

위상이동 간섭계를 이용한 Si_3N_4 박막의 두께 분포 측정

Measurement of Thickness Distribution of Si_3N_4 Membrane Using Phase-Shifting Interferometer

이정현*, 정승준*, 강전웅*, 전윤성*, 홍정기*†

Jung Hyun Lee*, Seung Jun Jeong*, Jeon Woong Kang*, Yun Seong Jeon* and Chung Ki Hong*†

초 록 레이저 간섭계를 이용하여 수백 나노미터 정도의 박막 두께를 측정하였다. 마흐-젠더 간섭계로 실험장치를 구성하고 위상이동법을 통해 박막을 투과할 때 생기는 위상지연을 측정하였다. 광휘 상관 모델을 적용하여 위상 이동법의 단점인 위상이동 오차가 보정된 위상도를 측정하였다. 기존에는 고려되지 않았던 공간적 위상 이동 오차를 보정하기 위하여 최소자승법을 이용하여 위상 기준면을 추정하였다. 이 방법으로 미세한 위상지연을 측정해야 하는 100 nm Si_3N_4 박막시료의 두께를 5 nm의 정밀도로 측정할 수 있었다.

주요용어: 위상이동 간섭계, 위상 분석, 박막, 두께 측정

Abstract The thickness of a Si_3N_4 thin film with a 100 nm nominal thickness was measured by use of a Mach-Zehnder interferometer. The map of the phase-delay through the thin film was obtained by an interframe intensity-correlation-matrix method that could eliminate phase-shifting errors. After the spatial phase-shifting errors were treated with a least-squares method, the the reference surface of the phase map was estimated. The overall accuracy of the method was found to be 5 nm.

Keywords: phase-shifting interferometer, phase map, thin film, thickness measurement

1. 서 론

물체의 형태나 변형을 측정함에 있어서 많은 광학적 방법들이 존재한다. 간섭성이 뛰어난 레이저가 발명된 이후 간섭계를 이용한 방법으로 빛의 파장 이하의 정확성을 가지고 측정할 수 있게 되었으며, 이에 더하여 위상이동 방법이 개발됨으로써 측정의 정확성은 더욱 증가하였다. 오늘날 위상이동 간섭계는 현대 광학적 측정분야에서 중요한 위치를 차지하게 되었다. 최초의 위상이동 간섭 실험은 1966년 P. Carré에 의해 처음 소개되었다[1]. 그 후

J. Bruning[2], K. Freischlad 와 C. J. Koliopoulos 등에 의해 발전되어 왔으며[3] 오늘날에는 speckle pattern interferometry[4], 디지털 홀로그래피[5,6] 등 여러 분야에서 응용되고 있다.

위상 이동 간섭계의 장점은 파면의 위상을 정량적으로 계산할 수 있다는 것이다. 하지만 여러가지 오차요소를 포함하게 되는데, 가장 큰 요인은 위상 이동 장치의 부정확성에 기인한다. 대표적인 예로 위상 이동 장치로 널리 쓰이는 piezo-electric transducer (PZT)의 경우 전압에 대한 이동량이 비선형성을 띄며 hysteresis를 가진다. 이러한 오차를 극복하기 위

하여 이동량을 감시하는 추가적인 측정장비를 사용하는 방법이 고안되기도 하였으나[7] 후에 간섭 무늬로부터 이동량을 직접 알아낼 수 있는 여러 방법들이 개발되었다.

Okada에 의해 간섭 무늬로부터 기준파의 위상 이동량이 결정될 수 있다는 가능성이 제기된 후[8], I. B. Kong과 S. W. Kim에 의해 실용적인 방법이 개발되어[9], S. W. Kim과 M. G. Kang에 의해 발전되었다[10]. 이런 방법들은 기존의 여러가지 오차요소를 제거할 수 있었으나 계산량의 증가로 많은 시간을 필요로 하고 5번 이상의 측정이 필요하다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하고 H. Y. Yun와 C. K. Hong에 의해 새로운 방법이 제시되었는데 이것은 광회 상관 모델을 통한 위상 검출 방법으로 상관 행렬을 이용하여 간섭 무늬간의 상호 관계를 기술한다[11]. 이 위상 검출 방법은 비교적 빠른 시간 내에 기준파와 물체파 사이의 상대 위상 차이, 위상 이동량 등을 정확하게 계산해 낼 수 있다.

