

논문 21-5-6

감광성 PVA 박막을 이용한 P3HT 유기박막트랜지스터의 패턴 형성과 패시베이션

Simultaneous Patterning and Passivation of P3HT-OTFTs with Photosensitive Poly Vinyl-alcohol(PVA) Layer

남동현¹, 박경동², 박정환³, 한교용^{4,a}

(Dong-Hyun Nam¹, Kyeong-Dong Park², Jeong-Hwan Park³, and Kyo-Yong Han^{4,a})

Abstract

We first demonstrated simultaneous patterning and passivation of P3HT active layer with photosensitive PVA. The passivation layers were obtained by annealing the organic layers after developing PVA and subsequent over-etching the P3HT layer. The fabricated OTFTs were electrically characterized. The OTFTs exhibited the mobility of $\sim 5.9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ and on/off current ratio of $\sim 10^4$. After passivation, the results showed the extended lifetime of ~ 250 hours with photosensitive PVA layer.

Key Words : P3HT, PVA, Patterning, Passivation, OTFT

1. 서론

유기물이 반도체의 성질을 가질 수 있다는 것이 밝혀지면서 지난 10년간 유기박막트랜지스터(Organic Thin Film Transistor : OTFT)의 성능이 급속히 향상 되었다. 그리하여 플렉시블 디스플레이, 초저가 RFID tag, 태양전지 등의 분야에서 OTFT를 이용한 유기 전자 소자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-6]. 특히 공액성의 유기 전자재료 중 저분자의 pentacene과 고분자의 regioregular-poly(3-hexylthiophene)(P3HT)를 이용한 유기박막트랜지스터의 디바이스 전기적인 성능은 수소화 된 비정질 실리콘 박막트랜지스터(a-Si:H)를 능가하는 연구 결과를 낳았다[7-10].

OTFT의 연구는 크게 재료분야와 공정분야로 나눌 수 있다. 재료분야에서는 새로운 고분자 물질의 개발, 높은 절연율 (dielectric constant)을 가지는 절연체 연구[11], 그리고 C-V 이력현상(hysteresis)을 줄이고 절연체 사이의 계면 효과를 향상시키기 위한 자가 조립 단분자막(Self-Assembled Monolayer) (SAM)의 연구 등이 활발히 진행되고 있다[12]. 공정분야에서는 유기반도체의 활성층과 소스와 드레인 전극 사이의 저항성 접촉 (Ohmic contact) 구현[13], 소자의 구조 개발, 유기 활성층의 패터닝 기술과 패시베이션에 등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이와 같은 다양한 연구 분야 중에서 유기 반도체 활성층의 패터닝 (patterning)과 패시베이션(passivation)에 대한 연구는 OTFT의 성능과 수명을 향상시키는 데 목적이 있다.

OTFT의 패터닝은 pentacene 등의 저분자 (small molecular)물질의 경우 섀도우 마스크 (shadow mask)를 이용한 진공 증착방법이 여러 논문에서 교과서적으로 사용되었으며, 유기용매에 잘 녹는 고분자 물질은 screen printing[14], ink-jet printing[15,16], photochemical crosslinking[17], imprint lithography

1. 미리넷솔라
2. 일본 동북대 공학연구과
3. 매그나칩 반도체
4. 영남대학교 전자정보공학부
(경북 경산시 대동 214-1)
a. Corresponding Author : kyhan@yumail.ac.kr
접수일자 : 2008. 3. 10
1차 심사 : 2008. 4. 14
심사완료 : 2008. 4. 23

[18], photolithography[19]등의 다양한 방법이 연구되어 왔다. 그 중 포토리소그래피 (photolithography)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 유기물인 포토레지스트나 아세톤과 같은 유기용매 (solvent)에 민감한 특성으로 인한 화학적 반응 (chemical reaction)으로 인해[20] 위에서 언급한 포토리소그래피 그 자체의 장점을 살릴 수 없다.

