

유기반도체 트랜지스터의 유전체 표면처리 효과

임상철^{***} · 김성현^{*†} · 이정현^{***} · 구찬희^{***} · 김도진^{**} · 정태형^{*}

*한국전자통신연구원 미래기술연구본부

**충남대학교 재료공학과

***경희대학교 디스플레이공학과

Dielectric Surface Treatment Effects on Organic Thin-film Transistors

Sang Chul Lim^{**}, Seong Hyun Kim^{*†}, Jung Hun Lee^{***}, Chan Hoe Ku^{***},
Dojin Kim^{**} and Taehyong Zyung^{*}

*Electronics and Telecommunications Research Institute, Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350

**Department of Materials Science & Engineering, Chungnam National University, Yuseong-gu, Daejeon 305-764

***Information Display Department, Kyung Hee University, Hoegi-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-701

(2005년 1월 6일 받음, 2005년 3월 17일 최종수정본 받음)

Abstract The surface states of gate dielectrics affect device performance severely in Pentacene OTFTs. We have fabricated organic thin-film transistors (OTFTs) using pentacene as an active layer with chemically modified SiO₂ gate dielectrics. The effects of the surface treatment of SiO₂ on the electric characteristics of OTFTs were investigated. The surface of SiO₂ gate dielectric was treated by normal wet cleaning process, O₂-plasma treatment, hexamethyldisilazane (HMDS), and octadecyltrichlorosilane (OTS) treatment. After the surface treatments, the contact angles and surface free energies were measured in order to analyze the surface state changes. In the electrical measurements, typical I-V characteristics of TFTs were observed. The field effect mobility, μ , was calculated to be 0.29 cm²V⁻¹s⁻¹ for OTS treated sample while those for the HMDS, O₂ plasma treated, and wet-cleaned samples were 0.16, 0.1, and 0.04 cm²V⁻¹s⁻¹, respectively.

Key words Organic thin film transistors, O₂-plasma, HMDS, OTS, semiconductors.

1. 서 론

유기 반도체 트랜지스터 (OTFTs)는 저비용, 대면적, 구부림이 가능한 전기 소자의 응용, 능동구동 발광 소자 (active-matrix emissive) 또는 액정평판 패널 디스플레이, 대면적 센서, 생화학 센서, 그리고 radio-frequency identification tags(RFID tags) 등의 구동요소로서 여러 해 동안 실험해 왔다. 펜타센(pentacene: C₂₂H₁₄)은 과학자들과 공학기술자 사이에서 가장 매력적인 관심을 끌고 있는 유기반도체 재료중의 하나이다. 왜냐하면, 펜타센 박막은 전계효과 이동도가 1 cm²V⁻¹s⁻¹ 이상을 가진 OTFT의 채널 층으로써 사용할 수 있기 때문이다.¹⁻³⁾ 이러한 전계효과 전하이동도는 비정질 Si 박막트랜지스터(a-Si-TFTs)와 비교할 만한 수치이며, 액정 디스플레이를 구동하는 박막 트랜지스터로 이용할 수 있다. 그러므로 전하이동도 관점에서 보면 펜타센을 이용한 유기 트랜지스터는 active-matrix display를 구동하는 스위칭 소자로서 사

용 될 수도 있다.

펜타센 박막은 보통 다결정체인데, 이 펜타센 박막은 유기 증기상 증착법²⁾과 열 증착법¹⁻³⁾으로 증착할 수 있다. 다결정 박막은 결정립(grain)과 결정립계(grain boundary)로 구성되어 있는데, 결정립은 반도체 특성을 가진 단결정상이며, 결정립계는 높은 누설전류를 가진 절연 특성을 보이는 비정질이다. 그러므로 OTFT의 성능은 박막 상태에 크게 의존한다. OTFT 소자내의 유기박막은 유기물 반도체와 유전층 사이의 물리적, 화학적인 상호작용의 영향 하에 유전층 위에 제조되므로, OTFT 소자의 성능은 반도체/유전체 계면의 상호작용에 크게 의존한다.⁴⁾

OTFT의 성능은 주로 유기 활성박막의 결정도에 좌우된다. 결정도는 유기박막의 성장공정과 유기박막이 성장된 게이트 절연층의 표면상태에 큰 영향을 받기 때문에 박막성장공정 및 표면상태의 최적화에 연구가 집중되고 있다.⁵⁻⁷⁾ 본 실험에서는 유전층/유기물 계면을 유전층 표면처리 방법을 통해 OTFT 소자의 성능 향상을 하려는데 그 목적이 있다.

†E-Mail : kimsh@etri.re.kr

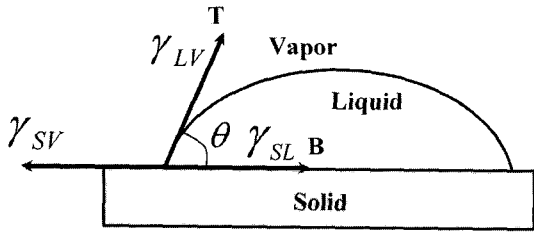


Fig. 1. Schematic diagram for the definition of contact angle. γ_{LV} , γ_{SV} , γ_{SL} and θ represent surface tension of liquid, surface free energy of solid, interfacial tension between liquid and solid, and contact angle, respectively.

