

Island 표면구조의 P(VDF-TrFE) 몰드를 임프린트한 Spike 형태의 고투과성 외부광추출 필름

Spike type high-transmittance external light extraction film imprinted with P(VDF-TrFE) mold with island surface structure

성 백 상¹, 조 재 혁¹, 임 영 지¹, Akpeko Gasonoo², 이 현 아¹, 이 장 원¹, 우 승 완¹,
김 동 수¹, 이 재 현¹, 김 민 회^{1*}, 이 종 회^{1*}

Baeksang Sung¹, Jae-Hyeok Cho¹, Young-Ji Lim¹, Akpeko Gasonoo², Hyunah Lee¹,
Jangwon Lee¹, Seungwan Woo¹, Dongsoo Kim¹, Jae-Hyun Lee¹, Min-Hoi Kim^{1*}, Jonghee Lee^{1*}

Abstract

In this study, a method for improving the light extraction efficiency of organic light emitting diodes was presented using the polymer Poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) [P(VDF-TrFE)] having an island surface structure after annealing. Polydimethylsiloxane (PDMS) imprinted on the island-structured P(VDF-TrFE) surface has a spike structure, which improves the external light extraction efficiency around 20%. It was confirmed that the produced film showed a low haze characteristic of 8.2, and the Current and external quantum efficiency could be improved without pixel blur due to the excellent transmittance of 93.4%.

요 약

본 연구에서는 열처리 후 Island 표면 구조를 가지는 고분자 Poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene) [P(VDF-TrFE)]를 사용하여 유기 발광 다이오드의 광추출 효율을 향상시키기 위한 방법을 제시하였다. Island 구조의 P(VDF-TrFE) 표면 위에 임프린트한 polydimethylsiloxane (PDMS)는 Spike 구조를 띄고 이를 통해 전류 및 외부양자 효율을 약 20%을 향상시켰다. 제작된 필름은 8.2의 낮은 Haze 특성을 보이며, 93.4% 우수한 투과도 특성으로 인해 Pixel blur 없이 광효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Key words : Organic Light-emitting diodes, Light extraction, Outcoupling, P(VDF-TrFE), PDMS

Department of Creative Convergence Engineering, Hanbat National University, 34158, Republic of Korea

★ Corresponding authors

E-mail : jonghee.lee@hanbat.ac.kr, mhkim8@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-828-8802

※ Acknowledgment

The first two authors (B. Sung, and J. Cho) contributed equally.

The authors acknowledge financial support from the Basic Science Research program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2018R1A6A1A03026005 and 2019R111A3A01056075), and by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (P0012744, The Competency Development Program for Industry Specialist).

Manuscript received May. 10, 2021; revised Jun. 20, 2021; accepted Jun. 25, 2021.

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.

I. 서론

유기발광다이오드(Organic light emitting diodes) 디스플레이는 높은 명암비, 넓은 광시야각, 저전압 구동, 유연한 기판의 적용 가능성과 같은 여러 장점이 있다. 이처럼 다양한 장점을 지닌 OLED는 다양한 분야에서 연구 개발이 빠르게 이루어지고 있다[1]. OLED의 연구는 초기부터 상용화된 지금까지 고효율화에 연구의 초점이 맞춰지고 있다[2]. 인광소재의 개발을 통해 높은 내부양자효율을 달성하였지만, 발광층에서 생성된 빛 대비 우리 눈으로 볼 수 있는 빛의 양은 20%에 미치지 못하고 있다. 이는 발광층에서 생성된 빛들이 유리, 투명전극, 유기재료 등 다양한 층들을 투과하면서 소실되기 때문으로, 내부에서 생성된 빛들이 유기재료와 투명전극 사이의 계면 혹은 유기기판과 외부 공기와의 계면에서의 굴절률 차이로 인해 전반사 등으로 밖으로 빠져나오지 못하고 소실되기 때문이다[3]. 따라서 내부에 갇힌 빛들을 기판 밖으로 추출하기 위한 기술인 광추출 기술들이 다양한 방법들 통해 활발히 연구되고 있다. 특히 간단하면서도 높은 광추출 효율을 기대할 수 있는 외부 광추출 기술이 각광받고 있다. 외부 광추출 기술이란 울퉁불퉁한 표면을 지닌 구조체를 기판 외부에 부착하는 방식이다. 주요 광손실 경로인 Substrate mode로 인해 기판으로 인한 전반사로 기판 내에 갇혀진 빛들을 주로 추출하는 방식으로, 기판과 비슷한 굴절률(~ 1.5)을 갖는 광추출 구조를 통해 임계각이 수정되어 기판에 갇힌 빛들을 추출할 수 있는 것이다. 외부 광추출 기술의 대표적인 예시인 microlens arrays(MLA)는 미세한 크기의 렌즈들이 배열되어있는 필름이다. 이를 OLED 소자 기판에 부착하는 간단한 방식으로 광추출 효율을 증가시킬 수 있다[4-8]. 다른 방식의 외부 광추출 기술로는 외부에 구조물을 부착하지 않고 sandblasting 공정을 통하여 기판의 표면 구조를 의도적으로 작은 크기의 흠집들을 만들어 주고 이 흠집들로부터 광추출 효율을 높이는 방식도 존재한다[9]. 이처럼 다양한 기술들로부터 광추출 효율을 높일 수 있지만, 선명한 이미지 구현이 요구되는 디스플레이 분야에는 적용이 어렵고, OLED 조명 분야에만 한정적으로 사용될 수 있는 한계점이 있다[10]. 광추출 구조물을 통해 빛이 증가하지만, 무작위 방향으로 산란시켜 pixel blur

