

유기반도체의 전하수송 특성 및 측정 방법

이창희

1. 서론

실생활에서 익숙하게 볼 수 있는 대표적인 유기 소재인 플라스틱은 가공하기 쉽고, 가볍고, 값이 싸기 때문에 다양한 응용에 많이 사용되고 있지만, 강도가 약하고 전기전도도와 열전도도가 낮은 반도체이다. 그런데 반도체 또는 금속과 같은 전기적·광학적 특성을 가지는 유기 물질도 있다.^{1,2} 예를 들면, 최초의 고분자 발광다이오드를 개발하는데 사용된 물질인 폴리파라페닐렌비닐렌 [poly(p-phenylenevinylene), PPV]은³ 에너지 밴드갭(bandgap)이 약 2.4 eV인 반도체이다.⁴ 이와 같은 고분자에 도핑을 하면 전기전도도를 반도체에서 금속의 영역까지 변화시킬 수 있어서 전도성 고분자(conducting polymer) 또는 합성 금속(synthetic metal)이라고 부른다.^{1,5,6} 전도성 고분자는 전자와 차폐, 정전방지, 산화방지, 이차전지, 축전지 등 다양한 분야에 사용될 수 있다.^{1,2}

이와 같은 전도성 고분자를 포함한 유기반도체는 반도체로서의 특성과 유기 재료의 장점(가공성, 분자 설계를 통한 맞춤형 재료 합성, 등)을 같이 가지고 있는 새로운 반도체 재료로 최근 활발히 연구되고 있다.⁷ 특히 작용기(functional group)를 붙이거나 분자 구조를 변화시키면 전자에너지 구조(electronic structure)와 에너지 밴드갭(energy band gap)을 쉽게 조절할 수 있는 장점이 있다.⁸ 유기반도체는 유기발광다이오드(OLED), 유기박막트랜지스터(OTFT), 유기태양전지, 비선형광학소자, 메모리소자, 바이오센서 등에 응용할 수 있다.⁷⁻¹⁸ 특히 OLED는 이미 휴대폰, 디지털

텔레카메라, PDA 등에 장착된 제품이 나오고 있고, 최근 삼성전자에서 40인치 능동구동 OLED 디스플레이까지 발표하고 있어서 가장 유망한 차세대 디스플레이로 주목받고 있다. 그리고 OTFT는 제조 온도가 낮아서 유연한 플라스틱 기판을 사용할 수 있고, 무기 반도체의 복잡한 제조 공정 대신에 진공증착, 스퍼터링, 또는 잉크젯 프린팅 등의 훨씬 단순한 제조 방법으로 제작이 가능하기 때문에 비용 면에서 저렴하고, 대면적화가 가능하다.¹²⁻¹⁵ 또한 이와 같은 OTFT 기판 위에 LCD나 OLED를 형성하면 구부릴 수 있는 표시소자(flexible display)를 개발할 수 있어서 향후 초박형·초대형 벽걸이 표시소자, 두루마리 TV 등의 출현을 가능하게 한다. 그리고 OTFT는 디스플레이뿐만 아니라 RF tags, 스마트카드 등에 활용될 수 있다.^{12,14,15} 따라서 실리콘에 기반을 둔 전자공학에 이어 유기반도체에 기반을 둔 유기전자공학(organic electronics) 또는 분자전자공학(molecular electronics) 분야가 등장하고 있다.¹⁹⁻²² 이 글에서는 유기반도체에



이창희

1987 서울대학교 물리학과(학사)
1989 서울대학교 물리학과(석사)
1994 University of California at Santa Barbara 물리학(박사)
1994 LG화학기술연구원 선임연구원
1997 인하대학교 물리학과 조교수
2001 인하대학교 물리학과 부교수
2003~ 국제전기기술위원회 OLED Area Manager
현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 부교수

Electrical Transport Properties and Measurement Methods for Organic Semiconductors

서울대학교 전기컴퓨터공학부(Changhee Lee, School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea) e-mail: chlee7@snu.ac.kr

서 전하 수송 특성과 측정 방법에 대해 설명하고자 한다.

2. 전기전도도 또는 비저항 측정

시료에 전기장 E 가 인가되었을 때 흐르는 전류밀도 J 는 옴의 법칙(Ohm's law)에 의해 전기장에 비례한다.

$$J = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

비례상수는 전기전도도(electrical conductivity)라고 하고 비저항(resistivity)의 역수이다. 전기전도도는 전하[전자 또는 정공(hole)] 농도 n , 전하량 e , 이동도(mobility)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = ne\mu \quad (2)$$

전기전도도와 비저항의 SI단위는 각각 S/m와 Ωm 이다.

