J. Microelectron. Packag. Soc., 28(3), 33-38 (2021)
Print ISSN 1226-9360 Online ISSN 2287-7525
https://doi.org/10.6117/kmeps.2021.28.3.033

유기 나노 보강층을 활용한 유연 디스플레이용 절연막의 기계적 물성 평가

오승진 · 마부수 · 양찬희 · 송 명 · 김택수†
KAIST 기계공학과

Mechanical Property Evaluation of Dielectric Thin Films for Flexible Displays using Organic Nano-Support-Layer

Seung Jin Oh, Boo Soo Ma, Chanhee Yang, Myoung Song, and Taek-Soo Kim†
Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)
(Received September 13, 2021: Corrected September 24, 2021: Accepted September 30, 2021)

초 록: 최근 유연 디스플레이에 관한 대중의 관심이 증대됨에 따라 롤러블(rollable), 폴더블(foldable) 디스플레이와 같은 우수한 폼 팩터(form factor)를 지닌 차세대 유연(flexible) 디스플레이가 주목받고 있다. 유연 디스플레이의 기계적 신뢰성 확보 측면에서, 내부 절연막으로 활용되는 실리콘 질화물(SiN_x) 박막은 구동 중 발생하는 응력에 매우 취약하므로 기계적 물성을 정확히 파악하여 파손을 예측하고 패널의 전기적 단락을 방지하는 것이 중요하다. 본 논문에서는, ~130 nm, ~320 nm 두께의 SiN_x 박막 박막 상부에 ~190 nm 두께의 유기 나노 보강층(PMMA, PS, P3HT)을 코팅하여 이중층 구조로 인장함으로써 매우 취성한 SiN_x 박막의 탄성 계수와 인장 강도 및 연신율을 측정하는 데 성공하였다. 챔버 압력 및 증착 파워를 조절한 공정 조건(A: 1250 mTorr, 450 W/B: 1000 mTorr, 600 W/C: 750 mTorr, 700 W)을 통해 제작된 ~130 nm SiN_x 의 탄성계수는 A: 76.6±3.5, B: 85.8±4.6, C: 117.4±6.5 GPa로, ~320 nm SiN_x는 A: 100.1±12.9, B: 117.9±9.7, C: 159.6 GPa로 측정되었다. 결과적으로, 동일 공정 조건 하에서 SiN_x 박막의 두께가 증가할수록 탄성 계수가 증가하는 경향을 확인하였으며, 유기 나노 보강층을 활용한 인장 시험법은 파손되기 쉬운 취성 박막의 기계적 물성을 높은 정밀도로 측정하는 데 효과적이었다. 본 연구에서 개발된 방법은, 취약한 디스플레이용 박막의 정량적인 기계적 물성 파악을 가능케하여 강건한 롤러블, 폴더블 디스플레이의 설계에 이바지할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract: Recently, rollable and foldable displays are attracting great attention in the flexible display market due to their excellent form factor. To predict and prevent the mechanical failure of the display panels, it is essential to accurately understand the mechanical properties of brittle SiN_x thin films, which have been used as an insulating film in flexible displays. In this study, tensile properties of the ~130 nm- and ~320 nm-thick SiN_x thin films were successfully measured by coating a ~190 nm-thick organic nano-support-layer (PMMA, PS, P3HT) on the fragile SiN_x thin films and stretching the films as a bilayer state. Young's modulus values of the ~130 nm and ~320 nm SiN_x thin films fabricated through the controlled chamber pressure and deposition power (A: 1250 mTorr, 450 W/B: 1000 mTorr, 600 W/C: 750 mTorr, 700 W) were calculated as A: 76.6±3.5, B: 85.8±4.6, C: 117.4±6.5 GPa and A: 100.1±12.9, B: 117.9±9.7, C: 159.6 GPa, respectively. As a result, Young's modulus of ~320 nm SiN_x thin films fabricated through the same deposition condition increased compared to the ~130 nm SiN_x thin films. The tensile testing method using the organic nano-support-layer was effective in the precise measurement of the mechanical properties of the brittle thin films. The method developed in this study can contribute to the robust design of the rollable and foldable displays by enabling quantitative measurement of mechanical properties of fragile thin films for flexible displays.

