


Light Intensity 및 명암비 향상을 위한 마이크로 LED의 사파이어 기판 형상 변화 연구

차유정, 곽준섭 

순천대학교 인쇄전자공학과

The Variation of Sapphire Substrate Shape of Micro LED Array to Increasing of Light Intensity and Contrast Ratio

Yu-Jung Cha and Joon Seop Kwak

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

(Received November 10, 2020; Revised November 17, 2020; Accepted November 20, 2020)

Abstract: Micro-LEDs can be applied to various parts of a product. However, it has disadvantages compared to general LEDs in large displays such as low efficiency, intensity, and contrast ratio, among others, owing to their short history of study. The simulations were carried out using ray-tracing software to investigate the change in light intensity and light distribution according to pattern shapes on the sapphire substrate of the flip-chip micro-LED (FC μ -LED) array. Three patterns-concave square patterns, convex square patterns, and Ag coated convex patterns-which existed on the opposite side of FC μ -LEDs ($115 \mu\text{m} \times 115 \mu\text{m}$) array, were applied. The intensity of FC μ -LEDs on the center of the receivers depends on the pattern depth with shape. The concave square patterns having FC μ -LEDs arrays show that decreasing intensity as the patterns depth. On the contrary, the convex square patterns having FC μ -LEDs arrays shows that increasing intensity as the patterns depth. In addition, the highest intensity shows that FC μ -LEDs having Ag-coated convex patterns on the opposite side of sapphire lead to a reduction in light crosstalk owing to the Ag film.

Keywords: Micro LEDs, Patterned sapphire substrate, Simulation

1. 서론

질화 갈륨 기반의 light emitting diode (LED)의 발전으로 현재 대부분의 light 기반의 주변 기기, 상품 및 device 들이 기존의 light에서 LED로 급속하게 변화되고 있다. 최근 대형 디스플레이 및 저전력 구동 플렉서블 디스플레이, 바이오 융합 분야, 선도성 섬유 및 다양한 응용 분야에서 LED를 적용하려고 하고 있으며 이

에 따라 LED의 다양한 방면에서의 특성 향상이 요구되고 있다. 이러한 LED의 다양한 특성 향상을 만족시켜 줄 수 있는 차세대 LED의 형태로 마이크로 픽셀 LED가 주목받고 있다 [1,2]. 1999년 Kansas State University의 Jiang 그룹에서 InGaN/GaN을 이용한 마이크로 LED가 연구 보고된 이후로 마이크로 LED를 다양한 분야에서 응용하기 위한 연구들이 진행되고 있다 [3]. 마이크로 LED는 약 100 ~ 수 μm 정도의 크기의 LED를 의미한다. 마이크로 LED는 기존의 LED의 크기에 약 1/3~1/100 정도의 수준으로 작아지면서 바이오테크놀로지, 디스플레이, 에너지, 가시광 통신 등 여러 분야에 응용 가능성으로 주목받고 있다. 또한, 마이크로 LED는 기존 LED 대비 저전력 구동이 가능하고 칩 크기의 소형화

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

Copyright ©2021 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.

로 유연한 기판에 적용 가능한 장점이 있다. 특히 최근에 3D 디스플레이, 가상현실 디스플레이, 증강현실 디스플레이, 초고해상도 대형 디스플레이 등에 마이크로 LED를 적용하기 시작하면서 더욱 관심이 집중되고 있으며 요구되는 특성 또한 다양하다. 초기 마이크로 LED의 제작에 관한 연구들이 진행되면서 많은 그룹에서 LED의 소형화를 위한 시도들이 있었고 그에 따른 다양한 문제점들이 나타났다 [4-9]. 첫 번째는 양자 효율의 감소이다. 마이크로 LED의 외부 양자 효율은 20~30%로 대면적 칩이 70~80%인 것에 비하여 매우 낮다. 마이크로 LED의 외부 양자 효율의 감소는 아직까지 밝혀진 바가 많이 없어서 그 원인을 밝히는 연구 및 효율 증가를 위한 연구들이 진행되고 있다 [10-13]. 현재까지 연구된 바에 의하면 낮은 전력 구동 체제와 side wall effect, non-radiative recombination, 에피워이어의 결함 등이 외부 양자 효율을 낮추는 주된 원인 것으로 나타났다 [14]. 두 번째는 마이크로 LED의 전사 방법이다. 마이크로 LED는 용도에 따라 낮은 밀도의 LED density와 높은 밀도의 LED density로 나뉜다. 이러한 LED의 density에 따른 전사방식에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다 [15-17]. 세 번째는 마이크로 LED의 칩 array에 따른 발광 패턴의 불균일성이다. 발광 패턴의 불균일성을 개선하기 위한 다양한 시도도 이루어지고 있다 [18-20]. 마이크로 LED의 발광 패턴의 불균일성은 칩 사이즈가 줄어들고 칩 사이 간격이 좁아지면서 칩의 발광 패턴의 옆에 배열된 칩들의 발광 패턴과 간섭을 일으키고 각 개별 칩의 성능의 차이 등에 의해서 나타나는 불균일성 때문이다. 이러한 마이크로 LED를 고해상도의 디스플레이에 적용하기 위해서는 칩의 발광 패턴의 균일성을 갖고 각 칩의 배열 때문에 생기는 암부, 칩 간의 crosstalk 등의 문제 해결이 반드시 되어야 한다.