그런데 실험적으로 시료 내부에 흐르는 전류밀도와 전기장을 정확하게 측정하는 것은 상당히 어렵다. 전류밀도는 시료에 흐르는 전류와 시료의 기하학적인 모양에 의해 결정되고, 전기장도 두 전극 사이의 전위차와 시료의 기하학적인 모양에 의해 결정된다. 그리고 많은 요인들이 시료의 전류 밀도와 전기장의 분포에 영향을 미치기 때문에 이와 같은 요인을 제거하거나 최소화하는 방법을 찾아야 한다. 예를 들면, 두 전극 사이에 온도차가 있다면 열전효과(thermoelectric effect)에 의한 전위차가 생긴다. 또한 주위에 자기장이 있는 경우에는 홀 효과(hall effect)와 자기저항(magnetoresistance)이 생긴다. 일반적으로 전류를 한 방향으로 흘려서 두 전극 사이의 전위차를 측정하고, 전류의 방향을 반대로 해서 다시 전위차를 측정하여 평균을 내는 방법을 사용한다. 이와 같이 하면 측정에 영향을 주는 여러 물리적인 요인들을 상쇄시킬 수 있다.²³

시료의 기하학적인 모양이 **그림 1**에 나타난 것과 같이 길이가 l 이고, 단면적이 A 라고 하자. 시료와 전극이 옴접촉(ohmic contact)을 형성하고 있다고 가정하고, 시료 양 끝의 전위차(electric potential difference)가 V 일 때 균일한 전류 I 가 흐르고 있다고 가정하자. 전기장은 $E=V/l$ 이고, 전류밀도는 $J=I/A$ 이므로 전기전도도는 식 (3)과 같다.

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{I/A}{V/l} = \left(\frac{I}{V}\right)\left(\frac{l}{A}\right) = \frac{1}{R}\left(\frac{l}{A}\right) \quad (3)$$

그런데 **그림 1**에 나타난 것과 같은 측정방법은 일반적으로 많이 사용하고 있지만, 시료자체의 저항뿐만 아니라 접촉저항(contact resistance)의 영향이 있다. 접촉 저항의 원인은 여러 가지가 있는데, 대표적인 요인으로는 전극과 시료의 일함수의 차이에 의해 계면에서 포텐셜 에너지 장벽이 생기는 것을 들 수 있다. 따라서 접촉저항을 제거하고 시료 자체의 저항을 측정하기 위해 **그림 2**에 나타난 것과 같은 4 단자(4 probe) 측정 방법을 사용한다. 바깥쪽에 있는 두 전극으로 전류 I 를 흐르게 하고, 안쪽에 있는 두 전극 사이의 전위차 ΔV 를 측정하여 전기전도도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{I}{\Delta V} \left(\frac{l}{wt}\right) \quad (4)$$

그림 2에 나타난 것과 같이 사각형 모양이 아닌 임의의 모양을 가진 2차원 등방성 물질의 전기전도도 또는 비저항 측정에는 van der Paw 방법을 사용한다.²⁴ 이와 같은 측정에 있어서 주의할 점은 전극이 시료의 주변부에 위치하고, 접촉부분이 시료의 크기

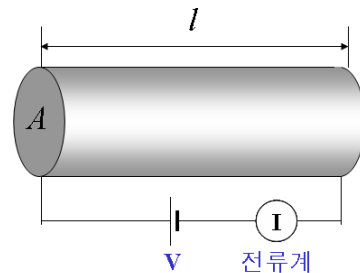


그림 1. 시료의 저항 측정을 통해 전기전도도를 구하는 방법.

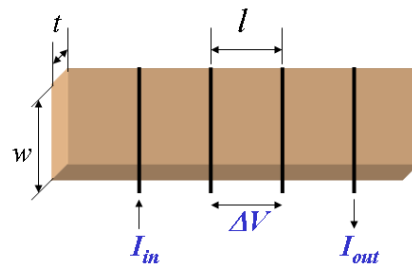


그림 2. 4 단자(4 probe) 전기전도도 측정 방법.

에 비해 작고, 시료의 두께가 균일하도록 해야 한다.

그림 3에 나타난 것과 같이 4개의 전극을 시료의 주변부에 접촉한 후 두 단자 1, 2에 전류 I_{12} 를 흘리고, 나머지 대응하는 두 단자 3, 4사이의 전위차 V_{43} 를 측정하여 저항 $R_1 = V_{43}/I_{12}$ 을 계산한다. 그리고 다시 다른 두 단자 1, 4에 전류 I_{14} 를 흘리고 나머지 대응하는 두 단자 2, 3사이의 전위차 V_{23} 를 측정하여 저항 $R_2 = V_{23}/I_{14}$ 를 계산한다. 이 값들을 이용하여 전기전도도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{\pi d}{2 \ln 2} (R_1 + R_2) f \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (5)$$

이 식에서 f 는 저항의 비율 R_1/R_2 에 의존하는 초월 함수(transcendental function)로 다음 식을 만족시킨다. 그리고 **그림 4**에 수치해를 나타냈다.

$$\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} = \frac{f}{2 \ln 2} \cosh^{-1} \left[\frac{1}{2} e^{\frac{\ln 2}{f}} \right] \quad (6)$$

원 또는 사각형과 같은 시료에 대칭적으로 동일한 간격으로 전극이 있을 때 $R_1 = R_2$ 이고 $f=1$ 이 된다. 그리고 $f=1$ 일 때 측정오차도 작아진다.²⁶ **그림 5**에 van der Paw 방법에 잘 사용되고 있는 시료의 모양을 나

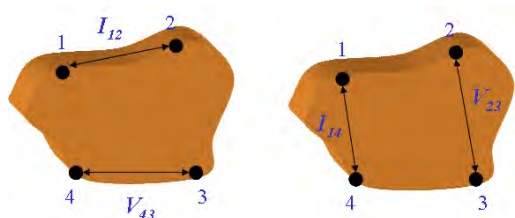


그림 3. Van der Pauw 비저항 측정 방법.

