

논문 2007-44SD-4-12

시뮬레이션을 이용한 PSS (patterned sapphire substrate) LED의 광추출 효율 평가

(The evaluation of the extraction efficiency of PSS(patterned sapphire substrate) LED using simulation)

이진복*, 윤상호*, 김동운*, 최창환*

(Jin-Bock LEE, Sang-Ho Yoon, Dong-Woohn Kim, and Chang-Hwan Choi)

요약

사파이어 기반의 GaN LED의 광추출 효율을 시뮬레이션을 이용하여 정량적으로 평가하였다. 각각의 LED는 ray-tracing 시뮬레이션을 이용하여 광추출 효율을 계산하였다. 본 연구에는 PSS(patterned sapphire substrate) LED와 flat LED의 비교 분석을 통하여, LED에서의 사파이어 기판의 패턴이 광추출에 미치는 영향을 설명하였다. 또한, 각각의 칩에서 반사막의 반사도가 광추출에 미치는 영향을 분석하고, 그 원인을 시뮬레이션을 이용하여 설명하였다. 한편, 사파이어 패턴에 의한 광추출효율의 변화 효과를 공기(air)와 실리콘(silicone) 분위기에서 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 시뮬레이션 기술을 통해 광추출 효율의 개선 정도를 정량적으로 평가할 수 있었으며, 이러한 연구가 향후 고효율 LED 개발에 도움을 줄 것으로 판단된다.

Abstract

The light extraction efficiency in GaN-on-sapphire LEDs based on a simple model was analyzed qualitatively. The light extraction efficiency in the LEDs is simulated numerically by using ray tracing method. In the present study, the extraction efficiency was simulated on flat LED and PSS(patterned sapphire substrate) LED. The role of the patterned sapphire substrate in PSS LED are analyzed and discussed. And, the effects of reflectance on flat LED and PSS LED were investigated. This analysis of simulation results provide a numeric figure for the extraction efficiency of LEDs and are helpful in the design of high brightness GaN LEDs.

Keywords : LED, GaN, extraction efficiency, patterned sapphire substrate

I. 서론

발광다이오드(light emitting diode, LED)란 화합물 반도체에 전류를 흘려 빛을 발산하는 반도체 소자이다. 전극을 통해 전류가 통과하면서 전자와 전공이라 불리는 전하입자가 PN 접합에 위치에 있는 MQW (multi-quantum well)에서 결합해 빛을 발산시키는 구조를 되어 있다^[1]. 이렇게 발산되는 빛의 색깔은 물질의 특성에 따라서 변화하게 된다. 적색 LED가 개발된 이

후 황색, 녹색, 청색, 백색 LED가 우리 생활 곳곳에 쓰이고 있으며, 최근에는 에디슨이 전구를 발명한 이래 120여 년간 빛의 세계에 군림해 온 백열전구와 형광등을 대체할 차세대 조명수단으로 주목 받고 있다. 이러한 LED 소자는 백열전구에 비해서 전력소비가 적고, 수명이 길어 한번 설치하면 교체나 유지보수가 거의 필요 없다는 장점을 갖고 있으며, 색상구현도, 내구성, 환경 친화도, 고속응답 등 기존 조명과 비교할 수 없을 정도로 많은 장점을 갖고 있다. 특히, 에너지 자원 고갈과 할로젠, 수은 등 기존 조명들의 공해문제가 세계적인 관심사로 대두되면서 전력 소모량을 대폭 줄일 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 LED에 대한 관심이 더욱 증

* 정회원, 삼성전기 중앙연구소
(Central R&D Institute, Samsung
Electro-Mechanics Co.,LTD.)

접수일자: 2006년10월30일, 수정완료일: 2007년3월20일

폭되고 있다.

