



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](#)

2022년 2월

석사학위 논문

# 박막 구조 분석을 위한 이중 공간접계 시스템 연구

조선대학교 대학원

광기술험공학과

권의혁

# 박막 구조 분석을 위한 이중 공간섭계 시스템 연구

Dual optical interferometric probe system  
for film structure analysis

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원

광기술험공학과

권 의 혁

# 박막 구조 분석을 위한 이중 공간섭계 시스템 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

권 의 혁

## 권의혁의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2021년 12월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제1장 서론 .....	1
제1절 연구 배경 .....	1
제2절 연구 현황 .....	3
제3절 연구 목표 .....	8
제2장 박막 구조 분석을 위한 시스템 .....	9
제1절 저간섭성 주사 간섭계 .....	9
1. 저간섭성 주사 간섭계 측정 원리 및 알고리즘 .....	9
제2절 분산 간섭계 .....	12
1. 분산 간섭계의 측정 원리 및 알고리즘 .....	12
2. 분산 간섭계의 측정 영역 .....	16
제3절 이중 광간섭계 시스템 .....	17
1. 이중 광간섭계 시스템의 측정 원리 .....	17
2. 이중 광간섭계 시스템을 통한 박막 구조 분석 .....	19
제3장 실험 결과 및 분석 .....	28
제1절 이중 광간섭계 시스템 구성 .....	29

1. 시스템 광학 구성 .....	29
2. 측정 소프트웨어 구성 .....	32
제2절 이중 광간섭계의 측정점 매칭 및 시스템 보정 .....	34
1. 측정점 매칭 .....	34
2. 초점 위치 검증 및 시스템 보정 .....	36
제3절 실험 및 결과 분석 .....	39
1. 투명 판 측정 .....	39
2. 제작한 박막 시편 측정 .....	45
3. 파우치형 이차전지 셀 측정 .....	56
제4장 고찰 및 논의 .....	59
제5장 결론 .....	63
[참고문헌] .....	65

## 그림 목차

그림 1-1. (a) 디스플레이와 (b) 반도체, (c) 바이오 나노 산업에 따른 박막 구조의 다양성 .....	1
그림 1-2. (a) 정상적인 이차전지 구조와 (b) 비정상적인 이차전지의 구조 .....	2
그림 1-3. 박막 구조 분석 기술의 분류 .....	3
그림 1-4. 타원계측기의 광학 구성도 .....	4
그림 1-5. 공초점 주사 현미경의 광학 구성도 .....	5
그림 1-6. (a) 저간섭성 주사 간섭계와 (b) 분산 간섭계 광학 구성도 .....	6
그림 2-1. 저간섭성 주사 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 간섭 신호 .....	9
그림 2-2. 저간섭성 주사 간섭계 간섭 신호의 푸리에-역푸리에 변환 방법 .....	11
그림 2-3. 분산 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 간섭 신호 .....	12
그림 2-4. 분산 간섭계 간섭 신호의 푸리에-역푸리에 변환 방법 .....	15
그림 2-5. 이중 광간섭계 시스템의 광학 구성도 .....	18
그림 2-6. 두 측정 프로브의 초점이 (a) 일치할 경우와 (b) 서로 겹치는 경우, (c) 서로 떨어진 경우 .....	19
그림 2-7. 저간섭성 주사 간섭계의 금속 기관 구조 분석 이론 .....	21
그림 2-8. 저간섭성 주사 간섭계의 투명 판 구조 분석 이론 .....	22
그림 2-9. 저간섭성 주사 간섭계의 박막 시편 구조 분석 이론 .....	23
그림 2-10. 분산 간섭계의 금속 기관 구조 분석 이론 .....	25
그림 2-11. 분산 간섭계의 투명 판 구조 분석 이론 .....	26
그림 2-12. 분산 간섭계의 박막 시편 구조 분석 이론 .....	27
그림 3-1. 이중 광간섭계 시스템의 (a) 3차원 모델링과 (b) 실제 광학 구성	



.....	30
그림 3-2. 실험에 사용된 (a) 광원과 (b) 광원의 스펙트럼 .....	31
그림 3-3. LABVIEW로 구성한 이중 공간섭계 시스템 측정 알고리즘 ..	33
그림 3-4. 측정 방식에 따른 측정 순서도 (a) 저간섭성 주사 간섭계와 (b) 분산 간섭계 .....	33
그림 3-5. (a) 시스템 측정점 매칭 실험 구성과 (b) 사용된 Thorlabs 사의 단일 모드 광섬유와 다중 모드 광섬유 .....	35
그림 3-6. 초점 위치 검증의 (a) 실험 구성과 (b) 사용된 Thorlabs 사의 펠리클 광분할기 .....	37
그림 3-7. 저간섭성 주사 간섭계로 측정한 펠리클 광분할기 결과 .....	38
그림 3-8. 시스템의 측정점 매칭 작업 후 이론값과 측정값 .....	38
그림 3-9. 측정한 (a) 커버 글래스와 (b) 시편에 대한 예상 광경로 .....	40
그림 3-10. 저간섭성 주사 간섭계로 측정한 커버 글래스 측정 결과 .....	41
그림 3-11. 분산 간섭계로 측정한 커버 글래스 측정 결과 .....	41
그림 3-12. 측정한 (a) 실리콘 웨이퍼와 (b) 시편에 대한 예상 광경로 ..	43
그림 3-13. 저간섭성 주사 간섭계로 측정한 실리콘 웨이퍼 측정 결과 ..	44
그림 3-14. 분산 간섭계로 측정한 실리콘 웨이퍼 측정 결과 .....	44
그림 3-15. 알루미늄 PET 증착 필름 모식도 및 예상 광경로 .....	46
그림 3-16. 저간섭성 주사 간섭계로 측정한 알루미늄 PET 증착 필름 ① 측정 결과 .....	47
그림 3-17. 분산 간섭계로 측정한 알루미늄 PET 증착 필름 ① 측정 결과 .....	47
그림 3-18. 저간섭성 주사 간섭계로 측정한 알루미늄 PET 증착 필름 ② 측정 결과 .....	48
그림 3-19. 분산 간섭계로 측정한 알루미늄 PET 증착 필름 ② 측정 결과	

.....	48
그림 3-20. (a) 라미네이팅 파우치 필름 모식도와 (b) 시편에 대한 예상 광 경로 .....	50
그림 3-21. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 라미네이팅 파우치 필름 측정 결과 .....	51
그림 3-22. 분산 간섭계로 측정된 라미네이팅 파우치 필름 측정 결과	51
그림 3-23. 단층 박막 모식도 및 예상 광경로 .....	53
그림 3-24. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 단층 박막 ① 측정 결과 ....	54
그림 3-25. 분산 간섭계로 측정된 단층 박막 ① 측정 결과 .....	54
그림 3-26. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 단층 박막 ② 측정 결과 ....	55
그림 3-27. 분산 간섭계로 측정된 단층 박막 ② 측정 결과 .....	55
그림 3-28. 파우치형 이차전지 셀의 (a) 모식도와 (b) 예상 광경로 .....	57
그림 3-29. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 파우치형 이차전지 셀 측정 결 과 .....	58
그림 3-30. 분산 간섭계로 측정된 파우치형 이차전지 셀 측정 결과 .....	58
그림 4-1. 저간섭성 주사 간섭계로 획득한 원인 미상 신호 .....	61

## 표 목차

표 2-1. 시편의 구조에 따른 이중 공간섭계 시스템의 측정 요소 .....	20
표 3-1. 광 검출기와 분광기의 성능 .....	31

# ABSTRACT

## Dual optical interferometric probe system for film structure analysis

By Ui Hyeok Kwon

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. One approach is using an interferometer to obtain surface profiles of the film layers. Low coherence interferometry (LCI) can detect the film layers with the low coherence characteristic of the optical source and scanning mechanism in the time domain and spectral domain, which enables to extract their optical thicknesses.

On the other hand, specimens such as a secondary battery cell are manufactured with a thin metal substrate and non-conducting dielectric films. On both sides of the substrate, the films are deposited to prevent the link between the battery cells, which are piled up to build the whole secondary battery. In this case, the thicknesses of the films and the substrate need to be measured to assure the

safety of the battery.

In this investigation, we propose a dual interferometric probe to measure the film and substrate thicknesses at once. In the optical probe, low coherence scanning interferometry (LCSI) and spectrally-resolved interferometry are adopted to measure the film thickness. LCSI has been an attractive tool for measuring 3D surface profile of a sample because it can avoid the well-known  $2\pi$  ambiguity problem. By using low coherence characteristic of a light source, LCSI can obtain a localized correlogram when the optical path difference (OPD) between reference and measurement arms becomes near zero by adjusting one of two path lengths. Spectrally-resolved interferometry (SRI) is the well-known technique to measure absolute distances and topographic or tomographic surface profiles based on the analysis of the spectral interferogram. Although phase shifting techniques can be involved in SRI to improve the measurement accuracy in some cases, the most attractive feature of SRI is to obtain the spectral phase to extract the measuring distance at once without any scanning mechanism opposed to the white light scanning interferometry. Based on these two interferometric principles, the proposed system can analyze the film structure of the specimen. The whole system is built with optical fiber structure, and the optical switch is used for changing the channel of the measurement probes. The measurement probes are located on both sides of the specimen, and the foci of the probes are coincided with each other. From the geometry of the measurement probes, the thickness of the substrate can be obtained.

