

Parylene 고분자 유전체 표면제어를 통한 OFET의 소자 안정성 향상 연구

서정윤^{1,2} · 오승택^{1,2} · 최기현^{1,2} · 이화성^{1,2†}

¹한양대학교 재료화학공학과

²BK21FOUR ERICA-ACE Center, 한양대학교

(2021년 05월 31일 접수, 2021년 07월 23일 수정, 2021년 07월 26일 채택)

Improvement of Operating Stabilities in Organic Field-Effect Transistors by Surface Modification on Polymeric Parylene Dielectrics

Jungyoon Seo^{1,2}, Seungteak Oh^{1,2}, Giheon Choi^{1,2}, Hwasung Lee^{1,2†}

¹Department of Materials Science and Chemical Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Republic of Korea

²BK21 FOUR ERICA-ACE Center, Hanyang University, Ansan, Gyeonggi 15588, Republic of Korea

(Received May 31, 2021, Revised July 23, 2021; Accepted July 26, 2021)

요약: 본 연구는 Parylene C 유전체 표면에 유기 자기조립단분자막(self-assembled monolayer, SAM) 중간층을 도입함으로써 표면특성을 제어하고 최종적으로 유기전계효과 트랜지스터(organic field-effect transistors, OFETs)의 전기적 안정성을 향상시킨 결과를 제시하였다. 유기 중간층을 적용함으로써, Parylene C 게이트 유전체의 표면 에너지를 제어하였으며, OFET의 가장 중요한 성능변수인 전계효과 이동도(field-effect transistor, μ_{FET})와 문턱 전압 (threshold voltage, V_{th})의 성능향상과 구동 안정성을 증대시켰다. 단순히 Parylene C 유전체를 적용한 Bare OFET에서 μ_{FET} 값은 $0.12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 가 측정되었으나, hexamethyldisilazane (HMDS)과 octadecyltrichlorosilane (ODTS)를 중간층으로 적용된 소자에서는 각각 0.32 과 $0.34 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 로 μ_{FET} 가 증가하였다. 또한 1000번의 transfer 특성의 반복측정을 통해 ODTS 처리한 OFET의 μ_{FET} 와 V_{th} 의 변화가 가장 작게 나타남을 확인하였다. 이 연구를 통해 유기 SAM 중간층, 특히 ODTS는 효과적으로 Parylene C 표면을 알킬 사슬로 덮어 극성도를 낮춤과 함께 전자 트래핑을 감소시켜 소자의 전기적 구동 안정성을 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract: By introducing an organic interlayer on the Parylene C dielectric surface, the electrical device performances and the operating stabilities of organic field-effect transistors (OFETs) were improved. To achieve this goal, hexamethyldisilazane (HMDS) and octadecyltrichlorosilane (ODTS), as the organic interlayer materials, were used to control the surface energy of the Parylene C dielectrics. For the bare case used with the pristine Parylene C dielectrics, the field-effect mobility (μ_{FET}) and threshold voltage (V_{th}) of dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]-thiophene (DNNT) FET devices were measured at $0.12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ and -5.23 V , respectively. On the other hand, the OFET devices with HMDS- and ODTS-modified cases showed the improved μ_{FET} values of 0.32 and $0.34 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, respectively. More important point is that the μ_{FET} and V_{th} of the DNNT FET device with the ODTS-modified Parylene C dielectric presented the smallest changes during a repeated measurement of 1000 times, implying that it has the most stable operating stability. The results could be meant that the organic interlayer, especially ODTS, effectively covers the Parylene C dielectric surface with alkyl chains and reduces the charge trapping at the interface region between active layer and dielectric, thereby improving the electrical operating stability.

Keywords: Electrical stability, Polymeric gate dielectric, Parylene C, Self-assembled monolayer, Organic field-effect transistors

† Corresponding author: Hwasung Lee (hslee78@hanyang.ac.kr)

1. 서론

유기 전계 효과 트랜지스터(Organic Field-Effect Transistor, OFET)는 저비용, 대면적, 쉬운 제조 방법, 경량성, 뛰어난 유연성 등으로 인해서 광범위한 전자 응용 분야에서 큰 주목을 받고 있다[1-4]. 최근에는 유기 반도체를 사용하는 OFET 장치에 대한 연구에서 비정질 실리콘 기반의 FET 장치의 성능을 능가하는 높은 전기적 성능이 측정되었다[5-8]. 하지만 OFET은 아직 장기적인 구동 안정성을 포함하여 상용화를 위한 필수 요건을 충족하지 못하였다. 차세대 전자 제품 시장에서 OFET를 성공적으로 상용화하기 위해서는 OFET에 적합한 유전체 층, 즉 높은 유전 상수를 갖고 있으며 장치가 기계적으로 유연할 수 있도록 하는 층도 개발해야 한다[9-12]. 또한 반도체 물질과 게이트 유전체 층 사이의 계면 특성이 박막의 성장, 결정도 및 전하 트래핑에 상당한 영향을 미치기 때문에, 안정적인 OFET 장치의 구동을 위해서는 게이트 유전체에 적합한 고분자 물질을 신중하게 선택해야 한다[11,13-15].

