

## RIE 공정을 이용한 유기발광다이오드의 광 산란층 제작

배은정\*·장은비\*·최근수\*·서가은\*·장승미\*·박영욱\*  
\*†선문대학교 디스플레이반도체공학과 나노 유기전자 연구실

### Fabrication of Scattering Layer for Light Extraction Efficiency of OLEDs

Eun Jeong Bae\*, Eun Bi Jang\*, Geun Su Choi\*, Ga Eun Seo\*,  
Seung Mi Jang\* and Young Wook Park\*†

\*†Nano and Organic-Electronics Laboratory, Department of Display and  
Semiconductor Engineering, Sunmoon University

#### ABSTRACT

Since the organic light-emitting diodes (OLEDs) have been widely investigated as next-generation displays, it has been successfully commercialized as a flexible and rollable display. However, there is still wide room and demand to improve the device characteristics such as power efficiency and lifetime. To solve this issue, there has been a wide research effort, and among them, the internal and the external light extraction techniques have been attracted in this research field by its fascinating characteristic of material independence. In this study, a micro-nano composite structured external light extraction layer was demonstrated. A reactive ion etching (RIE) process was performed on the surfaces of hexagonally packed hemisphere micro-lens array (MLA) and randomly distributed sphere diffusing films to form micro-nano composite structures. Random nanostructures of different sizes were fabricated by controlling the processing time of the O<sub>2</sub> / CHF<sub>3</sub> plasma. The fabricated device using a micro-nano composite external light extraction layer showed 1.38X improved external quantum efficiency compared to the reference device. The results prove that the external light extraction efficiency is improved by applying the micro-nano composite structure on conventional MLA fabricated through a simple process.

**Key Words** : OLEDs, micro-nano structure, RIE, light extraction

#### 1. 서 론

Organic light-emitting diodes (OLEDs)는 낮은 소비전력, 높은 색순도와 색재현율 및 유연 디스플레이 소자에 적용 가능성으로 인해 디스플레이 및 광원 분야에서 차세대 기술로 각광받고 있다[1-4]. 또한, 웨어러블 및 롤러블 디스플레이와 같은 분야에서 잠재력을 갖고 있기 때문에 수십 년 동안 연구되어왔다[1, 5-8]. 그러나 최근 연구결과에

의하면 OLEDs는 차세대 디스플레이 및 광원에 대해서 상대적으로 낮은 전력효율과 수명 문제를 극복해야한다[9]. OLEDs의 내부 양자효율은 100 %를 달성하였으나, 외부 양자효율은 20 %로 내부에서 생성되는 광의 80 %가 외부로 방출되지 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 광 추출 기술들이 활발히 연구되고 있다[10]. 광 추출 기술은 기판과 유기 박막 사이의 waveguide 효과에 의한 손실을 줄일 수 있는 내부 광 추출 기술과 기판과 공기 계면의 전반사 효과에 의한 광 손실을 줄이는 외부 광 추출 기술로 구분할 수 있다. 소자의 내부 구조를 변경시키는 내부

†E-mail: zerook@sunmoon.ac.kr

광 추출 기술로는 low-refractive index grid 구조, 내부 산란층 구조, 회절격자 구조 등이 있다[11-14]. 그러나 내부 광 추출 기술은 소자 내부 구조에 영향을 미치지 때문에 소자의 전기적 특성에 변화를 주지 않는 고도의 기술이 필요하다[15]. 외부 광 추출 기술은 유리 기판의 광학 구조를 변형시켜 소자 내에서 발생한 빛이 외부 광 추출층에 입사되는 빛의 전반사 각도에 변화를 주어 빛을 추출하게 된다. 현재까지 보고된 기술로는 외부 광 산란층 기술, 표면 거칠기, 고굴절 유리 기판, micro-lens array (MLA) 등이 있다[16-23]. 외부 광 추출 기술은 소자의 구조에 직접적인 영향을 주지 않으며 내부 광 추출 기술에 비해 상대적으로 공정이 간단하다[24]. 외부 광 산란층이 적용된 소자는 방출되는 광의 방사 패턴이 Lambertian 분포를 나타내고 시야각 변화에 따른 색좌표 변화를 최소화할 수 있다[25]. 회절 격자 구조를 적용했을 경우, 격자 구조에 의해 회절 조건이 결정되기 때문에 수직 방향 이외의 특정 파장에서의 효율 증가, 색좌표 변화 및 스펙트럼 왜곡 현상이 일어날 수 있다[26]. MLA를 이용한 경우, 기판 위에 형성된 구조물로 인해 입사되는 빛이 전반사를 피하고 추출될 수 있는 각도 범위를 높인다[27]. 현재까지 발표된 연구로는 고분자 물질로 이루어진 반구형, 원통형, 피라미드 및 정사각형과 같은 다양한 기하학적 구조의 MLA 및 외부 산란층 등이 있다[28-32]. 그러나 MLA 및 마이크로 패턴이 있는 외부 광 추출필름에 나노 스케일 패턴을 통합하여 마이크로-나노 복합 패턴을 적용시킨 OLEDs 소자의 광 아웃커플링 효과는 아직 연구된 바가 없다.

