creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265308

2016년 2월
석사학위논문

디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 첨단부품소재의 표면 형상 및 단차 측정

조 선 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

신 주 엽

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 첨단부품소재의 표면 형상 및 단차 측정

Measurement of surface shape and step height of advanced components using digital holography system

2016 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

신 주 엽

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 첨단부품소재의 표면 형상 및 단차 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2015년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

신 주 엽

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

신주엽의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 김 재 열 ㊞

위 원 조선대학교 교 수 김 경 석 ㊞

위 원 조선대학교 교 수 정 현 철 ㊞

2015년 12월

조 선 대 학 교 대 학 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ····· Ⅲ
LIST OF FIGURES ····· Ⅳ
ABSTRACT ····· Ⅵ

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구 배경 ····· 1
제 2 절 연구 목표 및 내용 ····· 3

제 2 장 이론적 배경 ····· 4
제 1 절 디지털 홀로그래피 ····· 4
제 2 절 홀로그램의 재생 ····· 9
제 3 절 결펼침 ····· 12

제 3 장 실 험 ····· 15
제 1 절 디지털 홀로그래피 시스템 ····· 15
1-1. 반사형 홀로그래피 시스템 ····· 15
1-2. 투과형 홀로그래피 시스템 ····· 17
제 2 절 비교 측정 장비 ····· 19
2-1. FE-ESEM ····· 19
2-2. Alpha step ····· 20

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2-2. AFM ····· 21
제 3 절 시험편 ····· 22
3-1. Resolution Target ····· 22
3-2. Photolithographic Product ····· 23

제 4 장 실험결과 ····· 24
제 1 절 Resolution Target ····· 24
1-1. Positive Resolution Target ····· 24
1-2. Negative Resolution Target ····· 26
제 2 절 Transmission-type Photolithographic Product ·· 27
2-1. 투과형 홀로그래피 측정 ····· 27
2-2. FE-ESEM 측정 ····· 33
2-3. Alpha step 측정 ····· 36
2-4. Compare of Result ····· 41
제 3 절 Reflection-type Photolithographic Product ····· 42
3-1. 반사형 홀로그래피 측정 ····· 41
3-2. FE-ESEM 측정 ····· 51
3-3. AFM 측정 ····· 54
3-4. Compare of Result ····· 59

제 5 장 결론 ····· 60
참 고 문 헌 ····· 61

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table. 1 Result of measurement by transmission type ·····32
Table. 2 Result of measurement by FE-ESEM ····· 35
Table. 3 Result of measurement by Alpha step ····· 40
Table. 4 Compare of measurement result of transmission type ····· 24
Table. 5 Result of measurement by reflection type ····· 29
Table. 6 Result of measurement by FE-ESEM ····· 30
Table. 7 Result of measurement by Alpha step ····· 31
Table. 8 Compare of measurement result of transmission type ····· 32

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Digital hologrphy ····· 5
Fig. 2-2 Coordinate system for numerical reconstruction ····· 7
Fig. 2-3 Propagation vector $\vec{k}$ ····· 10
Fig. 2-4 Unwrapped ····· 13
Fig. 3-1 Michelson interferometer ····· 15
Fig. 3-2 Reflection type digital holography ····· 16
Fig. 3-3 Mach-Zender interferometer ····· 17
Fig. 3-4 Transmission type digital holography ····· 18
Fig. 3-5 FE-ESEM ····· 19
Fig. 3-6 Alpha step ····· 20
Fig. 3-7 AFM ····· 21
Fig. 3-8 Resolution target ····· 22
Fig. 3-9 Photolithograpic product ····· 23
Fig. 4-1 Result of reference ····· 24
Fig. 4-2 Result of positive resolution target ····· 25
Fig. 4-3 Result of negative resolution target ····· 26
Fig. 4-4 Resolution reference ····· 27
Fig. 4-5 Result of point 1 ····· 28
Fig. 4-6 Result of point 2 ····· 28
Fig. 4-7 Result of point 3 ····· 29
Fig. 4-8 Result of point 4 ····· 29
Fig. 4-9 Result of point 5 ····· 30
Fig. 4-10 Result of point 6 ····· 30
Fig. 4-11 Result of point 7 ····· 31
Fig. 4-12 Result of point 8 ····· 31
Fig. 4-13 Result of point 9 ····· 32
Fig. 4-14 Result of FE-ESEM ····· 35
Fig. 4-15 Result of Alpha step ····· 40
Fig. 4-16 Result of point 1 ····· 43

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4-17 Result of point 2 ····· 43
Fig. 4-18 Result of point 3 ····· 44
Fig. 4-19 Result of point 4 ····· 45
Fig. 4-20 Result of point 5 ····· 46
Fig. 4-21 Result of point 6 ····· 47
Fig. 4-22 Result of point 7 ····· 48
Fig. 4-23 Result of point 8 ····· 49
Fig. 4-24 Result of point 9 ····· 50
Fig. 4-25 Result of FE-ESEM ····· 53
Fig. 4-26 Result of AFM ····· 58

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Measurement of surface shape and step height of advanced components using digital holography system

By Shin, Ju yeop
Advisor : Prof. Kim, Kyeong-Suk, Ph. D.
Dept. of Mechanical System
Engineering.
Graduate School of Chosun University.

Diversification and miniaturization made of high-tech parts and materials can be applied to various fields such as electronics, electricity to achieve the development of sustainable high technology. In addition to improved reliability, performance of these components, a variety of research and development can retain the competitiveness and cost-effectiveness compared to other ones. Consequently, NEMS and miniature painter composed of components with the technology of NEMS can improve the reliability, service life. also, it enables a non-destructive inspection we are handling to optimize performance of experiment. Now, we are continuing to carry out the research to get a reasonable result we hope. Therefore, In regard to digital holographic system, we will keep measuring the photolithography used in state-of-the-art components and materials in the semiconductor industry .

Semiconductor industry is one of key industries of Korea, which has continued growing showing a steady annual growth rate. Important technology for the semiconductor industry is high integration of devices. This is to increase the memory capacity for unit area, of which key is photolithography.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

The photolithography refers to a technique for printing the shadow of light lit on the mask surface on to wafer, which is the most important process in the semiconductor manufacturing process. In this study, width and step-height of the wafers patterned through this process were measured to ensure uniformity. The widths and inter-plate heights of the specimens patterned through the photolithographic process were measured using digital holography system. A digital holographic interferometer was configured, and nine (9) arbitrary points were set on the specimens as measurement points. The measurement of each point was compared with the measurements by a commercial device called Scanning Electron Microscope (SEM) and Alpha Step. The transmission digital holography has an advantage of short measurement time compared to other techniques and uses magnification lenses, allowing flexibility of changing between high and low magnifications. It is also possible non-contact, non-destructive measurement that does not damage the object. The test result confirmed that the digital holography system is a useful technique for measuring the patterns made using photolithography.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1절 연구 배경

홀로그래피의 기본적인 원리는 사진의 경우는 전기장 진폭의 제곱을 기록한 것을 보는 것으로 복사조도 분포라는 한계를 가진다. 즉, 사진에서 반사하는 빛은 복사조도에 관한 정보를 가지지만 물체로부터 나오는 파의 위상 정보는 가지고 있지 않다. 따라서 물체에서 반사되는 실제 파와 똑같은 진폭과 위상 그리고 주파수가 같은 파를 발생시키면 원래의 물체와 구별을 할 수 없게 되고, 실제 물체가 존재하는 것처럼 3차원 상을 볼 수 있다는 것이다. 따라서 레이저와 같은 간섭성이 좋은 빛을 이용하여 빛을 둘로 나눈 후 다시 만나게 하여 간섭 시키는데 하나의 빛은 기준파(Reference Wave) 다른 하나의 빛은 홀로그램에 기록 하는 물체파(Object Wave)로 나눈 후 물체파(Object Wave)가 기록된 홀로그램에 기준파(Reference Wave)를 조사하여 본래의 상을 재생하는 것이다[1].

홀로그래피 기술은 1948년에 Dennis Gabor 가 현미경에 사용되는 렌즈의 수차 문제를 해결하기 위한 발명으로 시작 되었으며 현재 우리가 알고 있는 파면재생(Wavefront Reconstruction) 이라는 2단계의 새로운 무렌즈 영상 처리 방법을 제안하였다[1-3]. Dennis Gabor 는 간섭성 참조파가 적절히 물체에 의해 회절되거나 산란된 빛과 동시에 존재하면, 회절 빛과 산란된 빛의 진폭과 위상 정보를 기록할 수 있음을 알았다. 그는 기록된 간섭무늬는 전체를 기록한다는 뜻에서 홀로그램(Hologram) 이라 불렀으며 원래 물체가 가지고 있는 파의 정보를 재생하여 본래의 영상을 얻을 수 있음을 증명하였다[1].

Dennis Gabor 의 영상 기술은 초창기에 관심을 얻지 못했지만, 1960년대에는 개념이나 기술적인 면에서 상당한 발전을 보였고, 그 응용이나 실용면에서 크게 확대 발전되었다. 홀로그래피에 대한 Dennis Gabor 의 초기 연구는 X-ray 결정학에서 W. L. Bragg 의 연구에 영향을 받았지만, 주된 동기는 새롭게 발견된 전자 홀로그래피로서의 응용 가능성이었다. Dennis Gabor 는 초기의 제안을 1949년과 1951년에 출판된 두 개의 긴 논문에 발표하였는데, 여기에는 현미경을 위한 홀로그래피의 응용 가능성이 나와 있다. 1960년대에 이르러 Theodore Harold

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Maiman 이 루비를 이용한 고체레이저의 발명 이후로 홀로그래피에 대한 연구는 급속도로 진전되었다[1,2].

1950년대에 Laurence 와 Goodman 이 수치적 회절 계산 방법을 이용하여 3차원 영상을 재생하는 법을 제안하였으며, Kronrod 가 이를 컴퓨터를 이용하여 실현해 내었다. 이를 토대로 기존의 사진건판을 이용하여 화학적 홀로그램 생성하였던 방법을 대체하여 CCD(Charge Coupled Device)를 이용함으로써 화학적 처리 시간을 크게 단축하여 측정 결과의 획득시간을 단축시키고, 홀로그램의 저장과 복원 및 데이터의 후처리의 전 과정을 컴퓨터를 이용하여 처리할 수 있게 되었다. 이를 디지털 홀로그래피라 하게 되었고 이 기술은 컴퓨터의 성능 향상과 디지털 입력장치 등의 발전으로 시간의 단축성, 측정의 편리성, 해상도의 향상 등의 이유로 다수의 분야에서 이용되고 있다.

디지털 홀로그래피는 기준파(Reference Wave)의 각도에 따라서 In-line 홀로그래피와 Off-axis 로 구분된다. In-line 홀로그래피는 물체파(Object Wave)의 입사에 대하여 기준파(Reference Wave)의 각도가 0° 인 경우로 실상과 (Real Image)와 허상(Virtual Image) 및 DC항이 중첩되어 선명한 상을 얻기 어렵다. Off-axis는 물체파(Ojbect Wave)에 대해 기준파(Reference Wave)가 각을 가지고 입사하는 것으로 실상과 허상 및 DC항이 공간적으로 분리된다[3].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 연구 목표 및 내용

본 논문은 레이저를 이용한 광응용 계측 기술인 디지털 홀로그래피 기술 중 off-axis의 이론적 방법을 이용하여 투과형 재질을 측정할 수 시스템과 반사형 재질을 측정할 수 있는 시스템을 구성하고 투과형과 반사형의 포토리소그래피 공정품 패터닝에 폭과 단차를 정량적으로 측정하고자 한다. 또한 기존에 측정하는 기기들의 측정 결과와 비교하여 신뢰성을 확보하고 홀로그래피 시스템의 장점을 파악하여 광응용 비파괴측정 기술 중 하나가 될 수 있음을 제시하였다. 본 논문에서 사용한 방법을 이용함으로써 첨단부품소재의 마이크로 및 나노급의 정량적인 측정 가능성을 확인할 수 있으며 측정 대상체의 결함 및 형상을 고 분해능으로 측정함으로써 장점을 부각시키고 비파괴 검사의 개념을 충족시키고 이를 기반으로 디지털 홀로그래피 시스템이 신뢰성 있는 비파괴 검사기술로 정착할 수 있을 것으로 기대한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 이론적 배경

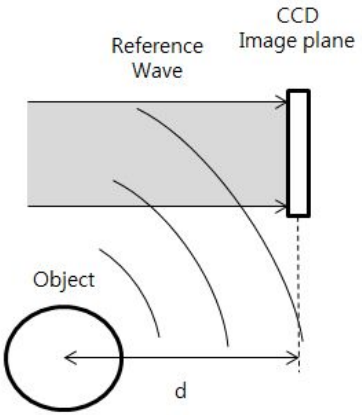
제 1 절 디지털 홀로그래피

홀로그래피는 1948년 Dennis Gabor가 현미경에 사용되는 렌즈의 수차 문제를 해결하기 위한 과정에서 발견되었다. 하나의 광원이 물체에 조사되어 반사되거나 투과되어 그 위상의 변화가 필름에 입사되고 동일한 정보를 가지고 있는 광원이 다시 필름에 입사되어 간섭을 일으키고 이 간섭무늬가 저장된 필름을 홀로그램이라 명명하였다. 홀로그래피는 필름에 기록한다는 의미에서 사진과 같은 맥락을 가지지만 둘 사이에는 커다란 차이가 있다. 우선 사진은 2차원의 면 위에 실제 물체와 같아 보이는 이미지가 저장되지만 복사조도 분포라는 한계를 가지게 된다. 즉, 궁극적으로 우리가 보는 것은 전기장의 진폭의 제곱을 기록한 것으로 빛의 복사조도에 대한 정보는 가지지만 물체로부터 반사된 빛의 위상정보는 가지고 있지는 않다. 하지만, 물체에서 반사되는 실제 파와 똑같은 진폭과 위상 그리고 주파수가 같은 파를 발생시킬 수 있다면 원래의 물체와 구별을 할 수 없고, 실제의 물체가 존재하는 것처럼 3차원 상을 볼 수 있다는 것이 홀로그래피이다. 따라서 홀로그래피는 물체에서 반사되는 빛의 위상에 대한 변화를 간섭무늬 형태로 기록하는 것으로 즉, 동일한 진폭과 위상 그리고 주파수가 같은 두 개의 빛인 기준파(reference wave)와 물체파(object wave) 파를 간섭 시켜 기록을 하고 이 후에 다시 기준파를 동일하게 입사시켜 실제 물체가 있었던 위치에 동일한 상을 재생시킬 수 있게 된다는 것이 홀로그래피의 기본 원리이다[5].

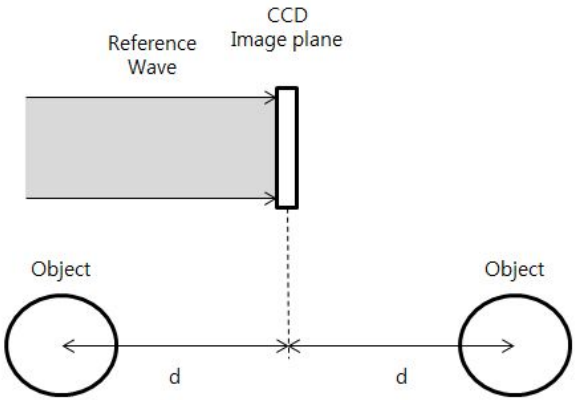
디지털 홀로그래피는 기존 홀로그래피에서 홀로그램 역할을 하는 사진판을 대신하여 CCD(charge coupled device) 카메라를 사용함으로써 화학적인 처리를 하지 않고 컴퓨터를 이용해 기록(recording) 및 재생(reconstruction)을 가능하게 하여 편리성 및 측정 시간의 단축성 등을 확보할 수 있게 되었다. 디지털 홀로그래피에서의 기록과 재생의 개념은 Fig. 2-1과 같다. Fig. 2-1(a)처럼 기준파와 물체에서 반사되는 물체파가 CCD 카메라 상면에서 만나 간섭을 일으키고 Fig. 2-1(b)처럼 기준파를 입사시키게 되면 실상과 같은 허상이 나타나게 된다. 그리고 Fig. 2-1(c)처럼 이 간섭에 대한 정보들은 컴퓨터를 통해 수치적으로 재생을 할 수 있게 된다.

Collection @ chosun

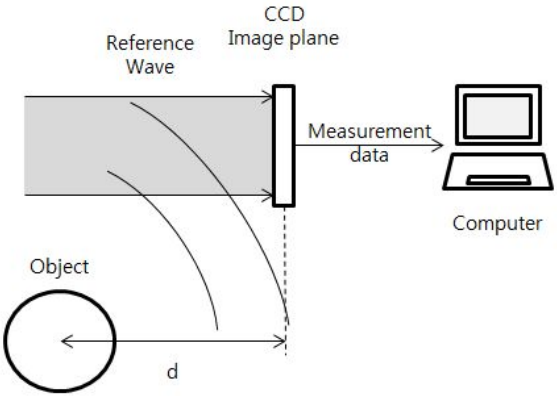
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Recording



(b) Reconstruction with reference wave



(c) recording and numerical reconstruction

Fig. 2-1 Digital holography

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

디지털 홀로그래피는 기준파와 참조파가 홀로그램 역할을 하게 되는 CCD 카메라 Image plane에서 간섭을 일으키게 되며 CCD 카메라 Image plane로부터 d거리에 위치하고 있는 물체에 대한 반사된 빛의 정보는 CCD Image plane에 의해 저장되어지고 이를 컴퓨터를 이용해 수치적으로 처리함으로써 재생을 할 수 있게 된다. 처리는 다음과 같은 과정에 의해서 진행된다. 우선 물체파의 경우는 식(2.1)처럼 표현 된다[6-11].

$$E_O(x,y) = a_O(x,y)e^{j\varphi_O(x,y)} \tag{2.1}$$

위 식에서 a_O는 물체파의 진폭을 나타내고 φ_O는 물체파의 위상을 나타낸다.

$$E_R(x,y) = a_R(x,y)e^{j\varphi_R(x,y)} \tag{2.2}$$

식(2.2)는 기준파를 나타내며 a_R는 진폭을 나타내고 φ_R은 위상을 나타낸다. 물체파와 기준파는 CCD 카메라 Image plane에서 간섭을 일으키게 되고 이 간섭은 빛의 Intensity와 비례하여 식(2.3)과 같이 계산되어 표현된다.

