



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](#)

2018년 2월

석사학위논문

다층 박막 구조물 분석을 위한
간섭계와 타원계측기의 복합 측정
시스템 연구

조선대학교 대학원

광기술험공학과

윤영호

다층 박막 구조물 분석을 위한
간섭계와 타원계측기의 복합 측정
시스템 연구

Measurement system of film structure by
interferometry and ellipsometry

2018년 02월 23일

조선대학교 대학원

광기술공학과

윤영호

다층 박막 구조물 분석을 위한
간섭계와 타원계측기의 복합 측정
시스템 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

윤 영 호

윤 영 호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 진 태 (인)

위 원 조선대학교 교수 권 민 기 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	4
제3절 연구목표 및 내용	13
제2장 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기 의 복합 측정 시스템	14
제1절 분산간섭계	14
1. 분산간섭계 기본적인 원리 및 이론	14
2. 임의의 반복 연산 알고리즘(Iterative arbitrary step algorithm)	20
제2절 영상 분광 타원계측기	23
1. 타원계측기의 기본적인 원리 및 이론	23
2. 영상 분광 타원계측기	25
3. 박막 이론	28
3.1 단층 박막 측정 이론	28
3.2 다층 박막 측정 이론	30
제3절 간섭계와 타원계측기 결합 원리	32
제3장 실험 결과 및 분석	35
제1절 복합 측정 시스템 구성	36
1. 시스템 Calibration	36
1.1 영상 분광기와 광검출기 정렬 및 파장에 따른 pixel 확인	37

1.2 복합 측정 시스템 하드웨어 Calibration 방법	42
(1) 복합 측정 시스템 입사각도 Calibration	42
(2) 광학부품의 회전각도 및 파장별 위상지연 값 Calibration	43
(3) 광분할기의 편광영향 Calibration	46
제2절 복합 측정 시스템 구성 및 실험	48
1. 복합 측정 시스템 구성	48
2. 위상천이 분산간섭계 실험 및 결과	51
3. 영상 분광 타원계측기 실험 및 결과	55
4. 복합 측정 시스템 실험 및 결과	58
제4장 고찰 및 논의	61
1. 위상천이 분산간섭계의 오차 요인	61
2. 영상분광 타원계측기 오차 요인	62
3. 결합된 시스템의 오차 요인	63
4. 시스템 성능검증	63
제5장 결론	65
[참고문헌]	67
[감사의 글]	71

그림 목차

그림 1. 반도체 칩의 단면 구조	1
그림 2. OLED 디스플레이의 단면 구조 및 제품	2
그림 3. 박막 구조 분석 기술의 분류	4
그림 4. 주사 전자 현미경 개략도	5
그림 5. 원자간력 현미경 측정 원리	6
그림 6. 백색광 주사 간섭계 개략도	8
그림 7. 분산 백색광 간섭계 개략도	8
그림 8. 반사광측정법 개략도	9
그림 9. 타원계측기 개략도	11
그림 10. 분산간섭계의 광학 구성	15
그림 11. 분산간섭계의 간섭 신호	15
그림 12. 영상 분광 타원계측기 개략도	26
그림 13. 단일 박막(대기층/박막/기판)의 광학적 모델	28
그림 14. 다층 박막의 반사 및 투과	30
그림 15. 복합 측정 시스템 구성도	33
그림 16. Jones matrix를 이용한 복합 측정 시스템 해석	34
그림 17. 간섭계와 타원계측기의 측정 원리	34
그림 18. 복합 측정 시스템 Calibration 목록	36
그림 19. 영상 분광기 구성도	37
그림 20. 영상 분광기와 CCD 카메라의 정렬	39
그림 21. 파장 통과 대역 필터를 이용해 획득한 영상	40
그림 22. Band-pass filter의 파장에 해당하는 pixel 위치 값	41

그림 23. 수평방향의 임의의 영역에서 내삽법을 이용한 CCD pixel과 파장 관계	41
그림 24. 각도 보정을 위한 마운트	42
그림 25. ZYGO laser를 이용한 편광기 보정	43
그림 26. 위상지연판의 파장별 위상지연을 보정하기 위한 실험 구성 ..	44
그림 27. 500 nm와 545 nm 파장에서의 위상지연판의 위상지연 결과	45
그림 28. 위상지연판의 파장별 위상지연 획득 결과	45
그림 29. 광분할기의 편광변화 측정 (a)투과 (b)반산 (c)반사투과	47
그림 30. p-편광의 투과반사에 대한 실험 및 이론값 비교 (a)진폭 (b)위상	47
그림 31. 실제 구성된 광학 구성도	48
그림 32. 복합 측정 시스템에 사용된 광원 (Broadband source)	49
그림 33. 위상천이에 사용되는 PZT stage	50
그림 34. 위상천이 분산간섭계 측정법	51
그림 35. Gauge block의 간섭무늬 영상	52
그림 36. 위상천이 획득 결과	52
그림 37. 10 μm 단차의 위상 획득 결과	54
그림 38. 10 μm 단차를 가진 gauge block 형상측정 결과	54
그림 39. 영상 분광 타원계측기 측정법	55
그림 40. 4층 박막의 획득된 이미지 데이터	56
그림 41. 임의의 박막 시편에 대한 이론값과 실험값	56
그림 42. 영상 분광 타원계측기 기초실험 결과 (a)4층 박막 시편 정보 (b)4층 박막 구조물 실험 결과	57
그림 43. 위상천이 분산간섭계를 이용한 4층 박막 측정결과 (a)위상 (b)박	

막의 위상	58
그림 44. 4층 박막의 형상 측정 결과	59
그림 45. 4층 박막의 형상과 두께 측정 결과	60
그림 46. 4층 박막의 3D 구조분석 결과	60

표 목차

표 1. 광학제품의 Jones matrix	27
표 2. 영상 분광기와 검출기의 성능	38

ABSTRACT

Measurement system of film structure by interferometry and ellipsometry

By Young Ho Yun

Advisor : Prof. Ki-Nam Joo, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

The importance of thin film structures has significantly increased in semiconductor and display industries according to the demand of multi-functional and highly efficient products with very tiny sizes. Moreover, complicated dimensional structures and the usages of various materials are essential for the fabrication. In the manufacturing process, the process condition should be optimized for high throughput and the measurement or inspection technologies cannot be avoided to be involved. In science fields, film structures are also indispensable to enhance the quantum efficiency of optical devices such as LEDs and OLEDs, develop new functional components and integrate optical or electrical circuits.

Film structures have been analyzed mainly by two principles: reflectometry and ellipsometry except for the destructive observation technologies such as SEM and TEM. By analyzing spectral density of reflected light from a specimen, reflectometry can obtain film thicknesses on the assumption of known refractive indices of films. Ellipsometry has become a standard tool,

where the ration of reflection coefficients can be extracted and compared with the theoretical one, and it is more reliable to measure thin film thicknesses compared to reflectometry because of high sensitivity of the measurement parameters to thin films. However, these two methods have the limitation not to focus on surface profiling and they only provide the information of film layers. When the substrate has specific surface shapes or textures, this important features cannot be characterized. In order to overcome this limitation, several researchers have approached to combine surface profiling techniques with reflectometry. By the similarity of the optical configuration between reflectometry and interferometry, the combined method can obtain surface and film thickness profiles in a single configuration at once. However, reflectometry is not adequate for the analysis of thin film structures due to low sensitivity, and therefore relatively thick film structures with each film thickness around an order of a few hundred nanometers have been analyzed. Another attempt to measure surface and film thickness profiles has been investigated in low coherence interferometry by temporal scanning and spectral resolving techniques. The nonlinear spectral phase containing the information of film layers in low coherence interferometry can be extracted from the measured phase by the Fourier analysis and the optimization, but it is not enough to measure thin film thicknesses under approximately 100 nm because of inherent measurement and calculation errors.

In this thesis, I propose a novel measurement system for multi-layered film structures named as MYFIELM (Measurement sYstem of Film structure by Interferometry and ELlipsometry). MYFIELM has the capability of simultaneously measuring the surface and thickness line profiles of thin film structures based on the theoretical models of the interferometric spectral phase and ellipsometric film analysis.

MYFIELM consists of two operating modes, i.e. interferometry and ellipsometry modes according to the existence of a reference beam by a beam

shutter. In interferometry mode, the broadband light from the optical source is split into two, a reference and a measurement beams, by a beam splitter and they are interfered after the reflection from a specimen and mirrors. Unlike the typical reflective interferometric configuration, the specimen is located in the middle of the measurement path and the incident angle of measurement beam is not orthogonal to the specimen because of the consideration of ellipsometry mode. In this case, polarizing optical components don't have any roles to generate the interference. Then, the recombined beam goes toward an imaging spectrometer and becomes spectrally resolved in order to obtain the spectral interferogram by an imaging device. It is noted that the measured image contains two kinds of information such as spatial and spectral density because MYFIELM measures a line profile of a specimen at once. On the other hand, only the measurement beam is used in ellipsometry mode and the spectroscopic ellipsometric principle of P₄₅C_RSA₋₄₅ type is adopted to analyze the film structure of the specimen. A quarter-wave plate as the compensator is rotated to change the polarization state of the incident 45° linearly polarized light, and an image stack of the spectral and spatial intensity variations corresponding to polarization changes are recorded by the imaging device after passing through a -45° rotated analyzer and the imaging spectrometer. In this case, the measurement beam is reflected off on the specimen twice and the theoretical model of ρ should be modified from the typical model of ellipsometry.

The film thicknesses measured by ellipsometry were transferred to interferometry and only the surface height was extracted from the spectral phase of the interferometry containing both of surface height and film thicknesses. For the verification, each performance of the operating mode was confirmed and 4 film layered specimen was measured in comparison of the reference values. MYFIELM is the most suitable solution for characterizing thin film structures with a textured substrate without any damage on the

specimen compared with the previous techniques even though it needs further improvements for stability and reliability.

Key words : Multi-layered film structure, Spectroscopic imaging ellipsometry, spectrally-resolved interferometry, combined technique, 3D thickness profile

제1장 서론

제1절 연구 배경

최근 다양한 형태의 다층 박막 구조물은 반도체 및 디스플레이, 태양광, 초소형 센서에 있어 제품의 소형화 및 고성능의 요구로 인해 점차 중요성이 증대되고 있다 [1]. 또한, 이러한 박막 구조물은 성능의 향상을 위해 다양한 두께 및 패턴이 형성되고 있고, 초소형 및 고성능을 위해 더욱 복잡한 적층형 구조로 제조되고 있으며, 박막의 두께 또한 더욱 얇아지고 있다 [2]. 특히, 반도체 분야에서 고집적도 회로는 성능 향상을 위해 그림 1과 같이 다양한 재질과 복잡한 형상의 적층형 구조로 구성되고 있다. 이러한 박막 구조물은 제조 시 웨이퍼공정 (Wafer), 산화공정 (Oxidation), 증착공정 (Deposition), 포토공정 (Photo) 등의 8대 공정을 거쳐 제조되는데, 산화공정에서는 웨이퍼의 산화막 두께에 따라 생산품의 품질이 결정되며 [3], 증착공정에서는 증착되는 물질의 두께에 의해 전기적 특성이 결정된다 [4]. 이때, 각각의 공정에서는 설계된 공정 조건에 따라 박막 구조물이 생산되기 때문에, 성능 향상 및 생산성 증대를 위해 공정 조건의 최적화가 중요하고 이를 결정, 개선하기 위해서는 정밀한 측정 및 검사 기술이 필수적으로 요구된다 [5].

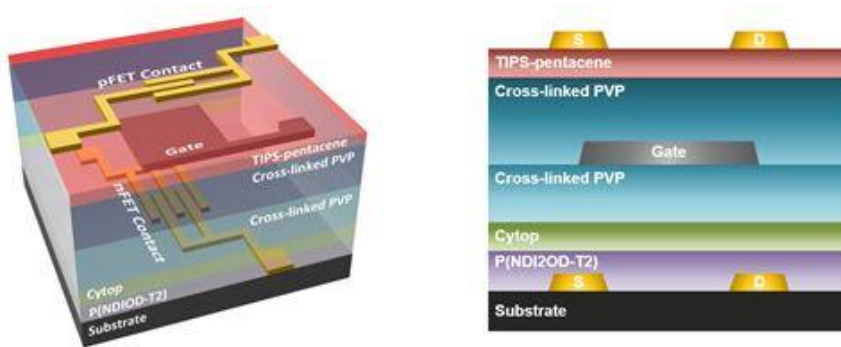


그림 1. 반도체 칩의 단면 구조

한편, 디스플레이 산업의 경우에도 그림 2와 같이 TFT 유리기판 (Glass substrate for TFT)과 칼라 필터 유리기판 (Glass substrate for color filter) 등과 같이 다양한 형태의 박막 구조물이 활용되고 있고, 이러한 박막 구조물은 LED, OLED 뿐만 아니라 최근 들어 주목받고 있는 Flexible Display에서도 필수적인 요소이다 [6]. 특히, 디스플레이 분야에서 TFT 공정은 유리기판 위에 트랜지스터 층을 만드는 가장 중요한 제조 공정으로, 이러한 공정이 여러 번 반복되어야 비로소 제품이 완성된다. 그래서 디스플레이 분야의 박막 구조물은 넓은 기판 위에 여러 층의 무기막과 유기막이 겹겹이 쌓인 복잡한 구조로 형성되며, 이러한 박막 구조물의 안정적인 생산 및 생산성 증대를 위해서는 공정 시 발생할 수 있는 불량률 최소화하여 수율을 향상시킬 수 있는 박막 측정/검사 기술이 필수적으로 요구되고 있다 [5]. 이처럼 오늘날의 IT, NT와 같은 첨단 분야에서 박막 구조물은 제품의 품질 및 성능을 결정하는 필수 요소이고, 성능 및 기술 수요에 따라 구조는 점차 다양하고 복잡해질 것으로 예상된다. 이와 더불어 안정적인 박막 구조물의 제조를 위해 박막 구조 분석을 위한 측정, 검사 기술이 많은 주목을 받고 있다.



그림 2. OLED 디스플레이의 단면 구조 및 제품

현재, 박막의 구조 분석을 위해 많은 종류의 측정, 검사 기술들이 연구, 개발되고 있으며, 이러한 방법들은 크게 파괴식 측정법 (Destructive)과 비파괴식 측정법 (Non-Destructive)으로 분류할 수 있다. 먼저 파괴식 측정법으로는 주사전자현미경 (SEM, Scanning Electron Microscopy) [7]과 원자간력 현미경 (AFM, Atomic Force Microscope) [8]이 대표적이다. 두 가지 방법 모두 표면의 형상과 패턴에 대해 높은 분

해능으로 측정 할 수 있을 뿐만 아니라 시편의 측면 측정을 통해 박막의 두께를 측정 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 측정에 있어 시편을 적당한 크기로 절단해야 하며 측정을 통해 시편에 손상을 입힌다는 단점이 존재하여, 현장적용이 불가능하고 비효율적이다 [9]. 한편 비파괴식 측정 방법으로는 주로 광학식 방법들이 응용되고 있으며, 특히, 간섭계 (Interferometry) [10], 반사광측정기 (Reflectometry) [11], 타원계측기 (Ellipsometry) [12] 방법들에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 광학식 방법들은 모두 빛을 이용하여 측정하기 때문에, 시편을 손상시키지 않고 박막 구조물을 분석 할 수 있으며, 실시간으로 정확하게 박막 두께를 측정할 수 있는 장점이 있어 산업계에서 널리 활용되고 있다. 그러나 현재까지 박막 구조물에 있어 매우 중요한 박막 구조물의 표면 형상 및 박막 두께를 동시에 측정, 분석할 수 있는 측정 방법에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 기존의 연구 결과들은 주로 박막의 두께 측정에 초점이 맞추어져 있거나 간단한 구조의 박막 구조물 측정만이 가능하다는 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 현장적용이 가능하며 시편의 손상 없이 측정할 수 있는 광학식 박막 구조 분석 기술에 대한 연구를 진행한다. 특히, 기존의 광학식 측정 방법을 개선하여 박막 구조물의 표면 형상과 두께를 동시에 측정할 수 있는 간섭계와 타원계측법을 결합한 새로운 광학 구성을 제안하고, 이를 통해 3차원 박막 구조분석 연구를 진행한다.

제2절 연구 현황

기존의 박막 구조 분석 기술은 그림 3과 같이 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다. 먼저 파괴식 측정법은 정확하고 높은 분해능을 가지는 반면에, 주로 프로브를 시편에 접촉하여 측정하거나 [8], 시편에 절단된 특정 조건 [7]에서 측정된다. 반면, 광학식 방법들과 같은 비파괴식 측정법은 측정 속도가 빠르고, 높은 분해능으로 시편의 손상 없이 측정할 수 있는 장점으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다.

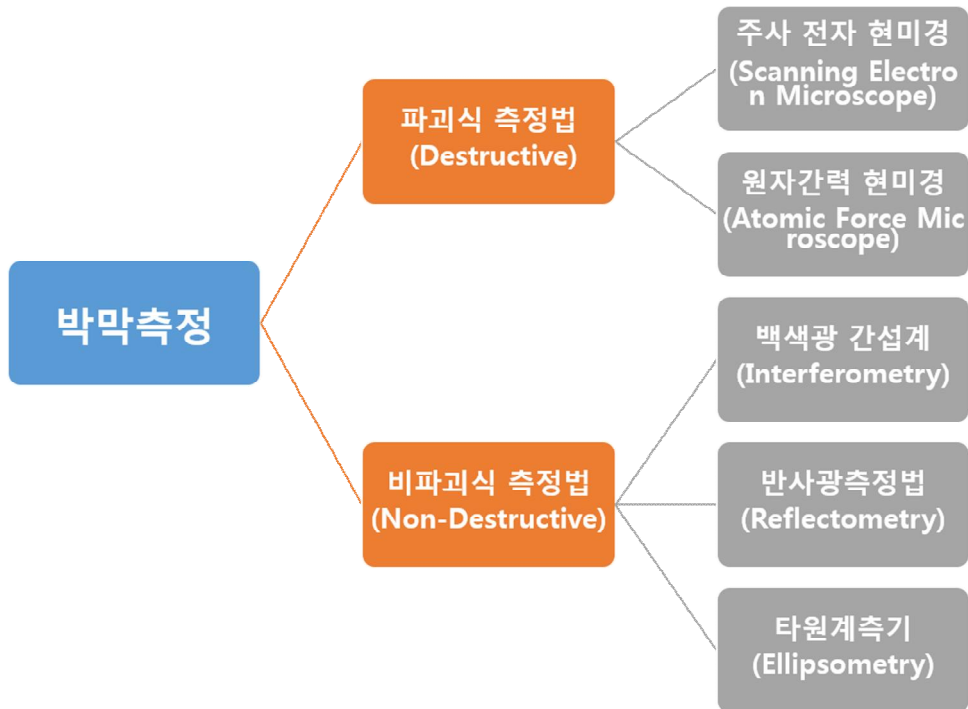


그림 3. 박막 구조 분석 기술의 분류

1. 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope)

1990년대 후반부터 세계적으로 나노연구가 활발해지면서 나노물질의 구조와 특성을 측정하는데 다양한 연구들이 진행되고 있으며, 관련 분야에서 전자 현미경은 측정기로써 중요한 축을 담당하고 있다 [13]. 전자 현미경은 그림 4와 같은 구조를 가지며, 광학현미경에서 사용하는 가시광 대역의 램프를 대신해 전자선을 사용하고, 또한 일반적인 렌즈 대신에 전자 렌즈를 사용하여 물체를 측정하는 특징을 가진다. 전자 현미경은 높은 에너지의 전자빔을 이용하여 전자가 시편에 충돌할 때 발생하는 2차 전자, 반사 전자, X-선 등을 검출하여 시편을 분석하며 높은 분해능을 가지고 있다. 그러나 시료에 전자빔을 조사하기 때문에 시편의 손상을 피할 수 없고 이를 보완하기 위해 추가적인 표면 코팅이 필요하다는 단점이 있다.

