



Organic Thin Film Transistor의 기술 현황



최종선
홍익대
전자전기공학부 교수

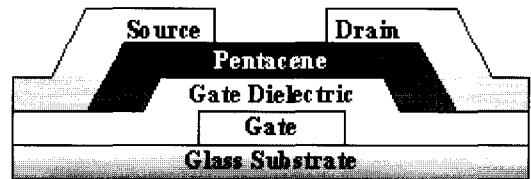


박재훈
홍익대
전기정보제어과 박사과정

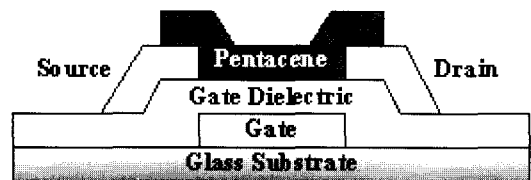
1. 서론

유기 박막 트랜지스터 (Organic Thin Film Transistor: OTFT)에 관한 연구는 1980년 이후부터 시작되었으나 근래에 들어 전 세계적으로 본격적인 연구가 진행되고 있다. 이는 OTFT가 넓은 면적 위에 소자를 제작할 경우, 낮은 공정 온도를 필요로 하는 경우, 또한 구부림이 가능해야 하는 경우, 특히 저가 공정이 필요한 경우 등에 가장 적합한 것으로 생각되고 있기 때문이다. 이러한 OTFT는 미래의 정보표시 장치의 필수적인 요소들과 집적화가 매우 용이하다는 장점을 가지고 있다. 소재의 특성상 유기 발광 다이오드에 쓰이는 발광 유기물과 같은 유기 반도체가 OTFT의 제작에 사용 가능하므로 증착 공정, 물리적·화학적 성질이 매우 유사하다. 또한 둘 다 상온 및 저온(100℃ 이하) 공정이 가능하므로 OTFT는 플라스틱 기반의 유기 발광 다이오드 제작에 적용될 수 있다. 같은 이유로 플라스틱 기판을 이용한 액정 표시 소자, 전자 종이, 그리고 스마트 카드에도 직접적으로 응용이 가능할 것으로 기대되고 있다. 현재 OTFT의 전계 효과 이동도가 p-type의 경우 비정질 실리콘 TFT의 특성을 능가하는 것으로 보고되고 있으며, n-type의 경우 약 0.1 cm²/Vs까지 보고되었고 전류 점멸비는

10⁶ 수준에 도달하고 있다. 그러나 전유기 디스플레이에 적용할 수 있기 위해서는 전계효과 이동도, 전류 점멸비, 문턱 전압의 균일도 등의 기초적인 소자의 성능 향상뿐만 아니라, OTFT의 구조 설계 및 제조 공정의 확립, OTFT 특성 평가 기술 등이 필요하다. 그림 1은 pentacene을 유기 반도체 물질로 사용한 OTFT의 구조를 나타낸다.



(a) top-contact OTFT



(b) bottom-contact OTFT

그림 1. Source/drain 전극의 위치네 따른 OTFT 구조

2. 본론

[외국 연구 사례]

OTFT의 연구에 있어서 선도적인 그룹으로 미국 Penn. State University의 Jackson 그룹, Bell Lab., 영국의 R. Friend 그룹, 프랑스 Garnier 교수팀이 있다. 다음 그림 2와 표 1에 연도별로 OTFT의 성장의 발전을 정리하였다[1~26]. 1980년대 후반부터 폴리티오펜 계열 고분자를 많이 연구하였으나 전계 효과 이동도가

$\sim 10^{-3} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 수준에 지나지 않았다. 그런데 1990년대 부터 유기 발광 소자 연구가 활성화 되면서 재료의 순도 향상, 유기 박막 제조 방법의 발전에 따른 morphology 개선 등의 결과로 전계 효과 이동도 및 특성이 많이 향상되었고, 저분자 재료의 경우 진공증착방법으로 만든 소자에서 전계효과 $\sim 3 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 수준에 도달하고 있다. 아직도 고분자를 이용한 소자의 이동도가 $\sim 10^{-2} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 수준이어서 재료 및 박막의 morphology 등에 많은 개선이 필요하다 하겠다.

