

Pentacene을 활성층으로 이용한 유기 TFT의 특성 연구

김영관 · 손병청 · 김윤명* · 표상우*

홍익대학교 화학공학과 · *홍익대학교 전기정보제어공학과
(2001년 5월 30일 접수 ; 2001년 8월 22일 채택)

Study on the Characteristics of Organic TFT Using Pentacene as a Active Layer

Young-Kwan Kim · Byoung-Chung Sohn ·
Yun-Myoung Kim* · Sang-Woo Pyo*

*Dept. of Chemical Engineering, Hongik University, 72-1,
Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea*

**Dept. of Electrical Information & Control Engineering, Hongik University, 72-1,
Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea*

(Received May 30, 2001 ; Accepted August 22, 2001)

Abstract : Organic semiconductors based on vacuum-deposited films of fused-ring polycyclic aromatic hydrocarbon have great potential to be utilized as an active layer for electronic and optoelectronic devices. In this study, pentacene thin films and electrode materials were deposited by Organic Molecular Beam Deposition (OMBD) and vacuum evaporation respectively. For the gate dielectric layer, photoacryl (OPTMER PC403 from JSR Co.) was spin-coated and cured at 220 °C. Electrical characteristics of the device were investigated, where the channel length and width was 50 μm and 5 mm. It was found that field effect mobility was 0.039 cm²V⁻¹s⁻¹, threshold voltage was -8 V, and on/off current ratio was 10⁶. Further details will be discussed.

Keyword : Thin film transistor, photoacryl, pentacene, gate dielectric.

1. 서 론

최근 유기물을 박막트랜지스터(thin film transistor ; 이하 TFT)와 발광다이오드 소자에 응용하기 위한 연구가 활발히 진행중에 있으며, 유기 ELD(electroluminescent device)를 능동구동방식(active matrix)으로 사용하기 위한 TFT

에 대한 다양한 연구가 진행중에 있다. 현재 능동구동소자로는 수소화된 비정질 실리콘 트랜지스터(amorphous silicon thin-film transistors ; a-Si:H TFT)나 다결정실리콘 트랜지스터(polycrystalline silicon TFT)가 사용되고 있다. 그러나 a-Si:H TFT소자는 전계 효과 이동도가 작아서 디스플레이의 대면적화가 어렵다는 단점

을 가지고 있고, 또한 poly-Si TFT소자는 전계 효과 이동도는 크나 소자 공정상 poly-Si층의 균일성에 대한 문제점을 가지고 있어 다른 구동 소자에 대한 연구가 필요하다. 유기물을 이용하여 소자를 제작할 경우 상온에서의 공정이 가능하기 때문에, 유연성이 있고 가벼운 플라스틱 기판의 사용이 가능해지고, 간단한 공정으로 소자를 제작할 수 있으며, 소자 제작비용을 적게 할 수 있는 장점이 있다. 특히 운반체 이동도(carrier mobility)가 높은 것으로 알려진 공액성 고분자(conjugated polymer)와 공액성 소중합체(conjugated oligomer)를 이용한 전계 효과 트랜지스터(field effect transistor)와 유기물에서의 루미네스스(luminescence)를 이용한 발광 다이오드(light emitting diode) 등의 소자 개발에 관심이 집중되고 있다. 이러한 유기 물질의 연구 중에 pentacene은 현재 TFT소자에서의 활성층으로서 많이 사용되고 있는 비정질 실리콘(amorphous silicon)과 비슷한 운반체 이동도를 가질 수 있는 것으로 알려져 있으며 최근 pentacene을 이용하여 운반체 이동도가 $2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 인 TFT의 제작이 보고되었다[1-3].

본 연구에서는 pentacene을 활성층으로 사용하고 기존의 유기 TFT에서 게이트 절연층으로 사용되고 있는 SiO_2 를 대신하여 유기물인 photoacryl (OPTMER PC403 from JSR Co.)을 절연층으로 사용하였다. 알루미늄이나 금을 사용한 전극 부분을 제외한 모든 부분을 유기물로 사용하여 TFT를 제작하였고 소자의 전기적인 특성을 살펴보았다.

2. 실험

Pentacene은 p형 반도체의 특성을 나타내며 박막 형태로 만들어졌을 때 매우 높은 이동도를 가지는 전기적 특성이 우수한 유기물로서 보고되고 있다. 하나의 pentacene 분자는 5개의 방향족 탄화수소(aromatic hydrocarbon)가 연결되어 한 분자를 이룬다[4]. Fig. 1에 채널 형성층으로 사용한 pentacene의 분자구조를 나타내었다. 불순물의 영향을 줄이기 위하여 미리 구입한 pentacene(Aldrich Chemical Co., > 97 % purity)을 vacuum gradient sublimation 공정으로 정제하여 소자 제작에 사용하였다.

