

다중 입사각 반사광측정법을 이용한 박막의 두께측정 Angle-resolved reflectometer for thin-film thickness measurement

*주우덕, #김승우

*W. D. Joo, #S.-W. Kim(swk@kaist.ac.kr)
한국과학기술원 기계항공시스템공학부

Key words : angle-resolved reflectometry, thin-film metrology, thickness measurement

1. 서론

박막 측정은 반도체와 평판 디스플레이 제조와 같은 첨단 산업분야에서 제조 속도 증가 및 불량률 감소에 직접적인 영향을 미치는 주요 공정 중 하나이다. 박막의 두께와 굴절률에 대한 대표적인 측정법은 엘립소메트리(ellipsometry)와 반사광측정법(reflectometry)이다. 시편에 대한 입사광과 반사광의 특성을 분석함으로써 박막의 특성을 측정한다는 데에서 공통점을 가지는 위 두 방법 모두, 분광측광법(spectro-photometry)과 같이 분광법을 이용하거나 VASE (variable angle spectroscopic ellipsometer)와 같이 다양한 입사각 정보를 수집하는 방법, 두 정보를 함께 사용하는 기법 등으로 발전해 왔다[1-2]. 다중 입사각에 대한 반사광 정보를 획득하는 과정에서 시스템의 일부 혹은 시편을 기계적으로 회전시키는 시스템이 고안되었으나, 이는 구동부가 포함되어 실시간 측정이 어렵고 시스템 구성의 크기가 커지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 개구수가 큰 대물렌즈를 적용함으로써 여러 입사각에 대한 반사광 정보를 기계적 구동 없이 한 번에 얻을 수 있는 방법이 제안되었다[3]. 이를 응용하여 시편의 표면형상이나 박막의 두께 및 굴절률 정보를 보다 간단한 시스템으로 측정하는 연구가 진행된 바 있다[4-5].

본 연구에서는 반사광 측정법을 기반으로 하여, 기계적 구동 없이 실시간으로 박막의 두께를 측정하고자 한다. 반사광측정법에 음향광변조필터(AOTF, acousto-optic tunable filter)와 개구수(N.A.)가 큰 대물렌즈를 적용함으로써 다중 입사각 및 다중 입사각에 대한 반사광 정보를 빠르게 획득하여 단층 및 다중 박막의 두께를 측정할 수 있는 방법을 제안한다.

2. 광학계 구성

광학계 구성은 Fig. 1 과 같다. 백색광 광원에 음향광변조필터를 이용하여 관심파장을 걸러내어 다양한 파장의 준단색광(quasi-monochromatic light)을 사용할 수 있게끔 하였다. 여기에 편광자(polarizer)를 두어 원하는 광 축으로 편광 축을 정렬한 선형 편광 된 빛은 무편광 광분할기(non-polarizing beam splitter)와 개구수가 0.95 인 대물렌즈를 거쳐 측정하고자 하는 시편에 입사한다. 개구수가 큰 대물렌즈는 μm 이하의 매우 좋은 수평분해능(spatial resolution)을 가지기 때문에 미세 패턴이 있는 시편의 측정에도 장점을 가진다. 시편의 측정점에서 반사된 빛은 다시 대물렌즈를 거쳐 CCD 로 입사한다. 이 때, CCD 앞에 위치한 일련의 렌즈 군에 의해 대물렌즈의 후초점면(Back focal plane)이 관찰면에 결상한다. 기본적으로 한 번에 한 점의 두께를 측정하지만, 시편에 위치한 이송 스테이지(translation stage)를 사용하거나 프로브(probe) 전체를 구동할 경우 면 상의 여러 점을 측정할 수 있다. 시편은 투명박막을 대상으로 하는데, 단층박막을 포함하여 다층박막으로도 그 범위를 넓힐 수 있다.

3. 측정원리

반사광측정법의 기본원리는 시편에 대한 입사광과 반사광의 세기 비, 즉 시편의 절대반사율(absolute reflectance)을

통해 시편의 특성을 분석하는 것이다. 그러나 실험적으로 직접 입사광과 반사광의 세기를 측정하기 어렵기 때문에 식(3-1)과 같이 절대반사율 값이 잘 알려진 표준시편을 사용하여 CCD 에서 측정된 반사광의 세기를 분석함으로써 시편 바로 위에서 입사광과 반사광의 세기를 측정하는 것과 동등한 결과를 얻을 수 있다.

$$\mathfrak{R}_{sam,abs} = \frac{I_{sam,ref}}{I_{std,ref}} \times \mathfrak{R}_{std,abs} \quad (3-1)$$

단, $\mathfrak{R}_{sam,abs}$ 와 $\mathfrak{R}_{std,abs}$ 는 측정시편과 표준시편의 절대반사율을, $I_{sam,ref}$ 와 $I_{std,ref}$ 는 각각 측정시편과 표준시편에 대한 감광부에서의 반사광의 세기를 의미한다. 표준시편으로는 주로 가공하지 않은 실리콘 웨이퍼(silicon bare wafer)를 사용한다.