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |E_O(x,y) + E_R(x,y)|^2 \\ &= |E_O|^2 + |E_R|^2 + E_O E_R^* + E_O^* E_R \end{aligned} \tag{2.3}$$

위에서 설명하였듯이 재생을 위해서는 식(2.3)에 기준파가 곱해져야 하고 이를 수행하게 되면 식(2.4)처럼 표현된다.

$$E_R(x,y)I(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2 E_O + |E_R|^2 E_O^* \tag{2.4}$$

위 식에서 $|E_R|^2$ 항은 기준파에 의해 CCD 카메라에 균일하게 작용되는 정보이며 $|E_O|^2$ 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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

허상(virtual image)의 생성을 나타낸다. 그리고 $|E_R|^2 E_O^*$ 실상의 왜곡에 의해서 나타나는데 실상의 왜곡은 공간적인 이동인자 E_R^2 때문이다. 따라서 왜곡되지 않는 실상을 얻기 위해서는 기준파를 conjugate를 시켜야하며 다음과 같이 식(2.5)처럼 표현되어 진다.

$$E_R^*(x,y)I(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R^* + |E_R^*|^2 E_O + |E_R^*|^2 E_O^* \tag{2.5}$$

식(2.4)와 식(2.5)에서 파면은 회절은 되었지만 초점(Focusing)이 맞춰지지는 않았다. 파면을 재생하기 위해서는 Fig. 2-2에서는 홀로그램면에서 물체면과 이미지면 사이의 d의 거리만큼 떨어져 있을 경우에 광학적으로나 수치적으로 빔이 전파될 때 파면을 재생을 할 수 있다는 것을 보여준다.

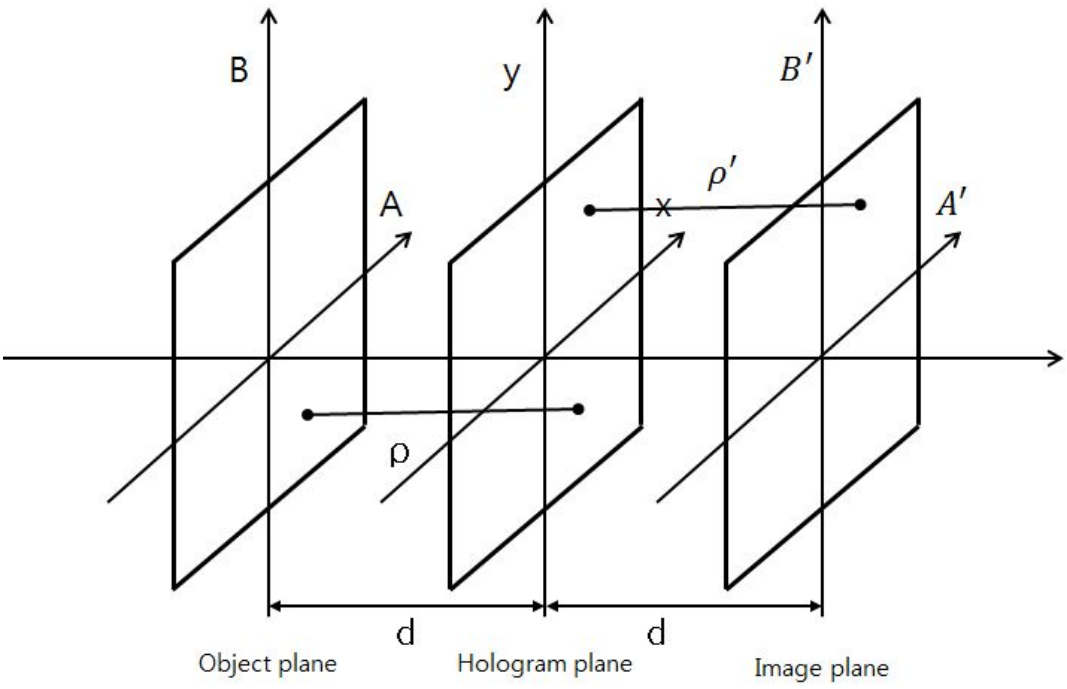


Fig. 2-2 Coordinate system for numerical reconstruction

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

홀로그램에 있어 조리개에 의한 파의 회절은 수직으로 파가 입사할 경우 Fresnel-Kirchhoff 적분에 의로 묘사될 수 있다. 이는 다음 식(2.6)과 같다.

$$U(A',B') = \frac{1}{j\lambda}\iint_{-\infty}^{\infty} E_R(x,y)I(x,y)\frac{1}{\rho}exp(-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho')dxdy \tag{2.6}$$

위 식에서 $\rho' = \left[(x-A')^2+(y-B')^2+d^2\right]^{\frac{1}{2}}$는 홀로그램면의 한 점과 그에 해당되는 재생 될 이미지면의 한 점 사이의 거리를 말하며 λ는 사용하는 광원의 파장을 의미한다. $U(A',B')$는 재생파의 장이다. 또한 점과 점사이의 각은 근사하게 0에 가깝기 때문에 기울기 인자는 1로 설정하여 계산한다. 따라서 실제 진폭에 의해 평면파 E_R의 경우 매우 단순하게 얻을 수 있으며 다음 식(2.7)과 같다.

$$E_R = a_R + j0 = a_R \tag{2.7}$$

회절 무늬는 CCD 카메라의 상면을 넘어 거리 d에 의하여 계산되어지는데 이는 실상의 면에서 복소 진폭이 재상됨을 의미한다. 식(2.6)은 수치적으로 홀로그램을 재생하기 위한 기본식이며 복소함수인 재생파 $U(A',B')$에 따라 intensity와 phase를 계산할 수 있게 된다[12].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 홀로그램의 재생

반사형 혹은 투과형의 디지털 홀로그래피 시스템을 구성하고 CCD 카메라를 통해 획득한 홀로그램은 스칼라 회절이론에 기초하여 수치적으로 재생을 할 수 있게 되는데 Fresnel diffraction method, Convolution method, Angular spectrum method, Validity of angular spectrum methode 등 다양한 재생 방법들이 있다. 이들 중 본 논문에서 사용한 방법은 근거리 및 원거리에서도 유용한 방법인 Angular spectrum method를 사용한다.

단색성 교란에 의한 복소 필드 분포가 어떤 평면을 가로질러 푸리에 해석이 가능하게되면, 다양한 공간의 푸리에 성분들은 그 평면에서 떨어져 다른 방향으로 진행하는 평면파와 동일하게 취급될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위의 조건을 만족하는 방법이 사용된다. 기존에 사용된 재생 방법은 느리고 부드럽게 변화하는 대상물은 정확하게 재생된다. 그러나 실제 필드의 재생은 한계가 있다. 따라서 회절 대상체의 Wave-field를 해석 할 수 있는 방법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Plane wave expansion으로 알려져 있는 방법을 사용하며 이는 현미경 영역까지 해석이 가능하다[13,14].

평면파가 직진하고 있다는 것을 가정하여 $z=0$인 평면을 가로지는 파의 함수는 푸리에 적분의 확장으로 다음 식(2.8)과 같이 2차원 푸리에 변환으로 표현할 수 있다.

$$A(f_x,f_y)=\iint_{-\infty}^{\infty} U(x,y,0)e^{[-j2\pi(f_x x+f_y y)]}dxdy \tag{2.8}$$

함수 U의 스펙트럼을 역으로 표현하면 다음과 같이 식(2.9)로 표현할 수 있다.

$$U(x,y,0)=\iint_{-\infty}^{\infty} U(f_x,f_y,0)e^{[j2\pi(f_x x+f_y y)]}df_x df_y \tag{2.8}$$

Fig. 2-3과 같이 $2\pi/\lambda$의 크기와 $\cos(\alpha,\beta,\gamma)$의 방향을 가지는 전파 벡터 $\vec{k}$로 진행

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하는 간단한 평면파를 고려하여 표현하게 되면 식(2.9)와 같게 된다.

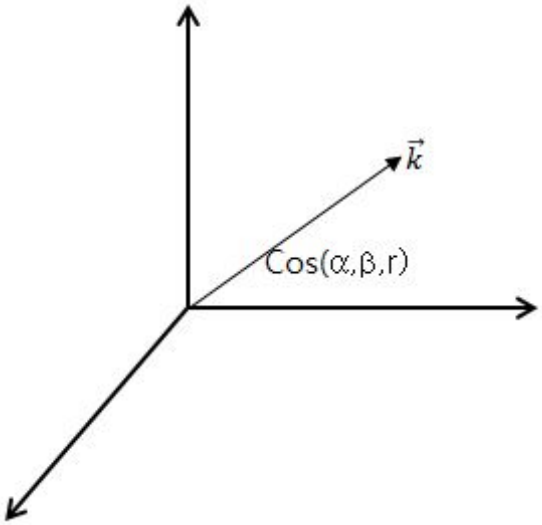


Fig. 2-3 Propagation vector $\vec{k}$

$$B(x,y,z;t) = e^{[j(\vec{k}\cdot\vec{r}-2\pi vt)]} \tag{2.9}$$

위 식에서 계산의 편리성을 위해 시간에 대한 의존도를 없애고 z평면을 가로지르는 평면파는 식(2.9)에 의해서 다시 식(2.10)으로 표현 할 수 있게 된다.

$$B(x,y,z) = e^{[j(\vec{k}\cdot\vec{r})]} = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\alpha x+\beta y)}\, e^{j\frac{2\pi}{\lambda}} \tag{2.10}$$

방향은 cosine, $\gamma = \sqrt{1-\alpha^2-\beta^2}$ 이고 $z=0$인 평면을 가로지르게 되면 식(2.8)에서 함수 $e^{[j2\pi(f_x x+f_y y)]}$는 consine 방향으로 진행하는 평면파를 나타낼 수 있다고 생각할 수 있게 된다.

$$\alpha = \lambda f_x \quad \beta = \lambda f_y \quad \gamma = \sqrt{1-(\lambda f_x)^2-(\lambda f_y)^2} \tag{2.11}$$

함수 U의 푸리에 분해에서 공간주파수 (f_x, f_y)를 갖는 평면파 성분의 복소진폭은

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

간단하게 $f_x = \frac{\alpha}{\lambda}, f_y = \frac{\beta}{\lambda}$ 일 때 $A(f_x, f_y; 0) df_x df_y$ 으로써 간단하게 구해진다. 그러면 식(2.8)은 식(2.12)로 나타낼 수 있다.

$$A(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) e^{[j2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)]} dxdy \tag{2.12}$$

식(2.12)와 같은 함수를 Angular spectrum이라 하며 본 논문에서 이용한 재생 방법은 고속 푸리에 변환과 역 고속 푸리에 기반을 두며 이 방법은 기존의 일반적인 방법보다 더 가까운 영역까지 해석할 수 있으며 고 분해능을 요구되는 대상물에 적합한 방법이다[20].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 결펼침

위상 펼침은 표본화를 위한 기준인 Nyquist rate에 의한 최소 표본화 비를 만족하는 wrapped의 위상과 unwrapped의 위상의 관계는 식(2.13)과 같고 실제 위상은 $\phi(x)$이다[15-16].

$$W\langle\phi(a)\rangle = \Phi(a) = \phi(a) + 2\pi k \tag{2.13}$$

위 식에서 W는 wrapping 연산자이고, $\Phi(x), \phi(x)$은 각각 wrapped 위상과 재생된 위상이며 이때 k는 정수 a은 표본화에 따른 상수이다. wrapping 연산자는 항상 $\Phi(x)$이 $-\pi \le \phi(a) \le \pi$이 되게 하며 Itoh의 계산에 의해 wrapped 위상과 실제 위상의 차이는 식(2.14)와 같다.

$$\triangle\phi(a) = \phi(a+1) - \phi(a),\ \triangle k(a) = k(a+1) - k(a) \tag{2.14}$$

식(2.13)과 식(2.14)를 이용하여 wrapped 의 위상차를 표현하면 식(2.15)이다.

$$\triangle[W\langle\phi(a)\rangle] = \triangle < \phi(a) > + 2\pi\triangle < k_1(a) > \tag{2.15}$$

위식을 다시 wrapped 연산자에 적용을 하면 식(2.16)이 된다.

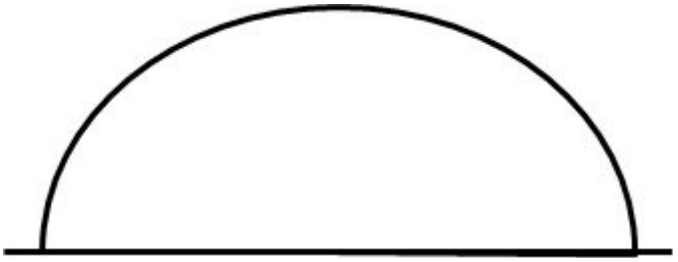
$$W[\triangle[W<\phi(a)>]] = W[\triangle<\Phi(a)>] = \triangle[<\phi(a)>] + 2\pi[\triangle < k_1(a) + k_2(a)] \tag{2.16}$$

위 식에서 k_1과 k_2는 두 번의 wrapped 연산자를 사용하여 나타난 것이며 이 시직은 wrapped의 위상차가 다음의 구간에 존재할 수 있게 한다.

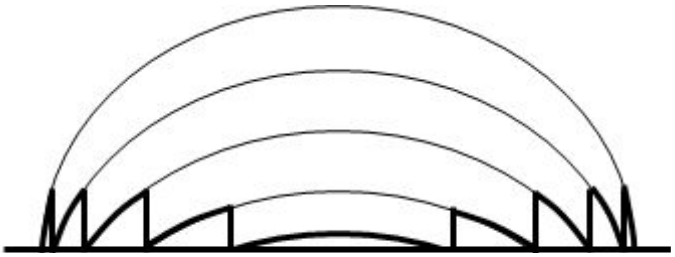
$$-\pi \le \triangle < \phi(a) > \le \pi \tag{2.16}$$

Collection @ chosun

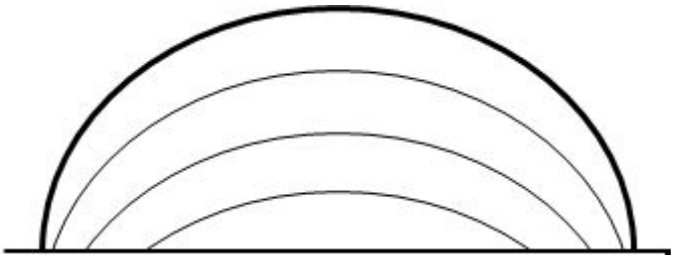
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Real phase



(b) Wrapped phase



(c) unwrapped phase

Fig. 2-4 Unwrapped

위상 이동에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상은 Arc-tangent 함수로 계산이 되어 불연속성을 가지는 톱니바퀴 형상으로 나타나기 때문에 이러한 불연속성을 해결하기 위해 불연속성을 연속성으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보를 획득하기 위해서 Phase unwrapping 과정을 거치게 된다[17]. 대상물의 형태가 복잡하고 노이즈가 많은 위상지도는 이미지의 깨짐 현상 및 왜곡의 발생이 심하여 해석에 있어 상당한 어려움이 있다. 결펼침은 위상을 구하기 위해 사용되는 Arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

연속값으로 변환하여 주는 과정이다. 먼저 Arc-tangent 함수는 $0 \sim \pi$의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 연속 위상으로 변환을 위한 결펼침은 식(2.17)을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \tag{2.17}$$

위 식에서 ϕ_{unw} : Unwrapped phase, ϕ_w : Wrapped phase, N : Fringe order 이며 결펼침을 위한 차수(N)의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 Pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면 N을 증가 또는 감소시키는 방식으로 프린지 차수(Fringe order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 따라 감도벡터(Sensitive vector)를 고려하여 구하게 된다[18-20].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실 험

제 1 절 디지털 홀로그래피 시스템

1-1. 반사형 홀로그래피 시스템

디지털 홀로그래피에서 마이켈슨 간섭계는 주로 반사가 잘 이루어지는 재질의 시험편을 측정하는데 이용된다. 마이켈슨 간섭계는 광원에서 시작한 빛을 Beam Splitter를 이용하여 분할시킨 후 각각의 빛은 같은 거리만큼 떨어진 곳에 두고 반사되는 빛들이 다시 Beam Splitter를 통해 간섭이 이뤄지는 성질을 가지고 있다. 이 간섭계를 홀로그래피에 적용시키는 경우 초기에 Beam Splitter에서 분할된 빛의 한 곳에 반사형 재질의 시험편을 놓으며 다른 하나의 빛은 이미지해석을 위한 위상제어기법을 사용할 수 있도록 PZT Actuator을 이용한 Mirror를 사용하게 되는데, 이를 이용하면 위상을 제어할 수 있게 된다. 위상을 제어하게 되면 파동방정식에서의 위상 조건이 제거가 되고 남은 변수는 실수로 만들어 계산에 있어서 용이성을 가지게 되어 변화된 간섭무늬에 의한 변형의 정보를 획득하기가 편리하게 된다. 이와 같이 마이켈슨 간섭계를 이용하게 되면 반사형 재질의 시험편을 측정할 수 있는 홀로그래피 시스템을 구성할 수 있게 되며 Fig. 3-1에 개략도를 나타내었다.

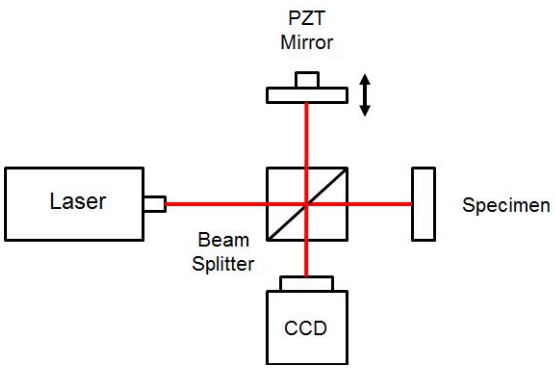


Fig. 3-1 Michelson interferometer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

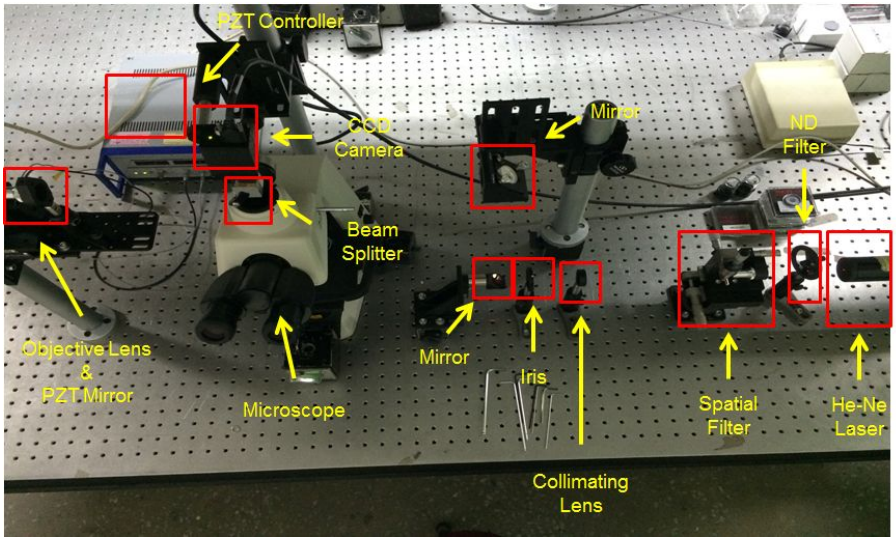


Fig. 3-2 Reflection type digital holography

반사형 홀로그래피 시스템은 반사형 재질의 대상체를 측정하기 위해 마이켈슨 간섭계를 이용하여 시스템을 구성하였다. 광원 632.8 nm의 파장을 가지는 He-Ne Laser을 사용하였다. 광원에서 나오는 빛은 ND Filter을 통과하게 되는 ND Filter 반사에 따라서 CCD 카메라에서 빛을 받아들일 때의 그 세기를 조절하기 위함이고 ND Filter를 통과한 빛은 빔 품질 향상을 위해 Pin Hole과 Objective로 이루어진 Spatial Filter를 사용하게 되는데 Objective를 통과한 빛은 확산을 하게 되고 이 빛을 다시 Pin Hole을 통과시킴으로서 최대한 레이저 빔의 중심부를 사용하기 위함이다. Spatial Filter을 통과한 빛은 Collimating Lens를 이용하여 평행광으로 만들어 주고 이 후 Iris를 이용해 그 크기를 제어할 수 있게 한다. 그 다음 이 빛은 마이크로스코프 형태의 시스템을 구성하기 위해 45° 의 각도를 가진 Mirror를 통해 반사되어 위로 향하게 되고 다시 Mirror을 통해 Beam Splitter을 향하게 하여 빛을 분할시킨다. 분할된 빛 중 하나는 Objective Lens를 통해 PZT Actuator가 장착된 Mirror를 향하게 되며 이 빛에 대해 위상제어를 하게 되고 다른 하나의 빛은 Microscopy를 통해 대상체로 향하게 된다. 이 두 빛은 다시 Beam Splitter을 통해 만나게 되고 CCD 카메라에서 간섭을 일으킨다. 여기서 얻어지는 간섭무늬를 컴퓨터를 통해 획득을 하고 이미지를 저장을 하고 이미지 처리를 통해 대상체의 변형에 대한 정보를 얻어낼 수 있게 된다. Fig. 3-2는 이와 같이 구성된 시스템을 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1-2. 투과형 홀로그래피 시스템

디지털 홀로그래피에 있어 마흐젠더 간섭계는 주로 투과가 잘 이루어지는 대상체를 측정하는데 사용된다. 마흐젠더 간섭계의 원리는 광원에서 시작된 빛을 Beam Splitter로 분할시키고 각각의 빛들을 Mirror을 만나서 45° 로 경로를 바꾼 후 다시 Beam Splitter을 만나 간섭을 일으킨다. 이 중 하나의 Mirror에 PZT Actuator을 이용하여 위상제어를 하고 다른 하나의 빛에 투과형 대상체를 통과하게 하여 두 빛의 차이에 의해 대상체의 변형의 정보를 획득하게 된다. Fig. 3-3에 마흐젠더 간섭계를 나타내었다.

