

마이크로 렌즈 어레이를 이용한 유기 발광 소자의 광추출 효율 향상에 관한 연구

김혜숙¹, 황덕현¹, 홍진웅², 송민종³, 한원근¹, 김태완^{1,a}

¹ 홍익대학교 정보디스플레이공학과

² 광운대학교 전기공학과

³ 광주보건대학 방사선과

Improvement of Outcoupled Light Efficiency of Organic Light-emitting Diodes with a Use of Microlens Array

Hye Sook Kim¹, Deok Hyeon Hwang¹, Jin Woong Hong², Min Jong Song³,
Wone Keun Han¹, and Tae Wan Kim^{1,a}

¹ Department of Information Display Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

² Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

³ Department of Radiation Technology, Gwangju Health University, Gwangju 506-701, Korea

(Received March 28, 2014; Accepted April 11, 2014)

Abstract: Because of a waveguiding effect and total internal reflection caused by a difference in refractive indices, only 20% of generated light is emitted to the air and the rest is trapped or absorbed in the device. An improvement of outcoupled efficiency of organic light-emitting diodes was studied using a microlens array. Mold of microlens array was fabricated by using photo-lithography with the AZ9260 photoresist, and the microlens array was formed onto the glass substrate using the UV curing agent named ZPU13-440. Device structure consists of microlens/glass/ITO/TPD/Alq₃/LiF/Al. It was found that there is an improvement of external quantum efficiency by about 20% at the same current density for the device with the microlens array compared to that of the reference one. Simulated outcoupled efficiency shows the improvement by about 20% for the device with the microlens array compared to that of the reference one. These results are consistent with the experimental ones.

Keywords: Microlens, Outcoupling efficiency, OLED

1. 서 론

유기 발광 소자는 다층의 유기 박막을 양전극과 음전

극 사이에 둔 구조로 된 소자로 기존의 디스플레이에 서 광원으로 사용되는 백 라이트 유닛 없이 자체적으로 발광 가능한 특성이 있다. 뿐만 아니라 시야각이 우수하고 응답 속도가 빠른 것으로 평가된다. 이러한 장점 등으로 유기 발광 소자는 주로 디스플레이 산업 분야에서 연구되어 왔으며 또한, 친환경적이고 에너지

a. Corresponding author; taekim@hongik.ac.kr

Copyright ©2014 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.

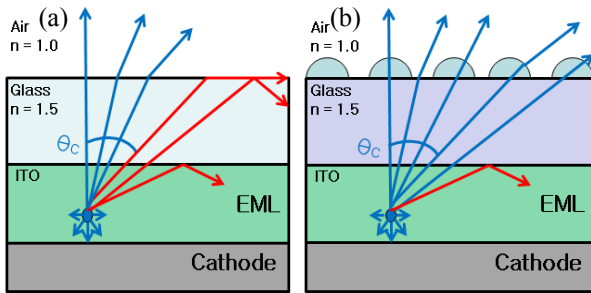


Fig. 1. Schematic representation of light rays in (a) the reference device and (b) the one with microlens array.

절감형 조명용 광원의 필요성이 대두됨에 따라 차세대 조명용 광원으로도 주목받고 있다. 하지만 조명용으로서의 유기 발광 소자는 기존의 조명 제품인 형광등 등에 비해 전력 효율 면에서 개선이 필요하다. 이에 대한 하나의 방안으로 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 외부 양자 효율의 개선을 들 수 있다. 1987년 Tang 그룹이 유기 발광 소자의 실용화 가능성을 처음 제시한 이후 [1], 1997년 Gu 그룹은 광선 광학을 이용하여 내부에서 생성된 빛은 약 30%가 유리 기판, 약 50%가 ITO 내에서 갇히게 되어 약 20%만이 외부로 방출됨을 보고하였다 [2]. 2002년 Möller 그룹은 PDMS (polydimethylsiloxane)을 이용하여 지름이 약 10 μm 인 마이크로 렌즈 어레이를 제작하여 광추출 효율이 마이크로 렌즈가 없는 소자와 비교하여 약 53% 향상됨을 보고하였다 [3].

