creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000278886

2020년 2월

석사학위 논문

단일 영상 분광 타원계측기 기반 다층 박막 분석 기술 연구

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 진 섭

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단일 영상 분광 타원계측기 기반 다층 박막 분석 기술 연구

Analysis of
multi-layered film structure by spectroscopic
ellipsometry with a single image

2020년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 진 섭

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

단일 영상 분광 타원계측기 기반 다층 박막 분석 기술 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2019년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

김 진 섭

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김 진 섭의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 진 태 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 종 락 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2019년 11월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론 ····· 1
제1절 연구 배경 ····· 1
제2절 연구 현황 ····· 4
제3절 연구목표 및 내용 ····· 9

제2장 단일 영상 획득을 통한 박막 구조 분석 ····· 10
제1절 박막 측정 및 이론 ····· 10
1. 분광 타원계측기의 측정 원리 ····· 10
2. 박막 분석 이론 ····· 15
제2절 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 ····· 19
1. 공간 위상 지연 소자 ····· 19
2. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 ····· 21
제3절 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 ····· 23
1. 편광 카메라의 원리 ····· 23
2. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 ····· 26

제3장 실험 결과 및 분석 ····· 29

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1절 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 ····· 30
1. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 구성 ····· 30
2. 시스템 변수 보정 ····· 33
3. 실험 및 결과 분석 ····· 43
제2절 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 ····· 47
1. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 구성 ····· 47
2. 시스템 변수 보정 ····· 49
3. 실험 및 결과 분석 ····· 53

제4장 고찰 및 논의 ····· 61

제5장 결론 ····· 64

[참고문헌] ····· 66

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 목차

그림 1-1. 반도체 구성 및 디스플레이 제품 ····· 1
그림 1-2. Roll to Roll 공정을 통한 대면적 박막 공정 ····· 2
그림 1-3. 박막 두께 측정 기술의 분류 ····· 4
그림 1-4. 반사광 측정법 개략도 ····· 5
그림 1-5. 타원계측기 개략도 ····· 6
그림 1-6. 간섭 모듈 타원계측기의 광학 구성 ····· 8
그림 2-1. 타원계측기의 광학 구성 ····· 11
그림 2-2. 분광 타원계측기의 광학 구성 ····· 13
그림 2-3. 단층 박막의 광학적 모델 ····· 15
그림 2-4. 다층 박막의 반사 및 투과 광학적 모델 ····· 17
그림 2-5. 액정의 복굴절에 의한 위상 지연 및 편광 변화 특성 ····· 19
그림 2-6. 공간 위상 지연 소자 Liquid crystal polymer 배열 구성 ····· 20
그림 2-7. 공간 위상 지연 소자로 사용한 Depolarizer의 특성 ····· 20
그림 2-8. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 광학 구성도 ····· 21
그림 2-9. 편광 카메라 내부 구성 및 원리 ····· 23
그림 2-10. 편광 카메라에서 획득되는 이미지와 분할된 이미지 ····· 23
그림 2-11. 편광 카메라의 파장에 대한 양자 효율 그래프 ····· 23
그림 2-12. 편광 배열판 위치에 따른 crosstalk 발생 (a) 유, (b) 무 확인 25
그림 2-13. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 광학 구성도 ····· 26
그림 2-14. 분광된 영상이 편광 카메라에 결상되는 원리 ····· 27
그림 3-1. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 광학 구성 ····· 30
그림 3-2. 실험에 사용된 광원과 스펙트럼 (SuperK compact laser) ····· 31
그림 3-3. 입사각 정의를 위한 보정 마운트 ····· 32

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-4. 편광기 축 설정을 위한 광학 구성 및 원리 ····· 34
그림 3-5. 분광 축과 카메라 pixel 축 보정 작업 원리 ····· 35
그림 3-6. 카메라 픽셀에 해당하는 파장 매칭 원리 ····· 36
그림 3-7. 대역 필터 통과 후 획득한 영상 ····· 37
그림 3-8. 대역 필터에 해당하는 픽셀 정보 ····· 37
그림 3-9. 내삽을 통해 획득한 픽셀에 대한 파장 정보 ····· 38
그림 3-10. 대역 필터 650 nm 사용시 발생하는 스마일 효과 ····· 38
그림 3-11. (a) 공간 위상 지연 소자의 영상, (b) 2D FFT를 통해 수직 축 정렬 확인 ····· 39
그림 3-12. 공간 위상 지연 소자의 특성 분석을 위한 광학 구성도 ····· 40
그림 3-13. 공간 위상 지연 소자의 (a) 측정, (b) 이론 모델 영상 ····· 40
그림 3-14. 공간 위상 지연 소자의 (a) 파장에 따른 위상 지연량, (b) 횡축 방향으로의 fast axis 회전량 ····· 41
그림 3-15. 파장에 따른 위상 지연별 이론 모델링 대비 측정 결과 비교 42
그림 3-16. 507.3 nm에 대한 (a) 실험값과 (b) 이론값 영상 ····· 43
그림 3-17. 측정값과 이론값의 파장에 따른 (a) Ψ와 (b) Δ 크기 비교 ·· 44
그림 3-18. (a) 3층 (b) 4층에 해당하는 다층 시편 모식도 ····· 46
그림 3-19. 편광 카메라를 이용한 타원계측기 구성도 ····· 47
그림 3-20. 실험에 사용된 LUCID 사 편광 카메라 ····· 48
그림 3-21. λ/4 위상 지연판의 45° 투과 축 정의를 위한 광학 구성 ····· 50
그림 3-22. 편광 카메라의 파장 매칭 원리 ····· 52
그림 3-23. 편광 카메라에서의 편광 검출 결과 ····· 53
그림 3-24. 단층 박막 시편의 Δ, β값 획득 결과 ····· 54
그림 3-25. 박막 라인 측정 결과 ····· 55
그림 3-26. (a) 단차 시편 측정 결과와 (b) 경계 측정 결과 ····· 56

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-27. (a) 4층 박막과 (b) 5층 박막 모형도 ····· 57
그림 3-28. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막에 대한 획득 영상과 분할된 영상 58
그림 3-29. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막에 대한 Δ와 β 결과값 ····· 59
그림 3-30. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막 두께 측정 결과 ····· 59
그림 3-31. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막에 대한 면적 측정 결과 ····· 60

표 목차

표 1. 기본 형태의 존스 행렬 ····· 14
표 2. 영상 분광기와 카메라의 성능 ····· 32
표 3. 실험에 사용된 ZYGO 레이저 ····· 34
표 4. 다층 박막 측정 결과 ····· 46

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Analysis of multi-layered film structure by spectroscopic ellipsometry with a single image

By Jin Sub Kim
Advisor : Prof. Ki-Nam Joo, Ph.D.
Department of Photonic Engineering
Graduate School of Chosun University

Recently, precise film structures have become essential for integrated circuit (IC) and flat panel display (FPD) products because of their multi-functional purposes and compactness. In these products, thin films are deposited on a silicon or glass substrate with various materials and thicknesses for conductivity, insulation and packaging. For the successful operation and performance, film structure should be manufactured as designed. In addition, the measurement or inspection of the geometrical dimensions and material properties of film layers becomes an important issue in order to confirm their functional uniformity.

Ellipsometry has been very important for the characterization of thin film structures as a non-destructive metrological tool. Comparing the measured quantities such as ellipsometric angles of Ψ and Δ with their counterparts of theoretical model, ellipsometry can determine the thin film thicknesses with high sensitivity and even a spectroscopic ellipsometry (SE) provides the reliability and robustness of the measurement results with sufficient spectral data of $\Psi(\lambda)$ and $\Delta(\lambda)$. However, most of SE only measure film thicknesses at a single point of the interest and adopt polarization adjustment of the light by using rotation of

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

polarizing optic elements or electrical phase modulation, which leads to time consumption. Imaging ellipsometry has capability of obtaining 3D or line profile of film thicknesses, but it still needs rotating mechanisms for the polarization changes. In this study, I propose two types of spectroscopic ellipsometers, a spatially phase-retarded spectroscopic ellipsometer and a polarization pixelated spectroscopic ellipsometer that can measure the multi-layered film thicknesses with a single image.

The spatially phase-retarded spectroscopic ellipsometer can collect all information, necessary to characterize film structures, with a single image acquisition. Instead of using temporal phase retardation devices, a spatial phase retardation plate is used and an imaging spectrometer can obtain the intensity variations by polarization states and wavelengths. As an optical source, a broadband light is used and the light with a small beam size is linearly polarized by a linear polarizer. Then, the light is incident to a film specimen and reflected off with the polarization changes caused by the ratio of p-pol and s-pol waves. The reflected light passes through a beam expander and the large size of the light goes through spatial phase retardations by a spatial phase retardation plate (SPR), designed to provide the periodic phase retardation along a horizontal axis. The spatially phase retarded light passes through an analyzer and detected in an imaging spectrometer. Then, the imaging spectrometer only images one of the horizontal lines of SPR at the center and spectrally resolve this line. The horizontal axis of the image indicates the polarization changes caused by the periodic phase retardations while the vertical axis means the spectral axis. As the result, the intensity variations by various polarization states and wavelengths can be obtained at once in a single acquisition of the image.

In the polarization pixelated spectroscopic ellipsometer, the ellipsometric parameters can be acquired by adopting a polarization-pixelated CMOS camera and an imaging spectrometer without any mechanical or electrical moving parts and their spectral and spatial profile are obtained with a single image. As a light source, a spatially coherent broadband light is used and the light beam size is enlarged by beam expander to fully illuminate the measurement line of a film specimen (S). The light beam goes through a 45° rotated polarizer and is incident

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

to S with the semi-Brewster angle of S. The reflected beam from S passes through a 45° rotated quarter-wave plate and is incident to an imaging spectrometer through an imaging lens. Then, the spectral density is distributed along the vertical axis of the captured image while each spectral density set corresponding to the point on the measurement line is horizontally located at the image of a polarization pixelated CMOS camera (PCMOS).

In PCMOS, an individual pixel of the image sensor has its own polarizer, oriented by 0°, 45°, 90°, and 135° while a (2×2 pixels) unit cell block is repeatedly arranged in whole imaging area. In this case, these four kinds of polarizers of the unit cell in PCMOS can act as a role of rotating an analyzer with a step of 45° under the assumption that the light obtained in the unit cell is from the same point on the measurement line and its wavelength is the same. Then, the whole image obtained by PCMOS can be split as four images according to polarizing angles and the ellipsometric information can be obtained by these polarization changes. Subsequently, the proposed system is equivalent to a number of rotating-analyzer type SE, and it can obtain the ellipsometric spectral data for the line at once with a single image only.

In order to verify the spatially phase-retarded spectroscopic ellipsometer and the polarization pixelated spectroscopic ellipsometer, single and multi layered film structures were used as specimens, and it was confirmed that multi-layered film thicknesses could be successfully obtained at a point and a line, respectively, with each single image.

Key words : Multi-layered film thickness, Single-shot, Spectroscopic imaging ellipsometry, Spatial phase retarder, Polarization-pixelated CMOS

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서 론

제1절 연구 배경

최근 첨단 산업분야의 발전으로 그림 1-1과 같은 초정밀 반도체 및 대면적 디스플레이의 두께가 점차 얇아지면서 이에 따라 고정밀의 빠른 측정 기술도 함께 요구되고 있다 [1]. 이러한 첨단 부품 및 제품들은 일반적으로 투명 유리 기판 또는 실리콘 기판 위에 증착, 식각 공정의 연속적인 과정을 통해 박막 형태의 구조물을 이루는 특징을 가진다 [2]. 이로 인해 박막 구조물은 제품의 품질과 성능을 결정하는 중요한 구성요소로써, 전기적인 특성뿐만 아니라 회로의 보호 또는 구분, 연결을 위한 역할을 수행한다. 그러나 박막의 두께가 불균일한 경우, 국부적으로 적층된 박막은 다른 광학적 특성을 갖게 되어 원활한 소자의 기능을 다하지 못하거나, 다른 소자와 상호작용에 있어서 문제점을 일으켜 제품의 성능 또는 기능을 저하시키는 큰 문제점을 초래한다. 따라서 완성된 박막 구조물 뿐만 아니라 공정 라인에서의 박막 두께 또는 광학적 상수 등을 빠르게 측정하고 모니터링하는 측정 검사 기술은 제품의 생산성과 품질을 증대시키는 매우 중요한 부분으로 자리잡고 있다 [3].

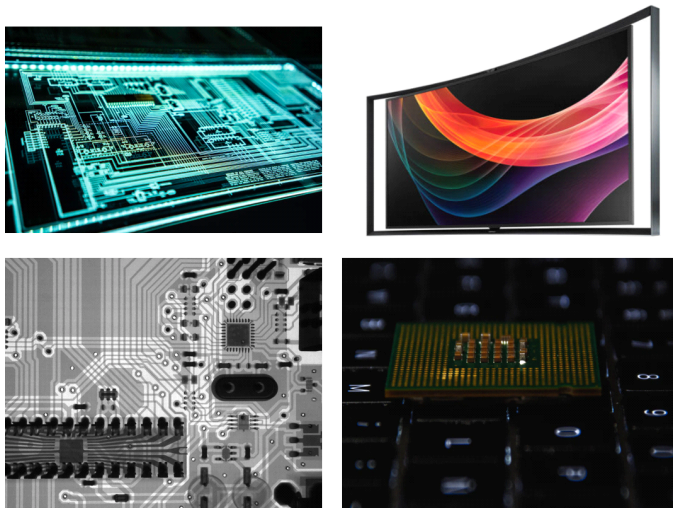


그림 1-1. 반도체 구성 및 디스플레이 제품

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한편, 유연 소자 디스플레이 (Flexible display) 분야에서는 그림 1-2와 같이 Roll-to-Roll 방법을 사용하여 대면적에 해당하는 유연 소자를 생산한다. 이러한 공정 방법은 빠르게 넓은 면적의 공정이 가능하다는 장점을 가지고 있으며 [4-5], 얇은 박막 증착이 가능하여 미세 선폭의 구현이 가능하고 Roll의 압력 등의 공정 조건을 이용하여 다양한 형태의 제품 생산이 가능하다. 하지만 이러한 공정에서 품질 검증을 위해 측정 검사 시스템을 필수적으로 동반해야하며, 공정 속도에 버금가는 측정 기술이 병행되어야 한다. 또한, 대면적 공정을 검사, 측정하기 위해서는 측정 기술 또한 넓은 영역을 측정할 수 있는 특징을 갖추어야 한다.

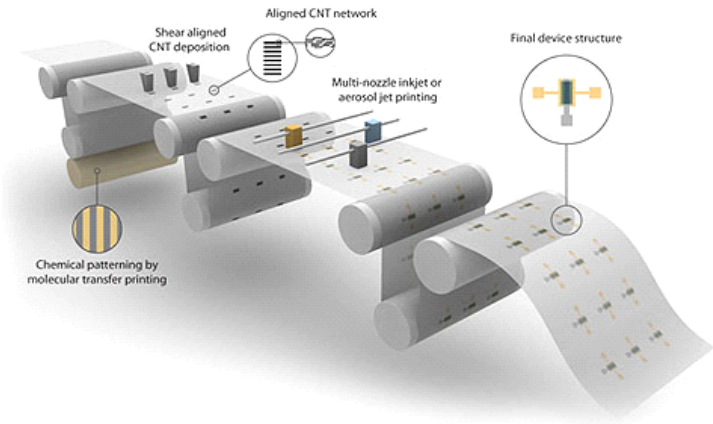


그림 1-2. Roll to Roll 공정을 통한 대면적 박막 공정

일반적으로 박막 두께 측정을 위해 많은 기술들이 개발되었으며, 전체적으로 파괴식과 비파괴식 방법으로 분류할 수 있다. 먼저 파괴식 측정법 (Destructive)인 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM) [6]과 투과 전자 현미경 (Transmission Electron Microscopy, TEM) [7]은 높은 분해능으로 박막의 두께 및 형상 등의 정보를 분석할 수 있으며 산업계에서 많이 사용된다. 하지만 측정 물체와의 직접적인 접촉으로 인해 시편에 손상이 가해지는 큰 단점을 가지고 있으며, 측정 및 분석을 위해 많은 시간이 소요되기 때문에 공정 라인에 적용하는데 어려움이 있다. 반면, 비파괴식 측정법 (Nondestructive)으로는 주로 광학식 측정법을 사용하는데, 이는 빛의 특성을 이용

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하여 시편에 직접적인 접촉 및 손상 없이 박막의 두께를 측정하는 방법으로 많은 연구들이 진행되어 왔다. 광학식 박막 측정법들로는 주로 간섭계 (Interferometry) [8-10], 반사계 (Reflectomery) [11-12] 그리고 타원계측기 (Ellipsometry) [13-15]등 다양한 기술들이 활용되고 있으며, 최근 들어 산업계의 요구에 따라 넓은 영역에서 정밀하고 빠르게 측정하기 위한 많은 방법들이 연구되고 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 연구 현황

박막 두께 측정 방법은 그림 1-3과 같이 파괴식 측정법과 비파괴식 측정법으로 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 먼저 파괴식 측정법은 대표적으로 주사 전자 현미경과 투과 전자 현미경이 많이 사용되며, 높은 분해능으로 박막의 두께 및 형상을 측정할 수 있지만 측정 원리상 시편의 손상이 발생하는 단점을 갖는다 [16,17]. 반면, 비파괴식 측정법은 빛의 특성을 이용하는 광학식 측정법을 주로 사용한다. 광학식 측정법은 시편의 손상 없이 박막 측정이 가능한 장점을 가지고 있어 많은 연구가 진행되었다 [18]. 본 연구에서는 이러한 광학식 방법에 초점을 맞추고 있기 때문에 이에 대해 좀더 자세히 살펴보았다.

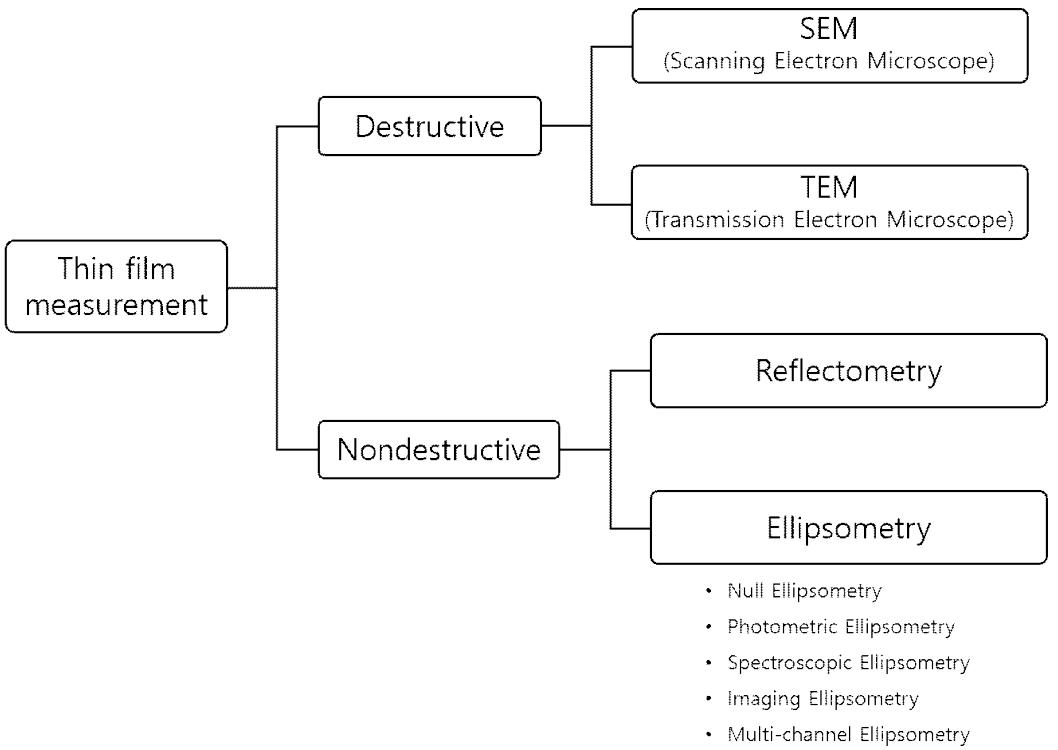


그림 1-3. 박막 두께 측정 기술의 분류

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 반사광 측정법 (Reflectometry)

광학식 측정법 중 반사광 측정법은 그림 1-4와 같이 간단한 광학 구성을 통해 빠르게 박막의 두께 측정이 가능하다. 먼저 넓은 파장대역을 갖는 광이 시편에 조사된 후, 반사된 광은 검출기에서 획득되며, 일반적으로 분광기를 이용하여 반사된 광의 스펙트럼을 획득하고 분석한다 [19]. 이때 검출된 스펙트럼과 광원 자체의 스펙트럼의 차이를 통해 실험 값을 획득하고, 수학적 분석을 통해 구성한 이론적인 스펙트럼 값과 비교 분석하여 박막의 두께를 결정한다. 반사광 측정법은 시편에서 발생하는 스펙트럼의 변화를 바로 측정하여 분석하기 때문에, 측정 속도가 빠르다는 특징을 갖는다. 그러나 반사광 측정법의 결과는 굴절률과 박막의 두께에 관한 함수인 광학적 두께이므로, 측정 물질의 굴절률과 소광계수에 해당하는 n, k값을 정확히 알고 있을 때 박막의 두께를 계산할 수 있다. 한편, 반사광 측정법으로 Cauchy 방정식, Sellmeier 방정식 등을 통해 간접적으로 박막의 굴절률을 계산할 수 있는 연구도 보고되었다 [20-21]. 이와 더불어 반사광 측정기에 대물렌즈를 결합하면 높은 수치 구경 (Numerical Aperture, NA)의 특징을 이용하여 매우 좁은 영역에 해당하는 패턴형태의 박막 구조물 측정이 가능하다. 그러나 얇은 박막을 측정하는 경우, 발생하는 스펙트럼의 변화량의 크기가 미비하여 박막 두께 측정의 한계를 갖는다 [22].

