

신규 용액공정 정공주입층 소재 Hexaazatrinitrophenylene 유도체를 도입한 인광 유기전기발광소자

Solution Processed Hexaazatrinitrophenylene derivatives as a efficient hole injection layer for phosphorescent organic light-emitting diodes

이 장 원, 성 백 상, 이 승 훈, 유 재 민, 이 재 현, 이 종 희[★]

Jangwon Lee, Baeksang Sung, Seung-Hoon Lee, Jae-Min Yoo, Jae-Hyun Lee, Jonghee Lee[★]

Abstract

To improve light-emitting performance of green phosphorescent organic light-emitting diodes (OLEDs), we introduced new hole injection materials-hexaazatrinitrophenylene (HATNA) derivatives as a solution processed hole injection layer (HIL). The HATNA derivative has a low the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) energy level, similar to the work function of Indium Tin Oxide (ITO), showing a different concept of hole injection mechanism. It was confirmed that the device efficiency of OLEDs using HATNA-HIL showed the improved external quantum efficiency from 10.8% to 15.6% and current efficiency from 32.7 cd/A to 42.7 cd/A due to the balance of electrons and holes in the emissive layer.

요 약

유기전기발광소자(Organic light diodes, OLEDs)의 전기발광특성을 향상시키기 위해, 본 논문에서는 용액 공정 정공주입층으로 신규 hexaazatrinitrophenylene(HATNA) 유도체들을 도입한 고효율 녹색인광 OLED소자의 특성을 연구하였다. HATNA 유도체는 Indium Tin Oxide(ITO)의 일함수와 비슷한 낮은 the lowest unoccupied molecular orbital(LUMO) 에너지 준위를 가져 다른 개념의 정공주입 메커니즘을 보여주었다. HATNA 유도체를 hole injection layer(HIL)로 사용한 OLED소자들은 HTL로의 정공주입장벽을 효과적으로 감소시키고 발광층 내에 전자와 정공의 균형을 최적화 시켜 외부양자효율이 10.8%에서 15.6%로, 전류 효율은 34.3 cd/A에서 42.7 cd/A로 소자 효율이 크게 향상 되었다.

Key words : Organic light emitting diodes, Hole injection layer, Solution-process, HATNA, efficiency

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

★ 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 Jul. 14, 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.

I. 서론

용액 공정 유기전기발광소자(organic light emitting diodes, OLEDs)는 진공 설비로부터 자유로워 대면적 OLEDs panel 구현이 가능하고, 재료 사용 효율이 높아 원가 절감이 가능한 장점이 있다[1]. 용액 공정 유기전기발광소자에서 정공주입층(hole injection layer, HIL)으로 주로 사용 되는 PEDOT : PSS (poly(2,3-dihydrothieno-1,4-dioxin)-poly(styrenesulfonate))는 높은 전도도와 높은 광 투과성, 낮은 에너지 준위를 가지고 있지만 강한 산성인(~ph 1.5)를 가져 ITO(Indium Tin Oxide)에 낮은 ph로 인하여 손상을 주며, 인듐 이온이 정공주입층으로 확산되는 등 사용에 있어 제약점이 제기 되어왔다[2]. 이를 대체하는 HIL로 WO₃(Tungsten trioxide), MoO₃(Molybdenum Trioxide)와 같은 전이 금속 산화물을 사용하였지만, 이 소재들 또한 용액공정으로 제조 시 유기물대비 높은 온도를 필요로 하거나 Plasma처리를 해야 되는 번거로운 조건이 동반되는 문제로 제기되어왔다[3-6]. 효과적인 정공주입층은 정공 또는 전자 주입을 위해서 전극의 일함수와 발광층의 전극의 일함수와 발광층의 HOMO(the highest occupied molecular orbital) 혹은 LUMO(the lowest unoccupied molecular orbital) 에너지 준위 사이의 전하 주입 장벽을 줄여줄 수 있는 에너지 준위를 가지는 물질을 이용하여 정공의 주입을 더 쉽게 진행되게 할 수 있다. OLED소자에서 전하 주입 장벽을 줄여줌으로써 향상된 전도도를 바탕으로 발광층에서 전자와 정공이 재결합을 쉽게 하게 해주어 OLED소자의 전력 효율 증가와 구동 전압 감소를 가능하게 한다. 최근 대표적인 HIL로 이용되고 있는 1,4,5,8,9,11-hexaazatriphenylenehexacarbonitrile(HAT-CN)은 낮은 LUMO 에너지 준위를 가지고 있어 다른 개념의 정공주입 메커니즘을 바탕으로 OLED소자의 효율을 올리는 결과를 얻을 수 있는 것을 보여 주었다[7-8].

