

(論 文)

광위상간섭에 의한 경면의 정밀 형상측정

김승우* · 공인복** · 민선규***

(1992년 4월 10일 접수)

Precision Profile Measurement of Mirror Surfaces by Phase Shifting Interferometry

Seoung-Woo Kim, In-Bok Gohung and Sun-Gyu Min

Key Words : Optical Metrology (광학 변위측정), Phase Shifting Interferometry (광위상간섭측정), Mirror Surfaces (경면), 3-Dimensional Profile Measurement (삼차원 형상측정), Piezoelectric Actuator (압전 구동기)

Abstract

An optical method of phase shifting interferometry is presented for the 3-dimensional profile measurement of mirror surfaces with nanometer resolution. A series of optical interferometric fringes are generated by comparing the surface to be measured with a reference flat. The fringes are captured by a CCD camera and then analyzed to obtain actual surface profile. Detailed principles are described along with necessary image processing algorithms. finally, several measurement examples are discussed which were performed on lapped surfaces, hard discs, and semiconductor wafers.

1. 서 론

일반적으로 경면(鏡面: mirror surface)은 평균 표면조도가 $0.01 \mu m$ 이하의 정밀 기계가공 표면을 의미한다. 경면의 수요는 종래에는 주로 광학 렌즈 부품에 국한 되었으나 최근에는 광전자 기술의 발전과 더불어 반도체 웨이퍼, 하드디스크와 같은 컴퓨터 주변기기, 그리고 비디오 녹화기와 같은 가전 제품등으로 확대되고 있다. 이러한 경면을 갖는 기계류 부품은 현대 산업에서 중요한 위치를 차지하고 있는 만큼 경면의 가공 방법에 대한 생산기술도 폭넓게 발전하고 있다.

경면의 효과적인 생산을 위해 가공방법과 더불어

반드시 요구되는 기술이 측정 기술이다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 표면측정 방식은 축침식(stylus method)으로 미세한 반경을 갖는 다이아몬드 축침을 측정표면위에 이동시키면서 표면형상에 따른 축침의 미세한 상하운동을 정밀 변위계로 증폭시켜 측정한다. 축침식 방법은 정밀한 측정과 측정된 정보로부터 측정표면 형상의 재생이 가능한 장점이 있으나 축침이 표면에 접촉하는 이유로 렌즈와 같은 연성의 표면에 흠집을 발생시켜 제품의 기능에 매우 중요한 하자를 야기시키는 단점이있다.

위와 같은 문제점을 보완하기위해 본 논문에서 연구한 광위상 간섭법의 기본원리는 위상이 다른 두개의 광을 간섭시켜 이때 발생하는 간섭무늬를 해석하는 방법^(1,2)으로 초기에는 주로 렌즈의 성능평가^(3,4)에 사용되었으나 현재에는 초정밀 부품의 표면성능 평가⁽⁵⁾등에 사용되고있다. 간섭무늬 해석 방법으로는 푸리에 변환(fourier transformation)을

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**정회원, 한국종합기계(주) FA사업부

***한국과학기술연구원 기계공학부

이용한 알고리즘^(6,7)과 계산된 위상으로부터 위상정렬(unwrapping)을 얻는방법,^(8,9) 광학계의 수차에 대한 분석^(10,11) 및 측정한계를 줄이기위해 두가지 파장을 이용하는 방법^(12,13)등 여러분야에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

본 논문에서는 초정밀 경면의 표면형상을 비접촉식으로 측정하기 위한 광위상 간섭법(phase shifting interferometry)에 관한 연구결과를 기술하였다. 리닉(linnik) 광학계를 이용한 광위상간섭에 대한 기본 측정원리를 정립하고 표면측정을 위한 간섭무늬처리 영상해석 알고리즘을 개발하였다. 그리고 실제적인 경면의 측정을 통하여 개발한 광학계 및 측정 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. 기본 측정원리

