

LED 광 추출 효율 향상을 위한 상부 층 특성 고찰

최철현 · 이동진 · 임해동 · 김보순 · 성준호 · 이민우 · 오범환[†]

인하대학교 정보통신공학부, 집적형 광자기술 연구센터
☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2010년 10월 1일 받음, 2011년 1월 21일 수정본 받음, 2011년 2월 14일 게재 확정)

본 논문에서는 통상적인 LED 구조 위에 추가적으로 상부 층을 형성하여 LED의 광 추출 효율을 개선하였다. 상부 층의 두께 및 굴절률 변화에 따른 LED의 광 방출 특성을 전산모사하였고 광 추출 효율이 개선되는 조건을 분석하였다. 약 1.05 ~ 1.40의 굴절률 범위에서 LED의 광방출이 증가하였다. 또한, 이 범위에서 두께가 증가할수록 광방출이 증가하였다. 굴절률이 1.30@589.3 nm 인 인덱스 매칭 액체를 실제 LED의 상부 층으로 형성하여 LED의 광 추출 효율이 약 22% 정도 향상됨을 실험적으로 보였다. 이렇게 LED 위에 상부 층을 형성하는 개념은 간단하게 LED의 광 추출 효율을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

A Study of the Upper Layer for Improvement of the Extraction Efficiency in LED

Chul Hyun Choi, Dong Jin Lee, Hae-Dong Yim, Bo-Soon Kim,

Jun-Ho Sung, Min Woo Lee, and Beom-Hoan O[†]

*Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA), School of Information and Communication Engineering,
INHA University, 253 YongHyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea*

(Received October 1, 2010; Revised manuscript January 21, 2011; Accepted February 14, 2011)

In this paper, we improved the light extraction efficiency by considering an additional upper layer on the top surface of a conventional LED. We simulated the LED's light emission as functions of the thickness and the refractive index of the upper layer, and analyzed how the condition improved the light efficiency. When the refractive index's range was from 1.05 to 1.40, the LED emission increased. For that case, the emission also increased as the thickness increased. We experimentally showed that the light extraction efficiency was improved about 22% by forming the upper layer on the top surface of an LED using material with refractive index 1.30 at 589.3 nm. It is expected that forming the upper layer on an LED can easily improve the extraction efficiency.

Keywords: LED, Extraction efficiency, Refractive index

OCIS codes: (230.3670) Light-emitting diodes; (130.0250) Optoelectronics; (240.0310) Thin films

I. 서 론

발광 다이오드(LED)는 기존의 여러 광원들을 대체할 차세대 광원으로써, 조명, 자동차, 의료, 디스플레이, 통신 등 첨단 산업에 널리 사용되고 있으며 점차 응용분야가 확대되고 있는 추세다. 이렇게 다양한 응용으로 인해 최근 들어 LED에 대한 관심이 늘어나고 있으며 활발히 연구되고 있다^[1, 2]. LED에서 방출되는 빛은 LED 내부의 활성층(active layer)에서 생성된다. 활성층에서 생성된 빛은 LED 내부의 여러 층을 지나 LED 외부로 방출된다. 이때 LED 소재와 공

기와의 굴절률 차이로 인해 활성층에서 생성된 빛이 일정 각도 이상으로 방출되면 공기와의 경계 면에서 내부로 전반사되어 외부로 방출되지 않는다. 이와 같이 LED 내부의 빛이 외부로 방출되는 효율을 광 추출 효율(extraction efficiency)이라고 한다. 일반적인 LED에서 방출되는 빛은 생성된 빛의 극히 일부분에 지나지 않으며 대부분의 빛은 LED 외부로 방출되지 못하고 내부에 갇히게 되어 LED의 광 추출 효율은 낮을 수 밖에 없다^[3].