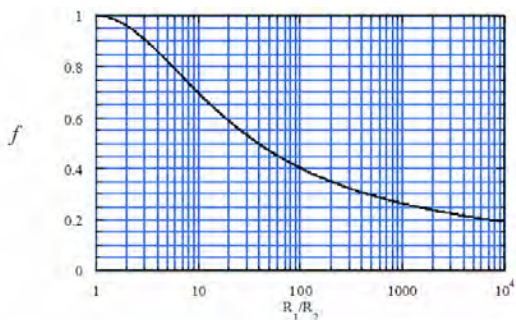


그림 4. Van der Pauw 비저항 측정 방법에서 f 함수의 수치해.

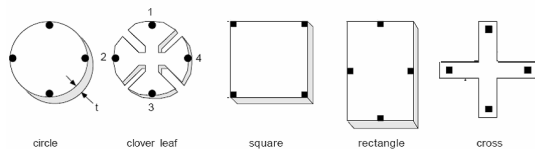


그림 5. Van der Pauw 전기전도도 측정용 시료의 모양.²⁶

타냈다. 원이나 사각형 모양이 잘 사용되고 있으나 전극 접촉 부분의 크기와 위치가 측정에 큰 영향을 미치므로 접촉 위치의 영향을 줄이기 위해 십자가 또는 클로버 모양을 사용하는 경우도 있다.²³

3. 전도성 고분자의 전기전도도

π -공액 고분자(π -conjugate polymer)에 FeCl_3 와 같은 강한 산화 물질로 도핑을 하면 p-형 반도체 특성을 나타내고, 알칼리 금속을 도핑하면 n-형 반도체 특성을 나타낸다.¹ 그리고 도핑을 더욱 많이 하면 전기전도도를 금속의 영역까지 변화시킬 수 있다. 위에 설명한 4단자 측정 또는 Van der Pauw 측정 방법으로 전기전도도를 측정할 수 있다. **그림 6**에 전도성 고분자의 전기전도도를 다른 물질들의 전기전도도와 비교하여 나타냈다. 폴리아세틸렌의 전기전도도는 3×10^4 S/cm 이상으로 구리와 같은 금속의 전기전도도와 유사한 수준까지 올릴 수 있다.^{4,5} 그리고 정전방지 또는 OLED 소자의 양극 계면에서 정공 주입층(hole injection layer)으로 사용되는 PEDOT-PSS의 전기전도도는 $10^{-5} \sim 10$ S/cm 범위를 나타낸다.²⁵

전도성 고분자는 고분자 사슬이 국소화되어 형성된 것과 같은 무질서한 박막을 형성하므로 에너지 준위가 국소화(localization) 된다. 따라서 도핑한 전도성 고분자에는 비록 큰 전하밀도가 있지만 전하들은 이와 같은 국소화된 에너지 준위(localized states)에서 호핑(hopping)을 하므로 전기전도도는 일반적인 금속과 달리 온도에 대해 다음과 같은 의존성을 보인다.^{1,26}

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[-\frac{T_0}{T} \right]^{1/d+1} \quad (7)$$

여기에서 T_0 는 전하가 국소화된 정도를 나타내는 값이고, d 는 전하 수송의 공간적인 차원을 나타낸다. 예를 들면, 3차원에서는 $\log \sigma$ 가 $T^{-1/4}$ 에 비례한다. 식

(7)은 Mott의 variable range hopping (VRH) model에서 얻어진다.²⁶

4. 전하이동도 측정

전기전도도는 식 (2)에 나타난 것과 같이 전하밀도와 전하이동도의 곱에 의해 결정되므로 전하밀도를 추가로 측정할 수 있어야 전하이동도를 구할 수 있다. 무기반도체의 경우 홀 효과(Hall effect) 등을 통해서 전하밀도를 측정할 수 있지만 전도성 고분자를 포함한 유기반도체에서는 홀 효과를 측정하기 어렵다. 따라서

전하이동도를 직접 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

그림 7에 유기반도체에서 많이 사용되고 있는 전하이동도 측정 방법을 나타냈다. 유기반도체에서 전하이동도를 측정하는 가장 직접적인 방법은 다음에 자세히 설명할 비행시간광전도도(time-of-flight photoconductivity, TOF-PC) 측정 방법이다. 만약 트랜지스터를 제작할 수 있으면 트랜지스터의 전류-전압 특성 곡선으로부터 전하이동도를 구할 수 있다. 그런데 이 전하이동도는 아주 얇은 두께의 채널 영역에서 측정된 것이므로 TOF-PC 방법으로 측정된 것과 차이가 나는 경우가 많다. 또한 발광 고분자(light-emitting polymer)와 같이 전류를 흘려주면 빛을 내는 경우 발

