

수 마이크로 영역에서의 나노 박막 두께 측정을 위한 타원계측법 Ellipsometry for Measuring Thin Film Thickness at Nano-Scale Within a Few Micrometers

*예상헌, #곽윤근, 김수현¹, 조현모, 조용재, 제갈원²

*S. Ye, #Y. K. Kwak(ykkwak@kaist.ac.kr), S. H. Kim¹, H. M. Cho, Y. J. Cho, W. Chegal²
¹ 한국과학기술원 기계공학과, ² 한국표준과학연구원 나노바이오 융합연구단

Key words : Polarization, Thin film metrology, Focused-beam ellipsometry, Real-time measurement

1. 서론

대부분의 물리, 화학, 재료 분야의 연구에 있어서 물질의 광학적 특성을 측정하고 박막의 두께를 측정하는 것은 매우 중요한 요소이다. 특히 반도체 및 평판표시장치(Flat Panel Display) 공정은 여러 가지 유전체 박막, 반도체 박막, 그리고 금속 박막을 반도체 기판 또는 투명 유리 위에 선택적으로 형성시키는 과정으로, 이러한 박막의 두께와 광학적 특성을 정의하고 이를 조절하는 일은 제품의 생산성 향상과 품질개선 측면에서 매우 중요한 요소이다.¹ 실제 반도체 및 디스플레이 공정에서 사용되는 측정 기술은 비파괴적인 속성을 지닌 광학적인 방법을 이용한 분광 반사광학계(Spectral Reflectometer)와 타원계측기(Ellipsometer)가 널리 사용되고 있다. Reflectometer는 시료에 수직 입사한 빛이 박막의 표면에서 반사되어 나온 빛과 박막을 투과하고 난 뒤 박막의 하단에 위치한 물질의 표면에서 반사되어 나오는 빛간의 간섭현상을 이용하여 박막의 두께를 측정하는 기술이다. 일반적으로 Reflectometer는 측정할 수 있는 박막의 두께 범위가 넓고, 측정 모호성이 없으며, 미세한 부위를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 박막에서 반사된 빛의 정확한 반사율(Reflectance)을 측정하기 위해서는 입사광의 강도를 알아야 하기 때문에 주기적인 입사광의 측정이 이루어져야 한다. 또한 광원에 의해 측정하는 과정 영역이 제한이 되고 그 과정 영역 내에서 간섭이 나타날 수 있는 두께가 측정한계가 된다. 그러므로 초박막(Ultra Thin-film, < 50 nm)의 측정에 한계가 있고, 광학 상수(n, k)의 측정이 어렵다.²

Ellipsometry는 빛의 편광 특성을 이용하는 기술로써 입사하는 빛의 편광 상태가 박막의 광학적 특성(굴절률, 두께) 변화에 민감하게 반응하는 것을 이용하여 시료의 표면에서 반사되어 나온 빛의 편광 상태를 측정함으로써 높은 정밀도를 가지고 측정 물질의 굴절률 및 두께를 측정할 수 있는 기법이다.³ 하지만, 최근 반도체에 Photolithography와 Etching 과정을 통해 생성되는 패턴 사이의 간격이 더욱 줄어들어 측정 영역보다 큰 기존의 측정광(Probe Beam) 크기를 사용하여 박막의 두께를 측정하기 힘든 한계에 직면해 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 시료에 반사되어 나오는 광 경로에 대물 렌즈를 위치시킴으로써 공간 분해능을 높이고자 한 결상 타원계측기(Imaging Ellipsometry)에 대한 연구가 진행되었다.^{4,5} 하지만 이러한 형태의 타원계측기는 영상을 획득하고자 하는 시료면과 CCD(Charge Coupled Device)의 이미지 면이 평행하지 않기 때문에 대물 렌즈를 광 경로에 평행하게 미소 이송을 시켜 초점이 맞은 시료의 영상들을 서로 짜맞추어 전체적으로 선명한 시료의 이미지를 얻을 수 있었다.⁴ 또한 높은 공간 분해능을 얻기 위해 고 배율의 대물 렌즈를 사용하고자 할 경우 초점 거리가 매우 짧아 시료와 대물 렌즈간의 간섭이 생겨 고 배율 렌즈를 사용하는데 제한적이게 된다.⁵

결상 타원계측기의 단점을 개선하고 높은 공간 분해능을 얻기 위해 시료와 대물 렌즈를 수직하게 배치한 Beam-profile reflectometer로 불리는 새로운 형태의 계측기가 연구 되었다.^{6,7} 앞서 설명한 reflectometer는 다중 과정을 이용

하여 측정 시료의 박막 표면 및 각 경계면에서 반사된 빛들의 간섭현상을 이용한 것이라면, Beam-profile ellipsometer는 수치구경(Numerical Aperture, NA)이 큰 대물 렌즈를 사용하여 다중 입사각에 대한 p -파와 s -파의 반사율을 측정하는 기술이다.⁶ NA 값이 큰 대물 렌즈를 사용함으로써 입사각을 변화시킬 필요가 없으며 매우 작은 시료 영역에 대한 측정이 가능하다는 장점을 지니고 있다.⁷

이 논문에서는 기존의 초점형 타입의 하드웨어 시스템을 채택하여 높은 NA를 가진 대물 렌즈를 이용해 다중 입사각에 대한 타원계측 상수를 측정하고자 한다. 무엇보다 새로운 실시간 타원 계측 알고리즘을 제안하고 그 가능성을 진단하고자 한다.

