

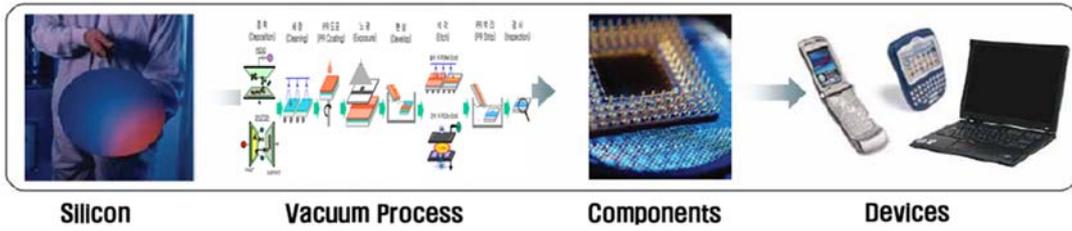
제 1 장 OTFT 소개 및 유기절연체 필요성

김윤호

최근 유연전자소자 기술은 곡면형(curved) 소자를 넘어서서, 구겨지거나 늘어날 수 있는 유연/연신 (flexible/stretchable) 소자 개발로 발전하고 있다. 유연전자소자 구현 위해서는 유연 박막트랜지스터 (thin-film transistor, TFT) 기술이 필수적이며 이미 폭넓은 관련 기술이 개발되었거나 활발히 연구되는 단계에 있다. 박막트랜지스터에는 전도체, 반도체, 절연체 등의 다양한 전기적 특성을 가지는 소재들이 사용된다. 이 중에서도 기판, 게이트 절연체, 보호층 등에 사용되는 절연체 소재는 전도체와 반도체와는 달리 소자의 전체 면적에 적용되기 때문에, 절연체 소재 자체의 유연성과 절연성이 점점 더 중요시되고 있다. 그러나 절연체 소재는 소자 구동의 안정성과 매우 밀접한 관련이 있고, 다양한 반도체 물질과의 상호작용이 중요하기 때문에 기존에 사용되고 있는 SiO₂ 또는 SiN_x 기반의 무기절연체를 대체하는 것이 매우 부담스러운 상황이다. 따라서, 대부분의 유연전자소자를 연구하는 연구그룹에서는 절연체 소재 보다는 전도체 또는 반도체를 개발하는 연구를 활발하게 진행 중이다. 최근 기존 실리콘 반도체에서만 구현할 수 있는 높은 전하이동도 (>10 cm²/vs)를 가지는 고성능 유기반도체 소재 및 성능을 개선시킬 수 있는 획기적인 공정기술들이 보고되고 있다. 하지만, 실제적인 유연소자를 구현하기 위해서는 유기반도체뿐만 아니라 유연절연체 개발 또한 반드시 필요하다. 특히, 앞으로 다가올 웨어러블형 IoT용 센서 및 유연소자 구현을 위해서는, 저가/대면적 코팅이 가능하고 높은 절연특성을 가지는 고분자 유연절연체 소재 및 공정기술 개발이 시급한 상황이다. 최근들어 유연성, 공정성 등의 장점을 가지고 있는 고분자 유연절연체에 관한 연구가 활발히 주목을 받고 있다.

이에, 본 사업에서는 유연전자소자용 유연절연체의 요구특성과 지금까지 개발된 고분자 기반 유연절연체 및 차세대 유연절연체의 연구방향에 대해서 고찰해보고자 한다. 또한 관련 분야의 핵심 연구그룹과 학회에 대한 정보도 함께 제공할 계획이다.

: Glass or Si Substrate Based Electronics, Batch Type Production, Vacuum Process



: Flexible Substrate Based Electronics, Continuous Type Production, Solution Process

