



양극성 유기 박막 트랜지스터

조신욱 | 울산대학교

임동찬 | 재료연구소

[요약문]

반도체적 성질을 가지는 유기 전자 재료를 활성층으로 활용한 유기 박막 트랜지스터(OTFT)는 제작 공정이 간단하고 비용이 저렴하다는 장점과 더불어 유기 반도체 자체가 가지는 가공성, 유연성 등으로 인해 유연한(flexible) 전자기기를 구현 할 수 있다는 가능성으로 미래형 전자기기의 핵심 구동 소자로서 많은 관심을 받고 있다. 특히 한 소자에서 p-type과 n-type이 동시에 구현되는 양극성(ambipolar) OTFT는 구동 회로의 설계 및 제작 공정을 단순화 시키고 다양한 기능을 부가 시킬 수 있어 좀 더 경량화, 소형화된 미래형 전자 기기를 구현 할 수 있도록 해준다. 본 논문에서는 이러한 ambipolar OTFT의 구조 및 구동 원리를 알아보고 소자에 사용되는 유기 반도체 소재와 소자 구현 기술에 대하여 살펴보고자 한다.

1. 서론

실리콘으로 대표되는 무기물 반도체 대신에 유기 반도체 물질을 활성층으로 활용한 유기 박막 트랜지스터(OTFT)는 제작 공정이 간단하고 비용이 저렴하다는 장점과 더불어 유기 반도체 자체가 가지는 가공성, 유연성 등을 바탕으로 유연한(flexible) 전자기기를 구현 할 수 있다는 가능성으로 인해 미래형 전자기기의 핵심 구동 소자로서 많은 관심을 받고 있다.^[3-5]

일반적으로 OTFT는 구동 전하의 종류에 따라 홀(hole)을 구동 전하로 쓰는 p-type과 전자(electron)를 구동 전하로 사용하는 n-type으로 크게 나누어진다. 대부분의 전자 기기의 구동 회로는 이 두 종류 FET의 조합으로 이루어진다. 따라서 한 소자에서 p-type과 n-type이 동시에 구현되는 양극성(ambipolar) OTFT는 구동 회로의 설계 및 제작 공정을 단순화 시키고 다양한 기능을 부가 시킬 수 있어 좀 더 경량화, 소형화된 미래형 전자 기기를 구현 할 수 있도록 해준다.^[6-8] 하지만 일반적인 유기물 반도체는 홀의 이동도가 현저히 높거나 전자의 이동도가 현저히 높은 비대칭 전하 수송 능력을 보여주기 때문에 유기물 반도체를 이용한 양극성 트랜지스터의 제작

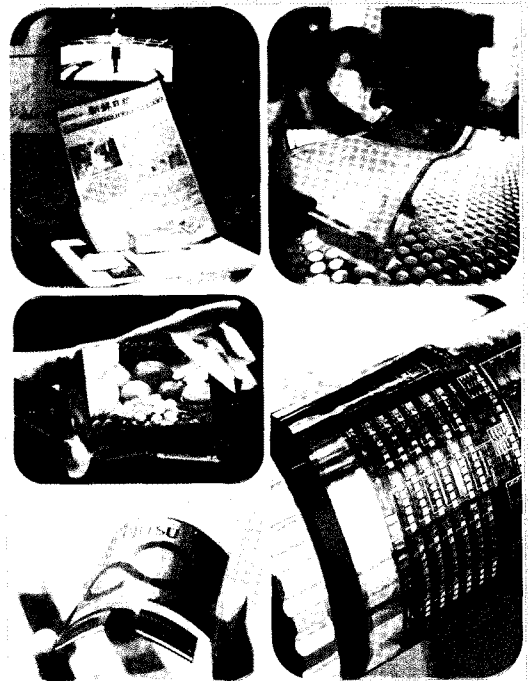


그림 1. 유기박막트랜지스터를 이용한 다양한 제품들



에 큰 제한을 받아 왔다.^[9-12]

본 논문에서는 유기 반도체 재료를 이용한 양극성 OTFT의 구조 및 구동 원리를 알아보고 소자에 사용되는 소재와 소자 구현 기술에 대하여 살펴보고자 한다. 더불어 한 물질에서 양극성 전하 소송 능력을 보여주는 신물질에 대해 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 양극성 유기 박막 트랜지스터의 구조 및 구동원리

2.1.1 Ambipolar OTFT의 구조

앞서 언급한 것처럼 유기 반도체 재료는 전자나 홀 중에 한 종류 전하만을 잘 전달하는 비대칭적 전하 소송 능력을 가지고 있어 ambipolar OTFT를 구현하기 위해 특별한 제작 기법이 동원되고 있다. 현재 ambipolar OTFT를 구현하기 위해 범용적으로 사용되는 방법은 크게 두 가지로 홀 전달 물질과 전자 전달 물질을 일정 비율로 서로 섞어서 bulk-heterojunction(BHJ) 형태로 OTFT의 활성층에 도입한 blend 방법과 홀 전달 물질과 전자 전달 물질을 층상 구조로 도입한 bilayer 방법이 주로 활용되고 있다.^[9-12] 일반적으로 진공 증착법으로 필름을 형성하는 단분자성 전자 재료의 경우 후자의 방법이 많이 활용되고 있으며, 용액공정을 주로 사용하는 반도체성 공액 고분자 물질의 경우 용액 공정상의 어려움으로 인해 blend 방법을 이용해 ambipolar OTFT를 구현하고 있다.

