

# 고분자 정공수송층에 용액 공정 도핑법을 적용한 인광 유기전기발광소자

## Solution processed doping to the polymer hole transporting layer for phosphorescent organic light-emitting diodes

성 백 상, 이 장 원, 이 승 훈, 유 재 민, 이 재 현, 이 종 희<sup>★</sup>

Baeksang Sung, Jangwon Lee, Seung-Hoon Lee, Jae-Min Yoo, Jae-Hyun Lee, Jonghee Lee<sup>★</sup>

### Abstract

In this study, a facial way to enhance the electrical properties of organic light-emitting diodes (OLEDs) via the solution process doping method based on the poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-co-(4,4'-(N-(4-sec-butylphenyl) diphenylamine)] (TFB) as a hole transporting layer (HTL) is demonstrated. In the TFB solution of the hole transport material, 1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylene hexacarbonitrile (HAT-CN) was doped by 3 wt% to improve the electrical properties of the HTL. According, the OLED with HAT-CN doped TFB showed the increased current density and luminance at the same driving voltage on behalf of the improved conductivity of HTL, and the reduced turn-on voltage from 13 V to 9 V. Furthermore, the maximum external quantum efficiency was dramatically increased three times from 3.6 to 10.8 % compared to the reference device without applying doping methode.

### 요 약

본 연구에서는 유기전기발광소자의 전기적 특성을 향상시키기 위한 방법으로, 용액공정 도핑법이 도입된 고분자 poly [(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-co-(4,4'-(N-(4-sec-butylphenyl)diphenylamine)] (TFB)기반의 정공수송층을 제안하였다. 정공수송층 소재 TFB 용액 내에 1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylene hexacarbonitrile (HAT-CN)를 3 wt% 도핑을 하여 정공수송층의 전기적 특성을 향상 시켰다. 이를 통해 HAT-CN이 도핑된 TFB를 이용한 유기전기발광소자에서는 향상된 정공수송층의 전도도를 통해 동일 구동 전압 시 전류 밀도와 휘도가 증가하였고, 점등 개시 전압이 13V에서 9V로 줄어드는 것을 확인 하였다. 또한, 도핑법이 적용되지 않은 기준 소자 대비 최대 외부양자효율이 3.6%에서 10.8%로 약 3배 향상 되는 것을 확인 하였다.

*Key words : Organic light-emitting diodes, Solution process, HAT-CN, TFB, Doping*

Department of Creative Convergence Engineering, Hanbat National University

★ Corresponding author

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

※ Acknowledgment

This research was supported by the Basic Science Research program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2018R1A6A1A03026005 and 2019R1I1A3A01056075).

Manuscript received July. 10, 2020; revised Sep. 14, 2020; accepted Sep. 17, 2020.

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.

1. 서론

용액 공정 유기전기발광소자(organic light emitting diodes, OLEDs)는 기존 진공 증착 공정으로 제작하는 OLEDs와 비교하여 재료의 소모가 적으며, 진공 설비로부터 자유롭기 때문에 보다 저렴한 비용으로 소자의 제작이 가능하며, 대면적 공정을 적용시키기에 장점이 있다[1-2]. 이 용액 공정 OLEDs는 진공 증착 공정 OLEDs와 마찬가지로 각 유기물들이 전자 수송층, 발광층 등 여러 가지 역할의 층들로 적층되어 구성되어 있는데, 이 용액 공정 OLEDs의 정공수송층 재료로 가장 많이 널리 사용하는 poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : poly(styrenesulfonate) (PEDOT : PSS)는 간단한 공정으로도 쉽게 투명한 박막을 얻을 수 있고 높은 광투과성과 저렴한 비용으로 용액공정 OLEDs의 정공수송층 재료로 주로 사용하고 있다[3]. 하지만 PEDOT : PSS의 경우 흡습성이 높고 물에 용해되어 있기에 물에 취약한 OLEDs의 특성상 수분으로 인한 소자의 수명저하로 이어지는 치명적인 단점이 있다. 또한 PEDOT : PSS의 높은 산성도로(pH 1.2) 인하여 OLEDs에서 가장 널리 쓰이는 투명전극 Indium tin oxide(ITO)가 산으로 인해 손상되거나 인듐 이온이 유기 박막으로의 확산 되는 등 OLEDs 구동에 문제를 일으키는 소자 내구성 저하 문제가 발생한다. 또한, PEDOT : PSS와 상부 유기 박막의 계면에서 엑시톤 소멸(exciton quenching)으로 인해 OLEDs의 발광 효율 저하의 문제가 야기된다[4-5]. 상기 언급한 바와 같은 PEDOT : PSS의 단점으로 인해 이를 대체할 정공수송층 재료 연구 개발이 최근 활발하게 이루어지고 있다. 예시로 Prof. Y. Yang 그룹에서는 용액공정 OLEDs에서 PEDOT : PSS를 대체할 재료로 전이금속산화물인 molybdenum trioxide(MoO<sub>3</sub>)를 용액으로 제조하여 정공주입층으로 사용하는 연구를 진행하였고[6], National Tsing Hua 대학교 Jwo-Huei Jou 그룹에서는 MoO<sub>3</sub>에 tungsten trioxide(WO<sub>3</sub>)를 이중 정공수송층으로 사용하여 PEDOT : PSS를 사용한 소자 대비 높은 효율과 낮은 구동전압을 보인 바 있다[7]. 본 연구에서는 PEDOT : PSS를 대체할 재료로 그림 1.(a)에 도시되어 있는 poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-co-(4,4'-(N-(4-sec-butylphenyl)diphenylamine))](TFB)를 용액공정 OLEDs의 정공수송층으로 사용하고자 하였다. TFB는 용액공정

