

질화갈륨 기반 다각형 발광다이오드의 광추출 효율 향상

김 자연*, 조유현**, 박현신**, 김두형**, 김민우**, 박종락**, 권민기**†

*마이크로광원연구센터, 한국광기술원

**광기술공학과, 조선대학교

Improvement of Light Extraction Efficiency of GaN Based Polygonal Shaped Light Emitting Diode

Ja-Yeon Kim*, Yu-Hyun Cho**, Hyun-Sun Park**, Doo-Hyung Kim**,
Min-Woo Kim**, Jong-Rak Park**, and Min-Ki Kwon**, †

*Micro Light Source Research Center, Korea Photonics Technology Institute(KOPTI), Gwangju, 500-779, Korea (South)

**Department of Photonic Engineering, Chosun University, Gwangju, 501-759, Korea (South)

(Received : May. 20, 2016 Revised : Jun. 18, 2016, Accepted : Jun. 21, 2016)

Abstract : GaN based LEDs have gradually replaced traditional light sources in various applications including backlight display units, traffic signals, automotive lighting, architectural lighting, and general lighting. However, improvements to the external quantum efficiency (EQE) are required for these various application. The EQE of LED is correlated to the internal quantum efficiency (IQE) and the light extraction efficiency (LEE). Although the IQE of GaN-based LEDs has reached more than 80% due to the rapid development of growth techniques for high-quality epi-layers, the LEE of the LEDs is still low because of the large refractive index difference between the GaN ($n_{\text{GaN}}=2.5$) and air ($n_{\text{air}}=1$). Herein, various polygon shaped(triangle, parallelogram, pentagon, hexagon, circle shaped) LEDs are compared with those of a traditional quadrangular LED to enhance LEE of LED. To estimate the enhancement of LEE, we simulated the various shaped LEDs with ray-trace simulation tools. In addition, to measure the total amount of photons emitted from LEDs in all directions, the various polygon LEDs were encapsulated and packaged with To-can. Their optical output power of polygonal shaped LED is significantly improved, compared to that of traditional quadrangular LED due to increase in LEE along to lateral direction.

Keyword : GaN, LED, light extraction efficiency, chip shaping, Gallium nitride

1. 서론

반도체 고체 조명으로 환경 친화적이고, 기존의 일반 조명 기구에 비하여 에너지절약 효과가 우수하고, 장시간 사용이 가능한 반영구적인 긴 수명, 빠른 응답 속도 등의 장점을 가진 고휘도 백색 LED는 에너지 위기와 환경오염을 극복할 수 있는 국가적 대안으로 떠

오르고 있다. 현재 LED는 생활 전반에 사용되기 시작하여 휴대폰의 액정 표시 소자, 옥외형 대형 디스플레이 전광판, 교통 신호등, 자동차 부품, TV back light unit를 중심으로 한 가전제품 등 모든 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다. [1,2] 일반적으로 고효율, 고연색 백색 LED의 제조의 수요가 큰 청색 및 근자외선 LED 응용과 관련한 InGaN/GaN 구조가 연구와 개발의 중심에 있어 왔다. 많은 기술 발전에도 불구하고 LED가 조명 시장의 가장 큰 시장인 실내 및 실외 일반 조명을 대체하기 위해서는 발광 효율 대비 높은 가격 및 신뢰성 등의 문제점이 있다. 보통 LED의 효율은 내부 양자효율과 광추출 효율의 곱으로 나타 낼 수 있고 최근 성장 기술의 발달로 인해 내부 양자효율은 크게 증가되었다. 하지만 광추출 효율은 여전히 낮은 실정이다.