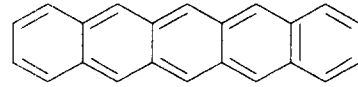


Fig. 1. The molecular structure of pentacene.

유기물의 성막 방법은 유기물의 결정화에 중요한 요소를 차지한다. 단순한 열 증착법으로 성막할 때에는 성막시간의 단축과 방법상 편한 장점이 있지만 성막시 불순물도 함께 성막되기 때문에 막질이 그다지 우수하지 못하다는 단점을 가지고 있다. 활성층의 성막 방법으로는 증착시 나타나는 분자의 손상을 줄이며 유기물질의 결정성 및 표면 균일도를 향상시킬 수 있도록 Organic Molecular Beam Deposition (OMBD)을 사용하였다. 증착에 사용된 OMBD 장비를 Fig. 2에 나타내었다. 분말 형태의 시료인 pentacene을 초고진공 챔버 안에 있는 파이렉스유리로 제작된 Knudsen 셀에 넣고 챔버 외부에서 전류를 인가하여 Knudsen 셀의 온도를 변화시켜 pentacene의 증착 속도를 조절하면서 두께를 제어한다. OMBD장비는 챔버 외부에 터보 분자펌프와 로터리 펌프를 통하여 챔버 내부의 진공도를 10^{-9} Torr 이하로 유지할 수 있으며, 이온 게이지, 시편 홀더, 두께 측정 장치(thickness monitor), Knudsen 셀 등으로 구성되어 있다.

본 연구에서 pentacene의 증착시 진공도는 5×10^{-7} Torr, 증착속도는 0.3~0.7 Å/s 그리고 기판은 상온으로 유지하였다. 성막된 pentacene 막의 두께는 약 1500 Å 정도였으며 두께 측정은 Ellipsometry(Plasmos SD-2100)를 사용하였다. 각 전극은 웨도우 마스크를 사용하여 패턴을 형성하였으며 게이트 전극으로는 알루미늄을, 소스-드레인 전극으로는 금을 사용하여 열진공증착법으로 약 1500 Å 두께로 성막하였다. Photoacryl 은 스펀코팅법으로 약 1.2 μm 두께로 막을 형성하였고, 220 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간동안 열처리하여 게이트 절연층을 형성하였다. 절연층으로 사용한 photoacryl의 유전율은 3.6 이고 $1.6 \times 10^{15} \Omega\text{cm}$ 의 저항값을 가진다. 전극 및 절연층의 두께 측정은 α -step profilometer를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 소자구조를 Fig. 3에 나타내었고, 채널 길이와 폭은 소스-드레인 전극증착시 웨도우 마스크를 사용하여 각각 50 μm 와 5 mm로 하였다.

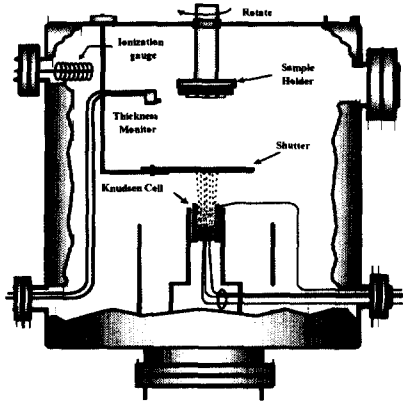


Fig. 2. The scheme of OMBD(organic molecular beam deposition) main chamber.

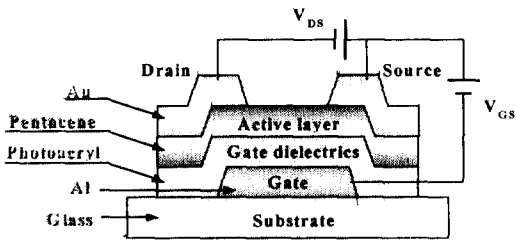
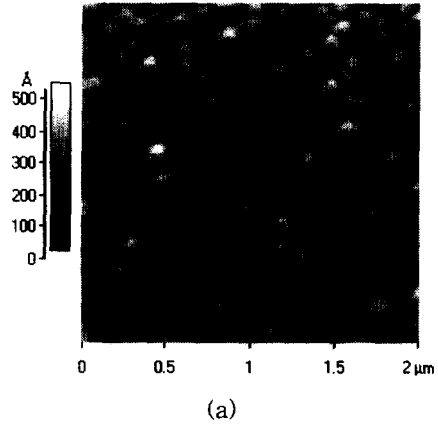
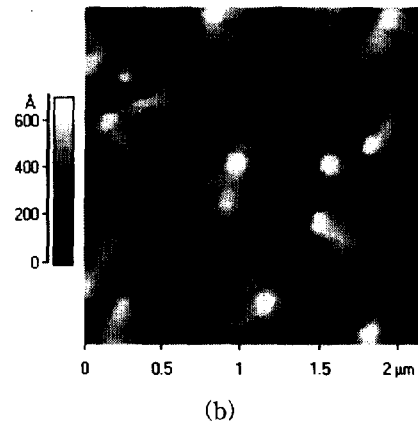