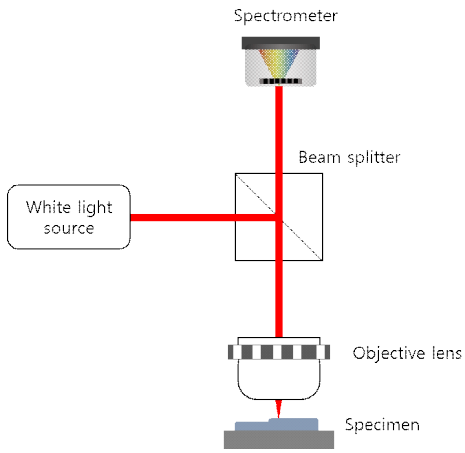


그림 1-4. 반사광 측정법 개략도

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 타원계측기 (Ellipsometry)

2.1 일반적인 타원계측기

타원계측기는 그림 1-5와 같이 편광이 정의된 빛이 시편에 입사된 후 발생하는 편광 변화량 또는 광강도의 변화 등을 이용하여 박막의 두께를 결정하는 광학적 측정 기기이다. 편광 변화를 이용하여 측정하기 때문에 환경 변화에 영향을 거의 받지 않으며, 수 십 Å이하의 얇은 박막 측정이 가능하다는 특징을 갖는다 [23-24]. 또한, 측정 시편에 대해 추가적인 후처리와 같은 기술을 사용하지 않고, 시편을 그대로 측정하기 때문에 산업계 응용이 편리하다. 타원계측기의 분석 원리는 시스템 구성을 통해 획득한 측정 결과와 존스 행렬 (Jones Matrix) [25] 또는 뮬러 행렬 (Muller Matrix) [26]과 같은 수학적 방식을 통해 이론적 모델값과 최적화를 통해 박막의 두께를 결정한다. 그러나 일반적인 타원계측기는 주로 점 측정 방식으로 대면적 측정에 한계를 가지며, 편광 부품의 회전 등으로 인하여 실시간 고속 측정에 한계를 갖는다. 이를 극복하기 위해 그동안 다양한 종류의 타원계측기가 제안되었다.

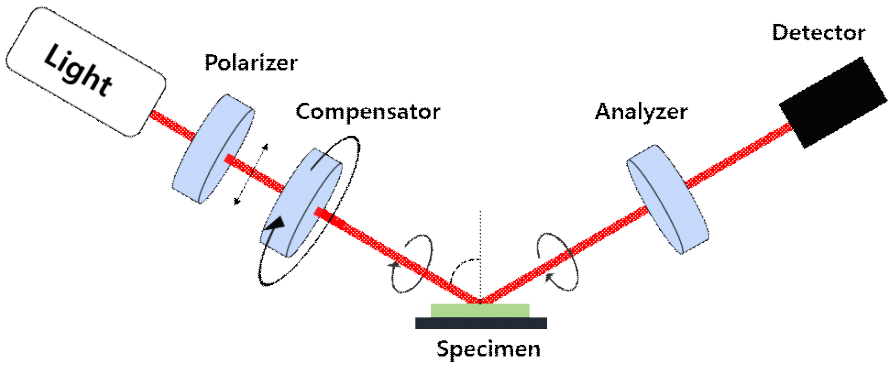


그림 1-5. 타원계측기 개략도

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 타원계측기의 종류 및 측정 한계

타원계측기는 구동 원리 및 광원에 따라 다양하게 분리될 수 있다. 최초의 타원계측기는 단파장 광원을 사용하여 편광기 또는 검광기 등의 회전을 통해 시편에서 반사된 빛의 소멸점을 찾는 Null 타원계측기로 [27], 높은 정밀도를 갖지만 소멸점을 찾기 위해 측정 시간이 오래 걸린다는 단점을 갖는다. 이를 보완하기 위해 광강도 변화를 검출하여 박막의 두께를 측정하는 Photometric 타원계측기가 개발되었으며 Null 타원계측기보다 빠른 측정이 가능하지만 정밀도가 다소 떨어지는 한계를 갖는다 [28]. 한편, 다파장 광원을 사용하여 단파장 광원에 비해 더 많은 양의 정보를 획득함으로써 다층 박막 분석이 가능한 분광 타원계측기 (Spectroscopic Ellipsometry) [29]가 개발되어 측정 결과의 신뢰성을 높이는 연구가 진행되었다. 또한, 타원계측기와 결상 시스템이 결합하여 박막의 라인 측정이 가능한 영상 타원계측기 (Imaging Ellipsometry)가 개발되었다. 그러나 이러한 타원계측기들은 여전히 편광 변화를 주기 위한 타원계측기의 측정 원리로 인해 발생하는 측정 시간의 한계점이 존재하며, 주로 점 측정 방식을 사용하기 때문에 넓은 영역의 측정 한계를 갖는다. 이를 극복하기 위한 연구들이 많이 진행 중에 있다.

2.3 다채널 타원계측기

산업계에서 빠른 측정 속도로 넓은 영역에 대해 박막 두께 측정이 가능한 시스템을 요구함에 따라 이에 대한 연구 개발이 진행 중에 있다. 최근 가장 많이 연구되는 형태의 타원계측기는 다채널 (Multi-channel) 형태 [30-31]의 분광 타원계측기로써, 적층되는 박막의 수가 증가함에 따라 다층 박막 측정을 위한 분광 타원계측기의 원리를 주로 사용한다. 타원계측기의 검출부 배열을 통해 여러 점에 대한 정보를 획득하는 다채널 형태의 타원계측기는 일반적인 타원계측기의 대영역 측정의 한계를 개선하였다. 그리고 측정 속도의 한계를 극복하기 위해 고차원 위상 지연기 등의 배치를 통해 측정 속도를 증가시키는 연구가 진행 중이다. 하지만 검출부의 배열로 인해 구성이 복잡하며, 넓은 영역 측정이 가능하지만 이는 측정 점들 사이에서는 측정이 불가능한 한계를 가진다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.4 간섭 모듈 타원계측기

한편, 간단한 광학 구성으로 빠른 측정을 위해 그림 1-6과 같이 간섭계 모듈과 타원계측기를 결합한 구성이 제안되었다 [32]. 광경로 차이가 0이 되는 지점에서 간섭무늬가 생기는 백색광의 특징을 이용한 간섭 모듈을 광원으로 구성하여 타원계측기를 구성하였으며, 박막 시편에서 반사된 빛의 간섭무늬를 분석하여 박막의 두께 측정이 가능한 특징을 갖는다. 제안된 방법은 기존의 타원계측기보다 측정 속도가 빠르다는 장점을 갖지만, 특수 모듈을 제작해야 하며 시편 측정 전 모듈의 광경로 계산이 필수적으로 요구되는 한계를 갖는다.

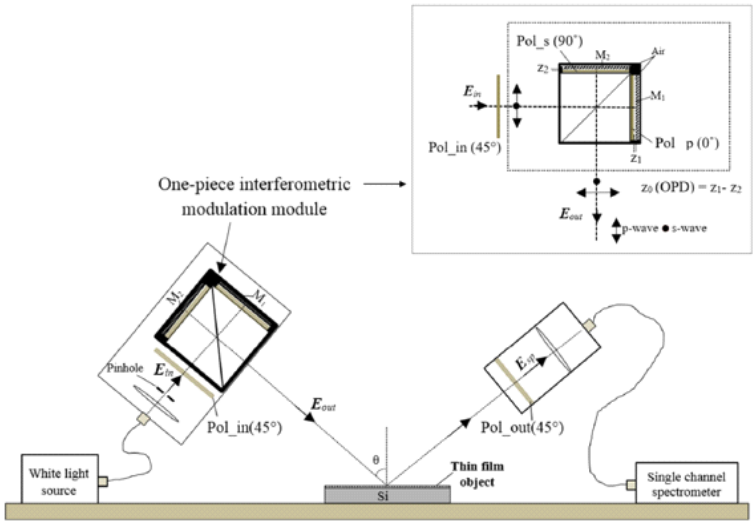


그림 1-6. 간섭 모듈 타원계측기의 광학 구성

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 기존의 박막 두께 측정에 대한 타원계측기의 한계를 극복하기 위해 새로운 원리를 이용한 분광 타원계측기 기술에 대한 연구를 진행한다. 본 연구에서는 산업계의 수요에 맞는 대영역, 고속 측정이 가능한 타원계측기를 위해 단일 영상으로 한 점과 라인에 대해 박막 두께 측정이 가능한 두 가지의 시스템을 제안하며, 이를 실험적으로 검증하는 것을 연구 목표로 한다.

본 연구의 목표 달성을 위한 세부 연구 내용은 다음과 같다.

1) 단일 영상을 통한 한 점 측정
- 공간 위상 지연 소자 특성 분석
- 공간 위상 지연 소자 기반 분광 타원계측기 구성
- 검증 실험 및 결과 분석

2) 단일 영상을 통한 라인 측정
- 편광 카메라 특성 분석
- 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 구성
- 검증 실험 및 결과 분석

본 논문은 제2장에서 제안하는 시스템에 사용되는 기본 이론과 원리에 대한 설명, 제3장은 두 가지의 시스템에 대한 보정작업, 검증 실험과 분석, 제4장에서는 고찰 및 논의 그리고 제5장은 결론으로 구성되어 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 단일 영상 획득을 통한 박막 구조 분석

제1절 박막 측정 및 이론

1. 분광 타원계측기의 측정 원리

1.1 타원계측기 측정 원리 및 이론

일반적인 등방 매질 내에서 z축 방향으로 진행하는 단색 광파의 전기장 E는 맥스웰 방정식 (Maxwell equation)에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = (E_{0x}x + E_{0y}y)e^{iw(\frac{Nz}{c}-t)} = (E_{0x}x + E_{0y}y)e^{iw(\frac{nz}{c}-t)}e^{-\frac{\omega kz}{c}} \quad (1)$$

여기서 N은 복소 굴절률 (Complex refractive index, $N = n + ik$)을 나타내며, κ는 소광계수 (Extinction coefficient), ω는 각 주파수 (Angular frequency) 그리고 c는 진공 중의 빛의 속도를 나타낸다. 타원계측기는 입사하는 광의 편광과 시편에서 반사되는 편광의 비를 이용하여 분석하며, 각 편광 성분에 해당하는 전기장을 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_{ip} = |E_{ip}|\cos(\omega t - \delta_{ip}),\ E_{is} = |E_{is}|\cos(\omega t - \delta_{is}) \quad (2)$$

이때, 입사면에 평행한 전기장을 p-파, 수직인 전기장을 s-파로 각각 표현할 수 있으며, 시편에 입사되는 특정 상태의 편광은 입사 각도, 측정 박막의 굴절률, 두께에 따라 편광 상태가 변하게 되는 동시에 반사된 빛의 진폭과 위상이 서로 달라지게 된다. 이때, 빛은 서로 다른 편광의 중첩으로 인해 일반적으로 타원편광 (Elliptical polarization)이 되며, p-파와 s-파에 해당하는 반사계수 (Reflection coefficient)는 프레넬 방정식 (Fresnel equations)에 의해 다음과 같이 정리된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$r_p = |r_p| e^{i\delta_p} = \left| \frac{E_{rp}}{E_{ip}} \right| e^{i(\delta_{rp} - \delta_{ip})}, \quad r_s = |r_s| e^{i\delta_s} = \left| \frac{E_{rs}}{E_{is}} \right| e^{i(\delta_{rs} - \delta_{is})} \tag{3}$$

식 (3)을 이용하여 타원계측기에서 측정값으로 사용되는 복소반사계수비 (ρ)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \tan\Psi \cdot e^{i\Delta} \tag{4}$$

식 (4)는 타원계측기의 물리적 측정값이며, 여기서 $\tan\Psi$는 p-파와 s-파의 반사계수에 대한 진폭의 크기 비를 나타내고 Δ는 각 편광의 반사계수의 위상차를 의미한다.

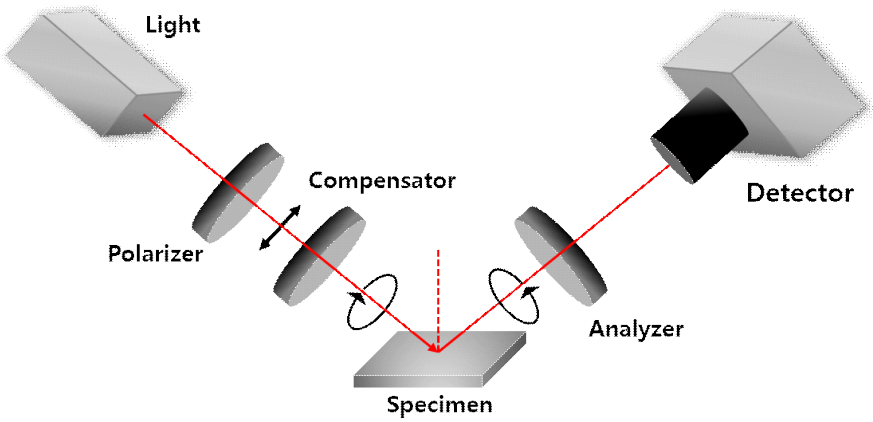


그림 2-1. 타원계측기의 광학 구성

한편, 빛이 시편에 대해 수직 입사하는 경우에는 등방성 물질에 대해 반사계수가 같아지기 때문에 물리적 측정값의 의미를 잃게된다. 일반적인 타원계측기는 그림 2-1과 같이 시편에 일정한 각도로 입사되도록 구성되며, 측정값 Ψ, Δ의 민감도 향상을 위해 빛은 측정 시편에 따라 결정되는 브루스터 각 (Brewster's angle)으로 입사한다. 그리

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고 타원계측기에서는 입사하는 빛 혹은 시편에서 반사하는 빛의 편광 상태를 일정하게 변화시켜 주기 위해 그림 2-1의 편광기, 위상 지연 소자 등을 회전시키면서 측정을 수행한다. 이를 통해, 타원계측기는 시편의 굴절률과 박막의 두께에 따라 달라지는 복소 반사계수비를 측정하고 이를 이론값과 비교하여 박막의 두께 및 굴절률을 추출한다.

1.2 분광 타원계측기 측정 원리

타원계측기는 사용하는 광원과 작동 방식에 따라 매우 다양한 종류가 있으며, 그 중에서 분광 타원계측기 (Spectroscopic ellipsometry)는 넓은 파장 분포를 가지는 광원을 이용하여 측정을 수행하기 때문에, 보다 신뢰성 있는 측정이 가능한 장점을 가진다. 분광 타원계측기의 측정 원리는 일반적인 타원계측기의 측정 원리와 동일하지만 넓은 파장 분포의 광원 (Broadband light source)과 분광기 (Spectrometer)를 사용하여 각 파장별 Ψ, Δ를 측정하는 특징이 있으며, 이를 통해 다층 박막 측정이 가능하다는 장점을 갖는다. 넓은 파장 분포의 광원을 사용하는 경우, 단파장 광원 (Monochromatic light source)에 비해 많은 양의 정보를 획득할 수 있으므로, 이론값과 비교시 보다 높은 정확성을 갖는다. 그림 2-2와 같이 분광 타원계측기는 광검출부에 분광기를 이용하여 파장별로 빛을 분산시키는 구조를 가지며, 이러한 특징으로 인해 주로 점 측정 방식의 분광 타원계측기가 널리 사용된다. 그리고 분광 타원계측기는 이론적 모델과 측정값의 최적화 (Optimization) 방법을 통해 결과를 추출할 수 있으며, 이론적 모델을 구성하기 위해서는 존스 행렬 또는 뮬러 행렬을 사용하여 시스템을 표현할 수 있다. 그림 2-2의 분광 타원계측기를 존스 행렬을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{E_{out}} = \overline{A_{-45}}\,\overline{S}\,\overline{C_r}\,\overline{P_{45}}\,\overline{E_{in}} \tag{5}$$

여기서 $\overline{E_{out}}$, $\overline{E_{in}}$은 각각 검출되는 빛의 전기장과 입사하는 빛의 전기장의 존스 벡터를 나타내고, $\overline{A_{-45}}$와 $\overline{P_{45}}$는 각각 -45°, 45° 회전되어있는 검광기 (Analyzer)와 편광기 (Polarizer)의 존스 행렬을 표현한다. 그리고 $\overline{S}$와 $\overline{C_r}$ 각각 시편과 회전하는 위상 지연판을 의미하며 자세한 표현은 다음과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\overline{S} = \begin{pmatrix} r_p(\lambda) & 0 \\ 0 & r_s(\lambda) \end{pmatrix} \tag{6}$$

식 (6)의 $r_p(\lambda)$, $r_s(\lambda)$는 파장에 따른 시편의 p-파와 s-파의 반사계수를 나타낸다. $\overline{C_r}$은 시편의 Ψ, Δ를 추출하기 위해 위상 지연판의 fast axis 회전 각도 (θ_r)와 위상 지연량 $\delta(\lambda)$를 이용해서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{C_r} = \begin{pmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta(\lambda)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{pmatrix} \tag{7}$$

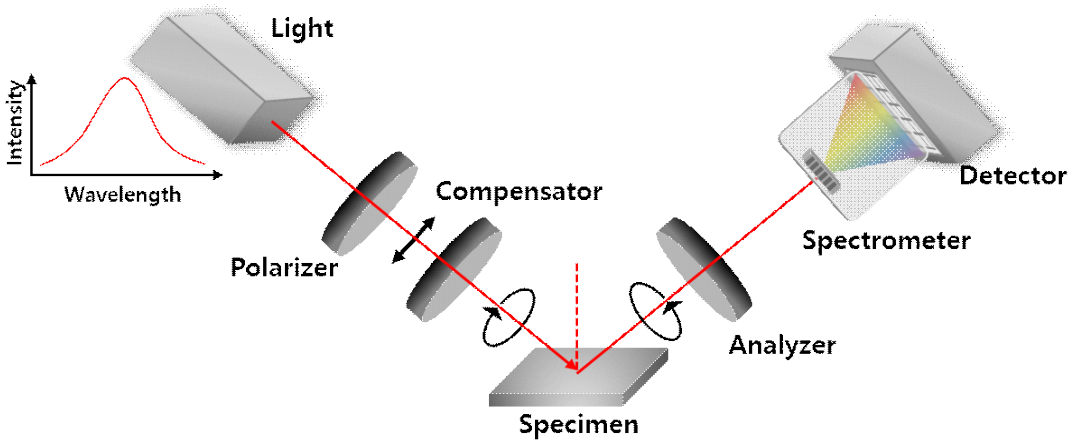


그림 2-2. 분광 타원계측기의 광학 구성

비록 분광 타원계측기는 파장별로 동일한 다층 박막에 대해 많은 정보를 얻을 수 있어 다층 박막 측정에 용이한 장점을 가지나, 일반적인 타원계측기에서와 같이 빛의 편광 변화를 주기 위한 기계적, 전기적 구동부로 인해 측정 시간이 다소 오래 걸린다는 한계점이 있다. 또한 분광기의 사용으로 인해 주로 점 측정 방식의 분광 타원계측기에 대한 연구가 진행되어 왔다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고로 식 (5)에 사용된 기본적인 존스 행렬들은 표 1과 같다.