또한 OTFT의 패시베이션은 대기 중의 산소가 유기 반도체 활성층으로의 도핑을 차단하여 유기 반도체의 수명 연장을 위해 꼭 필요한 공정이다. 유기 반도체 활성층에 산소가 도핑되면 OTFT의 성능이 급격히 저하되어 디바이스로의 올바른 동작을 할 수 없게 된다[21-24]. 저분자인 pentacene을 이용한 OTFT의 패시베이션은 여러 유기물과 무기물을 이용하여 시행되어져 왔다. 특히, pentacene-OTFT의 패시베이션 공정 전에 유기 반도체 활성층의 피해를 최소화하기 위한 보호막을 만들기 위해 수용성 유기물인 폴리비닐알코올을 이용하였다. 그리고 고분자인 P3HT를 이용한 OTFT의 패시베이션은 유기물이 아닌 무기물인 산화알루미늄 등을 단차 도포 방법(ALD)으로 증착하여 이루어졌으나 공정이 복잡해지는 단점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, P3HT 활성층의 패터닝을 위한 포토리소그래피의 포토레지스트 대용 및 패시베이션 박막으로 폴리비닐알코올(PVA) 사용을 본 논문에서 제안하였다. 폴리비닐알코올(PVA)은 대표적인 수용성 유기물이며 중크롬산암모늄(Ammonium dichromate)을 혼합하게 되면 감광성을 가지게 된다. 감광성 폴리비닐알코올을 자외선(UV)에 노출시키게 되면 중합반응(cross-link)을 하게 되며, 중합된 폴리비닐알코올은 물에 녹지 않는다. 특히 수용성이기에 포토리소그래피를 이용한 패터닝 공정에서 아세톤, 메탄올과 같은 유기용매나 포토레지스터 현상액을 사용하지 않으므로, 고전적인 포토리소그래피 방법을 이용하여 유기 반도체 활성층을 패터닝 하는 것보다 반도체 활성층이 입는 피해를 줄일 수 있다. 그리고 강한 수소 결합을 하고 있기에 산소의 차단 능력이 뛰어난 물질로 알려져 있다. 이러한 이유에서 감광성 폴리비닐알코올을 포토리소그래피 공정에서 포토레지스트 대신에 사용될 수 있으며, 유기

반도체 활성층으로 산소 도핑을 차단하는 패시베이션에 이용 될 수 있다[25,26].

따라서 본 연구에서는 감광성 폴리비닐알코올을 포토레지스트 대신에 포토리소그래피 공정에 사용하여 P3HT-OTFT의 성능 향상을 위한 반도체 활성층의 패터닝과 대기 중에서 디바이스의 수명을 연장하기 위한 패시베이션을 동시에 수행하여 디바이스를 제작하였다. 제작 후 패터닝에 의한 전기적인 성능 변화를 측정하였으며, 대기중에 보관하여 시간에 따른 P3HT-OTFT의 전기적인 성능의 변화를 측정하였다

2. 실험 및 측정

그림 1은 감광성 PVA를 이용한 패터닝 그리고 패시베이션 된 OTFT의 단면을 나타내고 있으며, 다음과 같은 공정을 통해 제작 되었다. 디바이스는 붕소(Boron)로 도핑 된 실리콘 기판에 공통 게이트 전극구조와 하부접촉구조를 가진다. 100 nm의 산화막 게이트 절연층은 건식산화 공정을 통해 형성하였으며, 그 후 게이트 전극으로 사용된 200 nm의 알루미늄(Al)을 실리콘 기판 아랫면에 진공 증착 하였다. 그리고 70 nm의 소스와 드레인 전극은 고전적인 포토리소그래피 방법과 리프트-오프(lift-off)방법을 사용하여 산화막 위에 금(Au)을 진공증착 하여 형성하였다. 반도체 활성층은 용해 공정 (solution process)을 통해 형성되었다. P3HT 용매로서 무수의 클로로포름 (CHCl_3 , Aldrich, anhydrous > 99 %)을 정제 없이 사용하여, 이에 P3HT를 0.134 wt%로 용해시키고, 유공도가 0.2 μm 인 PTFE 시린지 필터를 사용하여 잔존입자를 제거하였다. 유기 반도체 활성층은 P3HT용액을 2000 rpm, 60초의 스펀코팅 조건을 통하여 형성하였다. P3HT 반도체 활성층 제작 공정에서, 도핑된 산소의 추출을 위하여 질소 분위기에서 120 $^{\circ}\text{C}$, 1시간동안 열처리 (annealing)하였으며, 천천히 대기온도까지 냉각시켰다. 그 후 패터닝과 패시베이션은 감광성 PVA를 이용하여 다음과 같은 공정으로 수행되었다. PVA (Aldrich, MV=55,000)를 magnetic stirrer를 이용하여 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 DI-water에 8 wt%로 용해시킨 후, 감광성을 갖기 위해 빛이 차단된 분위기에서 중크롬산암모늄을 0.03 wt%로 혼합하였다. 감광성 PVA 박막은 3000 rpm, 60초의 스펀코팅 조건을 통해 얻었으며 80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 5분 동안 건조시켰다. 채널 영역의 PVA를 cross-