화학기상증착(chemical vapor deposition, CVD)으로 쉽게 증착이 가능한 poly(para-xylylene) (Parylene)과 그 유도체들은 대면적 가공성, 우수한 기계적 유연성, 뛰어난 내화학성, 상대적으로 높은 유전 강도, 그리고 우수한 절연 특성으로 인해 게이트 유전체 물질로 유망한 후보 중 하나이다[16-18]. 이중 poly(chloro-p-xylylene) (Parylene C)는 대표적인 Parylene의 유도체로서 현재 다수의 연구자가 고분자 유전체로서 활용하고 있는 소재이다[19,20]. 하지만 Parylene C의 우수한 유전체로서의 특성에도 불구하고 고분자 내에 존재하는 반복 단위의 염소 원자는 유전체 표면의 분극 효과 및 유기반도체 층 사이의 계면에서 전하 트래핑을 유도하며, 이는 소자구동의 안정성을 저하시키는 문제를 발생시키고 있다[18,21-23]. 또한 유기반도체 물질에 비해 상대적으로 높은 표면에너지로 인해 공액 분자의 pi-pi 쌓임 구조가 작용하여 박막구조 최적화 과정에 대한 방해요인 중 하나로 작용할 가능성이 있다[18,24].

본 연구팀은 OFET의 성능을 향상시키기 위한 노력의 일환으로 게이트 유전체 층의 표면 특성 제어를 통해 소자성능 향상 및 구동안정성 개선에 관한 다양한 연구를 수행하였으며, 이를 위해 자기조립단분자막(self-assembled monolayer, SAM)을 유기반도체와 유전체 사이의 중간층으로 도입하였다[25-29]. 특히, 유기실란계 SAM 물질은 최종 작용기의 화학적 변형의 용이성을 기반으로 하는 유용한 표면 개질 물질이며, 다양한 작용기를 도입함으로써 적절한 표면에너지 및 화학적 특성의 제어가 가능하다[29-33]. 또한, 다양한 말단기를 가진 중간층의 존재는 유전체 표면과 위에 형성

되는 유기반도체 분자 사이의 상호 작용을 변화시켜 박막의 구조적 형태와 전기적 특성에 영향을 미칠 수 있으며, 이를 적절하게 제어함으로써 최적의 소자성능을 확보할 수 있다[28,29,34-36].

본 연구에서는 Parylene C 게이트 유전체 표면에 형성되는 전하 트래핑 문제와 이로 인해 나타나는 소자구동 안정성을 향상시키기 위해 다양한 작용기를 가지는 유기실란계 중간층을 도입하여 OFET 성능을 평가하였다. 적용된 소자는 Bottom-gate top-contact (BGTC) 구조를 가지는 OFET를 이용하였으며, poly(ethylene-2,6-aphthalate) (PEN) 기판 위에 게이트 유전체로 Parylene C를 증착시킨 후, 두 종류의 유기실란계 SAM물질인 hexamethyldisilazane (HMDS)과 octadecyltrichlorosilane (ODTS)를 중간층으로 사용하였다. SAM 중간층을 도입하는 것은 Parylene C 표면에너지 제어와 함께 표면의 염소원자 노출을 최소화하는 목적도 가지고 있다. 유기활성층으로써 P형 단분자 반도체 소재인 dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene (DNNT)를 사용하였으며, 유기 분자선 증착법(organic Molecular Beam Deposition, OMBD)을 이용하여 박막을 형성하였다. 최종적으로 제작된 OFET 소자는 1000번의 transfer 특성 측정을 통해 이동도 및 문턱전압의 변화를 확인하였으며, 이를 기반으로 소자구동 안정성을 평가하였다.