표 1. 기본 형태의 존스 행렬

Jones Matrix	광학부품 및 특성
$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}$	Randomly Polarization
$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	Horizontal linear polarizer
$\begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix}$	시편 : $r_{p(s)}$는 반사계수로 p는 입사면에 평행한 경우를 s는 입사면에 수직인 경우를 나타냄
$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix}$	Compensator : δ는 fast-axis를 기준으로 했을 때 retardation 각
$\begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$	좌표 변환 : 각 광학부품의 광축을 기준으로 θ 만큼 회전시킴

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 박막 분석 이론

2.1 단층 박막 분석 이론

단층 박막은 그림 2-3과 같이 기저판 (Substract) 위에 단일 층으로 박막이 도포되어 있으며, 전체 광학적 구조는 대기층, 박막, 기저판으로 나눌 수 있다. 이때, 단층 박막에서는 경계 및 박막 내부에서 다중 반사 현상이 발생한다.

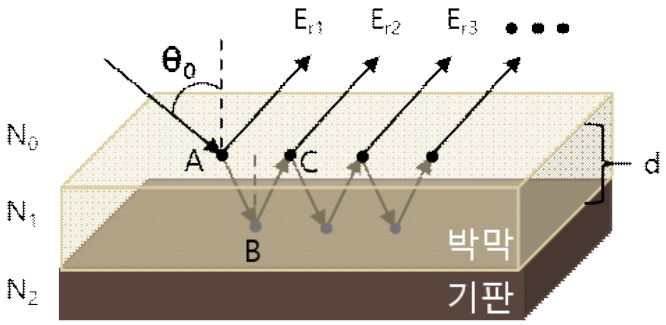


그림 2-3. 단층 박막의 광학적 모델

그림 2-3에서 N_0, N_1, N_2는 각 매질의 광학적 복소 굴절률을 나타내며, d는 박막의 두께를 의미한다. 대기층에서 빛이 θ_0의 각도로 박막에 입사하는 경우, 박막과 대기층의 경계면 및 박막과 기판의 경계면에서 빛은 다중 반사되며, 반사된 빛들은 중첩 ($E_{r1}+E_{r2}+E_{r3}+\cdots$)을 통해 전체적인 반사 빛을 형성한다. 그러면 반사하는 빛과 입사하는 빛의 비율을 통해 단층 박막에 대한 유효 반사계수를 구할 수 있다. 결국, 박막에서 발생하는 반사계수는 경계면에서 유도되는 프레넬 반사 (r_{01}, r_{12}) 및 투과계수 (t_{01}, t_{10}), 박막 내에서 발생하는 위상 지연 2β를 고려하여 식 (9)와 같이 무한급수로 표현 가능하다.

$$2\beta = 2K_1(\overline{AB}+\overline{BC}) - 2K_0\overline{AD} = \frac{4\pi d}{\lambda}(N_1\cos\theta_1) \tag{8}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$r = r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{-i2\beta} + t_{01}t_{10}r_{12}^2e^{-i4\beta} + \cdots \tag{9}$$

식 (8)의 θ_1은 스넬의 법칙에 의한 박막에서 빛의 투과 각도를 의미한다. 무한급수로 표현된 식 (9)는 간단한 수학적 계산을 통해 식 (10)과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$r = \frac{r_{01} + r_{12}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01}r_{12}\exp(-i2\beta)} \tag{10}$$

또한, 유도된 반사계수는 p-파와 s-파에 대한 식으로 아래와 같이 표현 가능하다.

$$r_p = \frac{r_{01,p} + r_{12,p}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,p}r_{12,p}\exp(-i2\beta)}, \quad r_s = \frac{r_{01,s} + r_{12,s}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,s}r_{12,s}\exp(-i2\beta)} \tag{11}$$

결국, 식 (11)을 통해 이론적인 단층 박막의 Ψ, Δ를 추출할 수 있으며, 이를 타원계측기의 측정값과 비교하여 박막의 두께를 추출할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 다층 박막 분석 이론

다층 박막은 기본적으로 단층 박막의 연속적인 형태로 구성이 되어있기 때문에 반복적인 수식을 통해 각 층에 대한 반사계수의 식 유도가 가능하다. 하지만 박막의 수가 증가할수록 수식이 복잡해지는 단점이 발생한다. 따라서 다층 박막 분석은 주로 박막의 경계면에서 일어나는 경계면 행렬 (Interface matrix)과 박막 내부에서 발생하는 층간 행렬 (Layer matrix)을 이용한 산란 행렬 (Scattering matrix)를 구성하여 다층 박막의 이론적 모델을 나타낸다. 다층 박막은 그림 2-4와 같이 입사각 θ를 갖는 빛이 박막에 입사할 때, 박막의 각 층에서 반사와 투과가 일어나며 박막의 내부에서는 흡수와 위상 변화와 같은 광학 현상이 발생한다.

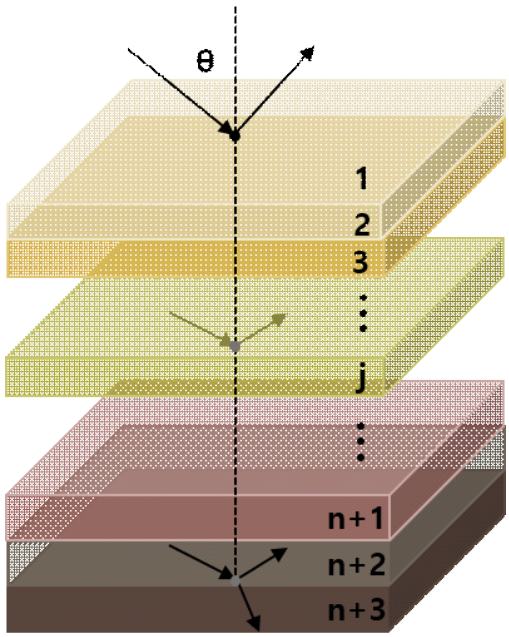


그림 2-4. 다층 박막의 반사 및 투과 광학적 모델

이러한 광학적 특징을 이용하여 앞서 설명한 경계면 행렬 (I)과 층간 행렬 (L)로 나타내면, 박막의 (n+1)개 층에 대한 산란 행렬을 다음과 같이 표현할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$S = I_{12} L_2 I_{23} L_3 \cdots I_{jj+1} L_{j+1} \cdots I_n L_{n+1} I_{n+1n+2} \tag{12}$$

여기서 I_{jj+1}은 박막의 j번째와 (j+1)번째 경계면 행렬이며, L_{j+1}은 (j+1)번째 층을 지날 때의 층간 행렬을 의미한다. 이러한 행렬식은 단층 박막 이론에서와 같이 프레넬 반사, 투과계수로 다음과 같이 표현 가능하다.

$$I_{jj+1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{t_{jj+1}} & \frac{r_{jj+1}}{t_{jj+1}} \\ \frac{r_{jj+1}}{t_{jj+1}} & \frac{1}{t_{jj+1}} \end{pmatrix}, \quad L_j = \begin{pmatrix} e^{i\beta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_j} \end{pmatrix} \tag{13}$$

여기서 β_j는 j번째 박막 층을 지날 때 발생하는 위상 변화량이며, 그 층에 대한 두께 (d_j), 입사각 (θ_j) 그리고 복소 굴절률 (N_j)의 함수이다.

$$\beta = \frac{2\pi d_j N_j \cos\theta_j}{\lambda} \tag{14}$$

또한, 산란 행렬 (S)은 (2 x 2) 형태이며, p-파와 s-파에 관한 행렬로 표현한 후에 각각 반사계수와 복소반사계수비로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_p = \frac{S_{21p}}{S_{11p}}, \; r_s = \frac{S_{21s}}{S_{11s}} \tag{15}$$

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{S_{21p}}{S_{11p}} \times \frac{S_{11s}}{S_{21s}} \tag{16}$$

위와 같은 식 (15)와 식 (16)을 이용하여 다층 박막에서의 이론적 반사계수비를 구할 수 있으며 측정 결과와 최적화를 통해 단층 박막과 동일하게 박막 두께 추출이 가능하다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기

1. 공간 위상 지연 소자

분광 타원계측기는 제2장 1절에서 설명한 바와 같이 Ψ, Δ의 측정을 위해 편광 소자의 기계적, 전기적 구동을 필요로 한다. 이 중에서 위상 지연 소자의 회전을 이용하는 분광 타원계측기의 경우에는 시간에 따라 위상 지연을 조절하여 빛의 편광을 변화시키며, 이를 통해 정밀하게 Ψ, Δ를 측정한다. 그러나 이 경우, 측정 시간이 길어지는 한계가 발생하며, 이러한 한계는 공간 위상 지연 (Spatial phase retadation) 방법을 이용하여 개선할 수 있다. 공간 위상 지연 소자 (Spatial phase retarder)는 공간 상에서 위상 지연이 달라지도록 설계된 광학 소자로, 일반적으로 액정 소자 (Liquid crystal)의 배열을 통해 구현할 수 있다. 액정 소자는 그림 2-5와 같이 복굴절성을 가지고 있어 입사하는 편광 상태와 액정 소자의 fast axis 방향의 관계에 따라 투과하는 빛의 편광을 변화시킬 수 있다. 그리고 공간 위상 지연 소자는 그림 2-6과 같이 내부에 이러한 액정 소자들이 일정한 주기로 fast axis가 회전되도록 구성되어 있으며, 이를 통해 공간적으로 위상 지연을 조절할 수 있다.

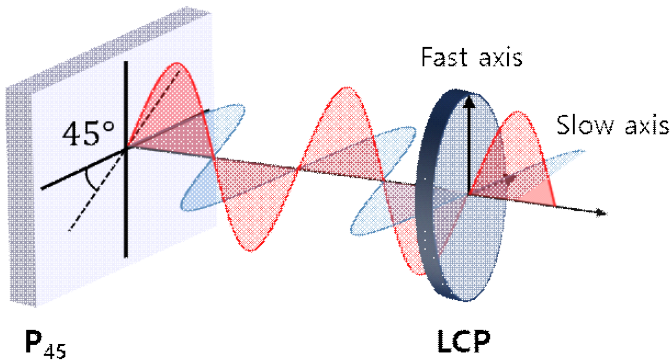


그림 2-5. 액정의 복굴절에 의한 위상 지연 및 편광 변화 특성
(P, polarizer; LCP, liquid crystal polymer)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 2-7은 공간 위상 지연 소자의 예 (DPP25, Thorlabs)로 액정의 fast axis 회전량과 45°의 선형 편광된 빛이 소자를 통과할 때 일어나는 위상 지연량을 나타낸다. 참고로 DPP25 소자는 25 μm 간격의 횡방향으로 fast-axis가 2°씩 연속적으로 회전되도록 설계, 제작되었다.

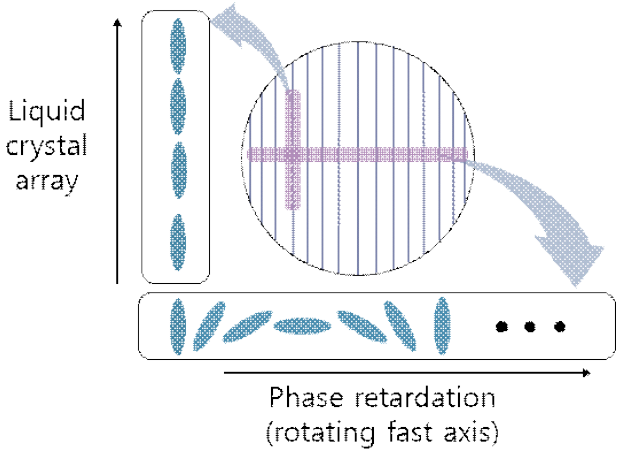


그림 2-6. 공간 위상 지연 소자 Liquid crystal polymer 배열 구성

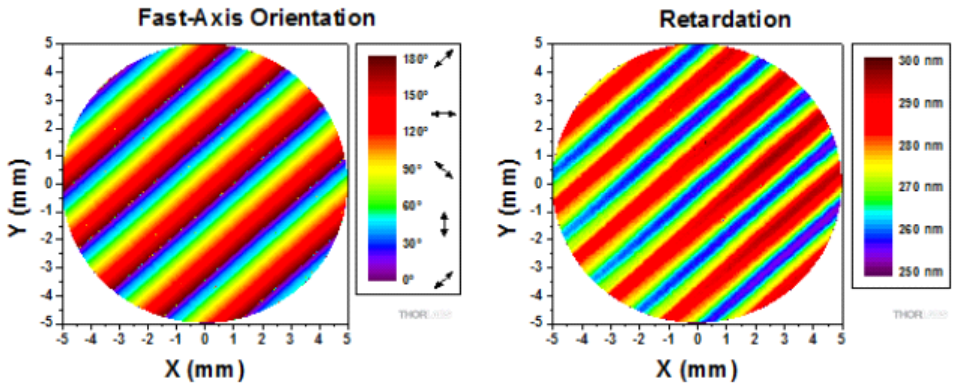


그림 2-7. 공간 위상 지연 소자로 사용한 Depolarizer의 특성

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기

기존의 분광 타원계측기가 가지는 한계인 오랜 측정 시간을 개선하기 위해, 앞서 설명한 공간 위상 지연 소자를 분광 타원계측기에 적용하면 실시간으로 Ψ, Δ를 측정할 수 있다. 그림 2-8은 이러한 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기의 광학 구성을 나타낸다.

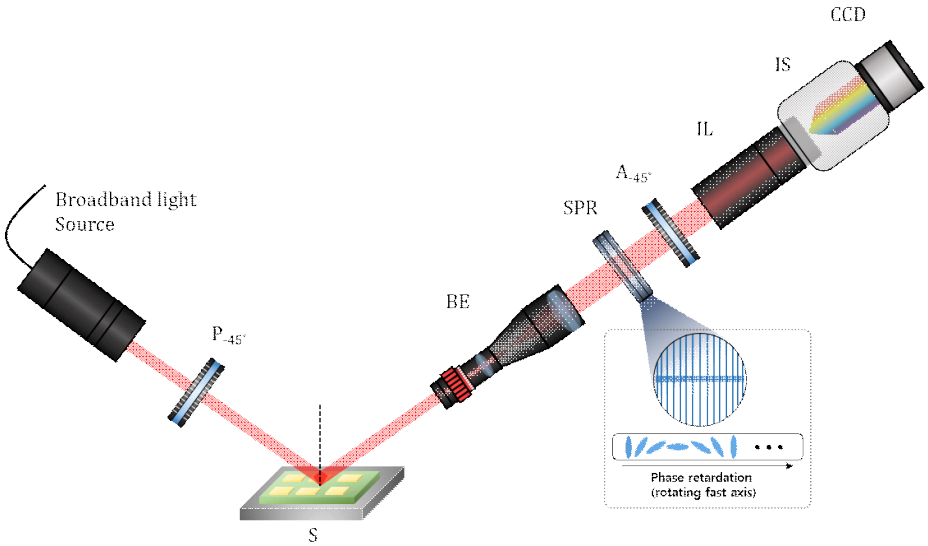


그림 2-8. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 광학 구성도
(P, polarizer; S, specimen; BE, beam expander; SPR, spatial phase retarder; A, analyzer; IL, imaging lens; IS, imaging spectrometer; CCD, CCD camera)

광원에서 시준된 빛은 편광기에 의해 45° 선형 편광으로 정의된 후, 시편에서 반사된다. 이후, 빔확장기에 의해 크기가 확대되며 공간 위상 지연 소자와 검광기를 지나 검출기에 결상된다. 이때, 확장된 빛이 공간 위상 지연 소자를 통과할 때 공간적으로 회전된 액정 소자의 fast axis에 의해 위상 지연된 결과와 영상 분광기의 효과로 인해 분광된 결과가 광 검출기로 사용되는 CCD 카메라에 영상으로 나타난다. 따라서 획득된 영상을 이용하여 분광 타원계측기의 원리를 적용하면, 기존의 분광 타원계측기의

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기계적 구동부에 의한 위상 지연과 동일한 효과로 Ψ, Δ를 추출할 수 있다. 그러면 결과적으로 단일 영상으로 다층 박막 두께 측정이 가능하다.

공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기의 분석 방법으로 존스 행렬을 이용하여 시스템의 행렬식을 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{E_{out}} = \overline{A_{-45}}\,\overline{SPR}\,\overline{S}\,\overline{P_{45}}\,\overline{E_{in}} \tag{17}$$

여기서 $\overline{SPR}$은 fast axis의 공간 (x) 상의 액정 소자의 회전량 및 액정 소자의 주기 특성에 의한 위상 변화량 $\delta(x,\lambda)$를 이용하여 다음과 같은 표현을 갖는다.

$$\overline{SPR} = \overline{R^{-1}[\theta(x)]}\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & \exp[i\delta(x,\lambda)]\end{pmatrix}\overline{R[\theta(x)]} \tag{18}$$

식 (18)에서 $\delta(x,\lambda)$는 실험을 통해 변수들을 결정할 수 있으며, 이를 이용하여 $\overline{SPR}$을 결정할 수 있다. 이후, 분광 타원계측기와 유사한 원리로 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기에서 획득한 데이터와 식 (17)의 이론 모델을 서로 비교하여 단일 영상을 통한 다층 박막의 두께 측정이 가능하다. 그러나 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기는 측정 원리상 측정 시편의 한 점에서 박막의 두께를 측정한다는 한계를 가진다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절 편광 카메라 기반 분광 타원계측기

1. 편광 카메라의 원리

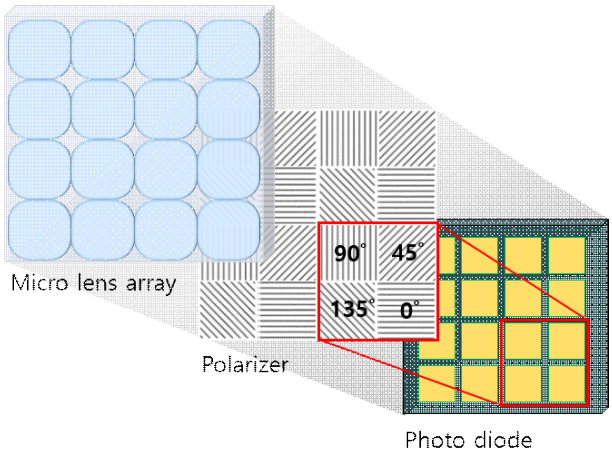


그림 2-9. 편광 카메라 내부 구성 및 원리

편광 카메라의 구조는 그림 2-9와 같은 구성으로, 일반적인 CCD 카메라와 달리 내부에 편광 소자와 Micro lens array가 함께 결합된 형태로 구성되어 있다. 영상 소자(Imaging sensor) 앞단에 투과 축이 0°, 45°, 90°, 135° 회전된 편광 소자가 (2 x 2) 픽셀 단위로 놓여 있기 때문에, 인접한 각 픽셀은 서로 다른 편광 상태의 빛의 광강도(Intensity)를 획득한다. 이를 이용하면, 그림 2-10과 같이 편광 카메라에서 획득되는 전체 이미지를 편광에 따라 4개의 이미지로 나눌 수 있다. 현재 상용화된 편광 카메라는 Mono type과 Color type이 있으며, Mono type의 편광 카메라의 파장에 따른 양자효율은 그림 2-11과 같이 각 파장에 따라 편광 상태의 효율이 비슷한 특징을 갖는다. 따라서 사용하는 광원의 파장에 대해 각 편광 픽셀마다 큰 대비를 보이지 않는다. 또한, 편광 카메라의 구조 특징으로는 그림 2-12와 같이 Micro lens array가 편광 소자 앞단에 위치함으로써, 입사하는 빛이 인접한 픽셀에서 검출되는 crosstalk 현상을 줄이도록 설계되었다. crosstalk 현상은 획득 이미지의 신뢰성 및 측정 결과에 큰 오차의 요인으로 작용하기 때문에 최대한 인접한 픽셀의 편광에 영향을 주지 않도록 구성된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

