

## Trend &amp; Technology 2

유기물과 산화물을 이용한  
하이브리드 박막 트랜지스터

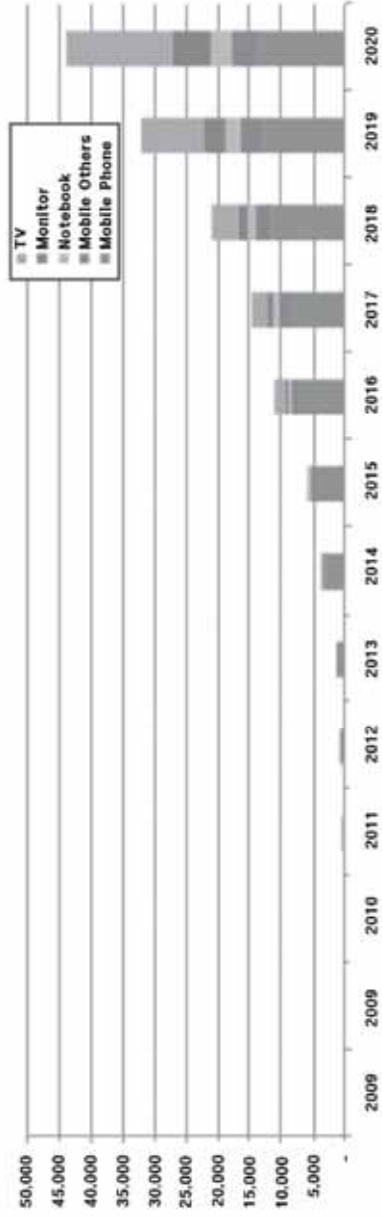
금 고려대학교 전기전자공학학부  
박정호, 배한식, 정명호, 주병권



## 1. 서론

전자 산업의 발전은 실리콘 반도체 소자의 발전과 그 패를 같이 하고 있다. 진공관 트랜지스터에서 실리콘 트랜지스터로의 전환과 이로 인한 집적회로의 실현은 전자 산업의 급격한 발달을 이뤄 냈다. 현대에 이르러 우리를 둘러싼 수많은 전자기기의 종류는 헤아릴 수 없이 많이 젖고 현 세대에서 인간이 살아가는 데 있어 전자기기란 이를 빼고는 삶이 영위되지 않는 수준에까지 이르렀다. 근자에 이르러서는 수많은 전자기기와 통신의 융합으로 유비쿼터스 환경이 구축되고 이런 환경을 좀더 편리하게 이용하기 위해 기존의 전자기기를 뛰어넘어 공간적, 시각적 제약을 뛰어넘을 수 있는 플렉시블 전자기기에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 플렉시블 전자기기를 현실화 시키기 위해서는 기존의 실리콘 반도체

를 통해서는 불가능하기에 이를 대체할 수 있는 재료와 기기 및 소자의 개발이 가장 시급하게 되었다. 이를 위해 세계 각국의 학계와 산업체, 정부 기관, 각종 연구소 등은 플렉시블 관련 화문 또는 전자기기에 대한 연구 및 개발이 대규모 자본의 투입과 함께 전격적이고도 빠르게 진행되고 있으며 차세대 전자 산업을 주도할 수 있는 성패를 좌우할 수 있을 정도로 중요시 되고 있다. 이번 현실에서 플렉시블 전자기기 시장은 급속도로 팽창하고 관련 연구도 비약적인 수준으로 도약하고 있다. 이 중 가장 선도적이고 대표적인 산업이 바로 디스플레이 산업으로 (그림 1)에 투명 플렉시블 디스플레이 시



