인 할 수 있고 이는 Silver nanowire 가 Silver 박막과 다르 게 150℃ 낮은 온도에서도 melting 되는 것을 알 수 있다. 이는 계면에서 GaN 박막과 상호 작용이 발생 할 수 있게 한다.

그림 3.6은 100℃ 에서 300℃ 까지 다양한 열처리 조건에 따른 Silver nanowire 투명전극층의 표면 SEM 이미지이다. 그림에서 보는것과 같이 150℃ 로 온도가 증가 했을때 면저항이 작아지게 되는 것을 알 수 있고 이는 Silver nanowire 의 네트워크 부분에서 welding 됨으로 wire-to-wire 저항이 작아졌기 때문으로 판 단된다. 하지만 300℃ 이상의 온도에서는 nanowire 들이 melting이 심하게 일어 남으로 네트워크가 파괴되어 면저항이 측정되지 않았다. 따라서 150℃ 의 온도가 적절한 열처리 온도임을 확인 할 수 있었다.



w/o Annealing

with Annealing



#### 그림 3.5 Silver nanowire 열처리에 따른 표면 SEM 이미지



그림 3.6 열처리 조건에 따른 Silver nanowire의 투과율 및 면저항

그림 3.7은 150℃ 열처리 후 p-GaN 박막과 Silver nanowire 사이의 Ohmic 형 성 여부를 판단하기 위한 전류-전압 곡선이다. 이를 위해서는 CTML (circular transmission line model) 방법을 이용하였고 이때 gap 을 20 µm로 하였다. 그림 에서 보는 것과 같이 열처리전에는 쇼트키 접합의 곡선을 보여준다. 열처리 후 에는 Ohmic 접합으로 변경되었음을 알 수 있다. 따라서 150℃ 의 낮은 열처리 온도에도 불구하고 Silver nanowire 기반 투명전극이 LED 의 전기적 특성의 저 하 없이 ITO를 대체하기 위한 투명전극으로 활용될 수 있음을 보여준다.



그림 3.7 Silver nanowire의 열처리에 따른 전류-전압 곡선



Collection @ chosun



#### 2. Silver nanowire 기반 투명전극 패터닝 형성

Silver nanowire 패터닝 공정 기술은 Mask aligner 장비와 photo resist(PR)를 이용하여 투명전극 영역을 제외한 나머지 영역의 Silver nanowire를 제거하는 공 정으로 N형과 P형 전극을 구분하기 위해서 반드시 필요한 공정 기술이다. PR은 종류에 따라 positive PR과 negative PR로 나뉘는데, 그림 3.8과 같이 positive PR은 UV과장의 빛에 노출되면 Develop 용액에 의해 노출된 부분이 제거가 되 지만 반대로 negative PR은 UV과장의 빛에 노출되면 노출되지 않은 부분이 제 거가 되는 특징이 있다.



그림 3.8 Positive PR과 Negetive PR의 특성





먼저 투명전극층의 패턴을 형성하기 위해서 positive PR 과 negative PR을 활용하여 Lift-off 방식과 Chemical 에칭 방식으로 진행하였다. 우선 패턴 형성을 위해 공정 스텝이 간단한 Negative PR 방식을 활용한 Lift-off 방식을 시도하였다. 그림 3.9는 Lift-off 패터닝 공정 순서를 보여준다. Lift-off 방식은 우선 P형 GaN 표면위에 Negative PR을 증착하고 Mask aligner 장비를 통해 Silver nanowire가 증착 될 투명전극 영역만 PR을 제거하고 Spin Coater 장비로 Silver nanowire를 증착한 후 마지막으로 Acetone용액으로 PR 를 제거하게 된다. 하지 만 그림 3.9 에서 보는 것처럼 nanowire가 엉커져 있는 PR이 깔끔히 제거되지 못하는 문제점이 발생하였다. 이렇게 되면 다음 공정에서 n형 전극을 위한 에칭 공정이 불가능하게 된다.



그림 3.9 Lift-off 패터닝 공정순서 및 투명전극 패턴의 광학이미지

두 번째 방법은 positive PR을 이용하여 Chemical 습식 시각을 활용하는 방법 이다. 그림 3.10 과 같이 P형 GaN 표면 위에 우선 Silver nanowire를 전면에 도 포를 시킨 후, 그 위에 Positive PR을 증착하고 Mask aligner 장비를 통해 투명 전극이 올라갈 부분에만 PR Mask로 막아준다. 그 다음 질산용액이 있는 비커에





샘플을 담궈 주면 PR mask가 없는 부분의 silver nanowire를 제거가 된다. 이때 Silver nanowire를 제거하기 위해 질산용액의 농도 및 에칭 시간을 잘 조절해야 한다. 그림 3.8에서 보는 것처럼 공정 조건이 최적화 되지 않으면 PR mask 패턴 이 질산과 반응하여 무너지고 결국 오버에칭 현상이 일어나게 되는 문제점이 있 다.