In the experiments, we measured several specimens such as bare silicon wafer, pellicle BS, flexible film specimens to verify the performance of the system. In addition, it was confirmed that the proposed system was able to measure the film and substrate thicknesses of the secondary battery cell.

Key words : Dual optical interferometer, Low coherence,  $2\pi$ -Ambiguity, Scanning interferometry, Dispersive interferometry, Multi-layered film thickness

# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경

현재 산업계는 AI (Artificial Intelligence), 반도체, 디스플레이, 바이오, 나노, 에너지와 같은 4차 산업 분야를 중심으로 급속한 연구 및 개발이 진행되고 있다. 특히, 제조 분야에서는 다양한 성능을 가지는 동시에, 크기가 매우 작은 혁신적인 제품들이 출시되고 있으며, 이러한 첨단 부품 및 제품들은 그림 1-1과 같이 대부분 집적화된 박막 구조물 (Film structure)을 핵심 요소로 활용하고 있다 [1-2]. 그래서 제품의 품질 및 성능을 확보하기 위해서는 설계 단계에서부터 공정, 제조에 이르기까지 모든 과정에서 박막 구조물의 기하학적 치수 및 재료 특성의 검사가 필요하다.

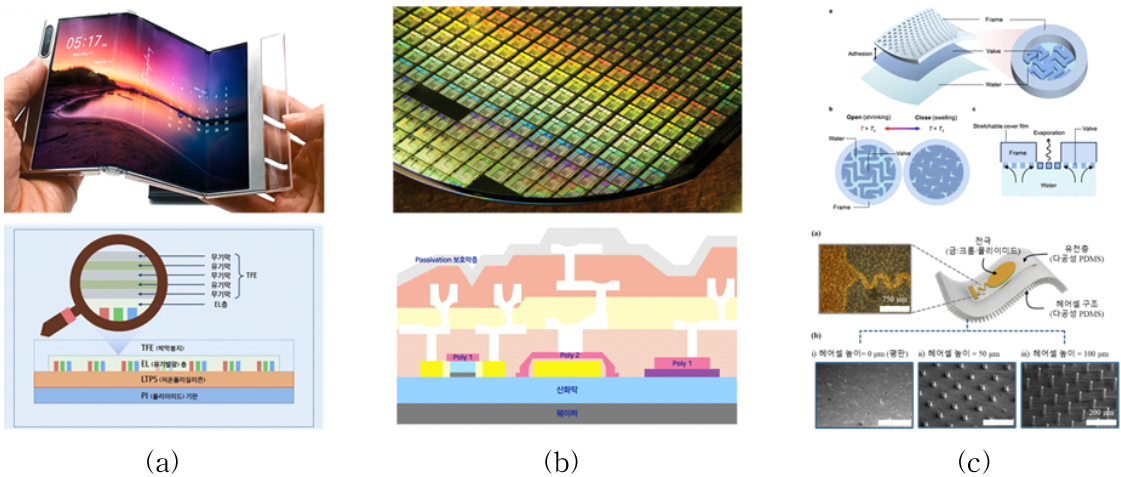


그림 1-1. (a) 디스플레이와 (b) 반도체, (c) 바이오 나노 산업에 따른 박막 구조의 다양성

한편, 최근 차세대 에너지 소자로 각광받고 있는 이차전지 (Secondary battery)는 스마트폰, 태블릿 PC와 같은 다양한 모바일 IT 제품에 필수적이며, 에너지 저장 시스템 (Energy Storage System, ESS) 및 무인 이동체의 전력 수단으로 각광받고 있다

[3-4]. 이러한 이차전지는 모양에 따라 각형, 원통형, 파우치형 전지로 나뉘며, 이 중에서 박막 구조물의 형태를 가지는 파우치형 이차전지는 비용이 저렴하고 대량 생산이 용이한 동시에 부피당 에너지 밀도가 높아서 산업적 활용도가 급격하게 증가하고 있다.

그림 1-2는 파우치형 이차전지의 박막 구조를 나타낸다. 정상적인 파우치형 이차전지는 그림 1-2(a)와 같이 반사율이 높은 금속 기판 (Substrate)의 양면에 유전체 박막 (Dielectric film)이 도포되어 있는 이차전지 셀 (Secondary battery cell)의 적층 형태로 구성되어 있다. 이 경우, 이차전지는 금속 기판들이 유전체 박막으로 인해 서로 분리되어 있는 구조를 가지지만, 그림 1-2(b)와 같이 양극탭 내 비정상적으로 큰 용착 돌기가 절연 테이프와 분리막을 뚫고 나와 음극과 양극이 맞닿게 되면, 이차전지 내에 과전류가 발생하여 폭발의 위험성이 생긴다. 또한, 이를 방지하기 위한 분리막을 두껍게 만들면 배터리 효율이 떨어지고 배터리 크기도 커지게 되는 문제점이 있다 [5].

그래서 이러한 파우치형 이차전지의 성능 및 안정성 확보를 위해서는, 이차전지 셀의 박막 구조 분석 기술이 필요하며, 특히 금속층이 포함되어 있는 동시에 양면의 박막이 도포되어 있는 구조에서 박막 구조물에 대한 측정, 검사 기술 연구가 필요하다.

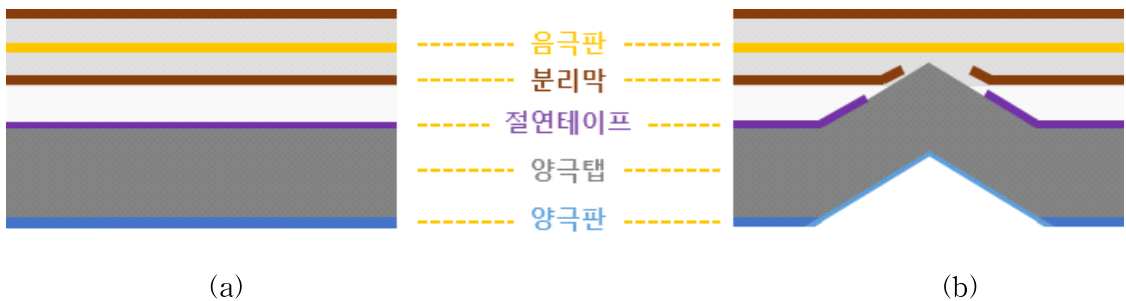


그림 1-2. (a) 정상적인 이차전지와 (b) 비정상적인 이차전지의 구조

## 제2절 연구 현황

기존의 박막 구조 분석 기술은 그림 1-3과 같이 크게 파괴식 (Destructive) 측정법과 비파괴식 (Non-destructive) 측정법으로 분류할 수 있다. 먼저 파괴식 측정법은 주사 전자 현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM) [6]이나 원자력간 현미경 (Atomic Force Microscopy, AFM) [7]과 같이 높은 분해능으로 정밀하게 박막을 측정할 수 있는 장점이 있으나, 시편 절단 및 접촉식 측정 방식에 의해 시편이 손상되는 문제가 있다. 반면, 비파괴식 측정법은 시편에 손상 없이 박막 측정이 가능한 장점이 있으며, 광학식 측정법은 대표적인 비파괴식 측정법으로 산업계에 널리 활용되고 있다. 광학식 측정법은 측정 속도가 빠르고, 비교적 정밀하게 박막 두께 및 굴절률 측정이 가능한 장점이 있으며, 대표적으로 타원계측기 (Ellipsometry), 공초점 주사 현미경 (Confocal scanning microscopy), 저간섭성 간섭계 (Low coherence interferometry)의 원리로 박막 구조물을 분석한다.