linking 시키기 위해 마스크 얼라이너를 이용하여 12 mW의 UV에 12초 동안 노출시켰다. 중합되지 않는 채널 바깥 부분의 PVA는 DI-water로 녹여서 채널영역이 패터닝 된 PVA 박막을 얻었다. 그 후 P3HT의 패터닝을 위해 디바이스를 클로로포름 용액에 넣어 채널 영역을 제외한 이외의 P3HT 반도체 활성층 부분을 제거하였다. 위의 패터닝 방법은 용매를 이용한 등방성 습식식각(wet-etching)공정이므로 채널 영역의 P3HT가 오버에칭 되었다. 그 후 P3HT의 어닐링과 PVA의 경화작업을 위해 RTA를 이용 질소 분위기에서 120 °C, 1시간 동안 열처리를 하였다. 열처리 공정에서 PVA는 녹아 홀러 채널영역의 P3HT 반도체 활성층의 옆 부분을 덮게 된다. 그 결과, 감광성 PVA를 이용하여 P3HT 활성층의 패터닝과 패시베이션 공정을 동시에 수행하여 디바이스를 제작하였다. 디바이스는 대기중에 보관하였으며 전기적인 성능 역시 대기중에서 시간의 흐름에 따라 측정하였다.

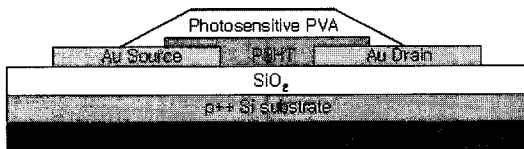


그림 1. 하부 전극 구조의 패터닝 그리고 패시베이션 된 P3HT-OTFT.

Fig. 1. Schematic cross-section of a fabricated P3HT-OTFT with bottom contact.

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_{fet})는 다음의 수식을 이용하여 얻었다[27]. 이 수식에서 μ_{fet} 는 전계효과 이동도, C_{ox} 는 절연체의 단위 면적당 커패시턴스, V_{th} 는 문턱전압, W 와 L 은 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.

$$I_{DS} = \frac{W \mu_{fet} C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

그림 2의 (a)와 (b)는 활성층이 패터닝 되지 않은 공통 게이트 전극을 가지는 하부 전극 구조의 P3HT-OTFT의 출력 특성과 전달 특성을 각각 나타내는 그래프다. 출력 특성은 다양한 게이트 전압 (V_{GS})에 따른 드레인 전압 (V_{DS})의 변화에 대한 드레인 전류 (I_{DS})의 변화로 나타나고, 전달 특성은 일정한 드레인 전압 ($V_{DS} = -40$ V)에서 게이트 전압 (V_{GS})의 변화에 대한 드레인 전류 (I_{DS})의 변화로 나타낸다. 그림 2(a)는 소스와 드레인의 전위차가 없을 때 ($V_{DS} = 0$ V), 게이트 절연층 (SiO_2)을 통한 누설전류 (leakage current)인 오프셋 드레인 전류 (I_{DS} offset)를 보여준다(타원 내의 I_{DS}). 이 전류는 공통 게이트 전극을 가지는 OTFT에서 일반적으로 나타나는 현상으로[28,29] 본 연구에서도 발견되었으며, 그 정의는 소스와 드레인에 전압이 인가되지 않았을 때 ($V_{DS} = 0$ V) 다양한 게이트 전압 (V_{GS})에 따른 드레인 전류 (I_{DS})의 값이다. 이 값은 게이트 전압이 커질수록 증가하는 현상을 보였다. 따라서 이 전류의 증가는 차단 상태 (off-state)에서의 전류 값을 높여서, 결과적으로 낮은 전류 점멸비 ($I_{on/off}$ ratio)를 나타내는 결과를 가져왔다. 이는 제작된 OTFT 소자가 반전층 (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 누설전류가 증가되었다고 보고되어진다[30].