Keywords: Bilayer, Mechanical Property, Silicon Nitride, Tensile Test, Thin Film

1. 서 론

최근 유연 디스플레이의 연구 개발 및 상용화 동향은 고정형인 커브드(curved), 벤더블(bendable) 디스플레이를 넘어 롤러블(rollable), 폴더블(foldable) 등 우수한 폼 팩터(form-factor)를 지닌 차세대 디스플레이가 주목받고 있다.[1] 하지만 롤러블, 폴더블 디스플레이는 제작 공정 혹은 구동 과정에서 극심한 온습도 변화 및 기계적 변형을

†Corresponding author
E-mail: tskim1@kaist.ac.kr
© 2021, 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.

겪게 되며, 이는 기계적 신뢰성 문제를 일으키는 주된 원인이다. 특히, 디스플레이 패널 내부 박막에 발생한 응력은 박막의 영구 변형, 박리, 균열 등의 파손을 야기하여 유연 디스플레이의 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있다.[2,3] 대표적으로, 유연 디스플레이 패널의 절연막으로 활용되는 수백 나노미터 두께의 얇은 실리콘 질화물(silicon nitride, SiN_x) 박막은 세라믹 소재의 특성 상 매우 취약하여 기계적 변형 및 충격에 쉽게 파손된다.[4, 5] 따라서 SiN_x 박막의 기계적 물성을 정확히 파악하여 파손을 예측하고 패널의 전기적 단락을 방지하는 것은 매우 중요하다.

SiN_x 나노 박막의 기계적 물성을 파악하기 위한 기존 연구로는 간접적 측정법인 나노인덴테이션(nanoindentation)이 대표적으로 활용되어 왔다.[6] 하지만, 해당 측정법은 정확한 인장 강도나 연신율을 측정할 수 없으며 기판 물성에 영향을 받은 탄성계수 값이 측정될 수 있다는 한계가 있다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위하여, 기판이 없는 상태의 나노 박막을 물 표면에서 인장함으로써 유연 디스플레이 소자의 배선과 절연막으로 활용되는 금속 및 세라믹 박막의 인장 물성을 정량적으로 측정한 연구가 이루어졌다.[7] 하지만, 박막 내에 극심한 인장 잔류응력이 걸린 SiN_x(~130 nm) 박막 혹은 고유의 연신율이 매우 낮아 작은 변형에도 취약한 SiN_x(~320 nm) 박막은 물 표면으로 온전히 전사하여 자유 지지 상태로 만드는 것이 매우 도전적이었다.

따라서 본 연구에서는, 나노미터 스케일의 유기 보강층을 코팅하여 이중층 상태로 박막을 물 표면에 전사하고 이를 인장 시험에 적용할 수 있는 효율적인 방법을 개발하였다. 상기한 방법을 적용했을 때, 잔류응력이 심하거나 매우 취성하여 직접 인장 시험을 수행하기 어려운 박막에 대해서도 정밀하게 인장 실험 수행이 가능하였다. 분석하고자 하는 박막의 탄성 계수 및 인장 강도는 혼합법칙(rule of mixture)를 활용하여 계산이 가능하였으며 인장 시험의 장점인 연신율 파악도 가능하였다. 본 연구에서 개발한 이중층 인장시험법은 고온에서 증착되어 잔류응력이 크게 인가된 박막 혹은 매우 취성하여 인장 시험이 어려운 다양한 세라믹 박막들의 기계적 물성 연구에 이바지할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 실험방법