본 연구에서 OLEDs의 외부 광 추출 효율을 향상시키기 위해 마이크로-나노 복합 구조가 형성된 외부 광 추출층을 제작하였다. 마이크로 패턴 변화에 따른 광 추출 정도를 분석하기 위해 75  $\mu\text{m}$ 의 반구형 패턴이 육각형으로 패킹된 MLA 및 구형 패턴이 랜덤하게 분포 되어있는 확산필름이 사용되었으며, 각 필름의 표면에 Reactive Ion Etching (RIE)공정을 통해 마이크로-나노 복합 구조가 제작되었다.  $\text{O}_2$  및  $\text{CHF}_3$  플라즈마를 사용하여 RIE 공정이 수행되었으며, 공정 시간을 조절함에 따라 마이크로 패턴 표면에 서로 다른 크기의 무작위한 나노 구조가 형성되었다. 마이크로-나노 복합구조로 이루어진 외부 광 추출층이 적용된 OLEDs의 광 아웃커플링 효율의 향상치가 실험적 및 이론적으로 분석되었다.

## 2. 실험 과정

### 2.1 마이크로-나노 복합구조 제작

본 연구에서 마이크로-나노 복합 구조를 구현하기 위하여 패턴이 있는 외부 광 추출층 표면에 RIE 공정이 수

행되었다. 이때 외부 광 추출층으로 사용되는 마이크로 패턴에 따른 광 추출 정도를 분석하기 위하여 직경이 75  $\mu\text{m}$ 인 반구형 패턴이 육각형으로 패킹된 MLA (MN tech Co.,Ltd., Chungju, Korea)와 10  $\mu\text{m}$  이하의 구형 패턴이 랜덤하게 분포 되어있는 확산필름 (SunGreen Co.,Ltd., Incheon, Korea)이 준비되었다. 본 공정에서는 Fig. 1의 모식도와 같이 1차로  $\text{O}_2$  플라즈마 처리 후, 2차로  $\text{CHF}_3$  플라즈마가 처리되었다. 플라즈마 공정파워는 200 W로 고정되었으며, 32 mTorr에서 진행되었다.  $\text{O}_2$  및  $\text{CHF}_3$ 의 플라즈마 처리 시간에 따라 마이크로 패턴 상부에 서로 다른 형태의 나노 구조가 형성되었다.

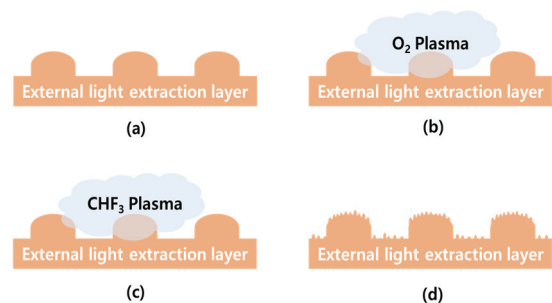


Fig. 1. Schematic of the RIE process: (a) MLA, (b)  $\text{O}_2$  plasma, (c)  $\text{CHF}_3$  plasma, (d) nanostructured MLA.

### 2.2 OLEDs 소자제작

185 nm의 ITO가 증착된 소다라임 글라스는 15분 동안 아세톤, 메탄올, 탈이온수로 초음파 세척기를 이용하여 세척되었다. 세척된 유리 기판은 120  $^{\circ}\text{C}$  드라이 오븐에서 1시간 동안 건조되었다. OLEDs의 발광 영역은 포토리스 그래피 과정에서 포토레지스트 (AZ 601 GXR, AZ Electronic Materials Co., Ltd.)에 의해 정의되었다. 준비된 기판은 잔류 오염물질을 제거하고 양극의 일함수를 조절하여 구동 전압을 낮추기 위해 UV 오존 (UVC-300, Omniscience) 및  $\text{O}_2$  플라즈마 (CUTE, Femto Science Co.) 처리되었다.

제작된 소자는 정공주입층, 정공수송층, 발광층, 전자수송층, 전자주입층으로 이루어진 다층구조를 갖는 형광 OLEDs이며, 소자 구조는 Fig. 2와 같다. 185 nm의 ITO를 양극으로, 100 nm의 N,N'-Bis(naphthalen-1-yl)-N,N'-bis(phenyl)benzidine (NPB)을 정공수송층으로, 40nm의 Tris(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq<sub>3</sub>)은 방출-전자 수송층으로 사용되었고, 1 nm의 lithium fluoride (LiF)은 전자 주입층으로, 120 nm의 알루미늄 (Al)은 음극으로 사용되었다. 본 연구에서 사용되는 모든 유기 물질과 금속은 고진공 ( $\sim 1.0 \times 10^{-7}$  Torr)에서 증착되었으며, 유기 물질과 금속의 증착 속도는 각각 최대 1  $\text{\AA}/\text{s}$  및 3  $\text{\AA}/\text{s}$ 로 제어되었다. 박막의 두께는 6 MHz

(QCM, Phillip Technologies)과 박막 증착 컨트롤러 (IQM-233, INFICON)로 조절되었다.