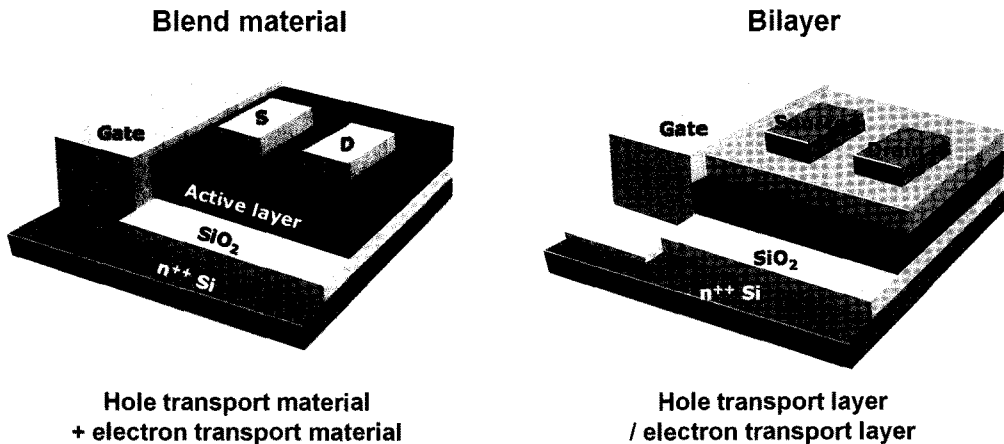


그림 2. 대표적인 ambipolar OTFT의 소자 구조

그림 2에 blend 방법을 활용한 ambipolar OTFT와 bilayer 방법을 활용한 ambipolar OTFT의 간략한 구조를 나타내었다. BHJ blend 방법을 활용한 ambipolar OTFT의 구조는 일반적인 게이트(gate) 전극에 전압을 걸어 전계 효과에 의하여 전자 또는 홀이 흐르는 channel이 생기게 하는 원리로 source, drain의 전류를 제어하는 단극성(unipolar) OTFT와 마찬가지로 MIS(metal-insulator-semiconductor) 구조를 기본 구조로 하고 있다. Bilayer로 활성층을 형성하는 방법을 사용하는 소자 역시 기본적인 MIS구조를 채택하고 있으나, 활성층을 구성하는 물질이 층상으로 분리되어 있으며 조건에 따라 홀 전달물질과 전자 전달 물질의 적층 순서만을 바꾸어 활용된다. 두 방법 모두 일반적인 단극성 OTFT와 마찬가지로 gate전극의 위치에 따라 top-gate 구조와 bottom-gate구조로 세분화 할 수 있으며, source와 drain전극의 상대적 위치에 따라 bottom contact FET와 top contact FET로 다시 나눌 수 있다. 그림 2에 소개된 구조는 모두 bottom-gate, top contact 방식을 표시하고 있다.

2.1.2 Ambipolar OTFT의 구동원리

어떠한 방법으로 반도체층을 형성시키든 간에 기본적인 ambipolar OTFT는 동일한 구동 원리를 가진다. 그림 3에 간략한 구동원리를 나타내었다. N-type 구동을 위해서는 gate 전극에 (+) 전압을 걸어주어 절연층과 반도체층의 계면 사이에 전자를 accumulation 시켜서 전자 수송 channel을 형성 시킨다. 다음 source 전극과 drain 전극 사이에 (+) 전압을 걸어주면 전자가 유기 반도체의 LUMO 레벨로 주입되어 channel을 따라 반대 전극으로 흘러가게 된다. P-type 구동에서는 반대로 gate 전극에 (-) 전압을 걸어주어 홀을 accumulation 시켜 홀 channel을 형성 시키고 유기 반도체의 HOMO 레벨에 홀을 주입시켜 구동시키는 원리로 동작한다. 즉 전자는 항상 도입된 유기 반도체의 LUMO 레벨에서 움직이고, 홀은 항상 HOMO 레벨에서 움직인다.

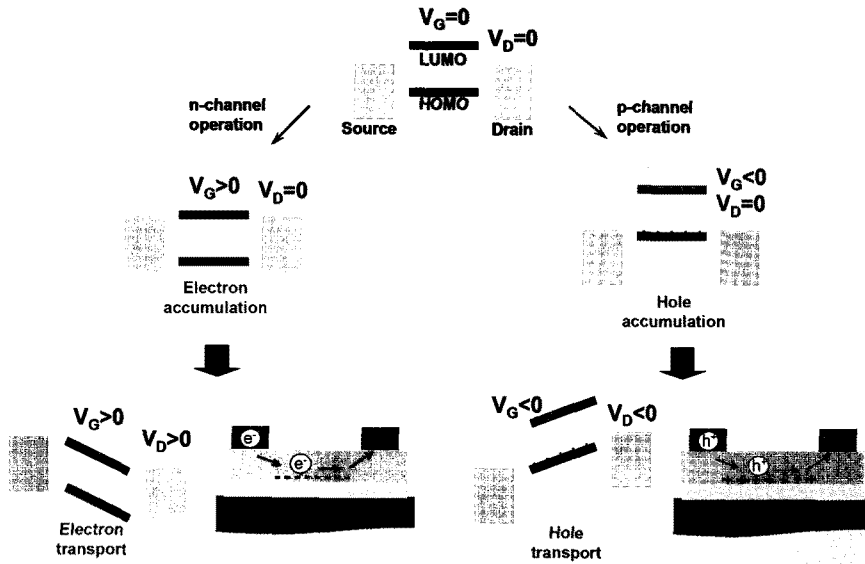


그림 3. Ambipolar FET의 구동원리

Ambipolar OTFT에서는 원활한 전자 및 홀의 주입을 위해서 source와 drain의 전극 물질 선택에도 주의를 기울여야 한다. 일반적으로 FET에서 전극 금속으로 가장 범용적으로 사용되는 Au의 경우 높은 일함수(work-function) 값에 의해(약 5.1eV) 홀의 주입은 용이한 반면 전자의 주입을 제한받는다. 반대로 Ca이나 Mg와 같은 낮은 일함수의 금속은 전자 주입은 용이한 반면 홀의 주입에 어려움이 있으므로 반도체 물질의 HOMO, LUMO 값에 맞추어 적절한 일함수 값을 가지는 금속을 전극으로 선택하여야 한다.

2.1.3 Ambipolar OTFT의 동작특성

FET의 전기적 특성은 source-drain 사이의 전압 V_{ds} 를 고정시키고 gate 전압 V_{gs} 에 대한 source-drain 사이 전류 I_{ds} 의 변화를 나타내는 전달특성(Transfer Characteristics)과 출력전압 V_{ds} 에 대한 I_{ds} 의 변화를 각 V_{gs} 에 대해서 나타내는 출력특성(Output Characteristics)을 측정하여 평가한다. Ambipolar OTFT는 전자와 홀 모두를 한 소자에서 구동시킨다는 특징 때문에 단극성 FET와 다른 특이한 동작 특성을 보여준다. 그림 4에 대표적인 ambipolar OTFT의 전달 특성 곡선을 나타내었다. 단극성 OTFT의 경우 p-type은 negative gate bias, negative drain-source bias에서만 동작하고, n-type의 경우 positive gate bias, positive drain-source bias 아래에서만 동작 특성을 보이는 반면 ambipolar OTFT의 경우에는 positive, negative 모두에서 동작한다. 높은 gate bias에서는 홀 또는