출처 : Displaybank, '플렉시블 디스플레이 기술동향 및 시장전망 (2008~2020)' 리포트

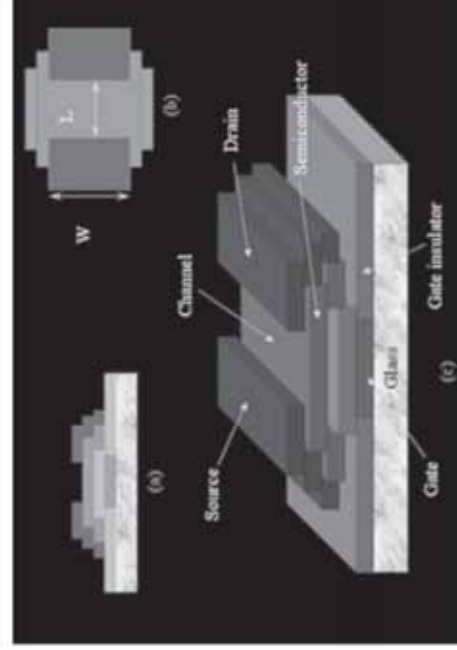
〈그림 1〉 투명 플렉시블 디스플레이 시장의 성장 전망

장의 성장 전망을 그래프로 나타냈다.

투명 디스플레이의 빠른 성장이 예상되면서 현재 학계, 산업계 모두 단순한 평판 디스플레이를 넘어선 투명 플렉시블 디스플레이를 만들기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존의 평판 디스플레이의 백플레인에서 사용되던 재료인 a-Si, LTPS 등이 공정이나 물성 측면에 있어서 플렉시블 디바이스에 적용하기에는 한계가 있기에 이를 대체할 수 있는 여러 소자에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며 그 중 대표적인 것이 산화물 반도체와 유기물 반도체이다. 이 두 반도체의 소자 및 디바이스에 관한 연구는 전세계에 걸쳐 광범위하게 진행되고 있으며 분고는 두 반도체 소자의 특징 및 기술 동향과 두 종류의 박막 트랜지스터를 결합해 만든 Hybrid 박막 트랜지스터에 대해 설명하고자 한다.

## 2. 유기물 박막 트랜지스터

박막 트랜지스터(FET, Thin Film Transistor)는 전계 효과 트랜지스터(FET, Field Effect Transistor)의 한 종류로 기존 전자 부품에 주로 사용되는 메모리나 중앙 처리 장치(CPU, Central Process Unit) 같은 집적 회로(이하 IC, Integrated Circuit) 등이 실리콘 반도체 도핑 공정을 통해



〈그림 2〉 기본적인 Bottom Gate Top Contact 박막 트랜지스터 구조

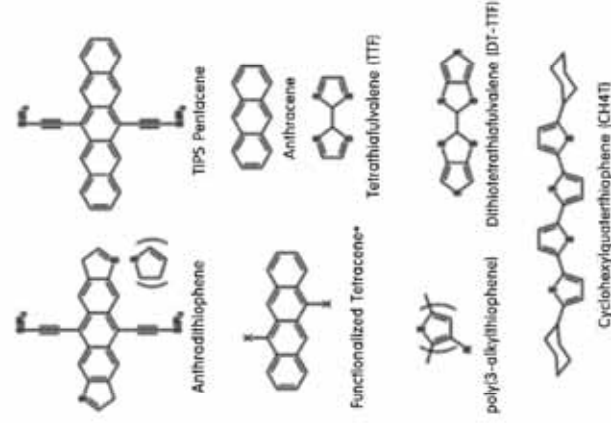
만들어 지는 것과는 다르게 어떤 특정한 기판 위에 게이트, 소스드레인, 활성층, 유전체층 등이 차례로 적층되어 만들어 진다. 주로 디스플레이의 백플레인이나 RFID 등 두께가 얇은 전자기기에 적용된다. 〈그림 2〉의 구조도는 Bottom Gate Top Contact 구조를 나타낸 그림이다.

