

## 플렉서블 디스플레이용 박막 소재 물성 평가

오승진 · 마부수 · 김형준 · 양찬희 · 김택수<sup>†</sup>

KAIST 기계공학과

### Measurement of Mechanical Properties of Thin Film Materials for Flexible Displays

Seung Jin Oh, Boo Soo Ma, Hyeong Jun Kim, Chanhee Yang, and Taek-Soo Kim<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),  
291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

(Received August 27, 2020: Corrected September 28, 2020: Accepted September 29, 2020)

**초 록:** 차세대 디스플레이 시장을 선도하기 위해서는 롤러블(rollable), 폴더블(foldable) 디스플레이와 같은 플렉서블(flexible) OLED 디스플레이의 상용화 및 양산화가 필수적이나, 실제 공정 및 굽힘 과정에서 발생하는 극심한 박막 내부 응력 변화로 인한 기계적 파손 문제가 심각한 상황이다. 따라서, 플렉서블 디스플레이 구조에 사용되는 박막 재료의 기계적 물성을 파악하는 것은 제품의 강건한 설계 및 구조 최적화에 필수적이다. 본 논문에서는 물 표면 플랫폼을 이용한 나노 박막 인장 시험법을 적용하여 플렉서블 디스플레이 패널에 적용되는 금속 및 세라믹 박막 소재들의 인장 물성을 정량적으로 측정하였다. 스퍼터링(Sputtering)으로 증착된 Mo, MoTi 나노 박막과, 플라즈마 강화 화학 기상 증착법(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)으로 증착된 SiN<sub>x</sub> 나노 박막의 탄성 계수와 인장 강도 및 연신율을 측정하는 데 성공하였다. 결과적으로 박막의 증착 조건 및 두께에 따라 기계적 물성이 크게 변화할 수 있음을 확인하였으며, 측정된 인장 물성은 기계적으로 강건한 롤러블, 폴더블 디스플레이의 설계를 위한 응력 해석 모델링 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**Abstract:** Commercialization of flexible OLED displays, such as rollable and foldable displays, has attracted tremendous interest in next-generation display markets. However, during bending deformation, cracking and delamination of thin films in the flexible display panels are the critical bottleneck for the commercialization. Therefore, measuring mechanical properties of the fragile thin films in the flexible display panels is essential to prevent mechanical failures of the devices. In this study, tensile properties of the metal and ceramic nano-thin films were quantitatively measured by using a direct tensile testing method on the water surface. Elastic modulus, tensile strength, and elongation of the sputtered Mo, MoTi thin films, and PECVD deposited SiN<sub>x</sub> thin films were successfully measured. As a result, the tensile properties were varied depending on the deposition conditions and the film thickness. The measured tensile property values can be applied to stress analysis modeling for mechanically robust flexible displays.

**Keywords:** Tensile Test, Thin Film, Mechanical Property, Rollable display, Foldable display

## 1. 서 론

롤러블(rollable), 폴더블(foldable) 등의 플렉서블(flexible) 디스플레이는 다양한 형태 변형으로 인해 공간 활용성이 높고, 얇고 가벼운 장점이 있어 최근 학계와 산업계에서 차세대 디스플레이로서 각광받고 있다.<sup>1)</sup> 하지만 현재 플렉서블 유기발광다이오드(Organic Light Emitting Diodes, OLED) 디스플레이의 상용화 및 양산화는 공정이나 구동 과정에서 발생하는 극심한 막 내 응력 변화로 인한 기계

적 신뢰성 문제로 인해 어려움을 겪고있다.<sup>2,3)</sup> 특히 플렉서블 OLED 내 소자 및 봉지 층에는 수백 나노미터 두께의 매우 얇은 금속 및 세라믹 재료들이 사용되는데, 이러한 재료들은 기계적으로 매우 취성하여 작은 변형에도 균열 혹은 박리가 쉽게 발생한다. 따라서, 이러한 취성 박막의 기계적 파손을 예측 및 방지하여 기계적 신뢰성을 향상시키기 위해서는 디스플레이 내 박막 재료의 탄성 계수, 인장 강도, 연신율 등의 기계적 물성을 정확히 파악하는 것이 필수적이다.<sup>4,5)</sup>