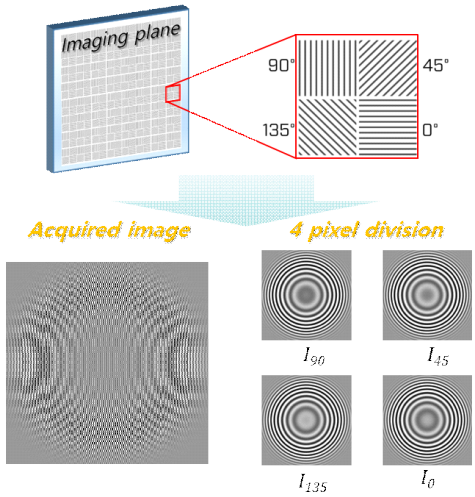


그림 2-10. 편광 카메라에서 획득되는 이미지와 분할된 이미지

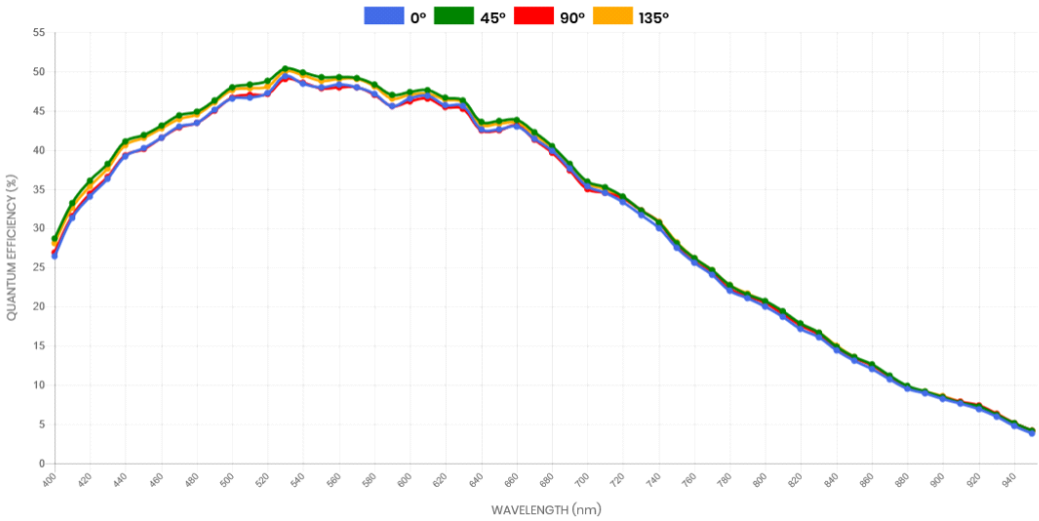
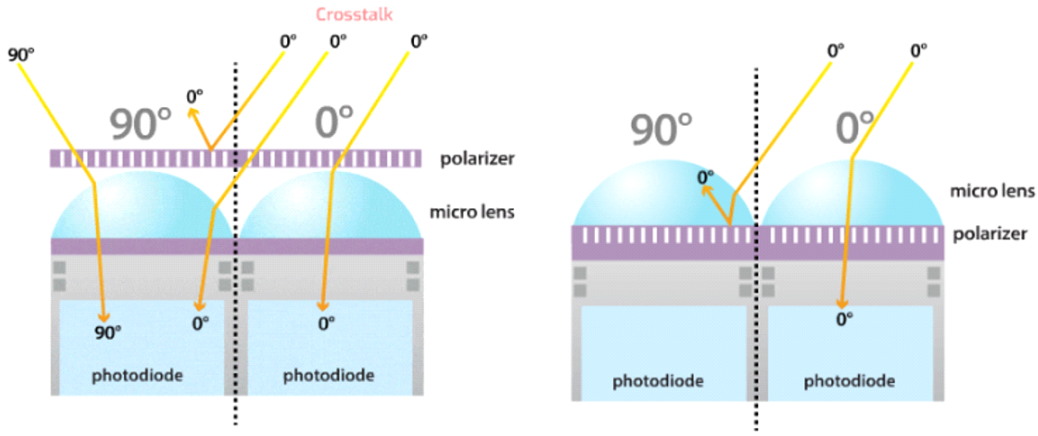


그림 2-11. 편광 카메라의 파장에 대한 양자 효율 그래프

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

그림 2-12. 편광 배열판 위치에 따른 crosstalk 발생 (a) 유, (b) 무 확인

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기

앞서 설명한 편광 카메라를 분광 타원계측기에 적용하면, 기존의 분광 타원계측기가 가지는 오랜 측정 시간과 점 측정 한계를 모두 개선할 수 있다. 그림 2-13은 편광 카메라 기반 분광 타원계측기의 광학 구성도를 나타낸다. 광학 구성은 일반적인 타원계측기의 형태와 동일하며 다층 박막 측정을 위해 넓은 파장 분포의 광원과, 실시간 라인 측정을 위해 영상 분광기와 편광 카메라가 사용된다.

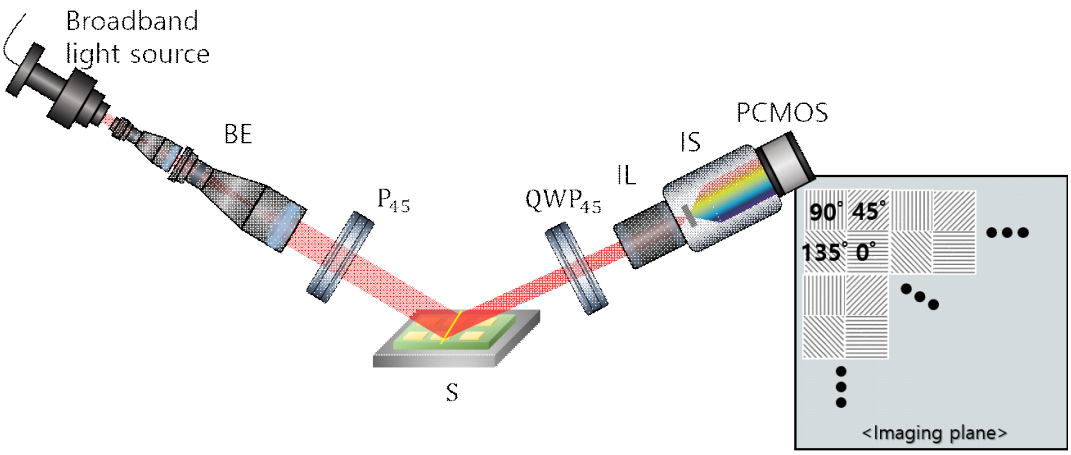


그림 2-13. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 광학 구성도
(BE, beam expander; P, polarizer; S, specimen; QWP, quarter wave plate; IL, imaging lens; IS, imaging spectrometer; PCMOS, ploarization-pixelated CMOS camera)

광원에서 시준된 빛은 빔확장기에 의해 크기가 확대되며, 투과 축이 45° 회전된 편광기를 지나면서 45° 선형 편광 빛으로 정의된다. 시편에서 반사된 빛은 fast axis가 45° 회전된 λ/4판을 통과한 후, 결상 렌즈와 영상 분광기를 지나 편광 카메라에 결상된다. 이때, 결상 렌즈의 초점 위치에 시편이 놓이게 되면, 그림 2-14와 같이 편광 카메라의 촬상면 (Imaging plane)의 가로 방향으로 시편의 한 라인 (Line)이 결상되며, 영상 분광기를 통해 세로 방향으로는 결상된 라인에 대한 분광 정보가 나타난다. 또한, 인접한

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

픽셀의 편광 각도가 서로 다른 편광 카메라의 특성으로 인해, 획득되는 한 장의 영상으로 0°, 45°, 90°, 135°에 해당하는 서로 다른 편광 각도를 가지는 4장의 영상획득이 가능하다.

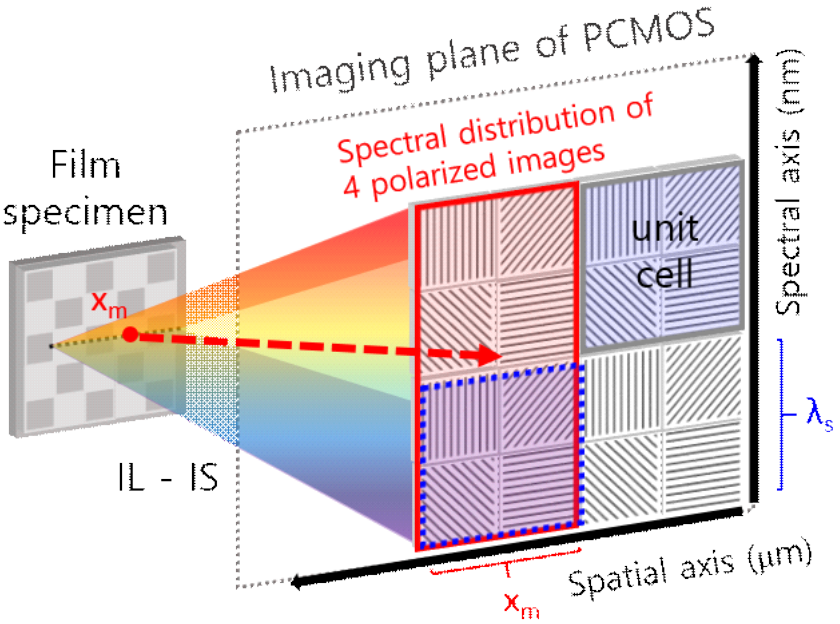


그림 2-14. 분광된 영상이 편광 카메라에 결상되는 원리

편광 카메라 기반 분광 타원계측기에서 획득되는 빛 ($\overline{E_{out}}$)은 존스 행렬을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{E_{out}} = \overline{A_{PCMOS}}\ \overline{QWP_{45}}\ \overline{S}\ \overline{P_{45}}\ \overline{E_{in}} \tag{19}$$

여기서 행렬 표현은 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기와 동일한 형태를 갖으며, $\overline{QWP_{45}}$와 $\overline{P_{45}}$는 각각 fast axis와 투과 축이 45° 회전 되어있는 λ/4 파장 지연판과 편광기의 존스 행렬을 나타낸다. 그리고 $\overline{A_{PCMOS}}$는 편광 카메라 내부의 편광 소자에 대한 존스 행렬로 픽셀에 따라 0°, 45°, 90°, 135°에 해당하는 편광 각도를 가진다. 식 (19)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

을 이용하여, 획득되는 4종류의 광강도를 나타내면 다음과 같다.

$$I_0 = \frac{1}{8}E_0^2[\tan^2\psi - 2\tan\psi\sin\Delta + 1] \tag{20}$$

$$I_{45} = \frac{1}{8}E_0^2[\tan^2\psi + 2\tan\psi\cos\Delta + 1]$$

$$I_{90} = \frac{1}{8}E_0^2[\tan^2\psi + 2\tan\psi\sin\Delta + 1]$$

$$I_{135} = \frac{1}{8}E_0^2[\tan^2\psi - 2\tan\psi\cos\Delta + 1]$$

식 (20)을 이용하면 간단한 수식을 통해 타원계측기의 물리적 측정값 Δ와 Ψ의 함수인 β에 해당하는 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta = \tan^{-1}\left(\frac{I_{90} - I_0}{I_{45} - I_{135}}\right) \tag{21}$$

$$\beta = \frac{(I_{90} - I_0)^2 + (I_{45} - I_{135})^2}{(I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135})^2} = \frac{\tan^2\psi}{(\tan^2\psi + 1)^2}$$

또한, 식 (21)은 획득한 영상의 가로 방향으로 반복적으로 적용되어 전체 라인에서의 Δ와 β의 계산이 가능하다. 그리고 이론값과 측정값의 비교를 통해 박막의 두께를 측정할 수 있다. 즉, 영상 분광기와 편광 카메라를 이용한 한 장의 영상 획득으로 시편의 한 라인에 해당하는 실시간 박막 두께 프로파일 측정이 가능하다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 실험 결과 및 분석

제2장에서는 단일 영상 획득을 통한 박막 두께 및 라인 측정을 위한 시스템의 원리와 이론에 대해 설명하였다. 제3장에서는 본 연구에서 제안하는 단일 영상 박막 두께 측정 시스템을 구성하고, 실험 전 진행되는 기본적인 보정 작업에 대한 결과와 다양한 박막 시편에 해당하는 측정 실험을 수행하였다. 이후 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기의 실험과 편광 카메라 기반 분광 타원계측기의 실험을 각각 수행하였으며 이를 실험적으로 검증하였다.

1. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기
   - 시스템 구성 및 변수 보정
   - 박막 시편 측정 및 결과 분석

2. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기
   - 시스템 구성 및 변수 보정
   - 박막 시편 측정 및 결과 분석

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1절 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기

1. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 구성

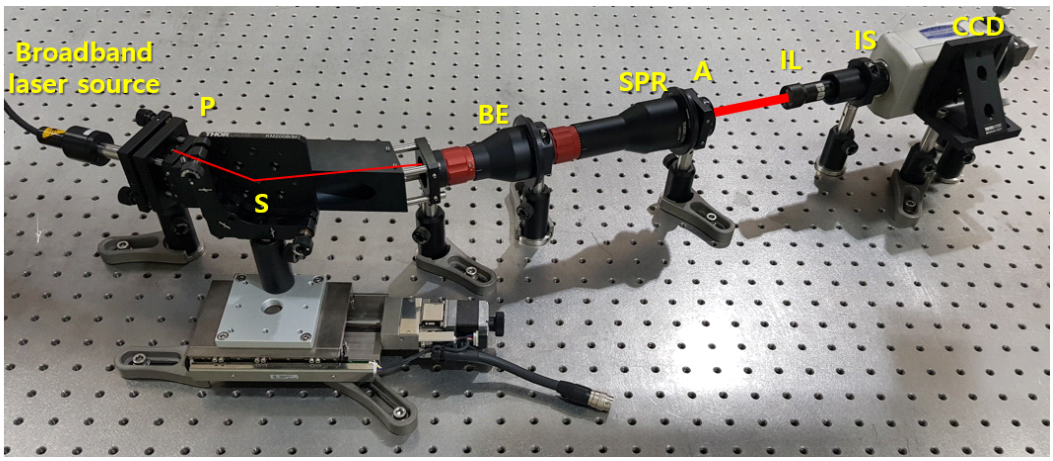


그림 3-1. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 광학 구성
(P, polarizer; S, specimen; BE, beam expander(3x, 10x); SPR, spatial phase retarder; A, analyzer; IL, imaging lens; IS, imaging spectrometer; CCD, CCD camera)

실시간 다층 박막 분석을 위해 본 논문에서 제안하는 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기의 광학 구성은 그림 3-1과 같다. 광원으로 그림 3-2와 같은 NKT Photonics 사의 SuperK compact laser로 Q-switching 펄스 레이저를 사용하였으며, SuperK compact laser는 비선형 광학 (Nonlinear optics) 현상인 2차 고조파 (Second harmonic) 효과를 통해 약 450-2400 nm의 넓은 파장 대역을 가진다. 입사하는 빛의 편광 정의와 편광 상태 검출을 위해 Thorlabs 사의 편광기 (Wire grid polarizer, WP25M-VIS)를 사용하였으며, 빛의 크기를 확장시키기 위해 Thorlabs 사의 빔확장기 (Beam Expander, GBE03-A, GBE10-A)를 사용하였다. 이때, 광원에서 시준된 빛의 직경은 1.5 mm였으며, 빔확장기에 의해 대략 20 mm의 크기로 확대되었다. 또한, 공간적으로 편광 변화를 주기 위해 사용된 공간 위상 지연 소자는 Thorlabs 사의 Liquid Crystal Polymer Depolarizer (DPP25-A)를 이용하였으며, DPP25 소자는 25 μm 간격

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

의 횡방향으로 fast-axis가 2°씩 연속적으로 회전되도록 설계 및 제작되어 입사하는 빛의 편광 상태를 공간적으로 나눌 수 있었다.

한편, 브루스터 각 (Brewster's angle)으로 입사되는 타원계측기의 특성상, 입사 각도 설정을 위해 그림 3-3과 같은 보정 마운트를 설계, 제작하였으나, 매 실험마다 시편의 위치가 미세하게 바뀌게 되므로 이에 대한 보정을 진행하였다. 결상 렌즈는 Edmunds 사의 #63-731 텔레센트릭 렌즈를 사용하였으며, #63-731은 1배의 배율 (Magnification), 110 mm의 작동거리 (Working Distance), 8.8 mm (H) x 6.6 mm (V)의 측정 영역 (Field Of View, FOV)을 갖는다. 분광 정보를 획득하기 위한 영상 분광기는 SPECIM 사의 IMSPECTOR V8 제품을 사용하였으며, (1280 x 1024) 픽셀을 가지는 CCD 카메라로 측정 영상을 획득하였다. 사용한 영상 분광기와 CCD 카메라의 자세한 성능은 표 2에 나타내었다.

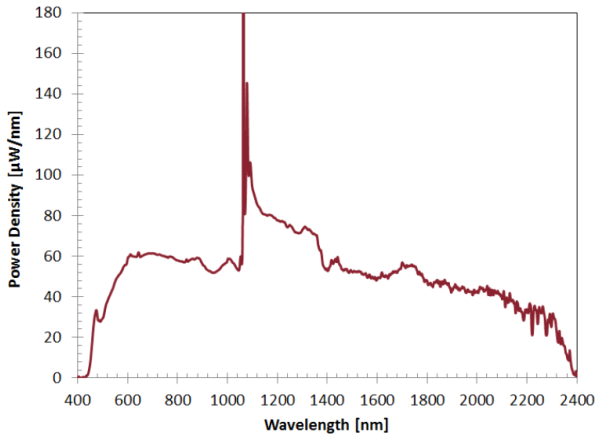


그림 3-2. 실험에 사용된 광원과 스펙트럼 (SuperK compact laser)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그림 3-3. 입사각 정의를 위한 보정 마운트

표 2. 영상 분광기와 카메라의 성능

장비		성능		
영상 분광기		Spectral Range	Slit size (width/length)	Spectral resoulution
		380 - 800 nm	50 μm/9.8 μm	3 nm
CCD Camera		Resolution	Pixel size	Sensitivity area
		1280 x 1024 pixel	4.65 x 4.65 μm	5.95 x 4.76 mm

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 시스템 변수 보정

타원계측기는 일반적인 측정기와 달리 이론값과 측정값을 이용하여 그 차이가 최소가 되도록 최적화를 진행한 후, 결과 값을 도출하는 측정기이다. 따라서 실험 전 광학 시스템의 여러 실험 변수들에 대한 보정 작업이 필수적이며, 이를 통해 타원계측기는 정밀한 측정 결과를 획득할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 변수 보정 작업을 진행하였다.

