

N형 유기물질을 이용한 세로형 유기 발광트랜지스터의 제작 및 특성에 관한 연구

오세용*[†] · 김희정 · 장경미*

서강대학교 공과대학 화공생명공학과, *서강대학교 공과대학 대학원 바이오 협동과정
(2006년 2월 21일 접수, 2006년 4월 23일 채택)

Characteristics and Fabrication of Vertical Type Organic Light Emitting Transistors Using n-Type Organic Materials

Se Young Oh*[†], Hee Jeong Kim, and Kyoungmi Jang*

Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Sogang University,
Sinsoo-Dong 1, Mapo-Gu, Seoul 121-742, Korea

*Interdisciplinary Program of Integrated Biotechnology, Sogang University,
Sinsoo-Dong 1, Mapo-Gu, Seoul 121-742, Korea

(Received February 21, 2006; accepted April 23, 2006)

초록 : 4 종류의 n형 유기 반도체 물질 F16CuPc, NTCDA, PTCDA, PTCDI C-8을 사용하여 ITO/n형 활성 물질/Al gate/n형 활성물질/Al로 구성되는 세로형 유기 박막트랜지스터를 제작하였다. 캐리어 이동도의 차이를 갖는 유기 물질의 종류와 유기 박막층의 두께 조절에 따른 유기 박막트랜지스터의 전류전압(I-V) 특성 및 전류의 온오프비에 미치는 영향을 조사하였다. PTCDI C-8을 사용한 세로형 유기 박막트랜지스터에서 낮은 구동전압과 높은 스위칭 특성을 보였다. ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al로 구성되는 발광트랜지스터를 제작하였고, 20 V에서 최고 0.054의 양자 효율을 나타내었다.

Abstract : We have fabricated vertical type organic thin film transistors(OTFTs) consisting of ITO/n type active material/Al gate/n type active material/Al using F16CuPc, NTCDA, PTCDA and PTCDI C-8. The effect of mobility of n type active materials and thin film thickness on current-voltage(I-V) characteristics and on/off ratios were investigated. The vertical type organic transistor using PTCDI C-8 exhibited low operation voltage and high on-off ratio. In addition, we have investigated the feasibility of application in organic light emitting transistor using light emitting polymer. Especially, the light emitting transistor consisting of ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al showed the maximum quantum efficiency of 0.054.

Keywords : vertical type OTFT, n type active materials, light emitting transistor, on-off ratio, quantum efficiency.

서 론

유기트랜지스터(OTFT)에 관한 연구는 1980년대부터 시작되었지만 그 당시에는 실리콘을 이용한 FET(field effect transistor)의 성능에 비해 특성이 현저히 떨어졌고 시대적으로 연구개발 필요성 또한 부각되지 못하였다.¹ 하지만 최근 유기물로 구성되는 트랜지스터의 성능이 실리콘과 상응하는 특성을 보일 뿐만 아니라 종이처럼 구부릴 수 있는 디스플레이의 개발 필요성이 강조되고 있어, 많은 연구가 진행되고 있다.^{2,3} OTFT는 사용되는 재료에 따라 저분자 반도체 화합물계와 전도성 고분자로 크게 나뉘어지고 있다.

저분자계로는 메로시아닌, 프탈로시아닌, 펜타센, 페릴렌, 플러렌 등이 사용되고 있으며 분자구조 이외에 물질의 순도, 제작조건, 박막상태 등에 따라 특성이 크게 좌우된다고 알려져 있다.^{4,5} 연구 초기에는 전계효과 이동도가 10^{-4} cm²/Vs이었고 동작주파수도 1 kHz 정도로 물성이 매우 좋지 않았다. 하지만 최근 Bell 연구소에서 고순도 펜타센 단결정을 이용하여 전계효과 이동도가 3.2 cm²/Vs, 전류의 온오프비가 10^9 이상, 동작주파수가 700 kHz~11 MHz로 실리콘에 상응하는 물성치가 보고된 바 있다.⁶ 이렇게 뛰어난 저분자 반도체 화합물의 트랜지스터 특성들이 알려지고 있지만, 박막 제작 시 진공 증착을 위해 고도의 장비가 요구되고 내구성도 떨어져 문제점으로 지적되고 있다.