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: [tskim1@kaist.ac.kr](mailto:tskim1@kaist.ac.kr)

© 2020, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

현재까지 박막 재료의 기계적 물성을 측정하기 위해서는 나노인덴테이션(nanoindentation)이나 벌지 시험(bulge test) 등의 방법이 대표적으로 활용되어 왔다.<sup>6)</sup> 하지만 이러한 방법들은 측정된 탄성계수 값이 기판의 영향을 크게 받을 뿐만 아니라 정확한 인장 강도나 연신율을 측정할 수 없다는 한계가 있다. 한편 인장 강도와 연신율을 측정하기 위하여 유연 기판 위에서 인장 실험을 하는 경우에는, 복잡한 계산이 수반되거나, 기판과 박막간의 상호작용으로 생기는 잔류 응력의 영향으로 정확한 기계적 물성 측정에 어려움이 있다. 특히 플라즈마 강화 화학 기상 증착법(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)으로 증착되는 박막의 경우 높은 온도 환경이 요구되기 때문에 유연 플라스틱 기판 위에 박막을 증착하여 인장 시험을 수행하는 데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 물 표면 환경에서 기판이 없는 상태의 초박막을 인장할 수 있는 물 표면 인장 시험법을 활용하여 플렉서블 OLED 내 소자층의 게이트(gate)와 봉지층에 활용되는 금속 및 세라믹 나노 박막의 인장 물성을 정량적으로 측정하고자 하였다. 그 결과, 스퍼터링(sputtering) 증착 박막인 Mo, MoTi 나노 박막과 PECVD 증착 박막인 SiN<sub>x</sub> 나노 박막의 인장 물성을 정밀하게 측정하는 데 성공하였다. Mo, MoTi 나노 박막의 경우 공정 조건의 차이에서 기인하여 기존 문헌과 탄성계수에 큰 차이가 있었다. 또한, SiN<sub>x</sub> 나노 박막은 두께에 따라 탄성계수의 차이가 거의 없었지만, 인장 강도와 연신율에 큰 차이가 있음을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1 물 표면을 활용한 나노 박막 인장 시험법

본 연구에서 활용한 인장 시험법은 물 표면의 표면장력을 활용하여 나노 박막을 자유 지지 상태로 인장하는 방법이다.<sup>7)</sup> Fig. 1에 물 위 인장 시험 장비의 구성을 나타내었다. 시편의 양쪽에 로드셀(LTS-50GA, KYOWA,

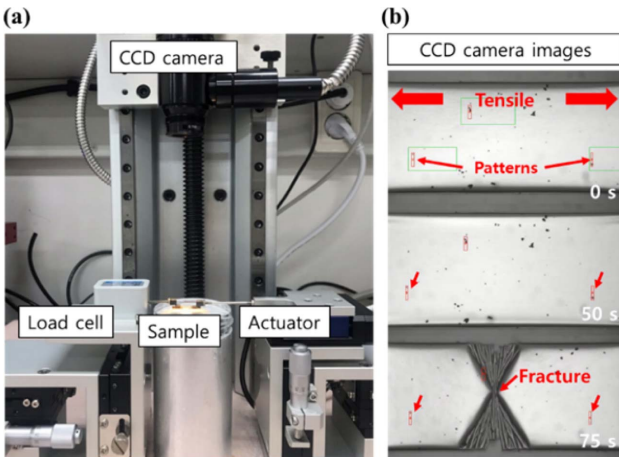


Fig. 1. Experimental setup. (a) Construction of test instruments. (b) Strain measurement by DIC method.