Fig. 1은 광간섭을 이용한 표면의 높이분포를 측정하기 위한 기본 원리를 보여준다. 레이저 광원으로 부터 얻은 위상이 동일한 같은 평행광속을 분광기에 의해 기준광속과 측정광속으로 분리하여 각각을 기준표면과 측정하고자 하는 표면에 입사시킨다. 이 때 기준면과 측정표면에 입사되어 반사되는 파두면(wavefront)은 각각 다음의 방정식으로 기술된다.

$$W_r(x,y) = a \text{Exp}(2jk l) \quad (1)$$

$$W_t(x,y) = b \text{Exp}[2Jkh(x,y)] \quad (2)$$

여기서 a 와 b 는 파두면(wavefront)의 진폭, k 는 $2\pi/\lambda$ 의 값을 갖는 상수, 그리고 l 과 $h(x,y)$ 는 각각 표준시편과 측정시편이 갖는 분광기로 부터의 거리를 의미한다. 이때 표준시편은 평면도(flat-

ness)가 $\lambda/20$ 인 거울을 사용하고 실제사용범위는 중심부에서 반경 1mm정도로 제한함으로써 표면상태는 일정하다고 가정할 수 있다. 특히 $h(x,y)$ 는 측정표면의 형상함수(profile function)로 정의된다. 식(1)과 (2)의 두광속이 분광기에 의해 다시 모아지면 위상간섭의 발생되며 이 때의 간섭무늬는 다음의 강도식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |W_r(x,y) + W_t(x,y)|^2 \\ &= a^2 + b^2 + 2ab \cos(2k[h(x,y) - l]) \\ &= I_0(1 + \gamma \cos(2k[h(x,y) - l]) \\ &= I_0(1 + \gamma \cos(\phi(x,y))) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $I(x,y)$ 는 측정점 (x,y) 상에서 빛의 강도, I_0 는 빛의 평균 강도, 그리고 γ 는 간섭무늬의 광도 진폭을 의미한다. 식(3)에서 $\phi(x,y)$ 는 측정점의 위상으로 정의되며 이는 형상함수 $h(x,y)$ 와 다음의 관계를 갖는다.

$$h(x,y) = \phi(x,y) / 2k + l \quad (4)$$

따라서, 간섭무늬의 강도 $I(x,y)$ 를 측정후 위상을 구하면 이로 부터 식(4)에 의해 형상함수를 얻을 수 있다. 이를 위해 식(3)을 l 에 대한 함수로 표현하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} I(l) &= a^2 + b^2 + 2ab \cos(2kh(x,y)) \cos(2kl) \\ &\quad + 2ab \sin(2kh(x,y)) \sin(2kl) \end{aligned} \quad (5)$$

윗식에서 보는 바와 같이 $I(l)$ 는 $\lambda/2$ 의 주기를 함수로 나타낸다. 이 때 l 을 Fig.2에서와 같이 주기 $\lambda/2$ 범위내에서 길이를 $\lambda/2 N$ 만큼 연속적으로 변화시키면서 각각의 강도를 측정하면 이때의 강도는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} I(l_i) &= a^2 + b^2 + 2ab \cos(2kh(x,y)) \cos(2\pi i/N) \\ &\quad + 2ab \sin(2kh(x,y)) \sin(2\pi i/N) \\ &= a_0 + a_1 \cos(2\pi i/N) + b_1 \sin(2\pi i/N) \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)은 직류성분과 제1차 조화성분만을 가진 퓨리