2.1. 시편 준비 방법

시편은 Fig. 1와 같이 SiN_x(~130, ~320 nm)/Cu(500 nm)/SiO_2(300 nm)/Si(525 μm)의 구조로 제작하였으며, SiN_x 박막은 PECVD 공정, 구리(Cu)층은 스퍼터링(sputtering), 실리콘 산화막(SiO_2)은 습식 산화(wet oxidation) 공정으로 증착되었다(Fig. 1(a)). 증착된 ~130, ~320 nm SiN_x 박막의 실측 두께는 각각 134.1±4.3, 321.1±13.6 nm이었다. 본 연구에서 분석한 SiN_x 박막의 증착 조건은 A, B, C로 각각 증착 압력 및 파워를 1250, 1000, 750 mTorr 및 450, 600, 700 W로 조절하여 SiN_x 박막에 인장, 표준, 압축 잔류응력이 인가되는 조건이었다. 박막 증착 후에는, 펨토초 레이저(femtosecond laser)를 이용하여 SiN_x/Cu층을 dog-bone 형상으로 가공하였다(Fig. 1(b)). Dog-bone 형상으로의 가공은 인장 시 그립(grip) 부분에서의 파단을 방지하고 시편의 목(neck) 부분에 균일한 응력을 가해지도록 할 수 있다. 가공 후, SiN_x 박막 표면에 4000 rpm, 40 s 조건의 스핀 코팅으로 ~190 nm 두께의 PMMA(950 PMMA A4, Microchem, USA) 보강층을 성막하였다(Fig. 1(c)). 이후, 자유 지지 상태의 PMMA/SiN_x 박막을 준비하기 위하여 dog-bone 형상으로 가공된 시편을 물 표면으로 박리한 후, 구리 식각액(Cu etchant)으로 전사하여 Cu 희생층을 제거하였다(Fig. 1(d, e)). 시편 적층 구조 상 Cu/SiO_2의 계면 접합력이 무척 약하기 때문에 박막의 손상 없이 물 표면에서 해당 계면의 박리가 가능하였다.

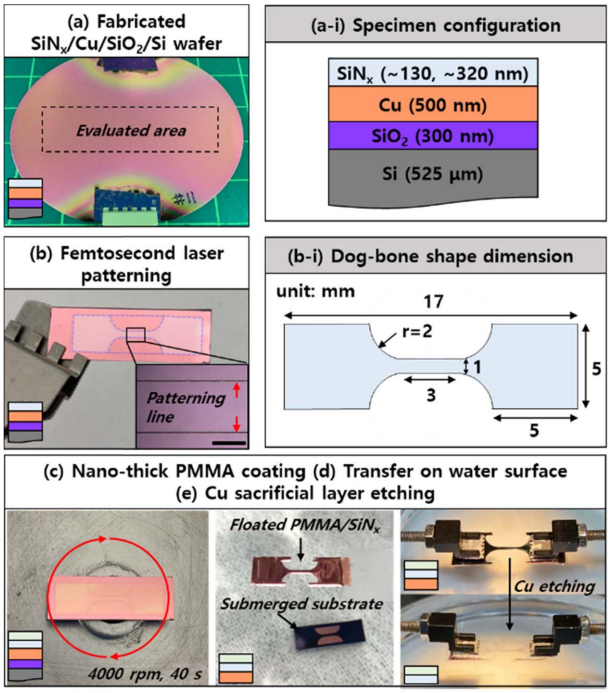

Fig. 1. Procedure for specimen preparation. (a) Deposition of thin films. (b) Dog-bone patterning using femtosecond laser (scale bar=500 μm). (c) Spin coating of PMMA layer. (d) Separation of PMMA/Cu layer. (e) Etching of Cu layer.

2.2. 물 표면 자유 지지 박막 인장 시험법

본 연구에서는 SiN_x 박막의 인장 시험을 위해 물 표면 플랫폼에서 나노 박막을 자유 지지 상태로 인장하는 물 인장 시험법을 활용하였다.[8] 장비의 구성은 Fig. 2에 나타내었다. 시편에 변위(displacement)를 가함과 동시에 시편이 견디는 하중(load)을 측정하기 위하여 리니어 액추에이터(M-111DG, PI, Germany) 및 로드셀(LTS-50GA, KYOWA, Japan)을 배치하였다. 나아가, 시편에 가해지는 변형률을 실시간으로 측정하기 위하여 디지털 이미지 상관법(Digital Image Correlation, DIC) 을 활용해 패턴을 추

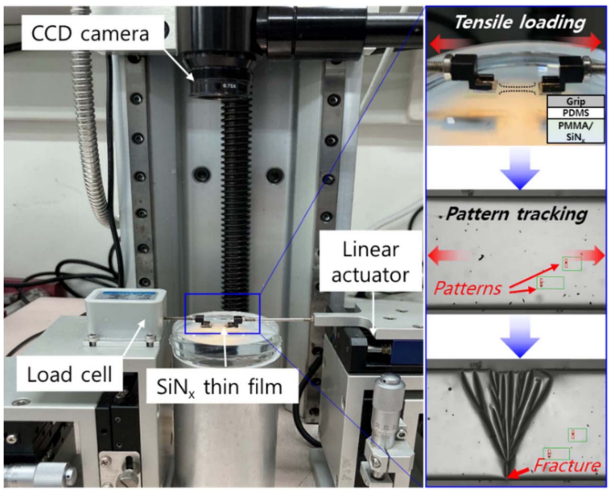

Fig. 2. Experimental setup. Tensile loading was projected horizontally until fracture occurred. Strain was measured by tracking patterns using the CCD camera.

