

스퍼터링 공법으로 제작한 ITO 박막의 디지털 홀로그래피를 이용한 단차에 대한 측정

정현일*, 신주엽**, 박종현*, 정현철***, 김경석****,#

*조선대학교 일반대학원 기계시스템미래자동차공학과, **㈜하백, ***조선대학교 산학협력단
공동장비운영센터, ****조선대학교 공과대학 기계공학과

Measurement of Step Difference using Digital Holography of ITO Thin Film Fabricated by Sputtering Method

Hyun Il Jung*, Ju Yeop Shin**, Jong Hyun Park*, Hyunchul Jung***, Kyeong-suk Kim****,#

*Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering, Graduate School, Chosun UNIV.,

**Habaek Co.,Ltd.,

***Center for Scientific Instruments, Industry Academic Cooperation foundation, Chosun UNIV.,

****Dept. of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.

(Received 17 June 2021; received in revised form 16 July 2021; accepted 18 July 2021)

ABSTRACT

Indium tin oxide (ITO) transparent electrodes, which are used to manufacture organic light-emitting diodes, are used in light-emitting surface electrodes of display EL panels such as cell phones and TVs, liquid crystal panels, transparent switches, and plane heating elements. ITO is a major component that consists of indium and tin and is advantageous in terms of obtaining sheet resistance and light transmittance in a thin film. However, the optical performance of devices decreases with an increase in its thickness. A digital holography system was constructed and measured for the step measurement of the ITO thin film, and the reliability of the technique was verified by comparing the FE-SEM measurement results. The error rate of the step difference measurement was within $\pm 5\%$. This result demonstrated that this technique is useful for applications in advanced MEMS and NEMS industrial fields.

Key Words : ITO(인듐 주석 산화물), Sputtering Method(스퍼터링 공법), Digital Holography(디지털 홀로그래피), Measurement of Step Difference(단차 측정), Transmission(투과형)

1. 서 론

투명전도막(Transparent Conductive Oxide : TCO)

재료는 비저항이 $1 \times 10^{-3} \Omega/\text{cm}$ 이하, 면저항이 $10^3 \Omega/\text{sq}$ 이하로 전기전도성이 우수하고 380 ~ 780nm의 가시광선 영역에서의 투과율이 80% 이상 이라는 두 가지 성질을 만족시켜야 한다. 투명전극 재료는 디스플레이 산업에서 핵심 부품이라 할 수 있으며, 본 연구에서 사용한 인듐 주석 산화물

Corresponding Author : gsckim@chosun.ac.kr

Tel: -82-62-230-7282, Fax: -82-62-233-6423

(Indium Tin Oxide : ITO)은 대표적인 투명전극 재료이다. 일반적으로 90%의 In_2O_3 , 10%의 SnO_2 구성으로 이루어져 있다. ITO의 단점으로는 유연성이 낮다는 점, 주재료인 인듐이 고갈되어 가고 있는 유한자원이라는 점 때문에 가격이 나날이 비싸져 가고 있다는 점이 있다. 이와 같은 이유로 오랫동안 대체품 연구가 활발히 이루어져 왔으나, 투명도, 전기전도성, 강도, 온도 같은 전기적 및 광학적 특성이 가장 뛰어나 현재까지 가장 널리 쓰이는 투명전극 재료이다.^[1-2]

ITO 박막의 증착 방법으로는 주로 스퍼터링 공법이 쓰인다. 이것은 플라즈마 발생 시 생기는 이온에 의해 막을 형성하는 공법으로, 균일한 박막 증착과 고속 증착이 가능하다.^[3] ITO 뿐만 아닌 모든 TCO 는 디스플레이를 형성하는 박막층의 두께를 아는 것이 중요하다.

