

논문 2007-44SD-11-7

ITO 전극 형성 방법이 청색 발광 다이오드의 전기 광학적 특성에 미치는 영향

(Influence of ITO-Electrode Deposition Method on the Electro-optical Characteristics of Blue LEDs)

한 재 호*, 김 상 배**, 전 동 민*

(Jae-Ho Han, Sang-Bae Kim, and Dong-Min Jeon)

요 약

ITO(Indium Tin Oxide) 전극 형성방법은 ITO 박막 자체의 전기·광학적 특성 뿐 아니라, ITO를 전극으로 하는 청색 발광 다이오드(파장 469nm)의 전기·광학적 특성 및 신뢰성에도 큰 영향을 미침을 확인하였다. 세 가지 ITO 전극 형성 방법, 즉 electron beam evaporation법과 sputtering법, 그리고 electron beam evaporation법으로 먼저 증착한 뒤에 sputtering법으로 증착한 hybrid법 등을 사용하여 청색 발광 다이오드를 제작한 다음에 ITO 박막의 특성과 aging에 따른 발광 다이오드의 전기·광학적 특성 변화를 고찰하였다. 그 결과, ITO 전극을 sputtering 또는 electron beam evaporation 방법으로 형성한 발광 다이오드는 각각 sputtering damage의 문제와 전기저항이 증가하는 문제점을 안고 있음을 발견하였다. 그리고 이 문제점들을 hybrid 방법으로 해결하였다.

Abstract

We have investigated the electro-optical characteristics and reliability of LEDs with the Indium-Tin-Oxide (ITO) electrodes formed by different deposition methods: electron beam evaporation, sputtering, and hybrid method of electron beam evaporation and subsequent sputtering. The deposition method of the ITO electrode has significant influence on the electro-optical characteristics and reliability of LEDs. The LEDs with the ITO electrodes formed by sputtering and electron beam evaporation have problems caused by sputtering damage and increased electrical resistance, respectively, and the problems have been solved by the hybrid method.

Keywords : Blue LED, GaN, ITO, E-beam evaporation, Sputtering.

I. 서 론

투명 전도성 산화막은 평판 디스플레이, 태양전지, 청색 발광 다이오드(light emitting diode) 등과 같은 광학 장치 등의 전극으로 사용되고 있다. 특히, Sn이 함유된 In₂O₃ (ITO) 박막은 전기저항이 낮고 가시 광선영역에서 광 투과율이 높아 널리 사용되고 있다.^[1~3] 투명 전도성 산화막의 특성은 제조 방법 및 조건에 매우 민감

한 것으로 알려져 있으며, 주로 sputtering법^[4]과 thermal evaporation법^[5] 그리고 electron beam evaporation법^[6]이 사용되고 있다.

sputtering법으로 제조된 ITO막은 치밀하고 또한 전기적, 광학적 특성이 우수하여 유기물 발광 다이오드, LCD 그리고 태양전지 등에 사용되고 있는 반면 electron beam evaporation 방법은 GaN 등의 III-V 화합물 반도체를 이용한 발광 다이오드 등에 사용되고 있다.

electron beam evaporation은 sputtering과 비교할 때 플라즈마 damage에 의한 특성 열화의 문제가 없으며, 생산 비용이 낮은 장점이 있어 발광 다이오드의 전극형

* 정회원, (주)삼성전기

(Samsung Electro-mechanics co.,Ltd.)

** 정회원, 아주대학교 전자공학부

(Dept. of Electronic Engineering, Ajou University)

접수일자: 2007년3월14일, 수정일자: 2007년10월24일

성 방법으로 가장 많이 사용되고 있다. 그 반면에, 막이 치밀하지 못하여 물질 특성, 특히 비저항 값이 크다는 문제점이 있다. sputtering 방법은 플라즈마 damage 때문에 발광 다이오드의 특성이 나빠지고 신뢰성이 저하될 가능성이 있으나, 그 현상 및 원인이 명확히 규명되지 않은 상태이다.

이 연구의 목표는 ITO 전극 증착 방법에 따라 발광 다이오드의 특성과 신뢰성이 어떻게 변화하는지를 살펴보고 발생하는 문제점을 해결하는 데에 있다. 이를 위하여 electron beam evaporation과 sputtering 방법으로 ITO 전극을 만든 발광 다이오드의 특성과 신뢰성을 살펴보고, 이 발광다이오드들에서 나타난 문제점을 해결하기 위한 방법으로 electron beam evaporation 후에 sputtering하는 hybrid 방법을 제안하였다. electron beam evaporation과 sputtering 방법으로 제작한 발광 다이오드에서는 각각 직렬저항의 증가와 비발광성 재결합 센터의 생성으로 인한 낮은 신뢰성의 문제점이 있음을 확인하였다. 그리고 이 문제점들을 hybrid 방법으로 해결하였다.