적하였으며, 이를 위한 CCD 카메라를 시편의 면외방향(out-of-plane)으로 배치하였다.[9] DIC 기법을 활용하여 변형률을 측정하기 위한 패턴으로는 마이크로미터 스케일의 흑연 입자(graphite particle)를 시편 표면에 분산시켰다. 이 때, 흑연 입자 패턴은 시편 표면과의 반데르발스 힘(van der Waals force) 및 정전기력(electrostatic force)으로 부착되어 시편의 실제 변형을 추적할 수 있다. 물 인장 시험 과정은 우측의 사진와 같이 고분자인 폴리디메틸실록산(Polydimethyl-siloxane, PDMS)이 코팅된 그립을 자유 지지 상태의 시편 상부에 반데르발스 힘으로 부착한 후, 지면과 수평 방향의 변위를 가하여 인장 실험을 수행하였다. 인장 실험 시 리니어 액추에이터의 속도는 0.6 μm/s로 통제하였으며 시편에 분당 ~0.3의 변형률이 가해졌다. 해당 속도에서 물 표면의 항력(drag force)은 매우 작아 측정 값에 영향을 미치지 못하는 수준이었다.

2.3. 혼합 법칙 (rule of mixture)

혼합 법칙에 의하여, PMMA/SiN_x 이중층 구조의 탄성 계수는 이를 구성하는 PMMA 및 SiN_x 의 탄성 계수 및 각 층의 두께에 의해 결정된다. 아래의 식과 같이 SiN_x 단일 박막의 탄성 계수(E_{SiNx})를 계산하기 위해서는, PMMA/SiN_x 이중층의 탄성 계수($E_{PMMA/SiNx}$), PMMA 단일 박막의 탄성 계수(E_{PMMA}), 그리고 PMMA 및 SiN_x 박막의 두께(t_{PMMA}, t_{SiNx}) 측정을 통해 계산할 수 있다.[10,11]

$$E_{PMMA/SiN_x} = E_{PMMA} \cdot \frac{t_{PMMA}}{t_{PMMA/SiN_x}} + E_{SiN_x} \cdot \frac{t_{SiN_x}}{t_{PMMA/SiN_x}}$$

Fig. 3과 같이 PMMA/SiN_x이중층 및 PMMA 단일 박막의 탄성 계수는 물 인장 시험을 통해 직접 측정하였다. 또한, PMMA 및 SiN_x 박막의 두께는 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope, AFM)을 이용하여 정밀하게 측정되었다. 박막의 두께는 dog-bone 시편의 다섯 지점을

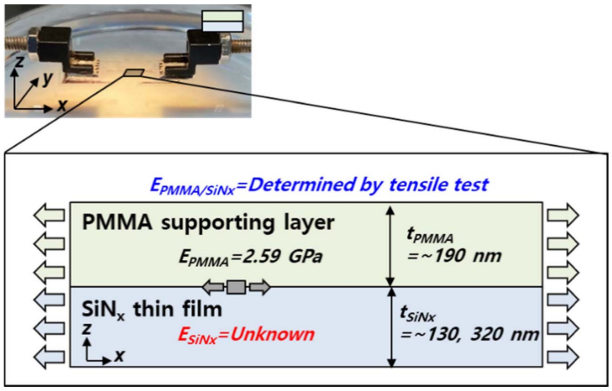

Fig. 3. Configuration of the PMMA/SiN_x bilayer structure.