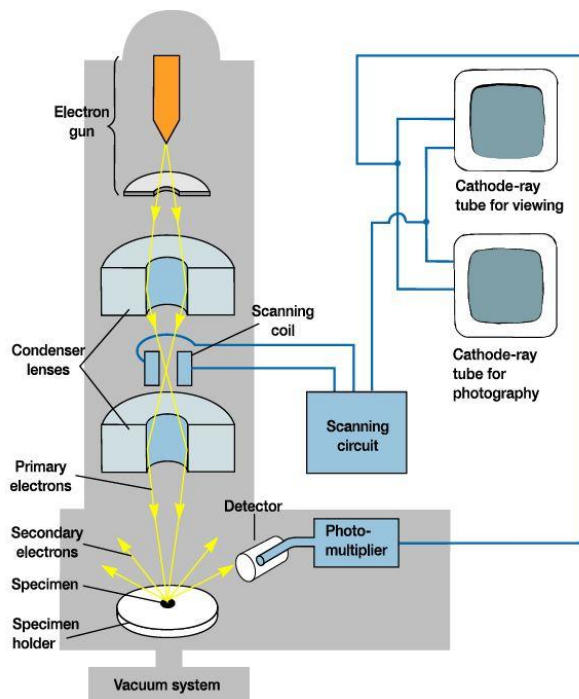


그림 4. 주사 전자 현미경 개략도

2. 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope)

원자간력 현미경은 가장 기본적이고 대표적인 주사 탐침 현미경으로, 탐침(Cantilever)과 시편 사이에서 발생하는 원자간 척력 및 인력 (Van der Waals force)을 이용하여 표면 형상을 측정하는 장치이다 [14]. 원자 간의 미세한 힘을 이용하여 형상을 측정하기 때문에 높은 분해능으로 측정이 가능한 장점이 있는 동시에 주사 전자 현미경과는 달리 진공상태가 요구되지 않고, 사용 방법이 간단하며 해석이 단순하다는 특징이 있다. 원자간력 현미경은 그림 5와 같이 탐침이 미세한 힘에 의해 쉽게 휘어질 수 있도록 구성되어 있으며, 탐침의 끝부분은 매우 뾰족하여 탐침을 시편 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시편 표면의 원자 사이의 거리에 따라 발생하는 힘에 의해 탐침은 위아래로 휘어진다. 이때 휘어진 정도는 레이저 기반 광삼각법 원리로 [15] 측정하게 되고 측정 결과를 통해 시편의 형상 측정이 가능하다. 하지만 탐침을 이용해 시편을 측정하기 때문에 시편에 손상을 입히게 되고, 시편의 표면형상만 측정한다는 한계가 있다.

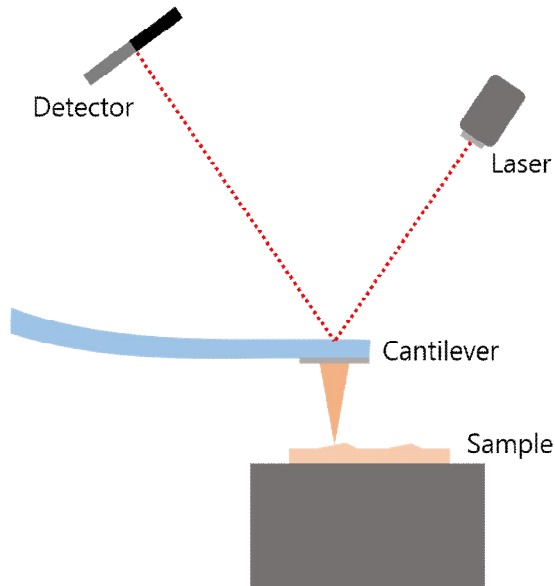


그림 5. 원자간력 현미경 측정 원리

3. 백색광 간섭계(Interferometry)

백색광 간섭계는 1990년 이후 3차원 형상 측정 분야에서 레이저를 사용하는 단색광 간섭계의 2π 모호성을 극복하기 위해 개발되었다. 또한 현재 반도체 및 디스플레이 분야의 측정, 검사 장비로 널리 활용되고 있으며, 또한 많은 연구가 진행되고 있다. 백색광 간섭계는 측정 방법에 따라 백색광 주사 간섭계 (White Light Scanning Interferometry) [16]와 분산 백색광 간섭계 (Dispersive White Light Interferometry) [17]로 분류 할 수 있다. 먼저 백색광 주사 간섭계는 그림 6과 같이 일반적으로 마이켈슨 간섭계 (Michelson Interferometry)로 구성되며, 광원으로는 텅스텐 할로젠 (Tungsten-Halogen) 램프나 제논 (Xenon) 램프와 같은 넓은 대역의 스펙트럼 광원을 사용하는 동시에 [18], 주사 (Scanning)를 통해 광경로차 (Optical path difference)를 조절하여 간섭 신호를 획득한다. 획득된 간섭 신호를 분석하면 시편의 형상을 측정할 수 있으며, 최근에는 이러한 백색광 주사 간섭법을 이용한 박막의 두께 측정 연구가 진행되었다 [19]. 이 경우, 광학적 구성은 동일하나 간섭 신호를 분석함에 있어 측정 위상으로부터 위상의 선형 성분과 비선형 성분을 구분하여 최적화 (Optimization) 방법을 통해 박막의 두께와 형상을 동시해 측정한다.

한편, 분산 백색광 간섭계는 그림 7과 같은 광학 구성을 가지며, 백색광 주사 간섭계와는 달리 구동 장치가 없는 대신에 광검출기로 분광기 (Spectrometer)를 사용하고, 이를 이용해 파장별 간섭 신호를 획득하여 거리를 측정한다. 이러한 분산 백색광 간섭계 역시 박막의 두께 측정에 응용되고 있으며 [20], 측정된 파장별 위상 성분으로부터 백색광 주사 간섭계에서와 같이 최적화를 통해 박막의 두께 및 표면 형상을 측정할 수 있다. 파장별 위상을 추출하는 방법에 따라 푸리에 변환 (Fourier transformation) 분산 간섭계와 위상천이 (Phase shifting) 분산간섭계로 나누어지며, 특히 위상천이 분산간섭계의 경우에는 푸리에 변환과 같은 추가적인 계산 없이 위상을 직접적으로 추출하기 때문에 측정 오차를 크게 줄일 수 있는 장점이 있어 박막 두께 측정 연구에 응용되었다 [21].

이러한 백색광 간섭계의 두 가지 측정 방법은 박막의 두께와 표면 형상을 동시에 측정할 수 있는 장점이 있으나, 측정 원리상 박막의 두께에 의해 발생하는 비선형 성분 에 대한 이론 모델과 실험값을 비교하기 때문에 측정 오차에 매우 민감하다. 특히, 박

막이 얇은 경우, 위상의 비선형 성분이 매우 미비하기 때문에 정확한 비선형 위상 성분 추출이 불가능하다. 이로 인해, 백색광 간섭계를 이용한 박막 두께 측정은 얇은 박막 및 다층 박막 측정에 한계를 가진다. 기존의 연구 결과에 따르면 박막의 두께가 100 nm 이하로 얇아지게 되면 비선형 성분이 실험시 발생하는 잡음 (Noise)보다 작아지게 되고 그로 인해 두께 측정에 한계가 있음이 보고되었다 [22].

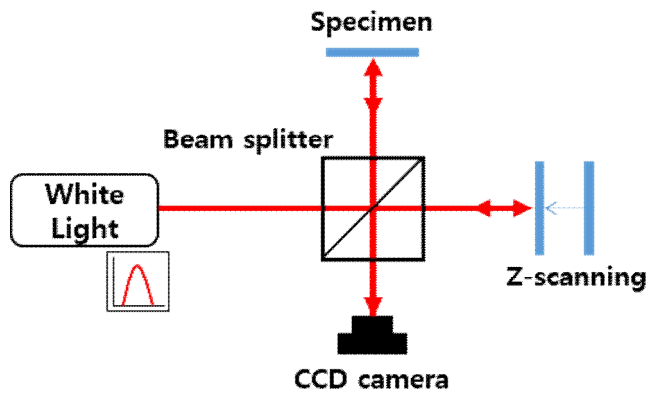


그림 6. 백색광 주사 간섭계 개략도

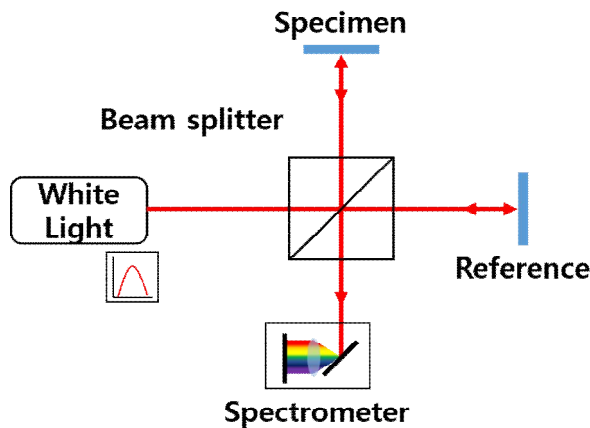


그림 7. 분산 백색광 간섭계 개략도

4. 반사광측정법(Reflectometry)

반사광측정법은 그림 8과 같이 넓은 파장 대역의 광원을 사용하여 박막 구조물에 빛을 수직으로 입사시킨 후 반사되는 빛을 이용하여 박막 두께를 측정하는 방법으로, 시편에 입사하기 전 광원의 스펙트럼과 시편에 의해 반사된 빛의 스펙트럼의 차이를 수학적 이론 모델과 비교하여 박막의 두께를 측정한다. 이때 박막에 대한 이론적인 모델은 박막의 두께와 물질의 굴절률의 함수로 정의되며, 물질의 굴절률은 일반적으로 Cauchy 방정식, Sellmeier 방정식 등을 이용하여 간접적으로 계산할 수 있다 [23].

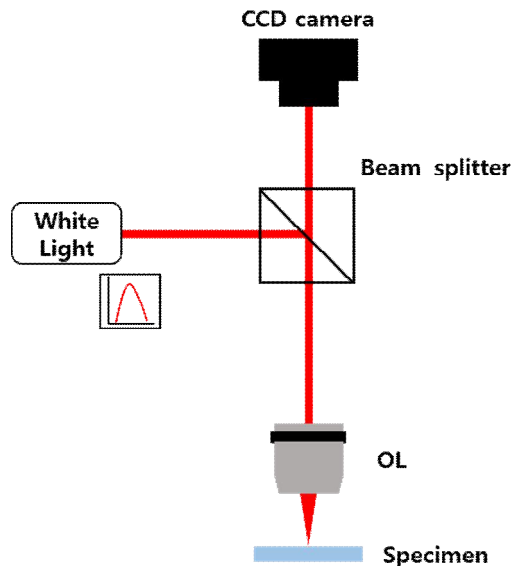


그림 8. 반사광측정법 개략도

반사광측정법은 시편에 의해 발생하는 빛의 스펙트럼 차이를 이용하여 박막을 측정하기 때문에 구성이 매우 간단하고 측정이 빠르다는 장점을 가진다. 또한 대물렌즈를 이용하는 경우, 대물렌즈의 높은 수치 구경 (Numerical aperture)을 통해 좁은 영역이나 미세 패턴의 박막을 측정할 수 있다 [24]. 하지만 반사광측정법은 백색광 간섭계와 유사하게 얇은 박막에 대해서는 측정에 한계를 가진다. 이는 얇은 박막에 의해 발생하는 반사광의 스펙트럼 변화량이 미비하기 때문에 발생한다. 또한 원리적으로 박막의 두께

만을 측정하기 때문에 박막에 대한 형상정보를 얻는 것이 불가능하다. 이를 해결하고자 최근에 박막의 형상과 두께를 동시에 측정하는 연구가 진행되었으며, 그림 9와 같이 간섭계와 반사광측정법을 결합하여 측정하는 방법으로 표면 형상 측정은 간섭계로, 박막의 두께는 반사광측정법을 이용하여 박막 구조물을 분석하였다 [25]. 광학 구성에서 편광 광분할기 (Polarizing beam splitter)를 사용하여 각각의 측정법을 구분하며, 나누어진 p-파, s-파의 편광을 이용하여 선택적인 측정이 가능한 특징이 있다. 이때, 시편에서 반사된 빛만을 사용하게 되면 반사광측정법 원리가 적용되며, 45° 편광기를 이용하여 기준광과 측정광을 모두 사용하면 간섭계 측정법으로 형상을 측정할 수 있다. 그러나 이 경우에도 반사광측정법의 한계로 인해 얇은 박막의 두께 측정이 어렵다는 단점이 존재한다.

5. 타원계측기(Ellipsometry)

타원계측기는 특정 편광상태의 빛이 시편에 입사한 후 반사된 빛의 편광 변화를 이용하여 박막에 대한 두께 및 굴절률을 측정하는 기기로 [26], 기존의 측정 방법들과 달리 편광을 이용하여 얇은 박막까지 측정할 수 있기 때문에 박막 측정 분야에서 널리 활용되고 있다. 타원계측기에서는 박막의 두께를 측정하기 위해 먼저 존스 행렬 (Jones matrix) 및 뮐러 행렬 (Mueller matrix)을 [27-28] 이용하여 박막의 이론적 모델을 정립하고, 실제 광학 구성을 통해 박막에 대해 편광 변화량을 측정하여 이를 이론값과 비교함으로써 박막의 두께를 측정한다. 일반적으로 타원계측기는 그림 9와 같이 시편의 브루스터 각 (Brewster angle)으로 빛이 입사하기 때문에, 시편에서 반사하는 p-편광과 s-편광 빛의 세기가 매우 민감하게 변화하고 이를 통해 높은 민감도로 박막의 두께를 측정할 수 있는 동시에 얇은 박막 두께 측정도 가능하다.

최초로 개발된 타원계측기는 Null 타원계측기로 단파장 광원을 사용하고 편광기와 검광기 등의 광학부품의 회전을 통해 빛의 소멸점을 찾는 방법이며, 정밀도가 높지만 측정 속도가 매우 느린 단점이 있다 [29]. 한편 이를 보완하기 위해 개발된 Photometric 타원계측기는 위상지연판을 회전시키면서 빛의 밝기 변화를 통해 박막의 두께를 측정하는 방법으로 Null 타원계측기보다 정확도가 비교적 떨어지지만 측정 속도가 높은 장점이 있다 [30].

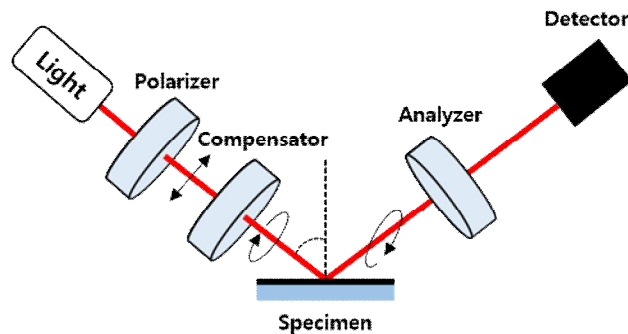


그림 9. 타원계측기 개략도

일반적으로 타원계측기는 다른 광학식 측정법에 비해 환경 영향에 비교적 민감하지 않고 높은 정밀도를 가지며, 박막에 대한 민감도는 0.1\AA 수준으로 아주 낮다. 또한 응용 분야 및 측정 환경에 맞추어 광학 구성의 변화가 가능하여 반도체, 디스플레이, 태양광 셀 등의 박막 분야에서 많은 주목을 받고 있다. 하지만 반사광측정법과 동일하게 박막 두께 측정만이 가능하여 표면 형상 측정에 한계를 가진다.

제3절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 박막 구조물에 대한 기존의 측정 기술의 한계를 극복하기 위해 새로운 3차원 구조분석 기술에 대한 연구를 진행한다. 그래서 본 연구는 다층의 얇은 박막의 두께 측정이 가능한 타원계측법과 표면 형상 측정이 가능한 간섭계를 결합한 새로운 구성의 3차원 박막 구조분석 시스템을 개발하고 이를 실험적으로 검증하는 것을 목표로 한다.

본 연구의 목표 달성을 위한 세부 연구 내용은 다음과 같다.

- 분산간섭계의 기본 원리 및 측정 알고리즘
- 타원계측기의 기본 원리 및 박막 분석 이론
- 분산간섭계와 타원계측기를 결합한 3차원 박막 구조분석 복합 측정 시스템
- 복합 측정 시스템 실험 및 결과 분석

본 논문은 제2장에서 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템에 대한 설명, 제3장에서는 각각의 측정법에 대한 기초 실험과 복합 측정 시스템에 대한 실험결과 분석, 제4장 고찰 및 논의, 마지막으로 제5장은 결론으로 구성되어 있다.

제2장 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계 측기의 복합 측정 시스템

제1절 분산간섭계

1. 분산간섭계 기본적인 원리 및 이론

분산간섭계는 그림 10과 같이 넓은 대역의 스펙트럼을 가진 광원과 분광기를 통해 광 주파수별 간섭 신호를 획득하고, 이를 이용하여 기준광과 측정광 사이의 광경로차 (Optical Path Difference)를 측정하는 거리측정 간섭계로, mm 이상의 측정 영역에서 nm의 분해능으로 거리를 측정할 수 있다. 광원으로부터 시준된 광은 간섭계에 입사하여 광분할기 (Beam splitter)를 통해 기준광 (Reference beam)과 측정광 (Measurement beam)으로 나누어지고, 기준거울과 측정거울에서 각각 반사된 후, 광분할기에서 다시 결합되어 간섭을 발생시킨다. 이때, 분광기 (Spectrometer)에서는 그림 11과 같은 주파수별 간섭 신호가 획득되며, 이를 분석하면 거리를 측정할 수 있다.

이때, 광분할기에서 기준거울까지의 거리를 L_1 , 측정거울까지의 거리를 L_2 라고하면, 측정 거리 $L(=L_1-L_2)$ 을 포함한 간섭 신호 $I(\nu)$ 는 다음과 같이 수학적으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$I(\nu) = a(\nu) + b(\nu)\cos 2kL = a(\nu) + b(\nu)\cos\left(\frac{4\pi nL}{c_0}\right)\nu \quad (1)$$

여기서 k 는 파수 (Wave number)를 나타내고, c_0 는 진공 중의 광속 (Speed of light in vacuum)을, n 은 매질의 위상 굴절률 (Phase refractive index)을, ν 는 광 주파수 (Optical frequency)를 의미한다.