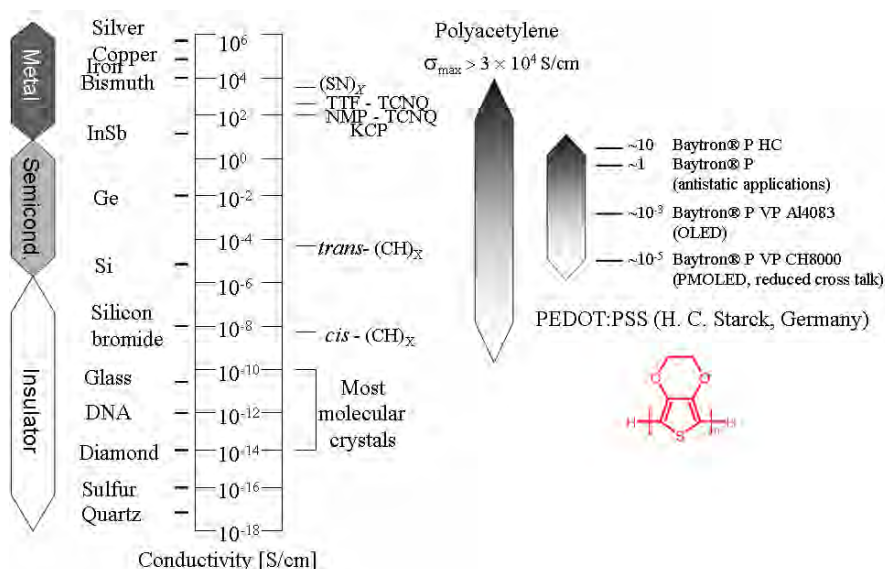


그림 6. 전도성 고분자의 전기전도도와 다른 물질과의 비교.

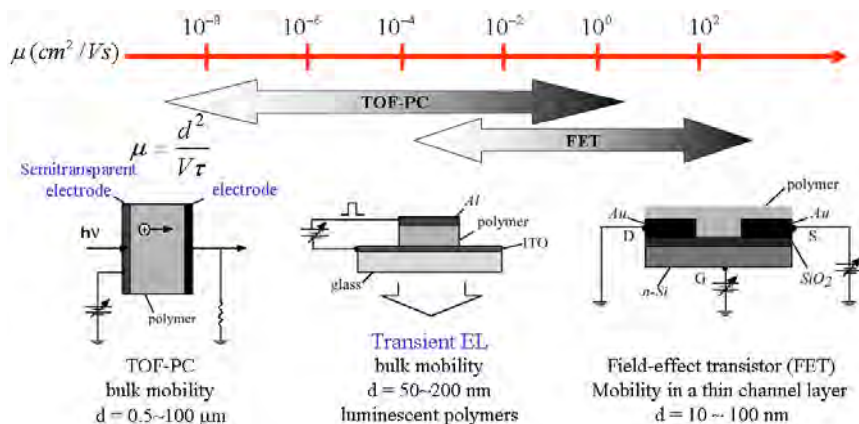


그림 7. 유기반도체의 전하이동도의 범위 및 측정 방법.

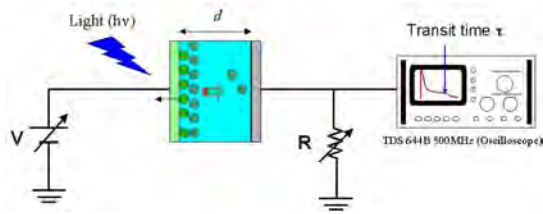


그림 8. Time-of-flight photoconductivity(TOF-PC) 실험을 통한 전하이동도 측정 방법.

광다이오드(LED)를 제작하여 짧은 전압 펄스를 인가한 후 빛이 나오기 시작하는 시간을 측정해서 전하이동도를 구할 수도 있다. 그러나 이 방법의 경우에는 빛이 전압 펄스보다 지연되는 이유가 전하이동도에 의한 원인 외에도 다양하기 때문에 해석에 주의가 필요하다.

