

유기 반도체를 이용한 전계효과 트랜지스터

김 성 현 · 황 도 훈 · 정 태 형

1. 서 론

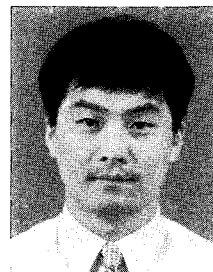
최근 10여년간 반도체 성질을 띄는 유기 소재의 개발과 이를 이용한 다양한 응용 연구들이 어느 때보다 활발히 진행되어 왔다. 전자파 차폐막, 캐패시터, 유기 EL 디스플레이, 유기 박막 트랜지스터, 태양 전지, 다광자 흡수 현상을 이용한 메모리 소자 등 유기 반도체를 이용한 응용 연구의 영역은 계속해서 확장되고 있다. 이중 특히 유기 EL 분야는 상품화를 목전에 두고 있어 유기물을 이용한 응용 연구를 활성화시키는 촉매제 역할을 하고 있다.

유기 트랜지스터에 관한 연구는 1980년 이후부터 시작되었으나 근래에 들어 전 세계적으로 본격적인 연구가 진행되고 있다. 제작 공정이 간단하고 비용이 저렴하며 충격에 의해 깨지지 않고 구부리거나 접을 수 있는 전자 회로 기판이 미래의 산업에 필수적인 요소가 될 것으로 예상되고 있으며 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 유기 트랜지스터의 개발은 아주 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 본 논문에서는 유기 전계효과 트랜지스터의 동작 원리와 지금

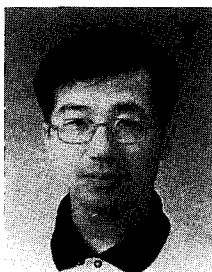
까지의 연구 발전 과정 그리고 앞으로 해결해야 할 연구 과제들과 전망에 관해 알아보기로 한다.

2. 유기물 전계효과 트랜지스터의 동작 원리

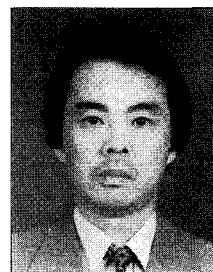
유기물 전계효과 트랜지스터의 구조와 동작 원리를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)에 G는 gate 전극이며 n-형 실리콘이 가장 많이 사용되고 있다. I는 절연막(insulator)으로 게이트 유전체(gate dielectrics)로 불린다. 게이트에 전압을 가하게 되면



황도훈
 1990 부산대학교 화학과(학사)
 1992 한국과학기술원 화학과(석사)
 1995 한국과학기술원 화학과(박사)
 1995~ 영국 Cambridge 대학 화학과
 1996 박사후 연구원
 1997~ 한국전자통신연구원 원천기술
 현재 연구본부 선임연구원



김성현
 1988 부산대학교 물리학과(학사)
 1992 Oregon State Univ. 물리학과(석사)
 1998 부산대학교 물리학과(박사)
 1998~ 한국전자통신연구원 원천기술
 연구본부 박사후 연구원
 1999~ 한국전자통신연구원 원천기술
 현재 연구본부 선임연구원



정태형
 1977 서울대학교 사범대학 화학과(학사)
 1978~ KIST 고분자연구부
 1981 Texas Tech University 화학과(박사)
 1986 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 박사후 연구원
 1989 한국전자통신연구원 원천기술
 현재 연구본부 책임연구원

Field Effect Transistor Using Organic Semiconductors

한국전자통신연구원(Seong Hyun Kim, Do-Hoon Hwang, and Taehyoung Zyung, ETRI, 161 Kajeong-Dong, Yusong-Gu, Taejon 305-350, Korea)