Fig. 3. The device structure of the organic thin film transistor.



3. 결과 및 고찰

Pentacene은 약 $10^{14} \Omega\text{cm}$ 의 저항 성분을 가지기 때문에 본 연구에서 사용된 소자구조에서는 채널 형성층에서 소스-드레인 전극까지의 거리인 pentacene의 두께는 캐리어들의 이동을 방해하여 소자의 전기적 특성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 pentacene의 두께를 줄이면 그 만큼의 저항성분을 줄여 소자의 전기적 특성을 향상시킬 수 있다.

AFM(atomic force microscopy, PSI Autoprobe LS)을 이용하여 800 Å 정도 두께로 성막한 pentacene의 표면형상을 관찰하였으며 Fig. 4에 나타내었다. Pentacene을 glass기판 위에 성막한 것과 photoacryl위에 성막한 것, 그리고 PECVD(physical enhance-ment chemical vapor deposition)로 증착된 SiO₂위에 성막한 것

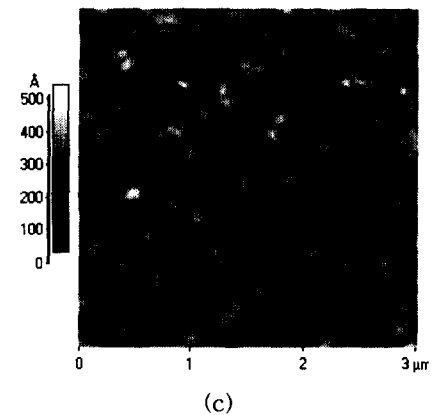


Fig. 4. Surface morphology of pentacene film. (a) Pentacene on the glass substrate, (b) Pentacene on the spin-coated and cured photoacryl, (c) Pentacene on the as-deposited SiO₂.

을 각각 비교하였는데 그레인(grain)을 형성하는 모양과 크기가 각각 다르다는 것을 알 수 있었다. 이것은 pentacene이 올려질 기판의 표면 성질에 따른 차이 때문으로 photoacryl위에 성막된 pentacene막의 그레인의 크기가 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있었다. 그레인 크기가 크다는 것은 결정화가 잘 되었다는 것을 의미하며, 전기적 특성은 그레인 크기가 클수록 우수하다. 전기적 특성은 이동도나 전기전도도 등을 말하며, 보통 그레인의 경계에서 산란 등이 일어나 운반체의 이동을 방해함으로써 전기적 특성을 떨어뜨린다. 그레인 크기가 크면, 그레인의 경계가 적어지게 되고 운반체의 산란 또한 적어지게 되어 전기적 특성은 그레인 크기가 작은 것에 비해 우수할 것이다[5].

Photoacryl을 기존 두께의 반 정도인 0.6 μm 두께로 성막한 후 MIM(metal-insulator-metal)구조를 사용하여 절연과괴 실험을 하여 Fig. 5에 나타내었다. 필요로 하는 동작 전압영역에서 절연과괴현상이 일어나지 않았기 때문에

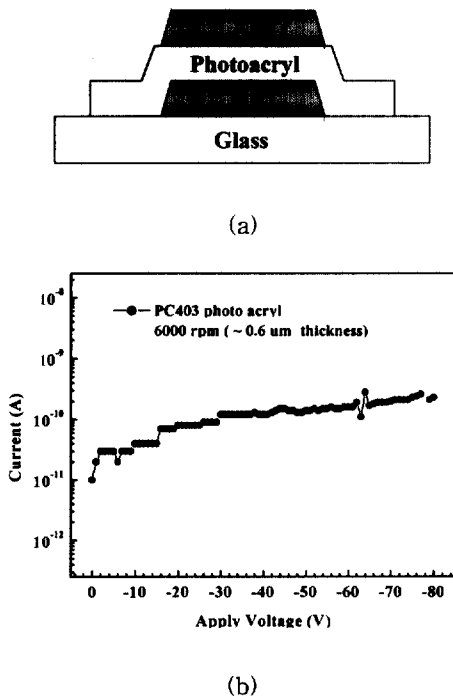


Fig. 5. Photoacryl MIM structure and electrical characteristic. (a) MIM device structure, (b) I-V electrical characteristic of MIM device.

