

InGaN/Sapphire LED에서 기판 제거 유무와 칩 마운트 타입이 광출력 특성에 미치는 영향

홍대운 · 유재근 · 김종만 · 윤명중 · 이성재[†]

충남대학교 전자전파정보통신공학과
☎ 305-764 대전광역시 유성구 공동 220

(2008년 8월 20일 받음, 2008년 9월 26일 수정본 받음, 2008년 10월 8일 게재 확정)

InGaN/Sapphire LED에서 기판 제거와 패키지 방식이 광출력 특성에 미치는 영향을 분석하였다. Sapphire 기판의 제거는 반도체 접합에서 발생된 열의 방출에 도움이 되지만, 반대로 광추출효율이 손상되는 문제점이 수반된다. Sapphire 기판이 제거된 칩을 열전도율이 좋은 금속의 마운트 위에 부착하면, 최대 구동전류는 현저히 증가하고 광출력도 상당히 증가됨으로써, 광추출효율이 손상되는 문제점이 어느 정도 보상된다. 하지만, sapphire 기판이 제거된 칩을 상대적으로 열전도율이 낮은 유전체의 마운트 위에 부착하는 경우에는, 거의 모든 입력전류 범위에서 sapphire 기판이 남아 있는 일반형 칩보다 낮은 광출력을 나타낸다. 따라서, 작은 광출력이 요구되는 응용분야에서는 사용된 칩 마운트의 종류에 무관하게, 일반형 칩이 sapphire 기판이 제거된 칩 보다 유리한 것으로 분석된다.

주제어: Light-emitting diode, InGaN/Sapphire LED structure, Substrateremoved chip, Maximum driving current, Maximum light output

I 서 론

발광다이오드(light emitting diode: LED)가, 예를 들어 액정 표시장치(Liquid Crystal Display: LCD)의 백라이트(backlight)나 자동차의 전조등과 같은 고휘도가 요구되는 분야에 좀더 광범위하게 사용되기 위해서는, 개별 단위 LED 램프로부터의 얻어낼 수 있는 광출력을 크게 키우는 것이 중요하다. 그동안 LED의 광출력을 높이기 위한 방안의 하나로 면적을 크게 키운 LED 칩을 활용하려는 연구가 활발하게 진행된 것이 사실이지만, 아직까지는 대면적 칩을 채택한 LED에 대한 응용 분야가 크게 제한되어 있다는 점에서 그다지 성공을 거두지 못하는 것으로 판단할 수 있을 것이다. 일반적으로 칩의 면적이 늘어나면, 활성층으로부터 생성된 광자들이 칩 밖으로 빠져 나오는 과정 중에 칩 내에서 이동하는 거리가 비례적으로 증가하기 때문에 광추출효율이 감소하게 되면서 LED 고유의 장점이 그만큼 퇴색되게 된다. 또한 칩의 면적이 증가함에 따라 필연적으로 구동전류가 증가하고 그에 따른 발열이 더욱 심화되기 때문에 효율적인 방열을 위한 복잡한 구조의 패키지가 요구되면서 LED 램프의 생산단가가 크게 상승하게 된다. 이러한 점들을 고려할 때, 단위 LED 램프로부터의 광출력을 증대시키기 위한 좀더 현실적인 방안은, 광추출효율이 크게 손상되지 않도록 칩의 면적을 비교적 작게 유지하면서도 발열문제를 완화할 수 있는 칩의 구조나 패키지 구조를 채택함으로써 구동전류를 크게 높이는 것이라고 판단된다.