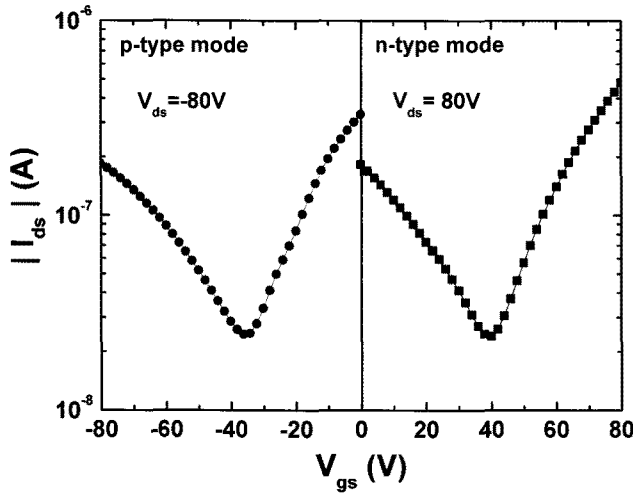


그림 4. ambipolar OTFT의 전달 특성

전자 하나만이 거동하는 특성을 보이다가 gate 전압을 낮추면 drain으로부터 반대 전하의 주입이 시작되어 완전한 off상태로 가지 못하고 다시 I_{ds} 값이 증가하게 되는 V자 형태의 전달 특성 곡선을 보여준다. 홀, 전자 각각의 구동 모드에서 최소점을 지난 후 다시 전류값이 증가하는 이러한 낮은 gate bias부분을 ambipolar 영역이라고 부른다. 이 영역에서는 전자와 홀이 동시에 반도체 층에 존재하게 된다.

이러한 홀과 전자의 동시 주입 특성 때문에 ambipolar OTFT의 output characteristic도 일반적인 단극성 OTFT와는 다른 양상을 보여준다. 그림 5에 전형적인 ambipolar OTFT의 출력 특성 곡선을 나타내었다. 높은 gate bias 영역에서는 일반적인 단극성 OTFT와 같이 linear한 영역과 threshold voltage (V_{th}) 이후에 V_{ds} 변화더라도 출력 전류 I_{ds} 는 변하지 않고 일정한 전류가 흐르게 되는 전형적인 FET의 출력 특성을 보여주나, 낮은 gate bias에서는 홀과 전자가 동시에 주입되어 channel에 존재함에 따라 둘 사이의 recombination과 같은 상호작용에 의해 diode와 같은 특성 곡선 모양을 보여준다. 이러한 diode-like 곡선이 보이기 시작하는 gate 전압 값은 앞서 살펴본 전달특성곡선에서 I_{ds} 값이 최소를 보이는 지점과 동일하다.

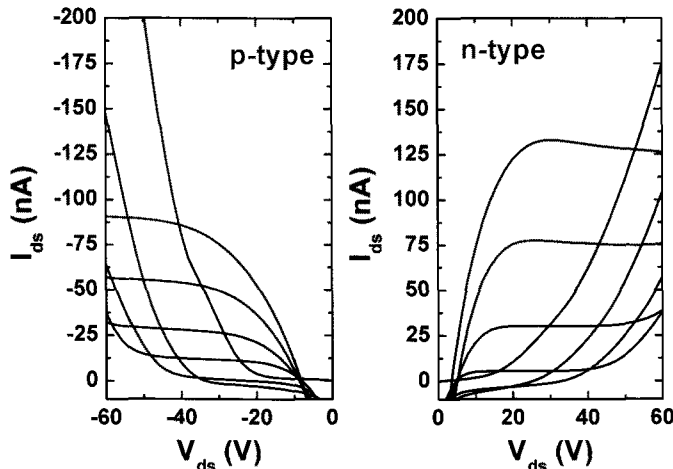


그림 5. ambipolar OTFT의 출력 특성

2.2 P3HT와 PCBM을 이용한 ambipolar OTFT

2.2.1 P3HT:PCBM blend를 이용한 ambipolar OTFT

Ambipolar OTFT를 구현하는 방법으로 BHJ blend를 이용하는 방법은 홀 전달 물질과 전자 전달 물질을 일정한 비율로 섞어서 용액을 만들고 간단한 스핀-코팅 방법을 이용하여 반도체층을 형성시킬 수 있다는 공정상의 이점으로 인해 가장 널리 활용되고 있는 방법이다. 다양한 종류의 홀 전달 물질과 전자 전달 물질이 활용되고 있는데, 대표적으로 p-type 성질을 강하게 가지는 공액 고분자와 강한 n-type 성질을 가지는 C₆₀ 유도체를 이용한 연구가 가장 활발하게 진행되었다. 그림 6은 공액 고분자 Poly(3-hexythiophene) (P3HT)와 [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester(PCBM)을 이용한 ambipolar OTFT 전달 특성 결과를 보여주고 있다.^[13] 소자의 기본 구조는 bottom contact 구조를 이용하였으며(그림 6(a)), P3HT와 PCBM의 화학구조는 그림 6(b)와 같다. P3HT:PCBM BHJ을 이용한 ambipolar OTFT에서는 홀과 전자의 유효한 주입을 위해서 Al 금속이 source와 drain 전극으로 활용되었다.