표 1. 연도별 OTFT의 성능 발전

연도	전계효과 이동도 (cm^2/Vs)	물질	참고문헌
1986	10^{-5}	polythiophene	2
1988	10^{-4}	polyacetylene	3
	10^{-3}	phthalocyanine	4
	10^{-4}	poly(3-hexylthiophene)	5
	10^{-3}	poly(3-alkylthiophene)	6
1989	10^{-3}	α -w-hexathiophene	7
	0.027	α -w-hexathiophene	8
1992	0.002	pentacene	1
	0.05	α -w-dihexyl-hexathiophene	9
1993	0.22	polythienylenevinylene	10
	0.06	α -w-dihexyl-hexathiophene	11
1994	0.03	α -w-hexathiophene	12
	0.038	pentacene	13
	0.3	C_{60}	14
1996	0.02	phthalocyanine	15
	0.045	poly(3-hexylthiophene)	16
	0.13	α -w-dihexyl-hexathiophene	17
	0.62	pentacene	18
1997	1.5	pentacene	19
	0.05	Bis(dithienothiophene)	20
1998	0.1	poly(3-hexylthiophene)	21
	0.23	α -w-dihexyl-quaterthiophene	22
	0.15	Dihexyl-anthradithiophene	23
2000	0.1	α -w-dihexyl-quinquethiophene	24
2002	3.0	pentacene	25

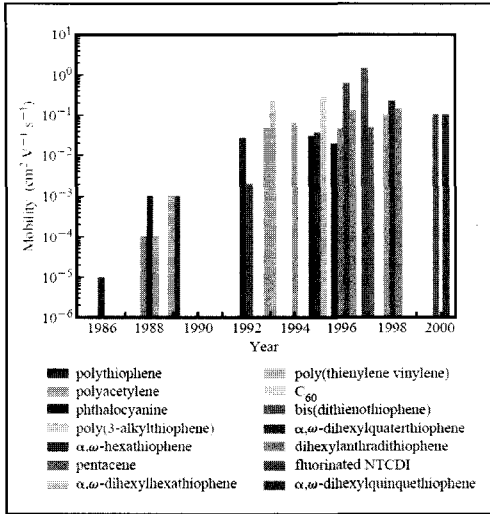


그림 2. 고분자 및 저분자 재료를 사용한 OTFT의 전계효과 이동도 특성 분석

[국내의 경우]

국내에서는 ETRI, 홍익대, 동아대 등에서 다년간 기초 연구를 해오고 있다. 현재 주로 저분자 재료인 pentacene을 이용한 OTFT 연구를 하고 있고, 전계 효과 이동도 수준은 선진국 수준인 약 1 cm²/Vs까지 발표하고 있다. 그런데 아직 n-type OTFT 특성에 대해 괄목할 만한 보고는 발표되지 않고 있다. 그리고 지금까지는 단위 소자 수준의 결과가 주를 이루었으나 OTFT를 구동 소자로 사용한 유기 발광 디스플레이에 대한 발표도 최근 눈여겨 볼만 하다.

[조사연구개발에 대한 평가]

현재까지 문헌에 발표된 전계효과 이동도는 p-type의 경우 비정질 실리콘 TFT 수준인 약 1 cm²/Vs까지, n-type의 경우 이것보다 훨씬 낮은 약 0.01 cm²/V이다. Bell Lab.의 Schon 등이 perylene 단결정을 이용해서 약 5.5 cm²/Vs인 n-type 이동도를 발표했으나 이 결과는 잘못된 것으로 밝혀졌다. 스위칭 소자로서 전류 점멸비는 10⁶ 수준에 도달하고 있다. 아직 이동도 측면에서 많은 개선이 필요하고, 특히 n-type의 경우 이동도 뿐만 아니라 물질의 안정성도 개선되어야 할 것이다.

[국내외 기술 수준의 비교]

다음 표2에 국내 연구 기관의 OTFT의 성능 수준을 OTFT 연구 분야에서 가장 우수한 결과를 발표한 Penn. State Univ.의 Jackson 그룹의 연구와 비교했다. 국내에서는 저분자 재료인 pentacene을 이용한 OTT 연구를 하고 있고, 전계 효과 이동도 수준이 선진국 수준인 약 1 cm²/Vs까지 발표하고 있다. 그러나 선진국과 비교할 때 아직 n-type OTFT 물질과 소자에 대한 연구가 미흡한 실정이며, 고분자에 대한 연구는 많이 뒤쳐져 있다. 따라서 선진국과 비교할 때 다른 핵심 세부 기술 중에서 OTFT 활성층 물질 개발이 많이 뒤쳐져 있으므로 이에 대한 연구가 활성화되어야 한다. 그리고, 지금까지는 단위 소자 수준에서의 결과가 발표되고 있는데 OTFT array 제조 공정 개발도 중점적으로 추진해야 한다.

표 2.