광 추출 효율은 LED를 인위적으로 가공하여 많은 부분을 개선할 수 있다. 이러한 기술로는 LED 칩 표면 위에 기하학

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

적 요철구조를 만드는 텍스처링(texturing) 기술^[4], 나노 형상의 주기적 패턴인 포토닉 크리스탈(photonic crystal) 기술^[5], 사파이어(sapphire) 기판의 표면에 주기적인 요철을 가공한 사파이어 가공기판 (patterned sapphire substrate) 기술^[6], 매우 얇은 금속 막을 이용한 표면 플라즈몬 (surface plasmon) 기술^[7] 등이 잘 알려져 있다. 그러나, 이러한 기술들은 나노 기술 기반으로써, 대량 생산을 위한 LED 적용에 있어 제조 공정상의 문제점이나 기술적으로 해결되어야 할 부분들이 있다.

본 논문에서는 일반적인 LED 표면에 추가적으로 상부 층을 고려함으로써 공기와의 굴절률 차이를 감소시켜 LED 내부의 빛이 외부로 좀 더 방출될 수 있게 하였다. 이와 관련하여 상부 층의 두께나 굴절률 변화에 따른 LED의 광방출 특성을 고찰하였다. 상부 층의 두께나 굴절률에 따라 LED의 광방출 특성이 변화하였으며 특히, 다소 낮은 굴절률 범위에서 상부 층의 두께가 증가할수록 광 추출 효율은 증가하였다.

II. LED 구조 설정 및 결과 분석

그림 1은 본 논문에서 설정한 일반적인 GaN 기반의 청색 LED 구조이다. 이때 LED의 전극 형성을 위한 구조는 고려하지 않았다. 각 층의 두께 및 굴절률을 그림 1에 각각 표시하였다. 일반적인 GaN 기반의 청색 LED 구조에서 투명 전극인 Indium tin oxide (ITO) 위에 추가로 상부 층을 설정하였다. 이때 상부 층의 두께 및 굴절률을 각각 변화시키면서 LED의 광방출 특성을 고찰하였다.

이를 위해 그림 2와 같이 전산모사용 LED 측정 셋업을 설정하였으며, 전산모사는 잘 알려진 광선추적 법(ray tracing)을 이용하였다. 그림 1의 LED 상부 층 위쪽 방향으로 디텍터가 위치하여 각각의 발산각도(지향각)에 맞게 디텍터의 수

광조건을 변화시켰다. 이때 LED의 중심과 디텍터의 중심은 일치하며 중심간의 거리(d)는 변화한다. 활성층에서 생성된 빛은 활성층의 모든 방향으로 방출되고 위쪽으로 방출된 빛은 디텍터에서 검출된다. 이때 디텍터는 정사각형 구조로 한 변의 길이는 10 mm이다. 표 1은 각각의 d에서 디텍터의 수광각도이다.

그림 2의 셋업에 대해 광선추적 법을 이용하여 각각의 d에서 상층부의 굴절률 및 두께에 대해 수광파워 변화를 그림 3(a)-(f)에 나타내었다. 굴절률은 1.0에서 2.4까지 변화시켰으며 두께는 LED 위에 형성할 수 있는 코팅 두께를 고려하여 100 μm까지 증가시켰다. 이때 각각의 수광각도에 대해 수광파워는 굴절률 1.05 ~ 1.40 범위에서 증가하였으며 특히 이 굴절률 범위에서는 두께가 증가할수록 증가하였다. 그 외 굴절률 범위에서는 상부 층의 두께가 증가하여도 수광파워는 크게 증가하지 않았다.

그림 3에서 디텍터의 수광 각도에 따라 최대의 광방출을 보이는 조건이 있으며 이러한 특성을 그림 4에 정리하였다. 각각의 수광각도에 따른 최대 및 최소 광파워 변화를 나타내었으며 최소 광파워는 상부 층이 없는 통상적인 LED의 광파워이다. 이를 바탕으로 이에 대한 광 추출 효율 변화를 함께 나타내었다. 이때 최대 광파워를 보이는 상부 층의 두께는

