

# 질화갈륨 기반 청색 고체 발광 다이오드에서의 스트레스 영향 해석

심상균, 이준기, 김영만 

전남대학교 신소재공학부

## Analysis of Stress-Induced Effect in Blue GaN-Based Light-Emitting Diodes

Sang Kyun Shim, June Key Lee, and Youngman Kim

Department of Materials Science & Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received September 30, 2019; Revised October 7, 2019; Accepted October 7, 2019)

**Abstract:** It was proven that the light outputs of blue GaN-based light-emitting diodes (LEDs) was seriously influenced by the application of external stress. We have simulated the wave function overlap of an electron and hole, which are significantly reduced by the development of stress. Consequently, its internal quantum efficiency decreased from 67.0% to 37.5%. To experimentally investigate the effect of stress, we designed and prepared a special zig system. By applying external tensile stress to compensate for the compressive stress innately developed in Blue LEDs, it was found that the optical output was greatly enhanced from 83.1 mcd to 117.2 mcd at a current of 100 mA, an increase of approximately 41%. In contrast, when the compressive stress is developed more by external compressive stress, we observed that the light output power was reduced from 89.0 mcd to 80.7 mcd, a decrease of approximately 9.3%.

**Keywords:** GaN, LEDs, Strain relaxation, External stress, Bending, IQE, Optical power

### 1. 서론

많은 전자소자들은 핵심이 되는 세라믹 물질의 기능적 특성을 최대한 발현하기 위하여 설계되어 있다. 물질의 결정성에 의하여 기능성은 가장 크게 영향을 받기 때문에, 공정개발에 대한 연구는 결정성을 향상시키거나 결함을 줄이는 방향으로 우선적으로 집중된다. 대부분의 경우 세라믹 물질에 스트레스가 걸리면 소자의 특징이 크게 변화되는 결과를 보여준다. 하지만 높은 결정성의 물질성장을 위해서는 공정상 스트레스를 피하거나 줄이기는 매우 어려운 상황이다. 소자를 패시베이션하는 후공정에 의하여 스트레스가 영향을 받을 수도 있으며, 소자 작동 시 발생하는 고온에 의하여 열팽창되어

스트레스가 증가하기도 한다 [1,2]. 소자에서의 스트레스의 영향은 무시할 수 없이 크지만, 그렇다고 동작 실패가 될 정도로 크지 않으며 또한 그 조절이 매우 복잡하고 어렵기 때문에 대부분의 경우는 무시되어 왔다.

이 연구에서는 질화갈륨(GaN) 기반의 고체 발광 다이오드(light-emitting diode, LED)에서의 스트레스가 발광특성에 얼마나 영향을 미치는가에 대하여 정량적으로 연구하였다. 450 nm 청색 LED에 대한 영향을 조사하였는데, 이는 LED 중에서 상업적 영향력이 가장 큰 소자이기 때문이다. 청색 LED는 최근 10년 들어서 사용이 급격하게 증가한 소자로서, LCD 디스플레이의 배경광원, 형광등을 대체하는 일반조명으로 사용이 확산되고 있으며 그 시장규모는 100조 원에 달하고 있다 [3-5].

GaN 기반으로 하여 청색 발광을 얻기 위해서는 InGaN/GaN 다중양자우물(multi-quantum well, MQW) 구조를 활성층으로 사용하여야 한다. 발광을 하는 InGaN층과 배리어층인 GaN층 간의 결정상수 차이 때문에 매우 높은 압축스트레스가 InGaN층에 발생하게 된다. 일반

✉ Youngman Kim; kimy@jnu.ac.kr

적으로 5~7 GPa 정도의 값이 생성되는 것으로 알려져 있다. GaN 기반 물질들은 높은 압전상수를 가지고 있는데, 높은 압축스트레스로 인하여 MQW 내에 높은 압전전계를 발생하게 된다. 발생한 압전전계로 인하여 LED의 특성이 악화되는데, 이를 QCSE (quantum-confined stark effect)라고 부른다. 누설전류의 증가, 동작전압의 변화, 낮은 재결합의 주요 원인으로 작용한다 [6,7].

QCSE를 줄이기 위한 연구들이 최근 들어서 많이 이루어지고 있다. 비극성 또는 반극성 InGaN/GaN MQW를 사용하는 방법, 수직형 구조의 칩을 사용하여 사용하는 방법, 나노구조를 사용하여 기판의 스트레스를 줄이는 등의 다양한 방법들이 시도되고 있다 [8-11]. 대부분의 연구들은 압축스트레스를 완화하면 LED의 특성이 정성적으로 향상되는 것을 보여주고 있지만, 정량적으로 스트레스를 조절하는 것에 대한 연구 결과는 보여주지 못하고 있다. 본 연구에서는 외부에서 정량적으로 변화를 주면서 스트레스를 가함으로써 청색 LED 소자의 특성이 변하는 것에 대하여 연구하였다.