Japan)과 리니어 액추에이터(M-111 DG, PI, Germany)가 있어 시편에 변위를 가하는 동시에 시편이 받고 있는 하중 값을 측정하였다. 또한, 인장 실험 중 장비의 수직 방향 위쪽에 CCD 카메라를 설치하여 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC)으로 시편 표면의 패턴을 추적하여 변형률을 실시간으로 계산하였다. DIC 기법은 디지털 카메라로 촬영된 변형 전후 사진의 변화를 추적하여 비접촉식으로 변형 분포를 측정하는 방법으로, 각 픽셀의 밝기 정도를 상관 함수로 계산하여 가장 상관도가 큰 지점을 추적할 수 있다.<sup>8)</sup>

2.2 시편 준비 방법

시편 준비 과정을 Fig 2에 나타내었다. 가장 먼저, Fig. 2(a)와 같이 표면에 실리콘 산화막(SiO<sub>2</sub>)이 형성된 실리콘(Si) 기판(525±25 μm) 위에 구리(Cu) 회생층(1 μm)을 증착한 후 그 위에 분석하고자 하는 금속 및 세라믹 박막을 증착하였다. 본 연구에서 분석한 Mo, MoTi 박막은 스퍼터링 증착법으로 각각 목표 두께 300 nm, 100 nm로 증착되었으며, 증착 압력은 각각 0.5 Pa, 0.24 Pa이었고, 증착 파워는 각각 2.1 kW, 7.9 kW이었다. SiN<sub>x</sub> 박막은 PECVD 증착법으로 목표 두께 100 nm, 200 nm로 증착되었으며, 증착 압력은 0.75 Pa, 증착 파워는 0.5 kW이었다. 그 후, 증착된 나노 박막 및 Cu 회생층을 펄초초 레이저(femtosecond laser)를 이용하여 Fig. 2(b)와 같이 Dog-bone 형상으로 가공하였다. Dog-bone 형상은 인장 실험 시 시편의 목 부분에 하중을 집중시켜 그립(Grip) 부분에서의 파손을 방지할 수 있는 장점이 있다. 이 때, SiN<sub>x</sub> 박막의 경우 세라믹 재료의 특성상 매우 취성하여 Mo, MoTi 박막과 같이 시편의 목(neck) 부분이 노출되도록 가공한 경우 박리 시 목 부분에 손상을 입기 때문에, 목 부분의 지지대를 형성하도

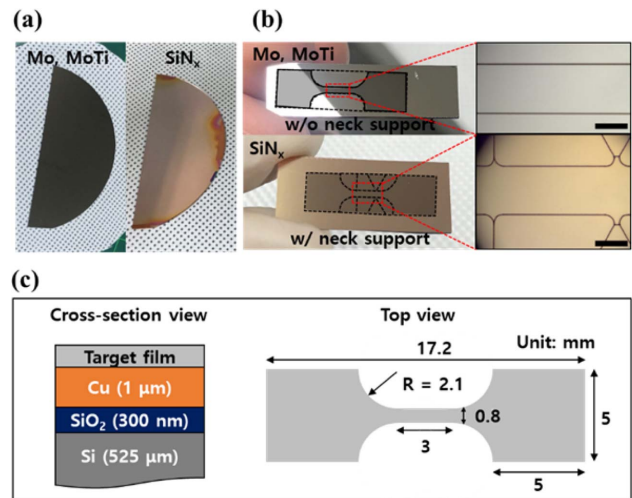


Fig. 2. Procedure for specimen fabrication. (a) Deposition of thin films. (b) Dog-bone patterning using femtosecond laser (scale bar = 500 μm). (c) Cross-section view of the deposited specimen and dimension of the patterned dog-bone shape.

록 가공을 진행하였다. 증착된 시편의 단면 모식도 및 가공한 Dog-bone 형상의 치수를 Fig. 2(c)에 자세히 나타내었다. Dog-bone 형상 가공 후에는 DIC 기법을 활용하여 변형률을 측정하기 위한 패턴을 형성하기 위해 수 마이크로미터 크기의 흑연 입자(Graphite particle)를 시편 표면에 분산시켰다. 이 때, 흑연 입자는 시편과의 반데르발스 힘(van der Waals force)과 정전기적 인력으로 인장 시험 시 변형 없이 시편 표면의 변위를 따라갈 수 있게 된다.