- 편광기의 편광 축 정의
- 카메라 축과 영상 분광기의 수직, 수평 축 정렬
- 분광된 영상의 파장별 카메라 픽셀 매칭
- 공간 위상 지연 소자의 수직 정렬 및 특성 분석

2.1 편광기의 편광 축 정의

타원계측기는 입사하는 빛에 대해 시편에서 반사하는 빛의 편광 변화에 따른 광량 변화량을 검출하기 때문에, 정밀한 측정을 위해 사용하는 편광기의 정확한 편광 축 각도 설정이 중요하다. 본 연구에서는 이러한 편광기의 편광 축 각도 설정을 위해 표 3과 같은 ZYGO 사의 헤테로다인 레이저 (Heterodyne laser)를 이용한 별도의 외부 편광 기준 방법을 사용하였다. ZYGO 사의 헤테로다인 레이저는 내부에 음향 광학 변조기 (Acousto-Optic Modulator, AOM)와 복굴절 물질을 이용하여 20 MHz의 차이를 가지는 2개의 서로 수직 편광을 가지는 레이저 빛을 생성해낸다. 이를 이용하면, 그림 3-4와 같이 헤테로다인 레이저 광원에서 나온 빛이 45°의 편광 축을 갖는 편광기를 지날 때, 맥놀이 신호가 가장 크게 획득된다. 그래서 본 연구에서는 광 검출기에서 가장 높은 신호가 검출이 될 때의 편광기의 편광 축을 45°로 정의하였으며, 이를 이용하여 검광기의 편광 축 방향 역시 투과 광량이 최소가 되도록 조정하여 -45°로 보정하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 3. 실험에 사용된 ZYGO 레이저

	ZYGO Laser	
	Beam Power	>400 μW
	Diameter	3 mm
	Frequency Difference	20 MHz

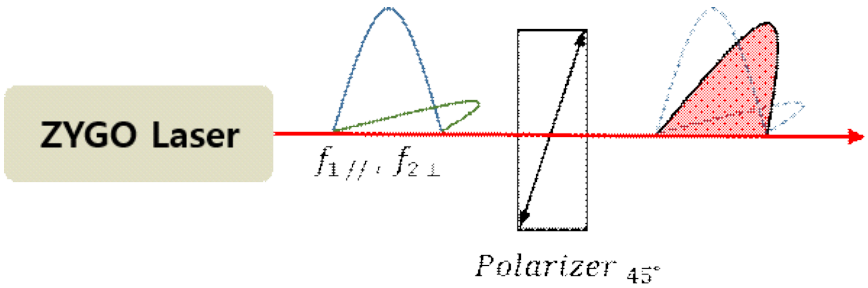


그림 3-4. 편광기 축 설정을 위한 광학 구성 및 원리

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 카메라 축과 영상 분광기의 수직, 수평 축 정렬

공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기는 그림 3-1과 같이 분광된 영상을 획득하기 위해 광 검출부에서 영상 분광기와 CCD 카메라를 사용한다. 이때, 분광된 영상이 파장에 따라 카메라의 수평 방향으로 잘 정렬되기 위해서는 영상 분광기 내에 위치한 분광 축의 슬릿과 카메라의 수평 축을 일치시키는 보정 작업이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 선폭 (Line width)이 매우 좁은 He-Ne 레이저 광원을 사용하여, 그림 3-5와 같이 획득되는 라인이 카메라의 수평 방향과 일치되도록 실험을 진행하였다. 이때, 정확한 라인 위치 결정을 위해 무게 중심법 (Center of gravity)을 이용하였으며, 영상의 양 끝 픽셀의 위치 차이가 최소가 되는 지점을 찾아 영상 분광기를 수동으로 회전시키며 수평 축을 정렬하였다.

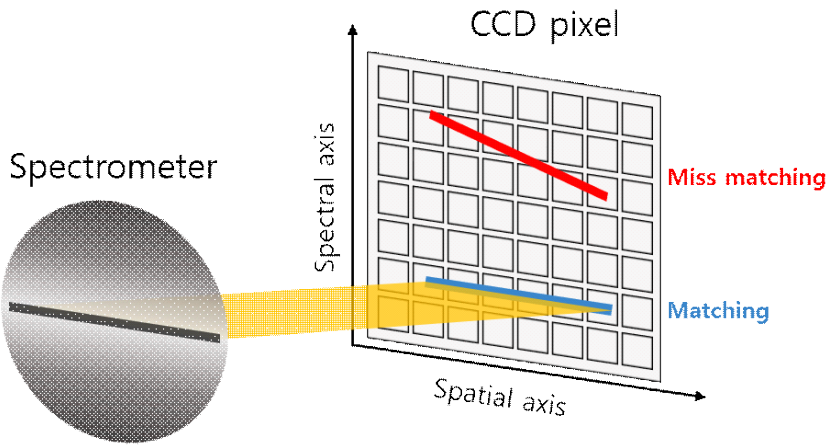


그림 3-5. 분광 축과 카메라 pixel 축 보정 작업 원리

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3 분광된 영상의 파장별 카메라 픽셀 매칭

영상 분광기와 카메라의 수직, 수평 축 정렬 이후, 그림 3-6과 같이 영상 분광기의 분광 정보와 이에 해당하는 카메라의 픽셀 정보를 맞추는 보정 작업을 진행하였다.

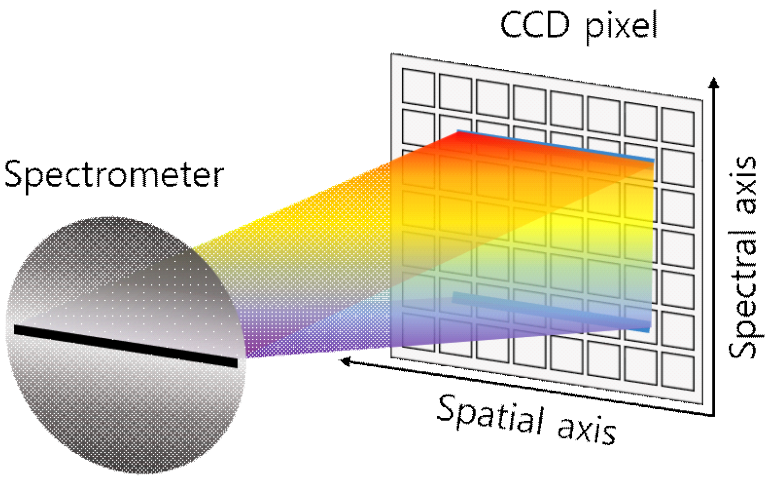


그림 3-6. 카메라 픽셀에 해당하는 파장 매칭 원리

이를 위해 본 연구에서는 사용하는 넓은 파장 대역 광원의 특정한 파장만을 추출하기 위한 Thorlabs 사의 대역 필터 (Band-pass filter)를 사용하였다. 이때 사용한 대역 필터는 반치폭 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 10 nm를 가지며, 중심 파장이 450, 500, 550, 600, 650 nm인 5개의 필터를 사용하였다. 실험 결과, 필터에 의해 획득된 영상은 그림 3-7과 같았으며, 대략 70개의 픽셀에서 빛의 세기가 검출되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 그림 3-7에서 알 수 있듯이 파장에 따라 카메라에서 검출되는 픽셀의 위치가 미세하게 다름을 확인하였다. 대역 필터를 통해 획득한 영상에서 중심 파장에 해당하는 라인을 결정하기 위해 무게 중심법을 이용하였으며, 그림 3-8과 같이 5개의 파장에 해당하는 픽셀 정보를 획득하였다. 이후 카메라의 모든 픽셀에서의 파장을 결정하기 위해 카메라의 수직 방향으로 5개의 픽셀 정보를 이용한 3차 곡선 맞춤 (Third-order polynomial fitting)을 통해 그림 3-9와 같이 카메라의 모든 픽셀에 해당

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하는 파장값을 획득하였다. 분광된 영상의 파장별 카메라 픽셀 보정 이후, 영상 분광기 내부의 광학부품들에 수차가 발생하여 그림 3-10과 같이 스마일 효과 (Smile effect)가 발생함을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 스마일 효과는 본 연구에서 진행된 영상의 파장별 카메라 픽셀 보정을 통해 실험 결과에 끼치는 영향이 최소화되었다.

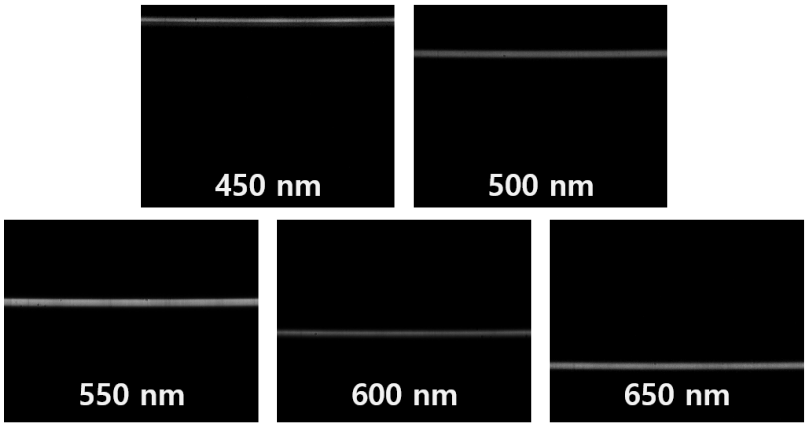


그림 3-7. 대역 필터 통과 후 획득한 영상

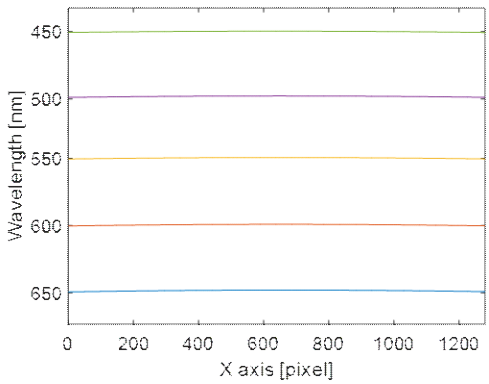


그림 3-8. 대역 필터에 해당하는 픽셀 정보

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

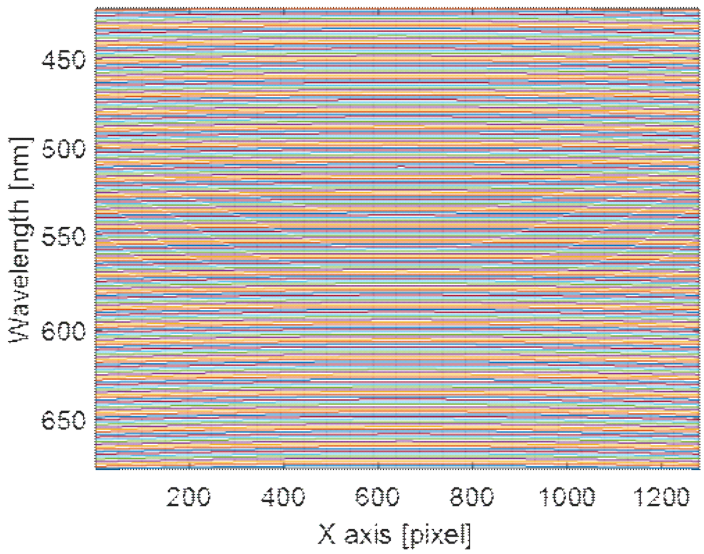


그림 3-9. 내삽을 통해 획득한 픽셀에 대한 파장 정보

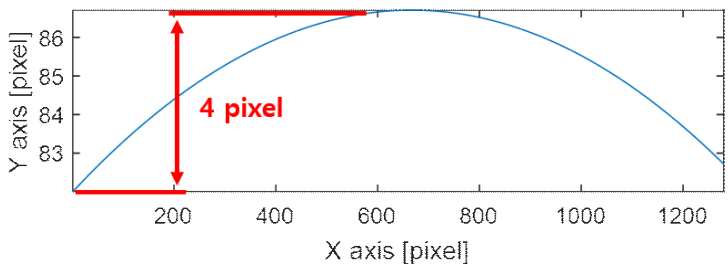
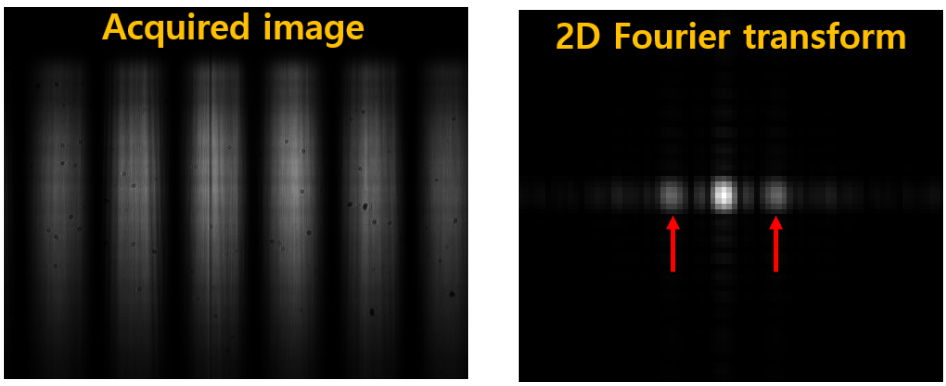


그림 3-10. 대역 필터 650 nm 사용시 발생하는 스마일 효과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.4 공간 위상 지연 소자의 수직 정렬 및 특성 분석

공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기의 핵심 부품은 공간 위상 지연 소자이며, 이를 실제 실험에 활용하기 위해서는 실험 전 액정 소자 (Liquid crystal)에 대한 정확한 특성 분석이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 획득되는 영상을 기준으로 수직 방향으로는 같은 회전 각도의 액정 소자의 배열을, 수평 방향으로는 공간 위상 지연이 발생하도록 주기적으로 회전하는 액정 소자의 배열을 정렬하였다. 먼저 액정 소자의 정확한 정렬을 확인 하기 위해 광원, 편광기, 공간 위상 지연 소자, 검광기 그리고 CCD 카메라의 일렬 (In-line) 구성을 통해 그림 3-11(a)와 같은 영상을 획득하였다. 또한, 보다 정밀하게 정렬 상태를 검증하기 위해 획득한 영상을 2차원 푸리에 변환 (2D Fourier transform)하였으며, 그 결과 그림 3-11(b)와 같이 공간 주파수 영역에서 해당하는 수평 방향 성분만이 검출됨을 확인하여, 공간 위상 지연 소자가 수평 방향으로만 공간 위상 지연이 발생함을 확인하였다.



(a) (b)

그림 3-11. (a) 공간 위상 지연 소자의 영상, (b) 2D FFT를 통해 수직 축 정렬 확인

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

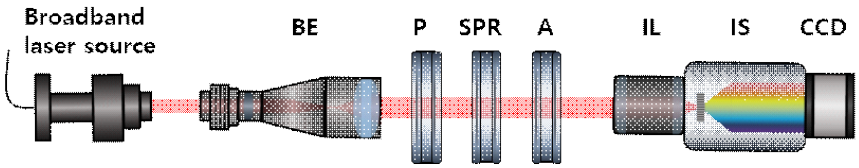
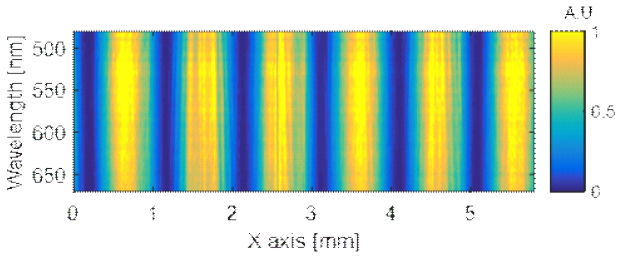
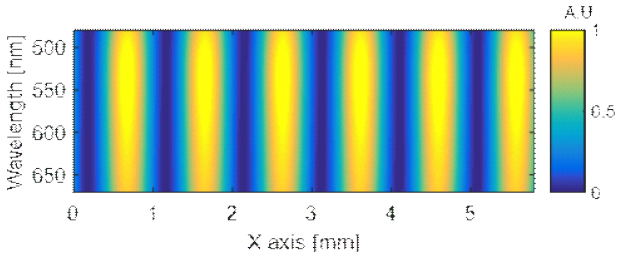


그림 3-12. 공간 위상 지연 소자의 특성 분석을 위한 광학 구성도
(BE, beam expander; P, polarizer; SPR, spatial phase retarder; A, analyzer; IL, imaging lens; IS, imaging lens CCD, CCD camera)



(a)



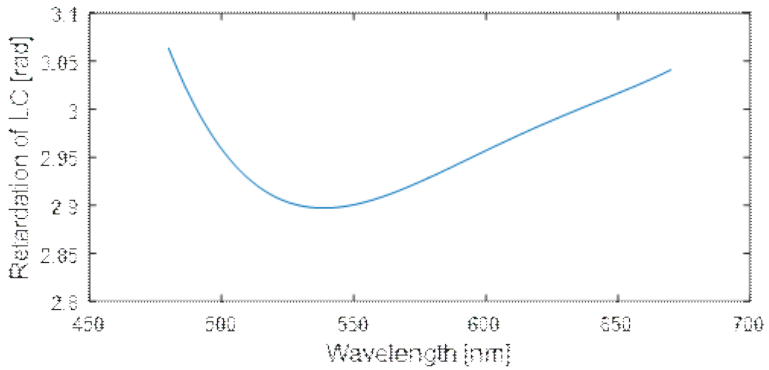
(b)

그림 3-13. 공간 위상 지연 소자의 (a) 측정, (b) 이론 모델 영상

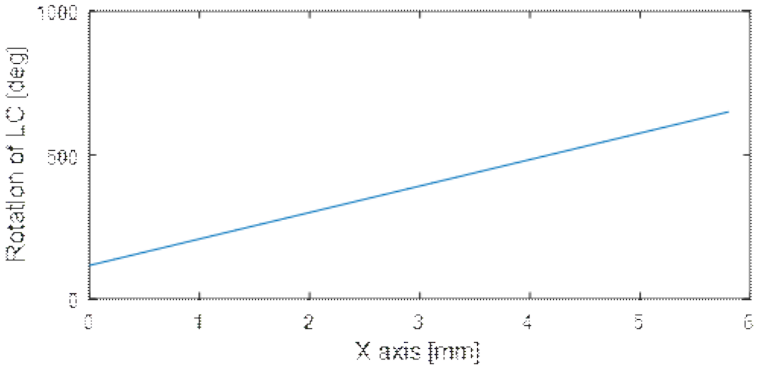
이후 공간 위상 지연 소자의 특성을 분석하기 위한 실험을 진행하였다. 그림 3-12와 같은 광학 구성을 통해 카메라에서 그림 3-13(a)와 같은 영상을 획득하였으며, 또한 액정 소자의 회전 방향과 위상을 고려한 이론적 모델을 통해 그림 3-13(b)와 같은 영상을 획득하였다. 영상에서 수직 방향은 액정 소자의 파장별 위상 지연량을 나타내며, 수평 방향으로는 액정 소자의 회전량을 의미한다. 식 (18)을 통해 공간 위상 지연 소자의 이론 모델을 구성하였으며, MATLAB 프로그램을 이용한 두 영상의 일치성 여부를

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

통해 최적화 방법으로 변수를 결정하였다. 그 결과, 그림 3-14와 같이 공간 위상 지연 소자의 파장에 따른 위상 지연량과 회전량을 획득하였고, 이때 최적화 방법을 통해 획득한 이론 모델과 측정 결과의 영상 상관관계는 그림 3-15의 결과로 판단하였다. 그림 3-15에서 알 수 있듯이 각 파장에 대한 광강도 분포에 해당하는 이론값과 측정값이 측정 잡음을 제외하고, 수평 방향의 주기와 분포가 일치하는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3-14. 공간 위상 지연 소자의 (a) 파장에 따른 위상 지연량, (b) 횡축 방향으로의 fast axis 회전량

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

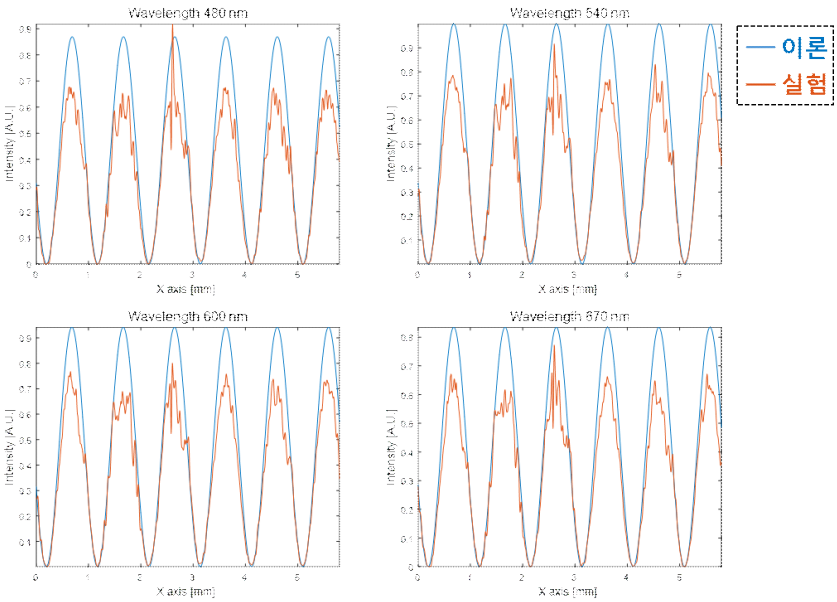


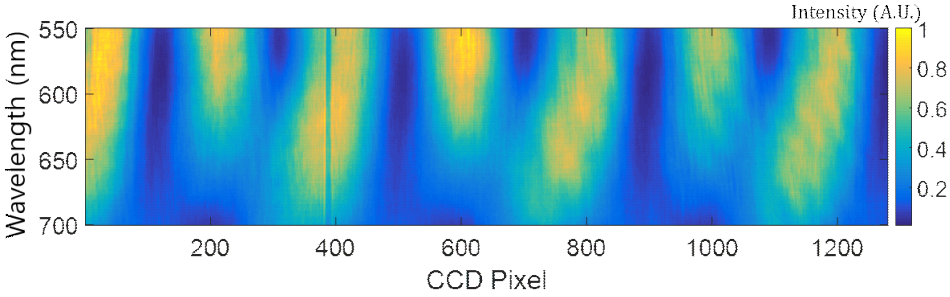
그림 3-15. 파장에 따른 위상 지연별 이론 모델링 대비 측정 결과 비교

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

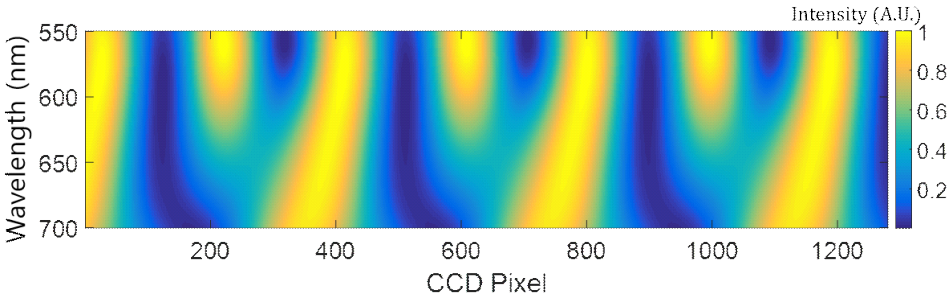
3. 실험 및 결과 분석

3.1 단층 박막 측정

시스템 보정 후, 본 논문에서 제안하는 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기를 검증하기 위해 한국표준과학연구원에서 제공한 표준시편 (Certificated Reference Materials, CRMs)을 측정하였다. 측정한 표준시편은 Si 기저판 위에 SiO_2가 단층으로 도포되어 있는 형태로, 14.3, 55.8, 110.1, 507.3 nm의 두께를 갖는 4개의 시편에 대해 실험을 진행하였다.