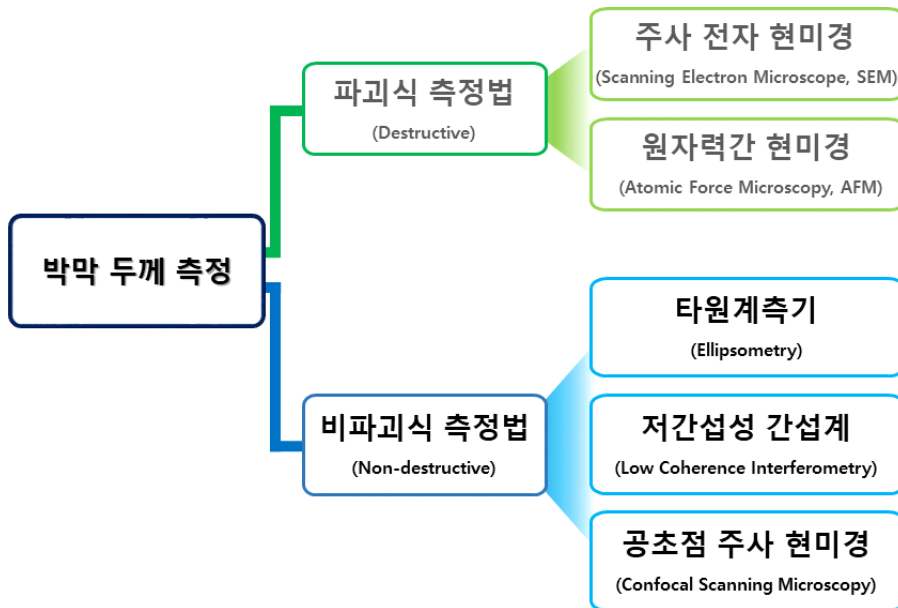


그림 1-3. 박막 구조 분석 기술의 분류



## 1. 타원계측기 (Ellipsometry)

타원계측기는 그림 1-4와 같이 입사하는 광의 편광 (Polarization) 상태를 정의하고, 이후 시편에서 반사하는 광의 편광 변화를 이용하여 박막의 두께 및 굴절률을 측정한다 [8-10]. 타원계측기는 반사광 측정기 (Reflectometry)와는 달리 시편에서 반사하는 반사율 및 편광을 이용하여 박막을 측정하기 때문에, 높은 분해능 및 정밀도로 수십 Å이하의 얇은 박막까지 측정할 수 있는 장점을 가진다. 이때, 박막의 이론적 모델은 물러 행렬 (Mueller matrix) 및 존스 행렬 (Jones matrix)을 이용하여 정립되고, 이를 이용하여 측정된 타원계측 각 (Ellipsometric angle)을 최적화한다 [11-13]. 일반적으로 타원계측기는 그림 1-4와 같이 측정 시편의 브루스터 각 (Brewster angle)으로 광이 입사하기 때문에, 시편에서 반사하는 p-편광과 s-편광에 해당하는 광의 광량은 매우 민감하게 변화하며, 이를 통해 높은 민감도로 박막의 두께를 측정할 수 있다. 하지만 일반적인 타원계측기는 박막 두께 측정만이 가능하며, 측정 방식에 있어 이론적인 모델을 통한 최적화 과정 때문에 박막 측정 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

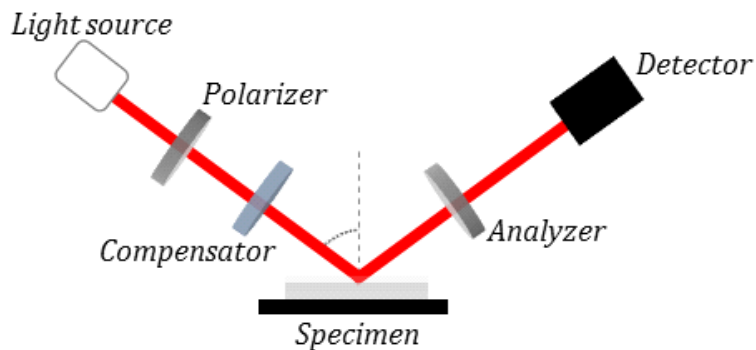


그림 1-4. 타원계측기의 광학 구성도

## 2. 공초점 주사 현미경 (Confocal scanning microscopy)

공초점 주사 현미경은 광학 현미경의 해상도를 높이기 위해 1957년 Minsky에 의해 처음 제안되었으며, 시편에 초점이 맺힌 광의 광량을 검출하여 시편의 3차원 형상을 측정한다 [14-15]. 공초점 주사 현미경은 일반적으로 그림 1-5와 같이 측정 시편의 형상 정보를 획득하기 위해 광축 방향의 주사 (Scanning) 방식을 이용하여, 시편의 위치에 따라 변화하는 광량을 검출한다. 이때 시편의 위치가 대물렌즈의 초점면 (Focal plane)과 동일한 경우, 시편에서 반사한 광은 그에 해당하는 공초점 위치의 핀홀 (Pinhole)을 모두 통과한다. 반면, 그 외의 위치에서 반사된 광은 핀홀에 의해 차단되기 때문에, 광량이 급격히 저하된다. 그래서 공초점 주사 현미경은 광축 방향의 위치에 따라 검출되는 광량의 최대 지점을 이용하여 시편의 높이를 측정한다. 그리고 이러한 원리의 공초점 현미경은 박막 구조물 분석에 있어, 각 박막의 표면에서 반사하는 광의 광량 변화를 검출하고, 측정 신호들의 첨두 (Peak) 위치들을 통해 박막 두께를 측정한다. 공초점 현미경은 비교적 간단한 구성으로 박막 두께를 측정할 수 있는 장점이 있으나, 종축 방향 분해능이 대물렌즈의 개구수 (Numerical Aperture, NA)에 비례하기 때문에, 비교적 낮은 배율의 대물렌즈를 사용하는 경우, 분해능의 한계가 발생한다.

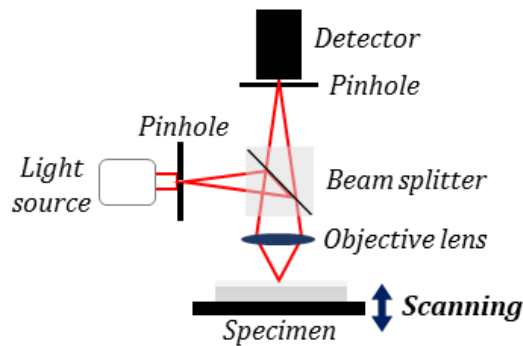


그림 1-5. 공초점 주사 현미경의 광학 구성도

### 3. 저간섭성 간섭계 (Low coherence interferometry)

저간섭성 간섭계는 3차원 형상 측정 분야에서 레이저와 같은 단색광 간섭계의  $2\pi$  위상 모호성 ( $2\pi$ -ambiguity)을 극복하기 위해 개발되었다. 저간섭성 간섭계는 측정 원리에 따라 저간섭성 주사 간섭계 (Low Coherence Scanning Interferometry, LCSИ)와 분산 간섭계 (Spectral-Resolved Interferometry, SRI)로 분류할 수 있다. 먼저 저간섭성 주사 간섭계는 그림 1-6(a)와 같이 일반적인 마이켈슨 간섭계 (Michelson interferometry)로 구성되며, 광원으로는 넓은 대역의 파장을 가지는 광원 (Broadband light source)을 사용하는 동시에, 기준 거울 혹은 시편을 주사 (Scanning) 방식을 통해 광경로차 (Optical Path Difference, OPD)를 조절하여 간섭 신호를 획득한다. 획득된 간섭 신호는 저간섭성으로 인해 국지적으로 발생하며, 간섭 신호를 분석하면 수 나노미터 (nm)의 분해능으로 시편의 형상 및 박막의 두께를 측정할 수 있다.

한편, 분산 간섭계는 그림 1-6(b)와 같이 구성되며, 분광기 (Spectrometer)를 통해 파장 (Wavelength) 혹은 광주파수 (Optical frequency) 영역에서 간섭 신호를 획득하여 시편의 형상 및 박막의 두께를 측정한다. 분산 간섭계는 저간섭성 주사 간섭계와는 달리 광경로차를 조절하기 위한 주사 방식이 필요없지만, 저간섭성으로 인하여 측정 영역의 한계를 가진다.

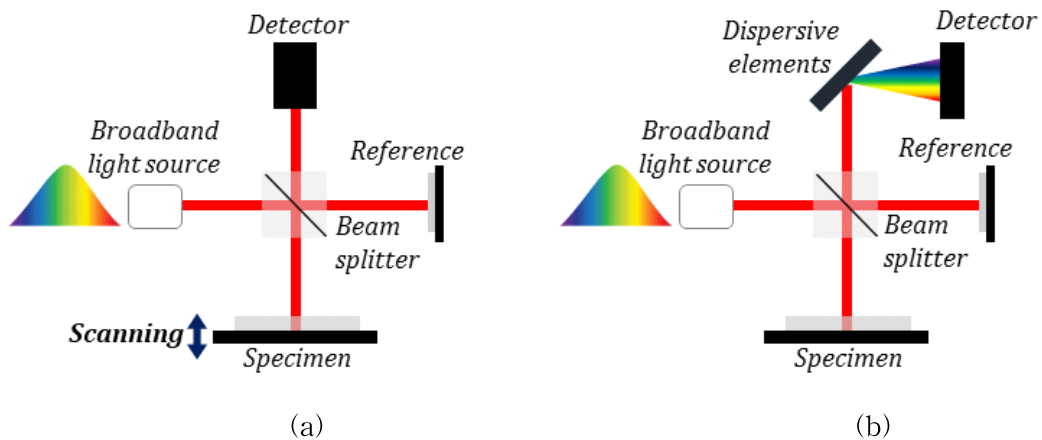


그림 1-6. (a) 저간섭성 주사 간섭계와 (b) 분산 간섭계의 광학 구성도

#### 4. 기존 박막 두께 측정 기술의 한계

파우치형 이차전지와 같이 금속층이 포함되어 있는 양면의 박막 시편의 경우에는 광이 박막 구조물 전체를 투과하지 못하기 때문에, 시편의 단면만을 측정할 수 있게 상용화되어 있는 기존의 박막 측정기는 이를 측정하기에 구조적인 한계를 가진다. 그래서 금속층이 포함되어 있는 양면의 박막 시편을 측정하기 위해서는 시편의 양면에 동일한 측정 프로브 (Measurement probe)가 설치되어 있는 이중 구조의 측정 시스템이 설계, 개발되어야 한다.

