Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 22, No. 2, p. 107, February 2009.

논 문 22-2-2

P3HT/POSS 합성 활성층을 이용한 OTFT 소자의 대기안정성 향상

Improved Air Stability of OTFT's with a P3HT/POSS Active Layer

박정환[1], 한교용[2,a]
(Jeong-Hwan Park[1] and Kyo-Yong Han[2,a])

Abstract

In order to improve air stability, we proposed a new active layer of an organic TFT by synthesizing P3HT/POSS conjugated polymer. P3HT/POSS OTFTs with the various P3HT/POSS volume ratios were fabricated and characterized. With the P3HT/POSS volume ratio of 1:1, we achieved the field-effect mobilities of $\sim 1.19\times10^{-3}$ $cm^2/v \cdot sec$ in the saturation region and the current on/off ratio of $\sim 2.51\times10^2$. The resulting current on-off ratio was much higher than that of the P3HT-based OTFTs and resulted from the dramatic decrease of the off-current. Since the off-current can be reduced by preventing oxygen in atmosphere from doping the P3HT/POSS active layers, this new active layer shows its ability to avoid oxygen doping in atmosphere. Therefore, the improvement of the air stability can be achieved by employing the P3HT/POSS active layers.

Key Words : P3HT, Poly(3-hexylthiophene), POSS, Polyhedral oligomeric silsesquioxane, OTFT, Air stability

1. 서 론

전도성 유기 반도체는 1977년에 분자구조가 단순한 공액성 유기 고분자인 폴리 아세틸렌에 적절한 도핑을 통해 전기 전도도가 거의 구리에 가깝게 도달될 수 있다는 것이 알려진 후 부터[1], 최근 10 여년간 반도체 성질을 갖는 유기 소재의 개발과 이를 이용한 다양한 응용 연구 또한 어느 때보다 활발히 진행되어 왔다. 유기 전자소자의 특성은 재료합성 방법의 다양함[2], 섬유나 필름 형태로 성형이 용이함[3], 경량성, 유연성, 전도성, 저렴한 생산비, 높은 생산성을 들 수 있고, 또한 무기물과 같이 벌크 성질을 이용 할 수 있을 뿐만 아니라, 분자 자체가 전도성을 가지므로 초박막의 형태에서도 그 전도성이 유지되어 새로운 초박막 전도성 소자 및 광소자의 개발이 가능하다. 따라서 그 응용 분야는 OLED 디스플레이, 태양 전지[4], 유기 EL (Electro Luminescence)[5], 광 검출기[6], 센서[7], 박막트랜지스터[8], 레이저[9] 등 미래의 전자 산업에서 무궁무진 하다.

현재 OTFT의 연구 분야는 크게 재료 분야와 공정 분야로 나눌 수 있다. 재료 분야에서는 새로운 고분자 물질의 개발, 높은 유전율 (dielectric constant)을 가지는 절연체 연구[10], 그리고 C-V 이력현상 (hysteresis)을 줄이기 위한 반도체와 절연체간의 계면 효과를 증진시키기 위한 자가 조립 단분자막 (Self-Assembled Monolayer) SAM의 연구[11] 등이 활발히 진행되고 있고, 공정 분야에서는 유기반도체와 소스와 드레인 전극 사이의 저항성 접촉 (Ohmic contact) 구현[12], 소자의 구조 개발, 유기 반도체 활성 층의 패터닝 기술[13], 유기물의 다양한 증착방법 등에 대한 연구가 이루어지고 있다.

유기박막 트랜지스터에 응용되는 대표적인 유기

1. 매그나칩 PSD사업부 파워솔루션 디비젼
(충북 청주시 흥덕구 향정동 1)
2. 영남대학교 전자정보공학부
a. Corresponding Author : kyhan@yumail.ac.kr
접수일자 : 2008. 5. 9
1차 심사 : 2008. 10. 2
심사완료 : 2008. 12. 29

