

양자 우물 구조가 GaN 기반 LED 특성에 미치는 영향

이재현* · 염기수**

*한밭대학교 정보통신전문대학원, **한밭대학교 정보통신공학과

The Effect of Quantum Well Structure 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 양자 우물 구조 변화에 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 LED 활성영역의 양자 우물의 두께와 개수, 장벽의 도핑 변화에 따른 출력 전력, 내부 양자 효율 특성을 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper, the output characteristics of GaN-based LED considering quantum well structure 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 thickness of quantum well, number of quantum well and doping of barrier are analyzed using ISE-TCAD.

키워드

light-emitting diodes, InGaIn/GaN Quantum well, Internal quantum efficiency, ISE-TCAD

1. 서 론

지금까지의 LED 산업은 설계의 모든 부분적인 면들의 최적화를 통해 LED의 특성을 점차 향상시키고 있으며 비용과 전력, 시간을 절약하기 위해 모델링과 시뮬레이션을 통한 LED 설계는 중요한 부분이 되었다. 질화물계 LED는 높은 에너지 효율로 전반적인 광전자 소자에 사용되고 있으며 녹색, 청색, 근자외선 스펙트럼 범위에서 동작하여 고효율의 SSL(Solid State Lighting), 백색 LED 등에 많이 이용되고 있다.

그러나 질화물계 LED는 Auger 재결합, 높은 주입 전류 밀도로 인한 전자 누설 등 복합적인 요인으로 인한 'droop' 현상으로 낮은 전류 범위에서 최대의 효율을 보이고 전류가 증가할수록

효율이 급격히 떨어지는 특성이 주로 나타나고 있다. 높은 전류에서의 광 효율을 높이기 위해 캐리어 이동, 활성 영역 안으로의 캐리어 주입 캐리어 손실 및 방사 재결합 등에 관한 중점적인 연구가 진행되고 있으며 LED 특성의 최적화를 위해 활성 영역의 우물과 장벽 구조, 합금 물질의 구성비, 도핑 농도 등 여러 가지 조건을 변화시켜 효율을 개선하려는 많은 연구가 이루어지고 있다 [1]-[3].

본 논문에서는 ISE-TCAD 시뮬레이션을 사용하여 InGaIn/GaN 다중 양자 우물 구조의 LED를 설계한 후 활성 영역 안 양자 우물의 두께와 개수, 장벽의 도핑 변화에 따른 출력 전력, 내부 양자 효율인 IQE의 특성을 분석하였다.

II. 설계 구조 및 파라미터

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

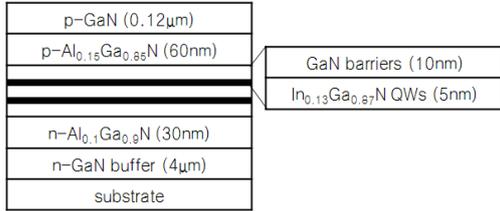


그림 1. 다중 양자 우물 구조 LED 단면도

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.

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

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

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

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[4].

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

III. 시뮬레이션 결과

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

그림 3은 InGaN 활성 영역의 양자 우물 두께 변화에 따른 출력 전력과 IQE 특성이며 두께는 3nm에서 20nm까지 변화시켰다. 양자 우물 두께가 증가함에 따라 출력 전력 값은 증가하고 두께가 15nm 이상이 되면 증가폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 IQE 값은 10mA에서 3nm 양자 우물 두께를 가진 LED의 효율이 20nm 두께보다 약 30% 정도로 가장 크지만 전류가 증가할수록