높은 정밀도를 가지는 타원계측기의 경우에는 광원의 광이 시편의 브루스터 각으로 입사해야 하며, 광의 편광 변화에 매우 민감한 특성으로 인해 이중 측정 시스템을 구성할 경우, 각각 독립적인 시스템이 적용되어야 한다. 그래서 측정 시스템이 복잡해지는 동시에, 타원계측기의 원리상 박막의 두께만을 측정할 수 있기 때문에, 전체 구조물의 분석이 불가능하다. 한편, 공초점 주사 현미경의 경우에는 비교적 간단하게 이중 측정 시스템을 구성할 수 있으나, 대물렌즈의 개구수에 의해 종축 방향 분해능이 결정되므로, 고분해능 측정 시스템을 위해서 높은 NA를 가지는 대물렌즈로 인하여 부피가 증가하고 시스템의 소형화에 한계가 있다.

저간섭성 간섭계는 비록 간섭계 구성을 위해 기준 거울 및 광분할기가 설치되어야 하나, 광학 구성이 비교적 간단하고, 이를 모듈화하는 경우 시스템의 소형화가 가능하다. 또한, 같은 광학 구성을 통해 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계 원리를 동시에 적용할 수 있기 때문에, 시편의 특성에 따른 측정 방식의 선택이 가능한 장점이 있다.

### 제3절 연구 목표

본 논문에서는 금속층이 포함된 박막 구조물에 대한 기존의 측정 기술의 한계를 극복하기 위해, 새로운 이중 광간섭계 측정 시스템에 대한 연구를 진행한다. 그래서 본 연구는 측정 원리에 따른 이중 측정 모드의 구현과 시편의 양면을 측정하기 위한 이중 구조의 측정 프로브 시스템 구성을 통해 다양한 구조의 박막 분석을 수행한다. 이를 위해 본 연구에서는 이중 광간섭계 시스템을 설계, 개발하고 이를 실험적으로 검증하는 것을 목표로 한다.

본 연구의 목표 달성을 위한 세부 연구 내용은 다음과 같다.

- 이중 광간섭계 시스템의 이중 측정 원리 (저간섭성 주사 간섭계, 분산 간섭계) 구현
- 시편의 양면을 동시에 측정하기 위한 이중 측정 프로브 시스템 구성
- 다양한 시편에 대한 구조 분석 및 측정

본 논문은 제2장에서 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 이론, 제안하는 이중 광간섭계 시스템을 제시하고, 제3장에서는 제안하는 시스템의 보정 및 실험, 결과 분석 내용을 설명한다. 제4장에서는 제안하는 이중 광간섭계 시스템에 대해 고찰 및 논의를 진행하고, 마지막으로 제5장의 결론으로 논문을 마무리한다.

## 제2장 박막 구조 분석을 위한 시스템

본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템은 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 원리로 박막 및 다양한 시편의 구조를 분석한다.

### 제1절 저간섭성 주사 간섭계

#### 1. 저간섭성 주사 간섭계 측정 원리 및 알고리즘

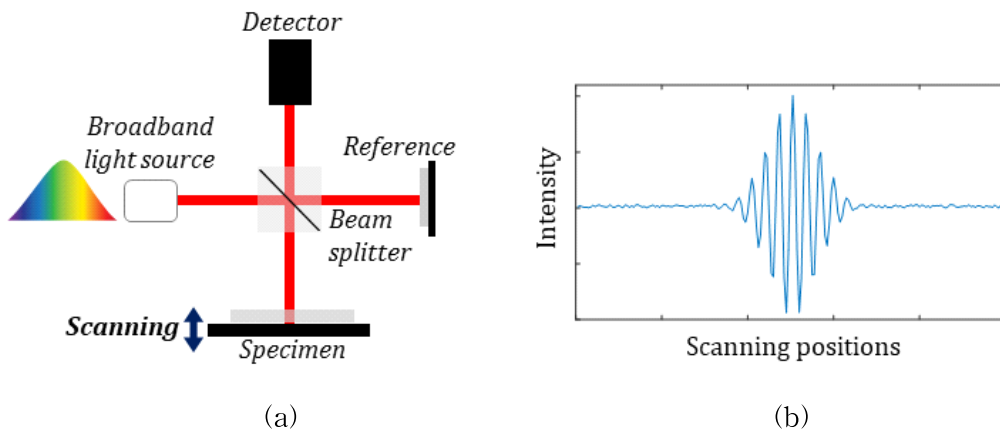


그림 2-1. 저간섭성 주사 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 간섭 신호

저간섭성 주사 간섭계는 그림 2-1(a)와 같이 일반적으로 넓은 파장 대역을 가진 저간섭성 광원을 이용하며, 기준 거울과 측정 시편 사이의 광경로차를 조절하여 간섭 신호를 획득한다 [16-21]. 이때, 발생하는 간섭 신호는 광원의 저간섭성으로 인해 그림 2-1(b)와 같이 광경로차가 0인 지점에서 국지적으로 발생하며, 간섭 신호의 가시도 정점 및 위상 정점을 추출하여 시편의 형상을 측정한다. 또한, 시편이 박막과 같이 여러 개의 반사면을 가지고 있는 경우에는 반사면의 개수만큼 간섭 신호가 획득되며, 이들 간섭 신호의 정점의 위치들로부터 박막의 두께를 측정할 수 있다. 이때, 박막의 두께는

저간섭성 광원의 가간섭거리보다 두꺼워야 한다.

측정된 간섭 신호로부터 가시도 정점 및 위상 정점을 추출하는 방법은 위상 천이 (Phase shifting) 방법, 힐버트 변환 (Hibert transform) 방법, 푸리에 변환 (Fourier transform) 방법 등 다양한 방법 [22-24]이 있으나, 그 중에서 푸리에 변환 방법이 일반적으로 널리 이용된다. 푸리에 변환 방법은 다시 푸리에 영역 해석법 (Fourier domain analysis)과 푸리에-역푸리에 변환 (Fourier transform-inverse Fourier transform) 방법으로 나누는데, 본 연구에서는 푸리에-역푸리에 변환 방법을 이용하여 간섭 신호를 분석하였다. 푸리에-역푸리에 변환 방법은 저간섭성 주사 간섭계의 광강도 (Intensity) 신호를 푸리에 변환하고, 간섭 신호에 해당하는 첨두 (Peak)만을 필터링 (Filtering)한 후, 다시 역푸리에 변환하여 획득한 가시도 함수의 정점을 추출하는 방법이다. 이를 설명하기 위해, 저간섭성 주사 간섭계의 광강도 신호 ( $i(h)$ )를 수학적으로 나타내면 식 (2-1)과 같다.

$$i(h) = i_0 + g(h-z)\cos[2k_c(h-z)] \quad (2-1)$$

여기서,  $i_0$ 는 배경광의 광강도 (Background intensity)이며,  $h$ 는 측정 시편의 높이,  $k_c$ 는  $(2\pi/\lambda_c)$ 로 표현되는 광원의 중심 파장에서의 파수 (Wave number)를 의미한다. 또한,  $g(h-z)$ 는 획득되는 간섭 신호의 포락선 함수 (Envelope function)를 의미하며, 광축 방향으로의 이동량인  $z$ 에 따라 변화하게 된다. 가시도 정점을 추출하기 위해 식 (2-1)을 푸리에 변환하면 다음과 같다.

$$I(u) = I_0\delta(u) + \frac{1}{2}G(u+u_0)\exp(-j2\pi uh) + \frac{1}{2}G(u-u_0)\exp(-j2\pi uh) \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서  $u$ 는 푸리에 영역에서의 공간 주파수를 의미하며,  $u_0$ 는 코사인 함수의 공간 주파수인  $(2k_c/2\pi)$ 를,  $G(u)$ 는  $g(z)$ 의 푸리에 변환된 결과를 나타낸다. 이때, 식 (2-2)의 오른쪽 첫 번째 성분은 배경광에 해당하는 첨두 신호이며, 두 번째, 세 번째 성분은 가시도에 해당하는 첨두 신호들이므로, 식 (2-2)의 오른쪽 세 번째 성분만을

필터링하여 이를 역푸리에 변화하면, 식 (2-3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_F(h) = g(h-z)\exp[i2k_c(h-z)] \quad (2-3)$$

식 (2-3)을 살펴보면,  $i_F$ 의 절댓값은 결국 간섭 신호의 포락선 함수를 나타내기 때문에, 이를 통해 간섭 신호의 포락선 함수를 추출하고, 추출된 시편의 높이 ( $h$ )에 해당하는 포락선 함수의 정점은 무게 중심법 (Center of gravity)을 이용하여 정밀하게 결정할 수 있다 [25]. 그림 2-2는 저간섭성 주사 간섭계의 푸리에-역푸리에 변환을 통한 가시도 정점 추출 방법을 나타낸다.