OLEDs에서 주로 PEDOT : PSS 상부에 성막하여 엑시톤 소멸 등 상기 서술한 PEDOT : PSS의 단점을 완화시키는 용도로 주로 사용 되어 왔으며, 고분자기반 재료로 유기용매에 잘 녹는 특성으로 인해 용액 공정 적용에 적합하며 spin coating을 통한 성막에도 좋은 평탄도를 보장하여 고품질의 투명 박막을 얻기에 장점이 있다고 알려져 있다[8]. TFB의 경우 일반적인 OLEDs에서 정공수송층으로 사용하기에 적합한 HOMO(the highest occupied molecular orbitals) 준위 5.3 eV를 가지고 있지만, 전도도가 기존 PEDOT : PSS나 다른 정공수송층 소재 대비 낮아 OLEDs 구동시 효율이 낮은 단점을 보였다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 TFB의 전도도를 향상시킬 수 있도록 그림 2. (b)에 도시된 1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylene hexacarbonitrile(HAT-CN)을 용액공정 방식으로 도핑하여 투명 전극(ITO)에서 TFB 층으로의 정공수송 특성을 증가시켰으며 정공수송층인 TFB 내에서 HAT-CN의 LUMO 준위를 통한 전자의 이동으로 생성된 정공으로 더욱 더 많은 정공들이 TFB 내에 존재하도록 하도록 유도하였다[9-11]. 이를 통해 발광층 내에 증가된 정공수송으로 소자의 전도도가 크게 향상되어 도핑 되지 않은 TFB를 사용한 기준소자 대비 HAT-CN이 도핑된 TFB 적용 소자에서의 외부양자 효율이 발광 휘도 100 cd/m<sup>2</sup> 기준 3.5 %에서 9.6 %로 크게 향상되는 것을 확인 하였다.

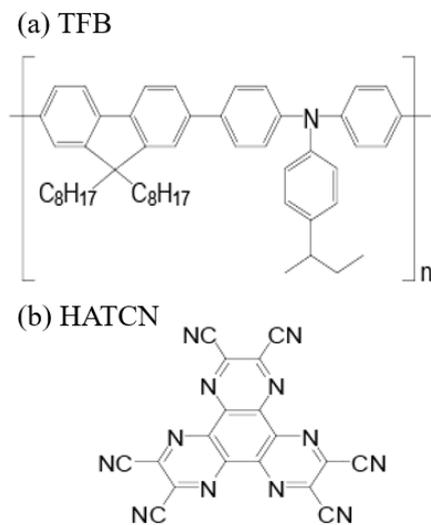


Fig. 1. Chemical structures of the organic materials used to fabricate OLEDs (a) hole transport material of TFB and (b) dopant of HATCN.