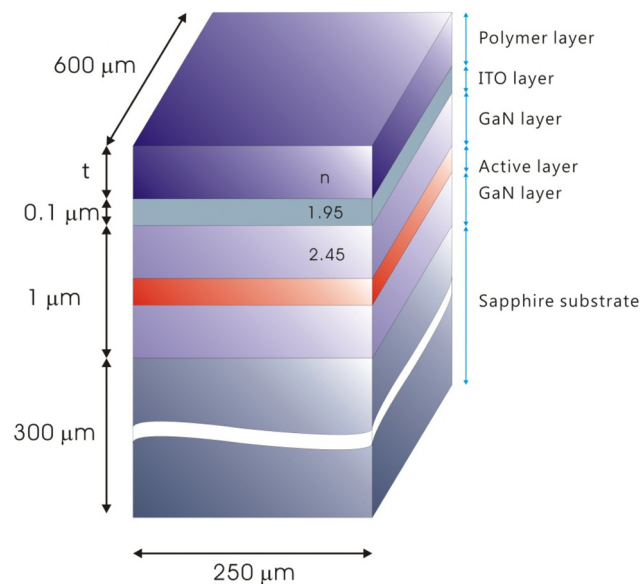


FIG. 1. Schematics of the LED structure.

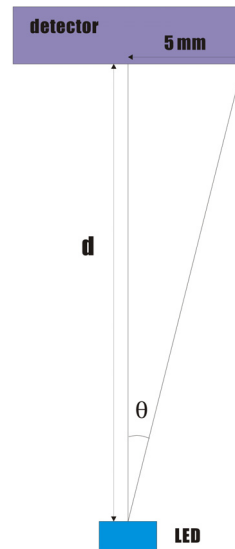


FIG. 2. Set up for simulating the optical power of LED.

TABLE 1. Receiving angles at each measurement distance

Distance d (mm)	(degree)
20	14.036
10	26.565
5	45.000
3	59.036
1	78.690
0.2	87.709