고체 표면의 마찰 또는 마모, 삼투성, 유전특성, 젖음성과 화학반응과 같은 표면특성은 표면 분자 집합체 상태에 크게 의존한다.^{8,9)} 그러므로, 박막 위에 분자 집합체 상태의 조절은 고 기능성 표면을 구성하는데 중요하다. 표면특성을 연구하는데 가장 효과적인 방법중의 하나가 접촉각 측정법이다. Fig. 1에 접촉각의 기본 개략도를 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 접촉각은 방울의 각의 접선과 기체, 액체, 고체의 교차점에서 고체 표면의 접선 사이의 각이다. 또한 접촉각은 고체표면의 젖음성의 척도이다. 물과 같은 극성 액체의 경우 작은 접촉각은 고체표면의 표면상태가 친수성(hydrophilic)인 상태를 나타내며, 표면 에너지가 높다는 것을 의미한다. 이와는 반대로, 큰 접촉각은 고체표면의 상태가 소수성(hydrophobic)인 상태를 나타내며, 표면에너지 값이 작다는 것을 의미한다. 표면에너지 값은 접촉각 측정법을 통해 Girifalco-Good-Fowkes-Young Model,¹⁰⁾ Owens-Wendt-geometric mean model,^{11,12)} Wu-harmonic mean model,^{13,14)} Lewis Acid/Base Theory Model^{15,16)} 등 전통적인 측정법으로 계산할 수 있다.

본 논문에서는 유전층을 as-prepared, O₂-plasma처리, hexamethyldisilane((CH₃)₃SiNHSi(CH₃)₃: HMDS)처리, octadecyltrichlorosilane(C₁₈H₃₇SiCl₃: OTS)처리 등 4가지 방법으로 표면처리 한 후 그 특성을 분석하였다. 트랜지스터의 반도체 층은 고진공 속에서 열 증착법으로 펜타센을 증착하여 사용하였다. OTS와 HMDS처리는 산화물을 기본으로 하는 유기 유전층 처리에 이미 넓게 사용되고 있다.¹⁷⁾ 접촉각 측정에 사용된 용액은 두 가지 종류의 극성용액인 탈이온수(deionized water)와 글리세롤(glycerol), 그리고 한가지 비극성 용액인 di-iodomethane을 사용하였다. 따라서 본 실험에서는 유전체의 표면자유에너지와 전하 이동도와의 관계 즉, 게이트 절연막의 표면상태가 소자의 성능에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

기판은 우선 저 저항을 갖도록 도핑된 Si 기판(저항 5-

10 Ωcm)을 기판과 게이트 전극으로 사용하였다. 모든 디바이스의 게이트 유전층은 열증착 방법으로 형성된 300 nm 두께의 SiO₂ (capacitance per unit area, C_o=10 nF/cm²)를 사용하였다. 소오스와 드레인 전극은 lift-off 공정을 이용하여 게이트 유전층 위에 제조하였다. OTFT 디바이스는 전술한 바와 같이 bottom contact 방법을 이용하였는데, 채널 영역의 폭(W)과 길이(L)는 각각 100 μm, 10 μm였다. 소오스와 드레인 전극은 스퍼터링 장치를 사용하여 각 Cr 10 nm/Au 90 nm를 증착하였다. 이때 Cr은 SiO₂ 기판과 Au와의 접촉을 원활하게 하기 위하여 증착하였다. 그 후 모든 기판은 아세톤, 메탄올에 각각 10분씩 초음파 세척을 하였으며, 대부분 기판표면의 유기물 등 잔여 불순물을 제거하였다. 마지막으로 기판을 탈 이온화된 물에 넣어 행군 다음, 고순도 질소가스로 불어 건조하였다. 본 실험에 사용된 유기반도체 트랜지스터의 소자 구조를 Fig. 2에 나타내었다.

유기 트랜지스터 활성층으로 펜타센을 증착하기 전에 SiO₂ 게이트 유전층의 표면상태를 변화시키기 위하여 여러 가지 방법을 통해 표면처리를 하였다. 표면처리는 3가지 종류 인데 O₂-plasma 처리, HMDS 처리, 그리고 OTS 처리이다. Fig. 3(a), (b)에 HMDS, OTS 처리 후 기판에 형성되는 모양을 도식화하여 나타내었다. 탈 이온수로 세척한 SiO₂ 기판은 그 표면에 OH-기가 붙어 있어 극성상태로 존재하게 된다. 이 기판을 HMDS나 OTS 용액에 담그면 HMDS나 OTS의 Si와 기판 표면의 산소(O)가 공유결합을 형성하게 되고, HMDS나 OTS의 alkyl기는 기판 표면의 반대쪽을 향하게 된다. HMDS와 OTS는 alkyl기의 길이 차이는 있지만 기본적으로 같은 방법으로 SiO₂ 표면에 붙는다. SiO₂ 표면에 HMDS나 OTS가 한 층 붙은 후 추가적으로 공급되는 분자들은 화학적으로 결합할 표면이 없으므로 저절로 단분자막(Self-Assembled Monolayer: SAM)을 형성하게 된다. HMDS와 OTS 단분자막은 친수성인 SiO₂ 표면을 소수성으로 바꾸어 주어 소수성인 펜타센 박막과의 결합력을 증가시킨다.

