

박막의 두께형상 및 굴절률 측정 Thin-film Measurements of thickness profile and refractive index

*주우덕¹, 김영식¹, 유준호¹, 김승우¹

*W. D. Joo¹, Y.-S. Ghim¹, J. H. You¹, #S.-W. Kim¹ (swk@kaist.ac.kr)

¹ 한국과학기술원 기계공학과

Key words : Thin-film, Thickness profile, Refractive index

1. 서론

박막의 제조 및 가공은 광통신 부품, 반도체, 디스플레이를 비롯한 다양한 산업에서 필요로 하는 기술이다. 반도체의 집적도가 높아지면서 패턴의 구조가 점차 복잡해지는 것이나, TFT-LCD 제작에 있어서 칼라 필터(color filter)의 두께나 스페이서(spacer)의 높이를 보다 균일하게 유지함으로써 생산성을 증대시키고자 하는 등 응용분야에서 요구하는 가공 수준이 갈수록 박막화, 집적화 및 정밀화되고 있다. 박막가공에 있어 반드시 가공 정밀도보다 높은 수준의 측정 기술이 병행되어야 해당 기술의 신뢰도를 검증할 수 있기 때문에 박막의 특성 측정에 대한 연구 역시 오랜 역사를 가지고 발전해 왔다.

다양한 측정기술 가운데 광학식 측정법의 경우 속도가 빠르고 측정대상을 손상시키지 않는 등 접촉식 측정법에 비해 많은 장점을 가진다. 박막의 두께와 굴절률을 광학적으로 측정하는 방법에는 타원해석법(ellipsometry)과 반사광 측정법(reflectometry) 등이 있다. 타원해석법은 물질의 구조와 특성에 따라 반사광의 편광별 위상과 진폭이 달라지는 현상을 이용하는 방법으로, 시편에 대한 민감도가 높아 수 Å 두께의 초박막까지 측정이 가능하지만 시스템이 다소 복잡하고 사용자에게 따라 민감한 단점이 있다. 반사광측정법은 측정물에 대한 입사광과 반사광의 세기 비를 측정하고 이를 이론상의 반사율 값과 비교 분석함으로써 박막 특성을 알아본다. 이 역시 나노미터 이하의 분해능으로 측정이 가능하고 수평분해능이 좋아 미세한 패턴의 측정에 강점을 가진다. 타원해석법과 반사광측정법 모두 연구를 거듭해오면서 입사각이나 입사광의 파장을 달리하여 측정하는 방법이 개발되었는데, 그 응용으로써 개구수가 큰 대물렌즈를 사용하여 다중 입사각에 대해 각 편광별 시편 특성을 별도의 구동부 없이 측정하는 연구가 선행된 바 있다.[1-2]

박막의 형상은 표면 계측(surface metrology)에 쓰이는 광간섭법(interferometry)을 사용하는데, 이는 사용하는 광원의 종류에 따라 다시 광위상간섭법(phase shifting interferometry, PSI)과 백색광간섭법(white-light interferometry, WLI)으로 나뉜다. 광위상간섭법은 단색광원을 사용하여 수 Å의 정밀도로 미세형상을 측정할 수 있으나, 광원과 알고리즘의 특성상 2π 모호성이 존재하여 큰 기울기의 형상 측정에 어려움이 있다. 반면에 백색광간섭법은 백색광원의 짧은 가간섭성에 의해 2π 모호성 없이 수 μm에 이르는 큰 단차도 측정이 가능하다. 백색광을 이용한 단차 측정은 PZT 등의 미세구동장치를 이용한 거리주사(z-scanning)식, 파장가변레이저(tunable laser)나 음향광변조기(acousto-optical modulator), 음향광변조필터(acousto-optical filter) 등을 이용한 파장주사(k-scanning)식, 프리즘이나 회절격자 등을 이용한 분산(dispersive) 백색광 간섭법 등의 방법으로 이루어진다.