실험에서 음향광변조필터와 개구수가 큰 대물렌즈를 사용함으로써 얻을 수 있는 이점은 시편이 나타내는 반사광의 세기의 변화를 다양한 방향에서 읽을 수 있다는 것이다. 동일한 시편에 대해서 반사광을 측정하더라도 반사율(\mathfrak{R})은 다음 식(3-2)와 같이 입사광의 파장(λ), 입사각(θ) 그리고 편광방향(\vec{P})에 따라 다르다.

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}(\lambda, \theta, \vec{P}) \quad (3-2)$$

Fig. 2 에 개구수가 큰 대물렌즈를 사용함으로써 얻을 수 있는 이점이 나타나 있다. 입사각의 경우, 수직입사에 해당하는 0° 입사각에서 식(3-3)으로부터 계산 가능한 최대 입사각, θ_c 에 이르기까지의 반사광 정보를 동시에 획득할 수 있다(Fig. 2-a). 개구수가 0.95 일 경우 θ_c 는 74.2° 이다.

$$N.A. = \sin(\theta_c) \quad (3-3)$$

더불어 수평(p-)편광 및 수직(s-)편광에 해당하는 반사광을 한 번에 측정 가능하므로(Fig. 2-c) 식 (3-2)의 특성을 보다 효과적으로 사용할 수 있다.

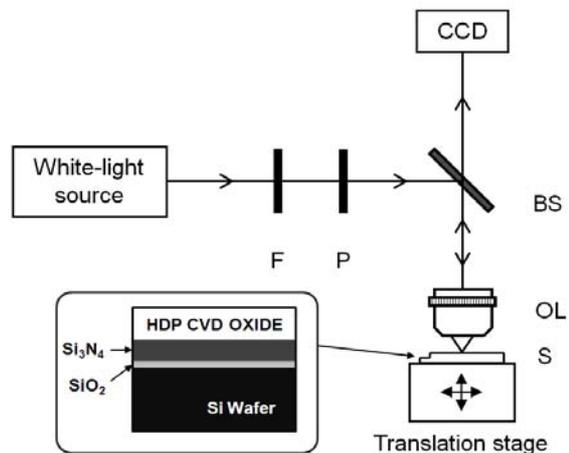


Fig. 1 The schematic diagram of the experimental setup (F: filter, P: polarizer, BS: non-polarizing beam splitter, OL: objective lens with high numerical aperture, S: thin-film sample)

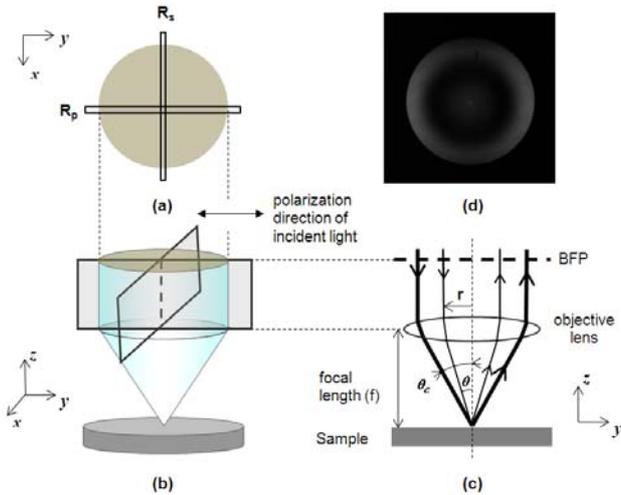


Fig. 2 (a) the top view of the back focal plane that notifies polarization directions of the light incident upon/reflecting from the sample (b) the 3D figure of the objective lens and light entering (c) the side view of the objective lens and the rays that shows how angle-resolved reflectometer works (d) an actual image of the back focal plane of the objective lens for measuring three-layered sample

이론적인 반사율 정보를 계산하는 방법은 단층박막 구조의 경우 박막 내 다중반사를 고려하여 쉽게 구할 수 있으나, 다층박막의 경우로 확장하면 다소 복잡해진다. 다층박막구조 각 층 내부에서의 빛의 진행을 정방향 및 역방향 성분으로 표현하여 2x1 행렬로 나타내고, 박막 내 진행 및 경계면 특성을 각각 2x2 행렬로 표현하는 방법을 이용 반사계수를 결정하는 방법이 알려져 있다[6].