와 같이 발광상이 굉장히 흐려지는 문제를 발생시키기 때문이다. 따라서 선명함이 중요한 Display의 분야에 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 디스플레이에 외부광추출 기술을 적용하기 위해서는 선명한 상을 위한 광경로 정렬 기술이 요구된다. 여러 연구그룹에서 발표된 광효율 향상 필름은 구조물의 형상과 배열을 일정하게 제작하여 방출되는 광경로를 정렬시킴으로써 Pixel blur가 적은 선명한 빛을 얻으면서 동시에 광효율을 향상시킬 수 있었다[11]. 하지만 미세 크기의 구조물을 균일하게 형성하는 데에 있어 어려움이 있고, 이를 제작하기 위한 플라즈마 식각 등의 고가의 공정들을 실제 산업에 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 본 연구는 열처리에 따라 Island 구조를 가지는 고분자 P(VDF-TrFE)를 이용해 몰드로 사용하였다. 볼록한 Island 표면 구조를 PDMS를 임프린트하여 얇은 Spike 형태의 광효율 향상 필름의 제작 방법을 제시한다. 일정한 모양의 Island 구조를 가지는 P(VDF-TrFE)표면을 얻기 위해 200°C의 온도에서 열처리를 진행해 필름의 몰드를 제작하여 몰드 위에 PDMS를 임프린트하였다. 제작된 PDMS 광효율 향상 필름은 90% 이상의 높은 투과도를 지닌 것을 확인하였으며, 이를 하부 발광 OLED 소자의 기판에 부착하는 간단한 방식으로 외부양자효율을 약 20% 정도 향상시켰다. 또한, 얇은 Spike 구조로 인해 OLED 소자에 적용 후에도 pixel blur 문제없이 선명한 이미지 구현이 가능함을 보여주었다.

II. 본론

1. P(VDF-TrFE) 몰드 및 PDMS를 이용한 광효율 향상 필름 제작

그림 2는 P(VDF-TrFE) 몰드 위에 광효율 향상 PDMS 필름 제작 방법을 도식화하였다. 몰드 제작을 위해 bare glass를 acetone내에 초음파 세척을 진행하였고, 이후 220°C의 isopropyl alcohol(IPA) 내에서 20분간 세척을 진행하였다. 세척된 bare glass 위에 cyclopentanone를 용매로한 40 wt%의 P(VDF-TrFE)용액을 3000 rpm으로 30초동안 스핀코팅을 진행하였다. 코팅한 P(VDF-TrFE)의 표면이 일정한 Island 구조를 형성할 수 있도록 핫플레이트 위에 200°C 온도로 2시간 동안 열처리를 진행하였다. 상기 방법에 의해 제조된 P(VDF-TrFE) 박막은

기판과 분리하는 것이 불가능하여 광효율 향상 필름의 몰드로 사용하였으며, 유리와 굴절률이 비슷한 (1.45) PDMS를 필름으로 사용하였다. PDMS 필름을 얻기 위해 제작한 몰드 위에 1000rpm, 15초 동안 스핀코팅 후, 몰드의 형상을 유지하기 위해 70°C에 3시간동안 열처리하여 굳혀주었다. P(VDF-TrFE) 몰드와 PDMS 필름 형성을 위한 열처리과정은 모두 ambient condition에서 진행하였다. 이후 완성된 PDMS 광효율 향상 필름을 P(VDF-TrFE) 몰드로부터 떼어내어 별도의 접착제없이 제작된 OLED 소자의 기판 하부에 부착하였다.