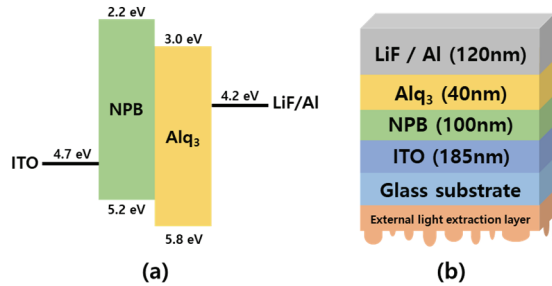


Fig. 2. (a) Energy band diagram of fabricated OLEDs (b) OLEDs structure.

2.3 특성평가

본 공정에서 사용된 외부 광 추출층의 패턴은 miniaturized scanning electron microscope (mini-SEM, EM30, COXEM Co.) 및 field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, F-4800, Hitachi)을 통해 측정되었다. 제작된 외부 광 추출층은 소자 적용 특성을 분석하기 위해 optically clear adhesive (OCA) 필름을 사용하여 OLEDs 소자의 유리 바닥/방출면에 부착되었다. 외부 광 추출층이 부착된 OLEDs 소자의 EL 특성은 분광방사계 (CS-2000, Konica Minolta Co. Ltd.)와 소스 미터 (Keithley-2410, Tektronix)를 사용하여 저진공 ( $-4.0 \times 10^{-7}$  Torr)에서 측정되었다. 시야각을 포함한 EL 특성은 OLEDs의 Lambertian 광원으로 가정하여 CS-2000으로 dark box 내에서 측정되었으며, 이후 외부양자효율 (external quantum efficiency, EQE)는 분포 특성을 적용하여 재계산 되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 마이크로-나노 복합구조

Fig 3의 SEM 이미지는 본 연구에서 사용된 마이크로 스케일의 외부 광 추출층 패턴이다. Fig 3 (A) 및 (B)는 각각 직경이  $75 \mu\text{m}$ 인 반구형 패턴이 육각형으로 패킹 되어 있는 MLA와 약 직경이  $10 \mu\text{m}$ 인 구형 패턴이 랜덤하게

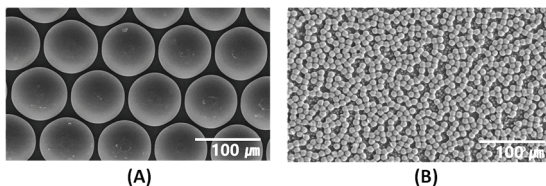


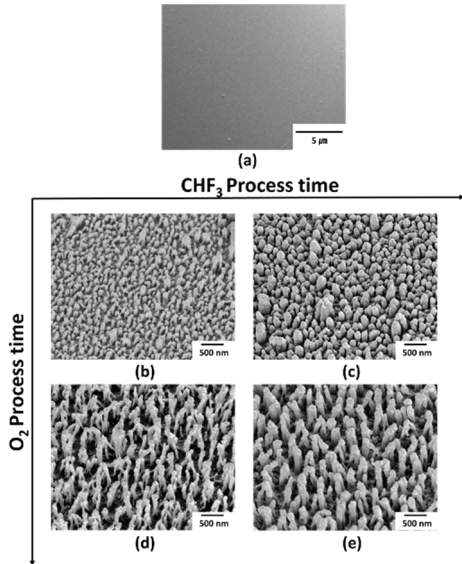
Fig. 3. SEM image of (A) hexagonally packed hemisphere MLA, (B) randomly distributed sphere diffusing film.

분포되어 있는 확산필름이다. 마이크로-나노 복합구조는  $\text{O}_2$ 와  $\text{CHF}_3$  플라즈마를 이용한 RIE 공정이 수행되었으며, 공정 시간은 100s와 400s로 조절되었다.