최근에는 별개의 분야로 여겨지던 박막의 두께 측정과 형상 측정을 백색광주사간섭법[3]이나 분산백색광간섭법[4]을 통해 동시에 수행하였고, 나아가 초박막 시편의 두께형상 측정을 위해 반사광측정법과 간섭법을 융합 적용한 연구도 진행되었다.

본 연구에서는 높은 개구수의 대물렌즈를 적용한 반사광측정법과 간섭법을 함께 적용하여 단층 및 다층박막의

두께형상과 굴절률을 측정하는 시스템을 제안한다. 반사광 측정법으로 박막의 두께와 굴절률을, 간섭법을 통해 박막의 형상정보를 각각 측정한다.

2. 반사광 측정법 및 간섭법을 이용한 박막의 두께형상 및 굴절률 측정

시편에 대한 반사율의 측정값과 이론값을 비교함으로써 두께 및 굴절률 정보를 얻는 것이 반사광측정법의 기본 원리이다. 반사율의 측정값은 다음 식 (1)로 표현할 수 있다. 여기서 $\mathfrak{R}_{sam,abs}$ 는 측정시편의 절대반사율(absolute reflectance), $\mathfrak{R}_{std,abs}$ 는 표준시편의 절대반사율, $I_{sam,ref}$ 는 측정시편에 대한 반사광의 세기, $I_{std,ref}$ 는 표준시편에 대한 반사광의 세기를 나타낸다.

$$\mathfrak{R}_{sam,abs} = \frac{I_{sam,ref}}{I_{std,ref}} \times \mathfrak{R}_{std,abs} \quad (1)$$

측정값과 비교하는 이론적인 반사율은 각 경계면의 프레넬 반사계수와 각 층의 두께 및 굴절률로부터 계산할 수 있다. 두께 및 굴절률 정보를 얻기 위한 방법으로는 이론값과 실험값의 차가 최소화인 값을 찾는 최적화 과정이 있으며, 그 밖에도 연산을 통한 수치적 방법으로 굴절률과 두께정보를 분리(decouple)하여 결정하는 알고리즘이 알려져 있다.[5]

대기층(ambient)-박막-기저층(substrate)으로 구성된 일반적인 단층박막 구조의 경우 박막 내 다중반사를 고려하여 간단한 연산을 통해 반사율을 구할 수 있다. 이를 다층박막으로 확장할 경우 빛의 진행을 정방향 및 역방향 성분의 2x1 행렬로 정의하고 박막의 특성을 2x2 행렬로 표현함으로써 반사계수를 정의하는 방법이 있다.[6]

동일한 시편에 대해서도 그림 1(a)와 같이 입사광의 편광방향이나 입사각 및 파장에 따라 반사율 값이 다르게 나타난다. 이를 이용하면 보다 정확한 측정이 가능하고 다층박막과 같이 다수의 미지값을 가지는 시편으로 측정대상을 확장할 수 있다. 기존의 반사광측정법에 개구수가 큰 대물렌즈를 적용하면 다양한 편광방향과 다중입사각을 한 번에 구현할 수 있다. 대물렌즈 후초점면(back focal plane)에서의 편광특성이 그림 1(c)에 나타나 있다. 선형편광된 입사광에 대하여 후초점면에서 빛의 편광축과 평행한 선상, l_p 위에 입사 및 반사하는 빛은 입사면과 편광방향이 평행한 수평편광(p-편광) 특성을 나타낸다. 이에 비해 l_s 위를 지나는 빛은 수직편광, 즉 s-편광을 유지한다. 따라서, CCD에서 l_p 및 l_s 상의 광강도 분포를 분석함으로써 p-편광 및 s-편광에 대한 반사율 정보를 동시에 획득할 수 있다. 다중 입사각의 구현은 대물렌즈의 횡단면을 보여주는 그림 1(d)에서 확인할 수 있다. 그림과 같이 개구수가 큰 대물렌즈를 적용함으로써 수직입사, 즉 0° 입사각부터 대물렌즈의 개구수에 의해 결정되는 최대 입사각에 이르기까지의 반사율 정보를 한 번의 실험으로 얻을 수 있다. 보다 넓은 범위의 입사각에 대한 정보를 얻기 위해서 개구수가 큰 대물렌즈를 사용하는 것이 좋다.