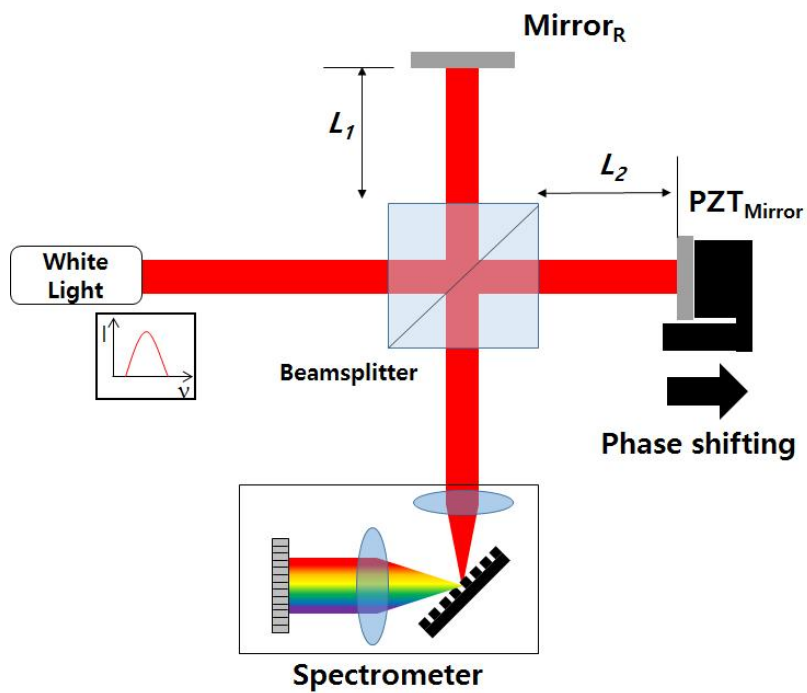


그림 10. 분산간섭계의 광학 구성

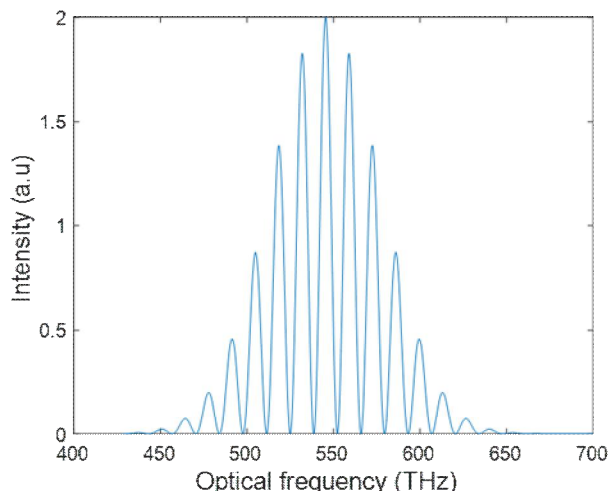


그림 11. 분산간섭계의 간섭 신호

식 (1)에서 $a(\nu)$ 는 광 주파수 영역에서 평균 광 강도 (Mean intensity)에 해당하고, $b(\nu)$ 는 간섭 신호의 변조 크기 (Modulation amplitude)를 나타내며, 광원의 주파수 분포 $s(\nu)$ 와 기준거울과 측정거울의 반사계수 $r_r(\nu)$, $r_m(\nu)$ 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a(\nu) = \frac{1}{2}s(\nu)[r_r^2(\nu) + r_m^2(\nu)] \quad (2)$$

$$b(\nu) = s(\nu)r_r(\nu)r_m(\nu)$$

이때, 거울의 반사계수들이 광 주파수에 대해 균일한 분포를 가진다고 가정하여 이들을 1로 놓고 식 (1)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$I(\nu) = s(\nu)[1 + \cos\phi(\nu)] \quad (3)$$

여기서 광 주파수별 위상인 $\phi(\nu)$ 은 식 (1)로부터 식 (4)와 같이 정의되며, 분산간섭계에서는 간섭 신호로부터 추출된 광 주파수 영역의 위상을 통해 L 을 측정할 수 있다.

$$\phi(\nu) = \frac{4\pi nL}{c_0}\nu \quad (4)$$

한편, 분산간섭계에서 측정 대상이 거울이 아닌 박막과 같은 구조인 경우에는 박막 내부에서의 다중 반사 및 간섭 현상으로 인해, $\phi(\nu)$ 는 식 (4)와 같이 ν 에 대해 선형적인 관계를 가지는 것이 아니라 보다 복잡한 양상을 보인다. 이때, $\phi(\nu)$ 는 기준거울과 측정 대상 간의 간섭에 의해 발생하는 위상 (ϕ_L)과 박막에 의한 위상 (ψ)으로 각각 나누어 생각할 수 있고, 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\phi(\nu) = \phi_L(\nu) + \psi(\nu) \quad (5)$$

이 경우, ϕ_L 은 식 (4)와 같이 ν 에 대해 선형적인 관계를 가지는 반면 ψ 는 일반적으로 ν 에 대해 선형성과 비선형성을 모두 포함한다. 그래서 측정 대상이 박막인 경우에는 $\phi(\nu)$ 의 ν 에 대한 기울기로 거리를 측정하게 되면, ψ 의 선형성으로 인하여 오차가 유발된다. 그러나 반대로 분산간섭계에서 $\phi(\nu)$ 를 추출하면, 식 (5)에서 알 수 있듯이 측정 대상의 형상 (거리)에 대한 정보와 박막에 대한 정보를 모두 획득할 수 있으며, 이를 이용하면 박막 구조물의 분석이 가능하다.

일반적으로 분산간섭계는 다음과 같은 측정 방법을 통해 간섭 신호의 분석이 가능하다.

- 간섭 신호의 정점 검출을 통한 주기 측정
- 간섭 신호의 푸리에-역푸리에 변환 (Fourier transformation - inverse Fourier transformation)
- 위상천이 방법 (Phase shifting technique)

분산간섭계의 간섭 신호는 그림 11과 같이 포락선 (Envelope) 함수와 변조 (Modulation) 신호로 구분할 수 있으며, 식 (1)에서 알 수 있듯이 측정 거리 L 은 변조 신호의 주기 (Period)로부터 측정이 가능하다. 이러한 특징을 이용하여 간섭 신호의 정점 (Peak)들을 검출하고, 검출된 정점들 간의 차이를 측정하는 방법은 간섭 신호의 검출과 동시에 측정이 가능한 장점이 있다. 그러나 간섭 신호에 잡음 (noise)이 포함되어 있는 경우에는 정밀하게 정점들을 검출하지 못하는 한계와 $\phi(\nu)$ 를 직접적으로 추출하지 못하기 때문에 박막 구조 분석이 불가능하다는 단점이 있다.

이와 달리 푸리에 변환을 이용하여 분산간섭계의 간섭 신호를 해석하는 경우, 수학적 원리상 정밀하게 간섭 신호의 주기를 측정하는 것이 가능하고, 통과 대역 필터 (band pass filter)와 역푸리에 변환을 추가적으로 적용하여 광 주파수별 위상을 추출할 수 있다. 식 (3)을 푸리에 변환하면,

$$i(\tau) = S(\tau) \otimes \left[\delta(\tau) + \frac{\delta(\tau - \tau_0)}{2} + \frac{\delta(\tau + \tau_0)}{2} \right] \quad (6)$$

로 표현할 수 있으며, τ 는 ν 의 푸리에 변환 변수를 의미하며, $S(\tau)$ 는 $s(\nu)$ 의 푸리에 변환 결과를, $\delta(\tau)$ 는 디락-델타 (Dirac-delta) 함수를 나타낸다. τ_0 는 L을 포함하는 변수로

$$\tau_0 = \frac{2nL}{c_0} \quad (7)$$

이다. 식 (6)에서 통과 대역 필터를 통해 간섭 신호의 변조 신호에 해당하는 성분 중 하나만을 추출하면 다음과 같으며,

$$i'(\tau) = S(\tau) \otimes \frac{\delta(\tau - \tau_0)}{2} \quad (8)$$

역푸리에 변환을 이용하면 식 (9)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$I'(\nu) = s(\nu) \frac{\exp[i\phi(\nu)]}{2} \quad (9)$$

그리고 식 (9)에서 로그 함수 및 실수부와 허수부의 관계를 통해 $\phi(\nu)$ 를 추출할 수 있다. 푸리에 변환 기반의 분산간섭계 해석 방법은 식 (9)와 같이 간섭 신호로부터 $\phi(\nu)$ 를 직접적으로 추출할 수 있으며, 별다른 구동 장치 없이 하나의 간섭 신호로부터 분석이 가능하다는 장점이 있어 많은 분산간섭계 연구에서 응용되고 있다. 그러나 푸리에 변환 기반의 분산간섭계 해석 방법은 이론적으로는 식 (9)에서와 같이 $\phi(\nu)$ 를 추출할 수 있지만, 실제 적용 측면에서는 계산 오차로 인하여 정확한 $\phi(\nu)$ 획득에 한계를 가진다. 특히, 푸리에 변환 시 간섭 신호는 윈도우 함수 (Window function)에 의해 왜곡이 발생하고, 이로 인해 계산된 $\phi(\nu)$ 는 위상 오차를 포함한다. 기존의 분산간섭계를 이용한 박막 측정 연구에서 얇은 박막의 두께 측정에 대한 한계를 가지는 이유

는 실제 측정에 의한 오차와 더불어 이러한 계산상의 오차로 인해 $\phi(\nu)$ 가 정확히 측정이 되지 못하기 때문이다.

한편, 위상천이 방법에 의한 분산간접계 해석 방법은 푸리에 변환 기반의 해석법과는 달리 $\phi(\nu)$ 를 간접 신호로부터 바로 추출할 수 있어, 앞서 설명한 것과 같은 계산상의 오차 없이 정확하게 $\phi(\nu)$ 를 획득할 수 있다. 위상천이 방법은 그림 10에서와 같이 기준거울이나 측정 대상에 미세하게 구동할 수 있는 구동 장치를 이용하여 정해진 거리만큼 이동하면서 여러 개의 간접 신호를 획득한다. 이후, 움직인 거리에 따른 위상과 획득된 간접 신호들 간의 관계로부터 간단한 수학적 관계를 통해 $\phi(\nu)$ 를 계산한다. 위상천이 방법은 구동하는 수에 따라 3-step, 4-step, 5-step 위상천이 방법 등으로 분류되며, 보통의 경우 4-step 방법이 널리 사용된다. 그러나 분산간접계에서 이러한 일반적인 위상천이 방법으로 $\phi(\nu)$ 를 추출하면, 파장별로 위상천이량 (Phase shift)이 달라지는 문제가 발생한다. 이는 일정하게 정해진 거리만큼 기준거울을 움직여도 구동 거리는 일정하지만 위상천이량은 구동 거리를 파장으로 나눈 값에 해당하기 때문에 파장별로 위상천이량이 달라지고 이로 인해 획득된 $\phi(\nu)$ 에 오차가 발생한다.

그동안 분산간접계에서는 일정하지 못한 위상천이량을 보상하기 위한 다양한 알고리즘이 개발되었으며, 대표적으로 5-step 보상 알고리즘 (Compensated 5-step phase shifting algorithm)은 간접 신호들로부터 $\phi(\nu)$ 를 추출함에 있어, 파장별 위상천이량의 차이를 보상해주는 방법을 이용한다. 그러나 기본적으로 위상천이 방법은 분산간접계에서 발생하는 파장별 위상천이량 차이에 따른 오차뿐만 아니라 구동 장치의 비선형성 (Nonlinearity), 히스테리시스 (Hysteresis) 등의 오차 요인을 포함하기 때문에 이를 근본적으로 해결하기 위한 알고리즘이 필요하다.

2. 임의의 반복 연산 알고리즘(Iterative arbitrary step algorithm)

앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 분산간섭계에서 위상천이 방법은 파장별 위상천이량 차이와 구동부의 구동 오차로 인해 $\phi(\nu)$ 를 정확히 측정 할 수 없다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 임의의 반복 연산을 기반으로 한 분산간섭계의 분석 알고리즘 방법을 도입하였다. 임의의 반복 연산 알고리즘은 간섭 신호들로부터 $\phi(\nu)$ 를 추출함에 있어, 위상천이량을 미지수로 놓고 계산이 진행되며, 획득된 간섭 신호들과 계산 과정에서 생성되는 간섭 신호들 간의 오차를 최소화하는 최적화 과정으로 구성된다. 임의의 반복 연산 알고리즘을 적용하기 위해 식 (1)을 k 에 따라서 다시 표현하면 다음과 같다.

$$I_{ij} = D_i + V_i \cos(\phi_i - \delta_j) \quad (10)$$

여기서 i 는 사용하는 카메라의 픽셀 위치이며, j 는 위상 변화 값을 나타낸다. 식 (10)에서 위상 정보를 획득하기 위해서는 코사인 함수를 제외한 다른 부분들을 제거해야 한다. 이때, 식 (10)에서 D_i 는 평균 광 강도를 의미하며, 위상천이 방법에서는 측정이 비교적 빠르게 수행된다는 가정 하에 D_i 의 값이 일정하다고 생각할 수 있으며, 이는 측정되는 간섭 신호들에서 초기 간섭 신호를 빼줌으로써($\Psi_{ij} = I_{ij} - I_{i1}$)을 제거할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi_{ij} &= V_i \cos \phi_i (\cos \delta_j - 1) + V_i \sin \phi_i \sin \delta_j \\ &= C_i (\cos \delta_j - 1) + S_i \sin \delta_j \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 C_i 는 $V_i \cos \phi_i$ 이며, S_i 는 $V_i \sin \phi_i$ 로 치환하여 표현하였으며 식 (11)을 이용하여 각 픽셀에 대한 위상은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{S_i}{C_i}\right) \quad (12)$$

임의의 반복 연산 알고리즘의 기본적인 원리는 측정된 간섭 신호로부터 C_i , S_i 와 δ_i 값을 찾는 것으로, 그 과정은 두 단계로 구성된다. 먼저 i, j 의 관계로 만들어진 값 (Ψ_{ij})과 측정된 간섭 신호로부터 계산된 값(Ψ'_{ij})의 오차가 최소가 되는 값을 찾아낸다. 이 경우 두 개의 에러 함수 (Error function)로 다음과 같이 정의된다.

$$E_i = \sum_{j=1}^m (\Psi_{ij} - \Psi'_{ij})^2 = \sum_{j=1}^m (C_i(\cos\delta_j - 1) + S_i\sin\delta_j - \Psi'_{ij})^2 \quad (13)$$

$$E_j = \sum_{i=1}^n (\Psi_{ij} - \Psi'_{ij})^2 = \sum_{i=1}^n (C_i(\cos\delta_j - 1) + S_i\sin\delta_j - \Psi'_{ij})^2 \quad (14)$$

여기서 식 (13)의 E_i 는 m 개의 연속된 위상천이에 대해 합산된 i 번째 픽셀의 오차를 의미하며, 식 (14)의 E_j 는 j 번째의 위상천이에서 얻어진 간섭무늬의 n 번째 픽셀에 걸친 오차의 합을 나타낸다. 그리고 이들 에러 함수의 극소값을 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial E_i}{\partial C_i} = \frac{\partial E_i}{\partial S_i} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial E_j}{\partial(\cos\delta_j)} = \frac{\partial E_j}{\partial(\sin\delta_j)} = 0 \quad (16)$$

결국, 식 (15)과 식 (16)을 이용하여 C_i , S_i 와 δ_i 을 계산할 수 있고, 이러한 과정은 반복적인 연산을 통해 수행된다. 실질적으로 이들 변수들은 서로 상호 교차 관계에 있기 때문에, δ_i 를 추출하기 위해 C_i , S_i 를 사용하여 계산해야 하며, 반대로 C_i , S_i 를 구하

기 위해 δ_i 를 사용하여 계산한다. 따라서 반복 연산 이후, C_i , S_i 와 δ_i 를 이용하여 식 (15)와 (16)을 만족하는 경우 분산간섭계의 $\phi(\nu)$ 를 위상천이 방법의 오차와 무관하게 정확히 측정할 수 있다. 비록 임의의 반복 연산 알고리즘은 원리적으로 반복 계산으로 인해 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있으나 오늘날 컴퓨터 기술의 급속한 발전과 빠른 최적화 알고리즘의 개발로 이러한 한계가 극복되었으며, 기존의 다른 방법들과 비교하여 가장 정확하게 분산간섭계의 $\phi(\nu)$ 를 추출할 수 있다.

제2절 영상 분광 타원계측기

1. 타원계측기 기본적인 원리 및 이론

일반적으로 등방 전달 매질 내에서 진행되는 단색 광파의 전기장 E 는 맥스웰 방정식 (Maxwell equation)을 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = (E_{0x}x + E_{0y}y)e^{i\omega(\frac{Nz}{c} - t)} = (E_{0x}x + E_{0y}y)e^{i\omega(\frac{nz}{c} - t) - \frac{\omega kz}{c}} \quad (17)$$

여기서 N 은 복소 굴절률 $N = n + ik$ (Complex Refractive Index)을 의미하며, ω 는 파동의 각 주파수 (Angular Frequency)를, k 는 소광계수 (Extinction Coefficient)를, c 는 진공 중의 빛의 속도 (Speed of light in vacuum)를 의미한다. 이때, 타원계측기의 광원에서 특정편광 상태로 광이 측정 시편에 입사하는 경우, 입사각과 측정 시편의 두께, 굴절률에 의해 편광 상태가 달라지고, 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$E_{ip} = |E_{ip}| \cos(\omega t - \delta_{ip}) \quad , \quad E_{is} = |E_{is}| \cos(\omega t - \delta_{is}) \quad (18)$$

(입사면에 대해 평행한 성분을 p-파, 수직인 성분을 s-파)

광원에서 시편에 입사하는 빛은 식 (18)과 같이 p-파와 s-파로 표현된다. 각각의 편광의 전기장은 시편에 의해 위상 및 진폭이 변하게 되고, 반사된 빛은 서로 다른 위상과 진폭을 가지게 되며 서로 중첩되어 타원편광 (Elliptical polarization)이 된다. 이 경우 p-파와 s-파의 반사계수 (Reflection Coefficient)는 프레넬 방정식에 의해 각각 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$r_p = |r_p| e^{i\delta_p} = \left| \frac{E_{rp}}{E_{ip}} \right| e^{i(\delta_{rp} - \delta_{ip})} \quad , \quad r_s = |r_s| e^{i\delta_s} = \left| \frac{E_{rs}}{E_{is}} \right| e^{i(\delta_{rs} - \delta_{is})} \quad (19)$$

이를 타원계측기에서 사용되는 복소반사계수비(ρ)로 정리하면 다음과 같다.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \tan\Psi \cdot e^{i\Delta} \quad (20)$$

여기서 $\tan\Psi$ 는 p-파와 s-파의 반사계수에 따른 진폭의 크기 비를 의미하며, Δ 는 p-파와 s-파의 반사계수의 위상차를 의미한다. 이때, 광의 입사각이 시편에 대해 수직인 경우에는 등방성 (Isotropic) 물질에 대해서 반사계수가 같아지기 때문에, 두 상수 (Δ, Ψ)는 의미가 없게 된다. 그러나 일반적인 타원계측기는 광이 시편에 수직이 아닌 상태로 입사하도록 광학적으로 구성되며, 특히 두 상수 (Δ, Ψ)의 민감도 향상을 위해, p-파와 s-파의 반사계수 차이가 큰 측정 시편의 편광각 (브루스터 각)으로 입사각을 설정한다. 그러면 타원계측기에서는 측정 시편의 굴절률과 박막의 두께에 따라 복소반사계수비가 달라지고, 이를 박막에 대한 이론적 모델과의 비교를 통해 박막의 두께 및 굴절률을 측정할 수 있다.

2. 영상 분광 타원계측기

타원계측기는 일반적으로 원리 및 구성에 따라 다양한 종류의 측정법들이 있으나, 본 논문에서는 이 중에서 본 연구의 목표를 달성하기 위한 영상 분광 타원계측기의 구성 요소인 3가지 타원계측법에 대해서만 다루기로 한다. 첫 번째로 Photometric Ellipsometry 원리는 편광기나 검광기 등의 편광 부품들의 회전을 이용하여 획득되는 빛의 밝기 변화를 이용하여 박막의 두께를 측정하는 방법으로, 빛의 소광점을 찾아 분석하는 Null Ellipsometry와는 달리 측정시간이 빠르다는 장점이 있다. 두 번째는 Spectroscopic Ellipsometry 원리로, 단파장의 광원을 사용하는 타원계측기는 주로 다층 박막 분석을 위해 사용되고 있으며 또한 데이터의 정보량이 작아 다층 박막을 분석하기 어렵지만, Spectroscopic Ellipsometry는 다층 박막의 두께를 분석하기 위해 다파장 광원을 사용하여 측정하며 많은 양의 데이터를 이용하여 보다 신뢰성 있는 측정이 가능하다. 마지막으로 Imaging Ellipsometry는 타원계측기와 결상 광학 시스템이 결합된 광학 구성으로, 일반적인 타원계측기는 점 측정 (Point measurements) 방법으로 많이 사용되는데 반해, 본 연구에서는 다층 박막의 구조물 분석을 위해 점 측정이 아닌 선 측정 (Line measurements)을 위한 Imaging Ellipsometry 원리를 도입하였다. 앞서 설명한 Photometric Ellipsometry와 Spectroscopic Ellipsometry, Imaging Ellipsometry 원리는 그림 12와 같이 영상 분광 타원계측기 (Spectroscopic Imaging Ellipsometry)에 복합적으로 구성될 수 있으며 이러한 측정 원리들을 바탕으로 박막 시편의 구조를 분석한다. 이때, 광원으로는 넓은 파장대역의 광원이 사용되며, 입사광은 편광기 (Polarizer)와 위상 지연판 (Phase retarder)을 지나 시편에 입사한 뒤, 반사하여 검광기 (Analyzer)를 통과한 후, 영상 분광기 (Imaging spectrometer)에 입사한다. CMOS 카메라에서는 시편의 임의의 선에 대해 분광된 이미지를 획득하게 되며, 위상 지연판의 회전에 따른 이미지들을 통해 시편의 한 선에 대한 박막의 두께를 측정한다.