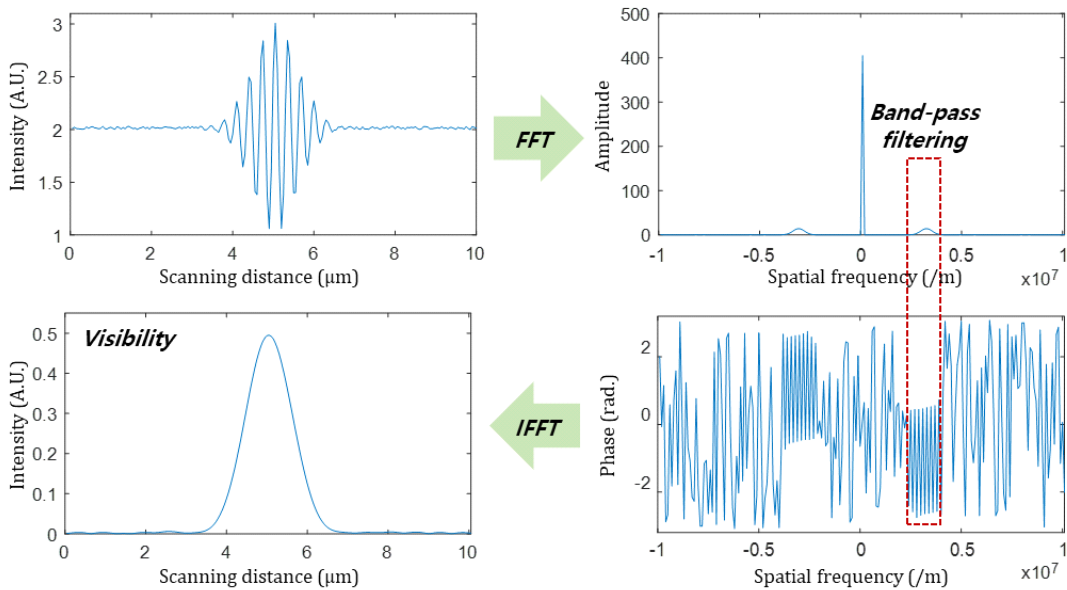


그림 2-2. 저간섭성 주사 간섭계 간섭 신호의 푸리에-역푸리에 변환 방법



## 제2절 분산 간섭계

### 1. 분산 간섭계 측정 원리 및 알고리즘

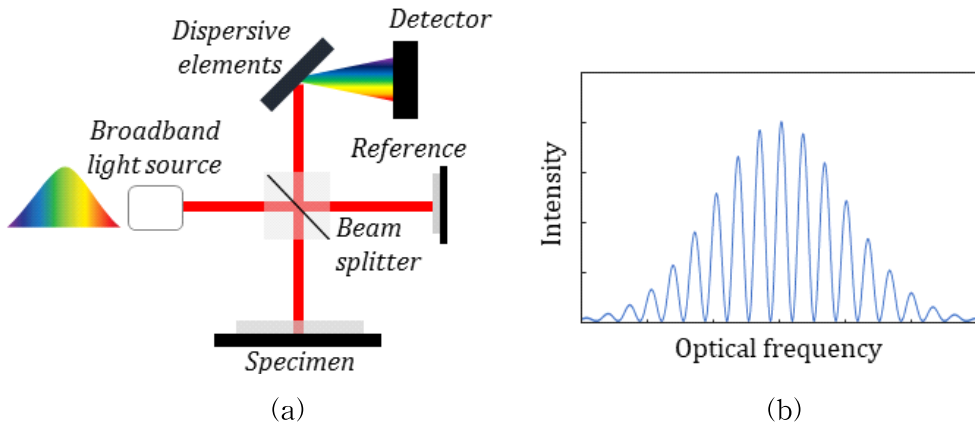


그림 2-3. 분산 간섭계의 (a) 광학 구성도와 (b) 간섭 신호

분산 간섭계는 저간섭성 주사 간섭계와 동일하게 넓은 파장 대역을 가지는 저간섭성 광원을 이용하여 그림 2-3(a)와 같이 구성되며, 광검출기로 분광기 (Spectrometer)를 이용하여 파장별 간섭 신호를 획득한다 [26-31]. 파장별 간섭 신호는 간단한 수식을 통해 광주파수별 간섭 신호로 변환이 가능하며, 이러한 광주파수별 간섭 신호는 기준 거울과 시편 사이의 광경로차에 의해 그림 2-3(b)와 같이 변조 (Modulation)된다. 분산 간섭계의 간섭 신호로부터 광경로차를 추출하기 위한 방법으로는 푸리에 변환이 널리 사용되고 있으며, 이를 설명하기 위해 분산 간섭계에서 획득되는 광주파수별 광강도  $i(\nu)$ 를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 i(\nu) &= a(\nu) + b(\nu)\cos 2k\Delta L = a(\nu) + b(\nu)\cos\left(\frac{4\pi n\Delta L}{c_0}\right)\nu \\
 &= a(\nu) + b(\nu)\cos\varphi(\nu)
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

여기서  $\Delta L$ 은 기준 거울과 측정 시편 사이의 광경로차를 의미하고,  $a(\nu)$ 는 광주파수 영역에서 획득된 신호의 평균 광강도 (Mean intensity),  $b(\nu)$ 는 간섭 신호의 변조 크기 (Modulation amplitude)를 나타낸다. 또한,  $k$ 는 파수 (Wave number),  $n$ 은 매질의 위상 굴절률 (Phase refractive index),  $c_0$ 는 진공중의 광속 (Speed of light in vacuum),  $\nu$ 는 광주파수 (Optical frequency)에 해당한다. 이때,  $a(\nu)$ 와  $b(\nu)$ 는 기준 거울과 시편의 반사 계수 및 광원의 주파수 분포  $s(\nu)$ 를 이용하여 표현할 수 있으며, 이들 반사 계수를 1로 가정하면, 식 (2-5)는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$i(\nu) = s(\nu)[1 + \cos\varphi(\nu)] \quad (2-5)$$

식 (2-5)를 살펴보면, 분산 간섭계에서 획득되는 광강도 신호는 광원의 주파수 특성을 띠는 광강도 분포를 보여주는 동시에, 간섭 신호의 위상  $\varphi(\nu)$ 에 의해 변조된 신호임을 알 수 있다. 그리고 식 (2-4)를 통해, 광주파수별 위상  $\varphi(\nu)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\varphi(\nu) = \frac{4\pi n \Delta L}{c_0} \nu = 2\pi\sigma\nu, \quad \sigma = \frac{2n\Delta L}{c_0} \quad (2-6)$$

식 (2-6)에서 알 수 있듯이,  $\sigma$ 는 광주파수별 간섭 신호의 변조 주파수 (Modulation frequency)를 의미하며,  $\Delta L$ 의 함수이다. 그래서 식 (2-5)의 광강도 신호로부터  $\sigma$ 를 추출하기 위해서 푸리에 변환을 이용하며, 식 (2-5)를 푸리에 변환하면 식 (2-7)과 같다.

$$I(\tau) = FT[i(\nu)] = S(\tau) \otimes \left[ \delta(\tau) + \frac{1}{2}\delta(\tau - \sigma) + \frac{1}{2}\delta(\tau + \sigma) \right] \quad (2-7)$$

식 (2-7)에서  $\tau$ 는 푸리에 변환에 의한 매개 변수로, 광속에 의해 발생하는 시간 지연을 의미하며,  $S(\tau)$ 는  $s(\nu)$ 의 푸리에 변환 결과를 나타낸다. 한편,  $\delta(\tau)$ 는 디랙-델타 함수 (Dirac-delta function)이며, 식 (2-7)에서 알 수 있듯이 분산 간섭계에서 획득한 광

강도의 푸리에 변환 결과는 각각  $\tau=0, \sigma, -\sigma$  위치에서의 침두 신호들로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 이 침두들의 위치로부터 바로  $\sigma$ 를 측정할 수 있으며, 식 (2-6)을 통해  $\Delta L$ 을 계산할 수 있다.

하지만 식 (2-7)에서 알 수 있듯이, 각각의 침두 신호들은 광원의 주파수 분포에 해당하는  $S(\tau)$ 에 의해 영향을 받기 때문에, 침두 신호들의 폭이 넓어지는 동시에, 각각의 침두 위치를 정확히 결정하기가 어렵다. 이를 해결하기 위해, 식 (2-7)의 오른쪽 두 번째 성분만을 필터링한 뒤 역푸리에 변환을 수행하면 식 (2-8)과 같은 신호를 획득할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 i'(\nu) &= FT^{-1}[I(\tau)] = s(\nu) \times \frac{1}{2} \exp[i(2\pi\sigma\nu)] \\
 &= s(\nu) \times \frac{1}{2} \exp[i\varphi(\nu)]
 \end{aligned}
 \tag{2-8}$$

여기서  $s(\nu)$ 는 실수 함수이므로,  $i'(\nu)$ 의 위상을 계산하면  $\varphi(\nu)$ 를 추출할 수 있으며, 식 (2-6)을 이용하여 식 (2-9)와 같이  $\Delta L$ 을 보다 정밀하게 계산할 수 있다.

$$\Delta L = \frac{c_0}{4\pi N} \frac{d\varphi(\nu)}{d\nu}
 \tag{2-9}$$

그림 2-4는 분산 간섭계의 푸리에-역푸리에 변환을 통한 광주파수별 위상 기울기를 통한 거리 측정 방법을 나타낸다.

