

유기전계효과 트랜지스터의 반도체/고분자절연체 계면에 발생하는 비가역적 전하트래핑에 관한 연구

임재민 · 최현호[†]

경상대학교 나노신소재융합공학과
(2020년 08월 27일 접수, 2020년 09월 16일 수정, 2020년 09월 21일 채택)

Irreversible Charge Trapping at the Semiconductor/Polymer Interface of Organic Field-Effect Transistors

Jaemin Im, and Hyun Ho Choi[†]

Department of Materials Engineering and Convergence Technology,
Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received August 27, 2020, Revised September 16, 2020; Accepted September 21, 2020)

요약: 공액분자반도체와 고분자절연체 계면에서 전하트래핑을 이해하는 것은 장시간 구동가능한 안정성 높은 유기전계효과 트랜지스터(이하 유기트랜지스터) 개발을 위해 중요하다. 본 연구에서는 다양한 분자량의 고분자절연체를 이용한 유기트랜지스터의 전하이동 특성을 평가하였다. Polymethyl methacrylate (PMMA) 표면 위에 적층된 펜타센 공액반도체의 모폴로지와 결정성은 PMMA 분자량에 무관함이 나타났다. 그 결과 트랜지스터 소자의 초기 트랜스퍼 곡선과 전하이동도는 분자량에 상관없었다. 하지만, 적정한 상대습도 환경에서 소자에 바이어스가 인가되었을 경우, 바이어스 스트레스 효과로 불리는 드레인전류 감소와 트랜스퍼 곡선 이동은 PMMA 분자량이 감소할수록 증대됨이 관찰되었다(분자량 효과). 분자량 효과에 의한 전하트래핑은 회복이 매우 어려운 비가역적인 과정임을 밝혀내었다. 이러한 분자량 효과는 PMMA 존재하는 고분자사슬 말단의 밀도 변화에 의한 것으로 판단된다. 즉, PMMA 고분자사슬 말단이 가지는 자유부피가 전하트랩으로 작용하여 분자량에 민감한 바이어스 스트레스 효과를 일으킨 것으로 판단된다.

Abstract: Understanding charge trapping at the interface between conjugated semiconductor and polymer dielectric basically gives insight into the development of long-term stable organic field-effect transistors (OFET). Here, the charge transport properties of OFETs using polymer dielectric with various molecular weights (MWs) have been investigated. The conjugated semiconductor, pentacene exhibited morphology and crystallinity, insensitive to MWs of polymethyl methacrylate (PMMA) dielectric. Consequently, transfer curves and field-effect mobilities of as-prepared devices are independent of MWs. Under bias stress in humid environment, however, the drain current decay as well as transfer curve shift are found to increase as the MW of PMMA decreases (MW effect). The charge trapping induced by MW effect is irreversible, that is, the localized charges are difficult to be delocalized. The MW effect is caused by the variation in the density of polymer chain ends in the PMMA: the free volumes at the PMMA chain ends act as charge trap sites, corresponding to drain current decay depending on MWs of PMMA.

Keywords: organic field-effect transistor, bias-stress stability, charge trapping, molecular weight

[†] Corresponding author: Hyun Ho Choi (hh.choi@gnu.ac.kr)

1. Introduction

플렉서블 디스플레이(flexible display), 웨어러블 디바이스(wearable device) 분야에서 유기 전계효과 트랜지스터(Organic Field-Effect Transistor, 이하 유기트랜지스터)는 디스플레이 소자를 제어하는 스위칭 기능을 수행하면서 용액 공정을 통해 휘어질 수 있는 플라스틱 기판에 제작할 수 있는 가장 적합한 소자 중 하나로 평가받고 있다. 또한, 유기반도체 분자구조 설계 및 합성 다양성에 기반한 다양한 트랜지스터기반 센서소자의 응용도 주목받고 있다.