그림 1(a)는 유기 발광 소자의 발광층에서 나온 빛의 경로를 나타낸 것이다. 유리와 공기의 굴절률 차이로 인해 파란색 빛으로 나타낸 것과 같이 임계각 θ_c 이내의 빛만이 유리 바깥으로 빠져 나온다. 빛의 입사각이 임계각일 경우에는 유리의 경계면을 따라가고, 임계각보다 클 경우에는 유리 내부에 갇히게 된다. 만일 유리의 굴절률이 1.5이고, 공기의 굴절률이 1.0일 때, 광추출 효율은 이론적으로 약 20%이다 [4].

그림 1(b)는 1(a)에서 나타낸 소자의 유리면 위에 유리와 굴절률이 비슷한 마이크로 렌즈 어레이를 부착한 모습이다. 그림 1(a)에서 붉은색으로 표시하였던 빛을 마이크로 렌즈 어레이를 거치면서 소자 바깥으로 나와 푸른색으로 표시하였다. 이러한 변화와 같이 마이크로 렌즈 어레이는 굴절률 차이로 인해 소자 바깥으로 나오지 못하는 빛이 바깥으로 나올 수 있도록 도와주어 소자 내부 구조와 관계없이 광추출 효율

향상에 기여할 수 있음을 의미한다 [5].

따라서 본 연구에서는 광추출 효율 향상을 위하여 마이크로 렌즈 어레이 설계 및 제작을 통해 유기 발광 소자의 광추출 효율 향상 연구를 진행하고, 이를 컴퓨터 시뮬레이션으로 실험 결과를 고찰해 보았다.

2. 실험 방법

그림 2는 마이크로 렌즈 어레이를 제작하는 과정이다. 먼저 실리콘 웨이퍼 상에 존재할 수 있는 유기 및 무기 오염 물질과 금속 오염 물질을 제거하기 위하여 초음파 세척기를 사용하여 상온에서 30분 쯤 아세톤-에탄올-1차 증류수 순서로 세정하였다. 그 후 질소 건조로 건조한 후 90°C에서 10분 간 열처리하여 웨이퍼 상에 남아 있는 수분을 최대한 제거하였다.

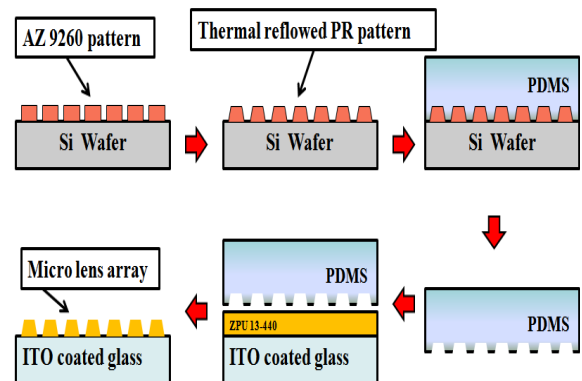


Fig. 2. Fabrication process of microlens array.

포토리저스트의 코팅은 Won사의 SC-103 스핀 코터를 이용하였다. 포토리저스트를 코팅하기 전에 HMDS (hexamethyldisilane) 용액을 이용하여 실리콘 웨이퍼 표면을 소수성 처리하였다. 포토리저스트는 두꺼운 두께의 몰드를 형성할 수 있는 AZ 9260 (Clariant Co., Ltd.)로 제작하였다. 스핀 코팅은 첫 번째로 500 rpm에서 9초, 750 rpm에서 20초 간 코팅한 뒤, 마지막으로 2,500 rpm에서 10초 간 코팅하였다. 그 뒤 AZ 9260의 안정화를 위하여 실온에서 약 20분 동안 놓아둔 후 95°C에서 10분 간 베이킹하여 포토리저스트에 남아있는 수분을 제거하였다.