그림 3.10 Chemical 패터닝 공정 순서 및 투명전극 패턴의 광학이미지

이러한 오버 에칭을 통해 투명전극 패턴이 무너지게 되는 문제점은 질산의 농도 를 DI water 를 이용하여 50% 로 희석하고 에칭 시간을 조절함으로써 해결 할 수 있었고 최종적으로 그림 3.11과 같은 깨끗한 패턴을 형성할 수 있었다. 그림 3.11은 또한 패턴의 모서리에서 에칭이 잘 되어 있는 SEM 표면 이미지를 또한 보여준다.



그림 3.10 Chemical wet 에칭을 통한 투명전극 패턴의 광학이미지 및 SEM 표면 이미지





### 제2절 UVA LED 디바이스 제작 및 평가

1. Silver nanowire 및 ITO 기반 투명전극을 이용한 UVA LED 제조 공정

1-1. Silver nanowire 기반 투명전극을 이용한 UVA LED 제작 우선 표면에 오염 물질 등 불순물을 제거하기 위해 UVA LED 웨이퍼를 Acetone에 3분간 세척을 하고 IPA를 이용하여 3분간 웨이퍼에 남아있는 Acetone을 중화 시켜준 후 DI-water를 이용하여 3분간 세척을 하는 유기 클리닝 을 진행 하였다. 불순물이 없는 깨끗한 상태의 UVA LED 웨이퍼 위에 Silver nanowire를 도포하기 위하여 스핀코팅 방식으로 Silver nanowire : D.I Water(2:1) 용액을 300rpm (5s) - 500rpm (10s) - 2000rpm (5s) 순서로 P형 GaN 위에 도포 시켜준다. 그 후, GXR601 Positive PR(Photo Resistance)을 double coating 한 후 노광기를 이용하여 메사 에칭 패턴을 형성한다. 그 다음, 메사 에칭을 하기 전 불필요한 부분의 Silver nanowire를 제거하기 위해 질산과 D.I Water을 1:1비율 로 희석한 비커에 1분간 담궈 놓는다. 만약 1분을 넘기면 PR Mask가 질산과 반 응하여 패턴이 변형되어 오버에칭이 되므로 주의를 해야 한다. Silver nanowire 의 선택적 에칭이 끝났다면 D.I Water에 충분히 세척을 해준 다음 N형 contact 을 위한 메사 에칭 공정을 통해 N형 GaN이 드러날 수 있도록 ICP(Inductive Coupled Plasma)장비를 이용해 건식 식각을 진행한다. 이때, 메사 식각의 깊이는 약 1um 로 한다. ICP를 이용한 메사 식각을 진행 후 마스크로 쓰인 PR을 제거 하기 위하여 Acetone에 3분간 세척을 하고 IPA를 이용하여 3분간 Acetone을 중 화 시켜준 후 DI-water를 이용하여 3분간 세척하여 준다. 마지막으로 P, N 전극 metal을 증착하기 위해 ZPN1150 Negative PR을 코팅하고 노광 후 E-beam을 이용하여 Cr(300Å) / Au(5000Å)를 증착 하고 Lift-off 방법으로 N-pad, P-pad 를 형성하였다. 그림 3.12는 Silver nanowire 투명전극을 이용한 UVA LED의 제 조 과정이다.







Metal deposition (Cr/Au)

Silver nanowire UVA-LED device

그림 3.12 Silver nanowire 투명전극을 이용한 UVA LED의 제조 과정

# 1-2. ITO 투명전극을 이용한 LED 및 투명전극이 없는 UVA LED 제작

추가적으로 비교실험을 위해 ITO 투명전극 UVA LED와 투명전극이 없는 p-GaN UVA LED 디바이스를 제조 하였고 공정과정은 그림 3.13과 같다. ITO 투명전극 UVA LED의 경우 ITO 는 e-beam evaporation 방법을 이용하여 200 nm 두께로 증착하였다. ITO는 ITO ethant 를 이용하여 습식 식각 후 ICP 를 이용하여 n-GaN이 들어날 때 까지 1µm 이상 건식 식각 하였고 이후 공정은 그 림 3.12의 Silver nanowire 투명전극을 이용한 LED의 제조 과정과 같다. 투명전 극이 없는 UVA LED의 전류 밀집 현상을 확인하기 위하여 투명전극이 없는 UVA LED 를 제조하였다. 제조 공정은 Silver nanowire 및 ITO 투명전극을 이 용한 UVA LED의 투명 전극 증착 및 식각 부분을 제외하고 나머지 공정과 같





다.



