

청색 마이크로 LED의 광 추출 효율에 미치는 칩 크기 의존성 연구

박현정, 차유정, 곽준섭 

순천대학교 인쇄전자공학과

Chip Size-Dependent Light Extraction Efficiency for Blue Micro-LEDs

Hyun Jung Park, Yu-Jung Cha, and Joon Seop Kwak

Department of Printed Electronics Engineering, Suncheon National University, Suncheon 57922, Korea

(Received September 20, 2018; Revised October 08, 2018; Accepted October 12, 2018)

Abstract: Micro-LEDs show lower efficiencies compared to general LEDs having large areas. Simulations were carried out using ray-tracing software to investigate the change in light extraction efficiency and light distribution according to chip-size of blue flip-chip micro-LEDs (FC μ -LEDs). After fixing the height of the square FC μ -LED chip at 158 μm , the length of one side was varied, with dimensions of 2, 5, 10, 30, 50, 100, 300, and 500 μm . The highest light-extraction efficiency was obtained at 10 μm , beyond which the efficiency decreased as the chip-size increased. The chip size-dependence of the FC μ -LEDs both without the patterned sapphire substrate, as well as vertical FC μ -LEDs, were analyzed.

Keywords: Micro LED (light emitting diode), Light extraction efficiency, Chip size, Ray tracing simulation

1. 서론

질화갈륨 기반의 LED (light emitting diode)는 고 전류밀도 주입 시 내부 양자 효율이 감소한다는 문제점이 있다 [1]. 이 현상을 efficiency droop이라 하며 오제 재결합(auger recombination), 전자범람(electron overflow), 정공 주입 효율 감소(poor hole injection), 캐리어 비편재화(carrier delocalization), 전류밀도에 의한 결함 재결합(defect recombination strongly dependent on current density), 전류 집중(current crowding)과 같은 다양한 메커니즘을 통해 설명된다 [2-7]. 하지만 현재까지 그 원인은 완전히 밝혀지지 않은 상태이다. 최근 마이크로 픽셀 LED는 일반 대면적 LED와 비교하여 고유한 전기 및 효율 특성을 보유하고 있음이 입증되었다. 마이크로 LED는 10 kA/cm^2 의 매우

높은 주입 전류밀도를 유지할 수 있다는 장점이 있다 [8-10]. 또한 일반적으로 LED 칩을 수십 마이크로 수준으로 작게 제작하면 무기물 재료의 특성인 휘어질 때 깨지는 단점을 극복할 수 있으며, 저전력 구동 플렉서블 디스플레이, 바이오 융합 분야, 전도성 섬유 및 다양한 응용 분야에 광범위하게 적용될 수 있다 [11].

그러나 칩의 크기가 100 μm 이하인 마이크로 LED의 외부 양자 효율은 20~30%이며 일반 대면적 칩이 70~80%인 것에 비해 매우 낮다는 단점이 있다. 외부 양자 효율은 내부 양자 효율과 광 추출 효율에 의해 결정된다. 내부 양자 효율은 사용된 반도체의 품질과 전류주입 효율에 의해 결정되며 전기적 에너지가 빛에너지로 변환되는 효율을 의미한다. 광 추출 효율은 LED 내부의 다중양자우물에서 발생한 빛이 외부로 방출되는 효율을 의미하며 외부 양자 효율은 생성된 빛 에너지가 물질 외부로 실제로 탈출하는 효율을 의미한다. 같은 내부 양자 효율을 갖는 LED일지라도 광 추출 효율에 의해 다른 외부 양자 효율을 가질 수 있다. 광 추출 효율은 빛이 칩의 내부에서 외부로 탈출할 때 매질의 굴절률 차이에 의해 발생하는 내부전반사 때문에

✉ Joon Seop Kwak; jskwak@sunchon.ac.kr

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

감소하게 된다. 낮은 광 추출 효율을 향상시키기 위해 flip-chip LED, vertical LED와 같은 칩 구조, 표면 요철, patterned sapphire substrate (PSS), 광결정, 반사방지막과 같은 기술이 적용되고 있다 [12-17].