포토 마스크는 캐드를 이용하여 마스크 패턴의 반지름을 50 μm , 충실도 (fill factor)가 0.10인 필름 형태

의 마스크로 제작하였다. 노광은 QUINTEL 사의 Q-4000 노광 장비를 이용하여 UV 출력 11 mW/cm^2 에서 270초 간 노광하였다. 노광된 실리콘 웨이퍼를 AZ EM사의 AZ 400 K 용액으로 180 ~ 210초 동안 현상한 뒤, 오븐을 이용하여 130°C 에서 30분 간 현상된 포토레지스트 패턴을 가열 용융(reflow)하여 남아 있는 포토레지스트 패턴이 보다 반구 모양이 되도록 하였다.

PDMS 몰드는 실리콘 웨이퍼 기판에 형성된 마이크로 렌즈 어레이 패턴을 이용하여 제작하였다. PDMS는 기계적 강도가 우수하고, 고온에서 장시간 사용하여도 노화되지 않는 장점을 가지고 있어서 작은 구조물의 형상, 마이크로 채널 부분에 응용되고 있다. PDMS는 액상으로 된 실리콘 합성 고무와 화학적 반응으로 경화를 촉진시키는 촉매로 이루어져 있으며, 사용한 PDMS는 다우 코닝사의 실가드 184 실리콘 엘라스토펜이다. PDMS 몰드를 만들기 위해서 실리콘 합성 고무와 경화제를 여러 부피비로 섞어 적절한 부피비를 실험을 통해 알아내었다. 실험을 통해 가장 적절하다고 판단된 부피비는 실리콘 합성 고무와 경화제의 비가 5:1일 경우이다. 이 부피비를 이용하여 5 ml 주사기를 사용하여 실리콘 합성 고무와 경화제를 플라스틱 막대를 사용하여 교반하고, 섞는 과정에서 발생한 기포가 사라질 때까지 약 20분 간 상온에 방치해 둔다. 기포가 사라지면 다시 주사기를 사용하여 마이크로 렌즈 어레이 패턴이 있는 실리콘 웨이퍼 위에 고르게 도포한 뒤 핫플레이트에 90°C 로 약 20분간 열을 가해 굳힌다. 굳어진 PDMS 몰드는 조심스럽게 실리콘 웨이퍼 기판과 분리시킨다.

마이크로 렌즈 어레이의 형성은 ChemOptics사의 ZPU13-440 UV 경화제와 PDMS 몰드를 이용하였다. 이 고분자는 UV 경화 저손실 고분자 물질이며 단일 모드 광도파로 제작이 가능하다. 또한 다양한 광소자 개발 물질로 사용되어 오고 있다. ZPU13-440은 굴절률이 1.44로 유리의 굴절률인 1.5와 차이가 거의 없으며, 필름으로 만들어졌을 때 균열이 일어나지 않는 특징이 있다. 유리 기판 위에 ZPU13-440을 한 방울 정도 떨어뜨린 후 PDMS 몰드를 그 위에 눌러준 뒤, 30초 동안 UV에 노출시켜 마이크로 렌즈 어레이를 유리 위에 만들었다.

유기 발광 소자는 진공 열 증착을 통해서 제작하였으며, ITO (180 nm)/TPD (40 nm)/Alq₃ (60 nm)/LiF (0.5 nm)/Al (100 nm)의 구조로 구성하였다. 마이크로 렌즈 어레이가 있는 소자는 증착에 앞서 마이크로

렌즈를 형성하였다. 증착 시 진공은 2×10^{-6} Torr의 진공도이며, 증착 속도는 유기물의 경우 $1.0 \sim 1.5 \text{ \AA/s}$, LiF의 경우 0.5 \AA/s , 음전극의 경우 $1.0 \sim 5.0 \text{ \AA/s}$ 이다. TPD (tetra-phenyl diamine)은 정공 수송층의 역할을 담당하는 고분자이고, tris(8-hydroxy quinolino) Alq₃ (aluminium)은 발광층과 전자 수송층 역할을 수행하며, LiF (lithium fluoride)는 전자 주입 및 정공 블로킹 역할을 수행하는 형태이다. 소자의 전압-전류-휘도 특성 측정은 Keithley 236 source-measure unit과 Keithley 617 electrometer를 이용하였다.

