

유기반도체 (Organic semiconductors)

화학센서(Chemical Sensors) 및 경제적인 전자 소자(Electronic Devices) 제조 방법 및 전망

| 박정원 , 동향정보분석팀



미래선도기술 이슈분석보고서는 혁신형 중소기업 정보분석 지원사업의 일환으로 작성된 보고서로서, 유망 기술에 대한 이슈분석을 통해 국내 기업들이 자사에 적합한 사업아이템 발굴 기회를 극대화 하는데 목적이 있다. 이슈 분석 대상은 글로벌 동향 브리핑(GTB) 사업에서 축적한 약 10년간의 글로벌 모니터링 정보를 키워드 빈도분석 후 수요 조사를 통해 정하였다. 또한 국내외 연구개발동향, 산업동향 및 기술/실용화/과급효과 등의 측면에서의 이슈제기 및 분석을 해당분야 전문가와 공동으로 수행함으로써 수요자 중심의 보고서가 되도록 노력하였다.

2006 미래선도기술 이슈분석보고서

• 나노셀룰로오즈 보강 복합재료	• 광촉매 박막제조기술
• 차세대 하드디스크 HAMR	• 산업용 무선 필드버스
• 멀티페로익스(Multiferroics)	• P2P 네트워크
• 탄소나노튜브	• 센서네트워크 기술
• 휴대용 연료전지	• 온라인 게임
• 칩내장형 임베디드 기술	• 임베디드 기술
• 유전자 치료	• 심진 부동산소수점 연산기
• 열화학적 복합전환 공정	• 게임산업
• 자기 냉장고	• 나노소재를 이용한 전자소자
• 유기 반도체 태양전지	• 유기반도체(Organic Semiconductors)
• 충전기기용 나노절연재료	• 공기오염센서
• 무선 통신망간의 간섭	• 위성항법시스템 시험장(GATE)
• 이동통신-무선랜 통합망의 보안	• 위성항법시스템 소프트웨어 수신기
• 해외선진국 반도체장비 기술동향	• 광촉매의 성능 및 응용 기술 현황
• 동유럽의 VoIP 사업현황	• 해외 선진국의 DMB/DAB 기술동향
• 지능형 자동차에 사용되는 텔레매틱스 기술동향	• 신약개발을 위한 RNAi 제품 현황
• 주요 선진국의 냉동·공조 기술 현황	• 해외 선진국의 위성항법 시스템 기술 동향
• 영상진단기기 및 초음파영상진단기기 제품 현황	• 최근의 게임시장 동향
• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향	• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향

Contents

1	서론	
	기술/산업 개요	5
	기술/산업의 종류 및 특성	7
	이슈 분석의 필요성	7
2	본론	
	국내외 연구개발 동향	9
	국내외 산업 동향 및 전망	13
3	이슈 분석	
	유기물 반도체를 이용한 전자소자 개발에서의 최근 또는 향후 이슈	15
	실용화, 산업화를 위한 기술(산업)적 과제	23
	산업적 응용분야 및 경제적 파급 효과	24
4	결론	27
	참고 문헌	28

서론

1

1. 기술/산업 개요
2. 기술/산업의 종류 및 특성
3. 이슈 분석의 필요성

1 서론

1. 기술의 특성

가. 기술/산업 개요

- 현재 거의 모든 전자 소자부품들의 소재인 실리콘은 재료의 한계로 인하여 많은 제한점들을 가지고 있으며 이에 대한 대안으로 그동안 탄소에 기초한 소재개발에 많은 투자가 있어 왔음.
- 먼저 반도체에 대해 설명하면, 일반적으로 반도체 소재는 빛이나 열에 노출되면 전도성을 띠는 물질임. 그러나 낮은 온도에서 이들은 부도체이며, 이러한 성질은 전문가들이 도핑(doping)이라 부르는, 정교하게 조절된 양의 화학 원소들을 첨가해 줌으로써 조절될 수 있음. 현재까지 반도체 원소(element)들은 컴퓨터, 평면 스크린, 데이터 저장 시스템, 그리고 태양전지와 같은 모든 전자소자로서의 응용에 있어서 기초가 되는 물질들임.
- 그러나 반도체 자체로서는 일반 다른 화학 물질이나 또는 유기물질과 반응하고 이에 작용하는 센서 능력이 부족한 단점을 가지고 있으며 또한 제조 공정에서 생산 원가의 비용이 높다는 한계를 가지고 있어, 이에 대한 대안 연구에서 유기 반도체의 탄생을 가져왔음.
- 즉 유기반도체들은 기존의 반도체가 가지지 못한 여러 가지 장점들을 가지고 있음. 유기 반도체 소재는 제조와 공정이 쉽고, 실리콘과 달리 잘 휘어지는 굴곡 표면에도 활용할 수 있음. 더욱이 이들은 매우 값이 저렴하다. 전문가들은 회로 제작에 있어서 인쇄법들을 적용하여 고속의 대량생산을 실현할 꿈을 꾸고 있음.
- 특히, 신문과 같이 돌돌 말아 휴대할 수 있는 디스플레이와 달력처럼 벽에 붙일 수 있는 TV, 벽이나 마루 바닥 표면을 모두 덮을 수 있는 무수한 센서를 집적한 대면적 디바이스 등과 같은 전자 제품의 실현을 위해서는 유기 트랜지스터가 필수적임.
- 유기 전자 소자 분야는 현재 많은 연구가 진행되고 상업화가 되었지만, 아직도 저비용, 경량화를 위하여 개발해야 할 분야는 무궁무진함.



그림1. 유기 트랜지스터를 이용한 디스플레이와 전자 신문

- 특히 유연성을 가지는 전자 소자(flexible electronic devices)는 기존의 실리콘 기반의 성능을 가지지만 현재로서는 제조비용이 실리콘 기반의 전자소자보다 비싼 실정임. 만약 이러한 문제점들이 극복되면, 유기 트랜지스터는 '구부릴 수 있는 컴퓨터'나 '종이와 같은 디스플레이' 등을 실현하기에 더 없이 좋은 소재임에 틀림이 없음.
- 아직 많은 개발이 이루어져야 하나, 다른 신개발 분야에 비하여서는 비교적 현재 유기 전자 소자(Organic electronics)는 상업화가 활발한 단계이며, 매우 급속도로 성장하는 사업 분야임. 따라서 향후 잠재적 시장이 매우 넓기 때문에 유기 전자 소자를 이용한 전자제품은 화학 센서, 핸드폰, 디스플레이, 발광다이오드와 같은 분야에 다양하게 적용될 수 있음.

2. 기술/산업의 종류 및 특성

- 유기 트랜지스터를 사용함으로써 유연하고, 가벼우며, 대면적 일렉트로닉스 제품을 값싸게 실현할 수 있는 이유는 플라스틱 기판 상에 비교적 용이하게 제작할 수 있고, 유기 트랜지스터는 플라스틱 기판의 내열 온도를 하회하는 200도 이하의 온도에서 제작 가능하기 때문임. 실리콘 기술을 이용하여도 플라스틱 기판 상에 트랜지스터를 형성할 수는 있으나, 일단 글래스 기판 상에 트랜지스터를 제작한 후 기판을 플라스틱으로 바꾸는 등의 복잡한 공정이 필요함. 이러한 방법으로는 제조 공정 수가 증가하여, 저비용화에는 한계가 있음. 또 다른 장점은 포스터를 인쇄하는 방식으로 트랜지스터를 인쇄 기술로 형성할 수 있다는 점임.
- 유기 트랜지스터에 사용되는 유기 반도체 재료와 배선 재료, 절연체 재료는 조금만 노력하면 모두 용액 상태로 취급될 수 있음. 이들 용액을 잉크젯 기술이나 스크린 인쇄 기술 등으로 적절히 도포하면, 트랜지스터의 구조를 직접 형성할 수 있음. 진공 장치를 사용하는 막의 형성, 리소그래피 기술과 에칭 공정에 의한 트랜지스터 제작 방법에서의 거대한 장치 사용과 다수의 공정이 불필요함. 무기 반도체의 역사가 약 반세기 정도인데 비해, 유기 트랜지스터는 20년 정도의 짧은 역사를 가지고 있지만 최근 빠른 속도로 연구 개발이 진행되고 있는 분야임.

3. 이슈 분석의 필요성

- 유기트랜지스터는 실리콘을 기반으로 하는 무기재료 반도체의 강점의 영역에서 이들이 다루지 못하는 분야에 적용하여 다양한 부가 가치를 창출할 수 있음. 특히 센서로 사용되어 기존의 값비싼 센서를 대체하여 대기나 수중에 존재하는 화학적 성분을 탐지할 수 있음. 미국을 비롯한 많은 연구 기관에서는 기존의 화학 성분센서를 향상시킨 보다 저렴한 가격의 센서를 개발하고자 노력하고 있음. 또한 유기 반도체(organic semiconductor)를 이용해서 화학 바이오센서부문에 생체분야의 적용하고 있음.
- 특히 유기트랜지스터를 이용한 , 핸드폰, 디스플레이, 발광다이오드와 같은 다양한 유기 전자 소자를 이용한 전자제품으로 응용이 가능함으로 시장성은 매우 넓음.
- 따라서 이러한 높은 부가가치를 창출하는 화학 센서의 특성과 경제적인 전자 소자의 제조법은 매우 중요하기 때문에 이에 대한 이슈에 대하여 정리하고자 함.