photoacryl 게이트 절연층의 두께를 줄여 소자를 제작 할 수 있게 되었으며, 절연층의 두께가 줄어들면서 더 낮은 동작 전압 영역에서 채널층에 캐리어들이 축적 되므로 TFT 동작 특성도 향상될 것으로 사료되었다.

본 연구에서 제작된 pentacene TFT 소자의 전기적 특성을 알아보기 위하여 소자의 전달 특성과 출력 특성을 Keithley 238, 617 source-measurement unit을 사용하여 각각 측정하였다. Pentacene은 p형 반도체 특성을 가지기 때문에 다수캐리어(majority carrier)는 정공(hole)이 되고, 유기 박막 트랜지스터는 활성층에 carrier들이 모이는 축적 모드(accumulation mode)에서 동작하기 때문에 소스 전극을 공통 전극으로 하고 게이트 전극과 드레인 전극에 음의 전압을 인가하여 전기적 특성을 측정하였다.

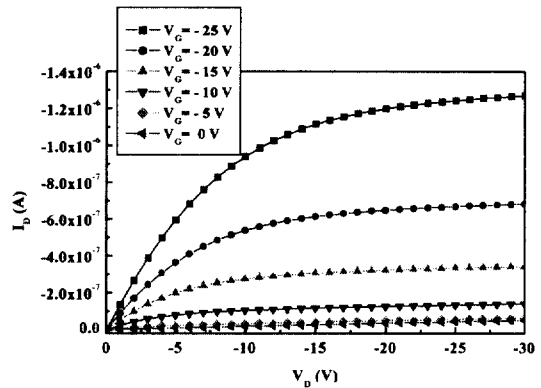
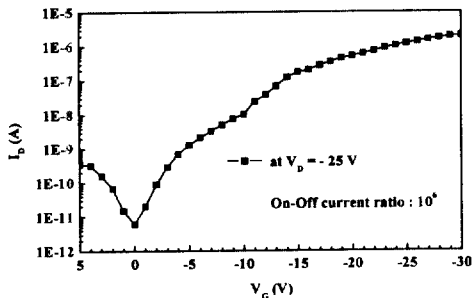


Fig. 6. The electrical output characteristics of the organic TFT.

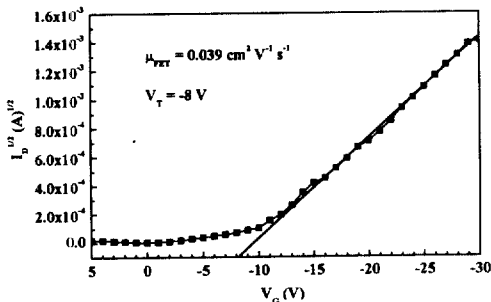
Fig. 6은 본 연구에서 제작한 유기 박막 트랜지스터의 출력 특성을 나타낸 것이다. 게이트 전압(V_G)을 -5 V, -10 V, -15 V, -20 V, -25 V 로 각각 인가하여, 드레인 전압(V_D)의 증가에 대한 드레인 전류(I_D)의 변화와 포화되는 트랜지스터의 전형적인 출력 특성을 얻을 수 있었다. 이로부터 게이트 전압이 상승함에 따라 TFT의 활성층인 pentacene에서 채널이 형성되어 드레인 전류가 흐르게 되고 일정 드레인 전압에 도달하면 포화되는 특성을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7(a)는 본 연구에서 제작한 유기 박막 트랜지스터의 전달 특성을 나타낸 것이다. 드레인 전극과 소스 사이의 전압(V_D)을 -25 V 로 고정시

키고 게이트 전압을 +5 V 에서 -30 V 까지 변화시켰을 때 나타나는 드레인 전류의 변화를 나타낸 것이다. 그래프에서 $V_G = 0$ V 일때를 소자가 정지(off)되었고, $V_G = -30$ V일 때 소자가 동작(on)되었다고 본다면, on-off 될 때 log스케일의 드레인 전류 차를 계산하면 약 10^6 정도가 되는 것을 알 수 있으며, 이것을 TFT 동작 특성 중에 on-off current ratio라 한다.