고분자 재료는 저분자 재료에 비하여 캐리어의 이동도가 낮지만, 가공성이 좋고 특히 잉크젯 프린터와 같은 간단한 장비로 디바이스의 제작이 가능하다는 장점 때문에 많은 관심이 모아지고

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: syoh@sogang.ac.kr

있다.⁷ 특히 최근 캠브리지 대학과 Seiko-Epson사의 공동 연구로 플라스틱 기판에 고분자를 코팅한 OTFT는 전계효과 이동도가 $0.02 \sim 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이고 전류의 온오프비가 10^5 이며 250 Hz의 동작 주파수를 갖는다고 보고되었다. 이와 같이 저분자계 화합물에 비하여 트랜지스터 특성은 떨어지지만, 향상된 기계적 특성이 요구되는 저렴한 트랜지스터의 응용에 적합한 것으로 평가 받고 있다.⁸⁻¹⁰

OTFT의 연구개발은 크게 다음 두 가지의 접근으로 정리될 수 있다. 첫번째로 고성능 OTFT 소자용 신재료 연구 개발, 그리고 두 번째로는 디바이스의 세부구조에 변화를 주거나 이에 새로운 동작 메커니즘이 적용된 소자를 개발하는 것이다. 특히 OTFT용 재료의 특성을 향상시키기 위한 연구에 많은 관심이 모아지고 있으며 캐리어의 이동도 향상과 소자 작동 시 재료의 안정성과 수명에 대한 내구성이 절실히 요구되고 있다. 이를 위해 고성능의 신물질 합성과 내구성있는 박막 제조를 통한 안정한 소자 제작에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 게이트 전압의 조절에 의해 전기적 스위칭이나 전하의 이동을 제어하는데 있어서 기존의 가로 형태 OTFT에서 가장 큰 문제점으로 지적되었던 응답속도나 전력소모 문제를 개선하기 위해 세로 형태의 정전유도 트랜지스터와 같은 진보된 구조의 디바이스 개발 역시 흥미로운 차세대 연구로 부각되고 있다.¹¹⁻¹³

본 연구에서는 유기 발광소자와 OTFT의 접목을 통해 제작되는 새로운 개념의 유기 전자소자에 대한 연구를 수행하였다. 즉 n형 유기 반도체 화합물인 F16CuPc, NTCDA, PTCDA, PTCDI C-8을 사용하여 세로형 OTFT를 제작하고, 그 밑에 고분자 발광층 P3HT와 정공 주입층 PEDOT-PSS 층을 도입하여 단일 소자에서 발광을 구동할 수 있는 새로운 개념의 복합형 발광트랜지스터를 제작하였다. 세로형 유기 박막트랜지스터는 기존의 가로형 트랜지스터에 비하여 높은 전류와 짧은 채널 길이, 빠른 구동 속도 등의 장점이 있고 또한 세로형이므로 유기 발광소자에 쉽게 적용될 수 있는 특징이 있다. 또한 대부분의 전도성 고분자 발광 재료는 정공 전달이 용이하기 때문에 고분자 발광층위에 n형의 트랜지스터 활성물질을 세로로 적층하게 되면 n형 OTFT는 발광층의 구동역할 뿐만 아니라 전자전달 기능까지 하게 되어 높은 효율로 발광소자를 구동할 수 있는 장점이 있을 것으로 사료된다.