본 논문에서는 간단한 마흐-젠더 간섭계와 위상 이동법 및 광회 상관 모델을 통한 위상 검출방법을 사용하여 Si_3N_4 박막에 의한 위상 변화를 측정하고 이를 통해 박막의 정확한 두께를 측정하는 방법과 정밀도를 높이기 위한 분석방법을 제시한다.

2. 이론

2.1. 위상이동 간섭계

위상이동 간섭계에서 간섭무늬의 밝기 분포는 기준파와 물체파 사이의 광경로 차이에 의해 결정된다. 기준파의 위상을 인위적으로 변화시키게 되면 간섭무늬의 밝기 분포가 달라지게 되는데, 이 변화된 기준파의 위상과 간섭무늬의 상관 관계를 파악함으로써 기준파와 물체파 사이의 위상차를 결정할 수 있다.

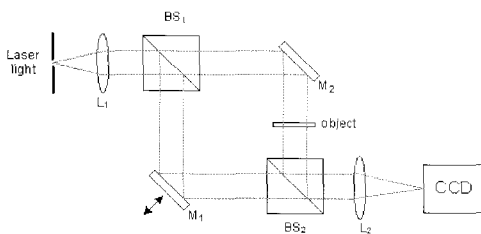


Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer (BS1, BS2: beam splitter, M1, M2: mirror, L1: collimating lens, L2: imaging lens)

위상이동 방법을 사용하면 파면에 대한 정확한 위상정보를 추출할 수 있다. Fig. 1과 같은 마흐-젠더 간섭계를 생각해보면 레이저 광원으로부터 나온 빛은 렌즈 L_1 지나 평행광이 되고, beam splitter (BS₁)에서 반사된 빛은 PZT 등으로 조절되는 움직일 수 있는 거울 M_1 에서 반사되어 beam splitter (BS₂)와 CCD에 초점이 맞춰진 렌즈 L_2 를 거쳐 CCD에 입사된다. 동시에 BS₁을 투과한 빛은 고정된 거울 M_2 에 반사되어 BS₂와 렌즈 L_2 를 거쳐 CCD에 입사된다. 결국 두 거울에서 반사된 빛은 간섭을 일으키면서 CCD카메라에 상이 맺히게 된다. 여기서 움직이는 거울 M_1 을 지나는 빛은 기준파(reference beam)가 되며 고정된 거울을 지나는 빛은 물체파(object beam)가 된다. CCD에 들어오는 각각의 빛의 진폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_r = a_r \exp[-j(\psi + 2\pi l_r / \lambda)] \quad (1)$$

$$u_o = a_o \exp[-j(\psi + 2\pi l_o / \lambda)] \quad (2)$$

여기서 ψ 는 레이저 광이 beam splitter에 처음으로 입사할 때의 위상이고, λ 는 레이저 광원의 파장, l_r 과 l_o 는 갈라진 후 두 빛의 경로이다.

두 빛이 간섭을 일으킨 후의 세기는 식 (3)이 되고 이것이 CCD에서 검출되는 결과이다.

$$I = |u_r + u_o|^2 = |a_r|^2 + |a_o|^2 + 2|a_r a_o| \cos[2\pi(l_r - l_o) / \lambda]. \quad (3)$$

식 (3)에서 미지수 a_r , a_o 와 $l_r - l_o$ 를 결정하기 위해서는 3개의 다른 식이 필요하게 된다. 이 값들을 구하는 가장 간단한 방법으로는 거울 M_1 을 광경로가 $\lambda/4$ 씩 차이가 나도록 4번을 밀어주는 4-step 방법이 있다. 각각의 단계에서의 빛의 세기는 식 (4)와 같다.

$$I_k = |a_r|^2 + |a_o|^2 + 2|a_r a_o| \cos[2\pi(l_o - l_r) / \lambda + k\pi / 2] \quad (4)$$

여기서 k 는 거울을 광경로가 $\lambda/4$ 씩 차이가 나도록 밀어주는 각 단계를 나타낸다. 위 식으로부터 두 경로의 광경로차를 구할 수 있게 되고, 식 (5)와 같이 된다.

$$l_o - l_r = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\arctan \left(\frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \right) + 2m\pi \right] \quad (5)$$

여기서 m 은 정수이며 $2m\pi$ 는 \arctan 함수에 의해 wrapped된 위상이 된다.

