

# GaN 기반 발광 다이오드(LED)의 특성 분석

이재현\* · 염기수\*\*

\*한밭대학교 정보통신전문대학원, \*\*한밭대학교 정보통신공학과

## Characteristic analysis of GaN-based Light Emitting Diode(LED)

Jae-hyun Lee\* · Kee-soo Yeom\*\*

\*Graduate School of Information & Communications, Hanbat National University

\*\*Department of Information & Communication Engineering, Hanbat National University

E-mail : leejh1897@naver.com\*, ksyoom@hanbat.ac.kr\*\*

### 요 약

본 논문에서는 ISE-TCAD를 이용하여 GaN 기반의 LED 특성을 분석하였다. LED는 GaN 버퍼층을 기반으로 GaN 장벽과 InGaN 양자우물로 구성된 활성 영역, AlGaIn EBL(Electron Blocking Layer)과 AlGaIn HBL(Hole Blocking Layer)로 이루어져 있다. Auger 재결합률, 양자 우물의 폭과 수, EBL의 Al 몰분율의 변화에 따른 LED의 출력 전력 특성을 분석하고 효율 개선을 위한 몇 가지 기준을 제시하였다.

### ABSTRACT

In this paper, the GaN-based LED characteristics are analyzed using ISE-TCAD. The LED consists of GaN barriers, active region of InGaIn quantum well, AlGaIn EBL(Electron Blocking Layer) and AlGaIn HBL(Hole Blocking Layer) on GaN buffer layer. The output power characteristics of LED considering Auger recombination rate, thickness of quantum well and number of quantum wells are analyzed and some criteria for the design of LED are proposed.

### 키워드

InGaIn quantum well, light emitting diodes, semiconductor devices

### 1. 서 론

광전자 소자는 적외선에서 자외선까지 폭넓은 스펙트럼의 범위를 방출하며 현재 full color 디스플레이, 광 기억 장치 등 다양한 범위에 사용되고 있다. 최근 이 분야에서 센서, 고효율의 SSL(Solid State Lighting), 백색 LED 등에 사용하기 위해 녹색, 청색, 근자외선 스펙트럼 범위에서 동작하는 질화물계 반도체를 기반으로 한 LED에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 중 InGaIn 합금 물질을 기반으로 한 LED는 환경 친화적이며 화학적으로 안정된 소자로써 상업적으로 많이 이용되고 있다[1]-[3].

LED의 광 효율을 높이기 위한 다양한 구조 설

계 중에서도 다중 양자 우물 구조는 여러 개의 양자 우물층과 장벽층으로 구성된 구조로써 활성 영역의 광 방출 특성을 증가시키는 장점을 가지며 구조의 최적화를 위해 양자 우물 또는 장벽의 두께, 합금의 구성 비, 양자 우물과 장벽 쌍의 개수 등 다양한 조건을 변화시켜 LED의 특성을 향상시킬 수 있다. 또한 활성 영역에서 나타나는 여러 재결합 현상 중에서 Auger 재결합은 고효율의 조명용 LED 개발의 장애 요소인 droop현상의 주요 원인으로 알려져 있으며 개선하려는 많은 연구가 이루어지고 있다[4].

본 논문에서는 InGaIn/GaN 다중 양자 우물 구조의 LED를 ISE-TCAD 시뮬레이션을 사용하여 설계한 후 Auger 재결합률, 양자우물의 폭과 수, EBL의 Al 몰분율 파라미터 변화에 따른 출력 전

력 특성을 분석하고 LED의 효율을 개선하기 위한 몇 가지 기준을 제시하였다.

### II. 설계 파라미터

그림 1은 ISE-TCAD로 설계한 InGaN/GaN 다중 양자 우물 구조 LED의 단면도이다[5]. 사파이어 기판 위에 4μm n형 GaN 버퍼층, HBL인 30nm n형 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N층이 버퍼층 위에 형성되어 있고 활성 영역은 2개의 5nm In<sub>0.13</sub>Ga<sub>0.87</sub>N 우물층과 우물층을 둘러싼 3개의 10nm GaN 장벽층으로 구성된 40nm의 다중 양자 우물 구조이다. 활성 영역 위로는 EBL인 60nm p형 Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N층과 전극이 형성되는 0.12μm p형 GaN층이 구성되어 있다.