그림 3(a)와 (b)는 감광성 PVA를 사용하여 P3HT 유기 반도체 활성층을 패터닝 한 OTFT의 출력 특성과 전달 특성을 각각 나타내는 그래프다. 그림 3(a)에서는 패터닝 되지 않은 P3HT-OTFT에서 나타난(그림 2(a)) 오프셋 드레인 전류가 나타나지 않음을 확인 할 수 있다. 즉 P3HT 유기 반도체 활성층의 패터닝을 통하여 오프셋 드레인 전류가 제거 되었으며, 그 결과, P3HT-OTFT의 전기적인 성능이 다음과 같이 향상되었다. 이동도는 $2.76 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 에서 $5.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 약 2배 가량 증가하였으며, 패터닝 되지 않은 디바이스에서 오프셋 드레인 전류로 인해 아주 작은 값인 46을 나타낸 전류점멸비는 10^4 으로 증가하였다.

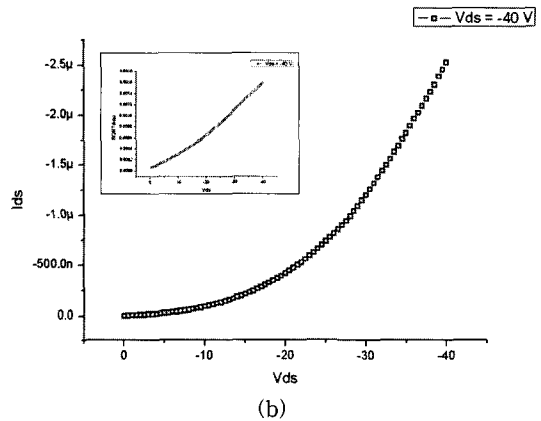
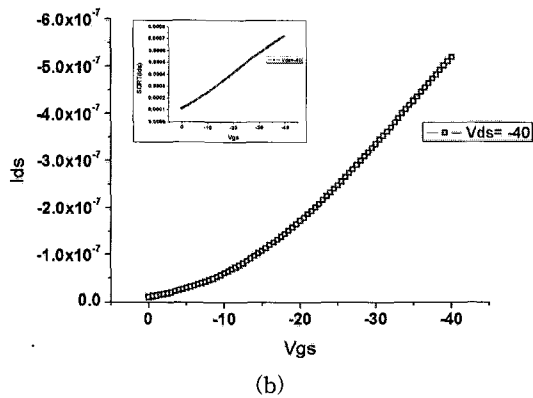
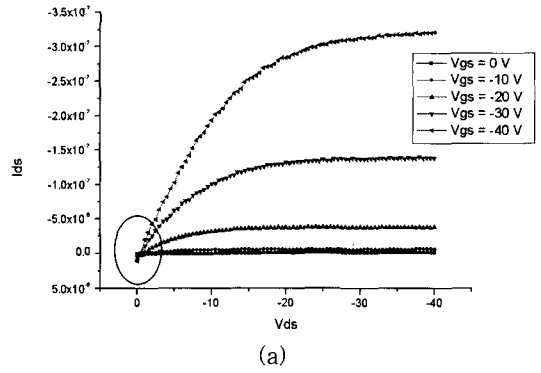
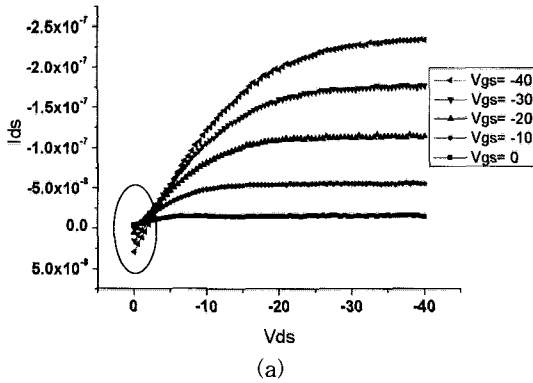


그림 2. 패터닝 되지 않은 P3HT-OTFT의 출력 특성 (a) 과 전달 특성 (b).