실 험

시약. 본 연구에서 사용한 n형 유기 반도체 물질인 F16CuPc (copper hexadecafluorophthalocyanine), NTCDA (1,4,5,8-naphthalenetetracarboxylic dianhydride), PTCDA (perylene-tetracarboxylic dianhydride) 와, octylamine hydrochloride, imidazole, 고분자 발광물질 P3HT (poly-3-hexylthiophene)는 Aldrich Chem Co.(USA)의 시약을 구입하여 정제과정 없이 사용하였고, 고분자 정공 주입 물질인 PEDOT-PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(styrenesulfonic acid))는 Bayer사로부터 구입하여 정제 없이 사용하였다. N형 유기 반도체 물질 중 PTCDI C-8 (*N,N*-dioctyl-3,4,9,10-perylene-tetracarboxylicdiimide)는 아래의 방법으로 합성하였다.¹⁴ 본

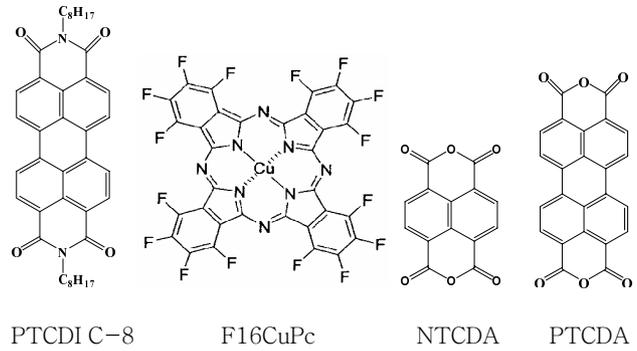
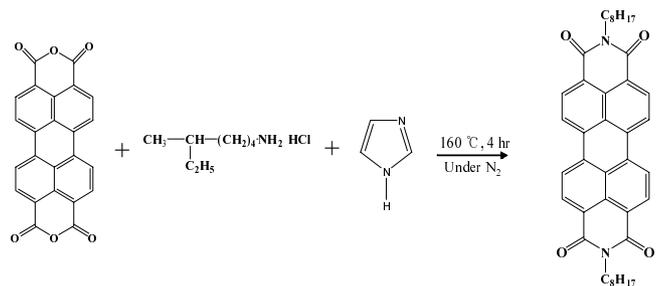


Figure 1. Molecular structures of n-type semiconductor materials.



Scheme 1. Synthetic route of PTCDI C-8.

실험에서 사용한 각 시료의 구조는 Figure 1에서 나타내었다.

***N,N*-Dioctyl-3,4,9,10-perylene-tetracarboxylic diimide (PTCDI C-8)의 합성.** N형 유기 반도체 물질로 사용되는 PTCDI C-8은 Scheme 1에 나타난 방법으로 합성하였다. 먼저 imidazole 0.365 mole (23.50 g)을 160 °C로 가열하여 액체 상태로 만든 후 PTCDA 0.012 mole (4.70 g)과 octylamine hydrochloride 0.028 mole (4.75 g)을 넣어 질소분위기 하에서 4시간 동안 반응시키고 반응 종료 후 실온으로 냉각시켰다. 그 다음 반응 생성물을 에탄올(500 mL)에 침전시키고 여기에 2 N HCl 1000 mL를 혼합시킨 후 glass filter로 여과하고 10% K_2CO_3 수용액과 증류수로 반복 세척하였다. 최종적으로 침전된 파우더를 120 mL의 클로로포름 용액에 넣고 재결정시킨 후 40 °C 진공오븐에서 약 24시간 건조하여 순수한 PTCDI C-8을 얻을 수 있었다(수득률 : 78%). 원소분석 : 이론치, C : 78.15, H : 6.89, N : 4.56; 실험치, C : 78.27, H : 6.59, N : 4.55.

소자의 제작 및 기기분석. ITO 기판은 저항이 20 Ω 내외인 $2 \times 2 \text{ cm}$ 크기의 ITO glass를 패팅하고 35% HCl 수용액을 사용하여 에칭한 후 NaOH 수용액, isopropyl alcohol, 증류수, 아세톤의 순으로 세척한 다음 질소가스로 건조시켜 사용하였다. 세척된 ITO 기판위에 다양한 두께의 n형 유기 반도체 물질을 증착 또는 코팅하여 박막을 제조하였다. 저분자 유기 박막은 진공 증착기(ULVAC VTR-300M/1ERH)를 사용하여 1×10^{-6} Torr 진공 하에서 0.5~1 Å/sec의 속도로 유지하며 증착하였다. PTCDI C-8 박막은 클로로포름에 녹여 1000 rpm의 속도로 스핀코팅 하였다. N형 유기 반도체 물질의 박막위에 게이트 전극으로 Al