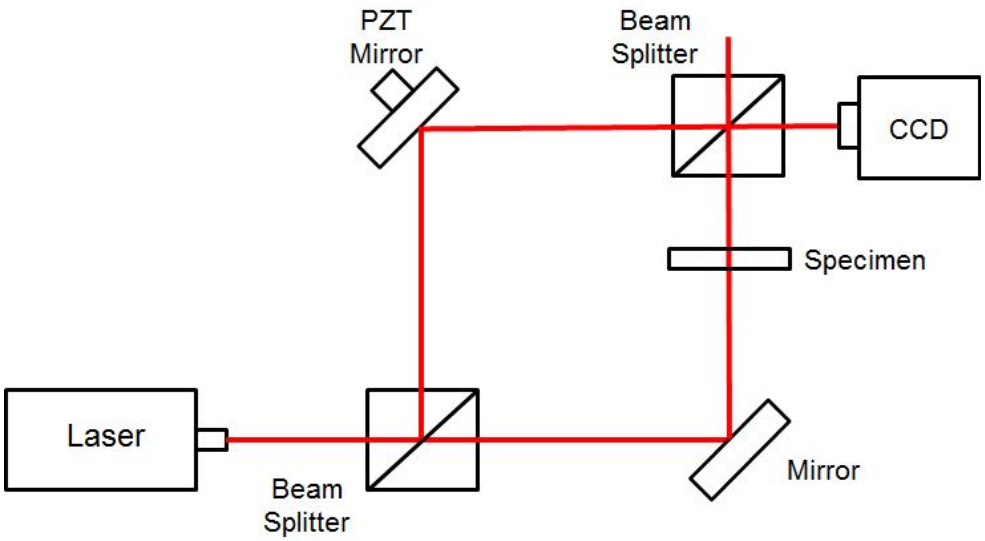


Fig. 3-3 Mach-Zender interferometer

투과형 홀로그래피 시스템은 마흐젠더 간섭계를 이용하여 빛이 투과가 잘되는 대상체에 주로 사용된다. 파장 632.8 nm를 가지는 He-Ne 레이저에서 나오는 빛은 편광을 이용하여 세기를 조절하기 위해 Polarizing Filter를 통과하게 되고 반사형과 마찬가지로 Pin Hole과 Objective Lens로 이루어진 Spatial을 통과하여 중심 빛을 사용하게 된다. 확산되는 빛은 Collimating Lens를 통과하여 편광 상태를 이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

루게 되고 Iris를 이용하여 그 크기를 조절하게 된다. 반사형에서는 Iris를 통과한 빛을 45° 의 각도를 가지는 Mirror을 이용하여 끌어올렸으나 투과형 간섭계에서는 마흐젠더 간섭계를 사용하기 때문에 Beam Splitter을 이용하여 빛을 두 개로 분할한다. 하나의 빛은 PZT Actuator가 장착된 45° 각도를 이루고 있는 PZT Mirror을 향하여 또 다른 Beam Splitter을 향하게 되고 다른 하나는 Microscopy에 장착된 시험편 거치 스테이지의 바로 밑에 45° 각도를 가지는 Mirror를 향하게 된다. 직진하는 빛은 45° 의 각도를 이루는 Mirror를 통해 위로 향하게 되고 이 빛은 시험편 거치 스테이지에 놓여 있는 시험편을 통과한 후 Objective Lens를 거쳐 Beam Splitter을 향하게 된다. 첫 번째 Beam Splitter에서 나뉜 빛은 두 번째 Beam Splitter에서 만나 간섭을 일으키고 CCD 카메라에 입사하게 된다. 이 입사된 빛은 반사형과 마찬가지로 컴퓨터를 이용하여 이미지를 획득하게 되고, 획득된 이미지를 프로그램 처리를 통해 변형의 정보를 얻어내게 된다. Fig. 3-4는 구성한 시스템을 나타낸다.

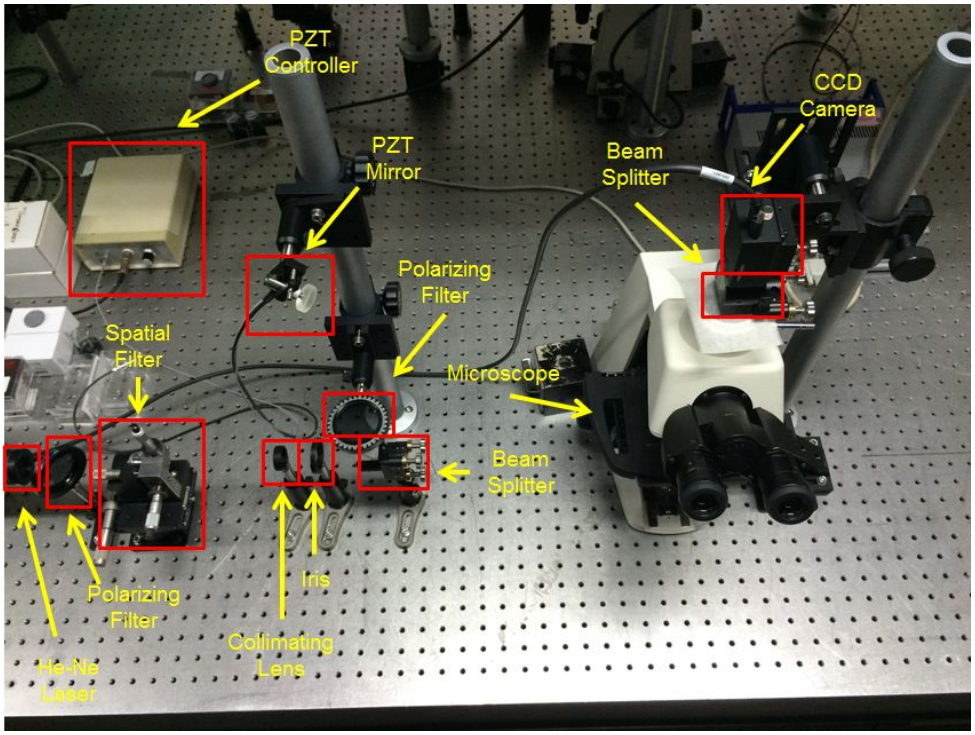


Fig. 3-4 Transmission type digital holography

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 비교 측정 장비

2-1. FE-ESEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)

본 논문에 신뢰성 확보 및 비교측정을 위해 사용된 첫 번째 장비는 주사전자현미경(Scanning Electron Micorscope)으로 대상체 표면에 전자선으로 주사하여 입체구조를 직접 관찰하는 기능을 가진 현미경으로 주로 박막 표면 및 단면 형상 측정, 표면 형상 측정과 성분 분석연구 및 개발 그리고 불량 분석 및 품질 테스트에 사용된다. 본 연구에서는 투과형과 반사형 시험편의 패터닝의 폭을 측정하기 위해 사용되었으며, 구성된 홀로그래피 간섭계에서 측정된 데이터와 비교 및 신뢰성 확보를 하고자 한다.

Model	Quanta 200 FEG (FEI COMPANY)
Maximum Load Size	50 mm x 50 mm
Magnification	x30 ~ x200
ESEM Resolution	30Kv SE : 1.5 mm, acceleration voltage : 0.2 ~ 30Kv

Fig. 3-5 FE-ESEM

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2-2. Alpha step

본 논문 실험 결과의 신뢰성 확보 및 비교 측정에 사용되는 두 번째 장비는 단차 측정을 전문적으로 하는 상용 장비로써 주로 수um needle을 이용하여 박막 또는 도막의 단차를 측정하는 장비이다. 본 논문에서는 구성된 홀로그래피 시스템으로 투과형 시험편 패터닝의 단차를 측정을 하고 비교와 신뢰성 검증을 위해 사용하였다.

Model	P-16+ (KLA Tencor)
Scan Length	80 mm
Maximum Load Size	200 mm x 20 mm (8 inch)
Scan Method	Bi-Directional Moving Stylus

Fig. 3-6 Alpha step

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2-3. AFM(Atomic Force Microscope)

본 논문 실험의 실험 결과의 신뢰성 화보를 위해 세 번째로 사용한 장비는 AFM으로 probe tip을 이용하여 tip과 측정 대상체 표면 사이의 interaction을 레이저 빔의 위치감응을 통해 광 다이오드검출기로 측정하는 것이며 측정 대상체의 초 미세구조 표면영상을 최대 1,000만 배의 배율에서 얻을 수 있는 장비로 주로 도체, 부도체, 폴리머, 박막 등 재료의 파괴나 손실 없이 3차원으로 높이 및 깊이를 측정하고 입체표면을 영상화 시켜주는 데에 사용 한다. 본 논문에서는 구성된 홀로그래피 시스템으로 반사형 시험편 패터닝의 폭을 측정을 하고 비교와 신뢰성 검증을 위해 사용하였다.

Model	XE-200 System(PSIA)
SPM Head	접촉식 AFM, 비접촉식 AFM
Maximum Load Size	200 mm x 200 mm (8 inch)
Scan Length	100 um (low voltage mode : 10 um)
Scan Speed	2 um/sec to 200 um/sec or more Vertical range 262 um or more
Resolution	< 0.15 nm (low voltage mode : < 0.02 nm)

Fig. 3-7 AFM

Collection @ chosun

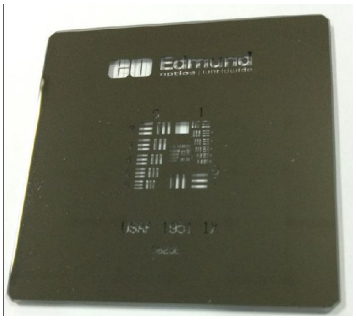
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 시험편

3-1. Resolution Target

본 논문의 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해 시험편 측정 전 Resolution target를 이용하여 측정하였다. Resolution target은 크게 positive 형과 negative형으로 나뉘어져 있어며 투과형 홀로그래피 시스템을 이용하여 positive 형을 측정하고 반사형 홀로그래피 시스템을 이용하여 negative 형을 측정하였다. 측정 위치는 Group Number 2의 Element 2의 세 개의 선 중 하나를 측정하여 사양에 나와 있는 값에 계산을 하여 측정한 결과와 비교 하였다. Fig. 3-8에 Resolution target의 사양을 표기하였으며 단위는 mm 이다.

(a) Positive



(b) Negative

Element	Group Number									
	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
1	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.0	64.0	128.0
2	0.280	0.561	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36.0	71.8	144.0
3	0.315	0.630	1.26	2.52	5.04	10.10	20.16	40.3	80.6	161.0
4	0.353	0.707	1.41	2.83	5.66	11.30	22.62	45.3	90.5	181.0
5	0.397	0.793	1.59	3.17	6.35	12.70	25.39	50.8	102.0	203.0
6	0.445	0.891	1.78	3.56	7.13	14.30	28.50	57.0	114.0	228.0

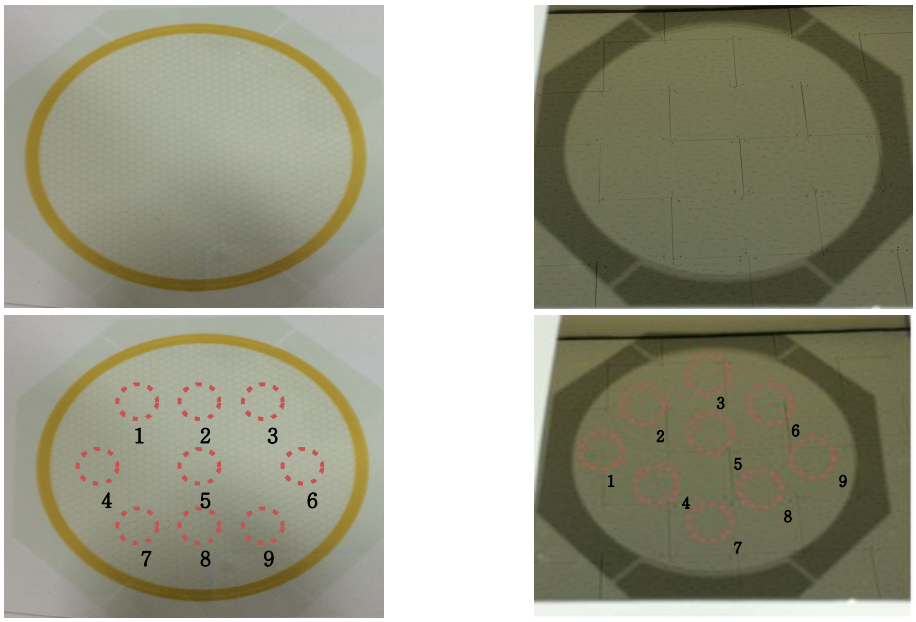
Fig. 3-8 Resolution target

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3-2. Photolithographic Product

시험편은 첨단부품소재인 반도체의 제작 시 사용되는 것으로 포토리소그래공정을 이용하여 패터닝 된 시험편이다. Fig. 3-9(a)에는 나타나 있는 것은 구성한 투과형 홀로그래피 시스템으로 측정하기에 적절하며, Fig. 3-9(b)는 반사형 홀로그래피 시스템으로 측정하기에 적절하다. 두 시험편은 원안에 벌집모양의 패턴이 이루어져 있으며 포토리소그래피 공정을 이용하여 제작이 되는데 포토리소그래피 공정은 반도체 소자의 직접도를 증가하기 위하여 사용 되는 기술로 원하는 모양으로 설계된 회로패턴이 있는 마스크에 빛을 쬐어 생기는 그림자를 웨이퍼 상에 전사시켜 복사하는 기술로 반도체의 제조공정에 중요한 부분이며 반도체 소자의 고직접도를 위해 패턴의 선폭과 선의 높이가 일정해 한다. 구성한 홀로그래피 시스템을 이용한 측정 실험은 Fig. 3-9 와 같이 임의의 9개의 점을 설정하여 한 점당 측정을 하고 비교 측정 장비인 SEM과 Alpha step 그리고 AFM의 측정결과와 비교한다.



(a) Transmission type specimen (b) Reflection type specimen

Fig. 3-9 Photolithograpic product

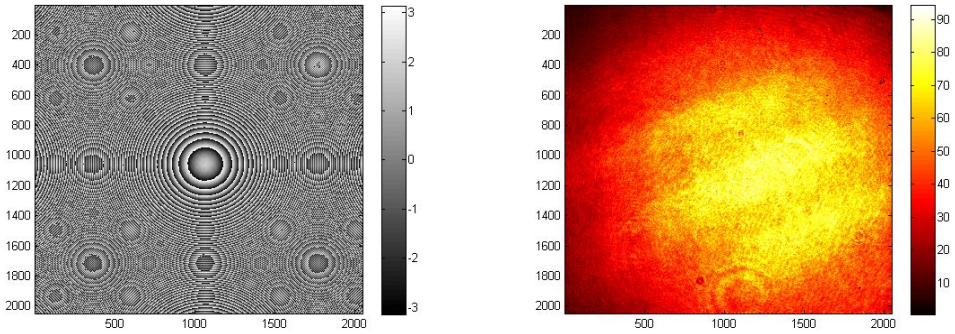
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 실 험 결 과

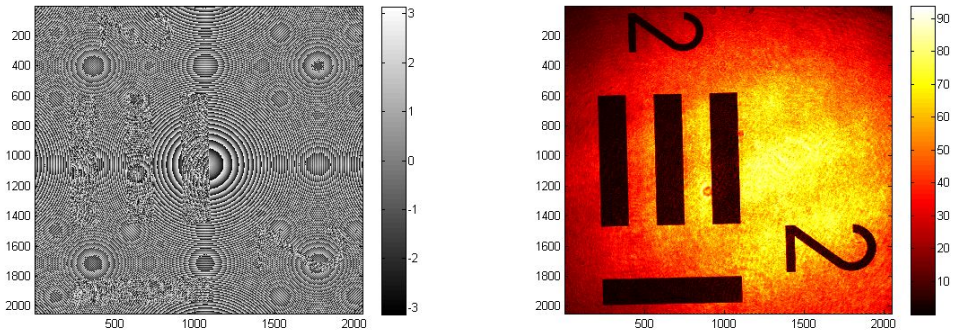
제 1 절 Resolution Target

1-1. Positive Resolution Target



(a) Angle (b) Intensity

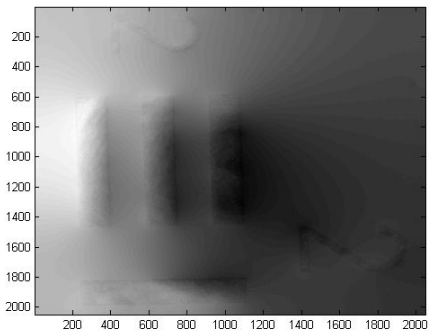
Fig. 4-1 Result of reference



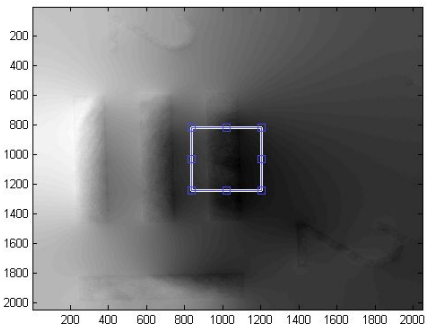
(a) Angle (b) Intensity

Collection @ chosun

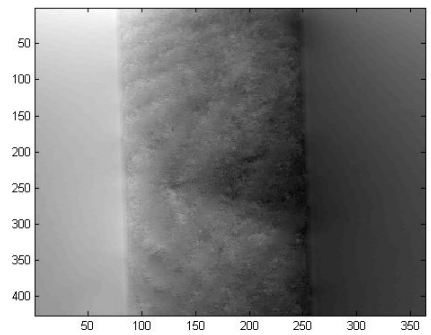
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