†Corresponding Author

성명 : 권민기

소속 : 조선대학교 광기술공학과

주소 : 광주광역시 동구 필문대로 309 (서석동)

전화 : 062-230-7549

E-mail : mkkwon@chosun.ac.kr

실제 LED 칩으로부터 빛이 발광할 때, LED 반도체 소재(GaN)와 공기(Air)의 굴절률 차이로 인하여 활성층 내부에서 발광된 빛이 임계각인 23.5° 이상이 되면 공기와의 경계 면에서 LED 내부로 전반사(TIR) 되어 빛이 갇히게 됨으로 외부로 발광이 되지 않는다. 광추출 기술은 이렇게 LED 내부에 갇히는 빛을 외부로 탈출하게 하여 방출되는 빛의 양을 향상시키기 위한 기술이다. 광추출 효율을 계산해 보면 대략적으로 표면으로 방출되는 양이 약 8%, 기판에서 손실이 약 20%, 칩 내부에서 갇히는 양이 약 72% 정도로 추정된다. 따라서 내부에 갇히는 빛을 효율적으로 LED 밖으로 방출시킬 수 있는 기술 개발이 절실하다.

광추출 효율을 향상시키기 위해 기판의 패터닝 [3,4], 칩 성형 [5-8], 광결정 [9, 10], 표면 거칠기 [11, 12] 등이 시도되고 있다. 비록 칩 성형이 광추출 효율 향상에 다중 반사 시 빛의 입사각을 변화시킴으로써 탈출 확률을 높일 수 있다고 알려져 있지만 최적 모양, 구조, 기존 기판 패터닝, 표면 거칠기와 혼합된 효과 등에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최적 칩 성형 조건을 확보하기 위해 기존의 사각형 발광다이오드와 같은 발광면적을 가진 삼각형, 평행사변형, 오각형, 육각형의 모양으로 칩을 Ray tracing 기반의 LightTools 광학설계법을 이용하여 각 모양에 따른 광추출 효율을 예측하고 비교하였다. 또한 기판의 패터닝, 표면 거칠기와 칩 성형을 동시에 하였을 때 광추출 효율의 변화를 예측하였다. 각 모양의 칩을 제작한 후 스크라이빙 하여 칩을 분리한 후 광출력 및 전기적인 특성을 분석할 수 있도록 평평한 To-can 위에 패키징 하였다. 그 특성을 적분구 및 고니오미터 측정을 통해 LED 칩들의 총 광량 및 지향각에 따른 광추출 효율을 비교하여 그 원인과 메커니즘에 대한 연구를 진행하였다.

2. 이론적 배경

LED에서 성능을 평가하는 요소 중의 하나가 외부양자효율이다. 즉, LED에 공급된 전기적 전력이 얼마만큼의 광 에너지로 발산하는 가를 나타내는 것을 의미한다. 식(1)은 LED의 외부양자효율을 나타내고 있으며 내부 양자 효율과 빛 추출 효율의 곱으로 표현되며 주입된 전자의 개수 대비 출력된 광자의 개수를 나타낸다.

$$\text{Efficiency of LED} = \eta_{\text{injection}} \times \eta_{\text{internal}} \times \eta_{\text{extraction}} \quad (1)$$

LED 내부의 다중양자우물에서 발생한 빛이 외부로 방출될 때, 질화갈륨(굴절률=2.5)과 공기(굴절률=1)와의 굴절률(refractive index) 차이로 인해 빛이 방출 될 수 있는 임계각이 감소하여 내부 전반사에 의한 빛이 공기 중으로 방출되지 않고 LED 내부에 갇히게 되는 문제점이 발생한다. 이러한 현상은 LED의 광추출효율이 낮아지는 문제를 야기시키고 결국 LED의 광효율을 감소시키는 결정적인 원인을 제공한다. LED 내부에서 발

생된 빛의 임계각은 약 23° 에 지나지 않으므로 발생된 빛의 극히 일부만 LED 밖으로 방출된다.

내부 전반사의 임계각은 탈출 콘(escape cone)에 의해 정의 될 수 있다. 탈출 콘 내부의 빛은 공기 중으로 탈출할 수 있으나, 탈출 콘 외부로 진행되는 빛은 내부 전반사를 겪으며 LED 내부에 갇혀 결함 등에 의해 재흡수를 통해 비발광 재결합을 하며 소멸 된다.