2. 실험

2.1. OFET 소자 제작

$2 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기로 자른 PEN 필름은 기판으로 사용되었다. 100 nm 두께의 Al 게이트 전극은 약 10^{-7} Torr에서 열증착기를 사용하여 10 Å/s의 속도로 새도우 마스크를 통해 기판위에 형성하였다. Parylene C 게이트 유전체 층은 화학기상증착 기반의 Parylene 코팅 시스템(ETPC-4035)을 이용하여 게이트 전극이 형성된 기판 위에 600 nm 두께로 형성되었다. Parylene C 유전체 층 표면을 개질하기 전에 표면을 30분간 UV/O₃ (253.7 nm)에 노출시켜 표면에 하이드록실기를 형성시켰다. 주사기를 이용해 두 개의 비커에 HMDS (Sigma Aldrich)와 ODTS (Sigma Aldrich)를 각각 0.5 mL씩 떨어뜨린 뒤, 기판을 고정된 슬라이드 글라스를 비커 위에 거꾸로 덮어두고 2시간 동안 방치하였다. 그 다음 기판을 회수하여 120°C에서 20분간 오븐에서 열처리를 하였다. 마지막으로 상온으로 식힌 기판을 톨루엔, 아세톤, 에탄올 순으로 세척한 뒤 질소 건조를 이용하여 세척을 마무리하였다. 그 후, p형 반도체 물질인 DNNT는 약 10^{-7} Torr의 압력과 0.2 Å/s의 증착 속도로 OMBD를 통해 박막을 형성시켰으며, 박막의 두께는 40 nm로 고정하였다. 마지막으로 70 nm 두께의 Au 전극 (소스와 드레

인)을 10^{-7} Torr의 압력과 7 \AA/s 의 속도로 새도우 마스크를 통해 증착하였으며, 채널 폭(W)과 채널 길이는 1 mm 와 50 \mu m 로 고정하였다.

2.2. 특성 분석

다양한 SAM중간층으로 처리된 Parylene C 유전체의 표면에너지(γ_s)는 기관상의 두 프로브 액체(물 및 diiodomethane)의 접촉각을 접촉각 분석기(Phoenix 300 A, SEO Co., Inc.)를 사용하여 측정하였으며, γ_s 값은 다음 Owens-Wendt 방정식을 사용하여 계산되었다.

$$1 + \cos\theta = \frac{2(r_s^d)^{1/2}(r_{lv}^d)^{1/2}}{r_{lv}} + \frac{2(r_s^p)^{1/2}(r_{lv}^p)^{1/2}}{r_{lv}} \quad (1)$$

여기서 γ_s 및 γ_{lv} 는 각각 유전체 표면과 프로브 액체의 표면 에너지이며, 위 첨자 d 및 p는 각각 표면 에너지의 분산 및 극성 요소를 나타낸다. 표면형태는 Nanoscope 5.30 소프트웨어를 사용하여 탭핑 모드의 원자력 현미경(AFM)을 사용하여 특성화되었다. Hewlett Packard HP4156A 반도체 매개 변수 분석기를 사용하여 실온과 어두운 조건하에서 OFET 성능이 측정되었다. 소자의 전류-전압 특성은 전형적인 p형 트랜지스터를 측정하는 방법을 적용하였으며, 음의 게이트 바이어스가 적용된 측정 모드와 접지된 소스 전극, 그리고 음으로 바이어스된 드레인 전극으로 구동하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서 제작한 OFET 단위소자의 구조는 Fig. 1(a)에 개략적으로 표현하였다. 먼저 화학적 이량체인 Parylene C 전구체를 160°C 이상의 온도에서 기화시킨 다음 고온상태(750°C)에 노출시켜 이량체를 열분해시킨다. 열분해로 생성된 단량체를 저온의 증착 챔버 내에서 PEN 기관 표면에 물리적 흡착과 표면 중합을 유도하여 균일한 Parylene C 필름이 형성시켰다. Parylene C 고분자 유전체 표면은 유기 실란계 SAM 물질인 HMDS와 ODTs를 증기증착법을 이용하여 유기 중간층으로