2.2. 두께 측정

Fig. 1에서 고정된 거울 M₂와 BS₂ 사이에 투과형 물체가 놓이게 되면 물체과의 광경로가 변하게 된다. 물체를 넣기 전의 기준파와 물체과의 광경로 차를 알고, 물체를 넣은 후의 기준파와 물체과의 광경로 차이를 안다면, 물체를 넣기 전과 넣은 후의 물체과의 상대 위상차를 구할 수 있다. 거울 M₂와 BS₂ 사이에 굴절률을 알고 있는 박막을 삽입하여 박막을 넣기 전과 넣은 후의 위상차의 분포를 분석함으로써 박막의 2차원적인 두께분포를 파악할 수 있다. 박막의 두께를 *d*, 굴절률은 *n*, 공기의 굴절률을 *n*₀라고 할 때 빛이 박막에 수직으로 입사한다면 박막이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 광경로(optical path length : OPL)의 차는 식 (6)이고,

$$\Delta OPL = (n - n_0) \times d \tag{6}$$

위상차는 식 (7)이 된다.

$$\Delta\phi = 2\pi \times \frac{\Delta OPL}{\lambda_{laser}} \tag{7}$$

$$d = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \times \frac{\lambda_{laser}}{n - n_0} \tag{8}$$

그러므로 박막이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 위상차를 알면 박막의 두께를 측정할 수 있다. 여기서 박막에 빛이 입사하는 각도에 대한 영향을 고려해보면, 100 nm 정도의 두께를 가지는 박막에서는 입사각의 1도 정도의 변화는 10⁻⁴ 라디안 정도의 위상차를 가져오므로 이에 대한 고려는 무시할 만 하다.

3. 실험

3.1. Setup

실험에서의 setup은 Fig. 2와 같다. 레이저로부터 나온 빛이 편광판을 거치면서 빛의 밝기가 조절되고 대물렌즈와 핀홀로 이루어진 spatial filter를 지난 후 시준 렌즈에서 평행광으로 만들어 진다. 평행광의 지름이 조리개에서 조절되어 beam splitter에서 두개의 경로로 나누어 지게 된다. 하나의 광은 PZT가 부착된 거울을 거치는 기준파가 되고 다른 하나의 박막을 지나는 물체파가 된다. 측정하려는 박막이 CCD상에 결상되게 하기 위하여 beam splitter와 CCD 사이에 결상 렌즈가 놓이게 되며,

기준파와 물체파는 beam splitter에서 합쳐져서 렌즈를 통하여 CCD에 입사된다.

광원으로는 10 mW의 헬륨 네온 레이저를 이용하였고, 시준 렌즈와 결상렌즈는 125 mm의 초점거리를 가지는 렌즈를 사용하였다. CCD는 1024 x 768의 해상도와 4.65 μm의 pixel pitch를 가지는 아날로그 CCD이며 CCD에서 측정된 intensity정보는 8 bit의 frame grabber에서 디지털 신호로 바뀌어 컴퓨터에 저장된다. 측정하려고 하는 시료는 Si₃N₄로 이루어졌으며 25°C에서 굴절률은 2.03이다. 이 박막은 10 mm x 10 mm의 프레임 가운데에 2 mm x 2 mm의 크기로 고정되어 있으며 대략 100 nm 정도의 두께를 가지고 있다.