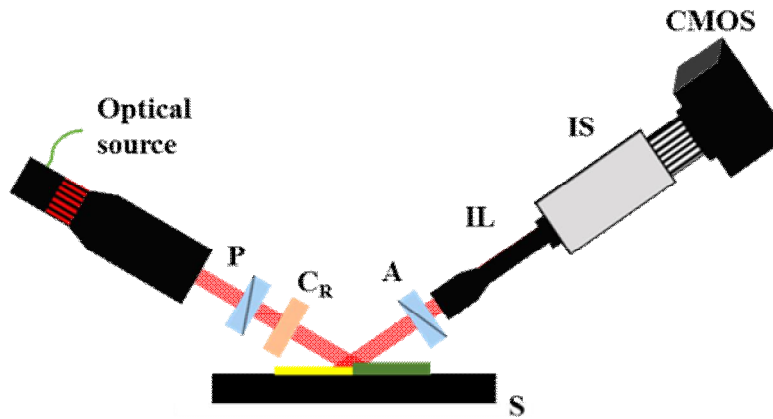


그림 12. 영상 분광 타원계측기 개략도

한편, 타원계측기에서 박막의 두께를 해석하기 위해서는 이론적 모델에 의한 값과 실험값의 비교를 통한 최적화 과정이 필요하다. 그리고 타원계측기의 이론적 모델은 광학 구성에서 사용되는 부품들을 통한 시스템 해석으로 수립할 수 있으며, 보통의 경우 편광을 고려한 Jones Matrix나 Mueller Matrix를 이용하여 해석한다. 본 연구에서는 측정 박막의 복굴절성을 고려하지 않기 때문에, 보다 간단하게 시스템을 해석하기 위해 Jones Matrix를 이용하여 시스템을 해석하였다. Jones Matrix는 표 1에서 보듯이 2×2 개의 원소를 가진 Matrix로 편광상태나 편광상태의 변화를 주는 광 부품을 표현하는데 사용되며 특히 완전편광일 경우 주로 사용된다.

표 1. 광학제품의 Jones matrix

Jones Matrix	광부품 및 그 특성
$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	선형 편광된 전자기파
$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	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: δ 는 fast-axis를 기준으로 했을 때 retardation
$\begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$	좌표 변환: 각 광학부품의 광축을 기준으로 θ 만큼 회전시킴

3. 박막 이론

3-1. 단층 박막 측정 이론

단층 박막은 일반적으로 그림 13과 같이 기판 위에 단일 층의 박막이 도포되어 있는 구조이며, 전체 영역은 대기층, 박막, 기판으로 나눌 수 있다.

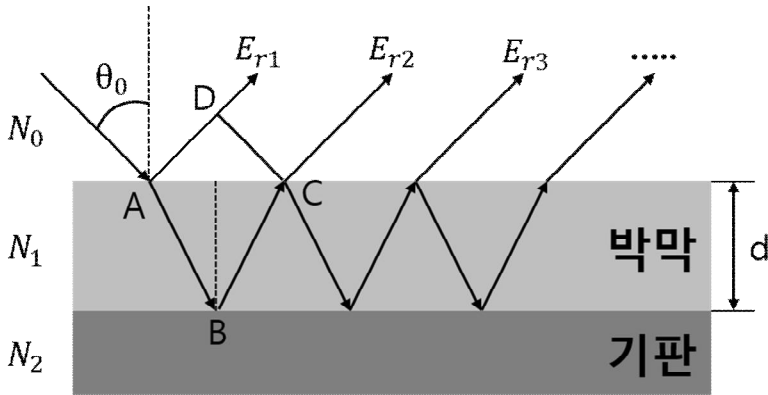


그림 13. 단일 박막(대기층/박막/기판)의 광학적 모델

여기서 N_0 , N_1 , N_2 는 각각 공기, 박막, 기판의 복소 굴절률을 나타낸다. 타원계측기에 서 빛이 두께가 d 인 박막에 각도 θ_0 로 입사하면, 박막의 표면과 내부에서는 그림 13과 같이 표면에서 반사한 빛과 박막을 투과한 후 기판에 의해 반사한 빛들이 발생하며, 다중 반사($E_{r1} + E_{r2} + E_{r3} \dots$)에 의한 빛들은 박막의 두께 d 와 복소 굴절률(N_1)로 인해 위상 지연이 발생한다. 이때, 다중 반사하는 빛들의 위상차(2β)는 빛들의 광경로 차로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$2\beta = 2K_1(\overline{AB} + \overline{BC}) - 2K_0\overline{AD} = \frac{4\pi d}{\lambda}(N_1 \cos \theta_1) \quad (21)$$

그래서 최종적으로 박막에서 반사된 빛은 표면과 내부에서 다중으로 발생하는 투과,

반사된 빛들의 합으로 표현되며, 이에 대한 반사계수는 각 경계면에서 유도되는 프레넬 (Fresnel) 반사 및 투과 계수와 식 (21)을 이용하여 다음과 같이 무한급수로 표현할 수 있다.

$$r = r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{-i2\beta} + t_{01}t_{10}r_{12}^2e^{-i4\beta} + \dots \quad (22)$$

식 (22)의 무한급수는 수학적으로 식 (23)과 같이 정리할 수 있으며, 이를 통해 단층 박막의 이론적인 반사계수를 유도할 수 있다.

$$r = \frac{r_{01} + r_{12}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01}r_{12}\exp(-i2\beta)} \quad (23)$$

또한, 식 (23)을 p-파와 s-파에 대해 각각 적용하여 각각의 반사계수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_p = \frac{r_{01,p} + r_{12,p}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,p}r_{12,p}\exp(-i2\beta)}, \quad r_s = \frac{r_{01,s} + r_{12,s}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,s}r_{12,s}\exp(-i2\beta)} \quad (24)$$

결국, 식 (24)를 이용하여 단층 박막에 대해 편광에 따른 복소반사계수의 이론적 모델이 정립되고, 실제 측정된 값과 이론적 모델 값과 비교하여 최적화 과정으로 박막의 두께를 측정한다.

3-2. 다층 박막 측정 이론

기본적으로 다층 박막은 단층 박막의 연속이므로, 식 (24)를 각 층에 대해 적용하여 다층 박막에 대한 이론적 모델을 정리할 수 있다. 하지만 이러한 표현은 수식이 매우 복잡해질 뿐만 아니라 비효율적이다. 이를 해결하기 위해 다층 박막에 대한 이론적 모델은 행렬을 이용하여 간단하게 표현할 수 있으며, 박막의 경계면 행렬 (Interface matrix)과 층간 행렬 (Layer matrix)로 구성된 산란 행렬 (Scattering matrix)을 이용하면, 이러한 복잡한 과정 없이 다층 박막의 이론적 모델을 정립할 수 있다. 그림 14와 같이 다층 박막에 빛이 θ 로 입사하는 경우, 각 박막 층의 경계면에서는 반사와 투과가 일어나고 박막의 내부에서는 흡수와 위상 변화가 발생한다.

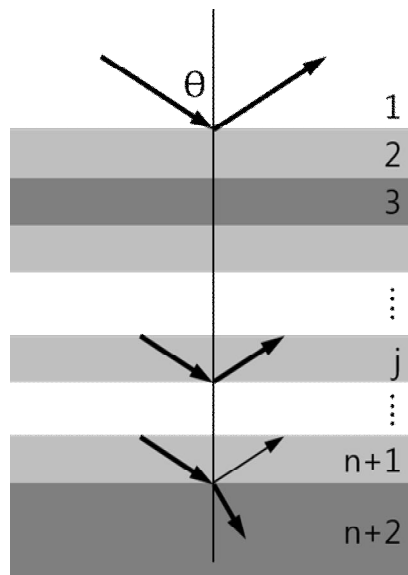


그림 14. 다층 박막의 반사 및 투과

이러한 현상들을 경계면 행렬(I)과 층간 행렬(L)로 구분해서 나타내면, 전체 (n+1)개의 박막을 가진 다층 박막에 대한 산란 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = I_{12} L_2 I_{23} L_3 \cdots I_{jj+1} L_{j+1} \cdots I_n L_{n+1} I_{n+1n+2} \quad (25)$$

여기서 L_{jj+1} 은 j번째와 (j+1)번째 경계면 행렬이며, L_{j+1} 은 (j+1)번째 층을 지날 때의 층간 행렬을 나타낸다. 이 행렬들은 앞에서 정의한 Fresnel 반사계수와 투과계수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{jj+1} = \begin{pmatrix} 1 & r_{jj+1} \\ t_{jj+1} & t_{jj+1} \\ r_{jj+1} & 1 \\ t_{jj+1} & t_{jj+1} \end{pmatrix}, \quad L_j = \begin{pmatrix} e^{i\beta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_j} \end{pmatrix} \quad (26)$$

여기서 β_j 는 j번째 층을 지날 때 발생하는 위상 변화량으로 그 층의 두께(d_j), 입사각(θ_j), 그리고 복소 굴절률(N_j)의 함수이다.

$$\beta = \frac{2\pi d_j N_j \cos \theta_j}{\lambda} \quad (27)$$

이때, 산란 행렬 역시 (2×2) 행렬이며, p-파와 s-파에 대한 산란 행렬을 각각 계산한 후 반사계수 및 복소반사계수비를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r_p = \frac{S_{21p}}{S_{11p}}, \quad r_s = \frac{S_{21s}}{S_{11s}} \quad (28)$$

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{S_{21p}}{S_{11p}} \times \frac{S_{11s}}{S_{21s}} \quad (29)$$

결국 식 (28)과 (29)를 이용하면 단층 박막에서와 마찬가지로 다층 박막에서도 이론적인 값과 타원계측기의 실험값의 차이를 최소화하는 최적화를 통해 다층 박막의 두께를 측정할 수 있다.

제3절 간섭계와 타원계측기 결합 원리

본 논문에서 제안하는 간섭계와 타원계측기를 결합한 시스템은 그림 15와 같이 구성된다. 전체적인 광학시스템은 크게 넓은 파장 대역의 광원을 사용하는 광원부, 시편을 정렬하고 측정하기 위한 시편부, 각각의 측정결과에 대한 분광 정보 및 공간 정보를 검출하기 위한 이미징 검출부로 분류된다. 광원부에서 넓은 파장 대역의 빛은 편광기와 위상 지연판을 통과한 후 광분할기에 입사되어 기준광과 측정광으로 나누어지며, 이때, 기준광의 유/무에 따라 다음과 같은 측정모드가 결정된다.

- 타원계측기 모드 (Ellipsometry mode)
- 간섭계 모드 (Interferometry mode)

먼저 타원계측기 모드 (Ellipsometry mode)는 빔가리개 (Optical shutter)에 의해 기준광이 차단된 상태에서 측정광만을 이용하여 측정 시편의 박막 두께를 측정한다. 타원계측기 모드에서 측정광은 측정 시편에 입사하여 반사한 후, 거울 (M_M)을 통해 측정 시편으로 되돌아오고, 다시 한 번 측정 시편에서 반사하여 영상 분광기와 CMOS 카메라로 구성된 이미징 검출부에서 측정된다. 이때, 그림 15에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제안하는 타원계측기는 일반적인 타원계측기와는 달리 빛이 시편을 두 번 반사하여 되돌아오도록 구성되며, 그림 16과 같이 Jones matrix를 이용하여 전체 시스템에 대한 이론적 분석을 수행한다.

한편, 간섭계 모드에서는 타원계측기 모드와는 반대로 기준광과 측정광 모두 광검출부에서 측정되며, 두 광에 의한 간섭 신호가 획득된다. 이때, 넓은 파장대역의 광원으로 인해 기준거울과 측정거울의 광 경로차가 0에 가까운 지점에서 간섭 신호가 발생하게 되고, 앞서 설명한 위상천이를 통한 임의의 반복 연산 알고리즘을 적용하기 위해 PZT (Piezoelectric transducer)를 이용하여 기준거울이 구동되면서 광검출부에서 간섭 신호가 획득된다.

본 연구에서 제안하는 간섭계와 타원계측기를 결합한 시스템의 측정은 다음과 같은 과정으로 수행된다.

- ① 타원계측기 모드에서 영상 분광 타원계측 원리를 이용한 박막의 두께 측정
- ② 간섭계 모드에서 위상천이 분산간섭계 원리로 광 주파수별 위상 획득
- ③ 측정된 박막 두께 정보를 이용한 이론적 광 주파수별 위상 생성
- ④ 간섭계에서 획득된 위상에서 박막 두께에 의한 위상 제거 및 형상 측정

타원계측기 모드에서 영상 분광 타원계측 원리를 적용하여 이론값과 실험값의 최적화를 통해 얻어진 박막의 두께 정보(t)는 박막의 두께 값에 사용됨과 동시에 간섭계 모드의 위상천이 분산간섭계를 통해 얻어진 위상정보에서 형상만을 추출하는데 사용된다. 이때, 분산간섭계를 이용해 박막을 측정하여 얻어진 위상정보는 식 (5)와 같이 박막의 형상정보를 가진 위상과 두께 정보를 가진 위상이 합해진 결과이기 때문에, 영상 분광타원계측 원리를 통해 측정된 박막 두께(t)를 이용하여 두께에 따른 위상을 생성한 후, 이를 위상천이 분산간섭계의 위상정보에 보상하면 형상 (h)만을 포함한 위상 획득이 가능하다. 그림 17은 본 연구에서 제안하는 간섭계와 타원계측기를 결합한 시스템의 측정 원리를 보여준다.

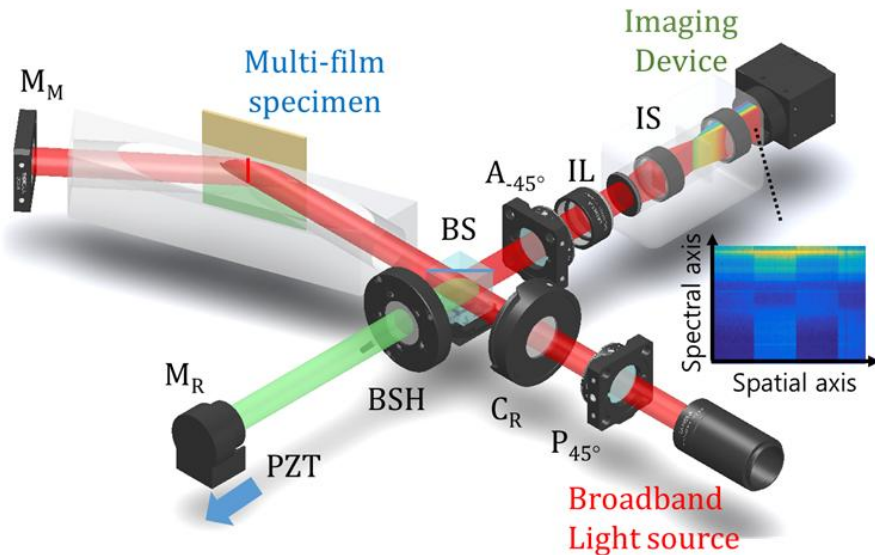


그림 15. 복합 측정 시스템 구성도

$$E = \begin{pmatrix} 1 & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & R & \sin A \\ \sin A & R & \cos A \end{pmatrix} (BS_R) \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} (BS_t) \begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos P & R & \sin P \\ \sin P & R & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & R & \sin P \\ -\sin P & R & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C \\ \sin C & \cos C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C & \sin C \\ -\sin C & \cos C \end{pmatrix}$$

그림 16. Jones matrix를 이용한 복합 측정 시스템 해석

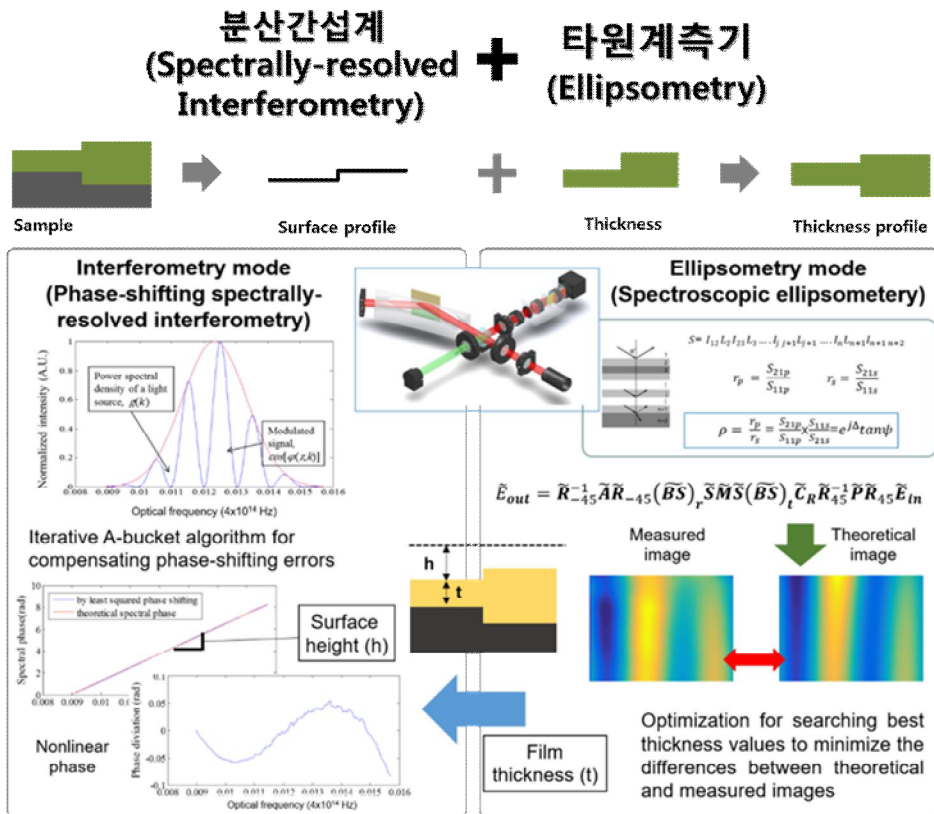


그림 17. 간섭계와 타원계측기의 측정 원리

제3장 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 제안한 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템을 검증하기 위해, 간섭계를 이용하여 형상정보 획득 실험을 수행하였고, 타원계측법을 이용하여 박막 시편의 두께 측정 실험을 수행하였다. 두 측정 방법의 가능성 여부를 확인하고 최종적으로 다층 박막의 3차원 구조분석 실험을 수행하였다. 시편 측정에 앞서 제안하는 측정 시스템의 Calibration 작업을 통해 이론에 사용되는 광학부품의 신뢰성을 높여 데이터 분석에 사용되도록 하였다.

본 3장은 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템의 구성 및 Calibration, 실험 내용을 기반으로 다음과 같이 4 단계로 나누어 구성되었다.