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션 방법 기반의 ray tracing 광학설계 프로그램인 LightTools (Synopsys: LightTools 8.5.0)를 이용하여 마이크로 LED의 크기에 따른 광 추출 효율 변화를 알아보기 위한 시뮬레이션을 진행하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 blue flip-chip micro-LEDs (FC μ -LEDs) 단면 구조를 보여준다. 450 nm 파장의 FC μ -LEDs는 아래쪽에서부터 실버 리플렉터, p-GaN, 발광층, n-GaN, 사파이어 기판 순으로 설계되었으며 사파이어 기판에는 지름 3.8 μ m, 사이 거리 0.2 μ m의 PSS가 적용되었다. 각 층에 대한 높이와 굴절률 정보를 표 1에 나타내었다. 조도 측정을 위한 디텍터는 0.1 μ m 떨어진 곳에 위치한다. LED 칩의 높이는 158 μ m로 고정하고 칩 크기 변화에 따른 상면과 측면의 광 추출 효율 및 배광 분포 경향을 LightTools 프로그램 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이후 PSS가 제외된 non PSS 모델과 사파이어 기판이 제외된 vertical FC μ -LEDs 모델에 대

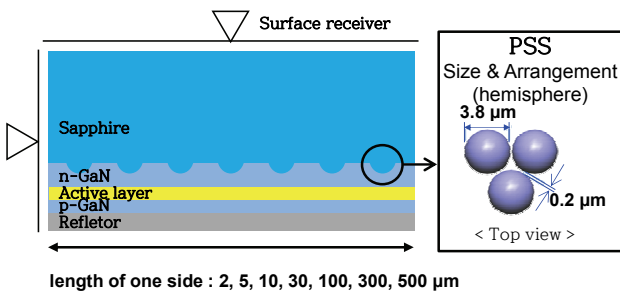


Fig. 1. Cross-sectional image of the FC μ -LEDs.

Table 1. Height and refractive index of the each layer.

Materials	Thickness	Refractive index
p-GaN	0.15 μ m	2.45
Active layer	0.1 μ m	2.54
n-GaN	6.75 μ m	2.45
Sapphire	150 μ m	1.78
Reflector	1 μ m	0.151

한 광 추출 효율의 칩 크기 의존성에 대한 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 FC μ -LEDs의 광 추출 효율 칩 크기 의존성

첫 번째로 칩 크기에 따른 FC μ -LEDs의 광 추출 효율 및 배광 분포 경향을 알아보기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 2(a)는 칩 크기에 따른 광 추출 효율 결과 그래프를 보여준다. 정사각형 칩의 한 변의 길이를 2, 5, 10, 30, 50, 100, 300, 500 μ m까지 변화시켜 가며 경향을 분석했다. 광도 및 조도 측정을 위한 서페이스 리시버를 칩의 상면과 측면에 각각 두었고, 전체 광량 측정을 위한 파필드 리시버를 두었다. 칩 크기가 증가할수록 상면 효율은 증가했고, 전체 광 추출 효율과 측면 효율은 칩의 한 변의 길이가 10 μ m에서 76.8%로 가장 높았지만 그 이후로 감소하는 경향을 보였다. 2 μ m에서 10 μ m까지는 광 추출 효율이 증가하다가 이후에 감소했다. 그 이유는 상면 효율은 칩 크기 증가에 따라 꾸준히 증가하는 반면, 측면 효

