

포토리소그래피를 이용한 P3HT 활성층의 패터닝에 대한 연구

Study on Photolithographic Patterning for P3HT Active Layer

박경동¹, 남동현¹, 박정환¹, 한교용^{2,a}

(Kyeong-Dong Park¹, Dong-Hyun Nam¹, Jeong-Hwan Park¹, and Kyo-Yong Han^{2,a})

Abstract

We studied on possibility of the application of photolithography technique to patterning the organic active layer poly(3-hexylthiophene) (P3HT). In the case of selective etching method, we made thin oxide film on P3HT thin film using O₂ treatment. We achieved the field-effect mobilities in the saturation regime $\sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, I_{on/off} ratios $\sim 10^5$ in the selective etching method, $\sim 7.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, I_{on/off} ratios $\sim 5 \times 10^3$ in the lift-off one. These values are higher than ones of the unpatterned P3HT-based OTFTs. On the basis of the above results, we demonstrate the photolithographic patterning for P3HT active layer is successfully carried out without degradation of P3HT.

Key Words : P3HT, Poly(3-hexylthiophene), Patterning, Photolithography, OTFT

1. 서론

1970년대 최초의 공액성고분자 (conjugated polymer)인 polyacetylene[1]의 등장과 이를 기반으로 한 전계효과트랜지스터 (FET)의 개발 후[2], polythiophene[3], polyphenylenevinylene (PPV)[4], phthalocyanine[5] 등을 거치며, 1990년대에 이르러 공액성 소중합체 (conjugated oligomer) 중의 하나인 sexithiophene의 전하 이동도가 수소화된 비정질 실리콘 (a-Si:H)의 그것에 근접함으로 인해[6] 유기 박막트랜지스터에 대한 연구가 본격적으로 시작되었고, 현재 pentacene, poly(3-hexylthiophene)를 이용한 유기 박막트랜지스터 (OTFT)의 소자 성능은 수소화된 비정질 실리콘 박막트랜지스터 (a-Si:H TFT)의 그것을 능가하는 연구 결과를 낳았다 [7-10]. 이와 같은 유기 박막트랜지스터는 유기 EL의 능동 구동소자에서부터 두루마리 TV, 차세대 스마트카드와 같은 정보처리용 집적회로 등에 적

용이 가능하므로 그에 대한 연구가 현저하게 주목되고 있다[11-13].

OTFT의 연구는 크게 재료분야와 공정분야로 나눌 수 있다. 재료분야에서는 새로운 고분자 물질의 개발, 높은 절연율 (dielectric constant)을 가지는 절연체 연구[14], 그리고 C-V 이력현상 (hysteresis)을 줄이고 절연체 간의 계면 효과를 증진시키기 위한 자가 조립 단분자막 (Self-Assembled Monolayer) (SAM)의 연구[15] 등이 활발히 진행되고 있으며, 공정분야에서는 유기반도체와 소스와 드레인 전극 사이의 저항성 접촉 (Ohmic contact) 구현[16], 소자의 구조 개발, 유기 활성층의 패터닝 기술 등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이와 같은 다양한 연구 분야 중에서 유기 활성층의 패터닝 (patterning)에 대한 가능성은 대면적이고 저렴한 OTFT의 실현을 위해 중요한 연구 단계 중의 하나이다.

지금까지 유기반도체의 패터닝 기술에 대해 간략히 살펴보면, pentacene 등의 저분자 (small molecular)물질은 새도 마스크 (shadow mask)를 이용한 진공 증착방법이 여러 논문에서 교과서적으로 사용되었으며, 그 밖에 screen printing[17], ink-jet printing[18,19], photochemical crosslinking [20], imprint lithography[21] 등의 다양한 방법이 연구되어 왔다. 하지만 이러한 기술들은 저렴하고,

1. 영남대학교 대학원 전자공학과
(경북 경산시 대동 214-1)
2. 영남대학교 전자정보공학부
a. Corresponding Author : kyhan@yumail.ac.kr
접수일자 : 2007. 1. 9
1차 심사 : 2007. 3. 16
심사완료 : 2007. 3. 22

대면적의 OTFT의 실현을 위해 더 많은 연구와 시간이 필요하다. 이에 비해 포토리소그래피(photolithography)[22]는 CMOS 기술의 기반 위에 이론적, 실험적으로 잘 정립되어 있으며, 현재 그 기술이 완숙 단계에 도달하였기에 다른 패터닝 기술에 비해 연구에 대한 시간이나 투자를 줄일 수 있다. 그러나 P3HT와 같은 공액성 고분자는 빛에 의한 그 물질 본연의 전기적 성능 저하(performance degradation)[23] 또는 용매(solvent)에 민감한 특성으로 인한 화학적 반응(chemical reaction)으로 인해[24], 포토리소그래피 기술을 적용시킨 연구사례가 거의 없었고, 비록 이 기술을 사용하여 보고된 논문에서는 parylene-C[polypara-xylylene]막의 도포[25]나 유기 반도체의 화학적인 조작(chemical modification)[26]으로 인해 추가적이고 번거로운 공정이 필요함으로 위에서 언급한 포토리소그래피 그 자체의 장점을 살릴 수 없다.