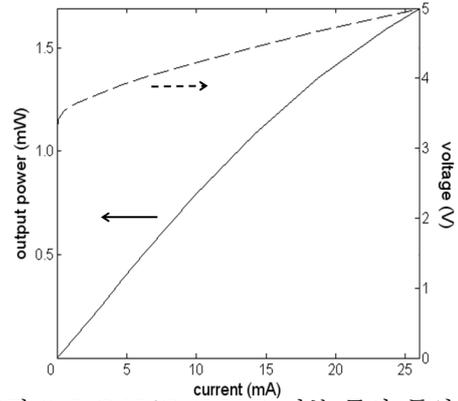
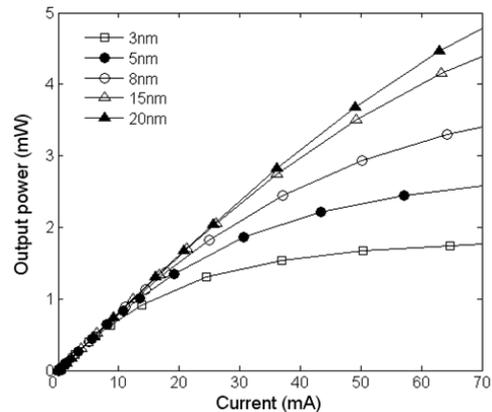
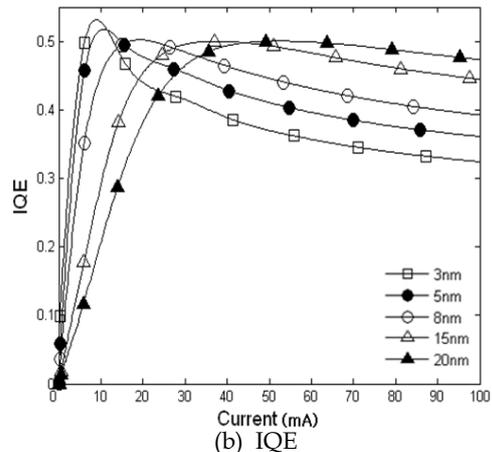


그림 2. InGaN/GaN LED 기본 동작 특성



(a) 출력 전력



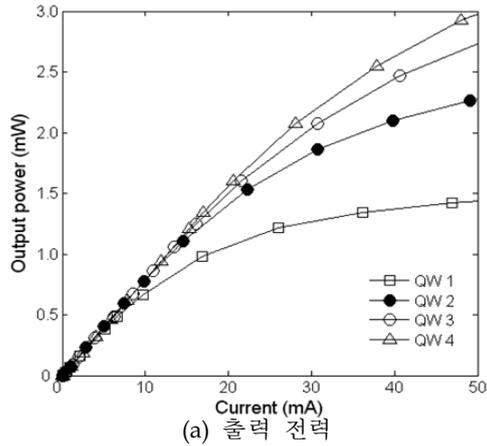
(b) IQE

그림 3. 양자 우물 두께에 따른 출력 특성

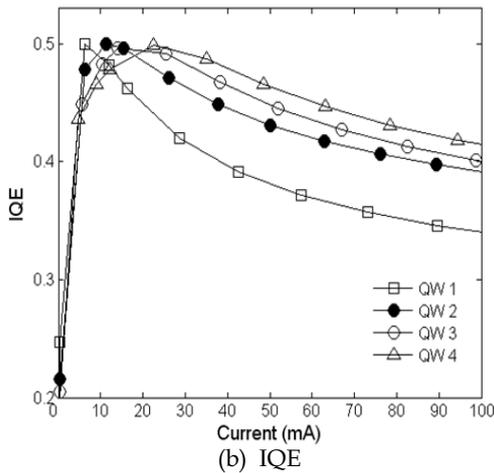
IQE 값이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

3nm, 5nm와 같이 두께가 얇은 양자 우물은 활성층으로 캐리어가 빠르게 주입되어 낮은 전류 범위에서는 방사 재결합률이 크게 증가하여 효율이 높지만, 전류가 증가함에 따라 두꺼운 양자 우물에 비해 활성층 안의 캐리어 밀도가 감소하고 활성층 이외의 영역으로 캐리어가 누설되어 재결합하는 비방사 재결합률이 증가하여 출력 특성이 크게 감소하게 된다. 양자 우물 두께가 증가하면

서 활성층 안의 캐리어 밀도가 증가하여 방사 재결합률의 증가로 출력 전력 IQE 값이 점차 커지다가 두께가 15nm 이상의 양자 우물은 높은 캐리어 밀도와 활성 영역 안 장벽의 기능 약화로 누설 전류가 생겨 증가폭이 다소 감소하는 것을 알 수 있다[3],[5]. 따라서 양자 우물 두께는 동작 전류 범위를 고려하여 5nm에서 15nm이하로 설계하는 것이 효율적이다