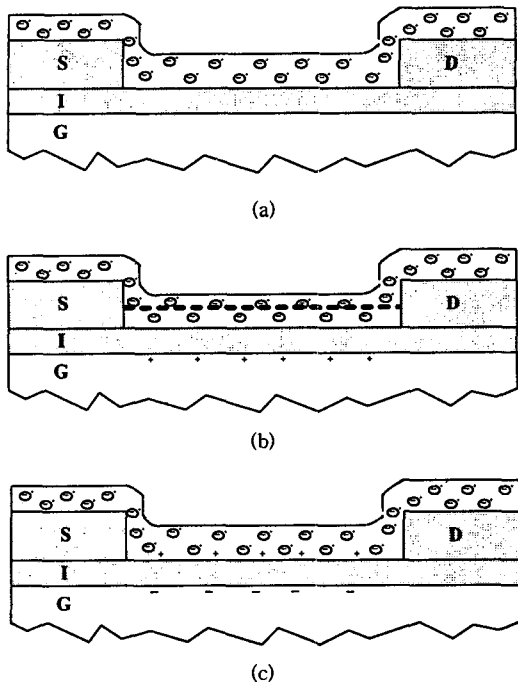


그림 1. 유기물을 이용한 전계효과 트랜지스터의 구조와 작동 원리. (a) $V_G = V_S = V_D = 0$, (b) $V_S = V_D = 0, V_G > 0$, (c) $V_S = V_D = 0, V_G < 0$.

절연막 때문에 전류가 흐르지 않고 반도체에 전기장(전계)이 걸리므로 전계효과 트랜지스터라는 이름이 붙여졌다. S와 D는 각각 소스(source)와 드레인(drain)이다. 소자에 흐르는 전류는 이 소스와 드레인 사이에 전압을 인가하여 얻게 되며, 이때 소스는 항상 접지되어 있어 전자나 홀의 공급처 역할을 하게 된다. 그 위에 표시된 층이 유기 반도체 층이다. 일반적으로 유기물 반도체는 p-형이므로 전도 전하는 양성인 정공이다.

유기물 전계효과 트랜지스터(OFET)의 소자 구조는 근본적으로는 비정질이나 다결정 실리콘을 사용한 트랜지스터와 같지만 유기물 위에는 소스와 드레인을 lithography를 이용하여 제작하기가 용이하지 않기 때문에 절연체 위에 소스와 드레인을 제작한 후 유기물을 진공 증착이나 스핀 코팅 방법으로 형성한다.

소자의 동작 원리를 살펴보면 우선 **그림 1(a)**에 나타낸 바와 같이 소스와 드레인, 게이트에 전압을 인가하지 않으면 유기물 반도체 내의 전하들은 모두 반도체 내에 고루 퍼져 있게 된다. 이때 소스와 드레인 사이에 전압을 인가하여 전류를 흘리면 낮은

전압하에서는 전압에 비례하는 전류가 흐르게 된다. 여기에 만약 **그림 1(b)**처럼 게이트에 양의 전압을 인가하면 이 인가된 전압에 의한 전기장에 의하여 양의 전하인 정공들은 모두 위로 밀려 올라가게 된다. 따라서 절연체에 가까운 부분은 전도 전하가 없는 층이 생기게 되고, 이 층을 공핍층(depletion layer)이라 부른다. 이런 상황에서 소스와 드레인에 전압을 인가하면 전도 가능한 전하 운반자가 줄어들어 있기 때문에 (a) 상황에 비해 더 낮은 전류의 양이 흐르게 될 것이다. 반대로 (c)처럼 게이트에 음의 전압을 인가하면 이 인가된 전압에 의한 전기장의 효과로 유기물과 절연체 사이에 양의 전하가 유도되고, 따라서 절연체와 가까운 부분에 전하의 양이 많은 층이 형성된다. 이 층을 축적층(accumulation layer)이라 부른다. 이때 소스와 드레인에 전압을 인가하여 전류를 측정하면 (a) 상황에서보다 더 많은 전류를 흘릴 수 있게 되는 것이다. 따라서 소스와 드레인 사이에 전압을 인가한 상태에서 게이트에 양의 전압과 음의 전압을 교대로 인가하여 줌으로써 소스와 드레인 사이에 흐르는 전류의 양을 제어할 수 있는 것이다. 이 전류량의 비를 점멸비(on/off ratio)라 한다. 우수한 성능의 트랜지스터 소자가 되기 위해서는 이 점멸비가 커야 한다.

