

# 용액공정 플렉서블 산화물 박막 트랜지스터 적용을 위한 폴리이미드 게이트 절연체

Polyimide Gate Insulators for Solution-Processed Flexible  
Metal Oxide Thin-Film Transistors

장광석 | Kwang-Suk Jang

Division of Advanced Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology,  
141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea  
E-mail: kjang@kriict.re.kr

## 1. 서론

곡면형 디스플레이(curved display)를 넘어서서 화면이 휘어지는 플렉서블 디스플레이(flexible display) 제품에 대한 기대가 점점 높아지고 있다. 플렉서블 디스플레이 구현을 위해서는 플렉서블 박막 트랜지스터(thin-film transistor) 기술이 필수적으로 필요하며 폭넓은 관련 기술이 개발되었거나 활발히 연구되는 단계에 있다. 박막 트랜지스터에는 전도체, 반도체, 절연체 등의 다양한 전기적 특성을 가지는 소재들이 사용된다. 이 중에서도 기판, 게이트 절연체, 보호층 등에 사용되는 절연체 소재는 보다 넓은 면적 또는 전면적에 활용되기 때문에 소재 자체의 유연성이 더욱 중요시되고 있다. 최근에는 유연성, 공정성 등의 장점을 가지고 있는 고분자 게이트 절연체에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무기 게이트 절연체와 비교하여, 고분자 게이트 절연체는 더 유연한 특성을 가지고 있을 뿐만 아니라 낮은 온도에서 인쇄공정을 통해 유연기판 위에 쉽게 코팅할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 고분자 게이트 절연체는 주로 유기 박막 트랜지스터에 적용되어 왔으며, 우수한 소자특성을 나타내는 용액공정 유기 박막 트랜지스터 소자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-6</sup>

하지만, 고분자 게이트 절연체는 용액공정 산화물 박막 트랜지스터 등과 같은 무기 박막 트랜지스터에의 적용이 어렵다고 알려져 있다. 고분자 게이트 절연체 활용의 한계를 넘어서기 위해서는 고분자 게이트 절연체의 내열성 및 표면특성 등의 문제가 해결되어야 한다.

용액공정 산화물 박막 트랜지스터는 주로 SiO<sub>2</sub> 등의 무기 박막을 게이트 절연체로 이용하여 연구되고 있으며 우수한 소자특성 및 공정성으로 인해 유망한 연구분야로 인식되고 있다.<sup>7-16</sup> 이러한 용액공정 산화물 박막 트랜지스터 소자 제작을 위해서는 indium gallium zinc oxide(IGZO), indium zinc oxide(IZO), zinc tin oxide(ZTO), zinc oxide(ZnO) 등의 산화물 반도체 층이 SiO<sub>2</sub> 게이트 절연체 위에 코팅되고 200~400 °C의 높은 온도에서의 열처리 공정을 거쳐야 한다. 높은 열처리 온도는 고분자 게이트 절연체의 용액공정 산화물 박막

Author



장광석

2003 KAIST 생명화학공학과 (학사)  
2009 KAIST 생명화학공학과 (박사)  
2009-2011 Georgia Tech, (박사후 연구원)  
2011-현재 한국화학연구원 화학소재연구본부 선임연구원

트랜지스터 적용에 큰 장벽이 된다. 또한, 고분자 게이트 절연체는 산화물 반도체와는 화학결합 구조의 차이가 크다는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 게이트 절연체 박막의 표면특성은 반도체 층의 형성과 박막구조 형태에 중요한 역할을 하며, 게이트 절연체 층과 반도체 층이 형성하는 계면은 박막 트랜지스터의 소자특성에 매우 큰 영향을 미친다. 절연체와 반도체 소재의 조합이 잘 맞지 않는 경우, 좋은 계면이 형성되지 않고 결함이 많은 상태가 되어 박막 트랜지스터의 소자성능을 크게 떨어뜨릴 수 있다. 이 글에서는 내열성 및 내화학성이 우수한 폴리이미드 게이트 절연체 소재를 소개하고, 폴리이미드 게이트 절연체가 적용된 용액공정 산화물 박막 트랜지스터에 관한 연구동향을 살펴보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 폴리이미드 게이트 절연체