(a) 출력 전력



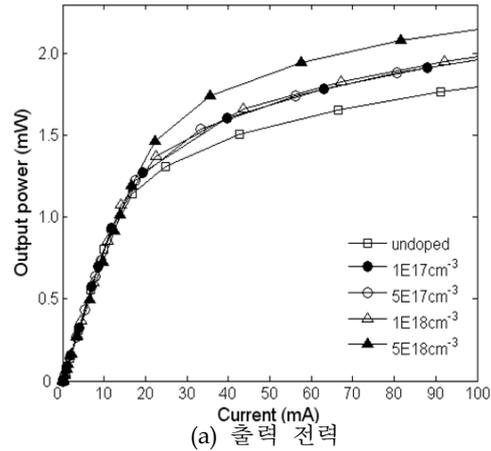
(b) IQE

그림 4. 우물 수에 따른 출력 특성

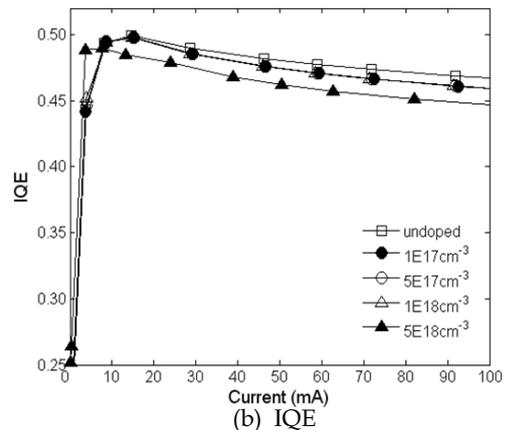
그림 4는 활성 영역 안의 우물 수의 변화에 따른 출력 특성을 나타내었다. 우물과 장벽의 두께는 각각 5nm와 10nm 이다.

우물의 수가 증가할수록 출력 전력과 IQE의 값은 증가하지만, 우물이 2개 이상일 경우 증가폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 단일 양자 우물 구조의 경우, 전류가 약 10mA일 때는 IQE 값이 가장 크지만 전류가 증가할수록 값이 크게 감소한다. p형 전극에서 주입되는 대부분의 정공은 큰 유효질량과 낮은 이동도로 인해 EBL 근처의 양자 우물에 다수 존재하게 된다[5],[6]. 낮은 전류에서는 정공이 EBL 근처의 양자 우물에서 대부분 재결합되기 때문에 단일 양자 우물 구조의 효율이 가장 크지만, 전류가 증가하면서 주입되는 캐

리어 수가 증가하게 되고 그만큼 단일 양자 우물 구조에서는 누설되는 캐리어의 양이 많아져 출력 특성이 감소하게 된다. 다수의 양자 우물 구조에선 2, 3번째 우물에 캐리어가 도달할 가능성이 훨씬 증가하여 출력 전력과 효율이 증가하지만 너무 많은 수의 우물은 캐리어가 각 우물에 균등하게 분배되지 못하여 광 방출 특성이 감소하여 증가폭이 크게 감소하게 된다. 따라서 양자 우물의 수는 2개에서 3개로 설계하여 양질의 출력 특성을 얻을 수 있다.



(a) 출력 전력



(b) IQE

그림 5. 장벽 도핑 농도에 따른 출력 특성

기본 LED 구조의 활성 영역 안에 구성된 3개의 장벽층 모두에 도핑을 하지 않았을 때와 도핑 농도를 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 에서 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 까지 변화시켜 p형 도핑 시켰을 때의 출력 특성을 그림 5에 나타내었다. 장벽에 도핑을 하였을 때 출력 전력은 더욱 증가하였으며, 도핑 농도가 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이상일 때 출력 전력이 크게 증가하였다. 하지만 IQE 값은 전류가 약 15mA 일 때, 도핑하지 않았을 때 보다 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑 하였을 때 약 2% 감소하여 장벽으로 인한 효율 증가는 약 10mA 이상부터는 보이지 않는 것을 알 수 있다.