시뮬레이션은 Light Tools 7.2.0 프로그램을 이용하여 마이크로 렌즈 어레이의 유/무에 따른 소자의 광추출 효율 결과를 얻고, 이를 실험에서 측정된 외부 양자 효율과 비교하였다. 시뮬레이션에서의 소자는 유리층 / 발광층 / 반사층으로 설정하였다. 굴절률은 유리층을 1.5, 발광층을 1.75로 지정하였고, 발광 파장은 녹색 광원에 해당하는 550 nm로 하였다. 반사층은 100% 반사로 설정해 광원이 소자 내부에서 유리면 쪽으로만 나오도록 하였다.

마이크로 렌즈 어레이는 반지름을 $50 \mu\text{m}$ 으로 설정하였고, 충실도와 모양의 다채로운 변화를 주어 실험 결과와 비교하였다. 특히, 마이크로 렌즈를 실제 제작하였을 때 사다리꼴 형태와 가까웠음을 고려하여 사다리꼴 모양에 대한 시뮬레이션에 초점을 맞추어 진행하였다. 사다리꼴 렌즈는 밑각을 $38^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 변화를 주어 왼쪽에 가까운 형태에서 왼쪽동까지 살펴보고, 높이는 $2.5 \sim 30 \mu\text{m}$ 사이를 $2.5 \mu\text{m}$ 간격으로 변화를 주었다.

3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 포토레지스트 몰드를 오븐으로 가열 용융한 후 변화한 모습을 광학 현미경으로 살펴본 사진이다. 이를 통해 렌즈의 모양이 반구형을 이루고 있음과, 렌즈의 충실도가 약 0.10, 반지름이 약 $50 \mu\text{m}$ 정도임을 확인할 수 있다. 여기서 충실도는 기판의 면적 대비 렌즈가 차지하는 비율이다. 그림 3(b)는 알파 스텝 측정기를 이용하여 마이크로 렌즈의 높이를 측정된 결과이다. 렌즈의 높이는 약 $5 \mu\text{m}$ 정도로 형성되었음을 알 수 있고, $150 \sim 200 \text{ nm}$ 에 걸쳐 높이 감소가 선형적으로 일어나고 있음을 통해 생성된 마이크로 렌즈가 반구형의 형태보다 렌즈의 수직 단면이 사다리꼴 모양임을 유추해 볼 수 있었다.

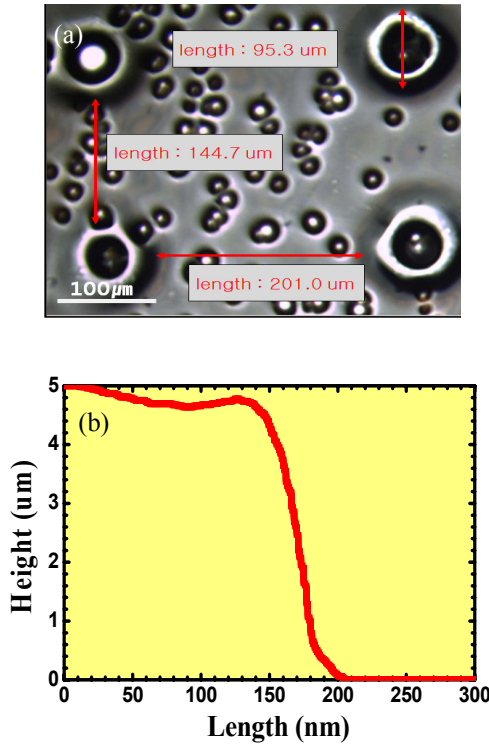


Fig. 3. (a) Picture of microlens array after thermal reflow taken by optical microscope (Olympus Co., Ltd.) and (b) height of microlens measured by alpha step 200 (Tencor Co., Ltd.).