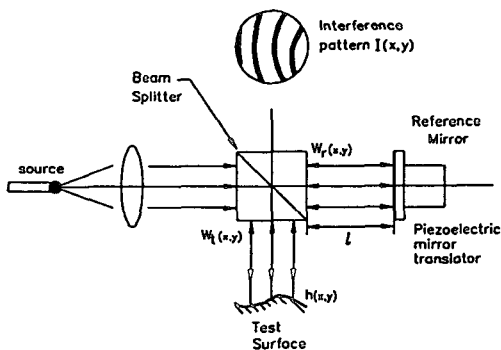


Fig. 1 Basic principle of Twyman-Green interferometry

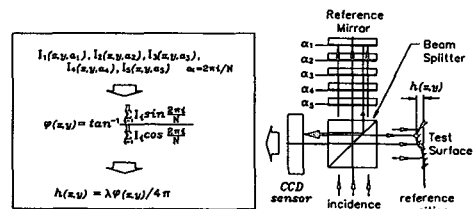


Fig. 2 Surface profile determination by phase shifting interferometry

에 함수의 형태를 갖으며, 여기서 상수 a_0, a_1 과 b_1 은 각각 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i = a^2 + b^2 \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \cos \frac{2\pi i}{N} = 2ab \cos(2kh(x,y)) \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N I_i \sin \frac{2\pi i}{N} = 2ab \sin(2kh(x,y)) \quad (9)$$

따라서 최종적으로 구하고자 하는 위상 $\phi(x,y)$ 와 형상함수 $h(x,y)$ 은 식(6)~(9)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

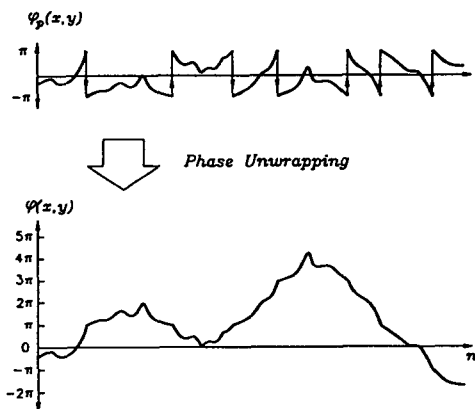
$$\phi(x,y) = 2kh(x,y) = \tan^{-1}(b_1/a_1) \quad (10)$$

3. 위상정렬

식(10)으로부터 구해지는 위상은 Fig. 3에 보인 바와 같이 π 와 $-\pi$ 사이의 값으로 제한되는 주위상(principal phase) ϕ_p 로 나타나게 되며 이는 역삼각함수 \tan^{-1} 의 계산의 결과에 따른 현상이다. 그러므로 실제 위상을 구하기 위해서는 위상정렬(phase unwrapping)의 과정이 필요하며 이는 다음의 식으로 표현된다

$$\phi(m) = \phi_p(m) + 2\pi K(m) \quad (11)$$

여기서 $K(m)$ 은 위상의 차수(order)로 두 인접점의 위상차가 $|\phi(m+1) - \phi(m)| < \pi$ 의 조건을 만족



$\phi_p(x,y)$: Discontinuous Phase Distribution Measured Quantity

$\phi(x,y)$: Continuous Phase Distribution

Fig. 3 Principle of phase unwrapping

하도록 다음과 같이 결정된다. 즉

$$K(m+1) = K(m) + n \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (12)$$

따라서 두 인접점의 실제 위상차가 π 보다 작은 경우에만 측정이 가능하게 되며 이를 광위상간섭의 측정한계라고 정의한다. 이 한계는 측정표면의 실제 높이변화로 보면 다음과 같다.

$$|\Delta h(n)| \leq \lambda/4 \quad (13)$$

여기서 Δh 는 인접한 두 측정점 사이의 표면높이 차이를 의미한다.

광위상간섭의 측정분해능(measuring resolution)은 사용하는 광원의 파장과 간섭무늬를 디지털화하는 변환분해능에 의해 결정된다. 이를 좀더 구체적으로 산출하면 HeNe 레이저광($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)을 사용하고 관측된 간섭무늬를 8비트 A/D 변환을 할 경우 이론적인 측정분해능은 다음과 같이 얻어진다.

$$\frac{\lambda/2}{2^8} = 1.2 \text{ nm} \quad (14)$$

4. 측정시스템의 구성

Fig. 4와 Fig. 5는 본 연구에서 설계제작한 광위상간섭 측정시스템의 구조도와 외관을 각각 보여준다. 측정시스템은 전체적으로 간섭상을 형성시키는 광학계와 간섭무늬를 해석하고 표면의 평가를 수행하는 디지털 신호처리부로 크게 된다. 광학계에서는 0.8 mm 직경의 HeNe 레이저가 16 mm의 직경