정공은 상대적으로 전자보다 이동도가 낮지만 장벽에 p형 도핑을 하게 되면 도핑하지 않았을

때 보다 더욱 높은 밀도로 이동하게 되어 활성층 안으로의 정공의 주입률이 증가하게 되고 다중 양자 우물 영역 내의 캐리어 분배 효율을 높일 수 있다[6],[7]. 따라서 장벽에 도핑을 하였을 때 활성층에서의 캐리어 밀도가 높아져 광 방출률이 증가하여 출력 전력 값이 증가하게 된다

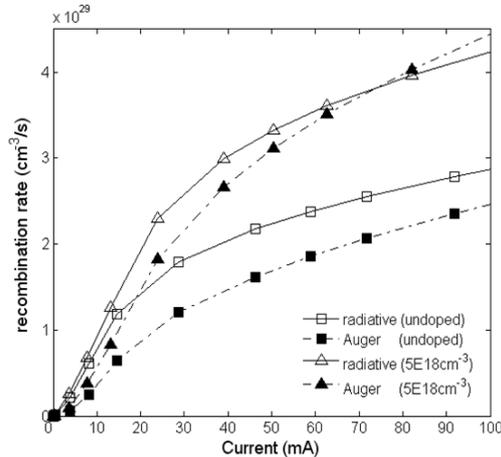


그림 6. 방사 재결합률과 Auger 재결합률의 변화

그림 6은 장벽에 도핑을 하지 않았을 때와 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 로 도핑 하였을 때의 방사 Auger 재결합률을 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 도핑 된 장벽은 기본 구조에 비해 방사 재결합률이 높지만 전류가 증가함에 따라 Auger 재결합률의 비율이 급격하게 증가하여 비방사 재결합률의 증가로 인해 IQE 값이 오히려 감소하는 것으로 나타난다. 또한 실제 공정상에서 p형 도핑을 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이상으로 하는 것은 도핑 물질인 Mg 확산 문제 등 기술적인 어려움으로 현재까지 연구 중에 있다[6]. 따라서 공정상의 문제가 없다면 장벽의 p형 도핑은 출력 전력과 IQE 값을 고려해 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 에서 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 사이의 도핑 농도로 광 방출 특성을 높일 수 있다

IV. 결 론

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

InGaN으로 이루어진 양자 우물은 두께가 증가할수록 출력 전력이 증가하며, 낮은 전류에서의 IQE 값은 두께가 얇을수록 크지만 전류가 증가함에 따라 두께가 커질수록 IQE 값이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 양자 우물 두께는 동작 전류 범위를 고려하여 5nm에서 15nm이하로 설계하는 것이 효율적이다 또한 양자 우물 수에 따른 출력 전력은 우물의 수가 증가할수록 값이 커지지만 2개 이상부터 증가폭이 감소하는 경향을 나타냈다

낮은 전류 범위에서 단일 양자 우물의 IQE 값이 가장 높지만 전류가 증가함에 따라 다중의 양자 우물 수를 가진 구조의 IQE 값이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 양자 우물의 수는 2개에서 3개로 설계하여 양질의 출력 특성을 얻을 수 있다. 활성 영역 안의 장벽에 모두 도핑을 하였을 때 출력 전력 값은 도핑하지 않았을 때 보다 증가하다 도핑 농도가 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이상일 때 출력 전력이 큰 폭으로 증가하게 된다. 10mA 이하의 전류 범위에서 도핑 된 장벽의 IQE 값은 더욱 크지만, 전류가 증가함에 따라 비방사 재결합률의 증가로 IQE 값의 효율 증가는 보이지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 장벽의 p형 도핑은 출력과 IQE 값을 고려해 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 에서 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 사이의 농도로 광 방출 특성을 높일 수 있다

참고문헌

- [1] Joachim Piprek, "Efficiency droop in nitride-based light-emitting diodes," Phys. Status Solidi A 207, no. 10, 2217-2225, 2010
- [2] Sergey Yu. Karpov, "Modeling of III-nitride Light-Emitting Diodes: Progress, Problems, and Perspectives," SPIE, vol. 7939, 2011
- [3] 이재현, 염기수, "GaN 기반 발광 다이오드(LED)의 특성 분석," 한국정보통신 종합학술대회논문집, 춘계 16권1호, 686-689, 2012
- [4] Integrated Systems Engineering, "ISE TCAD Release 9.5 Manuals Online,"
- [5] 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
- [6] Jih-Yuan Chang, Yen-Kuang Kuo, and Miao-Chan Tsai, "Correlation of barrier material and quantum-well number for InGaN/(In)GaN blue light-emitting diodes," phys. Status Solidi A 208, no. 3, 729-734, 2011
- [7] Yen-Kuang Kuo, Miao-Chan Tsai, Sheng-Horng Yen, "Effect of P-Type Last Barrier on Efficiency Droop of Blue InGaN Light-Emitting Diodes," IEEE quantum electronics, vol. 46, no. 8, 2010