

# 반사광측정법을 이용한 박막의 두께 및 굴절률 측정방법

## Simultaneous measurements of refractive index and thickness of a thin-film layer using reflectometry

\*주우덕, #김승우

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

KAIST 기계항공시스템공학부 정밀측정연구실

Key words : thin-film measurement, refractive index, film thickness, reflectometry

### 1. 서론

박막의 물성 측정은 CMP(Chemical mechanical polishing)와 같은 박막 제조 및 가공 공정에 있어서 정밀도와 반복능을 보장하는 역할을 담당한다. 이는 제품의 집적화 및 불량률 감소에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 반드시 필요하다. 특히 공정 내(In-line) 측정을 위해서는 보다 단순한 구조의 시스템으로부터 환경변수에 둔감하도록 빠른 측정이 가능해야 한다. 지난 수십 년간 박막의 두께와 굴절률로 대표되는 박막의 특성 계측 분야에서 다양한 광 측정법의 연구와 개발이 이루어졌다. 백색광간섭법(White-light interferometry)과 더불어 박막의 대표적인 측정법으로 반사광측정법(Reflectometry) 및 엘립소메트리(Ellipsometry)가 있다. 두 방법은 시편에 빛이 반사함으로써 인해 생성되는 변화를 측정함으로써 박막의 특성을 확인한다는 면에서 공통점을 가진다. 이들의 광학 시스템이 보이는 전체 구조 역시 서로 유사하나, 진폭비만을 고려하는 반사광측정법에 비하여 엘립소메트리는 진폭과 위상의 변화를 모두 측정하여 분석에 사용한다. 일반적으로 접근 가능한 정보량이 많은 엘립소메트리가 다소 정밀도가 높고 초 박막시편이나 복잡한 구조의 다층시편을 포함한 다양한 시편구조에 대해서도 신뢰성 있는 측정이 가능하다고 알려져 있으나, 최근 두 방법 모두 다양한 기법을 통하여 측정 가능한 시편의 종류와 정밀도 측면에서 발전을 거듭하고 있다. 그 대표적인 방법으로 광 파장대역과 분광검출기를 통하여 다양한 파장에 대한 측정정보를 동시에 획득하는 분광측정법, 그리고 하나의 시스템 내에서 입사각을 달리하여 반사광 정보를 얻을 수 있는 다중 입사각 측정법 등이 있다[1-2].

반사광측정법은 대부분 모델링과 최적화를 이용한 물성 측정원리를 이용하는데, 이 경우 박막의 두께 측정과 두께 및 굴절률 측정에서는 많은 차이를 보인다. 분산 관계에 의하여 사용 파장에 따라 굴절률이 변화하고, 그 변화 경향이 완만하며 굴절률 값이 반사율 함수 안에서 다른 변수들과 복잡하게 연동(coupling)되어 있기 때문에 변수나 실험값의 작은 변화에도 분석결과가 크게 달라질 수 있다.

본 연구에서는 다중 입사각 및 다 파장 반사광측정계를 구성하여 박막의 물성 값 측정원리를 제안한다. 유사한 원리를 통해 박막의 두께를 측정하는 연구가 진행된 바 있으나[3], 본 연구에서는 두께와 굴절률을 동시에 측정하는 과정을 제시한다. 높은 굴절률의 대물렌즈를 적용하여 다중 입사각 원리를 구현하며 백색광원에 광학필터를 적용함으로써 여러 파장에 대한 반사광 정보를 획득할 수 있다. 별도의 기계적 구동 없이 시편의 한 점에 대하여 빠르게 측정이 가능하며, 이에 따라 외부 진동이나 환경 변화에 둔감한 특성을 나타내기 때문에 다양한 박막 공정 상의 공정 내 측정법으로써 적용할 수 있다.

### 2. 이론적 배경

반사광측정법은 시편에 대한 입사광의 세기( $I_{inc}$ )과 반사광의 세기( $I_{ref}$ ) 절대 세기 비,  $\mathfrak{R}_{sam,abs}$ 로부터 그 구조와 물성치를 측정하는 방법이다.

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

반사율은 입사광의 파장, 편광방향, 그리고 시편에 대한 입사각에 따라서 변화하는 값으로써 동일한 측정점에 대해 정보가 많을수록 추후 분석에 유리하다. 실제 실험에서는 시편에 입사하기 직전의 입사광과 반사 직후의 반사광의 세기를 직접 측정하기 어렵기 때문에 식(1-2)와 같이 절대 반사율이 잘 알려진 표준시편을 통해 측정하고자 하는 시편의 절대반사율을 구해낼 수 있다.

$$\mathfrak{R}_{sam,abs} = \frac{I_{sam,ref}}{I_{std,ref}} \times \mathfrak{R}_{std,abs} \quad (1-2)$$

단,  $I_{std,ref}$ 는 표준시편에 대한 반사광의 세기,  $I_{sam,ref}$ 은 측정대상시편에 대한 반사광의 세기,  $\mathfrak{R}_{std,abs}$ 는 표준시편의 절대 반사율을 의미한다.