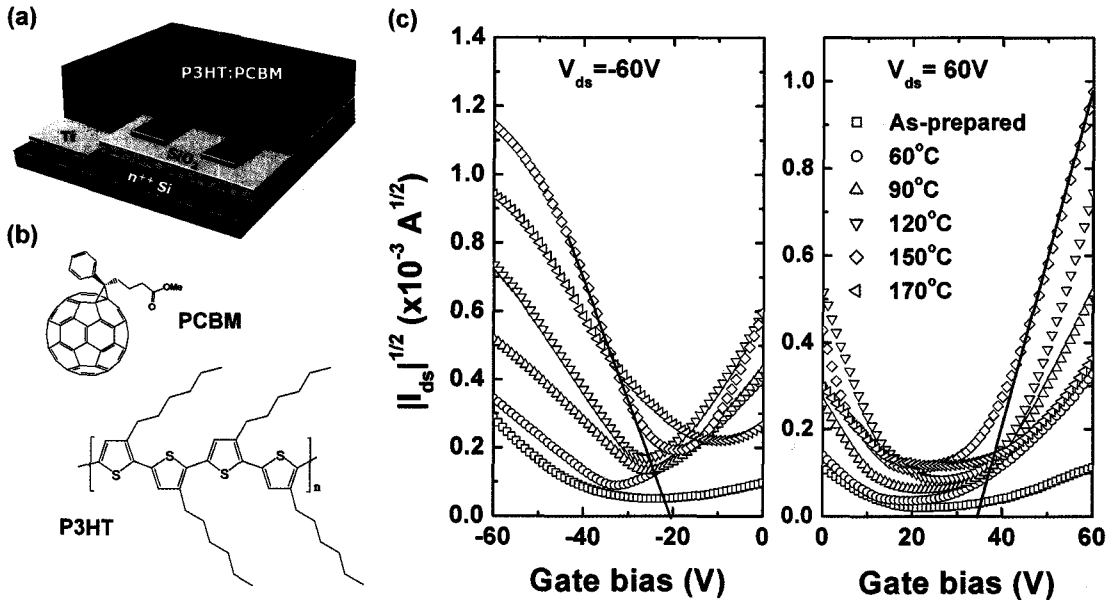
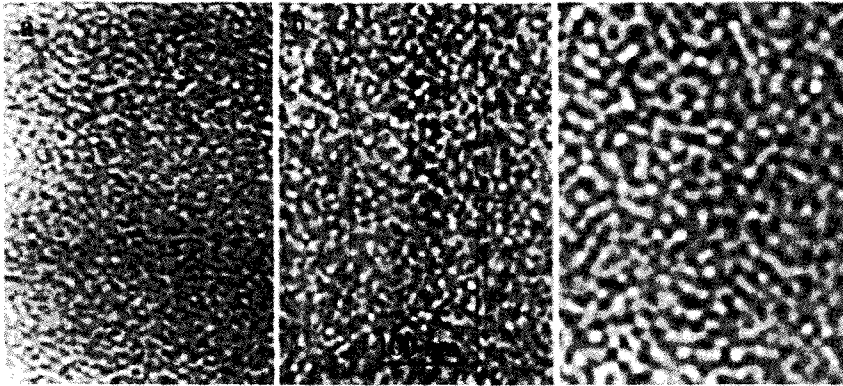


그림 6. P3HT와 PCBM을 이용한 ambipolar OTFT

BHJ을 이용한 OTFT 제작에서 높은 성능을 이끌어 내기 위해서는 홀 전달 물질과 전자 전달 물질 각각이 만드는 홀과 전자의 전달 경로를 적절하게 형성시켜주는 과정이 필수적이다. 즉 홀 전달 물질과 전자 전달 물질의 적절한 상분리(phase separation)를 유도하여 홀과 전자의 전달 경로를 확실히 형성시키는 기술이 가장 중요한 제작 요소 중에 하나이다. 일반적으로 BHJ blend 용액에 미량의 첨가제(additive)를 사용하여 처음부터 용액 상에서 상분리를 유도하고 필름을 형성하는 화학적인 방법과^[14-16] 소자 제작 후에 열처리를 통하여 유도하는 물리적인 방법^[13, 17] 두 가지가 많이 사용되고 있는데, P3HT:PCBM BHJ을 이용한 ambipolar OTFT에서는 주로 후열처리 방법을 이용하여 상분리를 유도한다. 그림 7에 나타낸 BHJ 필름의 TEM 이미지에서 확인할 수 있는 것처럼, 단순 스핀 코팅만으로 제작된 필름은 홀 전달 물질과 전자 전달 물질이 homogeneous한 morphology를 보여주고 있다(참고: TEM 이미지에서 P3HT는 밝은 명암으로 나타나고, 전자 밀도가 높은 PCBM은 상대적으로 어두운 명암으로 나타난다). 이러한 균질한 필름 morphology는 ambipolar OTFT의 전하 수송 면에서 제한을 가진다. 그러나 제작된 필름을 약 150°C 정도에서 열처리를 하면 각 구성 물질들이 서로 aggregation되면서 상분리가 일어나게 되어 전하 전달에 용이한 morphology를 가지게 된다. 이러한 열처리에 의한 상분리 효과는 제작된 소자의 전자 전달 특성에 그대로 반영되어



Ma et al, Advanced Functional Materials, 15,1617-1622

그림 7. P3HT:PCBM BHJ 필름의 TEM 이미지

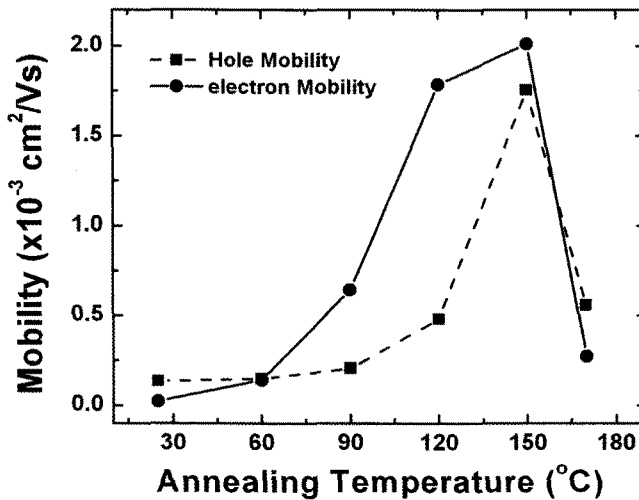


그림 8. 열처리 온도에 따른 홀과 전자의 이동도 변화

나타난다. 소자 제작 후 아무런 후처리를 하지 않은 경우에는 홀 이동도는 $1.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 전자 이동도는 $2.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 이었으나, 약 150°C에서 열처리 후에는 홀 이동도가 $1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 으로 약 10배 정도 증가하였으며, 전자 이동도는 $2.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 으로 100배 정도 증가한 결과를 보여주고 있다. 열처리 온도에 따른 홀과 전자의 이동도 변화 그래프를 그림 8에 나타내었다.

그림 9는 P3HT:PCBM ambipolar OTFT의 출력특성 곡선을 보여주고 있다. 각 특성 곡선 모두 낮은 gate 전압에서는 diode-like 곡선을 보여주고 gate 전압이 점차 증가하면 saturation된 I_{ds} 가 나타나는 전형적인 ambipolar OTFT의 출력 특성을 보여주고 있다. 후 열처리 효과 역시 출력 특성에서도 그대로 나타나고 있다. 열처리를 하지 않은 경우(그림 9(a): p-type 구동, 그림 9(b): n-type 구동), 가해진 최대 구동 전압($|V_{gs}| = 60\text{V}$ 와 $|V_{ds}| = 60\text{V}$)에서 나타나는 I_{ds} 값이 열처리 후에 p-type 구동에서는 약 10배, n-type모드에서는 약 100배 증가한 것을 알 수 있다.