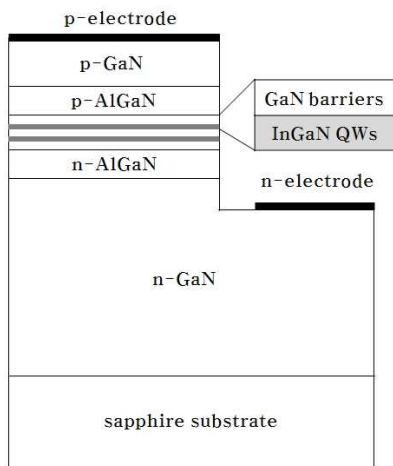


그림 1. InGaN/GaN 다중 양자우물 구조

n형과 p형 각각의 도핑 농도는  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이며 활성 영역은 도핑 되어 있지 않다.

물분율에 따른 각각의 파라미터 값은 시뮬레이션 내에서 합금을 이루기 위한 기본 물질들의 파라미터 값을 이용하여 선형 보간법으로 계산되며, 밴드갭 에너지( $E_g$ ), 전자 친화도( $\chi$ ), 유전상수( $\epsilon_r$ ) 및 굴절률( $n$ )에 대한 각 물질의 파라미터는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 각 물질의 기본적인 파라미터

	GaN	InN	AlN
$E_g$ (eV)	3.42	0.77	6.28
$\chi$ (eV)	3.4	5.927	2.2456
$\epsilon_r$	9.5	15.3	8.5
$n$	2.5067	2.9	2.035

재결합과 관련한 파라미터는 Auger 재결합, SRH(Shockley Read Hall) 재결합 모델을 사용하며 전자/정공 질량 및 이동도, 열전도도 등의 값은 ISE-TCAD의 기본 파라미터를 사용하였다.

### III. ISE-TCAD 시뮬레이션

설계한 GaN 기반 LED는 평균 482nm의 방출 파장을 내며 동작 전압은 약 3.75V이다.

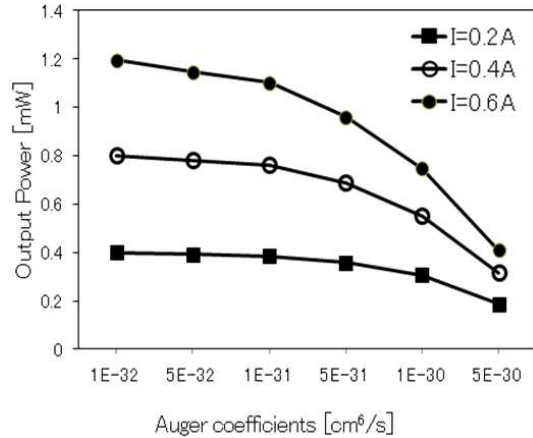


그림 2. Auger 재결합계수에 따른 출력전력 특성

그림 2에 InGaN 활성 영역의 Auger 재결합계수에 따른 출력 전력 특성을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 Auger 재결합계수 값이 증가할수록 Auger 재결합률도 증가하여 출력 전력 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 계수 값이  $10^{31} \text{cm}^6/\text{s}$  이상이 되면 출력 전력 값의 증가폭이 크게 감소하면서 수렴하는 것을 알 수 있다[3].

Auger 재결합 현상은 LED 효율에서 큰 영향을 미치지 않지만 활성 영역에서 주로 발생하여 광전자의 방출 특성을 감소시켜 출력 전력을 감소시키므로 활성 영역의 물질에 따른 적절한 Auger 재결합 계수 값을 통한 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다. 따라서 LED의 다중 양자 우물 구조를 설계할 때 InGaN 활성 영역에서의 Auger 재결합 계수 값이  $10^{31} \text{cm}^6/\text{s}$  이상이 되지 않도록 해야 한다.