- 시스템 Calibration
 - 영상 분광기와 CCD Camera pixel matching
 - 복합 측정 시스템 하드웨어 Calibration
- 위상천이 분산간섭계
 - 위상천이 분산간섭계 실험 및 결과
- 영상 분광 타원계측기
 - 영상 분광 타원계측기 실험 및 결과
- 복합 측정 시스템
 - 복합 측정 시스템 실험 및 결과

제1절 복합 측정 시스템 구성

1. 시스템 Calibration

본 연구에서 제안하는 복합 측정 시스템의 타원계측기 측정법은 일반적인 타원계측기와 동일하게 측정을 위한 시스템 calibration 작업이 매우 중요하다. 이는 측정 데이터를 분석하는 과정에서, 구성된 시스템에 대한 이론적인 모델을 구축하기 위해 사용되는 편광판, 위상지연판의 특성을 정확하게 파악해야 하기 때문이다. 특히, 각 소자들의 Jones matrix를 이용하여 시스템 모델을 정립할 때에는 편광축에 따라 각 소자들의 이론값이 다르기 때문에 이에 대한 calibration이 필수적이며, 또한 타원계측기의 특성상 빛의 시편에 대한 입사각도도 정확히 결정해야 한다. 그리고 이를 이용한 시스템 해석을 통해 생성된 이론값은 실험값과 비교하여 정확성과 신뢰성이 높아진다.

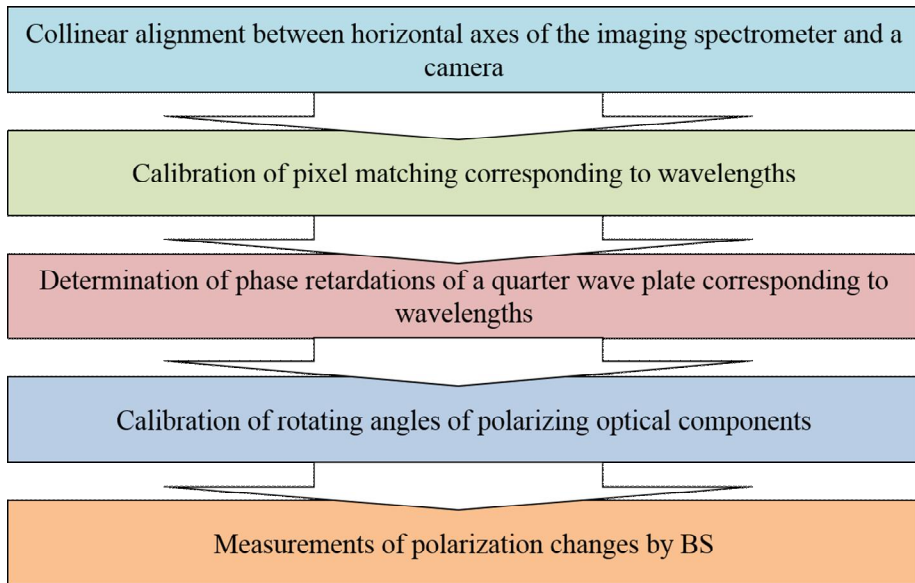


그림 18. 복합측정 시스템 Calibration 목록

이를 위해 본 연구에서는 그림 18과 같이 일반적인 타원계측기의 calibration 과정을 포함하여 다음과 같은 calibration이 진행되었다.

- 사용하는 영상 분광기와 광검출기의 수평, 수직축 정렬
- 영상 분광기를 통해 분광된 파장에 해당하는 광검출기의 pixel 확인
- 사용하는 위상지연판의 파장별 위상지연량 측정
- 광학부품들의 편광축 교정
- 광분할기에 의해 발행하는 편광 영향 고려

1.1 영상 분광기와 광검출기 정렬 및 파장에 따른 pixel 확인

본 논문에서 제안하는 다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템을 구성하기에 앞서 먼저 실험에 사용되는 영상 분광기와 광검출기로 사용하는 CCD 카메라의 정렬 및 파장에 따른 pixel 확인을 위한 calibration을 진행하였다. 영상 분광기 구조는 그림 19와 같이 앞단에 입사하는 광을 제한하기 위한 슬릿(Slit), 초점 렌즈(Focusing lens), 프리즘 (Prism) 및 회절 격자 (Diffraction grating)와 같은 분산 장치(Dispersion element), 그리고 시준기 (Collimator)로 구성되어 있다.

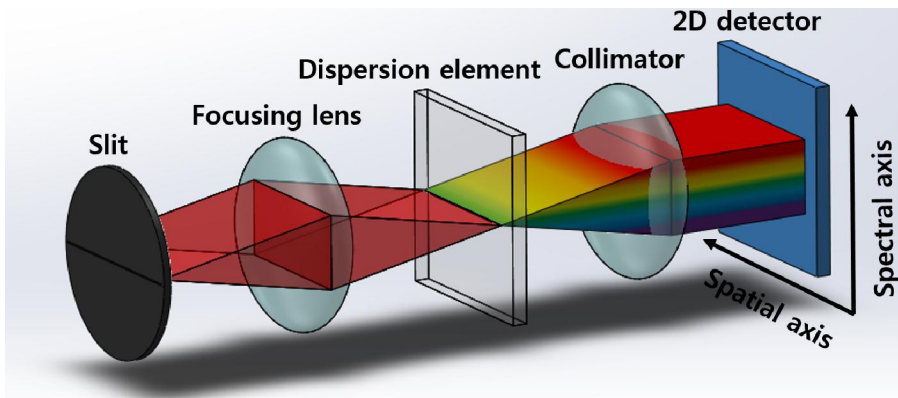


그림 19. 영상 분광기 구성도

측정 시편의 선 (Line)에 대한 영상은 외부의 결상 렌즈 (Imaging lens)를 통해 슬릿에 결상되고, 이를 통과한 후 초점 렌즈를 통해 분산 장치에 입사하게 된다. 이때, 입사한 넓은 파장 대역의 광은 분산 장치에 의해 각각의 파장에 따라 광이 나뉘지게 되며, 시준 렌즈를 통해 CCD 카메라와 같은 2D 검출기에 파장별로 영상이 맺히게 된다. 그래서 CCD 카메라의 수평(x) 축은 측정 시편의 선에 대한 공간 축 (Spatial axis)을, 수직(y) 축은 광의 파장에 따른 분광 축 (Spectral axis)을 의미한다. 따라서 이러한 영상 분광기와 CCD 카메라의 결합에서는 수평, 수직 축의 정렬과 더불어 수직 방향의 pixel 에 해당하는 파장에 대한 분광 정보가 매우 중요하며, 실험을 통해 결과를 데이터베이스 (Database)로 확보하여야 한다. 참고로 본 논문에서 사용한 영상 분광기는 SPECIM에서 상용화된 제품인 IMSPECTOR V8을 사용하였고, 검출기로는 Thorlabs 사의 CCD Camera인 DCU224M을 사용하였다. 각각의 장치에 대한 상세 사양은 표2와 같다.

표 2. 영상 분광기와 검출기의 성능

영상 분광기 (V8)		검출기 (CCD Camera)	
Entrance slit size (width/length)	50 μm /9.8 mm	Resolution	1280 \times 1024 pixel
Camera sensor	2/3 " - 768 \times 494		
Spectral range	360 - 820 nm	Pixel size	4.65 \times 4.65 μm
Spectral resolution	3 nm		
Spectral bending	$<\pm 2.0$ nm	Sensitive area	5.95 \times 4.76 mm
Spatial resolution	0.57 μm		

앞서 설명한 바와 같이 영상 분광기와 CCD 카메라 간 calibration은 다음과 같이 나뉜다.

- 사용하는 영상 분광기와 광검출기의 수평, 수직축 정렬
- 영상 분광기를 통해 분광된 파장에 해당하는 광검출기의 pixel 확인

먼저, CCD 카메라와 영상 분광기의 수평, 수직 축을 일치시키기 위해, 편이상 광원으로는 선폭이 매우 좁은 He-Ne laser를 이용하여 매우 좁은 선폭의 분광 영상을 획득하고, 이러한 분광 영상이 횡방향으로 수평이 되도록 정렬을 진행하였다. 그림 20(a)와 같이, 수평 정렬 과정 중에 CCD 카메라의 수평 pixel들과 He-Ne laser의 분광선이 평행하지 않는 경우에는 C-mount의 형태로 결합되어 있는 두 부품 사이를 수동적으로 회전시키면서 두 선의 평행 정도를 확인하였다. 그 결과, 그림 20(b)와 같이 He-Ne laser의 분광선이 CCD 카메라의 분광에 따른 수평축과 일치하도록 두 부품이 정렬되었음을 확인하였다. 이때의 CCD 카메라의 수직 방향의 pixel은 He-Ne laser의 파장에 대한 분광 정보를 나타낸다.

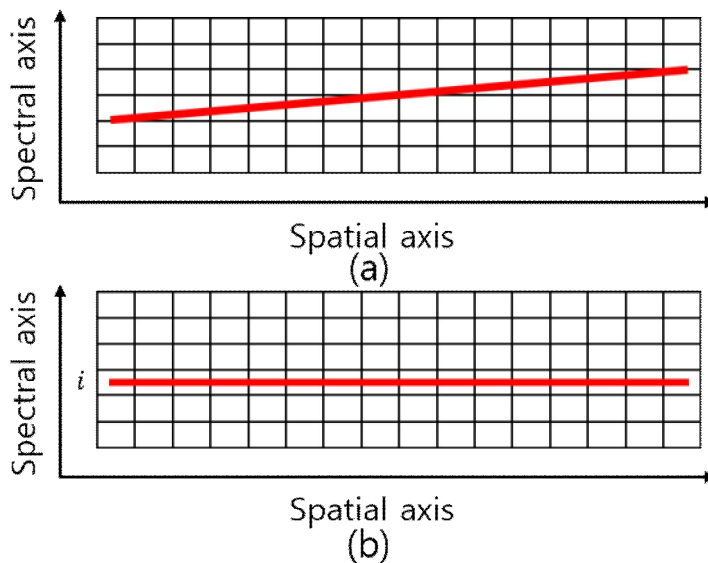


그림 20. 영상 분광기와 CCD 카메라의 정렬

두 번째로, 광원의 파장에 따른 CCD 카메라의 수직 방향 pixel을 확인하기 위해 넓은 파장 분포를 가지는 광원과 간섭 필터 (Interference filter)로 calibration을 진행하였다. 사용한 간섭 필터는 Thorlabs 사의 파장 통과 대역 필터 (Band-pass filter)로 10 nm의 반치폭 (Full width at half maximum, FWHM)을 가지며, 중심 파장이 각각 450, 500, 550, 600, 650, 700 nm인 전체 6 개의 필터를 사용하여 그림 21과 같은 결과를 획득하였다.



그림 21. 파장 통과 대역 필터를 이용해 획득한 영상

그 결과, 각 필터에 의한 수직방향 (분광 방향)에 해당하는 빛의 광도는 대략 40개의 pixel에서 검출됨을 확인하였고, 이를 무게중심법 (Center of gravity)을 이용하여 그림 22와 같이 각 파장에 해당하는 중심 pixel 값을 획득하였다. 또한, 6개의 필터들의 중심 파장에 해당하는 pixel에 대해 내삽법 (Interpolation)을 이용하여 그림 23과 같은 파장별 pixel 값을 추출하였다. 이러한 과정은 수평방향 (선 방향)의 모든 부분에 대해 수행되었으며 해당 결과를 행렬의 형태로 데이터베이스화하였다.

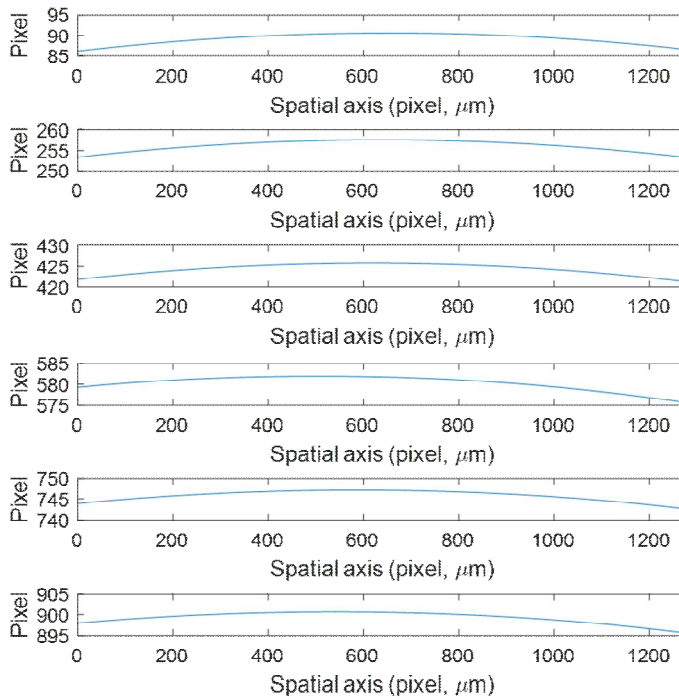


그림 22. Band-pass filter의 파장에 해당하는 pixel 위치 값

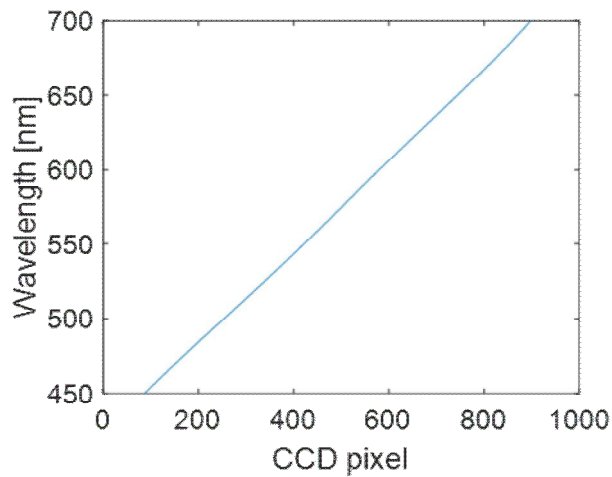


그림 23. 수평방향의 임의의 영역에서 내삽법을 이용한 CCD pixel과 파장 관계

1.2 복합 측정 시스템 하드웨어 Calibration 방법

(1) 복합 측정 시스템 입사각도 Calibration

본 논문에서 제안하는 복합 측정 시스템은 구조상 간섭계의 원리로 인하여 시편에서 반사된 빛이 되돌아와서 광검출기에 검출되어야 한다. 또한, 타원계측기는 시편에 대한 복소반사계수비를 이용하여 박막의 두께를 측정하기 때문에, 복소반사계수비가 최대가 되는 브루스터각 (Brewster's angle)을 이용한다. 일반적으로 타원계측기는 기저판 (Substrate)으로 널리 사용되는 Si 웨이퍼 (Silicon Wafer)의 브루스터각인 70° 를 시편의 입사각으로 사용한다. 그래서 복합 측정 시스템의 측정광은 시편에 70° 의 입사각으로 입사하는 동시에, 이후 거울에서 반사하여 되돌아올 수 있도록 구성되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 그림 24와 같이 각도 보정 마운트를 제작하여 다른 광 부품들과 결합이 용이한 동시에 기계 가공에 의한 70° 의 입사각을 확보하였다. 이때, 제작된 마운트로 빛이 입사하는 경우, 측정 시편이 마운트 아랫면과 수평한 상태가 되면 이론적으로 빛은 시편에 대해 항상 70° 로 입사하게 된다. 그러나 실제의 경우, 가공 오차 및 시편의 위치 및 정렬 상태에 따라 입사각의 각도는 약간의 차이가 발생하며, 그 정도는 $\pm 1^\circ$ 차이임을 확인하였다.

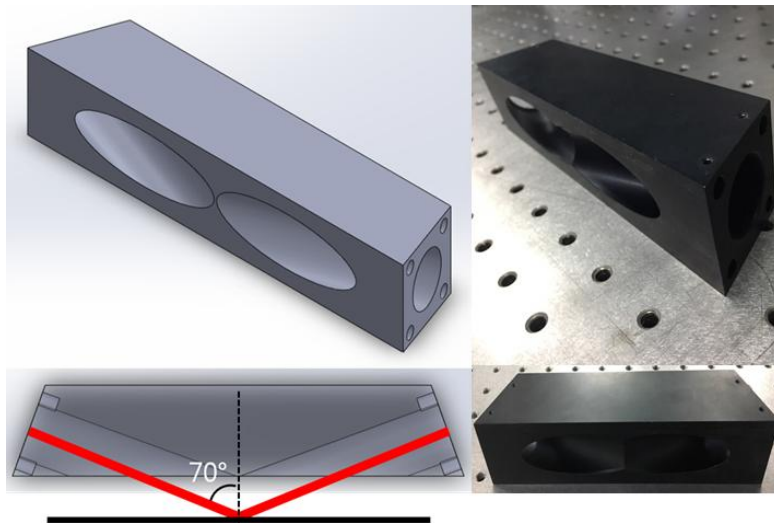


그림 24. 각도 보정을 위한 마운트

(2) 광학부품의 편광 각도 및 파장별 위상지연 값 Calibration

타원계측기는 편광기 및 위상지연판과 같은 편광 광학부품들이 사용되며, 이들을 이용해 이론적인 모델을 생성해내기 때문에 각각의 광학부품들의 편광축 (Polarization axis)을 정확히 측정해야 한다. 또한, 본 연구에서 사용되는 위상지연판의 경우, 위상지연 값이 각 파장마다 다르기 때문에 이 또한 Calibration이 필요하다. 본 연구의 복합 측정 시스템의 타원계측기는 편광기와 검광기는 고정되고 위상지연판이 회전하는 PC_RSA 구성이므로, 편광기와 검광기의 편광축 각도를 정확히 설정하는 것이 중요하다. 이를 위해, 편광기의 편광축 각도는 편광 정의가 잘 되어 있고, 편광 기준으로 활용할 수 있는 ZYGO사의 헤테로다인 레이저 (Heterodyne Laser)를 이용하여 Calibration을 진행하였다. ZYGO사의 헤테로다인 레이저는 내부의 음향 변조기 (Acousto-optic modulator) 등을 이용하여 두 개의 서로 다른 주파수의 레이저 빛을 생성하며, 이때 두 빛은 각각 정확히 수직, 수평 상태로 편광되어 있는 특징이 있다. 그래서 본 연구에서는 이러한 특징을 이용하여, 그림 25와 같은 구성으로 편광기의 편광축 각도를 calibration하였다. 레이저 앞단에 편광기로 사용하기 위한 Glan-Thomson 편광기를 설치하고, 이를 통과한 빛을 광검출기로 검출하였으며, 이때 서로 다른 주파수를 가지는 2개의 빛들에 의한 맥놀이 신호 (beating frequency)를 관찰하였다. 이때 2개의 레이저 빛은 45° 회전된 편광기를 통과하는 경우, 시간 영역 간섭에 의해 광검출기에서 맥놀이 신호가 가장 높게 측정된다. 동일한 방법으로 검광기의 Calibration도 진행하였으며, 그 결과 편광기와 검광기의 편광축 각도를 각각 45°, -45°로 설정하였다.

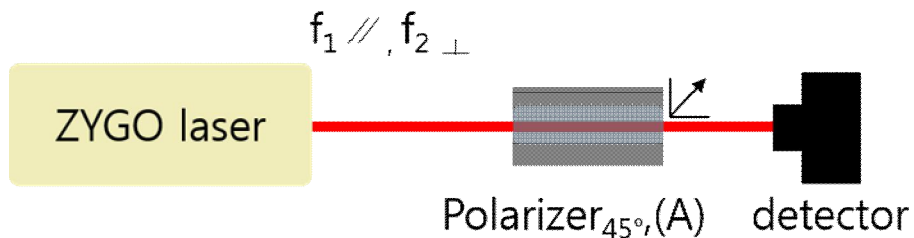


그림 25. ZYGO laser를 이용한 편광기 보정

한편, 본 연구에서는 복합 시스템에서 400-800 nm의 파장 대역을 가지는 $\lambda/4$ 위상 지연판을 보정판 (Compensator)으로 사용하였지만, 제조사에서 제공하는 사양에서 파장에 따른 위상지연 값이 서로 다를 수 있음을 확인하였다. 예를 들어, 600 nm 대역의 파장을 중심으로 위상지연 값은 1.6336이지만, 400 nm대역에서는 위상지연 값이 1.2566이다. 일반적으로 물질의 굴절률 및 복굴절성은 파장에 함수이기 때문에 이러한 현상이 발생하며, 이를 무시하고 위상지연 값을 상수로 고정시킨 채 타원계측기의 이론 모델을 생성하게 되면 실험 결과와 이론 모델이 서로 상이하여 오차가 유발된다. 이를 해결하기 위해서는 실험 전에 각 파장에 대한 위상지연 값을 획득하여 순람표 (Look-up table)를 작성하고 이를 이론 모델에 적용할 필요가 있다. 위상지연판의 파장별 위상지연 값을 획득하는 방법으로는, 앞서 편광축 각도에 대한 calibration이 수행된 편광기 및 검광기를 그림 26과 같이 동일한 광축에 정렬시킨 후, 위상지연판을 0.5°씩 회전하면서 전체 360°에 해당하는 광량의 세기 변화량을 획득하고, 이를 Jones matrix 기반의 이론값과 비교하는 최적화 과정을 이용하였다.