InGaN/Sapphire LED는, 효율이 높으면서 신뢰성도 탁월할 뿐만 아니라, 발광영역이 자외선에서부터 적색까지 매우 넓은 범위에 걸쳐 있어서,^[1] 현재 가시광 영역에서 가장 중요한

지위를 점하고 있다. 현재 상업적으로 광범위하게 사용되고 있는 InGaN/Sapphire LED의 칩 구조는, 그림 1에 보인 바와 같은 두 종류로 대별될 수 있다. 그림 1(a)의 구조는 일반형으로 부를 수 있는데, 비전도 특성의 sapphire 기판이 그대로 남아있기 때문에, 두 전극은 칩의 결정층 상부에 측면방향으로 서로 분리되어 형성되게 된다. 이에 비해, 그림 1(b)의 칩은 종종 수직구조(vertical structure)로 불리기도 하는데, 그 제조 과정은 다음과 같다. 먼저 성장된 결정층의 상부에 p전극을 형성한 후 sapphire 기판을 laser-liftoff 공정을 이용하여 제거한다.^[3] 그리고 기판이 제거된 wafer를 뒤집을 때 노출된 n-GaN 층 위에 n-전극을 형성함으로써 결과적으로 두 전극은 수직 방향으로 분리된다.

그림 1(b)의 구조에서처럼, 열전도도가 크게 떨어지는 sapphire 기판이 제거되는 경우 반도체 접합에서 생성된 열을 좀더 원활하게 방출시킬 수 있는 여지가 커지는 것은 분명하지만, 반대로 광추출효율이 손상되는 문제가 있는 것으로 분석된다. 하지만, 아직까지는 이들 두 구조의 장단점에 대한 체계적인 분석이 이루어져 있지 못함에 따라 각각의 구조의 특성

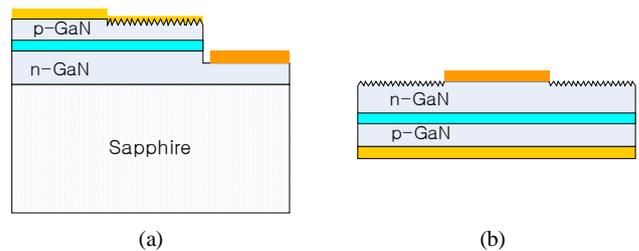


그림 1. InGaN/Sapphire LED 구조.
(a) Sapphire 기판이 남아 있는 일반형 칩
(b) Sapphire 기판이 제거된 수직구조 칩

[†]E-mail: sjlee@cnu.ac.kr

을 최대로 살릴 수 있는 패키지 방식에 대한 기본적인 가이드라인도 마련되어 있지 못한 것으로 여겨진다. 따라서, 본 논문의 목적은 InGaN/Sapphire LED에서 sapphire 기판의 제거가 미치는 방열 관점과 광추출효율 관점에서의 장단점에 대한 분석을 하고 이를 바탕으로 InGaN/Sapphire LED 칩의 패키지 설계 시 중요하게 고려해야 할 기본적인 원칙들을 마련해 보는 것이다.

II. 기판 제거가 광추출효율에 미치는 영향

그림 2는 전형적인 일반형 칩 구조에 대하여, Monte Carlo 광자 시뮬레이션 기법^{3,4)} 이용하여 계산한 광추출효율의 sapphire 기판의 두께에 따른 변화를 보여주고 있는데, sapphire 기판의 두께가 감소할수록 광추출효율이 점점 감소한다는 것을 알 수 있다. 참고로 계산에 사용된 중요 설계 변수에 대한 값은 참고문헌 [4]로부터 얻었음을 밝힌다.

Sapphire 기판의 굴절률은 약 1.77로, GaN 반도체 결정층의 굴절률(약 2.48) 보다 상당히 작지만 보통 칩의 밀봉제(encapsulant)로 사용되는 에폭시의 굴절률(약 1.50) 보다 약간 큰 값을 갖고 있어서, 기판은 반도체 결정층과 밀봉제 사이에서 굴절률 정합(index matching) 효과를 제공하게 된다. 좀더 구체적으로 살펴보면, sapphire 기판은 활성층으로부터 생성되어 기판 쪽으로 향하는 광자들에게 전반사 장벽을 형성함으로써 광자들의 상당 부분을 반도체 결정층 내로 가두는 역할도 하게 되지만, 일단 생성된 광자들이 반도체 결정층과 sapphire 기판 사이의 경계면에서 전반사 조건을 피하여 기판으로 투과되어 넘어간 후 측벽 면으로 입사할 수 있는 기회를 갖기만 하면 대부분 쉽게 칩 밖으로 투과되어 빠져나가게 된다. 이와 같은 sapphire 기판의 서로 상반된 두 효과에도 불구하고, sapphire 기판은 기본적으로는 반도체 결정층과 밀봉제 사이에서 굴절률을 정합시키는 역할을 하기 때문에 전체적으로는 광추출효율을 개선시키는 효과가 우세하다고 할 수 있다. 이와 같은 sapphire 기판의 광추출효율 개선 효과는 기판이 두꺼울수록 증가하는데, 그 이유는 기판