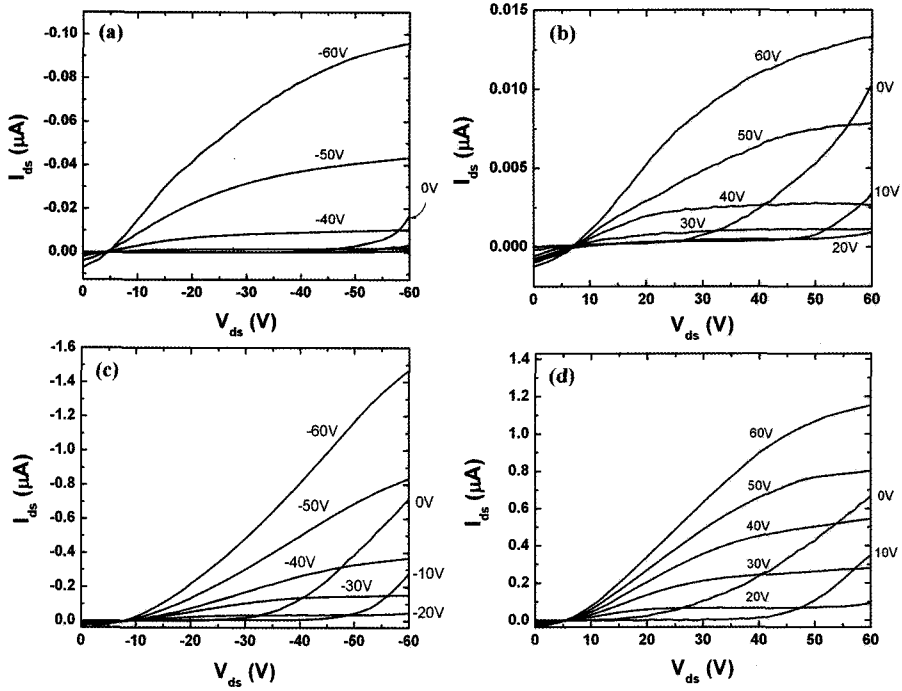


그림 9. P3HT:PCBM ambipolar OTFT의 출력특성 곡선

2.2.2 P3HT, PCBM bilayer를 이용한 ambipolar OTFT

앞서 기술한 blend를 이용한 FET에서는 낮은 gate 전압에서 보이는 diode-like 곡선 때문에 소자의 응용에 제한을 받게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 홀 channel과 전자 channel을 분리한 bilayer 방법을 P3HT와 PCBM을 이용한 ambipolar OTFT에 적용시켜 보았다.^[18]

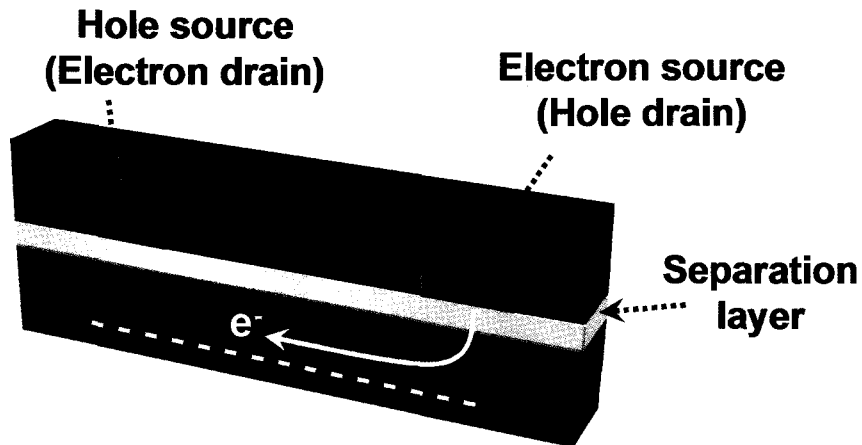


그림 10. 전자, 홀 수송층 분리형 ambipolar OTFT에 대한 기본 개념도

그림 10에 bilayer ambipolar OTFT에 대한 기본 개념을 소개하였다. 홀 전달층과 전자 전달층을 완전히 분리하기



위해서는 전자나 홀 중에 하나만을 선택적으로 통과 시키는 특별한 분리층이 필요한데, 여기서는 이러한 기능성 삽입층 물질로 TiO_x 물질을 사용하였다. sol-gel법으로 합성된 TiO_x 는 용액상을 가지므로 간단한 스핀코팅만으로 박막을 형성할 수 있고, 일반적인 유기 용매에 녹지 않기 때문에 두 번째 반도체층을 형성시키기 위한 용액 공정 동안 아래층이 녹아 없어지는 것을 방지 할 수 있을 뿐만 아니라, 전자는 잘 전달 시키는 반면에 홀은 막아 버리는 비대칭적 전달 특성을 가지고 있어 분리층으로 최적의 조건을 가지고 있다.

그림 11에 TiO_x 를 분리층으로 삽입하여 제작된 bilayer OTFT의 출력특성 곡선이 나타나 있다. TiO_x 를 도입하지 않은 소자의 경우(참고: P3HT와 PCBM은 기본적으로 같은 유기 용매에 녹으므로 두 물질을 용액공정으로 bilayer를 형성시키기 불가능하기 이 경우는 PCBM 대신에 C_{60} 을 진공 증착법으로 전자 전달층을 형성 시켰다.), 낮은 gate 전압에서 전형적인 diode-like 출력 특성을 보이고 있다. 그러나 TiO_x 를 분리층으로 삽입한 소자의 경우 홀과 전자가 각기 다른 층에 형성된 channel을 따라 흐르게 되어 서로 상호작용하지 않게 되어 낮은 gate 전압에서도 단극성 FET에서 보이는 것과 같은 saturation된 출력 특성을 보여준다.

