

# 차단층 설계 변수가 GaN 기반 LED 특성에 미치는 영향

이재현\* · 염기수\*\*

\*한밭대학교 정보통신전문대학원, \*\*한밭대학교 정보통신공학과

## The Effect of Blocking Layer Design Variable on the Characteristics of GaN-based Light-Emitting Diode

Jae-Hyun Lee\* · Keesoo 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 차단층 설계 변수에 따른 GaN 기반 LED의 출력 특성을 분석하였다. 사용된 LED의 기본 구조는 GaN 버퍼층을 기반으로 GaN 장벽과 InGaN 양자 우물로 이루어진 활성 영역이 AlGaIn EBL(Electron Blocking Layer)과 AlGaIn HBL(Hole Blocking Layer) 사이에 구성되어 있다. ISE-TCAD를 이용하여 GaN 기반 LED에서 EBL의 Al 몰분율과 두께, HBL의 Al 몰분율과 도핑 농도에 따른 출력 전력과 내부 양자 효율 특성을 분석하였다.

### ABSTRACT

In this paper, the output characteristics of GaN-based LED considering blocking layer design variables are analyzed. The basic structure of the LED consists of active region of GaN barrier and InGaIn quantum well between AlGaIn EBL(Electron Blocking Layer) and AlGaIn HBL(Hole Blocking Layer) on GaN buffer layer. The output power, internal quantum efficiency characteristics of LED active region considering Al mole fraction of EBL, thickness of EBL, Al mole fraction of HBL and doping concentration of HBL are analyzed using ISE-TCAD.

### 키워드

InGaIn/GaN light-emitting diodes, Internal quantum efficiency, blocking layer, ISE-TCAD

### 1. 서 론

질화물계 LED는 높은 에너지 효율과 친환경적인 소자로 백색 LED의 기초가 되고 있으며 전반적인 광전자 소자에 사용되고 있다. 하지만 질화물계 물질의 정공 특징인 큰 유효질량과 낮은 이동도로 인해 질화물계 LED의 효율을 높이기 위해서는 더욱 높은 주입 전류 밀도를 필요로 하여 낮은 전류 범위에서 최대의 효율을 보이고 전류가 증가할수록 효율이 급격히 감소하는 'droop' 현상이 주로 나타난다. 'droop' 현상의 다양한 원인 중에서는 높은 전류 밀도로 인해 캐리어들이 활성 영역 이외에 다른 층으로 누설 되는 것이

하나의 원인으로 나타나며 효율을 증가시키기 위해 전자, 정공 차단층인 EBL과 HBL층이 제안되었다. 활성 영역의 위 아래로 구성되어 있는 차단층은 주로 높은 밴드갭 특성을 가진 AlGaIn 물질이 사용되며 10%에서 20%사이의 Al 몰분율을 가지고 활성 영역 안의 전자와 정공을 효과적으로 감금시켜 방사 재결합률을 높이고 효율을 증가시키는 역할을 한다[1]-[4].

따라서 본 논문에서는 ISE-TCAD 시뮬레이션을 사용하여 InGaIn/GaN 다중 양자 우물 구조의 LED를 설계한 후 EBL의 Al 몰분율과 두께, HBL의 Al 몰분율과 도핑 농도에 따른 출력 전력과 내부 양자 효율인 IQE 특성을 분석하였다.

## II. 설계 파라미터

ISE-TCAD로 설계한 InGaN/GaN 다중 양자 우물 구조 LED의 단면도는 그림 1에 나타내었다.

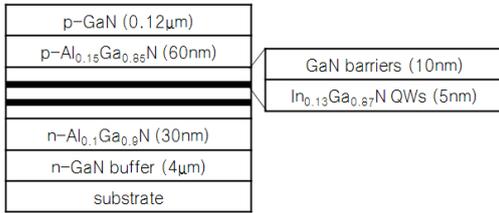


그림 1. 다중 양자 우물 구조 LED 단면도

n형과 p형 각각의 도핑 농도는  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  이며 GaN, InN, AlN 각 물질의 밴드 갭 에너지는 3.42eV, 0.77eV, 6.28eV 이다.