따라서 본 논문에서는 포토리소그래피 기술을 사용하여, OTFT 소자의 전기적 성능저하 없이 P3HT 유기 활성층의 패터닝 가능성에 대해 연구하였다. 이를 검증하기 위해 선택적 식각 방법과 lift-off 방법으로 유기 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT를 제작하고, 그것의 전기적 특성의 성능을 유기 활성층이 패터닝 되지 않은 P3HT-OTFT의 그것과 비교하였다.

2. 실험

2.1 공통 게이트 전극을 가지는 하부 전극 구조의 P3HT-OTFT 제작

본 연구에서 사용된 하부 전극 구조(Bottom Contact) (BC)의 OTFT[27]는 그림 1과 같다. 이 소자의 제작 순서는 높은 농도의 붕소(Boron)로 도핑된 p-type 실리콘(resistivity: 0.012-0.2 Ω cm)에 1000 Å의 SiO₂가 건식산화(dry oxidation)로 성장된 기판을 구입하여, 기판 뒷면을 BOE (HF: NH₄F= 1:7)로 90초 동안 식각하고 난 후, 공통 게이트 전극(common gate electrode)으로 알루미늄(Al) 2000 Å을 진공 증착 시킨다. 소스와 드레인의 전극을 형성하기 위해 lift-off 방법으로 1000 Å의 금(Au)을 진공 증착시킨 후, hexamethyldisilazane(HMDS)를 4000 rpm에 60초의 스핀코팅 조건으로 도포하였다.

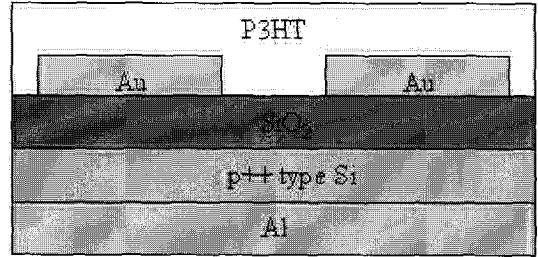


그림 1. 하부 전극 구조의 OTFT.

Fig. 1. OTFT with Bottom Contact (BC) configuration.

용해 공정(solution process)을 위한 P3HT 용매로서 무수의 클로로포름(CHCl₃, Aldrich, anhydrous > 99 %)을 정제 없이 사용하여, 이를 P3HT에 무게 백분율(wt%)로 용해시키고, 유공도가 0.2 μ m인 PTFE 시린지 필터를 사용하여 잔존 입자를 제거하였다. 활성층의 박막은 P3HT용액(P3HT: CHCl₃=2 mg/1 ml: 0.134 wt%)을 2000 rpm에 60초의 스핀코팅 속도로 얻었고, 120 °C에서 1시간동안 열처리(annealing)하였으며, 천천히 대기온도 까지 냉각(cooling)시켰다.

2.2 선택적 식각 방법으로 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT 제작

선택적 식각(selective etching)방법으로 활성층이 패터닝된 OTFT의 공정을 그림 2에서 간략히 나타내었다. 선택적 식각 방법의 경우, P3HT 박막은 본 실험에서 사용된 양성감광제(AZ 1512)와 낮은 접착력(adhesive strength)을 보였다. 이를 해결하기 위해, P3HT-OTFT 소자 성능에는 영향을 주지 않는 조건의 산소를 노출시켜 양성감광제를 P3HT 박막 위에 스핀코팅으로 도포하였다. 양성감광제가 도포된 P3HT 활성층을 패터닝하기 위해, 소프트 베이크, 노광, 현상, 하드 베이크 순서대로 공정을 진행하고, 클로로포름을 이용하여 채널을 제외한 나머지 부분의 P3HT를 식각하고, 잔존 감광제를 제거하였다. 이어서 120 °C에서 1시간 동안 열처리하였으며, 천천히 대기온도 까지 냉각시켰다.

2.3 Lift-off 방법으로 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT 제작

그림 3에서는 lift-off 방법으로 활성층이 패터닝된 OTFT의 공정을 간략히 나타내었다.