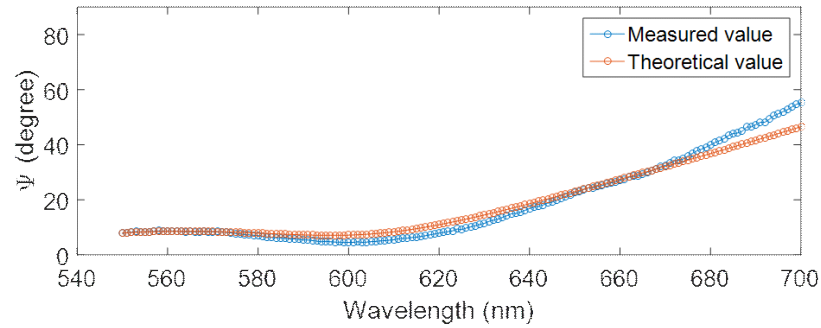
(a)



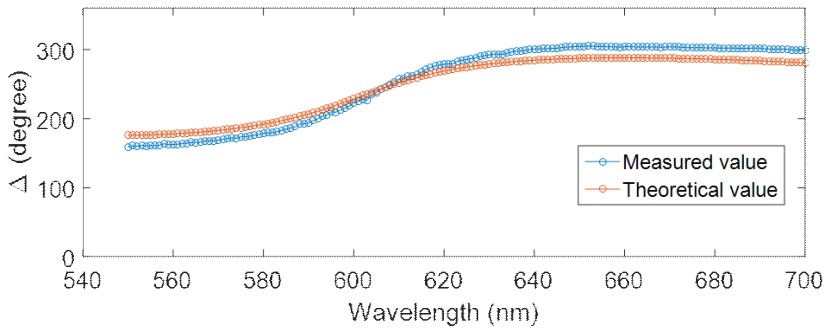
(b)

그림 3-16. 507.3 nm에 대한 (a) 실험값과 (b) 이론값 영상

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)

그림 3-17. 측정값과 이론값의 파장에 따른 (a) Ψ와 (b) Δ 크기 비교

그림 3-16은 각각 507.3 nm의 단층 시편에 해당하는 측정 및 이론 영상을 나타낸다. 그림 3-16에서 알 수 있듯이, 두 영상의 주기와 형태가 매우 유사한 경향을 보이며, 또한 획득 영상을 통해 Ψ와 Δ값을 추출한 결과 그림 3-17과 같이 측정값과 이론값이 매우 근접함을 확인하였다. 이러한 최적화 과정을 통해 표준시편에 대한 박막 두께를 측정한 결과, 14.1, 54.6, 110.4, 506.2 nm의 결과값을 획득하였으며, 15번 반복 측정 결과 1 nm의 반복능을 획득할 수 있었다. 단층 박막 표준시편 실험을 통해 본 논문에서 제안하는 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기로 박막 두께 측정이 가능함을 확인하였고, 이를 통해 일반적인 타원계측기의 기계적 구동부를 제거할 수 있음을 확인하였다.

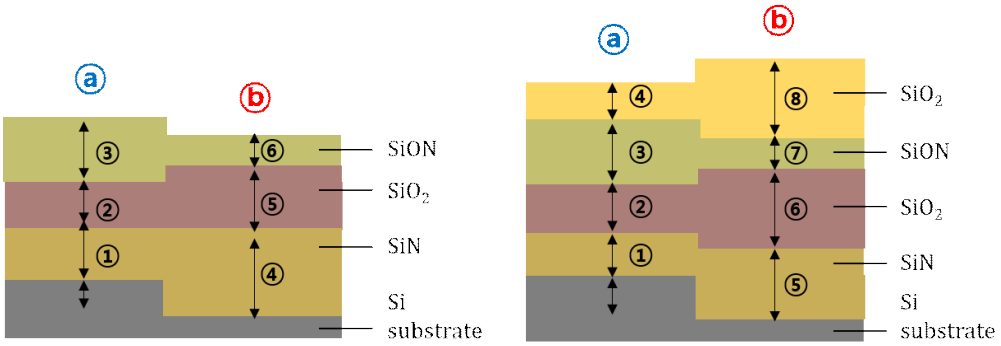
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2 다층 박막 측정

표준시편 측정 실험 이후, 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기로 다층 박막 시편에 대해 측정 실험을 수행하였다. 실험을 위해 그림 3-18과 같이 Si 기저판 위에 SiON-SiO_2-SiN의 3층 박막이 도포되어 있는 시편과 SiO_2-SiON-SiO_2-SiN의 4층 박막이 도포된 시편을 사용하였다. 3층 및 4층 박막 시편은 모자이크 패턴으로 제작되어 각 시편은 서로 다른 두께를 갖는 두 개의 영역으로 나뉘어 구성되었다. 제조사가 제공한 박막 두께 사양과 제안하는 시스템을 이용하여 두 개의 영역에 대해 측정 실험 결과를 표 4로 정리하였다. 또한, 실험 결과의 신뢰성 확보를 위해 일반적인 PC_RSA 구성의 타원계측기를 이용하여 측정 결과와 비교하였다. 그 결과, 대략 10 nm 수준의 박막 두께 편차를 보이고 있기는 하나, 측정된 박막 두께 값이 기존의 타원계측기의 측정 결과 값과 매우 근접함을 알 수 있었다.

측정 결과 발생한 오차는 실험에 사용된 공간 위상 지연 소자의 보다 명확한 특성 분석과 빛의 입사 각도에 대한 보정 미흡 등으로 발생되었다고 판단되며, 이를 보완하기 위해서는 보다 세밀한 보정 연구가 필요하다. 한편, 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기는 점 측정이라는 한계를 가지고 있지만, 단일 영상만을 이용하여 실시간으로 단층 박막뿐만 아니라 다층 박막의 두께 측정이 가능함을 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

그림 3-18. (a) 3층 (b) 4층에 해당하는 다층 시편 모식도

표 4. 다층 박막 측정 결과

(Unit: nm)

Three-layered Film Specimen				Four-layered Film Specimen			
Layer	Provided	PC_RSA	Suggested System	Layer	Provided	PC_RSA	Suggested System
Point ⓐ							
①	125	123.5	121.6	①	61	57	58.6
②	125	113.6	114	②	89	83.7	84.2
③	135	124.6	127.0	③	123	116.5	122.0
-				④	60	54.9	56.4
Point ⓑ							
④	135	124.9	116.9	⑤	76	82.4	83.5
⑤	160	159.6	153.0	⑥	150	159.9	152.3
⑥	46	64.4	57.5	⑦	78	75.0	63.1
-				⑧	123	120.1	131.2

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절 편광 카메라 기반 분광 타원계측기

제3장 1절에서는 단일 영상으로 한 점에 해당하는 다층 박막의 두께를 측정할 수 있는 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기를 구성하고 실험적으로 검증하였다. 제2절에서는 단일 영상 획득을 통해 박막의 라인 측정이 가능한 편광 카메라 기반 분광 타원계측기에 대한 광학 구성과 시스템 변수 보정 작업 그리고 실험 결과에 대해 상세히 설명한다.

1. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 구성

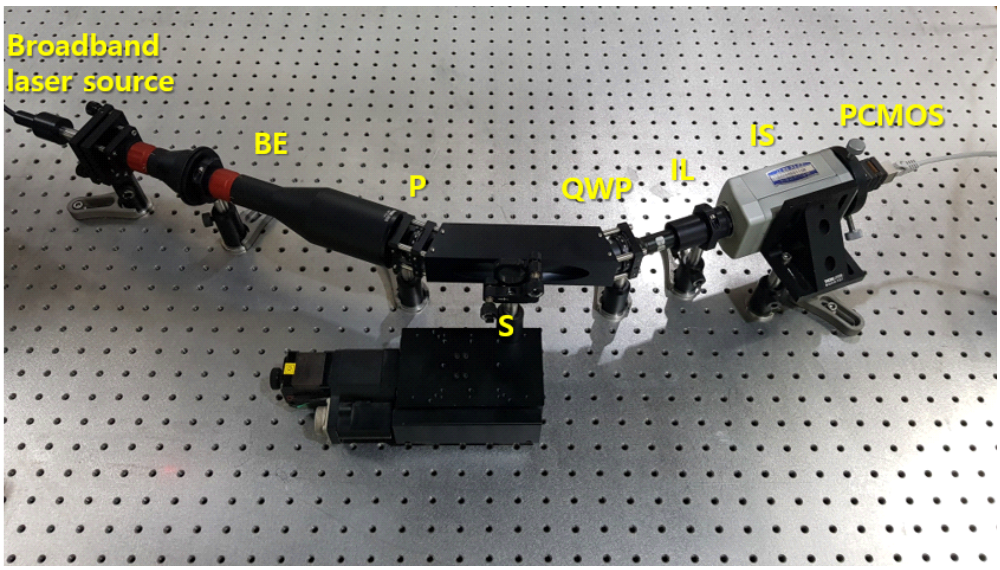


그림 3-19. 편광 카메라를 이용한 타원계측기 구성도
(BE, beam expander; P, polarizer; S, specimen; QWP, quarter wave plate; IL, imaging lens; IS, imaging spectrometer; PCMOS, polarizing-pixelated CMOS camera)

본 논문에서 제안하는 단일 영상을 통한 다층 박막 라인 두께 측정 검증을 위해 그림 3-19와 같이 편광 카메라 기반 분광 타원계측기를 구성하였다. 광학 구성은 제3장

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1절의 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기와 동일하게 SuperK compact laser를 광원으로 사용하였으며, 빔확장기 (3x, 15x), 45°의 투과 축을 갖는 편광기와 λ/4 위상 지연판 (AQWP10M-580), 결상 렌즈 (110 mm, 1x), 영상 분광기 (V8, Specim)를 이용하여 시스템을 구현하였다. 영상 획득을 위한 장치로는 그림 3-20과 같이 LUCID 사의 PHX050S-P 편광 카메라를 이용하였다. PHX050S-P는 (2448 x 2048)의 픽셀 분해능을 가지며, 픽셀 크기 3.45 μm, 24 fps의 영상 획득 속도 (Frame rate)를 갖는다. 또한, 본 실험에서는 3차원 대면적 측정을 위해 100 nm의 분해능을 갖는 Suruga Seiki 사의 X축 선형 구동기를 사용하였다.

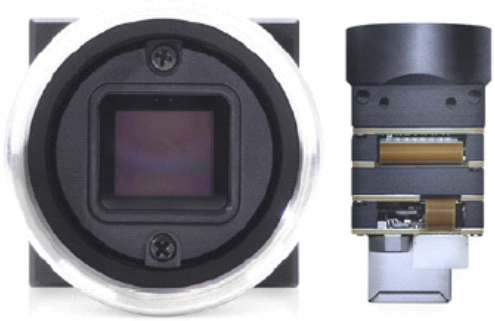


그림 3-20. 실험에 사용된 LUCID 사의 편광 카메라

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 시스템 변수 보정

제3장 1절의 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기와 동일하게, 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 역시 실험 전, 시스템 변수 보정 작업이 필수적이며 이를 위해 아래와 같은 보정 작업을 수행하였다.

- 편광기의 투과 축 및 λ/4 위상 지연판의 fast axis 축의 45° 설정
- 편광 카메라 축과 영상 분광기의 수직, 수평 축 정렬
- 분광된 영상의 파장별 편광 카메라 픽셀 매칭

이중에서 편광기의 45° 투과 축 설정과 영상 분광기의 분광 축과 편광 카메라의 수직, 수평 축 정렬의 보정 작업은 앞선 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기와 동일한 방법으로 진행되었기에 설명을 생략하기로 한다.

2.1 λ/4 위상 지연판의 45° 투과 축 설정

실험에 사용된 λ/4 위상 지연판의 fast axis 축의 45° 설정을 위해 그림 3-21과 같이 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 광원은 Thorlabs 사의 Fiber-Coupled Laser Source로 660 nm의 중심파장과 25 mW의 최대 출력을 가지고 있다. 광원의 빛은 단일 모드 광섬유 (Single Mode Fiber, SMF)를 통해 전달되어 시준 렌즈를 통해 광학계에 입사된다. 시준된 빛은 보정된 45° 회전된 편광기를 지나 s-편광된 빛이 편광 광분할기 (Polarizing Beam Splitter, PBS)에서 반사된다. 이때, 반사된 빛은 다시 거울 반사에 의해 편광 광분할기로 돌아오면서 λ/4 위상 지연판을 왕복하기 때문에, 이에 따라 편광 상태가 바뀌게 되며 λ/4 위상 지연판의 fast axis 축이 45°로 회전된 경우, p-편광 상태가 된다. 그러면 p-편광된 빛은 편광 광분할기에서 모두 투과되어 광검출기에서 가장 강한 광 세기로 검출된다. 본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 λ/4 위상 지연판의 fast axis의 축을 45°도 조정하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

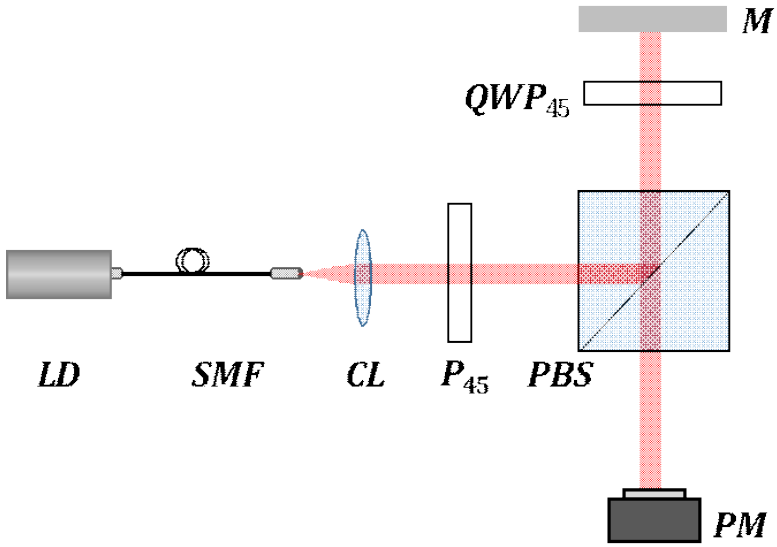


그림 3-21. λ/4 위상 지연판의 45° 투과 축 정의를 위한 광학 구성
(LD, laser diode; SMF, single mode fiber; CL, colimator; P, polarizer; PBS, polarizing beam splitter; QWP, quarter wave plate; M, mirror; PM, power meter)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 분광된 영상의 파장별 편광 카메라 픽셀 매칭

제안하는 편광 카메라 기반 분광 타원계측기도 역시 결상된 분광 영상 분석을 위해 카메라 픽셀에 해당하는 파장 정보를 결정해야한다. 그러나 제3장 1절에서 설명한 카메라 픽셀 매칭과는 달리 편광 카메라는 (2 x 2) 픽셀 단위를 기준으로 동일한 공간 및 파장 정보를 가져야 하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 우선 실험에서 550, 600, 650, 750, 800 nm의 중심 파장을 갖는 10 nm 반치폭의 대역 필터를 사용하여 파장별 편광 카메라 픽셀 맞춤 실험을 수행하였다. 각각의 파장 라인은 획득된 영상의 대략 110개의 픽셀에서 검출되는 것을 확인할 수 있었고, 이때 획득된 영상은 편광 카메라가 가지는 편광 픽셀 (0°, 45°, 90°, 135°)에 해당하는 4개의 영상으로 분할하여 적용하였다. 이렇게 편광에 따라 분할된 각각의 영상에 무게 중심법을 적용하여 중심 파장에서의 픽셀을 결정하였고, 또한 제3장 1절에서와 동일하게 3차 곡선 맞춤을 이용하여 전체 카메라 픽셀의 파장을 결정하였다. 그림 3-22는 파장별 편광 카메라 픽셀 매칭 과정 및 실험 결과를 나타낸다. 이를 통해 편광 카메라의 편광 픽셀에 해당하는 파장 정보를 각각 결정하였으며, 이를 통해 편광 카메라 기반 분광 타원계측기로 박막 두께 측정 실험을 수행하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

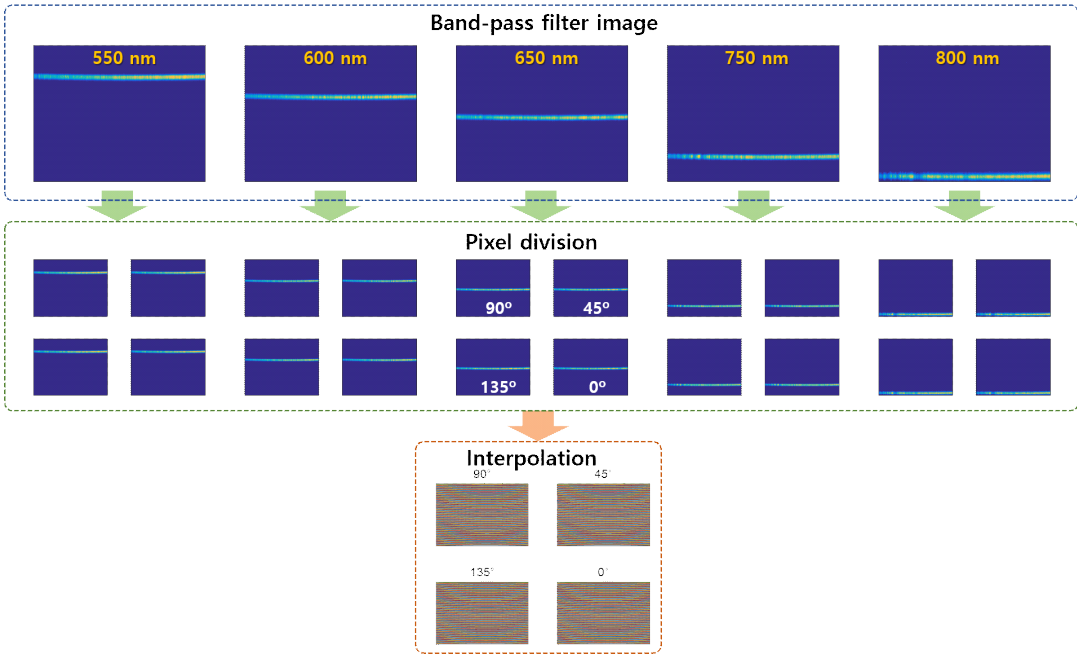


그림 3-22. 편광 카메라의 파장 매칭 원리

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 실험 및 결과 분석

3.1 단층 박막 측정

전체적인 시스템 변수에 해당하는 보정 작업을 수행한 후, 편광 카메라의 정상적인 동작 확인을 위한 실험을 수행하였다. 광원과 45° 투과 축을 갖는 편광기, 결상렌즈, 영상 분광기 그리고 편광 카메라를 일렬로 구성하여 4개의 편광 픽셀(0°, 45°, 90°, 135°)의 영상을 확인하고 이를 통해 시스템이 잘 동작하고 있음을 확인하였다. 실험 결과 그림 3-23과 같이 45°에 해당하는 픽셀에서 가장 강한 광 세기를 갖으며, 0°와 90°에서는 동일한 광강도를 그리고 135°에서는 빛이 검출되지 않는 것을 확인하였다. 이로써 편광기와 편광 카메라의 투과 축 설정에 대한 보정이 잘 되었으며, 편광 카메라가 원리대로 잘 동작하고 있음을 확인하였다.