식(2)를 이용하여 광추출 효율의 계산된 결과 LED 내부에서 공기 중으로 빛이 진행되는 경우는 4.18% 이고, LED 내부에서 기판으로 사용되는 sapphire(굴절률=1.9)로 빛이 진행되는 경우는 17.5%가 된다. 이렇게 볼 때 다중양자우물구조에서 많은 빛이 생성되더라도 결국 내부에 갇히게 됨으로 광추출 효율이 현저하게 낮아지는 문제점이 발생하게 된다.

$$(LEE) = \frac{P_{\text{escape}}}{P_{\text{source}}} = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_c) \approx \frac{1}{4} \frac{n_0^2}{n_s^2} \quad (2)$$

여기 P_{escape} 는 공기 중으로 방출된 광출력을 말하며 P_{source} 는 다중양자우물 구조에서 생성된 빛의 광출력을 말한다. n_0 와 n_s 는 각각 공기와 LED의 굴절률을 말한다. 매질의 굴절률이 클수록 광추출 효율은 감소한다.

Figure 1을 보면 기존 사각칩의 경우 첫 번째 면에서 전반사된 빛이 다시 2 번째 면에서 $90 - \theta$ (첫 번째 면의 입사각)의 값을 가지며 전반사가 일어나고 다시 3 번째 면에서는 첫 번째 면과 같은 입사각을 가지게 됨으로 지속적으로 내부에서 전반사 현상이 반복되는 것을 알 수 있다. 하지만 칩의 모양이 삼각형, 육각형 등으로 변하게 되면 지속적인 반사가 일어날 때 각 면에서 입사각이 변하게 되어 결국 입사각이 임계각 보다 작아지게 됨으로 탈출하게 된다. 따라서 칩의 성형은 광추출 효율 향상에 크게 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

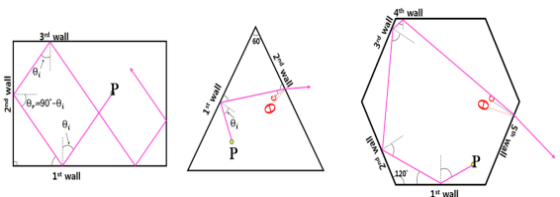


Figure 1. Ray tracing of light in rectangular, triangular, hexagonal shape LED chip

Figure 1을 보면 사각형 칩 보다 각이 증가하게 되는 육각형의 경우 빛이 맞는 면이 증가하고 지속적으로 입사각이 변하게 되어 광추출 효율이 증가하게 된다. 또한 삼각형의 경우 모서리의 수는 감소되지만 각도가 90° 이하이기 때문에 또한 입사각이 변하게 되어 광추출 효율이 증가하게 된다.

3. 시뮬레이션 및 결과 논의

3.1 시뮬레이션 조건

광학설계는 몬테카를로(Monte carlo) 기법을 사용한 Ray tracing에 기반을 둔 Light tools 프로그램을 이용하여 진행하였다. Light tools 프로그램은 광학 시스템을 통합 광 경로를 탐색 시에 면 특성과 광학적 수치를 필요로 하며, 이러한 광학적 정밀도는 실제 시스템과 유사한 모델을 설계하는데 도움을 준다.

정확한 광학설계를 위해서는 Ray tracing 시뮬레이션에 사용된 구조 및 입력 변수가 중요하다. Figure 2는 본 연구에서 이용한 각 층의 굴절률 및 두께에 대한 정보를 보여준다.

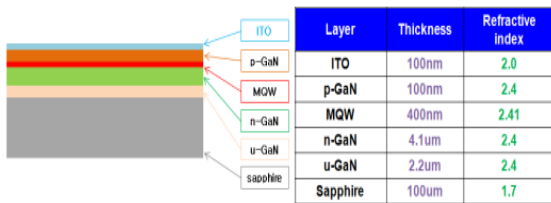


Figure 2. Schematic of LED chip and parameter for ray tracing simulation

칩 면적은 $500,000 \mu\text{m}^2$ 으로 하였고 MQW 내에 volume source (1W)를 설정하였고 Far-field receiver를 이용하여 LED 외부로 추출되는 총 광량을 측정하였다. Table 2는 각 chip의 구조 및 모양에 따른 광추출 효율 변화를 정리해 놓은 결과이다. 사각형의 칩 대비 다각형 칩의 efficiency가 약 20% 정도 향상되는 것을 관찰 할 수 있었다.