II. ITO 박막 증착공정과 특성 분석

이 연구에 사용된 ITO 증착 방법은 electron beam evaporation법과 sputtering법, 그리고 electron beam evaporation법으로 먼저 증착한 후에 sputtering법으로 증착한 hybrid법의 3가지이다. electron beam evaporation은 기본 진공도를 1×10^{-6} Torr 이하로 유지한 상태에서 $4 \text{ \AA}/\text{sec}$ 의 속도로 이루어졌으며 ITO 박막의 최종 두께는 3800 \AA 이었다. sputtering은 기본 진공도 1.7×10^{-7} Torr에서 이루어졌으며, 증착 조건은 700 watt RF power와 Ar 압력 13 mTorr였다. 그리고 hybrid법은 위에서 기술한 electron beam evaporation법과 sputtering법을 차례로 적용한 방법으로 각각 1900 \AA 씩 증착하였다. 이때 사용한 ITO 소스 및 sputtering target 재료의 조성은 모두 무게 비율로 10% SnO_2 가 함유된 ITO였다.

증착된 ITO 박막은 급속 열처리공정 (Rapid Thermal Process)으로 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 120초간 30 sccm 유량의 질소 분위기에서 열처리 하였다.

표 1은 경면 연마된 GaN 웨이퍼 위에 electron beam 법과 sputtering법, 그리고 hybrid법으로 증착한 다음에 열처리한 ITO 박막의 투과율을 469 nm 파장에서 측정 한 결과이다. 그리고 표 2는 실리콘 웨이퍼에 증착한

표 1. 연마된 GaN 기판 위에 증착된 ITO 박막의 469 nm 파장에서의 광 투과율.

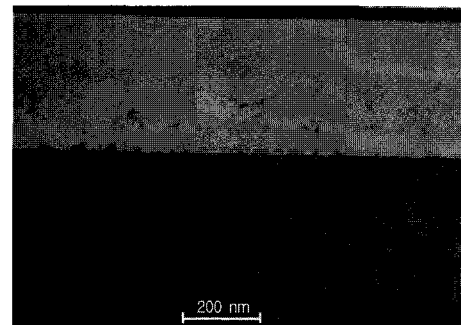
Table 1. Optical transmittance of the ITO thin film.

구분	E-Beam ITO	Sputtered ITO	Hybrid ITO
광투과율 (%)	96	92	95

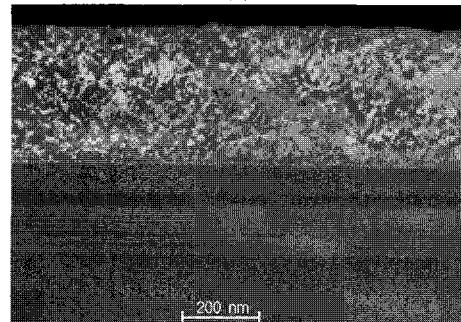
표 2. ITO 박막의 전기적 특성

Table 2. Electrical characteristics of the ITO thin film.

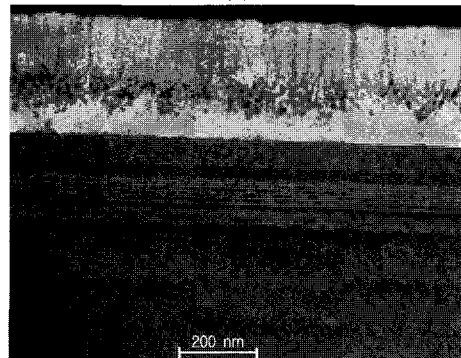
구분	E-Beam ITO	Sputtering ITO	Hybrid ITO
면저항 (Ω/\square)	50	28	36
비저항 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	2.10	0.89	1.25



(a)



(b)



(c)

그림 1. 열처리된 ITO 박막의 미세구조

Fig. 1. TEM microstructure images of the annealed ITO film deposited by (a) electron beam evaporation, (b) sputtering, and (c) hybrid method.

ITO 박막의 비저항을 비교한 것이다. 투과율은 electron beam evaporation된 ITO가 96 %로 가장 우수하여 가장 낮은 sputtering된 ITO에 비하여 4 % 정도 높은 반면, 비저항은 sputtering으로 형성한 ITO가 가장 좋아 electron beam evaporation된 ITO에 비해 42% 수준이었다.