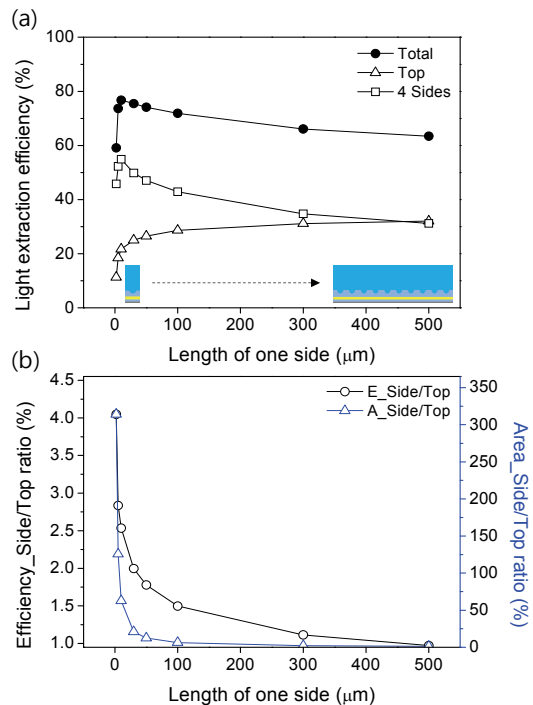


Fig. 2. (a) Result of light extraction efficiency and (b) side/top ratio according to changing the length of one side of the FC μ -LEDs.

율은 10 μm 에서 54.9%까지 증가하다가 이후 감소했고 그 감소율이 더 크기 때문이다. 칩 크기가 일반 LED 크기가 되면 상면 효율 증가율도 낮아진다. 이때, 상면으로 탈출하지 못한 광은 측면으로 탈출하지 못하고 내부전반사에 의해 소멸되어 전체 광 추출 효율이 감소하는 경향이 나타나게 된다. 결과적으로 마이크로 크기를 가질 때의 칩 형상이 일반적인 LED 칩 형상보다 더 높은 효율을 갖는 것을 확인하였다. 그림 2(b)는 칩의 측면/상면의 광 추출 효율 비와 면적 비를 보여준다. 100 μm 이하의 마이크로 크기에서는 칩의 한 변의 길이 변화에 따른 면적 비의 변화가 상당히 크다. 이는 상면적이 길이의 제곱에 비례해 증가하기 때문이다. 광 추출 효율 비 또한 100 μm 이하의 마이크로 크기에서 상면적 증가에 따라 광 탈출이 용이해져 상면 효율이 비교적 급격히 증가했다. 칩의 한 변의 길이가 500 μm 일 때는 상면과 측면의 면적 비와 효율 비가 유사하게 나타났다.

그림 3은 칩 크기에 따른 측면조도 이미지를 나타낸다. 광원에는 1 W 전력을 적용하였다. 에피층에서 주로 발광하며 칩 크기가 증가할수록 기판 측면에서 비교적 균일하게 발광하는 경향을 보인다. 칩 한 변의 길이가 10 μm 인 모델의 경우 광 이동이 가능한 공간이 좁기 때문에 PSS에 맞고 공기 중으로 탈출하거나, 사파이어 기판의 20 μm 거리 부근까지에서 주로 발광한

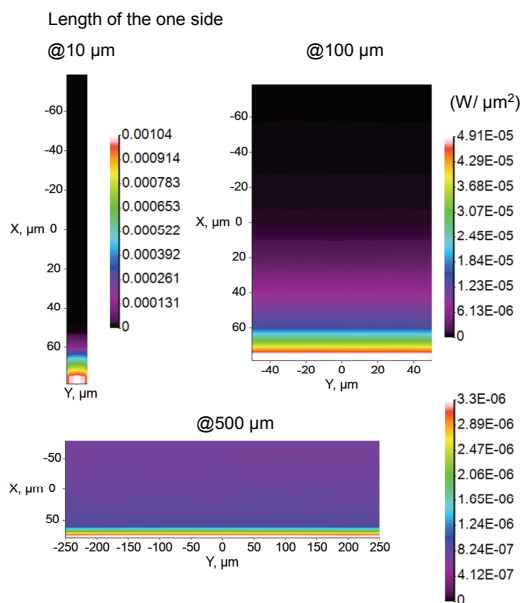


Fig. 3. Image of the side irradiance according to changing the length of one side of the FC μ -LEDs.

다. 칩 크기가 증가할수록 광 이동 공간이 넓어지고 PSS를 통해 사파이어 기판 쪽으로 이동하여 측면이나 상면으로 탈출하는 광이 많아지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 칩 크기가 작을수록 에피층 부근에서 집중적으로 광 탈출이 발생하며, 칩 크기가 클수록 측면에서 전반적으로 광 탈출이 발생하는 것을 확인하였다.