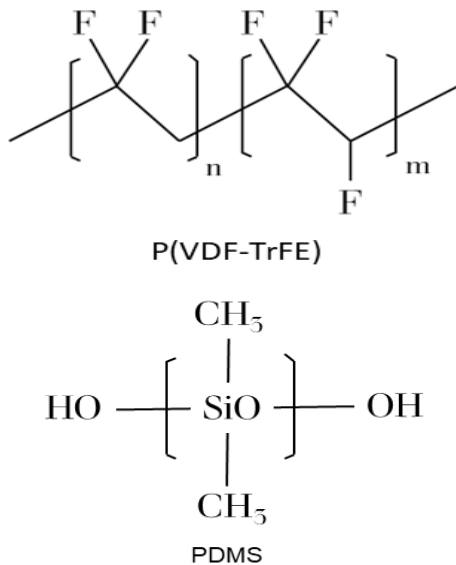


Fig. 1. Molecular structure of P(VDF-TrFE) and PDMS.
그림 1. P(VDF-TrFE)와 PDMS의 분자구조

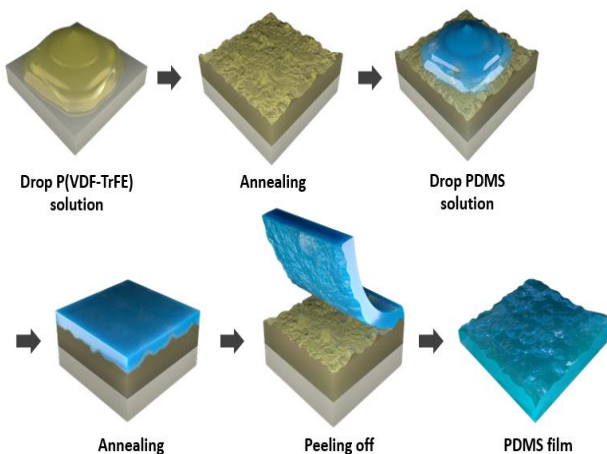


Fig. 2. Schematic of out-coupling film fabrication process with crystallized P(VDF-TrFE).
그림 2. 결정화 P(VDF-TrFE)를 사용한 광효율 향상 필름 제조 과정의 도식

2. OLED 소자 제작 및 광효율 향상 필름 적용

150 nm 두께의 ITO가 패턴 된 유리 기판 또한 acetone 내에 초음파 세척을 진행하였고, 이후 220°C의 isopropyl alcohol (IPA) 내에서 20분간 세척을 진행하였다. 그림 3. 제작한 OLED 소자의 구조는 ITO(150 nm)/ N,N'-Di(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine (NPB) (60 nm) / Tris-(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq₃) / LiF-Al (100 nm)로 구성되어 있다. 각 유기물들은 10⁻⁷ torr 이하의 고진공 상태의 진공 열증착기 내에서 1 Å/s의 속도로 증착되고, 금속 전극은 2 Å/s의 속도로 증착되었다. 증착이 끝나고 난 후 질소로 채워진 글러브박스 내에서 UV 레진을 이용한 봉지 공정 후 외부로 반출하여 측정을 진행하였다. 그림 3. (a) 필름이 없는 기준 소자와 (b) 광효율 향상 필름이 적용된 소자의 특성을 분석하기 위하여 전류 밀도-전압 특성 측정은 Keithley 2400으로 측정하였으며 전계발광 특성은 PR 650을 이용하여 측정하였다.