본 연구에는 다양한 LUMO 에너지 준위를 가지고 있어 기존 유기물 태양전지 등의 유기전자소자에 적용된 바 있는 다양한 hexaazatrinaphthylene(HATNA) 유도체들을 유기전기발광소자의 용액공정 HIL로 적용하여 그 특성을 평가하였다[8-9]. 그림 1에 도시한 화학구조와 같이, 적용된 HATNA 유도체들-2,3,8,9,14,15-hexachloro-5,6,11,12,17,18-

hexaazatrinaphthylene(HATNA-Cl₆)와 2,3,8,9,14,15-hexafluoro-5,6,11,12,17,18-hexaazatrinaphthylene(HATNA-F₆)를 적용한 OLED소자는 각 유도체의 적합한 에너지 준위 특성으로 인해 HIL이 적용되지 않은 기본소자의 외부양자효율 10.8 % 보다 향상된 외부양자효율 15.6 % 및 13.4 %의 특성을 보였다.

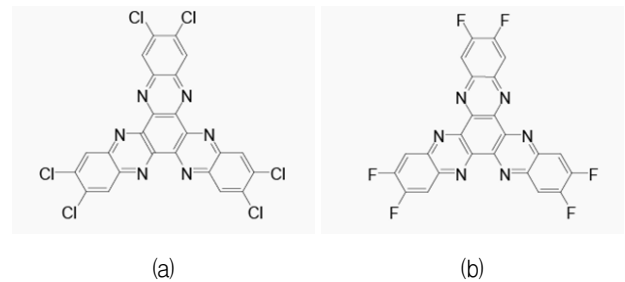


Fig. 1. The chemical structure of HATNA-Cl₆ (a) and HATNA-F₆ (b).

그림 1. HATNA-Cl₆ (a)와 HATNA-F₆의 화학구조(b)

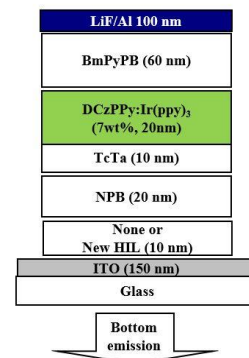


Fig. 2. Device structure of OLEDs with HATNA-Cl₆ or HATNA-F₆.

그림 2. HATNA-Cl₆와 HATNA-F₆가 적용된 OLED소자의 소자구조

II. 본론

1. 실험방법

제작된 소자들의 구조는 그림 2에 도시한 바와 같다. OLED소자는 ITO(70 nm)/신규 HIL(HATNA-Cl₆ or HATNA-F₆ (0 or 10 nm))/1,4-bis[N-(1-naphthyl)-N'-phenylamino]-4,4'-diamine(NPB) (20 nm)/4,4',4''-tri(N-carbazolyl)triphenylamine(TcTa) (10 nm)/ 2,6-bis(3-(9H-carbazol-9-yl)phenyl)pyridine (DCzPPy) doped with 7 wt.% tris(2-phenylpyridyl)iridium(III) (Ir(ppy)₃) (20 nm)/ 1,3-Bis

(3,5-dipyrid-3-ylphenyl)benzene (BmPyPb) (60 nm) / LiF-Al (100 nm)으로 구성되어 있다. 150 nm 두께의 ITO가 패턴 된 유리 기판을 이용하여 소자 제작을 진행하였고, 소자 제작 전 기판을 유기 용매를 이용해 세척하였고, 각 용액의 성막을 용이하도록 성막 전 기판에 UV-ozone에 20분 동안 노출시킨 후 각 재료들의 성막을 진행하였다. HIL은 2-propanone 용매에 (3 mg/ml)로 녹여 스핀 코팅법을 이용하여 성막하였다. 정공수송층(hole transporting layer, HTL)으로 NPB, 엑시톤 유출 방지층(exciton blocking layer, XBL)로 TcTa를 사용하였고, 발광층(emissive layer, EML)으로는 대표적 녹색 인광도판트 소재인 Ir(ppy)₃가 DCzPPy 호스트 소재에 7 wt% 도핑된 층을 사용하였다. 이 후 전자수송층(electron transporting layer, ETL)인 BmPyPb 및 금속전극까지는 10⁻⁷torr의 고 진공상태에서 각각 1 Å/s, 4Å/s의 속도로 증착하여 제작된 후 질소 분위기의 클러브박스에서 봉지되고 외부로 반출되어 측정되었다. 제작된 OLEDs의 발광 면적은 2×2 mm²이며, 전류밀도-전압 특성은 Keithley 238으로 측정하였고, EL spectra의 경우 spectro-radiometer(Minolta CS-2000)으로 측정하여 OLED소자 분석을 진행하였다.