((b)의 삽입 그림은 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 의 그래프를 나타냄)

(채널 길이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 7.56 \text{ V}$, 전계효과이동도: $2.76 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 전류점별비: 46)

Fig. 2. Output (a) and transfer (b) characteristic of the 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)

그림 4(a)는 패시베이션 되지 않은 P3HT-OTFT를 대기 중에 24시간 보관하고 난 후 얻은 출력 특성 그래프이며, 그림 4(b)는 PVA으로 패시베이션 된 P3HT-OTFT의 출력 특성 그래프를 나타낸다. 그림 4(a)에서 게이트 전압이 인가되지 않았을 때 ($V_G = 0\text{V}$) 소스와 드레인에 전압이 인가되면 전류가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 대기 중의 산소가 유기물 반도체 활성층에 도핑되어

그림 3. 감광성 PVA를 이용하여 패터닝 한 P3HT-OTFT의 출력 특성 (a) 과 전달 특성 (b).

((b)의 삽입 그림은 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 의 그래프를 나타냄)

(채널 길이: 2 mm, 길이: 45 μm , 문턱전압: $V_{th} = 5 \text{ V}$, 전계효과이동도 = $5.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 전류점별비: $I_{on/off}$ ratio = 9.8×10^3)

Fig. 3. Output (a) and transfer (b) characteristic of the patterned P3HT-based OTFT with photosensitive PVA.

(inset. of (b) means $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ graph)

(W: 2 mm, L: 45 μm) $V_{th} = 5 \text{ V}$, $\mu_{fet} = 5.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $I_{on/off}$ ratio = 9.8×10^3)

반도체 활성층의 전기전도도가 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 그림 4(b)는 감광성 PVA를 이용하여 패시베이션 시킨 P3HT-OTFT를 대기중에서 3일 동안 보관 한 후, 측정된 출력 특성 그래프이다. 그림 4(a)에서 나타난 누설전류가 그림 4(b)에

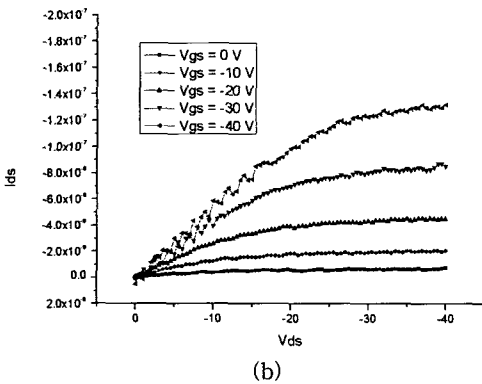
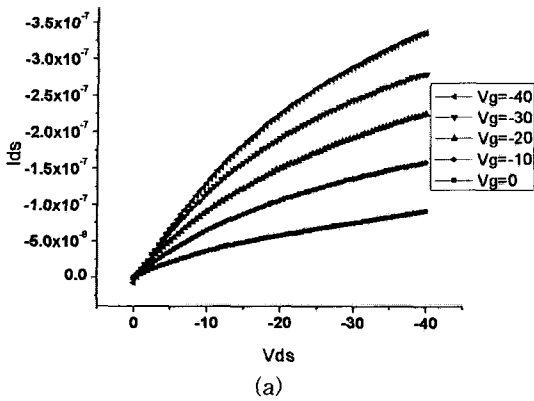


그림 4. 패시베이션 되지 않은 P3HT-OTFT가 대기중에 1일 노출 되었을 때 출력특성 (a) 과 감광성 PVA로 패시베이션 된 P3HT-OTFT가 대기중에 3일 보관 후 출력특성 (b).

