

광결정과 마이크로 공진기를 이용한 발광다이오드의 설계

Design of Photonic Crystal Microcavity Light Emitting Diodes

조민수*, 문기원, 김정희, 한연호, 정은아, 이재호*, 장경근*, 강신히*, 정인재*, 한해욱
 포항공과대학교 전자전기공학과, *LG Display LED 개발팀
 mscho@lgdisplay.com

최근 발광다이오드(light emitting diode; LED)는 신호등, 실내외 조명, 자동차, 액정 디스플레이의 backlight unit 등으로 그 활용범위를 넓히고 있다. Cree, Nichia 등 유수의 제조사에서 발광효율이 100 lm/W 이상인 LED 제품을 출시하고 있으며, 이에 힘입어 LED의 활용범위는 갈수록 확대될 전망이다.

LED의 활성층에서 발생한 빛이 외부로 방출되는 비율을 광추출효율이라고 하는데, 특별한 구조가 없는 보통의 LED의 경우, 전반사 등의 이유로 LED 내부에서 발생한 빛 중 약 4 % 만이 외부로 방출된다. 이러한 낮은 광추출 효율을 개선하기 위해서 광결정(photonic crystal; PC)효과⁽¹⁾, 마이크로 공진기(microcavity; MC)효과⁽²⁾를 이용한 구조가 제안되었고, 두 가지 개념을 함께 적용한 광결정 마이크로공진기 LED(photonic crystal microcavity LED; PCMC-LED)에서는 이론상으로 기존 대비 9.5배의 광추출효율 향상을 얻을 수 있음이 보고된 바 있다⁽³⁾.

본 논문에서는 광결정효과와 마이크로 효과를 동시에 적용한 질화물계 PCMC-LED의 설계최적화에 대하여 논의하고자 한다. 시간영역 유한차분법(finite difference time domain; FDTD)를 이용하여 기존의 LED와 PCMC-LED의 광추출효율을 계산하였고, 막의 두께, PC의 주기 및 형태 등의 설계변수를 최적화함으로써, 72 %의 광추출효율을 갖는 PCMC-LED를 설계하였다.

LED의 광추출효율을 계산하기 위해 상용 프로그램인 Lumerical사의 FDTD를 사용하였다. 각 LED의 활성층을 하나의 쌍극자(dipole) 광원으로 가정하였고, 주기 경계조건(periodic boundary condition)과 흡수 경계조건(perfect matched layer boundary condition)을 이용하여 계산하였다. 쌍극자 광원의 중심파장은 450 nm이고 밴드 폭은 70 nm로 설정하였다. 질화갈륨(GaN)의 물질 손실은 300 cm^{-1} 로 설정하였고, MC-LED 및 PCMC-LED에서 p-metal로 450 nm에서 반사율이 높은 은(Ag)을 사용하였다. PC-LED, MC-LED 및 PCMC-LED의 구조와 주요 설계변수를 그림1에 보였다. PC-LED의 경우 최적화된 설계변수의 값은 $\Lambda=240 \text{ nm}$, $a=180 \text{ nm}$, $h=184 \text{ nm}$ 이며, 광추출효율은 18.5 %로 계산되었다. MC-LED의 경우 주요 설계변수는 d_1, d_2 인데, 그 최적화된 값은 각각 220 nm와 185 nm이며, 이때의 광추출 효율은 37 %로 나타났다. 각각의 구조에 대한 최적 설계를 변경 없이 그대로 조합하여 PCMC-LED 구조를 설계하고 계산한 결과, PCMC-LED의 광추출효율은 48 %로, 아무런 구조가 존재하지 않는 기존의 범용 LED 대비 9.6 배의 개선을 확인할 수 있었다.

마이크로 공진기와 광결정 구조의 상호 작용을 고려하여, 광결정의 depth(h), hole diameter(a)를 FDTD를 통해 최적화 하였다. 각 변수에 대한 계산 결과를 그림2에 보였다.