유기트랜지스터의 상용화를 위해서는 충분한 전하이동도(field-effect mobility) 확보가 요구되고, 지난 15년간 유기트랜지스터 전하이동도는 급격한 향상을 통해 $0.1 \sim 10 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 수준을 이루어 다양한 어플리케이션의 가능성을 확보하였다[1]. 하지만 아쉽게도 소자안정성은 전하이동도 향상에 비해 개선이 요구된다. 특히, 소자의 전기적 구동을 위해 전극을 통해 바이어스가 인가되면, 소자는 지속적으로 바이어스에 의한 스트레스를 받고, 이는 전기적 특성 변화로 이어지는 현상을 초래한다. 이 현상을 바이어스 스트레스 효과(bias-stress effect)라 한다[2-4]. 이러한 현상은 유기반도체/절연체 계면에서 전하이동과 전하트래핑에 의한 것으로 계면에서 전하트랩을 일으키는 물리/화학적 원인을 규명하는 것이 매우 중요해지고 있다.

유기트랜지스터가 유연소자로 구현되기 위해서는 유연절연체 이용이 필수이고, 고분자절연체가 가장 적절한 대안으로 제시되고 있다. 유기반도체/고분자절연체에 대해 다양한 소재 조합으로 연구가 진행되었으나 재료의 다양한 조합으로 연구가 주로 이루어졌을 뿐, 고분자절연체의 물리적 물성이 계면 전하이동 특성에 미치는 영향은 활발하게 이루어지지 못하였다. 하지만, 고분자물성이 소자 특성에 큰 영향을 미칠 수 있는 가능성이 예전부터 보고되어 왔다. Facchetti, Marks 공동연구팀은 고분자의 viscoelasticity가 유기반도체 성장과 전하이동도에 매우 큰 영향을 미침을 보고하였다[5]. Liu 연구팀은 고분자 표면에너지 분포 균일도도 또한 소자 전하이동도를 결정짓는 중요한 요소로 보고하였다[6].

본 연구에서는 고분자절연체 분자량이 유기반도체 성장과 소자 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, 기존 연구와 다르게 트랜지스터 소자의 전하이동도 평가 외에도 장시간 구동 안정성을 확인할 수 있는 바이어스 스트레스 안정성도 함께 평가하였다.

2. Experiment

2.1. Device Fabrication

유기트랜지스터 소자 구조와 유기반도체 및 고분자

절연체 분자구조가 Fig. 1에 나타나 있다. 본 연구에서는 고분자절연체 표면에서 반도체층이 형성되는 top-contact bottom-gate 구조가 이용되었다. Polymethyl methacrylate (PMMA) 고분자절연체가 300 nm 두께를 가진 SiO_2 위에 스핀코팅으로 도포되어, PMMA/ SiO_2 이중층으로 구성된 게이트절연층을 만들어 게이트 전극으로부터 전하유입과 누설전류를 최소화하였다. Reflectometer로 측정된 PMMA 두께는 $\sim 200 \text{ nm}$ 로 이중층 게이트절연층의 전기용량(capacitance)은 $4.92 \text{ nF} \cdot \text{cm}^{-2}$ (at 10 kHz)로 측정되었다. 유기반도체는 증착용 반도체로 많이 사용되는 펜타센을 이용하였다. 펜타센 박막의 미세구조는 증착공정에서 기판 표면의 물리/화학 특성에 크게 민감하다고 보고되어 있다[7,8]. 열증착법(thermal evaporation)으로 패터닝된 Au를 소스-드레인 전극으로 이용하여 트랜지스터소자를 완성하였다.

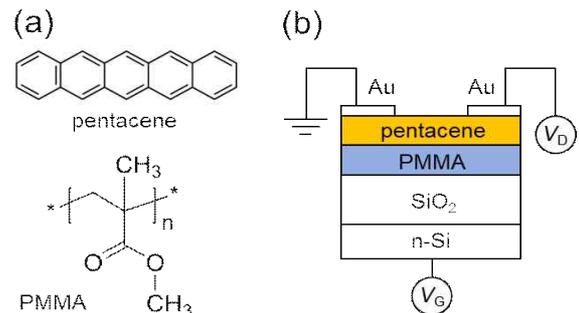


Figure 1. (a) Molecular structure of pentacene semiconductor and polymethylmethacrylate (PMMA) gate insulator. (b) Device structure of pentacene organic field-effect transistor (OFET).

