

반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Molybdenum 박막의 손상 측정

Damage Measurement for Molybdenum Thin Film Using Reflection-Type Digital Holography

김경석*, 정현일**, 신주엽***, 마혜준****, 권익환*****, 양승필*****, 홍정기*****, 정현철*†

Kyeong-Suk Kim*, Hyun-Il Jung**, Ju-Yeop Shin***, Hye-Joon Ma****, Ik-Hwan Kwon*****,
Seung-Pill Yang*****, Chung-Ki Hong*****, and Hyun-Chul Jung*†

초 록 전자제품에 필수적으로 사용되는 전자회로의 제작 시, 반도체 위에 증착하는 박막의 산화를 방지하기 위하여 molybdenum을 증착한다. Molybdenum 박막 증착 시 표면의 particle 또는 dust의 존재는 밀착력 감소 및 성능 저하, 수명 단축, 안전도 저하를 유발한다. 본 논문에서는 particle의 유무에 따른 molybdenum 박막 증착부의 변화를 보기 위하여, 두 가지 glass substrate를 대상으로 손상 측정 실험을 하였다. Sputtering 증착 기법으로 molybdenum이 glass substrate에 직접 코팅이 되는 clean과 dirty 두 종류의 molybdenum 박막을 제작하고, 손상 측정을 위해 반사형 디지털 홀로그래피를 구성하였다. 반사형 디지털 홀로그래피는 간섭계의 구성이 손쉽고 다양한 배율렌즈를 적용하여 측정영역에 다양성을 줄 수 있으며, 측정시간이 타 기법에 비해 짧은 장점을 가진다. 실험 결과로부터 반사형 디지털 홀로그래피가 박막의 손상 및 결함 측정에 유용한 기술임을 확인하였다.

주요용어: 반사형 디지털 홀로그래피, 물리브덴 박막, 레이저간섭계, 각 스펙트럼법, 레이저 비파괴검사, 손상 측정

Abstract In the fabrication of electronic circuits used in electronic products, molybdenum thin films are deposited on semiconductors to prevent oxidation. During the deposition, the presence of a particle or dust at the interface between the thin film and substrate causes the decrease of adhesion, performance, and life cycle. In this study, a damage measurement targeting two kinds of glass substrate, with and without particles, was performed in order to measure the change in the molybdenum thin film deposition area in the presence of a particle. Clean and dirty molybdenum thin film specimens were fabricated and directly deposited on a substrate using the sputtering method, and a reflection-type digital holographic interferometer was configured for measuring the damage. Reflection-type digital holography has several advantages; e.g., the configuration of the interferometer is simple, the measurement range can be varied depending on the magnification of a microscopic lens, and the measuring time is short. The results confirm that reflection-type digital holography is useful for the measurement of the damage and defects of thin films.

Keywords: Reflection Type Digital Holography, Molybdenum Thin Film, Laser Interferometer, Angular Spectrum Method, Laser Testing Method, Damage Measurement

1. 서 론

박막은 컴퓨터, TV, 휴대폰, 카메라 등과 같은 전자제품, 반도체산업 분야에서 많이 활용되는데

glass, 반도체와 같은 substrate 위에 금속, 저항체, 절연물과 같은 물질을 증착하여 회로 소자나 배선, 단자를 만든다. 이 때, 증착 방법으로는 진공 증착이나 형태화 등의 방법이 있는데 흔히 진공

[Received: October 3, 2014, Revised: February 10, 2015 / March 19, 2015, Accepted: March 30, 2015] *조선대학교 기계시스템공학과, **조선대학교 첨단부품소재공학과 대학원, ***조선대학교 기계시스템공학과 대학원, ****조선대학교 자연과학과 대학원, *****포항공과대학 물리학과, *****동아인재대학교 안경공학과, †Corresponding Author: Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea (E-mail: yonggaryjung@gmail.com)

증착법인 sputtering 기법을 이용한다. 이 sputtering 기법으로 증착 시 particle이 substrate 또는 증착할 물질 표면에 묻어있거나 vacuum chamber 내에 존재할 경우 증착하는 물질의 밀착력을 저하시켜 pin hole, crack, 박리와 같은 형태의 결함을 유발한다. 이러한 결함은 소자가 형성되지 않거나 전기전도나 투과율 불량, 사용 중 단선, 미세구조의 변형 등의 문제점으로 나타나며 반도체 소자의 성능 저하, 수명 단축, 안전도 저하를 야기한다.