그러나 현재의 LED는 이러한 수요를 충족시킬 만큼 충분한 성능 향상을 보이고 있지 않은 실정이다. 향후 LED가 단지 표시요소로부터 탈피하기 위해서는 발광 효율의 개선에 주력해야 하고, 특히 소자의 특성을 충분히 발휘하기 위해서는 소자의 내부양자효율 뿐만 아니라, 추출효율을 개선해야 한다. 현재, 선진 몇몇 업체에서는 저전류 영역에서 이미 내부 양자효율을 90% 이상 달성하였다고 보고하고 있다. 그러나 이에 비해서 칩에서의 광추출 효율은 상당히 부족한 실정이다^[2-3]. 이것은 MQW 구조에서 생성된 빛이 소자 밖으로 방출될 경우, 소자와 공기(air) 사이의 계면에서 굴절률 차이에 의한 전반사가 발생하게 되는데, GaN의 경우 굴절률이 가시광선 영역에서 약 2.5이고 공기(air)의 경우 굴절률이 1이기 때문에, 이 경우 빛이 빠져 나올 수 있는 임계각은 약 23도가 된다. 즉, GaN에서 공기(air)로 빛이 방출될 경우 23도의 임계각 안에 들어오는 빛만 밖으로 빠져 나올 수 있게 된다. 따라서, GaN-LED의 이러한 한계를 극복하기 위해서 소자의 디자인 개발, 반사전극 개발, 패키징 방법 개발이 필수적이다. 이러한 재료의 고유 특성으로부터 기인한 낮은 광추출 효율을 극복하기 위해서 칩 shaping이나, 표면 texturing, patterned sapphire substrate 등 다양한 방법들이 시도되고 있다^[4-7].

현재 내부양자효율과 칩의 광추출 효율을 분리하여 측정할 수 있는 기술이 부재한 상태이며, 상기한 광추출 개선 구조가 광추출 효율에 기여하는 정도를 정량적으로 평가하기 어려운 것이 현실이다. 본 연구에서는 ray-tracing 광해석 기술을 이용하여, LED에서 광추출 효율을 정량적으로 평가할 수 있는 기술을 개발하고, 특히, sapphire를 기반으로 하는 LED에 있어서, patterned sapphire substrate가 광추출 효율에 기여하는 정도를 평가하고자 한다. 일반 flat LED와 PSS(patterned sapphire substrate) LED를 공기(air)와 실리콘(silicone) 분위기에서의 광추출 효율을 비교 분석하였고, 각각의 칩에서의 하부 반사막의 영향을 분석하였으며, 시뮬레이션을 통하여 이에 대한 원인을 설명하였다.

II. 본 론

1. 시뮬레이션을 위한 구조 모델링

그림 1은 본 연구에서 사용된 LED 구조의 형상과 시

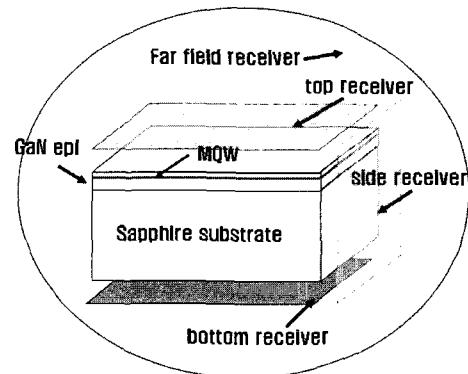


그림 1. 시뮬레이션을 위한 LED 구조 모델링

Fig. 1. The modelling of LED structures for simulation.

뮬레이션 위한 광검출 구조를 나타낸 것이다. LED는 GaN 에피층과 사파이어 기판으로 구성되어 있고, GaN 에피층 사이에는 MQW(multi-quantum well)가 존재하며, 이는 LED 시뮬레이션 상에서 광원으로 설정하였다. 광원으로부터 각각의 방향으로 추출되는 광량을 검출하기 위해서 각 면에 리시버를 설치하였다. 칩의 크기는 $600\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 로 하였으며, GaN 에피층의 두께는 $6\mu\text{m}$, 사파이어의 두께는 $80\mu\text{m}$ 로 하였다. 각 재료의 굴절률은 GaN는 2.5, 사파이어는 1.7, 공기(air)는 1, 실리콘(silicone)은 1.4로 하였다. 시뮬레이션을 위해서 기하광학 상용 소프트웨어인 ORA (Optical Research Associates)사의 Light Tools를 사용하였다.

