

유기 전계효과 트랜지스터 구동 안정성 향상 기술 동향

이승구¹ · 최현호^{2†}

¹울산대학교 화학과

²경상대학교 나노신소재공학부

(2019년 12월 10일 접수)

Overview of Electrical Stability in Organic Field-Effect Transistors

Seung Goo Lee¹ and Hyun Ho Choi^{2†}

¹Department of Chemistry, Ulsan University, Ulsan 44776, Korea

²School of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

1. 서 론

실생활에서 사용 빈도가 높은 전자제품들(휴대전화, 테블릿 pc, 스마트워치, TV 등)은 모두 디스플레이를 가지고 있고, 이제 디스플레이는 종이처럼 친숙한 존재가 되었다. 지난 10년간 디스플레이는 급격한 발전과 함께 세대 교체가 진행되었고, 현재 해상도 혁신과 함께 새로운 형태의 디스플레이 개발에 관심이 집중되고 있다. 특히, 최근에는 기계적으로 동그랗게 말리거나 접을 수 있는 디스플레이가 시장에 출시되어 디스플레이에 기계적 변형 기능을 부여하는 플렉서블 디스플레이(flexible display)가 가장 큰 관심을 받고 있다. 플렉서블 디스플레이 소자를 통해 전자소자는 인체와 더욱 밀접하게 상호 작용할 수 있도록 개발되고 있고 최근에는 웨어러블 디바이스(wearable devices)라고 하는 4차 산업혁명의 사물인터넷을 구현하기 위한 소자로 발전하고 있다. 전세계 웨어러블 디바이스의 시장 규모는 매년 꾸준히 성장하여 2022년에는 510억 달러에 이를 것으로 예상하고 있다[1].

플렉서블 디스플레이 분야에서 유기 전계효과 트랜지스터(Organic Field-Effect Transistors (OFETs), 이하 유기트랜지스터)는 디스플레이 소자를 제어하는 스위칭 기능을 수행하면서 저온 공정을 통해 휘어질 수 있는 플라스틱 기판에 제작할 수 있는 가장 적합한 소자 중 하나로 평가받고 있다. 유기트랜지스터가 구동소자로 관심을 받는 이유는 종이처럼 얇고 유연한 기판 위에 소자 구현이 가능하며, 유기물의 특성상 무기물에 비해 충격에 강하고 기계적 변형이 용이하기 때문이

다. 또한, 고비용의 진공 공정보다 산업적으로 저렴한 용액 공정이 가능한 장점이 있다. 특히 웨어러블 디바이스에서 유기트랜지스터는 플렉서블 디스플레이 소자의 제어뿐만 아니라, 디지털 헬스케어 기술에 적용할 수 있는 웨어러블 센서로도 응용이 가능하며, 미래 4차 산업혁명의 사물인터넷 분야에서 핵심 소자로 주목받고 있다[2, 3].

유기트랜지스터가 상용화되기 위해서는 충분한 전하이동도(field-effect mobility)가 확보되어야 한다. 지난 15년간 유기트랜지스터의 전하이동도는 수천배의 향상을 이루어 왔고, 현재는 1-10 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 수준의 전하이동도가 보고되고 있어, 비정질 실리콘 트랜지스터의 전하이동도($0.5\text{-}1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)를 뛰어넘었다[4]. 하지만 아쉽게도 소자 안정성은 전하이동도 향상에 비해 추가적인 개선이 요구된다[5]. 소자 안정성은 크게 환경 안정성(environmental stability)과 바이어스 스트레스 안정성(bias-stress stability)로 구분할 수 있다. 환경안정성은 유기트랜지스터의 실환경 노출에 따른 소자의 전기적 특성과 관련되어 있고, 특히 산소 및 수분 노출에 의한 변화가 취약하므로 이를 해결하기 위한 학계의 연구가 활발히 진행되고 있다[6-9].

유기트랜지스터의 전기적 구동을 위하여 전극을 통해 바이어스가 인가되면, 소자는 지속적으로 바이어스에 의한 스트레스를 받고, 이는 전기적 특성 변화로 이어지는 현상을 초래한다. 이 현상을 바이어스 스트레스에 의한 불안정이라 하고 간단하게는 바이어스 스트레스 효과(bias-stress effect)라 한다[5, 10]. 대표적인 바이어스 스트레스 효과로는 문턱전압(threshold voltage) 이동, 전하이동도 감소, 문턱전압이하 기울기(subthreshold slope) 상승, 오프상태 전류(OFF-state

[†] Corresponding author: Hyun Ho Choi (hh.choi@gnu.ac.kr)

current) 상승, 이력 현상(hysteresis) 상승 등이 있으며 이들은 소자의 전기적 특성 감소로 나타난다. 특히, 문턱전압 이동에 의한 온상태 전류(ON-state current) 감소는 유기트랜지스터와 연결된 디스플레이의 기능 저하(발광오작동, 휘도감소)로 이어진다. 일반적으로 바이어스 스트레스 효과는 유기반도체와 절연체 계면에 존재하는 전하의 상태변화, 특히 비편제화 준위(delocalized state)에 있는 전하가 편제화 준위(localized state)로 떨어져 버리는, 전하트래핑(charge trapping)현상과 밀접한 관련이 있다[11, 12].

