

광결정 구조를 적용한 GaN 기반 green LED 발광효율 향상의 이론적 분석

Theoretical analysis of light extraction efficiency from GaN-based LED with photonic crystals

정미라, 정관수, 유재수
경희대학교 전자진과공학
jsyu@khu.ac.kr

과거 실리콘 반도체가 전자정보의 혁명을 이끌었다면 이제 III-V족을 이용한 질화물계 화합물 반도체가 빛의 혁명을 예고하고 있다. 긴 수명과 환경 친화적이며 에너지 절약효과로 각광받으며 차세대 전략 제품으로 자리매김하고 있으며, 최근 LED (light emitting diode)의 발광효율이 급속히 증가되고 white LED가 개발되면서 디스플레이 위주의 사용범위를 넘어 차기 조명시장의 주역으로 떠오르고 있다. LED 내에서 생성되는 빛의 효율은 95%이상이지만 내부 전반사에 의해 밖으로 빠져나가는 빛은 약 5%정도로 낮은 발광효율을 가지게 된다. 밝기 문제가 크게 개선된다면 응용분야가 산업 전반으로 확산되어 활용범위가 더욱 넓어지면서 본격적인 LED 시대가 펼쳐질 것으로 기대된다. 이에 현재 LED의 발광효율을 향상시키기 위한 다양한 방법들이 연구되어오고 있다¹⁻³⁾. 광결정 (photonic crystal) 구조에는 PBG (photonic bandgap)이라는 빛의 방출이 억제된 진동수 영역이 존재하는데, 이 영역을 이용하여 특정파장의 빛을 완전히 반사시켜 광효율을 증가시킬 수 있다. GaN 기반 green LED에 인공 격자인 광결정 구조를 LED 표면에 형성시켜 광추출 효율의 향상됨을 실험적으로 보고되었지만¹⁻²⁾, 이론적인 연구는 상세히 수행되지 않았다. 본 연구는 발광효율의 계산을 위해 3D FDTD (three dimensional finite difference time domain) 방법으로 시뮬레이션하여, 발광효율 향상을 위한 green InGaN/GaN LED의 최적화된 2차원 광결정 구조를 이론적으로 도출하였다.

그림 1(a)는 시뮬레이션에 사용된 LED구조로, InGaN/GaN green LED의 top layer 위에 주기적으로 원기둥 모양의 2차원 광결정 구조를 형성하였다. Air hole의 반경 (r)을 변화시키면서 광밴드갭 효과와 깊이 (d)를 변화시키면서 전반사를 이용하여 광모드를 가둘 수 있다. 그림 1(b)는 $r/a=0.31$ 를 갖는 2차원 광결정 구조의 TE (transverse electric) 모드에 대한 광밴드 다이어그램을 나타낸다. 최적화된 2차원 광결정 구조를 얻기 위해 conjugate gradient minimization을 이용한 plane-wave expansion 방법을 사용하였다. 진공에서의 빛의 파장에 대한 격자상수의 비 (a/λ)를 주파수로 나타내며 그 주파수가 0.51과 0.63사이에서 TE모드 PBG가 존재함을 알 수 있다. 주파수에 따른 PBG 위치에서 PBG가 존재하는 임의의 주파수 $a/\lambda=0.6$ 을 PBG_M , PBG 보다 위에 존재하는 임의의 주파수 $a/\lambda=0.75$ 를 PBG_H , PBG 보다 아래에 존재하는 임의의 주파수 $a/\lambda=0.2$ 를 PBG_L 로 정의하였다. 실제적으로 발광 소자위에 2차원 광결정 구조를 제작할 때는 광결정 구조의 air hole이 유한한 깊이를 가지므로 발광효율이 air hole의 깊이에도 의존하게 된다. 이에 a/λ 에 상대적인 PBG에서 ITO (indium tin oxide)의 존재여부에 따라 광결정 깊이에 따른 발광효율 또한 조사되어야 한다. 소자내부에 PBG의 주파수를 갖는 빛을 적용하여 3차원 FDTD 방법으로 시뮬레이션하면 ITO (~ 5 nm)를 사용한 광결정

구조에서 깊이가 65-125 nm인 구간의 발광효율이 가장 높음을 계산할 수 있다. 이러한 구간에서 발광효율이 일정한 것을 볼 수 있는데, 이는 소자를 제작할 때 허용오차 부분으로 사용되어 제작공정에 도움을 줄 수 있다. 광결정 구조를 형성한 LED소자 위에 ITO를 형성이 LED의 발광효율에 주는 변화를 자세히 알기위해 좀 더 다양한 형태로 ITO를 LED 위에 형성하여 발광효율을 계산한 것을 그림 2에 나타내었다. ITO는 투명전극으로 면저항을 줄여 전류가 집중되는 현상을 막아주기 때문에 전류확산을 쉽게 하므로 발광효율증가에 도움을 준다. 이러한 이유로 광결정 구조를 갖는 LED의 모든 표면에 ITO가 얇게 형성된 구조가 가장 높은 발광효율을 나타낸다.