반도체로는 공액 고분자와 공액 저분자를 들 수 있는데, 기존의 무기박막 트랜지스터와 같이 유기박막 트랜지스터 역시 P-type과 N-type으로 구분된다. 최근 많이 응용되는 대표적인 P-type 유기반도체인 펜타센의 경우 전계효과 이동도(field effect mobility)가 2.4 $cm^2/V \cdot s$, 점멸비(on/off ratio)가 10^8 이상의 특성을 가지는 유기박막 트랜지스터 소자가 보고되고 있으며, 이는 기존의 hydrogenated amorphous Si(a-Si:H)보다도 우수한 성능이다. 그러나 펜타센은 그 우수한 특성에도 불구하고 고가의 진공증착장비가 요구되고 미세패턴 형성에 어려움이 있기 때문에 기존의 비정질 실리콘을 응용한 디스플레이에 비해 가격적인 면이나 대면적화에 있어서 불리하다. 이에 반해 반도체 특성을 가지는 대표적인 P-type 고분자인 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)는 톨루엔(Toluene), 클로로벤젠(Chlorobenzene), 테트라클로로에틸렌(Tetrachlorothylene), 테트라클로로에탄(Tetrachloroethane), 클로로포름($CHCl_3$) 등과 같은 유기용매에 쉽게 녹는 특성이 있어서 스핀 코팅이나 잉크젯 프린팅 등의 저렴한 공정으로 소자제작이 가능하다. 이러한 공정을 응용할 경우 미세패턴 형성 공정이 뒷받침 해준다면 저가격, 대면적 디스플레이 제작에 있어서 매우 유리한 점을 가지고 있다. 그리고 상온에서 모든 공정이 이루어지기 때문에 유기물 기판을 이용한 유연성이 있는 소자 및 패널 제작에도 쉽게 적용할 수 있다. 그러나 이미 많이 알려져 있듯이, P3HT는 일반대기 노출 시 산소(O_2)와 수분(H_2O)에 의한 과다 도핑으로 인해 P3HT박막의 conductivity가 높아지고, 이로 인해 벌크 전류가 나타나게 되어 유기 트랜지스터의 전류 점멸비(on/off ratio)의 특성이 감소된다. 그러므로 P3HT를 유기 반도체 층으로 사용한 소자의 제작은 N_2 분위기에서 이루어지거나 열적 어닐링(thermal annealing)의 추가 공정을 통해 P3HT 박막 내에 과다 도핑성분[14]을 제거해야만 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)와 Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS)를 혼합한 합성 고분자를 유기 활성 층으로 사용하여, P3HT를 사용한 유기박막 트랜지스터의 이동도를 향상시키는 것과 동시에 일반 대기 노출 시에 발생하는 성능 감소를 제거할 수 있다는 가설을 처음으로 제시하고, 그 가능성을 증명하였다. 본 가설은 POSS가 작용기와 비 작용기를 동시에 가지는 하이브리드 물질이기 때문에 성립한다. 왜냐하면 POSS 물질의 비 작용기 그룹이 SiO_2 표면의 실라놀기(Si-OH)와의 결합으로 인한 P3HT의 자가 정렬 향상[15] 에 의한 이동도의 증가가 예상되고, P3HT의 헥실 그룹이 POSS의 작용기와 결합하여 공기 중의 산소와 결합할 헥실기의 수를 감소시켜, 그 결과 산소의 도핑이 억제되고, 대기 안정성(Air stability) 을 향상시킬 수 있기 때문이다. 이를 증명하기 위해 P3HT와 P3HT/POSS OTFT를 다양한 방법으로 제작하고, 그 특성을 측정하여 가설을 검증하였다.

2. 실 험

2.1 P3HT/POSS 활성 층 합성

P3HT는 폴리사이오펜에 속하며 톨루엔 (Toluene), 모노클로로벤젠(Monochlorobenzene), 클로로포름(Chloroform), 자일렌 (Xylene), 테트라클로로에틸렌(Tetrachloroethylene) 등 다양한 용액에 쉽게 용해 공정 (solution process)이 가능하며, 스핀코팅으로 의해 잘 증착되는 성질을 가지고 있으며, 저렴한 가격으로 유연한 기판에 잘 응용될 수 있는 유기 반도체이다. 그 구조는 3-알킬 치환기(3-alkyl substituent)의 중합체 사슬이 머리와 꼬리가 마주보고 있는 형태 (Head to Tail) (HT)와 머리와 머리가 마주 보고 있는 (Head to Head) (HH) 두 가지의 형태가 있으며, 이것은 서로 다른 방향성을 가진다. 그림 1은 P3HT의 화학적 구조를 나타낸 그림이다.