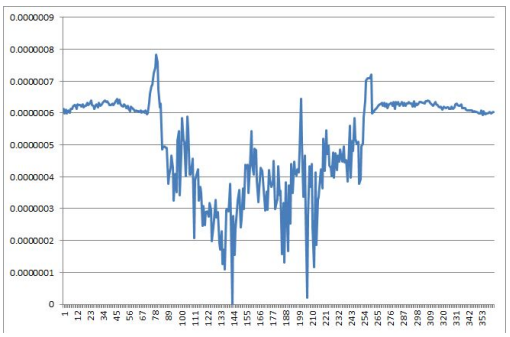
(c) Unwrapped



(d) Resize



(e) Result of resize



(f) Profile of resize image
(200 pixel of Y direction)

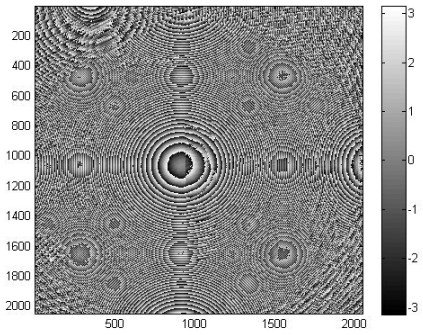
Fig. 4-2 Result of positive resolution target

Fig. 4-1에는 Positive resolution target 기준파에 대한 위상과 세기를 나타내고 있으며 Fig. 4-2에는 측정위치인 물체파의 Group number 2번의 element 2를 측정 위상과 세기 그리고 Unwrapping 한 이미지와 폭을 구하기 위한 사이즈 조절 후 이미지와 그에 따른 결과를 보여주고 있다. resolution target 의 계산은 세로의 길이의 경우 2.5/x, 가로 길이의 경우 0.5/x 인데 x에 해당되는 부분에 사양에 나와 있는 값을 집어넣게 되면 길이를 구할 수 있게 된다. Group number 2에서 element 2를 측정하였기 때문에 약 111 um가 나오게 되고 구성한 투과형 홀로그래피 시스템을 이용하여 측정한 경우는 peak 점 과 peak 점 사이의 픽셀의 수가 183개가 나오고 CCD 카메라 사양에 따라 픽셀 당 5.5 um 가지지만 x10배 율렌즈 사용을 고려하게 되면 약 101 um가 얻어 약 9 %의 오차율로 매우 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

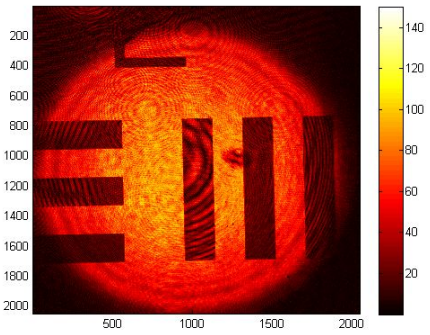
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

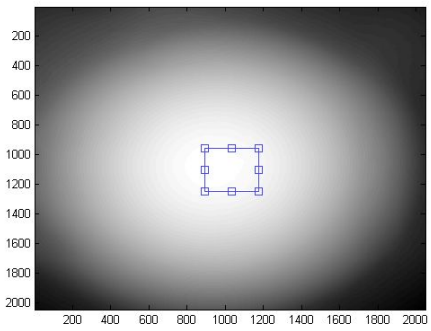
1-2. Negative Resolution Target



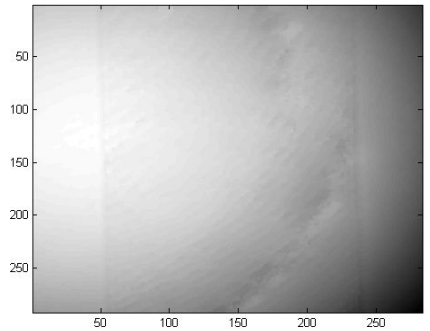
(a) Angle



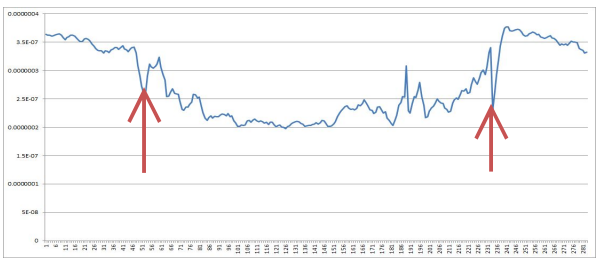
(b) Intensity



(c) Unwrap & Resize



(d) Result of resize



(e) Profile of resize image
(120 pixel of Y direction)

Fig. 4-3 Result of negative resolution target

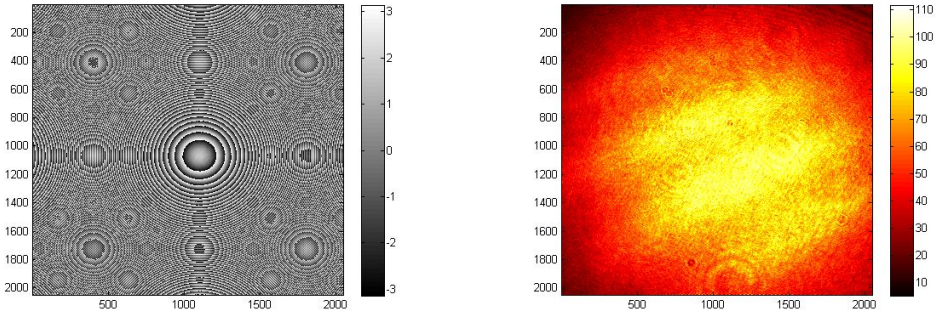
Fig. 4-3은 반사형 홀로그래피 시스템으로 Neagetive resolution target를 측정한 결과이다. 투과형과 홀로그래피 시스템과 마찬가지로 계산하였을 때 106 um가 나와 사양서의 결과와 비교하였을 때 4.5 %의 오차율로 매우 근사함을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 Transmission-type Photolithographic Product

2-1. 투과형 홀로그래피 측정



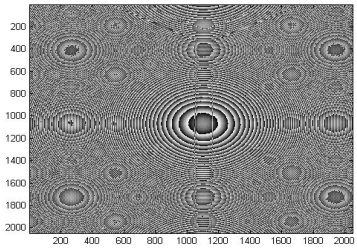
(a) Angle (b) Intensity

Fig. 4-4 Result of reference

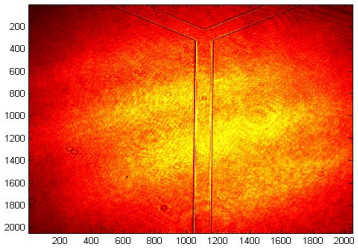
투과형 측정 실험을 위해 구성된 투과형 홀로그래피 시스템을 이용하여 우선 시험편의 Reference를 측정하였다. 레이저가 시험편을 통과하면서 굴절을 일으키기 때문에 계산의 정확성을 위해 시험편에 패터닝이 되지 않는 부분을 측정하였다. 마찬가지로 Reference의 경우도 8-step를 이용하여 측정하였으며 위 그림은 그때의 Angle 값과 Intensity값을 나타낸다. Object의 경우도 Reference의 경우와 마찬가지로 측정하여 둘의 차이로 변형의 정보를 얻어내게 된다.

Collection @ chosun

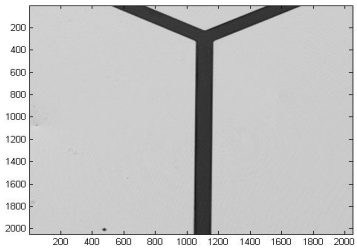
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



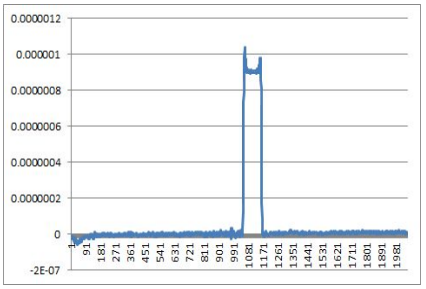
(a) Angle



(b) Intensity

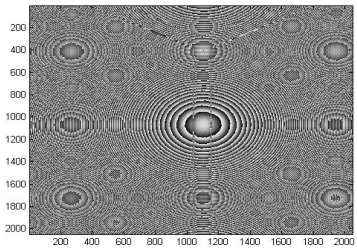


(c) Uwrapped

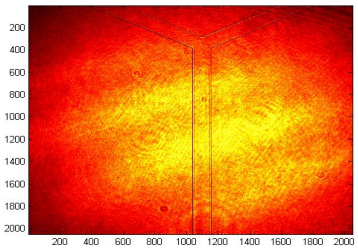


(d) 1100pixel of Y direction

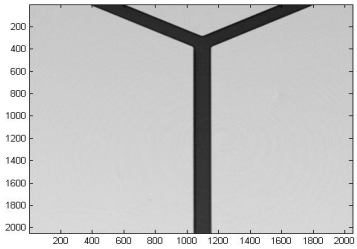
Fig. 4-5 Result of point 1



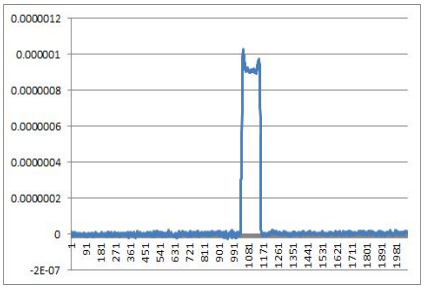
(a) Angle



(b) Intensity



(c) Uwrapped

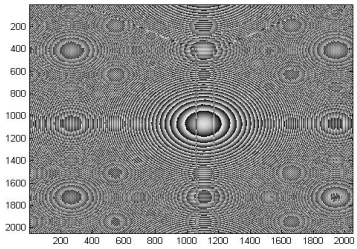


(d) 1100pixel of Y direction

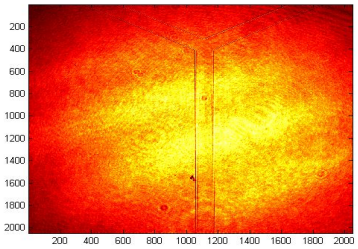
Fig. 4-6 Result of point 2

Collection @ chosun

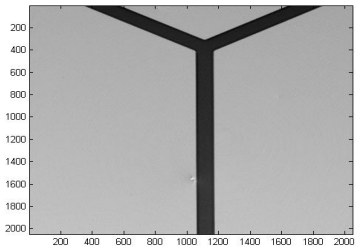
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



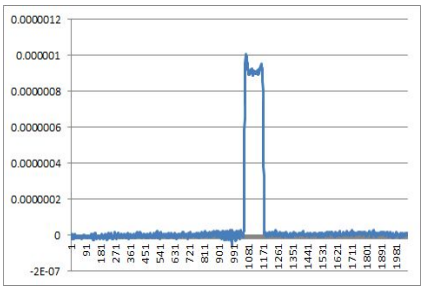
(a) Angle



(b) Intensity

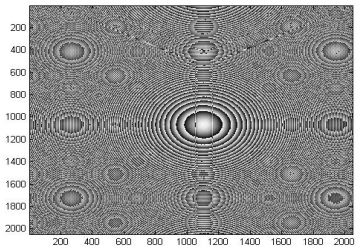


(c) Uwrapped

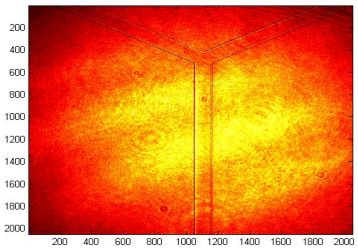


(d) 1100pixel of Y direction

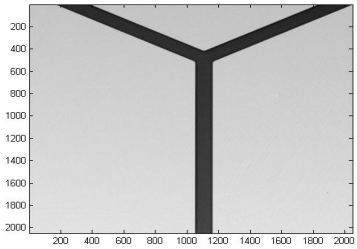
Fig. 4-7 Result of point 3



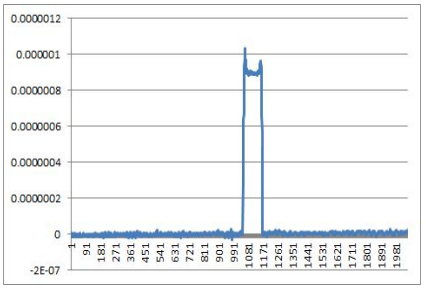
(a) Angle



(b) Intensity



(c) Uwrapped

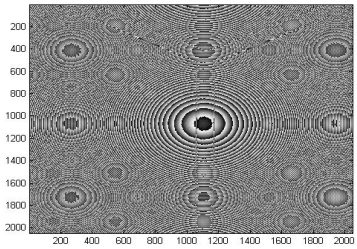


(d) 1100pixel of Y direction

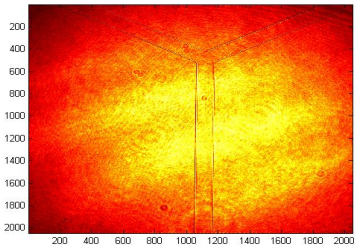
Fig. 4-8 Result of point 4

Collection @ chosun

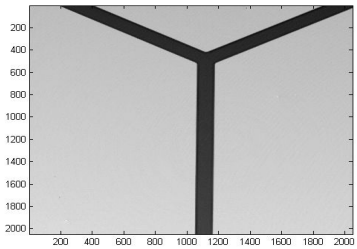
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



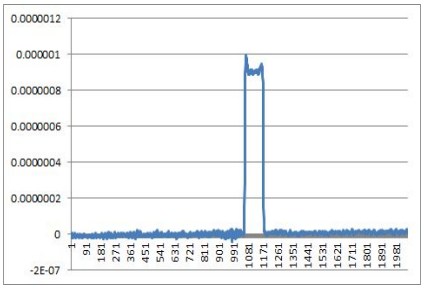
(a) Angle



(b) Intensity

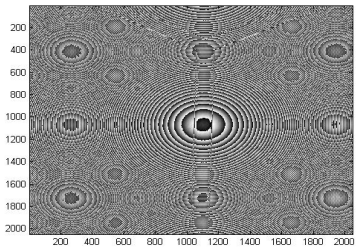


(c) Uwrapped

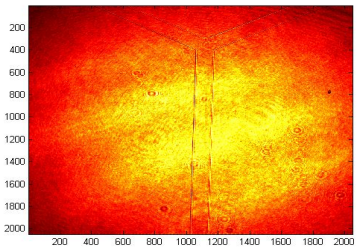


(d) 1100pixel of Y direction

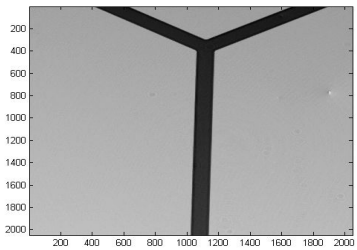
Fig. 4-9 Result of point 5



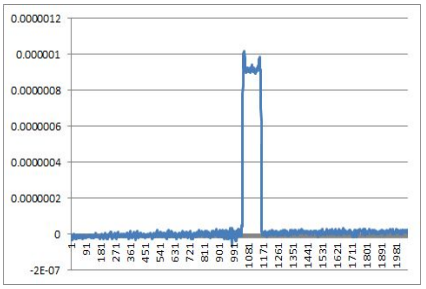
(a) Angle



(b) Intensity



(c) Uwrapped

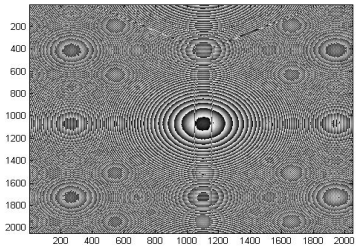


(d) 1100pixel of Y direction

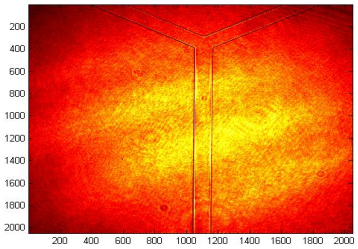
Fig. 4-10 Result of point 6

Collection @ chosun

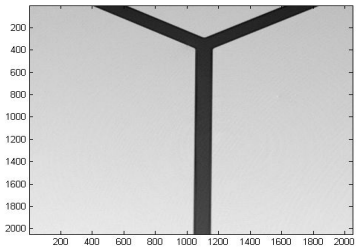
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



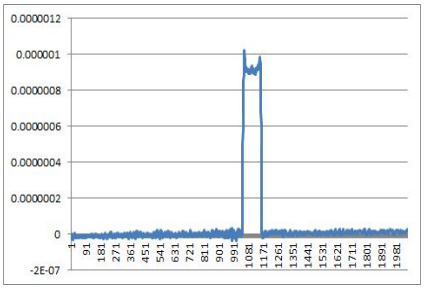
(a) Angle



(b) Intensity

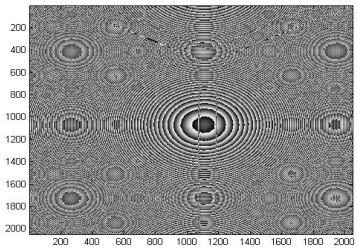


(c) Uwrapped

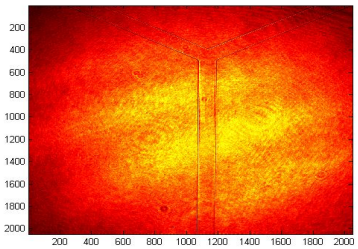


(d) 1100pixel of Y direction

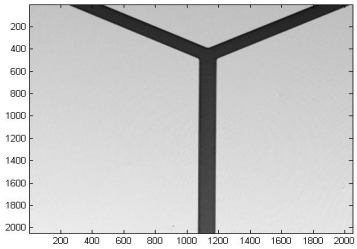
Fig. 4-11 Result of point 7



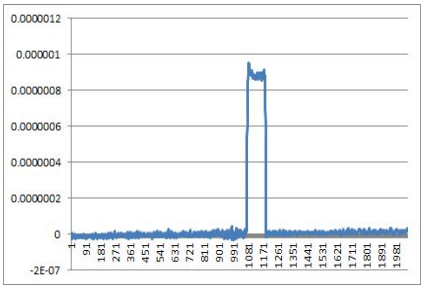
(a) Angle



(b) Intensity



(c) Uwrapped

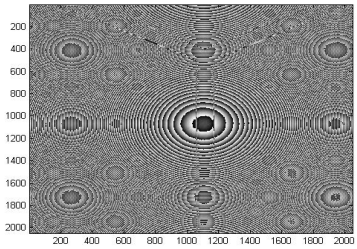


(d) 1100pixel of Y direction

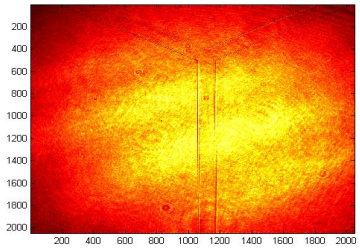
Fig. 4-12 Result of point 8

Collection @ chosun

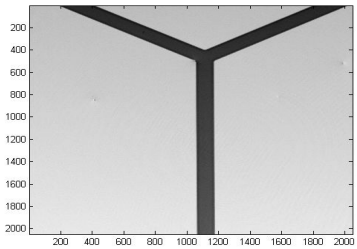
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



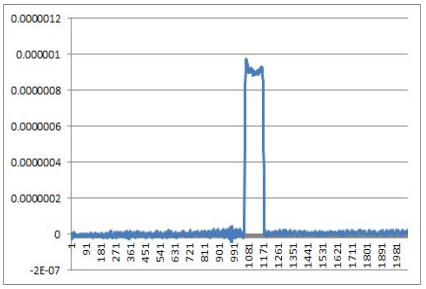
(a) Angle



(b) Intensity



(c) Uwrapped



(d) 1100pixel of Y direction

Fig. 4-13 Result of point 9

위의 Fig. 4-5, 13 같이 투과형 홀로그래피를 시스템을 이용한 실험결과는 (a)는 위상에 대한 정보를 (b)는 빛의 세기에 대한 정보를 (c)는 복원 후 Unwrapping한 이미지이며, (d)는 간섭무늬의 중심이 y축 기준으로 약 1100 pixel에 있어 그곳을 기준으로 x축 0~2048 pixel에서 얻은 profile 데이터이다. 결과 값은 Table. 1에 나타내었다.