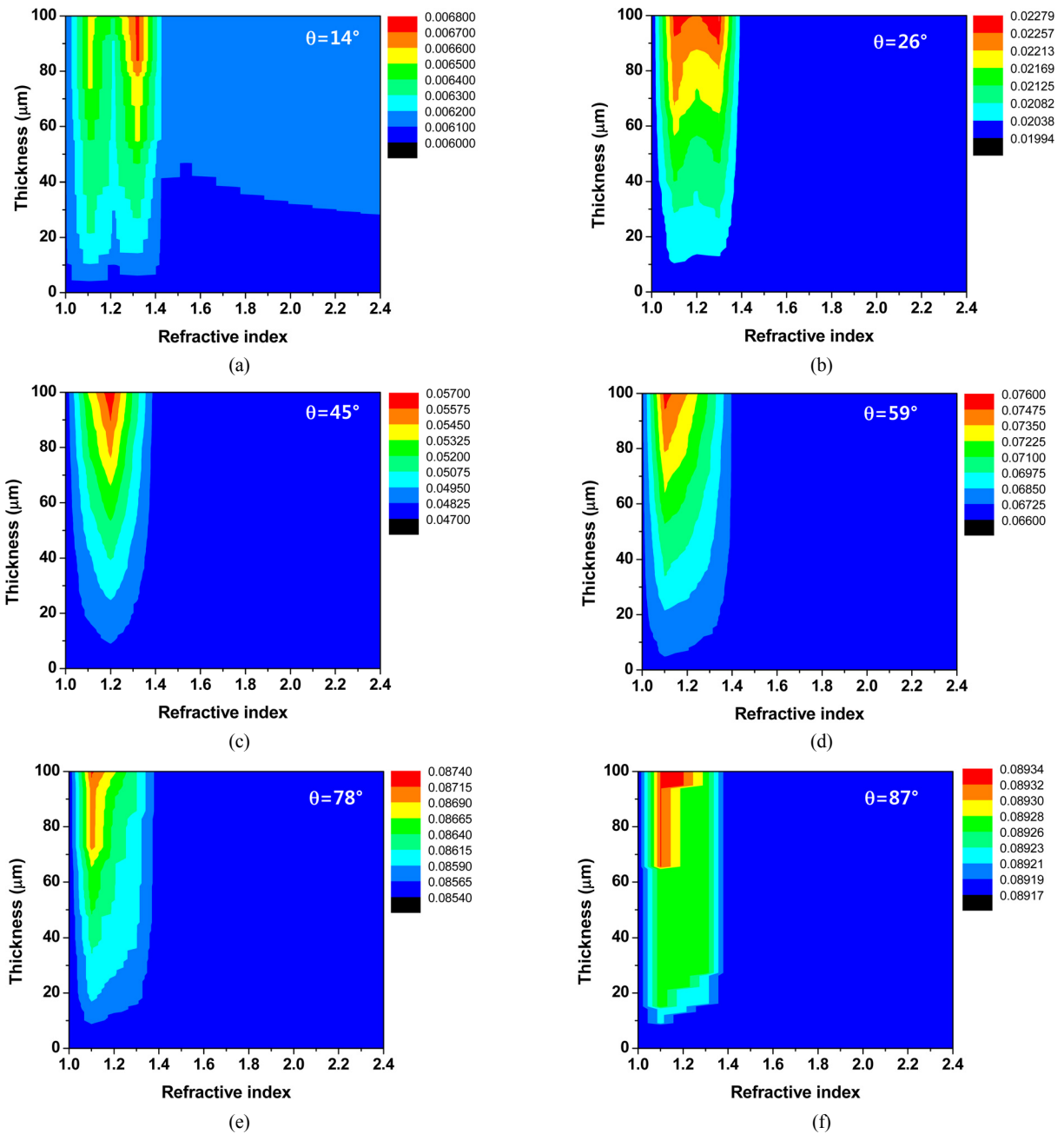


FIG. 3. Receiving optical power distribution as the refractive index and the thickness of the upper layer. The angle to receive optical power increases from (a) to (f).

100 μm이며 굴절률은 $\theta=14^\circ$ 일 때 1.32, $\theta=26^\circ$ 일 때 1.1~1.3, $\theta=45^\circ$ 일 때 1.15~1.22, $\theta=59^\circ$ 일 때 1.1~1.13, $\theta=78^\circ$ 일 때 1.1, $\theta=87^\circ$ 일 때 1.1~1.2이다. 100 μm는 본 논문에서 코팅을 고려한 최대 두께이지만, 만약 상부 층의 두께가 이보다 증가하면 최대 광파워는 더욱 더 증가할 것으로 예상된다. 수광각도가 넓어짐에 따라 디텍터에 도달하는 광파워가 증가하고 있다. 그 이유는 LED에서 방출되는 빛은 임의의 각도 범위 내에서 발산하므로 수광각도가 증가하면 수광영역이 넓어져 수광되는 광파워가 증가하기 때문이다. 또한, 90°근방에서는 최대 파워와 최소 파워의 차이가 거의 없는 것을

알 수 있다. 광 추출 효율은 거의 모든 영역을 수광하는 90° 근방을 제외하고는 상대적으로 많이 개선되었으며 특히 45° 근방에서 광 추출 효율은 약 22%만큼 개선되었다. 이러한 특성들을 통해 LED 표면 위에 상부 층을 추가함으로써 LED의 광파워 향상뿐만 아니라 발산각을 좁힐 수 있는 구조로 작용할 수 있다.

앞서 상부 층이 적절한 두께나 굴절률 값으로 형성되면 LED의 광방출이 증가하였다. 이와 관련하여 상부 층의 두께나 굴절률 값에 따른 광방출 특성의 변화를 알아보도록 하자. 우선 그림 5 (a), (b), (c)는 각각의 상부 층 두께에 대해

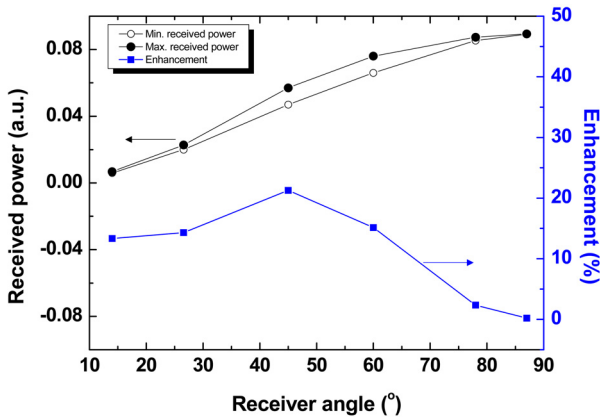


FIG. 4. The characteristics of maximum and minimum of optical power received (left) and the enhancement of the optical extraction in each receiver angle (right), respectively.