3. 유기물 트랜지스터의 발전 과정

유기 반도체를 이용한 전계효과 트랜지스터는 영국의 Cavendish Lab., 미국의 IBM 연구소, Bell Lab., 펜실바니아 주립대학, 네덜란드의 필립스, 프랑스의 CNRS 그리고 일본의 미쯔비시 등 연구소와 기업들을 중심으로 활발한 연구가 진행 중에 있다. 1986년 일본의 Mitsubishi Electric Corporation의 Tsumura 등은 유기물 반도체 polythiophene을 이용한 최초의 전계효과 트랜지스터를 제작하였다.¹ 이 전에도 몇몇 연구 그룹에서 유기 색소나² polyacetylene³ 같은 전도성 고분자를 이용하여 전계효과 트랜지스터를 제작하였으나 소자의 점멸비가 극히 낮았다. Tsumura는 SiO_2 절연 막 위에 약 1,400 Å의 polythiophene 막을 형성시킨 전계효과 트랜지스터로부터 점멸비 $10^2 \sim 10^3$ 정도의 값을 얻었다. 이 값은 현재 요구되고 있는 $10^6 \sim 10^8$ 정도에 비하면 아주 작은 값이지만 이전의 연구 결과들에 비교할 때 괄목한 발전이었다. 이러한 발전을 가져올 수 있었

던 가장 중요한 요인은 전계효과 트랜지스터의 특성에 맞는 유기 반도체 물질의 선택에 있었다. 트랜지스터의 접합비가 크기 위해서는 유기 반도체의 전하 운반자 농도가 낮고 이동도가 큰 물질을 선택해야 한다.

1988년 영국 Cavendish Lab.의 Burroughes는 polyacetylene을 이용한 전계효과 트랜지스터를 제작하였는데, 접합비 약 10^5 , 전하 이동도 $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 를 얻었다.⁴ 1989년 CNRS의 Garnier 등은 진공 증착한 α -sexithiophene 박막을 이용하여 전계효과 트랜지스터를 제작하였는데, 적절한 열처리 공정을 통해 전하의 이동도를 약 $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 정도까지 향상시킬 수 있었다.⁵ Garnier 그룹의 이러한 노력은 계속되어 1990년, 플라스틱 기판 위에 전계효과 트랜지스터를 제작하기에 이른다.⁶ 플라스틱 기판으로는 기계적 강도가 좋은 poly(parabanic acid) resin (PPA)을 사용하였고, 유전체로는 유전율이 10 kHz에서 18.5로 큰 cyanoethylpullulan(CYEPL)을 사용하였다. 그 위에 유기 반도체로 α -sexithiophene 박막을 형성하였다. 소스, 드레인 그리고 게이트는 모두 금 박막으로 제작하였다. 이러한 방법으로 전하 이동도를 $4.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 까지 얻어 실용성 있는 소자에 근접한 결과를 얻었다. 그러나 CYEPL은 유전율은 크지만 수분에 민감하고 절연성이 떨어져 전도도가 10^{-12} S/cm 정도로 SiO_2 에 비해 수 백배에서 수 만배 이상 큰 것이 문제점으로 지적되고 있다. α -Sexithiophene을 유기물 반도체로 사용하였을 경우 사용한 유전체에 따른 전하 이동도를 표 1에¹ 나타내었다.

1995년에 필립스의 Brown 등은 pentacene 박막을 SiN_x 위에 형성하였다.⁸ 그들은 가용성인 전구체(precursor)를 스펀코팅하여 박막을 형성한 후 140°C 진공 상태에서 열처리하는 방법으로 pentacene 박막을 제조하였다. 결과는 전하 이동도 $9 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 접합비 약 10^5 이었고 이전의 결과에 비해 성능이 크게 향상된 바는 없지만 이후 pentacene을 이용한 전계효과 트랜지스터 연구에 많은 영향을 주었다. Pentacene을 이용한 트랜지스터 연구는 1997년 이후 펜실바니아 주립대학의 Jackson 그룹에 의해 비약적 발전을 보이게 된다.⁹⁻¹² Pentacene은 진공 증착법으로 올렸으며, 기판 온도를 pentacene 증착시 미리 올려 결정화를 유도하였다. 결정화를 쉽게 하기 위해 유전체인 SiO_2 위에 2차원으로 잘 정렬되는 성질이 있는 octadecyltrichlorosilane(OTS)를

표 1. α -Sexithiophene과 함께 사용한 유전체의 종류와 소자의 전하 이동도.

