논문 2005-42SD-12-5

# 청색 발광 다이오드에서 활성층의 균일성과 신뢰성 사이의 상관관계 고찰

## ( Correlation between the Active-Layer Uniformity and Reliability of Blue Light-Emitting Diodes )

장 진 원*, 김 상 배**

( Jin-Won Jang and Sang-Bae Kim )

요 약

활성층의 균일성 차이에 따라 서로 다른 발광특성을 보이는 소자들의 균일성과 신뢰도 사이의 상관관계를 고찰하였다. 소자들을 초기 특성에 따라 균일한 발광특성을 보이는 그룹 I과 불균일한 발광특성을 보이는 그룹 II로 분류하였다. 그룹 II 소자의 경우 온도 의존성이 더 큰 것으로 나타났으며, 두 그룹의 신뢰성 실험을 통해 크게 두 가지 성능저하 과정이 있는 것을 알았다. 칩 전체적으로 균일하게 성능저하 되는 bulk 성능저하 과정과 칩의 edge부분에서부터 성능저하가 시작되는 edge 성능저하 과정이다. 비발광성 결함에 의한 bulk 성능저하는 불균일한 발광특성을 보이는 그룹 II 소자에서 더 빠르게 진행되었다. edge 성능저하는 그룹 I, II 소자에 관계없이 고전류로 aging하였을 경우 나타났으며, n-Ohmic 접촉 영역에서 시작하여 발광하지 않는 부분이 확장되는 성능저하 과정을 확인하였다. 이에 따라 고효율, 고신뢰도 청색 발광 다이오드 제작을 위해서는 활성층의 균일도를 높이고, 전류 밀도를 균일하게 하며, 건식 식각된 mesa면의 passivation을 하여야 한다.

**Abstract**

We have investigated the correlation between the active-layer uniformity and reliability of InGaN/GaN blue LEDs. According to initial characteristics, the devices are classified into two groups: group I devices of uniform light-emission and group II devices of non-uniform light-emission. The group II devices are more dependent on temperature and we have found two degradation mechanisms through reliability test. One is bulk degradation in which the degradation occurred over the entire chip and another one is edge degradation in which the degradation occurred from the edge of the chip. Bulk degradation caused by the nonradiative defects is found to be faster in group II devices while there is no difference in the rate of the much faster edge degradation, where darkening starts from the n-Ohmic contact edge. Therefore, more uniform active layer, more uniform current spreading, and the passivation of the dry-etched side-wall are essential for the high reliability of InGaN/GaN LEDs.

**Keywords** : Blue LEDs, Reliability

## I. 서 론

Ⅲ-Ⅴ 질화물 반도체인 InGaN/GaN계의 청색 발광 다이오드는 그 물질계에 존재하는 수많은 구조적, 전기적 결함에도 불구하고 높은 발광 효율을 나타내고 있다[1][2]. 이 InGaN는 단파장 광전소자 응용에 매우 중요한 물질로 발광 다이오드(LED)와 레이저 다이오드(LD)의 활성층 재료로 이용되고 있다[1]. 발광 다이오드의 가장 궁극적인 목표는 solid-state lighting의 광원이다. 현재는 백열전구와 형광등이 여러 응용 분야에서 광원으로 사용되고 있지만 이 광원들은 신뢰성이 떨어지고 효율이 매우 낮은 문제점이 있다. InGaN/GaN 물질계를 이

* 학생회원, ** 정회원, 아주대학교 대학원 전자공학과
(School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)
접수일자: 2005년2월2일, 수정완료일: 2005년11월23일

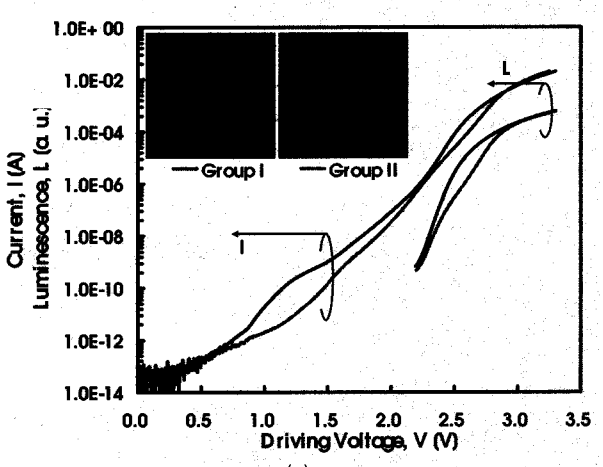
용한 고효율 백색 발광 다이오드는 가까운 미래에 형광등을 대신할 것으로 기대되어 많은 관심을 모으고 있다. 진공관을 사용하던 대부분의 전자회로는 높은 신뢰도의 solid-state 반도체 소자를 사용하는 회로로 바뀌었지만 유일하게 광원은 종래의 진공관 기술을 사용하고 있다. 효율적으로 발광할 수 있는 물질이 없어 발광다이오드를 조명 장치로 사용하는 데에는 여전히 한계가 있기 때문이다. 그러나 InGaN/GaN계 물질과 발광소자의 급속한 발전으로 solid-state lighting의 실현 가능성은 점점 높아지고 있다.