박막의 형상정보는 앞서 설명한 반사광측정법을 이용하여 측정된 박막의 두께 및 굴절률 정보를 바탕으로 간섭계

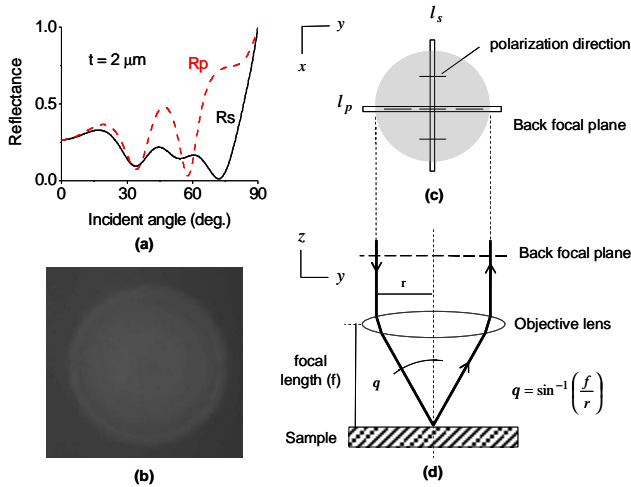


Fig. 1 (a) simulation results of reflectance for 2 μm thin-film structure with respect to both various incidence angle and polarization direction. (b) the intensity distribution of reflected light at the back focal plane for a thin-film structure (c) the top view of the back focal plane which shows polarization direction of light incident/reflected to an objective lens of high numerical aperture (d) the side view which shows the path of the beam traversing an objective lens

원리를 이용하여 측정한다. 간섭계는 음향광변조필터를 이용한 파장주사(k-scanning)원리를 적용하여 간섭무늬를 획득한다. 일반적으로 간섭무늬 I 는 식 (3)과 같다.

$$I(h, d; k) = I_0(k) + I_1(k) \cos[\Phi(h, d; k)] \quad (3)$$

, where $\Phi(h, d; k) = 2kh + \Psi(d; k)$

여기서 I_0 는 배경광의 세기, I_1 는 간섭무늬의 가시도, Φ 는 두께와 형상정보를 담고 있는 위상값, k 는 파수(wave number), d 는 박막의 두께, h 는 박막의 형상, 그리고 Ψ 는 박막 내 다중반사로 인한 비선형 위상성분을 의미한다. 형상정보 h 를 구하기 위해서 우선 간섭무늬 I 로부터 위상항 Φ 를 추출해야 한다. 이를 위해 FFT, 필터링(filtering) 및 IFFT의 수학적 연산이 필요하다. 위상항은 선형성분 $2kh$ 와 비선형성분 Ψ 으로 나눌 수 있는데, 이 때 Ψ 는 시편의 반사계수 r 과 식 (4)의 관계를 만족한다.

$$y(d; k) = \arg(r) \quad (4)$$

r 은 앞서 구한 두께 및 굴절률 정보로부터 결정되는 값이기 때문에 간단한 선형 맞춤(linear fitting)을 통해 다음 식 (5)와 같이 형상정보 h 를 구할 수 있다.

$$h = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(\Phi - \Psi)}{dk} \quad (5)$$