그림 4(a)는 기본 소자와 마이크로 렌즈를 부착한 소자의 전압에 따른 전류 밀도와 휘도 특성을 나타낸 그래프이다. 8 V에서 두 소자의 휘도를 비교해 보면 기본 소자는 약 400 cd/m²인데 비하여, 마이크로 렌즈 어레이를 부착한 소자는 약 1,000 cd/m²로서 전압에 따른 전류 밀도 특성이 비슷한 반면, 전압에 따른 휘도 특성은 큰 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 마이크로 렌즈 어레이를 부착함으로써 약 2.5배의 휘도가 증가함을 확인할 수 있었다.

그림 4(b)는 기본 소자와 마이크로 렌즈를 부착한 소자의 전류 밀도에 따른 외부 양자 효율을 나타낸 그래프이다. 외부 양자 효율은 전류 밀도가 8 mA/cm²에서 기본 소자와 마이크로 렌즈를 부착한 소자가 각각 0.73%와 0.87%로서 기본 소자에 비해 마이크로 렌즈를 부착한 소자의 외부 양자 효율이 약 20% 증가함을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션은 충실도 0.05부터 0.75까지에 대해 진행하였는데 실험의 충실도 조건인 0.10에서와는 달리

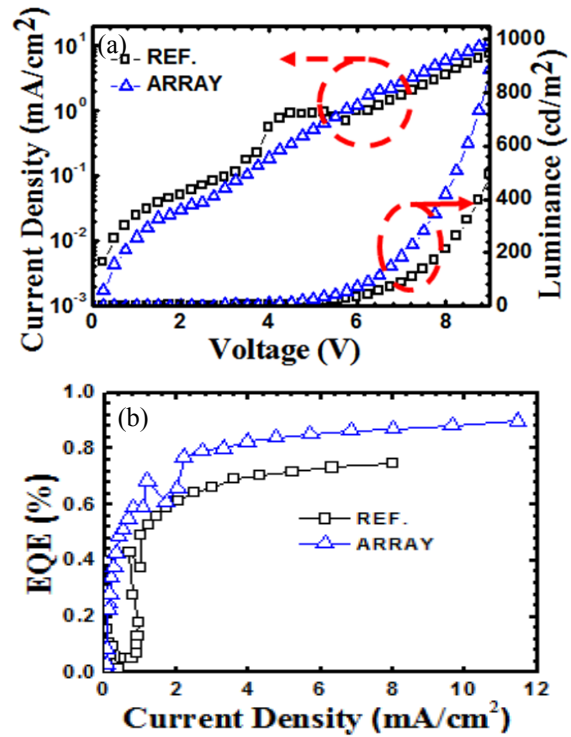


Fig. 4. (a) Current density-voltage-luminance characteristics and (b) external quantum efficiency-current density characteristics for the reference device and the device with microlens array.

0.30 부근에서 최대 광추출 효율이 나타났다. 그림 5(a)는 기본 소자와 렌즈의 반지름이 50 μm이고, 충실도가 0.30일 때, 렌즈 모양에 따른 광추출 효율을 비교한 그래프이다. 여기서 사다리꼴과 원뿔의 밑각은 46°로 설정하였다. 광추출 효율은 반구 모양의 마이크로 렌즈의 경우가 약 38%로, 기본 소자에 비해 약 73% 향상되어 가장 효율적인 렌즈로 나타났다. 한편, 렌즈 크기 변화는 광추출 효율 변화에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 시뮬레이션 결과에 따르면 이상적인 렌즈 배열이 충실도 0.30 정도로 배열된 반구 모양임을 판단할 수 있다 [6].

그림 5(a)는 렌즈의 모양에 따른 광추출 효율의 변화를 나타내었다. 이를 통해 렌즈의 모양은 반구일 때 약 38%로 가장 높음을 알 수 있었다. 그림 5(b)는 충실도가 0.10인 경우 사다리꼴 렌즈의 밑각과 높이 변화에 따른 광추출 효율을 나타낸 그래프이다. 이 결과를 통해서 광추출 효율은 밑각의 크기에 관계없이 사다리꼴 렌즈 높이가 커질수록 증가함을 알 수 있었다.