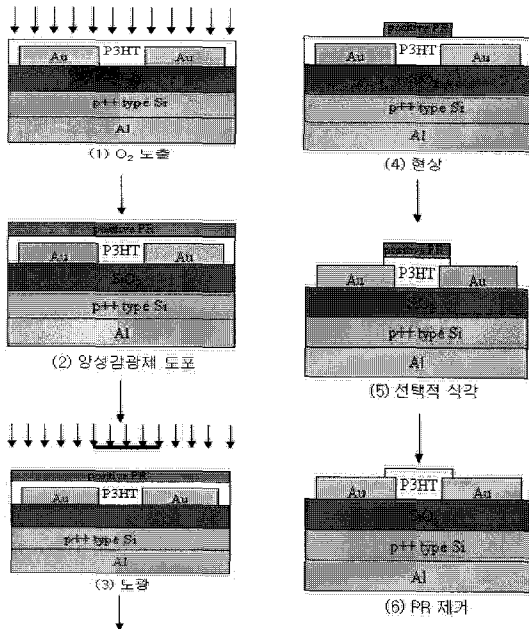


그림 2. 선택적 식각 방법으로 활성층이 패터닝된 OTFT.

Fig. 2. Patterned P3HT-based OTFT by selective etching method.

Lift-off 방법의 경우는 소스와 드레인의 전극을 형성한 다음 포토리소그래피 공정을 이용하여 일반적인 (standard)방법[28]을 사용하여 P3HT 활성층을 패터닝 하였다. 그리고 120 °C에서 1시간 동안 열처리하였으며, 천천히 대기온도 까지 냉각시켰다.

2.4 제작된 OTFT의 성능 측정

본 연구에서 사용된 P3HT는 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_{fe})는 다음의 수식을 이용하여 얻었다[29].

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

이 수식에서 μ_{fe} 는 전계효과 이동도, C_{ox} 는 절연체의 단위 면적당 커패시턴스, V_{th} 는 문턱전압, W

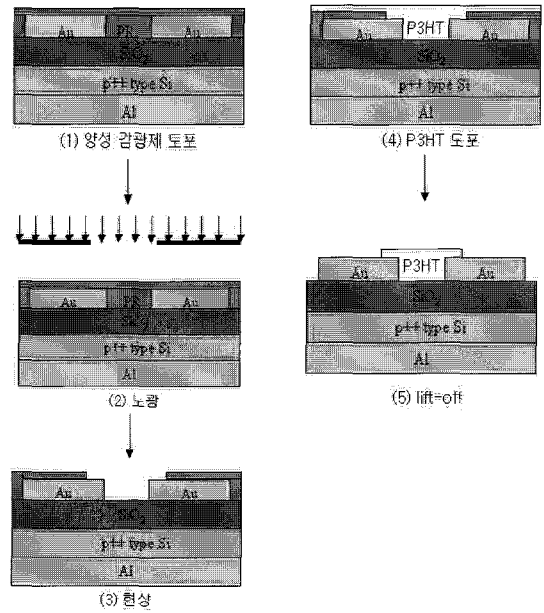


그림 3. 리프트오프 방법으로 활성층이 패터닝된 OTFT.

Fig. 3. Patterned P3HT-based OTFT by lift-off method.

와 L은 각각 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.

한편 본 연구에서 사용된 모든 유기박막트랜지스터는 클린룸에서 제작되었으며, 그 측정은 암실의 일반적인 대기 환경에서 HP 4155A 반도체 소자 분석기 (Semiconductor Parameter Analyzer)를 통해 20분 이내에 이루어졌다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공통 게이트 전극을 가지는 하부 전극 구조의 P3HT-OTFT 특성

그림 4(a)는 활성층이 패터닝 되지 않은 소자의 다양한 게이트 전압 (V_{GS})에 따른 드레인 전압 (V_{DS})에 대한 드레인 전류 (I_{DS})의 그래프 (출력 특성)를 나타내고, 그림 4(b)는 일정한 드레인 전압 ($V_{DS} = -40$ V)에서 게이트 전압 (V_{GS})에 대한 드레인 전류 (I_{DS})의 그래프 (전달 특성)를 나타낸