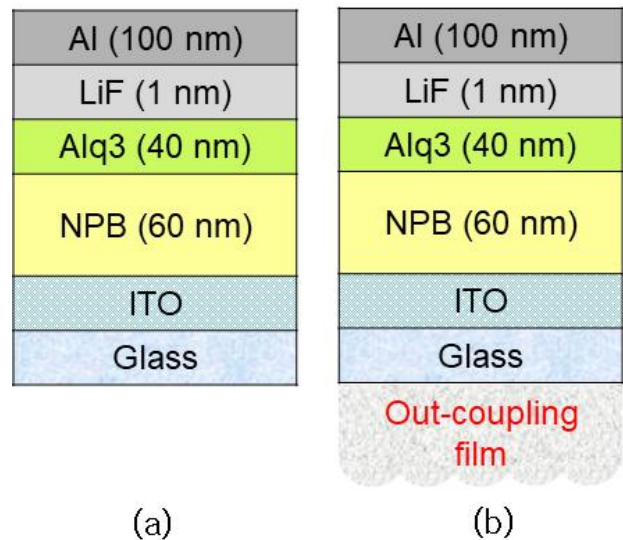


Fig. 3. Device structure fabricated in this study.

Device (a) : Reference device
Device (b) : Device with out-coupling film.

그림 3. 본 연구를 위해 제작된 소자 구조
소자 (a) : 기준 소자
소자 (b) : out-coupling 필름을 부착한 소자

3. P(VDF-TrFE) 필름의 열처리에 따른 표면 특성 분석

제작된 필름의 표면 특성 비교하기 위하여 bare glass와 P(VDF-TrFE) 몰드 위에 제작된 광효율

향상 필름의 표면 이미지를 광학 현미경을 통해 관찰하였다. 그림 4. (a)의 표면 이미지에서 bare glass 위에서 제작된 필름 대비 그림 4. (b)의 광효율 향상 필름이 작은 Spike 구조들로 채워져있는 것을 확인할 수 있다. 이 Spike 구조들은 P(VDF-TrFE)를 열처리 하여 Island 구조를 얻고 그 위에 PDMS 임프린트 하여 Spike 구조를 얻은 것으로 [12] P(VDF-TrFE)는 140°C 부근에서부터 결정상을 가지게 되어 온도가 높아질수록 결정의 크기가 점점 가늘고 얇아지게 된다. 200°C 부근이 되면 P(VDF-TrFE)는 유체 흐름으로 인해 결정이 Island 구조를 갖게 되는 것을 그림 4. (c) 주사전자 현미경을 통해 확인할 수 있다[13]. 이와 같이 형성된 Island 형태의 표면구조를 지닌 몰드로 얻은 Spike 구조의 광효율 향상 필름을 OLED 소자에 적용하여 광추출 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상하였다.

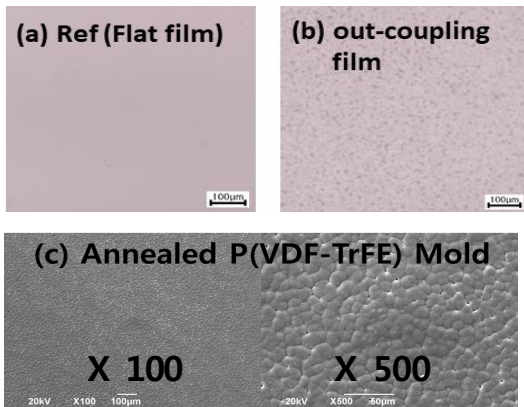


Fig. 4. Optical microscopic images of (a) Flat film (Reference) based on bare glass and (b) out-coupling film (island structure) based on P(VDF-TrFE) mold. (c) scanning electron microscope (SEM) image of crystallized P(VDF-TrFE) after annealing (Magnification - Left : X 100, Right : X 500).

그림 4. (a) bare glass 위에서 제작된 Flat 필름 (Reference)과 (b) P(VDF-TrFE) 몰드에서 제작된 Island 구조 광효율 향상 필름의 광학현미경 이미지 (c) 어닐링 후 결정화된 P(VDF-TrFE)의 주사 전자 현미경 이미지 (배율 - 좌 : X 100, 우 : X 500)

4. 광효율 향상 필름 적용 OLED 소자의 성능 분석

필름을 붙이지 않은 소자와 소자 발광부에 필름을 부착한 소자들을 Current density-Voltage-Luminance (J-V-L) 분석과 효율, 그리고 EL spectrum을 통해 비교 분석을 진행하였다. 그림 5. (a) J-V-L 측정 결과로부터 각 소자들의 전류밀도가 거의 일치