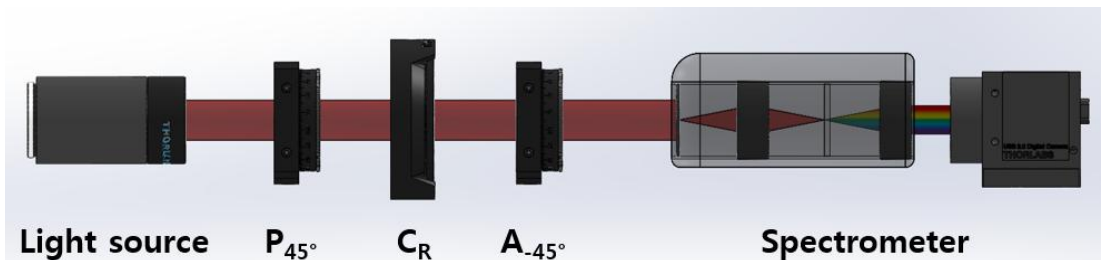


그림 26. 위상지연판의 파장별 위상지연을 보정하기 위한 실험 구성

그 결과, 우선 그림 27(a)와 같이 위상지연판의 회전에 따른 광강도를 파장별로 획득할 수 있었으며, 각 파장에 따라 획득되는 광 강도 곡선들이 조금씩 다를 수 있음을 확인하였다. 그림 27(a), (b)의 경우, 545 nm 파장의 광 강도 곡선이 500 nm 파장의 광 강도 곡선보다 약간 오른쪽으로 이동한 결과를 알 수 있다. 이러한 파장에 따른 광 강도 곡선들과 Jones matrix 기반의 모델을 각각 비교하여 위상지연판의 각 파장에 따른 위상지연 값을 그림 28과 같이 획득하였으며, 450 nm와 700 nm의 파장에서 0.017 정도의 위상지연 값 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

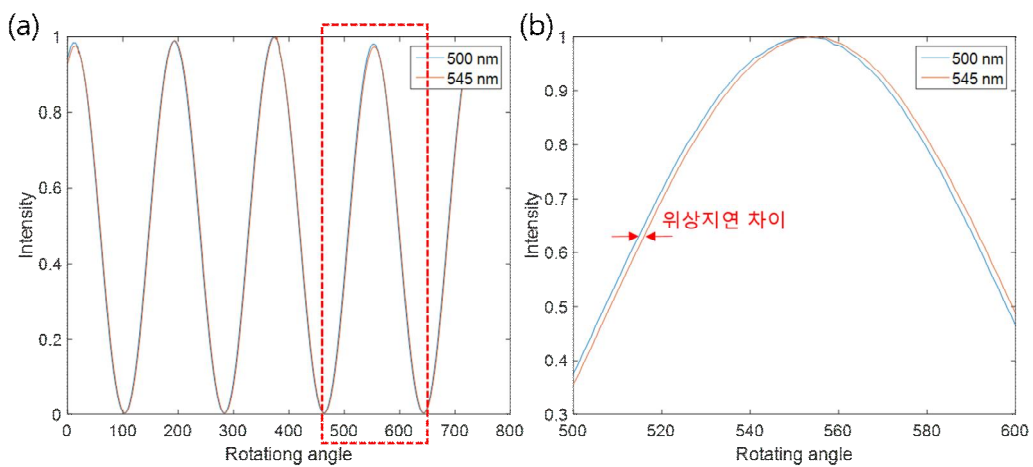


그림 27. 500 nm와 545 nm 파장에서 위상지연판의 위상지연 결과

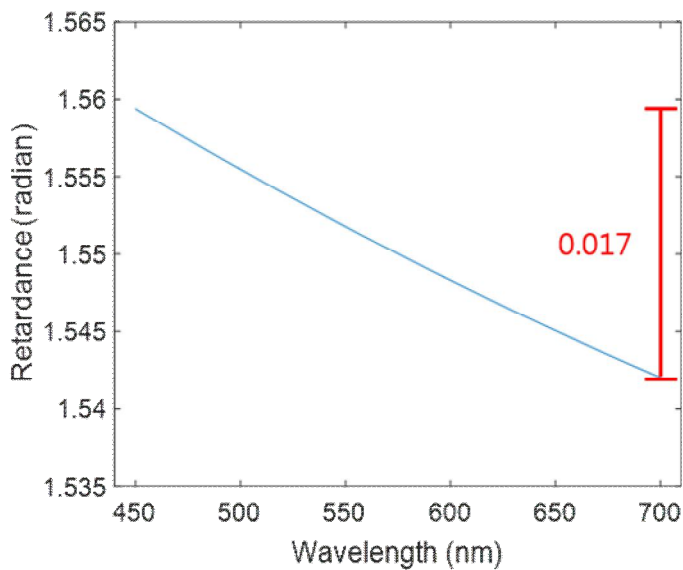


그림 28. 위상지연판의 파장별 위상지연 획득 결과

(3) 광분할기의 편광영향 Calibration

일반적인 타원계측기는 그림 9에서 알 수 있듯이 광분할기를 사용하지 않으나 본 연구에서 제안하는 복합 시스템의 경우에는 간섭계와의 결합으로 인하여 광분할기가 사용된다. 이때, 광분할기는 타원계측기 측정에 있어 편광에 영향을 미치게 되므로, 보다 정확한 측정을 위해서는 광분할기에 의한 편광 영향을 분석 과정에서 고려해야 한다. 빛이 광분할기에 입사하는 경우, 광분할기의 투과 및 반사 과정에서 발생하는 빛의 편광 변화는 각각 서로 다르고, 정확한 측정 결과를 획득하기 위해서는 이들을 각각 측정하여 데이터 분석에 적용해야 할 필요가 있다. 광분할기에 의한 빛의 편광 변화에 대한 Calibration은 그림 29와 같이 3 단계로 진행되었으며, 실험 및 분석은 광분할기를 측정시편으로 생각하고 위상지연판을 회전시켜 광량변화를 획득하는 일반적인 타원계측기와 유사한 방법으로 수행되었다. 그림 29(a)는 광분할기의 투과에 의한 편광 변화를 측정하는 실험구성이며, 그림 29(b)는 반사에 따른 편광 변화 측정 실험구성을 나타낸다. 각각의 투과, 반사 실험을 통해 얻어진 실험값은 Jones matrix 기반의 이론 모델과 비교 및 최적화를 통해 타원계측기의 원리로 분석되었으며, 결과적으로 광분할기의 투과, 반사에 대한 각각의 Jones matrix를 수립할 수 있었다. 또한, 이를 검증하기 위한 방법으로, 그림 29(c)와 같이 반사와 투과가 동시에 일어나도록 실험 장치를 구성한 후, 실험 결과를 이전에 수립한 광분할기의 투과, 반사에 대한 Jones matrix 기반의 이론적 모델과 비교함으로써 측정 결과의 신뢰성을 확보하였다. 그림 30은 p-편광에 대한 진폭의 변화와 위상 변화가 두 경우에 있어 거의 유사함을 보여준다.

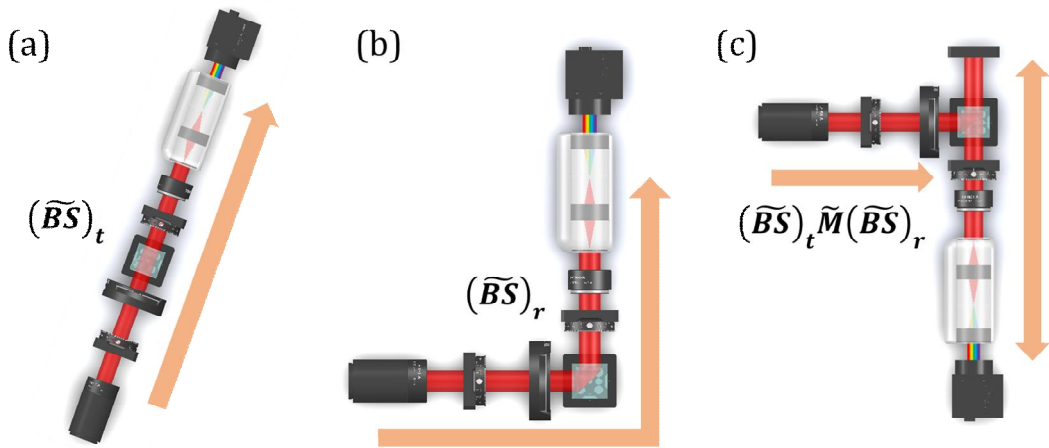


그림 29. 광분할기의 편광변화 측정 (a)투과 (b)반사 (c)반사투과

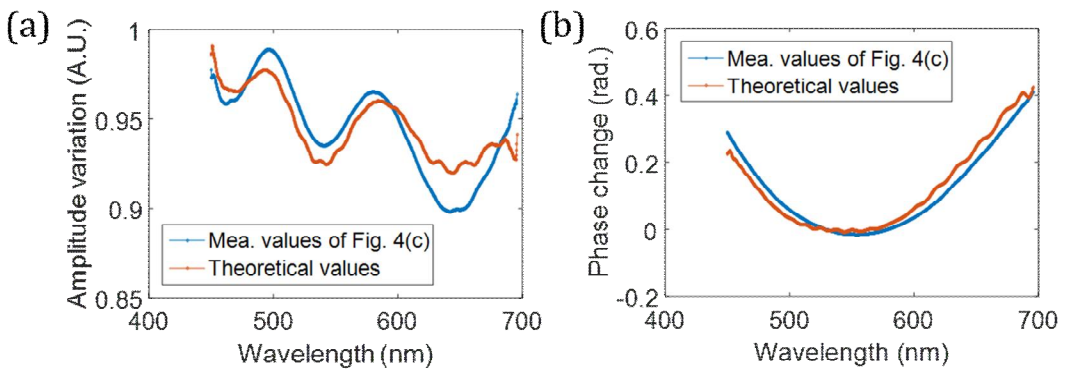


그림 30. p-편광의 투과반사에 대한 실험 및 이론값 비교 (a)진폭 (b)위상

제2절 복합 측정 시스템 구성 및 실험

1. 복합 측정 시스템 구성

그림 31은 본 논문에서 제안하는 간섭계와 타원계측기가 결합된 복합 측정 시스템의 실제 구성을 나타낸다.

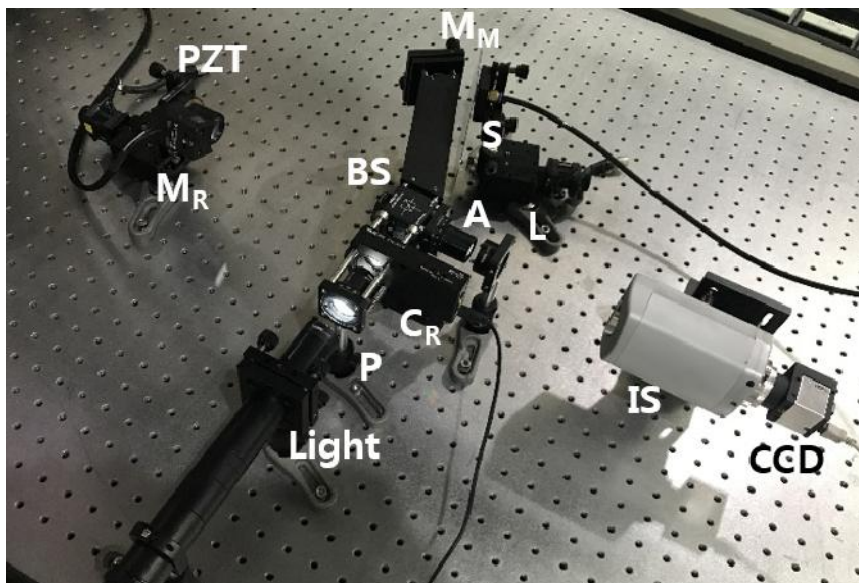


그림 31. 실제 구성된 광학 구성도; 광원, Broadband light; P(A), Glan thomson polarizer; C_R , Compensator, Quarter wave plate; BS, Beam splitter; BSH, Beam shutter; PZT, Piezoelectric stage; $M_{R,M}$, Mirror; L, Lens; IS, Image spectrometer; CCD, CCD camera (1024 x 1280 pixel)

광원으로는 그림 32와 같이 350-800 nm의 가시광 대역을 가지는 Thorlabs사의 플라즈마 (Plasma) 광원을 사용하였고, 편광기, 검광기로는 앞서 calibration을 수행한 Glan-Thomson 편광기를 사용하였다. 또한, 파장 보정판도 파장별 위상지연 값이 측정된 위상지연판을 사용하였으며, 광분할기 역시 투과, 반사에 따른 편광 변화 측정이 완료된 동일한 것을 사용하였다. 위상천이 간섭계의 위상지연을 위해 기준거울을 구동하

는 장치로는 그림 33과 같이 PI사 제품의 PZT (P-721)를 사용하였다. 또한 측정 시편의 영상을 획득하기 위해, 앞서 정렬 및 파장별 pixel 관계를 확인한 영상 분광기와 CCD 카메라를 사용하였으며, 위상지연판은 Tholabs사의 Stepping motor stage를 통해 회전 구동되었다. 그림 31을 보면, 광원으로부터 나온 빛은 편광기를 지나 선형편광이 되고 위상지연판을 통과한 후, 광분할기를 통해 기준광과 측정광으로 나뉜다. 이때 기준광을 가리고 측정광만을 이용하여 측정하면 타원계측법 원리로 측정 시편의 박막 측정이 수행되며, 반면 기준광과 측정광의 함께 이용하면 간섭계의 원리로 광 주파수별 위상을 획득할 수 있다. 본 논문에서는 복합 측정 시스템의 본격적인 측정에 앞서 각각의 모드에 대한 기초실험을 진행하였고, 이후 박막 시편의 3차원 구조 분석 실험을 진행하였다.



그림 32. 복합 측정 시스템 광원 (Broadband source)



그림 33. 위상천이에 사용되는 PZT stage

2. 위상천이 분산간섭계 실험 및 결과

먼저 복합 측정 시스템의 간섭계 모드인 위상천이 분산간섭계에 대한 기초 시험을 진행하였다. 위상천이 분산간섭계는 그림 34와 같이 광분할기를 통해 나뉜 측정광과 기준광 사이의 간섭 신호를 위상천이로 획득하여 분석한다. 이때 광원이 넓은 파장 분포를 가지기 때문에 기준거울 (M_R)과 측정거울 (M_M)의 광 경로차를 0에 가깝게 조절하면, 그림 35와 같은 공간축과 파장축에 대한 간섭 신호 영상이 발생하게 된다. 또한, 그림 35에서 알 수 있듯이 시편의 높이에 따라 각각 서로 다른 간격의 간섭 신호가 획득됨을 확인할 수 있다. 본 실험에서는 정량적 검증을 위해 상용화되어있는 Mitutoyo의 Gauge block들을 이용하여 $5\ \mu\text{m}$ 와 $10\ \mu\text{m}$ 의 단차를 가지는 측정 시편을 제작하여 측정하였다. 또한, 위상천이를 위해 거울이 부착된 PZT stage를 구동하였으며, 광원의 중심파장인 $560\ \text{nm}$ 를 기준으로 $\pi/2$ 만큼 위상을 이동시키면서 그림 36과 같은 11장의 이미지 데이터를 획득하였다.

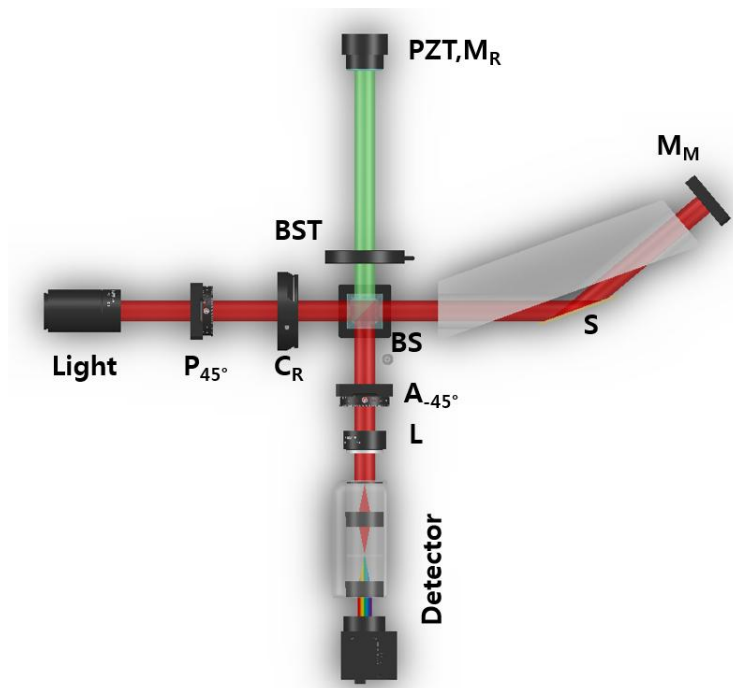


그림 34. 위상천이 분산간섭계 측정법

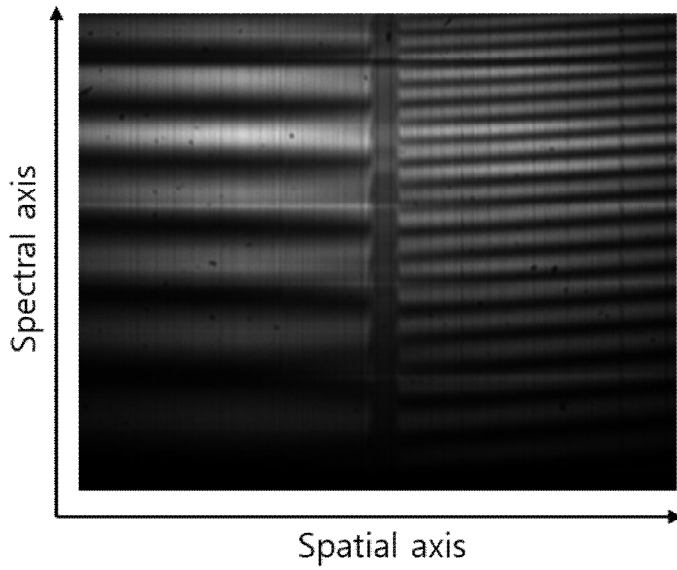


그림 35. Gauge block의 간섭무늬 영상

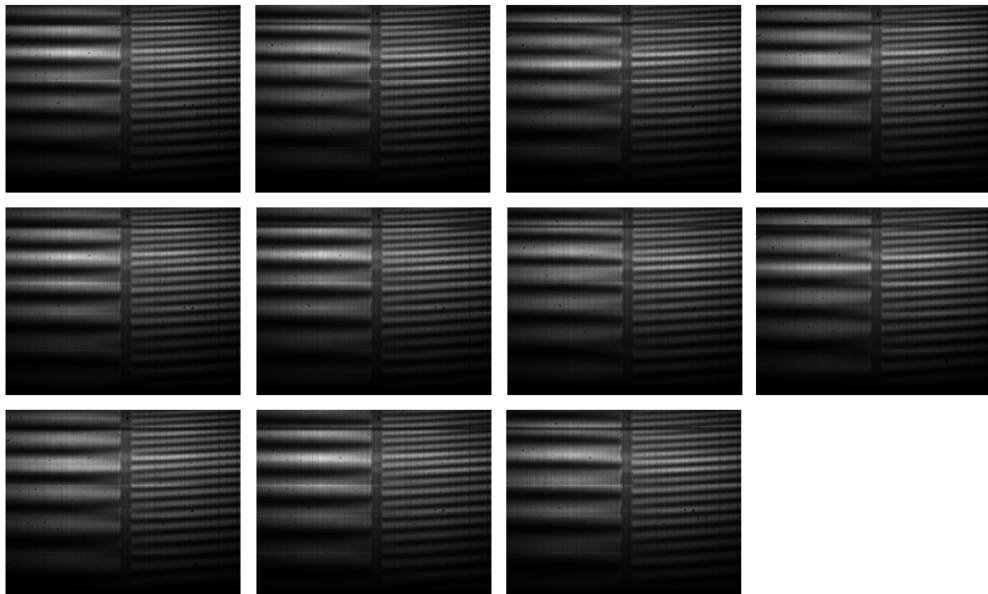


그림 36. 위상천이 획득 결과

획득된 이미지 데이터를 분석하기 위해, 임의의 반복 연산알고리즘을 적용하여 그림 37과 같은 파수 (Wave number)별 위상을 획득하였고, 획득된 위상의 기울기로부터 그림 38과 같은 $9.67 \mu\text{m}$ 의 단차를 가지는 시편의 형상정보를 획득하였다. 동일한 방법으로 $5 \mu\text{m}$ 의 단차 시편에 대해서도 측정을 수행하였으며, 그 결과 $5.14 \mu\text{m}$ 단차를 확인하였다. 이들 결과들은 제조사에서 제공하는 Gauge block들의 $0.45 \mu\text{m}$ 불확도 범위 내임을 확인하였다. 여기서, 일반적인 분산간섭계는 빛의 수직입사를 통해 시편의 형상을 측정하지만, 본 연구에서 제안하는 분산간섭계의 측정 방법은 수직입사가 아닌 특정 각으로 빛이 시편에 입사하기 때문에, 측정 결과에 대한 기하학적 보상이 필요하다. 그림 38의 결과 및 시편의 형상 측정 결과들은 이러한 기하학적 보상이 수행된 이후의 결과들로, 본 기초실험을 통해 복합 측정 시스템의 간섭계 모듈에서 위상천이 분산간섭계의 원리로 형상측정이 가능함을 확인하였다.