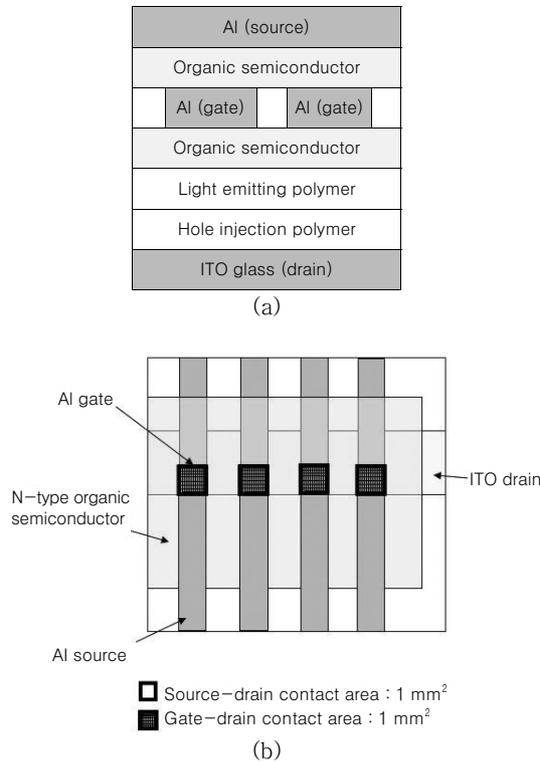


Figure 2. Device configuration of (a) light emitting transistor and (b) gate structure.

전극을 100 μm 간격으로 패터닝된 grid type의 마스크를 이용하여 100 \AA 으로 증착하였다. 이어서 n형 유기활성 물질을 한 번 더 증착시킨 이후 마지막으로 소스 전극으로 Al을 1200 \AA 의 두께로 증착하였다. 또한 ITO glass 위에 정공 주입 물질 PEDOT-PSS와 고분자 발광물질 P3HT를 각각 적층한 후 유기 박막트랜지스터를 위의 순서대로 적층하여 유기 발광트랜지스터를 제작하였다. 유기 발광트랜지스터의 구성과 게이트의 구조는 Figure 2에 나타내었다. 정공 주입 고분자와 고분자 발광물질은 각각 클로로포름 용액(2 wt%)하에서 스프인코팅하였다. PEDOT-PSS는 500 rpm의 속도로 180초 동안 스프인코팅하였고, 고분자 발광층은 두께별로 각각 500, 1000, 2000 rpm의 속도로 30초 동안 스프인코팅한 후 40 $^{\circ}\text{C}$ 진공오븐에서 2시간 건조시켰다. 이와 같이 제작된 유기 박막트랜지스터 및 유기 발광트랜지스터의 전류-전압(I-V) 특성과 발광(I-V-L) 특성은 programmable source measurement unit(KEITHLEY 237, KEITHLEY 2400)와 optical power meter(Newport 1830-C)를 사용하여 측정하였다. 외부양자효율(%)은 optical power meter로 부터 측정된 radiance(W) 값과 source meter에서 측정된 전류값을 이용하여 계산하였다.

결과 및 토론

세로형 OTFT에서 n형 유기 반도체 물질의 두께에 따른 전기적 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 PTCDI C-8과 F16CuPc에 대하여 각각 다른 두께의 소자를 제작하였다. Table 1에서 알

Table 1. On-off Characteristics of PTCDI C-8 and F16CuPc at Source-Drain Voltage of 5 V

