

# 고효율 광결정 발광다이오드의 설계

## Design of High-Efficiency Photonic Crystal Light-Emitting Diodes

김선경  
 LG 이노텍 LED 사업부 선행기술 Lab.  
 skkimb@lginnotek.com

반도체 LED의 발광효율은 내부발광효율과 추출효율로 나눌 수 있다. 내부발광효율은 LED 물질특성에 의해 결정되는 양으로, 반도체 내의 결함 여부라든지 효율적인 전류 주입 등과 연관되어 있다. 반면에, 추출효율은 반도체 내에서 생성된 빛이 실제로 관찰하고자 하는 외부 매질로 빠져 나오는 효율을 일컫는 것으로, 어떠한 구조적 변화가 도입되지 않는 경우 반도체와 외부 매질 사이의 굴절률 차이로 결정된다. 즉, 반도체 LED의 총 효율은 내부발광효율과 추출효율의 곱으로 나타날 수 있으며, 고효율 반도체 LED의 실현을 위해 상기의 효율들을 동시에 개선해야 한다.

이 중, 반도체 LED의 추출효율은 최종적으로 빛을 관측하는 매질인 공기(혹은, 에폭시)와 반도체 간의 높은 굴절률 대비로 인한 전반사 과정에 의해 제한된 값을 나타낸다. 즉, 전반사에 의해 LED 내부에 갇혀 있는 빛은 하단 거울 또는 특정 반도체 층(예를 들면, 양자우물) 층을 겪을 때마다 발생하는 흡수 손실에 의해서 열로 변환되어 소실된다. 따라서, 추출효율 향상이라는 명제는 임계각을 벗어난 빛을 흡수 과정에 의해 사라지기 전에 (가능한, 빛의 짧은 이동 경로 내에) 외부로 추출할 때 달성 가능하다.

기하학적 원리를 통해 추출효율을 개선할 수 있는 가장 쉬운 생각은 굴절률이 높은 반구(hemisphere)를 LED 소자 상층부에 도입하는 것이다. 입사각의 정의가 빛과 입사면 사이의 각 이라는 점을 상기하면, 반구의 모든 면에서는 빛의 입사각도가 항상 수직이다. (이 때, 반구의 크기는 LED 소자보다 매우 크다고 가정한다.) 실제로, 반도체 LED는 주로 에폭시로 이루어진 반구를 씌우게 되는데, 이는 표면 보호의 역할 뿐만 아니라 추출효율 향상에도 일익을 담당하게 된다. 이 때, 에폭시 층과 반도체 층 사이에 반도체 층과 비슷한 굴절률의 반구를 추가 도입하면 [그림 1(a)], 추가 도입된 반구의 굴절률이 반도체의 값에 접근할수록 추출효율은 점차 증가하는 경향을 나타낸다 [그림 1(b)].

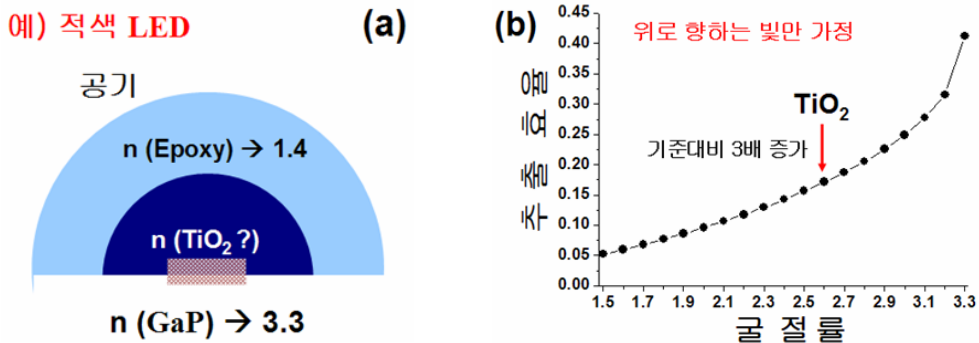


그림 1 (a) 적색 LED 칩 상부에 이중 반구 도입 구조. (b) 추가 반구의 굴절률과 추출효율 상관 관계

높은 굴절률의 반구 도입은 이상적인 굴절률을 가진 물질을 찾을 수 있다면, 원리적으로 반도체에서

생성된 빛 전부를 외부로 이끌어낼 수 있다. 하지만, 높은 굴절률을 가지며, 동시에 흡수가 없는 투명한 물질이 준비되어야 한다. 또한, LED 소자를 덮을 수 있는 만큼의 크기를 가진 반구를 제작하고, 씌우는 일 또한 난제가 될 수 있다. 다른 대표적인 기하학적 방법으로 LED 소자 측면에 특정 각도의 기울기를 도입하는 것을 들 수 있다.<sup>(1)</sup> 이는 측면 방향으로 진행되는 LED의 전파 모드(guided mode)를 측면 반사 과정을 통해 상층부로 추출하는 원리이지만, 가능한 짧은 진행 거리 내 빛의 추출이라는 명제에 비추었을 때, 특히, 흡수가 존재하는 실제 상황에서 취할 수 있는 추출 증대 효과는 크지 않다.