2.3 인장 실험 방법

시편 준비 이후 인장 시험 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 Fig. 3(a)와 같이 준비된 시편을 물 표면에서 박리하였다. 이 때, Si 기판 상부의 SiO<sub>2</sub> 층과 Cu 희생층의 계면 접합력이 약하기 때문에 물의 표면장력을 이용하여 쉽게 박리가 가능하였다. 다음으로 Fig. 3(b)와 같이 시편의 목부분을 보호하고 있던 지지대를 제거한 후, 물 표면에 떠 있는 시편을 Fig. 3(c)와 같이 구리 식각액(Cu etchant)으로 전사하여 하단의 Cu 희생층을 제거하였다. 마지막으로 Fig. 3(d)와 같이 반데르발스 힘을 이용하여 폴리디메틸실록산(Polydimethyl-siloxane, PDMS)이 코팅된 알루미늄 그립을 자유 지지 상태의 시편 상부에 부착한 후, 시편에 변위를 가하여 인장 실험을 수행하였다. 인장 실험 시 리니어 액추에이터의 속도는 0.6 μm·s<sup>-1</sup>으로 고정하였으며 이 속도는 물 표면의 항력(drag force)이 측정 값에 영향을 주지 않는 범위 내의 속도였다.

2.4 박막 두께 측정

박막의 인장 실험에서 정확한 응력 값을 계산하기 위

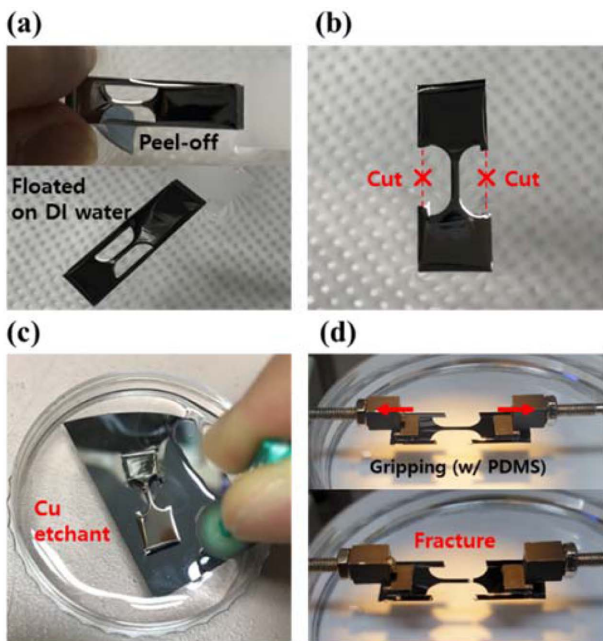


Fig. 3. Procedure for tensile test on water surface. (a) Peeling of the specimen. (b) Removing the neck support. (c) Etching of Cu sacrificial layer. (d) Tensile test on water surface.

해서는 인장력이 가해진 시편 목 부분의 단면적을 정확히 측정해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 인장 실험이 완료된 박막을 세척된 Si 기판으로 전사한 후 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope, AFM)을 이용하여 박막의 두께를 정밀하게 측정하여 인장 물성 계산에 반영하였다. 박막의 두께는 시편에서 무작위로 다섯 지점을 측정하여 평균값을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

스퍼터링 방식으로 증착된 Mo 나노 박막의 인장 실험 결과를 응력-변형률 선도(stress-strain curve)로 Fig. 4에 나타내었다. AFM으로 측정된 Mo 박막의 평균 두께는 305 ±2 nm이었으며, Mo 박막의 탄성계수는 217±3 GPa, 인장강도는 611±21 MPa, 연신율은 0.31±0.002%로 측정되었다. 그래프에서 확인할 수 있듯, 파단 전까지 소성 변형이 거의 없는 탄성 거동을 보였으며, Fig. 4에 삽입된 시편의 파단 이미지에서 취성 박막의 특징인 다발성의 균열 진전(crack branching) 현상을 확인하였다. 금속 재료임에도 상기한 것과 같은 취성 거동을 보이는 이유는 막의 두께가 매우 얇기 때문이다. 탄성계수의 경우, 기존 문헌값(325 GPa)<sup>9)</sup>과 비교하여 비교적 낮은 수치를 보였는데, 이는 증착 조건(증착 파워 및 압력)이 문헌과 달랐기 때문이라고 예상되며 증착 조건에 따라서 기계적 물성이 크게 달라질 수 있다는 점을 시사한다.