본 연구에서는 마이크로 LED의 intensity 증가, 배광 패턴의 조절 및 명암비의 향상을 위하여 FC- μ LED array의 사파이어 표면에 패턴 형성을 디자인하여 시뮬레이션 하였고 그 결과를 분석하였다. 광학설계 프로그램은 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 ray tracing 프로그램인 lighttools (Synopsys: LightTools 9.0.0)를 사용하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 시뮬레이션에 이용된 blue flip-chip micro-

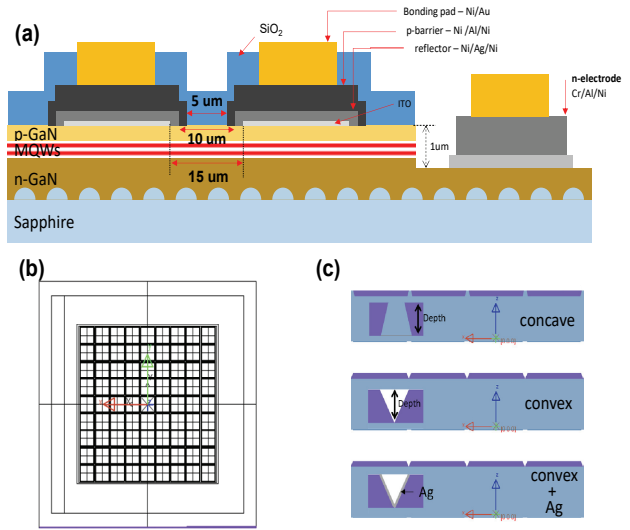


Fig. 1. (a) Schematic of the FC μ -LEDs, (b) top view of simulation design, and (c) side view of simulation design which appeared patterns shape.

LEDs (FC μ -LEDs)의 단면 구조를 나타내었다. 450 nm 파장의 FC μ -LEDs는 지름 3.8 μ m, 사이 거리 0.2 μ m의 pattern을 갖는 patterned sapphire substrate (PSS) 구조의 사파이어 기판 위에 n-GaN, 발광층 (multi-quantum well), p-GaN, 전류주입층, 실버 리플렉터, 전극, 본딩패드, 실리콘 보호층 순으로 설계하였고, 각 chip과 chip 사이는 실제 전류 주입층 기준으로 10 μ m의 간격을 두었다. 실제로 시뮬레이션의 모델인 FC μ -LEDs는 가로 32개 \times 세로 32개의 배열로 총 1,024개의 LED가 한 개의 소자 안에 array 되어 있으나 시뮬레이션에서는 간소하게 가로 9개 \times 세로 9개로 총 81개의 소자를 설계하여 가운데 한 개의 소자를 발광시켜 광학적인 특성을 분석하였다. 이때의 시뮬레이션을 위해 디자인한 FC μ -LEDs array의 top view를 그림 1(b)에 나타내었다. 조도 측정을 위한 리시버는 10 μ m 떨어진 곳에 위치한다. 사파이어 두께는 100 μ m로 고정하고 사파이어 표면에 여러 형태의 형상을 변화시켜 칩 전반부에서의 intensity 및 발광칩 중심에서의 intensity, 배광 이미지를 확인하였다. 각 형상은 concave 형태의 사각형상, convex 형태의 사각형상, 마지막으로 crosstalk 감소를 위한 convex 형태의 사각형상 사이에 Ag film을 형성시키는 형태로 디자인하였다. 각 패턴의 형태는 그림 1(c)에 나타내었다. 실제 시뮬레이션에 설계된 각 층의 두께 및 굴절률은 표 1에 나타내었다.

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

Material	Thickness	Refractive index
P-GaN	0.15 μm	2.45
MQW	0.1 μm	2.54
n-GaN	6.75 μm	2.45
Sapphire	100 μm	1.78
SiO ₂	1 μm	1.466
Ag	3,505 μm	0.04
Al	6,300 μm	0.6079
ITO	0.01 μm	2