2. 결과 및 고찰

앞서 서론에서 언급한바와 같이 낮은 LUMO값을 지니는 다양한 분자구조의 HATNA 유도체 들은 S. Barlow그룹 등에서 설계 및 합성, 분석한 것으로 알려져 왔다[9]. 본 연구에서 사용된 HATNA-F₆, HATNA-Cl₆의 HATNA 유도체들은 HATNA분자의 phenazine구조의 수소원자를 플루오르와 염소와 같은 할로젠원소로 치환한 구조를 가지고 이러한 변형을 통하여 분자의 에너지 준위 및 전하 수송능력을 제어할 수 있게 된다[9]. 할로젠화 HATNA 유도체들의 OLED소자에서의 전기적, 광학적 특성 변화를 평가하기 위하여 HATNA 유도체를 HIL로 적용한 소자와 HIL이 없는 소자의 전기적, 광학적 특성을 분석하였다. 그림 3은 HIL이 없는 소자, HATNA-Cl₆을 HIL로 적용한 소자, HATNA-F₆을 적용한 소자의 전류밀도-전압-휘도(current density-voltage-luminance, J-V-L) 특성을 측정한 결과이다.

HIL이 없는 기본소자의 경우 2.5 V의 낮은 임계 전압을 지니지만 완전한 전류밀도의 증가 특성을

보였고 HATNA-Cl₆ 및 HATNA-F₆가 HIL로 적용된 소자는 HIL이 없는 소자에 비해 3 V로 비슷한 임계전압을 보이지만 급격한 전류밀도의 증가 특성을 보였다. OLED 소자의 turn-on 전압은 HATNA-Cl₆를 적용한 소자가 5.3 V, HATNA-F₆를 적용한 소자가 7.3 V, 아무것도 적용하지 않은 기준 소자의 경우 9 V로 이것은 실험에 사용된 OLED 소자의 turn-on 전압이 전자주입층과 정공주입층에 의하여 고르게 관여되어 결정되었다는 것을 알 수 있게 한다. 1000 cd/m²에서 정의되는 구동 전압과 전류를 확인해보면 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆를 적용한 소자의 경우 각각 11.6 V에서 2.5 mA/cm², 13 V에서 2.9 mA/cm²의 결과를 보였고 HIL이 없는 소자는 16.5 V에서 3.1 mA/cm²로 측정되었다.

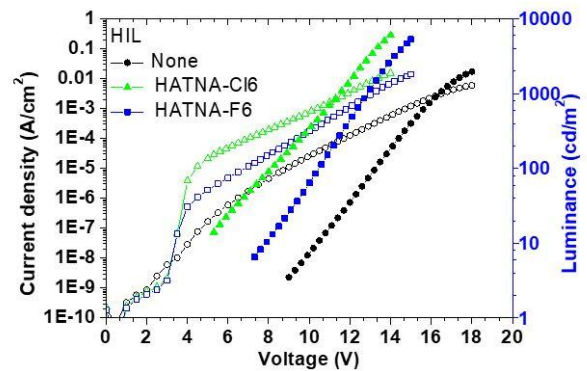


Fig. 3. Current density versus voltage (empty symbol) and luminance versus voltage (filled symbol) characteristics of OLEDs without HATNA derivative (black) or with HATNA-Cl₆ (green) and HATNA-F₆ (blue).