종합하면, 투과율의 관점에서는 electron beam evaporation된 ITO 박막이 sputtering된 ITO 박막에 비하여 우수하지만, 전기적 특성의 관점에서는 정반대의 결과를 보였다. 이에 비하여 hybrid법을 사용한 경우에는 투과율은 electron beam evaporation된 ITO박막과 비슷하면서 비저항은 sputtering된 박막의 1.4배 수준이었다.

ITO 박막의 미세 구조를 분석하기 위하여 TEM으로 ITO 박막의 파단면을 관찰하였다. 그림 1에 나타난 것과 같이, ITO의 미세구조는 증착 방법에 따라 뚜렷하게 구분된다. 그림 1(a)의 electron beam 증착된 ITO는 등방적인 결정성장으로 형성된 작은 결정립으로 구성되어 있고, ITO층 하부에는 공극이 많이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. sputtering된 ITO는, 그림 1(b)에 나타난 바와 같이, ITO 내에 결정립의 구분이 불가능할 정도로 치밀한 막이 형성되었음을 알 수 있다. 그리고 hybrid ITO는 미세구조의 차이가 뚜렷한 2층 구조로 이루어져 있음을 알 수 있다. 또, electron beam으로 증착된 아래층과 sputtering으로 증착된 위층 사이에는 결정성이 감소된 작은 결정립들로 이루어진 경계지역이 나타난다. 이곳은 sputtering할 때 높은 에너지 이온들과의 충돌 때문에 생긴 것이다. 또, hybrid 방법으로 형성된 ITO 박막의 위층을 이루고 있는 sputtering된 ITO는 높은 에너지의 이온과 충돌하여 생긴 표면에서부터 성장된 결정립의 폭이 작은 주상정의 모습을 보인다. 결정립계에서 전자의 전도도는 산란에 의해 지배되므로 박막의 전기저항은 결정립의 크기에 크게 의존하게 된다.^[7] 결정립의 크기가 큰 sputtering된 ITO의 전기저항이 더 낮은 것은 이 때문이다.

III. ITO 전극 형성 방법에 따른 청색 발광 다이오드의 특성 변화

그림 2에 p 전극이 ITO 박막으로 이루어진 청색 발광 다이오드의 단면 구조를 나타내었다. 청색 발광 다이오드의 제작은 sapphire 기판에 GaN pn 접합을 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)로

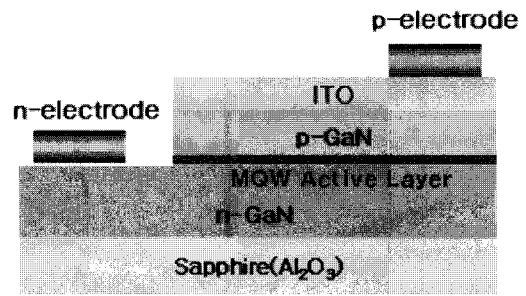
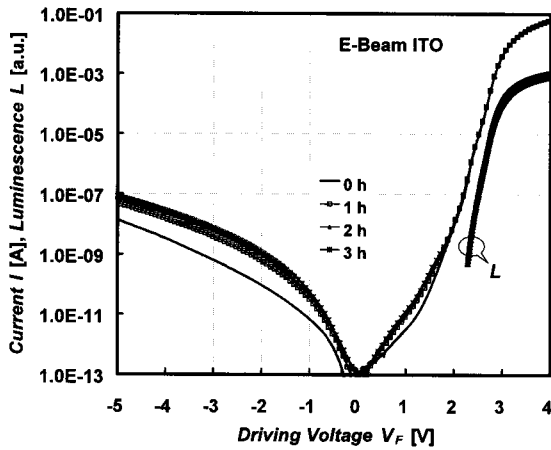


그림 2. LED 소자의 구조도
Fig. 2. Schematic structure of the LED device.

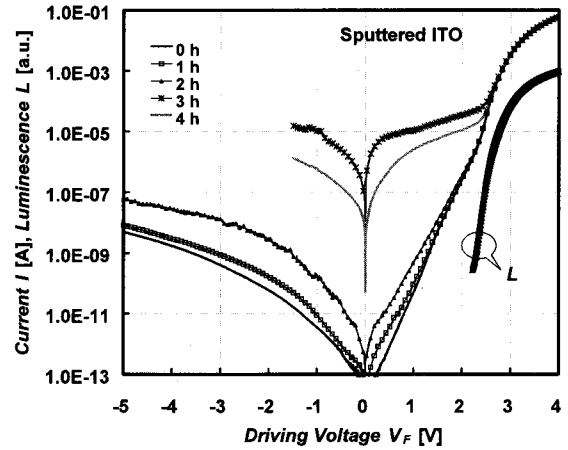
성장시킨 다음에 ITO 전극을 형성하는 순서로 이루어졌다. ITO 전극은 앞에서 설명한 3가지 형성방법으로 이루어졌다.