Material	Thickness (\AA)	Gate voltage (V_g), Current (mA)	On-off ratio
PTCDI C-8	1000	$V_g=0$ V: 17.549 $V_g=20$ V: 6.010	3.1
	2000	$V_g=0$ V: 3.075 $V_g=20$ V: 0.032	96.1
	3000	$V_g=0$ V: 0.048 $V_g=20$ V: 0.001	4.9
F16CuPc	1000	$V_g=0$ V: 8.055 $V_g=20$ V: 0.445	18
	2000	$V_g=0$ V: 0.746 $V_g=20$ V: 0.013	61.2
	3000	$V_g=0$ V: 0.005 $V_g=20$ V: 0.001	5.0

수 있듯이 PTCDI C-8, F16CuPc 둘 다 2000 \AA 두께에서 최고의 on/off 특성을 나타내었다. 특히 캐리어 이동도 특성이 가장 좋은 PTCDI C-8을 사용한 트랜지스터의 경우 n형 활성층의 두께가 2000 \AA 에서 96의 높은 스위칭 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 세로형 트랜지스터에서 소스-드레인간에 흐르는 전류는 게이트 전압 인가에 의해 실제적으로 게이트 전극 주변의 표면에서만 제어되므로 유기물 활성층의 두께가 증가할수록 디바이스내의 전류 특성도 나빠지고 게이트 전압에 의해 제어되는 양 또한 적어져 스위칭 특성이 떨어지게 된다. 반면에 유기물 활성층의 두께가 너무 얇으면 소스-드레인간 누설전류의 양이 증가하여 전류 특성은 좋아지지만 게이트 전압 인가에 의한 전류의 스위칭 특성은 감소하게 되는 것을 알 수 있었다.

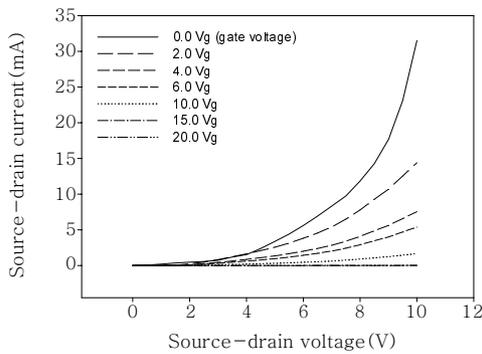
Table 2는 다양한 n형 유기활성층으로 구성되는 세로형 OTFT의 on/off 특성 결과이다. Table 2의 결과에서 알 수 있듯이 세로형 OTFT를 사용하는 n형 활성층 물질의 캐리어 이동도가 큰 경우 게이트 전압인가에 의해 더욱 높은 on/off 특성을 나타내었다. 이러한 결과는 이전의 세로형 트랜지스터의 동작 메커니즘에서 알 수 있듯이 보다 높은 캐리어 이동도 특성을 갖는 n형 활성층의 경우 게이트 전극 주변의 n형 활성층 표면에 생기는 에너지 장벽에 의해 캐리어의 이동도 감소가 더욱 현저히 나타나게 되어 보다 높은 on/off 특성을 나타낸다고 사료된다. 이와 같은 결과는 일반적으로 알려진 정전유도 트랜지스터(static induction transistor)에서 소스 전극과 드레인 전극 사이에 흐르는 전류가 게이트 전극에서 보상되는 전위차 장벽에 의해 감소하며 그 특성은 반도체 물질의 캐리어 이동도 특성과 비례한다는 결과와 유사하다는 것을 알 수 있었다.¹¹

Figure 3에 PTCDI C-8을 사용한 세로형 트랜지스터의 전류-전압 특성을 나타내었다. 게이트 전압의 증가에 따라 소스-드레인간의 전류는 크게 감소하고 게이트 전압 20 V에서 최고 96의 높은 on/off 특성을 나타내었다. 특히 Figure 3(b)의 소스-드레인 전류-게이트 전압의 특성에서 알 수 있듯이 게이트 전압이 5 V까지는 소스-드레인 전류 특성이 크게 감소하다가 그 이후에는 완만하게 감소하는 것을 알 수 있었다. PTCDI C-8을 사용한 세로

Table 2. On-off Characteristics of Various n-Type Organic Semiconductors at 2000 Å Thickness and Source-Drain Voltage of 5 V