3. 결과 및 고찰

3.1 Concave square patterned FC μ -LEDs

Filp-chip type의 LED는 LED 상부에 반사층이 존재하고 사파이어 면에서 발광을 측정하게 되므로 사파이어의 두께 및 패턴 형성이 영향을 받게 된다. 일반적으로 사파이어의 두께가 얇게 되면 빛이 사파이어층에서 소실되는 양이 적어져 발광효율 및 intensity가 높아진다 [21]. 따라서 첫 번째 패턴으로 마이크로 LED와 같은 사이즈인 $115 \times 115 \mu\text{m}$ 의 사각 패턴을 형성하고 LED가 array 된 면의 반대편에 사각 패턴을 concave type으로 디자인하여 깊이를 0, 5, 10, 15, 20 μm 로 변화시켰다. 그림 2(a)는 패턴의 깊이에 따른 light intensity를 나타내었다. 패턴이 없는 FC μ -LEDs에 비해서 패턴 형성 시에 사이드 방향에서 피크가 형성됨을 확인할 수 있다. 패턴이 없는 경우에는 가우시안 형태의 피크 intensity가 형성되는 반면에 패턴 형성 시에는 패턴에 의한 인위적인 light 분포가 만들어짐을 의미한다. 그림 2(a)의 삽입된 그림에서 나타났듯이 초기 얇은 패턴 형성 시에 패턴의 가장자리인 $\approx \pm 55 \mu\text{m}$ 에서 light intensity 변화로 피크가 발생되고 패턴의 깊이가 깊어지면 점차적으로 패턴의 가장자리 피크는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 패턴의 깊이가 5 μm 와 30 μm 를 비교하면 30 μm 에서 패턴의 가장자리에서 나타난 피크의 상대적인 감소가 크게 나타난다. 그러나 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라 옆쪽 패턴의 중심부에 intensity가 증가됨을 알 수 있다. 즉 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라 사이드 방향으로의 빛이 더 잘 퍼진다는 것을 의미한다. 그림 2(b)에 나타난 intensity는 리시버 가운데서의 intensity를 나타낸 것으로 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라서 $4.81 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $4.02 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 로 16.5% 감

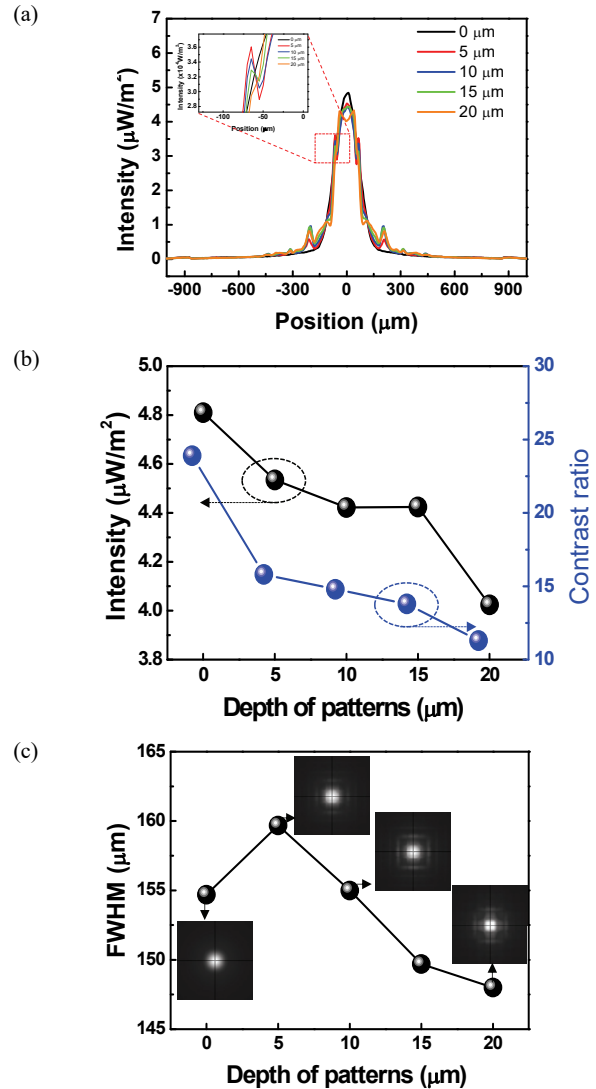


Fig. 2. (a) The light intensity of the concave patterned FC μ -LEDs arrays as the pattern depth, (b) intensity on center of the receiver and contrast ratio, and (c) FWHM with light distribution image as the pattern depth.

소함을 보였다. 실제로 패턴이 형성되면 FC μ -LEDs의 발광부의 MQW에서 빛이 탈출되는 사파이어의 표면까지의 거리가 줄어들게 되어서 intensity가 더 높아질 것으로 예상할 수 있으나 상대적으로 패턴 형성에 따른 사이드 방향으로의 탈출된 빛이 증가하여 발광부의 중심에서의 intensity는 감소한 것으로 보인다. 또한, 그림 2(b)에 칩 사이의 명암비를 의미하는 명암비를 나타내었다. 명암비는 발광시킨 한 개의 칩 중앙부와 array 되어 있는 칩 중 두 번째 칩의 중앙부와의 명암비를 나타낸 것으로 한 개의 개별 칩 발광에 따른 주