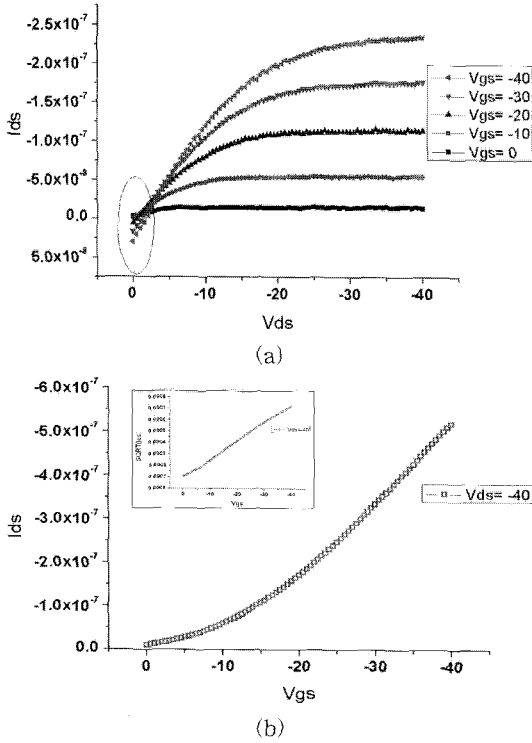


그림 4. 활성층이 패터닝 되지 않은 OTFT의 출력 특성 (a) 과 전달 특성 (b)의 삽입 그림은 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 의 그래프를 나타냄). (채널 폭이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 7.56 \text{ V}$, 전계효과이동도: $2.76 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 전류점멸비: 46)

Fig. 4. Output (a) and Transfer (b) characteristic of unpatterned P3HT-based OTFT(Inset of (b) means $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ graph). (W: 2 mm, L: 45 μm) $V_{th} = 7.56 \text{ V}$, $\mu_{fet} = 2.76 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $I_{on/off}$ ratio= 46

다. 그림 4(a)에서 소스와 드레인의 전위차가 없을 때 ($V_{ds}=0$), 게이트 절연층 (SiO_2)을 통한 누설전류(leakage current)로 보이는 오프셋 드레인 전류(offset drain current)가 나타났으며[30,31], 이 값은 게이트 전압 (V_{gs})이 커질수록 증가하는 현상을 보였다. (그림 4(a)의 타원 내의 그래프 참조) 따라서 차단상태 (off-current)에서 전류의 증가로 인해 낮은 전류점멸비 ($I_{on/off}$ ratio)의 결과를 초래하였다. 이러한 현상은 제작된 OTFT 소자가 반전

층 (inversion layer)에서 전도채널이 형성되는 MOSFET과 달리 축적층 (accumulation layer)에서 그것이 형성되며, 공통 게이트 전극을 사용하기에 게이트 전압을 인가하였을 때 활성층 (채널영역) 뿐만 아니라 디바이스 전체에 홀이 축적되어 소스와 드레인의 확장효과를 가져와서 게이트 절연층을 통한 전류가 증가되었다고 설명되어진다 [32]. 따라서 공통 전극 게이트를 가지는 하부 전극 구조의 OTFT가 높은 전류점멸비를 얻기 위해서는 채널영역을 제외한 여분의 P3HT 박막을 제거하여야 한다. 본 논문에서는 채널 영역 (활성층)을 패터닝 하는 방법으로 선택적 식각(Selective etching) 방법과 리프트오프 (Lift-off) 방법의 포토 리소그래피 기술을 이용하였다.

3.2 선택적 식각 방법으로 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT의 특성

선택적 식각 방법으로 P3HT 활성층을 패터닝하기 위해서는 P3HT 박막 위에 감광제를 스핀코팅으로 도포하여야 하는데 (그림 2(2)), 본 실험에서는 P3HT 박막이 양성 감광제 (AZ 1512)와의 낮은 접착력으로 인해 스핀코팅 작업의 재현성이 상당히 떨어졌다. 또한 P3HT 박막이 양성 감광제와의 직접적인 접촉으로 인해 P3HT에 좋지 않은 영향을 받을 수 있다. 이를 해결하기 위해 P3HT 박막 위에 일정시간의 산소를 노출시켜 얇은 산화막을 형성한 후, 스핀코팅으로 양성 감광제를 P3HT 박막위에 도포시켰다. 그림 5는 활성층을 패터닝하기 위해 일정한 산소를 노출시켜((a) 250 mTorr에서 90초, (b) 250 mTorr에서 180초) 제작된 OTFT 소자의 출력 특성을 나타낸다.

그림 5(a)와 (b) 모두 출력 특성 그래프에서 포화영역이 선명히 나타나지 않았고, 산소의 노출시간이 길어질수록 이러한 현상이 더욱 현저히 나타났다. 이는 P3HT가 산소의 도핑효과로 인해 P3HT 박막의 bulk conductivity 증가되어 채널의 핀치오프 (pinch-off) 상태에서도 상당한 bulk current가 흐르기 때문이라고 생각된다. 이러한 bulk current의 증가로 인한 활성층이 패터닝 되지 않은 OTFT는 평균적으로 낮은 전류점멸비와 전계효과 이동도를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 P3HT와 양성 감광제 사이의 접착력을 높이고, 전기적인 성능의 저하가 없는 최적의 산소 노출시간 (250 mTorr 60초)을 실험적으로 구하였으며, 선택적 식각 방법으로 활성층이 패터닝된 모든