따라서, LED의 추출효율 증대를 위해서는 빛의 이동 경로가 최소가 되면서 빛을 추출할 수 있는 구조적 장치가 필요하며, 대표적인 것이 2차원 광결정 (Photonic Crystal)의 도입이다. 초창기 광결정 LED 연구는 굴절률 대비가 큰 박막 구조에서 주로 시행되었다.<sup>(2)</sup> 이 연구에서는 광결정이 LED의 추출 효율 향상에 기여하는 원리를 두 가지로 나누었는데, 하나는 광 밴드갭 (Photonic Bandgap) 효과를 통해 측면 진행의 빛을 차단하여 수직 방향의 추출을 이끄는 것이고, 다른 하나는 광결정 고유의 분산 특성을 통해 높은 밀도의 '새는 모드 (leaky mode)'와의 결합을 통해 박막 외부로 빛을 추출하는 것이다. 하지만, 상기 특성은 광결정의 굴절률 대비가 크고 ( $\Delta n > 2$ ), 소자의 두께가 파장과 견줄 만큼 얇으며, 광결정이 박막 전체를 관통해야 하므로, 실제 LED 소자에는 적용 가능한 원리가 아니다.

현재 활발하게 개발 중인 GaN LED 소자를 예로 들 때, GaN LED 표면 상층부에 적용되는 광결정은 2차원 회절 격자의 역할을 수행하는 것으로 이해할 수 있다. 즉, 굴절률이 다른 두 매질을 빛이 투과하기 위해서는 평면 방향에 대해 위상정합 조건(phase-matching condition)을 만족해야 한다. 하지만, 빛이 굴절률이 높은 매질에서 낮은 매질로 진행할 때는, 특정 각도 이상에서 위상정합 조건을 만족할 수 없으며, 이것이 곧 전반사 과정이다. 이 때, 광결정은 전반사 각도에 해당하는 빛을 외부로 추출할 수 있도록 돕는다 [그림 2(a, b)]. 이는 광결정의 운동량이 전반사에 해당하는 빛에 더해져, 위상정합 조건이 만족되기 때문이다. 이를 종합하면, 광결정 LED의 설계는 전반사 과정에 형성되는 LED 내부의 전파 모드를 '새는 모드'로 효과적으로 변환 되는 조건을 찾는 것이다. 광결정의 구조적 조건에 따라 변환 효율은 달라지며, 대표적으로 광결정 패턴의 주기, 깊이, 공극률(Filling Factor) 등이 추출효율에 직접적인 영향을 미친다.<sup>(3, 4)</sup> 또한, LED 물질의 굴절률, 두께 등에 의해 최적 광결정 조건은 다르게 형성된다. 이번 발표에서는 반도체 LED의 추출효율 향상을 위한 최적 광결정 설계 과정 및 근간 원리에 대해 논하고자 한다.

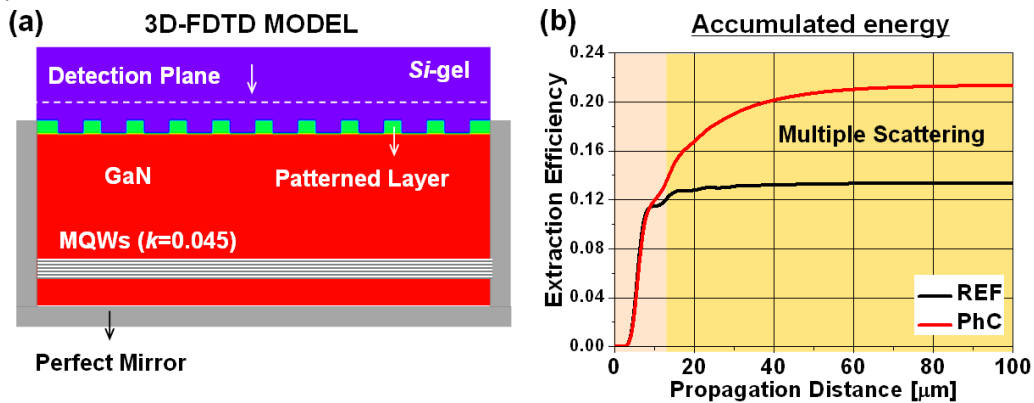


그림 2 (a) 3D-FDTD 계산 내 GaN LED 구조 (b) 광결정 도입 전/후 추출효율의 증가 비교

1. M. R. Krames, et. al., Appl. Phys. Lett. 2365, 75 (1999)
2. S. Fan, et. al., Phys. Rev. Lett. 78, 3294 (1997)
3. S. K. Kim, et. al., J. Korean Phys. Soc. 52, 1026 (2008)
4. S. K. Kim, et. al., Appl. Phys. Lett. 92, 241118 (2008)