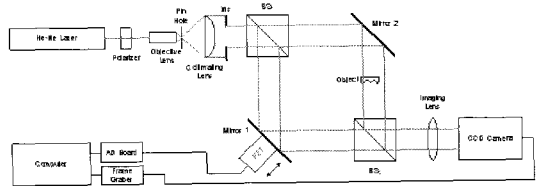
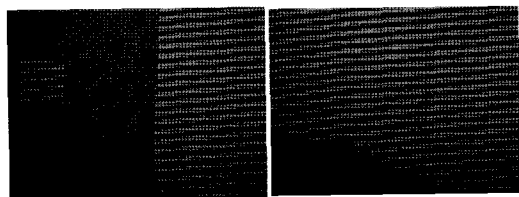


Fig. 2 Experiment setup

3.2. 실험

Fig. 3(a)와 같이 CCD면에 박막을 투과하는 영역과 투과하지 않는 영역을 동시에 나타나도록 박막의 위치를 조절하여 위치 시킨 후 박막의 고정판 위에 회전무늬가 나타나지 않도록 카메라의 위치를 조절하여 초점을 맞춘 후 2π 범위 내에서 위상이동이 일어나도록 하여 8회 촬영하였다. 광회상관법을 이용한 위상 추정시 위상이동의 횟수가 많을수록 정확한 위상이동 값을 얻을 수 있기 때문에 최소 측정 회수 4회보다 많은 8회의 위상이동 측정을 시행하였다. 다음은 박막을 제거한 후 연속적으로 위상이동하여 8회 촬영한다. Fig. 3은 박막이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 CCD상에 나타난 간섭무늬이다.



(a) With Si₃N₄ membrane (b) Without Si₃N₄ membrane

Fig. 3 Interference fringe patterns on CCD(1024×768)

4. 결과 및 고찰

4.1. 기준면 측정

위상이동 측정법에서 PZT로 거울에 변위를 주어 기준과의 광경로에 위상변화를 줄 때 거울 면에서 반사되는 모든 빛은 위상변화가 동일하다는 가정하에서 위상값을 계산한다. 만일 위상변화가 동일하지 않다면 100 nm 정도의 박막을 측정함에 있어서 작은 위상차도 큰 오차로 작용할 수 있다. 따라서 모든 면에서 위상변화가 동일한지 검증해 볼 필요가 있다.

Fig. 4에서의 밝기 분포도와 위상분포도는 광회상관 모델을 통한 검출방법으로 계산하였다. Fig. 4에서 보면 위상의 기준면이 매번 측정할 때마다 변화하여 반복 측정시 같은 결과를 주지 않음을 알 수 있다. Fig. 4(d)에서 알 수 있듯이 기준면의 변화는 측정면에 평행하지 않은 평면으로 나타난다. 이러한 결과는 수 차례의 반복적인 실험에서 동일하게 나타났으며 따라서 그러한 기준면의 기울어짐의

주된 요인이 주위의 공기의 흐름이나 진동에 의한 영향보다 다른 실험장치들의 움직임들에 의한 영향임을 알 수 있고 그 중에서도 PZT의 움직임에 가장 큰 영향을 받는 것으로 예상된다. Fig. 4(d)를 살펴 보면 좌우 위상차의 최대값과 최소값의 차이가 0.3 라디안 정도 되고 이는 30 nm 정도의 두께 오차로 작용한다. 이를 고려하지 않을 경우 100 nm 정도의 박막의 두께는 측정할 수 없게 된다.

4.2. 박막 삽입 전후의 위상변화 측정

기준면의 기울어짐이 고정되어 있지 않기 때문에 박막 삽입 전후의 박막에 의한 위상변화 측정과 동시에 기준면을 결정할 필요가 있다. 따라서 CCD 면에 박막을 투과하는 영역과 투과하지 않는 영역을 동시에 나타나게 촬영하였다. Si_3N_4 박막을 삽입하고 위상이동을 하면서 8장을 촬영하고 박막을 제거한 후 위상이동 하면서 8장을 촬영한 후 광회상관 모델을 이용하여 밝기 분포와 위상도를 구하였다. 그 결과가 Fig. 5이다.