그림 1. 유기전기발광소자 제작에 사용된 유기 물질의 화학 구조 (a) 정공수송층 소재(TFB) 및 (b) 도펀트(HATCN)

## II. 본론

### 1. 실험

HAT-CN 도핑의 유무에 따라 OLEDs의 성능을 비교하기 위해 제작된 소자 구조는 그림 2에 도시된 바와 같이 HAT-CN을 TFB에 도핑하지 않은 소자와, HAT-CN을 도핑한 소자를 각각 제작하였다. 제작한 소자는 ITO(150 nm)/ TFB : HAT-CN (0.3 wt%) (50 nm)/ 4,4',4"-tri(Ncarbazolyl) triphenylamine(TcTa)(10 nm)/ 2,6-bis[3-(9H-Carbazol-9-yl)phenyl]pyridine (DCzPPy) : tris(2-phenylpyridyl) iridium(III) (Ir(ppy)<sub>3</sub>) (20nm, 7wt%)/ 1,3-Bis(3,5-dipyrid-3-ylphenyl)benzene(BmPyPB)(60 nm)/ LiF-Al(100 nm)로 구성되어 있다.

150 nm 두께의 ITO가 패턴된 유리 기판을 이용하여 소자 제작을 진행하였고, 소자 제작 전 기판을 유기 용매를 이용해 세척하였고, 각 용액의 성막이 용이하도록 성막 전 기판에 UV-ozone에 20분 동안 노출시킨 후 각 재료들의 성막을 진행하였다. TFB 층은 *p*-xylene 용매에 1 wt% 농도로 용액을 녹여 제조하고, 핫플레이트 위에서 45 °C로 12시간 동안 교반한 이후 필터링한 용액을 기판 위에 올린 후 1000 rpm의 속도로 스핀 코팅 방식으로 성막 하였다. 이후 스핀 코팅이 끝난 후 120 °C의 핫플레이트 위에 놓아 가열시켜 잔류 용매를 제거해주었다. 이후 발광층부터 금속 전극까지 10<sup>-6</sup> torr 이하의 고진공 상태의 챔버 내에서 열증착을 통해 제작하였다. TcTa는 정공수송층인 TFB와 발광층의 정공주입장벽을 완화시켜 원활한 정공수송을 용이하게 하고 엑시톤 유출방지층(exciton blocking layer)으로의 역할을 위해 TFB 박막 위에 10 nm 두께로 성막되었다[12-13]. 발광층은 호스트 소재 DCZPPy 내에 녹색 인광 도펀트인 Ir(ppy)<sub>3</sub>를 7 wt% 비율로 도핑하여 구성하였고, 발광층 위에 전자의 원활한 수송을 위하여 전자수송층 재료인 BmPyPB를 성막하였으며, LiF-Al 구조로 상부 금속 전극을 구성하였다. 증착 공정이 끝난 후 질소로 채워진 글러브박스에서 봉지 공정 후 외부로 반출하여 측정하였다. 제작된 OLEDs의 발광 면적은 2×2 mm<sup>2</sup>이며, 전류밀도-전압 특성은 Keithley 238으로 측정하였고, EL spectra의 경우 spectro-radiometer (Minolta CS-2000)으로 측정하여 소자 분석을 진행하였다. 본 연구에 사용된 소재들의 에너지 레벨

다이아그램은 그림 3에 도시된 바와 같다.

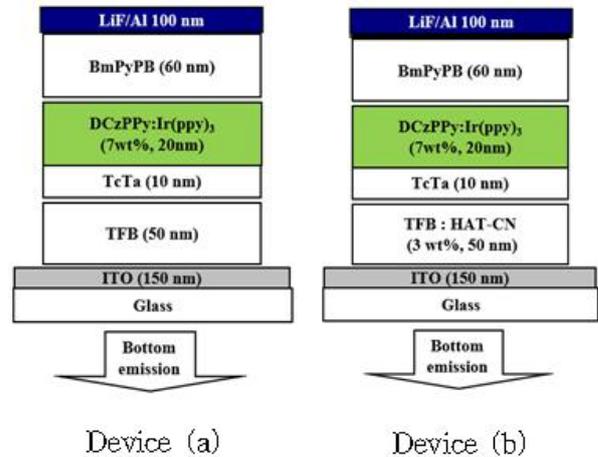


Fig. 2. Device structure of (a) reference device, and (b) HAT-CN doped TFB device.