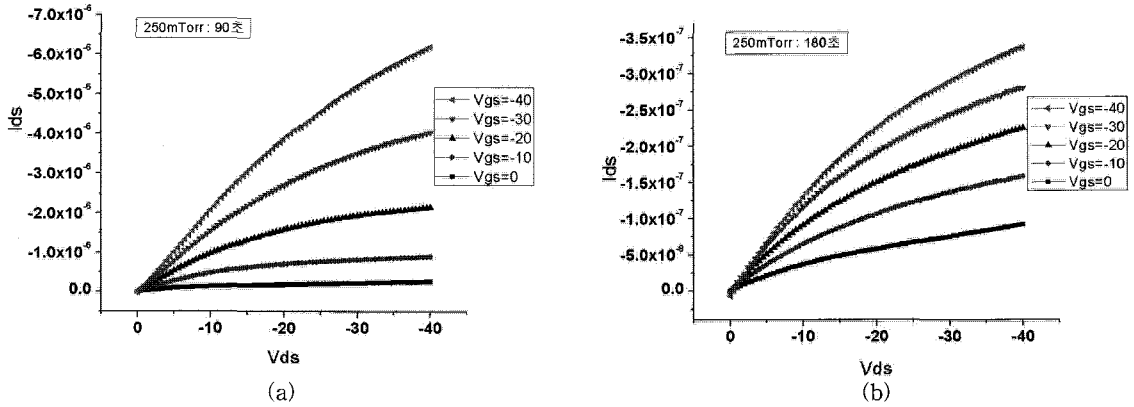


그림 5. 산소 노출을 이용하여 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT의 출력 특성.

- (a) (채널 넓이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 2.71 \text{ V}$, 전계효과이동도: $6.11 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 전류점멸비: 48)
- (b) (채널 넓이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 29.7 \text{ V}$, 전계효과이동도: $4.35 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 전류점멸비: 6.7)

Fig. 5. Output characteristic of patterned P3HT-OTFT by O_2 treatment.

- (a) (W: 2 mm, L: 45 μm) $V_{th} = 2.71 \text{ V}$, $\mu_{\text{fet}} = 6.11 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $I_{\text{on/off}}$ ratio= 48
- (b) (W: 2 mm, L: 45 μm) $V_{th} = 29.7 \text{ V}$, $\mu_{\text{fet}} = 4.35 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $I_{\text{on/off}}$ ratio= 6.7

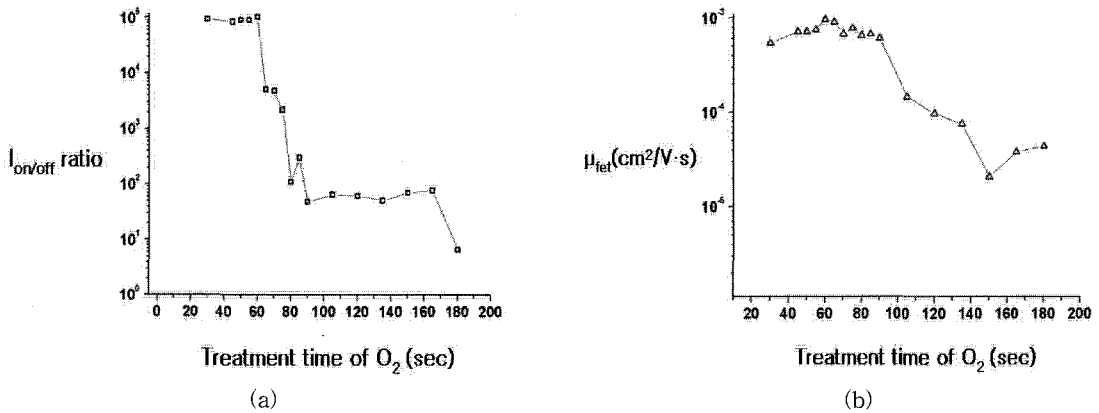


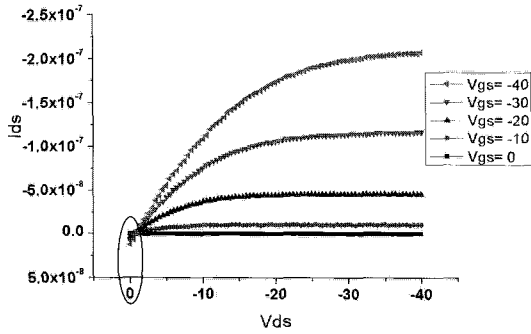
그림 6. 산소의 노출시간에 따른 전류점멸비 (a)와 전계효과 이동도(b).

Fig. 6. $I_{\text{on/off}}$ ratio (a) and field-effect mobility (b) to O_2 treatment time.