유전체	유전율 (10 KHz)	전하이동도 (cm^2/Vs)
SiO_2	3.9	2.1×10^{-4}
CYEPL	18.5	3.4×10^{-2}
PVA	7.8	9.3×10^{-4}
PVC	4.6	weak
PMMA	3.5	weak
Pst	2.6	weak

LB막으로 올려 사용하였다. 또한 기판 온도를 높였을 때 pentacene이 증착되지 않는 영역을 보완하기 위해 90°C 에서 1차, 27°C 에서 2차 증착을 하여 다층 구조를 형성하였다. 이러한 노력에 힘입어 전하 이동도는 $1.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 접합비는 약 10^8 으로 비정질 실리콘 (a-Si:H) 전계효과 트랜지스터의 성능에 상응하는 성능을 실현할 수 있었다. 여러 연구 기관에서 사용한 유기물 반도체의 종류와 유전체의 종류, 그리고 이들을 사용한 소자의 성능을 표 2에 요약하였다.

4. 연구 과제

현재 전계효과 트랜지스터에 가장 많이 쓰이고 있는 것은 반도체 재료는 비정질 실리콘이다. 그리고 전술한 바와 같이 유기물을 이용한 전계효과 트랜지스터는 성능면에서 비정질 실리콘을 이용한 소자와 대등한 수준에 근접해있다. 그러나, 최근 비정질 실리콘대신 성능이 더 우수한 다결정 실리콘(polysilicon)을 이용한 소자, 더 나아가서 단결정 실리콘(single crystal silicon) 또는 단결정성 실리콘(single crystal-like silicon)을 이용한 소자의 개발이 급속도로 진행 중에 있다. 그러나 다결정 실리콘을 만들기 위해서는 우선 비정질 실리콘 박막을 제작해야 하고, 이를 여러 가지 방법을 동원해서 다결정화해야 한다. 이때 소자의 온도를 350°C 이상 높여야 하며 excimer laser를 이용하는 경우에도 비정질 실리콘 제작시 자동적으로 포함되는 수소 등을 제거하기 위해 더 많은 공정이 포함되어야 하고, 넓은 면적을 다결정화하기 위해 시간이 많이 걸리는 등 공정상의 어려움과 원가 절상의 요인이 있다. 이러한 문제점을 유기물을 이용한 소자에서는 일시에 해결할 수 있다는 매력적인 장점이 있다. 우선 유기 트랜지스터는 상온, 혹은 최소한 100°C 이하의 저

표 2. 연구 기관별 전계효과 트랜지스터에 사용한 유기물 반도체와 유전체의 종류와 성능.

기 관	유기물 반도체	유전체	성 능	
			전하이동도(cm^2/Vs)	점결률
Mitsubishi	Polythiophene ¹	SiO ₂	10 ⁻⁵	10 ²
	Polypyrrole ¹⁷	SiO ₂	6.9×10 ⁻⁵	
	PTV ¹⁸	SiO ₂	0.22	10 ⁵
Cavendish Lab.	Polyacetylene ⁴	SiO ₂	10 ⁻⁴	
	P3HT ¹⁹	SiO ₂	0.1	10 ⁶
CNRS	ScPc ₂ /NiPc ²⁰	SiO ₂		
	Alpha-sexithiophene ^{6, 7}	SiO ₂	10 ⁻³	
Technical Res. Center of Finland	Poly(3-hexylthiophene) ²¹	See table 1	10 ⁻⁵	
	Quinqueithiophene(QT) ²¹	SiO ₂	10 ⁻⁶	
U. of Durham	(N-octadecylpyridinium)-Ni(dmit) ₂ ²²	SiO ₂	0.22	
Bell Lab.	α -sexithiophene ²³	SiO ₂	3×10 ⁻²	10 ⁶
	CuPc ²⁴	SiO ₂	0.02	4×10 ⁶
Philips	Pentacene ⁸	SiN _x	9×10 ⁻³	10 ⁵
		SiO ₂	3.8×10 ⁻²	
Penn. State U.	Pentacene ⁹⁻¹²	SiO ₂	1.5	10 ⁸
IBM	Pentacene ²⁵	BZT	0.3	

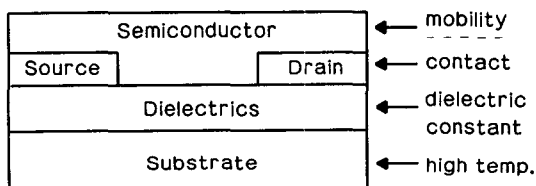


그림 2. 유기물을 이용한 전계효과 트랜지스터 각 부분별 주요 연구 과제.