변부의 영향을 확인함과 동시에 칩의 발광 패턴의 제어와 관계가 있다. 그림 2(b)에서 확인할 수 있듯이 concave square 패턴의 깊이에 따라서 발광 패턴의 변화를 확인할 수 있다. 명암비 면에서도 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라 점차적으로 감소함을 보였다. 이 또한 발광부의 중심 대비 사이드 쪽 칩의 중심에서의 발광 intensity의 증가 때문에 나타난 결과이다. 그림 2(c)에서 보이듯이 FWHM은 초기 5 μm 패턴 깊이에서 패턴의 가장자리에서 일어난 회절 및 굴절에 의하여 소폭 증가하였으나 깊이가 깊어짐에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 메인 발광칩에서 탈출하는 빛은 가운데로 모이고 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라 패턴의 가장자리에서 굴절과 회절되어 탈출하는 빛보다 사이드 칩으로 분산되어 탈출하는 빛이 많아짐을 의미한다. 또한, 그림 2(c)에 삽입된 이미지에서도 볼 수 있듯이 사이드로 탈출한 빛들이 특정 위치에서 탈출하여 일정한 패턴을 형성하는 배광 특성을 보인다. 패턴이 없는 FC $\mu\text{-LEDs}$ 는 sphere 형태의 배광 특성을 보이는 반면 메인 발광 패턴 주변부로 발광 라인이 형성되고 이는 그림 2(a)에서 나타난 intensity에서 예상된 이미지와 일치한다. 주변부에 형성된 발광 라인이 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라서 패턴의 가장자리에서만 회절과 굴절에 의한 ray가 탈출하는 것이 아니라 사이드 방향으로 탈출하는 빛들이 많아지고 삽입된 이미지에서도 볼 수 있듯이 주변부로 형성된 라인의 진하기가 진해졌다가 칩의 바로 사이드 쪽 칩의 전면으로 탈출하는 빛이 나타나 발광 패턴이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 사이드 방향으로의 빛 탈출로 인해서 array 된 칩 전체를 발광시켰을 때 사이드 방향으로 탈출되는 빛들 사이의 간섭으로 crosstalk을 일으켜서 display 상에 불균일한 빛의 형상이 나타나게 될 수 있음을 예상할 수 있다.

3.2 Convex square patterned FC $\mu\text{-LEDs}$

그림 1(c)의 두 번째 단면도와 같이 convex 형태의 square 패턴을 형성하여 intensity 및 명암비, FWHM, 배광 이미지를 분석하였다. Convex square pattern은 사각 패턴 주위에 groove를 형성하여 groove의 깊이를 변화시킴으로써 convex 형태의 square를 디자인하고 높이를 조절하였다. Convex square의 높이는 0, 5, 10, 20, 30 μm 로 변화시켰다. 그림 3(a)는 패턴의 깊이에 따른 intensity와 명암비를 나타내었다. Intensity는 패턴의 높이가 증가함에 따라 4.8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 에서 5.4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$

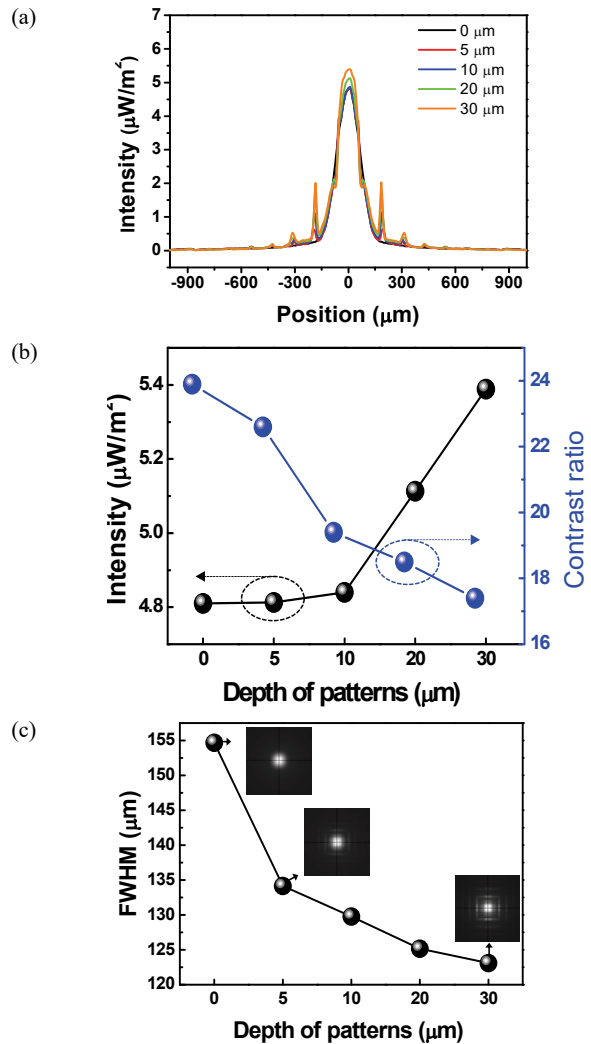


Fig. 3. (a) The light intensity of the convex patterned FC $\mu\text{-LEDs}$ arrays as the patten depth, (b) intensity on center of the receiver and contrast ratio, and (c) FWHM with light distribution image as the patterns depth.