본론

- # 2
- | 1. 국내외 연구개발 동향
 - | 2. 국내외 산업 동향 및 전망

2 본론

| 국내외 연구개발 동향

가. 국내외 연구개발 동향 및 전망

(1) 국내기술동향

- 유기 전자 소재를 이용한 분야 중 가장 각광 받는 분야가 전자 종이 분야임. 전자종이는 액체의 모양을 전기로 바꾸는 원리를 이용함. 처음에는 미국의 MIT 출신 연구자들이 필립스와 함께 만든 이잉크(E-Ink)사를 통해서 흑백 색소를 담은 캡슐이 전 기신호에 따라 아래위로 움직이면서 흑백 영상을 구현하는 기술을 개발했음. 이 캡슐을 플라스틱 막 사이에 넣는 방식으로 플렉서블 디스플레이를 만들 수 있음. 전원이 나가도 색소가 그 자리에 있기 때문에 영상이 사라지지 않으며, 흑백 대비가 워낙 선명해 기판이 휘어져도 어느 각도에서나 선명한 영상을 볼 수 있는 것이 장점임.
- 여기에 국내의 LG필립스 LCD는 작년 10월 일본 요코하마에서 열린 세계 최대 디스플레이 전시회 'FPD 인터내셔널'에서 이잉크와 공동 개발한 10.1인치 흑백 플렉서블 디스플레이를 선보인 바 있음. 이 잉크사는 최근 컬러 전자종이도 개발해 광고판 등에 적용하고 있음. 이와 별도로 필립스는 컬러 색채를 띤 기름방울의 수축 팽창에 따라 컬러 동영상을 구현할 수 있는 전자종이도 개발해냈음. 아래 그림은 한국 과학기술원에서 개발한 유기 박막 필름 트랜지스터 (OTFT)의 사진임.

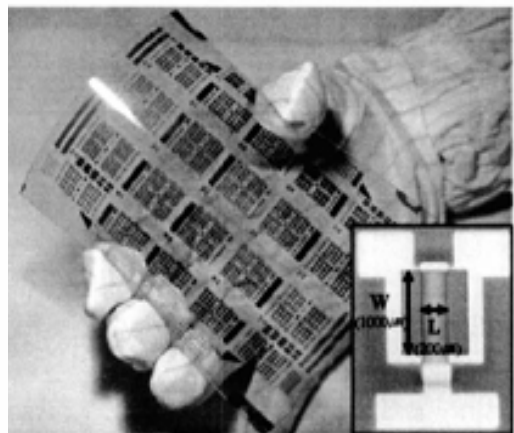
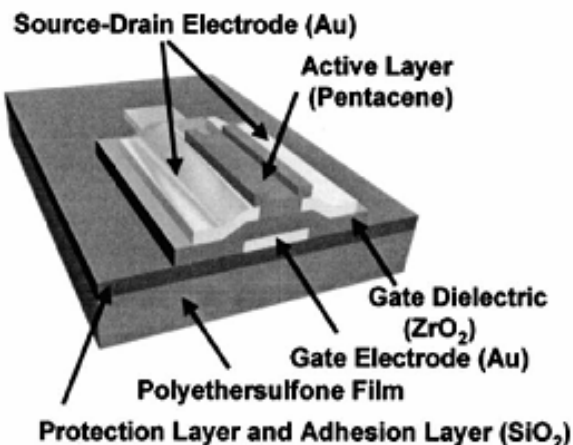
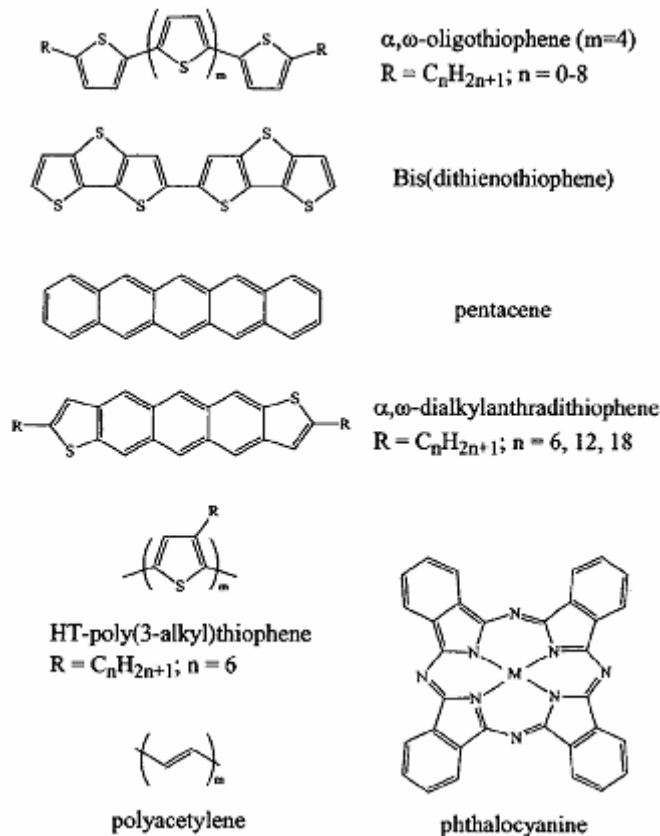


그림2. 한국의 과학기술연구원에서 개발한 변형된 유전체 박막으로 만든 OTFT

2 본론

| 국내외 산업동향

○ 플렉서블 디스플레이에서는 LCD든 OLED든, 아니면 전자종이든 모두 빛의 밝기와 색소의 작용을 조절하는 전기스위치 격의 박막 트랜지스터가 필수적임. 현재 박막트랜지스터는 모두 반도체로 만든다. 아래 그림은 일반적으로 사용되는 p-타입의 유기물 반도체로 기존의 무기물 반도체를 대체하려는 연구가 진행되고 있음.



- 기존의 무기물에 비하여 유기물로 트랜지스터를 만들면 150도 정도의 낮은 온도에서 제조가 가능함. 이렇게 되면 훨씬 잘 휘는 플라스틱 재료를 기판으로 이용할 수도 있게 됨. 또 기존의 반도체가 반도체와 절연체, 금속 등을 겹겹이 쌓아 회로를 만드는 것과 달리, 유기물 트랜지스터는 잉크젯 프린터로 종이에 인쇄하듯 한번에 만들 수 있어 제조공정도 단순해짐.
- 이미 세계적인 복사기 회사인 제록스사는 잉크 카트리지에 유기용액을 넣고 종이 대신 플라스틱 기판에 트랜지스터를 사용하여 말 그대로 ‘찍어내는’ 공정을 개발했음. 기존 공정과 달리 진공 상태가 아닌 대기압에서도 디스플레이를 제작할 수 있게 된 것임.

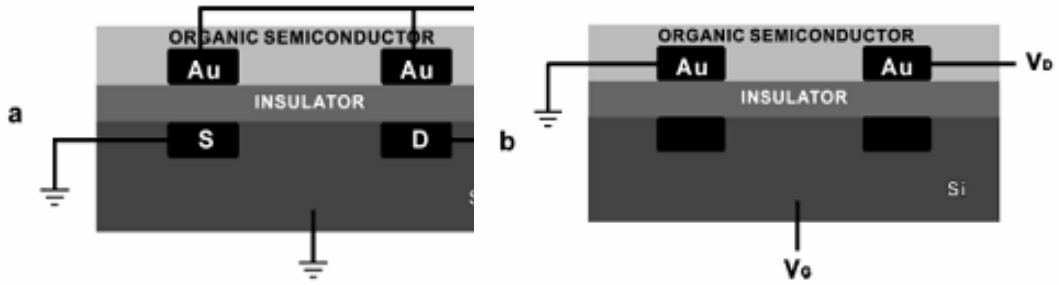


그림4. (a)절연체가 포함된 게이트 전계효과 트랜지스터 (insulated gate field-effect transistor (IGFET))모식도와 (b) 유기 전계 효과 트랜지스터(organic field-effect transistor (OFET)) 모식도

(2) 해외기술동향

- 무기 트랜지스터와 비교하여 유기 트랜지스터는 대기나 수분 또는 화학적 성분에 노출 될 경우 그 기능이 점차적으로 저하된다는 치명적인 단점을 가지고 있음. 성능의 저하는 기능을 상실하는 단점이지만 이와 같은 특성을 이용해서 화학적 센서를 만들 수 있음. 1970년대에 개발되기 시작한 화학센서는 인간의 코가 담당하는 기능을 모방하고 있음. 인간의 코는 현재 과학기술로는 모방할 수 없는 독특한 기능을 갖고 있음. 인간의 코는 대기중의 화학성분을 동시에 흡수하지만 각각의 화학성분을 냄새로 표현할 수 있는 기능을 갖고 있음.
- 유기 트랜지스터는 주요 연구지 중의 하나인 미국 캘리포니아 대학교에서는 인간의 코가 갖는 기능을 유기 트랜지스터가 담당할 수 있도록 연구를 진행하고 있음. 현재 개발된 센서는 5개의 유기 트랜지스터가 잉크젯 프린터의 분사노즐을 이용해서 제작됐음. 5개의 센서만 장착됐지만 특정한 물질이 신선한지 여부는 충분히 탐지할 수 있음. 아직은 대량생산에 대한 충분한 검증이 진행되지 않은 상태이기 때문에 현재로서는 약학이나 의학 등 특수분야에 시범적으로 사용될 예정이고 일반적인 사용은 아직 실험단계에 머물고 있음.
- 재료의 교체와 프로세스 기술의 향상 등에 의해 유기 반도체의 캐리어 이동도는 5년에 10배 정도 향상되어 왔음. 유기 반도체 재료에는 펜타센 등의 저분자계와 폴리티오펜 등의 고분자계의 두 종류가 있음. 캐리어 이동도는 저분자계에서 1990년대 후반에 비정질 실리콘과 비슷한 정도인 $1\text{cm}^2/\text{Vs}$ 를 달성한 바 있으며, 2000년대에 들어 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ 전후의 보고가 나오기 시작하고 있음.