ITO 증착 방법에 따른 전기적·광학적 특성 변화를 평가하기 위하여 초기 특성을 측정된 뒤에 가속 aging을 하면서 특성의 변화를 분석하였다. ITO 증착 방법과 aging에 따른 전기적, 광학적 특성의 변화를 그림 3, 4, 그리고 5, 6에 보였다. 먼저 electron beam 증착된 ITO 전극의 발광 다이오드 측정결과인 그림 3을 살펴본다. 그림 3 (a)에서 aging에 따라 누설전류가 증가하는 폭도 크지 않고 비발광성 재결합의 비중도 작아 안정적인 pn 접합을 이루고 있음을 알 수 있다. 그림 3 (b)에서는 aging이 진행됨에 따라 광효율과 광출력이 점차적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 그림 3 (c)에서 동저항은 aging이 진행됨에 따라 점차적으로 증가함을 볼 수 있다. 동저항이 증가하는 것은 오염성 접촉 저항의 증가, 박막 비저항의 증가 등이 원인일 수 있다. 그런데, 뒤에서 볼 hybrid ITO의 경우에 저항값이 안정적인 것으로 나타남에 비추어 비저항의 증가가 주요 원인을 유추할 수 있다. 특히 고출력 동작을 위한 고전류 동작에서는 electron beam 증착된 ITO 전극의 발광 다이오드에서 급속한 저항의 증가가 나타났다. 따라서 특히 고전류 동작에서는, electron beam 증착된 ITO 전극의 발광 다이오드는 신뢰성에 심각한 문제가 있다.

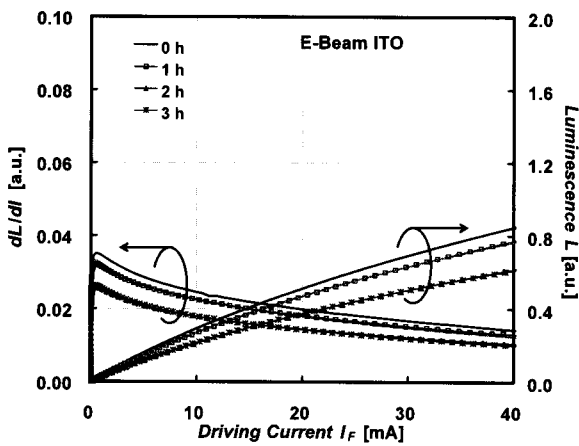
sputtering된 ITO를 사용한 청색 발광 다이오드의 특성을 그림 4에 보였다. 그림 4 (a)에서 aging 시작 3시간 이후부터 역방향 전압 영역과 저전류 영역에서 누설 전류가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있고, 4시간째 누설전류가 감소된 것은 완전 고장 모드전의 불안정한 상태임을 알 수 있다. 급격한 누설 전류의 증가는 광효율과 광출력에 영향을 미치며, 그 결과 그림 4 (b)에 나타난 것과 같이 광효율과 광출력이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(a)의 전류-전압 특성을 보면



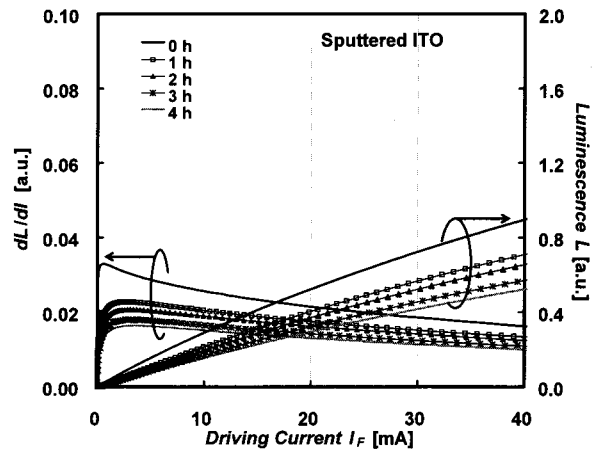
(a)