다음으로 스퍼터링 증착 MoTi 나노 박막의 응력-변형률 선도를 Fig. 5에 나타내었다. MoTi 박막의 두께는 110 ±1 nm로 측정되었다. Mo 박막과 마찬가지로, 파단 전까지 탄성 거동을 보였으며, Fig. 5에 삽입된 이미지와 같이 다발성 균열 진전도 확인할 수 있었다. 인장 물성을 분석한 결과, 박막의 탄성계수는 98±3 GPa, 인장강도는 253 ±17 MPa, 연신율은 0.26±0.02%로 측정되었다. 본 연구에서 측정된 Mo 박막의 탄성 계수가 217 GPa, 문헌에서 보고된 Ti 박막의 탄성계수가 약 90 GPa<sup>10)</sup>인 것을 고려하

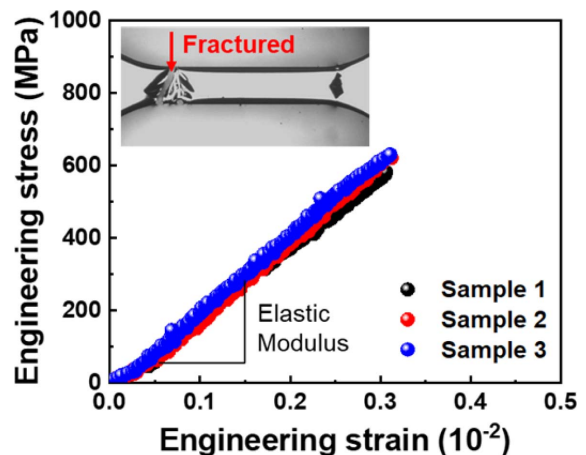


Fig. 4. Stress-strain curves of 305 nm-thick Mo nano-thin films.

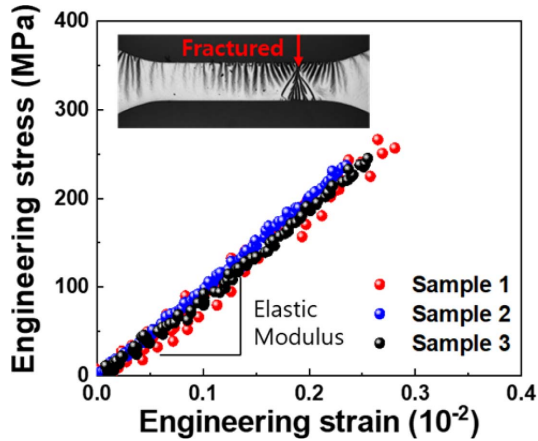


Fig. 5. Stress-strain curves of 110 nm-thick MoTi nano-thin films.

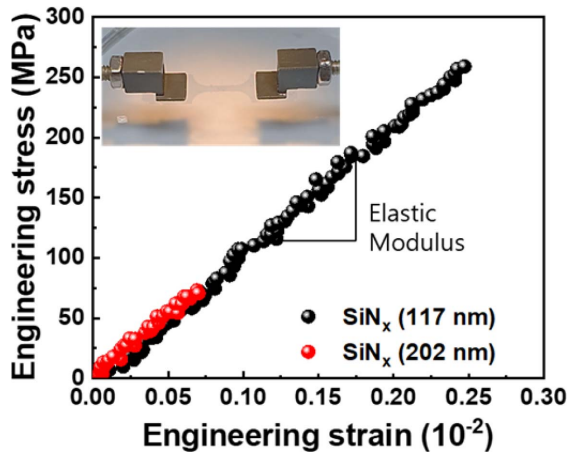


Fig. 6. Stress-strain curves of 117 nm and 202 nm-thick SiN<sub>x</sub> thin films.

였을 때, MoTi 박막의 탄성계수는 그 사이값이므로 혼합 법칙(rule of mixture)에 의해 측정값이 합리적임을 알 수 있다.