회로 고집적화를 위해서는 회로의 패턴, 높이 등에 대한 정확도와 균일성이 중요하다. 회로가 제대로 형성되지 않을 경우 투과율 불량, 단선 등의 여러 가지 불량으로 나타날 수 있기 때문이다. 패턴 검사를 위해 SEM(Scanning Electron Microscopy), AFM(Atomic Force Microscopy), Alpha step 등의 다양한 장비들이 사용되고 있다. 이 중, 접촉식의 경우, 접촉하는 팁이 약하고 접촉 시 시험편에 손상이 생길 위험이 있다. 반면 비 접촉식의 경우, 시험편에 손상없이 더 정확한 실험값을 얻을 수 있다. 그러나, 고가의 장비라는 점, 시편의 크기에 영향을 받는다는 점, 영상을 취합하여 표현하기 때문에 데이터 처리 속도가 느리다는 단점도 있다.^[4]

그리스 어원에서 홀로그래피는 완전한(Holos) 정보(Gramma) 기록을 의미한다. 홀로그램은 대상체로부터 빛의 크기, 위상 분포를 기록하게 된다. 디지털 홀로그래피는 이미지를 재생하기 위해 가간섭성 광원을 사용하며, 이를 통해 광파의 위상 정보를 기록 또는 재생하는 기술이다. 또한, CCD(Charged Coupled Device) 카메라를 입력장치로 사용하여 실시간으로 홀로그램 데이터를 입력 받아 분석이 가능하다는 장점이 있다. 이전 홀로그래피 기술들과는 달리 편집과 데이터 압축 및 전송이 특히 용이하다고 할 수 있다.

ITO 투명 전극은 디스플레이 시장이 급속도로 성

장함에 있어서 수요가 증가하여 희소성이 극대화되고 있다. 이로 인해 최적화된 증착의 필요성이 크게 대두 된다. 본 논문에서는 디지털 홀로그래피의 측정 능력을 검증하고 나아가 교정용으로 사용하기 위해, 스퍼터링 공법으로 ITO 박막을 제작하여 실험하였다.

2. 실험 장비 및 내용

2.1 디지털 홀로그래피 시스템

ITO 박막과 같은 투과형 대상체에 대해서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, Mach-Zehnder 간섭계와 같은 투과형 디지털 홀로그래피 간섭계를 사용한다. Mach-Zehnder 간섭계의 원리는 레이저가 Spatial Filter를 통과 후 첫 번째 B.S에서 두 갈래로 나뉘게 된다. 물체파는 시험편을 투과하게 되고 기준파는 Mirror에 반사되어 두 번째 B.S에서 물체파와 기준파가 합쳐지게 된다. 합쳐지면서 간섭무늬가 CCD에 입사되어 홀로그램으로 저장된다.^[5-6]

본 논문에서는 ITO 증착 박막에 대한 단차 측정을 위해 Fig. 2와 같이 Laser, Spatial filter, Collimating lens, Iris, PZT actuator, Mirror, B.S(Beam splitter), CCD로 이루어진 간섭계를 구성하였다. 홀로그래피의 기본 개념의 시작은 참조파(reference wave)와 대상체로부터 반사된 물체파(object wave)가 CCD 카메라의 표면에서 간섭을 일으키는 것으로부터 시작한다. 이와 같이 간섭을 일으킨 합성 파형은 CCD카메라를 통하여 전자적으로 기록되고 저장된다.^[7]