- 다만, 높은 캐리어 이동도를 가진 유기 트랜지스터를 인쇄 기술로 실현한 예는 없었음. 왜냐하면 당초, 저분자계 재료는 막 형성을 위해 진공 증착법을 사용할 수밖에 없었으며, 인쇄 기술에 사용할 수 있는 용액 재료인 경우, 캐리어 이동도가 저분자계 재료보다 1/10 정도로 작은 고분자계 밖에 없었기 때문임. 그러나 2004년 들어 저분자계 재료인 펜타센을 액체에 분산시킨 용액이 등장하여, 높은 캐리어 이동도를 가지면서도 인쇄 기술로 트랜지스터를 제작할 수 있는 길이 열렸음. 그리고 2005년에 드디어, 도포법으로 형성한 유기 트랜지스터에서도 캐리어 이동도가 비정질 실리콘 정도로 향상된 결과가 보고된 바 있음.

나. 국내외 기술비교 개발

- OLED재료 기술에 대한 지난 20년간 여러 나라의 특허 출원동향을 보면 이 분야에 대한 연구활동이 얼마나 활발하게 진행되고 있는지 실감할 수 있음. 이 분야에 대한 특허출원은 한국 744건, 미국 1197건, 일본 4687건, 유럽 370건등임. 한국은 2000년에 고분자재료와 저분자재료와 관련해 유럽의 2배에 가까운 출원건수가 접수됐음. 이는 전년 대비 90% 이상 증가된 것이며 2001년에도 150여 건이 접수됐음.
- 미국은 90년대 중반부터 본격적으로 출원되기 시작해 99년까지 완만한 증가세를 보이다가 2001년 이후 고분자 재료 기술이 폭발적으로 늘어났음. 일본은 다른 국가보다 빠른 80년대 후반부터 출원건수가 본격적으로 늘어나기 시작해 99년까지 급속도로 증가했음. 유럽은 가장 늦은 90년대 중반부터 출원이 늘어나는 경향을 보였음.
- 유기박막트랜지스터 재료 기술은 최근 들어 활발한 연구가 진행되고 있음. 83년부터 97년까지 15년 동안 출원된 특허건수보다 최근 5년 동안 출원된 건수가 더 많음. 하지만 유기반도체 재료 분야의 기술은 기술적인 측면에서는 많은 발전이 있었으나 상업성 문제 등으로 아직 실용화하지 못한 경향이 있기 때문에, 상업성 문제가 해결되면 보편적인 기술로 공급될 것으로 전망됨.

2. 국내외 산업동향 및 전망

- 다양한 응용 서비스의 특성에 따라 요구되는 센서 종류가 다양화 되고 있으며 감도 및 신뢰성을 높이기 위한 기술개발 또한 활발함. 미국, 일본등 국외에서는 고감도화뿐만 아니라 각 센서 제조기술을 기반으로 각종 센서를 신호회로와 집적하여 시스템에 연결하여 사용할 수 있는 회로일체형센서 개발에 집중하고 있음. 특히 현재 유기물 반도체를 이용한 화학센서 및 전자소자로의 응용은 전세계적으로 학계 및 산업체에서 매우 활발히 진행되고 있음.
- 또한, 유기물 반도체를 이용하여 2005년 11월 삼성전자는 세계 최대인 7인치 크기의 휘어지는 TFT-LCD를 발표했음. 이 디스플레이는 유리 대신 깨지지 않는 투명 플라스틱 기판을 적용해 자유롭게 휘 수 있도록 했음. 일본 샤프도 플라스틱 기판을 장착한 형태의 플렉서블 디스플레이를 개발했음. 언뜻 쉬워 보이지만, 유리 기판을 플라스틱으로 바꾸는 일은 그리 간단하지 않음. 기존 디스플레이는 섭씨 1000도 이상에서 가공되는 반도체를 사용하기 때문에 기판도 열에 잘 견디는 금속이나 유리를 사용했음. 플라스틱을 사용하면 제품을 만들기도 전에 녹아내릴 것임. 따라서 휘는 TFT·LCD를 개발했다는 것은 열에 강하면서 잘 휘는 플라스틱을 개발했거나, 전체 공정을 플라스틱도 견딜 수 있는 150도 이하의 저온에서 실현하였다는 것을 의미함.
- 플렉서블 디스플레이 시장에서 가장 주목받고 있는 OLED는 1970년대 후반 미국의 앨런 히거·앨런 맥더미드 교수와 일본의 히데키 시리카와 교수가 처음 발견한 ‘전기가 흐르는 플라스틱’을 이용함. OLED는 박막트랜지스터에서 전기신호를 받으면 내부의 전자가 이 동하면서 빛을 내는 장치임. 1987년 미국 이스트코닥이 처음 개발했으며, 바깥에 유리기판을 부착한 형태로 이미 디지털 카메라에 이용되고 있음.
- OLED는 스스로 빛을 내기 때문에 LCD처럼 백라이트가 필요가 없으며, 전력소비량도 적음. LCD는 액정과 컬러 필터를 통해 빛이 생성되기 때문에 보는 각도에 따라 색상과 영상이 바뀌지만, OLED는 스스로 빛을 내기 때문에 어느 각도에서도 동일한 영상을 볼 수 있음. 이렇기 때문에 플렉서블 디스플레이의 최고 기대주로 꼽히고 있음. 문제는 유기물로 만든 것이어서 산소와 습기에 취약하다는 점임. 이를 극복하기 위해 기판을 고분자 필름 또는 무기 박막으로 코팅하는 등의 기술이 개발되고 있음.
- 국내에서는 2002년 차세대 디스플레이 개발사업단이 출범, 오는 2011년까지 정부 투자 1000억원을 포함해 1750억원을 들여 플렉서블 디스플레이와 같은 차세대 디스플레이 분야를 연구하고 있음. 기업 에서는 삼성·LG 등이 주도하고 있다. 한때 디스플레이 분야의 강자였지만 지금은 한국·대만 등에 자리를 내준 일본도 활발한 움직임을 보이고 있음. 미국 국방부는 2004년 애리조나대에 4370만 달러를 투자해 군사용 플렉서블 디스플레이를 개발하고 있음. 휘어지는 디스플레이가 세상을 휘청거리게 할 날도 멀지 않아 보임.

이슈 분석

3

- | 유기물 반도체를 이용한 전자소자 개발에서의 최근 또는 향후 이슈
- | 실용화, 산업화를 위한 기술(산업)적 과제
- | 산업적 응용분야 및 경제적 파급 효과

3 이슈 분석

1. 유기물 반도체를 이용한 전자소자 개발에서의 최근 또는 향후 이슈

- 유기트랜지스터는 기존의 실리콘 전자공학으로는 다루지 못하는 부분을 보완하는 특징을 가지고 있어서, 실리콘과 상호보완적으로 사용함으로써 많은 상승효과를 기대됨. 특히 유기 트랜지스터는 자체만으로도 화학센서로 사용할 수 있는 특징이 있음. 따라서 첫 장에서는 유기물 반도체를 이용한 화학 센서 개발에 대한 이슈를 다루고자 함.
- 또한, 현재 유기 전자 소자(Organic electronics)는 상업화가 활발한 단계이며, 매우 급속도로 성장하는 사업 분야임. 따라서 향후 잠재적 시장이 매우 넓기 때문에 유기 전자 소자를 이용한 전자제품은 핸드폰, 디스플레이, 발광다이오드와 같은 분야에 다양하게 적용될 수 있음.
- 현재 많은 연구가 진행되고 상업화가 되었지만, 아직도 저비용, 경량화를 위하여 개발해야 할 분야는 무궁무진함. 특히 유연성을 가지는 전자 소자(flexible electronic devices)는 기존의 실리콘 기반의 성능을 가지지만 제조비용이 실리콘 기반의 전자소자보다 현재는 비싼 실정임.
- 특히 소자의 패터닝에 비용을 줄일 수 있는 직접 패터닝 기술이 매우 중요 하며 이에 대한 이슈를 다루며, 이와 관련된 기술은 아래와 같음.
- 직접 패터닝 기술:
 1. 잉크젯 분사 기술(ink-jet methods),
 2. 고분자 나노 임프린팅 기술(nanoimprinting of the polymer),
 3. 광식각에 의한 자기 정렬, 마이크로커팅(lithographically induced self assembly, microcutting of the cathode metal after deposition onto the underlying active organic materials),
 4. . 차가운 용접법 (lamination of contacts onto the organic surface from soft rubber stamps, and cathode formation by cold welding from stamps).
- 이러한 기술은 유기 발광 소자(organic light-emitting devices1 (OLEDs)), 유기 박막트랜 지스터(Organic thin-film transistors (OTFTs)), 태양열 발전을 위한 유기 광소자(thin-film organic photovoltaic cells for low-cost solar energy generation) 등의 전자 소자에 응용이 가능함.
- 따라서 본 기술은 설비투자비가 적게 들어갈 것으로 예상되는 기술 중심 영역으로 혁신형 중소기업 등이 미래 기술전략 수립 및 아이템 개발시에 유익하다고 판단됨.