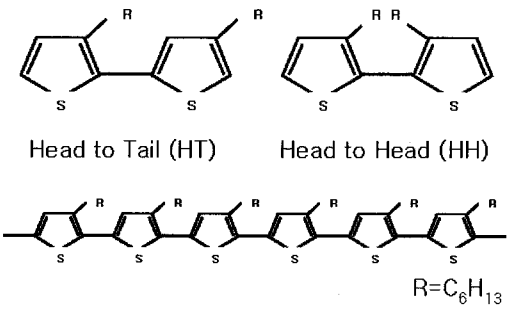


그림 1. P3HT의 화학적 구조.
Fig. 1. Chemical structure of P3HT.

이 중합체의 사슬의 결합이 무규칙적인 것(regio-random)은 규칙적인 것(regio-regular)에 비

해 전기전도도와 물질의 결정 구조가 좋지 않아 낮은 전하 이동도를 야기한다. 따라서 본 논문에서는 머리와 꼬리가 마주보고 있으며, 이것이 규칙적으로 배열되어 있는 Regio-regular HT P3HT를 사용하였다.

Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane은 실리콘(Si)과 산소(O)의 결합이 기본 골격 구조로 되어있고, 작용기(reactive functional group)와 비 작용기(non-reactive functional group)을 동시에 가지는 하이브리드(hybrid) 물질이다. 이 물질은 작용기와 비 작용기의 구조에 따라 전혀 다른 특성을 나타내게 된다. 본 실험에 사용한 POSS는 투명하고 점성이 높은 액체 상태로 되어있으며, 클로로포름(Chloroform)에 쉽게 용해 공정(solution process)이 가능한 물질이다. 그 화학적 구조는 그림 2와 같이 실리콘과 산소의 결합으로 된 기본골격 구조를 가지고 있으며 작용기로는 -C8H17을 비 작용기로는 -OH기를 가지고 있는 구조의 POSS 물질을 사용하였다.

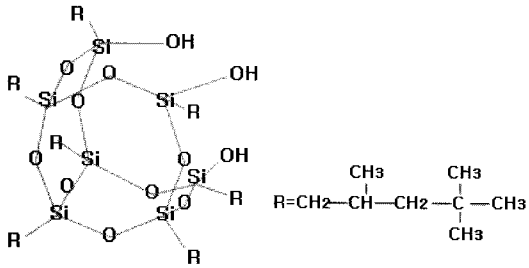


그림 2. POSS의 화학적 구조.
Fig. 2. Chemical structure of POSS.

POSS 물질은 투명한 색의 점성이 높은 액체 상태로 되어있으며, P3HT와 합성하기 위해서는 용해공정이 필요하다. 이를 위해 POSS의 용매로서 P3HT의 용매와 같은 무수의 클로로포름($CHCl_3$, Aldrich, anhydrous > 99 %)을 정제 없이 사용하여, 이를 무게 백분율 (0.134 wt%)로 용해하였다. 이 용액을 클로로포름에 용해된 P3HT 같은 비율(0.134 wt%)로 용해된 용액에 각각 다른 부피 비(3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3)로 합성하였다.

2.2 P3HT와 P3HT/POSS를 활성 층으로 사용한 OTFT 제작

본 연구에서 사용된 하부 전극 구조 (Bottom Contact) (BC)의 OTFT[16]는 그림 3과 같다. 이 소자의 제작 순서는 높은 농도의 붕소 (Boron)로 도핑 된 p-type 실리콘 (resistivity: 0.012 - 0.2 Ωcm)에 1000 Å의 SiO_2가 건식산화 (dry oxidation)로 성장된 기판을 구입하여, 기판 뒷면을 BOE (HF : NH_4F= 1 : 7)로 90 초 동안 식각하고 난 후, 공통 게이트 전극 (common gate electrode)으로 알루미늄 (Al) 1500 Å을 진공 증착 시킨다. 그리고 450 ℃에서 30 분 동안 열처리(annealing(를 하여 게이트 전극을 형성 하였다. 소스와 드레인의 전극을 형성하기 위해 lift-off 방법으로 750 Å의 금 (Au)을 진공 증착기를 사용하여 5×10^{-6} Torr의 진공 상태에서 평균 3~4 Å/s 의 속도로 증착 시켰다.

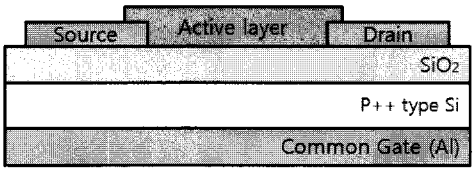


그림 3. 제작된 하부전극구조를 갖는 OTFT의 단면구조.
Fig. 3. Schematic diagram of an OTFT with Bottom Contact (BC) configuration.