실험으로 획득한 시편의 반사율과 이론적인 시편의 모델링으로부터 계산된 반사율의 차이를 최소화하는 방법으로 최적화된 시편의 두께와 굴절률 정보를 구할 수 있다(그림 1). 시편의 모델링에는 두께뿐만 아니라 굴절률 역시 미지의 식으로 가정해야 하는데, 사용 광원의 파장대역이 백색광 영역임을 고려할 때 파장  $\lambda$ 의 변화에 따른 굴절률,  $n(\lambda)$ 에 대하여 식 (1-3)과 같이 Cauchy equation을 사용하는 것이 적절하다[4].

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (1-3)$$

단, A와 B는 상수로 취급한다. 최소화할 목적함수(Merit function)를 설정한 뒤 이를 통해 최적화된 값을 구해내는 알고리즘으로는 Levenberg-Marquadt 비선형 최소자승법(Non-linear least square method)을 사용한다.

### 3. 광학계 구성

공정 내 측정을 목적으로 하고 있기 때문에 전체적으로 일반적인 반사광측정법의 간단한 구조를 따르되, 다양한 반사율 정보를 획득하기 위하여 광학 부품을 도입하였다. 제논(xenon) 램프나 텅스텐-할로겐(Tungsten-Halogen) 램프와

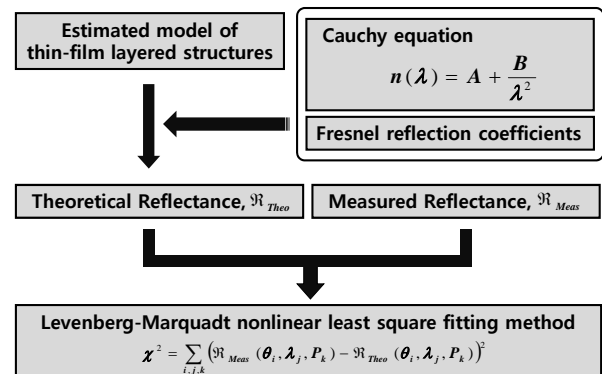


Fig. 1 A block diagrams that shows the procedures of attaining both refractive index and thickness of the thin-film simultaneously by reflectometry

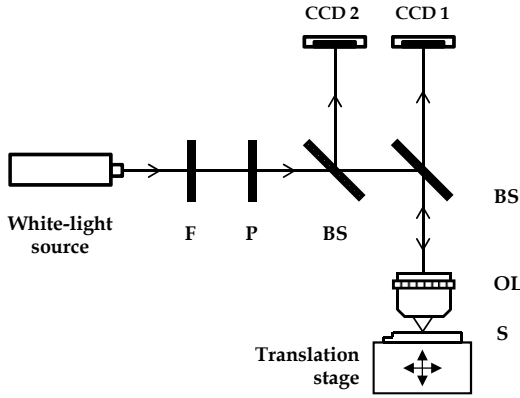


Fig. 2 Optical configurations for the inspection of thin-film properties including film thickness and refractive index (F: filter, P: polarizer, BS: non-polarizing beam splitter, OL: objective lens, S: sample)

같은 백색광원을 통해 발생된 빛은 광학 필터와 편광자, 그리고 시준렌즈 등을 거쳐가면서 원하는 중심파장 및 편광방향에 가지는 좁은 파장대역의 시준광이 된다. 이 빛은 시편에 입사 및 반사하여 두 개의 CCD 에서 영상을 맺는데, 이 때 시편 앞에는 개구수가 큰 대물렌즈가 위치하여 시편의 한 점에 대해 모든 편광방향으로 다중 입사각의 반사광을 획득할 수 있는 효과를 일으킨다. 첫 번째 CCD 는 대물렌즈의 후초점면을 결상하여 시편의 정보를 담은 영상을 획득하며, 두 번째 CCD 는 대물렌즈와 시편 간의 초점 맞춤 상태를 확인하는 역할을 담당한다. 시편은 수평이동 스테이지 위에 고정되어 있기 때문에 선 측정 및 평면의 여러 점에 대한 측정이 가능하다.

4. 실험 및 분석

실제 실험에 앞서 최적화 알고리즘을 통한 박막의 두께와 굴절률 동시 측정에 대한 모의실험(Simulation)을 수행하였다. 측정 대상은 실리콘 웨이퍼에 500 nm 두께의 산화실리콘(SiO<sub>2</sub>) 박막이 도포된 시편으로 가정하였으며 이론적인 굴절률의 참값은 문헌상의 값을 참조하였다[5].