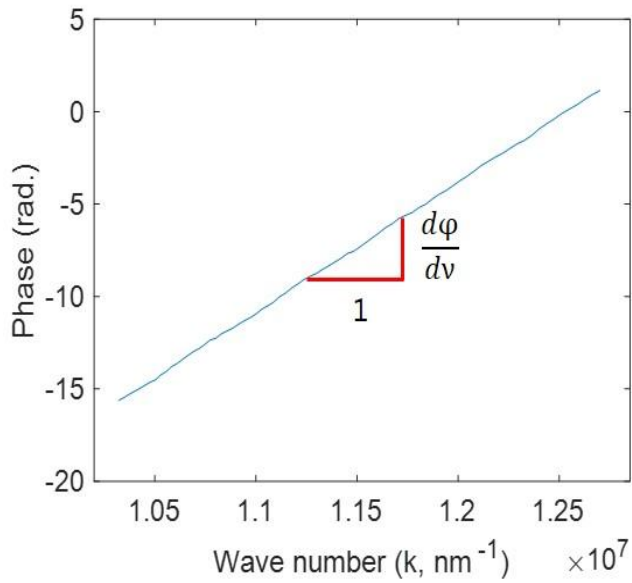


그림 37. 10 μm 단차의 위상 획득 결과

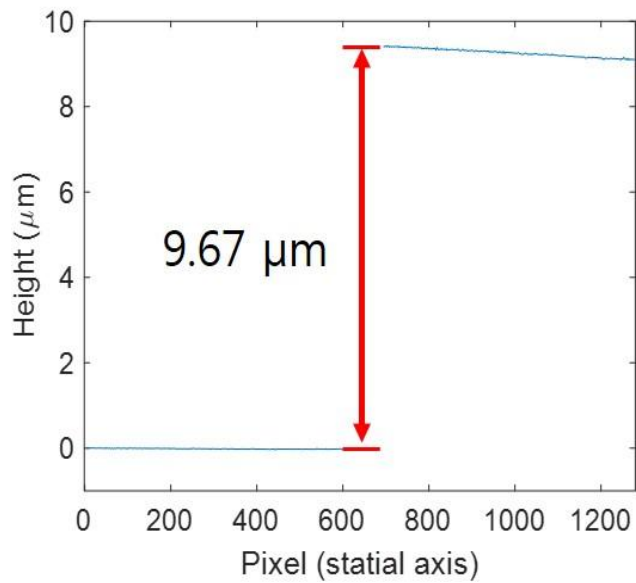


그림 38. 10 μm 단차를 가진 gauge block 형상측정 결과

3. 영상 분광 타원계측기 실험 및 결과

두 번째로, 본 논문에서 제안하는 복합 측정 시스템 중 타원계측기 모드의 영상 분광 타원계측기의 기초실험을 진행하기 위해 그림 39와 같이 빔가리개로 기준광을 차단하였다. 본 논문에서 제안하는 영상 분광 타원계측기는 기본적으로 $P_{45^\circ} \cdot C_R \cdot SA_{-45^\circ}$ 구성으로, 위상지연판을 회전시키면서 광량의 세기 변화를 측정하는 방법이다. 그래서 실험은 위상지연판을 0° 에서 180° 까지 0.5° 씩 회전하면서 그림 40과 같은 이미지 데이터를 각각 획득하였다. 그리고 측정된 데이터를 분석하기 위해 식 (30)과 같이 Jones matrix를 이용한 이론적 모델을 생성하고, 실험 결과와 이론값의 비교 및 최적화를 통해 박막의 두께를 측정하였다.

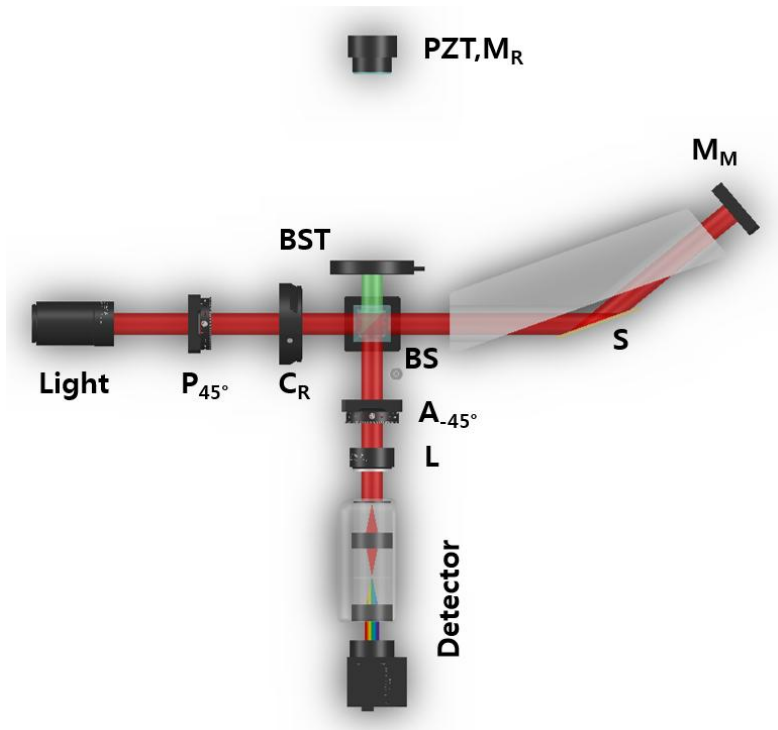


그림 39. 영상 분광 타원계측기 측정법

$$E_{out} = R_{45}^{-1} A R_{45} (BS)_r S M S (BS)_t C_R R_{45}^{-1} P R_{45} E_i \quad (30)$$

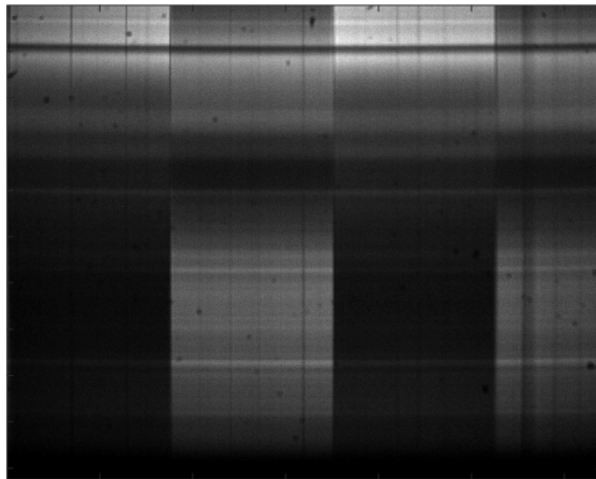


그림 40. 4층 박막의 획득된 이미지 데이터

이때, 각각의 광학부품들에 대한 Jones matrix들은 표 1을 참조하였고, BS_r 과 BS_t 는 앞에서 진행한 광분할기의 편광영향 Calibration을 통해 측정된 Jones matrix들을 이용하였다. 그림 41은 각각 식 (30)을 이용해 생성된 이론값과 실험을 통해 얻어진 측정 결과를 나타내며, 박막 두께를 변화시키면서 생성되는 이론값과 실험값의 차이가 최소가 되도록 최적의 조건을 찾아 박막의 두께를 측정하였다.

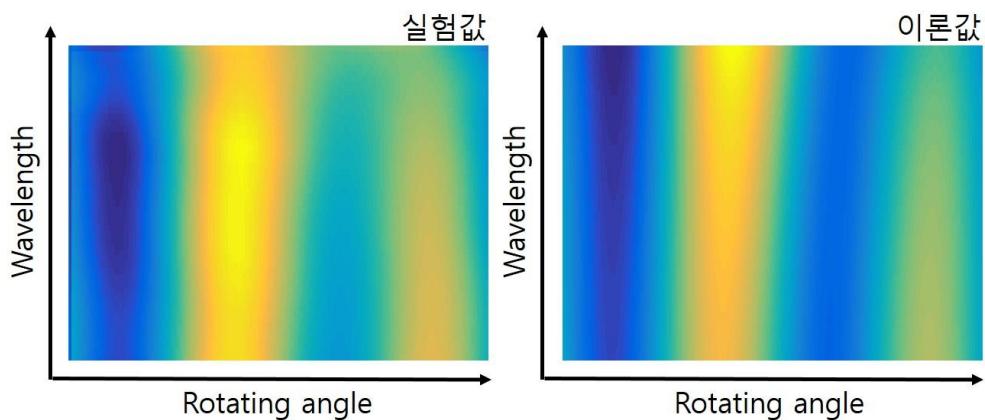


그림 41. 임의의 박막 시편에 대한 이론값과 실험값

측정 결과의 신뢰성을 위해, 시편으로 한국표준과학연구원에서 제공한 표준시편 (Certified Reference Materials, CRM)과 4층 박막 시편을 이용하였다. 먼저 표준시편은 단층 박막 시편으로 Si 웨이퍼 기판 위에 SiO₂ 박막이 도포되어 있으며, 박막 두께는 각각 14.3 nm와 55.8 nm이다. 실험결과 각각의 시편에 대한 박막 두께는 15.1 nm, 55.0 nm로 측정되어 측정 결과가 기준값과 매우 유사함을 확인하였다. 한편, 4층 박막 시편은 그림 42(a)와 같은 구조로, Si 웨이퍼 기판위에 SiN - SiO₂ - SiON - SiO₂의 4층 박막이 도포된 제조된 시편이며, Si 웨이퍼 기판 모양이 모자이크 패턴 형태로 구성되어 있는 동시에 박막 구조물 역시 모자이크 패턴을 가지는 특징이 있다. 이러한 다층 박막 시편의 측정 가능성을 확인하기 위해 그림 42(a)에 표시된 영역에 대한 측정을 수행하였으며, 그 결과 그림 42(b)와 같이 한 번의 측정으로 4 mm 이상의 선 영역에서 4층 박막의 두께를 측정할 수 있음을 확인하였다. 각 층에 대한 측정 결과는 초기 시편의 설계치와 비교했을 때 8 nm 이하의 값으로 측정됨을 확인하였으며, 또한 실험 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 동일한 측정 영역에 대해 15번 측정하고 표준편차를 이용하여 반복능을 확인한 결과, 각 층에 대해 0.63 nm, 0.45 nm, 0.88 nm, 0.45 nm의 값을 가짐을 확인하였다. 본 기초실험을 통해 구성한 복합 측정 시스템의 타원계측기 모드의 영상 분광 타원계측기의 두께 측정 가능성을 확인하였다.

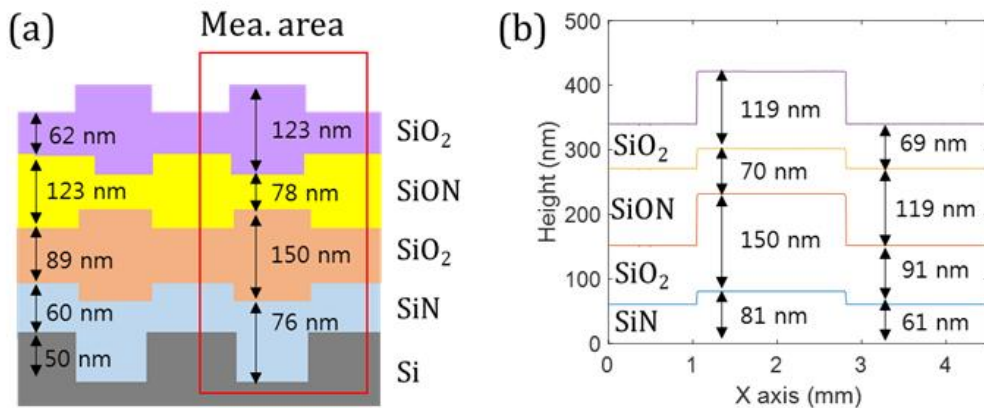


그림 42. 영상 분광 타원계측기 기초실험 결과 (a) 4층 박막 시편 정보 (b) 4층 박막 구조물 실험 결과

4. 복합 측정 시스템 실험 및 결과

앞서 본 연구에서 제안하는 복합 측정 시스템의 각 측정 모드는 기초 실험을 통해 검증하였으며, 이를 토대로 박막의 구조물의 분석을 위한 3차원 형상 및 박막 두께에 대해 본격적인 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 시편은 영상 분광 타원계측기의 기초 실험에 사용되었던 4층 박막 시편을 이용하였으며, 모자이크 패턴의 박막 구조물은 각 패턴의 크기가 $2 \times 2 \text{ mm}$ 로, 전체 $12 \times 12 \text{ mm}$ 의 크기를 가지고 있다. 박막의 구조물의 3차원 측정을 위해, 시편을 구동기 (Stage)에 부착하여 $20 \mu\text{m}$ 의 간격으로 전체 0.5 mm 까지 횡방향으로 구동하면서 여러 선들에 대한 측정을 수행하였다. 이때 각 선에서의 실험은 시편의 동일한 위치에 대해서 타원계측기 모드로 두께를 측정한 뒤 간섭계 모드로 형상을 측정하는 순서로 진행하였다.

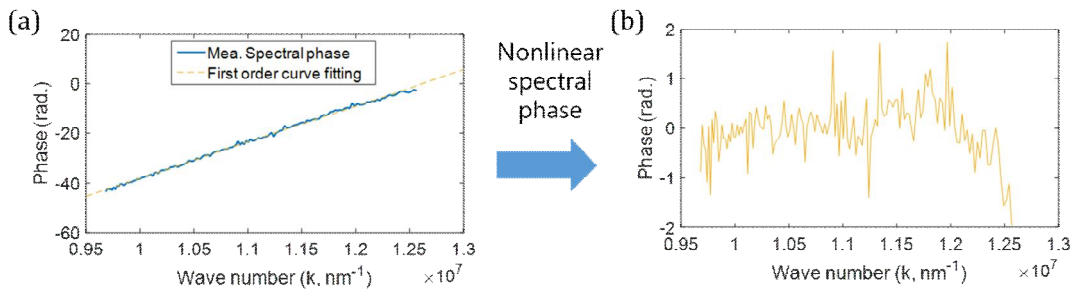


그림 43. 위상천이 분산간섭계를 이용한 4층 박막 측정결과 (a)위상 (b)박막의 위상

그림 43(a)는 간섭계 모드를 통해 시편의 임의의 한 점에서 획득한 파수 별 위상을 보여준다. 앞서 이론에서 설명한 바와 같이, 파수 별 위상은 형상 및 박막 두께에 의한 선형성분과 박막의 두께에 의한 비선형성분을 포함하며, 이는 그림 43(a)의 선형 곡선 맞춤 (Linear curve fitting) 결과를 제거한 그림 43(b)에서 확인할 수 있다. 이때, 박막에 의해 발생하는 비선형 성분은 실험 중에 발생한 잡음 (noise)과 비슷한 크기로 나타남을 확인하였으며, 이를 이용해 박막의 두께 측정에 한계가 있음을 알 수 있었다. 한편, 측정된 위상으로부터 형상 정보만을 획득하기 위해서는 박막의 두께에 해당하는 선형 성분을 그림 43(a)에서 제거해야 하며, 이는 영상 분광 타원계측기로 측정된 그림

42(b)와 같은 박막 두께정보를 이용하였다. 영상 분광 타원계측기에서 측정된 박막 두께로부터 파수 별 위상을 이론적으로 생성할 수 있고, 이러한 이론적 위상을 간섭계 모드에서 측정된 위상에 보상해주면 그림 44와 같은 4층 박막의 기관에 대한 형상을 획득할 수 있다. 측정된 결과를 확인해 보면 실제의 기관의 형상과는 달리 잡음이 섞여있으며, 이는 분산간섭계 측정에 있어 발생하는 여러 가지 측정 오차 때문으로 생각된다.

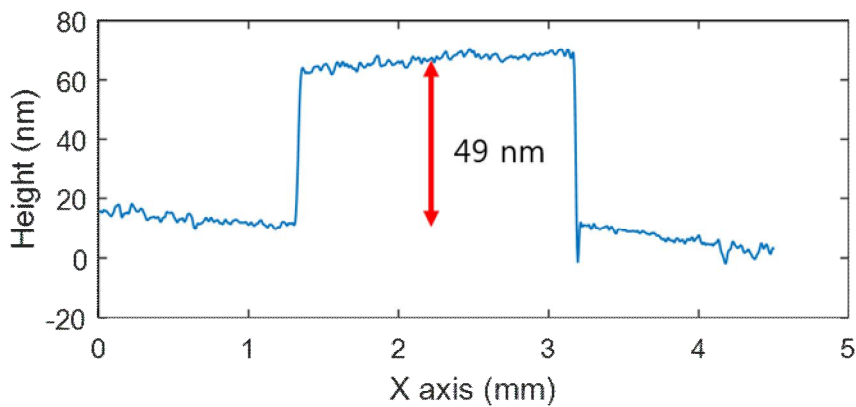


그림 44. 4층 박막의 형상 측정 결과

최종적으로, 복합 측정 시스템의 각 모드에서 측정된 결과들을 바탕으로 측정된 형상 정보와 두께정보를 결합하게 되면, 그림 45와 같이 측정 시편의 임의의 선에 대한 형상과 두께를 동시에 측정할 수 있으며, 이러한 분석 과정을 획득된 전체 데이터에 적용하여 분석한 결과 그림 46과 같은 3차원 박막 구조 결과를 측정할 수 있음을 확인하였다.