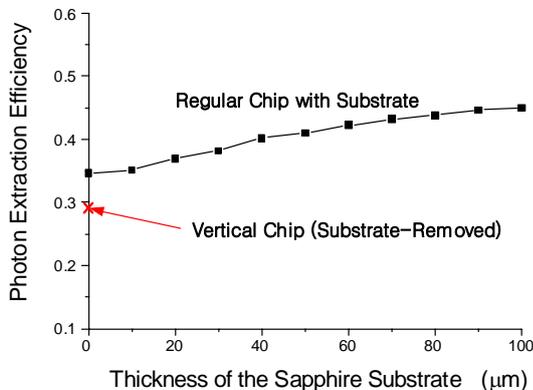


그림 2. Sapphire 기판의 두께에 따른 광추출효율(칩의 면적: 500×500 (μm)²)

이 두꺼워질수록 그에 비례하여 기판의 측벽 면에 도달하여 칩 밖으로 빠져나가는 광자들이 많아지기 때문이다. 결과적으로 그림 2에서 보여주듯이 기판이 얇아질수록 광추출효율은 점점 감소하게 된다.

그리고 같은 맥락에서, 기판이 완전히 제거된 그림 1(b)의 수직 구조에서는, sapphire 기판이 제공하는 굴절률 정합효과를 전혀 기대할 수 없기 때문에, 그림 1(a)의 일반형 구조에서 보다 낮은 광추출효율을 갖는다는 것을 쉽게 예상할 수 있을 것이다. 실제로 수직 구조에 대한 광추출효율은, 그림 2에 표시된 바와 같이, 일반형 칩 구조에서 기판의 두께가 0 일 때의 광추출효율보다 약간 더 작은 값을 갖는 것으로 계산되었는데, 그 차이의 근본적인 이유는 전극 구조 상의 차이점에 기인한다. 좀더 구체적으로 살펴보면, 두 전극이 측면방향으로 분리되어 있는 일반형 구조의 경우 활성층에서 전류의 밀도가 높은 영역이 상대적으로 칩의 가장자리에 놓이는 반면에, 상부 전극이 칩의 중앙에 위치하게 되는 수직 구조에서는 전류 밀도가 높은 영역이 칩의 중앙 부위에 놓이기 때문에, 광자들이 칩 밖으로 빠져 나오기 위해서 칩 내에서 이동하는 거리가 상대적으로 늘어나게 되고 그 결과로 광추출효율이 더 감소하게 된다. 하지만, 이와 같은 차이점은 수직 구조의 전극 패턴을 최적화함으로써 얼마든지 극복될 수 있다는 점에서 근본적인 차이점은 아니라고 할 수 있다.

결론적으로, 수직 구조에서와 같이 sapphire 기판이 제거되면, 생성된 광자들은 칩의 측벽 면을 통하여 빠져 나갈 기회를 크게 잃어버리면서 칩 내에서 훨씬 더 오랜 시간 동안 머물게 되며 그러한 동안 특히, 흡수계수가 상대적으로 큰 ohmic 전극과 매우 빈번하게 상호 작용하게 된다. 그리고, 그 결과로 광추출효율은 크게 떨어지게 된다. 따라서, 입사하는 광자들에 대한 반사도(reflectivity)를 획기적으로 높일 수 있는 새로운 전극이 개발되지 않는 한 수직 구조에서 광추출효율이 일반형 구조보다 낮아지는 것을 피하기 어렵게 된다.