성능	국외 연구기관 (Pen. State Univ.)	국내 연구기관 (홍익대, 동아대, ETRI)
mobility (cm ² /Vs)	0.1~1	0.1~0.5
On/Off ratio	10 ⁵ ~ 10 ⁸	10 ³ ~ 10 ⁶
Threshold voltage (V)	-10~10	-3
Leakage Current (A)	~10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ ~ 10 ⁻⁹

표 3. 외국의 공정 단위별 주요 기술 사항

기술	세부 기술	기술수준
유기 박막 재료 개발	저분자 활성화층	pentacene 등 p형 : $\mu \sim 3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ F16Cu-PC 등 n형 : $\mu \sim 0.02 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	고분자 활성화층	polythiophene 계열 : $\mu \sim 0.01 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
	절연층	Polyimide, PMMA 등 고분자 절연체 개발중
유기 TFT 설계 및 단위공정 기술	유기 TFT 설계	유기 TFT 단위소자 설계 및 평가
	유기 박막 제조 공정	진공증착, 스핀코팅, 잉크젯 프린팅, soft lithography 등 다양한 기술 개발
	유기 박막 형상화 공정	shadow mask, ink-jet, soft lithography 등 사용 1~10 μm 이하 수준의 pattern
	표면처리	Soft-assembly, OTS 등 표면처리
유기 TFT array 기술	유기 TFT array 설계기술	Philips : 15bit 펄스 코드 발생기 유기물 집적회로 제작
	유기 TFT 대면적 공정 기술	pentacene 진공 증착, polymer ink-jet printing

[국내의 공정 단위별 주요 기술 사항]

국내의 연구는 ETRI와 홍익대, 동아대 등을 중심으로 연구가 수행되어 왔고, 최근 OTFT의 성능이 개선되어 능동 유기 발광 다이오드에 활용 가능성이 높아짐에 따라 일부 기업체에서 연구를 시작하고 있다. 대부분의 연구가 진공증착 방식을 채택하고 있으며, 선

진국 대비 약 70%의 기술수준을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 우리나라는 우수한 반도체공정 기술을 확보하고 있기 때문에 관련 연구자들이 협력체계를 구축하여 조직적인 연구를 수행하면 조만간 선진국 수준에 도달할 것으로 예상된다.

표 4. 국내의 공정 단위별 주요 기술 사항

기술	세부 기술	기술수준
유기 박막 재료 개발	저분자 활성화층	pentacene 등 p형 : $\mu \sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ n형 : 없음
	고분자 활성화층	polythiophene 계열 : 초기 단계
	절연층	Polyimide, PMMA 등 고분자 절연체 개발중
유기 TFT 설계 및 단위공정 기술	유기 TFT 설계	유기 TFT 단위소자 설계 및 평가
	유기 박막 제조 공정	진공증착, 스핀코팅
	유기 박막 형상화 공정	shadow mask, ink-jet ~10 μm 이하 수준의 pattern
	표면처리	Soft-assembly, OTS 등 표면처리
유기 TFT array 기술	유기 TFT array 설계기술	없음
	유기 TFT 대면적 공정 기술	pentacene 진공 증착



[개발되었거나 개발 중인 새로운 기술]

현재 세계적으로 진행되고 있는 OTFT의 연구는 크게 진공증착 방식과 프린트 방식 두 가지로 분류할 수 있다. 진공증착 방식은 기존의 반도체 공정과의 호환성이 좋고 소자의 성능이 a-si TFT 수준에 도달하는 등 실용화 가능성이 높다. 프린트 방식은 공정의 간편함과 저가격의 장점이 있지만 소자의 성능이 아직 진공증착 방식과 비교하여 부족하고, 또한 균일한 프린팅을 위한 ink, 유기용액의 점도 조절 등 실용화를 위하여 해결해야 할 문제들이 산재해 있다. 현재 세계적으로 soft lithography (stamping 등), self-assembly를 이용한 표면 특성 향상 기술, 유기물을 gate insulator로 사용하는 기술 등이 개발되고 있다.

- 기존 공정방법

가) 기술적인 평가

유기 박막을 제작하는데 있어서 현재 진공증착 방식을 가장 많이 사용하는데 이는 기존의 반도체 공정과의 호환성이 좋고 소자의 성능이 a-si TFT 수준에 도달하는 등 실용화 가능성이 높다. 그러나 균일한 대면적 유기 TFT array를 제작하는 것은 쉽지 않을 것으로 예상된다.