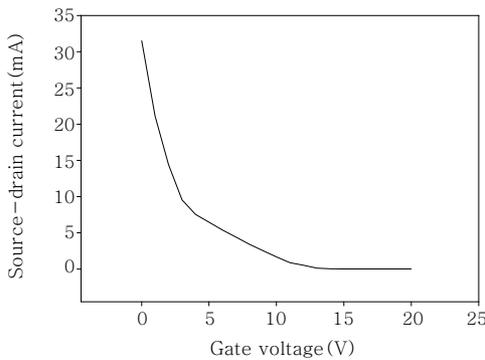
Material	Mobility ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)	Source-drain voltage	Gate voltage (V_g), Current (mA)	On-off ratio
PTCDI C-8	0.6	5 V	$V_g=0$ V: 3.075, $V_g=20$ V: 0.032	96.1
		10 V	$V_g=0$ V: 31.503, $V_g=20$ V: 0.353	89.2
F16CuPc	0.03	5 V	$V_g=0$ V: 0.765, $V_g=20$ V: 0.012	63.7
		10 V	$V_g=0$ V: 4.831, $V_g=20$ V: 0.171	28.2
NTCDA	3×10^{-3}	5 V	$V_g=0$ V: 0.012, $V_g=20$ V: 0.001	12.0
		10 V	$V_g=0$ V: 0.230, $V_g=20$ V: 0.014	15.5
PTCDA	1×10^{-5}	5 V	$V_g=0$ V: 0.423, $V_g=20$ V: 0.124	3.4
		10 V	$V_g=0$ V: 2.371, $V_g=20$ V: 0.873	2.7

Al/PTCDI C-8 1000/Al gate/PTCDI C-8 1000/ITO



(a)

Al/PTCDI C-8 1000/Al gate/PTCDI C-8 1000/ITO



(b)

Figure 3. I-V characteristics of vertical type organic transistor consisting of ITO/PTCDI C-8/Al gate/PTCDI C-8/Al, (a) source-drain current-source-drain voltage characteristics and (b) source-drain current-gate voltage characteristics.

형 OTFT는 전자의 캐리어 이동도 특성이 뛰어나기 때문에 결과적으로 디바이스의 전류-전압 특성이 좋고 특히 저전압에서도 뛰어난 on/off 특성을 나타내었다.

이와 같이 n형 유기 반도체 물질을 사용한 세로형 트랜지스터의 활성층의 두께와 캐리어 이동도 특성에 따른 세로형 OTFT 특성 결과로부터 트랜지스터의 on/off 성능에 가장 중요한 물리적 요인은 게이트 전압 인가에 의한 퍼텐셜 장벽의 크기와 물질의 캐리어 이동도 특성이라는 것을 알 수 있었다.

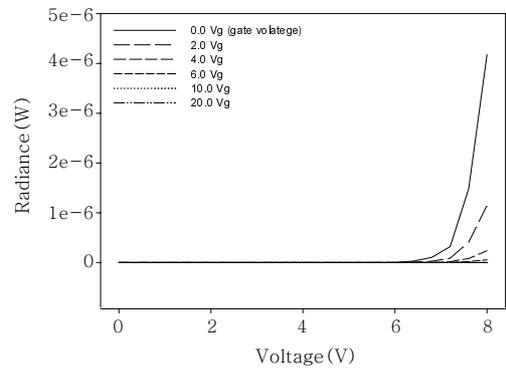
**Figure 4.** I-V-L characteristics of light emitting transistor consisting of ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al.

Figure 4에 ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al로 구성되는 발광트랜지스터의 발광 특성을 나타내었다. 이 소자는 게이트 전압을 인가하지 않은 경우 0 V에서 발광을 나타내지만 게이트 전압을 인가하면 좀 더 높은 전압에서 발광을 시작하고 20 V의 게이트 전압을 인가하게 되면 발광 특성이 거의 사라지는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 고분자 발광층 위에 세로형으로 적층된 OTFT에서 게이트 전압 증가에 따라 발광 디바이스 전체의 전류 특성이 크게 감소하여 결과적으로 발광 특성이 사라지기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 세로형 OTFT의 구조에 발광층과 정공 주입층으로 P3HT 고분자와 PEDOT-PSS 고분자를 도입함으로써 간단히 발광 특성과 트랜지스터의 스위칭 기능을 동시에 할 수 있는 발광트랜지스터의 제작이 가능한 것을 알 수 있었다.