2. LED 소자 시뮬레이션 및 해석

그림 2는 flat LED와 PSS LED의 광추출을 비교하여 나타낸 것이다. 또한, 그림에 포함된 수치는 각각의 방향으로 방출되는 광량을 나타낸 것이다. 그림2(a)에 나타난 바와 같이 일반적인 flat LED의 경우에는, GaN와 공기(air)사이의 굴절률 차이로 인해서 내부에서 발생한 빛이 외부로 방출되기 어려울 뿐만 아니라, 한번 방출되지 못한 빛은 지속적으로 칩내부에 갇혀있게 되는 광학적 성질로 인해서, GaN의 내부 MQW에서 100이라는 양의 빛이 발생한다고 가정했을 경우, 양 15.91%가 외부로 방출된다. 그러나 그림2(b)에 나타난 바와 같이 PSS LED의 경우 flat LED에 대해서 약 2배 정도의 광추출량이 증가하였다. 특히, 상부로의 방출이 현저히 증가함을 볼 수 있다. 상기한 바와 같이, 그림2(a)의 flat LED에서는 MQW에서 생성된 빛이 소자 외부로 방출될 때 소자와 공기(air) 사이의 계면 굴절률 차이에 의해 일어나는 전반사에 의해서 대부분의 빛이 갇혀 있는

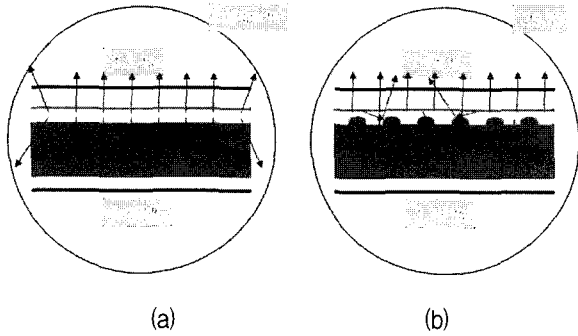


그림 2. 각각 LED 구조에 따른 광추출 효율 비교
 (a) flat LED,
 (b) PSS(patterned sapphire substrate) LED
 Fig. 2. The comparison of the extraction efficiency with LED structures.
 (a) flat LED,
 (b) PSS(patterned sapphire substrate) LED

반면에, 그림2(b)의 PSS LED에서는 GaN와 사파이어 계면 상에 존재하는 패턴이 GaN 내부에 갇혀 있는 빛의 입계각을 계속적으로 변화시켜, 외부 혹은 사파이어 방향으로의 방출을 더 용이하게 만든다. 특히, 시뮬레이션 결과를 볼 때, PSS LED가 flat LED에 비해서 상부로의 방출이 약 2.5배 증가하였으며, 이는 GaN와 sapphire 계면에 존재하는 패턴이 GaN에서 진행하는 빛을 난반사 시켜 효과적으로 상부로 방출시키는 역할을 하는 것으로 설명될 수 있으며, 실제로도 칩의 상부에서 육안으로 관찰하면 PSS LED는 flat LED에 비해서 매우 밝게 보임을 확인할 수 있었다. 한편, PSS LED에서 사파이어 기판의 패턴은 높이 2 μ m, 간격 2 μ m, 밑면의 반지름이 2 μ m인 콘 형상으로 모델링 하였다. 실제로 드라이 에칭 공정을 통해 패턴은 제작되었다.

한편, 실제 LED는 공중에서 모든 방향으로 빛이 방출되는 것이 아니라, 한쪽 면이 package에 고정되어, 한 방향으로 빛이 진행하는 구조를 갖고 있다. LED칩은 패키지를 할 경우 하부면에 반사막이 형성되는 바, 이러한 하부 반사막의 반사도에 대한 영향을 알아보기 위해 반사도에 따른 광추출의 변화를 시뮬레이션을 통해 살펴보았다.

그림 3은 하부 반사막의 반사도에 따른 광추출 효율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 반사도가 증가함에 따라서 광추출 효율이 증가함을 알 수 있다. 특히 주목할 점은 PSS LED의 경우 flat LED에 비해서 반사도에 대한 영향을 비교적 많이 받음을 알 수 있었다. 즉, flat LED의 경우는 반사막의 반사도가 광추출 효율에 크게 영향을 미치지 않지만, PSS LED