InGaN/GaN계 물질을 이용한 발광 다이오드의 활성층에는 sapphire 기판과 GaN 층 사이의 격자상수 차이(13.5%) 때문에, 보통 $1\times10^{8}$ 에서 $1\times10^{12}\,cm^{-2}$ 정도의 threading dislocation이 존재한다[2]. 이러한 수많은 dislocation에도 불구하고 질화물 반도체의 발광효율은 dislocation이 거의 없는 Ⅲ-Ⅴ 화합물 반도체(AlGaAs, AlInGaP) 발광 다이오드와 거의 비슷하거나 더 높다[3]. 이는 InGaN 활성층 안에서 인듐 조성의 공간적 변동에 의해 생성된 localized energy state에 기인한 것으로 해석되고 있다[4]~[8]. GaN계 물질을 이용한 발광 다이오드의 신뢰도와 관련된 기존 다른 그룹의 연구[9]에서 가속수명 실험을 통해 다음과 같은 결과를 확인하였다. 역방향 전류의 증가, 저전류 영역에서의 생성-재결합 전류의 증가, 이상계수의 증가 그리고 p 층 위의 투명전극의 성능저하로 인한 기생 직렬 저항의 증가 등이 그것이다.

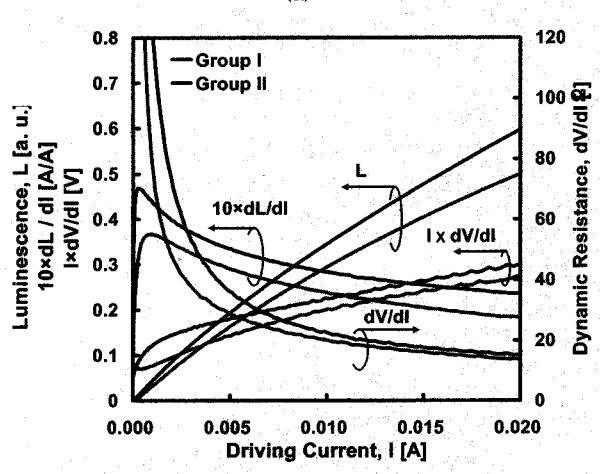
이 연구에서는 활성층의 균일성 정도에 따라 서로 다른 발광특성을 보이는 소자들의 신뢰성 측정을 통해 균일성과 신뢰도 사이의 상관관계를 고찰하였다. 초기특성에 따라 소자를 활성층이 균일한 그룹 I 소자와 불균일한 그룹 II 소자의 두 그룹으로 나누었으며 두 그룹의 온도 의존성을 비교하였다. 그리고 신뢰성 측정을 통하여 활성층 균일성에 차이가 있는 두 그룹의 신뢰성을 비교, 검토하였다. 크게 두 가지 성능저하 과정이 나타났는데 하나는 활성층의 열화이고, 다른 하나는 새롭게 발견된 건식 식각된 mesa 가장자리로부터의 열화이다. 또, 두 그룹 가운데 활성층이 불균일한 그룹 II 소자에서 활성층의 열화가 더 빨리 일어남을 확인하였다. 이는 고효율, 고신뢰도 청색 발광 다이오드 제작을 위해서는 활성층의 균일도를 높이고, 건식 식각된 mesa면의 passivation이 필수적임을 의미한다. 특히 활성층 인듐 조성의 작은 변동이 발광효율을 높일 수 있지만, 과도한 변동은 신뢰도에 악영향을 끼침을 확인하였다.

## Ⅱ. 초기 특성 비교

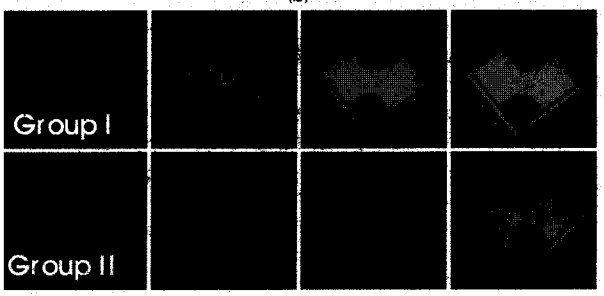
그림 1은 활성층 균일성 정도의 차이에 따라 구분된




(a)




(b)




(c)

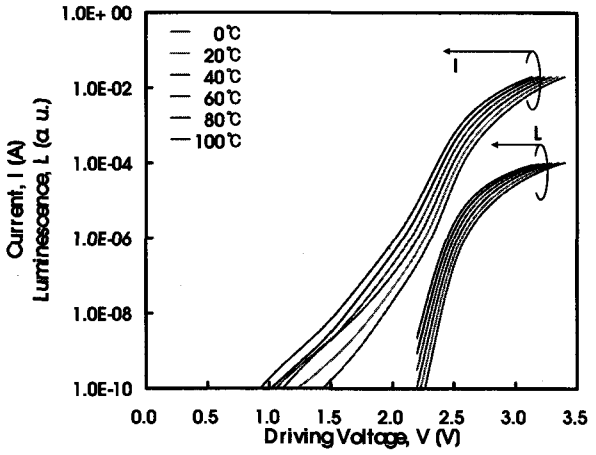
그림 1. 그룹 I, II의 초기 특성 비교 : (a) V-log I, V-log L 특성, EL 사진 (I=10 μA), (b) I-L, dV/dI, dL/dI, I(dV/dI) 특성, (c) 구동전류를 증가시키면서 측정한 EL 사진

Fig. 1. Comparison of the initial characteristics of group I and II devices. (a) V-log I, V-log L characteristics with EL image at I=10 μA in the inset, (b) I-L, dV/dI, dL/dI and I(dV/dI) characteristics, and (c) EL images as a function of driving current.