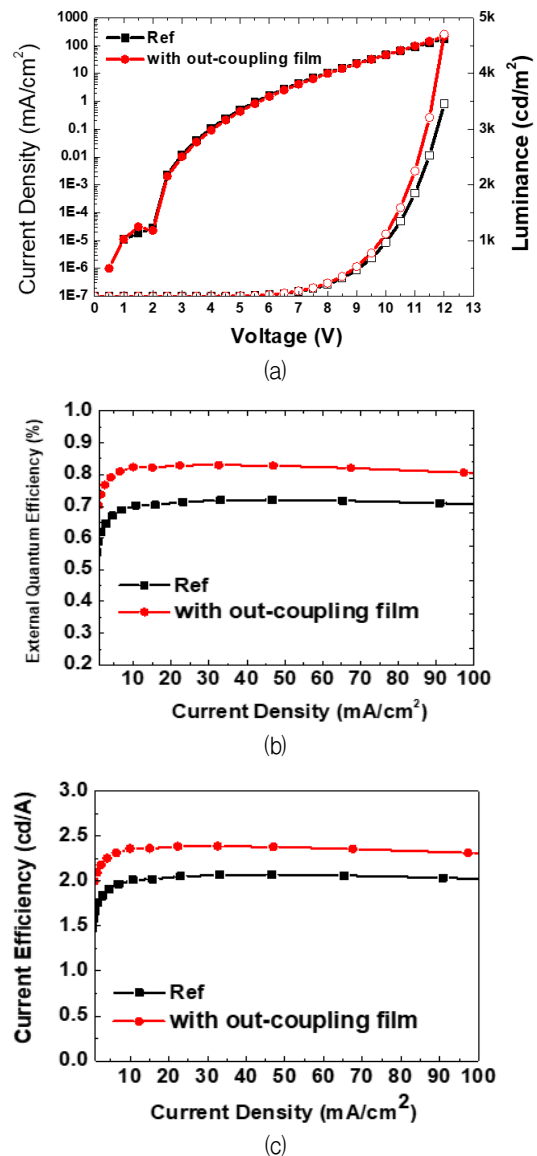


Fig. 5. (a) Current density-voltage-luminance (J-V-L) characteristics, (b) external quantum efficiency (EQE) - Current density characteristic, (c) Current efficiency - Current density of OLEDs without (black) and with (red) the out-coupling film.

그림 5. 제작한 OLED 소자들의 (a) 전류밀도-전압-휘도 특성, (b) 외부양자효율 특성 (c) 전류효율 특성 비교

하는 것을 확인하였다. 그리고 Turn on Voltage 도 모든 픽셀에서 4 V로 동일함을 확인하였다. 이는 소자의 전하 주입 등의 차이로 인한 효율 차이는 거의 없으며 각 측정 결과들의 차이는 소자의 전기적 성능으로 인한 차이가 아닌 필름의 유무에 따른 결과임을 알 수 있다. 따라서 J-V-L 그래프의 필름 적용 소자에서 휘도 상승은 필름으로 인한 휘도 상승이며, 이는 광효율 향상 필름 적용을 통해 기준 소자 대비 향상된 발광 성능을 보여주는 것임을

확인하였다. 정확한 효율 향상을 확인하기 위해, 그림 5. (b) 및 표 1의 외부양자효율 측정 결과를 통해 광효율 향상필름을 부착한 소자에서 각 효율들이 향상되는 것을 볼 수 있다. 이는 광효율 향상 필름의 Spike 구조를 통해 내부의 빛들이 줄어든 임계각을 바탕으로 보다 많이 외부로 빠져나올 수 있어 효율이 향상되었으며, 5.5 V에서 기준 소자 대비 외부양자효율이 약 20% 가량 높아진 것을 확인할 수 있다. 그림 5. (c), 표 1 전류효율 역시 마찬가지로 약 20% 정도의 효율 향상이 이루어졌으며, 이는 같은 전류에서 기준 소자 대비 필름을 적용한 소자에서 높은 휘도를 보여 전류 효율이 상승한 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison of OLED device performance with or without out-coupling film.