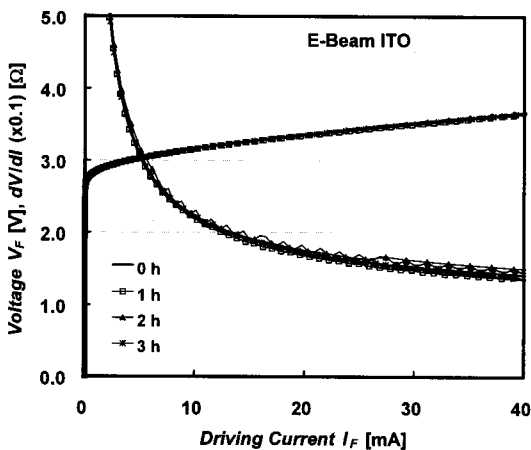
(a)



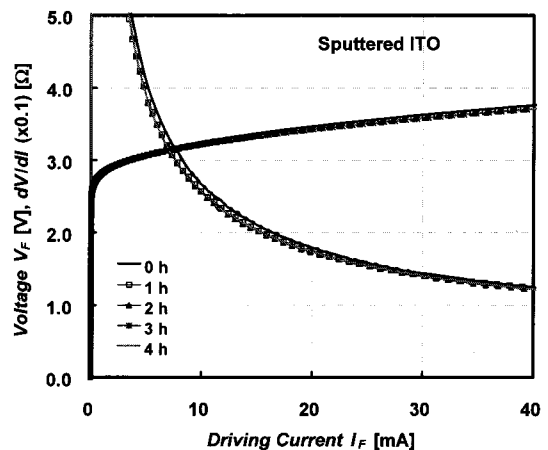
(b)



(b)



(c)



(c)

그림 3. electron beam 증착된 ITO를 적용한 발광 다이오드의 aging에 따른 전기적, 광학적 특성 변화
 Fig. 3. Change in electrical and optical characteristics of the LEDs with electron-beam ITO electrodes (aging condition : 40 °C, 60 mA): (a) V-log I, V-log L, (b) I-L, dL/dI, and (c) I-V, I-dV/dI.

그림 4. aging에 따른 Sputtering된 ITO 전극 발광 다이오드의 전기적, 광학적 특성 변화
 Fig. 4. Change in electrical and optical characteristics of the LEDs with sputtered ITO electrodes (aging condition : 40 °C, 60 mA): (a) V-log I, V-log L, (b) I-L, dL/dI, and (c) I-V, I-dV/dI.

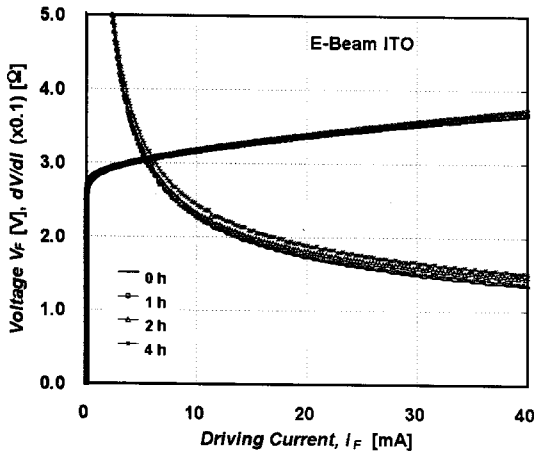


그림 5. electron beam 증착된 ITO 발광 다이오드의 aging에 따른 전기적 특성 변화 (100°C, 60mA)

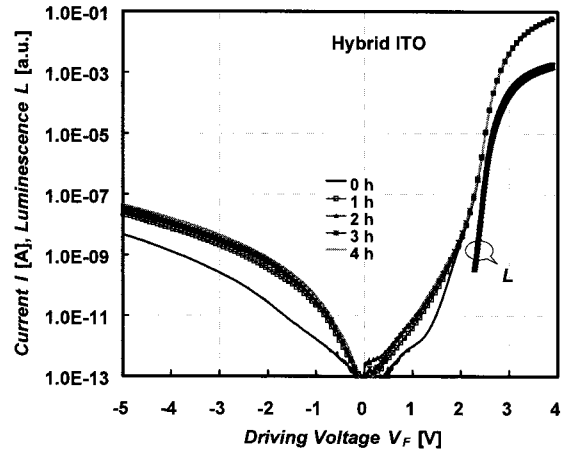
Fig. 5. Change in electrical characteristics of the LEDs with electron-beam ITO electrodes (aging condition : 100 °C, 60 mA): I-V, I-dV/dI.

초기 특성에서도 비발광성 재결합 전류가 많이 흐르는데, 이는 그림 3(a)의 electron beam 증착된 발광 다이오드와 분명히 구별된다.