도입하였다. 유기 중간층으로 개질된 유전체의 표면은 접촉각 측정을 통한 표면에너지 계산으로 특성화되었다. 아무런 처리가 되지 않은 Parylene C 기관의 표면에너지는 48.91 mJ/m^2 으로 가장 높은 표면에너지가 측정되었고, 이는 극성이 높은 염소원자나 하이드록실기 같은 작용기들이 표면에 노출되었기 때문으로 판단된다. HMDS와 ODTs SAM 중간층 처리 후 표면에너지는 각각 38.98 과 29.17 mJ/m^2 로 감소하였고, 이는 표면의 염소원자를 알킬 사슬 및 알킬 작용기로 덮어서 표면에너지가 감소하는 것으로 생각된다[37,38]. 중간층으로 형성된 SAM의 분자구조에 대한 모식도는 Fig. 1(b)에 제시하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 준비한 세 가지 형태의 Parylene C 게이트 유전체 표면위에 DNTT를 증착한 뒤 AFM을 통해 표면구조를 분석한 결과이다. OFET 소자내의 전하 캐리어들은 게이트 유전체 표면 근처의 반도체 층을 통해서 대부분 흐르기 때문에 유기 반도체의 형태 및 결정도를 확인하는 것은 소자성능을 평가하는데 있어 중요하다[37-39]. 단순 Parylene C와 HMDS, 그리고 ODTs를 도입한 Parylene C 유전체 표면에서 DNTT 박막이 잘 정의된 입자와 입자경계를 가진 다결정 그래핀 구조를 나타내는 것을 확인하였다. DNTT의 그래핀은 island 구조를 가지고 있으며, HMDS 중간층이 적용된 기관에서 가장 큰 그래핀이, 그리고 ODTs가 적용된 경우가 bare보다 약간 큰 그래핀 구조가 나타나는 것을 관찰하였다. 기본적으로 증착된 그래핀의 크기는 핵밀도에 의해 크게 결정되며, 핵생성은 균질 핵생성과 표면 매개 이중 핵 생성의 두 가지 메커니즘에 의해 형성된다. 기관과 증착된 박막 사이의 표면에너지 차이는 박막내부의 분자 배향을 결정하는데 매우 중요한 변수 중 하나이다[26,38,42]. 표면에너지 비율 차이가 1보다 클 경우 증착된 분자는 기관에 고정되어 표면 매개 이중 핵 형성으로 성장하기 쉽다. 반대로 표면에너지 차이 비율이 1보다 작을 경우 분자간 상호 작용이 분자와 기질 사이보다 더 강하여 결과적으로 균질한 핵 형성을 촉진한다. DNTT의 표면에너지는 46.53 mJ/m^2 으로 Bare Parylene C와 HMDS, ODTs 처리된 기관과의 표면에너지 비율 차이($\gamma_s(\text{유전체})/\gamma_s(\text{DNTT})$)는 각각 1.05, 0.84, 0.62 이다. 따라서 Bare Parylene C와 ODTs

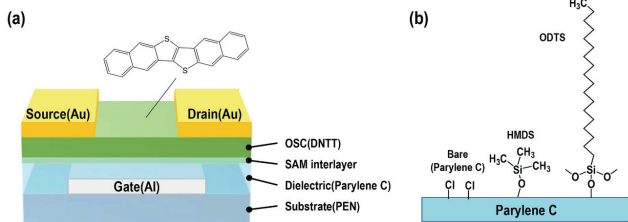


Figure 1. The schematic illustration of the top-contact bottom-gate DNTT OFET and chemical structures used in this study.

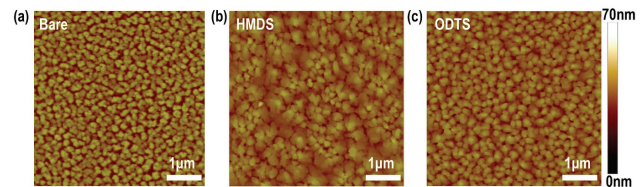


Figure 2. AFM images of 50 nm thick DNTT deposited on the various organic interlayers.

처리한 기판에 성장시킨 DNNT는 두 가지 핵 생성 메커니즘 중 하나가 우세하여 작은 입자 크기가 나타난 것이며, 표면에너지 비율이 1과 가까운 HMDS에서는 한쪽의 핵생성 메커니즘이 우세하지 못하고 두 가지가 동시에 일어나 핵밀도가 크고 입자 크기가 큰 그래인이 형성된 것으로 판단된다.

Fig. 3은 제작된 OFET의 단위소자에 대해 output (I_D - V_D) 특성과 transfer (I_D - V_G) 특성을 측정한 결과이며, 여기서 I_D 는 드레인 전류, V_D 는 드레인 전압 그리고 V_G 는 게이트 전압을 나타낸다. Output 특성에서 볼 수 있듯이 모든 장치는 낮은 V_D 구간에서 선형 영역이 명확하게 나타나며, V_G 를 초과하는 V_D 에서 포화 영역이 나타나는 전형적인 p형 트랜지스터로 구동하는 것을 확인하였다. Output 곡선의 최대 V_G (-40 V)에서 관찰된 최대 I_D 값은 ODTS를 도입한 경우에서 가장 높았으며, HMDS를 도입한 OFET에서는 이보다 약간 낮은 결과를 확인할 수 있었다. 하지만 Bare의 경우 ODTS와 HMDS와 비교하면 약 절반 정도의 최대 I_D 값이 측정되었다. $V_D = -40$ V에서의 OFET의 transfer 특성(I_D 및 $|I_D|^{1/2}$ vs. V_G)은 Fig. 3(d)~(f)에 나타냈다. 여기서 on/off ratio, 문턱전압(threshold voltage, V_{th}) 및 가장 중요한 전계효과 이동성(field-effect mobility, μ_{FET})을 포함한 장치 매개 변수를 추출할 수 있다. OFET의 on/off ratio는 로그 스케일의 곡선에서 추출되며, bare 장치에서 8×10^3 , HMDS 장치에서 1×10^4 , 그리고 ODTS 장치에서 3×10^4 을 나타냈다. V_{th} 및 μ_{FET} 를