그림 4는 배광 단면 이미지를 나타낸다. 리시버의 0~360 L, 0~90 V까지의 범위에서 측정된 광 추출 효율 결과 또한 확인했다. 즉, 아래 방향으로 향하는 광을 무시하고 상부로 향하는 광만 고려한다면, 칩 한 변의 길이 100 μm 에서 62.8%까지 효율 향상 후 다시 감소했다. 그 이유는 칩 크기가 증가할수록 아래 방향으로 향하는 광이 감소하는데 100 μm 이하의 마이크로 칩 크기에서는 아래로 향하는 광이 많기 때문이다. 이를 보여주는 ray tracing 이미지를 그림 5에 나타내었다.

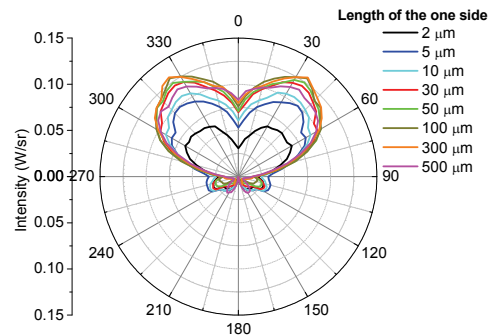


Fig. 4. Far-field light intensity angular distribution for the FC μ -LEDs.

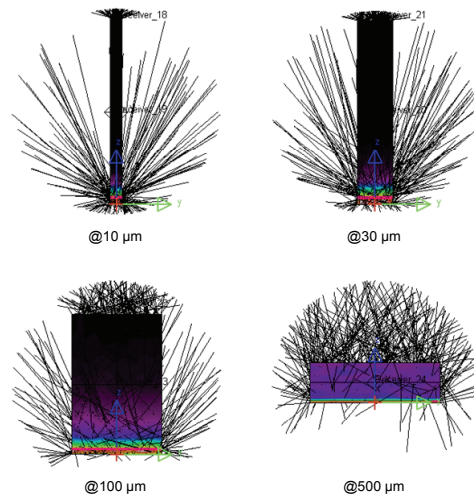


Fig. 5. Image of the ray tracing according to changing the length of one side of the FC μ -LEDs.

3.2 Non PSS FC μ -LEDs의 광 추출 효율 칩 크기 의존성

두 번째로 칩 크기에 따른 non PSS FC μ -LEDs의 광 추출 효율 경향을 알아보기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 6(a)는 칩 크기 변화에 따른 광 추출 효율 결과를 나타내며, 그림 6(b)는 칩의 측면/상면의 광 추출 효율 비와 면적 비를 나타낸다. FC μ -LEDs 시뮬레이션 결과와 달리 상면 효율의 변화가 없었다. 따라서 칩 크기가 증가할수록 측면 효율 감소에 따른 전체 광 추출 효율 감소 현상이 나타났다. 이것은 광 경로를 다양하게 변화시켜 줄 PSS가 없기 때문에 칩 크기가 증가할수록 광 탈출에 불리한 칩 형상이 되기 때문이다. 칩의 측면/상면 광 추출 효율 비는 선형적으로 감소하는 것을 보여준다. 그림 7은 배광 단면 이미지를 나타낸다. PSS 유무에 따라 배광이 다른 것을 확인할 수 있다. non PSS FC μ -LEDs는 앞서 설명한 이유에 의해 0도 방향으로 향하는 빛이 변화가 없고 측면 방향으로 향하는 빛이 감소함에 따라 전체적인 배광 형상이 변하게 된다. 또한 FC μ -LEDs 시뮬