본 총설에서는 유기트랜지스터의 유기반도체/절연체 계면에서 일어나는 바이어스 스트레스 효과에 대한 이론적 소개와 현재까지 밝혀진 전하트래핑 현상을 소개하고자 한다.

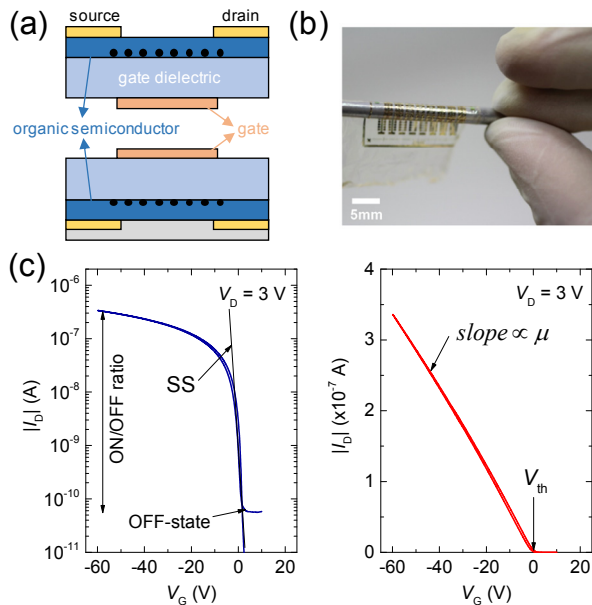


Figure 1. (a) Device structure of organic field-effect transistors, OFETs: top-contact bottom-gate, TCBG (top), bottom-contact top-gate, BCTG (bottom). Charge carriers accumulated by gate-bias are shown as black circles, which are located at the interface between organic semiconductor and gate dielectric. (b) A picture of OFETs array rolled on a rod with radius of 2 mm. Reproduced with permission from ref [2]. Copyright 2016 Wiley. (c) Transfer characteristics of OFET based on rubrene semiconductor. SS: subthreshold slope, V_D : drain voltage, V_{th} : threshold voltage, μ : field-effect mobility.

2. 유기트랜지스터의 구동원리와 바이어스 스트레스 효과의 현상 및 분석

2.1. 유기트랜지스터의 구동원리와 계면의 중요성

유기트랜지스터는 Fig. 1a-b에 보는 바와 같이 유기반도체와 절연체가 맞닿아 있고, 그 주변을 소스, 드레인, 게이트 전극으로 이루어져 있는 스위칭 소자이다. 게이트 전압 인가에 따라 유기반도체/절연체 계면의 전기적 상태를 절연성에서 전도성으로 가역적으로 변화시킬 수 있다[13]. 이는 게이트 전압에 따라 소스에서 드레인으로 흘러가는 드레인 전류 변화를 관찰하는 트랜스퍼 커브(transfer curve)로부터 확인할 수 있다. 트랜스퍼 커브로부터 소자의 다양한 성능을 정량화할 수 있는데, 전하이동도(μ), 문턱전압(V_{th}), 문턱전압이하 기울기(SS), 이력상태, 오프상태 전류 등이 Fig. 1c에 나타나 있다. 유기트랜지스터는 전하가 유기반도체/절연체 계면을 따라 이동하기 때문에 계면 상태가 전하이동특성에 매우 큰 영향을 미친다. 소자의 온/오프가 게이트 전압으로 조절되기 때문에 바이어스 스트레스 효과는 대부분 게이트 전압에 의해 계면에 포집된 전하들이 여러가지 원인에 의해 트래핑되는 현상과 관련 있다[14].

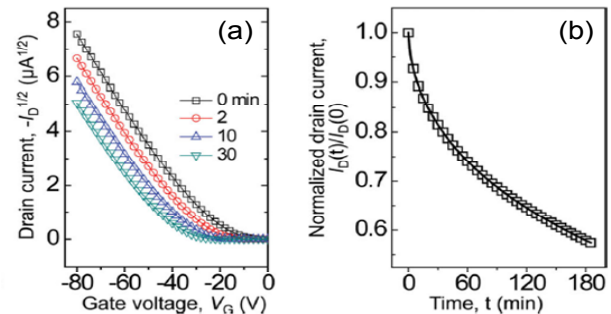


Figure 2. (a) Typical transfer characteristics of pentacene OFETs subjected to a prolonged period of gate-bias stress ($V_G = -80$ V). (b) In situ measurements of the drain current of a pentacene OFET as a function of the bias-stress time for a fixed $V_G = -60$ V, $V_D = -5$ V. The solid line follows a stretched exponential function. Reproduced with permission from ref [10]. Copyright 2014 Wiley.