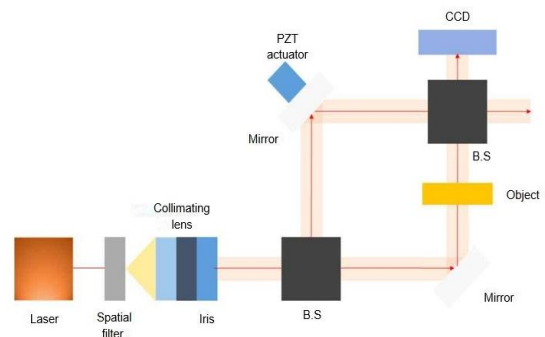


Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer

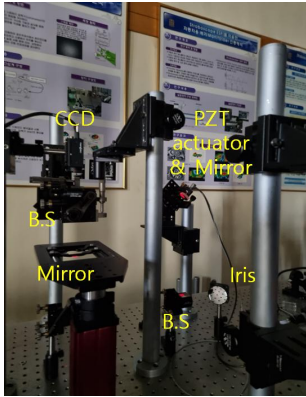


Fig. 2 Digital holography interferometer system

2.2 FE-SEM

디지털 홀로그래피를 이용한 ITO 증착 박막의 단차 측정에 대해 비교를 통한 신뢰성 확보를 위해 방출형 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope; FE-SEM)을 이용하여 측정을 진행하였다. 이 장비는 대상체 표면에 전자선을 주사하여 입체구조를 직접 관찰할 수 있어 박막의 형상 측정이나 미세구조를 가진 물체의 검사, 성분 분석, 결합검사 등에 주로 사용된다. 광범위한 샘플을 수용할 수 있는 세 가지 모드 (고진공, 저진공 및 ESEM)가 있는 기기이다. 일반 광학 현미경과는 달리 광원을 전자선으로, 매질을 진공으로, 렌즈를 자계렌즈로 사용한다는 차이점이 있다. Fig. 3에 실험에 사용한 FE-SEM 장치를 나타냈으며, 사양은 Table 1에 표기하였다.^[8]



Fig. 3 FE-SEM

Table 1 Specifications of FE-SEM

| Model | Quanta 200 FEG (FEI COMPANY) |
|-------------------|---|
| Maximum Load Size | 50 mm × 50 mm |
| Magnification | ×12 ~ ×1,200,000 |
| ESEM Resolution | 30Kv SE: 1.5 mm Acceleration Voltage: 0.2 ~ 30Kv |
| Beam Stability | <0.1%/1hr<0.4%12hr |

2.3 시험편

디지털 홀로그래피와 FE-SEM을 이용한 ITO 증착 박막의 단차 측정 실험의 정확도를 향상시키기 위해 Calibration 시험편을 사용하였으며, 일반적으로 사용되는 증착높이 150nm부터 200nm까지 10nm씩 증가시켜 6가지의 높이로 시험편을 준비하였다. 6가지 시험편을 대상으로 증착 박막의 단차 측정 실험을 수행하여, 단차와 측정 결과 각각의 오차율을 구하였으며, 디지털 홀로그래피의 실험 결과와 FE-SEM의 실험 결과를 비교하였다.

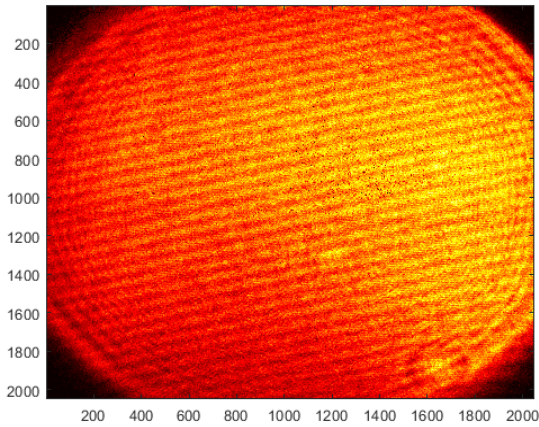
3. 실험결과 및 고찰

3.1 디지털 홀로그래피 측정 결과

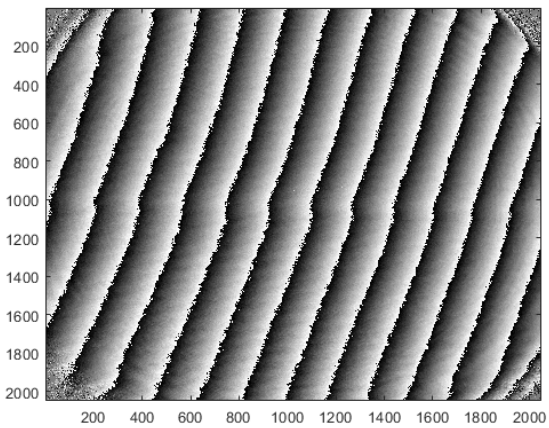
구성한 디지털 홀로그래피 간섭 시스템을 이용하여 증착 높이별 ITO 박막의 단차를 측정하였다. 디지털 홀로그래피로 참조광의 정보를 획득하고 박막을 측정하여 물체광의 정보를 획득하였다. 이때, 파의 강도와 위상정보를 획득하였으며, 150nm의 ITO 박막의 측정 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4(a)와 (b)는 획득한 디지털 홀로그래피 이미지의 세기(Intensity)와 위상도(Phase map)를 각각 보여준다. 물체광의 정보에서 참조광의 정보를 감산하여 물체에 대한 위상 정보만 남도록 하여 위상지도를 얻게 되며, 이를 결핍된 결과를 Fig. 4(c)에 나타내었다. Fig. 4(d)는 3차원으로 복원한 결과를 보여주고 있으며, 이 결핍된 이미지 상

에 선(프로파일 라인)을 긋고, 이 선에 대한 프로파일 정보를 취득하여 단차를 측정 할 수 있도록 하였다. Fig. 4(e)는 프로파일 라인에서의 프로파일 정보를 보여주고 있다. Fig. 4(c)에 표시된 5개의 프로파일 라인에서의 프로파일 정보를 평균하여 값을 구하였다.