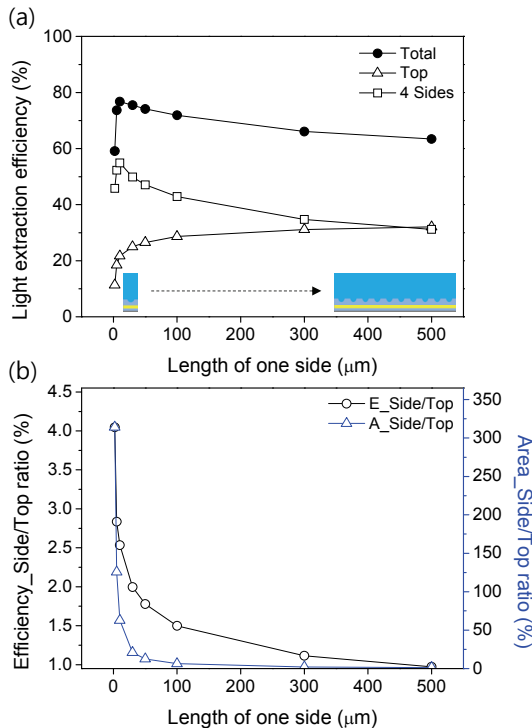


Fig. 6. (a) Result of light extraction efficiency and (b) side/top ratio according to changing the length of one side of the non PSS FC μ -LEDs.

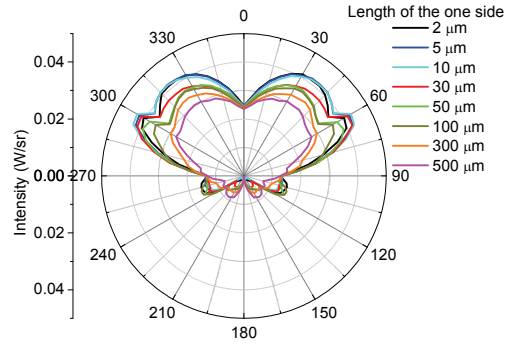


Fig. 7. Far-field light intensity angular distribution for the non PSS FC μ -LEDs.

레이션 결과와 달리 상부로 향하는 빛만 고려한 광 추출 효율은 칩 크기가 증가함에 따라 칩 한 변의 길이 10 μ m 이후에 꾸준히 감소하는 경향을 보였다. 이는 전체 광 추출 효율 경향과 비슷하며 PSS가 없기 때문에 칩 크기가 증가함에 따른 아래 방향으로 광 탈출이 발생하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 Vertical FC μ -LEDs의 광 추출 효율 칩 크기 의존성

세 번째로 칩 크기에 따른 vertical FC μ -LEDs의 광 추출 효율 경향을 알아보기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 8(a)는 칩 크기 변화에 따른 광 추출 효율 결과를 나타내며, 그림 8(b)는 칩의 측면/상면의 광 추출 효율 비와 면적 비를 나타낸다. 칩 크기가 증가함에 따라 상면 효율은 증가하고 측면 효율은 감소하였다. 상면 효율 증가량보다 측면 효율 감소량이 더 크기 때문에 전체 광 추출 효율은 칩 한 변의 길이 5 μ m에서 84% 이후로 감소하는 경향을 보였다. Vertical FC μ -LEDs는 비교적 가장 높은 광 추출 효율을 보이는데 이는 사파이어 기판을 제거함으로써 에피층에서 공기 증으로 바로 탈출하여 광량의 손실이 적기 때문이다. 앞선 두 시뮬레이션에 비해 가장 측면/상면 면적 비와 효율 비가 유사한 그래프를 보인다. 그림 9는 배광 단면 이미지를 나타낸다. 칩 크기가 증가할수록 상부로 향하는 광량이 증가하며 하부로 향하는 광량은 감소한다. 상부에서만 향하는 광 추출 효율을 확인한 결과, 칩 한 변의 길이 100 μ m까지 증가하다가 이후로 세츄레이션되는 현상을 보였다. 상부로 나오는 광량은 변화가 없어지는데 하부로 향하는 광량은 줄어들기 때문에 전체 광 추출 효율이 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