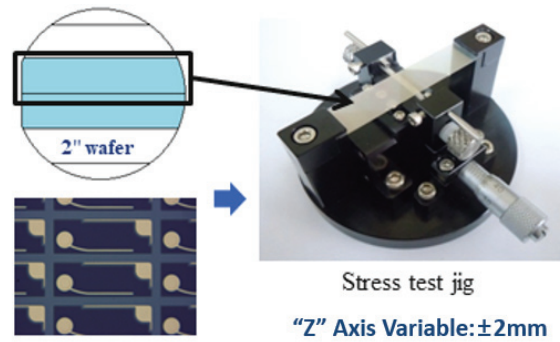
## 2. 실험 방법

### 2.1 청색 LED 소자의 제조

C-plane 사파이어 기판 위에 MOCVD (metal organic chemical vapor deposition)법을 사용하여 LED 에피구조를 성장하였다. InGaN/GaN 다섯 쌍을 가지는 MQW 구조를 가지며, 활성층인 InGaN은 두께 3.0 nm, In 20%의 구성비를 가진다. 배리어로 사용된 GaN은 두께 12.0 nm를 가진다. 일반적인 반도체 제작 공정을 사용하여 수평형 LED 칩을 제작하였으며, 크기는  $240 \times 600 \mu\text{m}^2$ 을 가진다. 외부에서 스트레스를 용이하게 가할 수 있도록 기판을 연마하여  $150 \mu\text{m}$ 로 두께를 줄였고, 기판을  $5.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ 의 크기로 잘랐다.

### 2.2 지그의 제작

외부에서 기계적으로 스트레스를 쉽게 가할 수 있도록 그림 1과 같은 지그를 제작하였다. 바 형태로 자른 LED 기판의 양쪽을 고정하고, 중간에 위치한 고정막대를 위와 아래로 움직임으로써 LED에 외부스트레스를 가할 수 있다. 고정자를 위로 올림으로써 LED에 인장스트레스를 가할 수 있으며, 아래로 내림으로써 압축스트레스를 줄 수가 있다.



**Fig. 1.** Brief view of fabricated LED chips, substrate bar and jig for applying external stress. The anvil can move upward and downward up to 2 mm.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 InGaN 활성층의 스트레스 계산

InGaN 활성층에 생성되는 압축스트레스를 계산하는 것은 매우 어려운 일이다. 사파이어 기판에서부터 활성층에 이르기까지 버퍼층, n-GaN, SRL (strain-relaxation layer), PSS 패턴 등의 다양한 구조를 가지고 있으며, MQW층 또한 다층구조로 되어 있기 때문에 이론적인 수치 계산으로 값을 구한다는 것은 불가능한 일이다.

계산에 사용된 GaN, InGaN의 결정상수와 탄성계수는 표 1과 같다. 이 값들의 사용하여 활성층인 InGaN 층에 걸리는 스트레인의 값을 계산하면 -2.2%가 되며, 이를 스트레스로 계산하면 약 -9.0 GPa의 값을 가진다. 일반적으로 박막공학에서 이 정도 크기의 스트레스라면 박리가 일어날 정도의 큰 값이다. 라만분석기를 사용한 분석으로 -6.5 GPa의 측정값이 발표가 되었는데, 박막 내의 결함 또는 In 뭉침현상 등을 고려하면 계산 결과와 측정치는 어느 정도 일치된 값을 가지는 것으로 보인다 [12].

**Table 1.** Lattice parameter and elastic coefficient of GaN, InN and InGaN.

| Material parameter                     |     | GaN   | InN   | In <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> N |
|--|-----|-------|-------|---------------------------------------|
| Lattice constants<br>[Å]               | a   | 3.189 | 3.545 | 3.26                                  |
|  | c   | 5.185 | 5.703 | 5.288                                 |
| Elastic stiffness<br>coefficient [GPa] | C11 | 390   | 396   | 223                                   |
|  | C12 | 145   | 115   | 137                                   |
|  | C13 | 106   | 92    | 109                                   |
|  | C33 | 398   | 224   | 355                                   |

### 3.2 외부 스트레스의 영향

정량적인 비교를 위하여 사파이어 위에 성장된 모든 층을 GaN으로 가정하고 계산을 함으로써 외부에서 걸어준 스트레스를 수치적으로 조절할 수 있었다. 전체 성장된 층의 두께가 3.0  $\mu\text{m}$ 이고, 지그의 고정자를 위로 0.5 mm 올린 경우를 계산하면 곡률반경(curvature) 2.1  $\text{m}^{-1}$ 을 얻는다. 이를 stoney equation을 사용하여 계산하면 0.51 GPa 값을 가진다. 같은 방식으로 고정자를 1.0 mm, 1.5 mm 이동시킨 경우를 계산하면 곡률반경 값 4.1  $\text{m}^{-1}$ , 6.2  $\text{m}^{-1}$ 을 얻고, 이를 스트레스로 환산하면 0.99 GPa, 1.49 GPa에 각기 해당한다. 곡률반경의 변화를 주면서 라만분석기와 X-ray 분석기를 사용하여 측정하였지만, 압축스트레인의 변화를 확인할 수는 없었다.