3 이슈 분석

가. 유기물 반도체를 이용한 화학 센서 개발 현황

- 센서개발의 역사를 살펴보면 1960년대 말까 지는 센서의 개척기로, 여러 가지 물리현상을 전기신호로 변환하기 위한 방법이나 재료들에 관한 연구가 행해졌음. 이때까지는 우리들 인간의 눈으로 보고, 귀로 듣고 피부로 느끼는 현상을 센서라고 하는 전자부품으로 계측하기 위해 많은 연구가 행해진 시대였음. 빛, 온도, 압력 등과 같은 물리량을 위한 센서는 비교적 빠른 시기에 개발이 진행되었음.
- 반도체 집적회로 기술의 발전에 따라 센서의 성능, 신뢰성, 경제성이 향상되었다. 앞으로의 센서개발 방향은 검출한계의 도전, 집적화, 다기능화, 미개발분야의 도전, 지능센서의 개발 등을 그 지향목표로 하게 될 것임. 최근 산업이 고도화되고 자동화됨에 따라, 센서 기술은 모든 산업의 기반 기술이 되었으며, 2,000년대 성장 산업으로 선진국이 독점하고 있는 고부가가치 기술 중의 하나가 되었음.

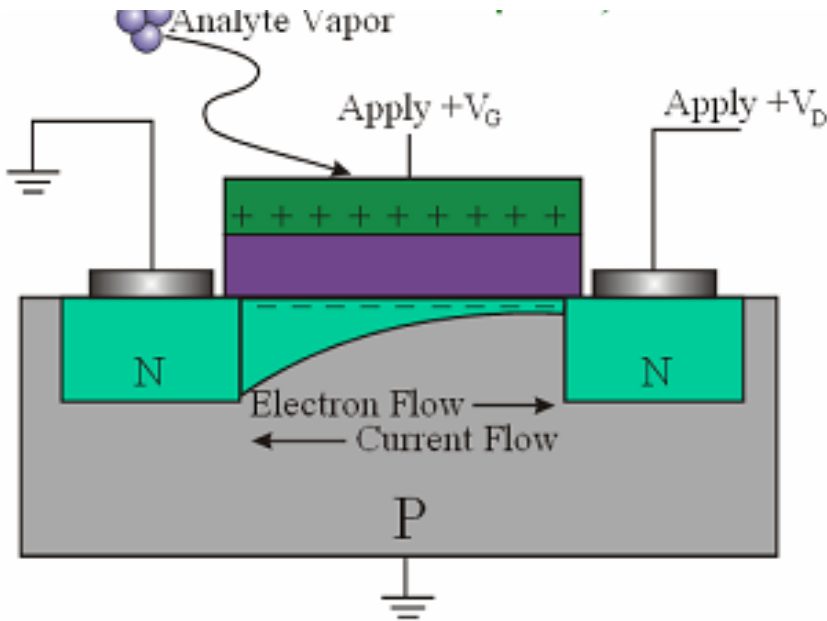


그림5. 화학 센서로써의 유기물 트랜지스터(ChemFET)

- 특히 유기트랜지스터는 기존의 실리콘 전자공학으로는 다루지 못하는 부분을 보완하는 특징을 가지고 있어서, 실리콘과 상호보완적으로 사용함으로써 많은 상승효과를 기대됨. 즉 고분자 필름등 유연한 시트위에 대면적의 집적회로가 인쇄 등의 저가의 프로세스로 실현됨. 화학 물질의 변화에 민감한 특성을 이용하여 유기 트랜지스터는 화학센서의 응용이 가능함.

○ 유기 트랜지스터가 고감도의 가스센서로서의 기능을 갖는 것은 Bell 연구소의 연구그룹에 의해서 제안되었는데, 그러면서 이 센서기능의 원리에 대해서는 해명되지 않는 점이 많았음. 여기에 여러 가지 유기물을 사용하여 유기트랜지스터의 가스검출에서 사용되었음.

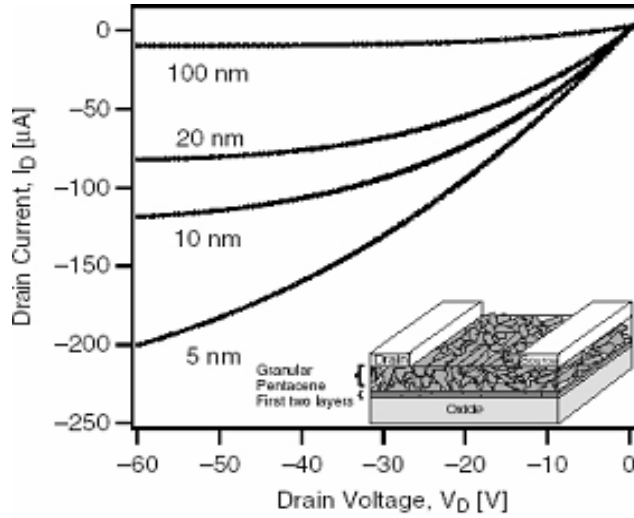


그림 6. 유기물 반도체 위에 소스-드레인 전극을 연결한 유기물 트랜지스터의 모형과 전기적 성질

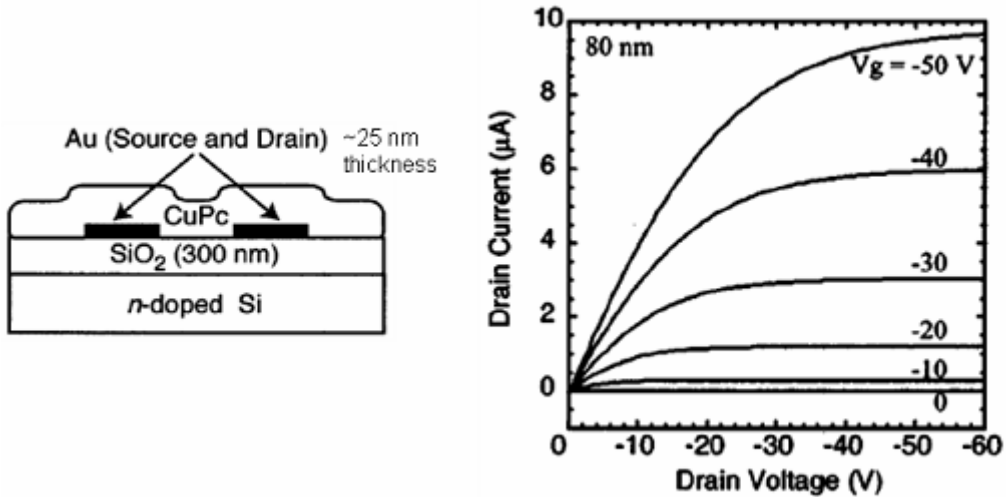


그림 7. 소스와 드레인 전극위에 유기물 반도체를 증착한 유기물 트랜지스터의 모식도와 전기적 성질.

○ 또한 유기트랜지스터의 특성으로 유기트랜지스터의 채널층을 물에 직접노출 한 상태의 소자를 작동시키는 것을 성공하였고, 또한 유기 트랜지스터와 미소 유체로를 집적화 하는데 성공하였음. 유기반도체와 분석물을 조합하여 1ppm의 감도가 실현되고 리셉터가 없어도 감도선택성이 있는 것을 알게 되었음. 유기트랜지스터의 어레이와 신호처리의 기술을 조합함으로써 특정분석물의 정량화도 가능할 것임.

○ 현재 이러한 유기물 트랜지스터를 이용한 센서 연구중에서 가장 중요한 이슈는 감도나 선택성을 향상시키는 것임. 따라서 아직도 이 분야에서 재현성이나 안정성과 더불어 감도와 선택성을 향상시키는 것이 절대적으로 요구됨.

나. 유기물 반도체를 이용한 경제적인 전자 소자 제조방법

○ 대면적 집적 공정 기술 개발로 극복이 가능하여야 함. 이러한 공정중의 하나인 스탬프(stamp)를 이용한 직접적인 인쇄법이나 잉크젯 분사 방법으로 유기 박막 소자 제조가 가능함.

○ 유기 전자 소자 에 있어서 유기물 반도체를 대면적 상품화가 가능한 기술로 발전시킬 수 있는 최근의 중요한 기술을 이슈화 하고자 함. 이러한 기술이 사용되기 위하여 가장 근본적인 유기물 반도체의 특수한 전기적 광학적 특성에 대하여 간단히 먼저 언급하고자 함. 그런 후에 박막의 증착 방법과 경제적으로 제조가 가능한 패터닝 기술에 대한 이슈에 접근하고자 함.

유기물 반도체의 필수 특성(Essential properties of organic semiconductors)

○ 모든 유기 물질과 같이 유기물 반도체 는 탄소 성분 이 많이 함유 된 것으로 끝부분 에 기능성기로 변환되어 있어서 전하 전도도와 광 루미네선서 (luminescent)의 성질을 가져야 함. 아래 그림에서는 유기 전자 소재가 분자 질량이 작은 분자(small molecules), 고 분자(polymers)와 생물학적 물질(biological materials) 로 분류할 수 있는 것을 보여 줌. 특히 플레 티늄-옥타틸포르피린(Pt-octaethylporphyrin (PtOEP))은 금속유기 복합체 로써 OLED에서 적색 광원을 발산할 수 있는 물질임.

○ 특히 중요한 이슈로써는 이러한 유기 반도체 물질을 이용하여 저가의 전자 소자를 제조할 때에는 반드시 대면적이 용이한 패터닝 기술과 증착 기술이 필요함. 기존의 광식각 공정은 노동 집 약적인 공정이므로 가격적이 면에서 큰 장점이 없기 때문임.