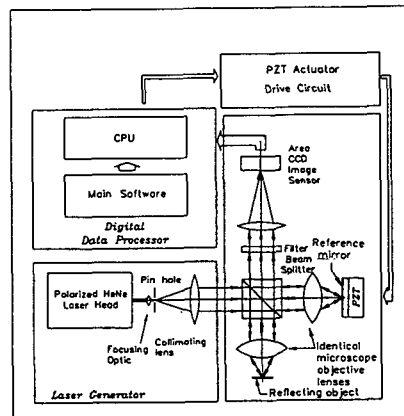


Fig. 4 System diagram of phase measuring interferometry

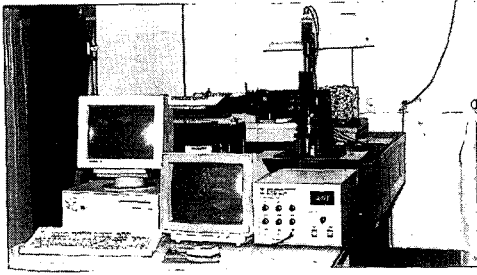


Fig. 5 Experimental apparatus of phase measuring interferometry

의 광속으로 확대되어 분광기를 통해 50 : 50으로 나뉘어 진후 볼록렌즈를 통해 측정시편과 기준거울면에 투사되어 다시 모아지게 되어 위상간섭무늬를 형성한다. 이는 512×492개의 화소를 갖는 CCD 영상소자에 의해 포착되어 8비트의 A/D변환을 거친후 컴퓨터(IBM 386/PC)에 입력되어 처리된다. 기준거울을 미세구동하기 위해 PZT 압전구동기(Burleigh사의 PZ-90)가 사용되었으며 이는 총 구동변위 0.6 μm 범위내에서 6 nm/Volt의 구동분해능으로 제어된다. 디지털 신호처리부에서는 CCD 영상센서에 의해 입력된 간섭무늬들의 영상정보를

이용하여 앞서 설명된 위상측정 및 위상정렬의 알고리즘을 구현하여 실제 표면형상을 구한 후, 이를 삼차원 그래픽기술을 사용하여 칼라 모니터상에 표시한다.

5. 실험 및 토의

Fig. 6은 측정시스템의 성능을 검토하기 위한 표준측정시편(standard specimen)에 대한 결과를 보여준다. 표준측정시편은 조화함수(harmonic function)의 형상을 갖는 표면으로 구성되어 있으며 550nm의 진폭을 갖고있다. Fig.6(a)에는 이시편으로 부터 광위상간섭에 의해 얻어진 간섭무늬의 형태를 보여준다. 이 간섭무늬에는 측정표면의 형상함수에 의해 결정되는 무늬뿐 아니라 측정표면을 기준표면에 대해 직각의 상대각을 갖도록 고정시킬 때 발생하는 위치오차에 의한 무늬도 포함되어 있다. Fig. 6(b)은 주파수분석으로 계산된 π 와 $-\pi$ 사이의 값으로 제한되는 주위상(principal phase) ϕ_p 를 나타내고 있는데 이는 상대각 성분이 포함된 상태이다. Fig. 6(b)로부터 위상정렬을 하고 상대각 성분을 제거하면 Fig. 6(c)에 보인바와 같이 측