방향족 폴리이미드는 방향족 dianhydride 단량체와 방향족 diamine 단량체로부터 얻을 수 있다(그림 1). 폴리이미드는 보통 2단계의 반응을 통해 얻어지며 전구체 고분자인 폴리아미산(polyamic acid, PAA) 상태를 거치게 된다. 대부분의 방향족 폴리이미드는 불용 성질을 가지고 있기 때문에 폴리이미드 박막을 얻기 위해서는 PAA 용액을 코팅하고 열처리 공정에 의한 이미드화 반응을 통해서 최종 박막을 만들 수 있다. 방향족 폴리이미드는 고분자 사슬 내의 전하 전이 복합화(charge transfer complex, CTC)로 인해 고분자 사슬 간의 강한 결합을 형성한다.<sup>17</sup> 이로 인해 폴리이미드 박막은

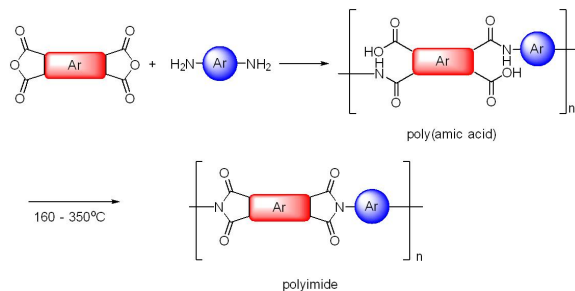


그림 1. 폴리이미드의 합성 경로.

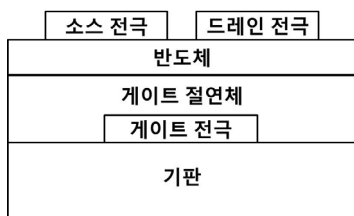


그림 2. 하부 게이트 상부 접촉(bottom-gate, top-contact) 구조의 박막 트랜지스터의 단면 모식도.

내열성, 내화학성 및 절연특성이 우수하며 게이트 절연체로의 응용에 큰 장점을 가지고 있다. 예를 들어, 폴리이미드의 우수한 내열성으로 인하여 반도체 층 형성 공정 등의 후속 공정에서 더 높은 온도로의 열처리가 가능하다. 또한, 반도체 층 및 전극 층 형성 공정을 통해서 발생하는 화학적 손상으로부터 자유롭다(폴리이미드 게이트 절연체 박막 위에서 금속 전극의 photolithography 공정 적용이 가능하다). 일반적으로 방향족 폴리이미드 박막은 100 nm 이상의 두께에서 우수한 절연특성을 나타내지만, 50 nm 이하의 초박막 상태에서는 절연특성 저하가 관찰되며 유전상수 및 전기용량이 다른 무기 소재 박막에 비해 크지 않다는 한계점도 함께 가지고 있다.

그림 2는 하부 게이트 상부 접촉(bottom-gate, top-contact) 구조의 박막 트랜지스터 모식도이다. 박막 트랜지스터에서 게이트 절연체 층은 게이트 전극에서의 누설전류를 막아주고, 전하를 축적시키는 전계효과를 유도하며, 반도체 층과 계면을 형성하기 때문에 반도체 막의 형성과 계면에서의 전하 이동에 영향을 미친다. 따라서, 절연특성, 전기용량, 표면에너지와 표면거칠기 등의 표면특성이 게이트 절연체의 중요한 특성으로 인식되고 있다. 다른 고분자 게이트 절연체와 마찬가지로 폴리이미드 게이트 절연체 또한 유기 박막 트랜지스터에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다.<sup>18-25</sup> 최근에는 유기반도체 층을 진공 공정이 아닌 용액공정으로 형성시키는 용액공정 유기 박막 트랜지스터 적용 연구와 소자성능을 향상시키기 위해 폴리이미드 게이트 절연체의 표면특성을 제어하는 연구가 진행되고 있다.<sup>24-25</sup>

그림 3은 표면특성 제어가 가능한 폴리이미드 게이트 절연체 소재의 합성 경로이다. 알킬사슬이 포함된 diamine 단량체의 비율을 조절함으로써 최종적으로 얻어지는 폴리이미드 게이트 절연체 박막의 표면에너지를 변화시킬 수 있다. 하