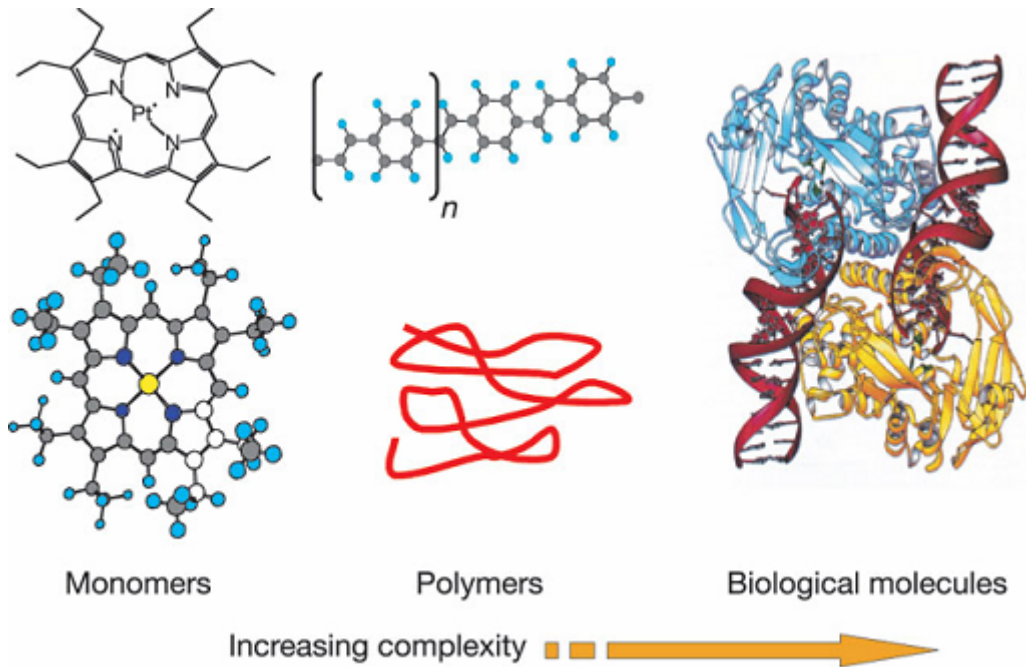


그림 8. 복잡성에 따른 다양한 형태의 유기 전자 재료

가. 유기 반도체의 증착법(Deposition of organic semiconductors)

○ 작은 분자량을 가지는 물질과 고분자 물질은 박막을 형성하기 위하여 다른 증착 방법을 사용함.

1. 고분자의 용액 증착법(Solution deposition of polymer thin films)

○ 일반적으로 고분자는 기판위에 전체적으로 도포한 후에 스핀을 이용한 용액 공정으로 이루어짐. 스핀한 후에 용매는 기화되어 날아가기 때문에 OLED와 OTFT에서 요구되는 100나노미터 수준의 두께를 유지할 수 있음. 이러한 방법은 매우 빠르게 대면적에 증착할 수 있는 장점이 있지만, 박막의 성질과 다른 후속 공정에서 불안정성 등의 문제점을 가지고 있음. 이러한 문제점들은 주로 다른 종류의 기능성을 첨가하거나 다른 고분자와 합성하여 문제점을 해결할 수 있음. 전체에 증착하는 이 기술의 또 다른 문제점으로는 부분적인 패턴 공정이 불가능하다는 것임. 따라서 이러한 기술은 하나의 물질을 전체에 증착할 때에만 사용이 가능하다.

○ 이러한 문제점을 보완하기 위하여 잉크 젯(ink-jet printing) 인쇄법을 사용되며, 이는 디스플레이에 필요한 R, G, B 색상을 동시에 도포할 수 있는 기술임. 그림에서 보는 바와 같이 50-100 마이크로미터 픽셀에 각각의 색상을 가지는 고분자를 빠른 시간내에 주입할 수 있는 아주 경제적인 기술임.

- 이런 잉크젯 인쇄법은 새로운 잉크의 개발이 필요하지만 매우 전망있는 기술이며, 일본의 토시바에서는 이 기술을 이용하여 17인치 디스플레이를 실제 구현해 보였음. 픽셀의 수율과 디스플레이의 수명 등과 같은 문제점들은 있지만 대면적의 패터닝 기술에 있어서 매우 경제적이므로 이러한 문제점만 극복하면 향후 저가의 전자 소자를 제조할 수 있을 것으로 여겨짐.

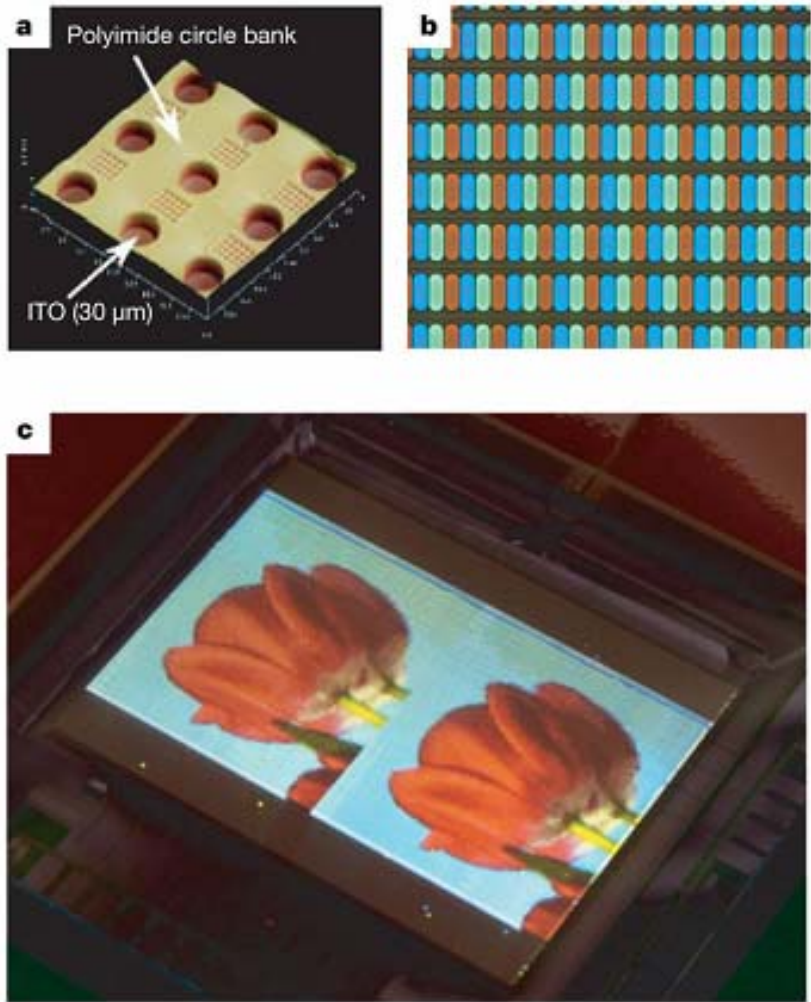


그림 9. 잉크젯 인쇄법(Ink-jet printing)과 천연 색상 고분자 유기 발광 소자 디스플레이(OLED)

2. 작은 분자의 기상 증착법(Vapour-phase deposition of small molecules)

- 작은 분자량을 가지는 박막 증착에 있어서 열 기상 증착법이 가장 일반화되어 있음. 이는 진공 챔버내에서 원료에 열을 가하여 기화시켜서 증착하는 방법으로 박막의 두께의 제어가 용이하여 널리 사용되고 있음. 하지만 이는 물질의 손실이 많고 균일한 박막의 형성이 어렵다는 한계점이 있음. 이러한 문제점에도 불구하고 IBM의 20인치 디스플레이와 소니의 13인치 디스플레이를 이 방법에 의하여 제조하였음.
- 이런 열 기상 증착법의 문제점을 해결하기 위하여 유기 기상 증착법(organic vapour phase deposition (OVPD)) 기술이 도입되었음. 이는 챔버의 벽을 가열하고 내부에서 비활성 가스를 통하여 일정하게 온도를 유지하여 소스 물질의 기화를 균일하게 만들어 주는 장점이 있음.