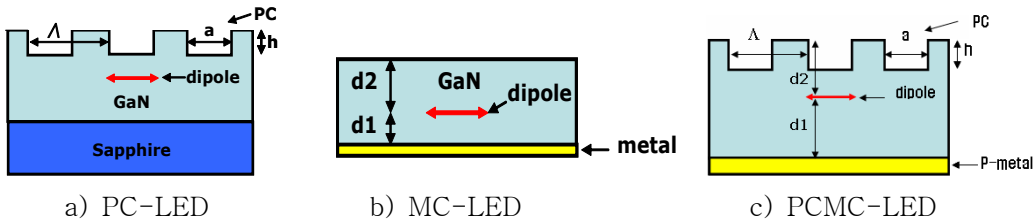
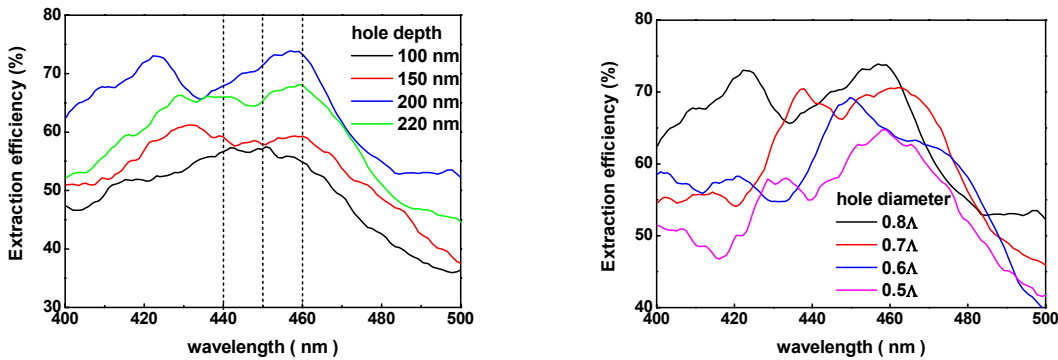


그림 1. 각 LED의 구조와 주요 설계 변수



a) hole depth의 변화에 따른 광추출효율 변화 b) hole diameter의 변화에 따른 광추출효율 변화
그림 2. LED 설계변수의 변화에 따른 광추출효율 스펙트럼의 변화

그림2에서 hole의 깊이가 200 nm일 때 추출효율이 최대가 됨을 확인할 수 있다. 또한, hole diameter는 광결정 주기의 0.5 배에서 0.8 배 까지 바꾸어 가면서 계산하였는데, 지름이 커짐에 따라 광추출효율이 향상됨을 알 수 있다. 이러한 추가적인 최적화 과정을 통해 PCMC-LED의 광추출효율은 72 %까지 증가했으며, 이 값은 최적화 전의 PCMC-LED에 비해 1.5 배 정도 향상된 결과이다.

본 논문에서는 광결정 효과와 마이크로 공진기 효과의 상호작용을 고려한 설계변수의 최적화를 통해 72 %의 광추출 효율을 갖는 GaN-based LED를 제작할 수 있음을 계산을 통해 확인하였다. 이러한 구조는 새로운 고효율의 LED 제작을 가능하게 하며, 나아가 다른 고체광원이나 유기 LED에도 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 POSTECH에 있는 DTRC(Display Technology Research Center)를 통하여 LG. Display에서 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

1. D. Kim, C. Cho, Y. Roh, H. Jeon and Y. Park, "Enhanced light extraction from GaN-based light-emitting diodes with holographically generated two-dimensional photonic crystal patterns", Appl. Phys. Lett., 88, 203508 (2006).
2. P. M. Pattison, A. David, R. Sharma, C. Weisbuch, S. DenBaars and S. Nakamura, "Gallium nitride based microcavity light emitting diodes with 2λ effective cavity thickness," Appl. Phys. Lett., 90, 031111 (2007).
3. 조민수, 문기원, 한연호, 정은아, 임미현, 한해욱, "광결정과 마이크로 공진기를 이용한 질화물계 발광다이오드의 높은 광추출효율 개선," 한국광학회 2007 하계학술발표회, Jul. 18-20, 2007.