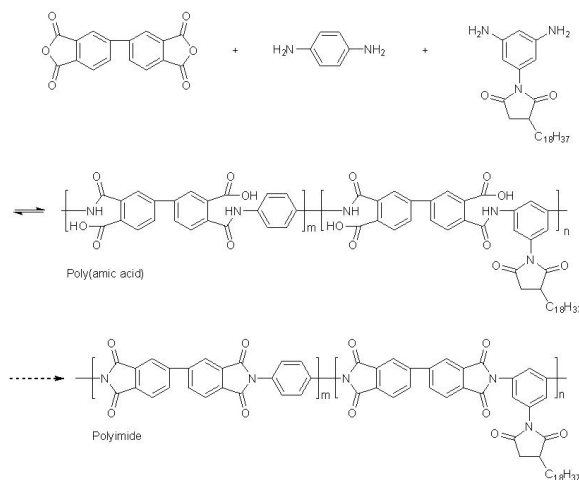


그림 3. 표면특성 제어가 가능한 폴리이미드 게이트 절연체 소재의 합성 경로.<sup>24</sup>

지만, 알킬사슬의 비율이 높아지면 폴리이미드 사슬간의 CTC를 방해하기 때문에 절연특성이 저하될 수 있다. 따라서, 절연특성과 표면특성의 최적화가 필요하다. 그림 4는 표면특성이 제어된 폴리이미드 게이트 절연체가 적용된 용액 공정 유기 박막 트랜지스터의 transfer 특성을 나타낸다. 유기 반도체는 2,7-didecyl [1]benzothieno [3,2-b][1]benzothiophene (C10-BTBT)을 이용하였고, 용액상태에서 350 nm 두께의 폴리이미드 게이트 절연체 박막 위에 스핀코팅 공정을 통하여 반도체 층을 형성시켰다. 만들어진 소자는 이동도 0.56 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점멸비 >10<sup>5</sup>의 우수한 특성을 나타내었다. 위와 같이 화학적 방법으로 폴리이미드 게이트 절연체의 표면특성을 조절할 수 있으며, 물리적 방법의 이용도 가능하다. 그림 5는 알루미늄/폴리이미드 이중층 게이트 절연체를 도입한 유기 박막 트랜지스터의 단면 모식도이다. 120 nm 두께의 폴리이미드 박막 위에 20 nm 두께의 산화물 박막을 용액공정으로 코팅함으로써 게이트 절연체의 표면특성을 바꾸어 줄 수 있다. 여기에서 폴리이미드 박막을 얻기 위한 열처리 온도와 알루미늄 박막을 얻기 위한 열처리 온도는 모두 200 °C이다. 상대적으로 알루미늄 층의 두께가 매우 얇기 때문에 전기용량의 감소는 매우 적고 누설전류 이동경로의 차단 효과로 인하여 절연특성이 향상된다. 그림 6은 폴리이미드 게이트 절연체 또는 알루미늄/폴리이미드 이중층 게이트 절연체가 적용

된 용액공정 유기 박막 트랜지스터의 transfer 특성을 나타낸다. 폴리이미드 단일층을 게이트 절연체로 적용하였을 경우 이동도 0.18 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점멸비 >10<sup>5</sup>의 특성을 나타내는데 비해, 이중층 게이트 절연체를 적용하였을 경우 이동도 1.42 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점멸비 >10<sup>6</sup>의 우수한 소자특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

## 2.2 폴리이미드 게이트 절연체의 용액공정 ZnO 박막 트랜지스터 적용

앞서 설명한 바와 같이 고분자 게이트 절연체를 용액공정 산화물 박막 트랜지스터에 적용시키기 위해서는 게이트 절연체 소재의 내열성 및 표면특성 문제가 해결되어야 한다. 대부분의 용액공정 산화물 반도체는 200~400 °C의 열처리 공정을 통해서 반도체 박막을 형성한다. 게이트 절연체 소재로 이용되는 대부분의 고분자는 200~400 °C의 고온에서 손상이 된다고 알려져 있는데 반해, 방향족 폴리이미드는 고온에서도 무게 변화 등의 물리적 특성 변화가 거의 없다고 알려져 있다.