그림 3은 활성 영역의 다중 양자 우물 구조에서 양자 우물의 폭에 따른 출력 전력 특성이며 양자 우물의 폭은 3nm에서 20nm까지 변화시켰다. 전압이 증가함에 따라 5nm, 8nm 양자 우물의 출력 전력 값은 증가하며 15nm 이상이 되면 출력 전력 값이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

다중 양자 우물 구조에서 장벽 두께에 비해 양자 우물의 폭이 너무 좁아지면 활성 영역으로의 캐리어 주입을 장벽이 막게 되어 양자 우물 안에

서의 광 방출률이 낮아지므로 출력 전력 또한 낮아지게 된다. 또한 장벽에 비해 너무 두꺼운 양자 우물은 우물 안에서의 캐리어들이 다른 층으로 굴절됨에 따라 누설 전류와 같은 장애 요소가 생겨 출력이 낮아지는 원인이 될 수 있다. 따라서 LED 설계 시에 양자 우물 폭은 5nm에서 8nm 사이로 설계하여 양질의 출력 전력 특성을 얻을 수 있도록 해야 한다.

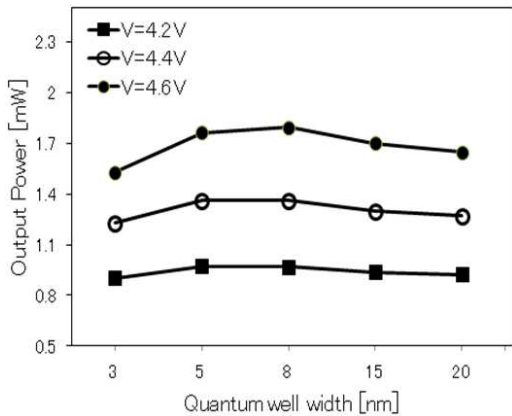


그림 3. 양자 우물 폭에 따른 출력 전력 특성

그림 4는 양자 우물의 폭을 5nm로 고정하고 양자 우물의 수에 따른 출력 전력 특성이다.

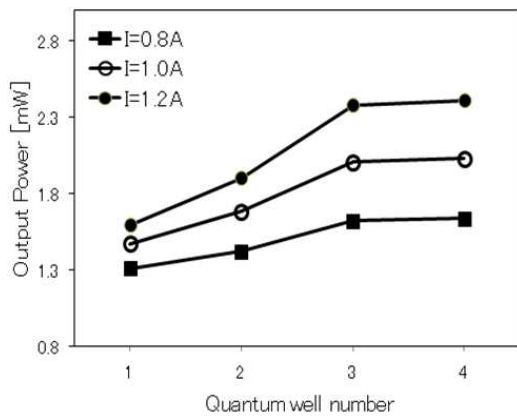


그림 4. 양자 우물 수에 따른 출력 전력 특성

단일 우물 구조일 때 출력 전력 특성은 가장 낮으며 우물의 수가 증가할수록 출력 전력 값은 증가하다가 3개 이상의 양자 우물이 되면 증가폭이 크게 감소함을 알 수 있다. 다중의 양자 우물 구조는 활성 영역 안의 비방사 재결합률을 낮추고 캐리어의 광 방출을 효과적으로 높일 수 있다. 그러나 양자 우물의 수가 너무 많으면 p형 전극에서의 캐리어가 활성 영역에서 제대로

이동할 수 없기 때문에 오히려 LED의 출력이 낮아지는 것을 알 수 있다. 따라서 다중 양자 우물 구조에서 양자 우물의 수를 3개로 하여야 LED의 출력 전력 특성을 최적화 할 수 있다.

그림 5는 EBL의 Al 몰분율에 따른 출력 전력 특성이다. 몰분율은 Al의 비율로 나타내었다.