그림 3.13 ITO 투명전극을 이용한 UVA LED 및 투명전극이 없는 UVA LED의 제조 공정

그림 3.14는 Silver nanowire 및 ITO 투명 전극, 투명전극이 없는 UVA LED의 표면 SEM 이미지를 보여준다. 그림에서 보듯이 ITO 및 Silver nanowire 패턴이 정확히 형성된 것을 확인할 수 있다. UVA LED의 특성 비교를 위해 사용된 Silver nanowire의 투명전극은 투과도가 85% 이상이고 면저항이 ITO와 비슷한 30 Ω/□ 를 사용하였다.



그림 3.14 Silver nanowire 및 ITO 투명 전극, 투명전극이 없는 LED의 표면 SEM 이미지





#### 2. UVA LED 들의 전기적 및 광학적 특성 평가

Silver nanowire 투명전극의 UVA LED 에서 활용 가능성을 확인하기 위해 앞서 제작된 UVA LED 들의 전기적, 광학적 특성을 측정하였고 ITO 투명전극을 이 용한 UVA LED와 비교하였다. 전기적 및 광학적 특성은 LED chip tester (Ecopia Co., Ltd) 을 이용하여 측정하였다. UVA 영역의 특성을 확인하기 위해 모든 LED들의 발광 파장은 그림 3.15와 같이 385 nm 하였다. 투명전극이 없는 UVA LED의 경우 20mA의 주입전류에 따른 Forward Voltage가 4.65 V로 매우 높으며 직렬 저항 또한 매우 큰 것을 알 수 있다. 이것은 전류 주입 효율 및 전 류 퍼짐 효과가 매우 낮음을 알 수 있다. ITO 기반 투명전극 및 Silver nanowire 기반 투명전극을 이용한 UVA LED 들의 Forward Voltage가 3.65, 3.45V로 크게 개선되었으며 직렬 저항 또한 많이 낮아진 것을 확인 할 수 있다. 이것은 투명전극을 이용함으로 전류 주입 효과 및 P형 GaN 내의 전공의 낮은 주입 및 이동도가 개선되었기 때문이다. 주목할 점은 Silver Nanowire 투명전극 을 이용한 LED의 Forward Voltage가 ITO 투명전극을 이용한 UVA LED 에 비 해 낮아진 점이다. 이것은 Silver 가 ITO에 비해 큰 일함수로 인해 Ohmic 형성 에 더 유리하기 때문이다.



그림 3.15 Silver nanowire 투명 전극, ITO 투명전극, 투명 전극이 없는 UVA LED 의 I-V 그래프





그림 3.16은 주입 전류에 따른 Optical output power (L-I) 그래프의 특성을 보 여주고 있다. 투명전극이 없는 UVA LED 는 투명전극이 없은 UVA LED 들에 비해 전류 주입 효율 및 전류 밀집 효과에 의해 광출력이 확실허 저하 되는 것 을 확인 할 수 있다. 그림 3.17을 보면 투명전극이 없은 UVA LED 의 경우 전 극 주변에서만 밝게 빛나는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 p형 GaN 층의 낮은 농도와 이동도로 인해 측면으로 큰 저항이 생겨 전류가 전극 주변에만 밀집 되 기 때문이다. 반면 Silver nanowire 와 ITO 투명전극을 활용한 LED 에서는 전 체의 LED 에서 균일하게 발광이 발생되는 것을 알 수 있고 광출력 또한 약 3배 이상 크게 증가되는 것을 볼 수 있다. 그림 3. 16에서 주목할 점은 Silver nanowire 투명전극을 이용한 UVA LED 의 광출력이 ITO 투명전극을 이용한 UVA LED 에 비해 약간 크고 300 mA 이상 높은 전류에서 더 커진다는 사실이 다. 이것은 Silver nanowire 투명전극이 ITO 에 비해 UVA 파장에서 높은 투과 율을 갖으며 전류 주입 및 퍼짐 효율이 더 좋다는 것을 의미한다.