일반적으로 플렉시블 전자기기의 경우 상기와 같은 박막 트랜지스터가 유연한 기판 위에 실장되어 만들어진 전자기기를 말하며 유연성이 좋은 만큼 공간이나 시각적 제약이 작고 이로 인해 사용의 편리성과 휴대성이 증대된 기기이다. 플렉시블 박막 트랜지스터는 현재 디스플레이 관련 백플레인, 전자 종이, RFID Tag 등에 부분적으로 적

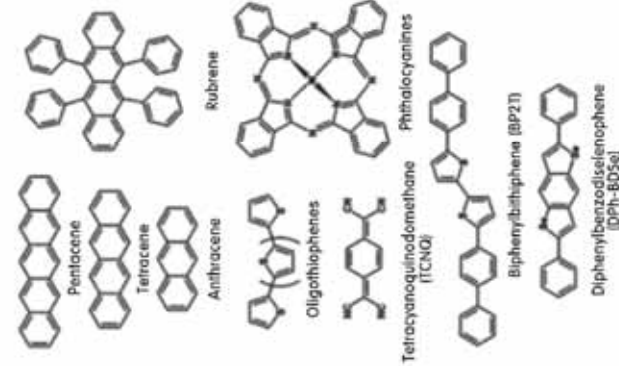
〈표 1〉 박막 반도체 재료 특징

TFT Performance	LTPS	a-Si	Organic	Oxide
Uniformity	Low	Good	Various	Good
Mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	50~150	< 1	< 10	1~80
Stability	High	Normal	Various	Various
Cost	High	High	Low	Low
Process Temperature	> 250°C	~ 250°C	RT ~ 250°C	RT ~ 250°C
Substrate	Glass, Metal	Glass, Metal, Plastic	Glass, Metal, Plastic	Glass, Metal, Plastic

## Solution-grown



## Vapor-grown



출처 : Materials today 10, 20, 2007

〈그림 3〉 유기물 박막 트랜지스터에 가장 많이 쓰이는 유기물

용되거나 응용에 관한 연구가 이뤄 지고 있으며 그 종류는 여러 가지가 있으나 대표적인 재료는 신화물 반도체와 유기물 반도체이다. 두 소자로 제작된 박막 트랜지스터의 특징을 기존 박막 트랜지스터 재료와 비교해 〈표 1〉과 같이 나타내었다. 일반적인 금속이나 유리 기판의 딱딱한 기판 위에 실장되는 실리콘 소자 대비 플렉시블 반도체 소자는 비록 전계 효과 이동도 측면에서는 우수하지 못하지만도 공정 조건이

나 비용 측면에서 많은 장점이 존재하며 특히 투명하게 제작이 가능하며 플렉시블한 기판 위에 형성 가능하다는 장점이 있다. 이중 유기물 박막 트랜지스터는 기존에 주로 절연체로 사용되던 유기물을 반도체 활성층으로 사용하고 있으며 유기물인 만큼 다른 소자에 비해 재료의 비용이 저렴할 뿐 아니라 유연성이 특히 뛰어나다. 유기물 박막 트랜지스터에 대한 연구는 최초 1983년 폴리아세틸렌을 사용한 유기물



박막 트랜지스터가 연구된 이래로 현재까지 꾸준히 연구가 진행되고 있으며 현재는 당시에 비해 전계 효과 이 동도나 기타 특성 측면에서 비약적인 발전을 거듭하였 다. <그림 3>에는 유기물 박막 트랜지스터에 가장 많이 사용되는 유기물 재료를 나타내었다.

유기 박막 트랜지스터의 장점은 활성층뿐 아니라 PEDOT:PSS 같은 유기 재료를 전극으로 사용해 완벽한 유기물 기반의 투명 플렉시블 소자를 개발할 수 있으며 재 료의 종류에 따라 용액 공정을 통해 제작이 가능하고 상온 공정에서 짧은 시간에 제작이 가능하기에 공정 비용과 재 료비용이 저렴하다는 점이다. 물론 용액 공정을 적용할 경 우 그렇지 않을 때보다 전계 효과 이동도가 다소 떨어지는 단점이 있지만 앞으로 재료나 공정의 개선에 따라 극복될 수 있는 여지가 크다. 이 같은 수많은 장점에도 불구하고 유기물 박막 트랜지스터는 많은 단점도 존재하는데 첫째 로 유기물의 특성상 수분이나 산소 등에 취약해 외부 요인 에 의한 특성의 변화가 크고 기본적으로 수명이 짧아 장기간 사용시 특성이 떨어져 안정적인 소자 제작이 힘들다는 점이다. 또한 P-Type 물질의 종류와 특성에 비해 N-Type 물질의 특성 떨어지고 종류가 부족하기 때문에 앞으 로 유기물 박막 트랜지스터 소자 수명 및 장기 신뢰성을 높이는 연구와 N-type 물질을 찾는 연구가 더욱 필요한