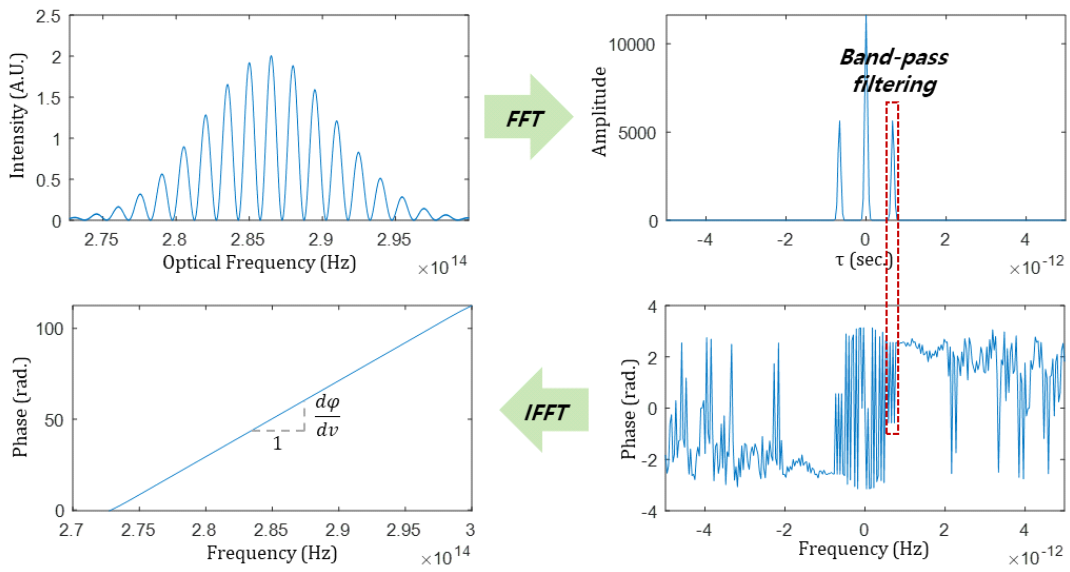


그림 2-4. 분산 간섭계 간섭 신호의 푸리에-역푸리에 변환 방법

## 2. 분산 간섭계의 측정 영역

분산 간섭계는 저간섭성 주사 간섭계와는 달리 광경로차를 조절하기 위한 기계적 구동부가 필요하지 않지만, 광원의 저간섭성으로 인해 측정 영역이 제한된다. 분산 간섭계의 측정 영역은 광원의 주파수 분포 폭에 의해 결정되는 최소 측정 거리 ( $L_{\min}$ )와 분광기의 분해능에 의한 최대 측정 거리 ( $L_{\max}$ )로 제한되며, 각각의 수학적 표현은 식 (2-10) 및 식 (2-11)과 같다.

$$L_{\min} = \frac{2\ln 2}{\pi \Delta\nu N} c_0 \quad (2-10)$$

$$L_{\max} = \frac{c_0}{4N\delta\nu} \quad (2-11)$$

여기서  $c_0$ 는 진공에서의 광의 속도,  $N$ 은 매질의 군굴절률 (Group index of refraction)을 나타내며,  $\Delta\nu$ 와  $\delta\nu$ 는 각각 광원의 주파수 분포와 분광기의 주파수 분해능을 의미한다. 식 (2-10)과 식 (2-11)을 살펴보면, 분산 간섭계는  $\Delta\nu$ 가 넓을수록 최소 측정 거리가 짧아지고,  $\delta\nu$ 가 작을수록 최대 측정 거리가 길어져서 전체 측정 영역이 증가한다. 하지만, 유한한 크기의 광원 분포와 분광기의 분해능으로 인해 분산 간섭계의 측정 영역은 여전히 제한받는다.

## 제3절 이중 광간섭계 시스템

### 1. 이중 광간섭계 시스템의 측정 원리

그림 2-5는 본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템의 광학 구성도를 나타낸다. 광원으로는 저간섭성 간섭계 원리를 적용하기 위해, 넓은 광주파수 대역을 가지는 SLD (Super Luminescent Diode)를 이용하며, 광원으로부터 단일 모드 광섬유 (Single mode optical fiber)를 통해 간섭계로 입사한 광은 우선적으로 광 서큘레이터 (Optical circulator)를 지나 광 스위치 (Optical switch)로 전달된다. 이때, 광 스위치는 시편의 양면을 측정하기 위한 채널 1과 채널 2의 측정 프로브 (Measurement probe)에 광을 순차적으로 전달한다.

한편, 각 채널의 측정 프로브는 마이켈슨 간섭계 (Michelson interferometer)의 구조로 구성되며, 시준 렌즈 (Collimating lens)와 집속 렌즈 (Focusing lens)를 이용하여 광을 기준 거울과 시편에 집속한다. 이후 반사된 광들은 다시 광섬유를 통해 광 서큘레이터에 전달되며, 신호 검출부 (Signal receiver)에서 간섭 신호가 획득된다.

그림 2-5에서 알 수 있듯이, 이중 광간섭계의 신호 검출부는 저간섭성 주사 간섭계의 간섭 신호를 획득하기 위한 단일 광검출기 (Photo detector)와 분산 간섭계의 간섭 신호를 획득하기 위한 분광기로 구성되며, 이들의 측정 결과는 이중 광간섭계의 측정 모드에 따라 각각 적용된다. 먼저, 긴 거리 측정 모드 (Long-range measuring mode)에서는 저간섭성 주사 간섭계의 원리로 시편의 주사를 통해 시편을 측정하며, 시편의 두께와 종류에 상관없이 측정이 가능한 특징이 있다. 그러나 시편의 광축 방향 주사로 인하여 측정 시간이 오래 걸린다. 이를 보완하기 위해, 분산 간섭계의 측정 영역에 검출되는 시편의 경우에는 고속 측정 모드 (Rapid measuring mode)로 전환되어 분산 간섭계의 원리로 시편의 구조를 분석한다. 이때 시편의 전체 두께는 분산 간섭계의 측정 영역에서 검출되며 이 경우, 시편의 측정은 기계적 구동을 최소화하여 수행된다.

제안하는 이중 광간섭계는 측정 모드 측면에서 분산 간섭계 기반의 고속 측정 모드와 저간섭성 주사 간섭계 기반의 긴 거리 측정 모드를 이용하여, 다양한 두께의 시편

을 측정할 수 있으며, 시편의 양면을 동시에 측정하기 위한 이중 구조의 측정 프로브 시스템을 통해 파우치형 이차전지 셀과 같이 금속층을 포함한 박막 구조물의 분석이 가능한 장점이 있다.

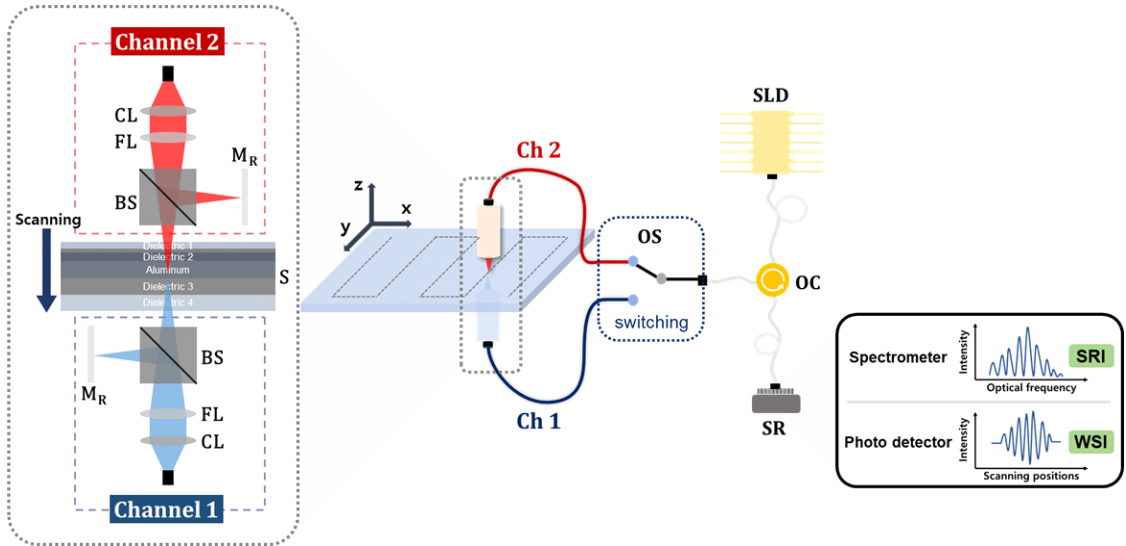


그림 2-5. 이중 공간섭계 시스템의 광학 구성도

(SLD, super luminescence diode; OC, optical circulator; OS, optical switch; CL, collimating lens; FL, focusing lens; BS, beam splitter;  $M_R$ , reference mirror; S, specimen; SR, signal receiver)