Fig. 4. Current-voltage characteristics of the unpassivated OTFT for 1 day exposure to air (a), 3 days exposure after passivation (b).

서는 거의 증가 하지 않았다. 이 결과는 PVA가 산소를 효과적으로 차단하여 P3HT 반도체 활성층의 산소도핑이 최소화되었음을 증명한다. 그러나 이렇게 제작 된 P3HT-OTFT는 시간의 지남에 따라 전류값이 감소하는 결과를 그림 3(a)와 그림 4(b)를 통하여 알 수 있다. 전류값의 감소는 곧 P3HT-OTFT의 전기적인 성능의 저하를 의미하므로 시간에 지남에 따른 P3HT-OTFT의 성능을 측정하고 분석하였다.

그림 5 (a)와 (b) 그리고 (c)는 노출시간이 증가함에 따라 이동도와 전류점멸비 그리고 전류값의 변화를 보여준다.

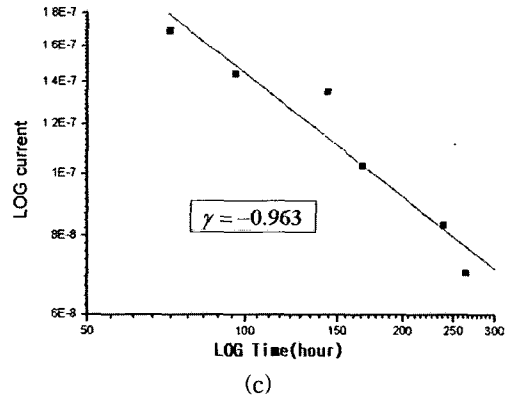
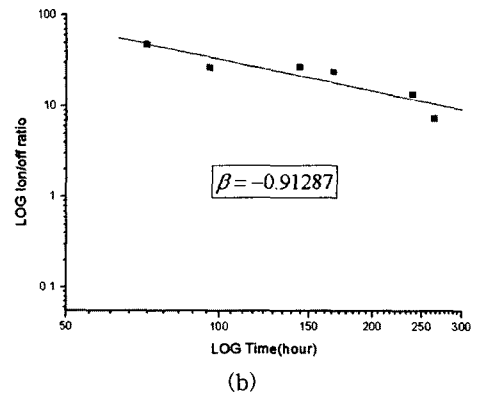
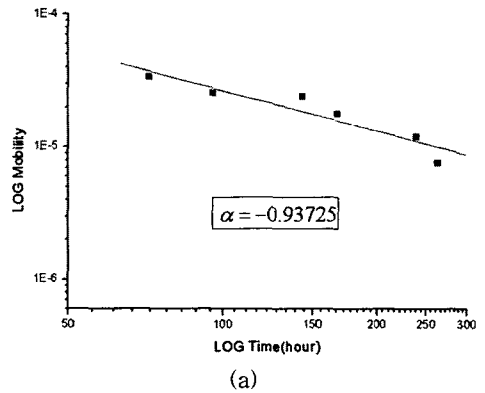


그림 5. P3HT-OTFT의 시간에 따른 이동도의 변화 그래프 (a), 전류점멸비의 변화 그래프 (b), 전류 Ids의 변화 그래프(VGs, VDs= -40 V 일때) (c).

Fig. 5. The plot of the mobility of the P3HT-OTFT with passivation layer in log-log scale.(a), on/off ratio of OTFT with passivation layer in log-log scale (b), Ids current of OTFT with passivation layer in log-log scale(at VGs, VDs= -40 V).

이 값들은 시간에 따라 지수적으로 표현하였으며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[31].