용해 공정 (solution process)을 위한 P3HT 용매로서 무수의 클로로포름 ($CHCl_3$, Aldrich, anhydrous > 99 %)을 정제 없이 사용하여, P3HT를 무게백분율 0.134 wt%로 용해하고, P3HT와 P3HT/POSS는 유공도가 0.2 um 인 PTFE 시린지 필터를 사용하여 잔존입자를 제거하였고, 스핀코터를 사용하여 2000 rpm에 60초로 P3HT와 P3HT/POSS 활성층 박막을 형성하였다. P3HT/POSS 박막의 용매를 제거하기 위해 90 ℃에서 5분간 오븐에서 베이킹을 하였고, 산소 또는 수분에 의한 P-doping 효과를 제거하기 위한 열처리는 하지 않았다.

모든 활성 층 박막은 포토리소그래피 방법을 사용하여 채널 이외의 부분을 선택적 식각하였다. 양성 감광제 (AZ 1512)를 활성 층 박막 위에 스핀코팅으로 도포하고, 양성감광제가 도포된 유기 활성층을 패터닝 하기 위해, 소프트 베이크, 노광, 현상 순서대로 공정을 진행하고, 마지막으로 클로로포름을 이용하여 채널을 제외한 나머지 부분의 유기 활성 층을 식각하였다.

2.3 제작된 OTFT의 성능 측정

본 연구에서 사용된 P3HT와 P3HT/POSS는 다수 캐리어 (major carrier)가 정공 (hole)인 p형 반도체이며, P3HT-OTFT 소자는 축적 영역 (accumulation region)에서 동작한다. 이 소자의 전기적 특성을 확인하기 위해 전달 특성 (transfer characteristic)과 출력 특성 (output characteristic)을 측정하였고, 포화영역 (saturation regime)에서의 전계효과 이동도 (μ_{fet})는 다음의 수식을 이용하여 얻었다[15].

$$I_{DS} = \frac{W\mu_{fet}C_{ox}}{2L}(V_{GS} - V_{th})^2$$

이 수식에서 μ_{fet}는 전계효과 이동도, C_{ox}는 절연체의 단위 면적당 커패시턴스, V_{th}는 문턱전압, W와 L은 각 각 채널의 넓이와 길이, I_{DS}와 V_{GS}는 드레인 전류와 게이트 전압을 나타낸다. 전류점멸비 ($I_{on/off}$ ratio)는 도통 상태 (on-state)에서의 최대 전류 값에 대한 차단 상태 (off-state)에서의 최소 전류 값에 대한 비율로 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 P3HT를 활성 층으로 사용한 OTFT 특성

그림 4는 공통 게이트 전극을 가지는 하부 전극 구조의 유기 박막트랜지스터의 출력 특성 (Output characteristic)을 나타내는 그래프이다. 출력 특성은 다양한 게이트 전압 (V_{GS})에 따른 드레인 전압 (V_{DS})에 대한 드레인 전류 (I_{DS})의 그래프 나타낸다. 그림 4에서 소스와 드레인의 전위차가 없을 때 (V_{DS} = 0), 게이트 절연 층 (SiO_2)을 통한 누설전류 (leakage current)인 오프셋 드레인 전류 (I_{DS} offset) 나타낸다. 이 전류는 공통 게이트 전극을 가지는 OTFT에서 일반적으로 나타나는 현상으로 본 연구에서도 발견 되었으며, 그 정의는 소스와 드레인에 전압이 인가되지 않았을 때 (V_{DS} = 0) 다양한 게이트 전압(V_{GS})에 따른 드레인 전류 (I_{DS})의 값이다. 이 값은 게이트 전압이 커질수록 증가하는 현상을 보인다. 따라서 이 누설전류는 차단 상태에서의 전류 값을 높이게 되고, 결과적으로 낮은 전류 점멸비($I_{on/off}$ ratio)를 가져오게 된다. 이러한 결과의 원인은 P3HT 박막의 용해공정 및 스핀코팅 공정 시 일반대기중의 산소와 수분에 의한 P3HT 박막에 추가적인 도핑으로 인해 나타난 것이다. 전통적인 공정 시 이러한 도핑효과는 질소 (N_2) 대기 상태에서 열적 어닐링(약 120 ℃) 공정을 통한 디도핑(de-doping) 공정 시 대부분 사라지게 된다.