III. 실험 및 측정결과

그림 3은 이 논문에서 다루게 될 4가지 기본 칩-마운트의 결합 방식을 보여주고 있다. 그림 3(a)와 (b)는 칩을 유전체 마운트 위에 부착시킨 경우이며, 반면에 그림 3(c)와 (d)는 금속 마운트 위에 부착시킨 경우인데, 이 경우 금속 마운트는 공통접지 전극으로서의 역할도 하게 된다.

유전체는 일반적으로 금속보다 낮은 열전도율을 갖는다. 따라서 비교적 두꺼운 유전체 마운트를 사용한 그림 3(a)와 (b)의 구조의 경우, 유전체 자체만의 열 저항은 반도체 결정층과 sapphire 기판의 결합이 제공하는 열 저항 보다 훨씬 더 큰 것이 보통이다. 그 결과, LED 칩의 접합 온도가 상승하는 정도는 sapphire 기판의 제거 여부에 의해 큰 영향을 받지 않게 된다. 따라서, 방열 관점에서의 그림 3(a) 구조와 비교한 그림 3(b)의 구조의 이점은 기판의 제거에 따른 광추출효율이 감소하는 단점을 보상하기에는 충분치 못할 개연성이 있

게 된다. 그림 3(c)의 경우에는 금속 마운트의 열 저항 보다는 sapphire 기판의 열 저항이 더 클 수가 있기 때문에 여전히 금속 마운트를 통한 열 방출이 제약을 받게 된다. 이에 비하여, sapphire 기판이 제거된 칩이 금속 마운트에 부착되어 있는 그림 3(d)의 경우에는, 반도체 접합에서 발생한 열이 금속 마운트를 통하여 쉽게 방출되고, 그에 따라 최대 구동 전류와 광출력을 키우는 것이 가능할 것으로 기대된다.

실험에 사용된 유전체 마운트는 SMD형 LED 램프 패키지에서 자주 사용되는 PPA(polyphthalamide)를, 그리고 금속 마운트는 lead형 LED 램프 패키지에 자주 사용되는 니켈, 코발트, 철의 합금으로 이루어진 kovar를 이용하여 가공하였다. 참고로 PPA, kovar, sapphire의 열전도율은 각각 2, 150, 0.3 W/(m·K)으로 알려져 있다. PPA 마운트와 kovar 마운트는 모두 같은 두께 0.5 mm와 같은 면적 7×7 (mm)²을 갖도록 하였다. 그리고, sapphire 기판을 제거한 칩과 제거하지 않은 칩은 모두 같은 에피택시 특성을 갖는 wafer를 이용하여 500×500 (μm)²의 크기로 가공하였으며, 단 sapphire 기판을 제거하지 않은 일반형 칩에서 기판의 두께는 약 80 μm이다. 이상에서 설명된 각각의 칩 마운트의 특성을 요약하면 표 1에 보인 바와 같다.

그림 4와 그림 5는 각각, 적분구에 연결된 CCD array detector를 이용하여 측정한 광출력과 최고 파장(peak wavelength)의 입력전류에 따른 변화를 보여주고 있다. 측정하는 동안 LED 램프들은 충분한 열용량을 갖는 금속 샘플 홀더의 평평한 표

면에 thermal grease를 이용해서 밀착시켜 부착하였으며, 구동전류는 매 10초마다 10 mA씩 증가시켜 나갔다.