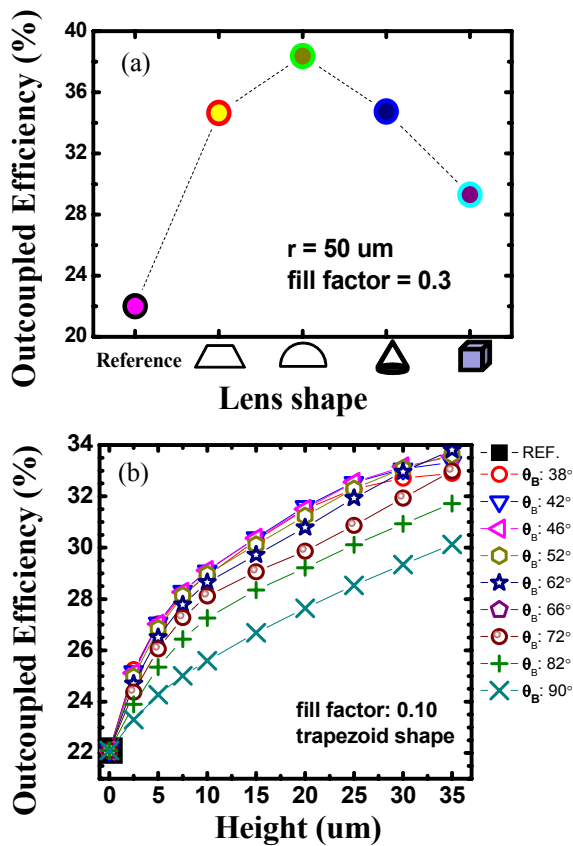


Fig. 5. (a) Simulated outcoupled efficiency of the light depending on the shape of microlens and (b) outcoupled efficiency of the light depending on the height of trapezoidal microlens for several base angles (θ_B).

또한, 마이크로 렌즈의 높이가 $5 \mu\text{m}$ 일 때 광추출 효율이 대략 26%로 기본 소자의 광추출 효율 22%에 비해 약 20% 향상되었는데 이 결과는 실험을 통해 제작한 마이크로 렌즈의 결과와 흡사하다.

4. 결론

본 연구에서는 유기 발광 소자의 광추출 향상을 위하여 마이크로 렌즈 어레이를 유리 기판 뒷면에 부착하였다.

이를 통해 기본 소자에 비해 마이크로 렌즈 어레이를 부착한 소자의 외부 양자 효율이 약 20% 향상됨을 알 수 있었다.

마이크로 렌즈 어레이에 의해 효율이 상승한 것은 유리 와 공기층의 굴절률 차이에 인한 전반사 효과로 유리 안에 갇혀있는 빛이 마이크로 렌즈에 의한 임계각 변화로 공기 층으로 더 많이 빠져 나왔기 때문이다. 이는 마이크로 렌즈 어레이를 이용하면 42° 이상의 입사각으로 입사되는 광선도 유리 내부에 갇히지 않고 소자 전면으로 방출되어 광추출 효율이 향상되는 것이라고 판단할 수 있다.

마이크로 렌즈 어레이의 광추출 효율 향상은 유기 발광 소자를 이용한 디스플레이나 조명 산업에 적용될 수 있다. 따라서 마이크로 렌즈 어레이는 차세대 조명인 유기 발광 조명의 연구에 있어 하나의 방향성이 될 수 있으며, 본 연구 결과는 그 기초 자료로서 가치가 있다고 판단할 수 있다.

REFERENCES

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
- [2] G. Gu and D. Z. Garbuzov, P. E. Burrows, S. Venkatesh, and S. R. Forrest, *Opt. Lett.*, **22**, 396 (1997).
- [3] S. Möller and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 3324 (2002).
- [4] C. Adachi, M. Baldo, S. R. Forrest, and M. E. Thompson, *J. Appl. Phys.*, **90**, 5048 (2001).
- [5] K. Saxena, V. K. Jain, and D. S. Mehta, *Opt. Mater.*, **22**, 396 (2009).
- [6] D. H. Hwang, H. S. Kim, W. J. Lee, S. Lee, and T. W. Kim, *J. KIEEME*, **23**, 745 (2013).