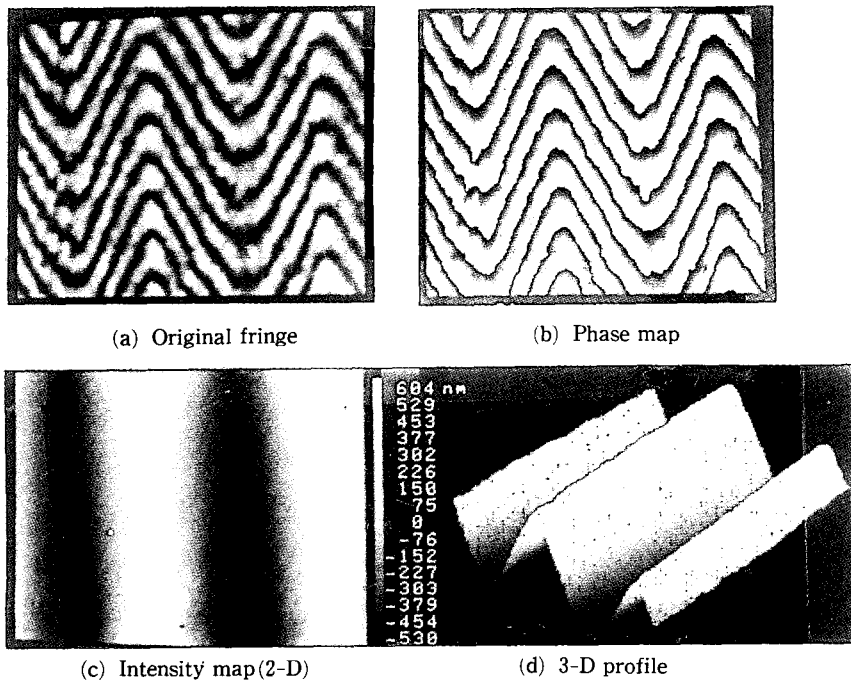


Fig. 6 Measurement result of a standard sample

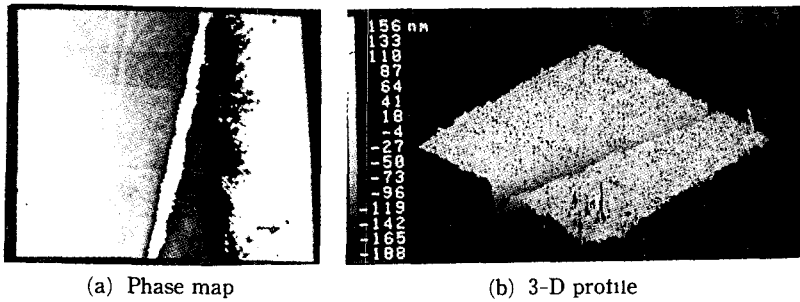


Fig. 7 Measurement result of precision ground surface

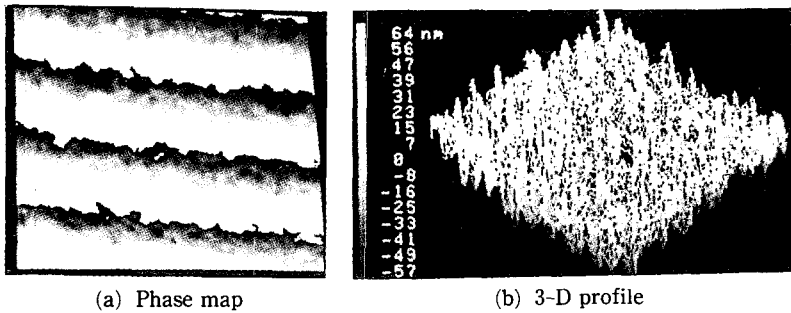


Fig. 8 Measurement result of a hard disc surface

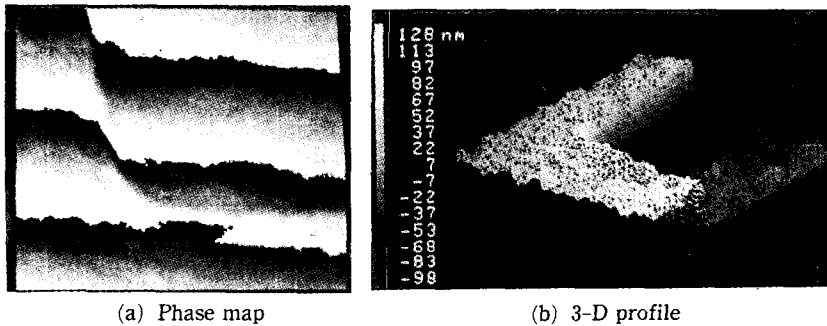


Fig. 9 Measurement result of a semiconductor wafer surface

정표면의 형상함수 성분만을 독립시킬 수 있다. 이로부터 측정표면의 높이성분을 구할 수 있으며 최종적으로 Fig.6(d)에서와 같이 삼차원 형상을 얻을 수 있다. 측정값과 측정시편의 실제표면과의 비교 결과 오차가 1%이내임을 알 수 있다.