이러한 이유로 박막의 결함 검사는 적용되는 제품의 성능 및 수명, 안전성까지 직접적인 연관성을 가지고 있기 때문에 이를 보완하기 위하여 결함 및 불량 분석 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 현재 박막의 구조적, 광학적 또는 물성, 두께 등을 평가하는 기술로는 HRXRD(high resolution X-ray diffraction), AFM(atomic force microscopy), SEM(scanning electron microscopy), 초음파현미경, 양전자소멸측정법 등 다양한 방법들이 사용되고 있다.

홀로그래피 기술은 1948년 Dennis Gabor가 현미경에 사용되는 렌즈의 수차 문제를 해결하기 위해 발명하였다[1]. 파면재생이라는 2단계의 무렌즈 영상 처리 방법을 이용하여 기준파(reference wave)가 물체에 의해 회절되거나 산란된 빛과 만나면 파의 진폭과 위상 정보를 기록할 수 있다. 이렇게 기록된 간섭무늬를 홀로그램(hologram)이라 부르고, 이 홀로그램으로부터 물체의 형상을 재생할 수 있다.

이후 1950년대 Roger, Lohmann 등의 학자들에 의해 이론적 확대가 이뤄졌고, Laurence, Goodman 등이 홀로그램의 수치적 재생 방법을 발견하였으며 Kronrod가 컴퓨터를 이용해 이를 실현해냈다[2,3]. 디지털 홀로그래피는 Schnars와 Juptner에 의해 고밀도의 정보를 광학적으로 저장하기 위한 기술로 필름에 홀로그램 정보를 기록하여 인코딩 과정을 거쳐 원래의 정보를 복원[4,5]하던 홀로그래피에서 홀로그램을 필름이 아닌 CCD(charge coupled device) 카메라를 통해 직접 기록함으로써, 홀로그램의 저장과 복원의 전 과정을 컴퓨터로 처리할 수 있게 된 것을 말한다. 데이터에 후처리를 할 수 있어 3차원 디스플레이, 미소물체의 측정, 유체의 유동을 기록하는 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

본 논문에서는 반사형 디지털 홀로그래피를 이

용하여 clean한 molybdenum 박막 샘플의 표면 조도를 측정하고, 측정 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 타 상용 장비(surface profiler, AFM)의 측정 결과와 비교하였다. 확보한 신뢰성을 기반으로 substrate 표면에 particle이 존재하는 dirty 샘플에 대한 실험을 통하여 타 상용 장비에 비해 9~2500배의 측정 영역을 동급의 분해능으로 측정이 가능함을 확인하였다.

2. 이 론

2.1. 디지털 홀로그래피의 원리

디지털 홀로그래피에 대표적으로 이용되는 간섭계로는 Fig. 1과 같은 반사형 대상에 사용되는 Michelson 간섭계와 Fig. 2와 같은 투과형 대상에 사용되는 Mach-Zehnder 간섭계가 있으며, 본 논문에서는 Michelson 간섭계를 이용하였다. 홀로그램을 얻기 위해서는 광원을 물체파(object wave)와 기준파로 나누어 물체파는 물체에서 반사되어 CCD 카메라로 입사하고, 기준파는 기준 거울에서 반사되어 CCD 카메라로 입사한다. 이렇게 입사된 물체파와 기준파는 Fig. 3과 같이 CCD 카메라 상면에서 간섭무늬를 형성하는데 이 간섭패턴이 홀로그램이다. 이 홀로그램에 Fig. 4와 같이

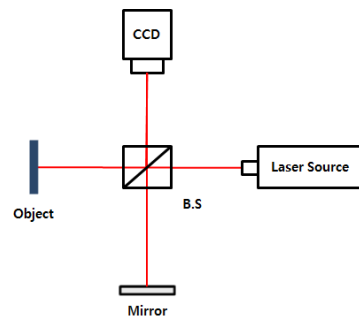


Fig. 1 Michelson interferometer

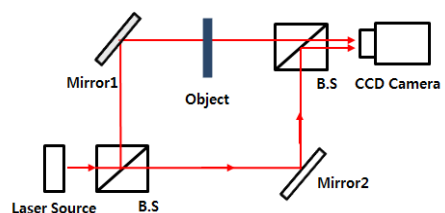


Fig. 2 Mach-Zehnder interferometer

다시 기준파를 조사하면 Fresnel-Kirchhoff 적분으로 나타낼 수 있는 회절로 image plane에 복원된다.