온에서 제작할 수 있다. 그리고 스펀코팅이나 진공 증착 등 단일 공정으로 가능하다. 이러한 많은 장점을 살리기 위해서는 최소한 아래의 몇 가지 문제점들은 해결되어야 한다고 생각한다. 그림 2에 전계효과 트랜지스터의 각 부분별 연구 과제에 관하여 간략히 요약하였다.

4.1 유기 반도체 재료

유기 반도체 물질이 트랜지스터에 사용되기 위해서 가져야 할 가장 필수적인 요소는 소자의 성능을 나타내기에 충분히 높은 전하 이동도를 가져야 한다는 것이다. 현재까지 전하 이동도가 가장 큰 물질은 약 1.5 cm^2/Vs 정도의 값을 가지는 pentacene으로 알려져 있으며 이 값은 비정질 실리콘과는 대등하지만 다결정 실리콘에 비해서는 매우 낮은 값이다. 유기 반도체 소재가 무기 반도체에 비해 전하의 이동도가 낮은 것은 일반적인 사항이며 아직 확실히 밝

혀진 것은 아니지만 전하가 유기물에 주입되면 포논(phonon)과 결합하여 폴라론(polaron)을 형성하는데 이것이 이동도를 낮추는 원인일 것으로 알려져 있다. 즉 전하가 움직이기 위해서는 주위의 분자들을 어느 정도 찌그러뜨려야 전하가 움직일 수 있으므로 전류를 흘리려 해도 쉽게 움직이지 않는 것이다. 따라서, 구조적으로 공액 결합을 유지하면서 폴라론은 잘 형성하지 않는 유기 반도체의 설계와 합성이 가능해지면 이동도 향상에 도움을 줄 수 있을 것이다.

또한 pentacene의 경우 저항 요소가 분자간의 전하 이동에 있다고 생각이 되기 때문에 분자간의 inter-molecular 전도가 쉽게 일어나도록 분자를 설계하는 것이 필요하다. 이러한 연구의 일환으로 증착시 기판의 온도를 올리거나⁹⁻¹² self-assembly 방법¹³을 이용하여 유기 분자의 결정화를 유도하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 고분자의 경우 분자의 배열이 일정하지 못하여 전하 이동도가 매우 낮으므로 고분자가 입체 규칙성을 갖도록 설계하는 것이 필요하다.

전하의 이동도를 높이는 또 한가지의 방법으로 도핑을 들 수 있다.¹⁴ 필립스의 Brown 등은 유기물 반도체 tetrathiofulvalene(TTF)와 2,3-dichloro-5,6-dicyano-1,4-benzoquinone(DDQ)에 각각 tetracyanoquinidimethane(TCNQ)와 poly(β -dodecyl-

oxy(-*a,a'*-*d'*terthienyl) (polyDOT₃)을 여러 물 비로 도핑하여 전도도를 조사하였다.³⁶ 그 결과 도핑 양이 증가할수록 전하의 이동도는 증가하였지만 이동도의 증가보다 전도도의 증가가 더 커져서 점멸비는 감소하는 것으로 나타나 바른 방법이 아니라는 것이 밝혀졌다. 따라서, 도핑에 따른 전하의 농도보다 이동도가 더 크게 증가하는 분자 시스템이 개발된다면 전계효과 트랜지스터뿐 아니라 공액 유기물을 이용한 모든 소자의 연구에 획기적 발전을 가져올 수 있을 것으로 생각된다.

또 한가지의 문제는 물질의 순도에 관한 것이다. 이동도와 점멸률 모두 순도에 크게 좌우되는데, 단 분자 유기물의 경우 상대적으로 순도를 높이는 것이 용이하지만 고분자의 경우 이것이 쉽지가 않다. 따라서 불순물을 최소화 함유하는 공액 고분자의 개발 혹은 정제 기술의 개발이 절실하다. 그리고 *p*-공액 성 유기 반도체는 대부분 *p*-형 반도체인데 다양한 종류의 소자의 개발을 위해서는 *n*-형 반도체의^{15,16} 폭넓은 개발이 필요하다. 대표적인 트랜지스터용 유기물의 구조를 **그림 3**에 도시하였다.

4.2 소스와 드레인

일반적으로 소스와 드레인으로 금을 쓰고 있다. 진공 열증착으로 쉽게 증착할 수 있으면서도 일함수(work function)가 높아 *p*-형인 유기물 반도체에 쉽게 홀을 주입할 수 있기 때문이다. 그러나 금 박막 위에 고분자 박막을 스펀코팅으로 박막을 형성하는 경우 고분자 막과 금 박막 사이의 접착력이 좋지 못하여 부가적 저항으로 작용하여 소자의 특성을 나쁘게 할 수 있다. 따라서 전도 특성이 좋고, 일함수가 높고, 유기물과 접착력이 우수한 재료와 공정의 개발이 필요하다.