3. 광학계 구성

광학 구성은 그림 2와 같다. 실험은 박막의 두께 및 굴절률 측정과 형상 측정을 위해 각각 한 번씩 총 두 번의 실험이 필요하다. 우선 두께 측정을 위한 반사광측정계를 구현하기 위하여 기준판의 셔터를 닫는다. 이 때 광원에서 나온 백색광은 음향광변조필터(acousto-optical tunable filter)와 편광자(polarizer)를 통해 원하는 파장의 선형편광된 준단색광으로 여과되어 측정 시편의 한 점에 입사한다. 시편의 두께정보를 담은 반사광은 대물렌즈의 후초점면에 위치한 CCD의 촬상면에 조영된다. 반사광측정법을 통해 두께정보를 획득한 다음에는 형상측정을 위해 셔터를 열고 간섭계를 구성하여 형상을 측정한다. 이는 측정판과 기준판에 각각 동일한 배율의 대물렌즈가 위치하는 리닉(Linnik) 간섭계의 구조와 동일하다. 측정면과 기준면에 대한 반사광이 중첩되어 간섭무늬를 형성하며 음향광변조필터를 이용하여 주파수를 주사(k-scanning)함에 따라 형상정보를 획득한다.

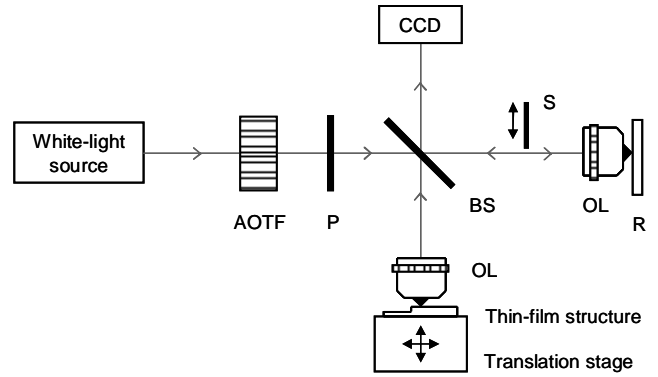


Fig. 2 schematic diagram of the experimental setup (AOTF: acousto-optical tunable filter, P: polarizer, BS: beam splitter, CCD: charge-coupled device, OL: objective lens with high numerical aperture, S: shutter, R: reference mirror)

4. 결론

높은 개구수의 대물렌즈를 반사광측정법에 적용함으로써 별도의 구동부 없이 다양한 입사각 및 편광방향에 따른 반사율 변화를 측정할 수 있기 때문에 박막의 두께 및 굴절률과 관련한 다양한 정보를 얻을 수 있다. 더불어 백색광 광원과 음향광변조필터의 조합을 이용해 가시광 영역에 해당하는 파장 변화를 가능케 하므로 다양한 입사각에 대한 반사율 결과를 얻을 수 있다. 다양한 측정정보를 바탕으로 다층박막의 두께와 굴절률을 분리하여 측정할 수 있으며 나아가 측정 대상을 다층박막으로까지 확장할 수 있는 장점을 가진다. 박막의 형상은 리닉 구조의 간섭계를 적용하며, 측정된 두께정보를 바탕으로 박막 표면의 한 점에 대한 높이정보 획득을 기대한다. 나아가 파장, 입사각 및 편광 방향의 변화가 가능한 데 따른 다양한 측정값을 이용하여 다층박막의 두께형상 및 굴절률 측정 알고리즘을 모색해 보고 이를 실험으로 검증하는 과정을 수행하고자 한다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 과제(Creative Research Initiative, CRI)의 지원을 받아 한국과학기술원 BUPE(Billionth Uncertainty Precision Engineering) 연구단에서 수행하였습니다.

참고문헌

1. A. Rosencwaig et al, "Beam profile reflectometry: A new technique for dielectric film measurements," Appl. Phys. Lett., 60(11), 1301-1303 (1992)
2. 이상헌, 박윤근, 김수현, 조현모, 조용재, 제갈원, "수 마이크로 영역에서의 나노 박막 두께 측정을 위한 타원계측," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집 pp.195-196, 2007
3. S. -W. Kim and G. -H. Kim, "Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry," Appl. Opt. 38, 5968-5973 (1999)
4. Y. -S. Ghim and S.-W. Kim, "Fast, precise, tomographic measurements of thin films," Appl. Phys. Lett. 91(2007)
5. T. Kihara and K. Yokomori, "Simultaneous measurement of refractive index and thickness of thin film by polarized reflectances," Appl. Opt., 29(34), 5096-5073(1990)
6. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*(North-Holland, New York, 1977)