유기반도체에서 전하이동도를 측정하는데 가장 많이 사용되는 TOF-PC 측정은 1960년대 초에 LeBlanc,²⁷ Kepler에²⁸ 의해 시작되었다. **그림 8**에 TOF-PC 측정 방법을 도식적으로 나타냈다. 시료의 양 쪽 표면에 전극을 접촉하는데 적어도 한쪽 전극은 빛을 투과할 수 있도록(반)투명전극으로 한다. 이 전극에 전위차 V 를 인가하면 전기장은 시료의 표면에 수직 방향으로 균일하게 형성된다. 주의할 점은 전극과 유기반도체의 접촉은 블로킹 접촉(blocking contact)이 되도록 하여 전극에서 전하 주입이 일어나지 않도록 해야 한다. 이와 같이 하면 전하는 빛에 의해서만 여기되므로 광전도도 측정이 용이해 진다. 투명전극을 통하여 시료 표면에 밴드 갭 이상의 에너지를 가진 짧은 레이저 펄스($h\nu > E_g$ (LUMO-HOMO), 펄스 시간 $\sim ns$)를 쏘이면 전자와 정공이 시료의 표면 근처에서 생기게 된다. 이 경우 시료의 흡수 길이(absorption length, α^{-1})보다 시료의 두께 d ($d\alpha^{-1} \approx 100$)가 아주 크도록 해야 전하는 빛이 입사한 전극 표면 근처에서 생성된다. 일반적으로 $\alpha^{-1} \approx 100$ nm이므로 시료의 두께는 적어도 $1 \mu m$ 이상이 되도록 한다. 투명전극 쪽에 인가된 전압의 극성과 반대되는 전하는 투명전극에서 빠르게 방전되고, 같은 극성의 전하는 시료의 반대편 전극으로 이동하여 반대편 전극에 도달하면 방전이 된다. 이와 같이 전하가 반대 전극에 도달하는 비행시간 τ 를 측정하면 다음 식으로부터 전하이동도를 측정할 수 있다.^{29,30}

$$\mu = \frac{d^2}{V\tau} [cm^2/Vs] \quad (8)$$

그림 9에 레이저로 시료 표면에 전자-정공을 여기시킨 직후부터 오실로스코프(oscilloscope)에서 관측되는 광전류 파형(photocurrent waveform)을 시간에 따라 나타냈다. 전하가 빛이 입사한 전극에서 반대 쪽 전극까지 이동하는 동안에 트랩(trap)되지 않고 일정한 유동 속도($v_d = \mu E = \mu V/d$)로 이동하면 광전류는 비행시간까지($t \leq \tau$) 일정하게 되고, 그 이상의 시간($t \geq \tau$)에서는 급격히 감소하는 모양을 나타낸다. 이와 같이 광전류의 파형에 나타나는 평평한 영역(plateau)의 끝에서 감소하기 시작하는 시간을 비행시간으로 결정한다.

그림 9와 같은 이상적인 광전류 파형을 얻기 위해서 측정의 RC 시간 상수(RC time constant)는 비행시간보다 작아야 한다($RC \ll \tau$). 여기에서 C는 전기용량을 나타내는데 시료의 전기용량이 가장 큰 기여를 한다. 그리고 저항 R은 시료의 저항과 부하저항 등을 포함한 전체 저항인데, 부하 저항은 $1 \sim 100 K\Omega$ 의 범위에서 $RC \ll \tau$ 조건을 만족하도록 결정한다. 그리고 레이저 펄스 시간도 비행시간보다 짧아야 하므로 나노초 영역의 펄스 레이저를 사용한다. 그런데 이와 같은 조건을 만족하더라도 **그림 9**와 같은 이상적인 광전류 파형을 얻기는 상당히 어렵다. 가장 큰 요인을 전하의 트랩핑(trapping)에 의한 영향이다. 전하가 비행하는 동안 깊은 에너지 트랩(deep trap)에 잡히면 전도에 기여하지 않으므로 광전류는 비행시간 전에도 시간에 따라 계속 감소한다. 이와 같은 트랩핑이 심하면 광전류에서 평평한 시간 영역을 찾기 어려워지므로, 비행시간을 정확하게 결정할 수 없다.

빛의 파형이 가우시안(Gaussian) 함수 형태인 경우 전하 밀도도 가우시안 형태일 것이다(**그림 10**). 전하

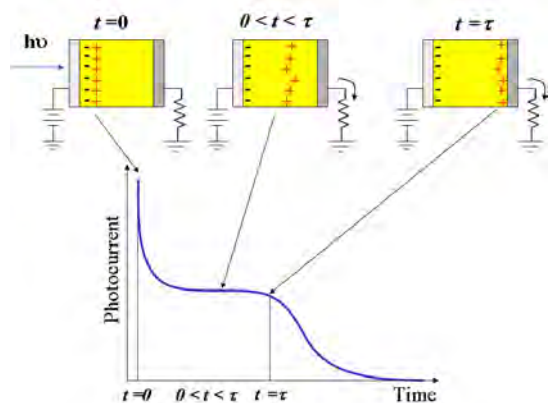


그림 9. TOF-PC 실험에서 측정하는 광전류 파형.