2.2. 바이어스 스트레스 효과의 현상 및 분석

유기트랜지스터의 바이어스 스트레스 효과를 관찰하는 방법은 소자에 게이트 전압을 인가한 후 스트레스 시간이 지남에 따라 1) 트랜스퍼 곡선을 구하는 방법(Fig. 2a)과 2) 온상태 드레인 전류를 측정하는 방법(Fig. 2b)이 있다[10]. 온상태를 유지하기 위한 고정된

게이트 전압이 인가되고, 이로 인해 소자의 유기반도체/절연체 계면에 높은 밀도로 전하가 집중된다(후자의 방법에서는 드레인 전압도 함께 인가된다). 첫번째 방법은 주기적으로 얻어지는 트랜스퍼 곡선을 통해 문턱전압, 전하이동도, 문턱전압이하 기울기, 이력현상의 변화를 동시에 모니터링 할 수 있어 소자의 상태를 다각도로 분석할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 트랜스퍼 곡선을 구하기 위해 게이트 전압인가를 잠시 멈추어야 하므로, 그 사이 스트레스 효과를 빠르게 회복하는 전하(rapid detrapping)는 측정되지 않는다는 단점이 있다. 두번째 방법은 게이트 전압인가가 계속 유지되므로, 트랩된 전하가 회복하는 현상은 막을 수 있다. 하지만, 드레인 전류 감소가 문턱전압 변화, 전하이동도 감소 등 어떤 요인에 의한 것인지 명확하게 밝혀내는데 한계가 있다. 따라서, 이 방법에서는 문턱전압 변화가 주요인이라 가정(전하이동도는 고정이라 가정)하고 정량적 분석을 수행한다.

바이어스 스트레스 효과의 정량 분석을 위해 많은 수학적 모델이 제시되었고, Fig. 2에서 보는 바와 같이 문턱전압 이동에 의한 드레인 전류 변화를 주로 해석하였다. 가장 유효한 모델은 늘어난 지수 함수(stretched exponential function)로 비정질 실리콘 트랜지스터의 바이어스 스트레스 효과를 설명하기 위해 최초로 제안되었다[14, 15]. 비정질 실리콘 트랜지스터에서는 수소의 분산적 움직임(dispersive process)이 바이어스 스트레스 효과의 원인이었다[16, 17]. 유기트랜지스터에서는 이 메커니즘이 유효하지 않지만, 흥미롭게도 대다수 실험결과가 늘어난 지수 함수를 따르고 있다[5, 18, 19]. 따라서, 전하의 이동가능준위(mobile state)에서 트랩준위의 분산적 움직임이 유기트랜지스터의 바이어스 스트레스 효과의 원인으로 판단하고 있으며, 분산적 움직임 메커니즘을 규명하거나 이를 정량화하는 지표인 확산계수(diffusion coefficient)를 구하는 연구가 수행되고 있다[20, 21].

3. 바이어스 스트레스에 의한 전하트래핑

3.1. 유기반도체 결정학 미세구조와 바이어스 스트레스

Kalb 연구팀은 유기반도체 단결정을 이용한 유기트랜지스터의 바이어스 스트레스 안정성을 연구하였다[22]. 특히, 루브렌(rubrene) 단결정 유기트랜지스터(유기반도체: 루브렌 단결정, 절연체: Cytop)의 경우, 불활성 분위기에서 두 시간 동안의 바이어스 스트레스에도 소자의 전기적 특성 변화가 거의 없음을 관찰하였다(문턱전압 변화 0.3% 이하) (Fig. 3). 이와 반대로 비정립계를 가진 다결정계 유기트랜지스터(유기반도체: pentacene, 절연체: Cytop)는 같은 바이어스 스트레스

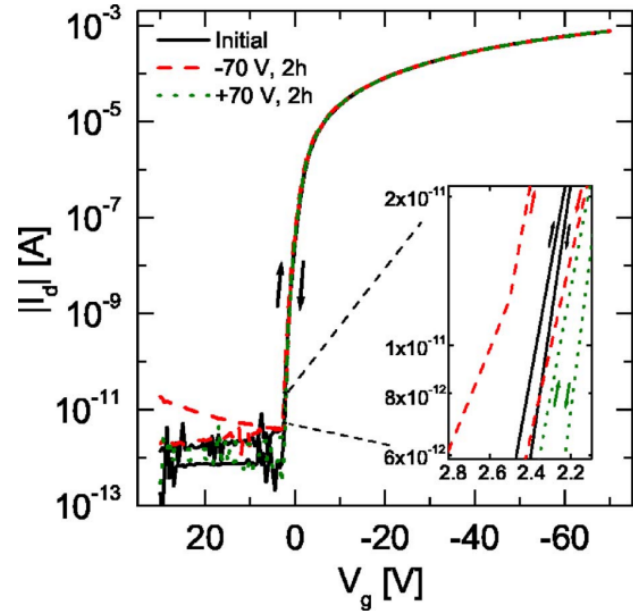


Figure 3. Bias-stress stability measured at $V_D = -80$ V prior to the stress sequence (full black line), after 2 h of gate bias stress at $V_G = -70$ V (dashed red line), and after subsequent gate bias stress at $V_G = +70$ V for 2 h (dotted green line) for a rubrene single crystal OFET. Reproduced with permission from ref [23]. Copyright 2007 American Institute of Physics.

환경에서 명확한 불안정성이 관찰되었다(문턱전압 변화 7.4% 이상).