4.3 유전체

지금까지 소자에 가장 많이 쓰여진 유전체는 SiO₂이다. 이는 절연율이 높고 기판으로 가장 많이 쓰여진 Si 위에 쉽게 형성할 수 있기 때문으로 생각된다. 그러나 비정질 구조이고, 유전율이 3.9 정도로 높지 않기 때문에 최적의 유전체라고 보기는 어렵다. 연구의 추세로 볼 때 플라스틱 기판의 사용이 예상되는데 이를 고려한다면 다음의 몇 가지 조건을 갖추어야 한다고 생각된다. 우선 낮은 온도에서 박막 형성이 가능해야 한다. 플라스틱 기판의 특성상 유리전이 온도가 낮아(PET의 경우 120 °C 부근) 온도를 높이기 힘들기 때문이다. 그리고 유전율이 커야 한다. 전계효과 트랜지스터의 동작 원리를 보

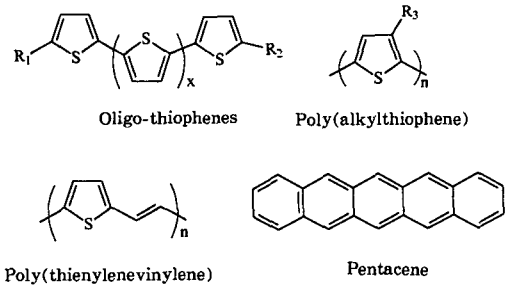


그림 3. 대표적인 트랜지스터용 유기 반도체 물질 (R_1, R_2 =hydrogen, methyl 혹은 n-hexyl group, R_3 =n-hexyl group, $x=1\sim6$).

면 게이트에 전압을 인가하여 이 인가된 전압으로 인해 유전체 양단에 전하들이 모이고, 이 전하들로 인한 전기장(전계)이 축적층과 공핍층을 만드는 것이다. 따라서 유전율이 크다는 것은 낮은 전압에서도 많은 전하를 유전체 양단에 모을 수 있다는 뜻이고, 따라서 낮은 전압에서 소자를 구동할 수 있다는 뜻이다. 유전율과 더불어 절연 특성이 좋아야 한다. 누설 전류는 유전체 양단에 모인 전하를 중화시키는 작용을 하므로 장시간 전하를 유지하지 못하고 자주 refresh 해 주어야 하는 구동상 문제를 야기하게 된다. 또한 열팽창율이 기판과 같거나 비슷해야 한다. 소자의 특성상 전류를 흘리기 때문에 필연적으로 열이 발생한다. 이러한 열에 잘 견디기 위해서는 열팽창율이 비슷한 소재가 가장 이상적인 것이다.

4.4 기판

지금까지 기판으로는 *n*-형 실리콘을 주로 사용하였기 때문에 기판에는 게이트 전극의 기능이 포함되어 있다. 만약 다른 기판을 사용한다면 게이트 전극이 기판 위에 더해져야 할 것이다. 전술한 바와 같이 앞으로 트랜지스터의 연구 추세가 구부릴 수 있는 시스템의 개발로 진행될 경우 플라스틱 소재가 기판으로 사용될 것이다. 이러한 목적을 위해서는 우선 유리전이 온도가 높은 내열성 플라스틱 기판의 개발이 필요하며 표면 거칠기가 좋고 기계적 강도가 커야 할 것이다. 또한 디스플레이의 구동 회로로 사용되기 위해서는 기판의 투과도가 좋아야 할 것이다.