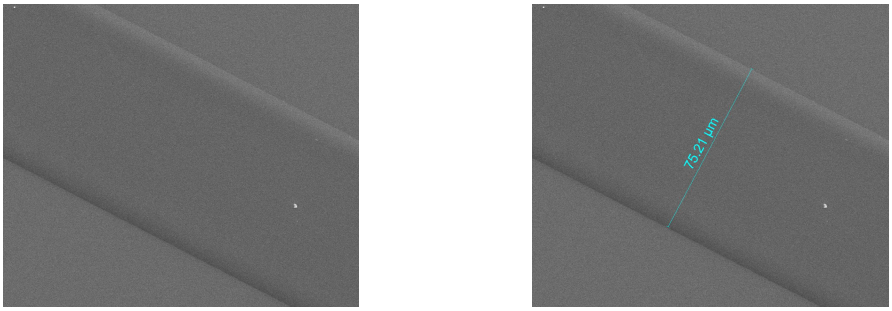
Table. 1 Result of measurement by transmission type [unit:um]

	Width	Step height
1p	72.60	0.90
2p	74.25	0.88
3p	72.60	0.88
4p	72.60	0.87
5p	73.15	0.86
6p	73.15	0.88
7p	70.40	0.87
8p	71.50	0.86
9p	73.15	0.85
Sum	653.40	7.85
Avg.	72.60	0.87

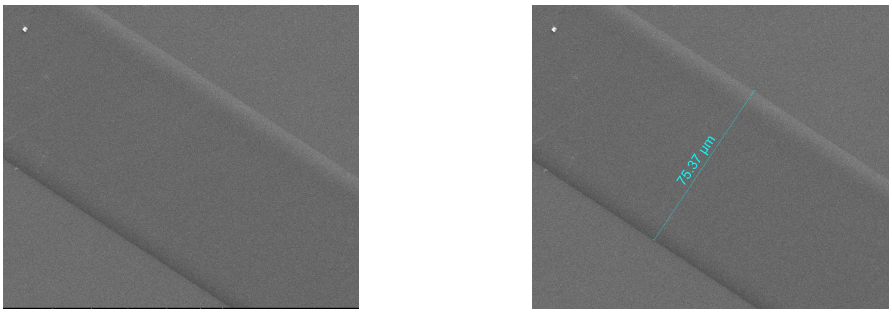
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

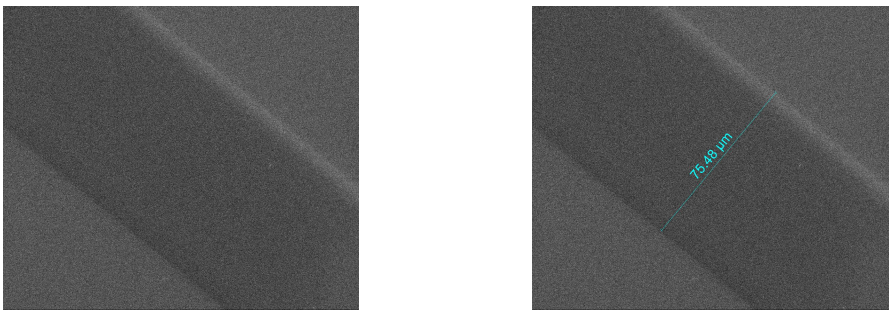
2-2. FE-ESEM 측정



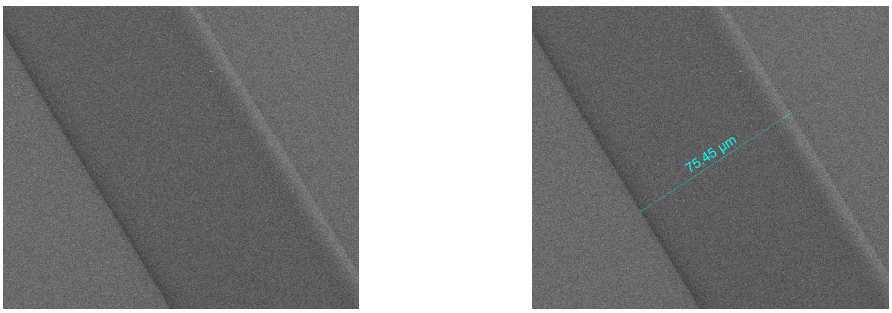
(a) Result of point 1



(b) Result of point 2



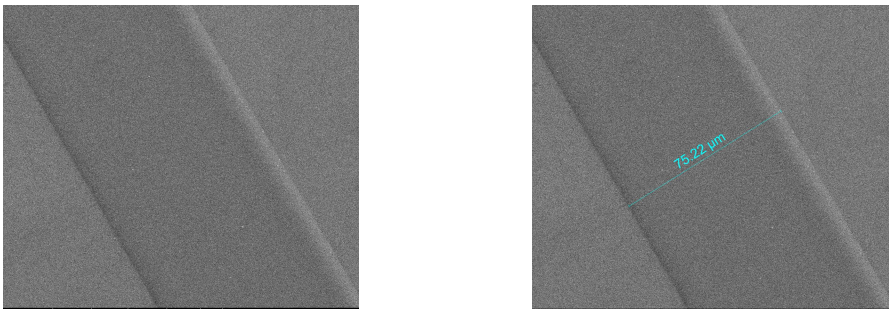
(c) Result of point 3



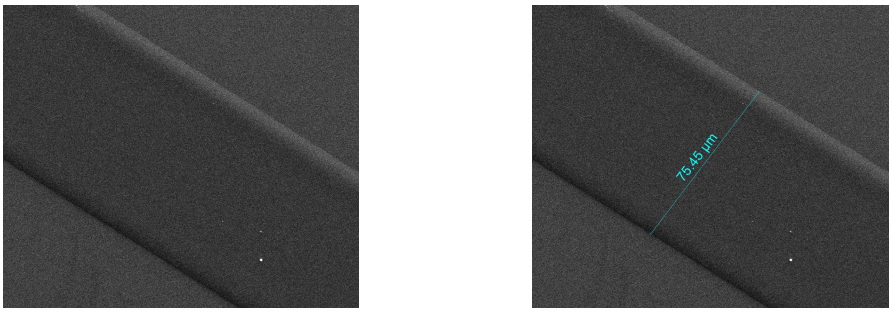
(d) Result of point 4

Collection @ chosun

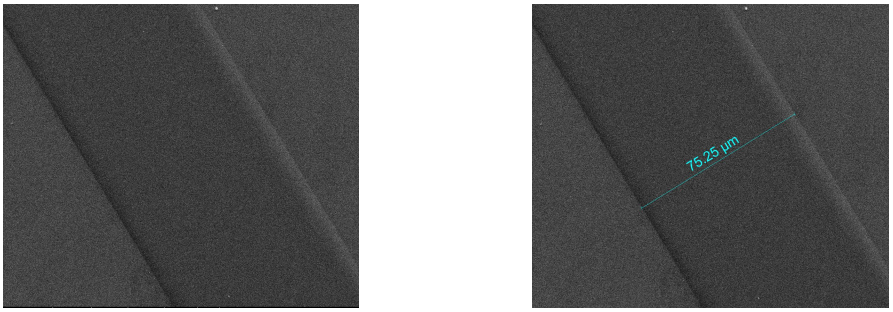
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



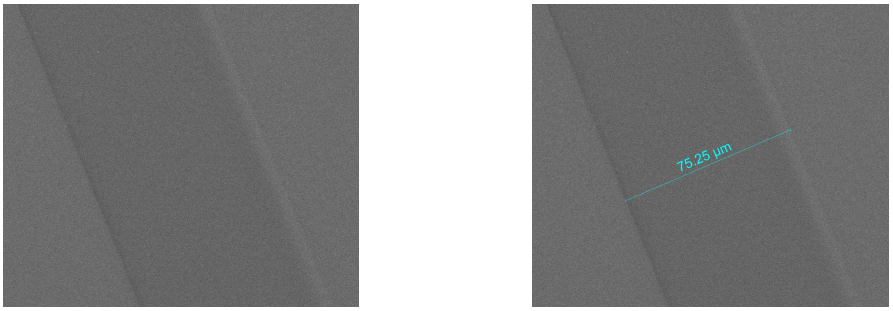
(e) Result of point 5



(f) Result of point 6



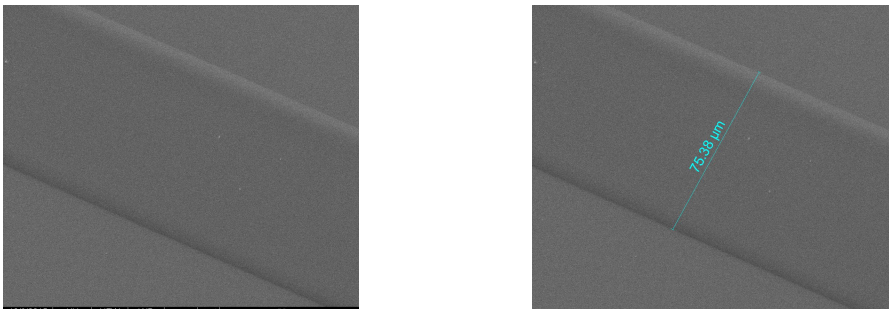
(g) Result of point 7



(h) Result of point 8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(i) Result of point 9

Fig. 4-14 Result of FE-ESEM

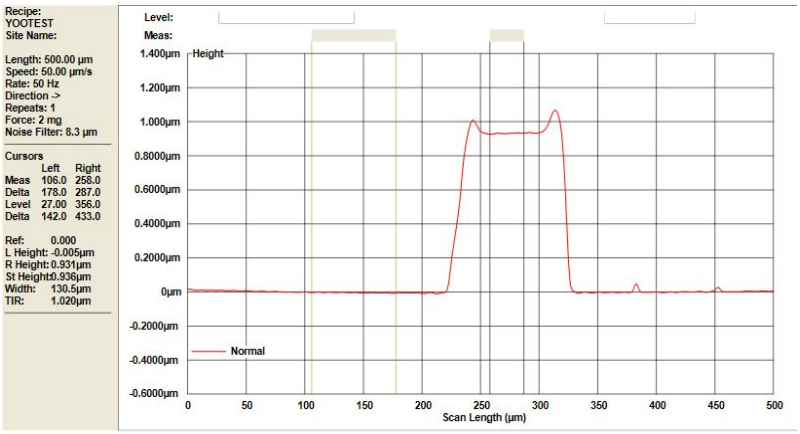
Table. 2 Result of measurement by FE-ESEM [unit:um]

	Width
1p	75.21
2p	75.37
3p	75.48
4p	75.45
5p	75.22
6p	75.45
7p	75.25
8p	75.25
9p	75.38
Sum	678.06
Avg.	75.34

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

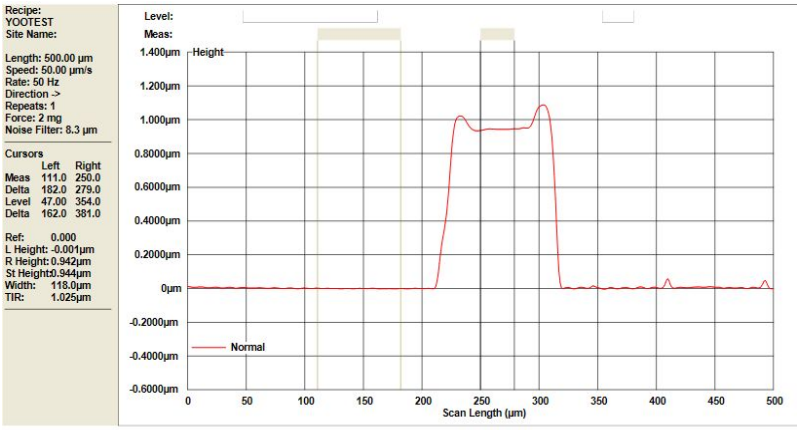
2-3. Alpha step 측정



2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.936 µm	Normal	Step Height	
Pp	1.008 µm	Normal	Peak	

(a) Result of point 1



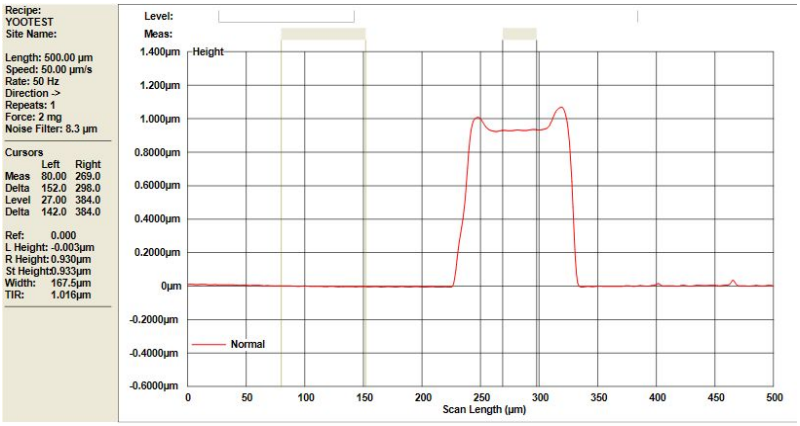
2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.944 µm	Normal	Step Height	
Pp	1.022 µm	Normal	Peak	

(b) Result of point 2

Collection @ chosun

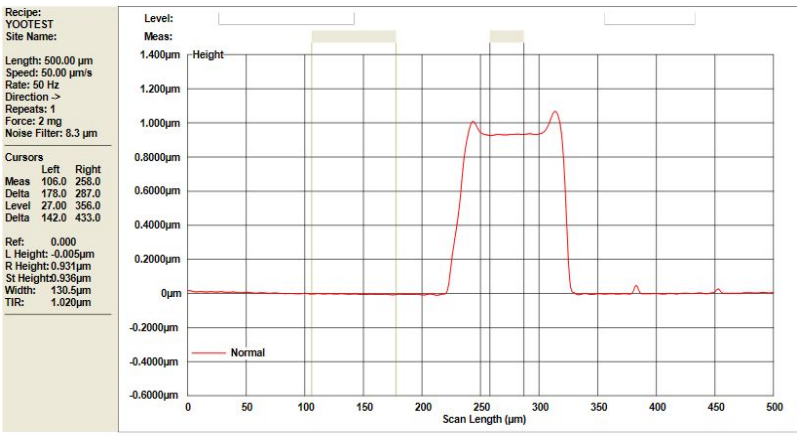
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.933 µm	Normal	Step Height	
Pp	1.007 µm	Normal	Peak	

(c) Result of point 3



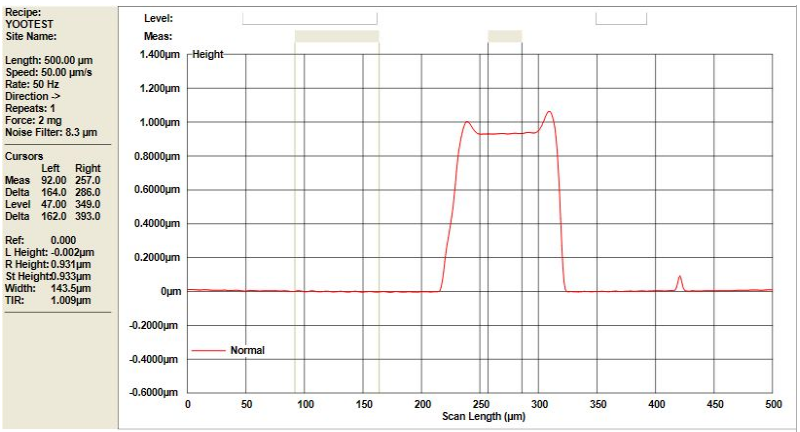
2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.936 µm	Normal	Step Height	
Pp	1.008 µm	Normal	Peak	

(d) Result of point 4

Collection @ chosun

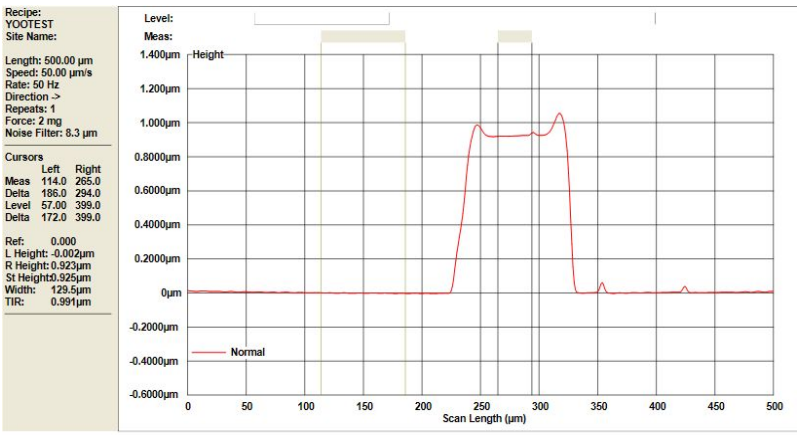
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.933 µm	Normal	Step Height	
Pp	1.003 µm	Normal	Peak	