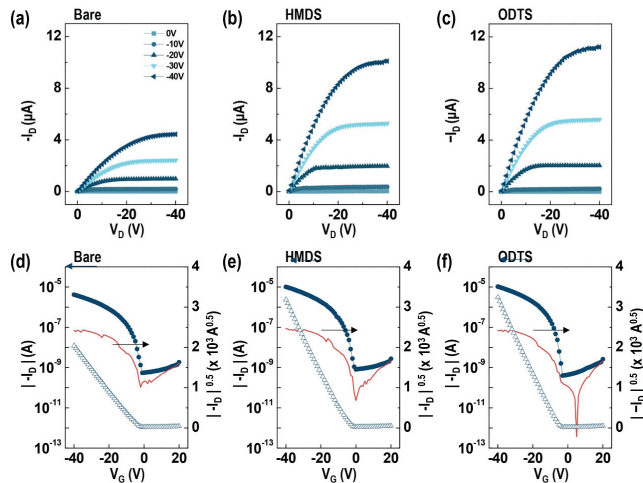


Figure 3. (a-c) Output characteristics and (d-f) transfer characteristics of DNNT OFETs with variable organic SAM interlayers: Bare, HMDS, and ODTS. The applied V_G for output characteristics was from 0 to -40 V with -10 V per step. The applied V_D for transfer characteristics was fixed at -40 V.

추출하는 데 사용되는 $|I_D|^{1/2}$ vs. V_G 그래프는 모든 DNNT OFET에서 높은 선형성을 나타내는 것을 확인하였다. V_{th} 는 V_G 축과 만나는 절편($I_D = 0$)에서 구할 수 있으며, $\mu_{FET} = 2L/(C_i W) \cdot (\partial I_D^{1/2} / \partial V_G)^2$ 의 식을 통해 μ_{FET} 을 계산하였다. 여기서 W 와 L 은 각각 채널 폭과 길이이며, C_i 는 유전체의 전기용량을 나타낸다. Bare Parylene C의 경우와 HMDS, ODTS 처리가 된 OFET 경우에서 V_{th} 각각 -5.23, -6.81, 그리고 -7.22 V로 측정되었다. 또한 OFET에서 $|I_D|^{1/2}$ vs. V_G 그래프의 기울기는 ODTS와 HMDS 경우가 비슷하게 나타나며, Bare 경우에서 기울기가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 ODTS에서 성장한 DNNT층을 기반으로 하는 OFET의 μ_{FET} 은 $0.34 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 가장 높은 값을 나타내었다. HMDS에서는 이와 비슷한 $0.32 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, Bare에서 가장 작은 $0.12 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 μ_{FET} 값을 얻을 수 있었다. 이러한 μ_{FET} 값의 증가는 DNNT의 표면구조 분석을 통해 확인된 그래인 크기를 비교한 결과와 다소 대비되는 것이지만, HMDS와 ODTS 처리를 통하여 CH_3 및 알킬 사슬로 표면을 덮어 Parylene C의 염소 원자로 인한 전하 트래핑 효과가 감소했기 때문으로 판단된다 [43].

OFET의 전기적 안정성과 SAM 중간층 사이의 관계를 조사하기 위하여 transfer 특성을 1000번의 반복 측정으로 비교 분석하였다. Fig. 4는 1000번의 측정 중 매 50번마다 측정된 그래프를 정리한 결과이다. I_D vs. V_G 그래프에서 세 종류의 소자 모두에서 on-전류와 off-전류 모두 점차 감소하는 모습을 보였으며, turn-on 전압이 음의 방향으로 이동하여 그래프가 전체적으로 왼쪽으로 이동하는 모습을 보였다(Fig. 4 (a)~(c)). 특히 off-

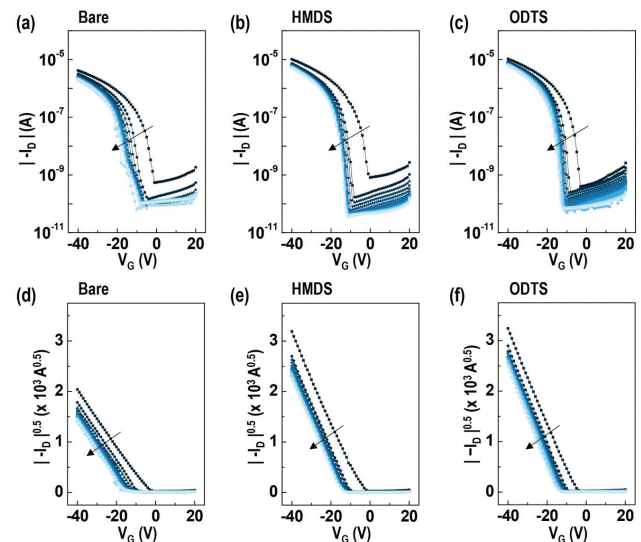


Figure 4. Transfer characteristics of DNNT OFETs with 1000 cycles. (a)-(c) I_D vs. V_G plot and (d)-(f) $|I_D|^{1/2}$ vs. V_G plot.