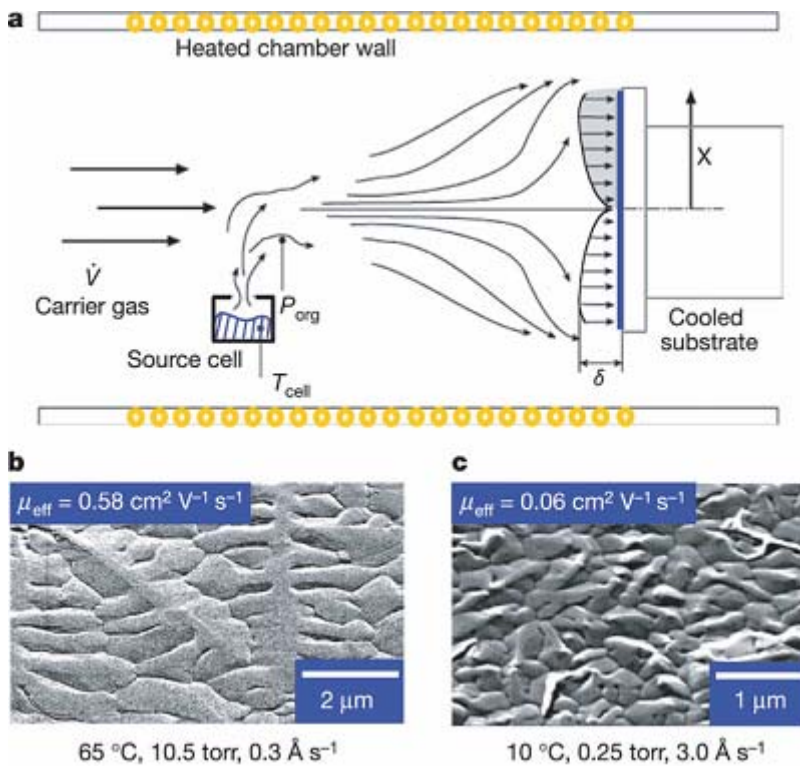


그림 10. 유기 전자 소자의 성장을 위한 유기 기상 증착법(organic vapour-phase deposition (OVPD))

나. 유기 전자 소자의 직접 패터닝(Direct patterning of organic electronic devices)

- 유기 박막을 저가로 제작하기 위해서는 유리, 플라스틱과 금속 포일과 같은 기판에서 낮은 온도에서 증착이 가능하여야 함. 또한 잉크젯 방법이나 유기 기상 증착법과 같은 증착 후에 패터닝을 위하여 새로운 기술이 필요함. 이러한 방법에는 고분자를 직접 나노 임프린팅(nanoimprinting) 하는 방법과 광식각 공정을 병행한 자기 정렬(self assembly), 마이크로 커팅(microcutting), 광 중합화, 차가운 용접법(cold welding)등의 공정이 있음. 이 중에서 차가운 용접법은 아래 그림에서와 같이 두개의 동일한 물질이 있는 박막을 접촉하여 압력을 가하는 것임.
- 이러한 기술은 10나노미터의 해상도를 가지는 매우 성능이 우수한 유기 전자 소자를 저렴한 가격에 제조할 수 있는 우수한 기술임. 향후 미래에는 유기 박막은 우수한 동작 특성과 유기 반도체의 특수한 기능성을 이용하여 많은 부분에 응용될 것임. 하지만 이러한 전자 소자의 응용은 소자의 제조 원가에 매우 의존하게 됨. 특히 기존의 실리콘 소자에 비하여 상대적으로 매우 저렴하지 않으면 이용 가치가 떨어짐.

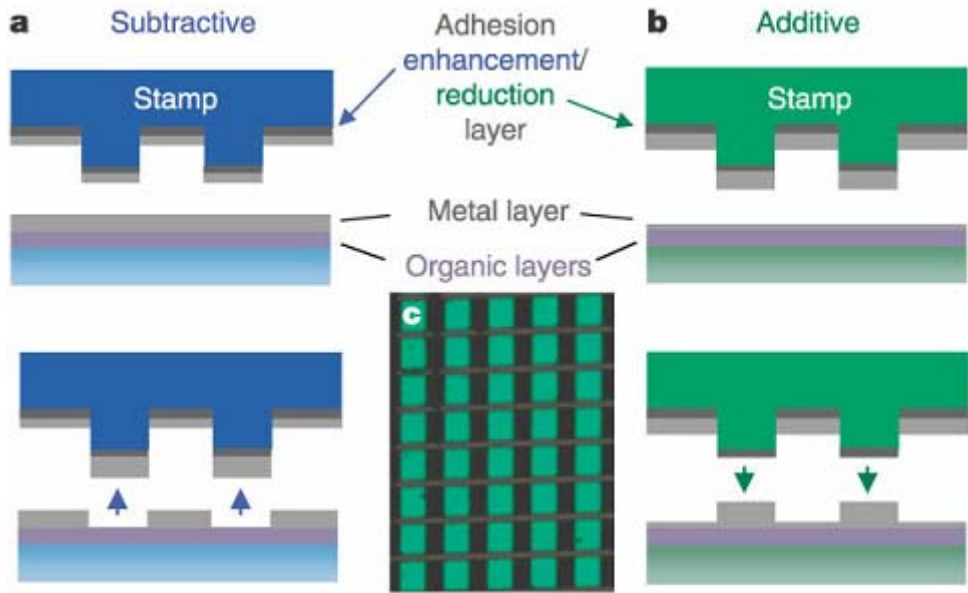


그림 11. 차가운 용접법(cold welding)에 의한 유기 전자 소자의 직접 마이크로/나노패터닝 공정 (Direct micro/nanopatterning)

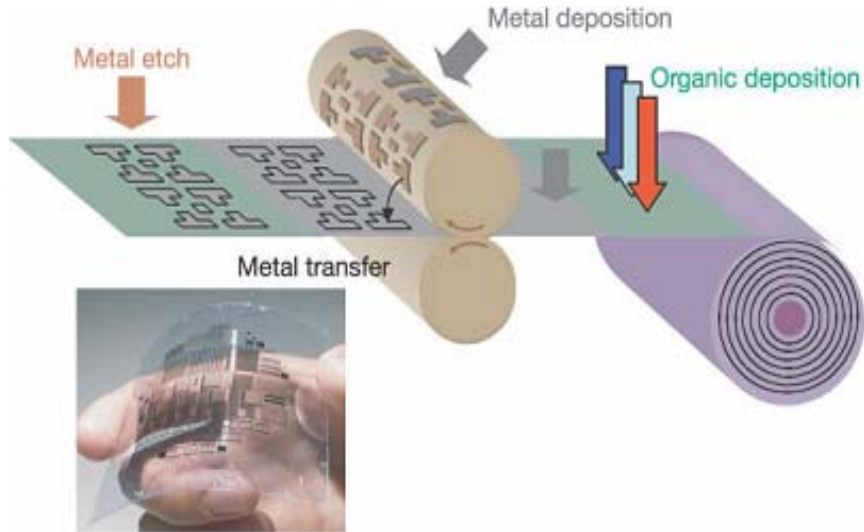


그림 12. 경제적인 유기 전자 소자 제조를 위한 연속 공정 개념도

- 만약 직물 제조에 사용되는 방법인 롤을 이용한 방법(roll-to-roll)이 성공한다면, 저온에서 증착이 가능하고, 저가로 대량 생산이 가능하여 매우 활용 범위가 넓어질 것임.
- 현재 많은 연구원들이 새로운 기술에 대하여 연구하고 있지만, 매우 극소수만이 실험실의 기술이 실제 제품생산에 적용되고 있는 실정임. 실제로 가장 간단한 스핀 코팅법이나 진공 증착법이 사용되어 천연색 디스플레이를 만들었지만, 향후 더욱 많은 연구 개발 결과가 이러한 유기 반도체 물질을 응용한 전자 소자의 제조원가를 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대됨.

2. 실용화, 산업화를 위한 기술(산업)적 과제

- 유기 전자 공학(Organic electronics)은 시장에 상품화를 하기에는 아직 초기 단계이지만, 현재의 연구 속도라면 곧 기존 기술의 주류로 부각될 것으로 여겨짐. 활성 유기 박막 소자는 시장에서 선보이고 있으며, 이동 전자 소자에도 응용이 되고 있음. 하지만 이러한 새로운 기술이 차세대 기술로 접목되기 위해서는 매우 저렴한 가격에 제조가 가능하고 가벼우며, 기존의 성능을 가지면서 휘어지는 유연성을 가져야 함.
- 유기 전자 소자의 장점은 유리, 플라스틱과 금속 박막과 같은 여러가지 기판을 사용할 수 있고, 다양한 유기 재료의 합성이 가능하다는 것임. 최근의 가장 진보된 유기 반도체 상품으로는 높은 효율성과 휘도를 가지는 유기 발광 전자소자(organic light-emitting devices (OLEDs))임. 차세대 박막 트랜지스터를 이용한 태양열 전지 분야도 매우 진보된 분야임. 이러한 기술의 최대 성능을 결정하는 것은 유기물 반도체 물질로써, 특정 응용을 위해서는 충분한 자격을 갖추고 있지만, 저가의 제조 공정에는 아직도 해결해야 할 문제가 많이 남아 있음.

- 대부분의 박막 소자에 사용되는 유기 물질은 저가이지만, 실제 전자 소자에 적용될 때에는 마지막 제품의 제조품에 의하여 가격이 결정됨. 따라서 이러한 물질의 성공적인 응용을 위하여서는 제조 공정의 혁신을 통하여 대면적 공정이 가능하고 저가의 공정 기술 개발이 필수적임.
- 기존의 반도체 제조 공정 기술을 유기물 전자 회로 소자에 적용이 필요하고, 유기물 반도체로부터 물리적 화학적 성질이 매우 우수한 성능을 구현하여야 함. 따라서 수분이나 부식성 분위기에 노출되었을 때 무기질 반도체는 견고하고 반응성이 적으며 안정한 반면에, 유기 전자 소자 재료는 견고하지 못하고 부서지기 쉽다는 단점을 가지고 있음.