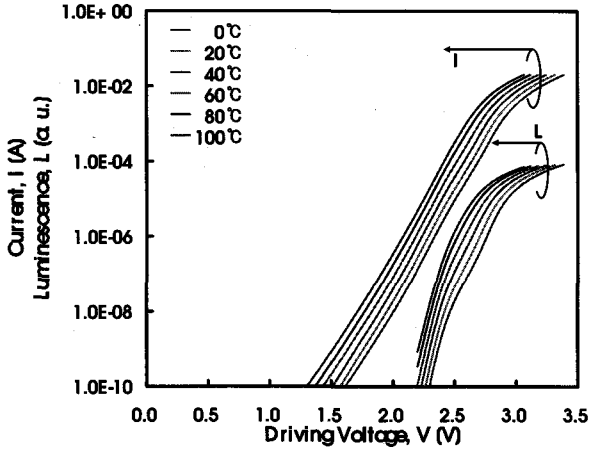
두 그룹에서 대표적인 소자들의 초기 특성을 나타낸 것이다. 그림 1 (a)에 나타낸 V-log L 특성 및 EL (Electroluminescence)사진에서 볼 수 있듯이 직렬 저항에 의해 전류 증가율이 감소하기 이전 영역에서 그룹 II에 속한 소자들은 그룹 I 소자와는 달리 광전류(luminescence) 곡선이 일정한 기울기로 증가하지 못하고 여러 기울기의 V-log L 특성을 보이고 있다. 여기서 L(luminescence)은 Si 광검출기로 측정한 광전류를 나타낸다. 그리고 그룹 I에 속한 소자들은 칩 전체적으로 균일하게 발광하고 있는 것을 볼 수 있으나 그룹 II에 속한 소자들은 발광하는 부분과 발광하지 않는 부분이 명확하게 구분되고 있다. 두 그룹의 특성 차이는 그림 1 (b)에 나타낸 I-L 특성 및 여러 미분 특성에도 잘 나타나 있다. 그룹 I 소자들의 luminescence와 미분 효율이 그룹 II 소자들보다 전 영역에서 높은 것을 알 수 있으며 특히 저전류 영역의 dL/dI 특성으로부터 그룹 II 소자에서 비발광성 누설전류가 더 많이 흐르는 것을 확인할 수 있다. 한편, 구동전류(I) 20 mA에서의 dV/dI 측정값이 그룹 I에 속한 소자가 그룹 II에 속한 소자에 비해 4-5 Ω 정도 높고, I-I(dV/dI) 특성으로부터 그룹 I 소자의 I(dV/dI) 값이 그룹 II 소자에 비해 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 그룹 I 소자들의 Ohmic 접촉 공정의 질이 그룹 II 소자들에 비해서 떨어짐을 보여준다. 그림 1의 (c)는 구동 전류를 증가시켜 가면서 EL사진을 촬영한 것으로 저전류 영역에서부터 두 그룹 소자들의 휘도가 차이 나는 것을 확인할 수 있고 그룹 II 소자의 불균일한 발광특성이 저전류 영역에서부터 계속되고 있음을 보여준다. 이상의 측정을 통하여 저전류 영역에서도 균일한 발광 특성을 보이는 그룹 I 소자와 불균일한 특성을 보이는 그룹 II 소자를 나눈 다음에 여러 다른 환경에서 가속수명 실험을 진행하여 전기적, 광학적 특성의 변화를 살펴보고 비교, 분석하였다.

## III. 그룹별 온도 의존성

다른 반도체 소자와 같이 반도체 pn 접합 다이오드는 온도의 변화에 따라 특성 변화가 큰 소자이다. 발광다이오드는 주변 환경의 온도변화에 의해서 뿐만 아니라 소자의 self-heating에 의한 온도변화에 의해서도 소자의 광출력 및 광변환효율 등의 특성이 변하게 된다. 이 장에서는 그룹 I, II 소자들의 온도 의존성을 분석하여 광출력 및 광변환효율의 차이에 대해 알아보고자 한




(a)




(b)

그림 2. 그룹 I, II의 온도특성 : (a) 그룹 I의 V-log I, V-log L 특성, (b) 그룹 II의 V-log I, V-log L 특성

Fig. 2. Temperature characteristics of group I and II devices. (a) V-log I, V-log L characteristics of group I, and (b) V-log I, V-log L characteristics of group II.

다. 그림 2에는 0℃에서 100℃까지 20℃ 간격으로 온도를 높여가면서 측정한 그룹 I, II 소자들의 V-log I,V-log L 특성을 나타내었다. 두 그룹 모두 온도가 증가할수록 발광성 전류 및 비발광성 전류가 증가하는 것을 확인할 수 있다. V-log L 특성곡선에서 그룹 I 소자의 경우에는 0℃에서 100℃까지 이상계수 1.21에 해당하는 일정한 기울기의 luminescence 곡선을 볼 수 있으나 그룹 II 소자의 경우에는 0℃에서 luminescence 곡선이 이상계수 1.21에 해당하는 기울기로 증가하다가 구동전압 2.475 V를 경계로 기울기가 감소하면서 비이상적인 특성을 보이고 있다. 이러한 현상은 온도가 증가하면서 덜 두드러지게 나타나 80℃ 이상의 V-log L