기준파($E_R(x,y)$)의 진폭은 a_R , 위상은 φ_R 이며 식(1)과 같이 표현된다.

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)\exp(i\varphi_R(x,y)) \quad (1)$$

물체파($E_O(x,y)$)의 진폭은 a_O , 위상은 φ_O 이며 식(2)와 같이 표현된다.

$$E_O(x,y) = a_O(x,y)\exp(i\varphi_O(x,y)) \quad (2)$$

그리고 CCD 에서 형성되는 두 파에 대한 간섭의 세기는 다음과 같이 표현되며,

$$\begin{aligned} h(x,y) &= |E_O(x,y) + E_R(x,y)|^2 \\ &= |E_O|^2 + |E_R|^2 + E_O E_R^* + E_O^* E_R \end{aligned} \quad (3)$$

홀로그래피 재생을 위해 기준파의 진폭을 식(3)에 곱하면 식(4)와 같다.

$$E_R(x,y)h(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2 E_O + E_R^2 E_O^* \quad (4)$$

위 식에서 $|E_R|^2$ 항은 기준에 의해 CCD에 균일하게 작용되는 정보이고, $|E_O|^2$ 항은 물체의 진폭정보이다. $(|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R$ 은 빛이 통과할 때 0차 회절이므로 홀로그래피 재생에서 고려되는 사항이 아니다. $|E_R|^2 E_O$ 는 재생되는 물체파에 의한 허상(virtual image)의 생성을 나타내므로 실제의 상을 얻기 위해서 식(3)에 E_R 을 conjugate시켜 곱하게 되면 식(5)와 같다.

$$E_R^*(x,y)h(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R^* + E_R^{*2}E_O + |E_R|^2 E_O^* \quad (5)$$

식 (5)에서 $E_R^{*2}E_O$ 항이 실제 상(real image)이 된다.

2.2. 디지털 홀로그래피의 재생

디지털 홀로그래피의 수치적 재생은 홀로그래피의 미세구조에 대한 재생파의 회절을 설명하는 Fresnel-Kirchhoff 적분을 기초로 wavefield에 저장

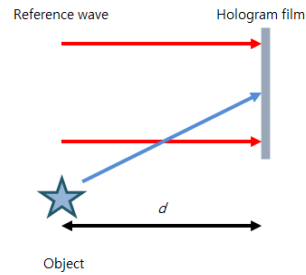


Fig. 3 Recording

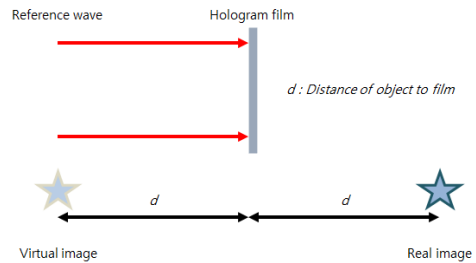


Fig. 4 Reconstruction with reference wave

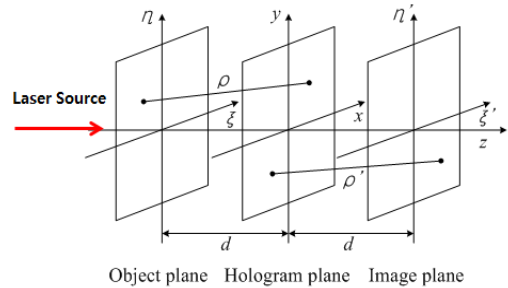


Fig. 5 Coordinate system for numerical hologram reconstruction

된 세기뿐만 아니라 위상 분포를 디지털 홀로그래피로부터 계산을 가능하게 한다.

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi,\eta) &= \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y)E_R^*(x,y) \frac{1}{\rho} \exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho) dx dy \\ \rho &= \sqrt{(\xi' - x)^2 + (\eta' - y)^2 + d^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 5에 홀로그래피의 수치적 재생을 위한 좌표계를 나타냈다. 식(6)을 이용하여 변형되지 않은 원래 이미지를 복원할 수 있으며, 여기서 λ 는 레이저 빔의 파장, $E_R^*(x,y)$ 은 켈레 기준파, ρ 는 인접한 두 면에서 대응하는 두 점 사이의 거리, d 는 인접한 두 면 사이의 거리이다.