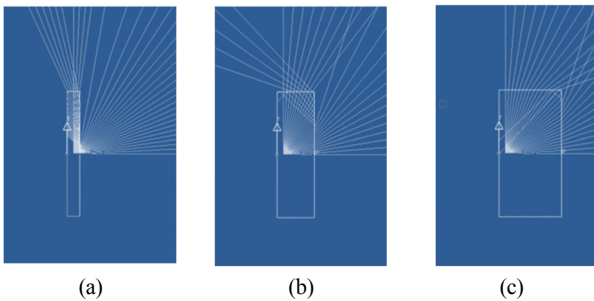


FIG. 5. Schematic diagram shows the variation of the optical path in each thickness of the upper layer. The thickness increases from (a) to (c).

중심에서 방출된 35개 광선의 광 경로를 나타낸 것으로써 이를 통해 두께 변화에 대한 광 방출 특성을 개략적으로 알아보고자 한다. 그림 5 (a)는 상부 층의 두께가 얇은 경우로써, 측면으로 방출되는 빛이 상대적으로 많으며 그 중 전방향이 아닌 뒷방향으로 방출되는 빛이 다수 존재한다. 그림 5 (b)는 좀 더 두꺼운 상부 층으로써 그림 5 (a)에서 측면으로 방출되던 빛이 좀 더 전방향으로 진행하고 있다. 그림 5 (c)는 가장 두꺼운 상부 층 구조로써 측면에서 방출되는 빛의 대부분이 전방향으로 진행하고 있다. 이로써 상부 층은 LED에서 방출되는 빛의 경로를 전방향으로 전환시켜 좀 더 많은 빛이 LED 전방으로 방출할 수 있도록 도와주는 역할을 한다.

그림 6 (a)와 (b)는 LED의 활성층에서 생성된 빛이 LED의 위쪽 표면으로 방출될 경우, GaN 층에 입사하는 빛의 각도에 따른 투과율 변화이다. 이때 중심파장은 450 nm이며 편광은 S-wave이다. 그림 6 (a)에서 상부 층의 굴절률은 1.35로 그림 3에서 광방출이 향상된 굴절률 값이다. 이때 두께는 100 μm이다. 상부 층이 없는 경우는 입사각에 따라 감소하는 잘 알려진 특성을 보이며 수직 입사의 경우 약 85% 정도의 투과율을 보인다. 이에 비해 상부 층이 있을 경우, 상부 층의 두께가 ITO 층에 비해 매우 두꺼우므로 진동하는 형태

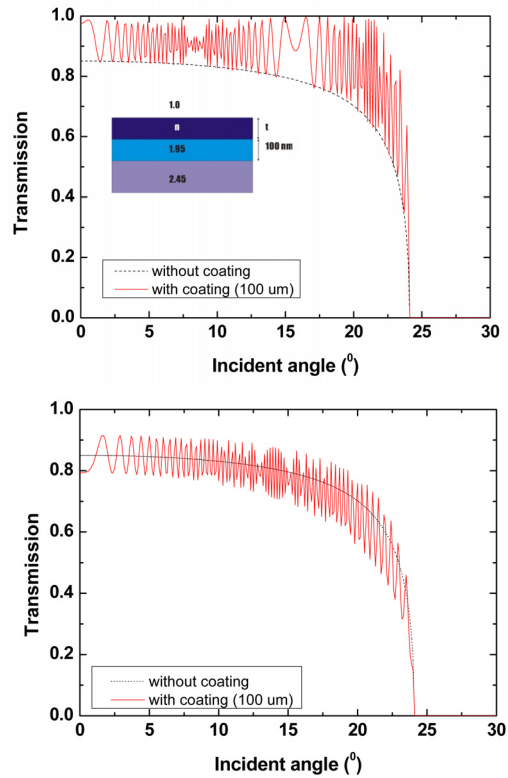


FIG. 6. Characteristics of transmission as a function of the incident angle when the refractive indices are (a) 1.35 and (b) 2.20, respectively. The dotted line and the solid line are without and with upper layer, respectively.