본 연구에서는 이러한 소자제작 과정에서 다양한 분자량의 PMMA (9, 62, 390 kDa, PDI < 1.2)를 도입하였다. 스핀코팅으로 박막을 도포할 경우, 일반적으로 같은 농도에서 분자량이 높을수록 박막 두께가 증가한다. 따라서 PMMA 고분자절연체의 두께를 200 nm로 유지하기 위해 PMMA가 녹아있는 톨루엔 용액의 농도와 스핀코팅 속도(rpm)를 조절하였다. 스핀코팅된 PMMA 층의 두께(t)와 분자량(MW), 농도(c , wt%), 스핀코팅 속도(v , rpm)는 다음과 같은 상관관계를 가짐을 확인하였다[9].

$$t \propto (c) \cdot (v)^{-1/2} \cdot (MW)^{1/4} \quad \text{Eq. 1}$$

3. Results and Discussion

3.1. Morphology and Crystallinity of Organic Semiconducting Layer

PMMA 분자량이 펜타센 유기반도체 물성에 미치는

영향을 파악하기 위해 우선 원자현미경을 이용하여 펜타센 모폴로지를 분석하였다. 두 종류 두께(3, 10 nm)의 펜타센 박막을 분석하여 박막 성장 초기와 후기 모폴로지가 PMMA 분자량에 따라 어떻게 변화하는지 확인하였다(Fig. 2). 그림에서 나타나듯이 펜타센 아일랜드의 개수/크기는 3 nm 샘플보다 10 nm 샘플에서 적고/큰데, 이를 통해 10 nm 펜타센 아일랜드는 여러 개의 결정계가 모인 집합체인 것으로 판단된다. 흥미로운 점은 PMMA 분자량이 변화가 펜타센 아일랜드의 개수, 크기, 모양에 큰 영향을 미치지 않았다는 것이다. Liu 연구팀은 polystyrene (PS) 분자량 변화에 따라 펜타센 아일랜드 크기의 급격한 변화를 보고하였다[6]. 이는 고분자 사슬 중간부(chain middle)와 말단(chain end)화학기가 가지는 표면에너지가 달라 고분자박막의 표면에너지 불균일도가 PS 분자량이 감소할수록 증가하기 때문이라고 설명하였다. 본 실험결과는 Liu 연구팀의 실험경향과 다른데, 1) PMMA 사슬 말단이 만들어내는 표면에너지 불균일도 변화가 적거나 2) 9 kDa보다 더 낮은 분자량에서 Liu 연구팀의 결과와 유사한 결과가 나올 것으로 판단된다.

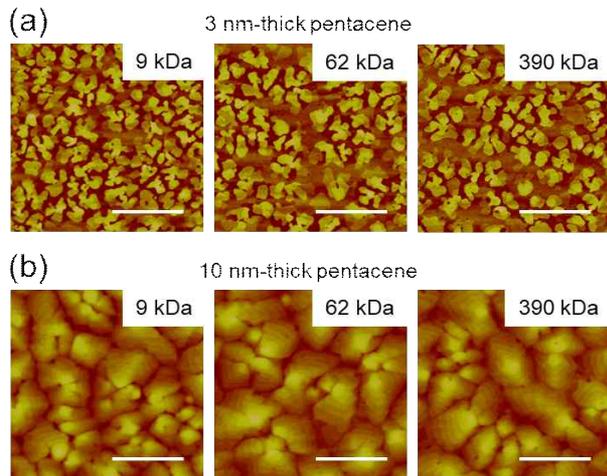


Figure 2. Atomic force microscope topographic images of pentacene thin film deposited onto PMMA layer with variable molecular weight (9~390 kDa). Thickness of pentacene layer: (a) 3 nm, (b) 10 nm. Scale bar: 1 μm.

펜타센 박막의 결정성은 X-선 회절(theta-2theta mode, Pohang Acceleration Laboratory) 실험을 통해 분석하였다. Fig. 3은 분자량이 다른 PMMA에 증착된 50 nm 두께의 펜타센 박막의 X-선 회절결과이다. 나타나는 회절 피크는 모두 펜타센의 (001) 피크로 판단된다[7,8]. 앞선 원자현미경을 통한 모폴로지 분석결과와 유사하게 (001) 피크의 세기와 full width of half maximum (FWHM) 모두 PMMA 분자량에 무관한 것으로 나타났다. 따라서

펜타센 박막 성장은 PMMA 분자량 9-390 kDa에서는 분자량에 무관한 것으로 판단된다.