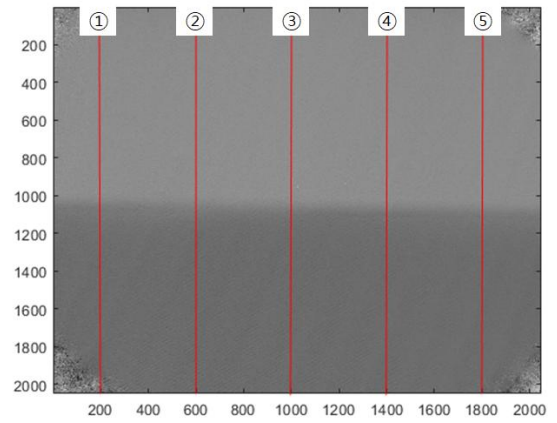
Table 2에 나타낸 결과에서 볼 수 있듯이, 150, 160, 170, 180, 190, 200nm 높이로 증착한 박막은 각각 151.8, 162.3, 173.7, 184.7, 196.5, 205.6nm로 측정되었다. 오차율은 1.20, 1.44, 2.18, 2.61, 3.42, 2.80%로 $\pm 5\%$ 이내임을 알 수 있었으며, 이를 Table 2에 나타내었다. 150, 160nm까지는 1% 대의 오차율이지만 170nm부터는 2~3% 대로 오차율이 증가함을 확인할 수 있었다.



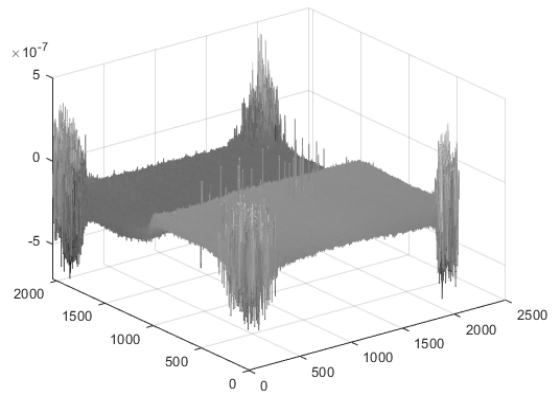
(a) Intensity



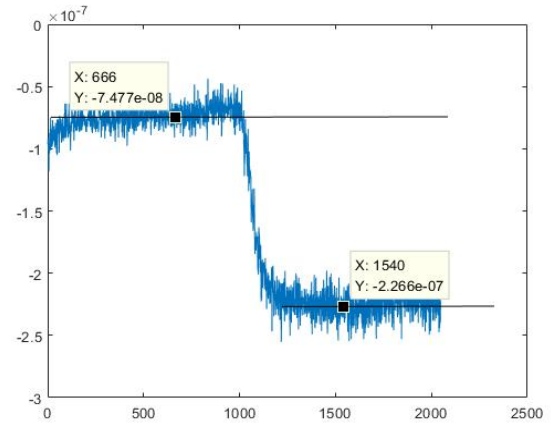
(b) Phase map



(c) Unwrapped image & profile position



(d) 3D image



(e) Profile

Fig. 4 Result of digital holography

Table 2 Result of digital holography

| Deposition height [Unit : nm] | Stepped pulley [Unit : nm] | Error rate [%] |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| 150 | 151.8 | 1.20 |
| 160 | 162.3 | 1.44 |
| 170 | 173.7 | 2.18 |
| 180 | 184.7 | 2.61 |
| 190 | 196.5 | 3.42 |
| 200 | 205.6 | 2.80 |