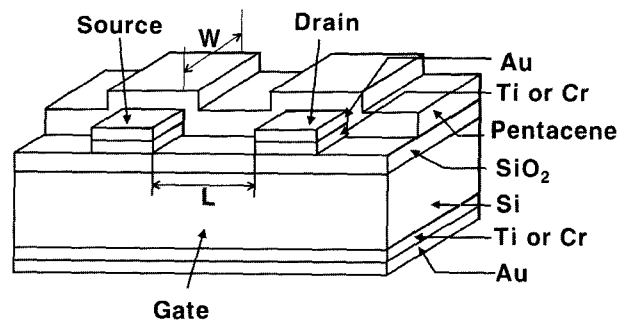


Fig. 2. Device structure of organic thin-film transistor. (Bottom contact: channel width 100 μm, length 10 μm)

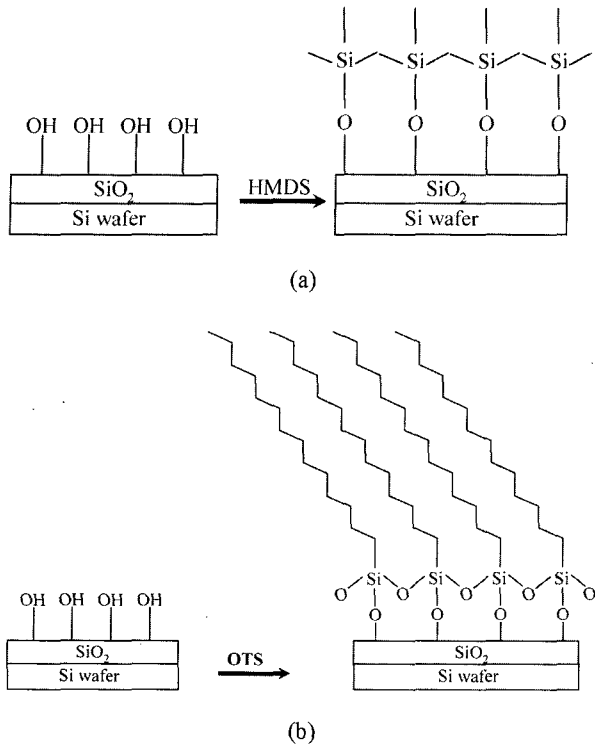


Fig. 3. Schematic diagram for the formation of SAM on SiO₂ surface by (a) HMDS treatment and (b) OTS treatment.

O₂-plasma 처리는 plasma power 50 W, O₂ gas 유량은 5 sccm, 처리시간은 5 min이었다. 여기서 처리시간을 5 min으로 한 것은 여러 가지 O₂-plasma 처리시간 별로 실험을 하여 본 실험에서 최적조건을 확인한 결과이다. 그리고 HMDS 처리는 spin coating 방법으로 3000 rpm에서 35 sec 동안 실시하였다. 마지막으로 OTS 처리는 wet-clean 후 OTS 용액에 10 sec 담근 후 아세톤으로 헹군 다음 질소가스로 건조하여 OTS 처리 시료를 만들었다.

유전체인 SiO₂ 기판의 표면 상태를 분석하기 위해 접촉각 측정을 통해 표면 특성을 관찰하였는데, 접촉각 측정에 탈이온수, 글리세롤, di-iodomethane 등 3가지 용액을 사용하였다. 이는 절연체 기판 표면의 접촉각을 통해 기판의 표면자유에너지를 계산하기 위함이다. 접촉각과 표면자유에너지 측정은 접촉각 측정 시스템 (Phoenix 300, SEO Co. Ltd)으로 측정하였는데 그 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 측정할 시료를 올려놓고, 컴퓨터를 통해 프로그램을 구동시켜 원하는 용액이 들어있는 syringe를 구동시켜 10~15 μl의 용액을 표면처리된 기판 상에 떨어뜨린다. 그 후 CCD 카메라를 통해 이미지를 촬영하여 PC를 통해 파일로 받아 접촉각의 데이터를 얻는다. 이러한 접촉각 데이터를 통하여 표면에너지나 접착력 등의 계산을 수행 할 수 있는 시스템이다.