출처 : Sony

<그림 4> 유기물 박막 트랜지스터를 백플레인으로 사용한 플렉시블 OLED

실정이다. 이와 같은 연구와 더불어 박막 트랜지스터 특성 면에 있어서 더 높은 전계 효과 이동도와 전류 전압 비, 낮은 동작 전압에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

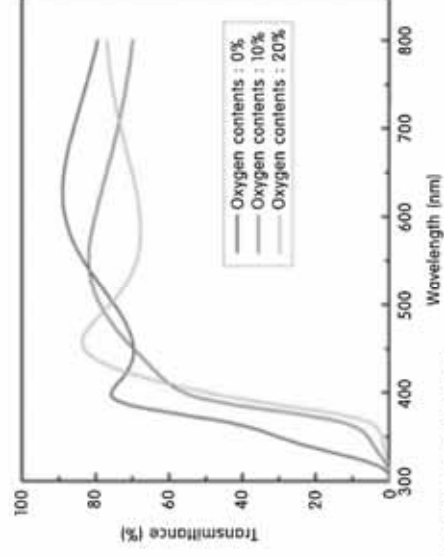
### 3. 산화물 박막 트랜지스터

산화물 박막 트랜지스터는 활성층 채널에 IGZO (Indium Gallium Zinc Oxide), ZnO(Zinc Oxide), TiO(Titanium Oxide) 등의 산화물을 사용한 박막 트랜지 스터다. 일반적으로 반도체 공정에서 접연막으로 사용되 는 산화물의 반도체 특성을 이용하여 제작되며 유기물 박 막 트랜지스터와 마찬가지로 투명하고 플렉시블한 특성을 갖는다. <그림 5>은 본 연구실에서 유리기판 위에 제작 한 ZnO 필름과 그 투과도 특성을 나타낸다.

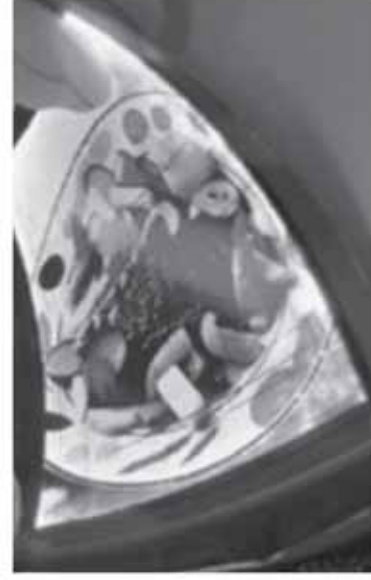
산화물 박막 트랜지스터는 유기 박막 트랜지스터와 마찬가지로 소자 재료에 따라 용액 공정의 적용이 가능하고 산화물의 특성상 산소, 수분 등에 대한 반응성이 떨어져 유기물 박막 트랜지스터 대비 안정성이 뛰어나며 현시점 에서 전계 효과 이동도가 유기물( $\sim 10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) 대비 훨씬 커서( $\sim 80 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ) 디스플레이 백플레인으로서의 적용 가 능성은 유기물 박막 트랜지스터 비해 오히려 높다고 할 수 있다. 다만 산화물 박막 트랜지스터의 산업화를 위해 서는 안정적인 뛰어난 성능의 박막 트랜지스터를 높은 생 산성으로 구현하는 방법 및 그 특성에 대한 연구가 진행 되어야 하며 유기물이나 실리콘 재료 대비 고가인 산화물 의 재료비를 절감할 수 있는 방안이 필요하다. 이를 위해 값싸고 안정적인 산화물 재료를 찾고 그에 맞는 최적의 공정 조건을 찾는 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 산화물 반도체의 경우 유기물 반도체와는 반대로 N-Type 박막 트랜지스터 재료의 특성과 종류가 P-Type 박막 트랜지 스터의 그것에 비해 우수하기에 P-Type 재료를 찾거나 현재 있는 P-Type 재료의 특성을 향상시키는 연구가 필 요하다.