로 12.5% 증가하였다. 즉 빛이 convex square pattern 형성에 따라서 사이드로 탈출하는 빛보다 사파이어 전면으로 탈출하는 빛이 증가했다는 것을 나타낸다. 그림 3(a)에서 나타난 명암비를 보면 convex square patterned FC $\mu\text{-LEDs}$ 역시 concave square patterned FC $\mu\text{-LEDs}$ 와 마찬가지로 패턴의 높이가 높아짐에 따라서 감소함을 보였다. 이는 패턴 형성에 따른 사이드 쪽으로 빛이 옆에 배열된 칩에서 탈출되고 이는 crosstalk 증가를 일으킬 수 있는 가능성이 증가함을 의미한다. 그림 3(c)에서 볼 수 있듯이 각 패턴의 높이에 따라서 FWHM의 감소가 나타난다. FWHM의 감소는 즉 퍼져

있던 발광 패턴이 좁아지는 것을 의미하는데 실제로 칩 사이즈가 $115 \times 115 \mu\text{m}$ 이므로 칩 사이즈와 근사한 크기로 발광 패턴을 조절할 수 있음을 의미한다. 실제로 각 FWHM 값에 위치한 발광 이미지를 살펴보면 원형의 발광 패턴에서 패턴을 갖는 FC μ -LEDs가 실제 칩의 모양과 유사한 사각형의 발광 패턴을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그러나 FC μ -LEDs 칩 주변으로 라인 형태의 새로운 발광 패턴이 퍼져 나간 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)에 나타난 각 발광 부분의 실제 ray tracing 결과를 보면 가운데 발광칩 옆으로 생성된 라인은 convex 패턴 사이드 면에서 ray들이 탈출되어 모이는 것을 확인할 수 있다. 또한, convex 패턴 사이드 면에서 탈출된 ray들이 사파이어에서 air 방향으로 탈출되어 빔이 굴절되기 때문에 라인으로 밝게 보이는 부분에 집중되는 것을 볼 수 있다.

3.3 Ag film coated convex square patterned FC μ -LEDs

각 개별 칩에서 가장 좋은 intensity를 가지면서 convex 패턴 사이드 면에서 빛의 탈출 및 각 convex 패턴 사이드 면에서 나오는 ray들의 crosstalk을 최소화하기 위해서 convex square pattern 위에 Ag를 코팅하여 시뮬레이션을 진행하였다. 패턴의 형태는 그림 1(c)의 3번째 시뮬레이션 단면도에 나타났으며 패턴의 높이는 0, 30, 50, 80, 100 μm 으로 디자인하였다. 패턴의 깊이에 따라서 intensity 및 명암비, FWHM, 배광 이미지를 분석하였다. 그림 4(a)에 array 칩 전체의 위치에 따른 light intensity를 나타내었다. Ag coated convex patterns을 갖는 FC μ -LEDs array의 light intensity는 옆쪽에 특별한 피크가 올라온 것을 볼 수 없고 가운데 발광칩 부분에서 패턴의 깊이가 깊을수록 더 높은 intensity를 확인할 수 있다. 또한 50 μm 이상에서 칩 전체 발광 intensity가 거의 유사한 것을 확인할 수 있었다. 100 μm 이상에서는 사파이어를 통과하지 않는 빛이 리시버에 도달하기 때문에 기존의 가우시안 형태의 light intensity 분포를 보인 것으로 판단된다. 그림 4(b)에 칩의 정 중앙에서의 intensity를 패턴의 깊이별로 나타내었다. 패턴의 깊이가 깊어짐에 따라 $4.81 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $12.55 \mu\text{W}/\text{m}^2$ 으로 약 261% intensity의 증가를 확인할 수 있었다. Contrast ratio 면에서도 패턴 형성에 따라서 30 μm 에서는 약간의 감소가 있었으나 패턴의 깊이가 증가함에 따라서 점차 적으로 증가하여 80