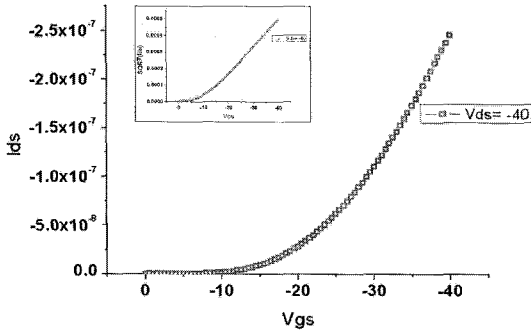
P3HT-OTFT는 이 조건으로 제작되었다. 그림 6은 산소의 노출시간에 대한 전계효과 이동도 (a)와 전류점멸비 (b)와의 관계를 나타내었다. 그림 7(a)와 (b)는 선택적 식각 방법으로 활성층이 패터닝된 유기 박막트랜지스터의 출력 특성과 전달 특성을 나타내는 그래프이다.

3.3 Lift-off 방법으로 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT의 특성

그림 8(a)와 (b)는 lift-off 방법으로 활성층이 패터닝된 유기 박막트랜지스터의 출력 특성과 전달 특성을 나타내는 그래프이다. lift-off 방법을 이용한 P3HT 유기 활성층 패터닝은 OTFT 소자의



(a)



(b)

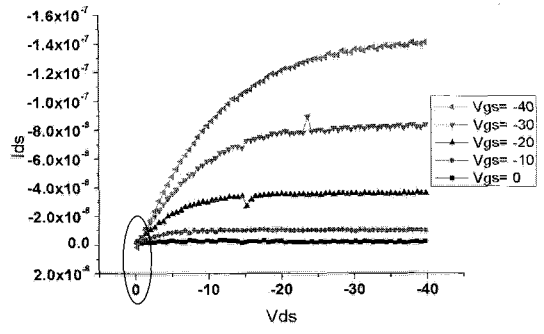
그림 7. 선택적 식각 방법을 이용하여 P3HT 활성층이 패터닝된 소자의 출력 특성 (a)과 전달 특성 (b)((b)의 삽입 그림은 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 의 그래프를 나타냄).

(채널 넓이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 1.35$ V, 전계효과이동도: $9.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 전류점멸비: 1.05×10^5)

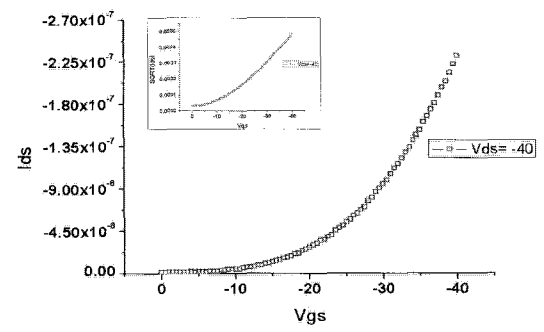
Fig. 7. Output (a) and Transfer (b) characteristic of patterned P3HT-based OTFT using selective etching method(Inset of (b) means $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ graph).

(W: 2 mm, L: 45 μm) $V_{th} = 1.35$ V, $\mu_{fet} = 9.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $I_{on/off}$ ratio= 1.05×10^5

제작 공정에서 O_2 의 노출 단계도 필요하지 않다. 그러나 P3HT의 패터를 lift-off 하기 위해 (그림 3(4)) 사용된 순도가 높은 아세톤의 경우는 원치 않은 부분의 P3HT 박막이 벗겨지는 (peeling-off) 현상[33]이 본 실험에서도 발견되었고, 이는 P3HT 분자들 간의 인력 (attractive force)이 아세톤과 P3HT 분자 사이의 그것에 비해 약하기 때문이라고 추측된다. 따라서 P3HT와 아세톤 사이의 인력



(a)



(b)

그림 8. 리프트오프 방법을 이용하여 P3HT 활성층이 패터닝된 소자의 출력 특성 (a)과 전달 특성 (b)((b)의 삽입 그림은 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 의 그래프를 나타냄).

(채널 넓이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 5.35$ V, 전계효과이동도: $4.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 전류점멸비: 1.5×10^3)

Fig. 8. Output (a) and Transfer (b) characteristic of patterned P3HT-based OTFT using lift-off method(Inset of (b) means $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ graph).