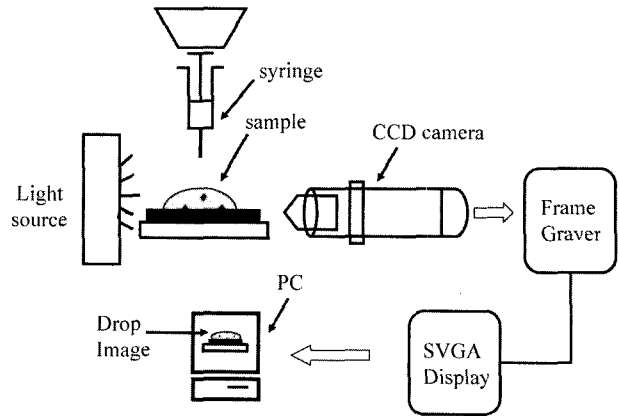


Fig. 4. Description of the system to measure the contact angles.

접촉각 측정에 사용된 3가지 용액은 각각 극성이 다른 물질을 선택하여 물질에 따라 접촉각의 각도를 비교함으로써 보다 정확한 기판의 표면자유에너지를 측정하기 위해 선택하였다. 접촉각은 온도가 22.6°C, 습도는 39%의 실험 분위기에서 측정하였다.

펜타센 박막은 진공 증착 시스템을 이용하여 증착률 1.0 Å/s로 유지하여 전체 박막 두께를 1000 Å까지 증착하였다. 펜타센을 증착하는 동안의 진공도는 5×10⁻⁶ Torr 이하의 압력에서 실시하였다. 유기반도체 트랜지스터 디바이스의 전기적 측정은 Semiconductor Parameter Analyzer (4156C, Agilent)를 이용하여 상온에서 측정하였다. 또한 펜타센 박막의 채널영역(channel area)표면을 전자현미경 (Scanning Electron Microscope: SEM)으로 관찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

여러 가지 기판 표면처리 후에 각각 기판의 액적 사진을 Fig. 5~7에 나타내었으며, 이에 따른 표면자유 에너지 값을 Table 1에 나타내었다. 표면에너지는 사용한 각 액체의 표면장력과 측정한 접촉각을 이용하여 Lewis acid/base model¹⁸⁾으로 계산하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 OTS와 HMDS로 처리한 시료는 O₂-plasma 처리나 wet-cleaned 한 시료보다 접촉각이 더 크고 표면자유에너지가 더 작은 것을 알 수 있다. 이것은 OTS와 HMDS 처리 후 SiO₂ 표면상태가 친수성에서 소수성으로 바뀌었다는 것을 나타낸다.

일반적으로 SiO₂를 포함한 무기물 산화층은 친수성 상태를 나타내는 반면에, 대부분 유기반도체의 경우(이 경우 펜타센) 소수성인 상태를 나타낸다. 그러므로, 이러한 친수성인 물질과 소수성인 물질의 표면 에너지 불일치로 인해 산화막 기판 위에 만들어지는 유기 반도체의 결정성 형성에 나쁜 영향을 가져온다. 따라서, HMDS 와

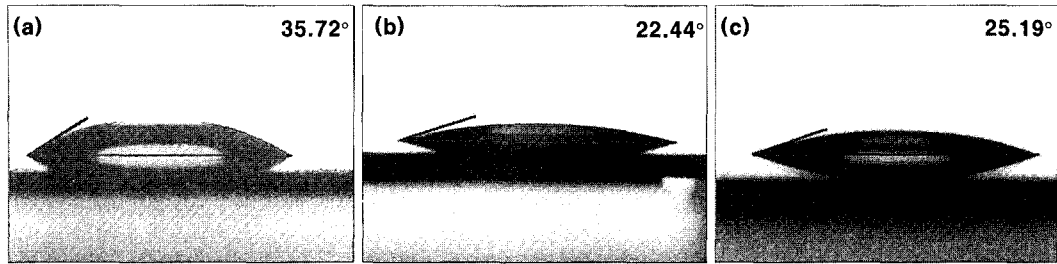


Fig. 5. Photographs for three kinds of liquid drops of different polarity showing different contact angles after wet-cleaning. (a) D. I water, (b) Glycerol, and (c) Di-iodomethane.

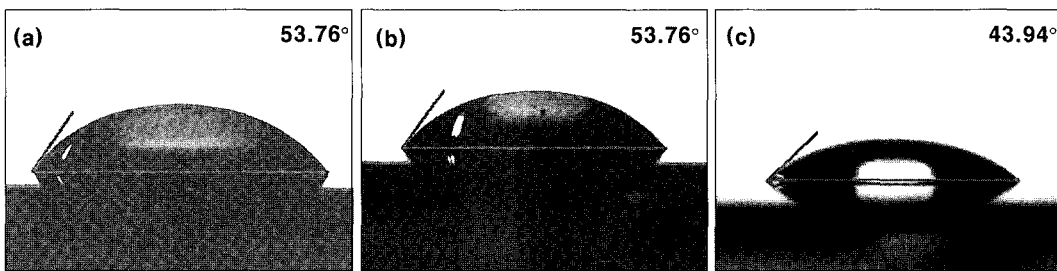


Fig. 6. Photographs of contact angles after HMDS treatment. (a) D. I water, (b) Glycerol, and (c) Di-iodomethane.