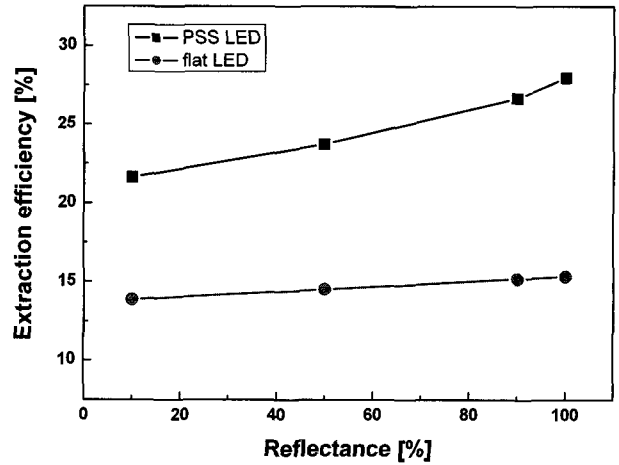


그림 3. 반사막의 반사도에 따른 LED의 광추출 효율
 Fig. 3. The extraction efficiency of LED with reflectance of reflector.

에서는 반사막의 반사도가 광추출 효율에 크게 영향을 미치기 때문에 반사막의 반사도를 높이는 것이 소자의 광효율 향상에 중요한 요소일 것으로 판단된다. 또한, 이러한 현상이 나타나는 원인은 PSS LED의 경우 하부 사파이어 기판 방향으로 빛의 진행이 flat LED의 경우보다 많기 때문이라고 판단되며, 이에 대한 정량적인 원인 규명은 그림6의 시뮬레이션 결과를 통해 설명할 것이다.

그림 4는 상기한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 사파이어 기판 패턴의 최적화를 위한 시뮬레이션을 진행하였고, 최적화된 패턴에 대한 광추출 효율의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 패턴의 최적화는 각각 cone의 높이, 폭, 간격 및 배치를 조절하여 시행되었으며, 이때 하부 반사막의 반사도는 90 %로 가정하였다. 본 연구에서는 최적화 구조에 대해서 자세하게 언급하지 않을 것이다. 그림 4(b)에서 나타난 결과를 그림 2(b)와 비교하면, 사파이어 기판 패턴의 최적화를 통해서 PSS LED칩의 광추출 효율이 약 11% 정도 향상되었다. 또한, 이러한 상황에서 PSS LED는 flat LED에 비해서 약 118% 광추출 효율이 향상됨을 확인할 수 있었으며, 상부로의 광추출량도 약3배 이상 증가하였다. 실제로 blue 상태에서(형광체 package전) PSS LED가 flat LED에 비해서 매우 밝게 보이는 이유를 설명할 수 있었다.

그러나 현재 청색 LED가 백색 LED로 사용되기 위해서는 형광체와 실리콘(silicone)을 섞어 package 한다. 이러한 경우 LED칩에서의 입계각은 GaN-공기(air)가 아닌 GaN-실리콘(silicone)에 의해서 결정될 것

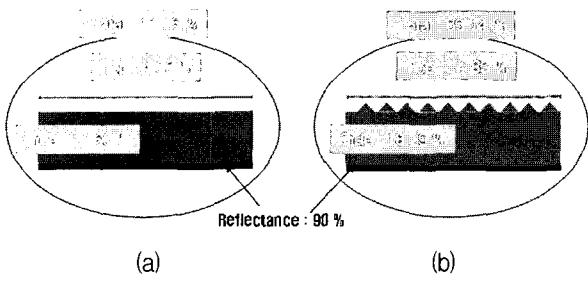


그림 4. 반사막의 반사도 90%에서의 광추출 효율 비교
 (a) flat LED
 (b) PSS(patterned sapphire substrate) LED
 Fig. 4. The comparison of the extraction efficiency at 90 % reflectance of reflector.
 (a) flat LED
 (b) PSS(patterned sapphire substrate) LED

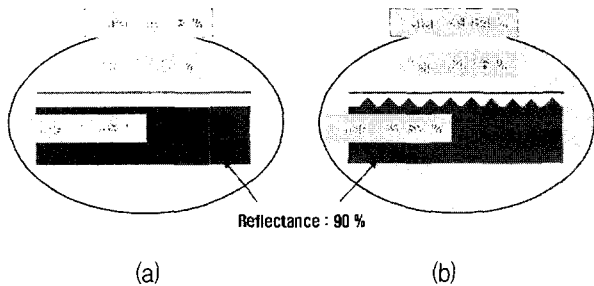


그림 5. 실리콘(silicone) 분위기에서 각각 LED 구조에 따른 광추출 효율 비교
 (a) flat LED
 (b) PSS(patterned sapphire substrate) LED
 Fig. 5. The comparison of the extraction efficiency with LED structures at silicone ambient.
 (a) flat LED
 (b) PSS(patterned sapphire substrate) LED