가 전기장 하에서 유동하면서 확산하므로 전하 파속(wave packet)은 시간에 따라 피크(파속의 중심)이 유동 속도 u_0 로 이동하고, 선포는 넓어지게 된다. 전하가 트랩의 영향을 받지 않는 정상적인 수송인 경우(Gaussian transport)에는 전하분포는 계속 가우시안 형태를 유지한다. 그리고 전하 이동도 $\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$ 와 확산계수(diffusion coefficient) $D(\text{cm}^2/\text{s})$ 는 다음과 같은 아인슈타인 관계식(Einstein relation)을 만족한다.

$$\mu = \frac{eD}{kT} \quad (8)$$

그런데 트랩의 영향이 심하면 전하가 계속 트랩에 포획되어 전하 파속의 형태는 시간이 지남에 따라 가우시안 형태에서 벗어나게 된다. 이 경우 **그림 10**에 나타난 것과 같이 파속의 피크는 거의 움직이지 않고 끝 부분에 있는 빠른 속도를 가진 전하들이 계속 반대편 전극으로 이동하게 된다. 이와 같은 전하 수송 현상을 분산적인 수송(dispersive transport)이라고 하며 Scher, Montroll 등이 자세한 분석을 했다.^{30,31} 이와 같은 경우 **그림 11**에 나타난 것과 같이 광전류는 비행시간 τ 를 전 후로 시간에 대한 의존성이 달라진다. 광전류의 시간 의존성을 로그-로그 그래프로 그리면 비행시간 τ 에서 역함수의 기울기가 $-(1-\alpha)$ 에서 $-(1+\alpha)$ 로 변하게 되고, 기울기의 합은 -2 가 된다.

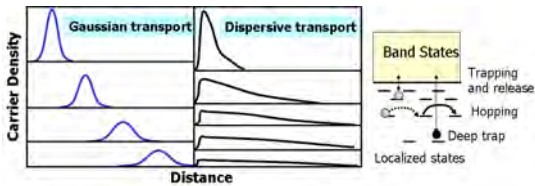


그림 10. 빛에 의해 여기된 전하의 시간에 따른 유동(drift)-확산(diffusion) 모양과 전하의 트랩핑(trapping)과 호핑(hopping)에 대한 도식적인 그림.

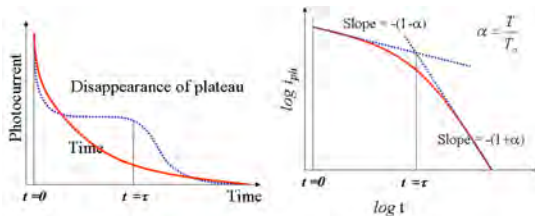


그림 11. 전하가 분산적인 수송(dispersive transport)을 하는 경우의 광전류의 시간에 대한 변화.

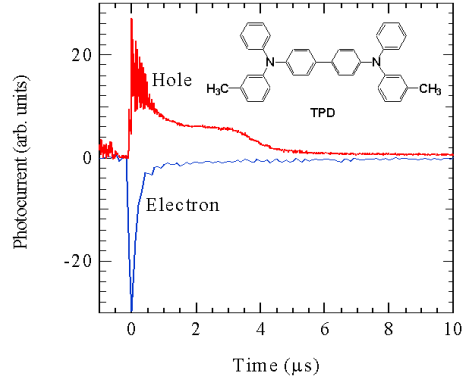


그림 12. 두께 1 μm 인 TPD의 상온에서 측정된 광전류 파형.

상수는 온도에 비례한다.³¹

$$i(t) \sim t^{-(1-\alpha)}, t < \tau \quad (9)$$

$$i(t) \sim t^{-(1+\alpha)}, t > \tau \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{T}{T_0} \quad (11)$$

여기서 T 는 트랩의 에너지가 지수함수적인 분포를 갖는 트랩의 분포를 결정하는 상수이다.

그림 12에는 대표적인 정공 수송 물질인 TPD 박막의 광전류 신호를 나타냈다. 시료의 두께는 1 μm 이고, 질소 레이저 펄스(파장 337 nm, 펄스폭 600 ps)를 ITO 투명전극으로 입사하여 시료에 전자와 정공을 여기시켰다. 정공의 경우 광전류 파형은 초기의 과도전류 이후 비행시간 t 까지 일정한 전류를 보이다가 그 이상에서 급격히 감소한다. 측정된 비행시간으로부터 식 (7)을 사용하여 계산하면 TPD의 hole mobility는 상온에서 전기장의 세기가 0.4 MV/cm일 때 약 $1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 이다. 그런데 전자는 트랩이 심하여 비행시간을 결정하기 어려운 것을 알 수 있다.

5. 유기반도체에서의 전하 수송 특성

유기반도체에서 분자는 약한 반 데르 발스(Van der Waals) 상호작용으로 결합되어 있어서 공유 결합 또는 이온 결합으로 원자들이 결합된 무기반도체와는 여러 특성이 다르다. 유기반도체에서 분자간의 상호작용이 작기 때문에 에너지 밴드 폭 W (energy band