3. 산업적 응용분야 및 경제적 파급효과

가. 유기물 반도체 소재기술의 응용 분야 및 파급효과

- 얇고 선명도가 높은 디지털 세상을 구현하려는 노력이 가속화하고 있음. 지난 70년대 후반 들어 특정한 유기물을 적절히 도핑하는 과정을 통해 전기 전도도가 구리에 가깝게 도달할 수 있다는 것이 알려지면서 유기반도체를 전기전자 소재로 활용하려는 연구가 활발하게 진행되고 있음. 유기반도체의 특성은 섬유나 필름 형태로 성형이 쉽고 가볍고 유연성이 높을 뿐만 아니라 저렴한 생산비 등을 들 수 있음. 게다가 다양한 합성 경로를 통해 새로운 구조와 기능을 갖는 화합물을 비교적 쉽게 형성할 수 있어 새로운 초박막 기능성 전기전자와 광소자로 개발할 수 있다는 장점도 있음. 이 같은 장점 때문에 최근 10여 년간 유기반도체 소재 개발과 이를 이용한 다양한 응용 연구개발 활동은 활발하게 진행돼 왔음.
- 특히 관련 기술이 급격히 발전함에 따라 응용분야가 넓어지고 있음. 지금까지 반도체 소자를 모듈화한 전광판이나 자동차용 조명등시장을 중심으로 성장해왔다면 앞으로는 LCD BLU 광원으로 휴대폰, 신호등, 통신용전송장치, 광계측기등 광응용 분야, 조명시장으로까지 발전할 것으로 보임. 또한 유기박막 트랜지스터 재료를 이용한 디스플레이 소자나 스마트 카드, 정보태그등도 다양하게 실생활에 응용되고 있어 그 파급효과는 더욱 커질 것으로 보임.
 - 전자파 차폐막과 유기발광다이오드(OLED), 유기박막트랜지스터, 유기태양전지, 다광자 흡수현상을 이용한 메모리 소자 등 유기반도체를 이용한 응용 연구 영역도 지속적으로 확대되고 있음. 더욱이 최근 들어 정보전달의 중요성이 점점 커지고 급속한 통신기술 발달로 인해 소비자의 고기능 디스플레이에 대한 요구가 점차 커지고 있음.
- 특히 OLED 재료를 이용한 평판 디스플레이에 대한 요구는 급속도로 증가하고있는 추세임. 이 같은 관심은 기존의 컴퓨터와 텔레비전 그리고 홈시어터뿐만 아니라 이동통신 단말기를 비롯해 PDA, 웹패드 등 각종 휴대형 정보기기 단말기 출시가 봇물을 이루면서 더욱 커지고 있음.

나. 기술의 응용 분야 및 파급효과

- 최근 센서기술은 현대 첨단과학기술의 영향으로 초소형화, 다차원화, 다기능화, 지능화, 시스템화 경향이 뚜렷함. 또한 기능막 작성법, 새로운 전해 프로세스 및 광전자 화학 프로세스용 재료 개발 등 전기화학 분야뿐 아니라 고분자 화학, 생물화학, 무기화학, 전자재료화학, 의학, 약학, 생리학, 전기공학 등 다양한 분야에서 응용되고 있음.
- 유기물 반도체를 이용한 첨단센서는 첨단산업분야에 응용되어 신제품개발, 기존제품의 고기능화, 생산공정의 자동화 등에 기여함으로써 파급효과가 매우 큰 산업임. 특히 화학 센서기술은 기초과학연구에서 산업공정제어는 물론 일상 가정생활에 이르기까지 광범위하게 활용되고 있음. 센서기술은 상당히 학제적이고 복합기술적이며 고부가가치를 가지며 그 파급효과도 큼. 이 학제적, 복합기술적인 센서기술의 특성은 센서기술의 혁신을 느리게 하고, 고부가가치적이며 파급효과가 크다는 특성은 센서기술의 보호장벽 높이고 기술이전을 기피하게 하고 있음.
- 또한, 유기물 반도체의 또 다른 응용으로 디스플레이의 핵심소재인 유기박막 트랜지스터(OTFT) 연구에 디스플레이의 박막트랜지스터에 사용되는 기존 실리콘 반도체를 대체할 수 있는 고분자 또는 유기물이 사용 가능함. 이는 구부릴 수 있는 액정디스플레이, 유기전기발광디스플레이(OLED), 전자 책 등은 물론 스마트 카드, 라디오파 인식장치, 전자파차폐, 스텔스 기술 등에 이용될 정도로 그 파급효과가 매우 높음.
- 특히 플렉서블 디스플레이는 기존 디스플레이를 대체할 뿐 아니라 응용 분야도 다양해 경제적 파급효과가 엄청날 것으로 보임. 미국 디스플레이 컨소시엄(USDC)은 2015년 플렉서블 디스플레이 시장 규모가 20억 달러에 이를 것으로 전망하고 있음. 이는 디스플레이 제품 자체만 따진 것이며, 부품 관련 시장까지 포함하면 실제 시장 규모는 이보다 훨씬 커질 것으로 예상됨. 전자부품연구원에 따르면 OLED만 해도 2003년 2억 달러에서 2008년 24억~38억 달러로 급성장할 것으로 추정됨. 새롭게 개발될 정보단말기 시장과 관련 콘텐츠 시장까지 합치면 추정이 불가능할 정도임.

4 결론

4 결론

- 유기트랜지스터를 화학센서에 응용하는 것은 실리콘을 기반으로 하는 무기재료 반도체의 강점의 영역에서 이들이 커버하지 못하는 분야의 적용에 장점을 가지고 있음. 이는 화학 바이오센서부문에서 생체분야의 적용은 앞으로의 좋은 가능성을 부여하리라 기대됨.
- 유기반도체는 다양하고 분석물에 대한 응답도 다양한데, 이 다양성을 활용하여 유기반도체로부터 센서로 활용이 가능함. 이러한 유기물 트랜지스터 센서의 감도나 선택성을 향상시키는 것이 중요하고, 재현성이나 안정성을 향상시키는 노력이 필요함.
- 또한 박막 소자에 사용되는 유기 물질은 저가이지만, 실제 전자 소자에 적용될 때에는 마지막 제품의 제조품에 의하여 가격이 결정되기 때문에 이러한 물질의 성공적인 응용을 위하여서는 제조 공정의 혁신을 통하여 대면적 공정이 가능하고 저가의 공정 기술 개발이 필수적임.
- 이러한 새로운 공정 기술과 기존의 반도체 제조 공정 기술을 유기물 전자 회로 소자에 효과적으로 적용하면, 유기물 반도체로부터 우수한 성질의 화학센서 및 전자소자를 제조할 수 있을 것으로 여겨짐.

참고문헌

1. Vaeth, K. M. OLED–display technology. *Inform. Display* 19, 12–17 (2003).
2. Lin, Y. Y., Gundlach, D. J., Nelson, S. F. & Jackson, T. N. in 55th Annu. Dev. Res. Conf. 60 (Electron Device Society, Ft Collins, Colorado, 1997).
3. Gundlach, D. J., Lin, Y. Y. & Jackson, T. N. Pentacene organic thin film transistors–molecular ordering and mobility. *IEEE Electron. Dev. Lett.* 18, 87–89 (1997).
4. Shtein, M., Mapel, J., Benziger, J. B. & Forrest, S. R. Effects of film morphology and gate dielectric surface preparation on the electrical characteristics of organic vapor phase deposited pentacene thinfilm transistors. *Appl. Phys. Lett.* 81, 268–270 (2002).
5. Peumans, P. & Forrest, S. R. Very high efficiency double heterostructure copper phthalocyanine/C60 photovoltaic cells. *Appl. Phys. Lett.* 79, 126–128 (2001).
6. Granstrom, M. et al. Laminated fabrication of polymeric photovoltaic diodes. *Nature* 395, 257–260 (1998).
7. Peumans, P., Uchida, S. & Forrest, S. R. Efficient bulk heterojunction photovoltaic cells based on small molecular weight organic thin films. *Nature* 425, 158–162 (2003).
8. Shaheen, S. E. et al. 2.5% efficient organic plastic solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 78, 841–843 (2001).
9. Baldo, M. A. et al. High efficiency phosphorescent emission from organic electroluminescent devices. *Nature* 395, 151–154 (1998).
10. Anthopoulos, T. D. et al. Highly efficient single–layer dendrimer light–emitting diodes with balanced charge transport. *Appl. Phys. Lett.* 82, 4824–4826 (2003).
11. Ma, D. G. et al. Bright electroluminescence from a new conjugated dendrimer. *Synth. Met.* 137, 1125–1126 (2003).
12. Lee, C.–L., Lee, K. B. & Kim, J.–J. Polymer phosphorescent light emitting devices doped with tris(2–phenylpyridine) iridium as a triplet emitter. *Appl. Phys. Lett.* 77, 2280–2282 (2000).
13. Burroughes, J. H. et al. Light–emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature* 347, 539–541 (1990).
14. Braun, D. & Heeger, A. J. Visible light emission from semiconducting polymer diodes. *Appl. Phys. Lett.* 58, 1982–1984 (1991).
15. Greenbaum, E., Blankinship, S. L., Lee, J. W. & Ford, R. M. Solar photobiochemistry: Simultaneous photoproduction of hydrogen and oxygen in a confined bioreactor. *J. Phys. Chem. B* 105, 3605–3609 (2001).
16. Greenbaum, E., Lee, I. & Lee, J. W. Functional 3D nanoscale imaging of a single–molecule photovoltaic structure. *Biophys. J. Part 2* 82, 206–207 (2002).
17. Pope, M. & Swenberg, C. E. *Electronic Processes in Organic Crystals* (Clarendon, Oxford, 1982).
18. Silinsh, E. A. in *Organic Molecular Crystals* (ed. Queisser, H.–J.) Ch. 1 (Springer, Berlin, 1980).
19. Sze, S. M. *Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley, New York, 1981).
20. Warta, W., Stehle, R. & Karl, N. Ultrapure, high mobility organic photoconductors. *Appl. Phys. A* 36, 163–170 (1985).