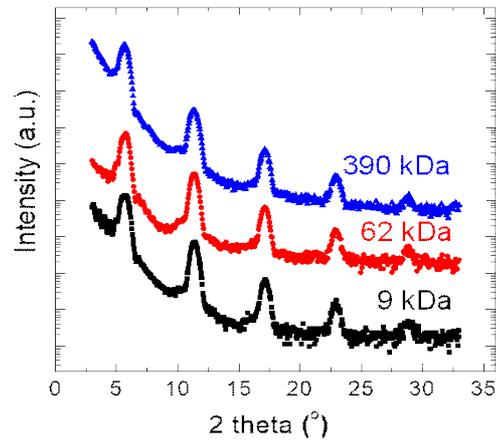


Figure 3. X-ray diffraction pattern of pentacene thin films (thickness: 50 nm) deposited onto PMMA layers with variable molecular weight (9~390 kDa) - theta-2theta mode, wavelength = 1.54 Å, 10C1-Pohang Acceleration Laboratory.

3.2. Electrical Properties of As-Prepared Devices

앞서 펜타센 모폴로지와 결정성 분석에서 관찰된 PMMA 분자량 무관성은, 펜타센이 트랜지스터 소자에서 전하이동층이 된다는 점을 고려할 때, 펜타센 유기 트랜지스터의 전기적 특성에도 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 이의 확인을 위해 우선 소자의 스위칭 특성을 평가하였다. Fig. 4(a)는 펜타센 유기트랜지스터의 게이트전압(VG) 인가에 따른 소스-드레인 전류(ID)를 나타내는 트랜스퍼 곡선이다. 유기트랜지스터가 스위칭 소자로 작동하기 위해서는 VG에 따른 ID의 급격한 변화가 관찰되고 ID의 급격한 증가지점의 VG (Von이라 정의함)가 0 V 근처이어야 하는데, 모든 소자들이 분자량에 무관하게 105배 이상의 ID 변화를 나타내었고, Von~0 V임이 관찰되어 스위칭 소자로 정상적인 작동함을 확인하였다. 중요한 점은 PMMA 분자량에 무관하게 동일한 트랜스퍼 곡선을 나타내었다는 점이다. 유기트랜지스터의 특성을 정량화하는 전계효과 전하이동도(field-effect mobility, μ) 다음의 식으로 구할 수 있고, 그 결과가 Fig. 4(b)에 나타나있다[10].

$$\mu = \frac{L}{WC_i} \cdot \frac{1}{V_D} \cdot \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \quad \text{Eq. 2}$$

여기서 L과 W은 소스-드레인 전극 사이 채널의 길이와 폭이고, Ci는 전기용량, VD는 소스-드레인 전압이다. Fig. 4(b)에서 확인할 수 있듯이 펜타센 유기트랜지스터의 전하이동도는 PMMA 분자량 변화에 비해서는

델 민감하게 변화하여 $0.3\sim 0.4\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 값을 가짐을 확인하였다. 분자량 390 kDa PMMA에서 가장 높은 전하이동도가 관찰된다. 이는 Liu 연구팀이 polystyrene 위에 증착된 펜타센 트랜지스터에서 측정된 경향과 유사하지만, 전하이동도의 고분자절연체 분자량 의존도는 이전 Liu 연구팀 보고에 비해 매우 적은 것으로 판단된다[6].

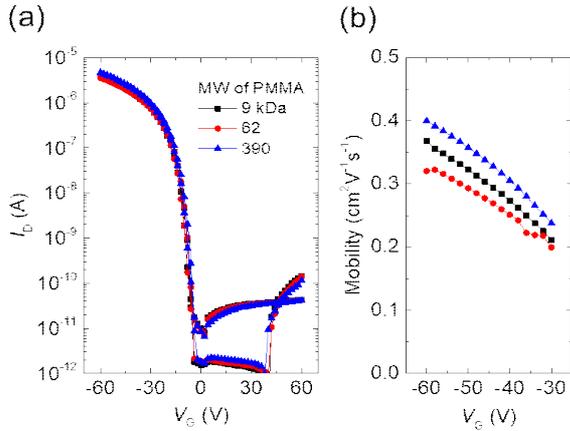


Figure 4. Electrical characteristics of pentacene OFETs based on PMMA with variable molecular weight (9~390 kDa): (a) Transfer curves (Gate voltage, V_G dual sweep from 60 V to -60 V; drain voltage, $V_D = -5$ V) (b) Dependence of field-effect mobility extracted by Eq. 2 on V_G .

