

Digital Tolansky 간섭계의 개발과 이를 이용한 Surface Topography Surface Topography by Using Digital Tolansky Interferometer

정 영옥*, 이 상수
(한국과학기술원, 물리학과)

Abstract

Digital Tolansky interferometer which is Tolansky interferometer interfaced to the computer through CCD TV-camera, is developed and applied to the surface topography. First, resolution of this system is determined by minimum measurable thickness of thin film. Theoretical analysis and experimental results are compared. Second, surface topographic picture of thin film is obtained by two orthogonal fringes. Using linear fitting method, height distribution of specimen is obtained and 3-dim. picture is plotted.

I. 서론

간섭계는 간단하고 저렴한 광학 부품으로 빛의 반경축경^[1]에서 부터 결정의 분자크기^[2]까지 측정하는 폭넓은 용도와 경제성을 가지고 있다.

결정의 격자간격측정이나 박막의 두께 측정^[3], 그리고 미세 구조의 surface topography를 위한 측정장치의 개발은 여러분야에서 이루어 졌다. 널리 사용되고 있는 전자현미경인 SEM (Scanning Electron Microscope)의 경우 이상적인 조건 하에서 5-200Å의 분해능을 가진다^[4]. 그러나 전자현미경은 비싼 가격과 사용 방법이 용이하지 않음으로 해서 간편하게 사용되지 못하는 단점이 있다.

1906년 Fabry, Perot 그리고 Buisson에 의해서 은박막을 입힌 고반사율을 가진 쐐기(wedge) 양면사이에서 예리한 Fizeau 간섭무늬가^[5] 관찰되었다. 1946년 S. Tolansky는 Fizeau 다중광속(multiple-beam) 간섭무늬의 결상원리를 밝혀냈다. 아울러 그는 이 간섭계를 이용해서 박막두께 측정, 결정격자구조분석 그리고 미세구조의 surface topography에 이르기 까지 많은 연구를 하였다.

Tolansky 간섭계는 두께나 깊이 측정에 있어서 전자현미경에 뒤지지않는 성능을 가지고 있으며 사용방법이 간단하고 장비가격이 전자현미경에 비해서 엄청나게 싼 장점을 가지고 있다.

본 연구는 Tolansky 간섭계의 높은 성능을 살리고 자동화되고 빠른 두께측정과 surface topography를 통해 시료의 구조를 3 차원으로 재현할 수 있도록 하는 것이다.

II. 이론

1. 전체계의 분해능

Tolansky 간섭계로 측정가능한 박막의 최소 두께는 박막두께에 의해서 쐐기는 인접한 간섭무늬의 강도차이가 구별가능한 순간의 간섭무늬의 이동간격으로 부터 측정될 수 있다. 쐐기사이의 각이 아주 작은 경우 Tolansky 간섭무늬의 강도 분포는 AIRY summation으로 근사될 수 있다. 쐐기사이의 양면이 높은 반사율을 갖고 있으면 박막의 작은 두께차 Δh 에

의해서 간섭무늬가 끊어져 옆으로 이동하고, 간섭무늬가 끊어지는 면에서 두 간섭무늬의 강도차 ΔI 가 발생한다. ΔI 에 해당하는 위상차 δ 의 변화량을 $\Delta\delta$ 라고 하면

$$|\Delta h| \approx 0.1\lambda/4F$$

의 관계식^[6]을 얻을 수 있다. 여기서 F는 finesse 이고, λ 는 광원의 파장이다. 실험에 사용된 간섭계의 경우 $F = 37.7$ 이므로 Δh 는 4\AA 이다. 그러나, 실제 간섭계는 대물경의 수치구경에 의해서 간섭을 일으킨 광물중 유한한 갯수만이 현미경에 입사되어 분해능이 이상적인 경우보다 나빠진다.