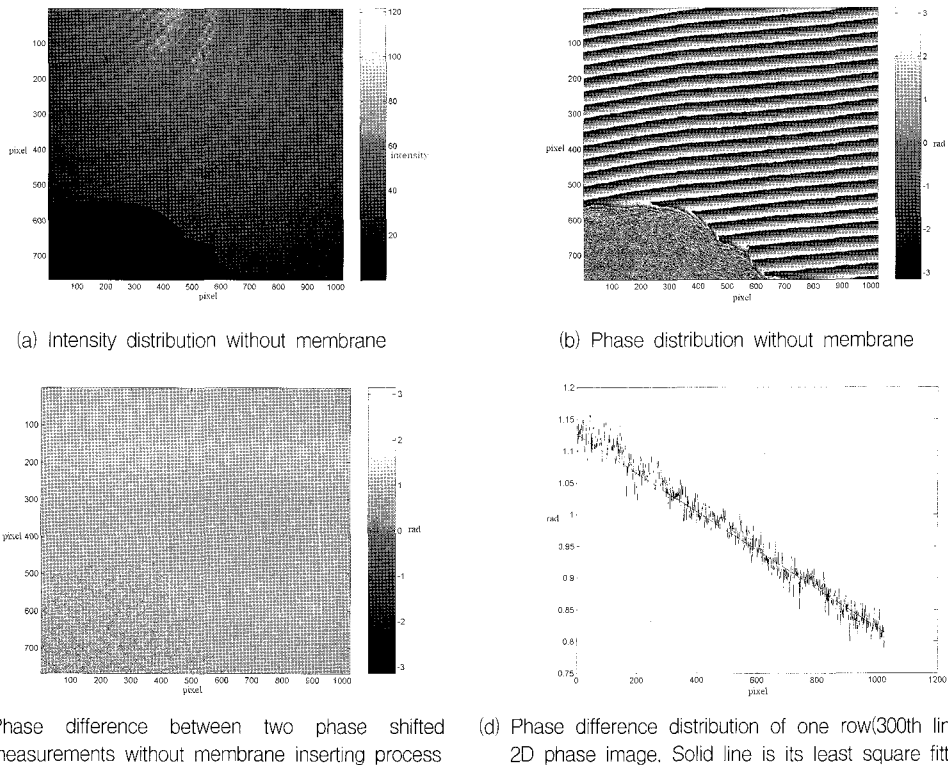


Fig. 4 Measurement and analysis of reference plane on CCD plane

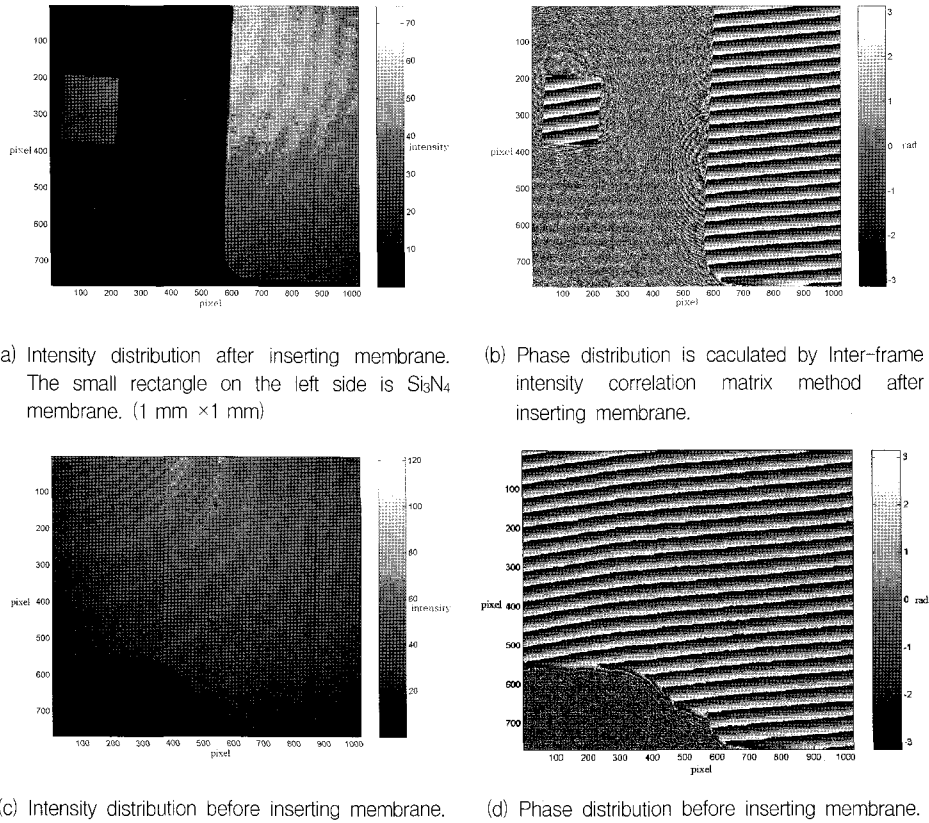


Fig. 5 Intensity and phase distributions at image plane

박막 삽입 전후의 위상차를 알기 위하여 Fig. 5(b)의 위상 분포와 Fig. 5(d)의 위상분포의 차를 구하면 Fig. 6과 같은 위상차 분포도를 구할 수 있다.

Fig. 6에서 위상차 분포를 살펴보면 박막이 있는 부분과 없는 부분에서 위상차가 거의 균일한 분포를 보임을 알 수 있다. 가로 방향의 단면도 위상차

를 살펴보면 Fig. 7과 같이 나타나는데, 4.1절에서 설명한 것처럼 박막에 의해 가려지지 않은 부분에서 기준면의 기울어짐을 관찰할 수 있으며, 이 영역으로부터 위상차의 최소 자승 면을 구하고 이것을 기준면으로 하여 박막이 위치한 영역에서의 보정된 위상차를 구하였다.

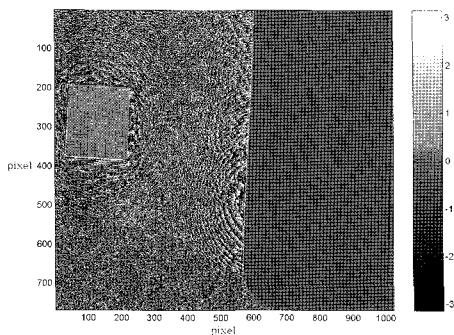