## 2. 이중 광간섭계 시스템을 통한 박막 구조 분석

### 2.1 측정 프로브의 기하학적 관계 및 시편 구조에 따른 측정 결과

본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템은 박막의 구조를 분석하기 위해 시편의 양면에 이중 프로브를 구성한다. 이때, 두 측정 프로브들 사이의 기하학적 관계는 측정 결과 분석에 있어 매우 중요하다. 이론적으로 두 측정 프로브들은 그림 2-6(a)와 같이 집속 렌즈를 이용하여 맺힌 초점들이 서로 일치해야 한다. 그러나 실제로 두 초점들은 사용하는 렌즈의 초점 심도 (Depth of field)와 광학 정렬 등의 이유로 정확히 일치할 수 없다. 그래서 실제로 구성된 이중 광간섭계 시스템에서는 두 측정 프로브의 기하학적 관계는 그림 2-6(b) 또는 2-6(c)와 같으며, 두 측정 프로브들 사이의 거리  $\alpha$ 를 정확히 결정하여 측정 결과에서 보정 (Calibration)해 주어야 한다. 그러나 그림 2-6(b)와 같이 두 초점들이 지나치게 겹치는 경우에는 두 측정 프로브에서 측정된 결과들을 통해 시편의 구조를 분석함에 있어 혼란을 일으킨다. 특히, 시편의 전체 두께 등이  $\alpha$ 보다 크거나 작은 상황에 따라 보정 방법이 달라져야 한다. 반면, 그림 2-6(c)와 같이 두 측정 프로브의 초점들이 떨어져 있는 경우에는 이러한 혼란을 최소화할 수 있기 때문에, 측정 결과 분석에 보다 용이하다.

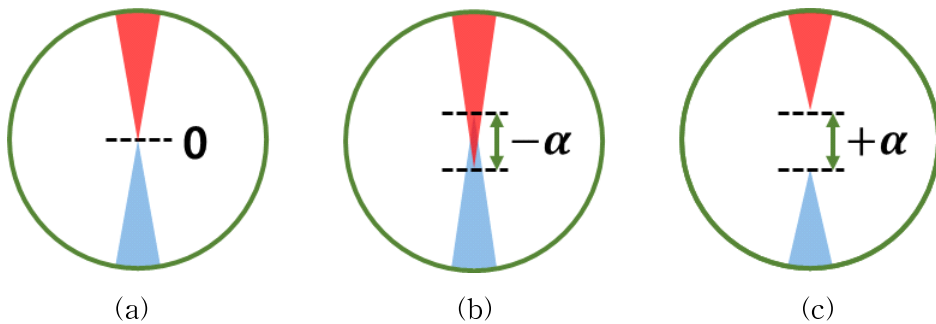


그림 2-6. 두 측정 프로브의 초점이 (a) 일치할 경우와 (b) 서로 겹치는 경우, (c) 서로 떨어진 경우



한편, 이러한 두 측정 프로브의 기하학적 관계를 이용하면, 시편의 종류에 따라 측정할 수 있는 물리량은 표 2-1과 같이 정리할 수 있다. 먼저 박막이 도포되어 있지 않은 금속 기판 및 투명 판의 경우에는 각 프로브의 측정 결과와 기하학적 관계를 통해 물리적 두께를 측정할 수 있으며, 이에 더하여 투명 판에서는 광학적 두께 측정을 통해 매질의 굴절률을 계산할 수 있다. 한편, 박막 시편의 경우에는 양면의 측정 프로브들을 이용하여 각 면에 도포된 박막의 광학적 두께를 측정할 수 있다. 또한, 두 측정 프로브들의 기하학적 관계를 통해 전체 시편의 두께를 계산할 수 있다. 만약, 박막 및 기저층의 굴절률을 알 수 있다면, 금속층 및 기저층의 물리적 두께 측정도 가능하다.

표 2-1. 시편의 구조에 따른 이중 공간섭계 시스템의 측정 요소

시편의 종류	측정 물리량	필요 물리량
금속 기판	물리적 두께	-
투명 판	물리적 두께, 광학적 두께, 굴절률	-
박막 시편 (금속층)	시편의 물리적 두께, 박막의 광학적 두께, 금속층의 물리적 두께	박막 굴절률
박막 시편 (투명 기저판)	시편의 물리적 두께, 박막의 광학적 두께, 기저층의 광학적, 물리적 두께	박막 및 기저층의 굴절률

## 2.2 저간섭성 주사 간섭계 기반 시편 측정

저간섭성 주사 간섭계는 시편의 광축 방향 주사를 통해 시편을 측정한다. 이때 측정되는 물리량은 표 2-1과 같이 시편의 종류에 따라 각각 달라진다.

### 2.2.1 금속 기판

그림 2-7은 금속 기판을 측정할 때 각 채널의 측정 프로브에서 획득되는 저간섭성 주사 간섭 신호를 나타낸다. 그림 2-7에서 알 수 있듯이, 각 측정 프로브에서는 시편의 주사에 따라 금속 기판의 양면의 높이에 해당하는 간섭 신호가 획득되며, 두 간섭 신호들의 정점의 위치들의 차이 ( $\delta t$ )로부터 금속 기판의 두께를 측정할 수 있다. 그러나 두 측정 프로브의 초점은 서로  $\alpha$ 만큼 떨어져 있기 때문에, 금속 기판의 물리적 두께 ( $T$ )는 식 (2-12)로 계산된다.

$$T = \delta t + \alpha \quad (2-12)$$

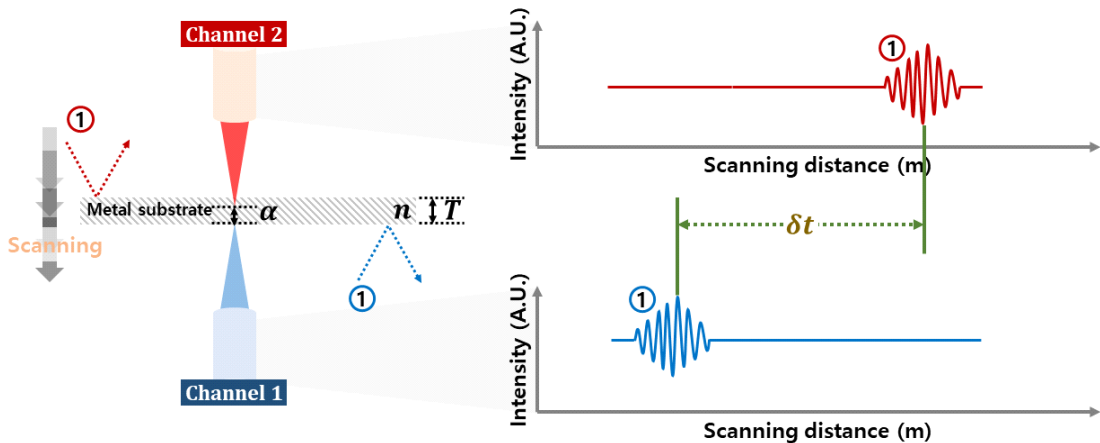


그림 2-7. 저간섭성 주사 간섭계의 금속 기판 구조 분석 이론

### 2.2.2 투명 판

그림 2-8은 투명 판을 측정할 때 각 채널의 측정 프로브에서 획득되는 저간섭성 주사 간섭 신호를 나타낸다. 금속 기판을 측정할 때와는 달리, 각 측정 프로브에서는 각각 2개의 간섭 신호가 획득되며, 두 간섭 신호의 정점의 위치 차이는 투명 판의 광학적 두께를 나타낸다. 한편, 각 채널에서 측정된 시편의 첫 번째 면에 해당하는 간섭 신호의 정점 위치들로부터 투명 판의 물리적 두께를 측정할 수 있다. 그림 2-8에서 알 수 있듯이, 채널 1의 측정 프로브에서는 ②번, ①번의 순서로, 채널 2의 측정 프로브에서는 ①번, ②번의 순서로 간섭 신호들이 획득된다. 각 채널에서는 두 간섭 신호들의 정점 위치로부터 광학적 두께 ( $D$ )를 측정하며, 측정 프로브들의 ①번 간섭 신호들의 정점 위치 차이와  $\alpha$ 로부터 식 (2-12)를 이용하여 투명 판의 물리적 두께를 계산한다. 또한, 이를 통해 투명 판의 균굴절률 ( $N$ )을 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$N = D/T \quad (2-13)$$