5. 앞으로의 전망

유기물 반도체의 전망을 한마디로 말하기는 어렵다. 현재 다결정 실리콘을 이용한 전계효과 트랜지

스터가 수 많은 연구자들에 의해 급격히 발전해 가고 있는 시점에서, 상대적으로 적은 수의 연구자들이 유기물의 장점을 살리고자 노력하고 있다. 이러한 노력이 헛되지 않기 위해서는 위에서 언급한 여러 가지 문제점들을 빠른 시간 내에 극복해야 할 것이며 유기 트랜지스터의 장점을 살릴 수 있는 새로운 응용분야를 개발해야 할 것이다. 가까운 장래에 박형의 카드에 대용량의 정보를 저장할 수 있는 스마트카드 그리고 플라스틱 LCD 및 유기 EL 디스플레이의 능동 구동회로 등에 사용될 것이 예상되고 있다. 최근 Bell Lab.에서는 프린팅 방법으로 플라스틱 기판 위에 트랜지스터를 구현하여 대량 생산의 가능성을 보여주었고 전자 잉크와 전자 종이의 구동회로로 유기 트랜지스터를 이용하는 연구에 박차를 가하고 있어 이 분야 연구의 발전 가능성을 시사했다. 앞으로 충분한 성능을 낼 수 있는 유기 반도체가 개발되어 진다면 기존 반도체 시장에 일대 혁신을 가져올 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. A. Tsumura, H. Koezuka, and T. Ando, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 1210 (1986).
2. K. Kudo, M. Yamashina, and T. Moriizumi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23**, L30 (1984).
3. F. Ebisawa, T. Kurokawa, and S. Nara, *J. Appl. Phys.*, **54**, 3255 (1983).
4. J. H. Burroughes, C. A. Jones, and R. H. Friend, *Nature*, **335**, 137 (1988).
5. G. Horowitz, D. Fichou, X. Peng, Z. Xu, and F. Garnier, *Solid State Comm.*, **72**, 381 (1989).
6. F. Garnier, G. Horowitz, X. Peng, and D. Fichou, *Adv. Mater.*, **2**, 592 (1990).
7. X. Peng, G. Horowitz, D. Fichou, and F. Garnier, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2013 (1990).
8. A. R. Brown, A. Pomp, D. M. de Leeuw, D. B. M. Klaassen, E. E. Havinga, P. Herwig, and K. Mulen, *J. Appl. Phys.*, **79**, 2136 (1995).
9. D. J. Gundlach, Y. Y. Lin, T. N. Jackson, S. F. Nelson, and D. G. Schlom, *IEEE Electron Device Letts.*, **18**, 87 (1997).
10. Y. Y. Lin, D. J. Gundlach, S. F. Nelson, and T. N. Jackson, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **44**, 1325 (1997).
11. T. N. Jackson, Y. Y. Lin, D. J. Gundlach, and H. Klauk, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **4**, 100 (1998).
12. H. Klauk, D. J. Gundlach, J. A. Nichols, and T. N. Jackson, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **46**, 1258 (1999).
13. F. Garnier, A. Yassar, R. Hajlaoui, G. Horowitz, F. Deffre, B. Servet, S. Rice, and P. Alnot, *J. Am. Chem. Soc.*, **115**, 8716 (1993).
14. A. R. Brown, D. W. de Leeuw, E. E. Havinga, and A. Pomp, *Syn. Met.*, **68**, 65 (1994).
15. G. Guillaud, M. A. Sadoun, and M. Maitrot, *Chem. Phys. Lett.*, **167**, 503 (1990).
16. Y. Y. Lin, A. Dodabalapur, R. Sarpeshkar, Z. Bao, W. Li, K. Balswin, V. R. Raju, and H. E. Katz, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2714 (1999).
17. H. Koezuka and A. Tsumura, *Synthetic Metals*, **28**, C753 (1989).
18. H. Fuchigami, A. Tsumura, and H. Koezuka, *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1372 (1993).
19. H. Sirringhaus, N. Tessler, and R. H. Friend, *Science*, **280**, 1741 (1998).
20. C. Clarisse, M. T. Riou, M. Gauneau, and M. Le Contellec, *Electronic Lett.*, **24**, 674 (1988).
21. J. Paloheimo, P. Kuivalainen, H. Stubb, E. Vuorimaa, and P. Yli-Lahti, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1157 (1990).
22. C. Pearson, J. E. Gibson, A. J. Moore, M. R. Bryce, and M. C. Petty, *Electronics Letters*, **29**, 1377 (1993).
23. A. Dodabalapur, L. Torsi, and H. E. Katz, *Science*, **268**, 270 (1995).
24. Z. Bao, A. J. Lovinger, and A. Dodabalapur, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 3066 (1996).
25. C. D. Dimitrakopoulos, S. Purushothaman, J. Kymissis, A. Callegari, and J. M. Shaw, *Science*, **283**, 822 (1999).