그림 3. HATNA 유도체를 적용하지 않은 OLED소자와 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆이 적용된 소자의 J-V-L 그래프

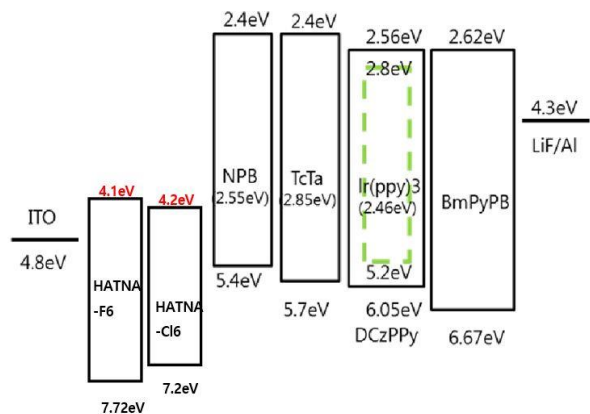


Fig. 4. Energy level diagram of OLEDs device. 그림 4. OLEDs 소자의 에너지 준위 다이어그램

이러한 구동 전압과 전류의 변화는 그림 4에 도시한 본 연구에 사용된 소재들의 에너지 준위 다이어그램을 통해 설명될 수 있다. 발광층과 전자수송층의 정공차단 에너지 장벽(hole blocking barrier)을 보면 0.62 eV($HOMO_{DCzPPy}:6.05$ eV, $HOMO_{BmPyPb}:6.67$ eV)차이로 정공을 발광층에 가두어 두기에 충분한 장벽 크기이므로 효과적으로 정공을 가두어 두었다고 이해할 수 있다. 반면에 정공수송층과 발광층의 LUMO 준위의 차이가 0.16 eV($LUMO_{NPB}:2.4$ eV, $LUMO_{TcTa}:2.4$ eV, $LUMO_{DCzPPy}:2.56$ eV)로써 낮은 전자차단 에너지 장벽(electron blocking barrier)을 갖게 되어 발광층 내부의 전자가 정공수송층으로 이동할 수 있지만, 그렇지 않은 것을 보아 OLED소자의 전자와 정공의 이동거리가 적절하여 전자 정공의 재결합 영역이 발광층의 적절한 부분에서 생성되었다고 이해할 수 있다. 신규 전자주입층은 새로운 정공 주입 메커니즘으로 인하여 NPB와 계면사이에서 전하의 분리가 이루어지고 NPB의 HOMO 준위로 정공의 이송 그리고 신규 정공 주입층의 LUMO 준위로의 전자의 이송 단계를 거친다[10-11]. 이러한 현상으로 인해 NPB로의 정공 주입장벽이 매우 감소하여 계면 사이에서 옴릭 접합(ohmic contact)이 생겨 정공의 주입능력이 향상되어 구동전압과 전류가 낮아진다고 이해할 수 있다[12-13].

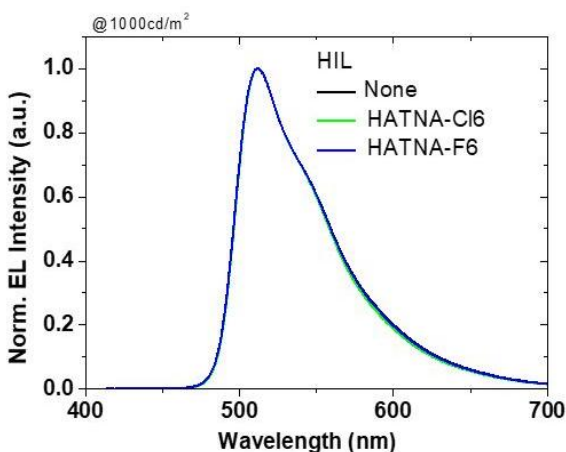


Fig. 5. Electroluminescent (EL) spectra of OLEDs without HATNA derivative (black), with HIL of HATNA-Cl₆ (green) or HATNA-F₆ (blue).

그림 5. HATNA 유도체를 적용하지 않은 OLED소자와 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆이 적용된 소자의 발광 스펙트럼 그래프