21. Karl, N. Studies of organic semiconductors for 40 years. III. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 171, 31–51 (1989).
22. Forrest, S. R., Kaplan, M. L. & Schmidt, P. H. Organic–on–inorganic semiconductor contact barrier diodes. II. Dependence on organic film and metal contact properties. *J. Appl. Phys.* 56, 543–551 (1984).
23. Campbell, A. J., Bradley, D. D. C. & Antoniadis, H. Dispersive electron transport in an electroluminescent polyfluorene copolymer measured by the current integration time–of–flight method. *Appl. Phys. Lett.* 79, 2133–2135 (2001).
24. Blom, P.W. M., de Jong, M. J. M. & vanMunster, M. G. Electric–field and temperature dependence of the hole mobility in poly(p–phenylene vinylene). *Phys. Rev. B* 55, R656–R659 (1997).
25. Bulovic, V., Burrows, P. E. & Forrest, S. R. in *Electroluminescence I* (ed. Mueller, G.) 262 (Academic, New York, 2000).
26. Sirringhaus, H. et al. Mobility enhancement in conjugated polymer field–effect transistors through chain alignment in a liquid–crystalline phase. *Appl. Phys. Lett.* 77, 406–408 (2000).
27. Forrest, S. R. Ultrathin organic films grown by organic molecular beam deposition and related techniques. *Chem. Rev.* 97, 1793–1896 (1997).
28. van de Craats, A. M. et al. Meso–epitaxial solution–growth of self organizing discotic liquid–crystalline semiconductors. *Adv. Mat.* 15, 495–499 (2003).
29. Burrows, P. E. & Forrest, S. R. Electroluminescence from trap–limited current transport in vacuum deposited organic light emitting devices. *Appl. Phys. Lett.* 64, 2285–2287 (1994).
30. Parker, I. D. Carrier tunneling and device characteristics in polymer light emitting diodes. *J. Appl. Phys.* 75, 1656–1666 (1994).
31. Gelinck, G. H., Geuns, T. C. T. & de Leeuw, D. M. High–performance all–polymer integrated circuits. *Appl. Phys. Lett.* 77, 1487–1489 (2000).
32. Drury, C. J., Mutsaers, C. M. J., Hart, C. M., Matters, M. & de Leeuw, D. M. Low–cost all–polymer integrated circuits. *Appl. Phys. Lett.* 73, 108–110 (1998).
33. Peumans, P., Bulovic, V. & Forrest, S. R. Efficient, high–bandwidth organic multilayer photodetectors. *Appl. Phys. Lett.* 76, 3855–3857 (2000).
34. Stutzmann, N., Friend, R. H. & Sirringhaus, H. Self–aligned vertical–channel polymer field effect transistors. *Science* 299, 1881–1884 (2003).
35. Kitaigorodsky, A. I. *Molecular Crystals and Molecules* (Academic, New York, 1973).
36. Werner, A. G. et al. Pyronin B as a donor for n–type doping of organic thin films. *Appl. Phys. Lett.* 82, 4495–4497 (2003).
37. Fukase, A. & Kido, J. Organic electroluminescent devices having self–doped cathode interface layer. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2 41, L334–L336 (2002).
38. Kido, J. & Matsumoto, T. Bright organic electroluminescent devices having a metal–doped electroninjecting layer. *Appl. Phys. Lett.* 73, 2866–2868 (1998).
39. Endo, J., Matsumoto, T. & Kido, J. Organic electroluminescent devices with a vacuum–deposited Lewis–acid–doped hole–injecting layer. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2 41, L358–L360 (2002).
40. Gao, W. & Kahn, A. Controlled p–type doping of an organic molecular semiconductor. *Appl. Phys. Lett.* 79, 4040–4042 (2001).

41. Pfeiffer, M., Forrest, S. R., Leo, K. & Thompson, M. E. Electrophosphorescent p-i-n organic light emitting devices for very high efficiency flat panel displays. *Adv. Mater.* 14, 1633–1636 (2002).
42. Do, L. M. et al. Observation of degradation processes of Al electrodes in organic electroluminescence devices by electroluminescence microscopy, atomic force microscopy, scanning electron microscopy and Auger electron spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 76, 5118–5121 (1994).
43. Aziz, H. et al. Degradation processes at the cathode/organic interface in organic light emitting devices with Mg:Ag cathodes. *Appl. Phys. Lett.* 72, 2642–2644 (1998).
44. Burrows, P. E. et al. Reliability and degradation of organic light emitting devices. *Appl. Phys. Lett.* 65, 2922–2924 (1994).
45. Kwong, R. C. et al. High operational stability of electrophosphorescent devices. *Appl. Phys. Lett.* 81, 162–164 (2002).
46. Xu, G. Fighting OLED degradation. *Inform. Display* 19, 18–21 (2003).
47. Gutmann, F. & Lyon, L. E. *Organic Semiconductors Part A* (R. E. Krieger Publishing, Malabar, Florida, 1981).
48. Wu, C. C., Sturm, J. C., Register, R. A. & Thompson, M. E. Integrated three color organic light emitting devices. *Appl. Phys. Lett.* 69, 3117–3119 (1996).
49. Jiang, X. Z. et al. Effect of carbazole-oxadiazole excited-state complexes on the efficiency of dye-doped light-emitting diodes. *J. Appl. Phys.* 91, 6717–6724 (2002).
50. Gu, G. & Forrest, S. R. Design of flat panel displays based on organic light emitting devices. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* 4, 83–99 (1998).
51. Hebner, T. R. & Sturm, J. C. Local tuning of organic light-emitting diode color by dye droplet application. *Appl. Phys. Lett.* 73, 1775–1777 (1998).
52. Sirringhaus, H. et al. High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science* 290, 2123–2126 (2000).
53. Shimoda, T., Morii, K., Seki, S. & Kiguchi, H. Inkjet printing of light-emitting polymer displays. *Mater. Res. Soc. Bull.* 28, 821–827 (2003).
54. Hebner, T. R., Wu, C. C., Marcy, D., Lu, M. H. & Sturm, J. C. Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting devices. *Appl. Phys. Lett.* 72, 519–521 (1998).
55. Gustafsson, G. et al. Flexible light-emitting diodes made from soluble conducting polymers. *Nature* 357, 477–479 (1992).
56. Gu, G., Burrows, P. E., Venkatesh, S., Forrest, S. R. & Thompson, M. E. Vacuum-deposited, non-polymeric flexible organic light emitting devices. *Opt. Lett.* 22, 175–177 (1997).
57. Burrows, P. E. et al. Organic vapor phase deposition: a new method for the growth of organic thin films with large optical nonlinearities. *J. Cryst. Growth* 156, 91–98 (1995).
58. Shtein, M., Gossenberger, H. F., Benziger, J. B. & Forrest, S. R. Material transport regimes and mechanisms for growth of molecular organic thin films using low-pressure organic vapor phase deposition. *J. Appl. Phys.* 89, 1470–1476 (2001).
59. Shtein, M., Peumans, P., Benziger, J. B. & Forrest, S. R. Micropatterning of organic thin films for device applications using organic vapor phase deposition. *J. Appl. Phys.* 93, 4005–4016 (2003).
60. Shtein, M., Peumans, P., Benziger, J. & Forrest, S. R.. Direct, mask- and solvent-free printing of molecular organic semiconductors. *Adv. Mater.* (in the press).

61. Karnakis, D. M., Lippert, T., Ichinose, N., Kawanishi, S. & Fukumura, H. Laser induced molecular transfer using ablation of a triazeno-polymer. *Appl. Surf. Sci.* 127-129, 781-786 (1998).
62. Blanchet, G. B., Loo, Y.-L., Rogers, J. A., Gao, F. & Fincher, C. R. Large area, high resolution dry printing of conducting polymers for organic electronics. *Appl. Phys. Lett.* 82, 463-465 (2003).
63. Suh, M. C., Chin, B. D., Kim, M.-H., Kang, T. M. & Lee, S. T. Enhanced luminance of blue light-emitting polymers by blending with hole transporting materials. *Adv. Mater.* 15, 1254-1258 (2003).
64. Wang, J., Sun, X., Chen, L. & Chou, S. Y. Direct nanoimprint of submicron organic light-emitting structures. *Appl. Phys. Lett.* 75, 2767-2769 (1999).
65. Chou, S. Y., Zhuang, L. & Guo, L. Lithographically induced self-construction of polymer microstructures for resistless patterning. *Appl. Phys. Lett.* 75, 1004-1006 (1999).
66. Stutzmann, N., Tervoort, T. A., Bastiaansen, K. & Smith, P. Patterning of polymer-supported metal films by microcutting. *Nature* 407, 613-616 (2000).
67. Zaumseil, J. et al. Nanoscale organic transistors that use source/drain electrodes supported by high resolution rubber stamps. *Appl. Phys. Lett.* 82, 793-795 (2003).
68. Kim, C. & Forrest, S. R. Fabrication of organic light-emitting devices by low pressure cold welding. *Adv. Mater.* 15, 541-545 (2003).
69. Kim, C., Burrows, P. E. & Forrest, S. R. Micropatterning of organic electronic devices by cold-welding. *Science* 288, 831-833 (2000).
70. S. R. Forrest, "The path to ubiquitous and low cost organic electronic appliances on plastic," **Nature** 428, 911-918 (2004)

저자소개

▶ 박 정 원

- ◆ 공학 박사 4년차 과정
- ◆ 현, University of California, San Diego 연구 조교

▶ 한국과학기술정보연구원 동향정보분석팀