(a)



(b)

Fig. 7. The electrical transfer characteristics of the organic TFT. (a) $\log(I_D)$ - V_D characteristic at $V_D = -25$ V, (b) square root(I_D)- V_G characteristic at $V_D = -25$ V.

유기 TFT 소자의 문턱 전압(threshold voltage, V_T)과 전계 효과 이동도(field effect mobility, μ_{FET})는 다음과 같은 수식들을 이용하여 얻어질 수 있다. 식 (1)은 선형 영역(linear region)에서 드레인 전류를 나타내고, 식 (2)는 포화 영역(saturation region)에서 드레인 전류를 각각 나타낸다[6].

$$(1) \quad I_D = \frac{W}{L} C_I \mu_{FET} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right]$$

$$(2) \quad I_D = \frac{W}{2L} C_I \mu_{FET} (V_G - V_T)^2$$

수식에서 μ_{FET} 는 전계 효과 이동도(field effect mobility)이고 W 는 채널의 폭, L 은 채널의 길이를 나타낸다. 또한 C_I 는 단위 면적당 절연체의 캐패시턴스 성분이며 V_T 는 문턱전압, V_G 는 게이트 전압, V_D 는 드레인 전압을 각각 나타낸다. 소자의 채널 길이 $L = 50 \mu\text{m}$, 채널 폭 $W = 5 \text{mm}$, 게이트 절연체의 캐패시턴스 $C_I = 2.656 \text{ nF/cm}^2$ ($f=100 \text{ kHz}$)이다. Fig. 7(b)는 게이트 전압 V_G 에 대한 $I_D^{1/2}$ 의 특성 곡선을 나타낸 것이며, linear fitting했을 때 나타나는 기울기 값과 포화영역에서의 드레인 전류 관계식 (2)를 사용하여 pentacene TFT 소자의 전계 효과 이동도를 계산하면 $\mu_{FET} = 0.039 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 이다. 그리고 특성 곡선을 linear fitting했을 때 드레인 전류가 상승하기 시작하는 지점의 게이트 전압(V_G)값은 문턱 전압을 나타내는데, $V_T = -8$ V 로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 유기물 반도체 중에서 전기적 특성이 우수한 pentacene을 활성층으로 사용하고 게이트 절연층으로 간단한 스프린코팅과 경화 과정으로 성막할 수 있는 photoacryl(OPTMER PC403 from JSR Co.)을 이용하여 유기 박막 트랜지스터를 제작하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제작된 유기 박막 트랜지스터의 전기적 특성은 전계효과 이동도가 $\mu_{FET} = 0.039 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 이었고, 문턱전압값은 $V_T = -8$ V, on/off current ratio 는 10^6 이었다.
2. 소자의 전극부분을 제외한 모든 부분을 유기물화 하는데 중점을 두었기 때문에 기존의 TFT에서 게이트 절연층으로 silicon dioxide 라는 무기물을 사용하는 것에서 photoacryl 유기물 게이트 절연층으로 바꾸었다.
3. 활성층을 채널층에 맞도록 패터닝 시켜 성막하면 채널층 밖으로 흐르는 누설전류를 감소시킬 수 있어 전기적 특성을 향상시킬 수

있을 것이며, 활성층인 pentacene막과 절연층인 photoacryl막의 두께를 줄여 동작전압을 낮출 수 있을 것이다.

4. 소자 제작시에 게이트 절연층과 활성층 사이의 불순물의 영향을 줄이고 활성층을 성막할 때 기판에 적절한 온도를 줌으로써 pentacene의 결정성을 향상시키면 더 좋은 전기적 특성을 얻을 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 홍익대학교 학술 연구조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. A. R. Brown, A. Pomp, C. M. Hart, and D. M. de Leeuw, *Science*, **270**, 972 (1995).
2. H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nichols, and T. N. Jackson, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **46**(6), 1258 (1999).
3. J. A. Rogers, Z. Bao, M. Meier, A. Dodabalapur, O. J. A. Schueller, and G. M. Whitesides, *Synthetic Metals*, **115**, 5 (2000).
4. A. Dodabalapur, L. Torsi, and H. E. Katz, *Science*, **268**, 270 (1995).
5. D. J. Gundlach, Y. Y. Lin, and T. N. Jackson, *IEEE Electron Device Lett.*, **18**, 87 (1997).
6. G. Horowitz, M. E. Hajlaoui, and R. Hajlaoui, *J. Appl. Phys.*, **87**(9), 4456 (2000).