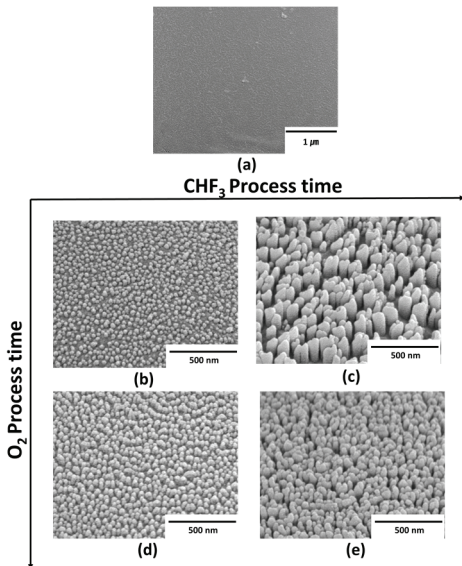
Fig 4와 5는 각각 반구형 MLA와 구형 패턴이 랜덤하게 분포 되어있는 확산필름의 RIE 공정에 따른 표면 변화를 측정한 SEM 이미지이다. Fig 4 (a)는 RIE 처리가 되지 않은 반구형 MLA의 반구형 구조물의 표면이며, 표면에 나노 구조가 형성되지 않았음을 확인할 수 있다. Fig 4 (b)(c)에서 RIE 처리 후 마이크로 패턴 상부에 무작위 나노 구조가 형성되었다. Fig 4 (b)와 (d), (c)와 (e)를 함께 비교했을 때,  $\text{O}_2$  처리 시간이 길수록 반구형 MLA의 표면은 더 깊게 에칭 되어 무작위 나노 구조의 기둥이 더 높게 형성되었다. 형성된 나노 기둥의 높이는  $\text{O}_2$ 를 100s 동안 처리한 (b)와 (c)에서 약 140~180 nm였으나,  $\text{O}_2$ 를 400s 동안 처리한 (d)와 (e)에서는 최대 375 nm까지 나타났다. Fig 4의 (b)와 (c), (d)와 (e)를 함께 비교했을 때,  $\text{CHF}_3$  처리시간이 길어질수록  $\text{O}_2$  처리에 의해 형성된 나노 구조가 응집되었다.  $\text{CHF}_3$ 를 100s 동안 처리한 (b)와 (d)에서는 나노 구조의 폭이 100 nm 이하였으나,  $\text{CHF}_3$ 를 400 s 동안 처리한 (c)와 (e)에서는 나노 구조의 폭이 약 150 nm까지 나타났다. Fig 5 (a)는 RIE 처리가 되지 않은 구형 패턴이 랜덤하게 분포 되어있는 확산 필름의 구형 구조물의 표면이다. Fig 5 (b)(c)는 RIE 처리 후 마이크로 크기의 구형 패턴 표면에 무작위 나노 구조가 형성되었다. Fig 5 (b)와 (d), (c)와 (e)를 함께 비교했을 때,  $\text{O}_2$ 처리 시간이 길수록 형성된 나노 구조의 기둥이 더 높게 형성되며 밀도가 높았다. (b)와 (d)에서 형성된 나노 구조의 폭은 약 20 nm로 동일하였으나,  $\text{O}_2$  처리 시간이 100s에서 400s로 길어지면서 나노 구조의 높이가 약 20 nm에서 75 nm로 증가하였다. Fig 5 (b)와 (c), (d)와 (e)를  $\text{CHF}_3$  처리 시간에 따른 변화로 비교했을 때,  $\text{CHF}_3$ 의 처리 시간이 길어질수록 나노 구조의 폭이 커졌다.  $\text{CHF}_3$ 의 처리 시간이 100s에서 400s로 증가하면서, (b)와 (d)에서의 나노 구조의 폭은 50 nm 이하였으나 (c)와 (e)에서 최대 80 nm 이상이다.

Fig 4와 5에서 RIE 공정의 처리 시간에 따라 형성되는 나노 구조는 동일한 경향성을 보였다.  $\text{O}_2$  처리시간이 길어질수록 형성되는 나노 구조는 더 깊게 에칭 되어 형성되는 나노 기둥이 높이가 높아졌으며,  $\text{CHF}_3$ 의 처리시간이 길어질수록 fluorine에 의해  $\text{O}_2$  공정을 통해 형성된 나노 기둥이 응집되어 폭이 넓어졌다[32]. 그러나  $75 \mu\text{m}$  크기의 반구형 MLA와  $10 \mu\text{m}$  이하의 구형 확산 필름 표면에 동일한 RIE 공정 조건으로 형성된 나노 구조물은 서로 다른 크기를 나타냈다.  $\text{O}_2$  400s/ $\text{CHF}_3$  400s 기준으로 분석했을 때, 반구형 MLA의 경우 RIE 공정 처리로 인해 높이가 375 nm, 폭이 150 nm인 나노 기둥을 형성한 반면, 구형 확산 필름을 사용한 경우 높이가  $75 \mu\text{m}$ , 폭이 80 nm인 나노

기둥이 형성되었다. 이는 본 연구에서 사용된 외부 광 추출층의 패턴 및 크기와 재질이 달랐기 때문에 서로 다른 표면 이미지를 보여준다.



**Fig. 4.** SEM image of different RIE processed hemisphere MLA: (a) bare (b) O<sub>2</sub> 100s/CHF<sub>3</sub> 100s, (c) O<sub>2</sub> 100s/CHF<sub>3</sub> 400s, (d) O<sub>2</sub> 400s/CHF<sub>3</sub> 100s and (e) O<sub>2</sub> 400s/CHF<sub>3</sub> 400s.



**Fig. 5.** SEM image of different RIE processed random distributed sphere diffusing film: (a) bare (b) O<sub>2</sub> 100s/CHF<sub>3</sub> 100s, (c) O<sub>2</sub> 100s/CHF<sub>3</sub> 400s, (d) O<sub>2</sub> 400s/CHF<sub>3</sub> 100s and (e) O<sub>2</sub> 400s/CHF<sub>3</sub> 400s.