이라고 판단된다. 따라서 시물레이션이 실제 GaN와 사파이어로 구성된 LED 칩으로부터 외부로 방출되는 광추출 효율을 보다 정확하게 반영하기 위해서, 실리콘(silicone) 분위기에서 수행되었다. 상기한 바와 같이 실리콘(silicone)의 굴절률은 공기(air)보다 큰 1.4로 가정하였다.

상기한 시물레이션 결과가 칩-공기(air) 분위기에서 시물레이션을 수행하였다면, 그림 5는 칩-실리콘(silicone) 분위기에서 시물레이션을 수행하였다. 실리콘(silicone) 분위기에서는 각각 칩의 광추출이 더욱 향상됨을 볼 수 있다. 예상된 바와 같이 GaN와 공기(air)는 굴절률의 차이가 크기 때문에 입계각이 약 23도로 매우 작고, 작은 입계각 내의 빛만 외부로 방출될 수 있기 때문에 광추출량이 작지만, GaN와 실리콘은 상대적으로 굴절률 차이가 작기 때문에 입계각이 37도로 상대적

로 큰 편이며, 이로 인해 광추출량이 상대적으로 증가하게 된다. 한편, 이러한 실리콘(silicone) 분위기에서 PSS LED의 광추출 효율은 flat LED에 비해서 약 35% 정도 증가하였다. 이는 공기(air) 중에서의 증가율(118%)에 비해서 훨씬 감소한 수치이다. 이러한 원인은 다음과 같이 설명될 수 있다. PSS LED에서 사파이어 기판의 패턴의 역할은 사파이어와 GaN 계면에 부딪히는 빛은 지속적으로 난반사 시켜, 결과적으로 외부로 방출될 수 있도록 임계각을 변화시키는 역할은 하는 것으로 설명될 수 있다. 따라서 GaN-공기(air)의 경우는 임계각이 작기 때문에 사파이어 기판 패턴에 의한 임계각 변화가 역할을 충분히 발휘하지만, GaN-실리콘(silicone)의 경우에는 칩과 실리콘과의 임계각이 상대적으로 크기 때문에, 이미 광추출이 상대적으로 용이한 상태이고, 이로 인해 사파이어 기판의 패턴에 의한 광추출 증가에 대한 영향이 확연히 나타나지 않기 때문에 실리콘(silicone) 분위기에서 PSS LED에 의한 광추출 향상율이 감소하게 되는 것이다. 실제 실험에서도 확인할 수 있듯이, 두 가지 경우의 칩을 공기(air) 중에서(형광체 package전) 측정을 하면 PSS LED가 flat LED에 비해서 매우 밝게 보이지만, 실제 package를 하고 난 후, 측정을 하게 되면 실질적인 광 출력의 증가는 약 30%에 불과하다. 따라서 LED 광효율 개선 비교에 있어서, 측정 환경에 따라서 개선율이 변화할 수 있기 때문에, 적절한 칩의 상황 하에서 측정 및 시물레이션이 수행되어야 정확한 개선 정도를 평가할 수 있으리라 판단된다. 또한, sapphire 기판을 갖고 있는 GaN LED에서의 각 방향으로 빛의 방출 경로를 분석하면, 그림5(a)의 flat LED의 경우에는 전체 광추출의 약 74%(1-11.70/44.18), 그림5(b)의 PSS LED의 경우에는 약 60%(1-24.16/59.84)가 측면으로 방출된다. 이러한 방출 경로에 대한 세부적인 규명이 LED에서의 광추출에 대한 이해 및 개선 구조의 설계를 위해 필요하다고 판단된다.