그림 2. (a) 기준 소자 및 (b) HAT-CN이 TFB에 소자 구조

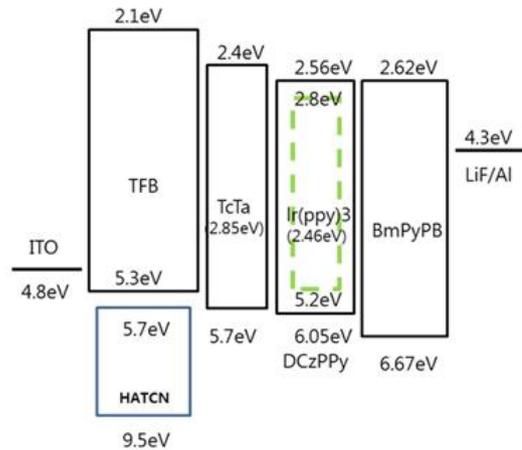


Fig. 3. Energy level diagram of the materials used in this study.

그림 3. 본 연구에 사용된 소재들의 에너지 레벨 다이어그램

### 2. 실험 결과 및 분석

대표적인 고분자 정공수송층 재료인 TFB는 적절한 HOMO 준위를 가지고 있고 유기 용매에 비교적 잘 녹는 특성을 이용해 용액공정을 이용하여 고품질의 투명 박막을 얻기에 적합하지만, TFB는 기존 정공수송층 소재 PEDOT : PSS 등과 비교시 전도도가 낮은 문제가 있다. 이와 같은 TFB의 낮은 전도도를 개선하기 위해, 본 연구에서는 용액공정의 장점인 손쉬운 도핑 방법을 통해 전도도를 향상시켜 OLEDs 성능을 개선하고자 하였다. 제시된 용액 공정 도핑 방법은 정공수송층 TFB 용액에 HAT-CN을 3 wt% 소량 첨가한 후 교반하는 간단

한 방식으로 제작 하였고, 이후 기준소자와 동일한 방식으로 발광층, 전자수송층 및 상부전극을 순차적으로 증착하여 용액공정 도핑 방법 적용 전후의 소자의 구동 및 성능 특성을 비교 분석하였다. 도펀트로 사용한 HAT-CN은 그림 3.에 도시된 것과 같이 깊은 곳에 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital) 준위를 이용하여 TFB내에 p-type 도핑을 통해 TFB의 정공 수송 능력을 향상 시키고자 하였다.

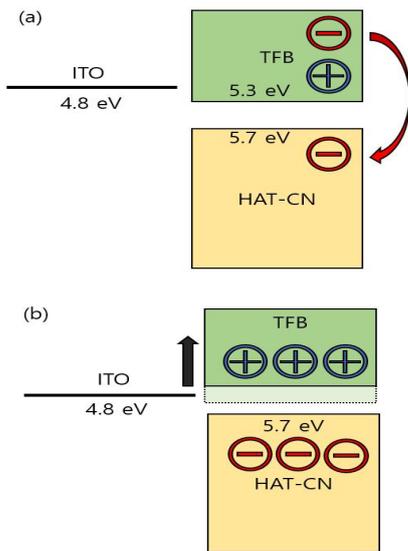


Fig. 4. (a) Electron transfer from TFB to HAT-CN, (b) Change of TFB HOMO level due to doping process

그림 4. (a) TFB에서 HAT-CN으로의 전자이동  
 (b) 도핑으로 인한 TFB HOMO level의 변화

HAT-CN도핑을 통한 효과는 그림 4.(a)에 도시된 바와 같이 깊은 곳에 위치한 HAT-CN의 LUMO를 통해 TFB의 전자가 이동하게 되어 TFB 내에서 더욱더 많은 양의 전자의 빈자리인 정공이 생성되고, 이를 바탕으로 늘어난 정공으로 인해 그림 4.(b)에 도시된 것처럼 TFB의 HOMO level이 얇은 곳으로 이동하게 되어 TFB의 HOMO 준위는 상승하게 됨에 따라 소자에 전계를 가할 시 ITO로부터 완화된 장벽을 통해 늘어난 정공수송으로 도핑 후 소자의 전도도를 증가시키게 된다[15-16]. 기준 소자와 도핑 공정을 통해 설계된 소자의 성능을 비교하기 위해, 그림 5에 도시된 바와 같이 도핑 전후의 전류 밀도-전압-휘도(current density-voltage-luminance :  $J-V-L$ ) 특성을 비교 분석하였다. 앞서 언급한 바와 같이 도핑이 되어 있지 않은 기준 소자의 경우 TFB의 낮은 정공이동 특성으로 낮은 전