Fig. 6 Phase distribution before correcting spatial phase error

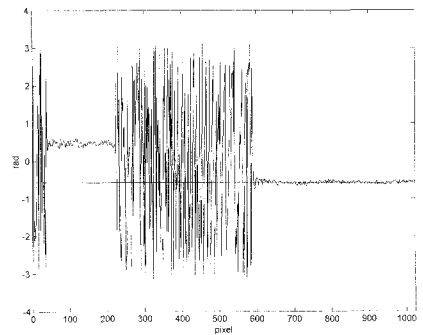


Fig. 7 Cross section of [Fig. 6] and least-square plane of reference plane

Fig. 8은 기준면으로부터 보정하고 박막의 고정판 부분의 위상도를 제거한 위상차 분포도의 2차원, 3차원 이미지이다.

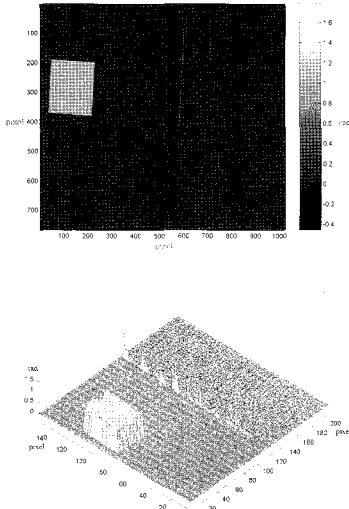
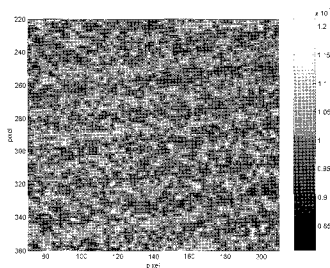
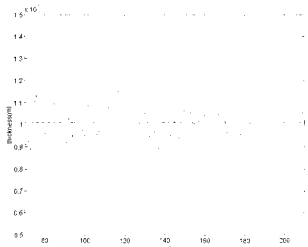


Fig. 8 Phase distribution after correcting spatial phase error which is least square surface

위상차로부터 식 (8)을 이용하여 두께 분포를 계산하면 Fig. 9과 같은 분포를 가지며, 평균 101.1 nm, 표준편차 5.2 nm로 측정되었다.