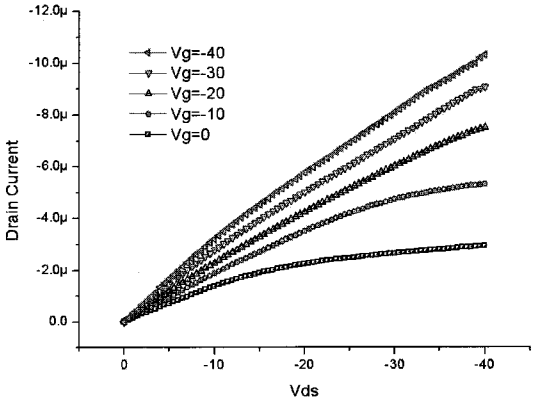


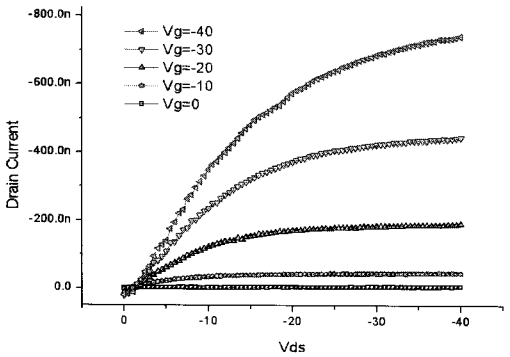
그림 4. 제작된 P3HT based OTFT의 I-V 출력 특성 곡선.
(채널길이 : 15 um, 넓이: 1 mm)

Fig. 4. I-V output characteristics of the P3HT based OTFT.
(Channel Length : 15 um, Width : 1 mm)

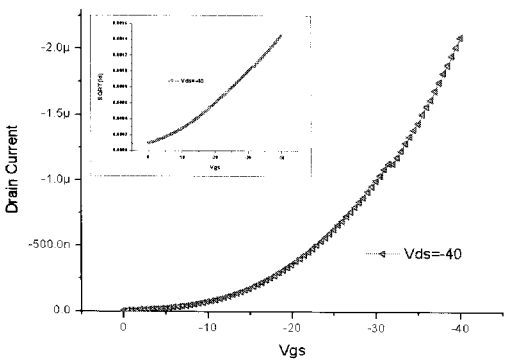
3.2 P3HT/POSS 활성 층으로 사용한 OTFT 특성

일반적으로 공액성 고분자인 P3HT는 빛 (UV)과 수분 (moisture)[17,18], 그리고 산소 (O_2)[19]에 민감한 특성을 가지고 있다. 빛은 P3HT의 conjugation system을 파괴하여 P3HT 본연의 성질을 잃게 만들며, O_2와 수분은 차단전류상태 (off-state)에서 P3HT박막의 전도성 (conductivity)을 증가시키는 효과 (P3HT의 도핑효과)를 나타내어, 그것의 과도한 노출은 P3HT의 성능을 저하시킨다[20]. 따라서 본 실험에서는 P3HT에 POSS를 합성하여 P3HT박막의 전도성(conductivity)를 증가시키는 것을 억제 시키게 된다. 이는 공액성 고분자인 P3HT의 용해 공정 시 O_2와 수분이 결합되는 P3HT의 헥실기에 POSS의 작용기를 먼저 결합을 시켜 O_2와 수분과 결합할 헥실기의 수를 줄임으로서 전도성을 증가시키는 도핑을 억제시키게 된다. 그림 5는 P3HT에 POSS를 각 각 0.134 wt%로 용해 후 부피 비 1:1로 합성시킨 P3HT/POSS 물질을 스핀코팅 공정으로 박막을 만든 후 리소그

래피 공정을 통한 선택적 식각 방법으로 만든 공통 게이트 전극을 가지는 하부 전극 구조의 유기박막 트랜지스터의 출력 특성 (Output characteristic)과 전달특성 (Transfer characteristic)을 나타내는 그래프이다. 대기 중에서 제작되고, 열적 어닐링 공정을 수행하지 않았음에도 불구하고, 매우 낮은 오프상태의 드레인 누설 전류특성을 나타내고, 그 결과 전류 점멸비 값은 P3HT-OTFT에 비해 약 200배 정도 높은 2.51×10^{2} 의 값을 얻을 수 있었다. 이동도는 1.19×10^{-3} $cm^2/V\cdot s$ 로 열적 어닐링을 수행한 P3HT OTFT와 큰 차이를 보이지 않았다.