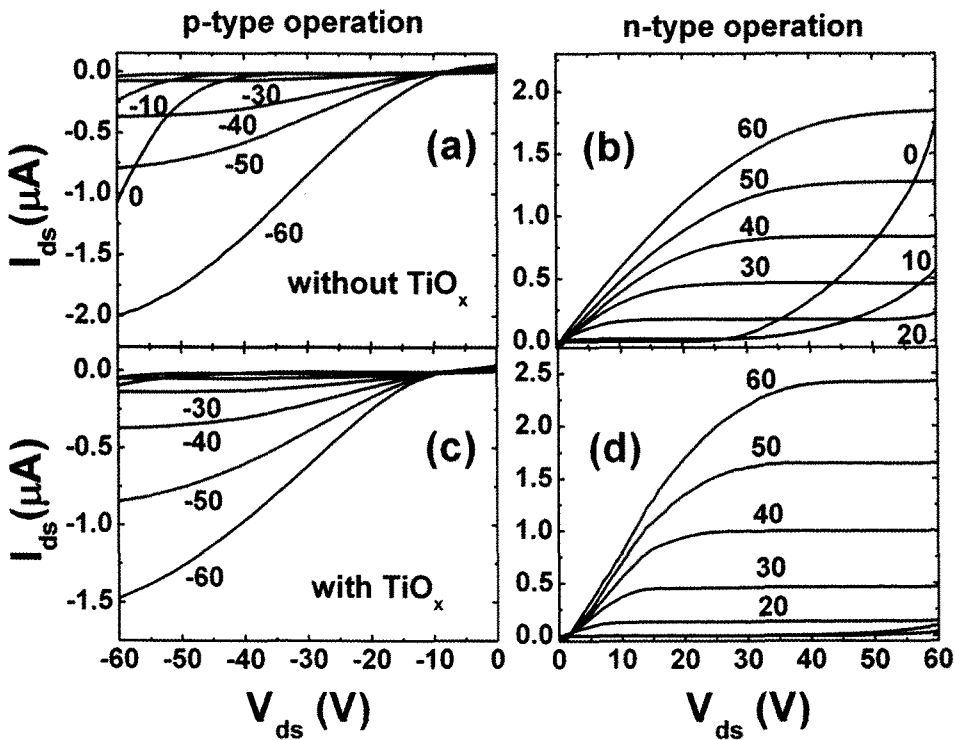


그림 11. TiO_x 를 분리층으로 삽입하여 제작된 bilayer OTFT의 출력특성 곡선

2.3 양극성 공액 고분자를 이용한 ambipolar OTFT

전자 전달 물질과 홀 전달 물질을 이용하여 특별한 제작 기법을 동원해 비교적 성공적으로 ambipolar OTFT를 구현하고 있지만, 그래도 전자와 홀 모두를 잘 전달할 수 있는 한 가지 소재만으로 소자를 구현하는 것이 가장 이상적인 방법일 것이다. 본 단락에서는 홀과 전자가 모두 잘 전달되는 낮은 밴드갭을 가지는 Donor (D)-acceptor (A) 타입의 공액 고분자 Poly(diketopyrrolopyrrole-benzothiadiazole), 일명 PDTDPP-alt-BTZ로 불리는 신물질을 이용한 완전 대칭 전하 전달 특성을 보이는 ambipolar OTFT에 대해 소개하고자 한다.^[19]

D-A 개념의 고분자 반도체는 낮은 밴드갭을 가지는 물질을 만들기 위해 특별히 고안된 새로운 형태의 화학적 구

조를 가지고 있다. 낮은 밴드갭을 가지는 이러한 D-A 타입의 공액 고분자 물질은 기존의 고분자 물질이 흡수하지 못하는 근적외선(near-IR)까지 흡수 영역이 확장됨으로 인해 더 많은 빛을 흡수 할 수 있다는 장점을 가지고 있어 최근 고분자 태양전지를 제작 부분에서 많은 주목을 받고 있는 물질이며, 실제로 태양전지 소자에서 높은 효율을 보여주고 있다. 더불어 D-A 개념의 고분자 반도체는 비교적 높은 수준의 전하 이동도를 함께 보여주면서 태양전지에서 활용뿐만 아니라 고분자 FET로도 응용 범위를 확대해 가고 있다.^[20-22]

PDTDPP-alt-BTZ는 기존의 DDAD 타입의 낮은 밴드갭 고분자 반도체가 전자를 잘 수송할 것으로 기대되는 acceptor 파트를 가지고 있음에도 불구하고 전공 수송력이 전자 수송력에 비해 언제나 높다는 사실을 인지하고 donor 한 부분 대신에 acceptor 파트를 하나 더 도입하여 전자 수송능력을 향상시킨 DADA 타입으로 신규 디자인된 고분자이다. PDTDPP-alt-BTZ의 화학 구조는 그림 12에 제작된 소자의 기본 구조와 함께 나타내어져 있다. 일반적인 D-A 타입의 공액 고분자 반도체는 density function theory(DFT)를 이용한 charge density isosurface를 분석해 보면 홀 전달이 주로 이루어지는 HOMO의 isosurface는 전체 고분자 체인에 잘 퍼져 있는 반면, LUMO의 isosurface는 acceptor 분자 근처에 국소화 되어 있는 형식으로 나타난다.^[23, 24] 그러나 PDTDPP-alt-BTZ는 HOMO isosurface와 LUMO isosurface가 모두 전체 고분자 체인을 따라 골고루 분포하는 것으로 나타나 전자와 홀이 모두 잘 전달되는 이유를 잘 설명해 주고 있다(그림 12(b)).