용액 공정으로 제조된 고분자 반도체 박막은 모노머의 화학구조, 후처리 공정, 분자량 등에 따라 다양한 미세구조를 가진다. 결정성이 높은 고분자 박막을 유기트랜지스터에 적용했을 때, 높은 바이어스 스트레스 안정성을 가짐이 여러 연구결과로 밝혀졌다. Street 연구팀은 PBTtT (poly[2,5-bis(3-tetradecylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene]) 유기트랜지스터가 PQT-12 (poly(3,3''-didodecylquaterthiophene)) 유기트랜지스터에 비해 높은 바이어스 스트레스 안정성을 가지는 원인을 PBTtT의 상대적으로 높은 결정성으로 설명하였다[23]. Kim 연구팀은 PQTBTz-C12 (poly(didodecylquaterthiophene-alt-didodecylbithiazole)) 유기트랜지스터의 열처리 전후를 비교한 결과 결정성이 향상된 열처리소자가 약 5배 높은 바이어스 스트레스 안정성을 가짐을 증명하였다 (Fig. 4)[24]. 또한, PQTBTz-C12는 분자량이 증가할수록 액정성에서 반결정성으로 변화하는데, 반결정성에서 바이어스 스트레스 안정이 낮음을 확인하여 미세구조 형태의 중요성을 밝혔다[24].

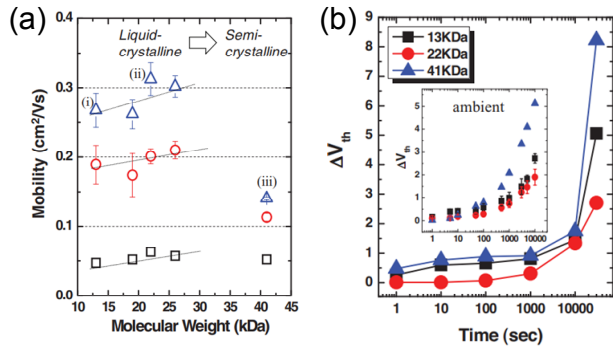


Figure 4. (a) Change of average field-effect mobility as a function of molecular weight and annealing temperature of PQTBTz-C12 thin film. (b) Threshold voltage shift (ΔV_{th}) of PQTBTz-C12 OFETs as a function of molecular weight under inert conditions ($H_2O < 1$ ppm and $O_2 < 1$ ppm): gate bias $V_G = -20$ V and drain bias $V_D = -1$ V. The inset shows ΔV_{th} measured under ambient conditions (RH ~40% at 25 °C) over a period of 10^4 s. Reproduced with permission from ref [24]. Copyright 2011 Wiley.

3.2. 유기반도체/절연체 계면 간 전하이동

전하트래핑의 가장 주된 원인 중 하나는 유기반도체/절연체 계면을 통과하는 전하이동에서 기인한다. 이는 이동가능전하(mobile charge carrier)가 유기트랜지스터의 전도성 채널에서 절연체로 터널링하여 이동불가능 상태로 변화하는 것을 의미한다. 이 현상은 바이어스 스트레스가 인가된 p-type 유기트랜지스터(유기반도체: polytriarylamine, 절연체: SiO₂)가 유기반도체층을 제거하여도 절연체 표면이 양의 전하로 대전되어 있고, 새로운 유기반도체층을 도입하여도 바이어스 스트레스 효과가 유지되는 것을 확인하여 증명하였다[25]. Podzorov 연구팀은 유기반도체가 가진 이동가능전하의 에너지 준위와 절연체가 가진 이동불가능 상태 에너지 준위 간의 차이가 계면 간 전하이동속도(charge transfer rate)를 결정짓는다고 보고하였다[11]. 바이어스 스트레스에 의한 드레인 전류 변화 관찰과 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital) 준위를 관찰할 수 있는 UPS(Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy) 측정을 통해, 유기반도체의 HOMO 준위와 절연체의 편재화 에너지 준위 간의 겹쳐짐이 커질수록 계면 간 전하이동이 빨라지고, 바이어스 스트레스 효과가 상승함을 증명하였다 (Fig. 5). 이를 해결하기 위해 Cytop과 같은 불소화 절연체 고분자를 유기반도체/절연체 계면층으로 도입하여 절연체 표면의 이온화 포텐셜(ionization potential)을 높이거나 계면 간 전하터널링을 막기 위한 나노크기수준의 다양한 물리적 배리어를 삽입하는 방법이 제시되고 있다[22, 26-28].