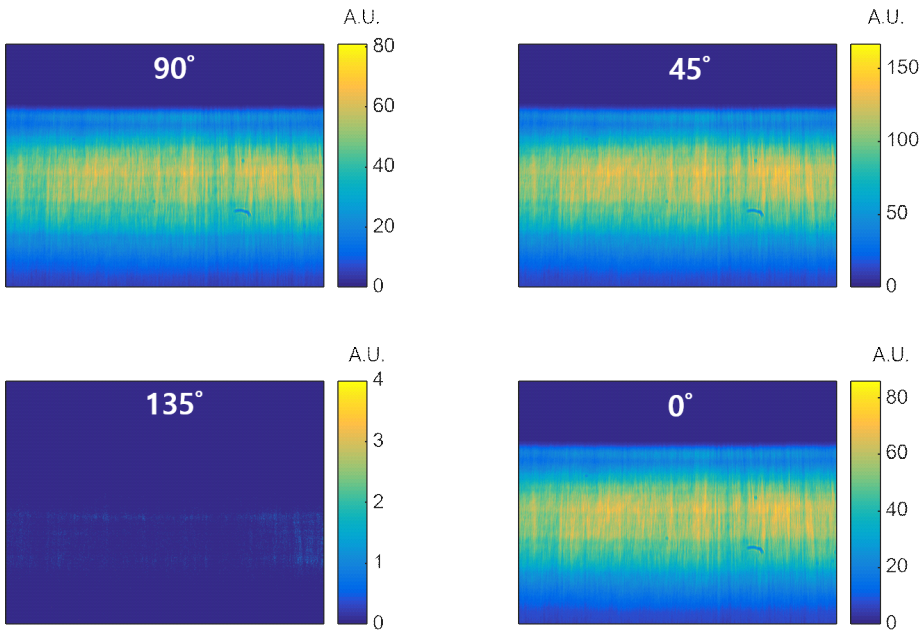


그림 3-23. 편광 카메라에서의 편광 검출 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

편광 카메라 기반 분광 타원계측기의 성능 검증을 위해 제3장 1절의 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기에 사용되었던 단층 표준시편 (14.3, 55.8, 110.1, 507.3 nm)을 이용하였으며, 타원계측기의 측정값 Δ와 β의 계산을 위해 식 (20)과 식 (21)을 사용하여 박막 측정 분석을 진행하였다. 그 결과, Δ와 β는 그림 3-24와 같이 획득되었으며, 박막의 두께는 각각 16.3, 53.8, 112.1, 508.2 nm로 측정되었다. 또한, 제안하는 시스템은 라인에 해당하는 박막 두께 측정이 가능하기 때문에 이를 이용해 그림 3-25와 같은 측정 결과를 획득했다.

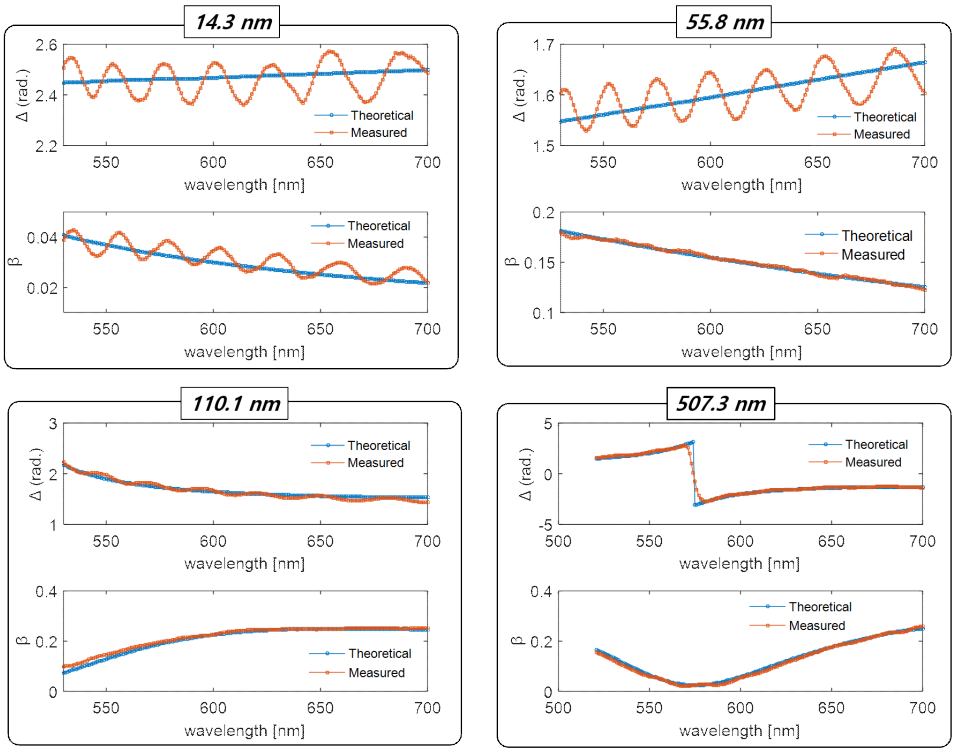


그림 3-24. 단층 박막 시편의 Δ, β값 획득 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

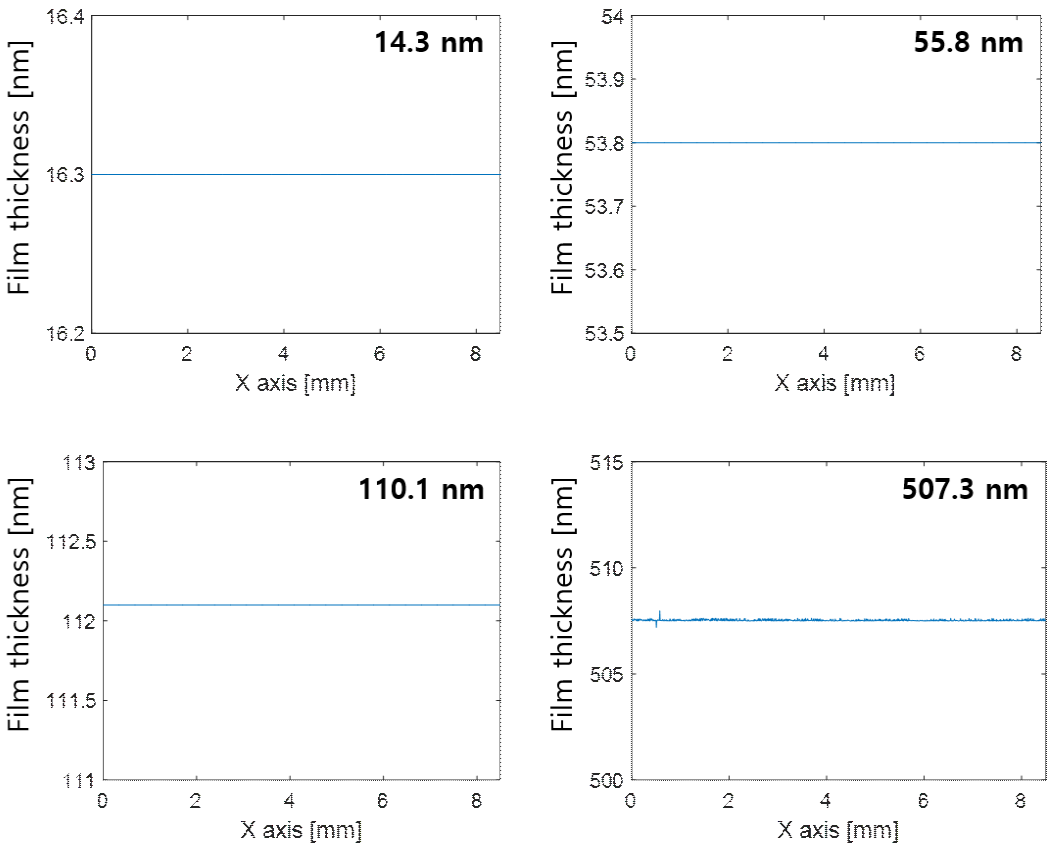


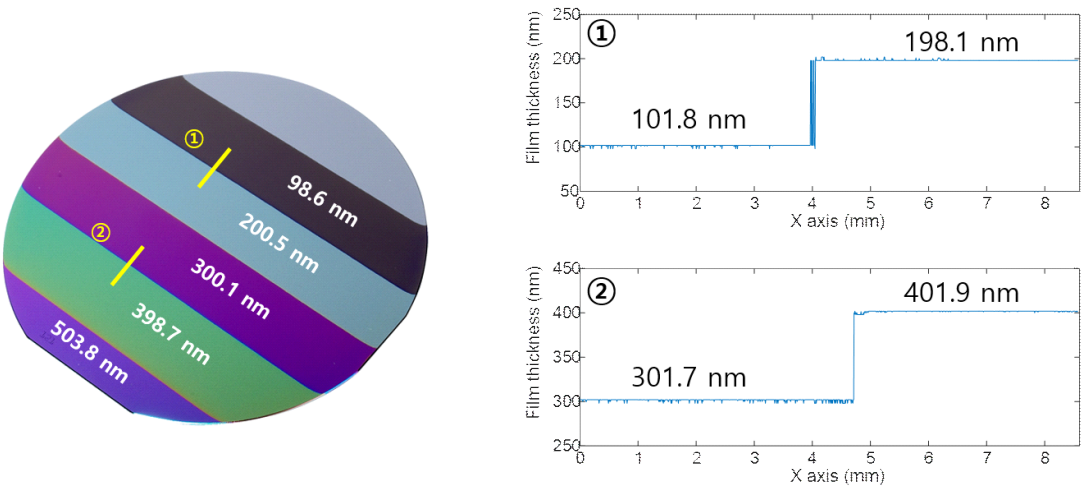
그림 3-25. 박막 라인 측정 결과

그림 3-24를 살펴보면 박막의 두께가 얇아질수록 측정값의 흔들림 (Oscillation) 현상을 확인할 수 있다. 이는 복굴절 물질로 구성된 λ/4 위상 지연판 내부에 형성된 공기층에 의해 생기는 간섭현상으로 판단되며, 얇은 박막에서는 흔들림 현상이 더 뚜렷하게 확인되는 것으로 생각된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.2 단차 박막 측정

편광 카메라 기반 분광 타원계측기는 박막의 라인 측정이 가능하기 때문에 이를 검증하기 위해 그림 3-26(a)와 같은 Si 기저판 위에 SiO_2가 단층으로 도포되어 있는 Ocean Optics 사의 박막 단차 시편 (Step film wafer)에 대해 실험을 수행하였다. 박막 단차 시편은 전체 6층으로 나뉘어져 있으며, 0 nm - 500 nm까지 100 nm의 두께 차이를 보인다. 그림 3-26(b)는 박막 단차 시편의 (100 nm - 200 nm), (300 nm - 400 nm) 단차 경계를 측정한 결과를 보여준다. 그 결과, 그림 3-26(b)에서 알 수 있듯이, 측정된 박막 두께는 제조사 제공 두께와 비슷한 결과값을 보였으며, 이를 통해 서로 다른 박막 두께를 갖는 시편의 측정이 가능함을 확인하였다.



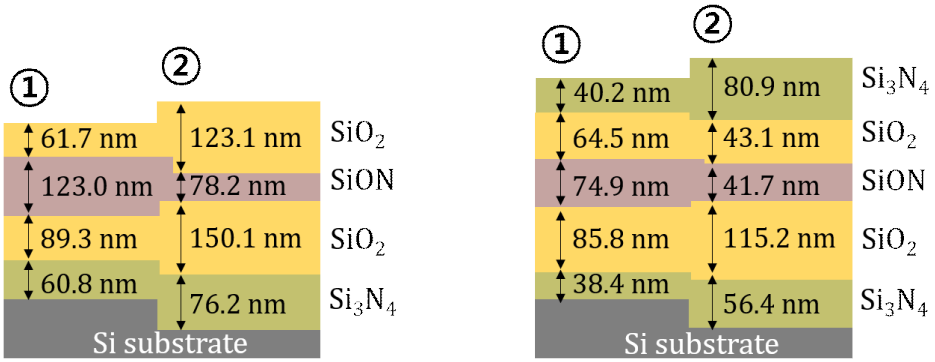
(a) (b)

그림 3-26. (a) 단차 시편 측정 결과와 (b) 경계 측정 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.3 다층 박막 측정

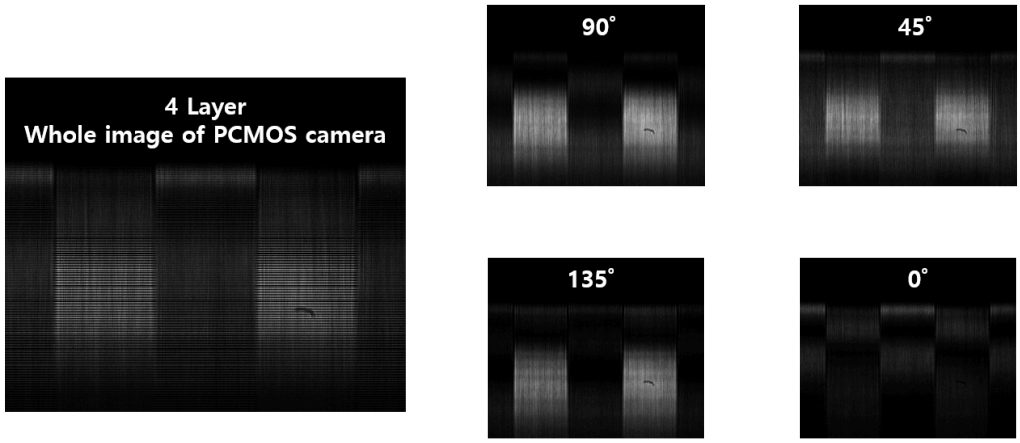
최종적으로 본 연구에서 제안하는 시스템을 이용하여 다층 박막 측정을 위한 실험을 진행하였다. 측정 시편은 그림 3-27과 같이 Si 기저판 위에 SiO_2-SiON-SiO_2-Si_3N_4의 4층 박막과 Si_3N_4-SiO_2-SiON-SiO_2-Si_3N_4의 5층 박막이 도표된 시편을 사용하였다. 그림 3-28는 편광 카메라에서 획득된 영상을 나타내며, 획득된 영상은 편광 픽셀에 대해 각각 4개의 영상으로 분할되어, 식 (21)을 이용하여 Δ와 β를 계산하였다. 동시에 그림 3-29와 같이 이론 값과의 비교를 통해 박막 두께를 측정하였으며, 최적화를 통해 그림 3-30과 같이 두께 값을 결정할 수 있었다.



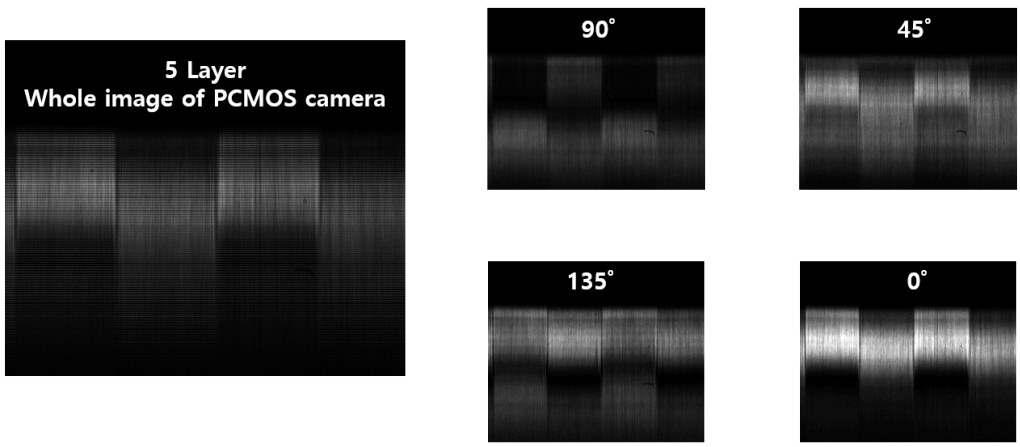
(a) (b)

그림 3-27. (a) 4층 박막과 (b) 5층 박막 모형도

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



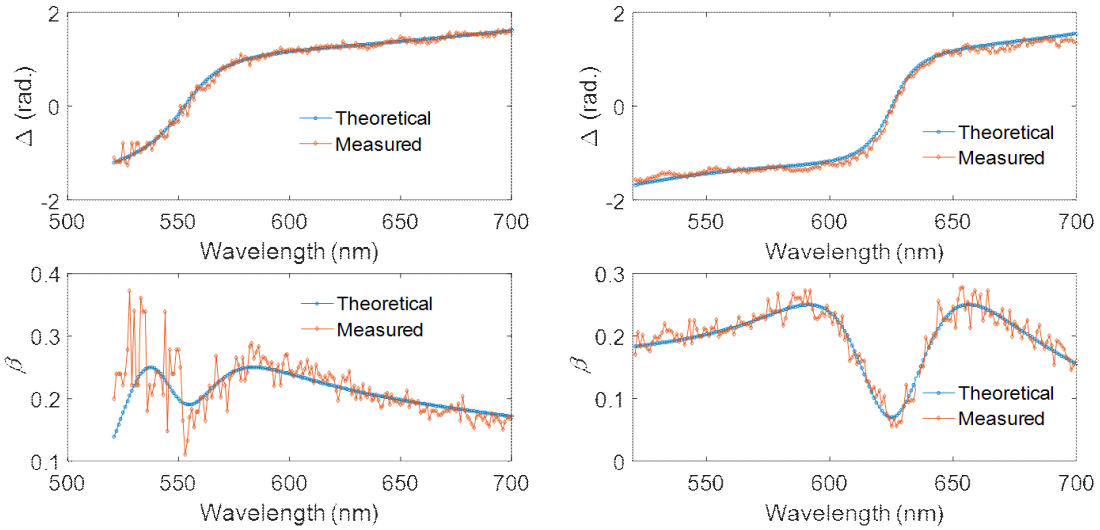
(a)



(b)

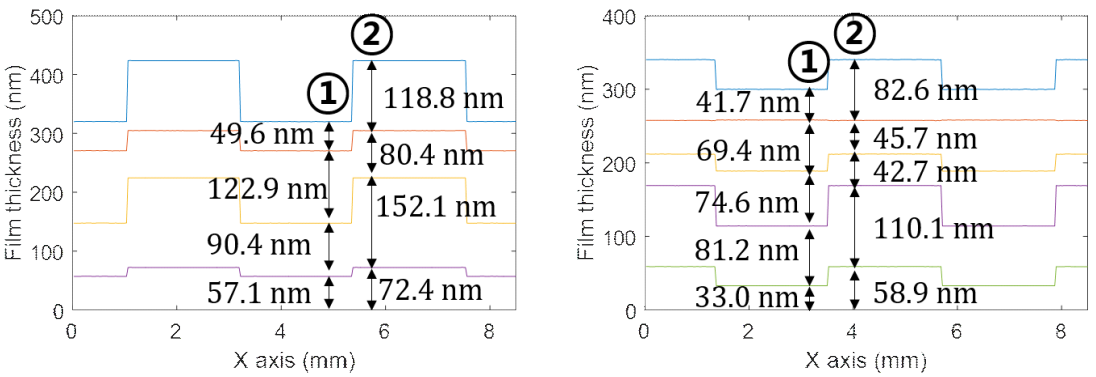
그림 3-28. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막에 대한 획득 영상과 분할된 영상

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

그림 3-29. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막에 대한 Δ와 β 결과값



(a) (b)

그림 3-30. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막 두께 측정 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3차원 대면적 박막 측정을 위해 횡축 방향 구동기를 사용하여 4층과 5층 박막에 대해 실험을 진행하였으며, 측정 과정은 앞서 설명한 단일 라인 측정 방법과 동일하게 진행되었다. 130 μm 간격으로 구동기를 동작시키면서 100 라인에 해당하는 영상을 획득하였으며, 이를 분석하여 3차원 박막 측정을 수행하였다. 이때 측정 영역은 8.5 mm (H) x 13 mm (V) 였으며, 그림 3-31은 이 중에서 박막이 도포된 영역인 8.5 mm (H) x 8.5 mm (V)에 대한 영역만을 나타내었다. 본 실험을 통해 제안하는 편광 카메라 기반 분광 타원계측기는 단일 영상을 통해 라인에 대한 다층 박막 두께 분석이 가능하고, 또한 스캔을 통해 빠른 속도로 대면적 측정이 가능함을 확인하였다.