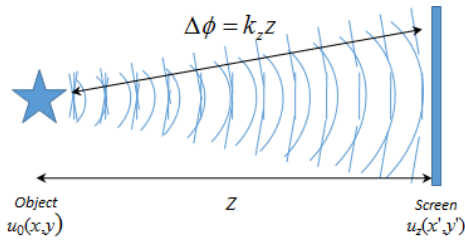


Fig. 6 Angular spectrum method(ASM)

2.3 Angular Spectrum Method(ASM)

본 논문에서는 Fig. 6과 같이 평면파 확장 방법(plane wave expansion method)이라고도 부르는 프레넬 근사 없이 평면파를 전파시키는 ASM(angular spectrum method)방법을 이용하여 재생한다.

이미지 면의 각 스펙트럼은

$$U_o(k_x, k_y) = F[u_o(x, y)] \quad (7)$$

스크린 면의 각 스펙트럼은

$$U_z(k_x, k_y) = U_o(k_x, k_y) \cdot \exp(ik_z z) \\ ; k_z = (k^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2} \quad (8)$$

스크린 면의 diffraction field는 다음과 같다.

$$u_z(x', y') = F^{-1}[U_z(k_x, k_y)] \quad (9)$$

이는 CM(convolution method)처럼 연속적인 FFT(fast Fourier transform) 및 IFFT(inverse fast Fourier transform)가 사용된다. 그러므로 ASM은 CM과 같이 z 에 대하여 제한된 상한값을 가지고 재생되는 이미지의 픽셀 사이즈가 유지된다. 따라서 이 방법은 Fresnel 영역보다 더 가까운 영역에서도 사용되고, 높은 NA(numerical aperture)를 필요로 하는 microscopic sample을 측정하는데 있어서도 매우 유용하다.

3. 실험

3.1. 시험재료

본 실험에서 사용된 시험편은 particle 유무에 따른 결함을 측정하고자 substrate로 사용되는



(a) clean specimen



(b) dirty specimen

Fig. 7 Molybdenum thin film specimen

glass로 particle이 없는 깨끗한 상태의 glass와 임의의 particle을 부여한 glass를 준비하여 각각의 glass 위에 sputtering 기법으로 molybdenum을 증착하여 Fig. 7과 같이 제작하였다.

3.2. 실험 장치

3.2.1. 반사형 디지털 홀로그래피 시스템

본 연구에서는 Fig. 8과 같은 개략도를 통하여 Fig. 9에서와 같이 파장이 632.8 nm인 He-Ne laser, polarizer, spatial filter, mirror, object lens($\times 10$), collimating lens, beam splitter(B.S), 1024 \times 1280 CCD camera, PZT(piezoelectric transducer) actuator 등의 광학부품을 이용하여 Michelson 간섭계를 기반으로 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구성하였다.

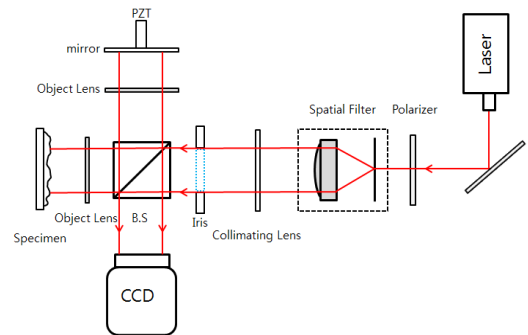


Fig. 8 Schematic diagram of reflection type digital holography system

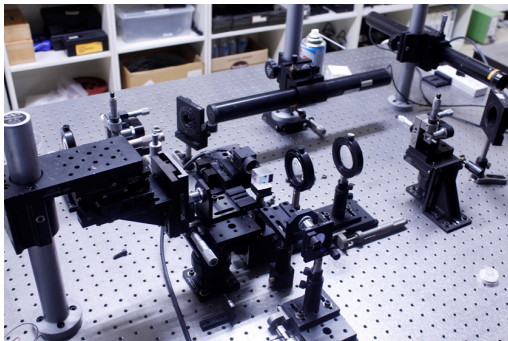


Fig. 9 Reflection type digital holography system

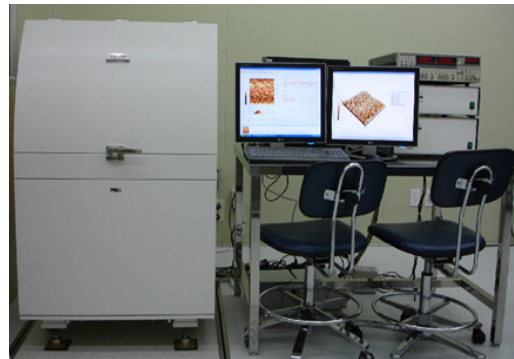


Fig. 11 AFM

3.2.2. Surface Profiler

이 장치는 공초점 다중 핀홀 기술에 의한 비접촉 표면 측정 시스템으로 본 연구에서는 Fig. 10과 같은 KORTerm Science의 uSurf 제품을 사용하였다. 이 시스템은 소자의 형상과 특성을 관찰하고 분석하는 시스템으로써 Table 1에 surface profiler 제원에 대하여 보여주고 있다.