약 6.5 GPa의 압축스트레스가 활성층에 걸려 있고, 외부에서 기계적으로 스트레스를 걸어서 약 1.5 GPa를 걸어줄 수가 있으므로 충분히 스트레스의 변화에 대한 실험을 할 수 있을 것으로 생각된다. 외부에서 인장스트레스를 가한 경우에 변하는 청색 LED 소자의 광출력 특성을 측정한 결과는 그림 2와 같다. 그림 2에서 보듯이 외부 인장스트레스가 강하게 걸릴수록 LED의 광출력이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수가 있다. 걸어준 전류 50~200 mA에서 비슷하게 외부스트레스 없을 경우 대비 35~40% 정도로 광출력이 향상하며, 이는 활성층의 스트레스가 외부에서 곡률반경을 변화시킴으로써 줄어든다는 것을 의미한다. 곡률반경의 변화에 의하여 광추출 효율이 조금 증가할 수가 있지만, 실험 결과에 영향을 미칠 수 있을 정도로 크지는 않을 것으로 예상된다.

반대로 외부에서 압축스트레스를 가하여 활성층에 걸려 있는 압축스트레스를 더욱 강화한 경우의 LED 광출력 특성은 그림 3과 같다. 지그를 사용하여 1.0 mm 이상을 이동시키면 기판이 부러지기 때문에 외부 스트레스는 1.0 GPa까지만 가할 수가 있었다. 그림 3에서 보듯이 외부 압축스트레스가 증가할수록 LED의 광출력은 감소하는 것을 확인할 수가 있었다. 걸어준 전류 50~200 mA의 범위에서 줄어드는 광출력 세기는 외부 스트레스가 없을 경우에 비하여 8~10% 정도였다. 광출력은 외부 스트레스에 의하여 변화가 크지만, 전류-전압(I-V) 특성곡선은 거의 변화를 보여주지 않는다.

QCSE가 거의 없는 반극성 m-plane GaN 청색 발광 다이오드를 제조하여, 외부 스트레스 효과를 평가하고자 하였다. 하지만 기판으로 사용된 r-plane 사파이

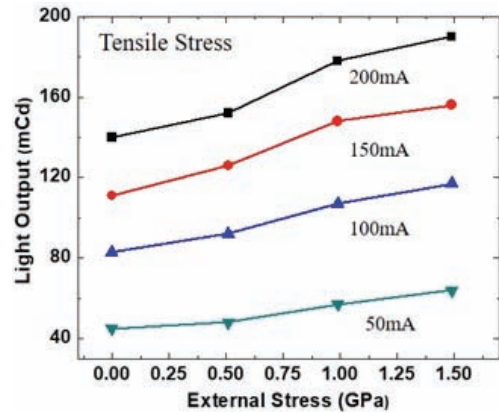


Fig. 2. Light output as a function of external tensile stress at 4 values of applied currents.

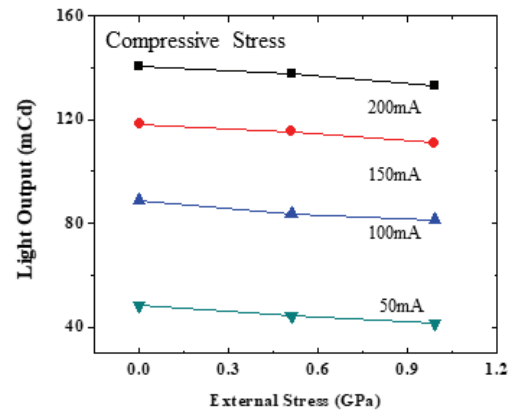


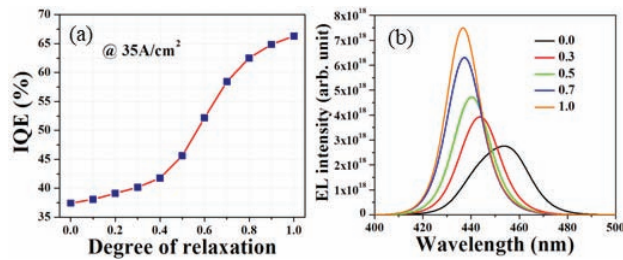
Fig. 3. Light output as a function of external compressive stress at 4 values of applied currents.