Digital Tolansky 간섭계의 최소두께 측정치는 Tolansky 간섭계의 분해능과 CCD TV-camera, digitizer 그리고 컴퓨터의 성능에 의해서 영향을 받는다. 한 간섭무늬 간격에 해당하는 컴퓨터의 pixel 갯수가 정확한 피크 강도의 위치에 대한 오차와 측정 가능한 최소 두께의 크기를 결정한다.

$$d_m = \lambda/2N$$

d_m 은 측정가능한 최소두께이고, N은 간섭무늬 사이의 pixel 갯수이다. 적절한 실험조건하에서 간섭무늬간격을 200 pixel까지 얻을 수 있으므로 측정가능한 최소두께와 오차의 최소한계는 11\AA 이 된다.

2. 수직인 2방향의 digital 간섭무늬로부터 얻는 박막의 surface topography.

Tolansky 간섭무늬는 다중평속에 의한 에리한 간섭무늬이므로 간섭무늬방향으로 높이나 깊이등의 시료표면상태를 정확히 알수있다. 그러나 간섭무늬 사이의 시료 표면에 대한 정보는 정확히 알수없다.

Tolansky 간섭계를 surface topography에 사용하기 위해서는 기본적으로 수직인 두 방향에 대한 시료표면의 간섭무늬를 얻어야 한다. Cover glass를 수직인 두 방향에 대해서 기울이면 같은 시료에 대해서 수직인 두가지 방향의 간섭무늬를 얻을수 있다. 간섭무늬들은 각각의 방향에 대한 표면 정보를 갖고 있으며 이 정보를 적절히 분석, 종합하면 한 방향보다 정확한 시료의 구조를 분석할 수 있다.

그림 1 은 수직인 두 방향의 간섭무늬를 얻는 과정을 나타낸 것이다.

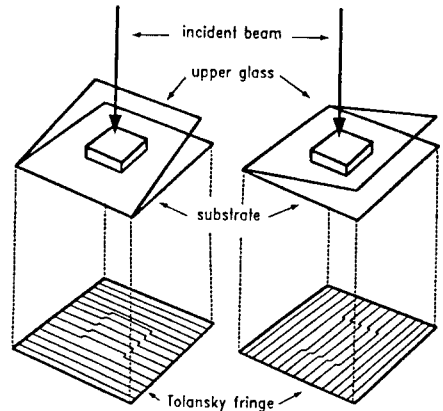


Fig. 1 Two orthogonal Tolansky fringes from different directions of wedge angle.

간섭무늬 사이의 높이분포는 간섭무늬의 높이분포로부터 결정될 수 있다. 수직인 두 방향의 간섭무늬로부터 정확히 측정된 격자의 높이분포와 이로부터 선형 fitting방법에 의해서 결정된 격자 사이의 공간의 높이분포로부터 3차원 시료구조를 입체적으로 재생할 수 있다.

III. 실험 결과

이 실험의 장치도가 그림 2에 나타나있다.

1. 정량적인 두께측정

편평도가 좋은 Slide glass에 높이를 측정할 시료로 Al 박막을 쌓고 두께를 측정하기 위해서 다시 Al 박막을 넓게 약 $1,000\text{\AA}$ 두께로 쌓았다. CCD TV-camera 를 통해 받아들여진 간섭무늬의 강도분포를 video-digitizer를 통해 0~63 gray level 사이의 값으로 A/D 변환시켜 컴퓨터의 보조기억장치에 입력시킨다. 계수화된 간섭무늬로부터 극소강도점을 찾는 과정은 Software를 통한 처리과정중 가장 중요한 부분이다.^[7]

본 실험에서는 적선에 가까운 에리한 간섭무늬이므로 여러 가지 중심선 추출방법 중에서 간섭무늬에 수직인 한 방향만으로의 주사가 가장 정확함을 확인하였다. 그림 3은 중심선 추출 방법에 의해서 얻은 Skeletonized fringe와 극소점이 두께

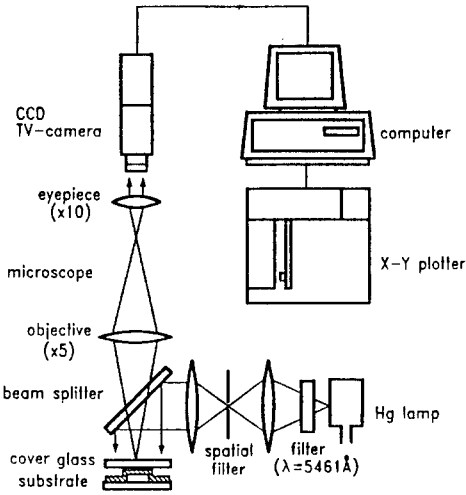


Fig. 2 Experimental setup.