잉크젯 프린팅 방식은 공정의 간편함과 저가격의 장점이 있지만 소자의 성능이 아직 진공증착 방식과 비교하여 부족하고, 또한 균일한 프린팅을 위한 ink, 유기용액의 점도 조절 등 실용화를 위하여 해결해야 할 문제들이 산재해 있다.

나) 경제적인 평가

유기 TFT 제조는 기존의 실리콘 TFT보다 제조 공정 등이 간단하므로 제조 원가가 낮고, 투자 규모도 기존 반도체 fab에 비해 월등히 낮을 것으로 예상된다.

다) 산업기술에 미치는 파급효과 분석

유기 TFT는 제작 공정이 간단하고, 비용이 저렴하며, 충격에 의해 깨지지 않고, 구부러지거나 접을 수 있기 때문에 미래의 정보 전자 산업에 필수적인 요소가 될 것으로 예상되고 있다. 유기 트랜지스터는 유기 반도체의 특성상 전하 이동도가 낮아 Si 등이 쓰이는 빠른 속도를 필요로 하는 소자에는 쓰일 수 없으나, 넓은 면적, 낮은 공정 온도, 저가 공정, 또한 구부림이 가능해야 하는 경우에 유용하게 쓰일 수 있다. 또한 유기

반도체 트랜지스터는 발광 유기물과 같은 유기물 반도체이므로 증착 방법이 같고, 물리적, 화학적 성질이 비슷하여 같은 공정 조건을 유지하면서 소자를 제작할 수 있다. 또한 둘 다 상온 및 저온 (섭씨 100도 이하) 공정이 가능하므로 유기 트랜지스터를 이용한 플라스틱 기반의 유기 EL 디스플레이의 제작이 가능하다. 같은 맥락에서 플라스틱을 기판으로 하여 구부림이 가능한 액정 표시 소자를 구현하는 곳에서도 사용이 가능하다. 또한 최근 큰 관심을 불러일으키고 있는 전자종이는 전류 구동이 아니라 전압 구동이고, 높은 전하 이동도나 빠른 스위칭 속도를 필요로 하는 표시 소자가 아닐 뿐 아니라 구부림이 가능한 대 면적에 적용되는 기술이므로 유기 트랜지스터가 가장 적합하다. 또한 현재 반도체 공정을 통한 실리콘 기판으로 사용되고 있는 스마트 카드용 마이크로 프로세서도 유기 트랜지스터를 적용할 경우 실리콘 프로세서와 플라스틱 base 등의 접합 등에 따른 경비를 절감할 수 있어 사용이 기대되어 진다. 더 나아가서 입는 컴퓨터의 다양한 부분에 응용이 가능할 것으로 생각된다.

(4) 주요 관련기술의 검토

국내에서는 삼성 SDI, LG전자, 네스 디스플레이 등의 기업에서 유기 EL 디스플레이에 대한 연구 개발 및 양산 투자를 하고 있다. 이미 휴대폰용 디스플레이를 생산하고 있다. 유기 TFT는 유기 EL 기술과 상당히 유사하므로 본 연구개발로 개발된 유기 TFT 기술을 실제 생산에 응용할 때 필요한 관련 인프라가 잘 구축되어 있다. 특히 최근 OTFT의 성능이 개선되어 AMOLED에 활용 가능성이 높아짐에 따라 일부 기업체에서 개발 연구를 시작하고 있기 때문에 본 연구 결과의 산업화 전망이 아주 밝다고 볼 수 있다. 그리고 우리나라는 우수한 반도체 공정 기술을 확보하고 있기 때문에 관련 연구자들이 협력체계를 구축하여 조직적인 연구를 수행하면 조만간 선진국 수준에 도달할 것으로 예상된다.

[원재료에 대한 검토 분석]

1) 원재료의 국내·외 수급현황 (생산, 수요, 수출입량 등) 및 그 전망

유기 TFT에 사용되는 유기 반도체는 국외 업체로

Aldrich, Syntech, American Dye Systems, Covion, H. W Sands 등에서 공급하고 있고, 국내에서는 썬파인 캠 등에서 일부 합성하고 있다. 아직은 연구용으로 공급하므로 가격이 높으나 (예 : pentacene 1g 600,000~700,000원 정도), 산업화되어 대량 공급이 되면 가격이 상당히 낮아질 것이다.