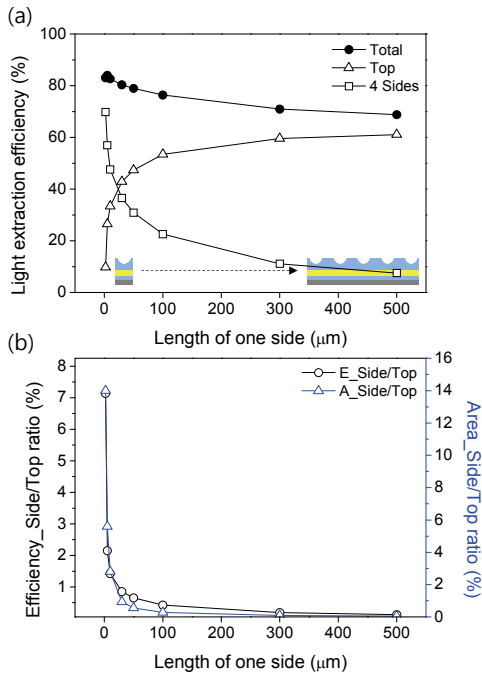


Fig. 8. (a) Result of light extraction efficiency and (b) side/top ratio according to changing the length of one side of the vertical FC μ -LEDs.

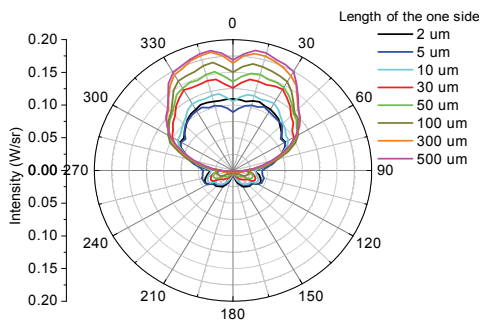


Fig. 9. Far-field light intensity angular distribution for the vertical FC μ -LEDs.

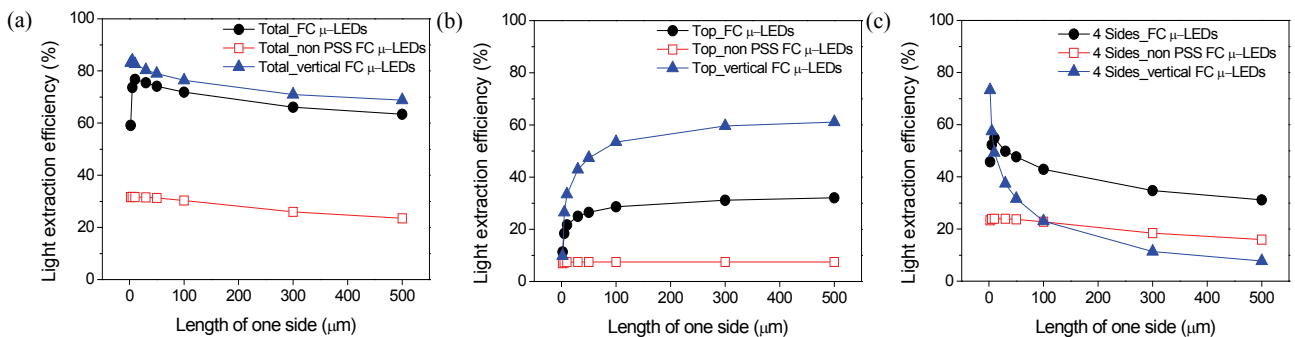


Fig. 10. Light extraction efficiency of (a) total, (b) top, and (c) 4 sides area according to changing the length of one side of the LEDs.