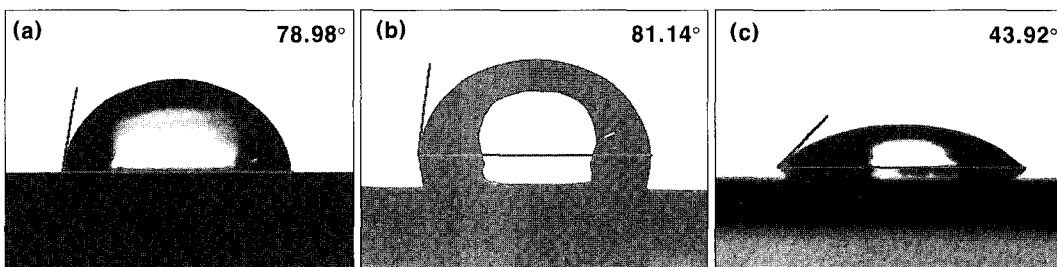


Fig. 7. Photographs of contact angles after OTS treatment. (a) D. I water (b) Glycerol, and (c) Di-iodomethane.

OTS 처리는 친수성인 SiO₂ 표면을 소수성으로 바꾸어주므로 유기 반도체 제조 시 결정성이 증가하며, 전하 이동도도 증가하는 좋은 영향을 미칠 수 있다.⁹⁾

이와는 반대로, O₂-plasma 처리한 SiO₂ 표면은 접촉각이 아주 급격하게 감소하는데, 이는 기판 표면이 아주 극성인 상태 (매우 친수성)임을 나타낸다. 이 경우에 접촉각이 너무 작아서(접촉각 ≤ 10°) 측정할 수 없을 정도였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 기판을 아세톤과 탈이

온수에서 초음파 세척만 한 경우인 as-prepared 시료의 경우 O₂-plasma 처리한 시료에 비해 상대적으로 큰 접촉각을 보이고 있다. 이는 초기 기판을 cleaning 한 후 게이트 유전층 위에 아직도 남아 있는 잔여 유기물의 영향이라고 추측된다.¹⁹⁾ 기판의 잔여 유기물의 양이 감소할수록 접촉각은 감소할 것이라 예상되며, O₂-plasma가 이런 잔류 유기물을 효과적으로 제거해 준다. 또한, O₂ 가스 분위기 하에서 plasma 처리된 기판표면은 매우 활

Table 1. Comparison of contact angles and surface free energies for various SiO₂ substrates.

Surface treatment	Contact angle liquid			Surface free energy (mJ/m ²)
	D.I water	Glycerol	Di-iodomethane	
As-prepared	35.72°	22.44°	25.19°	61.37
O ₂ -plasma treatment	N.A. (< 10°)	N.A. (< 10°)	27.28°	61.36
HMDS treatment	53.76°	53.76°	43.94°	43.57
OTS treatment	78.98°	81.14°	43.92°	28.05

성화된 O-H 결합인 극성 그룹이 SiO₂ 표면에 형성되는데, 이것은 O₂-plasma 처리 후에 왜 기판 표면이 친수성 인가를 보여주는 원인이기도 하다.^{20,21)} 본 실험에서 O₂-plasma 처리한 기판의 표면 접촉각이 탈이온수와 글리세롤 용액 모두 10° 이하로 작게 측정이 되어 정확한 각도를 알 수 없었다. 본 실험에서 사용한 Lewis acid/base model에서 이들 극성액체의 접촉각은 10°에서 5°로 변화하여 입력하여도 계산된 표면자유에너지는 오차 범위에서 큰 변화를 보이지 않았다. 따라서 본 실험에서는 10°를 입력하여 계산하였다.

Fig. 8은 유기반도체 트랜지스터 channel층 영역 펜타센 박막의 전자현미경 사진을 나타낸 것이다. 여기에서 Fig. 8(a), (b), (c), (d)는 각각 as-prepared, O₂-plasma, HMDS, OTS 처리한 기판 위에 펜타센 박막을 증착한 경우이다. 그림에서 어두운 부분이 활성층인 channel area 이고, 밝은 부분이 Au electrode 위에 증착된 부분이다. 그림에서 보는 바와 같이 SiO₂ 위에 증착된 펜타센 결정립의 크기가 전기장을 걸기 위한 소오스와 드레인인 Au 전극 위에 증착된 결정립의 크기보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이로써 Au 전극 위에 펜타센 박막이 형성될 때 핵 생성물이 상대적으로 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 Au 전극과 SiO₂와의 계면에 상대적으로 아주 밝은 이미지를 확인할 수 있는데, 이것은 SiO₂와 Au 사이의 계면에서 유기박막 증착 시 더 두껍게 형성되었기