(a)



(b)

그림 5. 제작된 P3HT/POSS OTFT의 (a) 출력특성 (b) 전달특성. (채널길이 : 15 um, 넓이 : 1 mm, V_{th}=-6.54 V, u_{fet}=1.19×10^{-3} $cm^2/V\cdot s$, $I_{on/off}$ ratio : 2.51×10^{2})

Fig. 5. (a) Output characteristic and (b) transfer characteristic of the P3HT/POSS OTFT. (Channel Length : 15 um, Width : 1 mm, V_{th}=-6.54 V, u_{fet}=1.19×10^{-3} $cm^2/V\cdot s$, $I_{on/off}$ ratio : 2.51×10^{2})

3.3 P3HT와 POSS의 부피 비에 따른 OTFT 특성

그림 6은 P3HT/POSS 합성 물질을 각 각 다른 부피비로 합성한 것을 유기 활성 층으로 사용한 유기박막 트랜지스터의 부피 비율에 따른 전계효과 이동도와 전류 점멸비를 그래프로 나타낸 것이다. 유기 활성 층의 합성 비율은 P3HT대 POSS의 부피비로 각각 2대1, 3대1 그리고 1대3으로 합성하여 측정하였다. 그 결과, 부피 비를 1대 1로 합성했을 때 가장 좋은 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다.

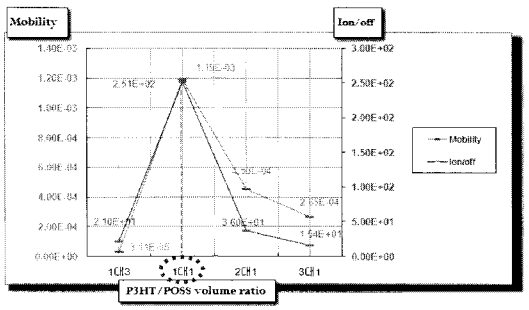


그림 6. P3HT와 POSS의 부피비에 따른 이동도와 전류점멸비의 변화.

Fig. 6. Mobility and $I_{on/off}$ ratio variations with different P3HT/POSS volume ratios.

4. 결 론

P3HT OTFT의 이동도를 증가시키고, 대기 안정성을 향상시켜, 대기 중 제작 공정 및 패시베이션을 보다 쉽게 할 수 있게 하기 위해, P3HT와 POSS의 합성물질을 활성 층으로 이용하는 방법을 처음으로 제안하였다. 그 이유는 POSS 물질의 비작용기 그룹이 SiO_2 표면의 실라놀기(Si-OH)와의 결합으로 인한 P3HT의 자가 정렬 향상에 의한 이동도의 증가, 그리고 P3HT의 헥실 그룹이 POSS의 작용기와 결합하여 공기 중의 산소와 결합할 헥실기 수의 감소 때문이다. 이를 증명하기 위해 P3HT OTFT와 P3HT/POSS OTFT를 제작하여 비교하였다. 그 결과 P3HT/POSS OTFT의 경우, 그 부피비가 1대 1일 때 가장 높은 전계효과 이동도와 전류 점멸비의 값을 나타내었고, 이때 전류 점멸비 값은 2.51×10^{2} 로 P3HT-OTFT에 비해 약 200배 정도의 향상을 보였다. 따라서 본 논문에서

는 대기 안정성을 갖는 유기박막 트랜지스터를 제안하고, 그 가능성을 성공적으로 증명하였다. 그러나 이동도의 경우, P3HT/POSS OTFT의 이동도는 $1.19x10^{-3}$ $cm^2/V \cdot s$ 로 측정되어, 열적 어닐링을 수행한 P3HT OTFT와 큰 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 POSS의 비 작용기인 (-OH)기와 절연 층 표면경계의 실라놀기(Si-OH)의 결합을 통한 P3HT의 내부 정렬이 스핀코팅으로 인하여 향상되지 못했기 때문이라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 포항나노기술집적센터 (National Center for Nanomaterials Technology)와 영남대학교의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] C. K. chiang, C. R. Fincher, Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau, and A. G. MacDiarmid, "Electrical conductivity in doped polyacetylene", Phys. Rev. Lett., Vol. 39, p. 1098, 1977.