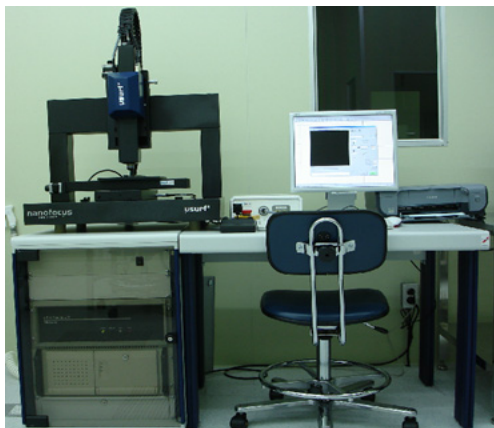


Fig. 10 Surface profiler

Table 1 Specification of surface profiler

Optical, non-contact technology	Confocal multi-pinholes system
Simple operation	Dynamic real-time synchronization & User friendly interface
Nanometer accuracy	Vertical resolution (1 nm), Lateral resolution(0.31 μm)
Robust technology	Precise acquisition of complex geometry & Insensitive echnology to mechanical vibrations

Table 2 Specification of AFM

SPM Head	Contact AFM, DFM, Non-contact AFM, FMM, Phase image, Force vs. Distance curve, DC-EFM, Current AFM, I/V spectroscopy
Scan length	100 μm(low voltage mode : 10 μm)
Scan Speed	2 μm /sec to 200 um/sec or more Vertical range : 262 μmor more
Resolution	< 0.15 nm (Low voltage mode : < 0.02 nm)
Zoom optics	500X
Stylus Tip	5 μmor more
Sample size	Up to 200 mm × 200 mm, 20 mm thick

3.2.3. AFM

AFM(atomic force microscope)은 probe tip(지름 100Å 이하)과 시편 표면 사이의 interaction(bend or deflection)을 laser beam의 위치감응 광 다이오드 검출기(position sensitive photodiode: PSPD)로 측정함으로써 초미세 구조를 가지고 있는 시험편의 표면 영상을 최대 1,000만 배의 배율로 획득 가능한 현미경이다. 도체나 부도체 및 폴리머, 박막 등의 샘플의 파괴나 손실 없이 삼차원 높이 및 깊이를 측정하여 입체 표면 영상화가 가능한 시스템이며 본 연구에서는 Fig. 11과 같은 PSIA사의 XE-200 system 모델을 이용하여 접촉식으로 측정하였으며, 제원은 Table 2에 나타냈다.