3.3. Bias-Stress Stability of Pentacene Transistors

유기트랜지스터의 전기적 특성은 트랜스퍼 곡선 측정 외에도 장시간 안정성 측정을 통해 평가할 수 있다. 유기트랜지스터의 전기적 구동을 위하여 전극을 통해 바이어스가 인가되면, 소자는 지속적으로 바이어스에 의한 스트레스를 받고, 이는 장시간 구동 전후에 전기적 특성 변화를 초래한다. 이 현상을 바이어스 스트레스에 의한 불안정이라 하고 간단하게는 바이어스 스트레스 효과(bias-stress effect)라 한다. 특히, 트랜스퍼 곡선의 게이트 전압 방향으로의 평행이동과 온상태 드레인전류(ON-state drain current) 감소가 대표적으로 관찰되는데, 이는 유기반도체와 절연체 계면에 존재하는 비편제화 준위(delocalized state)에 있는 전하가 편제화 준위(localized state)로 떨어지는 전하트래핑(charge trapping) 현상으로 해석할 수 있다(Fig. 5a) [11,12].

펜타센 유기트랜지스터의 PMMA 분자량에 따른 바이어스 스트레스 효과 변화를 관찰하기 위해 바이어스 스트레스($V_G = -60$ V, $V_D = -5$ V, 2시간 인가) 전후 트랜스퍼 곡선을 측정하였다. Fig. 5(b)와 (c)는 각각 9, 62 kDa PMMA를 이용한 펜타센 유기트랜지스터에 수분이 배제된 진공상태에서 바이어스 스트레스 실험을 수행한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 stressed

트랜스퍼 곡선은 as-prepared 그것에 비해 약 -5~-7 V 평행이동하였다. $V_G = -60$ V, $V_D = -5$ V에서 관찰되는 ID도 감소하였는데, 바이어스 스트레스 전후 전하이동도 변화가 없으므로 ID 감소는 트랜스퍼 곡선의 평행이동에 의한 것으로 판단된다. 앞서 Fig. 4 결과와 유사하