2) 원재료에 관련된 국내·외 기술의 현황분석 및 전망
유기 TFT에 사용되는 유기 반도체는 저분자로는 pentacene, tetracene 등의 polyacene 계열과 copper phthalocyanine(Cu-PC), perylene, C₆₀ 등이 사용되고 있고, 고분자 물질로는 polythiophene 계열이 주로 사용되고 있는데 저분자보다는 박막의 disorder가 심하므로 mobility가 낮다. 현재 p-type의 경우 mobility가 a-Si 수준인 naphthalenetetracyclic diimide 계열의 물질에서 0.1 cm²/Vs, fluorinated copperphthalocyanine의 경우 10-2 cm²/Vs까지 보고되고 있다. 또한 n-type 유기물은 산화 potential이 낮아서 산화가 잘 되고 불안정한 것이 많다. 따라서 mobility가 크고 안정적인 n-type 유기 반도체를 개발해야 한다.

유기 절연체로는 polyimide, polymethyl methacrylate (PMMA), polyvinylephenol 등을 사용하고 있는데, 높은 유전상수 및 높은 유전항복강도를 가지는 유기 절연막의 개발이 필요하다.

전극 재료로서 Al 등 금속을 일반적으로 사용하고 있으나 온도에 약한 유기막에 금속을 증착할 때 발생할 수 있는 문제점을 극복하기 위하여 유기물 금속을 사용하는 것이 바람직하며, 최근 전도성 고분자인 PEDOT, polyaniline 등을 사용하여 유기 TFT를 개발하고 있고, 전도성의 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있어서 향후 완전 유기물 트랜지스터의 실현이 가능할 것이다.

참고 문헌

[1] C. D. Dimitrakopoulos and D. J. Mascaró, IBM J. Res. & Dev., Vol. 45, p. 11, 2001
 [2] A. Tsumura et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 49, p. 1210, 1986.
 [3] J. H. Burroughes et al., Nature, Vol. 335, p. 137, 1988.

[4] C. Clarisse et al., Electron. Lett., Vol. 24, p. 674, 1988.
 [5] A. Assadi et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 53, p. 195, 1988.
 [6] J. Paloheimo et al., "Lower dimensional systems and molecular devices", Proceedings of NATO ASI, Spetses, Greece, R. M. Mertzger, Ed., Plenum Press, New York, 1989.
 [7] G. Horowitz et al., Solid State Commun., Vol. 72, p. 381, 1989.
 [8] G. Horowitz et al., Synth. Met., Vol. 51, p. 419, 1992.
 [9] F. Garnier et al., J. Amer. Chem. Soc., Vol. 115, p. 8716, 1993.
 [10] H. Fuchigami et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 63, p. 1372, 1993.
 [11] F. Garnier et al., Science, Vol. 265, p. 1684, 1994.
 [12] A. Dodabalapur et al., Science, Vol. 268, p. 270, 1995.
 [13] C. D. Dimitrakopoulos et al., J. Appl. Phys., Vol. 80, p. 2501, 1996.
 [14] R. C. Haddon et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 67, p. 121, 1995.
 [15] Z. Bao et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 69, p. 3066, 1996.
 [16] Z. Bao et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 69, p. 4108, 1996.
 [17] C. D. Dimitrakopoulos et al., Synth. Met., Vol. 92, p. 47, 1998.
 [18] Y. Y. Lin et al., 54th Annual Device Research Conference Digest, 1996, p.80.
 [19] Y. Y. Lin et al., IEEE Electron Device Lett., Vol. 18, p. 606, 1997.
 [20] H. Sirringhaus et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 71, p. 2871, 1997.
 [21] H. Sirringhaus et al., Science, Vol. 280, p. 1741, 1998.
 [22] H. E. Katz et al, Chem. Mater., Vol. 10, p. 457, 1998.



- [23] J. G. Laquindanum et al., J. Amer. Chem. Soc., Vol. 120, p. 664, 1998.
- [24] H. E. Katz et al., Nature, Vol. 404, p. 478, 2000.
- [25] H. Klauk et al., J. Appl. Phys., Vol. 92, p. 5259, 2002.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 최종선

◆ 학력

- 1983년 서울대 금속공학과 공학사
- 1987년 Univ. of California, San Diego
전기전자공학과 공학석사
- 1992년 Purdue Univ. 전기전자공학과 공학박사

◆ 경력

- 1989년 - 1992년 Purdue Univ. 연구조교
- 1992년 - 1994년 현대전자산업주식회사 차장
(TFT생산기술팀장)
- 1994년 - 현재 홍익대 전자전기공학부 교수

성명 : 박재훈

◆ 학력

- 2000년 홍익대 전자전기제어공학군 공학사
- 2002년 홍익대 전기정보제어과 공학석사
- 2002년 - 2004년 홍익대 전기정보제어과 박사과정