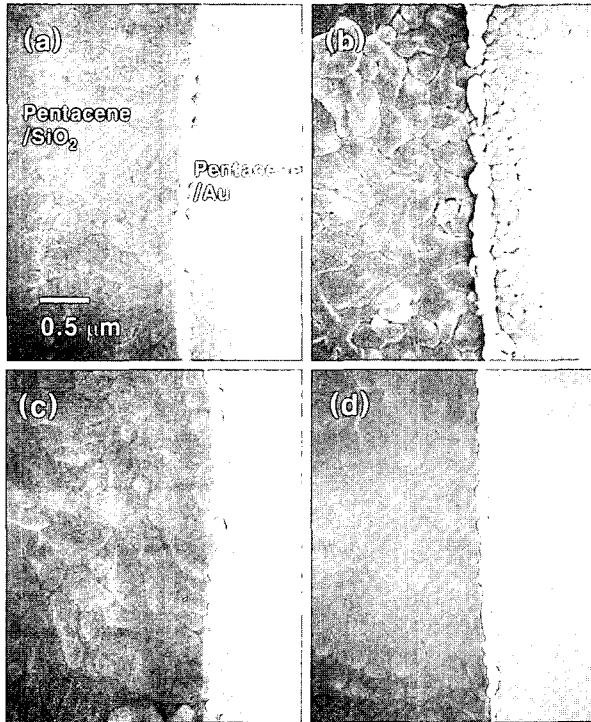


Fig. 8. SEM images of pentacene films deposited on gate dielectrics (a) as-prepared, (b) O₂-plasma treated, (c) HMDS-treated, and (d) OTS-treated.

때문이다. 이는 펜타센의 핵 생성 속도가 다른 지역보다는 이 계면 쪽에서 더 빠르기 때문으로 사료된다. 위에서 언급한 바와 같이 HMDS, OTS 처리한 SiO₂ 기판 표면은 친수성에서 소수성으로 변한다고 하였는데, 본 실험에서는 이 두 가지 표면 처리한 기판의 표면에 형성되는 펜타센 박막의 결정립의 크기 변화가 그렇게 큰 차이가 없다는 것을 관찰 하였다.

Fig. 9는 네 가지 표면처리 한 기판 위에 펜타센을 증착한 후 유기반도체 트랜지스터의 전기적 특성을 측정 한 전형적인 field effect transistor 곡선인 I_D-V_D 그래프이다. 이때 가해진 gate voltage는 0~100 V이며, OTS 처리한 시료가 as-prepared 한 시료보다 포화 전류 값이 거의 7배가 차이가 나는 것을 알 수 있다. Fig. 9(a)는 as-prepared 한 후 펜타센을 증착하여 측정한 전기적 특성 곡선인데 내부의 작은 그래프는 I_{on/off} 특성의 그래프이다. Fig. 9(b), (c), (d)는 각각 O₂-plasma, HMDS, OTS 처리한 후 측정한 트랜지스터 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 표면처리 상태가 친수성 표면에서 소수성 표면으로 변함에 따라 트랜지스터 특성곡선의 I_{DS}도 점점 증가하여 전계효과 전하이동도도 점점 증가하는 것을 알 수 있다. Table 1에서 보여진 것처럼 표면자유에너지와 포화 전류 값을 비교하여 보면 낮은 표면자유에너지를 갖는 시료가 더 높은 포화 전류 값을 갖는 것을 알 수 있다.

유기 반도체 트랜지스터의 전계 효과 전하 이동도는 다음에 주어진 고전적 식

$$I_D = \frac{WC_1}{2L} \mu (V_G - V_T)^2 \quad (1)$$

로부터 계산 될 수 있다. 여기서, W와 L은 소오스-드레인의 폭과 길이이고, μ , C₁, V_T은 각각, 전계효과 전하이동도, 절연체의 단위면적당 정전용량, 문턱 전압이다. 위 식에서 중요한 변수는 축적층(accumulation region)의 전하이동도 μ 이다. Table 2에 네 가지로 표면처리 한 유기반도체 트랜지스터 소자의 전기적 특성을 정리하여 나타낸 것이다.

HMDS와 OTS 처리는 서로 다른 길이의 alkane 사슬을 하고 있으며, 따라서 표면에너지는 이러한 두 가지 샘플에 대한 전계효과 전하이동도로 주어지는 중요한 변수가 되는 것이다. Table 2에서 보는 바와 같이, HMDS 처리한 샘플의 field effect mobility 보다는 OTS 처리한 샘플의 mobility가 더 크다는 것을 알 수 있다. As-prepared의 경우에는 기판표면에 남아 있는 잔여 유기물 또는 불순물 등이 세척 중 완전히 제거가 되지 않아 나쁜 소자의 전기적 특성을 만드는 것으로 사료된다.