Table 2. Extraction efficiency of LED chip depending on chip die shaping

chip 모양	다중양자우물구조의 출력	외부로 추출된 광출력 (Far-field에 의해 수집된 광량)	효율
삼각형 (Tri.)	1W	0.289W	28.9%
사각형 (Rec.)	1W	0.239W	23.9%
오각형 (Pen.)	1W	0.285W	28.5%
육각형 (Hex.)	1W	0.288W	28.8%
원형 (Cir.)	1W	0.308W	30.8%

Figure 3는 시뮬레이션을 통해 얻은 배광 분포이며, 다각형의 칩이 모두 측면 및 표면 모두에서 사각형의 칩보다 더 많은 광을 방출하는 결과를 얻을 수 있었다. 특히 원형 칩의 경우 측면으로 진행하는 모든 광선이 입계각 안에 들기 때문에 측면 광방출이 크게 증가되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞서 이론에서 예측했던 바와 같이 모서리의 각도가 90° 에서 크거나

작아짐으로 계면에 입사되는 각도가 변화하게 되어 다른 면에서 반사 횟수가 증가될수록 입계각 안에 들게 될 확률이 크게 증가되기 때문으로 판단된다. 이러한 이론적 배경과 시뮬레이션 결과를 토대로 기존의 사각형 칩에 비해 다각형 칩이 더 높은 광 추출 효율을 나타낼 것으로 기대된다. 시뮬레이션 결과 가장 높은 효율 증가를 구성하는 원형의 경우 불행히도 다이아몬드 또는 레이저 스크라이빙을 통해 제작하기 불가능하기 때문에 원형 보다는 스크라이빙이 가능한 삼각형, 육각형 구조의 다각형이 칩 성형에 적합하다.

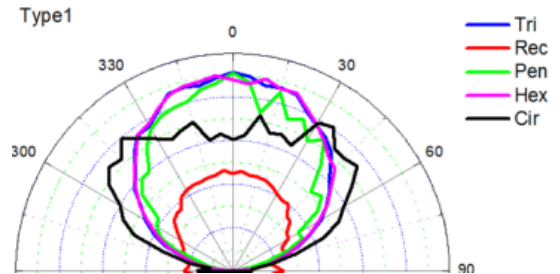


Figure 3. Light distribution pattern of various shaped LED chip

Table 3은 사각형 칩과 삼각형 칩을 이용하여 칩 성형에 따른 광추출 효율의 변화이며 표면 거칠기와 PSS (Patterned Sapphire Substrate) 기관의 거칠기가 동시에 존재했을 때 광추출 효율의 증가분이 줄어드는지를 판단하기 위한 결과이다. 비록 삼각형과 육각형 구조는 모두 스크라이빙을 통해 가능하지만 다이몬드 스크라이빙시 육각형 구조는 약 33%의 영역 손실이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 삼각형과 사각형구조를 중점적으로 광추출 특성을 비교하고자 한다. 표면 거칠기는 ITO 층을 가공하여 제작하였다. 일반적으로 나노 스피어리소그라피 방법을 이용하여 폴리스티렌 패턴을 활용하여 BOE 식각공정을 통해 얻어질 수 있는 직경 400nm 과 높이 100nm 으로 하였고 패턴간의 간격은 가로, 세로 $1 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. [13] PSS 구조는 일반적으로 포토리소그라피를 이용하여 패턴 형성 후 BCl_3/Cl_2 의 건식식각을 통해 제작된다. [14] 본 연구에서는 일반적으로 LED 에피 성장에 사용되는 PSS 모양을 반구 모양으로 설정하였고 지름 $2 \mu\text{m}$ 와 높이 $1 \mu\text{m}$, 패턴간의 간격을 $3 \mu\text{m}$ 로 설계 하였다. 예상했던 대로 PSS와 표면 거칠기를 통해 광추출 효율이 크게 증가됨을 확인하였다. 하지만 여전히 칩의 성형을 통해 추가적으로 약 5%의 광추출 효과를 기대할 수 있었다. 이러한 현상은 칩 성형에 의해 측면으로 진행되는 빛을 효율적으로 방출할 수 있기 때문으로 판단된다.