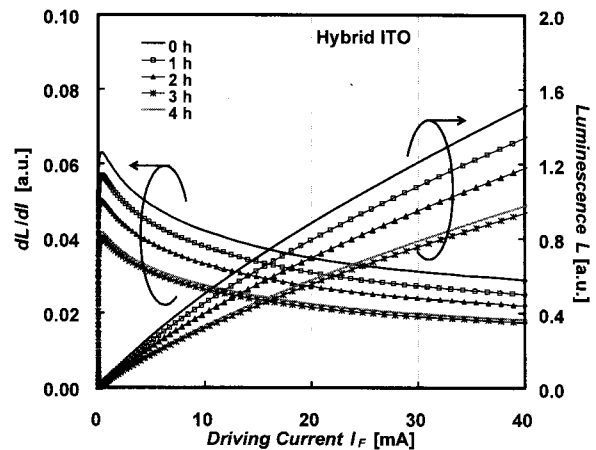
이로부터 sputtering된 ITO 전극의 발광 다이오드에는 플라즈마에 의한 결함 때문에 pn 접합에 비발광성 재결합 센터들이 많이 생겼음을 알 수 있다. 그 반면에 그림 4 (c)에서 알 수 있는 것처럼 동저항이나 직렬저항은 aging이 진행되어도 비교적 안정된 특성을 보이고 있다. 이로부터 발광 다이오드 저항 값의 안정성은 electron beam 증착된 ITO에 비해 우수한 것으로 평가할 수 있다. 100°C 60mA에서 aging한 결과인 그림 5로부터 electron beam 증착된 ITO 전극 발광 다이오드의 직렬 저항은 고온 고전류 aging에서 훨씬 더 빠른 속도로 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 electron beam evaporation 방법을 고출력 발광 다이오드 제작에는 사용하려면 이 문제를 해결하여야 한다.

이렇게, sputtering된 ITO 전극의 발광 다이오드는 비발광성 재결합 센터 때문에, 그리고 electron beam 증착된 ITO 전극의 발광 다이오드는 직렬 저항의 불안정성 때문에 신뢰성에 문제가 있다. 이 문제의 가장 간단한 해결책은 플라즈마 손상이 없는 electron beam 증착으로 ITO 전극의 아래층을 형성하고 그 위층은 비저항의 안정성이 높은 sputtering으로 형성하는 것이다. 앞 장에서 살펴본 것처럼 이렇게 2층 구조를 사용하면 나타나는 투과율의 감소나 비저항의 증가는 큰 장애요소가 되지 않는다.

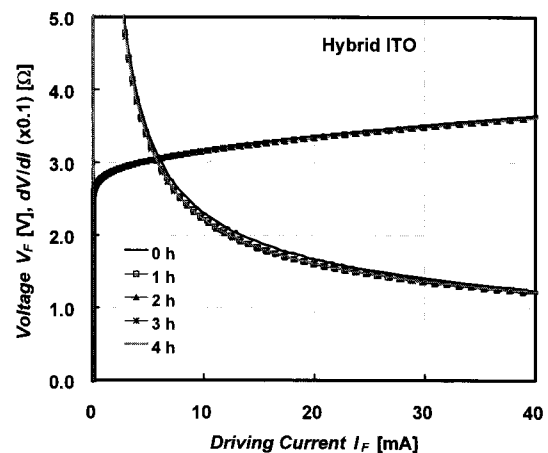
이 hybrid ITO를 적용한 청색 발광 다이오드의



(a)



(b)



(c)

그림 6. aging에 따른 hybrid ITO 전극 발광 다이오드의 전기적, 광학적 특성 변화

Fig. 6. Change in electrical and optical characteristics of the LEDs with hybrid ITO electrodes (aging condition : 40 °C, 60 mA): (a)V-log I, V-log L, (b) I-L, dL/dI, and (c) I-V, I-dV/dI.

aging에 따른 특성 변화를 그림 6에 보였다. 그림 6 (a)에 보인 것처럼 시간이 변함에 따라 누설 전류가 증가하는 폭이 크지 않으므로 안정적인 pn 접합을 이루고 있다고 할 수 있다. 그리고 그림 4 (a)에 보인 sputtering된 ITO 전극의 발광 다이오드와는 달리 비발광성 재결합 전류의 비중이 낮음을 확인할 수 있다. 그림 6 (b)에서 광 효율과 광 출력은 electron beam 증착된 ITO와 유사한 형태로 변화한다. 또, 그림 6 (c)에 볼 수 있듯이 aging이 진행되어도 동저항 값의 변화폭은 크지 않다. 이렇듯 직렬저항 값은 안정적인 모습을 보이고 있으며, 변화폭은 sputtering된 ITO와 비슷하다. 결론적으로, hybrid ITO를 적용한 소자는 pn 접합특성에 있어서는 electron beam 증착된 ITO와 비슷하고 직렬저항 특성은 sputtering된 ITO와 비슷하여, electron beam ITO와 sputtering된 ITO의 문제점은 없애고 장점은 모두 지니고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6에서 광출력이 상대적으로 높게 나타난 것은 patterned substrate를 사용하여 extraction efficiency가 커졌기 때문이다.