O₂-plasma 처리된 샘플은 기판 표면에 남아있는 잔여 유기물을 아주 활성화된 산소로부터 제거 할 수 있으

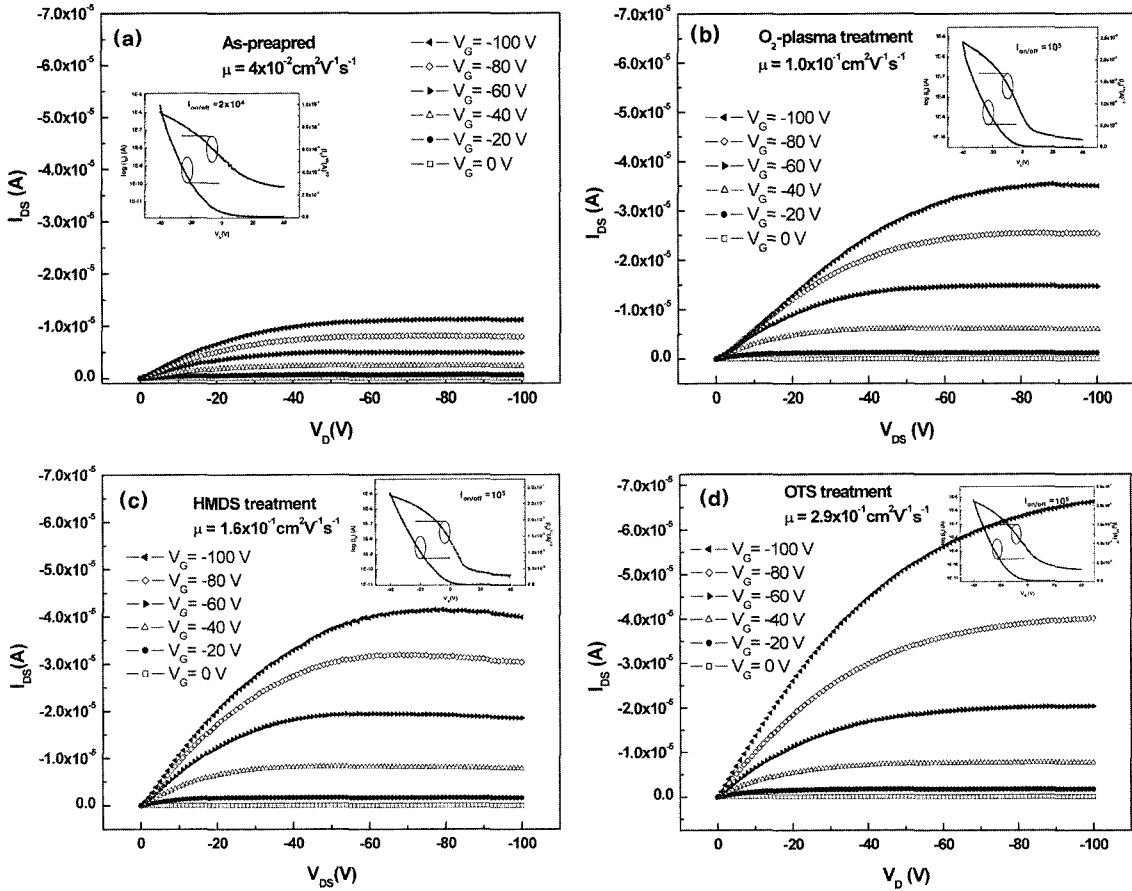


Fig. 9. Plots of drain current (I_D) vs. drain voltage (V_D) with varying gate voltages (V_G) for (a) as-prepared, (b) O_2 -plasma, (c) HMDS, and (d) OTS treated devices.

Table 2. Electrical properties of the devices with various surface treatments.

Condition	V_{TH} (V)	μ (cm^2/Vs)	$I_{on/off}$
As-prepared	-15	4×10^{-2}	2×10^4
O_2 -plasma treatment	-13	1.0×10^{-1}	10^5
HMDS treatment	-10	1.6×10^{-1}	10^5
OTS treatment	-13	2.9×10^{-1}	10^5

며,¹⁹⁾ 이는 접촉각 측정으로부터 관찰 되었다. 기판의 표면상태가 O_2 -plasma 처리 후 완전히 변화된 것이 이를 증명하고 있다. 잔여 유기 오염물질은 다루기가 힘들며, 따라서 as-prepared 샘플은 실험적인 결과에서 무시하기로 하였다. Fig. 10은 전계효과 전하이동도와 표면에너지를 식

$$\mu \approx \frac{10}{E_s} \quad (2)$$

로 fitting한 결과이다. 물론 as-prepared 처리한 샘플

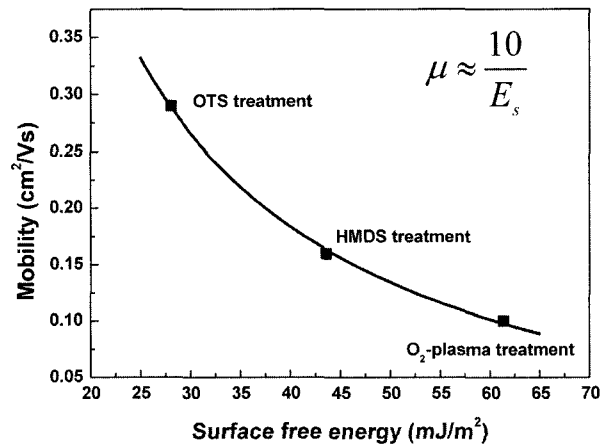


Fig. 10. Field-effect mobility μ of OTFTs vs. surface free energy of SiO_2 induced by various surface treatments.