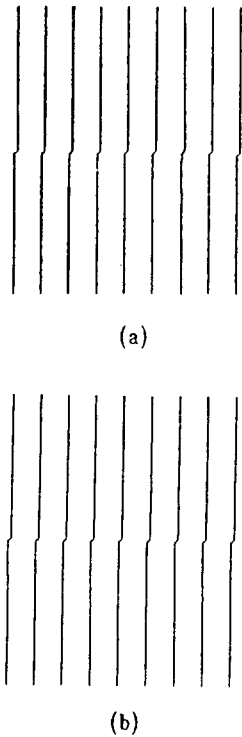


Fig. 3 (a) skeletonized fringes and (b) thinned fringes from digitized interferogram.

이상인 경우 이들의 위치를 평균하여 얻은 Thinned fringe이다.

계수화된 간섭무늬가 컴퓨터에 의해서 이어진 선으로 인식하게 해주기 위해서 각 간섭무늬의 차수가 결정되어야 한다. 결정된 차수는 이어진 하나의 간섭무늬임을 나타내기도 하지만 높이의 증가방향에 대한 정보^[8]도 가지고 있다. 실제간섭무늬는 완전하게 제거되지 않은 잡음신호의 영향과 제에 내재한 오차에 의한 효과를 줄이기 위해서 최소자승법을 사용하여 선형 방정식의 기울기와 절편을 구하여 두께를 측정하였다. 측정된 각 시료의 박막 두께와 시료의 3차원 도시가 그림 4와 그림 5에 나타나 있다. 그림 4에 나타나 있는 시료는 두께가 162\AA 이며 표준편차가 7\AA 이었다. 그리고 박막의 edge가 원만한 곡선을 이루며 뽀아졌음을 알 수 있었다. 그림 5는 박막 두께가 315\AA 이고 표준편차가 8\AA 인 시료의 표면구조이다. 박막의 edge가 앞의 시료에 비해서 급한 경사를 이루며 뽀아졌음을 알 수 있다.

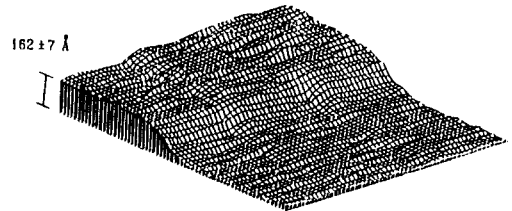


Fig. 4 3-D plot of thin film surface profile. Its thickness and standard deviation are 162\AA , 7\AA respectively.

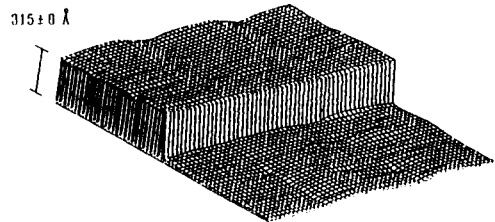
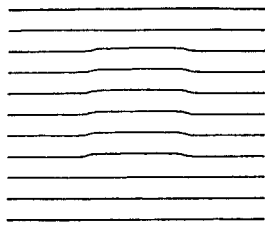


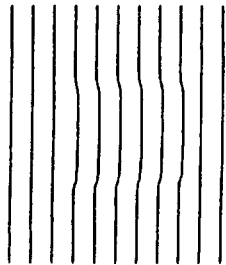
Fig. 5 3-D plot of thin film surface profile. Its thickness and standard deviation are 315\AA , 8\AA respectively.