그림 5는 1000 cd/m²에서 정리된 OLED소자의 발광 스펙트럼 측정 결과를 보여주고 있다. 모든 OLED 소자는 Ir(ppy)₃가 도핑된 DCzPPy를 발광층으로 가지는 녹색 인광 발광 스펙트럼을 지니고 있다. HATNA-Cl₆가 적용된 소자의 550-600nm 사이에서 아주 작은 스펙트럼의 차이가 존재하는데 이 현상은 HATNA 유도체들이 정공 주입층에 적용되면서 정공의 주입이 조절되며 이로 인하여 발광층 내에 전자와 정공이 재결합되는 부분인 recombination zone의 위치가 변경되었다고 할 수 있다. 또한 새로운 스펙트럼 피크가 발견되지 않은 것을 보아 7 wt%의 Ir(ppy)₃의 농도는 에너지 이동(energy transfer)에 충분한 농도이므로 발광층의 호스트 분자로부터 도펀트 분자로 에너지 이동이 매우 잘 일어났다는 것과 전하가 TcTa나 NPB, BmPyPb에 누출되지 않고 발광층 내에 잘 가둬져 있다는 것을 알 수 있다[8, 14-15].

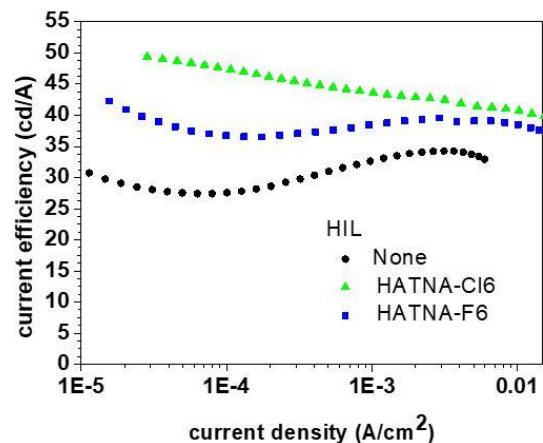


Fig. 6. Current efficiency versus current density characteristics of OLEDs without HATNA derivative (black) or with HATNA-Cl₆ (green) and HATNA-F₆ (blue).

그림 6. HATNA 유도체를 사용하지 않은 OLED소자와 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆이 적용된 소자의 전류 효율 그래프

그림 6은 신규 정공주입층이 적용되지 않은 기본 소자와 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆가 적용된 소자들의 전류 효율 측정 결과를 보여주고 있다. 기본 OLED소자의 경우 구동전압 16.5 V에서 34.3 cd/A의 효율을 보였고 HATNA-Cl₆를 정공 주입층으로 사용한 OLED소자의 경우 구동전압 11.6 V에서 42.7 cd/A로 기본소자를 사용한 소자보다 낮은 구동전압과 높은 전류효율을 보였다. 마찬가지로 HATNA-F₆를 사용한 OLED소자도 13 V에서 39.6 cd/A 값으

로 기본소자보다 향상된 효율을 보였다. 이와 같이 HATNA 유도체를 정공주입층으로 적용한 소자들이 보다 높은 효율을 보였는데 이는 발광층으로 들어오는 정공의 양이 증가하고 전자와 정공의 비율이 잘 맞는 현상이라고 해석 될 수 있다[16-17]. 할로겐화 HTANA 유도체를 용액공정 정공주입층으로 도입하여 정공의 주입이 조절된 OLED소자들의 특성은 Table 1에 정리 되어있다.

Table 1. Summarized performance of OLEDs without HATNA derivative or with HATNA-Cl₆ and HATNA-F₆.

표 1. HATNA 유도체를 적용하지 않은 OLED소자와 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆이 적용된 소자의 특성 정리

HIL	None	HATNA-F ₆	HATNA-Cl ₆
Turn-on voltage (V)	9	7.3	5.3
Operating voltage (V)	16.5	13	11.6
Current density (mA/cm ²)	3.1	2.9	2.5
Current efficiency (cd/A)	34.3	39.6	42.7
Power efficiency (lm/W)	21.9	29.8	32.2
External quantum efficiency (%)	10.8	13.4	15.6
CIE (X, Y)	(0.30, 0.62)	(0.30, 0.63)	(0.30, 0.62)

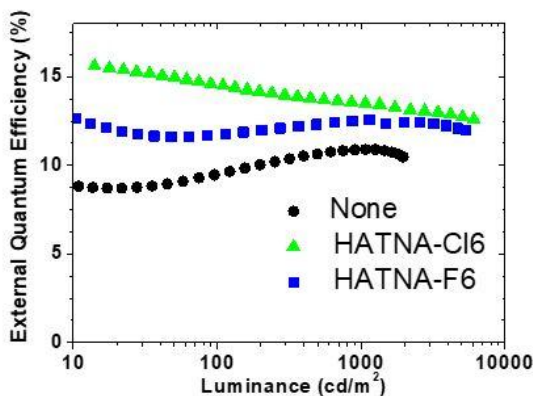


Fig. 7. External quantum efficiency of OLEDs without HATNA derivative (black), with HIL of HATNA-Cl₆ (green) or HATNA-F₆ (blue).