그림 7은 고내열성 폴리이미드 게이트 절연체 소재의 합성 경로이다. 300 °C에서의 이미드화 반응 후에 얻어진 폴리이미드는 400 °C의 고온에서도 1% 미만의 무게 감소가 있다. ZnO는 박막 트랜지스터에 널리 사용되는 대표적인 반도체 소재로서 진공공정 뿐만 아니라 용액공정으로도 많은 연구가 되고 있다. 용액공정을 위한 ZnO 반도체 잉크는 주로 ZnO 전구체를 수용액에 녹이거나 분산시킨 형태를 사용한다. 하부 게이트 구조의 박막 트랜지스터를 만들기 위해서는 ZnO 수계 잉크를 게이트 절연체 위에 코팅한 후 200~400 °C의 고온에서 열처리 공정을 거쳐야 한다. 일반적으로, 열처리 공정 온도가 더 높을수록 용액공정 산화물 박막 트랜지스터의 소자특성이 향상된다고 알려져 있다. 폴리이미드 게이트 절연체를 이용할 경우, 이러한 내열성 문제는 해결이 되지만

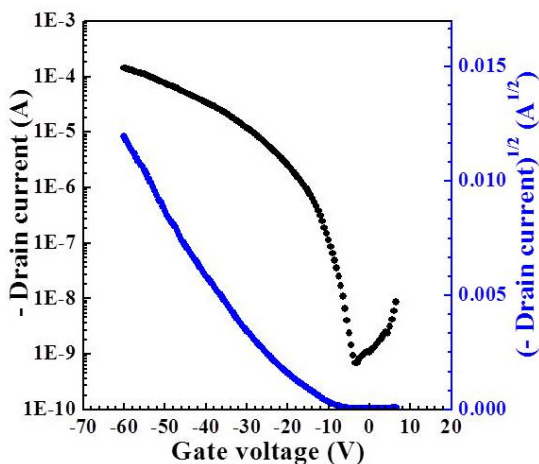


그림 4. 표면특성이 제어된 폴리이미드 게이트 절연체를 적용한 C10-BTBT 유기 박막 트랜지스터의 transfer 특성.<sup>24</sup>



그림 5. 알루미늄/폴리이미드 이중층 게이트 절연체를 도입한 유기 박막 트랜지스터의 단면 모식도.<sup>25</sup>

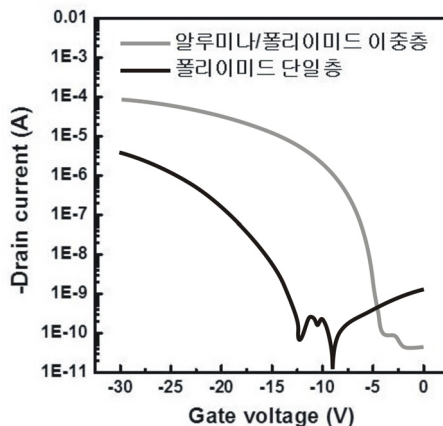


그림 6. 알루미늄/폴리이미드 이중층 게이트 절연체를 도입한 유기 박막 트랜지스터의 transfer 특성.<sup>25</sup>

표면특성 문제는 여전히 남아있다. SiO<sub>2</sub> 등의 산화물 게이트 절연체를 적용할 경우, ZnO 반도체와 화학결합이 유사하기 때문에 산화물 게이트 절연체 표면에서 ZnO 반도체는 공유결합을 형성할 수 있다. 따라서, 균일한 반도체 박막의 형성에 유리하며 반도체와 게이트 절연체는 좋은 계면을 형성할 수 있다. 폴리이미드 게이트 절연체 위에 ZnO 수계 잉크를 코팅하고 열처리 공정을 거치면 균일한 형태의 ZnO 박막을 얻을 수 없다.<sup>26,27</sup> 코팅 과정에서 ZnO 수계 잉크가 비젯음(dewetting) 상태가 되거나 열처리 중에 ZnO 나노입자들이