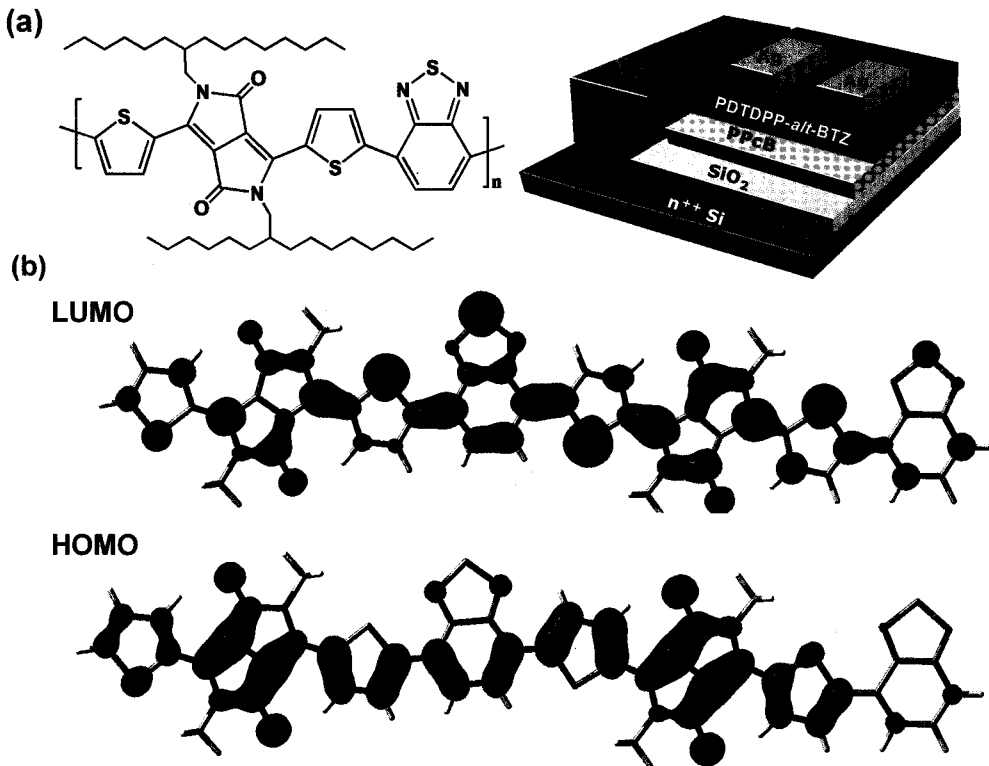


그림 12. (a) PDTDPP-alt-BTZ의 화학구조와 ambipolar OTFT구조. (b) DFT방법으로 계산된 PDTDPP-alt-BTZ의 HOMO, LUMO isosurface.

그림 13(a)와 13(b)의 전달 특성 곡선과 출력 특성 곡선에서 보듯이 제작된 소자는 완벽한 대칭적 전자 수송 능력과 홀 수송 능력을 보여주고 있다. 가장 최적화된 조건으로 제작된 FET 소자에서 홀 이동도는 약 $0.1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 전자



이동도는 약 $0.09\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 으로 아주 우수한 ambipolar OTFT 특성을 보여주고 있다. PDTDPP-alt-BTZ를 이용한 ambipolar OTFT 두 개를 이용한 가장 간단한 형태의 논리 회로인 인버터 (inverter)를 제작한 결과가 그림 14에 나타나 있다. 제작된 인버터는 지금까지 고분자 반도체를 이용해 제작된 ambipolar OTFT를 이용한 인버터 중에서는 가장 높은 약 35정도의 이득값을 보여주었다.

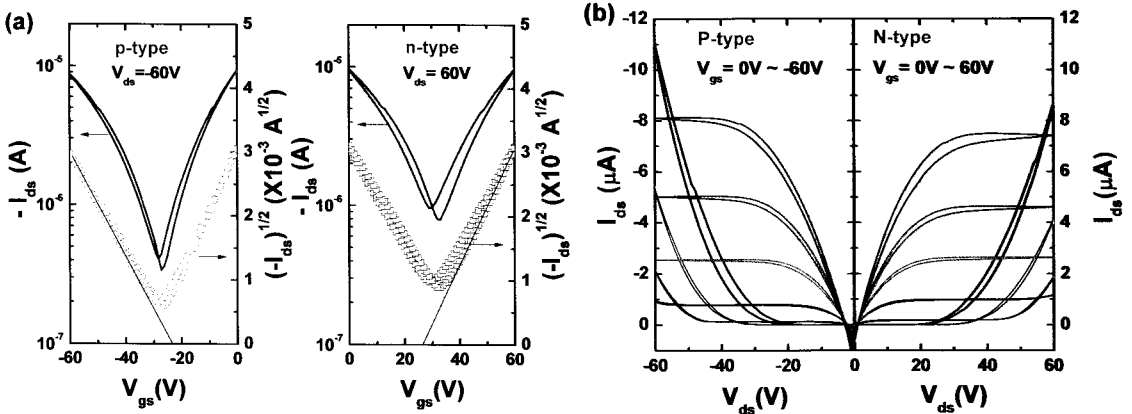


그림 13. PDTDPP-alt-BTZ ambipolar OTFT의 (a) 전달특성곡선, (b) 출력특성곡선

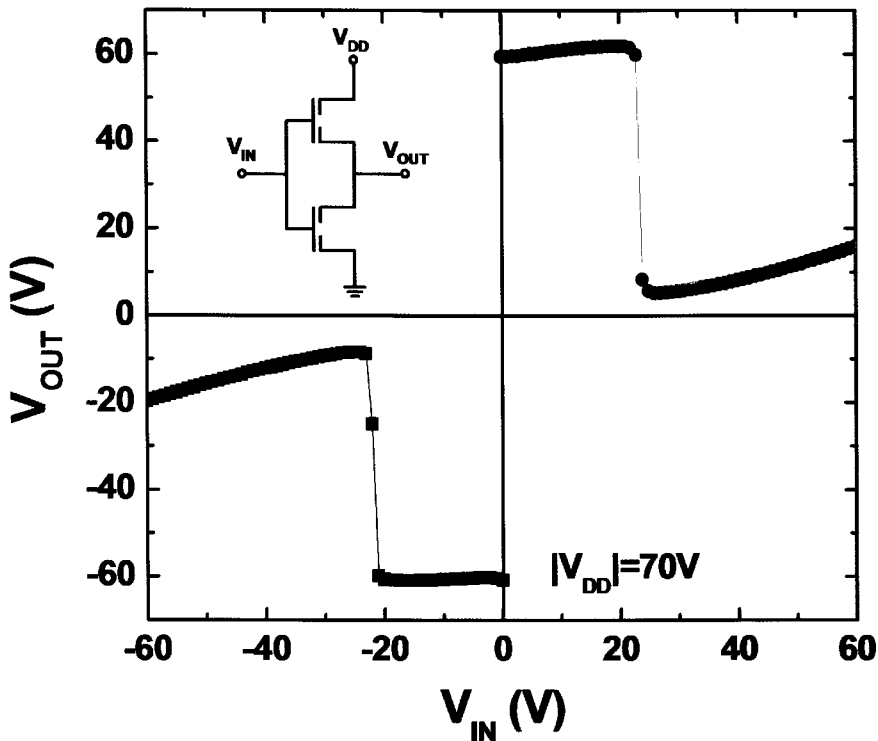


그림 14. PDTDPP-alt-BTZ ambipolar OTFT를 이용한 인버터

3. 결 론

본 논문에서 유기 전자 재료를 이용한 ambipolar OTFT의 제작과 소자 구동원리에 대해 소개하고, ambipolar OTFT 제작 예로 홀을 잘 전달시키는 물질인 P3HT와 전자를 잘 전달시키는 PCBM 두 가지 물질로 BHJ blend 방법을 이용해 제작한 ambipolar OTFT와 홀과 전자 전달층을 TiO_x 물질을 이용해 분리한 bilayer 방법으로 제작된 ambipolar OTFT를 소개하였다. 더불어 홀과 전자가 모두 잘 전달되는 낮은 밴드갭을 가지는 신개발 물질 PDTDPP-alt-BTZ를 이용한 완전 대칭형 ambipolar OTFT에 대해서도 간략히 살펴보았다.