의 투과율을 보이며, 수직 입사의 경우 약 98% 정도의 높은 투과율을 보인다. 특히, 입사각에 대해 상부 층이 있으면 전반적으로 상부 층이 없는 경우와 비교하여 더 높은 투과율을 보인다. 그림 6 (b)는 상부 층의 굴절률이 2.2이며 상부 층의 두께는 100 μm이다. 상부 층이 있는 경우, 그림 6 (a)에서와 마찬가지로 진동하는 형태이나 그 중심선이 상부 층이 없는 경우의 곡선과 거의 비슷하여 전반적인 투과율 변화는 없다. 상부 층의 굴절률이 LED의 굴절률만큼 높아지면 LED와 상부 층의 경계 면에서 굴절률 차이가 적어지므로 LED와 공기와의 경계 면보다는 광 방출이 증가하나 최종적으로 상부 층과 공기와의 굴절률 차이가 높아 광방출은 다시 낮아진다. 이로써 상부 층은 공기와 LED의 큰 굴절률 차이를 완화할 수 있는 굴절률로 결정되어야 하며 그렇지 않을 경우, 상부 층의 두께가 두꺼워져도 광 방출의 향상을 기대하기는 어렵다.

이제 앞서 언급된 결과에 대해 실험을 통해 그 특성을 파악하고자 한다. 통상적인 GaN 기반의 청색 LED (C-LED)와 그 표면 위에 상대적으로 낮은 굴절률의 물질이 올라가 있는 LED (I-LED)의 전기광학적 특성을 비교하고자 한다. 여기서 사용된 LED의 중심파장은 450 nm이며 LED와 디텍터 사이의 거리는 20 mm이다. 앞선 결과에서 LED의 광방출은 1.4 이하의 낮은 굴절률에서 개선되었다. 이를 위해 본 논문에서는 1.30@589.3 nm의 굴절률(공급자 제공 수치)을 가지는 인

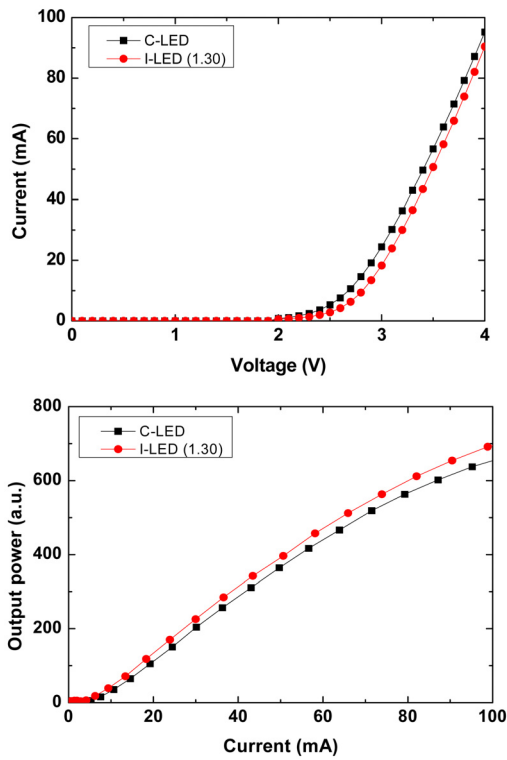


FIG. 7. (a) Current as a function of operating voltage and (b) light output power as a function of operating current are compared with the conventional LED.