### 4. Hybrid IC

Hybrid IC란 유기물 박막 트랜지스터와 비유기를 박막



〈그림 5〉 ZnO의 투과도와 산화물 반도체의 밴드갭



출처 : Samsung electronics, LG Display

〈그림 6〉 산화물 반도체를 이용한 디스플레이

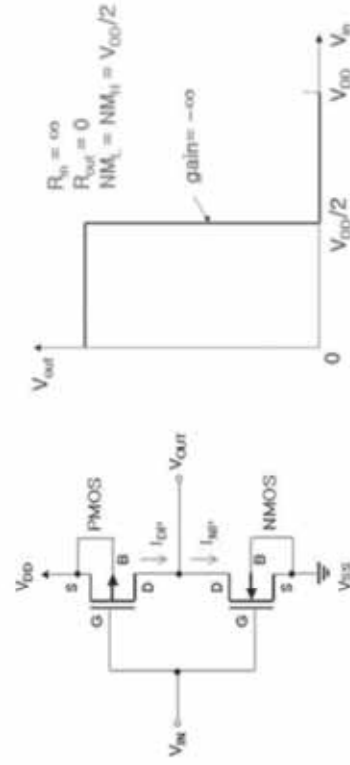


Hybrid Thin Film Transistor Inverter

〈그림 7〉 Hybrid 박막 트랜지스터 인버터



유기물과 산화물을 이용한 하이브리드 박막 트랜지스터



〈그림 8〉 인버터 회로와 그 동작

〈표 2〉 인버터 동작 영역에 따른 NMOS와 PMOS의 상태

Region	NMOS	PMOS
A	Off	Linear
B	Saturation	Linear
C	Saturation	Saturation
D	Linear	Saturation
E	Linear	Off

트랜지스터를 결합해 만든 집적회로를 말한다. 앞에서 설명한 바와 같이 유기물의 경우 재료 종류와 특성이 P-Type에 치우쳐 있고 산화물의 경우는 반대로 특성이 N-Type에 치우쳐 있다. 양자 모두 투명 플렉시블 디스플레이 백플레인용 박막 트랜지스터로 사용할 경우 P-Type 혹은 N-Type의 박막 트랜지스터 하나로 구동이 가능하지만 RFD Tag이나 기타 IC 제작을 위해서는 N-Type과 P-Type 박막 트랜지스터의 사용이 꼭 필요하다. 그러나