류밀도를 보여주며, 15 V의 높은 전압을 가해야만 소자가 점등 하는 것을 확인 할 수 있고 이때의 최대 휘도 역시 낮은 전류 밀도로 인해 약  $200 \text{ cd/m}^2$ 로 낮은 수치를 띄는 것을 확인할 수 있다. 반면, 표 1에 정리된 내용과 같이 HAT-CN 도핑 소자의 경우, 기존 소자 대비 정공주입과 정공수송이 도핑 효과로 인해 크게 향상되어 문턱 전압이 (turn on voltage) 기준소자 대비 4 V가량 크게 앞당겨졌으며, 같은 구동 전압 대비 휘도 역시 크게 향상되는 것을 관찰 할 수 있다.

도핑을 통한 영향으로 소자의 발광색 변화를 관찰하기 위해 정규화된 전기발광스펙트럼을 확인하였다. 그림 6에 도시된 바와 같이 도핑의 유무와 상관없이 기준소자와 도핑된 소자 모두 유사한 동일한 최대 파장 512 nm의  $\text{Ir(ppy)}_3$ 의 고유 발광 파장이 관측되었으며 이는 HAT-CN 3 wt % 도핑으로 인한 발광색의 변화는 발생하지 않는 것을 확인하였다.

마지막으로 HAT-CN을 TFB에 도핑한 용액공정 정공수송층이 OLEDs의 효율 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 외부양자효율, 전류효율, 전력효율 특성을 살펴보았다. 그림 7과 표 2와 같이 HAT-CN이 도핑된 TFB 정공수송층을 사용한 경우, 외부양자효율 및 전력효율이 도핑 되지 않은 소자와 비교시 크게 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 이는 앞서 그림 4의 메커니즘에서 설명한 바와 같이 도핑 효과에 의한 발광층 내부로 정공수송이 증가하여 도핑된 소자의 발광층에서 더 많은 엑시톤이 생성되어 기준 소자 대비 휘도 증가 및 소자 효율 향상으로 이어지게 되었고 특히 전력효율 특성은 외부양자효율 특성 증가와 더불어 구동전압이 크게 감소한 효과가 추가 반영되어 전력효율이  $2.4 \text{ lm/W}$ 에서 5배 높은  $10.7 \text{ lm/W}$ 로 증가 폭이 더 큰 것을 확인 할 수 있었다.

Table 1. Turn on Voltage and Luminance Characteristics of TFB only and HAT-CN doped TFB devices.

표 1. TFB 만을 사용한 소자와 HAT-CN을 TFB에 도핑한 소자의 구동전압-휘도 특성 비교

	Device (a)	Device (b)
Turn on V	13 V	9 V
Luminance (at 15 V)	$54.57 \text{ cd/m}^2$	$1509 \text{ cd/m}^2$

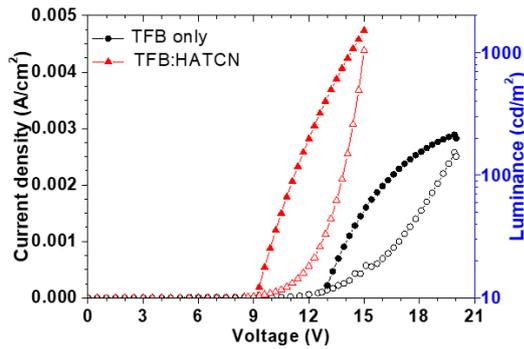


Fig. 5. Current density-voltage-luminance (J-V-L) Characteristics of TFB only and HAT-CN doped TFB devices.