어 기판이 외부충격에 쉽게 크랙이 나서 바 형태로 가공이 불가능하였다.

### 3.3 SILENSE 시뮬레이션

LED 시뮬레이션 프로그램인 SILENSE를 사용하여 스트레인의 증감에 따른 이론적인 해석을 하였다. 그림 4(a)에서 보듯이 활성층 내의 압축스트레스가 높은 경우, 즉 degree of relaxation 값이 0인 경우에는 내부 양자효율(IQE) 값이 ~37% 나오며, 스트레스가 점점 사라지면서 스트레스가 완전히 없어지면 IQE 값이 ~67% 까지 올라가는 결과를 보여주었다.

그림 4(b)를 보면 LED 소자에서의 광출력 피크는 활성층에서의 스트레스 값이 높을수록 줄어들고 또한 옆으로 넓어짐을 확인할 수 있다. 또한 최고파장의 값



**Fig. 4.** (a) Internal quantum efficiency variation at current 50 mA ( $35 \text{ A/cm}^2$ ) and (b) light output (EL) intensity as a function of degree of relaxation.

이 440 nm에서 460 nm까지 이동하는 적색이동(red shift) 현상도 발견된다. 이는 QCSE에 의하여 밴드갭이 심하게 기울어지고, 따라서 전자와 정공의 파동함수 겹침이 현저하게 줄어들기 때문에 일어나는 현상이다. InGaN 활성층에서의 압축스트레스가 줄어들면 밴드갭의 기울어짐이 줄어들고, 전자와 정공의 k-벡터값이 같아져서 파동함수의 겹침이 증가하게 되어 높은 광출력을 가지는 LED 소자의 제조가 가능하다.

#### 4. 결론

GaN 기반의 청색 LED 소자의 발광층인 InGaN에는 매우 높은 값의 압축스트레스가 걸려 있고, 이는 외부에서 인장스트레스를 가함으로써 줄여줄 수 있음을 확인하였다. 외부 스트레스의 값이 증가할수록 발광층의 스트레스는 감소하고, LED의 광출력 값은 ~40% 정도까지 증가하는 것을 측정하였다. 반대로 압축스트레스를 가해 주면 InGaN 발광층의 스트레스가 더욱 증가하여 광출력은 약 9% 감소하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션을 하여서 스트레스를 줄여주면 MQW층에서의 압전효과가 감소하여 전자와 정공의 파동함수 겹침이 증가하고, 이로부터 LED의 광출력이 향상된다는 것을 확인하였다. GaN 기반의 LED 소자는 스트레스의 영향을 매우 많이 받으며, 스트레스를 완화시켜 줌으로써 소자의 특성을 향상시킬 수가 있음을 실험과 시뮬레이션으로 검증하였다.

#### ORCID

Youngman Kim

<https://orcid.org/0000-0001-7103-1312>

#### REFERENCES

- [1] B. J. Koo, Y. J. Song, S. Y. Lee, D. J. Jung, B. H. Kim, K. Kim, Y. Park, and J. K. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2286 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.123826>]
- [2] W. Z. Tawfik, G. Y. Hyun, S. J. Lee, S. W. Ryu, J. S. Ha, and J. K. Lee, *J. Mater. Sci.*, **53**, 8878 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2177-8>]
- [3] J. L. Yu and S. Y. Lee, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **17**, 201 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2016.17.4.201>]
- [4] H. J. Park, Y. J. Cha, and J. S. Kwak, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 47 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.47>]
- [5] Y. Jeong, J. Yoo, S. Lee, and J. Hong, *Sens. Actuators, A*, **135**, 215 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.06.073>]
- [6] M. H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai, J. K. Kim, E. F. Schubert, J. Piprek, and Y. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 183501 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2800290>]
- [7] J. Bai, T. Wang, and S. Sakai, *J. Appl. Phys.*, **88**, 4729 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1311831>]
- [8] H. Zhao, R. A. Arif, and T. Tansu, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 1104 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/jstqe.2009.2016576>]
- [9] S. H. Park, Y. T. Moon, J. S. Lee, H. K. Kwon, J. S. Park, and D. Ahn, *Phys. Status Solidi A*, **208**, 195 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201026420>]
- [10] S. Yamamoto, Y. Zhao, C. C. Pan, R. B. Chung, K. Fujito, J. Sonoda, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Express*, **3**, 122102 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1143/apex.3.122102>]
- [11] W. Z. Tawfik, S. J. Bae, S. B. Yang, T. Jeong, and J. K. Lee, *Appl. Phys. Express*, **6**, 122103 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.7567/apex.6.122103>]
- [12] Z. Y. Li, M. H. Lo, C. H. Chiu, P. C. Lin, T. C. Lu, H. C. Kuo, and S. C. Wang, *J. Appl. Phys.*, **105**, 013103 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3055264>]