전류의 감소폭이 on-전류 감소폭보다 커서 on/off ratio가 점차 증가하며 bare Parylene C 경우와 HMDS, ODTS 처리한 경우에서 각각 2.0×10^4 , 1.5×10^5 , 그리고 9.7×10^4 로 측정되었다. 이러한 현상이 일어난 이유는 연속적인 transfer 특성의 측정으로 인해서 일부 캐리어들이 빠져나가지 못하고 OFET의 게이트 유전체에 트랩핑되어 성능에 변화를 준 것으로 판단된다. Fig. 4(d)~(f)는 $|I_D|/2$ vs. V_G 를 나타내는 그래프이며, 세 소자 모두에서 그래프의 기울기는 거의 일정하게 유지되면서 음의 방향으로 평행하게 이동하는 모습을 관찰할 수 있었다. OFET의 $|I_D|^{1/2}$ vs. V_G 그래프에서 기울기와 μ_{FET} 값은 비례 관계이므로 1000번의 transfer 특성 측정 동안에 μ_{FET} 은 변화없이 일정한 값을 얻을 수 있을 것으로 예측된다. 이 결과는 Fig. 5에 정리하였다.

Fig. 5는 1000번의 transfer 특성 측정과 20분간의 bias를 가하면서 확인한 OFET의 성능 변화를 최종적으로 정리한 그래프이다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이, Bare Parylene C 경우와 HMDS 그리고 ODTS로 처리된 경우에서 $0.12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $0.32 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 그리고 $0.34 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 으로 측정된 초기 OFET의 μ_{FET} 값은 1000번의 transfer 특성 측정 후 $0.11 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $0.28 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 그리고 $0.34 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 세 소자 모두 초기에 측정된 μ_{FET} 값과 약간의 변화만 있을 뿐 거의 일정하게 유지되는 모습을 보였으며, 이는 Fig. 4(d)~(f)에서 관찰된 기울기가 일정하게 유지되는 현상과 잘 일치하였다. 전반적인 OFET의 μ_{FET} 값은 ODTS > HMDS > bare 순으로 높은 것을 볼 수 있었으나, Bare 기판을 적용한 OFET이 μ_{FET} 값이 가장 일정하게 유지되는 것처럼 보인다. 하지만 변화의 정도는 세 경우 모두 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. μ_{FET} 의 변화보다 중요한 의미를 보여주는 것이 Fig. 5(b)에서 보여주는 V_{th} 변화에 대한 결과이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 초기 V_{th} 는 Bare Parylene C 경우와 HMDS 그리고 ODTS로 처리된 경우에서 각각 -5.23 , -6.81 , 그리고 -7.22 V로 측정되었다. 1000번의 transfer 특성 측정 후 OFET의 V_{th} 는 각각 -16.17 , -15.34 ,

그리고 -13.97 V로 음의 방향으로 이동한 값이 측정되었으며, ODTS 처리가 된 OFET에서 V_{th} 의 이동이 가장 작은 것으로 나타났다. 이것은 Parylene C 기판에 노출된 염소원자가 ODTS SAM이 가지고 있는 알킬 사슬로 인해 덮여 전하의 트랩핑 효과가 감소한 것을 의미한다.