실험에서 두께는 나노미터 이하, 굴절률은 소수점 이하 넷째 자리 수준의 오차를 보일 경우 측정이 잘 이루어졌다고 볼 수 있다. 실험값으로 참값에 5 % 이내의 무작위 오차를 더한 값을 사용하여 모의실험을 수행하였을 때, 상기 조건을 만족하는 결과를 획득함으로써 알고리즘의 가능성을 확인하였다(그림 3).

이를 검증하기 위하여 기준 두께 518 nm 의 단층 산화실리콘 박막시편에 대하여 실험을 수행하였다. 파장에 따른 대물렌즈의 후초점면 이미지로부터 반사율 정보를 획득

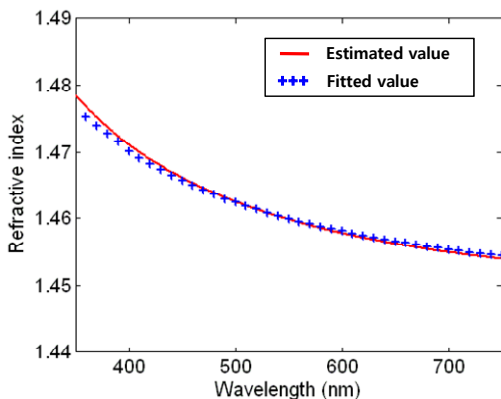


Fig. 3 Simulation results of the refractive index when minimization has done for both the thickness and refractive index simultaneously

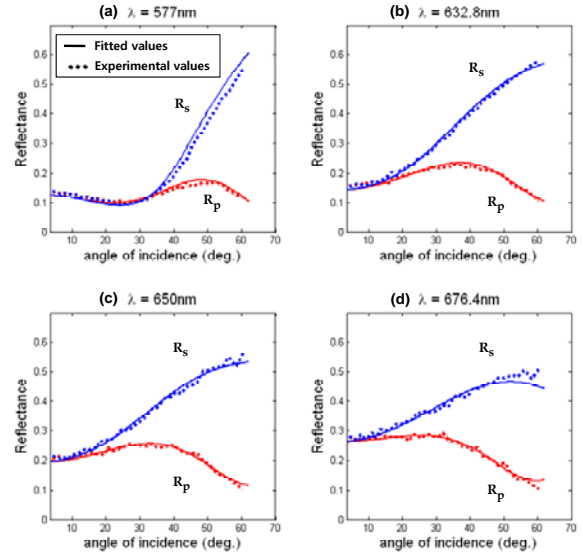


Fig. 4 Comparison of the reflectance variation between the experimental values(dotted lines) and the values from least square fitting optimization(solid lines)

하여 최적화를 수행한 결과 약 515 nm 두께와 백색광 영역에서 기존 문헌에서 알려진 굴절률 분포와 소수점 둘째 자리 이하 수준의 차이를 보이는 결과를 얻을 수 있었다. 실제 시편의 굴절률 값은 공정 조건에 따라서 문헌상의 값과 차이를 보일 수 있다. 측정결과가 유효함을 살펴보기 위하여, 최적화로부터 얻은 결과로부터 재구성한 반사율 정보를 실험값과 비교하였다. 이를 그림 4 와 같이 파장 별로 나누어 그려보면 서로 일치하는 경향을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 개선된 반사광측정법을 이용하여 시편의 단일 측정점에 대하여 파장, 입사각, 편광방향의 변화에 따른 반사광 정보를 동시에 획득함으로써 박막의 두께 및 굴절률을 측정할 수 있는 방법을 설명하고 분석 및 실험결과를 제시하였다. 빠른 측정과 환경 변수에 대한 둔감함, 시스템의 단순한 구성 등에 의해 각종 박막 공정상의 공정 내 측정에 유용한 방법이 되리라 기대한다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 도약연구지원 사업의 지원을 받아 한국과학기술원 극초단광학 초정밀기술 연구단에서 수행하였습니다.

참고문헌

1. 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
2. A. Rosencwaig, et al., 'Beam profile reflectometry: A new technique for dielectric film measurements,' Appl. Phys. Lett. 60(11), 1992
3. 주우덕, 김승우, "다중 입사각 반사광측정법을 이용한 박막의 두께측정," 2008 년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 271-273, 2008.
4. M. Born, E. Wolf, *Principles of optic*, 7<sup>th</sup> Ed. (Cambridge University press, 1999)
5. Edward D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*, (Academic Press, Orlando, 1985)