GaN의 경우, 결정 내에 존재하는 전위(dislocation)는 비발광성 재결합의 주요 원인이 되며,^[8-9] 이는 역방향 전류의 양에 중요한 역할을 담당하고 있는 것으로 알려져 있다.^[10-11] 따라서, 역방향 전류의 양은 광출력과 상관관계를 갖게 된다. sputtering된 ITO 전극의 발광 다이오드에서 aging 시간에 따른 광출력 감소율이 electron beam ITO 및 hybrid ITO 발광 다이오드에 비해 현저하게 높게 관찰되는 원인은 비발광성 재결합 발생원의 양이 다른 ITO 제조법에 비해 많기 때문이다. sputtering된 ITO전극의 발광 다이오드에서는 전극을 증착할 때 높은 에너지의 이온들이 전위(dislocation) 등의 결정 결함을 발생시킨다. 이러한 결함들이 aging 되면서 계속 증가하여 비발광성 재결합이 늘어나면서 aging에 따른 특성의 저하가 빠르게 나타난 것이다.

그림 4 (a)에서 보듯이 sputtering된 ITO전극의 발광 다이오드는 비발광성 재결합 전류가 초기 값도 크고 aging에 따른 증가율도 높다. 이는 결정결함이 처음에도 많고 그 증가율도 높음을 의미한다. 발광성 확산 재결합 전류가 우세한 양자우물 활성층이 결함이 적은 pn 접합을 이루어 우수한 특성을 가진다는 점에^[12] 비추어 sputtering 방법을 ITO 전극 형성에 그대로 사용하는 것은 적절하지 않음을 알 수 있다.

동저항 또는 직렬저항은 sputtering된 ITO를 적용한 소자와 hybrid ITO를 적용한 소자에서 비교적 안정적

인 특성을 나타내고 있다. 이와는 달리, electron beam ITO를 적용한 소자에서는 저항값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이, electron beam 증착된 ITO 전극의 발광 다이오드도 신뢰성의 문제를 안고 있다. 이 연구에서는 이러한 문제점들을 hybrid ITO 증착 방법으로 해결하였다.

IV. 결 론

전극 형성 공정이 ITO 박막 및 ITO를 전극으로 하는 청색 발광 다이오드의 전기적, 광학적 특성 및 신뢰성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 증착된 ITO 박막의 특성을 살펴보면, 투과율에서는 electron beam evaporation으로 증착한 ITO 박막이 sputtering으로 증착한 박막보다 4% 정도 높았고, 비저항은 그 반대로 sputtering으로 증착한 ITO가 electron beam evaporation으로 증착한 ITO 박막에 비하여 낮아 42% 수준이었다. 발광 다이오드의 특성은, sputtering된 ITO 전극의 발광 다이오드는 비발광성 재결합 센터 때문에, 그리고 electron beam 증착된 ITO 전극의 발광 다이오드는 직렬 저항의 불안정성 때문에 신뢰성에 문제가 있었다.

이 문제를 해결하는 방법으로 ITO 전극의 아래 부분은 electron beam evaporation으로, 위 부분은 sputtering으로 증착하는 hybrid법을 제시하였다. 이 ITO 박막은 투과율은 electron beam 증착된 ITO와 비슷하고 비저항은 sputtering된 ITO의 1.4배 정도여서 박막 자체의 특성은 발광 다이오드에 사용하는 데에 적절한 것으로 판명되었다. 이 hybrid ITO를 사용한 발광 다이오드를 가속 aging 실험을 하면서 특성의 변화를 살펴본 결과, electron beam 증착된 ITO를 사용한 발광 다이오드에서 나타났던 저항값의 증가도 나타나지 않았고, sputtering된 ITO 전극의 발광 다이오드에서 보였던 과도한 비발광성 재결합과 그에 따라 수명이 짧아지는 문제점도 나타나지 않았다. 이렇게, electron beam evaporation과 sputtering된 ITO 전극의 문제점을 해결하였다. 한편, sputtering에 의한 비발광성 재결합 센터의 생성 원리, electron beam 증착된 ITO 전극의 비저항이 증가하는 이유 등은 앞으로 규명하여야 할 과제이다.