재결합과 관련한 파라미터는 Auger 재결합, SRH(Shockley Read Hall) 재결합, Radiative 재결합 모델을 사용하며 각각의 재결합률 계산식은 다음과 같다.

$$R_{Rad} = C_R(np - n_{i,eff}^2) \quad (1)$$

$$R_{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)}, \left( n_1, p_1 = n_{i,eff} e^{\frac{(-)E_{mp}}{kT}} \right) \quad (2)$$

$$R_{Auger} = (C_{An} + C_{Ap})(np - n_{i,eff}^2) \quad (3)$$

n과 p는 전자, 정공 농도이며 (1), (3)식의  $C_R$ 과  $C_A$ 는 radiative, Auger 재결합 계수, (2)식의  $\tau_{n,p}$ 는 전자, 정공의 수명 시간(lifetime)이다[5].

물분율에 따른 각각의 파라미터 값은 시뮬레이션 내에서 기본 물질들의 파라미터 값을 이용하여 선형 보간법으로 계산되며, 전자/정공 질량 및 이동도, 전자친화도, 열전도도 등의 값은 ISE-TCAD의 기본 파라미터를 사용하였다

## III. ISE-TCAD 시뮬레이션

설계한 InGaN/GaN LED의 동작 전압은 약 3.8V이며 10mA에서 0.8mW, 20mA에서 1.42mW의 출력 전력 특성을 나타낸다. LED의 평균 방출 파장은 482nm이며 기본 동작 특성을 그림 2에 나타내었다.

그림 3은 AlGaIn EBL Al 물분율의 5%에서 40%까지의 변화에 따른 출력 전력과 IQE 특성을 나타내었다. 전류가 증가하면서 물분율이 클수록 출력 전력 값은 증가하며 물분율이 20% 이상이면 출력 전력값이 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. IQE 값은 전류가 6mA일 때 물분율이 5%일 때보다 40%일 때 IQE 값이 약 6% 차이로

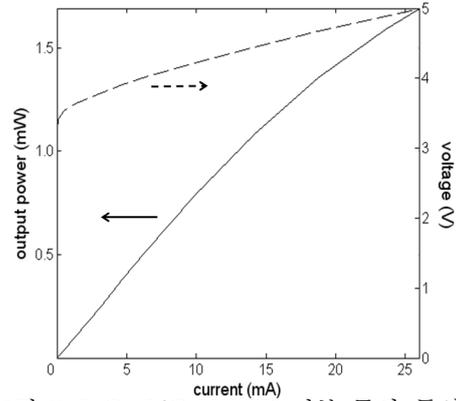
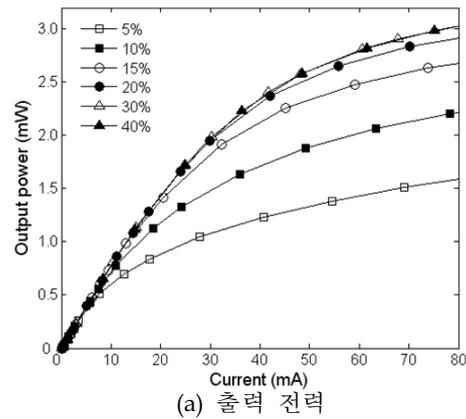
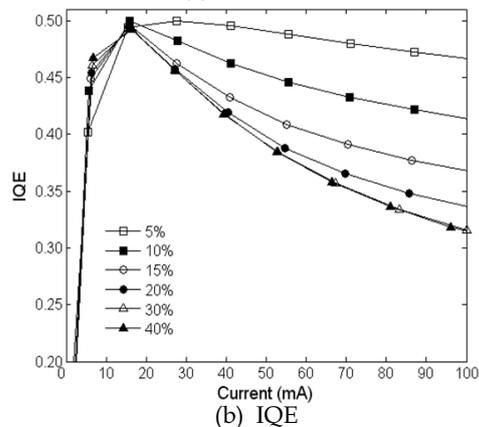