2. 초점형 타원계측기의 원리

초점형 타원계측기 기술은 대물 렌즈를 시료와 수직하게 위치시킴으로써 다중 입사각에 대한 타원계측 변수 측정과 매우 작은 spot size를 구현하는 것이 그 특징이라 할 수 있다. 대물 렌즈를 통과한 선형 편광된 빛은 다양한 입사각을 지니고 시료에 입사하게 된다. 시료에서 반사되어 나온 빛은 시료의 광학 특성 즉, 굴절률과 두께에 따라 입사된 선형편광은 다른 편광 상태를 지니고 다시 대물 렌즈에 의해 모이게 된다. Fig. 1은 대물 렌즈의 수치구경(NA)에 의해 결정되는 입사각의 입사각을 도식한 그림이다. (A)지점으로 입사한 빛은 입사각이 0° 이 되고 (B)지점으로 입사한 빛은 대물렌즈의 NA에 의해 결정되는 최대 입사각을 지니고 입사하게 된다. 대물렌즈의 NA가 커지게 되면 초점거리는 짧아지지만, $NA = \sin(\theta_{max})$ 의 관계로 인해 입사각은 커지는 효과를 얻을 수 있다. 이론적으로 $NA = 0.95$ 인 경우 입사각은 71.8° 의 최대 입사각으로 입사를 하게 된다.

Fig. 2는 x 축 방향으로 고정된 편광자를 통과한 빛이 대물 렌즈에 입사하기 전(상반구)과 투과하고 난 뒤 시료에서 반사되어 나온 빛의 편광 상태(하반구)를 기술하고 있다. 대물 렌즈에 x 축 방향으로 선형 편광된 빛이 입사를 하고 있지만, x 축을 따라 위치한 빛은 p -파 성분만을, y 축에 위치한 빛은 s -파 성분만을 지니고 시료에 입사하게 되어 시료 표면에서 반사된 이후에도 p - s -파 성분만을 지니게 된다. 다른 지점을 통해 입사하는 빛은 p - s -파가 혼합된 편광 상태를 지니고 시료에 입사하게 되는데, p - s -파의 비율은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 x 축을 기준으로 한 방위각(ϕ)에

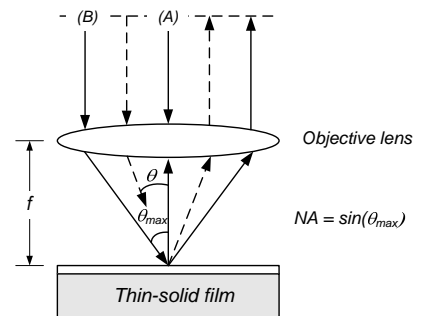


Fig. 1 Objective lens and optical path of multiple rays: principle of focused-beam ellipsometer

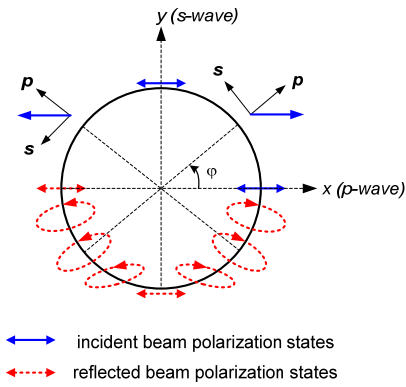


Fig. 2 Polarization state of input beam (upper hemisphere) incident at the objective lens and output beam (lower hemisphere) reflected off by the sample surface

따라 변화하게 된다. 그러므로 일정 방향으로 편광된 빛이 대물 렌즈를 통과하게 되면 렌즈에 의해 자동으로 편광 상태가 변화된 빛이 시료에 입사하게 되는 것이다. 그러므로 기존의 회전 편광자/검광자와 같은 회전부가 필요 없으므로 전체 시스템의 간소화와 실시간 측정을 가능하게 하는 핵심이라고 할 수 있다.

3. 실험 장치 및 실험 결과

측정 광의 크기를 최대한 줄이기 위해 큰 NA 를 지닌 대물 렌즈를 사용한 초점형 타원계측기의 개략도를 Fig. 3 에 도시하였다. 이러한 시스템 구조는 대물 렌즈가 회전형 검광자의 역할을 대신한다는 것을 제외하면 전형적인 PSA (polarizer-sample-analyzer type) ellipsometer 형태를 지니고 있다. 백색광이 광 파이버를 통과한 뒤 시준 렌즈에 의해 평행광으로 된 후 laser line filter (Thorlabs, FL632.8-1)에 의해 632.8 nm 의 단색광으로 변화하게 된다. neutral density filter 는 광 검출기인 CCD 의 포화를 방지하기 위해 설치되었다. Glan taylor polarizing cube (CGTP-20)를 통과한 광은 Nikon 사의 CFI LU Plan Apo Epi (100x and NA = 0.95)에 의해 집광이 되어 시료 표면에 입사하게 된다. 시료에서 반사되어 나온 빛은 beam-splitter 에 의해 검광자쪽으로 방향이 선회하게 되는데, p-/s-파의 반사율이 다르기 때문에 이에 대한 영향을 줄이기 위해 laser line non-polarizing cube beam splitter (Newport, 10BC16NP.4)를 사용하였다. 최종적으로 CCD 카메라에 의해 광 세기가 검출된다.