$$\mu = \mu_0 \exp(-\alpha t) \quad (2)$$

$$r = r_0 \exp(-\beta t) \quad (3)$$

$$i = i_0 \exp(-\gamma t) \quad (4)$$

μ_0 와 r_0 그리고 i_0 는 패시베이션 후 초기의 이동도와 전류점멸비 그리고 전류값을 나타낸다. 전류값은 $V_{GS} = -40$ V, $V_{DS} = -40$ V일 때의 값이며, 그래프에서 구한 기울기는 시간에 따른 성능의 저하를 나타낸다. 그림 5(a)에서 구한 이동도의 변화 기울기는 a 로 표기 하였으며 그 값은 -0.913 이고 그림 5(b)에서 구한 전류점멸비의 변화 기울기는 β 로 표기 하였으며 그 값은 -0.937 이다. 그리고 그림 5(c)에서 구한 전류값의 변화 기울기는 γ 로 표기 하였으며 그 값은 -0.963 의 값을 나타낸다. 측정된 디바이스의 수명은 약 250시간 정도이며, 이는 전류값이 초기의 전류값의 절반이 될 때까지 걸리는 시간이다. 각각 그래프에서 구해진 a 와 β 그리고 γ 이 값들은 아크릴과 PVA를 이용하여 적층구조로 패시베이션 된 펜타센 유기 박막 트랜지스터의 값과 비교해보면 약 10배 정도 큰 값을 나타내며, 성능의 저하가 더 빠르게 나타나는 것을 의미한다. 그 이유는 저분자인 펜타센의 경우, 진공증착을 하여 반도체 활성층 박막을 형성하므로, 상대적으로 산소의 영향이 적고, 보다 안정적인 구조를 가지며, 또한 아크릴과 PVA의 적층구조로 되어 있기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 감광성 PVA를 이용하여 P3HT-OTFT의 반도체 활성층의 패터닝 그리고 패시베이션을 동시에 수행하였다. 감광성 PVA를 이용한 P3HT 유기 박막 활성층의 패터닝을 통해 패터닝 되지 않은 P3HT-OTFT에서 나타난 오프셋 전류가 제거되어 전기적인 특성이 향상되었다. 이동도는 $2.76 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 에서 $5.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 로 약 2배가량 증가하였으며, 특히 오프셋 전류로 인해 아주 작은 값을 나타낸 전류점멸비는 약 10^4 정도로 200배의 증가를 보였다. 그리고 패시베이션 되지

않은 유기박막트랜지스터를 대기중에 24시간동안 보관했을 때, P3HT 유기 반도체 활성층으로 산소가 도핑 되어 누설전류가 크게 증가하였다. 그러나 감광성 PVA로 패시베이션 된 P3HT-OTFT는 대기중에 260시간 이상 보관 하여도 누설전류는 거의 증가하지 않았다. 즉 PVA에 의해 P3HT 유기 반도체 활성층으로의 산소 도핑이 차단되었기 때문이다. 그러나 전류값이 시간에 따라 점진적으로 감소하는 현상을 보였다. 패시베이션 된 P3HT-OTFT를 대기중에서 보관 하였을 때 디바이스의 수명은 약 250시간 정도로 나타났으며, 이는 전류값이 패시베이션 했을 때의 초기값의 절반이 되었을 때 시간이다. 감광성 PVA를 이용한 패터닝을 통해 P3HT-OTFT의 전기적인 성능 향상과 산소를 차단시키는 패시베이션을 통해 디바이스의 수명 연장을 증명하였다.

감사의 글

본 연구는 포항나노기술집적센터 (National Center for Nanomaterials Technology)와 영남대학교의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] C. D. Sheraw, L. Zhou, J. R. Huang, D. J. Gundlach, T. N. Jackson, M. G. Kane, I. G. Hill, M. S. Hammond, J. Campi, and B. K. Greening, "Organic thin-film transistor-driven polymer-dispersed liquid crystal displays on flexible polymeric substrates", J. Francl and J. West, Appl. Phys. Lett., Vol. No. 80, p. 1088, 2002.
- [2] S. Ohta, T. Chuman, S. Miyaguchi, D. Satoh, T. Tanabe, Y. Okuda, and M. Tsuchida, "Active matrix driving organic light-emitting diode panel using organic thin-film transistors", J.J.A.P., Vol. 44, p. 3678, 2005.
- [3] L. Zhou, S. K. Park, B. Bai, J. Sun, S. C. Wu, T. N. Jackson, S. Nelson, D. Freeman, and Y. T. Hong, "Pentacene TFT driven AM OLED displays", IEEE Electron Device Letters, Vol. 26, p. 640, 2005.
- [4] Y. W. Choi, S. S. Yoon, J. H. Choi, H. J.