(a) Thickness distribution of membrane.



(b) Thickness plot of 300th line of entire area. (the dotted line is average thickness)

Fig. 9 Corrected thickness distribution of Si_3N_4 membrane

5. 결론

박막의 두께 측정에 있어서 기존에는 타원분석기나 SEM을 이용하여 측정하였으나 이러한 방법들은 이차원적인 분포를 구하기 위하여 스캐닝 작업을 필요로 하고, 따라서 많은 시간이 소요된다. 특히 SEM같은 장비는 시료를 손상시킬 수 있다는 단점이 있다. 이 실험의 장점은 위상이동 방법을 더한 간단한 마흐-젠더 간섭계와 헬륨-네온 레이저를 가지고 투과형 필름에 두께 분포를 빠르고 정확하게 구할 수 있다는 점이다. 이를 위하여 공간적인 위상이동 오차까지 고려하여야 100 nm의 얇은 시료에 대해서도 정확한 두께를 측정할 수 있으며, 본 실험에서는 그러한 공간적인 위상이동 오차에 해당하는 위상의 기준면을 최소자승법을 이용하여 추정함으로써 기준면을 보정하여 두께측정의 정밀도를 5 nm 정도로 높였다.

이러한 측정법은 박막의 삼입 전후의 위상차이를 통해 구하게 되므로 위상이동 오차를 제외한 실험 장치에 사용되는 광학 부품 표면의 정밀도에 의해 발생하는 오차들은 고려하지 않아도 된다. 따라서 고가의 초정밀 광학부품을 사용하지 않고도 매우 정밀한 측정을 할 수 있다는 점도 장점으로 들 수 있다. 다양한 시료와 주변 환경을 고려한 오차분석의 모델링은 측정대상의 폭을 넓히고 보다 정확한 결과와 다양한 응용을 가능하게 할 것이다.

후 기

본 논문은 과기부 과학재단지정 지역협력 연구센터인 레이저응용 신기술개발 연구센터의 2004년도 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

[1] P. Carré, "Installation et utilisation du compateur photoelectrique et interferential du Bureau International des Poids et Mesures," Metrologia 2, p. 13, (1966)

[2] J. Buruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, D. A. White and D. J. Brangaccio, "Digital wavefront measuring interferometry for testing optical surfaces and lenses," Applied Optics 13, pp. 2693-2703, (1974)

- [3] K. Freischlad and C. L. Koliopoulos, "Fourier decription of digital phase mesurment phase-measuring interferometry," *Journal of the Optical Society of America* 7, pp. 542-551, (1990)
- [4] K. Creath, "Phase shifting speckle interferometry," *Applied Optics*, 24, pp. 3053-3058, (1985)
- [5] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase shifting digital holography," *Optics Letters* 22, pp. 1268-1270, (1997)
- [6] T. Zhang and I. Yamaguchi, "Three-dimensional microscopy with phse shifting digital holography," *Optics Letters* 23, pp. 1221-1223, (1998)
- [7] J. Schwider, R. Burow, K E Elssner, J. Grnzna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "digital wave front measuring interferometry: some systematic error sources," *Applied Optics* 22, pp. 3421-3432, (1983)
- [8] K. Okada, A. Sato, and J. Tsujiuchi, "Simultaneous calculation of phase distribution and scanning phase in phase shifting interferometry," *Optics Communications* 84, pp. 118-124, (1991)
- [9] I. B. Kong and S. W. Kim, "General algorithm of phase shifting interferometry by iterative least square fitting," *Optical Engineering* 34, pp. 183-188, (1995)
- [10] S. W. Kim, M. G. Kang, and G. S. Han, "Accelerated phase measuring interferometry by least square for phase shifting interferometry," *Optical Engineering* 36, pp. 3101-3106, (1997)
- [11] H. Y. Yun and C. K. Hong, "Inter frame intensity correlation matrix method for self-calibration in phase shifting interferometry," to be published in *Applied Optics*, (2005)