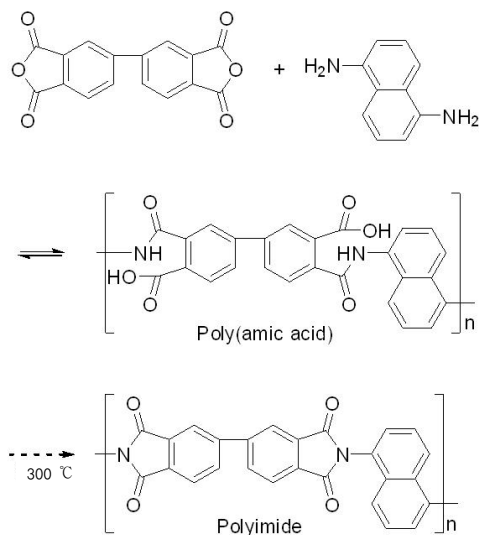


그림 7. 고내열성 폴리이미드 게이트 절연체 소재의 합성 경로.<sup>26</sup>

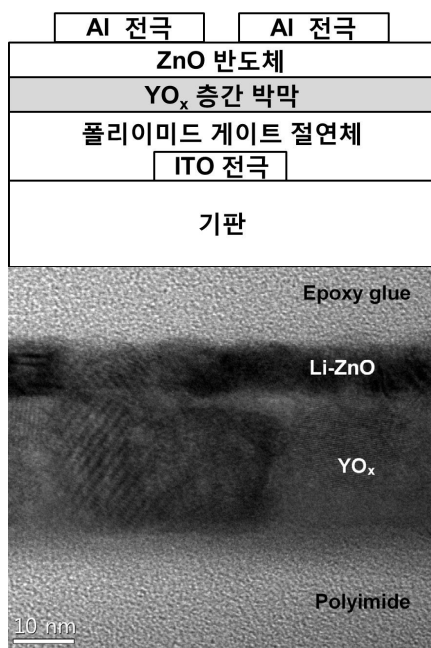


그림 8. YO<sub>x</sub> 층간 박막이 도입된 폴리이미드 게이트 절연체를 적용한 ZnO 박막 트랜지스터의 단면 도식도와 단면 TEM 이미지.<sup>26</sup>

불균일하게 응집되는 현상이 발생한다. 이러한 표면특성 문제를 해결하기 위하여 산화물 층간 박막을 도입할 수 있다(그림 8). 350 nm 두께의 폴리이미드 박막 위에 25 nm 두께의 YO<sub>x</sub> 층간 박막을 용액공정으로 코팅함으로써 게이트 절연체의 표면특성을 바꾸어 줄 수 있다. 여기에서 폴리이미드 박막을 얻기 위한 이미드화 열처리 온도와 YO<sub>x</sub> 층간 박막을 얻기 위한 열처리 온도는 모두 300 °C이다. YO<sub>x</sub> 층간 박막이 도입된 경우에는 ZnO 반도체 층이 균일한 박막을 형성하는 것을 확인할 수 있다(그림 8). YO<sub>x</sub> 층간 박막이 도입된 폴리이미드 게이트 절연체의 유전상수는 3.2이며, 2 MV/cm에서의 누설전류가  $3.3 \times 10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup>로 측정이 된다. 그림 9는 폴리이미드 게이트 절연체 또는 층간 박막이 도입된 폴리이미드 게이트 절연체가 적용된 용액공정 ZnO 박막 트랜지스터의 transfer 특성을 나타낸다. 폴리이미드 단일층을 게이트 절연체로 적용하였을 경우 이동도 0.1 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점별비 >10<sup>5</sup>의 특성을 나타내는데 비해, YO<sub>x</sub>/폴리이미드 이중층 게이트 절연체를 적용하였을 경우 이동도 4.9 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점별비 >10<sup>6</sup>의 우수한 소자특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3 폴리이미드 게이트 절연체의 용액공정 IZO 박막 트랜지스터 적용

산화물 반도체의 열처리 공정 온도가 더 높을수록 용액공정 산화물 박막 트랜지스터의 소자특성이 향상된다고 알려져 있다. 따라서, 폴리이미드 게이트 절연체의 내열성이 향상되면 더 뛰어난 특성의 박막 트랜지스터를 얻을 수 있다. 내열성이 더욱 향상된 폴리이미드 게이트 절연체 소재를 얻기 위하여 새로운 구조의 diamine 단량체를 합성하고 폴리이미드 중합에 도입하였다(그림 10). 300 °C에서의 이미드화 반응을 통해 얻어진 새로운 구조의 폴리이미드 박막은 500 °C에서도 1% 미만의 무게감소를 보인다. 내열성이 향상된 폴리이미드 게이트 절연체의 유전상수는 2.8이며, 2 MV/cm에