2. 박막의 3차원 Topography

이 실험은 단순한 두께측정이 아니라 일정한 크기와 높이를 가진 박막의 surface topography이다. 시료의 제작은 polyester film으로 원하는 모양의 mask를 제작하고 film의 정전기기를 이용하여 coater 안에서 slide glass와 부착하게 하여 원하는 모양의 박막을 쌓았다. upper glass를 수직인 두 방향으로 기울여서 얻어진 간섭무늬를 각각 계수화 시켜 그림 6과 같이 중심선 추출하였다. 높이 측정을 마친 간섭무늬는 간섭무늬 각 위치의 높이를 결정하고 이로부터 선형 fitting 과정을 통해서 간섭무늬 사이의 높이를 결정하고 두 방향의 높이분포를 합성하여 전체 높이를 결정한다. 높이가 결정된 시료의 3차원 도시가 그림 7에 나타나 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 Thinned fringes of (a) horizontal direction and (b) vertical direction.

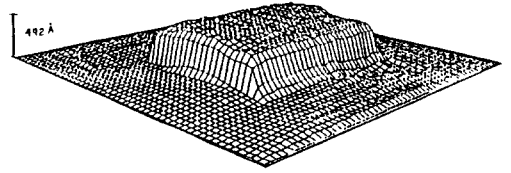


Fig. 7 3-D plot of thin film which is obtained from two fringes of orthogonal direction. Film thickness is 492 Å .

IV. 결 론

본 논문에서 Tolansky 간섭계와 CCD TV-camera, digitizer 그리고 소형 컴퓨터를 연결하여 digital Tolansky 간섭계를 제작하였으며, 정량적이고 빠르게 박막의 두께를 측정하고 박막 표면의 구조를 3차원으로 재생할 수 있는 software를 개발하였다.

실험은 두가지 과정을 통하여 진행되었다. 첫번째 과정은 digital Tolansky 간섭계의 성능인 정량적인 두께 측정 과정이었다. 제작된 시료의 평균 두께는 315Å 이었고 표준편차는 8Å 이었다. 위의 결과를 토대로 제작된 digital Tolansky 간섭계의 성능은 16Å의 오차폭을 가짐과 아울러 측정가능한 최소 두께 역시 이 값에서 크게 벗어나지 않을 것으로 유추할 수 있다. 이론에서 살펴본 최소 측정가능한 두께나 오차 범위와 크게 틀리지 않음을 볼 때 이상적인 Tolansky 간섭계보다 오차가 커지는 이유가 한정된 대물렌즈의 수치구경의 크기와 완전하게 편평하지 않는 웨지 양면의 영향이 가장 두드러짐을 알 수 있었다. 두번째로 일정한 모양을 가진 박막시료의 surface topography를 하였다. 수직인 두 방향의 간섭무늬를 통하여 격자화된 시료 각 부분의 높이를 알아내었으며 이를 토대로 linear fitting에 의해서 격자사이의 시료의 높이를 결정하였다. 결정된 높이를 삼차원으로 도시하였으며, 도시된 그림은 63×63의 격자로 구성하게 하였다.

이 결과로 미루어 볼 때 두 방향에 의한 간섭무늬의 분석은 Tolansky 간섭무늬의 장점인 높은 성능을 유지하면서 보다

많은 부분의 표면정보를 실시간(real time)으로 처리할 수 있는 가능성을 보여주었다. 이는 전자현미경에 비해서 저렴한 가격과 빠르고 간편한 방법으로 시료의 미세구조를 가시화 할 수 있으며 높이나 깊이등은 전자현미경에 뒤지지 않는 정확도로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Reference

1. 이 상 수, 파동광학, 교학연구사, 서울 (1983)
2. S. Tolansky, Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Films, Dover Publications Inc., New York (1970)
3. S. Tolansky, An Introduction to Interferometry, John Wiley and Sons, New York (1973)
4. P. J. Grundy, and G. A. Jones, Electron Microscopy in the Study of Materials, Edward Arnold, London (1976)
5. R. Bunnagel, H. A. Oehring and K. Steiner, Appl. Opt. 7, 33 (1968)
6. M. Born, and E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, New York (1983)
7. W. R. J. Funnell, Appl. Opt. 20, 3245 (1981)
8. C. L. Koliopoulos, Lasers and Optronics, 65 (1988)