무작위로 측정하여 평균값을 반영하였다. 각 시편 내에서 측정된 SiN_x 박막 두께의 편차는 시편 두께의 3% 이내 수준으로 균일하여 혼합 법칙의 적용을 통한 탄성 계수 확보가 가능하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 다양한 조건을 통해 증착된 SiN_x 박막 중, ~130 nm 두께 박막에 인장 잔류응력이 인가된 박막의 경우(조건 A) Cu 희생층을 식각할 때 외부 충격 없이도 박막에 균열이 생기는 문제가 발생하였다. 또한, ~320 nm SiN_x 박막의 경우에는 기계적으로 매우 취약하여 모든 조건(A, B, C)에서 파손이 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 SiN_x 박막 표면에 유기 보강층을 성막하였으며 Fig. 4(a)와 같이 시편 준비 단계에서 박막의 파손을 방지할 수 있었다. 유기막으로는 PMMA를 선정하였으며, 추가적인 잔류응력이 발생하는 것을 방지하기 위하여 상온에서 스

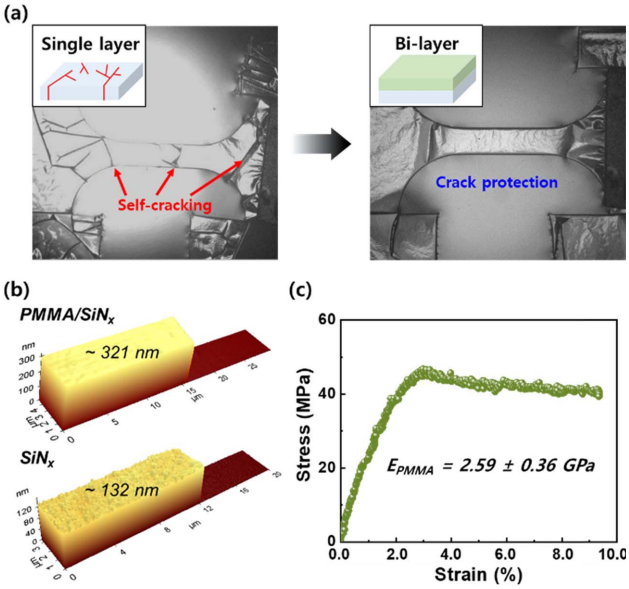

Fig. 4. (a) Crack protection through coating PMMA support layer. (b) Thickness measurement results using AFM. (c) Stress-strain curve of the PMMA thin film.

핀 코팅 방식으로 ~190 nm 두께로 성막하였다(Fig. 4(b)). 이중층 상태로 인장 시험을 진행하였을 때, SiN_x 박막의 기계적 물성을 계산하기 위한 PMMA 단일막의 탄성 계수는 Fig. 4(c)와 같이 2.59±0.36 GPa로 측정되었으며 이는 기존 문헌값과 거의 유사하였다.[12] 응력–변형률 선도에서PMMA 단일막은 ~2%의 연신율까지도 탄성 거동을 보였으므로, 이중층 상태로 인장 실험 시 PMMA 막은 탄성 거동 영역 안에서 변형되었음을 알 수 있다.

유기 나노 보강층을 활용하여 취약한 SiN_x 박막을 지지하는 이중층 인장 시험법의 실효성을 확인하기 위해 단일 SiN_x 박막 측정과 비교하여 정합성을 가지는지 검증하였다. 단일 SiN_x 박막으로 인장 물성 측정이 가능했던 B, C 조건에 대하여 이중층 인장 시험법을 활용하였을 때와 단일막의 시험 결과를 비교해보고자 하였다. 이중층 인장 시험법을 통해 SiN_x 박막의 탄성 계수를 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. 조건 A, B, C를 통해 증착된 SiN_x 박막의 탄성계수는 각각 76.6±3.5 GPa, 85.8±4.6 GPa, 그리고 117.4±6.5 GPa로 계산되었다. B, C 조건 SiN_x 단일 박막의 탄성 계수는 91.7±4.2 GPa, 112.0±10.0 GPa로 측정되었고 계산값과 매우 근접함을 알 수 있다. 또한, 조건당 세 개의 샘플을 측정하였을 때 샘플 간 편차도 적고 측정값이 기존 문헌 값 범위 내에 있어 이중층 시험법의 타당성을 검증할 수 있었다.[6,13] 기존에 이중층 인장 시험에 관한 연구는 다수 이루어졌지만, 대부분 박막보다 두꺼운 기판 위에서 실험하여 박막의 탄성 계수를 높은 정확도로 추출해내기 어려웠다.[10] 하지만, 본 연구에서는 강성이 매우 작은 나노미터 스케일의 PMMA 박막을 활용함으로써 SiN_x 박막의 물성을 높은 정확도로 계산해낼 수 있었다고 생각된다.