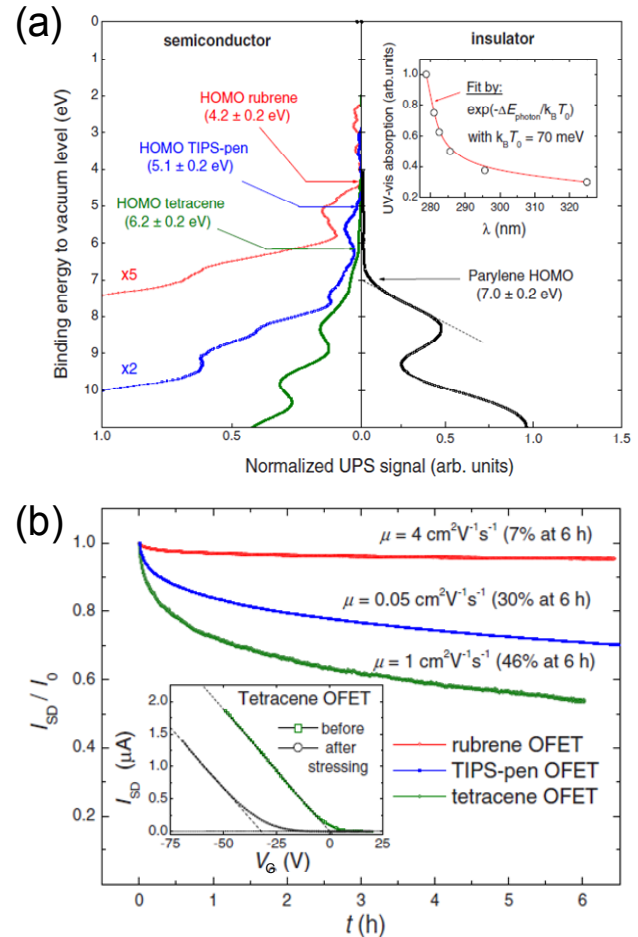


Figure 5. (a) Left: UPS spectra of rubrene (red), TIPS-pen (blue), and tetracene (green). Right: UPS spectrum of ultrathin (10 nm) parylene-N on gold. The inset is a UV-visible optical absorption spectrum of parylene-N, showing a ~1.5 eV-wide tail of states below the 280 nm absorption edge. (b) Normalized bias stress curves, $I_{SD}(t)/I_0$ of several single-crystal OFETs ($V_G = -80$ V, $V_{SD} = 25$ V, $C_i = 2.35$ nFcm⁻²). Reproduced with permission from ref [11]. Copyright 2010 The American Physical Society.

3.3. 수소양이온 이동 (proton migration) 메커니즘

바이어스 스트레스 효과는 유기반도체/절연체 계면에서 형성된 수소양이온 이동으로 해석될 수 있다. 이동가능홀전하(mobile hole carrier)와 습도에 의한 물분자가 공존할 때 전하이동층에서 홀전하(h⁺)는 전기화학 반응에 의해 수소양이온(H⁺)으로 전환된다: $2H_2O + 4h^+ \leftrightarrow 4H^+ + O_2(g)$ [20, 21]. 계면에서 형성된 수소양이온은 가역적으로 절연체 내부로 침투할 수 있고, 이는 게이트 전압에 의한 전기장을 차단하여 전하이동층에 이동가능홀전하의 밀도를 감소시킨다. 고분자 절연체

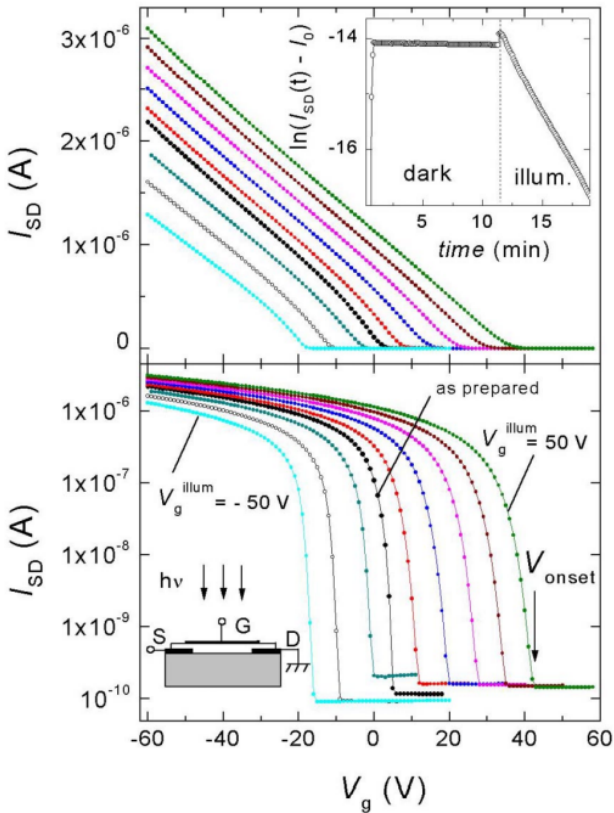


Figure 6. Linear (top) and semilog (bottom) plots of the $I_D(V_G)$ of a rubrene OFET, measured at a fixed $V_D = 5$ V in the dark after illumination of the device with a white light. During illumination, different V_G^{illum} from -50 to 50 V. The illumination time was 2 min for positive V_G^{illum} and 10–40 min for negative V_G^{illum} . The top inset shows that I_{SD} , measured at fixed $V_D = 5$ V and $V_G = -60$ V, rapidly decreases under illumination due to V_{onset} shift. Reproduced with permission from ref [29]. Copyright 2005 The American Physical Society.

가 사용될 경우, 고분자 체인말단이 가진 자유부피(free volume)를 이용하여 수소양이온 이동이 가능하고, 체인말단 밀도가 증가할수록 수소양이온 이동속도와 바이어스 스트레스 효과가 증대됨이 밝혀졌다[18].