(e) Result of point 5



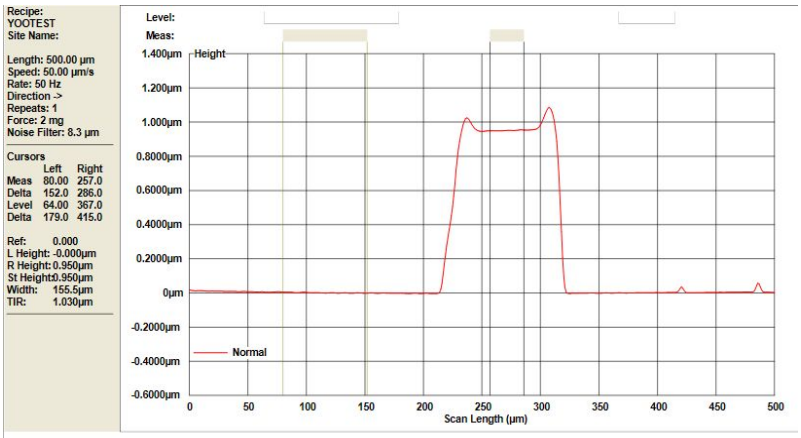
2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.925 µm	Normal	Step Height	
Pp	0.987 µm	Normal	Peak	

(f) Result of point 6

Collection @ chosun

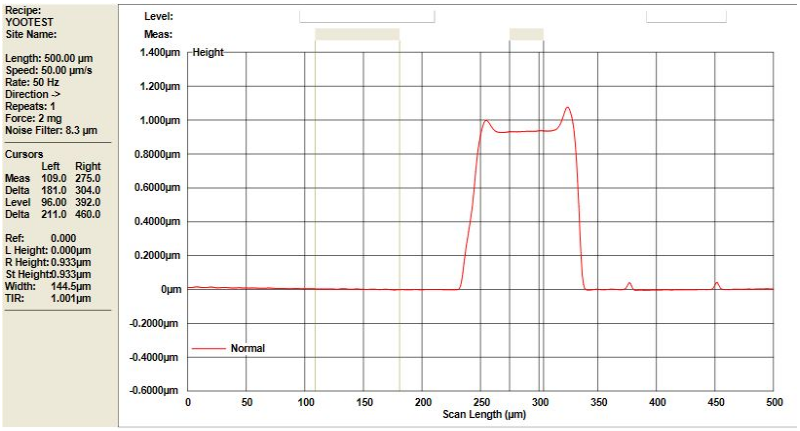
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.950 µm	Normal	Step Height	
Pp	1.024 µm	Normal	Peak	

(g) Result of point 7



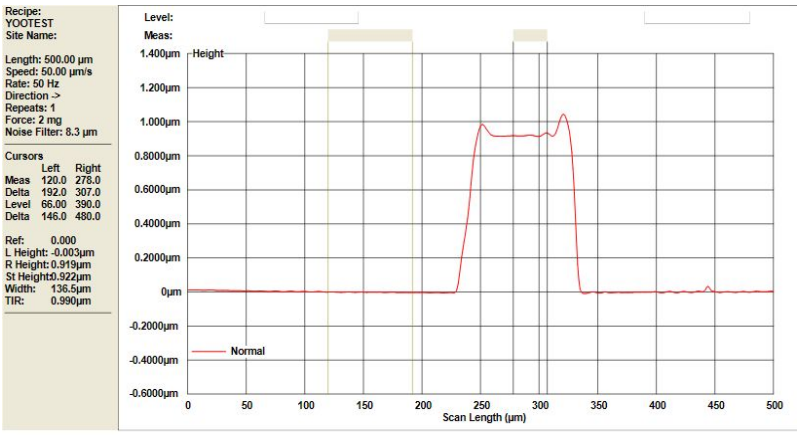
2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.933 µm	Normal	Step Height	
Pp	0.998 µm	Normal	Peak	

(h) Result of point 8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



2D Surface Parameter Summary

Param.	Value	Trace	Description	Arguments
Height	0.922 µm	Normal	Step Height	
Pp	0.983 µm	Normal	Peak	

(i) Result of point 9

Fig. 4-15 Result of Alpha step

Table. 3 Result of measurement by Alpha step [unit:um]

	Step height
1p	0.944
2p	0.944
3p	0.933
4p	0.936
5p	0.933
6p	0.925
7p	0.950
8p	0.933
9p	0.922
Sum	8.420
Avg.	0.936

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2-4. Compare of Result

Table. 4 Compare of measurement result of transmission type [unit:um]

	Transmission type digital holography		FE-ESEM	Alpha step
	Width	Step height	Width	Step height
1p	72.600	0.900	75.210	0.944
2p	74.250	0.880	75.370	0.944
3p	72.600	0.880	75.480	0.933
4p	72.600	0.870	75.450	0.936
5p	73.150	0.860	75.220	0.933
6p	73.150	0.880	75.450	0.925
7p	70.400	0.870	75.250	0.950
8p	71.500	0.860	75.250	0.933
9p	73.150	0.850	75.380	0.922
Sum	653.400	7.000	602.680	7.498
Avg.	72.600	0.870	75.340	0.936

투과형 홀로그래피 시스템으로 측정한 폭과 FE-ESEM으로 측정한 폭의 결과를 비교하였을 때 구성한 시스템은 9포인트 평균으로 72.6 um가 나왔으며 FE-SEM의 경우 75.34 um가 나왔으며 둘 차이는 약 2.74 um의 차이를 보였으며 비교측정 장비인 FE-SEM을 기준으로 3.6 %의 오차율을 가짐을 알 수 있다. 마찬가지로 투과형 시스템으로 측정한 단차와 Alpha step으로 측정한 단차의 결과를 비교하였을 때 구성한 시스템의 경우 9포인트 평균 0.87 um가 나왔으며 Alpha step의 경우 0.963 um가 나왔다. 비교측정 장비인 Alpha step를 기준으로 구성한 시스템의 결과가 약 7 %의 오차율을 보임을 알 수 있었다. 하지만 투과형 홀로그래피 시스템은 두 비교측정 장비와는 다르게 시험편에 비접촉, 비손상 측정이 가능하며 한번 구성해 놓는 경우 측정시간이 수배 짧다는 장점을 가지고 있어 오차율을 감안할 수 있다고 판단하였다.

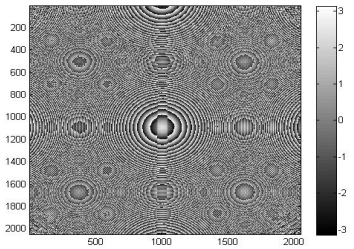
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

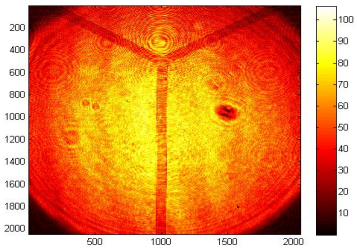
제 3 절 Reflection-type Photolithographic Product

3-1. 반사형 홀로그래피 측정

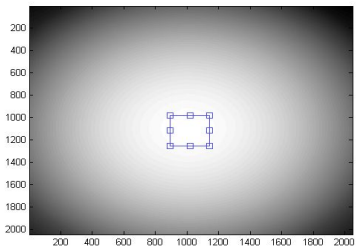
반사형 시험편 패터닝의 폭과 단차를 측정하기 위해 구성한 반사형 홀로그래피 시스템을 이용하였다. 반사형의 투과형과는 다르게 Reference를 따로 잡지 않고 Object에 8-step를 이용하여 측정하고 Object를 기준으로 프로그램 적으로 임의의 Reference를 만들어 둘의 차이에 의해서 변형의 정보를 얻어내게 된다. 또 한 임의의 Reference를 만들기 때문에 둘 사이의 세기의 차이에 의해서 2048 x 2048 픽셀에 대한 정보를 다 얻어내지 않고 간섭무늬에 집중되어있는 시험편 부분만을 잘라내어 측정하였으며, 마찬가지로 측정의 결과가 곡률로 나와 이미지를 피팅 후 데이터를 획득하였다. 이후 FE-ESEM과 Alpha step으로 측정한 결과와 비교하였다.



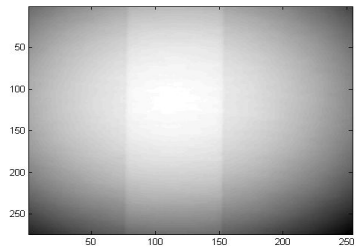
(a) Angle



(b) Intensity



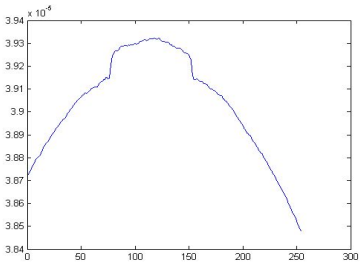
(c) Unwrapped & Resize



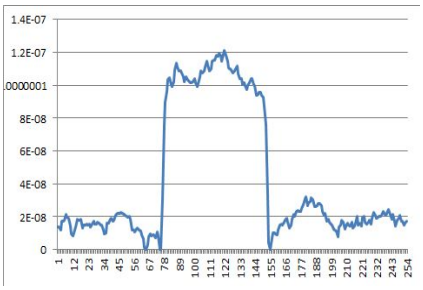
(d) Result of resize

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

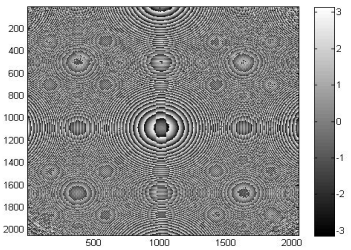


(e) 120 pixel of Y direction

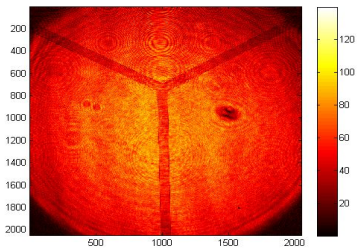


(f) Pitting data

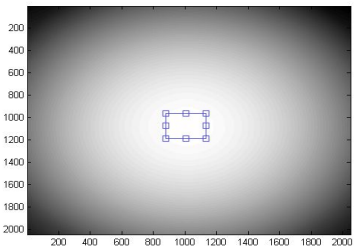
Fig. 4-16 Result of point 1



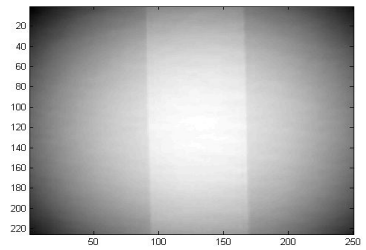
(a) Angle



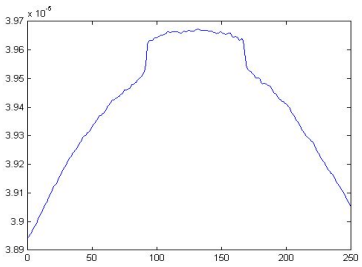
(b) Intensity



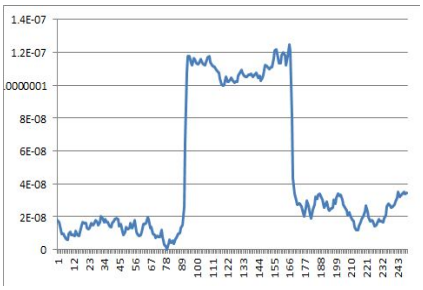
(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



(e) 120 pixel of Y direction

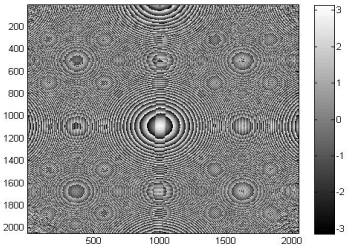


(f) Pitting data

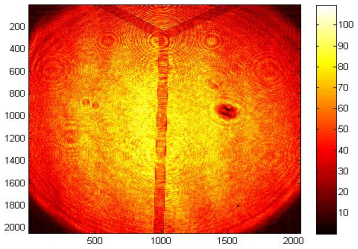
Fig. 4-17 Result of Point 2

Collection @ chosun

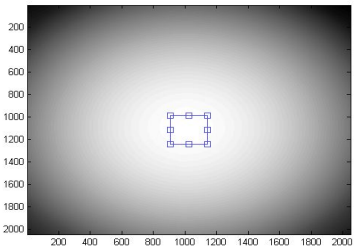
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



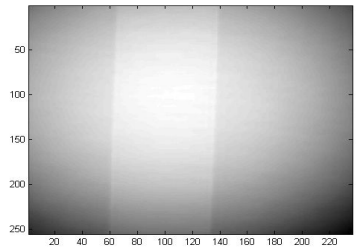
(a) Angle



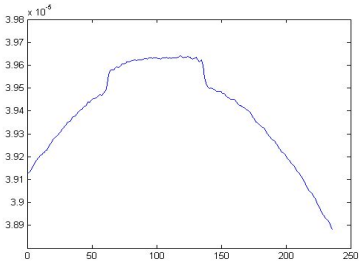
(b) Intensity



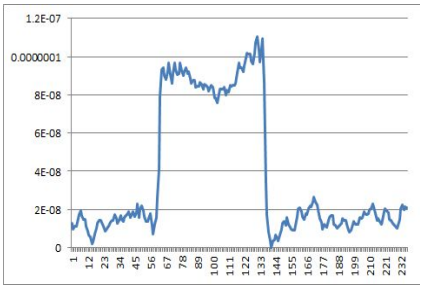
(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



(e) 120 pixel of Y direction

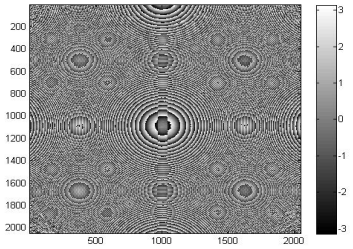


(f) Pitting data

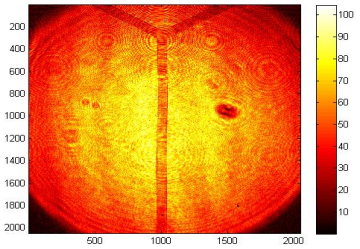
Fig. 4-18 Result of Point 3

Collection @ chosun

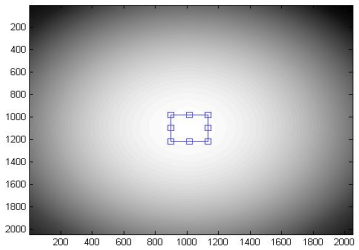
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



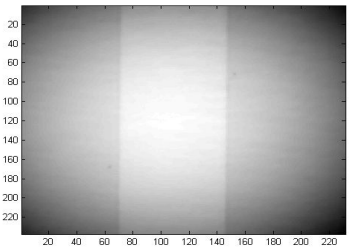
(a) Angle



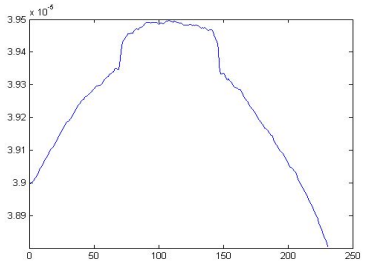
(b) Intensity



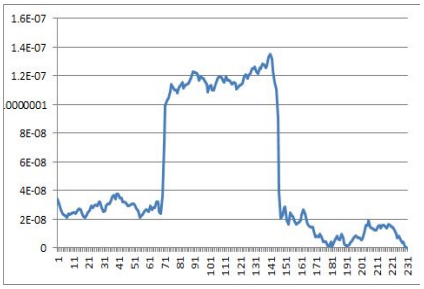
(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



(e) 120 pixel of Y direction

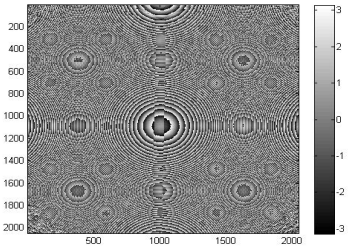


(f) Pitting data

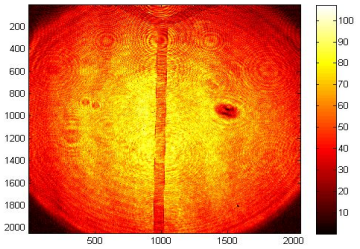
Fig. 4-19 Result of Point 4

Collection @ chosun

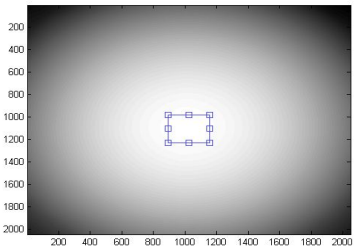
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



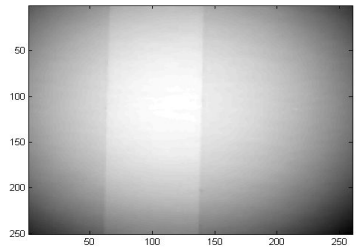
(a) Angle



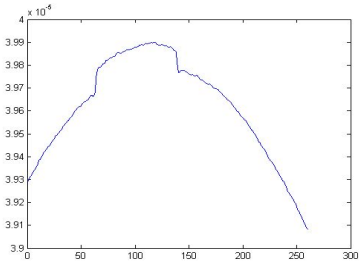
(b) Intensity



(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



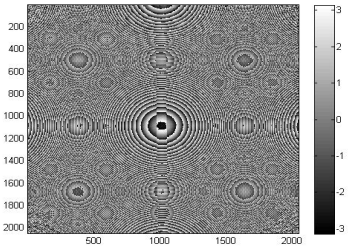
(e) 120 pixel of Y direction

(f) Pitting data

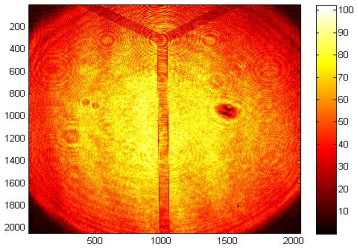
Fig. 4-20 Result of Point 5

Collection @ chosun

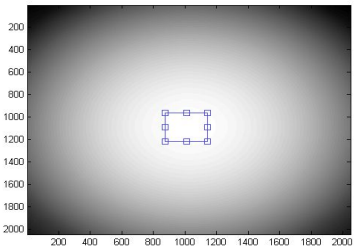
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



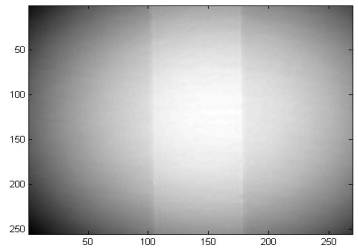
(a) Angle



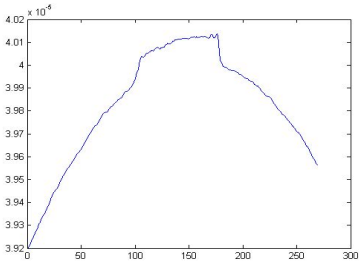
(b) Intensity



(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



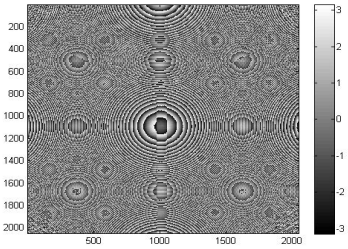
(e) 120 pixel of Y direction

(f) Pitting data

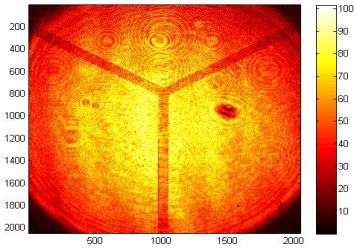
Fig. 4-21 Result of Point 6

Collection @ chosun

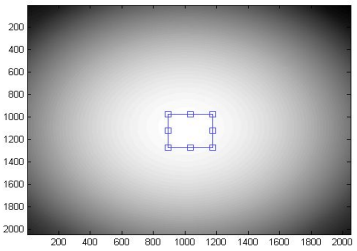
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