Table 3. Light extraction efficiency of rectangular and triangular shaped LED chip with surface roughness and PSS structure

Lateral	Surface roughness	PSS	System efficiency(%)
Quadrangle	X	X	23.9
	O	X	27.5
	X	O	49.7
	O	O	50.0
Triangle	X	X	28.9
	O	X	32.8
	X	O	54.7
	O	O	55.0

4. 실험 방법

사각형, 삼각형, 그리고 육각형 모양의 칩의 면적은 모두 $500 \times 1000 \mu\text{m}^2$ 으로 동일하게 설계하였다. 앞서 언급한 것과 같이 다이아몬드, 레이저 스크라이빙 또는 스텔스 방식의 스크라이빙을 고려하여 가능성이 있는 칩 분리가 가능한 구조는 삼각형, 육각형 모양이 된다. 본 연구에서는 3가지 구조의 칩을 구현하여 삼각형, 육각형 구조가 기존 사각형 구조에 비해 광추출 효율이 어떻게 변화되는지를 분석하고자 한다. 칩 성형에 따른 광추출 효율의 변화를 판단하기 위해 칩 성형에 따른 전기적 특성 변화를 최소화 할 수 있도록 하였으며 같은 전극 소재를 사용하였고 전극 모양에 따른 current spreading 차이가 거의 없도록 p형 전극과 n형 전극의 크기 및 거리를 동일하게 설계하였다.

사각형, 삼각형, 육각형 LED는 금속유기화학기상증착법 (MOCVD)을 이용하여 사파이어 기판 위에 550°C 에서 25nm 저온 버퍼 성장 후 약 1050°C 에서 $2.5 \mu\text{m}$ 두께의 n형 GaN 층을 성장하였다. 다음 청색 파장을 얻기 위해 750°C 에서 장벽층 10nm, 우물층 2nm의 구조로 약 5회 반복하여 성장하였고 950°C 에서 $0.15 \mu\text{m}$ 두께의 p형 GaN 층을 성장하였다. 성장후 p형 GaN 층을 활성화 시키기 위하여 급속 열처리 (Rapid thermal annealing) 장비를 이용하여 750°C 에서 5분간 열처리 하였다. 우선 n형 전극 증착을 위해 포토리소그라피 후 ICP (Inductive Coupled Plasma) dry etching 매사에칭을 진행하였다. p-GaN 층의 오믹과 current spreading을 위하여 ITO (Indium Tin Oxide)를 고온 e-beam으로 90nm 전면 증착하였다. ITO가 증착된 샘플을 HCl 용액을 이용하여 선택적으로 wet etching하였다. ITO 투과도 향상과 전기적 특성 향상을 위하여 질소 분위기에서 550°C , 1분간 열처리하였다. 마지막으로 n형 및 p형 전극은 Cr (500\AA) / Au (5000\AA)를 증착하였다. 이후 $100 \mu\text{m}$ 까지 back side sapphire polishing을 진행하였고 다이몬드 스크라이빙을 이용하여 칩을 분리하였다.

5. 실험 결과 및 토의

Figure 4는 제작된 칩의 전류-전압 곡선이다. 사각형, 삼각형 그리고 육각형 칩 모두 거의 비슷한 전류-전압 특성을 나타내었다. 동작 전류인 120mA에서 순방향 전압은 사각형 칩이 3.21 V, 삼각형 칩이 3.19 V, 육각형 칩이 3.17 V로 측정되었다. 전체적으로 직렬 저항 등에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 전류-전압 곡선의 평가 결과 칩의 모양이 변함에 따라 전기적 특성에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다.