3.4. 광유도 바이어스 스트레스 효과 (photo-induced bias-stress effect)

유기반도체와 고분자절연체 계면에서 전하이동과 그에 따른 드레인 전류 변화는 소자에 빛이 조사되었을 때 더욱 가속화됨이 밝혀졌다[29, 30]. 예를 들어 루브렌 단결정 트랜지스터(유기반도체: 루브렌 단결정, 절연체: parylene-N)는 어두운 상황에서 드레인 전류 감소량은 1%/hr로 매우 작았지만, 가시광 조사하에서 소

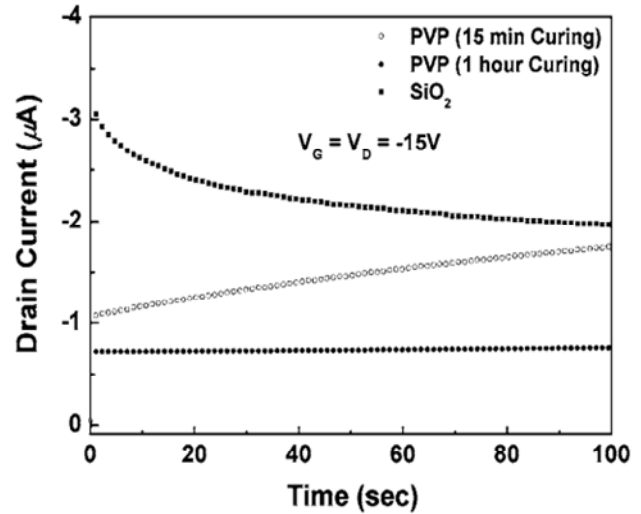


Figure 7. Time-dependent I_D characteristics of pentacene OFETs with variable curing time of PVP gate dielectric under a gate bias stress of $V_G = V_D = -15$ V. Reproduced with permission from ref [35]. Copyright 2006 American Institute of Physics.

자는 명확한 드레인 전류 감소를 보여주었다. 이 현상을 광유도 바이어스 스트레스 효과라 명하고, 빛의 조사와 게이트 전압 인가가 동시에 이루어질 때 발생한다 (Fig. 6). 또한, 광유도에 의한 계면간 전하이동 속도는 흡수계수, 빛의 밝기, 게이트 전압이 가장 큰 영향을 준다. 흥미로운 점은 인가된 게이트 전압의 극성에 따라 계면 간 이동하는 전하 종류를 결정할 수 있다는 것이다: 게이트 전압 극성이 양(음)이면 전자(홀)전하가 계면을 통과하여 이동한다. 이에 따라 문턱전압 이동 방향 및 크기도 선택적으로 조절할 수 있다. 이 현상은 광트랜지스터의 광학 민감성을 높이는데 장점으로 작용할 수 있다. 계면을 통과하여 고분자절연체에 트랩된 전하는 안정된 상태를 유지하지만, 게이트 전압 인가없이 빛이 조사되면 트랩된 상태를 쉽게 풀어 이 메커니즘을 이용해 메모라이징/이레이징 가능한 소자를 개발하려는 시도도 이루어지고 있다[30, 31].

3.5. 바이폴라론 (bipolaron) 형성

바이어스 스트레스 효과는 이동이 어려운 바이폴라론 형성으로도 설명할 수 있다. 같은 극성을 띤 두 전하간에 척력(Coulombic repulsion)에 의해 분리된 폴라론 상태와 바이폴라론 상태 사이에는 큰 에너지 장벽이 존재하고[32], 이로 인해 형성된 바이폴라론은 전하이동에 기여하지 못하고, 드레인 전류를 감소시키는데 기여한다. 이 메커니즘에 기초한 수학적 모델과 실제 실험데이터가 일치함을 F8T2 (poly(9-9'-dioctyl-

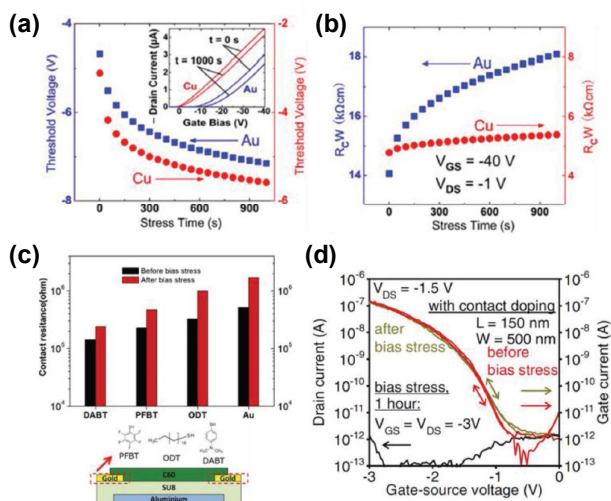


Figure 8. (a) Time-dependent threshold voltage shifts for pentacene OFETs with different electrodes (Au or Cu). Inset: transfer characteristics measured prior to the bias stress, after 1000 s of bias stress at $V_D = -1$ V. (b) Normalized contact resistance shifts of pentacene OFETs with Au or Cu electrodes as a function of the bias stress time. (c) Contact resistance of C60 OFETs with different gold electrodes, before and after bias stress at $V_D = 10$ V and $V_G = 20$ V for 1 h. (d) Transfer characteristics for contact-doped OFETs, before and after bias stress. Reproduced with permission from ref [9]. Copyright 2019 Wiley.

fluorene-co-bithiophene)) 트랜지스터, polythiophene 트랜지스터를 이용해 증명하였다[33]. Cho 연구팀은 광활성 전하포집 분광기(photo-excited charge collection spectroscopy)를 이용해 바이폴라론 에너지 준위와 밀도를 정량화하였다[34].