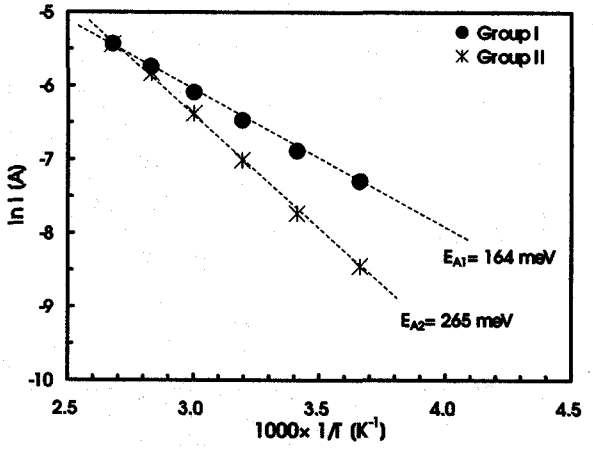



그림 3. 그룹 I, II의 활성화 에너지 비교 (V=2.75 V에서의 log I 대 1/T)

Fig. 3. Comparison of activation energy of group I and II devices. (log I vs 1/T at V=2.75 V).

특성곡선에서는 보이지 않고 정상적인 luminescence 곡선이 나타난다. 그림 2 (b)의 V-log I 특성에서 온도가 증가함에 따라 발광성 확산 재결합 전류가 우세해지는 부분에서 전류, 전압 곡선의 기울기가 변하지 않고 있다. 발광다이오드의 전류, 전압 특성에서 전류를 로그단위로 나타내었을 경우 특성곡선의 기울기는 $1/nV_T$ (n: 이상계수, $V_T$: thermal voltage)에 비례하게 된다. 즉 온도가 높아짐에 따라 $V_T$값이 증가하게 되어 기울기가 작아진다. 그렇지만 그룹 II 소자는 기울기가 변하지 않는 것으로 보아 발광성 확산 재결합 전류항의 이상계수가 작아지고 있음을 알 수 있다.

V-log L 특성의 기울기 변화 등의 이러한 실험결과로부터 그룹 II 소자에는 여러 가지 다이오드 성분이 공존하고 있는 것으로 생각되며 온도가 증가하여 발광성 재결합 전류가 우세해지면서 luminescence 특성이 정상적인 단일 다이오드에서 볼 수 있는 특성으로 바뀌어 가고 있는 것으로 보인다. 구동전압 2.75 V에서 log I 대 1/T의 그래프로부터 아레니우스 plot을 그려 각 그룹의 활성화 에너지를 그림 3에 나타내었다. 구동전압 2.75 V는 그룹 II 소자의 V-log I, V-log L 특성곡선에서 비이상적인 특성이 나타나는 영역이다. 그룹 I 소자의 활성화 에너지($E_{A1}$)는 164 meV, 그룹 II 소자의 활성화 에너지($E_{A2}$)는 265 meV로 그룹 II 소자는 기존의 연구[10]와 많이 다른 값이다. 그룹 I 소자와 비교하면 온도에 민감하게 반응하는 모습으로 그룹 II 소자의온도 의존성이 더 큰 것으로 나타났다.

## IV. 그룹별 신뢰성 비교

그림 4에 80℃, 90 mA에서 가속수명 실험을 한 그룹 I, II 소자의 구동전류 20 mA에서 측정한 luminescence의 변화와 EL 사진을 나타내었다. luminescence는 aging하기 전 초기값을 기준으로 정규화 하여 나타내었다. 특성의 변화에 따라 크게 세 부분으로 나뉘는데 각 단계는 다음과 같다. 1단계는 안정화되는 과정으로 luminescence가 증가하는 것을 볼 수 있다. 2단계는 bulk 성능저하 단계로서 그림에서 볼 수 있듯이 두 그룹 모두 칩 전체적으로 어두워지면서 성능저하가 일어나고 있다. 그렇지만 그룹 간에 확연하게 서로 다른 양상을 보여서 그룹 II 소자의 luminescence가 더 빠르게 감소하는 모습을 볼 수 있다. 3단계는 edge 성능저하 단계로서 두 그룹 모두 칩의 n-Ohmic edge 부분에서부터 점차적으로 어두워져 발광하는 부분이 감소하면서 매우 빠르게 edge 성능저하가 일어나는 단계이다. 점차적으로 p-Ohmic 접촉 쪽으로 발광하지 않는 부분이 확장되고 있다. edge 성능저하는 100℃ 이상의 고온, 80mA 이상의 고전류로 aging하였을 때에 나타났다. 세부적인 실험을 통해 각 단계에서 그룹별 aging 특성을 비교, 분석하였다.

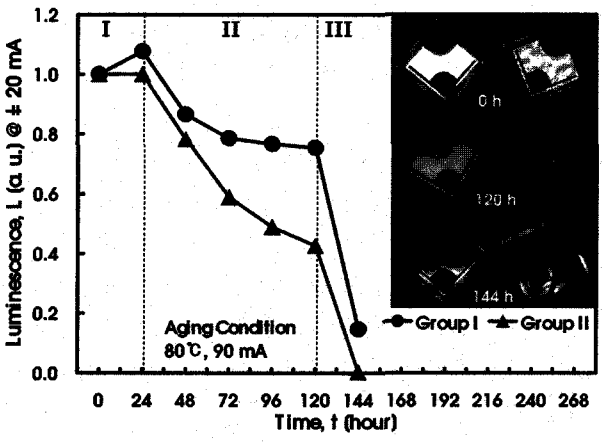



그림 4. 80℃, 90 mA에서 aging한 두 그룹의 성능저하 비교 (I=20 mA에서 luminescence의 변화, EL 사진)

Fig. 4. Comparison of degradation behavior in group I and II devices at 80℃, 90 mA (Change of luminescence at I=20 mA with EL images in the inset).