그림 3에 나타난 바와 같이, PSS LED와 flat LED에서 반사막의 반사도 특성에 변화에 따른 광추출 특성 변화가 상이함을 설명하기 위해서 그림6과 같이 실리콘(silicone) 분위기에서 시물레이션을 수행하였다. 앞서 설명된 바와 같이 flat LED는 반사막의 영향을 크게 받지 않는 반면에 PSS는 반사막 특성에 상대적으로 크게 영향을 받음을 확인하였다. 이의 원인을 규명하기 위해서 반사막을 흡수체로 설정하고 사파이어 기판과 평행하게 사파이어 기판 내부에 광 리시버를 설치하여 반사

막으로 향하는 빛의 양을 시뮬레이션 상에서 검출하였다. 또한, 반사막을 흡수체로 설정한 이유는 반사막에 부딪쳐 되돌아오는 빛이 다시 리시버에 도달하는 것을 막고, 단지 광원으로부터 기관 방향으로 향하는 빛의 양만을 계산하기 위함이다. 각각 동일한 위치에 사파이어 내부에 리시버를 설치하여 그 부분에 통과하는 빛의 양을 검출하였다. 결과에서 나타난 바와 같이 PSS LED와 flat LED에 있어서 반사막에 도달하는 빛의 양은 각각 27.22%와 13.08%임을 알 수 있다. 즉, flat LED에 비해서 PSS LED에서 반사막에 도달하는 빛의 양이 2배 이상임을 알 수 있다. 반사막의 특성이 좋다면 이러한 빛이 다시 상부 혹은 측면으로 반사되어, 방출될 수 있으나, 그렇지 않을 경우에는 전체 중에서 더 많은 양의 빛이 반사막에서 에너지를 잃게 됨을 의미한다. 이로 인해서 PSS LED의 경우가 반사막 특성에 더욱 민감함을 유추할 수 있다. 이와 같이 사파이어 기관의 패턴은 굴절률 차이에 의해서 GaN 에피층에 갇혀 있는 빛을 상부로 방출시키는 역할을 할 뿐 아니라, 기관 방향으로의 진행을 더욱 용이하게 하여, 결국 GaN 에피층 밖으로 빛을 방출 시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

IV. 결론

사파이어 기반의 GaN LED의 광추출 효율을 시뮬레이션을 이용하여 정량적으로 평가하였다. PSS LED는 flat LED에 비해서 광추출 효율이 매우 향상되었다. 이는 사파이어 기관의 패턴이, 굴절률 차이로 인한 작은 임계각 때문에 GaN 에피층에 갇혀있는 대부분의 빛을 외부로 방출시키는 역할을 하기 때문이라고 판단된다. 특히, 칩-공기(air)에서는 118%, 칩-실리콘(silicone)에서는 35%의 향상을 보였는데, 실제 패키지 후 백색(white) LED의 광량의 향상 정도를 실험값과 비교해 보았을 때, 칩-실리콘(silicone)상의 시뮬레이션 결과가 실험값에 더 근접하였다. 이는 백색(white) LED를 만들기 위해서, 실제 패키지 시에 실리콘(silicone)이 형광체와 섞여 사용되기 때문인 것으로 판단된다.

또한, PSS LED는 flat LED에 비해서 반사막의 영향을 훨씬 많이 받는 것으로 보였는데, 이는 광원(MQW)으로부터 반사막에 도달하는 광량이 flat LED에 비해서 2배 이상 많기 때문이다. 본 연구의 결과는 LED칩에서 현수준의 광추출 효율을 정량적으로 평가할 수 있게 하였으며, 광추출 효율 향상을 위한 칩구조 설계에 기여

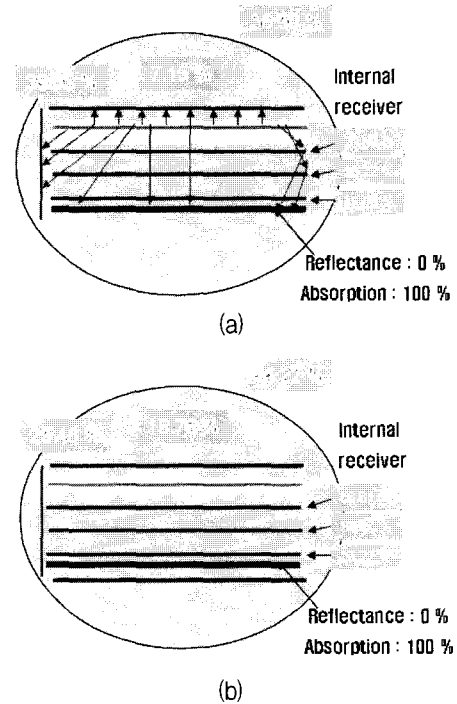


그림 6. 반사막으로 도달하는 광량 비교

(a) flat LED

(b) PSS(patterned sapphire substrate) LED

Fig. 6. The comparison of lights arrived at the reflector.