그림 4의 그래프에서 한 가지 언급되어야 할 사항은, 좀더 공정한 광출력의 비교를 위하여, 낮은 입력전류 영역에서 PPA 마운트 위에 부착된 칩의 광출력이 kovar 마운트 위에 부착된 칩의 광출력과 서로 같은 값을 갖도록 해주기 위하여 인위적으로 PPA 마운트의 광출력을 약 0.12배만큼 증가시키는 방식으로 보정하였다는 점인데, 그 이유는 다음과 같다. 일반적으로, PPA 마운트의 반사율은 은으로 도금된 kovar 마운트의 반사율에 비하여 상당히 떨어진다. 만일 이 두 종류의 마운트 사이에 반사율 차이가 없다면, 입력전류가 상대적으로 낮은 영역에서는 반도체 접합에서의 발열에 따른 효과가 상대적으로 미약하기 때문에 광출력에 차이가 날 수 없게 된다.

그림 5에서 한가지 주목할 점은 구동전류를 증가시켜 나갈 때, 중심파장이 가파른 기울기로 갑자기 증가하기 시작하는 지점이 나타난다는 점이다. 일반적으로 구동전류가 증가하고 그에 따른 발열로 인하여 반도체 접합의 온도가 상승하게 되면 활성층의 유효 밴드갭 에너지가 줄어들게 되고, 그 결과로 발생하는 빛의 파장이 길어지는 소위 적색편이(red-shift) 현상이 나타나게 된다. 이와 같은 적색편이가 심각하게 나타

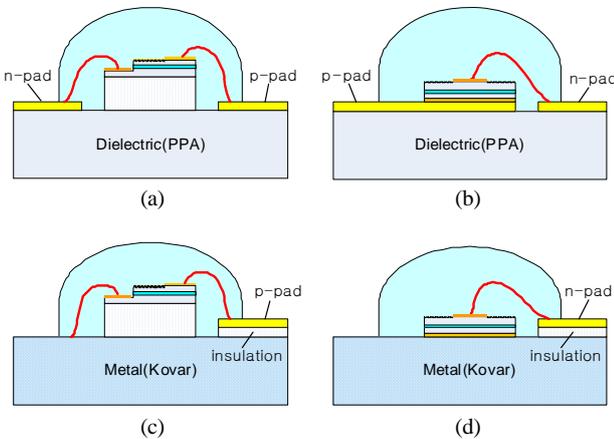


그림 3. 기본 chip-mount 결합 방식

- (a) 유전체 마운트 위에 부착된 일반형 칩
- (b) 유전체 마운트 위에 부착된 기판이 제거된 칩
- (c) 금속 마운트 위에 부착된 일반형 칩
- (d) 금속 마운트 위에 부착된 기판이 제거된 칩

표 1. 실험에서 사용된 칩과 마운트의 사양

구 분	열전도율(W/(m·K))	두께(mm)	면적(mm ²)
Sapphire 기판	0.3	0.08	0.5×0.5
PPA 마운트	2	0.5	7×7
Kovar 마운트	150	0.5	7×7

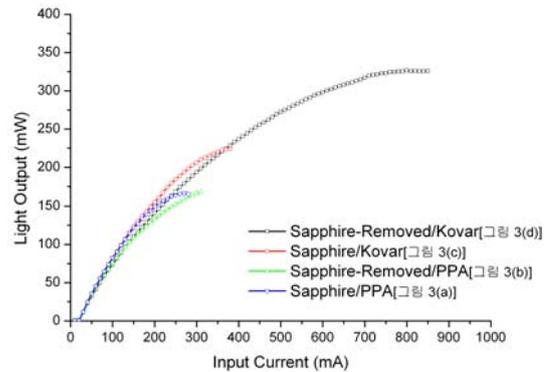


그림 4. 입력전류에 따른 광출력.

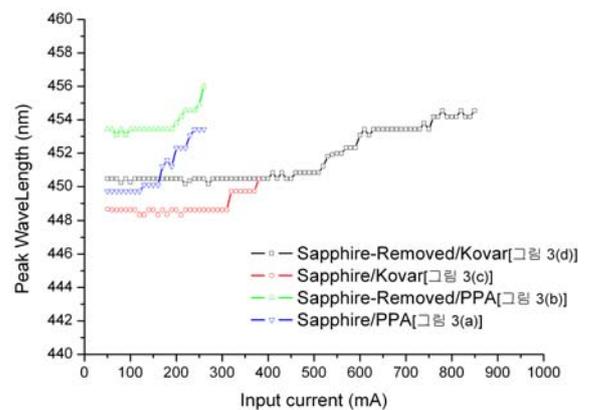


그림 5. 입력전류에 따른 최고 파장.