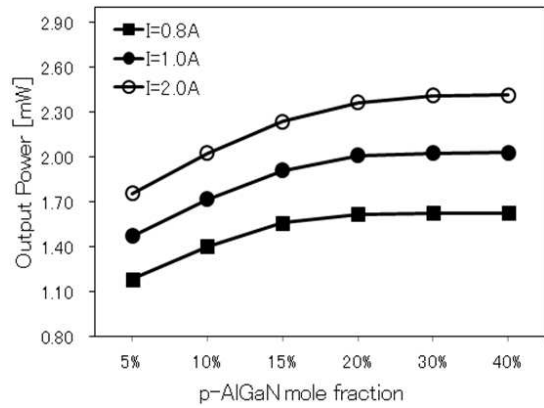


그림 5. Al 몰분율에 따른 출력 전력 특성

EBL의 Al의 몰분율이 증가할수록 출력 전력 값이 증가하는 것을 알 수 있다. EBL은 주로 큰 밴드갭 특성을 가지고 활성 영역으로부터 누설되는 전자들을 감금함으로써 LED의 특성을 높이는 역할을 한다. Al의 몰분율이 증가함에 따라 EBL의 밴드갭이 높아지고 다중 양자 우물 구조의 활성 영역 안의 전자 밀도를 증가시켜 출력 전력을 증가시킨다. Al의 비율이 20%이상으로 높아지게 되면 전자의 밀도는 증가하지만 p형 전극으로부터 정공의 공급이 제한되어 출력 전력 값의 증가폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 AlGaIn와 GaN 장벽층 사이의 격자 상수 불일치에 의한 strain 증가로 문제를 야기할 수 있다. 따라서 LED 구조에서 AlGaIn으로 구성된 EBL의 Al 비율을 20%가 넘지 않도록 하여야 한다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 다중 우물 양자 구조를 갖는 GaN 기반 LED에서 파라미터 변화에 따른 LED 특성을 ISE-TCAD 시뮬레이션을 이용하여 분석하고 적절한 설계 기준을 제시하였다.

InGaIn 활성 영역의 Auger 재결합률은 그 값이 증가할수록 출력 전력 특성을 낮추고 값이 낮아지면 어느 순간 일정한 출력 전력을 나타내는 경향을 나타냈다. 따라서 다중 양자 우물 구조 설계 시에 Auger 재결합 계수가  $10^{-31} \text{cm}^6/\text{s}$  이상이 되지 않도록 해야 한다. 또한 양자 우물의 폭에

대한 출력 전력 특성은 다중 양자 우물 구조에서의 장벽에 비해 너무 좁은 폭을 가진 양자 우물은 출력 전력 값이 감소하며 15nm 이상의 넓은 폭을 가진 양자 우물의 출력 전력 값은 5nm 일 때 보다 오히려 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서 양자 우물의 폭은 5nm에서 8nm 사이로 설계하여 양질의 출력 전력 특성을 얻을 수 있도록 해야 한다. 다중 양자 우물 구조 설계 시에 양자 우물의 수는 3개 이상이 되면 출력 전력의 증가 폭이 거의 없이 비슷한 출력 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 LED 설계 시에 양자 우물의 수는 3개로 설계할 수 있다. 그리고 LED 구조에서 EBL은 활성 영역의 밴드갭을 고려하여 물질의 물분율을 증가시키면서 활성 영역의 전자 밀도를 증가시켜 LED의 출력 특성을 높힐 수 있다. 따라서 EBL 설계 시 AlGaIn으로 구성된 EBL의 Al 비율을 20%가 넘지 않도록 설계함으로써 LED의 출력 전력 특성을 최적화 할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Tzer-En Nee, Jen-Cheng Wang, Hui-Tang Shen, Ya-Fen Wu, The effect of high temperature on the optical properties of InGaIn/GaN blue light-emitting diodes with multiquantum barriers, Crystal Growth, 298, 714-718, 2007
- [2] Mary H. Crawford, Member, IEEE, LEDs for Solid-State Lighting : Performance Challenges and Recent Advances, IEEE quantum electronics, vol. 15, No. 4, 2009
- [3] Simone Chiaria, Enrico Furno, Michele Goano, Member, IEEE, and Enrico Bellotti, Design Criteria for Near-Ultraviolet GaIn-Based Light-Emitting Diodes, IEEE transactions on electron devices, vol. 57, No. 1, 2010
- [4] 김종배, The Issues and the Technology Trends of LED, 전자통신동향분석 제24권 제6호, 2009
- [5] S.M. Thahab, H. Abu Hassan, Z. Hassan, Optical Performance of InGaIn/AlGaIn Double Heterostructure Light Emitting Diodes, IEEE, 2006