그림 2. InGaN/GaN LED 기본 동작 특성



(a) 출력 전력



(b) IQE

그림 3. EBL Al 물분율에 따른 출력 특성

더욱 높아 낮은 전류 범위에선 물분율이 높을수록 IQE 값이 크지만, 약 20mA 이상부터 전류가 증가할수록 반대의 경향이 나타나게 된다. Al 물분율이 증가하게 되면 EBL의 밴드갭이 높아져 활성 영역 안의 전자들을 더욱 많이 감금하게 되어 전자 밀도를 증가시켜 출력 특성을 증가시킨다. 하지만 물분율이 20% 이상으로 높아지면 전자의 밀도는 증가하지만 p형 전극으로부터 활성 영역으로의 정공의 공급이 제한되어 값의 증가폭이 감소하게 된다[3],[6]. 또한 전류가 증가함에 따라 물분율이 클수록 활성 영역 안의 많은 캐리어 밀

도로 인해 비방사 재결합인 Auger 재결합률이 높아지게 되고 n형 영역으로의 캐리어 누설 가능성이 증가하여 IQE 값은 크게 감소하게 된다. 따라서 출력 전력과 IQE 값을 고려하여 EBL의 Al 몰분율은 20%를 넘지 않도록 하여야 한다.

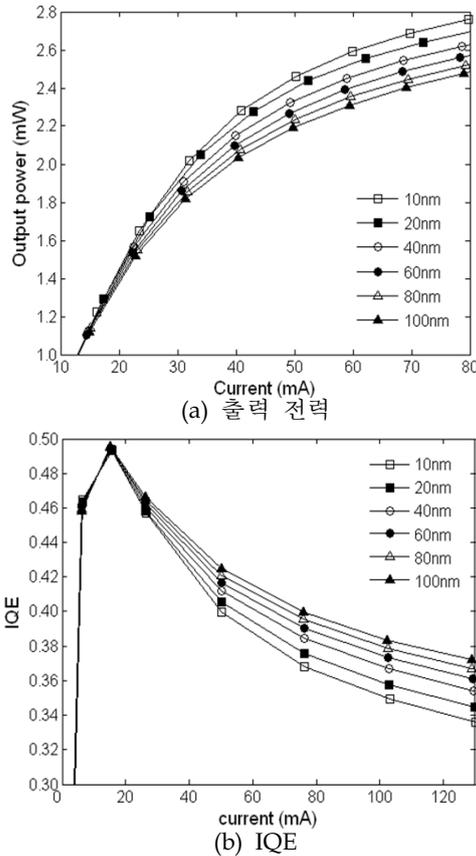


그림 4. EBL 두께에 따른 출력 특성

그림 4는 Al 몰분율이 15%일 때, EBL 두께를 10nm에서 100nm까지 변화시킴에 따른 출력 특성이다. 그림에서 보는 바와 같이 EBL의 두께가 증가함에 따라 출력 전력 값은 감소하게 된다 또한 IQE 값은 최대값 이후 전류가 약 20mA 이상에서부터 EBL의 두께가 얇을수록 효율의 감소폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

EBL의 두께가 증가하게 되면 p형 영역으로의 누설 전자를 차단할 가능성이 증가하여 비방사 재결합률의 감소로 IQE 값이 높아지지만, p형 전극으로부터 정공이 활성 영역으로 이동하는 이동 거리가 증가하여 주입 밀도가 감소함에 따른 낮은 방사 재결합률로 출력 전력 값이 낮아진다 반면 얇은 EBL 두께는 활성 영역으로의 정공 주입률 증가로 전자, 정공의 방사 재결합률이 높아지지만 그에 따른 p형 영역으로의 누설 전자 밀도 증가로 IQE 값이 감소하게 된다. 따라서 EBL의 두께는 40nm에서 80nm 이하로 설계하여 양질의 출력 특성을 얻을 수 있다.