### 1. 안정화 과정

그림 5에 두 그룹 소자들을 160℃, 40 mA에서 aging

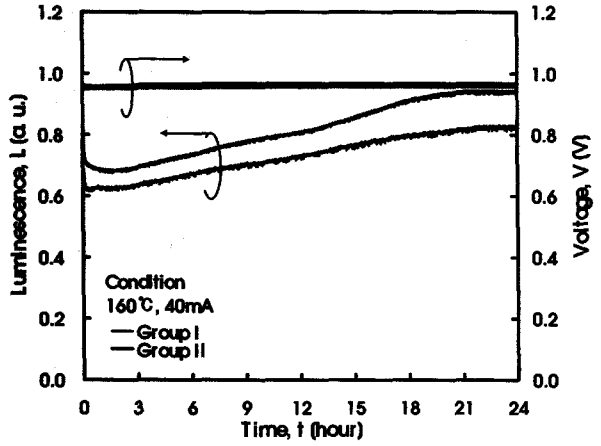


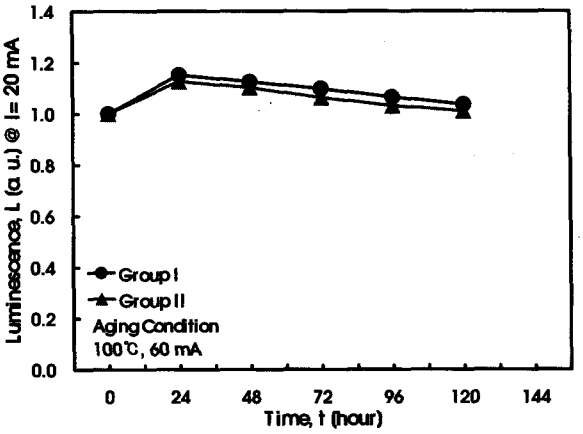

그림 5. 두 그룹의 luminescence, 전압 모니터링 (160℃, 40 mA

Fig. 5. Time dependence of luminescence and operation voltage in group I and II devices at 160℃, 40 mA.

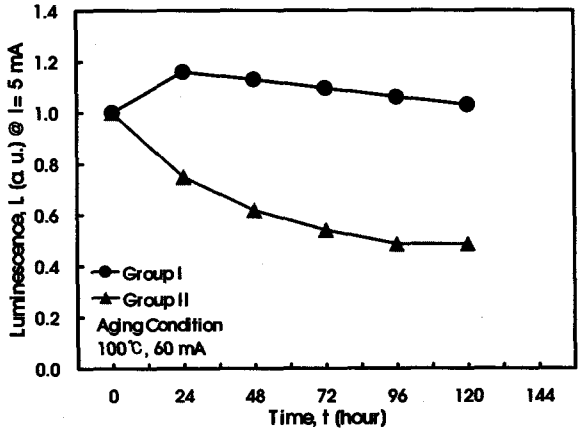
하면서 구동전압과 luminescence를 일정한 시간 간격으로 실시간 관찰한 결과를 나타내었다. 두 그룹 모두 24시간 이내에 luminescence 값이 포화되면서 안정화되는 것을 볼 수 있다. aging 초반부에는 luminescence가 self-heating에 의해 크게 감소하는 모습을 볼 수 있다. 초기의 dV/dI, I(dV/dI) 특성으로부터 그룹 I 소자들의 Ohmic 접촉 공정이 잘 이루어지지 않아 동저항이 큰 것을 볼 수 있었다. 이에 따라 그룹 I 소자에서 heating에 의한 영향이 더 크게 나타나 luminescence가 더 많이 감소한다. 시간에 따라서 안정화되는 속도가 다른 것으로 보아 각 구간마다 서로 다른 메커니즘이 있을 것으로 보이는데, 더 많은 연구가 필요하다.

## 2. Bulk 성능저하 과정

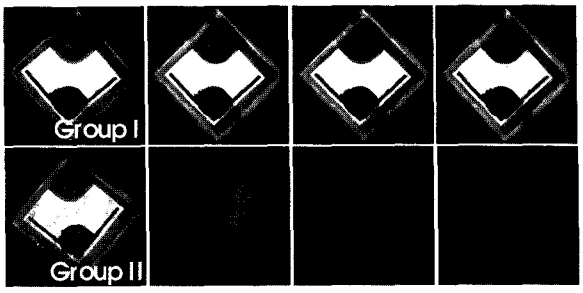
그림 6에 100℃, 60 mA에서 aging하면서 측정한 luminescence와 EL사진을 나타내었다. 구동전류 20 mA에서 측정한 초기 luminescence를 기준으로 정규화시켜 나타낸 그림 6 (a)를 보면 그룹 I, II 소자 간에 큰 차이를 볼 수 없으나 구동전류 5 mA에서 측정한 그림 6 (b)를 보면 저전류 영역에서 성능저하 되는 모습이 그룹 간에 뚜렷하게 구분되는 것을 볼 수 있다. 구동전류 5 mA에서의 luminescence를 보면 열화 속도가 그룹 II 소자에서 현저히 큼을 확인할 수 있다. EL사진에서도 그룹 I 소자의 경우에 칩 전체적으로 균일하게 발광하는 것을 볼 수 있으나 그룹 II 소자의 경우에는 24시간 후에 전체적으로 빛의 양이 많이 줄어들면서 칩 전체적으로 발광하는 부분과 발광하지 않는 부분이 명확




(a)




(b)




초기 24시간 후 72시간 후 120시간 후

(c)

그림 6. 100℃, 60 mA에서 aging 한 두 그룹의 성능저하 비교 : (a) I=20 mA에서 luminescence의 변화, (b) I=5 mA에서 luminescence의 변화, (c) I=50 μA에서의 EL사진

Fig. 6. Comparison of degradation behavior in group I and II devices at 100℃, 60 mA. (a) Change of luminescence at I=20 mA, (b) Change of luminescence at I=5 mA, and (c) EL images.