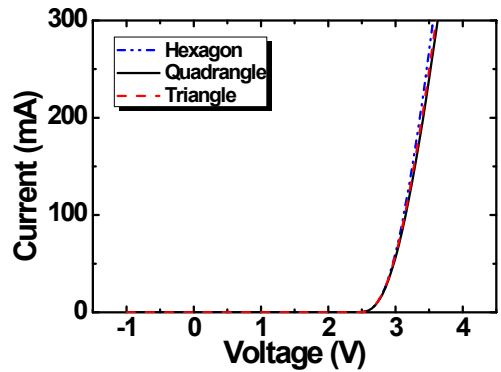


Figure 4. Characteristic of current-voltage of rectangular, triangular and hexagonal shaped LED chip

Figure 5는 제작된 칩의 전류에 따른 광출력 변화를 보여준다. 사각형 칩을 기준으로 광출력의 증가율을 계산하였을 때 삼각형 칩이 11.24%, 육각형 칩이 12.87%로 약 10% 이상 광출력이 향상되는 것을 확인하였다. 이러한 광효율의 증가는 칩 성형이 광추출 효율의 향상에 크게 도움이 되는 것을 알 수 있는 결과이다.

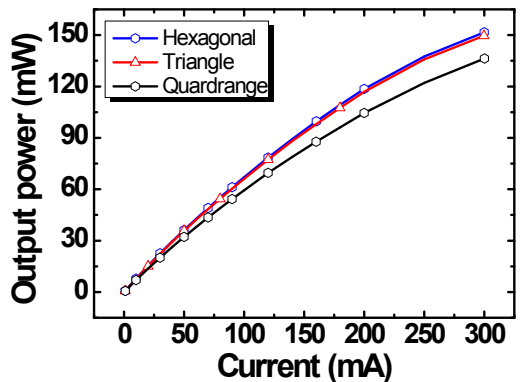


Figure 5. Optical output power of rectangular, triangular and hexagonal shaped LED chip

Figure 6는 사각형, 삼각형 칩, 육각형 칩의 배광분포 측정 결과이다. 사각형 칩에 비해 삼각형과 육각형 칩이 표면 및 측면 쪽에서 높은 발광 강도를 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 광학 설계를 통해 예측했던 것과 같이 다각형 칩 성형 시 다중 반사 시 입사각의 변화에 따른 입계각에 들 수 있는 확률을 높임으로 표면 및 측면으로 광자의 탈출이 크게 증가되는 것으로 판단된다. Figure 3의 시뮬레이션 결과와 약간의 배광 분포 차이는 전류 주입을 위해 시편 제작 시 전극 층에 의한 광흡수 및 식각 공정에 의한 n형 전극층의 칩 구조 변형 때문으로 판단된다.

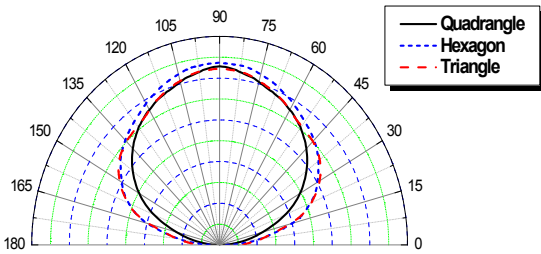


Figure 6. Light distribution pattern of rectangular, triangular and hexagonal shaped LED chip

4. 결론

본 논문에서는 GaN 기반의 LED 칩의 광 추출 효율 향상을 위한 다각형 LED 칩의 설계와 제작을 진행하였다. 광학 설계를 기반으로 기존 사각형 LED에 비해 다각형 LED들이 다중 반사 시 입사각의 변화에 따라 결국 입계각 안에 들게 됨으로 광자의 탈출 확률이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 스크라이빙을 고려하여 실제로 적용 가능한 삼각형, 육각형 LED를 제작하였고 사각형 LED와 비교하였다. 칩 성형 기술을 접목시켜 효과적으로 전기적 특성 저하 없이 LED 칩의 광 추출효율이 10% 이상 크게 향상되었음을 확인하였다. 또한 이러한 광출력의 증가가 측면뿐만 아니라 표면 광 방출의 증가에 기인함을 알 수 있었다. 이 결과는 LED 칩의 모양이 다각형으로 변함에 따라 다중 반사 시 입사각이 변하게 됨으로 LED 칩 내부에서 일어나는 전반사를 효과적으로 감소시켜 측면은 물론 표면에 광선의 전달 시 입계각 안에 들 수 있는 확률이 크게 증가하였음을 알 수 있었다.