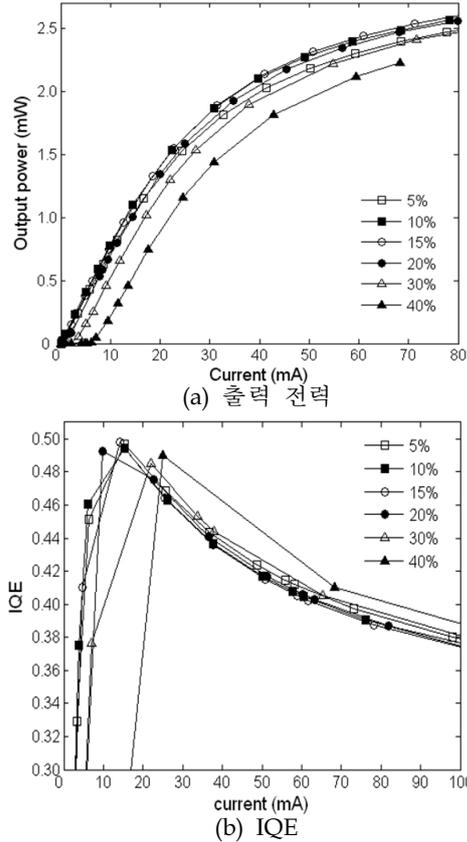


그림 5. HBL Al 몰분율에 따른 출력 특성

HBL의 Al 몰분율 증가에 따른 출력 특성을 그림 5에 나타내었다. HBL의 Al 몰분율이 5%에서 15% 까지 증가함에 따라 출력 전력 값은 증가하다가 20% 이상이 되면 값이 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 IQE 값은 10mA에서 몰분율 15%와 40%가 약 22%의 차이로 몰분율 15%의 IQE 값이 훨씬 크지만 전류가 20mA 이상 증가하게 되면 출력 전력 값과 반대의 경향으로 몰분율 40%의 IQE 값이 큰 것을 알 수 있다.

HBL의 Al 몰분율이 15%까지 증가함에 따라 n형 영역으로의 누설 정공의 효과적인 차단으로 활성층 안의 방사 재결합률이 증가하여 출력 전력과 IQE 값이 증가하지만 몰분율이 20% 이상으로 높아지면 n형 전극에서 활성층으로 이동하는 전자의 흐름을 오히려 막게 되어 출력 특성이 점차 낮아지게 된다. 그리고 20mA 이상의 주입 전류 증가에 따른 캐리어 밀도 증가로 활성층에서의 방사 재결합률 증가폭에 비해 Auger 재결합률이 더욱 증가하면서 비방사 재결합률이 높아져 IQE 값이 출력 전력과 반대의 경향으로 나타난다. 따라서 HBL의 Al 몰분율은 효율을 고려하여 15%에서 20% 사이로 설계하여 출력 특성을 높일 수 있다.

p형 도핑 농도가  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  일 때, HBL의 n형 도핑 농도를  $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 에서  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 까지 변화 시킴에 따른 출력 특성을 그림 6에 나타내었다.

HBL의 도핑 농도가 증가할수록 출력 전력 값은 증가하고, IQE 값은 서로의 값 차이가 1% 미만으로 거의 변화가 없지만 IQE 최대값 이후 도핑 농도가 클수록 효율 감소폭이 약간 큰 것을 알 수 있다.