텍스 매칭 액체를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 액체는 LED 위에 균일하게 코팅이 되지 않아 액체 속에 담겨 실험을 진행하였다. 또한, 본 실험에서 사용한 인덱스 매칭 액체는 파장변화에 대한 굴절률 변화가 미미하여 450 nm로 파장이 감소하여도 굴절률은 0.002에서 0.003 정도 증가한다. 먼저 C-LED의 I-V와 L-I 특성을 측정하였다. 그 후 측정된 LED를 인덱스 매칭 액체에 담겨 마찬가지로 I-LED의 I-V와 L-I 특성을 측정하였다. 측정된 결과를 그림 7 (a)와 (b)에 나타내었다. 그림 7 (a)에서 I-V 특성은 많은 차이는 아니지만 C-LED가 좀 더 좋은 특성을 보였다. LED 위에 올라간 물질이 전류 흐름에 있어 미세한 영향을 미치는 것으로 보인다. 그림 7 (b)에서 L-I 특성은 I-LED가 우수한 특성을 보였으며 20 mA 기준에서 광 추출 효율은 약 22% 정도 향상되었다. 여기서 I-LED는 액체에 넣어서 2 ~ 3 mm 정도의 다소 높은 두께가 상부 층으로 형성되므로 앞서 계산한 두께 범위 보다 상당히 높기 때문에 좀 더 많이 광 추출 효율이 개선된 것으로 사료된다.

III. 결 론

본 논문에서는 통상적인 LED 구조 위의 상부 층을 형성하여 그 특성을 고찰하였다. 상부 층의 두께나 굴절률에 따라 광방출 효율이 변화하였다. 특히, 상부 층의 굴절률이 1.05 ~

1.40의 범위에서 광방출 효율이 증가하였으며 이 범위에서 두께가 증가할수록 광방출 효율이 증가하는 특성을 보였다. 상부 층이 LED 위에 형성되면 통상적인 LED 표면에서 방출된 빛이 상부 층의 측면에서 반사가 이루어져 상부 층 표면으로 방출될 수 있는 기회를 증가시킬 수 있어 광방출이 증가하였다. 상부 층의 굴절률이 적절하지 않으면 LED와 상부 층의 경계 면이나 상부 층과 공기와의 경계 면에서 어느 한쪽만을 보상할 수 밖에 없으므로 양쪽 모두를 적절히 보상할 수 있는 중간 굴절률 범위에서 광방출이 증가하였다. 또한, 인덱스 매칭 액체를 사용하여 LED의 광방출 특성을 실험하였으며 20 mA에서 약 22 % 정도의 광방출 효율을 개선할 수 있었다. LED 위에 적절한 굴절률의 물질을 두꺼운 두께로 추가함으로써 보다 많은 양의 빛을 외부로 방출함과 동시에 LED의 발산각을 좁혀 줄 수 있으므로 이러한 특성은 LED 칩 설계나 패키지에 있어서 널리 응용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022-03002-0)를 통하여 과학재단의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. M. S. Shur and R. Zukauskas, "Solid-state lighting: toward superior illumination," *Proc. IEEE* **93**, 1691-1703 (2005).
2. M. H. Crawford, "LEDs for solid-state lighting: performance challenges and recent advances," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **15**, 1028-1040 (2009).
3. Y. K. Ee, P. Kumnorkaew, R. A. Arif, H. Tong, H. Zhao, J. F. Gilchrist, and N. Tansu, "Optimization of light extraction efficiency of III-Nitride LEDs with self-assembled colloidal-based microlenses," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **15**, 1218-1225 (2009).
4. S. C. Hsu, C. Y. Lee, J. M. Hwang, J. Y. Su, D. S. Wu, and R. H. Horng, "Enhanced light output in roughened GaN-based light-emitting diodes using electrodeless photoelectrochemical etching," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18**, 2472-2474 (2006).
5. M. Boroditsky, T. F. Krauss, R. Coccioli, R. Vrijen, R. Bhat, and E. Yablonovitch, "Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1036-1038 (1993).
6. J. H. Lee, J. T. Oh, S. B. Choi, Y. C. Kim, H. I. Cho, and J. H. Lee, "Enhancement of InGaN-based vertical LED with concavely patterned surface using patterned sapphire substrate," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20**, 345-347 (2008).
7. P. A. Porta, M. Harries, and H. D. Summers, "Surface plasmon mediated emission in resonant-cavity light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.* **89**, 121120-1~121120-3 (2006).