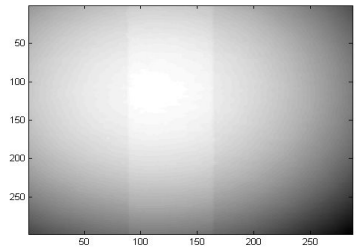
(a) Angle



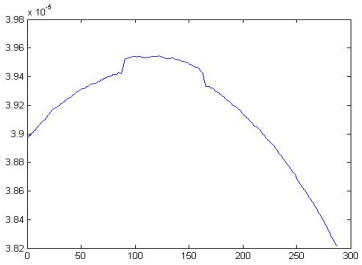
(b) Intensity



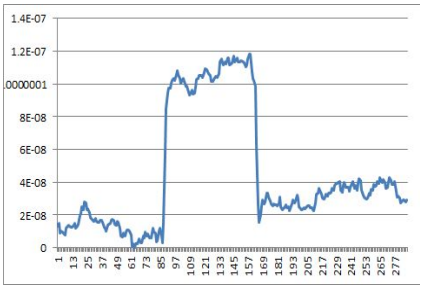
(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



(e) 120 pixel of Y direction

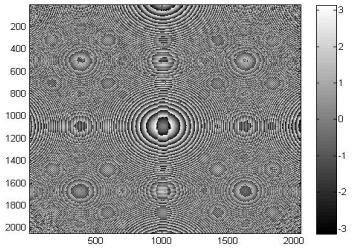


(f) Pitting data

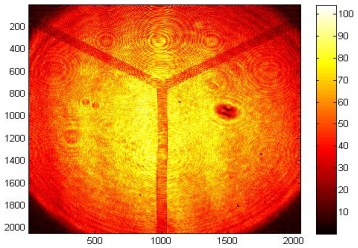
Fig. 4-22 Result of Point 7

Collection @ chosun

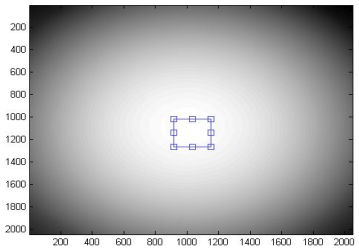
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



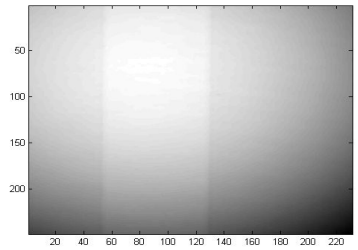
(a) Angle



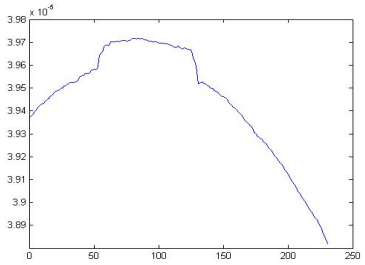
(b) Intensity



(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



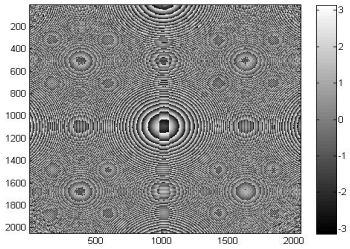
(e) 120 pixel of Y direction

(f) Pitting data

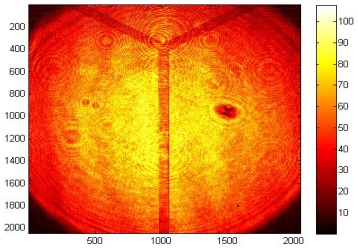
Fig. 4-23 Result of Point 8

Collection @ chosun

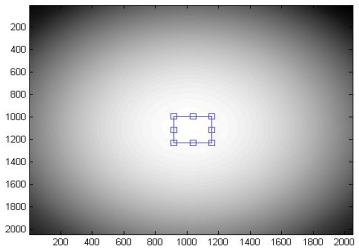
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



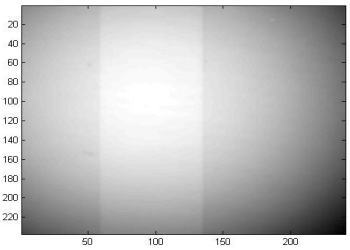
(a) Angle



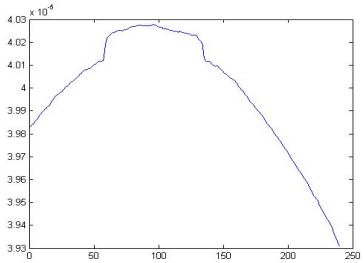
(b) Intensity



(c) Unwrapped & Resize



(d) Result of resize



(e) 120 pixel of Y direction

(f) Pitting data

Fig. 4-24 Result of Point 9

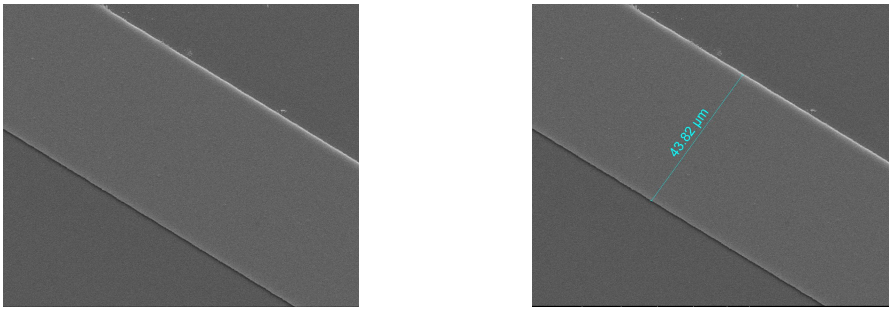
Table. 5 Result of measurement by reflection type [unit:um]

	Width
1p	44.00
2p	44.00
3p	46.20
4p	43.45
5p	43.45
6p	43.45
7p	42.90
8p	43.50
9p	44.00
Sum	394.90
Avg.	43.88

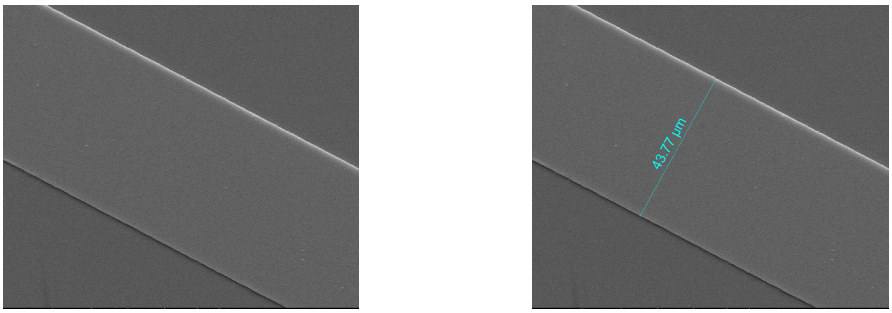
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

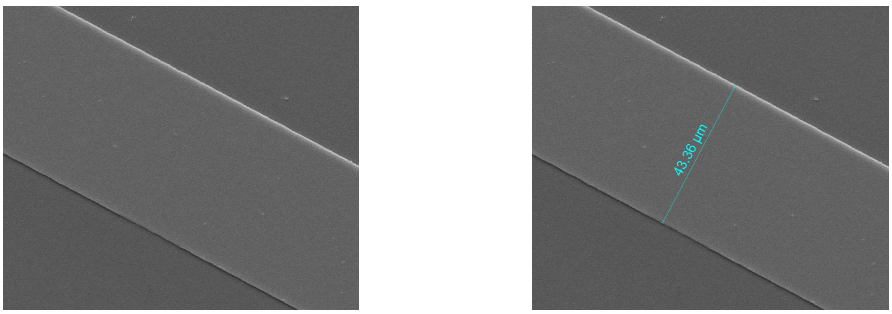
3-2. FE-ESEM 측정



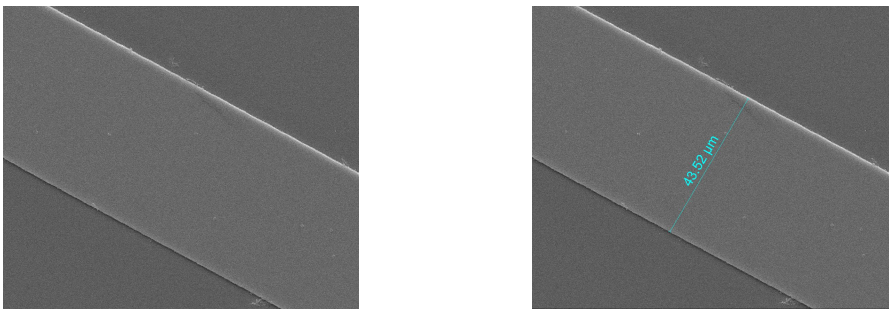
(a) Result of point 1



(b) Result of point 2



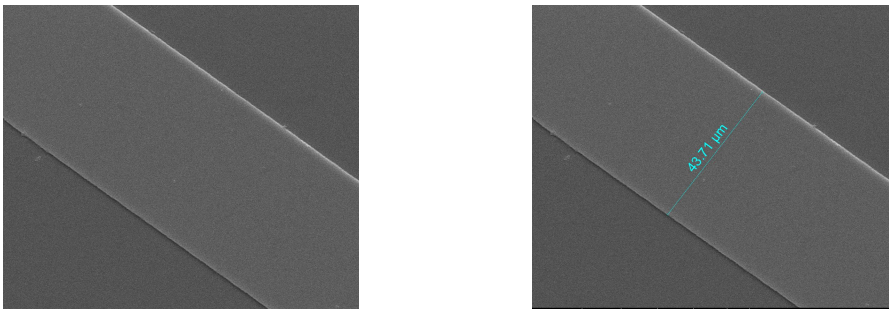
(c) Result of point 3



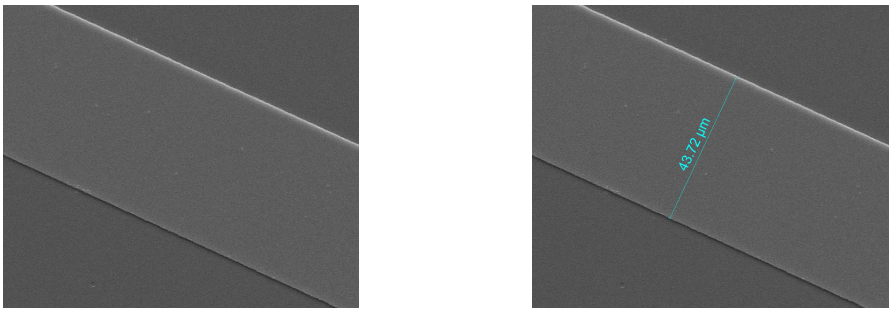
(d) Result of point 4

Collection @ chosun

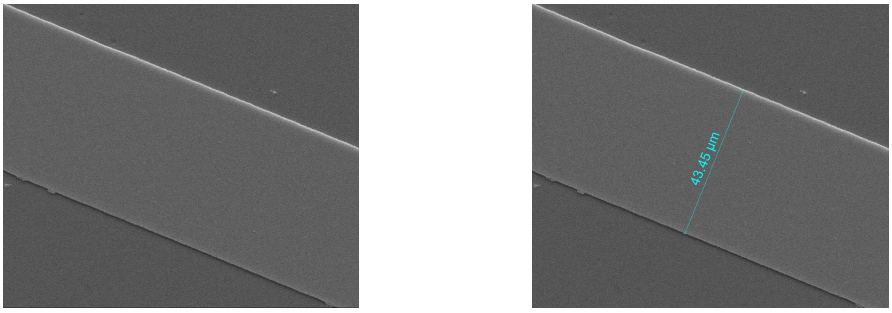
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



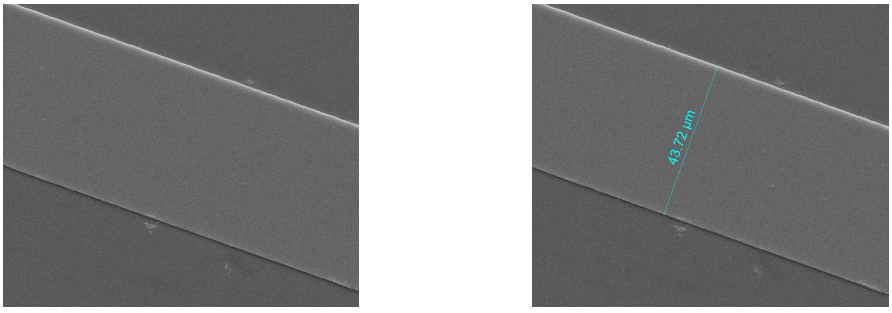
(e) Result of point 5



(f) Result of point 6



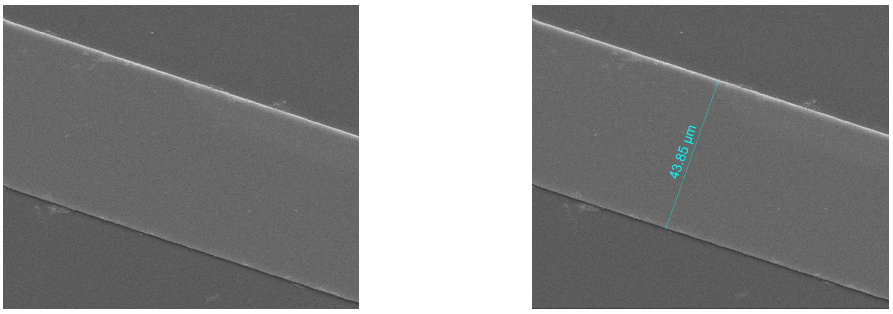
(g) Result of point 7



(h) Result of point 8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(i) Result of point 9

Fig. 4-25 Result of FE-ESEM

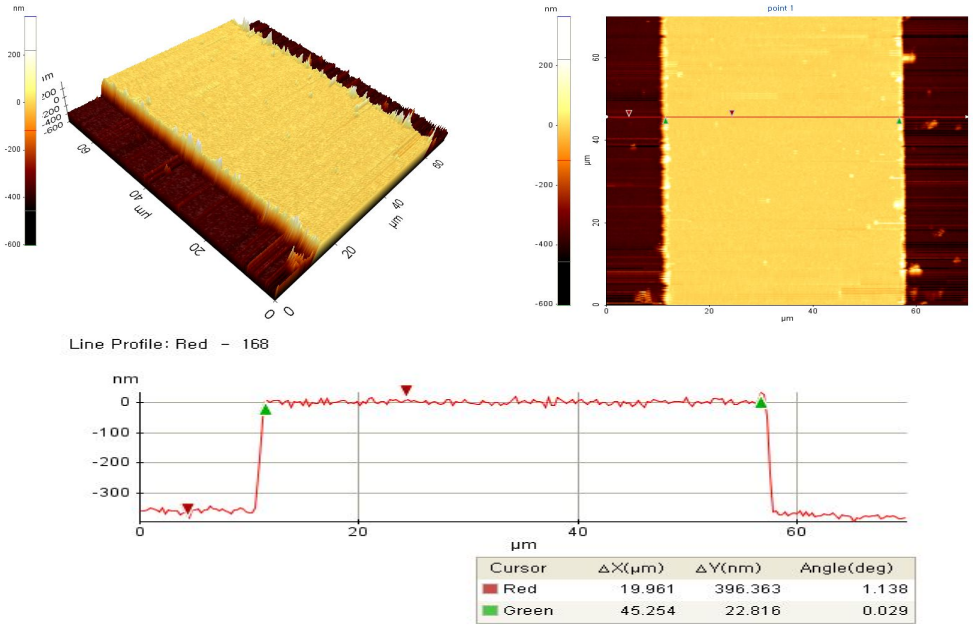
Table. 6 Result of measurement by FE-ESEM [unit:um]

	Width
1p	43.82
2p	43.77
3p	43.36
4p	43.52
5p	43.71
6p	43.72
7p	43.45
8p	43.72
9p	43.85
Sum	392.92
Avg.	43.66

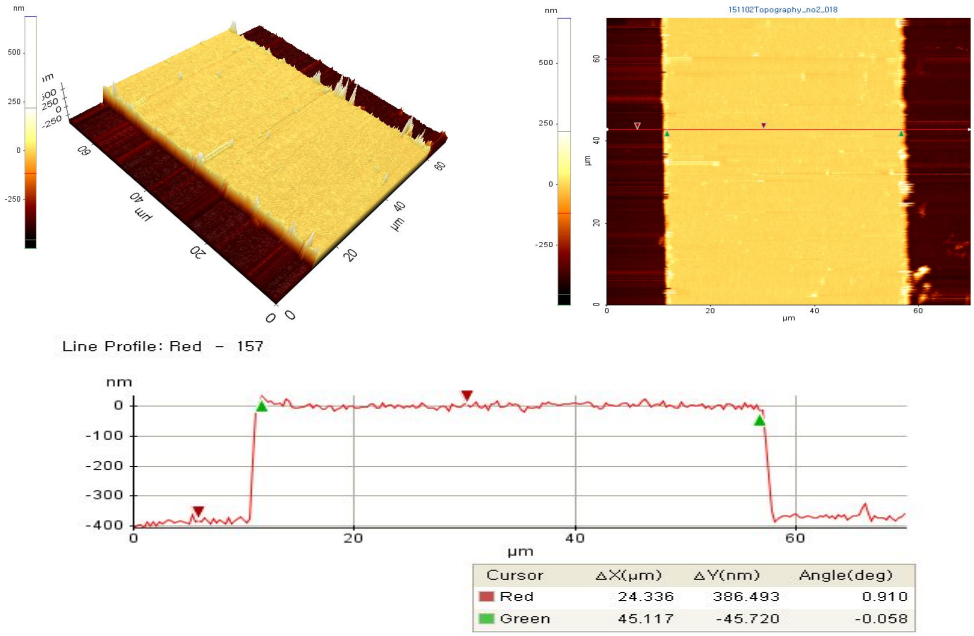
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3-3. AFM