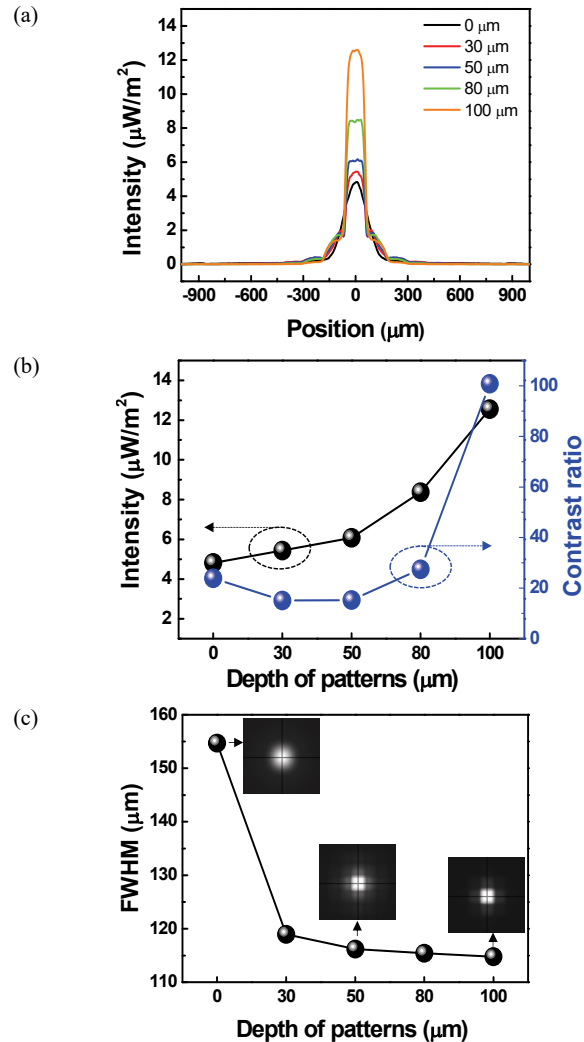


Fig. 4. (a) The light intensity of the Ag coated convex patterned FC μ -LEDs arrays as the patten depth, (b) intensity on center of the receiver and and contrast ratio, and (c) FWHM with light distribution image as the patterns depth.

μm 이상에서는 기존의 패턴의 없는 FC μ -LEDs array 보다 증가하였다. 이는 사이드로 퍼지는 빛이 현저히 줄어들음을 나타낸다. 그림 4(c)에서 나타낸 FWHM을 확인할 수 있듯이 패턴 형성에 따라서 칩의 크기인 115 μm 에 근사한 값으로 줄어들고 삽입된 이미지에서도 확인 가능하듯이 칩의 형상인 사각형의 배광 이미지를 나타내는 것을 볼 수 있다. 즉 사파이어 패턴을 통한 빛의 배광 형상 제어가 가능함을 의미한다.

3.4 Concave, convex, Ag coated convex patterns 비교

각 패턴에 따른 FC μ -LEDs array의 특성을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이 concave square patterns 형성 시에는 칩의 중심에서의 intensity가 감소 하였으나 convex square patterns에서는 intensity가 증가하였다. Ag coated convex patterns에서의 intensity는 convex 패턴의 FC μ -LEDs array에서와 거의 같은 intensity를 유지하였다. 그러나 그림 5(b)에 칩 전면부 전체에서 측정한 intensity를 비교하면 사이트 방향에서의 intensity에서 차이점을 확인할 수 있다. Concave square patterns 및 convex square patterns에서는 발광하는 메인칩 사이트 방향에서 피크가 나타난 반면 Ag coated convex patterns 사이트에서는 피크가 사라진 것을 확인할 수 있다. 이는 삽입된 그림의 발광 이미지에서도 확인할 수 있다. 패턴이 없는 경우는 원형의 발광 패턴이 형성되고 convex 패턴의 경우는 가운데 메인 발광 패턴은 square 형상으로 변화되었으나 주변부 특정 위치에 밝은 라인이 형성된 것을 볼 수 있다. 그러나 Ag

coated convex 패턴의 경우는 사이트의 밝은 라인 발광 면은 사라지고 square 패턴만 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 주변부의 밝은 부분이 현저하게 줄어든 것을 볼 수 있다.

그림 6에 각 위치에 따른 ray-tracing을 나타내었다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 convex 패턴의 경우 메인 발광 칩 주변에 형성된 밝은 라인 패턴이 패턴을 형성하기 위해 깎아낸 위치로 굴절되어 빛이 바깥으로 탈출되어 배광 패턴을 형성한 것을 알 수 있다. 그러나 그림 6(b)에서 확인할 수 있듯이 Ag coated convex patterns에서는 사이트 방향의 패턴 형성 부위에서

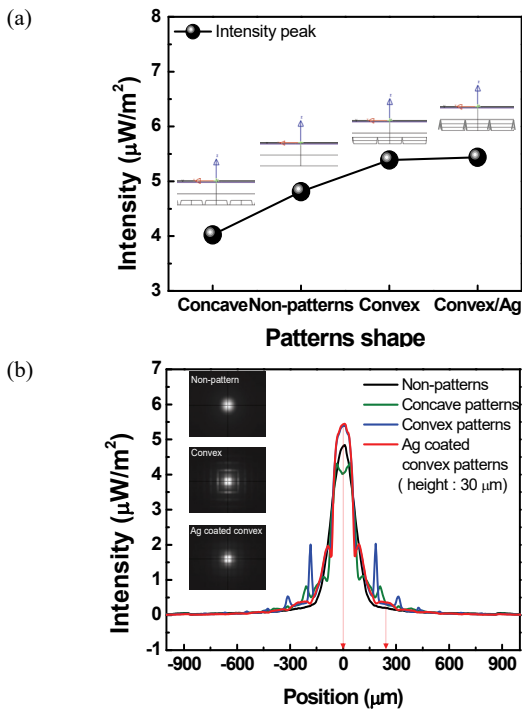


Fig. 5. (a) The compared light intensity on center of the receiver as the patterns shape and (b) the compared light intensity of the patterned FC μ -LEDs arrays with the light distribution image.