### 3.2 마이크로-나노 복합 구조가 적용된 OLEDs의 EL 특성

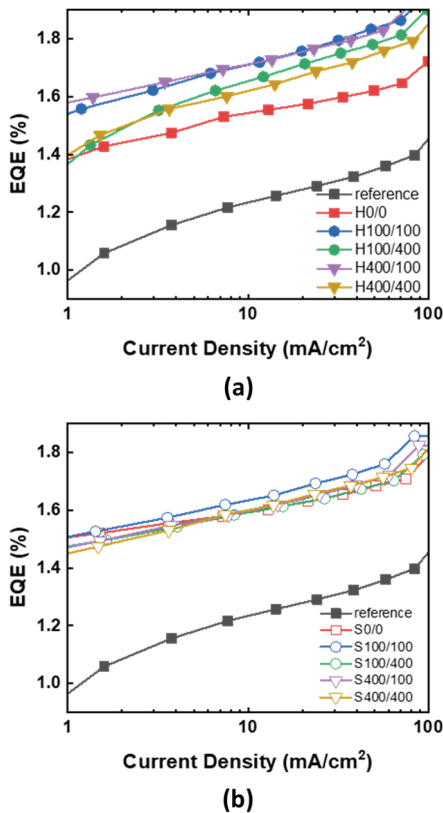
외부 광 추출층은 제작된 OLEDs의 유리 바닥/방출면에 OCA로 부착되어 소자에 대한 EL 특성이 측정되었다. Reference는 외부 광 추출층이 적용되지 않은 bare OLEDs이며, RIE 처리를 하지 않은 마이크로 패턴과 O<sub>2</sub> 및 CHF<sub>3</sub>의 처리 시간에 따라 형성되는 마이크로-나노 복합 구조의 특성 평가를 진행하였다. 소자 구성은 Table 1에 요약되어 있다.

**Table 1.** OLEDs device configuration

Configuration	Sample Name	
	hemisphere MLA packed hexagonal	random distributed sphere diffusing film
bare OLEDs	reference	
O <sub>2</sub> 0s / CHF <sub>3</sub> 0s	H0/0	S0/0
O <sub>2</sub> 100s / CHF <sub>3</sub> 100s	H100/100	S100/100
O <sub>2</sub> 100s / CHF <sub>3</sub> 400s	H100/400	S100/400
O <sub>2</sub> 400s / CHF <sub>3</sub> 100s	H400/100	S400/100
O <sub>2</sub> 400s / CHF <sub>3</sub> 400s	H400/400	S400/400

Fig 6는 제작된 OLEDs의 current density-EQE 특성을 보여 준다. EQE 특성은 전류밀도 20 mA/cm<sup>2</sup>에서 분석되었다. reference 소자의 EQE는 1.28%이며, 외부 광 추출층이 적용된 모든 소자는 reference 대비 EQE가 향상되었다. Fig 6 (a)는 75 μm 반구형 MLA의 마이크로-나노 복합 구조가 적용된 OLED의 특성을 나타내며, 나노 구조가 형성되지 않은 H0/0 소자의 EQE는 1.57%로 reference 대비 23%가 증가하였다. 이는 외부의 반구형 패턴으로 인한 광 산란이 일어났기 때문에 효율이 향상되었다. 반구형 MLA에 마이크로-나노 복합 구조가 적용된 모든 소자의 효율은 reference와 비교했을 때 H0/0를 적용한 소자보다 더 높은 향상치를 나타냈다. H100/100 및 H100/400 소자의 EQE는 각각 1.77% 및 1.71%로 reference 대비 38% 및 33%가 향상되었다. H400/100 및 H400/400 소자의 EQE는 각각 1.76% 및 1.68%로 reference 대비 38% 및 31%가 향상되었다. 또한, 나노 패턴이 형성되지 않은 H0/0과 비교하였을 때 H100/100, H100/400, H400/100 및 H400/400의 EQE는 각각 13%, 9%, 12% 및 7% 더 높았다. EQE 변화는 O<sub>2</sub>의 처리 시간보다 CHF<sub>3</sub>의 처리시간에 따라 비교적 큰 차이를 보였다. 이를 통해 광 추출 효율은 나노 기둥이 깊이보다 폭의 크기에 더 영향을 받았음을 확인할 수 있다. Fig 5 (b)에서 나노 구조가 형성되지 않은 S0/0 소자의 EQE는 1.63%로 reference 대비 28% 향상되었다. 이 결과는 H0/0 소자와 동일하게 마이크로 스케일의 구형 패턴으로 인한 광 산

란 효과가 발생했기 때문에 효율이 향상되었다. 구 형태 표면에 마이크로-나노 복합 구조가 적용된 모든 소자들의 효율은 reference 대비 최대 31 %의 향상치를 보였다. S100/100, S100/400, S400/100 및 S400/400 소자의 EQE는 각각 1.63 %, 1.62 %, 1.64 % 및 1.63 %이며, reference 대비 31 %, 26 %, 28 % 및 27 % 향상되었다. 나노 구조가 형성된 S100/100, S400/100 소자는 S0/0과 비교했을 때 효율이 3 % 및 1 % 더 높았다. 그러나 나노 구조가 형성되었음에도 S400/400은 S0/0과 효율 차이를 보이지 않았으며, S100/400은 오히려 효율이 -1% 더 낮았다.



**Fig. 6.** Current density – EQE characteristics: (a) hexagonally packed hemisphere MLA and (b) randomly distributed sphere diffusing film.