(W: 2 mm, L: 45 μm) $V_{th} = 5.35$ V, $\mu_{fet} = 4.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $I_{on/off}$ ratio= 1.5×10^3

을 줄이기 위해 순수한 아세톤을 사용하는 대신 아세톤을 메탄올에 1:1의 비율로 희석시킨 용액을 사용하였고, 그 결과 P3HT 박막이 벗겨지는 현상이 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 포토리소그래피 기술, 즉 선택적

식각 방법과 lift-off 방법을 이용하여 P3HT 유기 활성층의 패터닝 가능성에 대해 연구하였고, 이를 증명하기 위해 P3HT 유기 활성층이 패터닝된 소자를 제작하여 전계효과 이동도와 전류점멸비를 측정하였다.

소자의 제작 방법에서는 다음과 같은 연구를 통해 P3HT 유기 반도체 활성층을 패터닝 하였다. 선택적 식각 방법의 경우 포토리소그래피 공정에서 스핀코팅을 위해 P3HT 박막 위에 양성 감광제를 도포하여야 하는데 P3HT 박막과 감광제 사이의 낮은 접착력으로 인해 스핀코팅 작업이 쉽게 이루어지지 않았다. 또한 P3HT 박막이 양성 감광제와의 접촉으로 인해 좋지 않은 영향 (damage)을 받을 수도 있다. 따라서 P3HT-OTFT 소자 성능에는 영향을 주지 않는 조건 (공정압력 250 mTorr, 노출시간 약 60초의 O₂ 노출)으로 P3HT 박막 위에 얇은 산화막을 형성하여 이 문제들을 해결하였다. lift-off 방법의 경우 P3HT 박막의 lift-off 단계에서 순수한 아세톤을 사용하면 원하는 P3HT 박막 부분이 벗겨지는 현상이 발견되었고, 이를 해결하기 위해 메탄올에 아세톤을 1:1의 비율로 희석시킨 용액을 사용하였다.

이상에서 언급한 것과 같이 포토리소그래피 공정의 개선으로 발생한 문제점을 해결하고 난 후 제작된 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT 소자는 그렇지 않은 소자에 비해, 선택적 식각 방법의 경우 전류점멸비가 최대 10³배, 전계효과 이동도가 최대 10배 까지 증가하였고 lift-off 방법의 경우 전류점멸비가 최대 10², 전계효과 이동도는 최대 1.5배 까지 증가하였다. 전류점멸비의 향상은 P3HT 유기 반도체의 성능 저하 없이 채널영역을 패터닝하여 오프셋 드레인 전류를 줄인 결과이며, 전계효과 이동도의 경우에는 실험적으로 그 수치가 증가하였으나, 이에 대해서는 부가적인 연구가 필요하고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 P3HT 유기 활성층의 패터닝 방법으로 선택적 식각 방법과 리프트오프 방법의 포토리소그래피 기술을 적용하여 P3HT 유기 반도체의 성능저하 없이 성공적으로 활성층이 패터닝된 P3HT-OTFT를 제작하였다.

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] F. Ebisawa, T. Kurosawa, and S. Nara, "Electrical properties of polyacetylene/polysiloxane interface", *J. Appl. Phys.*, Vol. 54, p. 3255, 1983.
- [3] G. Tourillon and F. Garnier, "New electrochemically generated organic conducting polymers", *J. Electroanal. Chem.*, Vol. 135, p. 173, 1982.
- [4] J. H. Burroughes, C. A. Jones, and R. H. Friend, "Field-enhanced conductivity in polyacetylene-construction of a field-effect transistor", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 22, p. 956, 1989.
- [5] G. Guillaud, M. Al Sadoum, M. Maitrot, J. Simon, and M. Bouvet, "Field-effect transistors based on intrinsic molecular semiconductors", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 167, p. 503, 1990.
- [6] F. Garnier, G. Horowitz, X. Z. Peng, and D. Fichou, "An all-organic "soft" thin film transistor with very high carrier mobility", *Adv. Mater.*, Vol. 2, p. 592, 1990.
- [7] Y. Y. Lin, D. J. Gundlach, S. F. Nelson, and T. N. Jackson, "Stacked pentacene layer organic thin-film transistors with improved characteristics", *IEEE Electron Devices Letters*, Vol. 18, Iss. 12, p. 606, 1997.
- [8] D. J. Gundlach, H. Klauk, C. D. Sheraw, C. C. Kuo, J. R. Huang, and T. N. Jackson, "High-mobility, low voltage organic thin film transistors", 1999 International Electron Devices Meeting Technical Digest, p. 111, 1999.
- [9] H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nichols, and T. N. Jackson, "Pentacene organic thin-film transistors for circuit and display applications", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 46, Iss. 6, p. 1258, 1999.