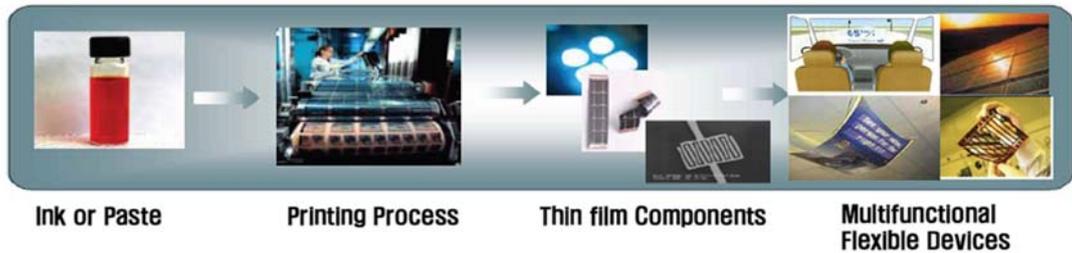


그림 1 유연 및 인쇄전자소자의 개발

1. OTFT 기본구조

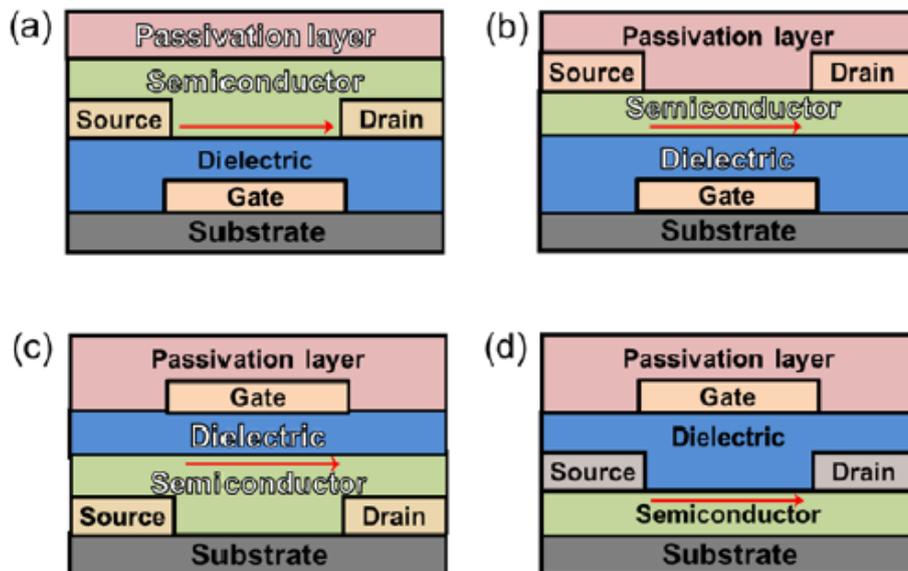


그림 1. 대표적인 OTFT 소자 구조. (a) bottom-gate/bottom-contact (coplanar), (b) bottom-gate/top-contact (staggered), (c) top-gate/bottom-contact (staggered), (d) top-

gate/top-contact (coplanar),

OTFT는 기판, 전극 (게이트, 소스, 드레인), 유기반도체, 절연체, 봉지막 등으로 구성되어 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 전극 (S, D, G) 배치에 따라 크게 4가지 (TCBG, BCBG, BCBG, TCTG) 구조로 분류할 수 있으며 각 구조 마다 장단점과 특징이 있다. 으나, 본 자료에서는 자세하게 다루지 않는다. 하지만 가장 소자 구조와 관계없이 전하이동이 발생하는 채널은 반도체와 절연체의 계면에 형성된다. 따라서, 유기반도체 소재 자체의 전하이동도 개선뿐 만 아니라 절연체와 유기반도체 사이의 계면특성에 대한 연구도 반드시 진행되어야만 한다. 특히 Flexible OTFT를 구현하기 위해서는 기존에 사용하던 SiO_x 계열의 무기절연체가 아닌 유기절연체가 요구된다. 이 때 사용되는 유기절연체의 물성 (특히, 표면구조 및 표면에너지)은 물질마다 다르기 때문에 신규 유기절연체와 유기반도체 간의 상호작용 및 표면특성 연구의 중요성이 대두되고 있다. 또한, 높은 OTFT의 소자 성능을 이끌어내기 위하여, 높은 유전율과 전기절연특성을 가진 신규 절연소재에 대한 요구가 이어지고 있는 상황이다.

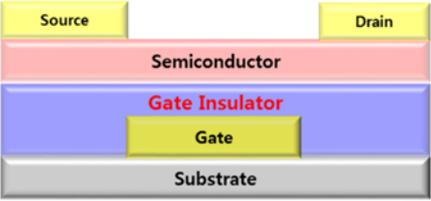
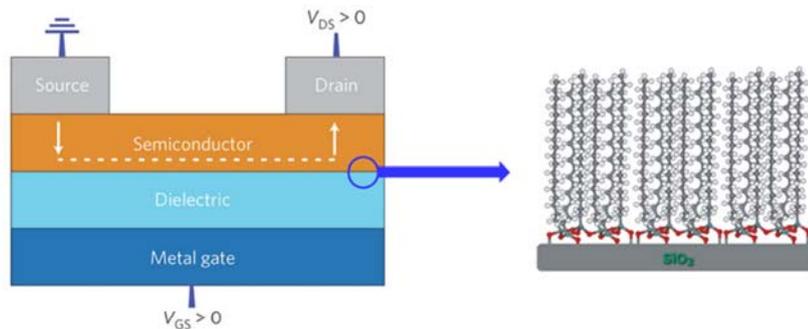
<p>▪ TFT structure & TFT materials</p>  <ul style="list-style-type: none"> - Electrodes (source, drain & gate): metals, ITO, ... - Semiconductors: Si, organics, metal oxides, ... - Gate insulators: SiO₂, SiN_x, polyimides, CYTOP, crosslinked PVP, ... <p>▪ Required properties of gate insulators</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dielectric properties - Electrical insulating properties - Surface properties (affinity to semiconductors) 	<p>▪ Flexible TFTs</p> 
--	--