Ambipolar OTFT에 관한 연구는 아직 초기 단계에 머물고 있으며, 단극성 소자에 비해 낮은 전하 이동도를 보여 줄 뿐만 아니라 on/off ratio 역시 $10^1 \sim 10^3$ 정도로 성능면에서 미흡한 실정으로 아직 많은 연구 개발을 필요로 하고 있다. 앞서 기술한 것처럼, 높은 성능을 가지는 ambipolar OTFT의 개발은 전자 기기 구동 회로의 디자인을 단순화 하고 경량화 시킬 수 있는 장점을 가지고 있어 미래형 전자 소자의 핵심 소재가 될 것으로 기대되고 있다. 따라서 좋은 특성의 신규 소재 개발과 소자 최적화 기술 개발을 위한 지속적인 연구와 투자가 계속 되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국 기계연구원 부설 재료연구소 (KIMS)의 창의형 연구과제와 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2011-0009148)을 받아 수행되었습니다.

✻ 참고 문헌

- [1] W. P. Su, J. R. Schrieffer, A. J. Heeger, Phys. Rev. Lett. 42, 1698-1701 (1979).
- [2]. A. J. Heeger, S. Kivelson, J. R. Schrieffer, W. P. Su, Rev. Mod. Phys. 60, 781-850 (1988).
- [3]. G. P. Collins, Sci. Am. 291, 74-81 (2004).
- [4]. H. Yan et al. Nature 457, 679-686 (2009).
- [5]. M. Muccini, Nature Materials 5, 605-613 (2006).
- [6]. Z. Bao and J. Locklin, in Organic field-effect transistors, CRC Press, Boca Raton, FL (2007).
- [7]. E. J. Meijer, D. M. De Leeuw, S. Setayesh, E. Van Veenendaal, B. H. Huisman, P. W. M. Blom, J. C. Hummelen, U. Scherf and T. M. Klapwijk, Nature. Mater. 2, 678-682 (2003).
- [8]. B. Crone, A. Dodabalapur, Y. Y. Lin, R. W. Filas, Z. Bao, A. LaDuca, R. Sarpeshkar, H. E. Katz and W. Li, Nature 403, 521-523 (2000).
- [9]. L. Bürgi, M. Turbiez, R. Pfeiffer, F. Bienewald, H. J. Kirner and C. Winnewisser, Adv. Mater. 20, 2217-2224 (2008).
- [10] I. McCulloch, M. Heeney, C. Bailey, K. Genevicius, I. Macdonald, M. Shkunov, D. Sparrowe, S. Tierney, R. Wagner, W. M. Zhang, M. L. Chabinyc, R. J. Kline, M. D. McGehee and M. F. Toney, Nature Mater. 5, 328-333 (2006).
- [11] H. Sirringhaus, P. J. Brown, R. H. Friend, M. M. Nielsen, K. Bechgaard, B. M. W. Langeveld-Voss, A. J. H. Spiering, R. A. J. Janssen, E. W. Meijer, P. Herwig and D. M. de Leeuw, Nature 401, 685-688 (1999).
- [12] J. C. Bijleveld, A. P. Zoombelt, S. G. J. Mathijssen, M. M. Wienk, M. Turbiez, D. M. de Leeuw and R. A. J. Janssen, J. Am. Chem. Soc. 131, 16616-16617 (2009).



- [13] S. Cho, J. Yuen, J. Y. Kim, K. Lee, A. J. Heeger, *Appl. Phys. Lett.* 89, 153505, (2006).
- [14] J. Peet, J. Y. Kim, N. E. Coates, W. Ma, D. Moses, A. J. Heeger, G. C. Bazan, *Nature Materials* 6, 497–500 (2007).
- [15] R. C. Coffin, J. Peet, J. Rogers, G. C. Bazan, *Nature Chem.* 1, 657–661 (2009).
- [16] J. S. Moon, C. J. Takacs, S. Cho, R. C. Coffin, H. Kim, G. C. Bazan, A. J. Heeger, *Nano Lett.* 10, 4005–4008 (2010).
- [17] H. Kong, J. S. Moon, N. S. Cho, I. H. Jung, M.-J. Park, J.-H. Park, S. Cho, H.-K. Shim, *Appl. Phys. Lett.* 95, 173301 (2009).
- [18] S. Cho, J. Yuen, J. Y. Kim, K. Lee, A. J. Heeger, S. Lee, *Appl. Phys. Lett.* 92, 063505 (2008).
- [19] S. Cho, J. Lee, M. Tong, J. H. Seo, C. Yang, *Adv. Funct. Mater.* 21, 1910–1916 (2011).
- [20] M. Tong, S. Cho, J. T. Rogers, K. Schmidt, B. B. Y. Hsu, D. Moses, R. C. Coffin, E. J. Kramer, G. C. Bazan, A. J. Heeger, *Adv. Funct. Mater.* 20, 3959–3965 (2010).
- [21] S. Cho, J. H. Seo, S. H. Park, S. Beaupre, M. Leclerc, A. J. Heeger, *Adv. Mater.* 22, 1253–1257 (2010).
- [22] N. Blouin, A. Michaud, M. Leclerc, *Adv. Mater.* 19, 2295–2300 (2007).
- [23] S. Cho, J. H. Seo, S. H. Kim, S. Song, Y. Jin, K. Lee, H. Suh, A. J. Heeger, *Appl. Phys. Lett.* 93, 263301 (2008).
- [24] S. K. Lee, S. Cho, M. Tong, J. H. Seo, A. J. Heeger, *J. Poly. Sci. Part A–Poly. Chem.* 49, 1821–1829 (2011).



조 신 욱

· 울산대학교 물리학과 조교수
 · 관심분야 : Organic Electronics (OPV, OFETs),
 Organic Multi-functional Devices.
 · E-mail : sucho@ulsan.ac.kr



임 동 찬

· 재료연구소 융합공정연구본부 선임연구원
 · 관심분야 : 유기태양전지(나노와이어, 양자점 등)
 탄소소재 전극, 클러스터 나노 촉매
 · E-mail : dclim@kims.re.kr