그림 5. TFB 만을 사용한 소자와 HAT-CN을 TFB에 도핑한 소자의 전류밀도-전압-휘도 특성

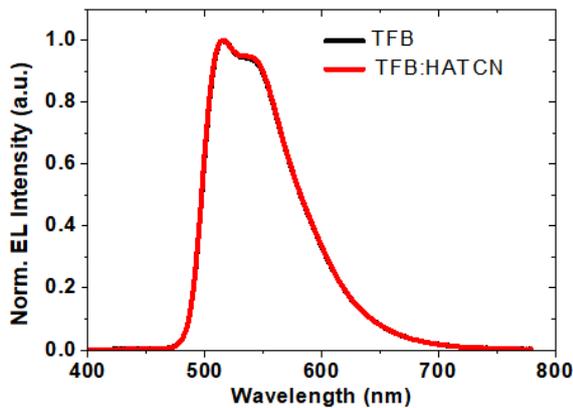


Fig. 6. Normalized EL spectrum of OLEDs.

그림 6. 유기전기발광소자들의 정규화된 전기발광스펙트럼

Table 2. Maximum efficiency of OLEDs device.

표 2. 제작된 OLEDs 소자의 각 최대효율

	Max EQE (%)	Max CE (cd/A)	Max PE (lm/W)
Device (a)	3.6	11.9	2.4
Device (b)	10.8	35.4	10.7

### III. 결론

기존 용액공정 정공수송층이 가지는 단점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 고분자 정공수송층 소재 TFB에 HAT-CN 소재를 용액공정 기반 도핑을 통해 전도도를 개선하였다. TFB의 HOMO 준위보다 낮은 위치에 LUMO 준위를 지닌 HAT-CN을 도핑을 하여, 정공주입층 내부에 정공 생성을 높였고 발광층 내부의 정공 주입을 증가시켜 소자의 구

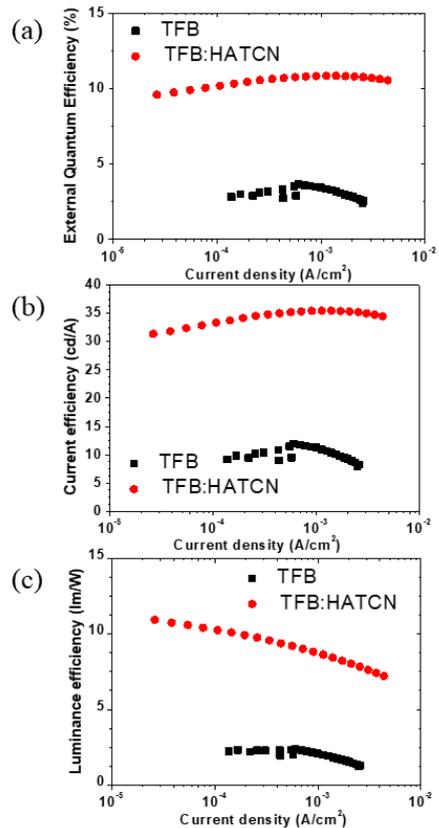


Fig. 7. Efficiency Characteristics of OLEDs, (a) external quantum efficiency (EQE), (b) current efficiency (CE), and (c) Power efficacy (PE).

그림 7. OLEDs 소자들의 효율 특성 비교 (a) 외부 양자 효율, (b) 전류효율, (c) 전력효율

동전압을 4 V 가량 앞당겼으며 기준 소자대비 향상된 효율의 용액공정 정공수송층을 이용한 OLEDs 소자를 제작할 수 있었다.

### References

[1] M. Cai, J. Shinar, "High-Efficiency Solution-Processed Small Molecule Electrophosphorescent Organic Light-Emitting Diodes," *Adv. Mater.* vol.23, pp.3590-3596, 2011.  
DOI: 10.1002/adma.201101154

[2] L. Duan, Y. Qiu, "Solution processable small molecules for organic light-emitting diodes," *J. Mater. Chem.*, vol.20, pp.6392-6407, 2010.  
DOI: 10.1039/b926348a

[3] H-W. Chang, C-C. W, "Color-stable, ITO-free white organic light-emitting diodes with enhanced efficiency using solution-processed transparent electrodes

and optical outcoupling layers,” *Organic Electronics*, Vol.15 pp.1028–1034, 2014.

DOI: 10.1016/j.orgel.2014.02.017

[4] H. Choi, K. Kim, “Solution processed WO<sub>3</sub> layer for the replacement of PEDOT : PSS layer in organic photovoltaic cells,” *Organic Electronics*, Vol.13, Issue 6, pp.959–968.