3.6. 느린분극 (slow polarization) 효과

바이어스 스트레스 효과는 보통 드레인 전류의 감소로 나타나지만, 극성 화학기를 가진 고분자 절연체가 이용되었을 경우 반대로 드레인 전류 상승으로 이어지는 경우가 있다. 수산화기와 같은 강한 쌍극자 화학기를 가진 고분자(대표적으로 poly(4-vinyl phenol) (이하 PVP)이 있다)가 절연체로 사용될 때, 게이트 전압에 의한 전기장은 쌍극자 화학기들을 정렬시키게 된다. 하지만, 이러한 분극은 화학기의 움직임을 요구하기 때문에 속도가 느리고 시간을 요구한다[35, 36]. 이러한 느린분극 현상이 존재할 때, 게이트 전압에 의한 바이어스 스트레스 실험이 진행된다면 실험 초기에는 분극하지 못한 쌍극자 화학기들이 정렬되면서 더 많은 전하를 전도층에 모을 수 있게 되어, 드레인 전류가 증가하

는 현상이 발생한다. Hwang 연구팀은 펜타센트랜지스터(유기반도체: pentacene, 절연체: PVP)에서 PVP 절연체의 가교결합 정도에 따라 바이어스 스트레스 안정성을 평가하였다[35]. 완전가교가 이루어진 소자에서는 바이어스 스트레스에 의한 드레인 전류 감소가 나타나지만 부분가교가 이루어져 수산화기가 많이 존재하는 소자에서는 드레인 전류 상승이 일어났다 (Fig. 7). 최적화된 부분가교에서 소자는 매우 안정한 특성을 나타냈다. 고분자 절연체가 수분을 함유하고 있을 때도 느린분극 효과가 발생함이 증명되었다.

3.7. 접촉저항 (contact resistance) 효과

소스, 드레인 전극과 유기반도체와의 계면은 전하를 주입 및 수집하는데 매우 중요한 부분이고, 이 부분의 에너지 장벽은 트랜지스터 소자의 접촉저항으로 정량화될 수 있다. 접촉저항을 낮게 만들어 오믹접촉(Ohmic contact)을 구현하는 것은 높은 전하이동도를 가지는데 중요할 뿐만 아니라 바이어스 스트레스 안정성 향상에도 기여한다. Yan 연구팀은 펜타센트랜지스터의 전극을 Au와 Cu를 도입하여 접촉저항과 바이어스 스트레스 안정성을 평가한 결과, Cu 전극이 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다(Fig. 8a-b)[37]. Robin 연구팀은 소스-드레인 전극에 자기조립단층막을 도입해 C60 박막의 결정계 크기를 올린 결과 접촉저항이 감소하였고 바이어스 스트레스 안정성이 향상되었다(Fig. 8c)[38]. 이외에도 전극 근처 유기반도체 층을 도핑하여 접촉저항을 감소하려는 시도도 이루어지고 있다 (Fig. 8d)[39].

4. 결론

본 총설에서는 유기반도체/절연체 계면에서의 전하이동을 이용한 유기 전계효과 트랜지스터를 소개하고, 소자 불안정성에 기여하는 핵심 원인인 바이어스 스트레스 효과를 소개하였다. 특히, 바이어스 스트레스 효과에 의해 소자성능을 저하시키는 전하트랩을 분석하고 전하트랩 메커니즘을 규명한 연구결과를 중심으로 소개하였다. 전하트랩은 유기반도체, 절연체, 유기반도체/절연체 계면에 다양한 원인으로 분포하고 있으며, 이 원인들의 제어가 고안정성 유기트랜지스터 개발에 중요한 요소로 판단된다.

References

1. <https://www.medgadget.com/2018/07/wearable-medical-device-market-analysis-2018-growth-by-top-companies-and-trends-by-types-and-application-forecast-ana>