그림 7. HATNA 유도체를 사용하지 않은 OLED소자와 HATNA-Cl₆, HATNA-F₆이 적용된 소자의 외부양자효율 그래프

그림 7은 신규 전공수송층이 적용된 소자와 기본 소자의 외부양자효율 특성 그래프이다. New HIL의 사용은 HTL로의 정공주입장벽을 효과적으로 감소시켜 오믹 접합을 형성 하게 된다[12-13]. 이로 인해 정공 주입능력이 양호해져 보다 많은 양의 정공이 수송되고 전자와 정공의 재결합 확률이 높아져 전도도가 향상되므로 구동전압과 전류가 감소한다. 이는 곧 유기전기발광소자의 효율과 직결되어 HATNA 유도체를 사용한 소자 역시 높아진 효율을 해당 그래프를 통해 향상된 외부양자효율을 확인할 수 있다.

III. 결론

할로겐화 HATNA 유도체(HATNA-Cl₆, HATNA-F₆)를 용액 공정 정공주입층으로 적용하여 제작된 인광 유기전기발광소자의 전기발광 특성을 확인하였다. HATNA-Cl₆, HATNA-F₆를 삽입하여 제작된 소자들은 외부양자 효율이 각각 15.6 %, 13.4 %로 정공 주입층이 없는 기본소자(10.8 %)에 비하여 각각 약 1.5배, 약 1.3배 향상하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 할로겐화 HATNA 유도체가 용액공정 유기전기발광소자에서 정공주입층으로 사용에 적합할 것으로 예상된다.

References

[1] Anil R. Duggal, Christian M. Heller, Joseph J. Shiang, Jie Liu, and Larry N. Lewis “Solution-Processed Organic Light-Emitting Diodes for Lighting,” *JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY*, VOL.3, NO.2, pp.184-192, 2007. DOI: 10.1109/JDT.2007.895357

[2] Jens Meyer, Rebecca Khalandovsky, Patrick Görrn, Antoine Kahn, “MoO₃ Films Spin Coated from a Nanoparticle Suspension for Efficient Hole Injection in Organic Electronics,” *Adv. Mater.*, 23, pp.70-73, 2011. DOI: 10.1002/adma.201003065

[3] Jae-Hyun Lee, Dong-Seok Leem, Jang-Joo Kim, “High performance top-emitting organic light-emitting diodes with copper iodide-doped hole injection layer,” *Organic Electronics*, Vol.9,