DOI: 10.1016/j.orgel.2012.01.033

[5] Y. H. Kim, J. Lee, K. Leo, “Achieving High Efficiency and Improved Stability in ITO-Free Transparent Organic Light-Emitting Diodes with Conductive Polymer Electrodes,” *Adv. Funct. Mater.* Vol.23, pp.3763–3769, 2013.

DOI: 10.1002/adfm.201203449

[6] S. Murase, Y. Yang, “Solution Processed MoO<sub>3</sub> Interfacial Layer for Organic Photovoltaics Prepared by a Facile Synthesis Method,” *Adv. Mater.* Vol.24, pp.2459–2462, 2012.

DOI: 10.1002/adma.201104771

[7] M. R. Nagar, J-H. Jou, “Solution Process Feasible Highly Efficient Organic Light Emitting Diode with Hybrid Metal Oxide Based Hole Injection/Transport Layer” *MRS Advances*, pp.1–9.

DOI: 10.1557/adv.2019.300

[8] J. J. Park, J. H. Kwon, “Small molecule interlayer for solution processed phosphorescent organic light emitting device,” *Organic Electronics* 10, pp.189–193, 2009. DOI: 10.1016/j.orgel.2008.08.014

[9] L. S. Liao, K. P. Klubek, “Power efficiency improvement in a tandem organic light-emitting diode,” *Appl. Phys. Lett.* 92, 223311, 2008.

DOI: 10.1063/1.2938269

[10] J-H. Lee, J-J. Kim, “A high performance transparent inverted organic light emitting diode with 1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylenehexacarbonitrile as an organic buffer layer,” *J. Mater. Chem.*, Vol.22, No.15262, 2012, DOI: 10.1039/c2jm32438e

[11] J. Lee, J-H. LEE, “Efficient Green Phosphorescent OLEDs with Hexaazatrinaphthylene Derivatives as a Hole Injection Layer,” *Appl. Chem. Eng.*, Vol.26, No.6, December 2015, 725–729.

DOI.org/10.14478/ace.2015.1108

[12] S. Reineke, K. Leo, “Reduced efficiency roll-

off in phosphorescent organic light emitting diodes by suppression of triplet-triplet annihilation,” *Appl. Phys. Lett.* Vol.91, No.123508 2007.

DOI: 10.1063/1.2786840

[13] J. Meyer, T. Riedl, “Highly efficient simplified organic light emitting diodes,” *Appl. Phys. Lett.* 91, pp.113506 2007. DOI: 10.1063/1.2784176

[14] G. Rajanm, Ritu Srivastava, O. P. Sinha, “Study of injection and transport properties of metal/organic interface using HAT-CN molecules as hole injection layer,” *Vacuum* 146 (2017) 530–536. DOI.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.007

[15] Y. Xu, Y-Y. Noh, “Doping: A Key Enabler for Organic Transistors,” *Adv. Mater.* 2018, 30, 1801830. DOI: 10.1002/adma.201801830

[16] M. Schwarze, K. Leo, “Molecular parameters responsible for thermally activated transport in doped organic semiconductors,” *Nature Materials*. 2018, s41563–018–0277–0.

DOI:10.1038/s41563–018–0277–0

## BIOGRAPHY

### BaekSang Sung (Member)



2013~2019 : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat National University.  
2020~present : MS degree in Creative convergence Hanbat Nat'l Univ.

### Jangwon Lee (Member)



2016~2019 : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat National University.  
2020~present : MS degree in Creative convergence Hanbat Nat'l Univ.

**Seung-Hoon Lee** (Member)



2013~2018 : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat National University.  
2019~present : MS degree in Creative convergence Hanbat Nat'l Univ.

**Jae-Min Yoo** (Member)



2015~2020 : BS degree course of Creative convergence Engineering, Hanbat National University.

**Jae-Hyun Lee** (Member)



2002 : BS degree in Material Science and Engineering, Korea University.  
2011 : PhD degree in Material Science and Eng., Seoul Nat'l Univ.  
2011~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, TU Dresden (Germany).  
2012~present : Associate Professor, Hanbat National University.

**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 : Senior Member of Engineering Staff, Researcher, 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 : Assistant Professor, Hanbat Nat'l Univ.