3.3. 실험 방법

실험 및 데이터 획득은 mathworks의 MATLAB을 이용하였으며, 측정 시스템 구성과 같이 박막

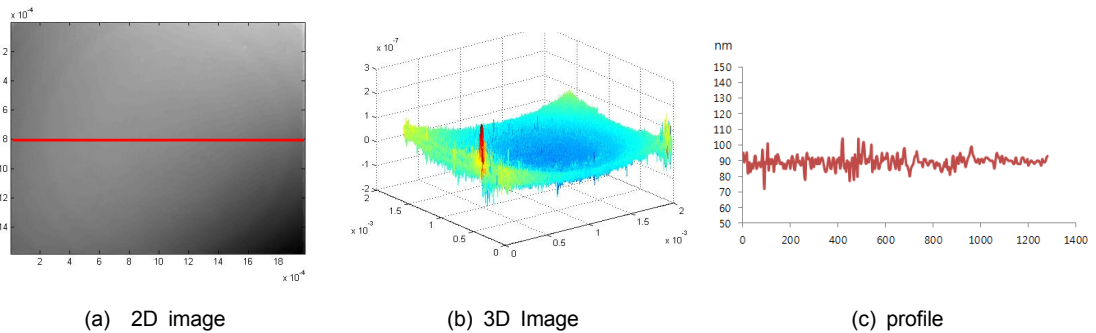


Fig. 12 Result for clean sample measured by digital holography system

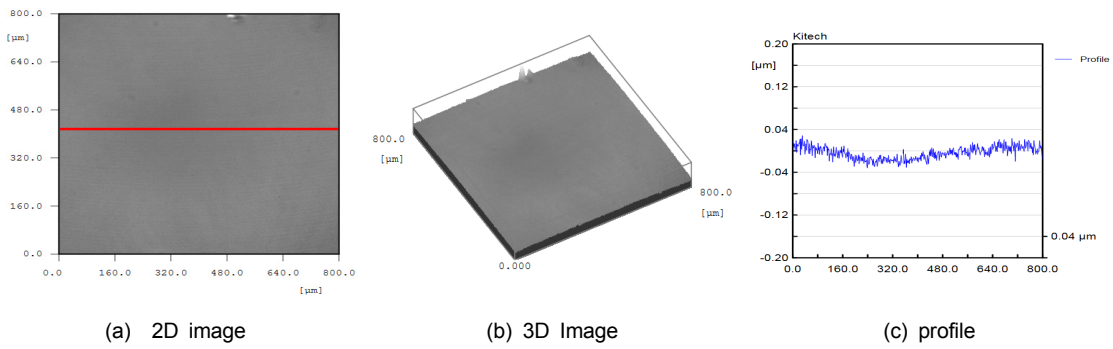


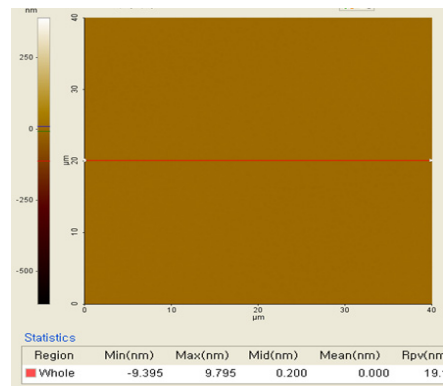
Fig. 13 Result for clean sample measured by surface profiler

시험편 측정을 위해 기준과의 미러 쪽에 PZT(piezo electric transducer) actuator를 장착하고 matlab으로 전압을 제어하여 8-step의 변화를 주며 reference와 object 각각 8번씩의 변화된 phase와 intensity를 기록하고 이를 이용하여 각각의 간섭정보를 획득한다. 여기에 ASM을 적용하여 3차원과 2차원의 이미지로 재생을 하는데 이 때, 노이즈를 제거하고 데이터 피팅을 통해 표면 형상 이미지와 표면 조도 값을 획득한다.

디지털 홀로그래피 시스템으로 획득한 데이터 값에 대한 신뢰성을 얻기 위해 상용화된 표면 형상 측정 및 조도 측정 장비인 surface profiler와 AFM으로 제작한 시험편의 표면 형상 및 조도를 측정하여 디지털 홀로그래피 시스템 결과 데이터와 비교 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 clean한 molybdenum 박막의 측정은 Fig. 12에 보여주고 있으며 각각 재생한 결과인 2D와 3D 이