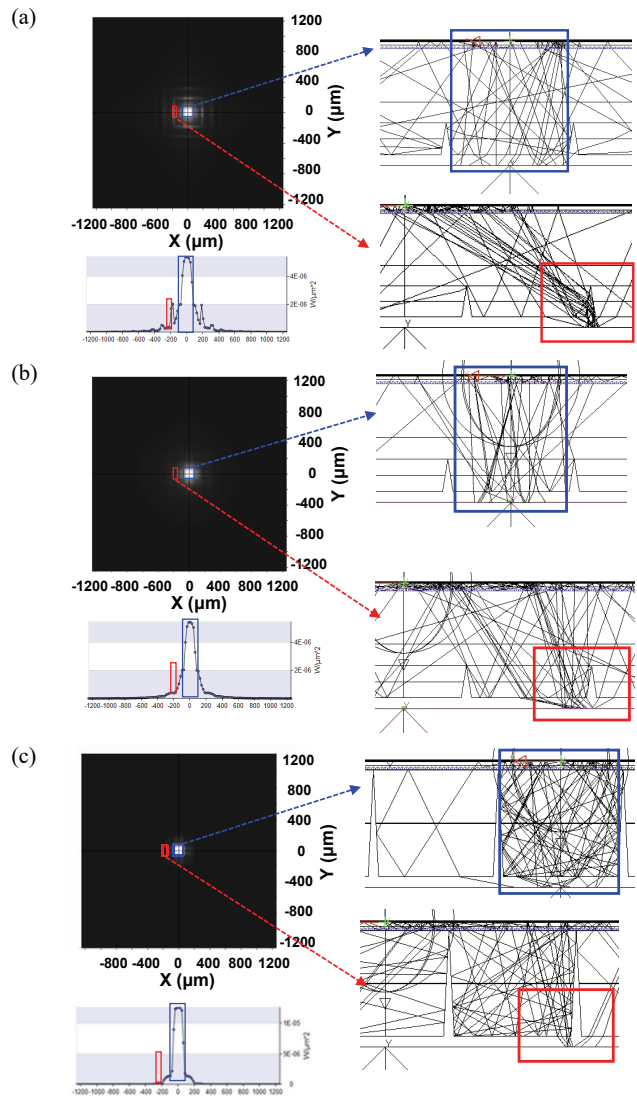


Fig. 6. The schematic diagram of lay tracing image: (a) convex patterns, (b) Ag coated convex patterns at 30 μm patterns depth, and (c) Ag coated convex patterns at 100 μm patterns depth.

ray가 빠져나가지 않고 다시 반사되어 내부로 들어가는 것을 확인할 수 있다. 그러나 패턴의 깊이가 얇을 경우에 convex square patterns과 Ag coated convex square patterns 모두에서 메인 발광 칩 옆쪽으로 ray가 상부에서 반사되어 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있었다. 그림 6(c)에서 확인할 수 있듯이 사파이어 전체 두께인 100 μm 로 패턴을 형성할 경우에 사파이어 내부를 통해서 메인 발광 칩 외에 사이드 방향 쪽으로 ray가 이동하지 않고 발광 칩 내부에서 ray-tracing이 일어나다가 외부로 탈출하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 FC μ -LEDs array의 광 특성 향상을 위하여 광학 설계 프로그램인 lighttools (미국 Synopsys)를 사용하여 사파이어 면에 패턴을 디자인하였고 변수 조건에 따라 light intensity, 명암비, 발광 이미지 등을 분석하였다. Concave square patterns, convex square patterns, Ag coated convex square patterns을 적용하였을 때 concave 패턴은 중심에서의 intensity가 패턴의 깊이 0~20 μm 로 증가함에 따라서 4.81 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 에서 4.02 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 로 약 16.5% 감소하였고 명암비 역시 23.9에서 11.3으로 줄어드는 현상을 보였다. 이에 반하여 convex square 패턴의 경우 중심에서의 intensity가 패턴의 깊이 0~30 μm 에서 4.8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 에서 5.4 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ 로 12.5%로 증가하는 현상을 보였다. 그러나 concave square 패턴과 마찬가지로 명암비는 23.9에서 17.4로 줄어들었다. 이는 패턴 형성에 의해서 사이드 방향으로의 빛이 더 잘 퍼질 수 있다는 것을 의미하고 두 패턴의 경우 모두 메인 발광 칩 외에 사이드 방향 특정 위치에서 발광 라인이 형성되었다. 이는 전체 칩 발광 시에 칩 간의 빛이 서로 간섭을 일으키는 crosstalk 현상을 만들어 불균일한 발광 이미지를 형성시킬 수 있다. 이러한 현상을 줄이기 위하여 Ag coated convex 패턴을 디자인하였다. Ag coated convex 패턴의 경우 convex 패턴과 마찬가지로 intensity의 경우 30 μm 에서 유사한 값을 보였으나 명암비는 패턴의 깊이에 따라 점차 증가하였으며 최대 100까지 조절 가능성을 보였다. 또한, FWHM 면에서 칩의 발광 사이즈와 거의 유사한 115 $\mu\text{m} \times 115 \mu\text{m}$ 까지 줄어들음을 확인하였고 메인 발광 칩 외에 주변부에 형성되는 특정 라인이 사라지는 것을 발광 이미지를 통하여 확인하였다. 즉, Ag coated convex 패턴을 실제 FC μ -LEDs array에 적용하여