전반적으로 반구형 MLA의 효율 향상치가 구형 확산 필름보다 더 높았다. 반구형 MLA 및 구형 확산 필름에서 각각 H100/100 및 S100/100의 EQE가 1.77 % 및 1.68 %로 가장 높았다. 이 결과는 Fig 5 (a) 및 (b) 와 비교했을 때, 마이크로 패턴 표면에 RIE 처리 이후, 형성된 나노 기둥의 높이는 반구형 MLA가 구형 확산 필름보다 최소 2배 이상

더 높아 광 산란 효과가 증가하였다[33]. 이는 O<sub>2</sub> 100s 및 CHF<sub>3</sub> 100s 동안 처리되었을 때 마이크로 패턴 표면에 형성된 나노 구조의 높이와 폭이 광 추출 구조에 최적화되었음을 확인할 수 있다. 분석된 모든 소자의 EL 특성을 요약한 내용은 Table 2에 정리 되어있다.

**Table 2.** Summarized EL characteristics of fabricated OLEDs with external light extraction layer

Sample Name	At current density 20mA/cm <sup>2</sup>		
	EQE (%)	Improvement to Reference	Improvement to H0/0
Reference	1.28		
H0/0	1.57	1.23X	
H100/100	1.77	1.38X	1.21X
H100/400	1.71	1.34X	1.09X
H400/100	1.76	1.38X	1.12X
H400/400	1.68	1.31X	1.07X
Sample Name	EQE (%)	Improvement to Reference	Improvement to S0/0
S0/0	1.63	1.27X	
S100/100	1.68	1.31X	1.03X
S100/400	1.62	1.26X	0.99X
S400/100	1.64	1.28X	1.01X
S400/400	1.63	1.27X	1.0X

Fig 7에서 시야각 특성을 분석하기 위해 제작된 소자는 0°에서 70°까지 (10°씩) 측정되었으며, 시야각 변화에 따라 normalized 된 EL intensity를 나타낸다. 모든 소자는 Lambertian 광원보다 넓은 프로파일을 보였다. 반구형 MLA를 적용한 소자의 방출 패턴은 reference에 비해 좁은 방사 프로파일을 보여준다. 마이크로-나노 복합 구조가 있는 H100/100, H100/400, H400/100 및 H400/400의 시야각 분포는 reference 대비 최대 -3 %까지 감소했으나, 나노 패턴이 없는 H0/0과 비교했을 때 최대 10 %까지 증가하였다. 반면, 구형 확산 필름을 적용한 소자의 방출 패턴은 Lambertian과 reference보다 더 넓은 방사 프로파일을 보여 주며, 반구형 패턴을 적용한 소자보다 더 넓은 광 분포를 나타낸다. 이 결과는 구형 패턴을 적용하였을 때, 전방으로 추출되는 광에 비해 측면으로 더 많은 광이 방출되기

때문이다. S400/100, S400/400의 시야각 분포가 비교적 넓은 방사패턴을 보여주며, 이는 H400/100 및 H400/400의 결과와 동일하게 O<sub>2</sub> 처리 시간에 영향을 받았음을 확인할 수 있다. O<sub>2</sub>의 처리 길수록 형성되는 나노 구조의 높이가 높아지기 때문에 기둥에 의한 산란효과의 증가로 넓은 시야각 분포를 나타냈다. 본 연구에 사용된 공정을 통해 시야각 조절이 가능함을 확인할 수 있다.

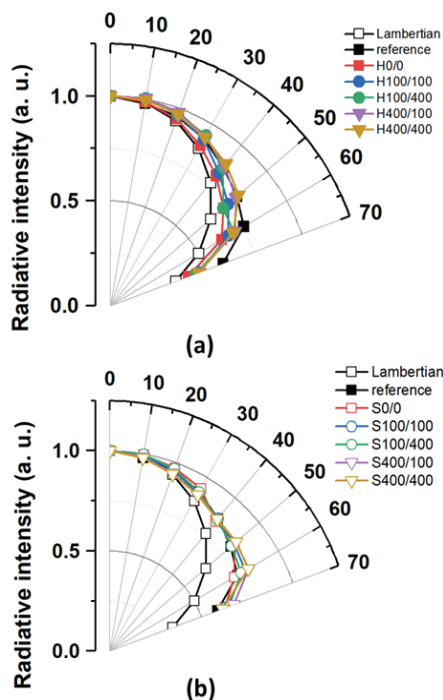


Fig. 7. Comparison of viewing angle characteristics: (a) hexagonally packed hemisphere MLA and (b) randomly distributed sphere diffusing film.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 단순 공정을 통해 마이크로-나노 복합 구조를 구현하여 OLEDs의 외부 광 추출 효율을 향상시켰다. 반구형 패턴이 육각형으로 패킹된 MLA 및 구형 패턴이 랜덤하게 분포되어있는 확산필름의 마이크로 패턴 표면에 RIE 공정을 수행하여 나노 구조를 형성시켰다. 나노 구조는 O<sub>2</sub> 및 CHF<sub>3</sub> 플라즈마 공정 시간에 따라 서로 다른 형태 및 분포를 나타냈으며, 패턴에 따른 소자 적용 특성 평가가 진행되었다.