Figure 5는 세로형 발광트랜지스터의 발광효율 특성을 나타내었다. 세로형 OTFT에서 n형 유기 활성층의 두께가 2000 Å일 때 최고의 on/off 특성을 나타내었지만 발광트랜지스터의 경우 정공 주입층과 고분자 발광물질의 적층에 따라 전체적인 디바이스의 두께가 증가하면서 디바이스의 전류-전압 특성이 나빠지게 된다. 따라서 고분자 정공 주입층의 두께 500 Å, P3HT의 두께 1000 Å과 n형 활성물질인 F16CuPc의 두께가 1000 Å일 때 20 V에서 0.054의 가장 높은 효율을 나타내었다. 또한 게이트 전압의 증가에 따라 발광트랜지스터의 효율은 감소하였고, 게이트 전압이 20 V일 때 디바이스의 효율이 거의 0에 가까워지면서 스위칭 특

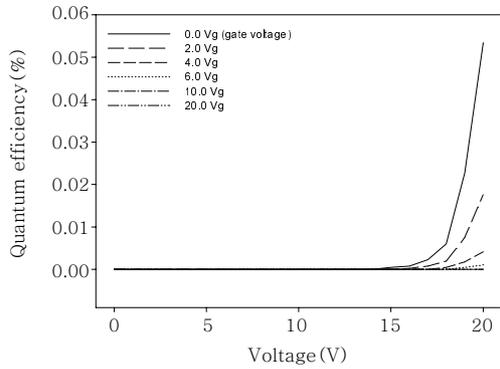


Figure 5. External quantum efficiency of light emitting transistor consisting of ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al.

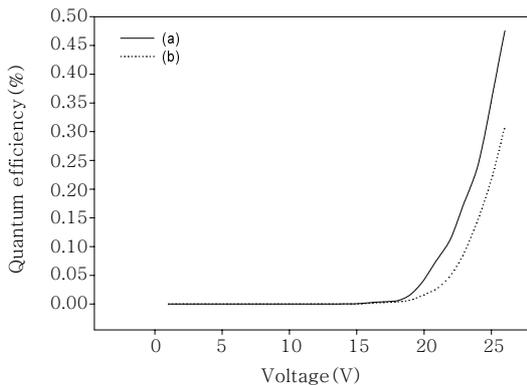


Figure 6. Quantum efficiency of P3HT light emitting diode (a) with electron transfer layer of F16CuPc and (b) without electron transfer layer.

성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 발광트랜지스터에서 P3HT 고분자는 정공전달 특성이 좋은 물질로 알려져 있다. F16CuPc 물질은 전자의 전달 특성이 좋은 물질로 발광트랜지스터에서 캐리어의 균형을 향상시키는 역할을 하면서 발광 특성의 스위칭 기능을 나타내는 역할을 하는 것으로 생각된다. 이러한 결과를 간접적으로 검토하기 위해 P3HT로 구성되는 발광 다이오드(ITO/PEDOT-PSS/P3HT/Al)에서 F16CuPc 층을 P3HT 층 위에 500 Å로 적층한 경우와 그렇지 않은 디바이스를 제작하였다. 이 결과를 Figure 6에 나타내었다. F16CuPc 유기물 층을 500 Å로 적층한 발광 다이오드는 P3HT로 구성된 단독 디바이스에 비해 두께가 증가하였음에도 불구하고 구동전압이 낮아졌으며 20 V에서의 발광 효율도 높은 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 P3HT의 발광층은 정공 이동 특성이 뛰어나 P3HT의 단독 디바이스에서는 캐리어 균형이 떨어지지만 전자 전달 특성이 좋은 F16CuPc 층이 도입되면 캐리어 균형이 향상되기 때문이라고 사료된다. 따라서 ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al로 구성되는 발광트랜지스터에서 구동전압이 15 V로 비교적 두꺼운 층으로 구성되는 디바이스의 구성에서도 낮은 구동전압을 나타내는 것으로 사료된다. 결과적으로 ITO/PEDOT-PSS/P3HT/F16CuPc/Al gate/F16CuPc/Al로 구성되는 발광트랜지스터