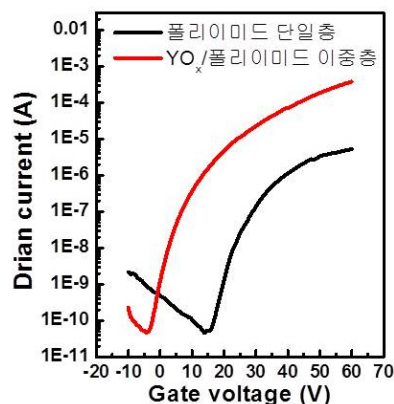


그림 9. 폴리이미드 게이트 절연체와 YO<sub>x</sub> 층간 박막이 도입된 폴리이미드 게이트 절연체를 적용한 ZnO 박막 트랜지스터의 transfer 특성.<sup>26</sup>



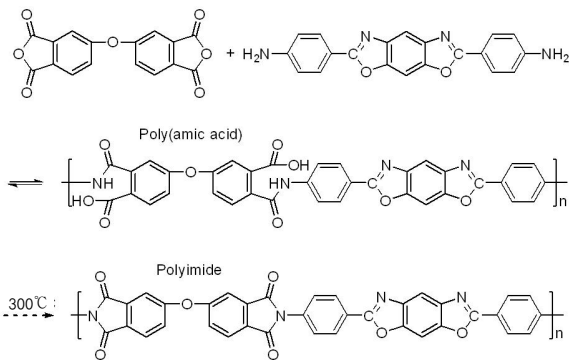


그림 10. 새로운 구조의 diamine 단량체를 이용한 폴리이미드 게이트 절연체 소재의 합성 경로.<sup>28</sup>

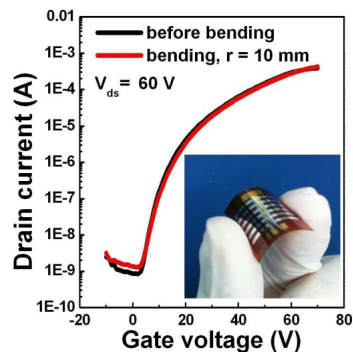


그림 12. 고내열성 폴리이미드 게이트 절연체를 적용한 플렉서블 IZO 박막 트랜지스터의 transfer 특성.<sup>26</sup>

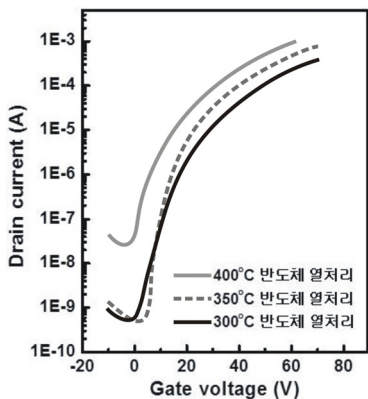


그림 11. 고내열성 폴리이미드 게이트 절연체를 적용한 IZO 박막 트랜지스터의 transfer 특성.<sup>28</sup>

서의 누설전류가  $\sim 10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup>로 측정된다.

IZO 반도체는 ZnO와 더불어 박막 트랜지스터에 널리 사용되는 대표적인 반도체 소재이다. 박막 트랜지스터에 적용되는 ZnO 반도체는 결정형인데 비해 IZO 반도체는 비정질이며, ZnO 보다 용액공정으로의 적용이 용이하기 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있다. IZO 잉크는 주로 2-methoxyethanol과 같은 알코올계 용매와 2종 이상의 전구체로 이루어져 있다. 고분자 게이트 절연체 적용에 있어서, 알코올계 잉크이기 때문에 코팅 과정에서의 비젯음(dewetting) 문제가 발생하지 않고, 비정질이기 때문에 열처리 과정에서 결정화와 동반되는 응집 현상으로부터 자유롭다는 장점이 있다. 이로 인해 산화물 층간 박막을 도입하지 않고도 폴리이미드 게이트 절연체 위에서 균일한 박막 형태의 IZO 층을 얻을 수 있다.

고내열성이 확보된 폴리이미드 게이트 절연체를 적용하여 용액공정 IZO 박막 트랜지스터를 제작하였다. 폴리이미드 박막 위에 IZO 잉크를 코팅한 후 각각 300 °C, 350 °C, 400 °C에서 열처리를 진행하였다. 그림 11은 제작된 IZO 박막 트랜지스터의 transfer 특성을 나타낸다. 300 °C 반도체 열처리 공정을 적용하였을 경우 이동도 6.0 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점멸비 >10<sup>5</sup>의 특성을 나타내고, 350 °C 반도체 열처리 공정을 적용