- [10] H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, "Integrated, high-mobility polymer field-effect transistors driving polymer light-emitting diodes", *Synth. Met.*, Vol. 102, Iss. 1-3, p. 857, 1999.
- [11] 김윤명, 표상우, 김준호, 심재훈, 김영관, 김정수 "Photoacryl 을 게이트 절연층으로 사용한 유기 박막트랜지스터의 전기적 특성에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 15권, 2호, p. 110, 2002.
- [12] 장재원, 김 훈, 신경식, 김재경, 주병권, "SOI 웨이퍼를 이용한 Top emission 방식 AMOLEDs의 스위칭 소자용 단결정 실리콘 트랜지스터", *전기전자재료학회논문지*, 16권, 4호, p. 292, 2003.
- [13] 장재원, 이주원, 김재경, 김영철, 주병권, "수소 플라즈마 처리를 이용한 역스테거드형 펜타센 트랜지스터의 전기적 특성 향상에 대한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 16권, 11호, p. 961, 2003.
- [14] 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, Iss. 12, p. 1535, 2005.
- [15] R. J. Willicut and R. L. McCarley, "Electrochemically polymerizable self-assembled monolayers", *Advanced Materials*, Vol. 7, Iss. 8, p. 759, 1995.
- [16] 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, 093707, 2005.
- [17] Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, "High-performance plastic transistors fabricated by printing techniques", *Chem. Mater.*, Vol. 9, Iss. 6, p. 1299, 1997.
- [18] T. R. Hebner, C. C. Wu, D. Marcy, M. H. Lu, and J. C. Sturm, "Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting devices", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 72, p. 519, 1998.
- [19] H. Sirringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, and E. P. Woo, "High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits", *Science*, Vol. 290, No. 5499, p. 2123, 2000.
- [20] F. J. Touwslager, N. P. Willard, and D. M. de Leeuw, "I-line lithography of poly-(3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes and application in all-polymer integrated circuits", *Phys. Lett.*, Vol. 81, Iss. 24, p. 4556, 2002.
- [21] C. C. Cedeno, J. Seekamp, A. P. Kam, T. Hoffmann, S. Zankovych, C. M. S. Torres, C. Menozzi, M. Cavallini, M. Murgia, G. Ruani, F. Biscarini, M. Behl, R. Zentel, and J. Ahopelto, "Nanoimprint lithography for organic electronics", *Microelectron. Eng.*, Vol. 61-62, p. 25, 2002.
- [22] M. Quirk and J. Serda, "Semiconductor Manufacturing Technology", Prentice Hall, Chap. 13-15, 2001.
- [23] J. Ficker, H. von Seggern, H. Rost, W. Fix, W. Clemens, and I. McCulloch, "Influence of intensive light exposure on polymer field-effect transistors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, Iss. 8, p. 1377, 2004.
- [24] S. Holdcroft, "Patterning π -conjugated polymers", *Adv. Mater.*, Vol. 13, Iss. 23, p. 1753, 2001.
- [25] I. Kymissis, C. D. Dimitrakopoulos, and S. Purushothaman, "Patterning pentacene organic thin film transistors", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 20, p. 956, 2002.
- [26] C. D. Müller, A. Falcou, N. Reckefuss, M. Rojahn, V. Wiederhirn, P. Rudati, H. Frohne, O. Nuyken, H. Becker, and K. Meerholz, "Multi-colour organic light-emitting displays by solution processing", *Nature*, Vol. 421, p. 829, 2003.
- [27] C. R. Kagan and P. Andry, "Thin-Film Transistors", Marcel Dekker Inc., Chap. 6, 2003.
- [28] S. A. Campbell, "The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication", Oxford University Press, Chap. 11, p. 283, 2001.
- [29] S. Scheinert and G. Paasch, "Fabrication and analysis of polymer field-effect transistors", *Phys. Stat. Sol. (a)*, Vol. 201, Iss. 6, p. 1263, 2004.
- [30] W. Geens, S. E. Shaheen, B. Wessling, C. J. Brabec, J. Poortmans, and N. Serdar

- Sariciftci, "Dependence of field-effect hole mobility of PPV-based polymer films on the spin-casting solvent", *Organic Electronics*, Vol. 3, Iss. 3-4, p. 105, 2002.
- [31] S. H. Kim, Y. S. Yang, J. H. Lee, J.-I. Lee, H. Y. Chu, H. Y. Lee, J. Y. Oh, L. M. Do, and T. H. Zyung, "Organic field-effect transistors using perylene", *Optical Materials*, Vol. 21, Iss. 1-3, p. 439, 2003.
- [32] H. Jia, G. K. Pant, E. K. Gross, R. M. Wallace, and B. E. Gnade, "Gate induced leakage and drain current offset in organic thin film transistors", *Organic Electronics*, Vol. 7, p. 16, 2006.
- [33] J. R. Chan, X. Q. Huang, and A. M. Song, "Nondestructive photolithography of conducting polymer structures", *J. Appl. Phys.*, Vol. 99, 023710, 2006.