(a) 2D image



(c) profile

Fig. 14 Result for clean sample measured by AFM

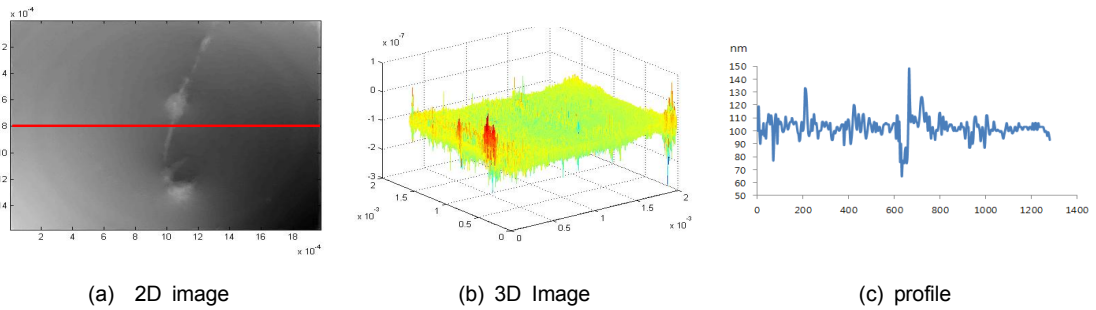


Fig. 15 Result for dirty sample measured by digital holography system

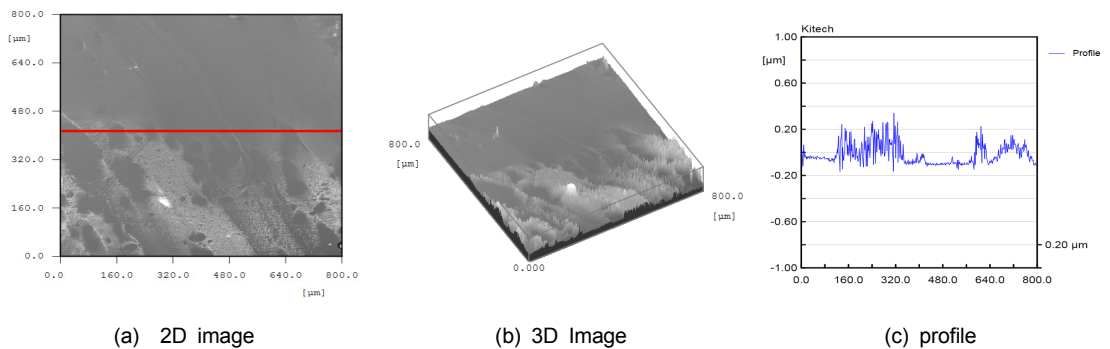


Fig. 16 Result for dirty sample measured by surface profiler

미지와 line profile data 이다. Clean한 박막의 표면은 일정한 조도를 갖는다는 조건으로 측정하여 재생한 이미지의 중간부분을 타 상용 장비의 결과와 비교하기 쉽도록 line profile data를 수치적으로 표현하였으며 측정 결과 값은 Max. 값이 104 nm, Min. 값이 72 nm로 단차가 32 nm임을 알 수 있다. 본 실험 결과와의 비교를 위해 타 상용 장비인 surface profiler와 AFM으로 측정하고 그 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 먼저 surface profiler의 측정 결과는 Max. 값이 $-0.079 \mu\text{m}$ Min. 값이 $0.045 \mu\text{m}$ 이었으며 단차가 $0.034 \mu\text{m}$ 였다. 다음으로 AFM으로 측정한 결과는 Max. 값이 9.795 nm Min. 값이 -9.395 nm 임을 알 수 있다. 각각의 결과를 Table 3에 나타냈다.

또한 particle로 인한 임의의 결함을 부여하여 제작한 dirty molybdenum 박막을 각각의 시스템으로 측정한 결과 값을 Figs. 15~17과 Table 4에 나타냈다. Max. 값과 Min. 값의 차이를 구한 후 clean한 박막을 측정한 결과 값을 빼주게 되면 그 값이 particle의 높이 정보임을 알 수 있으며 단차를 통해 particle로 인한 결함임을 추정할 수

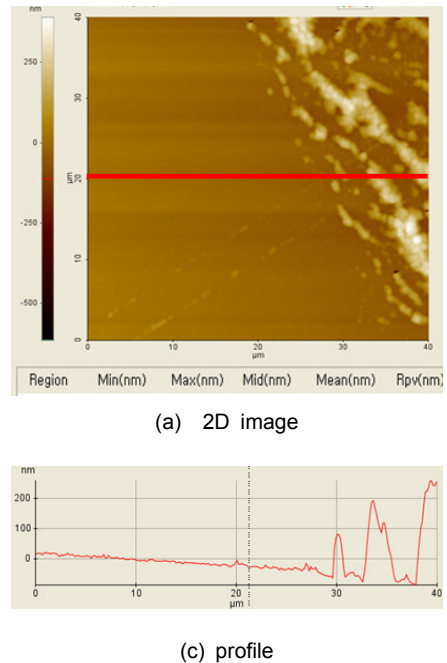


Fig. 17 Result for dirty sample measured by AFM

Table 3 Roughnes for clean sample

	Digital Holography system	Surface Profiler	AFM
Max Value	104	-79	9.795
Min Value	72	45	-9.395
Result Value	32	34	0.4

Table 4 Roughness for dirty sample

	Digital Holography system	Surface Profiler	AFM
Max Value	148	341	391
Min Value	65	-180	-613
Result Value	83	161	222

Table 5 Difference between results

	Digital Holography system	Surface Profiler	AFM
Clean	32	34	0.4
Dirty	83	161	222
Difference	51	127	221.6