하게 구분되고 있다. 현재 상용화 되어 있는 휴대형 이동전화 키패드용 발광소자의 경우 5 mA로 구동된다는

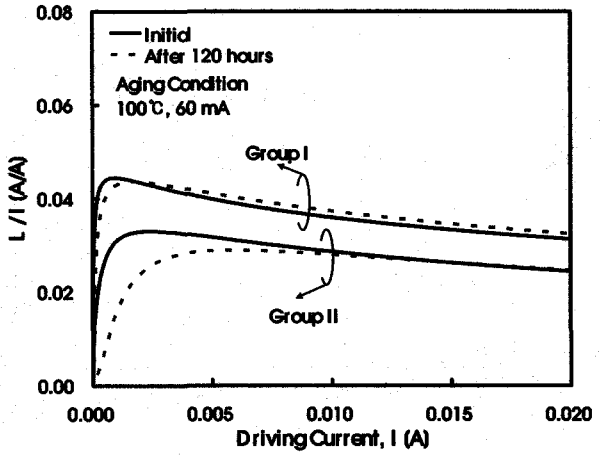


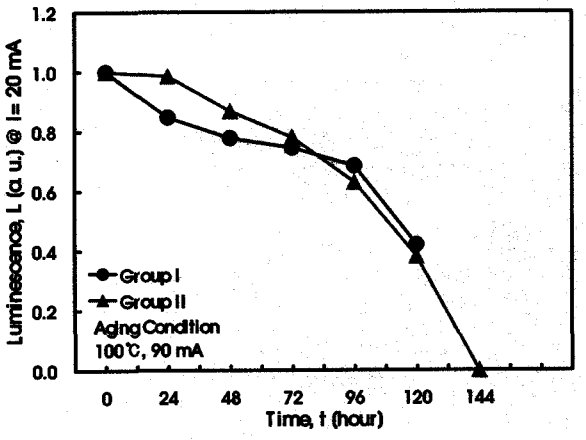

그림 7. 100℃, 60 mA에서 aging 한 두 그룹의 L/I 특성 비교

Fig. 7. Comparison of L/I characteristics of group I and II devices at 100℃, 60 mA.

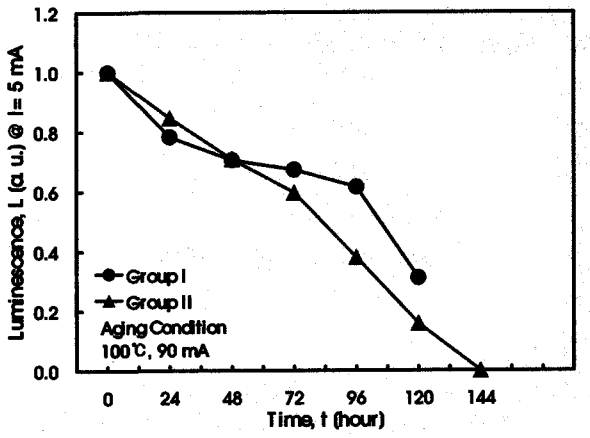
점에서 그룹 II 소자의 경우 신뢰성에 있어 많은 문제를 보이고 있다. 이렇게 bulk 성능저하는 불균일하게 발광하는 그룹 II 소자에서 더 빨리 일어나는데 그 이유를 두 그룹의 주입전류와 luminescence의 비율을 초기상태와 120시간 aging한 후에 비교하여 나타낸 그림 7에서 찾을 수 있다. 여기서 전류와 luminescence의 비율을 나타내고 있는 L/I 특성 곡선은 발광효율을 나타내는 것으로서 비발광성 재결합 센터의 증가율이 그룹 II 소자에서 컸기 때문에 저전류 영역에서 발광효율의 감소와 성능저하가 큰 것이다. 따라서 그룹 II 소자와 같이 불균일한 발광특성을 보이는 소자는 고신뢰도 응용에 사용할 수 없다.