width)가 작다. 인접 분자 사이의 전자 파동함수의 중첩 적분(inter-molecular electron overlap integral)을 t 라하면 밴드 폭은 $W=4t$ 이다. 그런데 유기반도체에서 전자 파동함수의 중첩이 작기 때문에 일반적으로 $t \leq 0.1$ eV이다. 따라서 밴드 폭은 상온에서의 열에너지($kT \approx 0.026$ eV)와 같은 수준이다. 또한 전자-포논 상호작용(electron-phonon interaction)이 커서 전하는 주위 분자 또는 결정 구조를 변형시키며 안정화되어 폴라론(polaron)을 형성한다. 따라서 대부분의 유기반도체는 결정상태에서도 상온에서의 전하 이동도는 정도로 작다. 이와 같은 이유로 유기반도체에서 전하의 평균자유경로(mean free path) l 는 격자 상수 정도의 크기($\alpha \approx 1$ Å)를 가진다.³² 이와 같이 $l \approx \alpha$ 인 경우를 Ioffe-Regel limit이라고 하며,³³ 전하는 에너지 밴드에서의 전도(band-like transport)라고 하기보다는 분자의 에너지 준위들에서의 호핑 전도(hopping transport)를 하는 것으로 기술하는 것이 더 적합하다.^{34,35}

그리고 유기 반도체는 일반적으로 비정질 상태로 되어 있어서 분자의 무질서도가 크기 때문에 분자의 에너지 준위가 국소화된 상태(localized states)가 되어 전하 이동도가 낮아진다. 무질서한 유기반도체 박막의 전하이동도는 일반적으로 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ cm²/Vs의 범위를 가지고 있다. 따라서 전하 이동은 국소화된

에너지 상태 사이에서의 호핑으로 기술할 수 있다. 이에 대해 많이 사용되는 모델로는 **그림 13**에 도식적으로 나타낸 것과 같이 풀-프랭켈 모델(Poole-Frenkel model)과 H. Bassler 교수가 제안한 무질서도 모델(Disorder model)이 많이 사용된다.³⁰

Poole-Frenkel model에서는 국제화된 전하의 쿨롱 포텐셜이 외부전기장이 가해진 경우에는 기울어져서 ΔE_{PF} 만큼 낮아지게 된다. 따라서 전기장이 가해진 경우 호핑 확률이 증가한다. 따라서 mobility는 전기장이 증가함에 따라 증가하고, 온도가 증가함에 따라 지수함수적으로 증가할 것으로 예상할 수 있다. Poole-Frenkel model에 의하면 전하 이동도는 다음 식으로 표현할 수 있다.³⁰

$$\mu(F, T) = \mu_{PF} \exp\left(\frac{\Delta E - \beta_{PF} \sqrt{F}}{k_B T_{eff}}\right) \quad (12)$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \quad (13)$$

$$\beta_{PF} = \sqrt{\frac{q^3}{\pi \epsilon \epsilon_0}} \quad (14)$$

여기서 ΔE 는 활성화에너지이며, T_{eff} 는 유효온도, β_{PF} 는 Poole-Frenkel 상수를 나타낸다.

Disorder model에서는 국제화된 상태가 에너지 및 분자간의 거리에 대해 Gaussian 분포를 하고 있다고 가정하고 전하는 이와 같은 국제화된 상태 사이를 호핑하는 것으로 설명한다. 에너지 무질서도(energetic disorder)를 σ , 위치 무질서도(positional disorder)를 Σ 로 표시하면 Disorder model에서 전하 이동도는 다음 식으로 표현할 수 있다.³⁰

$$\mu(F, T) = \mu_{\infty} \exp\left[-\left(\frac{2\sigma}{3k_B T}\right)^2\right] \exp\left\{C\left[\left(\frac{\sigma}{k_B T}\right)^2 - \Sigma^2\right]\sqrt{F}\right\} \quad (15)$$

여기서 μ_{∞} 는 고온에서의 전하이동도(high temperature limit of mobility), C 는 맞춤 상수이다.

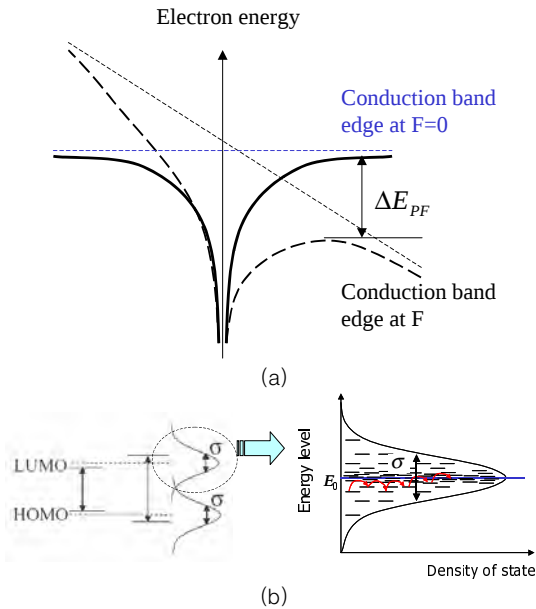


그림 13. (a) Poole-Frenkel model, (b) Disorder model.