이렇게 실험으로 구한 측정시편의 절대반사율 값을 이론적으로 모델링한 시편구조로부터 계산해낼 수 있는 이론적 절대반사율과 비교하는 최적화 과정을 통해 실제 시편의 두께 값을 정확하게 구할 수 있다.

4. 최적화 및 모의실험

Fig. 3 에서와 같이, 실험값과 이론값 사이의 차이를 최소화하는 변수를 최적화 과정을 통해 검색하여 시편 박막 각 층의 두께를 결정한다. 최적화 알고리즘으로는 널리 사용되는 Levenberg-Marquadt 비선형 최소자승법(non-linear least square method)을 적용하였다. 일반적인 최적화의 특성상 국소 최소값에 최적화 함수가 멈출 가능성이 있고, 더욱이 다층 박막 시편의 경우 다변수 최적화 과정을 거치게 되므로 각 변수간 연동(coupling) 가능성에도 주의해야 한다. 본 연구는 다양한 반사율 측정값을 이용할 수 있으므로 이로부터 merit function 을 다양하고 적합하게 적용해 볼 수 있는 장점이 있다.

최적화 모의실험은 ‘oxide(700nm) - nitride(140nm) - oxide(15nm) - silicon substrate’의 3층 박막구조에 대해서 참값에 10%의 오차를 임의로 추가한 것을 모의 실험값으로 설정하고 시행하였다. 다과장 및 다중 입사각 정보를 모두 활용하였을 때, 각 층의 두께값은 모두 나노미터 이하의 정확도 및 정밀도를 보여주었다. 초기 추측값은 각 층별로 참값에서 ±100 nm, ±50nm, ±20nm 범위에서 지정하였다.

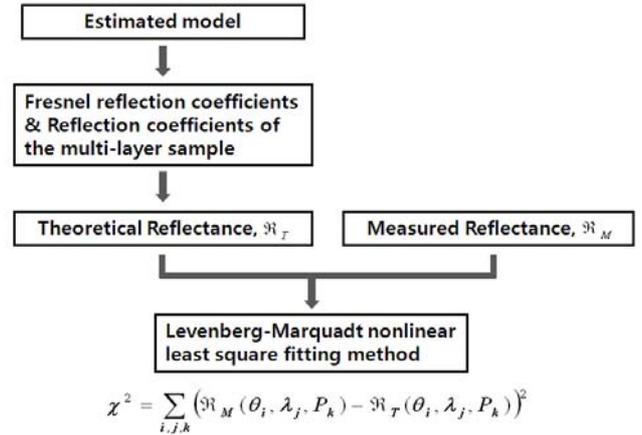


Fig. 3 The flow chart of the analysis. Acquiring measured reflectance and theoretical one proceed separately, and combining both of them with optimization process gives us the thickness information of the sample.

5. 결론

본 연구는 반사광측정법을 이용해 다층박막의 한 점에 대한 두께를 실시간으로 측정하는 방법을 제안하고 그 가능성을 살펴보았다. 일반적인 반사광측정법에 음향광변조 필터와 개구수가 큰 대물렌즈를 적용함으로써 가시광 영역의 다양한 과장, 다중 입사각, 그리고 모든 편광방향에 대한 반사광 정보를 빠르게 측정할 수 있는 시스템을 구현하였다. 이로부터 획득한 반사율 정보와 이론적인 모델링으로부터 계산한 반사율 값 사이의 차를 최소화하는 최적화 과정을 통해 최종적인 두께 정보를 추출할 수 있다. 보다 완성된 분석 및 반복능 검사를 통해 성능을 확인하고, 최적화에 사용된 오차함수를 적절히 정의함으로써 다양한 시편으로 그 측정 대상을 확장할 수 있을 것이다.

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. O. S. Heavens, *Optical Properties of Thin Solid Films* (Butterworths, London, 1955)
2. J. A. Woollam, et al., "Overview of Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer(VASE), Part I: Basic Theory and Typical Applications," Proc. SPIE, CR72, 29 - 58, 1999
3. A. Rosencwaig, et al., 'Beam profile reflectometry: A new technique for dielectric film measurements,' Appl. Phys. Lett. 60(11), 1992
4. C. W. See, et al., "Scanning optical microellipsometer for pure surface profiling," Appl. Opt.37(10), 1998
5. S.-H. Ye, et al. "Angle-resolved annular data acquisition method for microellipsometry," OPTICS EXPRESS, 15(26), 2007
6. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland, New York, 1979)