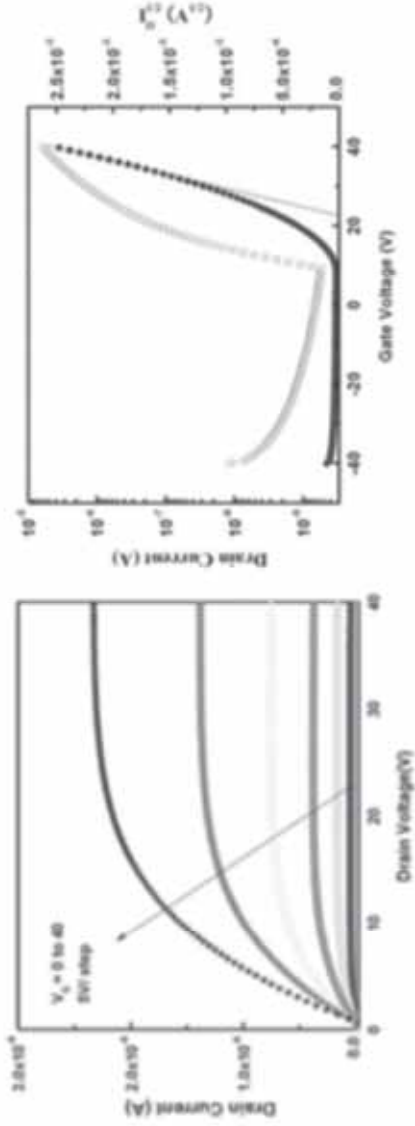
〈그림 9〉 신호를 박막 트랜지스터



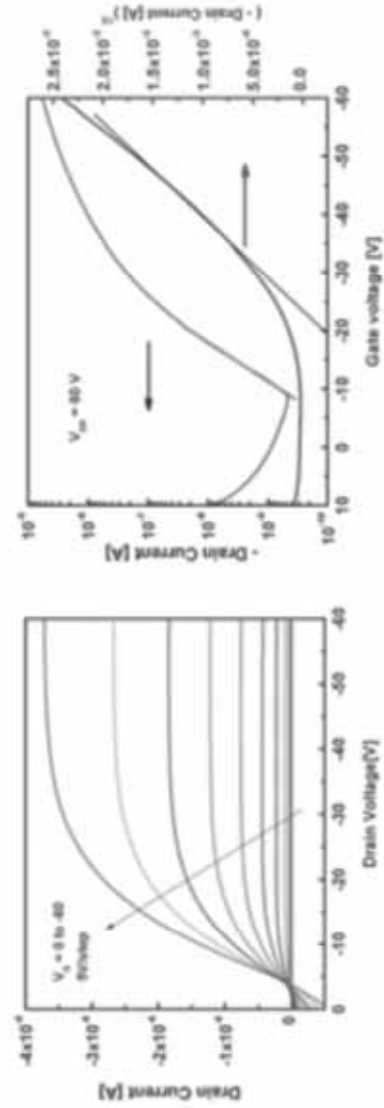
〈그림 10〉 유기물 박막 트랜지스터



〈그림 11〉 Hybrid 박막 트랜지스터

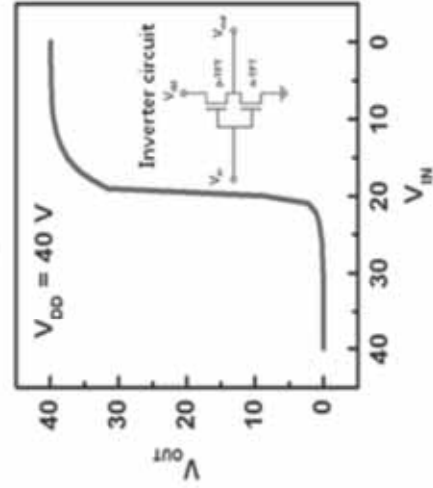


〈그림 12〉 인버터의 N-Type 박막 트랜지스터 Output, Transfer 곡선

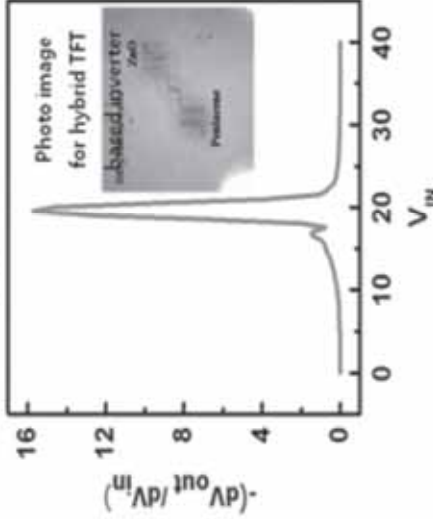


〈그림 13〉 인버터의 P-Type 박막 트랜지스터 Output, Transfer 곡선

The static voltage transfer characteristics

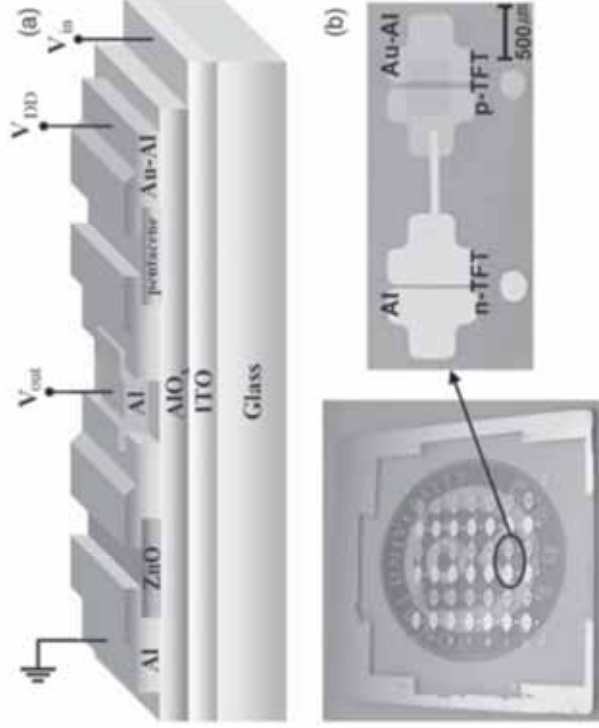


Voltage gain characteristics



〈그림 14〉 인버터 측정 결과





출처 : Appl. Phys. Lett. 90, 173511, 2007

〈그림 15〉 ZnO-Pentacene Hybrid Inverter