참고 문헌

- [1] A. C. Arias, L. S. Roman, T. Kugler, R. Toniolo, M. S. Meruvia, I. A. Hummelgen, "The use of oxide thin films as a transparent electrode in PPV based light emitting diodes," *Thin Solid Films*, vol. 371, pp.201-206, August 2000.
- [2] F. Zhu, K. Zhang, B. L. Low, S. F. Lim, S. J. Chua, "Morphological and electrical properties of indium tin oxide films prepared at a low processing temperature for flexible organic light-emitting devices," *Materials Science and Engineering B*, vol. 85, pp.114-117, August 2001.
- [3] D. Vautrey, M. B. Khalifa, M. P. Besland, J. Tardy, C. Sandu, M. G. Blanchin, J. A. Roger, "Electrical and optical characteristics of indium tin oxide thin films deposited by cathodic sputtering for top emitting organic electroluminescent devices," *Materials Science and Engineering C*, vol. 21, pp.265-271, September 2002.
- [4] D. C. Paine, T. Whitson, D. Janiac, R. Beresford, C. O. Yang, "A study of low temperature crystallization of amorphous thin film indium-tin-oxide," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 12, pp.8445-8450, June 1999.
- [5] L. G. Mar, P. Y. Timbrell, and R. N. Lamb, "An XPS study of zinc oxide thin film growth on copper using zinc acetate as a precursor," *Thin Solid Films*, vol. 223, pp.341-347, February 1993.
- [6] T. Ishida, H. Kobayashi, and Y. Nakato, "Structure and properties of electron-beam-evaporated indium tin oxide films as studied by x-ray photoelectron spectroscopy and work-function measurements," *Journal of Applied Physics*, vol. 73, no. 9, pp.4344-4350, May 1993.
- [7] M. Higuchi, S. Uekusa, R. Nakano, K. Yokogawa, "Micrograin structure influence on electrical characteristics of sputtered indium tin oxide films," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, no. 11, pp.6710-6713, December 1993.
- [8] S. J. Rosner, E. C. Carr, M. J. Ludowise, G. Girolami, and H. I. Erikson, "Correlation of cathodoluminescence inhomogeneity with microstructural defects in epitaxial GaN Grown by metalorganic chemical-vapor deposition," *Applied Physics Letters*, vol. 70, no. 4, pp.420-422, January 1997.
- [9] T. Hino, S. Tomiya, T. Miyajima, K. Yanashima, S. Hashimoto, and M. Ikeda, "Characterization of Threading Dislocations in GaN Epitaxial Layers," *Applied Physics Letters*, vol. 76, no. 23, pp. 3421-3423, June 2000.
- [10] P. Kozodoy, J. P. Ibbetson, H. Marchand, P. T. Fini, S. Keller, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra, "Electrical Characterization of GaN p-n Junctions with and without Threading Dislocations," *Applied Physics Letters*, vol. 73, no. 7, pp.975-977, August 1998.
- [11] J. W. P. Hsu, M. J. Manfra, D. V. Lang, S. Richter, S. N. G. Chu, A. M. Sergent, R. N. Kleiman, L. N. Pfeiffer, and R. J. Molnar, "Inhomogeneous Spatial Distribution of Reverse Bias Leakage in GaN Schottky Diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 12, pp.1685-1687, March 2001.
- [12] X. A. Cao, E. B. Stokes, P. M. Sandvik, S. F. LeBoeuf, J. Kretchmer, and D. Walker, "Diffusion and Tunneling Currents in GaN/InGaN Multiple Quantum Well Light-Emitting Diodes," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 23, no. 9, pp.535-537, September 2002.

 저 자 소 개



한 재 호(정회원)
 2006년 아주대학교 전자공학과
 공학석사
 1997년~현재 삼성전기
 OS연구소 연구원
 <주관심분야 : 발광소자 설계, 소
 자 테스트>



전 동 민(정회원)
 1996년 성균관 대학교 금속공학과
 공학사
 1998년 성균관 대학교 금속공학과
 공학석사
 2003년 성균관 대학교
 신소재공학과 공학박사
 2003년~현재 삼성전기 OS사업부 책임연구원
 <주관심분야 : 전자재료, 광학박막, 자성박막>



김 상 배(정회원)
 1981년 아주대학교 전자공학과
 공학사
 1983년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 공학석사
 1987년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 공학박사
 1987년~1990년 한국전자통신연구원 선임연구원
 1990년~현재 아주대학교 전자공학부 교수
 <주관심분야: 반도체 레이저, 반도체 발광/수광
 소자>