Fig. 5(c)는 V_G 를 -40 V, V_D 를 -40 V로 유지하면서 최대 I_D 류 변화를 확인한 그래프이다. 아무 처리도 하지 않은 Bare 기판에서는 초기 6.23×10^{-6} A의 on 전류에서 시작하여 점점 감소하여 20분이 지난 후 5.27×10^{-6} A로 감소하였다. HMDS는 9.33×10^{-6} A에서 시작하여 초반에 살짝 증가하는 모습을 보이다가 지속적으로 감소하여 9.65×10^{-6} A로 감소하였다. ODTS 처리를 한 장치의 경우 1.01×10^{-6} A에서 시작하여 HMDS 처리한 장치처럼 초반 드레인 전류가 약간 증가하는 모습을 보였으며, 20분간의 바이어스를 가해준 뒤에 1.00×10^{-6} A로 드레인 전류가 거의 일정하게 유지되는 모습을 보였다. 이를 통해서 Parylene C 유전체만을 사용한 경우에 비해서 HMDS와 ODTS를 도입한 경우에서 최대 ID 변화의 안정성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었으며, 고분자 유전체 표면에 알킬 구조를 갖는 표면처리가 OFET 소자 구동의 안정성을 더욱 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 Parylene C 고분자 유전체가 적용된 OFET의 전기적 안정성을 향상시키기 위해 게이트 유전체와 유기 반도체 사이에 유기 실란계 HMDS와 ODTS SAM 중간층을 도입하였다. 유기 중간층을 가진 Parylene C 유전체 표면에서 유기 반도체 필름의 형태학적 및 결정의 변화가 나타남을 관찰하였으며, 1000번의 연속적인 transfer 특성 반복측정과 20분간의 bias 실험을 통해 소자의 안정성을 확인하였다. 실험 결과, 1000번의 transfer 특성 측정을 통한 μ_{FET} , V_{th} 변화는 Bare Parylene C 유전체를 사용한 경우보다 HMDS, ODTS 처리를 한 OFET 소자에서 안정적으로 나타남을 확인하였다. 이 결과는 유기 실란계 SAM 중간층의 도입으로 인해 Parylene C 표면의 극성 작용기들을 효과적으로 알킬 사슬로 덮여 전기적 안정성을 향상시킬 수 있으며, 특히 ODTS 처리로 전반적인 OFET의 성능 향상과 안정성 개선을 할 수 있음을 나타낸다. 이 연구 결과는 향후 고분자 유전체를 적용한 유연전자소자의 성능향상과 안정성 증대에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

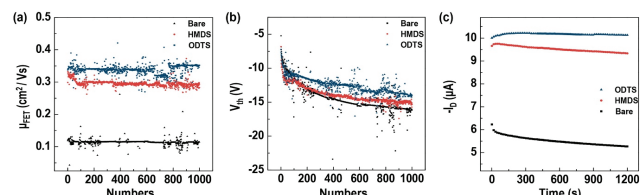


Figure 5. Variations in the performances for (a) μ_{FET} and (b) V_{th} during 1000 operation cycles. (c) Maximum I_D variation of DNTT OFET at $V_G = -40$ V and $V_D = -40$ V for 20 min.

감사의 글

본 연구는 이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의해 진행된 연구결과입니다(과제번호: 20010915).