하였을 경우에는 이동도 9.2 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점멸비 >10<sup>6</sup>의 우수한 소자특성을 나타낸다. 400 °C 반도체 열처리 공정을 적용하였을 경우에는 이동도는 11.2 cm<sup>2</sup>/Vs로 상승하지만 off 전류 값이 크게 증가하여 전류점멸비가  $\sim 10^4$  수준으로 감소한다. 400 °C 이상의 온도에서는 폴리이미드 게이트 절연체의 누설전류 특성이 감소하는 것으로 보인다. 하지만, 400 °C 열처리 후에도 여전히 게이트 절연체로서의 역할을 하는 것을 확인할 수 있다. 폴리이미드의 화학구조 변형을 통해 400 °C 이상의 열처리 후에도 성능저하가 없는 고분자 게이트 절연체 소재의 개발도 가능할 것으로 기대된다.

플렉서블 박막 트랜지스터로의 응용 가능성을 확인하기 위하여 Kapton 필름을 기판으로 이용하여 IZO 박막 트랜지스터를 제작하였다(그림 12). 별도의 지지기판 없이 Kapton 필름 위에 직접 용액공정을 진행하였으며, 350°C 반도체 열처리 공정을 적용하였다. 제작된 플렉서블 박막 트랜지스터는 이동도 4.1 cm<sup>2</sup>/Vs, 전류점멸비  $4.7 \times 10^5$ 의 소자특성을 나타낸다. 흥미롭게도 곡률 반경(bending radius)이 10 mm로 휘어져있는 상태에서도 소자의 특성저하가 없다는 것을 확인하였다. 이동도는 4.1 cm<sup>2</sup>/Vs로 변화가 없으며, 전류점멸비는  $3.2 \times 10^5$ 로 약간 감소함을 확인할 수 있다. 고내열성이 확보된 폴리이미드 게이트 절연체가 적용된 용액공정 IZO 박막 트랜지스터는 휘어져있는 상태에서도 성능저하 없이 소자구동이 가능하다. 이는 고분자 게이트 절연체가 적용된 산화물 박막 트랜지스터의 큰 장점이라고 생각된다.

### 3. 결론

용액공정 산화물 박막 트랜지스터 적용을 위한 폴리이미드 게이트 절연체에 관한 최근의 연구동향을 간단히 소개하였다. 폴리이미드 박막은 내열성, 내화학성 및 절연특성이 우수하며 게이트 절연체로서의 응용에 큰 장점을 가지고 있다. 폴리이미드 게이트 절연체는 용액공정 산화물 박막 트랜지스터 뿐만 아니라 진공공정 산화물 박막 트랜지스터 및 저온다

결정 실리콘 박막 트랜지스터 등의 다른 형태의 무기 박막 트랜지스터에도 적용이 가능할 것으로 보인다. 하지만, 실제 응용을 위해서는 우선적으로 소자특성의 향상이 필요하다. 이를 위해서는 폴리이미드 게이트 절연체와 무기물 반도체 사이의 계면특성에 대한 이해가 중요한 열쇠가 될 것으로 보인다.

이 글에서는 하부 게이트 구조의 박막 트랜지스터에 대해 설명했지만, 최근에는 상부 게이트 구조의 산화물 박막 트랜지스터에 고분자 절연체를 적용하는 연구 또한 진행되고 있다. 상부 게이트 구조의 경우에는 내열성이 큰 문제가 되지 않기 때문에 더 다양한 종류의 고분자 소재를 게이트 절연체로 적용하는 것이 가능하다.