제작된 반구형 MLA와 구형 확산 필름이 부착된 소자는 마이크로 패턴의 크기와 필름의 재질로 인해 동일한

RIE 공정을 수행하였음에도 불구하고 효율 차이를 보였다. 반구형 MLA에 형성된 마이크로-나노 복합 구조가 적용된 소자의 최대 효율은 MLA가 부착되지 않은 소자 대비 1.38X, 마이크로 스케일의 반구형 패턴만 적용된 소자 대비 1.21X가 향상되었다. 반면, 구형 확산 필름에 형성된 마이크로-나노 복합 구조가 적용된 소자의 최대 효율은 확산 필름이 부착되지 않은 소자 대비 1.31X, 구형 패턴만 적용된 소자 대비 1.03X의 향상치를 나타냈다.

본 연구에서는 O<sub>2</sub> 및 CHF<sub>3</sub>의 공정 시간을 조절하여 광 추출 효율을 극대화 및 시야각 분포 조절이 가능한 나노 구조를 최적화하였다. 이 결과는 간단한 공정을 통해 마이크로-나노 복합 구조를 구현하여 OLEDs의 아웃커플링 효율을 향상시키는 효과적인 방법론을 보여주고 있다. 또한, 고효율 OLEDs에 달성할 수 있는 또 다른 기회를 제공할 것을 기대한다.

#### 감사의 글

이 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2020RIC1C1013567)과 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004, 2021H-01-02-09-003)으로 수행된 결과입니다. 또한 선문대학교 차세대반도체기술센터의 분석지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Xu, R. P., Li, Y. Q., and Tang, J. X., "Recent advances in flexible organic light-emitting diodes", *J. of Materials Chemistry C*, Vol. 4, No 39, pp. 9116-9142, 2016.
- Tang, C. W., and VanSlyke, S. A., "Organic electroluminescent diodes". *Applied physics letters*, Vol. 51, No. 12, pp. 913-915, 1987.
- Sun, N., Jiang, C., Li, Q., Tan, D., Bi, S., and Song, J., "Performance of OLED under mechanical strain: a review", *J. of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 1, No. 42, 2020.
- Zhang, Q., Li, B., Huang, S., Nomura, H., Tanaka, H., and Adachi, C., "Efficient blue organic light-emitting diodes employing thermally activated delayed fluorescence" *Nature Photonics*, Vol. 8, No. 4, pp. 326-332, 2014.
- Park, M. H., Han, T. H., Kim, Y. H., Jeong, S. H., Lee, Y., Seo, H. K., Cho, H. C., and Lee, T. W., "Flexible organic light-emitting diodes for solid-state lighting", *J of Photonics for energy*, Vol. 5, No. 1, pp. 053599, 2015.
- Hong, K., and Lee, J. L., "Recent developments in light extraction technologies of organic light emitting diodes,"