Fig.7(a)와 (b)에는 정밀연삭가공면에 대한 광위상간섭무늬와 측정결과를 보여준다. 시편 중앙부에 발생된 흠집의 깊이와 폭을 정확히 측정관찰할 수 있음을 보여주고 있다. Fig. 8은 컴퓨터주변기인

하드디스크(hard disc)면의 측정결과로 표면상에 생성되어 있는 수십 나노미터 범주의 골을 분명히 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 9는 반도체 웨이퍼상에 식각(etching)되어 있는 집적회로의 삼차원 형상의 측정결과이다. 부식된 형상과 부식의 깊이를 정확히 측정할 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결 론

정밀기계가공된 경면의 삼차원형상에 대한 초정

밀측정을 위해 레이저광학을 이용하는 광위상간섭 측정의 원리를 제시하였으며 이를 구현하기 위한 측정시스템을 설계 제작하였다. 또한 측정 실험을 통해 연삭면, 하드디스크, 반도체 웨이퍼에 대한 측정결과를 제시하였다. 결론적으로 광위상간섭의 원리를 이용하여 1.2나노미터의 분해능을 갖는 초정밀 실현할 수 있음을 실증하였다.

참고문헌

- (1) Whitehouse, D.J., 1988, "Comparison Between Stylus and Optical Methods for Measuring Surface," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, pp. 649~653.
- (2) Whitehouse, D.J. 1987, "Instrument Science and Technology," *J. Phys. E : Sci. Instrum.* 20, pp. 1145~1155.
- (3) Bruning, J.H. and Herriott, R.D., 1974, "Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses," *Appl. Opt.*, Vol.13, No.11, pp. 2693~2703.
- (4) Moore, D.T., Murray R. and Neves, F.B., 1978, "Large Aperture AC Interferometer for Optical Testing," *Appl. Opt.*, Vol.17, No.24, pp. 3959~3963
- (5) Ono, A. 1987, "Aspherical Mirror Testing with an Area detector Array," *Appl. Opt.*, Vol.26, No. 10, pp. 1998~2004.
- (6) Freischlad, K. and Koliopoulos, C.L. 1990, "Fourier Description of Digital Phase Measuring Interferometry," *Opt. Soc. Am.*, Vol.7, No.4, pp. 543~551.
- (7) Bone, D.J. and Bachor, H.A. 1986, "Fringe Pattern Analysis Using a 2-D Fourier Transform," *Appl. Opt.*, Vol.25, No.10, pp. 1653~1660
- (8) Marron, J.C., Sanchez P.P. and Sullivan, R.C., 1990, "Unwrapping Algorithm for Least-Squares Phase Recovery from the Modulo 2π Bispectrum Phase", *Opt. Soc. Am.*, Vol.7, No.1, pp. 15~20.
- (9) Hunt, B.R. 1979, "Matrix Formulation of the Reconstruction of Phase Values from Phase Differences," *Opt. Soc. Am.*, Vol.69, No.3, pp. 393~399.
- (10) Hudgen, R.H. 1977, "wavefront Reconstruction for Compensated Imaging," *Opt. Soc. Am.*, Vol.67, No.3, pp. 375~378.
- (11) Schwider, J. and Burow, R. 1983, "Digital Wavefront Measuring Interferometry : some Systematic Error Sources," *Appl. Opt.*, Vol.22, No.21, pp. 3421~3432.
- (12) Creath, K. 1987, "Step Height Measurement using Two-Wavelength Phase Shifting Interferometry," *Appl. Opt.*, Vol.26, No.1, pp. 2810~2816.
- (13) Ishii, Y. and Onodera, R. 1991, "Two-Wavelength Laser-Diode Interferometry that uses Phase-Shifting Techniques," *Opt. Soc. Am.*, Vol. 16, No. 19, pp. 1523~1525.