3.2 FE-SEM 측정 결과 및 비교 검증

FE-SEM 으로 측정한 ITO 박막 증착 시험편에 대한 단차 측정 결과는 Fig. 5에 대표적으로 150nm 증착에 대한 결과를 나타내었다. Table 3에 FE-SEM으로 박막 단차를 측정한 결과를 나타내었다. FE-SEM의 Digital holography와 달리 증착 두께가 두꺼워 질수록 오차율이 감소하는 결과를 확인할 수 있었다. 이것은 프로파일 라인을 긋기 위해 작업자가 수동으로 위치를 잡기 때문에, 동일 화면면적에서 두께가 두꺼워 질수록 차지하는 범위가 커지기 때문에 오차율이 낮아지는 것으로 판단된다. 디지털 홀로그래피로 측정한 결과와 비교하였을 때, 둘 다 오차율이 $\pm 5\%$ 이내임을 확인할 수 있었다. 증착 시, 증착 높이가 설계값대로 증착되지 않았을 수 있다는 점을 감안하였으며, 상용 장비인 FE-SEM으로 측정한 결과와 비교하였을 때 증착 높이 순서대로 2.15, 2.20, 2.78,

Table 3 Result of FE-SEM

| Deposition height [Unit : nm] | Measuring result [Unit : nm] | Error rate [%] |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 150 | 148.6 | 0.93 |
| 160 | 158.8 | 0.75 |
| 170 | 169.0 | 0.58 |
| 180 | 180.7 | 0.39 |
| 190 | 190.9 | 0.47 |
| 200 | 199.6 | 0.20 |

2.21, 2.93, 3.01%로 측정되었다. 오차율이 2, 3% 내외인 것으로 볼 때, 디지털 홀로그래피 측정 결과 또한 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 디지털 홀로그래피로 ITO 투명 전극을 스퍼터링 공법으로 150nm부터 200nm까지 10nm 단위로 증착하여, 높이가 다른 총 6종의 ITO 증착 박막에 대해 단차를 측정하였다. 증착 높이별로 측정한 결과, 증착 높이에 대한 오차율은 2.275%로 측정되었다. 상용장비이며 원래 박막 검사장비로 활용되고 있는 FE-SEM 측정 결과와 비교하더라도 나노급의 박막 검사에도 충분히 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

디지털 홀로그래피는 박막 두께가 두꺼울수록 오차율이 커지는데 투과 시 높이별로 굴절율이 조금씩 달라지며, 이 영향으로 두께가 두꺼울수록 오차율이 증가한 것이라고 판단된다. 두께별로 계산식을 보정하면 될 것으로 보이며 이에 대해 추가로 연구가 진행된다면 앞으로 충분히 박막과 같은 MEMS 및 NEMS 산업에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 2019년도 조선대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.”(This study was supported research fund from chosun university 2019)

REFERENCES

1. Mentley, D. E., “State of flat-panel display technology and future trends,” Proceeding of the IEEE, Vol. 90, No. 4, pp. 453-459, 2002.
2. Castellano, J. A. and et al., “Handbook of display technology,” Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 4-5, 2012.
3. Kim, G. H., Lee, S. H., Yoon, J. H., and Kim, D. H., “ITO transparent electrode material

- technology trends,” *Information Display*, Vol. 11, No. 5, pp. 17-22, 2010.
4. Kim, K. S., Jung, H. I., Shin, J. Y., Yi, S. H., Kwon, I. H., and Jung, H. C., “Measurement of Line Width for Honeycomb Structured Circuit Using Reflective Digital Holography,” *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 37, No 3, pp. 158-159, 2017.
 5. Cuhe, E., Marquet, P., and Depeursinge, C., “Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography,” *Applied Optics*, Vol. 39, No. 23, pp. 4070-4075, 2000.
 6. Kim, K. S., “Principle of Digital Holography,” in *Technical Lecture*, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol 33. No 5, pp. 472-478, 2013.
 7. Schnars, U. and Jueptner, W., “*Digital Holography*,” Springer, Berlin, Germany, pp. 21-98, 1965.
 8. Jung, H. C., Shin, J. Y., and Kim K. S., “Deposition Step-height Measurement for ITO Thin Film Pattern Fabricated with Photo-lithography,” *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol 40. No 1, pp. 9-15, 2020.