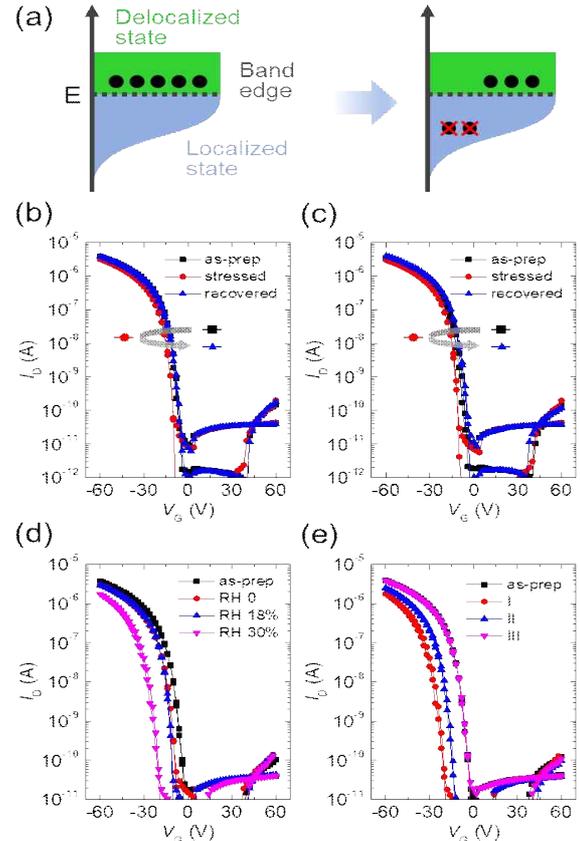


Figure 5. (a) Schematic of bias-stress-induced modulation of density-of-the-states (DOS) at the interface between organic semiconductor and gate dielectric. Band edge charge carriers are delocalized, contributing to the charge transport and drain current, but some of them are localized by bias stress, resulting in the decrease of density of mobile charge carriers and drain current. (b, c) Bias-stress experiment conducted under vacuum (10^{-3} Torr): (b) 9 kDa PMMA, (c) 62 kDa PMMA (black square: before bias stress; red circle: after bias stress - $V_G = -60$ V and $V_D = -5$ V for 2 hours; blue triangle: after 2 hours of recovery). (d) Dependence of bias-stress effect of OFET using 62 kDa PMMA on relative humidity, RH. (e) Bias stress and recovery experiments of the OFET based on 62 kDa PMMA conducted under RH = 30%: black square: before bias stress, red circle (step I): after bias stress, blue triangle (step II): 10 hours of recovery of the bias-stressed device, and purple inverted triangle: 2 hours exposure of humid environment without bias stress.

계 Fig. 5(b), (c) 결과는 바이어스 스트레스에 의한 트랜스퍼 곡선의 이동량은 PMMA 분자량에 무관함을 나타낸다. 바이어스 스트레스가 인가된 소자를 2시간 방치 후 재측정결과 트랜스퍼 곡선은 스트레스 전의 상태로 완벽하게 돌아감을 확인할 수 있었다(blue triangles in Fig. 5b, c). 따라서 Fig. 5(b), (c)에서 관찰된 바이어스 스트레스 효과는 가역적 전하트래핑(reversible charge trapping)에 의한 것으로 판단된다.

앞선 Fig. 5(b), (c) 결과는 수분이 배제된 진공환경에서 수행된 결과이다. 소자가 습도에 노출되었을 경우 바이어스 스트레스 안정성 변화를 관찰하기 위해 소자가 노출되는 상대습도(relative humidity, RH)를 체계적으로 조절해가며 소자의 장시간 구동($V_G = -60$ V, $V_D = -5$ V, 2시간 인가) 전후 트랜스퍼 곡선을 측정하였다. 62 kDa PMMA를 이용한 펜타센 트랜지스터를 측정에 사용하였다. Fig. 5(d)에서 확인할 수 있듯이 상대습도가 증가할수록 트랜스퍼 곡선의 이동과 드레인전류 감소가 많아지는데 이는 바이어스 스트레스 효과 증대를 의미한다. 결국, 수분이 소자 내부로 침투하여 전하트랩을 생성하고 있음을 의미한다.

Fig. 5(e)는 Fig. 5(d)에서 이용한 소자의 바이어스 스트레스 전후, 회복 전후 특성을 평가한 결과이다. 트랜스퍼 곡선 I는 Fig. 5(d)와 같은 소자 바이어스 스트레스($RH = 30\%$, $V_G = -60$ V, $V_D = -5$ V, 2시간 인가) 후 측정되었다. 해당 소자를 10시간 방치 후 재측정결과 트랜스퍼 곡선 II를 얻었다. 흥미롭게도 습도가 배제된 진공 환경에서 수행한 Fig. 5(b), (c)와 달리 트랜스퍼 곡선 II는 스트레스 전 상태로 완벽하게 돌아가지 못함이 확인되었다. 따라서, 수분이 기여하는 전하트랩이 비가역적 전하트래핑(irreversible charge trapping)을 유도함을 확인할 수 있다. 해당 소자를 다시 Fig. 5(b), (c) 실험과 같이 진공환경에 노출된 경우, 소자 특성은 원상태로 복구하는 것을 확인할 수 있었다. 상대습도에 의한 바이어스 스트레스 효과 증대를 명확하게 규명하기 위해 소자에 바이어스 스트레스를 인가하지 않고 $RH = 30\%$ 에만 노출하였다.

2시간 노출 후 측정된 트랜스퍼 곡선 III는 스트레스 전 상태와 동일하게 측정되었다. 따라서 수분이 그대로 트랜스퍼 곡선의 이동을 일으키는 것이 아니라 수분에 의한 바이어스 스트레스 효과 증대로 인해 트랜스퍼 곡선의 이동이 나타난다고 판단된다.