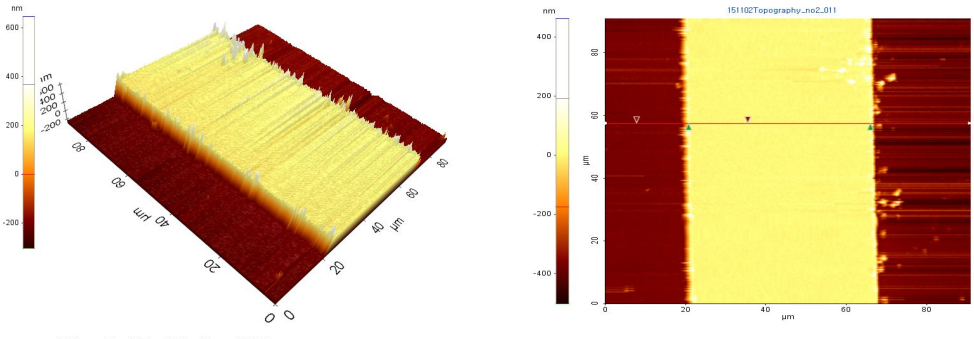
(a) Result of point 1



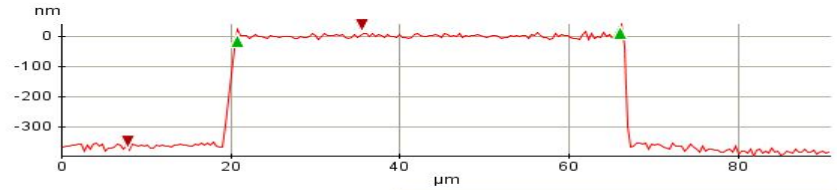
(b) Result of point 2

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

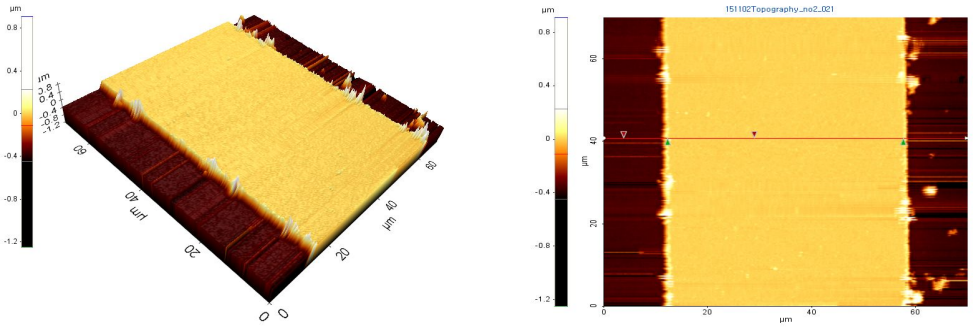


Line Profile: Red - 163

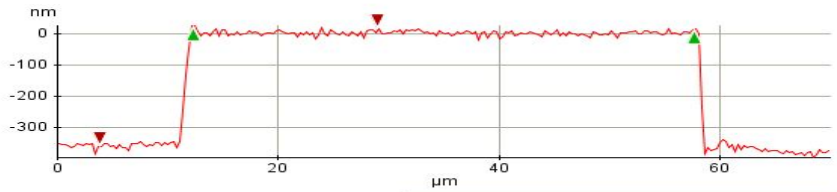


Cursor	ΔX(μm)	ΔY(nm)	Angle(deg)
Red	27.699	387.357	0.801
Green	45.277	29.874	0.038

(c) Result of point 3



Line Profile: Red - 150

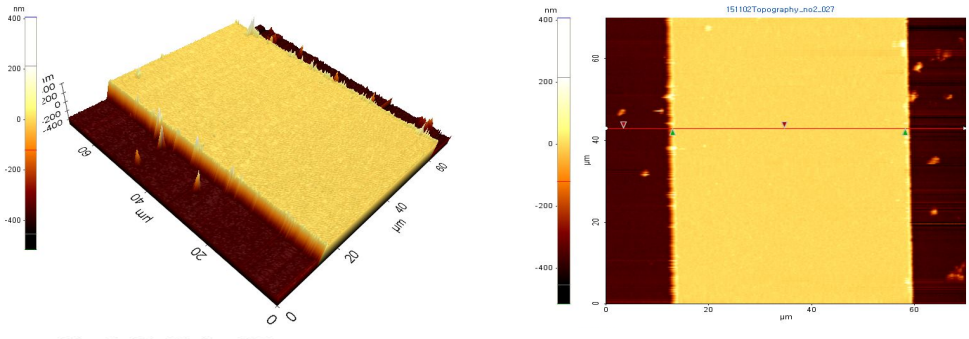


Cursor	ΔX(μm)	ΔY(μm)	Angle(deg)
Red	25.156	0.376	0.856
Green	45.391	-0.008	-0.010

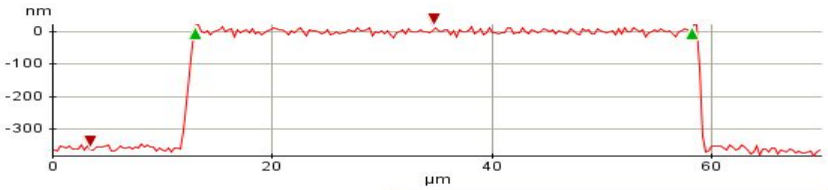
(d) Result of point 4

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

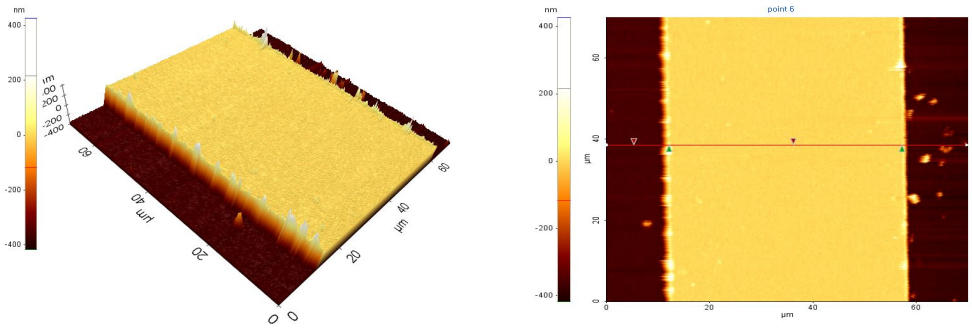


Line Profile: Red - 158

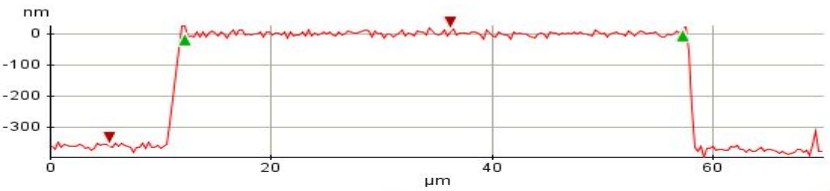


Cursor	ΔX(μm)	ΔY(nm)	Angle(deg)
Red	31.309	375.459	0.687
Green	45.254	-0.613	-0.001

(e) Result of point 5



Line Profile: Red - 142

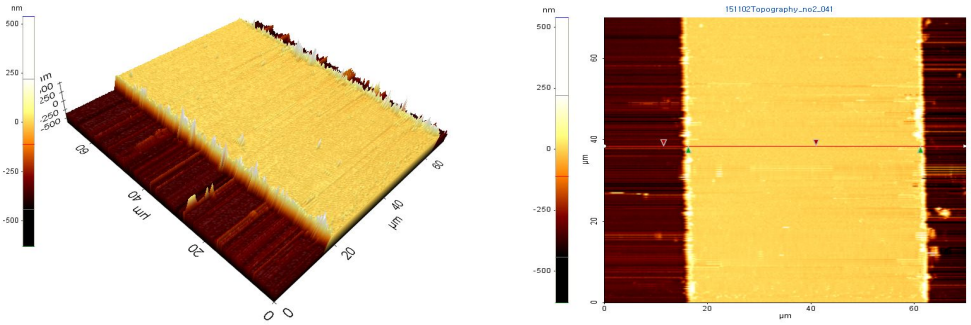


Cursor	ΔX(μm)	ΔY(nm)	Angle(deg)
Red	30.898	370.093	0.686
Green	45.117	13.046	0.017

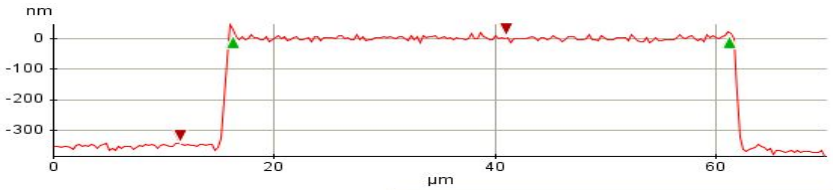
(f) Result of point 6

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

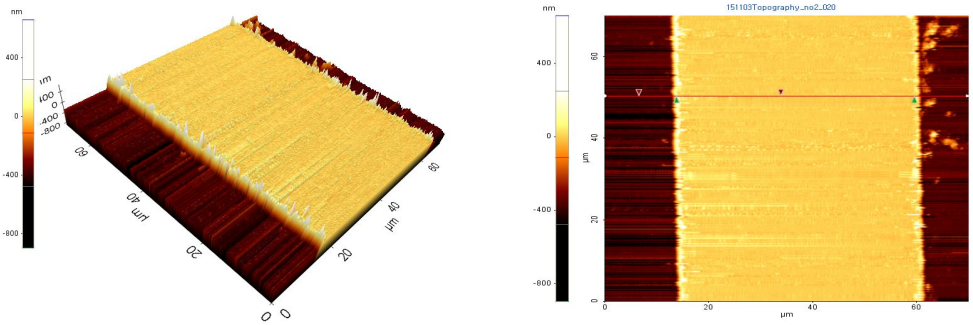


Line Profile: Red - 141

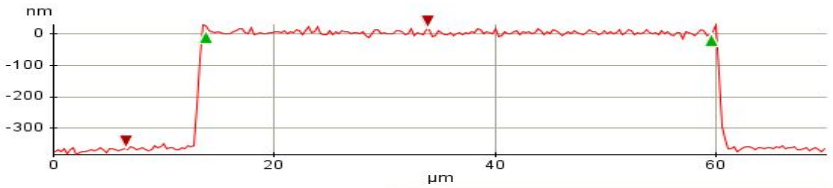


Cursor	ΔX(μm)	ΔY(nm)	Angle(deg)
Red	29.531	353.155	0.685
Green	44.980	-1.701	-0.002

(g) Result of point 7



Line Profile: Red - 185

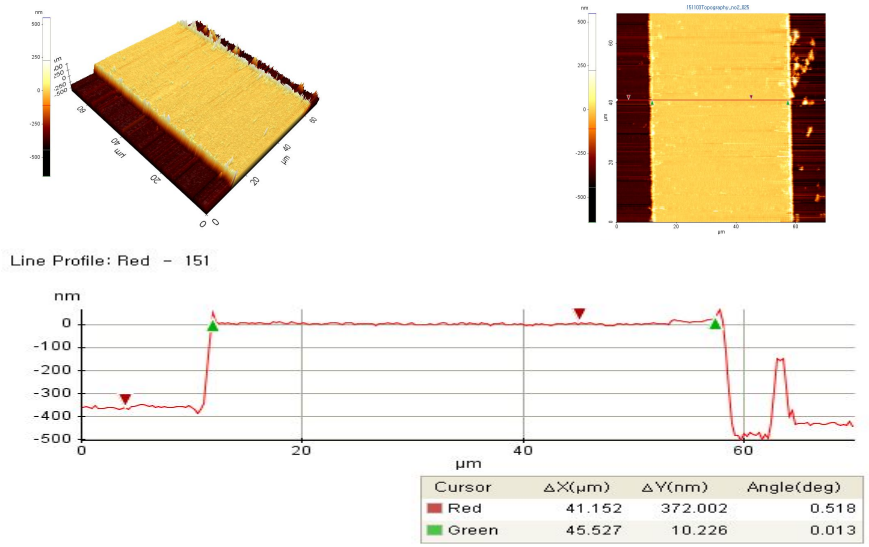


Cursor	ΔX(μm)	ΔY(nm)	Angle(deg)
Red	27.344	380.140	0.796
Green	45.801	-10.850	-0.014

(h) Result of point 8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(i) Result of point 9

Fig. 4-26 Result of AFM

Table. 7 Result of measurement by AFM [unit:um]

	Width
1p	45.254
2p	45.117
3p	45.277
4p	45.319
5p	45.254
6p	45.117
7p	44.980
8p	45.801
9p	45.527
Sum	407.646
Avg.	45.290

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2-4. Compare of Result

Table. 8 Compare of measurement result of reflection type [unit:um]

	Reflection type digital holography	FE-ESEM	AFM
	Width	Width	Width
1p	44.000	43.820	45.254
2p	44.000	43.770	45.117
3p	46.200	43.360	45.277
4p	43.450	43.520	45.319
5p	43.450	43.710	45.254
6p	43.450	43.720	45.117
7p	42.900	43.450	44.980
8p	43.500	43.720	45.801
9p	44.000	43.850	45.527
Sum	394.900	349.070	362.119
Avg.	43.880	43.660	45.290

구성한 반사형 홀로그래피 시스템으로 측정한 폭의 결과와 FE-ESEM으로 측정한 폭과 AFM으로 측정한 결과와 비교하였을 때 반사형 홀로그래피 시스템의 9 포인트의 평균은 43.880 um 가 나왔으며 FE-ESEM은 43.660 um 그리고 AFM으로 측정한 결과는 45.290 um 가 나왔다. 우선 FE-ESEM의 결과와 비교하였을 경우 FE-ESEM을 기준으로 약 0.5 %의 오차율, AFM의 결과와 비교하였을 경우 AFM을 기준으로 약 3 %의 오차율을 보임을 알 수 있다. 이는 구성한 반사형 홀로그래피 시스템 장비가 비교측정용 장비와 비교 하였을 경우 매우 정확한 값이 나왔음을 알 수 있으나, 반사형 홀로그래피 시스템의 경우는 비접촉식의 측정이 가능하고 FE-ESEM 과 AFM 보다 시험편의 크기에 영향을 덜 받는다는 장점을 가지고 있고 두 비교측정용 장비에 비에 측정 결과를 매우 빠르게 가질 수 있다는 장점을 가지고 있어 미세구조물의 측정에 충분함을 알 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

본 논문에서는 광응용 계측 기법중의 하나인 홀로그래피를 이용하여 반사형 디지털 홀로그래피 시스템과 투과형 홀로그래피 시스템을 구성하였고 첨단부품소재인 포토리소그래피 공정품의 패터닝의 폭과 단차를 측정하여 재생하였으며, 신뢰성 확보를 위해 FE-ESEM, Alpha step, AFM의 기존에 패터닝의 폭과 단차를 측정하는 측정 장비와 결과를 비교하였다. 각각의 측정의 결과를 정량적을 획득 한후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 투과형 홀로그래피 시스템을 이용하여 첨단부품소재인 포토리소그래피 공정품 패너닝의 측정 시 폭은 72.6 um가 나왔으며 FE-SEM의 경우 75.34 um가 나왔으며 둘 차이는 약 2.74 um의 차이를 보였으며 비교측정 장비인 FE-SEM을 기준으로 3.6 %의 오차율을 가짐을 알 수 있다. 마찬가지로 투과형 시스템으로 측정한 단차와 Alpha step으로 측정한 단차의 결과를 비교 하였을 때 구성한 시스템의 경우 9포인트 평균 0.87 um가 나왔으며 Alpha step의 경우 0.963 um가 나왔다. 비교측정 장비인 Alpha step를 기준으로 구성한 시스템의 결과가 약 7 %의 오차율을 보임을 알 수 있었다.

2) 반사형 홀로그래피 시스템으로 이용하여 측정 폭은 43.880 um 가 나왔으며 FE-ESEM은 43.660 um 그리고 AFM으로 측정한 결과는 45.290 um 가 나왔다. 우선 FE-ESEM의 결과와 비교하였을 경우 FE-ESEM을 기준으로 약 0.5 %의 오차율, AFM의 결과와 비교하였을 경우 AFM을 기준으로 약 3 %의 오차율을 보임을 알 수 있다.

본 논문에서 연구한 홀로그래피 시스템을 이용하면 구성의 간편함, 측정 시간의 단축, 측정 대상체의 비파괴, 배율 렌즈를 통한 측정영역의 확보, 기존의 측정 장비들에 비해 가격의 저렴함 등의 장점을 가지고 um 급, nm 급으로 측정이 가능하기 때문에 기존에 사용하는 높은 가격의 측정 장비들을 대체 할 수 있으리라 판단하며 광응용 계측 비파괴 검사 분야의 발전에 일조할 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1. D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature 161, No.4098, pp. 777-778 (1948)
2. D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront," Proc. Roy. Soc. 197, pp. 454-487 (1949)
3. D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefront II," Proc. Phys. Soc. 64, pp. 449-469 (1951)
4. U. Schnars, W. Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction", Appl. Opt. 33(2), pp. 179-181 (1994)
5. U. Schnars, W. Juptner, "Digital recording and numerical reconstruction of holograms", Meas. Sci. Technol. 13, pp. R85-R101 (2002)
6. Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18-20 (2003)
7. J. W. Goodman, R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms", Appl. Phys. Lett., vol. 11, pp. 77-79(1967)
9. J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle", Journal of the Optical Society of America, Vol 66, pp.1145-1150, 1976.
10. M. A. Kronrod, N,S. Merzlyakov, and L. P. Yaroslavskii, "Reconstruction of a hologram with a computer", Sov. Phys. Tech. Phys., vol. 17, pp. 444-334 (1972)
11. K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, "Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems," (2010)
12. H. Coufal, D. Psaltis, and G. T., "Holographic data storage, Springer series in optical sciences", Sincerbox, (2000)
13. 손정영, "홀로그래피의 원리와 응용", pp.221 (2004)
14. M. H. Horman, "An applicationi of wavefront reconstruction to interferometry", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 333-336, 1965.
15. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.

16. K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," Progress in Optics XXVI, pp. 349-393, 1988
17. K. Hibino, B. F. Oreb, D. I. Farrant, and K. G. Larkin, "Phase shifting for nonsinussoidal waveforms with phase-shifting errors," J. Opt. Soc. Am. A 12, pp. 761-768, 1995
18. Charette P. G. and Hunter I. W., "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content", Appl. Opt, Vol. 35, pp. 3506-3513, 1996.
19. J. S. Lee., "Optical Tomography and Superresolution and Extreme Wide Angle Lens Design in Digital Holograpy.", Myongji Univ., master's thesis, pp . 11-12, 2014
20. D. S. Kim., "The measurement of fracture surface roughness of CT specimen by using Digital Holography.",Chosun Univ., master's thesis, pp. 4-7, 2010
21. A. Naseem., "Numerical reconstruction of digital holograms and its application to three-dimensional imaging.", Chosun Univ., ph.D Dissertation pp. 14-17, 2010

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

저작물 이용 허락서

학 과	기계시스템공학	학 번	20147102	과 정	석사
성 명	한글: 신 주 엽 한문: 申 周 燁 영문: Shin, Ju-yeop				
주 소	광주광역시 남구 월산동 수박등로 48-7번길(라인아파트, 1704호)				
연락처	e-mail : honji@naver.com				
논문제목	한글: 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 첨단부품소재의 표면 형상 및 단차 측정 영문: Measurement of surface shape and step height of advanced components using digital holography system				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2016 년 2 월 일

저작자: 신 주 엽 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

Collection @ chosun