있다. 이 때 각각의 시스템으로 측정 가능한 영역 크기가 달라 동일한 부분을 측정하는 것이 어려워 particle의 높이 정보를 구해 비교하였다. Table 5에 각각의 기법에 대한 결과 값의 차를 나타냈다. 디지털 홀로그래피와 surface profiler의 경우 clean한 샘플에서는 두 기법 측정 결과가 비슷한 양상을 보였으나, AFM의 경우 다른 두 기법과는 다르게 확연한 차이를 보여주고 있다. 이는 AFM이 디지털 홀로그래피와 surface profiler에 비하여 매우 미세한 particle을 측정하는데 있어 감도가 떨어져 인식을 하지 못하여 매우 작은 값을 나타내는 것으로 판단되며, 이와 반대로 dirty한 샘플을 측정하였을 경우는 AFM이 두 기법에 비하여 값이 크게 나오는 것으로 보아 큰 particle를 측정하여 높이 정보를 획득하는데 있어 매우 정밀하다는 판단을 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 particle의 유무에 따른 각각의 시험편을 측정하여 clean 샘플의 경우 홀로그래피는 32 nm, surface profiler은 34 nm, AFM은 0.4 nm라는 결과를 얻어 홀로그래피와 상용장비인 surface profiler의 값이 비슷하게 나와 신뢰성을 확보하였으나, AFM의 경우 다른 두 기법에 비해 측정 감도, 측정 영역 등의 영향으로 particle을 인식하지 못하여 측정 값이 매우 낮게 나온 것으로 판단을 하였고, dirty 샘플의 경우 홀로그래피, surface profiler, AFM이 각각 83 nm, 161 nm, 222 nm로 particle의 존재할 경우는 앞서 말한 바와 같이 측정 영역이 다르지만 박막 표면에서의 particle이 일정하다는 가정하에 측정값이 다르게 나오는 것으로 보아 AFM이 다른 기법에 비해 정밀하다는 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 측정하고 2차원 및 3차원으로 재생하여 결함의 유무를 식별 가능함을 통해 박막의 결함 검사가 가능함을 확인하였다.
- 2) 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하면 간단한 간섭계 구성으로도 박막의 결함 유무가 측정 가능함을 확인하고 타 상용 장비들에 비해 측정 속도가 빠르다는 장점 및 배울렌즈의 조절로 측정 영역을 설정할 수 있는 장점을 가지고 있음을 확인하였다.
- 3) 여러 환경적인 요인과 측정 범위가 크고 영역이 각기 달라 오차율이 발생하고 분해능이 떨어지는 결과가 발생하여 상용 장비들과의 비교가 어려웠으나 측정 영역을 줄임으로써 분해능을 높이고 오차 범위를 줄여 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 디지털 홀로그래피 시스템은 비파괴, 비접촉식으로 박막의 결함을 측정할 수 있는 장치로 꾸준한 연구를 통해 박막의 성능 저하, 수명 단축 및 안전도 저하를 방지하는데 기여하는 검사 장치가 될 것으로 판단된다.

후 기

"이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의

채원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0009416)"

"이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 채원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2013M2A2A9046502)"

참고문헌

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principles," *Nature*, Vol. 161. No. 4098, pp. 777-778 (1948)
- [2] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 11, pp. 77-79 (1967)
- [3] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer," *Sov. Phys. Tech. Phys.*, Vol. 17, No. 2, pp. 333-344 (1972)
- [4] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson and M. Ayres, "Holographic data storage: from theory to practical systems," Wiley, New York (2010)
- [5] H. J. Coufal, G. T. Sincerbox and D. Psaltis, "Holographic data storage," Springer-Verlag New York, Inc. (2000)
- [6] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* Vol. 22, No. 16, pp. 1268-1270 (1997)
- [7] U. Schnars and W. Jueptner, "Digital Holography," Springer Berlin Heidelberg, pp. 21-98, (1965)
- [8] L. Denis, C. Fournier, T. Fournel and C. Ducottet, "Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography," *Proc. SPIE*, Vol. 5914, pp. 148-161 (2005)
- [9] K. Freischlad and C. L. Koliopoulos, "Fourier description of digital phase measurement phase-measuring interferometry," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 7, No. 4, pp. 542-551 (1990)
- [10] J. H. Buruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio, "Digital wavefront measuring interferometry for testing optical surfaces and lenses," *Applied Optics*, Vol. 13, Issue 11, pp. 2693-2703 (1974)
- [11] K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics*, Vol. 26, pp. 349-393 (1988)
- [12] K. S. Kim, H. C. Jung, K. S. Kim, C. J. Park and H. S. Jang, "A study on a relationship between the surface roughness of fracture CT specimen broken by fatigue crack growth and the moment," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 462-468 (2010)