표 1. out-coupling film 유무에 따른 OLED device 성능 비교

	Ref	with out-coupling film	Enhancement(%)
EQE (%)	0.59	0.70	19.39
Current efficiency (cd/A)	1.67	1.99	19.61

5. 소자 발광 스펙트럼 분석 및 광효율 향상 필름 광학분석

Spike 형태의 광효율 향상 필름으로 인한 발광색의 변화 및 빛의 산란으로 인한 빛 번짐(Pixel blur)을 확인하고자 EL spectrum 측정과 Haze 측정을 통해 비교하였다. 발광색의 변화를 확인하기 위해 필름을 부착하지 않은 기준소자와 광효율 향상 필

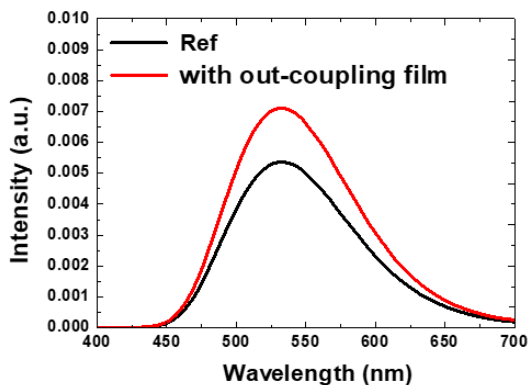


Fig. 6. Electroluminescence spectra of reference OLED (Black) and OLED with out-coupling film (red).

그림 6. 기준 OLED(흑색) 및 광효율 향상 필름을 부착한 OLED(적색)의 전계 발광 스펙트럼

름을 부착한 소자의 EL spectrum을 비교한 결과 두 소자 모두 532 nm의 최대 peak를 가져 필름으로 인한 발광색의 변화는 보이지 않는 것을 확인하였다. 그림 6. 또한 광효율 향상 필름으로 증가한 휘도 덕분에 같은 구동 전압에서 증가한 전계발광(Electroluminescence) 세기 또한 확인할 수 있다.

필름의 광학적 특성을 분석하기 위해 UV-Vis spectrophotometer를 이용해 필름의 전광선 투과율(Tt)과 평행 투과율(Tp) 그리고 확산 투과율(Td) 측정을 진행하였다(Fig. 7.). Tp와 Td를 더한 값인 전광선 투과율(Tt)은 빛이 필름을 투과한 총량으로 93.4%의 매우 높은 투과율을 보이는 것을 확인할 수 있다.

$$(Haze = \frac{T_d}{T_t} \times 100)$$

위 측정을 통해 얻은 각 투과율 값인 Td와 Tt를 위 식을 이용해 계산하면 Haze 값을 얻을 수 있다. 계산한 Haze 수치를 통해 필름의 여러 가지 특성을 알 수 있다. 제작한 광효율 향상 필름의 경우 8.2로 80에 이르는 MLA의 Haze 수치에 비해 낮은 값을 보여준다[14]. Haze가 높을수록 확산되는 빛의 양이 더욱 많아져 빛이 무작위 산란되어 보여 높은 Pixel blur를 야기하며, Haze가 낮을 경우에는 보다 선명하게 빛을 관찰 할 수 있다[13]. 그림 8.의 우측의 사진처럼 기준에 사용하는 MLA 필름은 대체로 불투명하여 OLED에 적용 시 무작위 방향으로 빛이 산란되는 pixel blur가 심해 뿌옇게 빛이

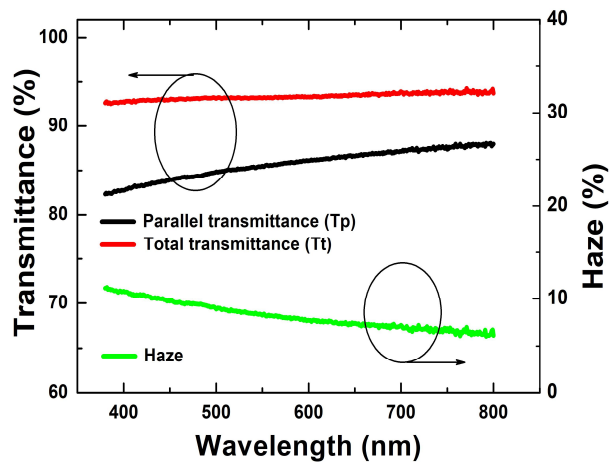


Fig. 7. Total (Red), parallel (Black) transmittance and measured haze (green) of Out-coupling film.