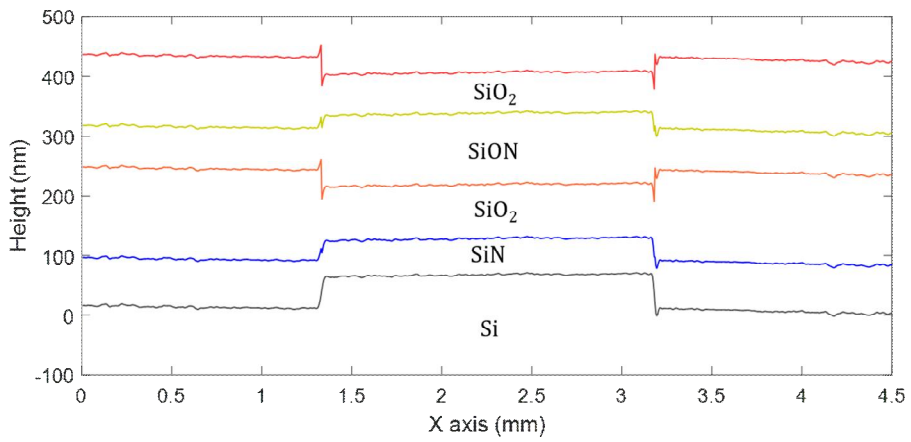


그림 45. 4층 박막의 형상과 두께 측정결과

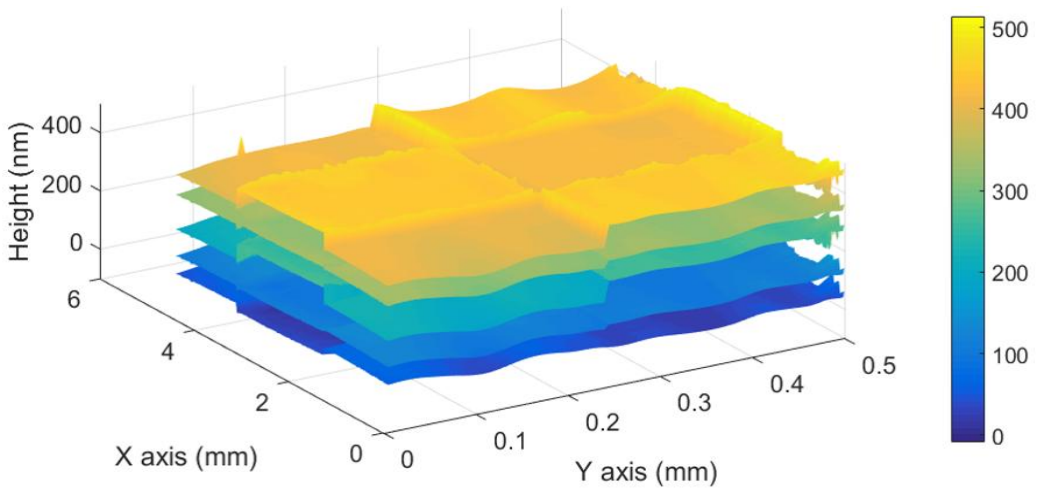


그림 46. 4층 박막의 3D 구조분석 결과

제4장 고찰 및 논의

본 논문에서는 다층 박막의 구조물 분석을 위해 간섭계와 타원계측기를 결합한 복합 측정시스템을 구성하고 이를 실험적으로 검증하였다. 서로 다른 두 개의 측정 원리를 결합함에 있어 본 논문에서 제안하는 시스템의 오차 요인은 크게 다음과 같이 3가지로 나눌 수 있으며, 전체 시스템의 성능 검증을 위한 방법이 필요하다.

- 위상천이 분산간섭계의 오차 요인
- 영상분광 타원계측기의 오차 요인
- 복합측정 시스템의 오차 요인

1. 위상천이 분산간섭계의 오차 요인

본 논문에서는 박막의 형상을 측정하기 위해 위상천이 분산간섭계의 원리를 적용하여 시편을 측정하였다. 위상천이 분산간섭계는 일반적으로 다음과 같은 측정 오차를 포함한다.

- 분광기의 파장 정밀도에 의한 측정 오차
- 광원의 파장 및 출력 안정도
- 위상 천이 과정 중의 진동 오차
- 광검출기의 잡음

이러한 일반적인 측정 오차와 더불어 본 연구에서 구성한 위상천이 분산간섭계는 측정 시편이 광축과 수직이 아닌 이유로 기하학적인 오차가 유발될 가능성이 있다. 본 연구에서 제안하는 복합측정 시스템은 타원계측기와 간섭계를 결합하여 구성되기 때문에, 타원계측기의 측정 원리상 빛이 특정 각도를 가지고 시편에 입사하게 되며, 위상천이 분산간섭계의 측정 또한 시편에 입사하는 빛이 기울어진 상태로 측정이 수행된다. 그래서 시편이 보다 복잡한 형상을 가지는 경우에는 입사하는 빛이 시편의 형상에 의해 영향을 받을 수 있다. 그러나 측정 시편이 본 연구의 응용 분야인 다층 박막의 경

우에는 형상의 높이가 비교적 작기 때문에 이에 대한 영향을 줄일 수 있고, 이를 결과적으로 확인해 보면 그림 44와 같이 위상천이 분산간섭계를 통해 박막의 형상정보를 획득할 수 있다. 이때, 측정된 형상 정보의 단차 간 경계면 모양이 정확히 수직을 나타내고 있음을 확인하였다. 이는 측정된 값에 추가적으로 기하학적 보상을 해주기 때문에 어느 정도 신뢰를 가질 수 있기 때문이며, 단차의 높이가 수백 nm 정도의 크기를 가지고 있기 때문에 데이터를 획득함에 있어 많은 오차 요인으로 작용하지 않았기 때문으로 판단된다.

2. 영상분광 타원계측기 오차 요인

본 논문에서는 박막의 두께를 측정하기 위해 영상분광 타원계측기의 원리를 적용하여 측정하였다. 영상분광 타원계측기를 통해 시편을 측정함에 있어 가장 중요한 오차 요인은 시스템 calibration의 부정확성이다. 첫 번째, 시스템을 구성함에 있어 시편에 대한 입사각을 보정하기 위한 마운트를 제작하였지만, 시편의 정렬 상태에 따라 $\pm 1^\circ$ 의 편차를 가지게 되어 오차 요인으로 작용된다. 이를 해결하기 위해서는 전체 시스템을 시편에 대해 수직으로 위치시키거나 정렬용 레이저를 사용하여 시편의 정렬 상태를 정확히 확인하면 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 두 번째, 간섭계와의 결합을 위해 사용되는 광분할기에 의해 발생하는 편광변화에 의한 오차가 발생할 수 있다. 비록 본 논문에서 광분할기의 편광변화량을 calibration하기 위해 광분할기에 대한 영향을 실험적으로 측정하여 이론에 도입하였으나, 그림 30과 같이 이론값과 측정값에 있어 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있고 이러한 차이가 측정 결과에 영향을 미친다. 이를 개선하기 위해서는 Polarimeter와 같은 측정기를 이용하여 광분할기에 의해 발생하는 편광변화량에 대한 직접적인 측정이 필요하다.

3. 결합된 시스템의 오차 요인

본 논문에서 제안하는 시스템은 위상천이 분산간섭계와 영상분광 타원계측기를 결합한 시스템으로 각각의 측정 시스템의 정밀도는 차이를 보인다. 일반적으로 위상천이 분산간섭계는 수 nm의 정밀도를 가지는 반면에, 영상분광 타원계측기는 nm 이하의 정밀도를 가지고 있으므로, 두 측정 시스템을 결합함에 있어 이러한 정밀도의 차이는 전체 측정 시스템으로 박막 구조물을 측정하는 경우 측정 결과에 영향을 미친다. 즉, 위상천이 분산간섭계로 측정된 형상 정보는 전체 박막 구조물의 박막 형상에 영향을 미치게 되므로, 구성된 전체 시스템의 측정 정밀도는 위상천이 분산간섭계의 정밀도에 의해 결정된다. 이 때문에 본 논문에서 제안하는 복합측정 시스템의 정밀도 향상을 위해서는 위상천이 분산간섭계의 정밀도 향상이 필수적이다. 위상천이 분산간섭계의 정밀도를 향상시키기 위해서는 1절에선 설명한 것과 같이 분광기의 파장 정밀도에 의한 측정 오차를 줄이고 광원의 파장 및 출력 안정도를 높이는 동시에 위상 천이 과정 중의 진동 오차를 최소화하여야 한다. 비록 본 연구에서 임의의 반복 연산 알고리즘을 통해 파장별 위상 오차를 최소화하였지만, 위상천이 과정 중의 발생하는 진동에 의한 오차를 최소화하여야 측정 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

4. 시스템 성능검증

본 논문에서는 그림 42(a)와 같은 구조의 4층 박막 시편의 형상과 두께를 측정하여 박막 구조물 분석을 실시하였다. 하지만 측정에 사용된 시편은 측정을 목적으로 제작된 시편으로, 한국표준과학연구원에서 제공하는 CRM과는 다르게 공인되지 않은 시편이다. 또한, 제작된 시편이 초기 설계 값으로 정확히 제작되었음을 확인할 수 있는 방법이 없다. 제작된 시편에 대한 정보는 일반적으로 각 층에 해당하는 공정을 끝마친 후 접촉식 측정기로 단층에 해당하는 형상을 측정하여 제공된다. 그러나 이후의 공정을 통해 전체 시편의 박막 구조 형태가 그대로 유지되고 있는 것을 확인할 수 없는 단점이 있는 동시에 접촉식 측정 방법의 정밀도 역시 한계로 작용한다.

현재 본 논문에서 제안하는 복합측정 시스템은 공인되지 않은 다층 박막 시편을 측

정하였기 때문에 반복능 이외에 정확한 시스템의 성능 검증에 한계를 가진다. 이를 해결하기 위해서는 다층 박막 시편에 대한 CRM의 확보가 중요하며, 이러한 공인된 측정 시편의 반복 측정 결과를 통해 시스템의 성능 검증을 수행하여야 한다. 비록 본 논문에서는 다층 박막에 대한 CRM 확보의 한계로 인해 이러한 성능 검증이 이루어지지 않았으나, 단층 박막의 시편에 대해서는 CRM을 통해 측정 결과에 대한 비교, 검증을 수행하여 기본적인 시스템의 성능을 확인하였다. 향후 본 연구에서 제안하는 복합 측정 시스템의 성능 검증은 다층 박막에 해당하는 CRM이 제작된다면 이를 적용하여 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

제5장 결론

본 연구에서는 간섭계와 타원계측기 두 종류의 측정법을 결합하여 다층 박막 구조물의 3D 구조분석을 위한 복합 측정 시스템을 제안, 구성하였으며, 각각의 측정법에 대한 이론 정립 및 기초실험을 통해 검증하였고, 이를 토대로 다층 박막의 형상 및 두께 측정에 대해 실험적 검증을 수행하였다. 또한 타원계측기에 사용되는 광학부품의 Calibration을 통해 이론적 모델링의 신뢰성과 정확도를 향상하였고, 이를 통해 다층 박막 구조물의 3D 구조분석이 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 복합 측정 시스템은 간섭계와 타원계측기를 결합한 시스템으로 기존의 광학식 측정방법과는 달리 형상과 두께를 동시에 측정이 가능하다는 장점을 가진다. 또한, 다층 박막의 구조물의 3D 구조분석이 가능하다. 복합 측정 시스템의 각각의 측정방법으로는, 먼저 형상측정 방법은 분산간섭계의 원리를 사용하였고, PZT를 이용해 임의의 반복 연산 알고리즘을 이용하여 박막의 형상을 측정하였다. 기초실험으로 Gauge block을 이용하여 5 μm , 10 μm 단차 시편을 제작하여 형상측정 실험을 진행하였다. 실험결과, 제조사에서 제공하는 0.45 μm 의 불확도 안에 측정되는 것을 확인하였다. 두께측정 방법으로는 타원계측기를 사용하였고, 다과장 광원과 영상 분광기를 사용하여 영상 분광 타원계측기 원리를 적용하였다. 실험으로는 위상 지연판을 회전시키는 방법인 PC_RSA타입을 이용하여 박막의 두께를 측정하였다. 기초실험으로 단층 박막(Si-SiO₂) 시편인 CRM과 4층 박막(SiN - SiO₂ - SiON-SiO₂) 시편을 이용하여 두께 측정 실험을 진행하였다. 실험결과, 참조데이터와 측정된 박막 두께는 큰 차이를 보이지 않았으며, 4층 박막 시편에 대해 반복능을 확인한 결과 1 nm 이하임을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 복합 측정 시스템의 오차의 요인으로는 광학계의 정렬 및 측정 시편의 정렬 상태, 영상 분광기에 의한 오차, 사용하는 광원의 스펙트럼을 대표적으로 생각할 수 있다. 광학계의 정렬 및 측정 시편의 정렬 상태는 각각의 광학부품에 대한 Calibration과 각도 보정 마운트를 제작함으로써 오차를 감소시켰고, 영상 분광기에 의해 발생하는 smiling 효과가 발생함을 확인하였으며, 이를 데이터 분석에 직접 적용하여 오차 요인을 감소시켰다. 사용하는 광원의 스펙트럼 모양은 간섭계측정법에 오차 요인으로 광원의 스펙트럼 모양이 가우시안 (Gaussian)모양과 비슷할수록 오차가 감소한

다. 그리고 실험 환경인 온도, 습도와 외부 진동 등을 고려하여 연구를 수행하면 오차를 현저히 줄일 수 있다.

결론적으로 본 연구에서 제안하는 복합 측정 시스템은 비록 기초 단계 수준의 실험 및 검증이 진행되었지만, 추후 시스템과 분석방법을 보완하면 보다 정밀한 다층 박막 구조 분석기술이 될 것으로 판단된다.

[참고문헌]

- [1] Hermen, I. P., “Optical diagnostics fir thin film processing”, Academic press. (1996)
- [2] Mathad, G. S., “Thin Film materials, processes, and reliability”, Infineon Technologies corp. (2008)
- [3] 김영도, “실리콘 산화막의 두께에 따른 ALD Al_2O_3 박막의 passivation 효과”, 한국신재생에너지학회. (2009)
- [4] 이성노, “다층 박막의 두께변화에 따른 자기커패시턴스 특성 향상에 관한 연구”, 서울대학교 물리학과 석사학위논문. (2015)
- [5] 이상길, “반도체산업에서의 정밀측정기술”, 기계저널. (1998)
- [6] Markku Ylilammi, “Optical determination of the film thicknesses in multilayer thin film structures”, Thin Solid Films. (1993)5
- [7] Tanaka, K., “A preparation method for observing intracellular structures by scanning electron microscopy”, J. of Microscopy. (1984)
- [8] Gerhard Meyer, “Novel optical approach to atomic force microscopy”, Appl Phys Lett. (1988)
- [9] Irving P,Herman, “Optical diagnostics for thin film processing”, Academic press. 1996.

- [10] P, de Groot, "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry", Appl. Opt. (1994)
- [11] Youngquist, R. C., "Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique", Opt. Lett. (1987)
- [12] Jellison, G. E., "Spectroscopic ellipsometry data analysis: measured versus calculated quantities", Thin solid films. (1998)
- [13] Bogner, A. "A history of scanning electron microscopy developments: Towards 'wet-strm' imaging", Micron. (2006)
- [14] Hans-Jürgen Butt, "Measuring electrostatic, van der Waals, and hydration forces in electrolyte solutions with an atomic force microscope", Biophysical Journal. (1991)
- [15] 박종성, "광삼각법을 이용한 레이저 변위 센서의 특성 연구" 한국정밀공학회지. (1999)
- [16] Danielson, B. L., "Absolute optical raging using low coherence interferometry" Appa. Opt. (1991)
- [17] Schnell, U., "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the targer" Opt Lett. (1996)
- [18] Flournoy, P. A., "White-light interferometric analysis" Appl. Opt. (1972)

- [19] 김기홍, “백색광 주사 간섭법을 이용한 박막의 두께 형상 측정법” 한국광학회지. (1999)
- [20] Ghim Young-Sik, “Spectrally resolved white-light interferometry for 3D inspection of a thin-film layer structure” Appl Opt. (2009)
- [21] Sanjiv Kumar Debnath, “Spectrally resolved phase-shifting interferometry of transparent thin films: sensitivity of thickness measurements” Appl Opt. (2006)
- [22] 강민구, “백색광 주사 간섭계를 이용한 표면형상 측정 알고리즘에 관한 연구” 한국과학기술원 기계공학과 박사학위 논문. (1999)
- [23] Tatian, B. “Fitting refractive-index data with the Sellmeier dispersion formula” App Opt. (1984)
- [24] 주우덕, “높은 개구수의 대물렌즈를 적용한 박막 두께 형상 및 굴절률 측정용 백색광 간섭계” 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문. (2008)
- [25] 김영식, “박막 두께 형상 및 굴절률 측정용 분산 백색광 간섭법” 한국과학기술원 기계공학과 박사학위 논문. (2007)
- [26] 안일신, “엘립소메트리” 한양대학교 출판부. (2000)
- [27] Lien, A. “Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid crystal display at oblique incidence” Appl. Phys. Lett. (1990)

- [28] Pezzaniti, J. L. “Mueller matrix imaging polarimetry” Optical engineering. (1995)
- [29] Hauge, P. S. “Recent development in instrumentation in ellipsometry” Surface Science (1980)
- [30] Azzam, R. M. A. “Perpendicular-incidence photometric ellipsometry(PIPE) of surfaces with arbitrary anisotropy” Journal of Optics. (1981)

이 력 서

성 명 : 윤 영 호 (尹 永 溟)

출 생 지 : 성 남

학 력

- 2007.3. - 2010.2. 강진고등학교 졸업
- 2010.3. - 2016.2. 조선대학교 광기술공학과 학사 졸업
- 2016.3. - 2018.2. 조선대학교 광기술공학과 석사 졸업

학위 논문

- [1]. “다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2018)

학술지 게재 논문

- [1]. **Young Ho Yun**, Yong Bum Seo and Ki-Nam Joo, “Elimination of the direction ambiguity and the dead zone in spectrally resolved interferometry”, Meas. Sci. Technol.27 035004 (2016)
- [2]. Yong Bum Seo, **Young Ho Yun** and Ki-Nam Joo, “3D Multi-Layered Film Thickness Profile Measurements based on Photometric Type Imaging Ellipsometry”, Int. J. Precis. Eng. Manuf. 17 989-993 (2016)
- [3]. **윤영호**, 김대희, 주기남, “방향 판별 분산간섭계의 최적 분산 조건 연구”, 한국정밀공학회지 제34권 제4호 (2017)
- [4]. Dae Hee Kim, **Young Ho Yun** and Ki-Nam Joo, “SPARSE(spatially phase-retarded spectroscopic ellipsometry) for real-time film analysis”, Optics Letters. Vol. 42, No. 16 (2017)

특허 등록 및 출원

- [1]. 분산판을 이용한 방향판별 분산간섭계 및 이를 이용한 측정시스템
등록번호 : 1016788910000, 2016.11.17

국내·외 학회 발표

- [1] **윤영호**, 주기남, “ 이색BS를 이용한 분산간섭계 한계점 보상,” 한국정밀공학회 추계학술발표회 2015.
- [2] **윤영호**, 김대회, 주기남, “방향 판별 분산간섭계의 최적 조건 연구,” 한국정밀 공학회 춘계학술발표회 2016.
- [3] **Young Ho Yun** and Ki-Nam Joo, “Multi-layer film thickness measurements by spectroscopic imaging ellipsometry,” ICPT 2016.
- [4] **Young Ho Yun** and Ki-Nam Joo, “Spectroscopic imaging ellipsometry for measurements of the multi-layer film thickness,” OPTIC 2016.
- [5] **윤영호**, 주기남, “방향 판별 분산간섭계의 최적 조건 연구”, 한국광학회 하계학술발표회 2017.
- [6] 김대회, **윤영호**, 주기남, “Real-time spectroscopic ellipsometry using a Depolarizer”, 한국광학회 하계학술발표회 2017.
- [7] **윤영호**, “다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템 연구”, 삼성전기 논문대상 2017.
- [8] **윤영호**, 주기남, “다층 박막 구조물 분석을 위한 간섭계와 타원계측기의 복합 측정 시스템 연구”, 한국정밀공학회 추계학술발표회 2017.