4. 결론

본 연구에서는 FC μ -LEDs, non PSS FC μ -LEDs, vertical FC μ -LEDs의 전체, 상면, 측면 광 추출 효율의 칩 크기 의존성을 연구하였고, 그 결과 그림 10에서 나타낸 바와 같이, vertical FC μ -LEDs는 다른 두 모델보다 전체 광 추출 효율이 칩 한 변의 길이 5 μ m에서 84%로 가장 높았으며 상면 효율 증가율과 측면 효율 감소율이 가장 크게 나타났다. vertical FC μ -LEDs는 FC μ -LEDs에 비해 칩 한 변 길이 100 μ m 기준에서 6.4% 높은 효율을 보인다. 상면 효율 그래프를 보면 non PSS FC μ -LEDs는 변화가 없으며 FC μ -LEDs와 vertical FC μ -LEDs는 마이크로 크기인 100 μ m까지 비교적 급격히 효율이 증가하다가 이후에는 증가율이 감소하는 경향을 보였다. 100 μ m 기준에서 FC μ -LEDs는 28.6%, vertical FC μ -LEDs는 53.4% 효율을 보였다. 측면 효율 그래프는 vertical FC μ -LEDs가 칩 크기 증가에 따라 가장 큰 폭으로 감소하는 것을 보여준다. 500 μ m에서는 대부분의 빛이 상면을 통해 탈출하는데 이는 상면적이 측면적에 비해 약 18배 더 크고 칩 형상이 아주 납작한 판형상으로 측면으로 광이 탈출하기 힘든 구조를 갖기 때문이다. 본 연구를 통해 100 μ m 이하의 마이크로 크기에서 FC μ -LEDs와 vertical FC μ -LEDs의 광 추출 효율이 증가함을 확인했다. 하지만 마이크로 LED의 외부 양자 효율은 efficiency droop에 의한 내부 양자 효율 감소에 따른 영향이 큰 것으로 확인된다. 이 문제가 개선된다면 마이크로 LED는 자동차, 디스플레이, 의료, 섬유 등 다양한 분야에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Joon Seop Kwak

<https://orcid.org/0000-0002-1706-7258>**감사의 글**

본 논문은 한국연구재단 이공분야 기초연구사업 지원(NRF-2014R1A6A1030419, 2018R1D1A3A03000779)으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] J. Piprek, *Phys. Status Solidi A*, **207**, 2217 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201026149>]
- [2] Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 141101 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2785135>]
- [3] M. H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai, J. K. Kim, E. F. Schubert, J. Piprek, and Y. Park, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 183507 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2800290>]
- [4] X. Ni, Q. Fan, R. Shimada, Ü. Özgür, and H. Morkoç, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 171113 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3012388>]
- [5] Y. Yang, X. A. Cao, and C. Yan, *IEEE Trans. Electron Devices*, **55**, 1771 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2008.923561>]
- [6] J. Hader, J. V. Moloney, and S. W. Koch, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 221106 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3446889>]
- [7] Y. Y. Kudryk and A. V. Zinovchuk, *Semicond. Sci. Technol.*, **26**, 095007 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/26/9/095007>]
- [8] Z. Gong, S. Jin, Y. Chen, J. McKendry, D. Massoubre, I. M. Watson, E. Gu, and M. D. Dawson, *J. Appl. Phys.*, **107**, 013103 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3276156>]
- [9] P. Tian, J.J.D. McKendry, Z. Gong, B. Guilhabert, I. M. Watson, E. Gu, Z. Chen, G. Zhang, and M. D. Dawson, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 231110 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4769835>]
- [10] T. K. Kim, M. U. Cho, J. M. Lee, Y. J. Cha, S. K. Oh, B. Chatterjee, J. H. Ryou, S. Choi, and J. S. Kwak, *Phys. Status Solidi A*, **215**, 1700571 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201700571>]
- [11] T. Jeong, *Inf. Disp.*, **17**, 18 (2016).
- [12] S. J. Park, *LED Light extraction technology*, <http://webzine.kps.or.kr/contents/data/webzine/webzine/14762094724.pdf> (2008).
- [13] H. J. Park, D. K. Lee, and J. S. Kwak, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 676 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.10.676>]
- [14] S. S. Kim, J. W. Lee, and B. J. Jeon, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 800 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.12.800>]
- [15] S. J. Hwang and J. S. Kwak, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**, 175 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2017.30.3.175>]
- [16] M. S. Jang, W. H. Kim, Y. R. Kang, K. H. Kim, S. B. Song, J. H. Kim, and J. P. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 849 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.10.849>]
- [17] K. S. Shin, D. Y. Kim, and T. G. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 911 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2011.24.11.911>]