- Electronic Materials Letters, Vol. 7, No. 2, pp. 77-91, 2011.
7. Leo, K., "Efficient and flexible solution", Nature Photonics, Vol. 5, No. 12, 716-718, 2011.
  8. Bhatnagar, P. K., "Organic Light-Emitting Diodes—A Review", Nanomaterials and Their Applications, pp. 261-287, 2018.
  9. Zhang, J., Li, W., Cheng, G., Chen, X., Wu, H., and Shen, M. H. H., "Life prediction of OLED for constant-stress accelerated degradation tests using luminance decaying model", J. of Luminescence, Vol. 154, pp. 491-495, 2014.
  10. Adachi, C., Baldo, M. A., Thompson, M. E., and Forrest, S. R. "Nearly 100% internal phosphorescence efficiency in an organic light-emitting device" J. of Applied Physics, Vol. 90, No. 10, pp. 5048-5051, 2001.
  11. Kim, J. G., Hwang, Y., Hwang, H., Choi, J. H., Park, Y. W., and Ju, B. K., "Enhanced optical efficiency and color purity for organic light-emitting diodes by finely optimizing parameters of nanoscale low-refractive index grid" Scientific reports, Vol. 10,
  12. Lee, K., Shin, J. W., Park, J. H., Lee, J., Joo, C. W., Lee, J. I., ... and Moon, J., "A light scattering layer for internal light extraction of organic light-emitting diodes based on silver nanowires", ACS applied materials and interfaces, Vol. 8, No. 27, pp. 17409-17415, 2016.
  13. Lim, T. B., Cho, K. H., Kim, Y. H., and Jeong, Y. C., "Enhanced light extraction efficiency of OLEDs with quasiperiodic diffraction grating layer", Optics express, Vol. 24, No. 16, pp. 17950-17959, 2016.
  14. Choi, K. B., Shin, S. J., Park, T. H., Lee, H. J., Hwang, J. H., Park, J. H., ... and Ju, B. K., "Highly improved light extraction with a reduced spectrum distortion of organic light-emitting diodes composed by the sub-visible wavelength nano-scale periodic ( $\sim 250$  nm) structure and micro-lens array", Organic Electronics, Vol. 15, No.1, pp. 111-117, 2014.
  15. Lee, C., and Kim, J. J., "Enhanced light out-coupling of OLEDs with low haze by inserting randomly dispersed nanopillar arrays formed by lateral phase separation of polymer blends", Small, Vol. 9 No. 22, pp. 3858-3863, 2013.
  16. J. J. Shiang, T. J. Faircloth, and Anil R. Duggal, "Experimental demonstration of increased organic light emitting device output via volumetric light scattering", J. of Applied Physics, Vol. 95, pp. 2889-2895, 2004.
  17. T.-W. Koh, J. A. Spechler, K. M. Lee, C. B. Arnold, and B. P. Rand, "Enhanced Outcoupling in Organic Light-Emitting Diodes via a High-Index Contrast Scattering Layer", ACS Photonics, Vol. 2, pp. 1366-1372, 2015.
  18. Lee, I., Park, J. Y., Gim, S., Ham, J., Son, J. H., and Lee, J. L., "Spontaneously Formed Nanopatterns on Polymer Films for Flexible Organic Light-Emitting Diodes", Small, Vol. 11, No. 35, pp. 4480-4484, 2015.
  19. Chen, S., and Kwok, H. S., "Light extraction from organic light-emitting diodes for lighting applications by sand-blasting substrates", Optics express, Vol. 18, No. 1, pp. 37-42, 2010.
  20. Peng, H., Ho, Y. L., Yu, X. J., Wong, M., and Kwok, H. S., "Coupling efficiency enhancement in organic light-emitting devices using microlens array-theory and experiment", J. of display technology, Vol. 1, No. 2, pp. 278-282, 2005.
  21. Möller, S., and Forrest, S. R., "Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays", J. of Applied Physics, Vol. 91, No. 5, pp. 3324-3327, 2002.
  22. Song, J., Kim, K. H., Kim, E., Moon, C. K., Kim, Y. H., Kim, J. J., and Yoo, S., "Lensfree OLEDs with over 50% external quantum efficiency via external scattering and horizontally oriented emitters", Nature communications, Vol. 9, No. 1, pp. 1-10, 2018.
  23. Zhou, D. Y., Shi, X. B., Gao, C. H., Cai, S. D., Jin, Y., and Liao, L. S., "Light extraction enhancement from organic light-emitting diodes with randomly scattered surface fixture." Applied surface science, Vol. 314, pp. 858-863, 2014.
  24. Greiner, H., "Light extraction from organic light emitting diode substrates: simulation and experiment", Japanese J. of Applied Physics, Vol. 46, No. 7R, pp. 4125, 2007.
  25. Ang, P. Y., Will, P. A., Lenk, S., Fischer, A., and Reineke, S., "Inside or outside: Evaluation of the efficiency enhancement of OLEDs with applied external scattering layers", Scientific reports, Vol. 9, No. 1, pp. 1-10, 2019.
  26. Jang, J. H., Oh, M. C., Yoon, T. H., and Kim, J. C., "Polymer grating imbedded organic light emitting diodes with improved out-coupling efficiency", Applied Physics Letters, Vol. 97, No. 12, pp. 203, 2010.
  27. Krummacher, B. C., Mathai, M. K., Choong, V., Choulis, S. A., So, F., and Winnacker, A., "General method to evaluate substrate surface modification techniques for light extraction enhancement of organic light emitting diodes", J. of applied physics, Vol. 100, No. 5, pp. 054702, 2006.
  28. Yuan, W., Li, L. H., Lee, W. B., and Chan, C. Y., "Fabrication of microlens array and its application: a review." Chinese J. of Mechanical Engineering, Vol. 31, No. 1, pp. 1-9, 2018.
  29. Sun, Y., and Forrest, S. R., "Organic light emitting devices with enhanced outcoupling via microlenses fabricated by imprint lithography", J. of applied physics, Vol. 100, No. 7, pp. 073106, 2006.
  30. Zhou, T. F., Ruan, B. S., Zhou, J., Dong, X. B., Liang, Z. Q., and Wang, X. B., "Mechanism of brittle fracture in diamond turning of microlens array on polymethyl

- methacrylate”, *Advances in Manufacturing*, Vol. 7, No. 2, pp. 228-237, 2019.
31. Go, J. H., " Technology trends and prospects for improving light extraction of OLEDs using new materials and new structures ", *The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, No. 3, pp. 11-21, 2013.
32. Hwang, J. H., Lee, H. J., Shim, Y. S., Park, C. H., Jung, S. G., Kim, K. N., ... and Ju, B. K., "Enhanced light out-coupling efficiency of organic light-emitting diodes with an extremely low haze by plasma treated nanoscale corrugation”, *Nanoscale*, Vol. 7, No. 6, pp. 2723-2728, 2015.
33. Kwack, J. H., Choi, J., Park, C. H., Hwang, H., Park, Y. W., and Ju, B. K., "Simple method for fabricating scattering layer using random nanoscale rods for improving optical properties of organic light-emitting diodes”, *Scientific reports*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-8, 2018.

---

접수일: 2022년 3월 4일, 심사일: 2022년 3월 14일,  
게재확정일: 2022년 3월 25일