표 2. 최대 구동전류와 최대 광출력

		최대 구동전류 [mA]	최대 광출력 [mW]
Regular Chip	PPA mount	160	127
	Kovar mount	310	210
Substrate-Removed Chip	PPA mount	190	128
	Kovar mount	510	277

난 상태의 입력전류에서 LED를 장시간 구동하게 되면 LED의 신뢰성과 수명에 영향을 미칠 수 있다는 점에서, LED의 최대 구동전류를 결정하는 합리적인 방법의 하나는 적색편이가 시작되는 입력전류를 찾는 것이라고 할 수 있을 것이다. 그리고 위와 같이 결정된 최대 구동전류에서의 광출력을 최대 광출력으로 삼을 수 있을 것이다. 이와 같이 결정된 최대 구동전류와 최대 광출력을 요약하면 표 2에 보인 바와 같다.

표 2와 그림 4에서 알 수 있듯이, PPA 마운트보다 kovar 마운트를 선택했을 때, 최대 구동전류와 광출력 모두 현저하게 증가하였다. 그러나, 여기서 주목해야 할 점은 sapphire 기판을 제거한 칩보다 일반형 칩의 최대 구동전류와 광출력의 개선 정도가 상대적으로 작다는 것이다. 예를 들어, 일반형 칩의 경우 kovar 마운트 위에서는 최대 구동전류와 광출력이 각각 310 mA와 210 mW로, PPA 마운트 위에서의 비교했을 때, 최대 구동전류와 광출력은 각각 94%와 65% 정도 향상되었다. 그러나, sapphire 기판을 제거한 칩의 경우에는 kovar 마운트 위에서 최대 구동전류와 광출력이 각각 510 mA와 277 mW로, PPA 마운트 위에서의 비교했을 때, 최대 구동전류와 광출력은 각각 168%와 116%까지 훨씬 더 크게 향상되었다. 이와 같이, 금속 마운트를 사용하는 경우, 기판이 제거된 칩보다는 일반형 칩에서 최대 구동전류와 광출력 모두 상대적으로 적게 개선된다는 사실은 일반형 칩의 경우 두꺼운 sapphire 기판이 여전히 열 방출을 심각하게 제한하고 있다는 것을 의미한다.

표 2와 그림 4에서 확인할 수 있는 또 다른 중요한 사항은, 특히 최대 광출력 관점에서, 기판이 제거된 칩의 성능이 일반형 칩과 비교했을 때 그다지 인상적이지 못하다는 점이다. 예를 들어, kovar 마운트에서 sapphire 기판을 제거한 칩의 최대 구동전류는 510 mA로 일반형 칩보다 65% 향상되었지만, 최대 광출력은 277 mW로 일반형 칩보다 단지 32% 정도만 향상되었을 뿐이다. Sapphire 기판이 제거된 칩의 성능은 유전체 마운트 위에서 훨씬 더 저조해지는 것으로 판단된다. 예를 들어, PPA 마운트에서 sapphire 기판을 제거한 칩의 최대 구동전류는 190 mA로 일반형 칩보다 19% 정도 향상되고 있지만, 최대 광출력은 128 mW로 일반형 칩과 비교하여 거의 개선되지 못하고 있다.