추가로, 유기막의 종류 및 물성에 따라 측정값에 영향이 있는지에 대한 검증을 목적으로 PMMA, PS, 그리고 P3HT의 세 종류 유기막을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 각 유기막의 탄성 계수는 ~2.6 GPa, ~3.1 GPa, 그리고 ~0.1 GPa로, 인접막의 탄성계수에 따라 측정 결과에 차이가 있는지도 검증을 진행하였다. 조건 B로 동일하게 증착된 SiN_x 박막의 탄성 계수 측정 결과는 유기막 종류에 따라 86±5 GPa, 85±15 GPa, 그리고 96±2 GPa로 큰 차이가 없이 측정됨을 확인하였다. 따라서 이중층 시험법은 기계적으로 취약한 박막의 탄성 계수를 정확히 측정하기 위한 효율적이고 정확성 높은 방법으로 판단된다. 다만, 연신율은 유기막 종류에 따라 0.087±0.026%, 0.112±0.024%, 그리고 0.274±0.108%이었으며, 인장 강도는 79.2±18.1 MPa, 93.2±20.7 MPa, 그리고 227.5±97.5 MPa로 유기막의 종류에 따라 차이가 있음을 확인하였다. 특히, P3HT를 활용하였을 때는 PMMA, PS를 활용하였을 때와 비교하여 연신율 및 인장 강도의 편차가 매우 컸다. 이는 P3HT/SiN_x 박막간의 젖음(wetting) 특성이 PMMA/SiN_x 및 PS/SiN_x 박막 간의 젖음 특성보다 좋지 못하여 성막된 유기막의 균일도가 떨어졌기 때문으로 추측된다. 차이가 발생하는 메커니즘에 관해 정확한 규명을 하기 위해서는, 후속 연구가 필요할 것으로 생각되며 유기막의 탄성계수 및 파괴 인성과도 큰 연관이 있을 것으로 예상된다.[14] 결과적으로, Fig. 6의 실험 결과는 실제 디스플레이 소자 공정 시 SiN_x 박막의 인접막의 종류 혹은 특성에 따라 다층 막의 인장 특성이 달라질 수 있음을 시사한다.

~320 nm SiN_x 박막의 인장 시험 결과는 Fig. 7과 같다. ~320 nm SiN_x 박막의 경우, 물 표면으로 박리 시 매우 취약하여 파손되었기 때문에 조건 A, B, C로 증착된 박막 모두 PMMA 이중층을 활용하여 측정을 진행하였다. Fig. 7(a)는 증착 조건 별 탄성 계수를 보여주며, 조건 A, B, C

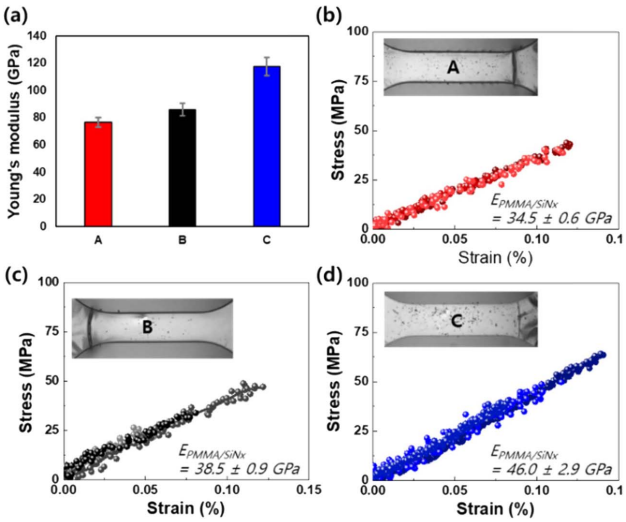

Fig. 5. Bilayer(PMMA/SiN_x) tensile test results for ~130 nm-thick SiN_x thin films. (a) Young's modulus values. (b-d) Stress-strain curve of the PMMA/SiN_x bilayer films deposited by condition A, B, and C.