### 3. Edge 성능저하 과정

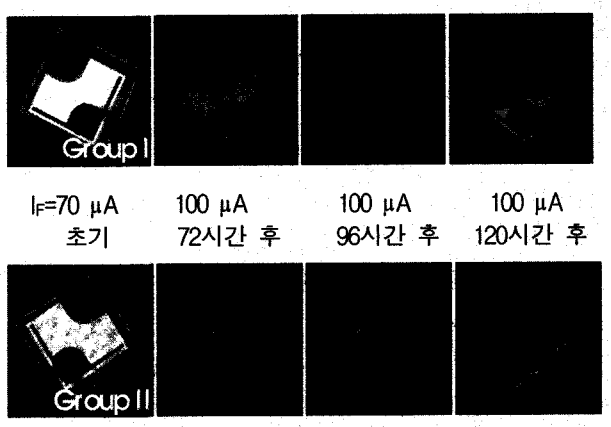
그림 8에 100℃, 90 mA에서 aging하면서 측정한 luminescence와 EL사진을 나타내었다. 구동전류 20 mA에서 측정한 초기 luminescence를 기준으로 정규화시켜 나타낸 그림 8 (a)를 보면 두 그룹 모두 안정화 과정을 거친 후에 bulk 성능저하가 일어나고 있는 모습이다. 그룹 I 소자의 경우 72시간까지 luminescence의 감소 속도가 점차 감소하다가 96시간부터 다시 증가하기 시작하여 120시간 후에는 초기값의 절반 수준까지 갑자기 떨어진 것을 볼 수 있는데, 그림 8 (c)의 EL 사진에서도 n-Ohmic(사진의 위쪽 모서리)접촉 부분 주위에 어두운 부분이 보이기 시작하다가 aging 시간이 증가함에 따라 p-Ohmic 접촉 부분으로 확장되는 모습을 볼 수 있다. 그룹 II 소자의 경우에 초기에는 그룹 I 소자보다 성능저하 되는 속도가 느리다가 24시간 이후부터




(a)




(b)




(c)

그림 8. 100℃, 90 mA에서 aging 한 두 그룹의 성능저하 비교 (a) I=20 mA에서 luminescence의 변화, (b) I=5 mA에서 luminescence의 변화, (c) EL사진

Fig. 8. Comparison of degradation behavior in group I and II devices at 100℃, 90 mA. (a) Change of luminescence at I=20 mA, (b) Change of luminescence at I=5 mA, and (c) EL images.

는 더 빠른 속도로 luminescence가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 8 (b)에 나타낸 구동전류 5 mA에서의 성능저하 모습을 구동전류 20 mA에서 성능저하 과정과 비교하여 보면 그룹 II 소자가 저전류 영역에서 더 빠른 속도로 성능이 저하됨을 알 수 있다. 이는 앞 절에서 설명 했듯이 그룹 II 소자는 비발광성 재결합 센터의 증가로 인해 저전류 영역에서 성능저하가 크기 때문이다. 그리고 그룹별 온도 특성 측정에서도 알 수 있듯이 온도가 높아짐에 따라 그룹 II 소자의 비이상적인 특성이 사라지고 그룹 I 소자와 비슷한 특성이 나타난다. 따라서 aging 조건이 고온, 고전류 일수록 그룹 간에 bulk 성능저하 차이가 줄어드는 모습이다. 그리고 edge 부분에서부터 발광하지 않는 부분이 확장하는 edge 성능저하는 고전류로 aging하였을 때에 나타났다. 고전류로 aging 했을 때에는 반도체내에 deep level band의 원인이 되는 defect가 광범위하게 생성되며, 특히 semi transparent ohmic 접촉 층에 심각한 성능저하를 초래하고, p-GaN 층에 직렬 저항 성분의 증가로 인한 전류밀집 현상으로 luminescence가 크게 감소하는 연구 결과[9]가 이미 보고된 바 있다. edge 성능저하가 dV/dI값의 증가를 수반하므로 구동전압과의 상관관계를 알아보고자 aging 시간에 따라 구동전류 20 mA에서의 구동전압, luminescence 그리고 동저항의 변화를 그림 9에 나타내었다. dV/dI 값이 큰 폭으로 증가하는 시점에서 구동전압 또한 증가하고 있으며 결과적으로 edge 성능저하가 일어나면서 luminescence가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 이러한 현상들의 가능한 원인들을 제시하면 다음과 같다. 첫째는 p-Ohmic 접촉 부분으로 공급된 전류가 반투명전극을 통해서 활성영역으로 집속되는 과정에서 직렬 저항 성분의 증가로 인해 칩 전체 면적 중 상대적으로 n-Ohmic 접촉부분에서 전류 밀집(current crowding)현상이 발생하여 그 부분에서 전류밀도가 높아 스트레스가 증가하기 때문인 것으로 예상된다. 둘째는 칩을 만들 때 n-Ohmic 접촉을 하기 위한 건식 식각 공정 후에 passivation을 하지 않은 것이 원인이 될 수 있다. passivation 공정을 하지 않은 것만이 원인이라면 칩의 가장자리 전체에서 저하가 시작되어야 하지만 n-Ohmic 접촉 부분에서 두드러지게 성능저하가 되는 것으로 보아 제시한 두 가지 원인이 복합적으로 나타나는 것으로 생각된다. 또한 저항값이 크게 증가한다는 것으로부터 투명전극 또는 p층의 저항이 커지면서 전류 확산이 잘 이루어지지 않아 직렬 저항값이 급격하게 증가하는 것으로 예상된다.

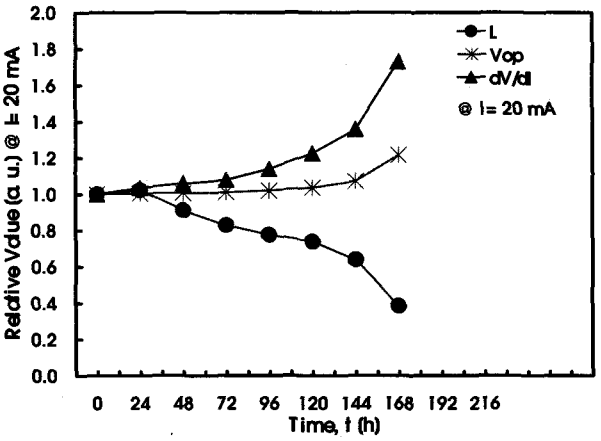



그림 9. 100℃, 90 mA에서 aging 한 그룹 I 소자의 I=20 mA 에서 luminescence, 구동전압 그리고 dV/dI의 변화

Fig. 9. Change of luminescence, driving voltage and dV/dI characteristics of group I device at I=20 mA (aged at 100℃, 90 mA).