Fig. 6에 SiN<sub>x</sub> 나노 박막의 두께에 따른 대표 응력-변형률 선도를 나타내었으며, 목표 두께 100 nm, 200 nm로 증착된 SiN<sub>x</sub> 박막의 실제 두께는 각각 117 nm, 202±3 nm이었다. 인장 실험 결과, 117 nm 두께 SiN<sub>x</sub> 박막의 탄성 계수와 인장 강도, 연신율은 각각 110 GPa, 259 MPa, 0.25%로 측정되었으며 202 nm 두께 SiN<sub>x</sub> 박막의 경우는 각각 119±6 GPa, 74±7 MPa, 0.063±0.005%로 측정되었다. 측정된 탄성계수는 PECVD 증착 SiN<sub>x</sub> 박막의 탄성 계수에 관해 기존에 보고된 문헌값(109-153 GPa)<sup>11</sup>과 큰 차이가 없는 수준이었다. 300 nm 두께의 SiN<sub>x</sub> 박막은 매우 취성하여 실험이 불가능하였기에 SiN<sub>x</sub> 박막의 인장 강도와 연신율은 두께가 증가함에 따라 크게 감소한다는 것을 유추할 수 있었다. 그 첫 번째 원인으로, 기존 문헌에서 제시한 것과 같이 세라믹 박막의 두께가 증가할수록 내재하는 결함의 빈도가 높아지기 때문에 더 낮은 인장 응력에서 파단이 일어나는 것으로 생각할 수 있다.<sup>12</sup> 두 번째로, Fig. 7의 광학현미경(Optical Microscope, OM) 사진에

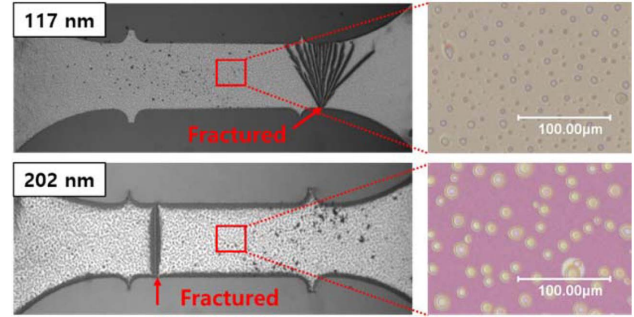


Fig. 7. CCD camera images of the fractured 117 nm and 202 nm-thick SiN<sub>x</sub> thin films and OM images of each surface showing blistering phenomenon.

서 볼 수 있듯, SiN<sub>x</sub> 박막 표면에 존재하는 블리스터링(blistering)의 증가에 따른 기계적 특성 저하도 중요한 원인으로 생각된다. 블리스터링 현상은 SiN<sub>x</sub> 박막의 PECVD 증착 시 사용되는 전구체(precursor)인 실란(silane, SiH<sub>4</sub>) 기체와 암모니아(ammonia, NH<sub>3</sub>) 기체의 반응 후 생성되는 수소 기체가 열처리 시 박막 외부로 확산되며 생기는 현상이다.<sup>13</sup> 각각의 요인이 SiN<sub>x</sub> 박막의 연신율과 인장 강도 감소에 미친 영향에 대해서는 후속 연구를 통해 더욱 고찰이 필요할 것으로 생각된다.

나아가 Fig. 7의 파단 이미지에서 확인할 수 있듯, 202 nm 두께의 SiN<sub>x</sub> 박막은 117 nm 두께의 박막과 다르게 단일 경로로 균열이 진행하였으며 이를 통해 파단 시 소산되는 에너지가 적었음을 알 수 있다. 따라서 SiN<sub>x</sub> 박막으로 봉지층의 설계 시, 상대적으로 더 얇은 두께의 SiN<sub>x</sub> 박막을 활용하는 것이 기계적으로 강건하다. 하지만, 봉지막의 본 기능은 외부 환경으로부터 내부 소자를 보호해야 하는 것이므로, 이를 함께 고려하여 최적 두께를 찾는 것이 중요할 것이다.