References

1. Y. H. Lee, M. J. Jang, M. Y. Lee, O. Y. Kewon, and J. H. Oh, *Chem.*, **3**, 724 (2017).
2. Y. Yao, H. Dong, and W. Hu, *Adv. Mater.*, **28**, 4513 (2016).
3. M. J. Kim, S. U. Ryu, S. A. Park, K. W. Choi, T. H. Kim, D. S. Chung, and T. H. Park, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1904545 (2020).
4. D. H. Kwak, Y. N. Seo, J. E. Anthony, S. H. Kim, J. Y. Hur, H. J. Chae, H. J. Park, B. G. Kim, E. H. Lee, S. L. Ko, and W. H. Lee, *Adv. Mater. Interfaces*, **7**, 1901696 (2020).
5. K. H. Kim, J. H. Hong, S. G. Hahm, Y. C. Rho, T. K. An, S. H. Kim, and C. E. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 13481 (2019).
6. H. Chen, M. Hurhangee, M. Nikolka, W. Zhang, M. Kirkus, M. Neophytou, S. Cryer, D. Harkin, P. Hayoz, M. Abdi-Jalebi, C. McNeil, H. Siringhaus, and I. McCulloch, *Adv. Mater.*, **29**, 1702523 (2017).
7. J.T.E. Quinn, J. Zhu, X. Li, J. Wang, and Y. Li, *J. Mater. Chem. C*, **5**, 8654 (2017).
8. S. G. Lee and H. H. Choi, *JAIK*, **20**, 162 (2019).
9. Z. Liu, Z. Yin, S.-C. Chen, S. Dai, J. Huang, and Q. Zheng, *Org. Electron.*, **53**, 205 (2018).
10. E. Y. Shin, H. J. Cho, S. W. Jung, C. D. Yang, and Y. Y. Noh, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1704780 (2018).
11. H. Gao, Y. Qiu, J. Feng, S. Li, H. Wang, Y. Zhao, X. Wei, X. Jiang, Y. Su, Y. Wu, and L. Jiang, *Nat. Commun.*, **10**, 3912 (2019).
12. J. S. Kwon, H. W. Park, D. H. Kim, and Y. J. Kwark, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 5366 (2017).
13. N. M. B. Neto, M. D. R. Silva, P. T. Araujo, and R. N. Sampaio, *Adv. Mater.*, **30**, 1705052 (2018).
14. J. M. Lim and H. H. Choi, *JAIK*, **21**, 129 (2020).
15. G. H. Choi, K. H. Lee, S. T. Oh, J. Y. Seo, C. H. Kim, T. K. An, J. H. Lee, and H. S. Lee, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 10010 (2020).
16. H. J. Park, J. M. Kwon, H. J. Ahn, and S. J. Jung, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 6251 (2019).
17. H. Ye, H. J. Kwon, X. Tang, C. E. Park, T. K. An, and S. H. Kim, *Org. Electron.*, **87**, 105942 (2020).
18. H. J. Kwon, H. Ye, T. K. An, J. S. Hong, C. E. Park, Y. S. Choi, S. J. Shin, J. H. Lee, S. H. Kim, and X. Li, *Org. Electron.*, **75**, 105391 (2019).
19. E. Y. Shin, E. Y. Choi, and Y. Y. Noh, *Org. Electron.*, **46**, 14 (2017).
20. T.K. Rockson, S. H. Baek, H. Y. Jang, G. H. Choi, S. Y. Oh, J. H. Kim, H. W. Cho, S. H. Kim, and H. S. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 10108 (2019).
21. X. Li, S. H. Baek, K. H. Kim, H. S. Lee, and S. H. Kim, *Org. Electron.*, **69**, 128 (2019).
22. H. J. Park, J. M. Kwon, H. J. Ahn, and S. J. Jung, *J. Mater. Chem. C*, **7**, 6251 (2019).
23. H. J. Park, H. J. Ahn, J. M. Kwon, S. J. Kim, and S. J. Jung, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 37767 (2018).
24. B. Han, P. Wang, H. Jin, Z. Hou, and X. Bai, *Phys. Lett. A*, **384**, 126628 (2020).
25. S. T. Oh, G. H. Choi, H. W. Cho, J. Y. Ha, Md. R. R. Khan, and H. S. Lee, *J. Phys. Chem. C*, **124**, 161 (2020).
26. T. K. Rockson, S. H. Baek, H. Y. Jang, S. T. Oh, G. H. Choi, H. H. Choi, and H. S. Lee, *J. Phys. Chem. C*, **122**, 17695 (2018).
27. M. Nakano, I. Osaka, and K. Takimiya, *Adv. Mater.*, **29**, 1602893 (2017).
28. B. B. Patil, Y. Takeda, S. Singh, T. Wang, A. Singh, T. Do, S. P. Singh, S. Tokito, A. K. Pandey, and P. Sonar, *Sci. Rep.*, **10**, 19989 (2020).
29. S. Casalini, C. A. Bortolotti, F. Leonardi, and F. Biscarini, *Chem. Soc. Rev.*, **46**, 40 (2017).
30. S. Kumar, D. Panigrahi, and A. Dhar, *Appl. Surf. Sci.*, **435**, 855 (2018).
31. Y. B. Kim, J. H. Bae, H. W. Song, T. K. An, S. H. Kim, and C. E. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 39493 (2017).
32. M. Nakano, I. Osaka, and K. Takimiya, *Adv. Mater.*, **29**, 1602893 (2016).
33. P. Prisawong, P. Zalar, A. Reuveny, N. Matsuhisa, W. Lee, T. Yokota, and T. Someya, *Adv. Mater.*, **28**, 2049 (2016).
34. J. S. Kim, B. S. Kang, and K. W. Cho, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1806030 (2019).
35. H. Chen, W. Zhang, M. Li, G. He, and X. Guo, *Chem. Rev.*, **120**, 2879 (2020).
36. F. Zhang, E. Mohammadi, X. Luo, J. Strzalka, J. Mei, and Y. Diao, *Langmuir*, **34**, 1109 (2018).
37. S. Wang, S. Zhou, Y. Tong, Z. Song, H. Wang, Q. Tang, X. Zhao, and Y. Liu, *Adv. Mater. Interfaces*, **6**, 1801984 (2019).
38. X. Gu, L. Shaw, K. Gu, M. F. Toney, and Z. Bao, *Nat. Commun.*, **9**, 534 (2018).
39. T. Breuer, A. Karthäuser, H. Klemm, F. Genuzio, G. Peschel, A. Fuhrich, T. Schmidt, and G. Witte, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 8384 (2017).
40. S. Riera-Galindo, F. Leonardi, R. Pfattner, M. Mas-Torrent, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1900104 (2019).
41. X. Ren, K. Pei, B. Peng, Z. Zhang, Z. Wang, X.

- Wang, and P. K. L. Chan, *Adv. Mater.*, **28**, 4832 (2016).
42. J. Takeya, T. Nishikawa, T. Takenobu, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5078 (2004).
43. J. Zessin, Z. Xu, N. Shin, M. Hambsch, and S. C. B. Mannsfeld, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 2177 (2019).