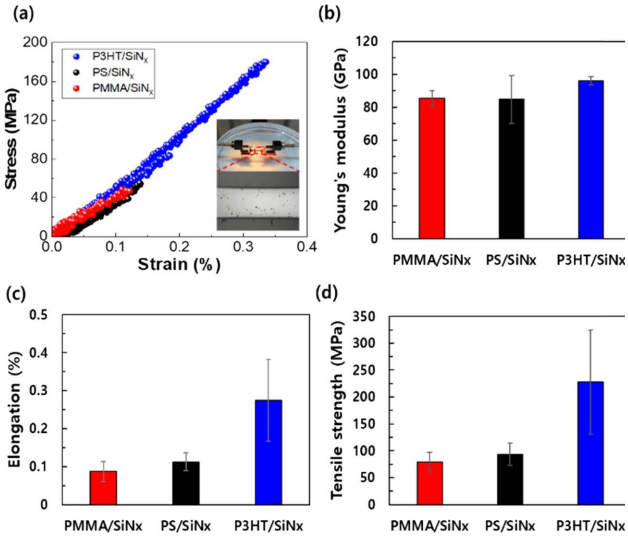

Fig. 6. Bilayer tensile test results for ~130 nm-thick SiN_x thin films using PMMA, PS, and P3HT nano-support-layer. (a) Stress-strain curves. (b-d) Young's modulus, elongation, and tensile strength values.

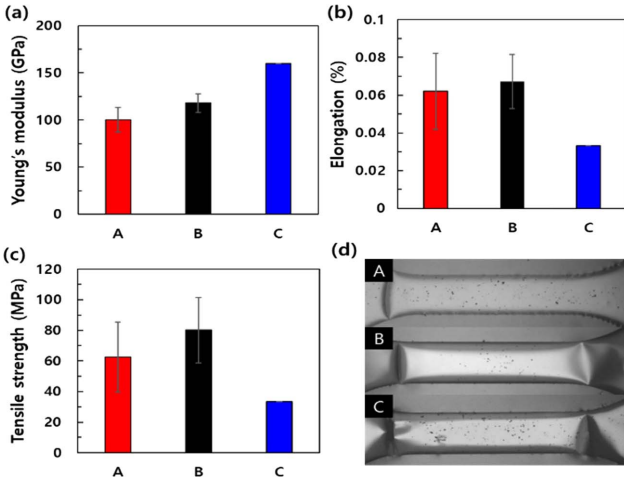

Fig. 7. Bilayer tensile test results (~320 nm-thick SiN_x). (a-c) Young's modulus, elongation, and tensile strength values. (d) Fracture images.

에 해당하는 탄성계수는 각각 100.1±12.9 GPa, 117.9±9.7 GPa, 그리고 159.6 GPa로 증가하는 경향성을 나타냈다. 이는 앞서 제시하였던 ~130 nm SiN_x 박막의 증착 조건 별 탄성 계수의 경향성과 동일하였다. 또한, ~130 nm SiN_x 박막과 비교하여 전체적으로 탄성 계수가 증가하였음을 알 수 있다. 따라서, 증착 조건 A, B, C 순서로, 그리고 두께가 두꺼워질수록 SiN_x 박막의 탄성 계수가 증가함을 확인하였다. 한편, Fig. 7(b, c)는 ~320 nm SiN_x 박막의 연신율 및 인장 강도를 나타낸다. ~320 nm SiN_x 박막의 경우 연신율 및 인장 강도가 0.062±0.020%, 0.067±0.014%, 그리고 0.033% 및 62.5±22.8 MPa, 80.1±21.4 MPa, 그리고 33.4 MPa로, 유기막의 보강에도 매우 낮게 측정되었다. 이는 유기 나노 보강층의 강성이 매우 작아 이중층의 연신율이 SiN_x 박막의 파단에 지배적으로 영향을 받았음을 의미한다. 또한, 증착 조건 별 경향성은 뚜렷하게 나타나지 않았으나 ~130 nm SiN_x 박막에 비하여 전체적으로 외부 하중에 취약함을 알 수 있었다. 나아가, 연신율 및 인장 강도는 탄성 계수와 비교하여 큰 편차를 보였는데, 이는 취성 박막의 특성 상 성막된 시편의 균일도보다 각 시편에 포함된 치명적인 결함(critical defect)으로부터의 균열 전파가 연신율 및 인장강도를 결정짓기 때문이다. 따라서, 절연막 특성이 잘 유지되는 한에서 SiN_x 박막의 두께를 감소시키는 것이 박막 트랜지스터와 같은 디스플레이 내부 소자층의 기계적 신뢰성에 유리하게 작용할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 유기 나노 보강층을 활용한 물 인장 시험법을 통해 롤러블, 폴더블 등의 유연 디스플레이의 취약층 중 하나인 SiN_x 박막의 인장 물성을 정량적으로 측정하였다. PMMA 보강층을 적용해 측정한 A, B, C 총 세 조건으로 증착된 SiN_x(~130 nm)박막의 탄성 계수는 각각 76.6±3.5 GPa, 85.8±4.6 GPa, 그리고 117.4±6.5 GPa 이었다. 이 값은 단일 SiN_x 박막의 인장 시험을 통해 측정한 탄성 계수와 매우 근접하였다. 또한, 보강층의 종류를 PS, P3HT 등으로 변화시켰을 때에도 해당 측정법이 유효함을 확인하였다. 마지막으로, ~320 nm 두께 SiN_x 박막의 탄성계수는 각각 100.1±12.9 GPa, 117.9±9.7 GPa, 그리고 159.6 GPa 로 측정되었다. 따라서, SiN_x 박막의 탄성 계수는 증착 조건 A, B, C 순서 및 박막 두께의 증가에 따라 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 유기 나노 보강층 인장 시험법은 다양한 취약 박막의 기계적 물성 연구에 이바지할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 측정한 인장 물성 값은 기계적 관점에서 최적 공정 모색에 도움을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 유연 전자기기의 응력 해석 시뮬레이션 모델링에 활용되어 기계적 신뢰성 향상에 기여할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 ㈜LG Display의 LGD-KAIST Incubation Program의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다(C2020004052).