유기물 박막 트랜지스터나 신화물 박막 트랜지스터 두 소자 모두 단독으로는 N-Type 박막 트랜지스터와 P-Type 박막 트랜지스터를 모두 완벽하게 특성을 구현하기 어렵기 때문에 안정적인 회로 구성이 어렵다. 물론 단일 계열 소자로 구성이 되었을 때 공정이 단순해 진다거나 비용이 줄어들 수 있겠지만 IC의 특성은 단일 박막 트랜지스터 성능에 비해 떨어지게 된다. 이의 대안으로 N-Type의 신화물 박막 트랜지스터와 P-Type의 유기물을 결합한 Hybrid 방식을 통해 우리가 원하는 IC의 특성을 구현할 수 있다. 〈그림 7〉은 기본적인 IC 구성 단위 중 하나인 인버터를 Hybrid 박막 트랜지스터로 구성한 내용을 나타낸 그림이다.

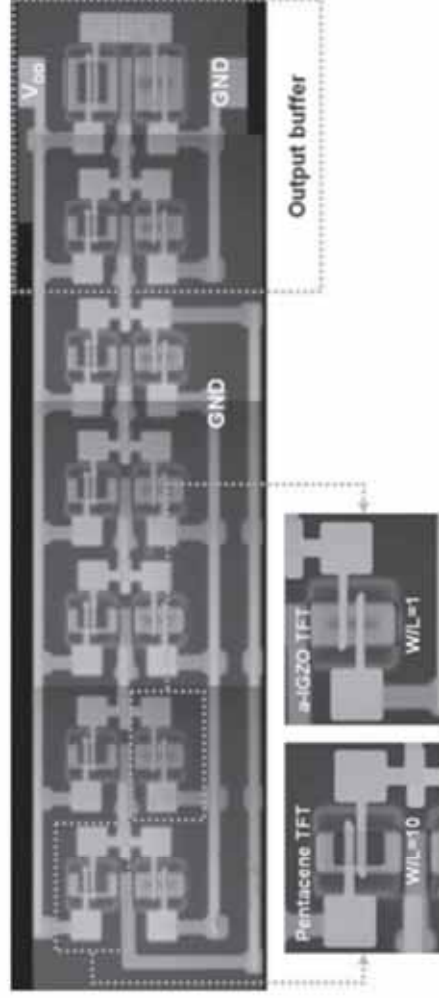
IC를 구성하는 최소 단위가 트랜지스터라고 할 때 인버터 회로는 트랜지스터가 집적된 최소 크기의 IC라 할 수 있다. 상기와 같이 유기물 박막 트랜지스터와 신화물 박막 트랜지스터를 결합하여 훌륭한 인버터를 만들 수 있다. 본 연구실은 실리콘 기판 위에 인버터를 간단한 구조로 구성 및 제작하여 그 특성을 확인해 보았고 그 결과는 다음과 같다.

〈그림 8〉을 통해 기본적인 인버터의 회로 및 동작, 〈표 2〉는 인버터의 동작 영역에 따른 NMOS와 PMOS의 상태를 나타냈다.