CCD 에서 검출된 광의 세기 분포에서 동심원에 위치한 빛의 세기를 얻게 되면 방위각(phi)에 대한 Fourier 계수 α_2 α_4 를 측정할 수 있는데, Silicon($N=3.875-j0.0156$) 기저층 위에 SiO_2 ($N=1.460$)가 서로 다른 두께로 도포된 시료를 준비하여 측정한 결과를 Fig. 4 에 도시하였다. 양수 부분에 있는 값은 α_4 , 음수 영역에 있는 값은 α_2 를 각각 의미한다. 실선은 이론값을 등근 점은 실험값을 각각 의미하며 Fig. 4 에서 입사각이 60.7°인 데이터들만 의미 있는 것이고, 다른

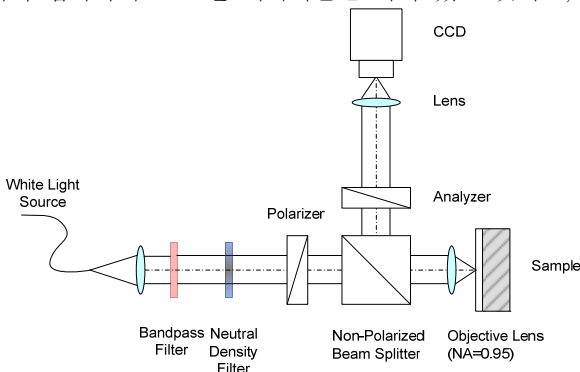


Fig. 3 Schematic diagram of the focused-beam ellipsometer

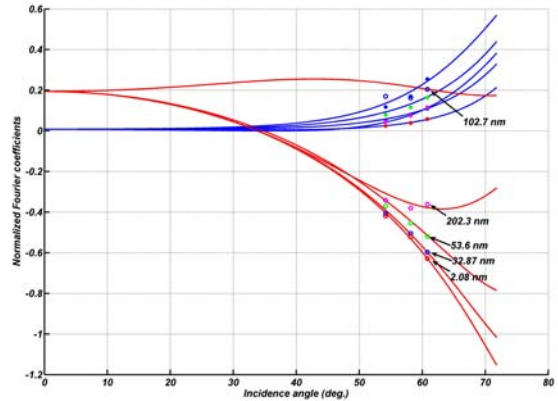


Fig. 4 Normalized Fourier coefficients α_2 (lower area, negative value) and α_4 (upper area, positive value) obtained by experiment (circles) and simulation (solid line) results

입사각에서의 데이터들은 보정 과정이 적용되기 전의 실험 및 이론값들이다. SiO_2 의 두께가 2.1~202.3 nm 해당하는 넓은 범위에서 일치함을 알 수 있다.

4. 결론

초점형 타원 계측기는 기존의 연구자들에 의해 제안된 시스템 구조이지만, 이 논문에서 제안한 새로운 방법의 타원 계측상수 측정법은 기계적인 움직임 없이 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있으며, 다중 입사각에 대한 정보를 획득할 수 있다. 또한 기초 실험을 통해 측정 가능성을 충분히 검토할 수 있었다. 자세한 이론적 수식과 보상 과정은 추후 논문을 통해 발표될 예정이다.

후기

본 연구는 나노메카트로닉스 기술사업단의 지원으로 진행되었으며, 이에 관계자분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. "The International Technology Roadmap for Semiconductors," edited by SIA (Semiconductor Industry Association), 2005
2. 정석균, "디스플레이 공정과 박막두께측정," 공업화학전망, **8**, 96-105, 2005.
3. Tompkins, H. G., Irene, E. A., *Handbook of Ellipsometry*, (William Andrew, New York, p4), 2005
4. Henon, S., Meunier, J., "Microscope at the Brewster Angle: Direct Observation of First-order Phase Transitions in Monolayers," Rev. Sci. Instrum., **62**, 936-939, 1991.
5. Beaglehole, D., "Performance of a Microscopic Imaging Ellipsometer," Rev. Sci. Instrum., **59**, 2557-2559, 1988.
6. Rosencwaig, A., Opsal, J., Willenborg, D. L., Kelso, S. M., and Fanton, J. T. "Beam Profile Reflectometry: A New Technique for Dielectric Film Measurements," Appl. Phys. Lett., **60**, 1301-1303, 1992.
7. Fanton, J. T., Opsal, J., Willenborg, D. L., Kelso, S. M., and Rosencwaig, A., "Multiparameter Measurements of Thin Films using Beam-profile Reflectometry," J. Appl. Phys., **73**, 7035-7040, 1993.