그림 3은 a/λ 에 대한 상대적인 PBG 위치에서의 파장에 따른 발광효율을 나타내고 있다. 그림 1(b)에서 정의한 PBG_H , PBG_M , PBG_L 영역에 해당하는 주파수들이 LED 소자에 적용될 때 파장에 따라 외부로 나오는 빛의 세기는 525 nm 부근에서 가장 높은 발광효율을 나타내었다. 이는 PBG 내에서는 빛이 측면으로 이동하는 것 보다 수직적으로 빠져나가려는 현상이 크게 나타나기 때문이다. 또한 PBG_H , PBG_L 영역에서의 발광효율이 광결정을 갖지 않은 소자보다는 다소 높게 나타났는데 이는 밴드갭 효과에 의한 것 보다는 광결정 구조가 단지 표면을 거칠게 하는 효과를 주어 임계각을 변화시켜 더 많은 빛이 나올 수 있도록 발광효율을 높여 주었기 때문이다. 결과적으로 $r/a=0.31$, $d\sim 105$ nm로 최적화된 2차원 광결정 구조에 PBG에 해당하는 $a/\lambda=0.6$ 의 주파수를 LED 소자에 적용하면 기존의 LED보다 약 29% 정도 효율이 증가된 소자를 얻을 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 원천기술개발사업 [2008-F-045-02, 실감 휴대단말용 프로제션 입·출력 플랫폼 개발]의 일환으로 수행하였음.

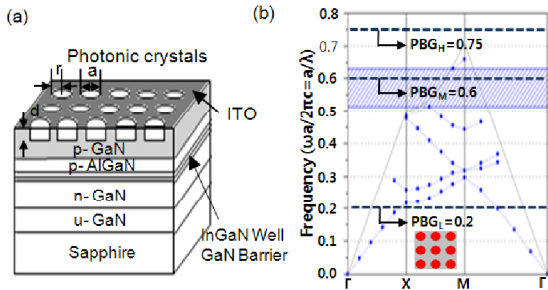


그림 1. (a) 광결정 구조를 가진 green InGaN/GaN LED구조도. (b) $r/a=0.31$ 을 갖는 square lattice 광결정 구조에 대한 TE모드의 광밴드 다이어그램.

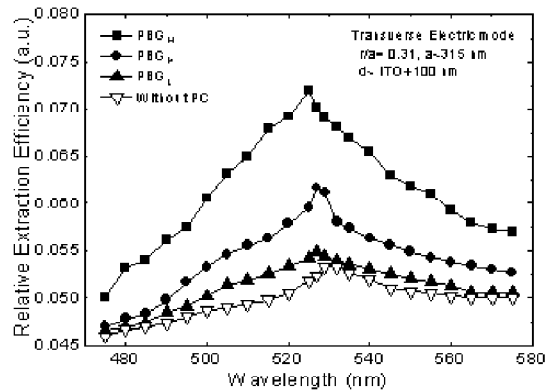


그림 3. a/λ 에 대한 상대적인 PBG 위치에서 파장에 따른 광추출 효율.

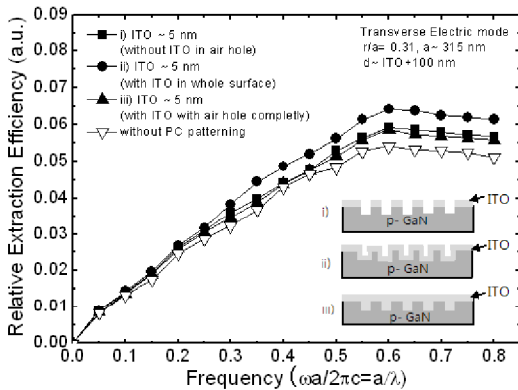


그림 2. 다양한 형태의 ITO 패턴에 대한 주파수에 따른 광추출 효율.

참고 문헌

1. J. Y. Kim, M. K. Kwon et al., Appl. Phys. Lett. **91**, 181109 (2007).
2. D. H. Kim et al., Appl. Phys. Lett. **87**, 203508 (2005).
3. C. Chao et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 091116 (2006).