References

1. E. G. Jeong, J. H. Kwon, K. S. Kang, S. Y. Jeong, and K. C. Choi. "A review of highly reliable flexible encapsulation technologies towards rollable and foldable OLEDs", Journal of Information Display 21(1), 19 (2020).
2. M. -K. Lee, I. -W. Suh, H. -S. Jung, J. -H. Lee, and S. -H. Choa. "Warpage of Flexible OLED under High Temperature Reliability Test", J. Microelectron. Packag. Soc. 23(1) 17 (2016).
3. 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).
4. K. Kim, H. Luo, T. Zhu, O. N. Pierron, and S. Graham. "Influence of Polymer Substrate Damage on the Time Dependent Cracking of SiNx Barrier Films", Scientific Reports 8, 4560 (2018).
5. E. K. Park, S. Kim, J. Heo, and H. J. Kim. "Electrical evaluation of crack generation in SiN_x and SiO_xN_y thin-film encapsulation layers for OLED displays", Applied Surface Science 370(1), 126 (2016).
6. H. Huang, K. J. Winchester, A. Suvorova, B. R. Lawn, Y. Liu, X. Z. Hu, J. M. Dell, and L. Faraone. "Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films", Materials Science and Engineering A 435-436, 453 (2006).
7. S. J. Oh, B. S. Ma, H. J. Kim, C. Yang, T. -S. Kim. "Measurement of Mechanical Properties of Thin Film Materials for Flexible Displays", J. Microelectron. Packag. Soc. 27(3), 77 (2020).
8. 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).
9. 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).
10. O. Awartani, B. I. Lemanski, H. W. Ro, L. J. Richter, D. M. DeLongchamp, and B. T. O'Connor. "Correlating Stiffness, Ductility, and Morphology of Polymer:Fullerene Films for Solar Cell Applications", Advanced Energy Materials 3(3) 399 (2013).
11. X. Chen, B. L. Kirsch, R. Senter, S. H. Tolbert, and V. Gupta. "Tensile testing of thin films supported on compliant substrates", Mechanics of Materials 41(7), 839 (2009).
12. J. Chang, K. B. Toga, J. D. Paulsen, B. Menon, and T. P. Russell. "Thickness Dependence of the Young's Modulus of Polymer Thin Films", Macromolecules 51(17), 6764 (2018).
13. 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, 59(72) (2018).
14. T. Y. Tsui, A. J. McKerrow, and J. J. Vlassak. "Constraint Effects on Thin Film Channel Cracking Behavior", Journal of Materials Research 20(9), 2266 (2005).