3.4. Molecular Weight-Dependent Bias Stress Stability

수분에 의한 바이어스 스트레스 효과 증대 현상에 대해 Cho 연구팀은 펜타센/polystyrene 트랜지스터에서 게이트전압에 의한 물분자의 polystyrene 내부로의 침투가 원인임을 증명하였다[13]. Polystyrene 고분자사슬 말단

은 중간부에 비해 높은 자유부피(free volume)를 가지는데[14,15], 해당 공간으로 물분자가 침투하고 이것이 펜타센에 존재하는 전하를 트래핑하는 위치가 됨을 규명하였다. 이와 같이 상대습도 노출하에서 소자의 PMMA 분자량에 따른 바이어스 스트레스 효과 변화를 비교하기 위해 장시간 구동을 유지한 채 드레인전류 $I_D(t)$ 변화를 관찰하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이, 소자들은 PMMA 분자량이 높을수록 I_D 감소가 적었다. 이러한 분자량 효과는 물분자가 주변에 없을 때는 관찰되지 않았는데(Fig. 5(b), (c) 참조), Fig. 6 실험결과는 물분자에 의한 바이어스 스트레스 효과가 PMMA 분자량에 영향을 받음을 의미한다. 앞선 Fig. 5(d) 실험결과에 따르면 수분이 기여하는 전하트랩은 비가역적 전하트래핑을 유도하는데, 이것이 분자량효과를 일으키는 원인임을 알 수 있다. 펜타센 모폴로지, 결정성이 PMMA 분자량에 무관함으로 분자량효과를 일으키는 비가역적 전하트래핑은 펜타센/PMMA 계면 전하이동층에 인접한 PMMA에서 일어나는 것으로 판단된다. 그리고 PMMA에 트랩된 전하밀도는 PMMA 분자량이 감소할수록 증가하는 것으로 판단된다.

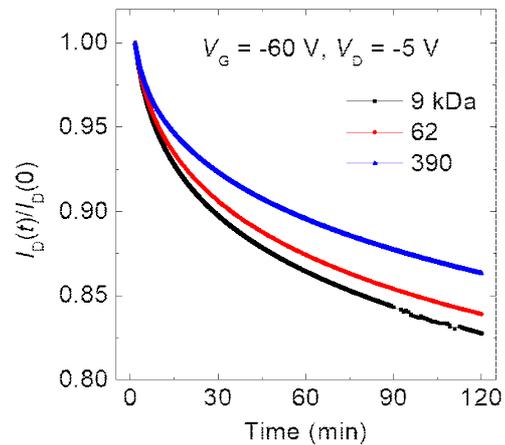


Figure 6. Bias-stress experiment under humid N_2 ($RH = 30\%$): time-dependent I_D with fixed $V_G = -60$ V and $V_D = -5$ V.

Cho 연구팀이 제안한 것과 마찬가지로 본 실험에서 밝혀진 분자량효과는 PMMA 사슬 말단 - 물분자 상호작용에 의해 나타난 것으로 판단된다[13]. 일반적으로 고분자 사슬 말단은 사슬 중간부에 비해 높은 자유부피를 가지는데, PMMA 분자량이 낮아질수록 사슬 말단의 밀도는 증가한다. 물분자-사슬말단 간의 상호작용과 이로 인해 설명가능한 전하트래핑 메커니즘을 Fig. 7에 나타내었다. 첫번째로는 사슬말단의 높은 자유부피로 물분자가 침투하고 이것들이 전하를 트래핑시킨다. 두번째로는 본 연구에 이용된 소자구조에서는 물분자 침

투는 펜타센 전하이동층을 거쳐 들어간다. Sharma 연구팀 보고에 따르면 이 경우 물분자(H₂O)와 하전된 유기 반도체(OS⁺)간 전기화학 반응에 의해 프로톤(H⁺)이 생성될 수 있다: $2\text{H}_2\text{O} + 4\text{OS}^+ \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{OS}$. 이렇게 생성된 프로톤은 H⁺, H₃O⁺ 형태로 PMMA 사슬말단에 침투하여 트래핑되는 경우 본 실험결과를 설명할 수 있다[16]. 두 메커니즘 모두 상대습도가 0인 환경에서는 구현되지 않아 분자량효과를 일으킬 수 없다.