그림 3.16 각각 UVA LED들의 입력 전력에 대한 Optical output power







그림 3.17 주입 전류에 따른 Silver nanowire, ITO, No TCO UVA LED의 전류퍼짐 현상





#### 제4장 결론

최근 고연색 조명 시장과 UV curing 시장의 발전과 함께 고효율, 친환경적이며, 파장제어가 가능하고, 소형기기가 가능한 UV LED가 관심을 받고 있다. 하지만 UV LED가 기존 조명기기를 대체하기 위해서는 높은 휘도 대비 높은 가격이 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 UV LED의 효율을 높이기 위한 연구가 절실하다. 이렇게 UV LED 의 효율이 낮은 이유 중 하나는 현재 LED에서 투명전극으로 사용 중인 ITO는 전기적 및 광학적 특성이 우수하지만, 자외선 영역에서 흡수로 인해 UV LED의 광 효율이 저하되는 단점을 가지고 있기 때문이다. 또한 ITO 의 경우 휘귀 금속인 인듐의 높은 가격 또한 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 이러한 ITO의 문제점을 개선하기 위해 Silver nanowire 투명전극을 연구하고 LED에 적용할 수 있는 공정 기술을 개발하였다.

다양한 증착 조건과 열처리 과정을 최적화함에 따라 기존 LED에 활용되는 ITO 의 특성보다 향상된 전도도 및 투과율를 갖는 Silver nanowire 기반의 투명전극 을 제조하였고, Silver nanowire 기반의 투명전극의 화학적 습식 식각 조건을 조절함으로 투명전극 패터닝 공정을 확립하였다. 그 후 Silver nanowire 투명전 극 UVA LED 디바이스를 제작하였고 ITO 투명전극과 투명전극이 없은 UVA LED 그 특성을 비교하였다.

Silver nanowire 투명전극이 ITO 투명전극에 비해 높은 투과도 및 높은 일함수 로 인한 전류 주입 효율이 향상된 결과를 확인하였고 또한 ITO 투명전극을 이 용한 UVA LED에 비해 광 출력이 향상된 결과를 도출하였다.

이러한 연구결과를 통하여 Silver nanowire를 기반으로 한 투명전극이 UVA LED 의 효율을 높이는데 크게 기여할 것이고 추후 고효율 Deep UV 개발 등에 활용 될 수 있을 것으로 확신하였다.





#### [참고문헌]

- [1] X. Song, X. Zeng, J. Zhang, Y. Jin, and X. Meng, Mater. Sci. and Appl., 3, 838 (2012)
- [2] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. Denbaars, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett., 84, 855 (2004)
- [3] H. W. Huang, C. C. Kao, J. T. Chu, W. D. Liang, H. C. Kuo, S. C. Wang, and C. C. Yu, Mater. Chem. and Phys., 99, 414 (2006)
- [4] R. H. Hong, C. C. Yang, J. Y. Wu, S. H. Huang, C. E. Lee, Appl. Phys. Lett., 86, 221101 (2005)
- [5] J. K. Kim, J. Q. Xi, H. Luo, and E. F. Schubert, Appl. Phys. Lett., 89, 141123 (2006)
- [6] T. Nishida, N. Kobayashi, and T. Ban, Appl. Phys. Lett., 82, 1 (2003)
- [7] S. Shakya, K. H. Kim, and H. X. Jiang, Appl. Phys. Lett., 85, 142 (2004)
- [8] 김동명 "IT CookBook 반도체 공학 연습문제 풀이집 세트" 한빛미디어 p.22(2012)
- [9] 윤의준, 김경국, 이성남, 김현수, 나현석 "Light-Emitting Diodes" 홍릉과학 출판사 p.139 (2011)
- [10] D. Zhu, D. J. Wallis and C. J. Humphreys, Rep. Prog. Phys., 76, 106501(2013)
- [11] C. Y. Cho, M. Choe, S. J. Lee, S. H. Hong, T. H. Lee, W. T. Lim, S. T. Kim, and S. J. Park, Appl. Phys. Lett., 113, 113102 (2013)
- [12] T. H. Seo, S. J. Chae, B. K. Kim, G. U. Shin, Y. H. Lee, and E. K. Suh, Appl. Phys. Express., 5, 115101 (2012)
- [13] B. Pal and P. K. Giri, Appl. Phys. Lett., 108, 084322 (2010)
- [14] K. K. Kim, S. D. Lee, H. S. Kim, J. C. Park, S. N. Lee, Y. S. Park, S. J. Park, and S. W. Kim, Appl. Phys. Lett., 94, 071118 (2009)
- [15] S. S. Pan, G. H. Li, L. B. Wang, Y. D. Shen, Y. Wang, T. Mei, and X. Hu, Appl. Phys. Lett., 95, 222112 (2009)