에서 F16CuPc 층은 디바이스의 스위칭 기능뿐만 아니라 발광디바이스에서 캐리어 균형을 개선시키는 역할도 하는 것을 간접적으로 알 수 있었다.

결론

다양한 n형 유기 반도체 물질을 이용한 세로형 유기 박막트랜지스터의 특성을 비교분석하였고, 이것을 통하여 최적화된 세로형 유기 박막트랜지스터에 고분자 정공 주입 물질과 고분자 발광물질을 도입하여 유기 발광트랜지스터를 제작하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) ITO/n형 유기 활성층/Al gate/n형 유기 활성층/Al로 구성되는 세로형 트랜지스터의 제작이 가능하였다. 세로형 OTFT의 on/off 특성은 n형 유기 활성층의 캐리어 이동도와 두께에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다.
- 2) PTCDI C-8을 n형 유기 활성층으로 사용한 세로형 트랜지스터의 on/off 값은 96으로 최고값을 나타내었고, 트랜지스터의 구동전압도 매우 낮은 값을 보였다.
- 3) 세로형 OTFT의 구조에 발광층과 정공 주입층을 도입함으로써 간단히 발광 특성과 트랜지스터의 기능을 동시에 할 수 있는 발광트랜지스터의 제작이 가능하였다. 발광트랜지스터에서 n형 유기 활성층으로 사용한 F16CuPc 층은 스위칭 기능과 다이오드의 캐리어 균형을 향상시키는 역할을 하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 유기 발광트랜지스터에서 PEDOT-PSS 층 500 Å, P3HT 층 1000 Å과 n형 유기 활성층 F16CuPc 1000 Å 일 때 20 V에서 0.054의 높은 발광효율을 나타내었고, 게이트 전압이 20 V에서 발광 특성이 사라지면서 스위칭 특성을 나타내었다.

감사의 글 : 본 연구는 정보통신부(04-Basic Research-047)와 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10196-0)로부터 지원받은 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Y. Taur and T. H. Ning, *Fundamentals of Modern VLSI Devices*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
2. R. Wisnieff, *Nature*, **394**, 225 (1998).
3. B. Comisky, J. D. Albert, H. Yoshizawa, and J. Jacobson, *Nature*, **394**, 253 (1998).
4. C. W. Tang and S. A. Van Slyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
5. K. Kudo, M. Yamashina, and T. Moriizumi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, 130 (1984).
6. T. Siegrist, C. Kloc, J. H. Schon, B. Batlogg, R. C. Haddon, S. Berg, and G. A. Thomas, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **40**, 1732 (2001).
7. S. R. Forrest, *Nature*, **428**, 911 (2004).
8. J. H. Burroughes, D. D. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P.L. Burn, and A. B.

- Holmes, *Nature*, **347**, 539 (1990).
9. F. Ebisawa, T. Kurokawa, and S. Nara, *J. Appl. Phys.*, **54**, 3255 (1983).
 10. A. Tsumura, H. Koezuka, and T. Ando, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 1210 (1986).
 11. G. Parthasarathy, P. E. Burrows, V. Khalfin, V. G. Kozlov, and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2138 (1998).
 12. J. Nishizawa, T. Terasaki, and J. Shibata, *IEEE Trans. Electron Devices ED-22*, 185 (1975).
 13. K. Kudo, M. Iizuka, S. Kuniyoshi, and K. Tanaka, *Synth. Metals*, **11**, 111 (2000).
 14. Y. Yang and A. J. Heeger, *Nature*, **374**, 344 (1994).