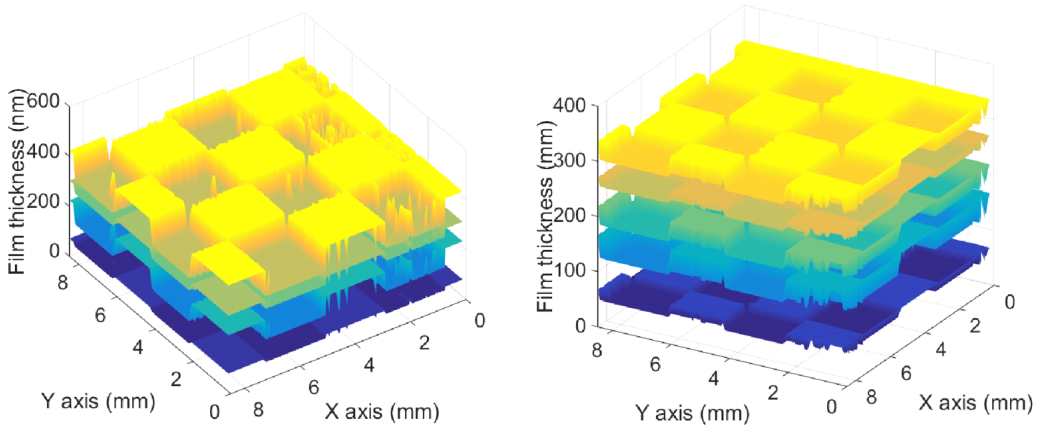


그림 3-31. (a) 4층 박막, (b) 5층 박막에 대한 면적 측정 결과

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 고찰 및 논의

본 논문에서는 한 점과 라인에 대한 다층 박막의 두께를 단일 영상으로 측정하기 위한 시스템을 구성하고 이를 실험적으로 검증하였다. 제안하는 두 시스템의 오차요인은 다음과 같이 각각 나눌 수 있으며, 시스템의 성능 개선을 위해서는 이를 고려해야 한다.

- 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 오차요인
- 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 오차요인

1. 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기 오차요인

본 연구에서는 단일 영상으로 한 점에 대한 다층 박막의 두께 측정을 위해 공간 위상 지연 소자를 사용하여 시스템을 구성하였으며, 측정 오차요인은 다음과 같다.

- 사용하는 광원의 파장 대역
- 광강도 및 파장 분포의 균일성과 안정성
- 공간 위상 지연 소자의 특성

본 연구에서 사용된 광원의 파장 범위는 대략 450-2400 nm의 넓은 파장 분포를 가지지만, 가시광 대역 (400-700 nm)을 갖는 광학 부품들로 인해 사용 파장이 한정적이다. 또한, 제3장에서 진행한 카메라 픽셀에 대한 파장 매칭 작업 결과에 의해 실험 분석에 사용된 파장 범위는 550-700 nm로 고정 사용하였다. 이는 일반적인 타원계측기에서 사용되는 200-1000nm 파장 범위보다 비교적 좁기 때문에 초박막 또는 다층 박막 측정 결과에 영향을 준다. 따라서 보정 작업 및 광학부품의 파장대역을 넓히는 작업이 진행되면 보다 정밀한 측정이 가능할 것으로 보인다.

두 번째로 입사하는 광의 광강도 균일도가 측정 결과의 오차요인으로 작용했다. 본 연구에서는 편광 변화를 공간적으로 나누어 사용하는 공간 위상 지연 소자의 내부 구

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

조로 인해, 입사하는 광의 광강도 균일도 및 안정성이 나빠지게 되면 이론적으로 구성한 위상 지연량의 값에 오차가 발생하여 원하는 위상 지연 정보 획득이 불가능하게 된다. 또한, 일시적으로 변화하는 파장 분포 역시 측정 이미지와 이론적 이미지의 차이를 발생시키고 최적화 진행시 오차요인으로 작용된다.

마지막으로 가장 큰 오차요인은 보정작업에서 발생하였으며, 특히 공간 위상 지연 소자의 특성 분석에서의 오차가 실험 결과에 큰 영향을 끼쳤다. 실제 실험에 사용된 소자는 본 실험을 위해 그림 3-14와 같은 결과로 보정 작업이 진행되었지만, 복굴절 물질의 정확한 위상 지연량, fast axis의 회전량을 보다 정확하게 결정할 필요가 있다. 이론 모델을 위해 존스 행렬을 이용하여 구성하였지만, 보다 많은 파라미터를 이용하여 분석이 가능한 뮬러 행렬을 사용하면 더 정확한 결과값을 획득할 것으로 판단된다.

2. 편광 카메라 기반 분광 타원계측기 오차요인

본 논문에서 제안하는 편광 카메라를 기반으로 하는 시스템은 다음과 같은 한계점 및 오차요인을 가진다.

- 편광 카메라 특징에 따른 공간 분해능 저하
- 편광 소자 및 광학부품에 따른 오차

먼저 편광 카메라의 특징에 대해서는 앞선 제2장에서 상세히 설명하였다. 카메라 영상 소자 앞단에 편광 소자가 (2 X 2) 픽셀 단위로 구성되어 있기 때문에 인접한 픽셀에 동일한 박막 정보가 맺혀지지 않는 문제점이 발생한다. 이에 더해, 일반 CMOS 카메라에 비해 공간 분해능이 저하되는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 편광 카메라 두 대를 사용하여 인접한 픽셀을 각각 결상하여 보완하는 방법, 핀홀 또는 회절 소자의 사용으로 입사빔을 각 픽셀에 나누어 입사시키는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 이 경우, 시스템 자체가 복잡해지고 어려운 보정 작업을 수행해야 하는 어려움이 있다. 한편, 고배율의 대물렌즈를 사용하여 해상도를 높이는 방법을 통해 이러한 오차를 최소화할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

두 번째로 시스템에 사용되는 광학부품의 보정 작업에서 발생하는 오차를 생각할 수 있다. 예를 들어 정확한 편광기의 효율, λ/4 위상 지연판의 위상 지연에 따른 파장 의존성 그리고 결상 렌즈와 영상 분광기에서 발생하는 색수차 등이 오차 요인으로 작용한다. 특히, 그림 3-24의 결과를 보면 얇은 박막에서 빛의 흔들림 현상이 더욱 뚜렷하게 보이는 것을 볼 수 있는데, 이는 λ/4 위상 지연판 내부 공기층에서 발생하는 다중 반사에 의한 것으로 판단된다. 따라서 시스템 구성에 앞서 각 광학부품에 대한 명확한 보정작업을 수행한다면 보다 정확한 결과값을 획득할 것으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장 결론

본 논문에서는 단일 영상을 통해 점과 라인에 대한 다층 박막 두께 측정 시스템을 제안하고 구성하였으며, 두 시스템의 측정법에 대한 이론 확립과 기초실험을 진행하였다. 이를 통해 단층, 다층 박막 시편에 대해 단일 영상으로 두께 측정이 가능함을 확인하였다. 또한 측정 실험 전, 필수적으로 요구되는 보정작업을 진행하여 시편에 대한 이론적 모델 구성을 통해 측정 결과의 정확도와 신뢰성을 향상 시켰다.

먼저, 제안하는 첫 번째 시스템으로 공간 위상 지연 기반 분광 타원계측기는 박막 시편의 한 점에 해당하는 두께를 단일 영상으로 측정이 가능한 특징을 갖는다. 기존의 타원계측기는 편광 변화를 위해, 시간적으로 회전하는 편광기 등을 이용하기 때문에 측정 시간이 다소 걸리는 한계가 있었다. 하지만 제안하는 시스템은 공간적으로 편광 변화를 줄 수 있는 소자를 사용하여 파장에 따른 편광 변화량이 단일 영상에 포함되어 시간적 편광 변화 없이 박막 두께 측정이 가능한 장점을 갖는다. 제안하는 시스템을 검증하기 위해 14.3, 55.8, 110.1, 507.3 nm의 두께를 갖는 단층 박막을 측정하였으며, 이후 3층과 4층에 해당하는 다층 박막 측정 실험을 진행하였고, 15번 반복측정을 통해 1 nm 이하의 반복능을 갖는 것을 확인하였다.

두 번째로 한 라인에 해당하는 박막 두께 프로파일에 대해 단일 영상으로 분석이 가능한 편광 카메라 기반 분광 타원계측기를 제안하고 검증하였다. 실험에 앞서 편광 소자, 광학부품에 대한 보정작업을 수행하였으며, 시스템 검증을 위해 14.3, 55.8, 110.1, 507.3 nm의 두께를 가지는 단층 박막을 측정하였다. 또한 라인 두께 측정이 가능함을 확인하기 위해 박막 단차를 가지는 step wafer를 측정하였으며, 이후 임의의 패턴을 가지는 4층, 5층에 대한 다층 박막 측정 실험을 수행하였다. 그 결과, 단층 및 다층 박막에 대해 단일 영상으로 박막의 두께 프로파일 측정이 가능함을 확인하였다. 또한, 130 um 간격, 100 라인의 횡방향 스캔을 통해 시편에 해당하는 8.5 mm (H) x 13 mm (V)에 대한 3차원 박막 두께 측정을 수행하였다. 이때 획득한 결과의 신뢰성 확보를 위해 20번 반복측정한 결과, 1 nm 이하의 반복능을 획득하였다.

본 연구에서 제안하는 두 시스템의 오차요인으로는 광학계, 측정 시편의 정렬 상태, 결상렌즈 및 영상 분광기의 수차 그리고 미흡한 보정작업을 생각할 수 있다. 입사하는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

광의 각도를 보정하기 위한 마운트 제작을 통해 광학계 및 시편의 정렬의 오차를 줄였으며, 수차에 대한 오차를 보정작업의 결과에 적용시켜 오차를 감소시켰다. 그러나 미흡한 보정작업은 추가적인 실험을 통해 보다 나은 실험 결과값을 도출할 수 있을 것으로 판단한다.

결론적으로 본 논문에서 제안하는 두 가지의 단일 영상 분광 타원계측기 시스템은 기초적인 실험 및 검증이 진행되었으며, 추후 보완된 분석 방법을 통해 보다 다양한 시편에 대한 성능 검증이 이루어지면, 산업계에서 요구하는 대영역의 빠른 박막 측정 분야에 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[참고문헌]

[1] G. S. Mathad, “Thin film materials, process, and reliability,” The Elctrochemical Society 6(12), (2008).

[2] P. K. BASU, “Theory of optical processes in semiconductors,” Oxford Science Publications, (1997).

[3] 최유화, “광계측기기 시장 동향 및 전망,” The Optical Journal, 18-24 (2007).

[4] S. H. Ahn and L. J. Guo, “High-speed roll-to-roll nanoimprint lithography on flexible plastic substrates,” Advanced Materials 20(11), 2044-2049 (2008).

[5] F. C. Krebs, “Polymer solar cell modules prepared using roll-to-roll methods: Knife-over-edge coating, slot-die coating and screen printing,” Solar Energy Materials and Solar Cells 93(4), 465-475 (2008).

[6] K. Tanaka, “A preparation method for observing intracellular structures by scanning electron microscopy,” Journal of Microscopy 133(2), 213-222 (1984).

[7] L. Reimer, “Transmission Electron Microscopy,” Physics of Image Formation and Microanalysis (1984).

[8] L. Deck and P. De Groot, “High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry,” Applied Optics 33, 7334-7338 (1994).

[9] B. L. Danielson and C. Y. Boisrobert, “Absolute optical ranging using low

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

coherence interferometry," Applied Optics 30(21), 2975 (1991).

[10] U. Schnell, R. Dandliker and S. Gray, "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target," Optics Letter 21(7)m 528-530 (1996).

[11] R. C. Youngquist, S. Carr and D. E. Davies, "Optical coherence-domain reflectometry a new optical evaluation technique," Optics Letter 12(3), 158-160 (1987).

[12] E. A. Swanson, D. Huang, M. R. Hee, J. G. Fujimoto, C. P. Lin and C. A. Puliafito, "High-speed optical coherence domain reflectometry," Optics Letteer 17(2), 151-153 (1992).

[13] G. E. Jellison, "Spectroscopic ellipsometry data analysis: measured versus calculated quantities," Thin Solid Films 313, 33-39 (1998).

[14] D. E. Aspnes, "Approximate solution of ellipsometric equations for optically biaxial crystals," Optics Letter 70(10), 1275-1277 (1980).

[15] 안일신, 엘립소미트리, (한양대학교 출판부, 2000).

[16] 박종래, "주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM)과 전자 X-ray를 이용한 고분자 소재 분석," 고분자 과학과 기술 7(1), 75-85 (1996).

[17] G. Lawes, "Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis," Springer, (1975).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[18] 주기남, “21세기 기계산업의 변화-광기술의 발전 동향,” 대한기계학회 논문집 5(1), 53-61 (2017).

[19] R. C. Youngquist and D. E. Davies, “Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique,” Optics Letter 12(3), 158-160 (1987).

[20] J. Li and S. -T. Wu, “Extended cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals,” Jounal of Applied Physics 95(3), 896-901 (2004).

[21] B. Tatian, “Fitting refractive-index data with the Sellmeier dispersion formula,” Applied Optics 23, 4477-4485 (1984).

[22] H. H. Gilgen, R. P. Novak, R. P. Salathe, W. Hodel and P. Beaud, “Submillimeter optical reflectometry,” Optics Letter 7(8), 1225-1233 (1989).

[23] A. Rothen, “The ellipsometer, an apparatus to measure thickness of thin surface films,” Review of Scientific Instruments 16(2), 26-30 (1945).

[24] 변준석, “Study on the Dielectric Functions of GaAsxSb1-x Alloys and Analysis of 3D Nanostructure by Spectroscopic Ellipsometry,” 경희대학교 일반대학원 박사학위 논문 (2014).

[25] D. Penninckx and V. Morenas, “Jones matrix of polarization mode dispersion,” Optics Letter 24(13), 875-877 (1999).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[26] D. H. Goldstein, “Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter,” Applied Optics 31(31), 6676-6683 (1992).

[27] J. L. Ord “An ellipsometer for following film growth,” Surface Science 16, 155-165 (1969).

[28] D. E. Aspnes, “A photometric ellipsometer for measuring for measuring flux in a general state of polarization,” Surface Science 56, 161-169 (1976).

[29] B. Johs, J. A. Woollam, C. M. Herzinger, J. N. Hilfiker, R. A. Synowicki and C. L. Bungay, “An ellipsometer for following film growth,” Surface Science 16, 29-58 (1999).

[30] J. Lee, P. I. Rovira, I. An and R. W. Collins, “Rotating-compensator multichannel ellipsometry: Applications for real time Stokes vector spectroscopy of thin film growth,” Review of Scientific Instruments 69(4), 1800-1810 (1998).

[31] R. Collins, I. An, H. Fujiwara, J. Lee, Y. Lu, J. Koh and P. Rovira, “Advances in multichannel spectroscopic ellipsometry,” Thin Solid Films, 18-32 (1998).

[32] V. Dembele, S. Choi, W. Chegal, I. Choi, M. J. Paul, J. Kim and D. Kim, “Dynamic spectroscopic ellipsometry based on a one-piece polarizing interferometric scheme,” Optics Communications, 454 (2019).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 력 서

성　　명 : 김 진 섭 (金 辰 燮)

학　　력

2009. 03. - 2012. 02. 창평고등학교 졸업

2012. 03. - 2018. 02. 조선대학교 광기술공학과 학사 졸업

2018. 03. - 2020. 02. 조선대학교 광기술공학과 석사 졸업

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

학위 논문

[1] “단일 영상 분광 타원계측기 기반 다층 박막 분석 기술 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2020).

학술지 게재 논문

[1] J. Jang, J. W. Jeon, **J. S. Kim** and K.‐N. Joo, “Efficient and Exact Extraction of the Object Wave in Off-axis Digital Holography,” Current Optics and Photonics, Vol. 2, No. 6, pp. 547-553, (2018).

[2] **J. S. Kim** and K.‐N. Joo, “Single-shot characterization of multi-film structures based on combined spectral interferometry and spatially recorded spectroscopic ellipsometry,” Applied Optics, 58, 5637-5643, (2019).

특허 등록 및 출원

[1] 주기남, **김진섭**, 김대희, 윤영호 “타원계측기 기반의 다채널 광 계측기,” 특허 10-2018-0042074 (2019).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

국내·외 학회 발표

[1] 윤영호, **김진섭**, 전준우, 주기남, “광학시스템의 Coherent Noise 현상 분석 및 감소 방법에 대한 연구,” 한국정밀공학회 추계학술대회 (2017).

[2] **김진섭**, 김대희, 윤영호, 주기남, “다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템 연구,” 한국광학회 동계학술발표회 (2018).

[3] **Jin Sub Kim**, Dae Hee Kim and Ki-Nam Joo, “Real-time spectroscopic ellipsometer using a depolarizer,” CLEO (2018).

[4] **김진섭**, 김대희, 윤영호, 주기남, “실시간 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 시스템,” 한국광학회 하계학술발표회 (2018).

[5] **김진섭**, 주기남, “실시간 다층 박막 구조물 분석 기술 개발,” 한국정밀공학회 추계학술대회 (2018).

[6] **김진섭**, 주기남, “박막 시편의 표면 및 두께 동시 측정 연구,” 한국정밀공학회 춘계학술발표회 (2019).

[7] **김진섭**, 주기남, “Single shot measurement for surface height and film thickness of film structure,” 차세대 리소그래피 학술대회 (2019).

[8] **Jin Sub Kim** and Ki-Nam Joo, “Single shot measurement for surface height and film thickness of film structure,” ISMTII (2019).

[9] **Jin Sub Kim** and Ki-Nam Joo, “Single shot spectroscopic ellipsometry using polarized camera for measuring line profile of film thickness,” ASPEN (2019).