발광 칩 형상 및 주변부로 퍼지는 빛을 제어하여서 명암비 향상 및 crosstalk을 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

ORCID

Joon Seop Kwak

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

감사의 글

이 논문은 2020년 순천대학교 학술연구비(과제번호: 2020-0185) 공모과제로 연구되었음.

REFERENCES

- [1] T. Jeong, *Inf. Disp.*, **17**, 18 (2016).
- [2] T. Wu, C. W. Sher, Y. Lin, C. F. Lee, S. Liang, Y. Lu, S. W. Huang Chen, W. Guo, H. C. Kuo, and Z. Chen, *Appl. Sci.*, **8**, 1557 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.3390/app8091557>]
- [3] S. X. Jin, J. Li, J. Z. Li, J. Y. Lin, and H. X. Jiang *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 631 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.125841>]
- [4] H. Jiang and J. Lin, *III-Vs Rev.*, **14**, 32 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/s0961-1290\(01\)80261-1](https://doi.org/10.1016/s0961-1290(01)80261-1)]
- [5] R. A. Mair, K. C. Zeng, J. Y. Lin, H. X. Jiang, B. Zhang, L. Dai, H. Tang, A. Botchkarev, W. Kim, and H. Morkoç, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2898 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.120209>]
- [6] K. C. Zeng, L. Dai, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2563 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.125078>]
- [7] X. Li, P. W. Bohn, J. Kim, J. O. White, and J. J. Coleman, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3031 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.126569>]
- [8] Z. Y. Fan, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 094001 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/41/9/094001>]
- [9] T. Someya, R. Werner, A. Forchel, M. Catalano, R. Cingolani, and Y. Arakawa, *Science*, **285**, 1905 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.285.5435.1905>]
- [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] I. Y. Hong, A.B.M.H. Islam, T. K. Kim, Y. J. Cha, and J. S. Kwak, *Appl. Surf. Sci.*, **512**, 145698 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145698>]

- [12] I. Y. Hong, J. H. Lee, S. M. Cho, J. B. So, T. K. Kim, Y. J. Cha, and J. S. Kwak, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **18**, 160 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2018.2876467>]
- [13] H. J. Park, Y. J. Cha, and J. S. Kwak, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 47 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.47>]
- [14] X. A. Cao, S. J. Pearton, A. P. Zhang, G. T. Dang, F. Ren, R. J. Shul, L. Zhang, R. Hickman, and J. M. Van Hove, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2569 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.125080>]
- [15] L. Zhang, F. Ou, W. C. Chong, Y. Chen, and Q. Li, *J. Soc. Inf. Disp.*, **26**, 137 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.649>]
- [16] R. S. Cok, M. Meitl, R. Rotzoll, G. Melnik, A. Fecioru, A. J. Trindade, B. Raymond, S. Bonafede, D. Gomez, T. Moore, C. Prevatte, E. Radauscher, S. Goodwin, P. Hines, and C. A. Bower, *J. Soc. Inf. Disp.*, **25**, 589 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/jsid.610>]
- [17] B. Corbett, R. Loi, W. Zhou, D. Liu, and Z. Ma, *Prog. Quantum Electron.*, **52**, 1 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2017.01.001>]
- [18] J. H. Lee, A.B.M.H. Islam, T. K. Kim, Y. J. Cha, and J. S. Kwak, *Photonics Res.*, **6**, 1049 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1364/PRJ.385249>]
- [19] H. Y. Lin, C. W. Sher, D. H. Hsieh, X. Y. Chen, H.M.P. Chen, T. M. Chen, K. M. Lau, C. H. Chen, C. C. Lin, and H. C. Kuo, *Photonics Res.*, **5**, 411 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1364/prj.5.000411>]
- [20] G. Tan, Y. Huang, M. C. Li, S. L. Lee, and S. T. Wu, *Opt. Express*, **26**, 16572 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.26.016572>]
- [21] K. T. Lam, S. C. Hung, C. F. Shen, C. H. Liu, Y. X. Sun, and S. J. Chang, *Semicond. Sci. Technol.*, **24**, 065002 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0268-1242/24/6/065002>]