감 사

본 논문은 산업통상자원부 디자인혁신역량개발사업(10054112, 인터랙션 디자인 기반의 경관조명제품 개발) 및 중소기업청의 시장창출형창조기술개발과제(S22320224:친환경 Deep blue LED를 이용한 고효율, 고연색 의료용 광원개발)으로 지원된 연구결과입니다.

참고문헌

1. 서은경, 홍창희, 김현수, 조제희, “GaN LED의 현재와 미래”, 물리학과 첨단기술, 16 (2014).
2. 전기영, 김유곤, “LED 광원의 시장 현황 및 전망”, KEIP PD issue report, 15-5, 40-48 (2015).
3. X. Li, S. Huang, H. Lin, C. Lu, S. Yang, C. C. Sun, and C. Liu, “Fabrication of patterned sapphire substrate and effect of light emission pattern on package efficiency”, opt. mater. exp. 5, 1784-1791 (2015).
4. Gao H, Yan F, Zhang Y, Li J, Zeng Y and Wang G, “Enhancement of the light output power of InGaN/GaN light-emitting diodes grown on pyramidal patterned sapphire substrates in the micro- and nanoscale”, J. Appl. Phys. 103, 014314 (2008).
5. J. Y. Kim, M. K. Kwon, S. J. Park, J. P. Kim, IEEE Photon. Tech. Lett, “Enhanced Light Extraction From Triangular GaN-Based Light-Emitting Diodes”, 19, 1865-1867 (2007).
6. D. H. Jang, J. I. Shim, and D. S. Shin: IEEE Photonics Technol. Lett. “Enhancement of Light Extraction Efficiency Using Lozenge-Shaped GaN-Based Light-Emitting Diodes ” 21, 760-762 (2009).
7. X. H. Wang, P. T. Lai, and H. W. Choi: “The contribution of sidewall light extraction to efficiencies of polygonal light-emitting diodes shaped with laser micromachining”, J. Appl. Phys. 108, 023110 (2010).
8. S. E. Brinkley, C. L. Keraly, J. Sonoda, C. W. J. S. Speck, S. Nakamura, and S. P. DenBaars, “Chip Shaping for Light Extraction Enhancement of Bulk c-Plane Light-Emitting Diodes ”, Appl. Phys. Exp. 5, 32104 (2012).
9. M. K. Kwon, J. Y. Kim, K. S. Kim, G. Y. Jung, W. Lim, S. T. Kim, S. J. Park, “Enhanced Light Extraction of GaN Based Blue Light-Emitting Diode with SiO2/ITO Photonic Crystal Structure”, ECS. J. Sol. Stat. Sci. Tech. 2, P13-P15 (2013).
10. M.-K. Kwon, J.-Y. Kim, I.-K. Park, K. S. Kim, G.-Y. Jung, S.-J. Park, J. W. Kim, and Y. C. Kim, “Enhanced emission efficiency of GaN/InGaN multiple quantum well light-emitting diode with an embedded photonic crystal”, Appl. Phys. Lett. 92, 251110 (2008).
11. J. Kim, M. Ji, D. Yuan, R. Guo, J. Liu, M. Asadirad, T. Detchprohm, M. K. Kwon, R. D. Dupuis, S. Das, J. H. Ryou, Direct periodic patterning of GaN-based light-emitting diodes by three-beam interference laser ablation, Appl. Phys. Lett. 104, 141105 (2014).
12. P. J. Choi, J. Y. Kim, Y. J. Kang, M. K. Kwon,

- “Light extraction enhancement of GaN based light emitting diodes by ZnO nanorod arrays” , J. nanosci. and nanotech., 14, 5965-5969 (2014).
13. Z. Huaiwen, Z. Yiyun, Y. Hua, X. Bin, W. Kui, L. Jing, W. Guohong, “Light extraction efficiency enhancement in light-emitting diodes with indium tin oxide nano-craters” , J. Semicon, 33, 054009 (2012).
 14. S. Zhou, B. Cao, S. Liu, H. Ding, “Improved light extraction efficiency of GaN-based LEDs with patterned sapphire substrate and patterned ITO” , Opt. & Laser Tech. 44, 2302 (2012).