6. 맺는말

최근 유기반도체는 유기발광다이오드(OLED), 유기 박막트랜지스터(OTFT), 유기태양전지, 비선형광학소자, 메모리소자, 바이오센서 등에 응용하게 되면서 새로운 반도체 재료로 최근 활발히 연구되고 있다. 이 글에서 유기반도체에서의 전기전도도 또는 비저항의 측정 방법과 대표적인 전도성 고분자의 전기전도도에 대해 설명을 했다. 그리고 유기반도체의 전하이동도를 측정하는 가장 직접적인 방법인 비행시간 광전도도 측정 방법에 대해 자세히 설명하고 전하이동도의 전기장 및 온도에 대한 의존성을 설명했다.

참고문헌

1. T. A. Skotheim, R. L. Elsenbaumer, and J. R. Reynolds Eds., *Handbook of Conducting Polymers*, 2nd Ed., Marcel Dekker, New York, 1998.
2. M. Angelopoulos, *IBM J. Res. & Dev.*, **45**, 57 (2001).
3. J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes, *Nature*, **347**, 539 (1990).
4. C. H. Lee, G. Yu, and A. J. Heeger, *Phys. Rev. B*, **47**, 15543 (1993).
5. C. K. Chiang, C. R. Fincher, Jr., Y. W. Park, A. J. Heeger, H. Shirakawa, E. J. Louis, S. C. Gau, and A. G. MacDiarmid, *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 1098 (1977).
6. N. Basescu, Z. X. Liu, D. Moses, A. J. Heeger, H. Naarmann, N. Theophilou, *Nature*, **327**, 403 (1987).
7. S. A. Jenekhe, *Chem. Mater.*, **16**, 4381 (2004).
8. A. Kraft, A. C. Grimsdale, and A. B. Holmes, *Angew. Chem. Int. End. Engl.*, **37**, 402 (1998).
9. R. Sheats, H. Antoniadis, M. Hueschen, W. Leonard, J. Miller, R. Moon, D. Roitman, and A. Stocking, *Science*, **273**, 884 (1996).
10. R. H. Friend, R. W. Gymer, A. B. Holmes, J. H. Burroughes, R. N. Marks, C. Taliani, D. D. C. Bradley, D. A. Dos Santos, J. L. Bredas, M. Logdlund and W. R. Salaneck, *Nature*, **397**, 121 (1999).
11. H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, *Science*, **280**, 1741 (1998).
12. C. D. Dimitrakopoulos and D. J. Mascaro, *IBM J. Res. & Dev.*, **45**, 11 (2001).
13. G. Horowitz, *J. Mater. Res.*, **19**, 1946 (2004).
14. Thomas N. Jackson, Yen-Yi Lin, David J. Gundlach, and Hagen Klauk, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, **4**, 100 (1998).
15. Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, *Chem Mater.*, **9**, 1299 (1997).
16. H. Hoppe and N. S. Sariciftci, *J. Mater. Res.*, **19**, 1924 (2004).
17. W. Clemens, W. Fix, J. Ficker, A. Knobloch, and A. Ullmann, *J. Mater. Res.*, **19**, 1963 (2004).
18. L. Chen, D. W. McBranch, H. -L. Wang, R. Helgeson, F. Wudl, and D. G. Whitten, *P. Natl. Acad. Sci., U. S. A.* **96**, 12287 (1999).
19. C&EN, 79, 45 (2001. 12. 10.).
20. M. C. Petty, M. R. Bryce and D. Bloor, *Introduction to Molecular Electronics*, Edward Arnold, London, 1995.
21. S. Roth, *One-Dimensional Metals*, VCH, New York, 1995.
22. AIP Series in Polymers and Complex Materials, in *Physical Properties of Polymers Handbook*, (AIP Press, New York, 1996).
23. Lake Shore 7500/9500 Series Hall System User's Manual.
24. L. J. Van der Pauw, *Phillips Research Reports*, **13**, 1 (1958).
25. T. Johansson, L.A. Petterson, O. Inganäs, *Synth. Met.*, **129**, 269 (2002).
26. A. J. Epstein, in *Organic Electronic Materials*, Eds. by R. Farchioni and G. Grosso, Springer, Berlin, 2001, Chapt. 1.
27. O. H. LeBlanc, Jr., *J. Chem. Phys.*, **33**, 626 (1960).
28. R. G. Kepler, *Phys. Rev.*, **119**, 1226 (1960).
29. E. A. Silinsh and V. Capek, *Organic Molecular Crystals*, AIP, New York, 1994.
30. P. M. Borsenberger and D. S. Weiss, *Organic Photoreceptors for Imaging Systems*, Marcel Dekker, New York, 1993.
31. H. Scher and E. W. Montroll, *Phys. Rev. B*, **12**, 2455 (1975).
32. J. D. Wright, *Molecular Crystals*, 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
33. A. F. Ioffe and A. R. Regel, *Prog. Semicond.*, **4**, 237 (1960).
34. M. Pope and C. E. Swenberg, *Electronic Processes in Organic Crystals*, Clarendon Press, Oxford, 1982.
35. K. C. Kao and W. Hwang, *Electrical Transport in Solids*, Pergamon Press, Oxford, 1981.