- Kim, J. H. Son, S. Y. Kim, Y. H. Lee, Y. H. Choi, and S. T. Kim, "Low-voltage-operating AMOLED Driven by Pentacene Organic TFT using high-K gate Dielectric", SID Technical Digest, p. 112, 2006.
- [5] M. C. Suh, J. H. Jeong, T. Ahn, J. S. Park, S. Y. Kim, Y. J. Kim, T. J. Kim, H. J. Lee, S. M. Lee, Y. W. Park, Y. G. Mo, H. K. Chung, B. W. Koo, S. Y. Kim, and S. Y. Lee, "A 4.0-in. OTFT-Based AMOLED Display", SID Technical Digest, p. 116, 2006.
- [6] S. Y. Lee, B. W. Koo, E. J. Jeong, E. K. Lee, S. Y. Kim, J. W. Kim, H. E. Lee, I. W. Ko, Y. G. Lee, Y. T. Chun, T. S. Oh, S. K. Kang, L. S. Pr, and J. M. Kim, "Integration of a 4.5-in. Color AMOLED with Organic Transistor", SID Technical Digest, p. 244, 2006.
- [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, Issue. 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, Issue. 6, p. 1258, 1999.
- [10] H. Sirrinhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, "Integrated, high-mobility polymer field-effect transistors driving polymer light-emitting diodes", Synth. Met., Vol. 102, Issues. 1-3, p. 857, 1999.
- [11] 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, Issue. 12, p. 1535, 2005.
- [12] R. J. Willicut and R. L. McCarley, "Electrochemically polymerizable self-assembled monolayers", Advanced Materials, Vol. 7, Issue. 8, p. 759, 1995.
- [13] 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, p. 093707, 2005.
- [14] 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, Issue. 6, p. 1299, 1997.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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, Issue. 24, p. 4556, 2002.
- [18] 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.
- [19] 박경동, 남동현, 박정환, 한교용, "포토리소그래피를 이용한 P3HT 활성층의 패터닝에 대한 연구" 전기전자재료학회논문지, 20권, 4호, p. 294, 2007.
- [20] 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, Issue. 8, p. 1377, 2004.
- [21] B. S. Ong, Y. Wu, and P. Liu, "Design og high-performance regioregular polythiophenees for organic thin-film transistors", Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 8, 2005.

- [22] D. Li, E. J. Vorkent, R. Nortrup, H. S. Moon, H. Katz, and Z. bao, "Humidity effect on electrical performance of organic thin-film transistors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p. 042105, 2005.
- [23] Y. Qiu, Y. Hu, G. dong, L. Wang, J. Xie, and Y. Ma, "High-mobility thin-film transistors based on aligned carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, p. 1644, 2003.
- [24] R. Ye, M. Baba, K. Suzuki, Y. Ohishi, and K. Mori, "Effects of O₂ and H₂O on electrical characteristics of pentacene thin film transistors", *Thin Solid Films*, Vol. 464, p. 437, 2004.
- [25] J. H. Schön, "On the stability of organic field-effect transistor materials", *Applied Physics Letters*, Vol. 79, No. 25, p. 4163, 2001.
- [26] M. G. Kane, J. Campi, M. S. Hammond, and F. P. Cuomo, "Analog and digital circuit using organic thin-film transistors on polyester substrates", *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 21, No. 11, p. 534, 2000.
- [27] S. Scheinert and G. Paasch, "Fabrication and analysis of polymer field-effect transistors", *Phys. Stat. Sol. (a)*, Vol. 201, Issue. 6, p. 1263, 2004.
- [28] W. Geens, S. E. Shaheen, B. Wessling, C. J. Brabec, J. Poortmans, and N. S. Sariciftci, "Dependence of field-effect hole mobility of PPV-based polymer films on the spin-casting solvent", *Organic Electronics*, Vol. 3, Issues 3-4, p. 105, 2002.
- [29] 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, Issues 1-3, p. 439, 2003.
- [30] 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.
- [31] S. H. Han, J. H. Kim, and J. Jang, "Lifetime of organic thin-film transistors with organic passivation layers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 073519, 2006.