## IV. 결 론

활성층의 균일성 차이에 따라 서로 다른 발광특성을 보이는 소자들의 신뢰성 실험을 통해 균일성과 신뢰도 사이의 상관관계를 고찰하였다. 소자들을 초기 특성에 따라 균일한 발광특성을 보이는 그룹 I과 전류-전압특성과 광전류(luminescence)-전압 특성의 비이상적인 특성과 불균일한 발광특성을 보이는 그룹 II로 분류하였다. 그룹 II 소자의 경우 온도 의존성이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 서로 다른 전기 광학적 특성을 보이는 두 그룹의 신뢰성 실험을 통해 크게 두 가지 성능저하 과정이 나타났다. 칩 전체적으로 균일하게 성능저하되는 bulk 성능저하 과정과 칩의 edge 부분에서부터 성능저하가 시작되는 edge 성능저하가 그것이다. 두 성능저하 과정 중에서 bulk 성능저하는 그룹 간에 확연하게 서로 다른 양상으로 나타났으며 비발광성 재결합 센터의 증가로 인해 그룹 II 소자에서 더 빠르게 진행되었다. edge 성능저하는 그룹에 관계없이 고전류로 aging 하였을 때 나타났다. 그룹 II 소자는 그룹 I 소자보다 활성층의 에너지 갭 변동폭(fluctuation)이 클 것이라고 예상할 수 있다. 그렇지만 온도특성에서도 확인할 수 있듯이 변동폭이 크지 않아 고온에서나 캐리어의 공급이 많을 때에는 활성층 변동의 영향이 무시될 수 있어 고온, 고전류에서 성능저하 및 온도특성이 그룹 I 소자

와 비슷해지는 것을 확인하였다. 이상의 결과로부터 고효율, 고신뢰도 청색 발광 다이오드 제작을 위해서는 활성층의 균일도를 높여야 할 뿐만 아니라 전류 밀집에 의한 스트레스를 줄여야 하며, 건식 식각된 mesa 가장자리로부터의 열화를 막기 위해 passivation 공정이 이루어져야 함을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌


[1] Shuji Nakamura, Gerhard Fasol, *The Blue Laser Diode*, (Springer-Verlag, Heidelberg, 1997).

[2] S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford and D. A. Steigerwald, "High Dislocation Densities in High Efficiency GaN-based Light-Emitting Diodes," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 66, pp 1249-1251, Mar. 1995.

[3] T. Mukai, M. Yamada and S. Nakamura, "Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green /Amber/Red Light-Emitting Diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, pp 3976-3981, Jul. 1999.

[4] S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota and S. Nakamura, "Spontaneous Emission of Localized Excitons in InGaN Single and Multiquantum Well Structures," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 69, pp 4188-4190, Dec. 1996.

[5] S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota and S. Nakamura, "Luminescence from Localized States in InGaN Epilayers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp 2822-2824, May 1997.

[6] Y. Narukawa, Y.Kawakami, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura, "Recombination Dynamics of Localized Excitons in $In_{0.20}Ga_{0.80}N$-$In_{0.05}Ga_{0.95}N$ Multiple Quantum Wells," *Phys. Rev. B.*, Vol. 55, pp 1938-1941, Jan. 1997.

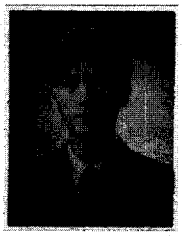
[7] Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, Sz. Fujita, Sg. Fujita and S. Nakamura, "Role of Self-formed InGaN Quantum Dots for Exciton Localization in the Purple Laser Diode Emitting at 420 nm," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, pp 981-983, Feb. 1997.

[8] S. Chichibu, K. Wada and S. Nakamura, "Spatially Resolved Cathodoluminescence Spectra of InGaN Quantum Wells," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 71, pp 2346-2348, Oct. 1997.

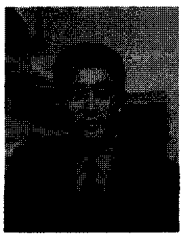
[9] G. Meneghesso, S. Levada, E. Zanoni, S. Podda, G. Mura, M. Vanzi, A. Cavallini, A. Castaldini, S. Du, I. Eliashevich, "Failure Modes and Mechanisms of DC-Aged GaN LEDs," *Phys. stat. sol. (a)* 194, No. 2, pp 389-392, 2002.

[10] L. Hirsch and A. S. Barriere, "Electrical Characterization of InGaN/GaN Light Emitting Diodes Grown by Molecular beam epitaxy," *J. Appl. Phys.*, Vol. 94, pp 5014-5020, Oct. 2003.


## 저 자 소 개

장 진 원(학생회원)
2003년 아주대학교 정보통신대학 전자공학부 공학사
2005년 아주대학교 대학원 전자공학과 공학석사
현재 삼성전자 재직



김 상 배(정회원)
1981년 아주대학교 전자공학과 공학사
1983년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
1987년 9월~1990년 8월 한국전자통신연구소 광전자연구실 선임연구원
1990년 9월~현재 아주대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 반도체 레이저 및 광전소자 등>