- pp.805–808, 2008. DOI: 10.1016/j.orgel.2008.05.011
- [4] Hana Choi, Bongsoo Kim, Min Jae Ko, Doh Kwon Lee, Honggon Kim, Sung Hyun Kim, Kyungkon Kim, “Solution processed WO₃ layer for the replacement of PEDOT : PSS layer in organic photovoltaic cells,” *Organic Electronics*, 13, 959–968, 2012. DOI: 10.1016/j.orgel.2012.01.033
- [5] Stefan Höfle, Michael Bruns, Stefan Strässle, Claus Feldmann, Uli Lemmer, Alexander Colsmann, “Tungsten Oxide Buffer Layers Fabricated in an Inert Sol Gel Process at Room Temperature for Blue Organic Light Emitting Diodes,” *Organic Electronics*, Vol.14, pp.1820–1824, 2013. DOI: 10.1016/j.orgel.2013.04.017
- [6] Eul-Yong Shin, Jae-Hyun Lee, Yoonseuk Choi, Min-Hoi Kim, “Enhanced charge injection in 6, 13-bis (triisopropylsilylethynyl)-pentacene field-effect transistors with a rhenium oxide buffer layer,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol.34, pp.035–008, 2019. DOI: 10.1088/1361-6641/aaff37
- [7] Jeong-Hwan Lee, Sunghun Lee, Jung-Bum Kim, JunHyuk Jang and Jang-Joo 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.*, 22, pp.15262–15266, 2012. DOI: 10.1039/c2jm32438e
- [8] Jae-Hyun Lee, Jonghee Lee, “Efficient Green Phosphorescent OLEDs with Hexaazatrinaphthylene Derivatives as a Hole Injection Layer,” *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 26, No. 6, 725–729, 2015. DOI: 10.14478/ace.2015.1108
- [9] Stephen Barlow, Qing Zhang, Bilal R. Kaafarani, Chad Risko, Fabrice Amy, Calvin K. Chan, Benoit Domercq, Zoya A. Starikova, Mikhail Yu. Antipin, Tatiana V. Timofeeva, Bernard Kippelen, Jean-Luc B., Antoine Kahn, and Seth R. Marder, “Synthesis, Ionisation Potentials and Electron Affinities of Hexaazatrinaphthylene Derivatives,” *Chem. -Eur. J.*, 13, 3537–3547, 2007. DOI: 10.1002/chem.200601298
- [10] Sunghun Lee, Jeong-Hwan Lee, Jae-Hyun Lee, and Jang-Joo Kim, “The Mechanism of Charge Generation in Charge-Generation Units Composed of p-Doped Hole-Transporting Layer/HATCN/n-Doped Electron-Transporting Layers,” *Adv. Funct. Mater.*, 22, pp.855–860, 2012. DOI: 10.1002/adfm.201102212
- [11] Yook KS, Jeon SO, Lee JY, “Efficient hole injection by doping of hexaazatriphenylene hexacarbonitrile in hole transport layer,” *Thin Solid Films*, 517, pp.6109–6111, 2009. DOI: 10.1016/j.tsf.2009.05.011
- [12] Hao-Wu Lin, Wei-Chieh Lin, Jung-Hung Chang, Chih-I Wu, “Solution-processed hexaaza triphenylene hexacarbonitrile as a universal hole-injection layer for organic light-emitting diodes,” *Organic Electronics*, 14, pp.1204–1210, 2013. DOI: 10.1016/j.orgel.2013.02.011
- [13] Gopeeka Rajan, Vandana Yadav, Payal Manzhi, Gayatri Chauhan, C.K. Suman, 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, pp.530–536, 2017. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.07.007
- [14] Jiang Li, Zhenjun Si, Chunbo Liu, Chuannan Li, Feifei Zhao, Yu Duan, Ping Chen, Shiyong Liu and Bin Li, “Highly efficient phosphorescent organic light-emitting devices based on Re(CO)₃Cl-bathophenanthroline,” *Semicond. Sci. Tech.*, 22, pp.553–556, 2007. DOI: 10.1088/0268-1242/22/5/017
- [15] Chih-Hao Chang, Szu-Wei Wu, Chih-Wei Huang, Chung-Tsung Hsieh, Sung-En Lin, Nien-Po Chen, and Hsin-Hua Chang, “Efficient red, green, blue and white organic lightemitting diodes with same exciplex host,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 55, 03CD02, 2016. DOI: 10.7567/JJAP.56.129209
- [16] Chihaya Adachi, Marc A. Baldo, Mark E. Thompson, Stephen R. Forrest, “Nearly 100% internal phosphorescence efficiency in an organic light-emitting device,” *J. Appl. Phys.*, 90, pp. 5048–5051, 2001, DOI: 10.1063/1.1409582
- [17] Rico Meerheim, Sebastian Scholz, Selina Olthof, Gregor Schwartz, Sebastian Reineke, Karsten

Walzer, and Karl Leo, "Influence of charge balance and exciton distribution on efficiency and lifetime of phosphorescent organic light-emitting devices," *J. Appl. Phys.*, 104, 014510, 2008.

DOI: 10.1063/1.2951960

BIOGRAPHY

Jangwon Lee (Member)



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

BaekSang Sung (Member)



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

SeungHun Lee (Member)



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

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 National University.
2011~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, TU Dresden (Germany).
2012~present : Associate Professor, Hanbat National University.

Jonghee Lee (Member)



2002 : BS degree in Chemistry, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea.
2004 : MS degree in Chemistry, KAIST, Korea.
2007 : Ph.D. degree in Chemistry, KAIST, Korea.

2007~2010 : Senior Member of Engineering Staff, Researcher, Electronics and Telecommunication Research Institute (ETRI), Korea
2010~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, Technical University. of Dresden, Germany.
2012~2018 : Senior Member of Engineering Staff, Researcher, ETRI, Korea
2018~present : Assistant Professor, Hanbat National University.