(a) flat LED

(b) PSS(patterned sapphire substrate) LED

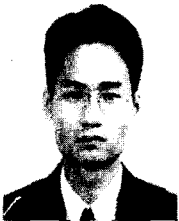
할 수 있을 것이다. 또한, 광추출 효율을 정량적으로 산출할 수 있다면, 외부양자효율(External quantum efficiency)로부터 내부양자효율(internal quantum efficiency)의 정량적 산출에 유용하리라 판단된다. 향후, 형광체의 빛의 scattering과 광변환 효율 등을 고려하여 실제 LED 칩으로부터 PKG 까지 실제 광효율을 정확하게 예측하고 설계할 수 있는 시뮬레이션 기술을 확보할 것이다.

참고 문헌

[1] E.F.Schubert, "light-emitting diodes", Cambridge university press, 2003.
 [2] T.Fujii, Y.Gao, R.Sharma, E.L.Hu, S.P.DenBarrs, and S.Nakamura, "Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening", Appl.Phys.Lett., Vol.84, No.6, 855, 2004.
 [3] R.Windisch, P.Heremans, A.Knoblock, P.Kiesel, G.H.Dohler, B.dutta, and G.Borghs, "Light-emitting diodes with 31% external quantum

- efficiency by outcoupling of lateral waveguide modes*", Appl.Phys.Lett., Vol.74, No.16, 2256, 1999.
- [4] H. W. Choi, M. D. Dawson, P. R. Edwards, and R. W. Martin, "High extractor efficiency InGaN micro-ring light-emitting diodes", Appl.Phys.Lett., Vol.83, No.22, 4483, 2003.
- [5] K. Orita, S. Tamura, T. Takizawa, M. Yuri, S. Takigawa, and D. Ueda, "High-extraction efficiency blue light-emitting diode using extended-pitch photonic crystal", Jpn. J.Appl.Phys, Vol.43, No.8B, 5809, 2004.
- [6] C. C. Sun, C. Y. Lin, T. X. Lee, and T. H. Yang, "Enhancement of light extraction of GaN-based light-emitting diodes with a microstructure array", Opt.Eng. 43(8), 1700, 2004.
- [7] K. Orita, S. Tamura, T. Takizawa, M. Yuri, S. Takigawa, and D. Ueda, "High-extraction efficiency blue light-emitting diode using extended-pitch photonic crystal", Jpn. J.Appl.Phys, Vol.43, No.8B, 5809, 2004.

 저자 소개



이진복(정회원)
1997년 한양대학교
전기공학과 학사 졸업.
1999년 한양대학교
전기공학과 석사 졸업.
2004년 한양대학교
전기공학과 박사 졸업.

2004-현재 삼성전기 중앙연구소 재직 중
<주관심분야 : 반도체 재료, LED, ZnO>



윤상호(정회원)
1994년 한양대학교
물리학과 학사 졸업.
1997년 한양대학교
물리학과 석사 졸업.
2002년 한양대학교
물리학과 박사 졸업.

현재 삼성전기 중앙연구소 재직 중
<주관심분야 : 반도체, 고체물리, 전산물리>



김동운(정회원)
1988년 연세대학교
기계공학과 학사 졸업.
1990년 연세대학교
기계공학과 석사 졸업.
2003년 연세대학교
기계공학과 박사 졸업.

현재 삼성전기 중앙연구소 재직 중
<주관심분야 : 광소자, MEMS, LED(Light emitting diode)>



최창환(정회원)
1986년 연세대학교
기계공학과 학사 졸업.
1991년 University of Colorado
기계공학과 석사 졸업.
1997년 North Carolina State
기계과 박사 졸업.

현재 삼성전기 중앙연구소 재직 중
<주관심분야 : 광소자, 전자부품>