Fig. 8에는 본 연구에서 측정한 인장 물성을 정리하여 그래프로 나타내었다. Mo 박막과 MoTi 박막을 비교하였을 때는 Mo 박막의 기계적 특성이 더욱 우수했으며, 따라서 기계적으로 더 신뢰성이 높은 게이트 전극 물질은 Mo라고 판단된다. SiN<sub>x</sub> 박막은 동일 증착 조건에서 두께에 따른 인장 강도의 차이가 거의 없었지만 낮은 두께일수록 연신율과 인장 강도가 우수하였다. 현재 롤러블, 폴더블 디스플레이에 사용되는 박막의 공정 조건과 두께는 매우 다양하기 때문에 본 연구 결과는 공정 조건 및 두께에 따라 박막의 기계적 물성이 크게 달라진다는 점을 실험적으로 확인하여 제시하였다는 점에서 큰 의의를 가진다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 물 표면 플랫폼 기반 나노 박막 인장 시험기를 이용하여 롤러블, 폴더블 OLED 디스플레이 내 스퍼터링, PECVD 증착 박막 소재들의 인장 물성을 정량적으로 측정하였다. 그 결과 스퍼터링으로 증착된 Mo 박

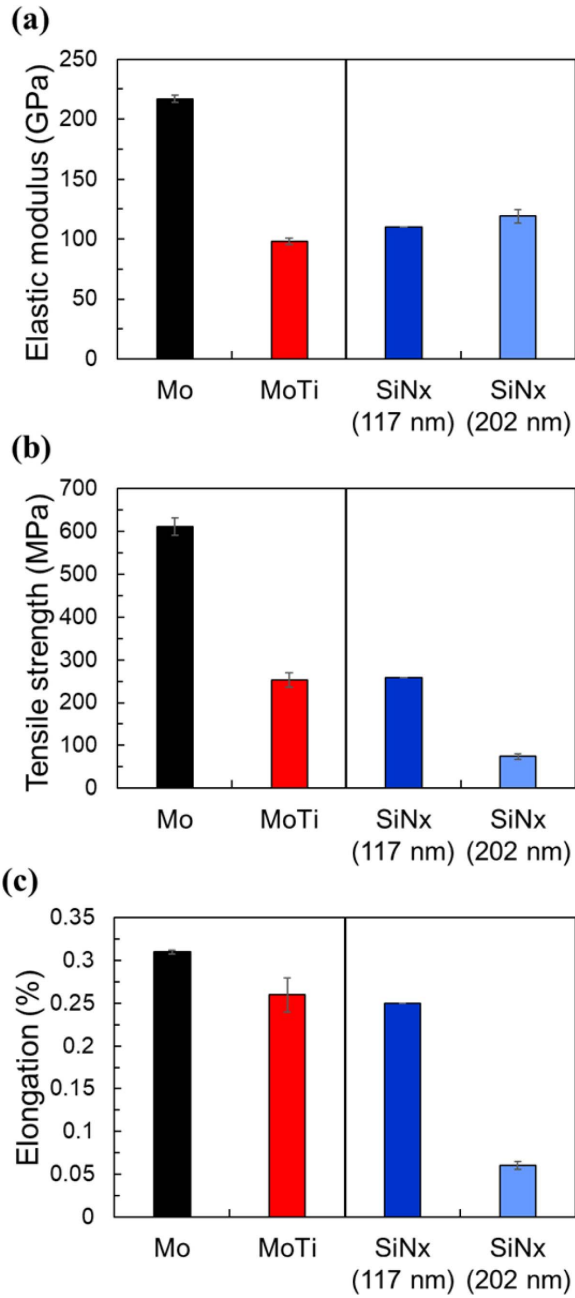


Fig. 8. Tensile properties of the thin films for flexible OLED displays. (a) Elastic modulus. (b) Tensile strength. (c) Elongation.