[2] Mohamed S. A. Abdou, X. Lu, Zi W. Xie, F. Orfino, M. Jamal Deen, and S. Holdcroft, "Nature of impurities in π-conjugated polymers prepared by ferric chloride and their effect on the electrical properties of metal-insulator-semiconductor structures", Chem. Mater., Vol. 7, p. 631, 1995.

[3] C. P. Jarrett, A. R. Brown, R. H. Friend, M. G. Harrison, D. M. de Leeuw, P. Herwig, and K. Müllen, "Field-effect transistor studies of precursor-pentacene thin films", Synthetic Metals, Vol. 85, Issues 1-3, p. 1403, 1997.

[4] J. H. Schön, Ch. Kloc, E. Bucher, and B. Batlogg, "Single crystalline pentacene solar cells", Synthetic Metals, Vol. 115, Issues 1-3, p. 177, 2000.

[5] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes", Appl. Phys. Letts., Vol. 51, Issue 12, p. 913, 1987.

[6] P. Peumans, V. Bulovi, and S. R. Forrest, "Efficient, high-bandwidth organic multilayer photodetectors", Appl. Phys. Letts., Vol. 76, Issue 26, p. 3855, 2000.

[7] L. Torsi, A. Dodabalapur, N. Cioffi, L. Sabbatini, and P. G. Zambonin, "NTCDA organic thin-film-transistor as humidity sensor: weaknesses and strengths", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 77, Issues 1-2, p. 7, 2001.

[8] A. Tsumura, H. Koezuka, and T. Ando, "Macromolecular electronic device: Field-effect transistor with a polythiophene thin film", Appl. Phys. Letts., Vol. 49, Issue 18, p. 1210, 1986.

[9] N. Tessler, "Lasers based on semiconducting organic materials", Advanced Materials, Vol. 11, Issue 5, p. 363, 1999.

[10] R. Schroeder, L. A. Majewski, and M. Grell, "High-performance organic transistors using solution-processed nanoparticle-filled High-k polymer gate insulators", Advanced Materials, Vol. 17, Issue 12, p. 1535, 2005.

[11] R. J. Willicut and R. L. McCarley, "Electrochemically polymerizable self-assembled monolayers", Advanced Materials, Vol. 7, Issue 8, p. 759, 1995.

[12] 박경동, 남동헌, 박정환, 한교용, "포토리소그래피를 이용한 P3HT 활성층의 패터닝에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 20권, 4호, p. 294, 2007.

[13] S. Y. Kim, J. M. Baik, H. K. Yu, and J.-L. Lee, "Highly efficient organic light-emitting diodes with hole injection layer of transition metal oxides", J. Appl. Phys., Vol. 98, p. 093707, 2005.

[14] M. J. Joung, C. A. Kim, S. Y. Kang, K.-H. Baek, G. H. Kim, S. D. Ahn, I. K. You, J. H. Ahn, and K. S. Suh, "The application of soluble and regoiregular poly(3-hexylthiphene) for organic thin-film transistors", Synthetic Metals, Vol. 149, p. 73, 2005.

[15] S. Scheinert and G. Paasch, "Fabrication and analysis of polymer field-effect transistors", Phys. Stat. Sol. (a), Vol. 201, Issue. 6, p. 1263, 2004.

[16] C. R. Kagan and P. Andry, "Thin-Film Transistors", Marcel Dekker Inc., Chapter 6, 2003.

[17] Y. Qiu, Y. Hu, G. Dong, L. Wang, J. Xie, and Y. Ma, "H_2O effect on the stability of organic thin-film field-effect transistors", Appl. Phys. Lett., Vol. 83, Issue. 8, p. 1644, 2003.

[18] S. Hoshino, M. Yoshida, S. Uemura, T. Kodzasa, N. Takada, T. Kamata, and K. Yase, "Influence of moisture on device characteristics of polythiophene-based field-effect transistors", J. Appl. Phys., Vol. 95, p. 5088, 2004.

[19] M. S. A. Abdou, F. P. Orfino, Y. Son, and S. Holdcroft, "Interaction of oxygen with conjugated polymers: Charge transfer complex formation with poly(3-alkylthiophenes)", J. Am. Chem. Soc. Vol. 119, Issue 19, p. 4518, 1997.

[20] L. A. Majewski, J. W. Kingsley, C. Balocco, and A. M. Song, "Influence of processing conditions on the stability of poly(3-hexylthiophene)-based field-effect transistors", Appl. Phys. Lett., Vol. 88, p. 222108, 2006.