그림 2. OTFT 구성 요소 및 Flexible TFT 기술

2. 유기절연체의 필요성 및 요구특성

Gate용 절연체 물질은 반도체 채널 및 전도성 전극 물질과 함께, 고성능 OTFT를 구현하기 위한 핵심 구성 요소 중 하나이다. 특히, Gate용 절연체는 디바이스의 동작 전압을 낮추고 Gate 누설 전류를 최소화하는 측면에서 결정적인 역할을 하며, 일반적으로 무기 및 유기 물질로 분류된다. AlO_x , ZrO_x , HfO_x , TiO_x 와 같은 이산화 규소와 다양한 금속 산화물 (MO_x)로 주로 구성된 무기 기반의 절연체는 높은 정전 용량, 높은 절연 내력 및 낮은 Gate 누설 전류를 나타낸다. 그러나, 일반적으로 값비싼 진공 증착 및 고온 열처리 공정을 필요로 한다. 이러한 이유 때문에 상대적으로 낮은 용융 온도 또는 유리 전이 온도 (일반적으로 $<200^\circ\text{C}$)를 나타내는 유기 반도체 및 플라스틱 기판 위에 무기 절연막을 제작하는 것은 쉽지 않다. 특히, 두꺼운 무기 필름의 대부분은 연질 플라스틱 기재 상에 부착 되기에는 너무 부서지기 쉽다. 주로 다양한 고분자로 구성된 유기절연체 재료는 다양한 용매를 이용한 용액공정이 가능하기 때문에 대면적 및 인쇄공정 등을 이용한 유연 전자소자 제작이 가능한 장점이 있다. 또한, 유기반도체와의 적절한 호환성 측면에서도 몇 가지 장점을 가지고 있다. 그러나 무기 절연체에 비해 유전율이 낮고 절연특성이 떨어지는 문제점이 있다. 용액 공정을 통해 제조된 고분자 박막은 많은 핀홀을 포함할 가능성이 높으며 따라서 상당량의 전류가 누설되기 때문이다. 또한 절연특성을 높이기 위해 두께를 높이면 캐패시턴스가 작아져 OTFT 구동 측면에서 매우 불리하다는 단점이 있다. 본 연구자료에서는 앞서 유기절연체의 약점을 보완할 수 있는 신규 소재와 공정에 대한 최근 연구동향에 대해 광범위하게 소개하고자 하며, 관련 내용에 대해 상세하게 기술되어 있는 문헌 및 관련 연구그룹들을 소개할 예정이다.



- When a voltage V_g is applied between source and gate, majority carriers accumulate **at the insulator-semiconductor interface**, leading to the formation of a conduction channel between source and drain

Surface (interface) properties of gate insulators, as well as dielectric and insulating properties, are very important!

그림 3. 유기절연체와 유기반도체 사이의 표면특성 제어의 중요성 모식도

References

- [1] S. Yoo, Y. H. Kim, J.-W. Ka, Y. S. Kim, M. H. Yi, K. -S. Jang, *Org. Elec.*, 2015, 23, 213
- [2] S. Kim, T. Ha, S. Yoo, J.-W. Ka, J. Kim, J. C. Won, D. H. Choi, K. -S. Jang, Y. H. Kim, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017, 19, 15521
- [3] H. Moon, H. Seong, W. C. Shin, W.-T. Park, M. Kim, S. Lee, J. H. Bong, Y.-Y. Noh, B. J. Cho, S. Yoo, S. G. Im, *Nat. Mater.*, 2015, 14, 628-635
- [4] B. N. Yason, S.-J. Kang, G. D. Tabi, A. Perinot, M. Caironi, A. Facchetti, Y.-Y. Noh, *Adv. Mater.*, 2017 (DOI: 10.1002/adma.201605685)
- [5] Y.-L. Rao, A. Chortos, R. Pfattner, F. Lissel, Y.-C. Chiu, V. Feig, J. Xu, T. Kurosawa, X. Gu, C. Wang, M. He, J. W. Chung, Z. Bao, *J. Am. Chem. Soc.*, 2016, 138, 6020
- [6] J. Ko, Y. J. Kim, Y. S. Kim, *ACS Appl. Mater. Inter.*, 2016, 8, 23854
- [7] W. Huang, K. Besar, Y. Zhang, S. Yang, G. Wiedman, Y. Liu, W. Guo, J. Song, K. Hemker, K. Hristova, I. J. Kyriassis, H. E. Katz, *Adv. Func. Mater.*, 2015, 25, 3745
- [8] L. Xing, Q. Li, G. Zhang, X. Zhang, F. Liu, L. Liu, Y. Huang, Q. Wang, *Adv. Func. Mater.*, 2016, 26, 3524