막의 탄성계수는  $217 \pm 3$  GPa, 인장 강도는  $611 \pm 21$  MPa, 연신율은  $0.31 \pm 0.002\%$ 로 측정되었으며, MoTi 박막의 탄성계수는  $98 \pm 3$  GPa, 인장 강도는  $253 \pm 17$  MPa, 연신율은  $0.26 \pm 0.02\%$ 로 측정되었다. 또한 PECVD로 증착된 117 nm 두께 SiN<sub>x</sub> 박막의 탄성 계수와 인장 강도, 연신율은 각각 110 GPa, 259 MPa, 0.25%로 측정되었으며 202 nm 두께 SiN<sub>x</sub> 박막의 경우는 각각  $119 \pm 6$  GPa,  $74 \pm 7$  MPa,  $0.063 \pm 0.005\%$ 로 측정되었다. 본 연구에서 측정된 인장 물성 결과값은 기계적 관점에서 최적 공정 조건 및 증착 두께 모색에 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 플렉서블, 웨어러블 전자기기의 응력 해석 시뮬레이션 모델링에 활용될 수

있다. 궁극적으로는 측정된 물성 데이터 베이스를 활용하여 롤러블, 폴더블 OLED 디스플레이의 기계적 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 (주)LG Display의 LGD-KAIST Incubation Program의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

### References

1. Y. F. Liu, J. Feng, Y. G. Bi, D. Yin, and H. B. Sun, "Recent Developments in Flexible Organic Light-Emitting Devices", *Advanced Materials Technologies*, 4(1), 1800371 (2019).
2. B. S. Ma, W. Jo, W. Kim, and T. S. Kim, "Mechanical Modeling of Rollable OLED Display Apparatus Considering Spring Component", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 27(2), 19 (2020).
3. M. K. Lee, I. W. Suh, H. S. Jung, J. H. Lee, and S. H. Choa, "Warping of Flexible OLED under High Temperature Reliability Test", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 23(1), 17 (2016).
4. S. H. Choa, Y. M. Jang, and H. S. Lee, "Effects of Encapsulation Layer on Center Crack and Fracture of Thin Silicon Chip using Numerical Analysis", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(1), 1 (2018).
5. A. Kleinbichler, M. Bartosik, B. Völker, and M. J. Cordill, "Thin Film Adhesion of Flexible Electronics Influenced by Interlayers", *Advanced Engineering Materials*, 19(4), 1600665 (2017).
6. O. Kraft and C. A. Volkert, "Mechanical Testing of Thin Films and Small Structures", *Advanced Engineering Materials*, 3(3), 99 (2001).
7. J. H. Kim, A. Nizami, Y. Hwangbo, B. Jang, H. Lee, Woo, C. S. Hyun, and T. S. Kim, "Tensile testing of ultra-thin films on water surface", *Nature communications*, 4(1), 1 (2013).
8. T. C. Chu, W. F. Ranson, M. A. Sutton, and W. H. Peters, "Applications of Digital-image-correlation Techniques to Experimental Mechanics", *Experimental Mechanics*, 25(3), 232 (1985).
9. X. Dai, A. Zhou, L. Feng, Y. Wang, J. Xu, and J. Li, "Molybdenum thin films with low resistivity and superior adhesion deposited by radio-frequency magnetron sputtering at elevated temperature", *Thin Solid Films*, 567(30), 64 (2014).
10. T. Tsuchiya, M. Hirata, and N. Chiba, "Young's modulus, fracture strain, and tensile strength of sputtered titanium thin films", *Thin Solid Films*, 484(1-2), 245 (2005).
11. Z. Gan, C. Wang, and Z. Chen, "Material Structure and Mechanical Properties of Silicon Nitride and Silicon Oxynitride Thin Films Deposited by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition", *Surfaces*, 1(1), 59 (2018).
12. S. Lee, J. H. Kim, Y. S. Kim, T. Ohba, and T. S. Kim, "Effects of Thickness and Crystallographic Orientation on Tensile Properties of Thinned Silicon Wafers", *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 10(2), 296 (2020).
13. S. S. Sandeep, K. Warikoo, and A. Kottantharayil, "Optimization of ICP-CVD silicon nitride for Si solar cell passivation", *Proc. 38<sup>th</sup> IEEE Photovolt. Special. Conf.*, Austin, TX, USA, 1102 (2012).