은 무시하고 나머지 세가지 표면처리 한 결과의 그래프이다. 여기서, μ 는 전계효과 전하이동도이고 E_s 는 표면에너지를 나타낸다. 이상의 분석을 통하여 전계효과 전하이동도는 항상 표면에너지에 반비례 한다고 보여진다. 따

라서 반도체/유전층의 계면상태에 따라 전계효과 전하이동도를 좌우하는 아주 중요한 변수 중의 하나라고 여겨지며, 모든 유기반도체 트랜지스터 제작 시 계면에서의 표면처리가 항상 고려되어야 한다는 것이다.

4. 결 론

펜타센 OTFT는 게이트 유전층 표면상태에 따라 크게 달라진다. 본 논문에서는 SiO₂ 게이트 유전체 기판에 여러 가지 표면처리를 통하여, 활성층 위에 펜타센을 증착하여 OTFT 디바이스를 제작한 후 표면상태 변화에 따른 전기적 특성을 비교하였다. SiO₂ 유전층 표면 처리에 따라 화학적 변화를 줌으로써 전계효과 전하이동도도 증가하는 뚜렷한 특성을 나타내었다. OTS 처리나 HMDS 처리는 소수성을 유도하며, 이러한 self-assembled monolayers법을 사용함으로써 표면에너지가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 따라서 전계효과 이동도도 증가함을 관찰하였다. 가장 높은 전계효과 이동도는 OTS 처리한 샘플에서 $0.29 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 이었다.

게이트 유전체의 표면자유에너지가 OTFT의 성능에 크게 영향을 주는 특정 요소인 것은 확실하다는 것을 확인하였다. 즉, 전계효과 이동도는 펜타센의 결정도에 따라서도 영향을 받지만 펜타센 박막과 게이트 유전체 사이의 계면 상태에도 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nicoles, C. D. Sheraw, M. Bonse and T. N. Jackson, *Solid State Technol.*, **43**, 63 (2000).
2. M. Shtein, J. Mapel, J. B. Benziger and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 268 (2002).
3. D. Knipp, R. A. Street, B. Krusor, A. Volkel and J. Ho, *J. Appl. Phys.*, **93**, 347 (2003).
4. A. Salleo, M. L. Chabinyc, M. S. Yang and R. A. Street, *Appl. Phys.*, **81**, 23 (2002).
5. A. R. Brown, C. P. Jarret, D. M. de Leeuw and M. Matters, "Field-effect transistors made from solution processed organic semiconductors" *Synth. Met.*, **88**, 37 (1997).
6. Y. Lin, D. J. Gundlach, S. F. Nelson and T. N. Jackson, "Stacked pentacene layer organic thin-film transistors with improved characteristics" *IEEE Elect. Dev. Lett.*, **18**, 606, (1997).
7. C. D. Dimitrakopoulos, A. R. Brown and A. Pomp, "Molecular beam deposited thin films of pentacene for organic filed effect transistor applications" *J. Appl. Phys.*, **80**, 2501, (1996).
8. R.H. Tredgold, *Order in Thin Organic Films*, Cambridge University Press, (1994).
9. A. Ulman, *An Introduction to Ultrathin Organic Films: From Langmuir-Blodgett to Self-Assembly*, Academic press, New York, (1991).
10. T. Young, *Philos. R. Soc. Lond.*, **95**, 65 (1805)
11. F. M. Fowkes, *Ind. Eng. Chem.*, **56**, 40 (1964)
12. D. K. Owens and R. C. Wendt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **13**, 1741 (1969)
13. D. H. Kaelble, *J. Adhes.*, **2**, 50 (1970)
14. S. Wu, *J. Polym. Sci, Part C* **34**, 19 (1971)
15. R. F. Gould (Ed.), *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Proceeding of the 144th Meeting of the American Chemical Society, Vol 43, Washington D. C. (1964).
16. R. J. Good, *Contact angle wetting and adhesion: A critical review*, in: K. L. Mimal (Ed.), *Contact angle, Wettability and Adhesion*, USP, The Netherlands, 3-36 (1993).
17. H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nichols, C. D. Sheraw, M. Bonse, T. N. Jackson, *Solid State Technol.* **43**, 63 (2000).
18. K.-X. Ma, C.-H. Ho, F. Zhu and T.-S. Chung, *Thin Solid Films*, **371**, 140-147 (2000).
19. D. Lu, Y. Wu, J. Guo, G. Lu, Y. Wang and J. Shen, *Materials Science and Engineering*, **B97**, 141-144 (2003).
20. X. Li and K. Horita, *Carbon*, **38**, 133 (2000).
21. M. Nakahara, K. Ozawa and Y. Sanada, *J. Mater. Sci.*, **29** 1646 (1994).