〈그림 9〉의 회로와 같이 인버터는 NMOS와 PMOS 각각 1개로 구성되어 있다. 회로도의 NMOS는 N-Type 신화물 박막 트랜지스터, PMOS는 P-Type 유기물 박막 트랜지스터로 구성할 수 있다. 〈그림 9〉는 신화물 박막 트랜지스터, 〈그림 10〉은 유기물 박막 트랜지스터, 11)은 두 박막 트랜지스터를 결합하여 인버터를 구성한 구조도이다.

〈그림 11〉의 인버터의 제작은 P-Type 실리콘 기판에 게이트 전극으로는 Ag를, 소스/드레인 전극은 Ti/Au, 게이트 유전체는 열처리된 통해 SiO<sub>2</sub>를 사용하였고 활성층 Channel로 N-Type 박막 트랜지스터의 신화물 물질은 ZnO, P-Type의 유기물 물질은 pentacene을 사용하였다. 제작 후 N-Type과 P-Type 박막 트랜지스터 각각의 측정 결과는 〈그림 12〉, 〈그림 13〉과 같고 계산 결과 신화물 박막 트랜지스터는 0.03 cm<sup>2</sup>/V · s의 전계 효과 이동도와 2.76×10<sup>4</sup>의 on/off ratio, 유기 박막 트랜지스터는 0.1





출처 : Appl. Phys. Lett. 93, 213505, 2008

〈그림 16〉 a-IGZO-Pentacene Hybrid Ring Oscillato

$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 의 전계 효과 이동도와  $1.26 \times 10^6$ 의 on/off ratio를 확인하였다.

그리고 인버터 측정 시는 〈그림 14〉와 같은 결과가 측정되어 정상적인 인버터 동작 특성을 확인할 수 있다.

〈그림 15〉와 〈그림 16〉은 각각 연세대학교와 일본 동경대학교에서 연구 발표한 Hybrid IC 소자를 보여준다. 연세대학교 임성일 교수 연구팀은 ZnO와 pentacene을 이용하여 7 V의 저전압 구동 영역에서 21의 높은 전압이득을 보여주는 hybrid inverter를 만들어 2007년 Applied Physics Letter지에 발표하였으며, 동경대학교에서는 a-IGZO와 pentacene을 이용한 Hybrid Inverter 및 Ring Oscillator를 제작하여 역시 Applied Physics Letter誌에 게재하였다.

## 5. 결론

본고에서는 플렉시블 전자기기 제작의 가장 기본적인 요소인 플렉시블 박막 트랜지스터의 제조로 많이 사용 중인 산화물, 유기물 박막 트랜지스터와 이를 결합하여 만든 Hybrid IC를 소재의 특성, IC 제작과 평가 결과를 중심으로 간략하게 소개하였다. Hybrid IC는 차세대 전자기기 연구의 기초

연구로써 차후 산업화를 주도할 수 있는 중요한 소자이며 본 소자에 대한 연구는 기존 실리콘 대체 플렉시블 박막 트랜지스터에 관한 연구를 실제 제품에 적용할 수 있는 방안에 응용 방법에 관한 연구이다. 실제로 많은 기업이나 학계에서 제품에 실제 적용할 수 있도록 만드는 현실적인 연구를 지속하고 있다. 향후 Hybrid 실제 제품에 적용하기 위해서는 대면적, 높은 생산성의 대량 생산이 가능한 공정 조건이나 균일한 특성을 낼 수 있는 소자 및 방법에 대한 연구는 물론이고 제품 수명 측면이나 그밖에 신뢰성 확보를 위한 기술적인 연구가 더욱 필요할 것으로 보인다. **DP**

### 감사의 글

본고는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2009-0083126) 및 세계수준의 연구중심대학 사업(R32-2008-000-10082-0)의 지원 하에 수행되었다.

### 〈참고문헌〉

- 1) C. Reese et al., Materials today, 10, 20 (2007)
- 2) M. S. Oh et al., Appl. Phys. Lett., 90, 173511 (2007)
- 3) J. H. Na et al., Appl. Phys. Lett., 93, 213505 (2008)