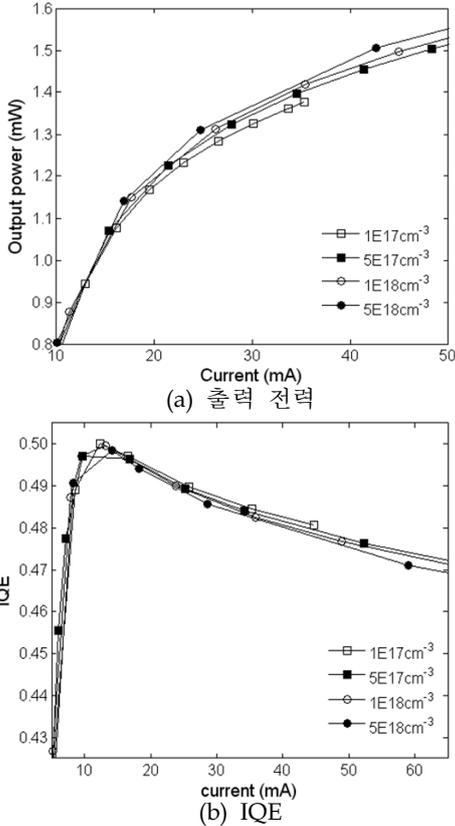


그림 6. HBL 도핑 농도에 따른 출력 특성

HBL의 도핑 농도가 증가할수록 활성 영역으로의 전자 밀도가 높아지고 효율적인 정공 차단 역할을 하게 되어 출력 전력 값이 증가하지만 정공에 비해 이동도가 큰 전자의 밀도 증가로 누설 전자가 발생해 비방사 재결합률이 크게 높아져 IQE 값이 낮아질 수 있다. 하지만 그림 6의 (b)에서 보는 바와 같이 전체적인 효율 값의 변화는 거의 차이가 없는 것을 나타냈다. 따라서 HBL의 도핑 농도는 출력 특성을 고려해  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  에서  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  사이로 설계하는 것이 효율적이다

#### IV. 결 론

본 논문에서는 ISE-TCAD 시뮬레이션을 이용하여 InGaN/GaN 다중 양자 우물 구조 LED에서 차단층 설계 변수에 따른 출력 전력과 IQE 특성을 분석하였다.

EBL의 Al 몰분율이 증가함에 따라 출력 전력과

IQE 값은 증가하다 20% 이상이 되면 증가폭이 감소하며, IQE 값은 전류가 높아질수록 몰분율이 높을 때 효율이 크게 감소한다 따라서 출력 전력과 IQE 값을 고려하여 EBL의 Al 몰분율은 20%를 넘지 않도록 하여야 한다. EBL의 두께 변화에 따른 출력 전력은 두께가 증가함에 따라 값이 감소하게 되고 IQE 값은 20mA 이후 두께가 얇을수록 효율의 감소폭이 큰 것을 알 수 있다 따라서 두께는 40nm에서 80nm 이하로 설계하여 양질의 출력 특성을 얻을 수 있다 HBL의 Al 몰분율은 5%에서 15%까지 증가함에 따라 출력 전력 값이 증가하다 20% 이상이 되면 출력 전력 값이 감소하게 되고 IQE 값은 전류가 증가함에 따라 출력 전력과 반대의 경향을 띄게 된다 따라서 Al 몰분율은 15%에서 20% 사이로 설계하여 출력 특성을 높일 수 있다. HBL의 도핑 농도 변화에 따른 출력 전력은 도핑 농도가 증가할수록 값이 증가하게 되지만 전체적인 IQE 값의 변화는 거의 차이가 없다. 따라서 HBL은  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  에서  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  사이의 도핑 농도로 설계하는 것이 효율적이다.

#### 참고문헌

- [1] Sumitra Singh, Navin K. Rohila, Suchandan Pal, C. Dhanavantri, "Optimization towards reduction of efficiency droop in blue GaN/InGaN based light emitting diodes," opti 123, 1287-1292, 2012
- [2] Sang-Heon Han, Dong-Yul Lee, Sang-Jun Lee, Chu-Young Cho, "Effect of electron blocking layer on efficiency droop in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes," physics letters 94, 231123, 2009
- [3] Simone Chiaria, Enrico Furno, Michele Goano, and Enrico Bellotti, "Design Criteria for Near-Ultraviolet GaN-Based Light-Emitting Diodes," IEEE tran. electron devices, vol. 57, no. 1, 2010
- [4] 이재현, 염기수, "GaN 기반 발광 다이오드(LED)의 특성 분석," 한국정보통신 종합학술대회논문집, 춘계 16권1호, 686-689, 2012
- [5] Integrated Systems Engineering, "ISE TCAD Release 9.5 Manuals Online,"
- [6] Yen-Kuang Kuo, Jih-Yuan Chang, and Mei-Ling Chen, "Role of electron blocking layer in III-nitride laser diodes and light-emitting diodes," SPIE vol.7597, 2010