이상과 같이, 특히 광출력 관점에서, sapphire 기판이 제거된 칩의 기대에 못 미치는 성능은 근본적으로는 sapphire 기판이 제거될 때 초래되는 광추출효율의 손상과 직접적으로 관련되어 있다. 기판의 제거에 따른 광추출효율의 손상으로

말미암아, 특히 입력전류가 상대적으로 작은 영역 즉, 반도체 접합의 온도 상승이 심각하지 않은 영역에서 기판이 제거된 칩의 광출력은 사용된 칩 마운트의 종류와 무관하게, 일반형 칩의 광출력보다 작아지게 된다. 비슷한 이유에서 유전체 마운트를 사용하는 경우, sapphire 기판이 제거된 칩의 광출력은 거의 모든 입력전류 범위에서 일반형 칩보다 작아지게 된다.

IV. 결 론

InGaN/Sapphire LED 칩에서 sapphire 기판의 제거는 반도체 접합에서 발생한 열의 방출에 도움을 주는 이점이 되지만, 이 이점은 광추출효율의 손상이라는 단점과 수반되어 나타난다. 따라서 sapphire 기판을 제거한 칩의 방열 관점에서의 잠재력을 충분히 활용하기 위해서는, 열전도성이 충분히 좋은 마운트 위에 칩을 부착시키는 것이 필수적으로 요구된다. Sapphire 기판을 제거한 칩이 유전체 마운트 위에 부착되는 경우에는, 손상된 광추출효율의 단점이 주로 부각됨으로써 거의 모든 입력전류 범위에서 광출력은 일반형 칩보다 작아지게 된다. 따라서, 일반적으로 낮은 출력을 요구하는 응용분야에서는, 사용되는 칩 마운트의 종류에 관계없이, 일반형 칩이 기판이 제거된 칩 보다 유리한 것으로 판단된다.

마지막으로, sapphire 기판이 제거된 칩이 좀더 광범위하게 사용되기 위해서는 매우 낮은 광자 흡수율을 갖고 있는 ohmic 전극을 개발함으로써 기판이 제거될 때 광추출효율이 손상되는 것을 최소화하는 것이 필요한 것으로 분석된다.

감사의 글

LED 칩을 제공해 주신 LG이노텍(주)의 김상기 님과 LED 램프 제작에 많은 도움을 주신 나이텍스(주)의 권광우 님과 정동열 님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] T. Mukai, M. Yamada, and S. Nakamura, "InGaN-based uv/blue/green/amber/red LEDs," *Proc. SPIE*, vol. 3621, pp. 2-14, 1999.
- [2] T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, "Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 6, pp. 855-857, 2004.
- [3] S. J. Lee, "Analysis of light-emitting diodes by Monte Carlo photon simulation," *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 9, pp. 1427-1437, 2001.
- [4] S. J. Lee, "Study of photon extraction efficiency in InGaN light-emitting diodes depending on chip structures and chip-mount schemes," *Opt. Eng.*, vol. 45(1), no. 014601, pp. 1-14, 2006.

Analysis of the Effect of the Substrate Removal and Chip-Mount Type on Light Output Characteristics in InGaN/Sapphire LEDs

Dae Woon Hong, Jae Keun Yoo, Jong Man Kim, Myeong Jung Yoon, and Song Jae Lee[†]

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University 220 Koong-dong, Yuseong-gu, Taejeon 305-764, Korea

[†]*E-mail: sjlee@cnu.ac.kr*

(Received August 20, 2008; Revised manuscript September 26, 2008; Accepted October 8, 2008)

We have analyzed the effect of the substrate removal and packaging schemes on light output characteristics in InGaN/Sapphire LEDs. The removal of the sapphire substrate helps to dissipate the heat generated in the junction, but the advantage comes only with the detrimental effect of degrading the photon extraction efficiency. If the substrate-removed chip is attached to a metallic mount with good thermal conductivity, the maximum driving current is increased drastically, producing significantly increased light output and therefore compensating the photon extraction efficiency degradation. On a dielectric mount with a relatively poor thermal conductivity, however, it produces smaller light output, over most input current range, than the regular type of chips with the sapphire substrate remaining. Thus, for low power applications, the regular chips may be preferred over the substrate-removed chips, regardless of the chip mounts employed.

OCIS codes: (230.3670) Light-emitting diodes.