그림 7. 광효율 향상 필름의 총(적색), 평행(흑색) 투과율 및 측정된 헤이즈(녹색)

방출되는 것을 볼 수 있다. 이는 렌즈로부터 넓어진 빛의 방향으로 인해 인접 렌즈까지 빛이 조사되어 발광상이 흐릿한 문제를 발생시키는 것이다. 따라서 많은 픽셀이 사용되는 디스플레이에 적용이 불가능하며 부분적으로 조명 분야에만 사용되는 한계가 있었다. 하지만 본 논문에서 제작한 Spike 구조의 광효율 향상 필름은 얇고 긴 형태의 구조로 이루어져 있기 때문에 인접한 Spike 구조체들로부터의 간섭을 줄일 수 있어 낮은 Haze를 나타낸다. 따라서 Spike 구조의 광효율 향상 필름은 OLED에 적용 시 빛의 왜곡 없이 선명한 상을 전달할 수 있다.

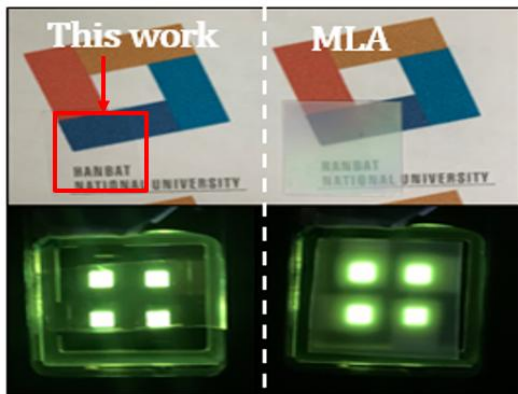


Fig. 8. Film and OLED emission images of with film (Left : out-coupling film, Right : MLA film).

그림 8. 각 필름 이미지와 각 필름을 적용한 OLED의 발광 이미지(좌측 : 광효율 향상 필름, 우측 : MLA 필름)

III. 결론

본 연구에서는 저가의 용액공정을 통하여 높은 투과도와 낮은 haze를 지닌 광효율 향상필름을 제작하였다. 열처리 이후 Island 구조를 가지는 고분자 P(VDF-TrFE)를 몰드 위에 PDMS로 임프린트하여 Spike 형태의 광효율향상 필름을 제작하였다. 제작한 광효율향상필름을 OLED 발광부에 별도로 접착제 없이 부착하여 전류효율 및 외부양자효율을 약 20% 향상시킬 수 있었다. 제작된 필름은 인접 구조체와 간섭이 적은 얇은 형태의 Spike 구조를 띄고 있어 93.4%의 우수한 투과도 특성과 더불어 낮은 Haze를 나타낸다. 따라서 Pixel blur가 적어 고해상도 디스플레이를 위한 광추출 기술에 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] J. Song, S. Yoo, "Organic Light-Emitting Diodes: Pushing toward the Limits and Beyond," *Adv. Mater.*, 1907539, 2020. DOI: 10.1002/adma.201907539
- [2] W. Brutting, J. Frischeisen, T. D. Schmidt, B. J. Scholz, and C. Mayr, "Device efficiency of organic light-emitting diodes: Progress by improved light outcoupling," *Phys. Status, solidi*, Vol.210, pp.44-65, 2013. DOI: 10.1002/pssa.201228320
- [3] B. J. Scholz, J. Frischeisen, A. Jaeger, D. S. Setz, T. C. G. Reusch, and W. Brutting, "Extraction of surface plasmons inorganic light-emitting diodes via high-index coupling," *Opt. Express*, 20, pp. A205-A212, 2012. DOI: 10.1364/OE.20.00A205
- [4] J. W. Han, C. W. Joo, J. h. Lee, Z. R. Ramadhan, J. h. Hong, S. B. Park, S. g. Yu, J-H. Lee Y. H. Kim "Enhancement of spectral stability and outcoupling efficiency in organic light-emitting diodes with breath figure patterned microlens array films," *Optical Materials*, Vol.96 pp.109262, 2019. DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109262
- [5] W. J. Hyun, S. H. Im, O. O. Park, B. D. Chin "Corrugated structure through a spin-coating process for enhanced light extraction from organic light-emitting diodes," *Organic Electronics*, Vol.13, pp.579-585, 2012. DOI: 10.1016/j.orgel.2012.01.001
- [6] J-H. Jang, M-C. Oh, T-H. Yoon, J. C. Kim, "Polymer grating imbedded organic light emitting diodes with improved out-coupling efficiency," *Appl. Phys, Lett.*, Vol.97, pp.123302, 2010. DOI: 10.1063/1.3491286
- [7] H.-H. Cho, B.I Park, H-J. Kim, J. Y. Shim, S. h. Jeon, J-h. Jeong, J-J. Kim "Solution-processed photonic crystals to enhance the light outcoupling efficiency of organic light-emitting diodes," *Curr. Appl. Phys*, Vol.10, e139, 2010. DOI: 10.1364/AO.49.004024
- [8] Peng, H., Ho, Y. L., Yu, X.-J., Wong, M., & Kwok, H.-S. "Coupling Efficiency Enhancement in Organic Light-Emitting Devices Using Microlens Array-Theory and Experiment," *Journal of Display Technology*, Vol.1, No.2, pp.278-282, 2005.