[16] T. Minami, Semicond. Sci. Technol., 20, S35 (2005)

[17] J. Li, L. Hu, J. Liu, L. Wang, T. J. Marks, and G. Gruner, Appl. Phys. Lett., 93, 083306 (2008)

- [18] S. Li, Z. Yu, C. Rutherglan, and P. J. Burke, Nano Lett., 4, 2003 (2004)
- [19] W. Wu, and N. G. Tassi, Nanoscale., 6, 7811 (2014)
- [20] H. Bai, C. Li, and G. Shi, Adv. Mater., 23, 1089 (2011)
- [21] Z. Liu, Liu, H. Li, Q. Dong, S. Yao, A. B. Kidd, X. Zhang, J. Li, and W.
- Tian, Sol. Energy Mater. Sol Cells, 97, 28 (2012)
- [22] X. Wan, G. Long, L. Huang, and Y. Chen, Adv. Mater., 23, 5342 (2011)
- [23] K. Ellmer, Nature Photonics, 6, 809 (2012)
- [24] C. Liu, X. Yu, Nanoscale Res. Lett., 6, 75 (2011)
- [25] J. Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, P. Peumans, Nano Lett. 8, 689 (2008)
- [26] V. Scardaci, R. Coull, P. E. Lyons, D. Rickard and J. N. Coleman, Small, 7, 2621 (2011)
- [27] H. Wu, D. Kong, Z. Ruan, P. C. Hsu, S. Wang, Z. Yu, T. J. Carney, L.
- Hu, S. Fan and Y. Cui, Nat. Nanotech. 8, 421 (2013)





지작물 이용 허락서					
학 과 광기술공학과 학 번 20137107 과 정 석 사					
성 명 한글:전종현 한문:田 鍾 顯 영문 : Jong Hyun Jeon					
주 소 광주광역시 북구 문흥동 명지아파트 102동 1209호					
연락처 E-MAIL : jjh0787@hanmail.net					
한글 : GaN 기반의 자외선 발광다이오드를 위한 은 나노와이어 투명전극 영어 : Study on the silver nanowire transparent conducting electrode for GaN-based ultraviolet light-emitting diodes.					
본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을					
이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.					
<ul> <li>- 다 음 -</li> <li>1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함</li> <li>2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집 · 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.</li> <li>3. 배포 · 전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.</li> <li>4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.</li> <li>5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.</li> <li>6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음</li> <li>7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 건송 · 출력을 허락함.</li> </ul>					
동의여부 : 동의( √ ) 반대( )					
2015년 2월					
저작자: 전 종 현 (서명 또는 인)					
조선대학교 총장 귀하					

- 35 -





## [감사의 글]

Collection @ chosun

대학원에 입학을 한지 어느덧 2년이란 시간이 흘렀습니다. 먼저 저를 부모님 같 은 마음으로 보살펴 주시고 실험적인 문제나 개인적인 문제가 있을 때 언제든지 도움을 주신 권민기 교수님과 김자연 박사님에게 감사의 인사를 드리고 싶습니 다. 또한, 제가 전공에 대한 기본적인 지식과 많은 조언을 해주신 김진태 교수님, 김현수 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님 그리고 주기남 교수님께 감사드립 니다. 항상 존경하고 열정적인 교수님들과 박사님 덕분에 2년 동안 많은 걸 배우 게 되었고 앞으로 훌륭한 연구자가 되도록 사회에서 빛이 되는 인재가 되도록 하겠습니다.

그리고 항상 형제처럼 서로를 아끼고 돈독함을 과시하는 우리 실험실 식구에게 도 고마움을 전하고 싶습니다. 항상 제가 힘들 때 많이 응원해주고 고민을 늘 자 기 일처럼 들어 주었던 승종이형과 저와 함께 광기술원에서 실험을 진행하며 많 은 도움을 주었던 선율이형, 마지막으로 늘 실험실 분위기를 활기차고 유쾌하게 만들어 준 내 동기 두형이와 후배 건후에게 많은 고마움을 전합니다.

마지막으로 저를 낳아 주시고 저를 끝까지 믿고 대학원 진학을 허락해 주신 부 모님에게 끝없는 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

이렇게 저에게 많은 도움과 고마움을 주신 분들이 있었기 때문에 무사히 2년 동안 대학원 생활을 성공적으로 마친 것 같습니다. 앞으로 사회에 나가 많은 걸 배우고 좋은 경험도 많이 쌓아 어디에서도 인정받는 인재가 되도록 노력하겠습 니다.

2014年12月6日

田鍾顯