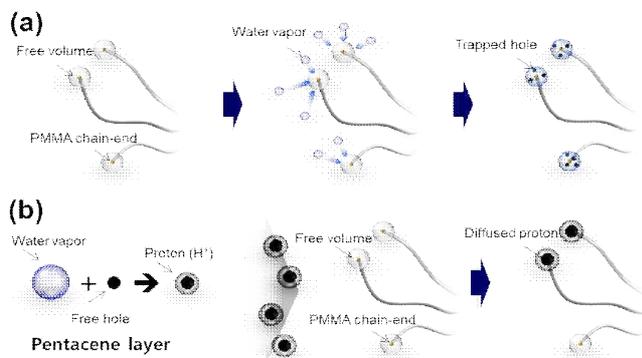


Figure 7. Water molecule-induced irreversible charge trapping as an origin of MW effect. (a) Water molecule trapping at the free volume of PMMA chain-end, resulting in charge trapping. (b) Proton (H⁺) generation at the conducting channel of OFET and proton migration into PMMA chain-end.

4. Conclusion

본 연구에서는 PMMA 고분자절연체 분자량이 펜타센/PMMA 계면에서 일어나는 전하이동 현상에 미치는 영향을 규명하였다. 증착된 펜타센의 모폴로지와 결정성은 분자량에 영향을 받지 않아, 이로 인해 트랜지스터 소자의 초기 전하이동특성은 분자량효과를 가지지 않았다. 하지만, 소자를 장시간 구동할 시 일어나는 바이어스 스트레스 효과는 분자량에 큰 영향을 받는 것을 규명하였다. 이러한 분자량효과는 소자가 습도에 노출될수록 증대되어, 습도에 의한 비가역적 전하트래핑 현상 때문임을 밝혀내었다.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1C1C101269011) and funded by the Ministry of Education (No. NRF-2020R1A6A1A03038697).

References

1. A. F. Paterson, S. Singh, K. J. Fallon, T. Hodsdon, Y. Han, B. C. Schroeder, H. Bronstein, M. Heeney, I. McCulloch, T. D. Anthopoulos, *Adv. Mater.*, **30**, 1801079 (2018).
2. S. Park, S. H. Kim, H. H. Choi, B. Kang, K. Cho, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1904590 (2020).
3. S. G. Lee, H. H. Choi, *Journal of Adhesion and Interface*, **20**, 162 (2019).
4. W. H. Lee, H. H. Choi, D. H. Kim, K. Cho, *Adv. Mater.*, **26**, 1660 (2014).
5. C. Kim, A. Facchetti, T. J. Marks, *Science*, **318**, 76 (2007).
6. X. Sun, Y. Liu, C. Di, Y. Wen, Y. Guo, L. Zhang, Y. Zhao, G. Yu, *Adv. Mater.*, **23**, 1009 (2011).
7. H. S. Lee, D. H. Kim, J. H. Cho, M. Hwang, Y. Jang, K. Cho, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 10556 (2008).
8. H. Yang, T. J. Shin, M. M. Ling, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 11542 (2005).
9. D. W. Schubert, *Polymer Bulletin*, **38**, 177 (1997).
10. G. Horowitz, *Adv. Mater.*, **10**, 365 (1998).
11. B. Lee, A. Wan, D. Mastrogianni, J. E. Anthony, E. Garfunkel, V. Podzorov, *Phys. Rev. B.*, **82**, 085302 (2010).
12. V. Podzorov, E. Menard, A. Borissov, V. Kiryukhin, J. A. Rogers, M. E. Gershenson, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 086602 (2004).
13. H. H. Choi, W. H. Lee, K. Cho, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 4833 (2012).
14. W. C. Yu, C. S. P. Sung, R. E. Robertson, *Macromolecules*, **21**, 355 (1988).
15. J. Liu, Q. Deng, Y. C. Jean, *Macromolecules*, **26**, 7149 (1993).
16. A. Sharma, S. G. J. Mathijssen, E. C. P. Smits, M. Kemerink, D. M. de Leeuw, P. A. Bobbert, *Phys. Rev. B.*, **82**, 075322 (2010).