DOI: 10.1109/jdt.2005.858944

[9] Zhou, J., Ai, N., Wang, L., Zheng, H., Luo, C., Jiang, Z., Yu, S Wang, J. "Roughening the white OLED substrate's surface through sandblasting to improve the external quantum efficiency," *Organic Electronics*, Vol.12, No.4, pp.648-653, 2011.

DOI: 10.1016/j.orgel.2011.01.018

[10] Malte C. Gatherm, Sebastian Reineke, "Recent advances in light outcoupling from white organic light-emitting diodes," *Journal of Photonics for Energy*, Vol.5, 2015. DOI: 10.1117/1.JPE.5.057607

[11] H S. Kim, M C. Suh, "Improvement of viewing angle dependence of the white organic light emitting diodes with tandem structure by introduction of nanoporous polymer films," *Organic Electronics*, Vol.40, 2017. DOI: 10.1016/j.orgel.2016.10.042

[12] Andrew J. Lovinger "Ferroelectric Polymers," *Science*, Vol.220, Issue4602, pp.1115-1121, 1983.

DOI: 10.1126/science.220.4602.1115

[13] S-W. Jung, S-M. Yoon, S. Y. Kang, and B-G. Yu "Properties of Ferroelectric P(VDF-TrFE) 70/30 Copolymer Films as a Gate Dielectric," *Integrated Ferroelectrics*, Vol.100, pp.198-205, 2008. DOI: 10.1080/10584580802541106.

[14] A. Gasonoo, J-H. Lee, "Outcoupling efficiency enhancement of a bottom-emitting OLED with a visible parylene film," *Opt. Express*, 26724, Vol.28, No.18/31, 2020. DOI: 10.1364/OE.397789

BIOGRAPHY

BaekSang Sung (Member)



2013~2020 : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

2020~present : MS degree in Creative convergence Hanbat Nat'l Univ.

Jae-Hyeok Cho (Member)



2014~present : BS/MS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

Young-Ji Lim (Member)



2016~2021 : BS/MS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

Akpeko Gasonoo (Member)



2013 : BS degree in Computer Engineering, KNUST, Ghana
2017 and 2021 : MS, and PhD. degree in Electronic Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

2021~present : Post Doc. Researcher, RIPE & 3D Printing, Hanbat Nat'l Univ.

Hyunah Lee (Member)



2012~2019 : BS/MS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

2020~present : PhD degree in creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

Jangwon Lee (Member)



2016~2019 : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

2020~present : MS degree in Creative convergence Hanbat Nat'l Univ.

Seungwan Woo (Member)

2016~Present : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

Jonghee Lee (Member)

2002, 2004, and 2007 : BS, MS, and PhD. degree in Chemistry, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea.
2007~2010 : Member of Engineering Staff, Electronics and Telecommunication Research Institute(ETRI), Korea

2010~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, Technical Univ. of Dresden, Germany.

2012~2018 : Senior Member of Engineering Staff, Researcher, ETRI, Korea

2018~present: Associate Professor, Hanbat Nat'l Univ.

Dongsoo Kim (Member)

1991~2001 : MS, Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Yung Nam University
1991~2011 : Nano Mechanical System Research Division at Korea Institute of Machinery & Materials as the general manager(KIMM)
2012~present : Professor, Hanbat Nat'l Univ.

Jae-Hyun Lee (Member)

2011 : PhD degree in Material Science and Eng., Seoul Nat'l Univ.
2011~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, TU Dresden (Germany).
2012~present : Professor, Hanbat Nat'l Univ.

Min-Hoi Kim (Member)

2013 : Ph.D degree in Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea
2013~present : Associate Professor, Hanbat Nat'l Univ.