### 참고문헌

1. J. H. Cho, J. Lee, Y. Xia, B. Kim, Y. He, M. J. Renn, T. P. Lodge, and C. D. Frisbie, *Nat. Mater.*, **7**, 900 (2008).
2. M. E. Roberts, N. Querolto, S. C. B. Mannsfeld, B. N. Reinecke, W. Knoll, and Z. Bao, *Chem. Mater.*, **21**, 2292 (2009).
3. Z. Liu, J. H. Oh, M. E. Roberts, P. Wei, B. C. Paul, M. Okajima, Y. Nishi, and Z. Bao, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 203301 (2009).
4. S. C. B. Mannsfeld, B. C.-K. Tee, R. M. Stoltenberg, C. V. H.-H. Chen, S. Barman, B. V. O. Muir, A. N. Sokolov, C. Reese, and Z. Bao, *Nat. Mater.*, **9**, 859 (2010).
5. A. Sokolov, Y. Cao, O. B. Johnson, and Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 175 (2012).
6. K.-J. Baeg, D. Khim, S.-W. Jung, M. Kang, I.-K. You, D.-Y. Kim, A. Facchetti, and Y.-Y. Noh, *Adv. Mater.*, **24**, 5433 (2012).
7. M.-G. Kim, M. G. Kanatzidis, A. Facchetti and T. J. Marks, *Nat. Mater.*, **10**, 382 (2011).
8. K. K. Banger, Y. Yamashita, K. Mori, R. L. Peterson, T. Leedham, J. Rickard, and H. Sirringhaus, *Nat. Mater.*, **10**, 45 (2011).
9. D.-H. Lee, Y.-J. Chang, G. S. Herman, and C.-H. Chang, *Adv. Mater.*, **19**, 843 (2007).
10. D.-H. Lee, S.-Y. Han, G. S. Herman, and C.-H. Chang, *J. Mater. Chem.*, **19**, 3135 (2009).
11. S. Jeong, Y.-G. Ha, J. Moon, A. Facchetti, and T. J. Marks, *Adv. Mater.*, **22**, 1346 (2010).
12. S. Jeong, J.-Y. Lee, S. S. Lee, Y. Choi, and B.-H. Ryu, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 11773 (2011).
13. T. Jun, K. Song, Y. Jung, S. Jeong, and J. Moon, *J. Mater. Chem.*, **21**, 13524 (2011).
14. S.-Y. Han, G. S. Herman, and C.-H. Chang, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 5166 (2011).
15. M.-G. Kim, H. S. Kim, Y.-G. Ha, J. He, M. G. Kanatzidis, A. Facchetti, and T. J. Marks, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 10352 (2010).
16. S. Y. Park, B. J. Kim, K. Kim, M. S. Kang, K.-H. Lim, T. I. Lee, J. M. Myoung, H. K. Baik, J. H. Cho, and Y. S. Kim, *Adv. Mater.*, **24**, 834 (2012).
17. S. W. Lee, J. Y. Kim, S. J. Kwon, and H. M. Seo, *Polymer Science and Technology*, **24**, 17 (2013).
18. T. Ahn, Y. Choi, H. M. Jung, and M. Yi, *Org. Electron.*, **10**, 12 (2009).
19. K.-S. Jang, H. J. Suk, W. S. Kim, T. Ahn, J.-W. Ka, J. Kim, and M. H. Yi, *Org. Electron.*, **13**, 1665 (2012).
20. S. Pyo, M. Lee, J. Jeon, J. H. Lee, M. H. Yi, and J. S. Kim, *Adv. Func. Mater.*, **15**, 619 (2005).
21. S. Pyo, H. Son, K.-Y. Choi, and M. H. Yi, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 133508 (2005).
22. J.-M. Won, H. J. Suk, D. Wee, Y. H. Kim, J.-W. Ka, J. Kim, T. Ahn, M. H. Yi, and K.-S. Jang, *Org. Electron.*, **14**, 1777 (2013).
23. S. Yoo, Y. H. Kim, J.-W. Ka, Y. S. Kim, M. H. Yi, and K.-S. Jang, *Org. Electron.*, **23**, 213 (2015).
24. K.-S. Jang, W. S. Kim, J.-M. Won, Y. H. Kim, S. Myung, J.-W. Ka, J. Kim, T. Ahn, and M. H. Yi, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 950 (2013).
25. J.-Y. Yoon, S. Jeong, S. S. Lee, Y. H. Kim, J.-W. Ka, M. H. Yi, and K.-S. Jang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 5149 (2013).
26. J.-Y. Yoon, Y. H. Kim, J.-W. Ka, S.-K. Hong, M. H. Yi, and K.-S. Jang, *J. Mater. Chem. C*, **2**, 2191 (2014).
27. K.-S. Jang, D. Wee, Y. H. Kim, J. Kim, T. Ahn, J.-W. Ka, and M. H. Yi, *Langmuir*, **29**, 7143 (2013).
28. D. Wee, S. Yoo, Y. H. Kang, Y. H. Kim, J.-W. Ka, S. Y. Cho, C. Lee, J. Ryu, M. H. Yi, and K.-S. Jang, *J. Mater. Chem. C*, **2**, 6395 (2014).