- lysis-to-2027.html
2. A. Reuveny, S. Lee, T. Yokota, H. Fuketa, C. M. Siket, S. Lee, T. Sekitani, T. Sakurai, S. Bauer, and T. Someya. *Adv. Mater.*, **28**, 3298 (2016).
 3. J. Rogers, G. Malliaras, and T. Someya. *Science Advances*, **4**, eaav1889 (2018).
 4. A. F. Paterson, S. Singh, K. J. Fallon, T. Hodsdon, Y. Han, B. C. Schroeder, H. Bronstein, M. Heeney, I. McCulloch, and T. D. Anthopoulos. *Adv. Mater.*, **30**, 1801079 (2018).
 5. H. Sirringhaus. *Adv. Mater.*, **21**, 3859 (2009).
 6. H. T. Yi, Z. Chen, A. Facchetti, and V. Podzorov. *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 2365 (2016).
 7. M. Nikolka, I. Nasrallah, B. Rose, M. K. Ravva, K. Broch, A. Sadhanala, D. Harkin, J. Charnet, M. Hurhangee, A. Brown, S. Illig, P. Too, J. Jongman, I. McCulloch, J.-L. Bredas, and H. Sirringhaus. *Nat. Mater.*, **16**, 356 (2017).
 8. J. D. Wood, S. A. Wells, D. Jariwala, K.-S. Chen, E. Cho, V. K. Sangwan, X. Liu, L. J. Lauhon, T. J. Marks, and M. C. Hersam. *Nano Lett.*, **14**, 6964 (2014).
 9. S. Park, S. H. Kim, H. H. Choi, B. Kang, and K. Cho. *Adv. Funct. Mater.*, n/a, 1904590.
 10. H. H. Choi, W. H. Lee, D. H. Kim, and K. Cho. *Adv. Mater.*, **26**, 1660 (2014).
 11. B. Lee, A. Wan, D. Mastrogiovanni, J. E. Anthony, E. Garfunkel, and V. Podzorov. *Phys. Rev. B*, **82**, 085302 (2010).
 12. V. Podzorov, E. Menard, A. Borissov, V. Kiryukhin, J. A. Rogers, and M. E. Gershenson. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 086602 (2004).
 13. M. Fahlman, S. Fabiano, V. Gueskine, D. Simon, M. Berggren, and X. Crispin. *Nature Reviews Materials*, **4**, 627 (2019).
 14. S. G. J. Mathijssen, M. Kemerink, A. Sharma, M. Cölle, P. A. Bobbert, R. A. J. Janssen, and D. M. de Leeuw. *Adv. Mater.*, **20**, 975 (2008).
 15. Y. Chen, and V. Podzorov. *Adv. Mater.*, **24**, 2679 (2012).
 16. W. B. Jackson, J. M. Marshall, and M. D. Moyer. *Phys. Rev. B*, **39**, 1164 (1989).
 17. F. R. Libsch, and J. Kanicki. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 1286 (1993).
 18. H. H. Choi, W. H. Lee, and K. Cho. *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 4833 (2012).
 19. T. Miyadera, S. D. Wang, T. Minari, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi. *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 033304 (2008).
 20. P. A. Bobbert, A. Sharma, S. G. J. Mathijssen, M. Kemerink, and D. M. de Leeuw. *Adv. Mater.*, **24**, 1146 (2012).
 21. A. Sharma, S. G. J. Mathijssen, M. Kemerink, D. M. d. Leeuw, and P. A. Bobbert. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 253305 (2009).
 22. W. L. Kalb, T. Mathis, S. Haas, A. F. Stassen, and B. Batlogg. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 092104 (2007).
 23. R. A. Street. *Phys. Rev. B*, **77**, 165311 (2008).
 24. D. H. Kim, J. Lee, J.-I. Park, J. W. Chung, W. H. Lee, G. Giri, B. Yoo, B. Koo, J. Y. Kim, Y. W. Jin, K. Cho, B.-L. Lee, and S. Lee. *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 4442 (2011).
 25. S. G. Mathijssen, M. J. Spijkman, A. M. Andringa, P. A. van Hal, I. McCulloch, M. Kemerink, R. A. Janssen, and D. M. de Leeuw. *Adv. Mater.*, **22**, 5105 (2010).
 26. A. Virkar, S. Mannsfeld, J. H. Oh, M. F. Toney, Y. H. Tan, G.-y. Liu, J. C. Scott, R. Miller, and Z. Bao. *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 1962 (2009).
 27. F. Gholamrezaie, A.-M. Andringa, W. S. C. Roelofs, A. Neuhold, M. Kemerink, P. W. M. Blom, and D. M. de Leeuw. *Small*, **8**, 241 (2012).
 28. J. Park, W. H. Lee, S. Huh, S. H. Sim, S. B. Kim, K. Cho, B. H. Hong, and K. S. Kim. *J. Phys. Chem. Lett.*, **2**, 841 (2011).
 29. V. Podzorov, and M. Gershenson. *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 016602 (2005).
 30. H. H. Choi, H. Najafzadeh, N. Kharlamov, D. V. Kuznetsov, S. I. Didenko, K. Cho, A. L. Briseno, and V. Podzorov. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 34153 (2017).
 31. H. H. Choi, J. Park, S. Huh, S. K. Lee, B. Moon, S. W. Han, C. Hwang, and K. Cho. *ACS Photonics*, (2017).
 32. R. Di Pietro, I. Nasrallah, J. Carpenter, E. Gann, L. S. Kölln, L. Thomsen, D. Venkateshvaran, K. O'Hara, A. Sadhanala, M. Chabinyc, C. R. McNeill, A. Facchetti, H. Ade, H. Sirringhaus, and D. Neher. *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 8011 (2016).
 33. R. A. Street, A. Salleo, and M. L. Chabinyc. *Phys. Rev. B*, **68**, 085316 (2003).
 34. H. H. Choi, B. Kang, B. Moon, E. Song, and K. Cho. *Adv. Electron. Mater.*, **2**, 1500380 (2016).
 35. D. K. Hwang, K. Lee, J. H. Kim, S. Im, J. H. Park, and E. Kim. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 093507 (2006).
 36. D. K. Hwang, C. Fuentes-Hernandez, J. Kim, W. J. Potscavage Jr., S.-J. Kim, and B. Kippelen. *Adv. Mater.*, **23**, 1293 (2011).
 37. Y. Yan, X. J. She, H. Zhu, and S. D. Wang. *Org. Electron.*, **12**, 823 (2011).
 38. M. Robin, M. Harnois, Y. Molard, and E. Jacques. *Org. Electron.*, **39**, 214 (2016).
 39. F. Ante, D. Kälblein, U. Zschieschang, T. W. Canzler, A. Werner, K. Takimiya, M. Ikeda, T. Sekitani, T. Someya, and H. Klauk. *Small*, **7**, 1186 (2011).