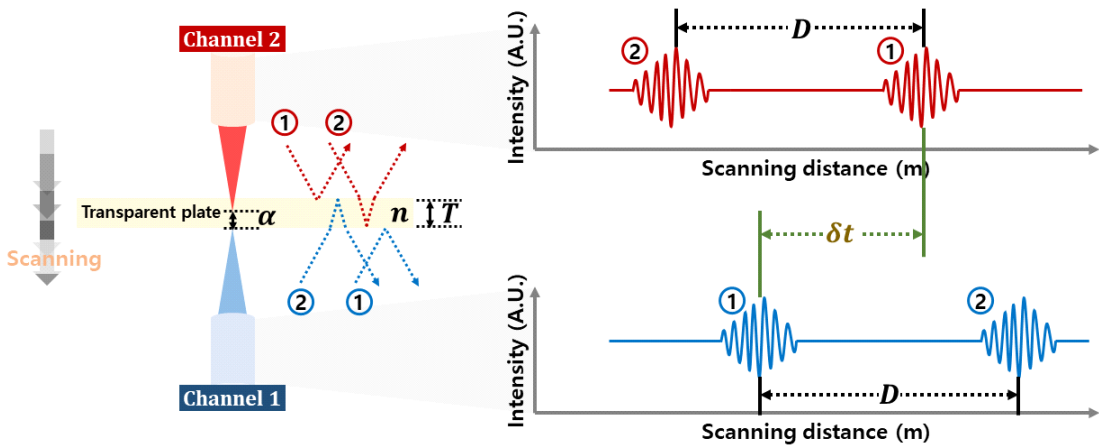


그림 2-8. 저간섭성 주사 간섭계의 투명 판 구조 분석 이론

### 2.2.3 박막 시편

그림 2-9는 금속 기판의 양면에 박막이 도포되어 있는 단층 박막 시편을 측정할 때 간섭성 주사 간섭 신호를 나타낸다. 이 경우, 각 채널의 측정 프로브에서는 박막의 표면과 금속 기판의 표면에 해당하는 두 개의 간섭 신호가 획득되며, 두 간섭 신호의 정점의 위치 차이는 박막의 광학적 두께를 나타낸다. 한편, 시편의 전체 물리적 두께는 앞서 박막이 없을 때와 마찬가지로 측정할 수 있다. 또한, 박막의 굴절률을 알고 있으면, 이를 통해 금속 기판의 물리적 두께도 계산할 수 있다. 그림 2-9에서 알 수 있듯이, 금속 기판의 윗면, 아랫면에 해당하는 박막의 광학적 두께는  $n_1t_1$ ,  $n_3t_3$ 이며, 박막의 굴절률 ( $n_1$ ,  $n_3$ )를 통해, 각각의 박막의 물리적 두께 ( $t_1$ ,  $t_3$ )를 계산할 수 있다. 또한, 측정된 시편의 전체 물리적 두께로부터, 금속 기판의 물리적 두께 ( $t_2$ )는 식 (2-14)로 계산할 수 있다.

$$t_2 = T - (t_1 + t_3) \quad (2-14)$$

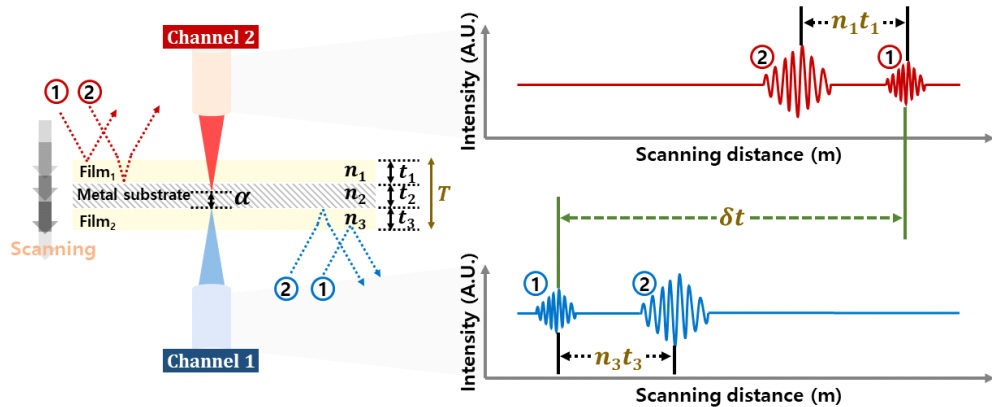


그림 2-9. 저간섭성 주사 간섭계의 박막 시편 구조 분석 이론

단층 박막 시편 측정에 더하여, 다층 박막 시편을 측정하는 경우 역시 동일한 방법을 이용하면, 각 박막의 굴절률을 알고 있다는 가정 하에, 박막의 광학적, 물리적 두께와 금속 기판의 물리적 두께, 시편의 전체 두께를 측정할 수 있다.

## 2.3 분산 간섭계 모드에 따른 박막 구조 분석 이론

제안하는 이중 광간섭계는 분산 간섭계를 이용하여 고속 측정 모드로 광축 방향 구동을 최소화하여 시편을 측정할 수 있다. 이를 위해서는 시편의 측정 물리량들이 분산 간섭계의 측정 영역 내에서 측정되어야 한다.

### 2.3.1 금속 기판

그림 2-10은 금속 기판을 측정할 때 각 채널의 측정 프로브에서 획득되는 분산 간섭 신호의 푸리에 변환 결과를 나타낸다. 분산 간섭계에서는 저간섭성 주사 간섭계와는 달리, 시편의 광축 방향 주사 없이 고정된 위치에서 간섭 신호를 획득할 수 있다. 그러나 측정된 거리가 분산 간섭계의 측정영역에서 벗어나는 경우 간섭 신호 획득이 불가능하기 때문에, 측정이 수행되는 경우 시편의 위치는 각 측정 프로브의 측정 영역 내에 있어야 한다. 이를 위해, 시편 측정 시 한 번의 시편 이동이 필요하며, 이때의 이동량 ( $S$ )과 측정 프로브들 사이의 거리를 통해, 식 (2-15)를 이용해서 금속 기판의 물리적 두께 ( $T$ )를 측정할 수 있다.

$$T = S - d_1 - d_2 + \alpha \quad (2-15)$$

여기서  $d_1$ 과  $d_2$ 는 각각 채널 1과 채널 2의 측정 프로브에서 측정된 거리를 나타낸다. 그림 2-10에서 알 수 있듯이, 채널 1과 채널 2의 측정이 수행되는 위치는  $S$ 와 같으며, 이러한 측정 위치는 금속 기판의 물리적 두께와  $d_1$ ,  $d_2$ 의 합으로 표현할 수 있으며,  $\alpha$ 는 보정되어야 한다.

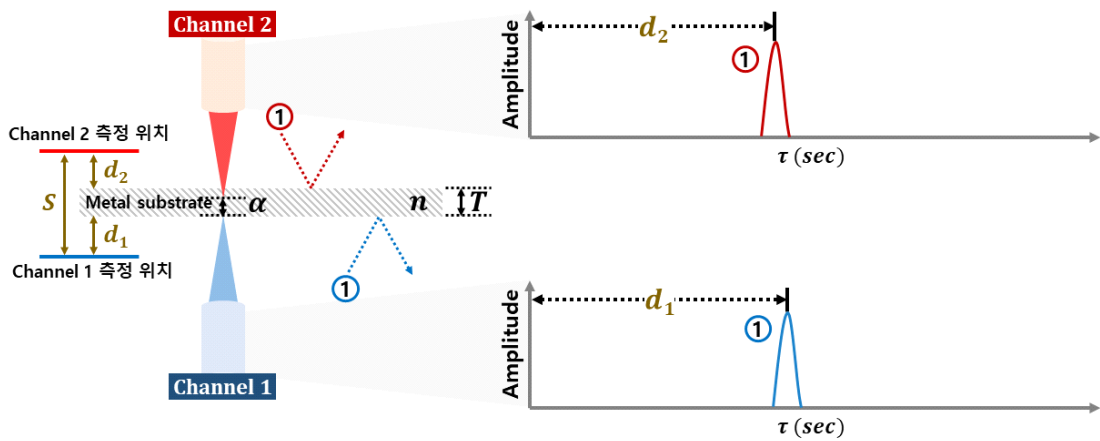


그림 2-10. 분산 간섭계의 금속 기판 구조 분석 이론

### 2.3.2 투명 판

그림 2-11은 투명 판을 측정할 때 각 채널의 측정 프로브에서 획득되는 분산 간섭 신호의 푸리에 변환 결과를 나타낸다. 금속 기판을 측정할 때와는 달리, 측정 프로브에서는 각각 2개의 간섭 신호가 획득되며, 두 간섭 신호의 정점의 위치 차이는 저간섭성 주사 간섭계와 동일하게 투명 판의 광학적 두께 ( $D$ )를 나타낸다. 또한, 그림 2-11에서 알 수 있듯이, 채널 1과 채널 2의 측정이 수행되는 위치는  $S$ 와 같으며, 이러한 측정 위치는 투명 판의 물리적 두께 ( $T$ )와  $d_1$ ,  $d_2$ 의 합으로 표현할 수 있으며,  $\alpha$ 는 보정되어야 한다. 이를 통해 투명 판의 균굴절률 ( $N$ )은 저간섭성 주사 간섭계와 동일하게 식 (2-13)을 이용하여 계산된다.

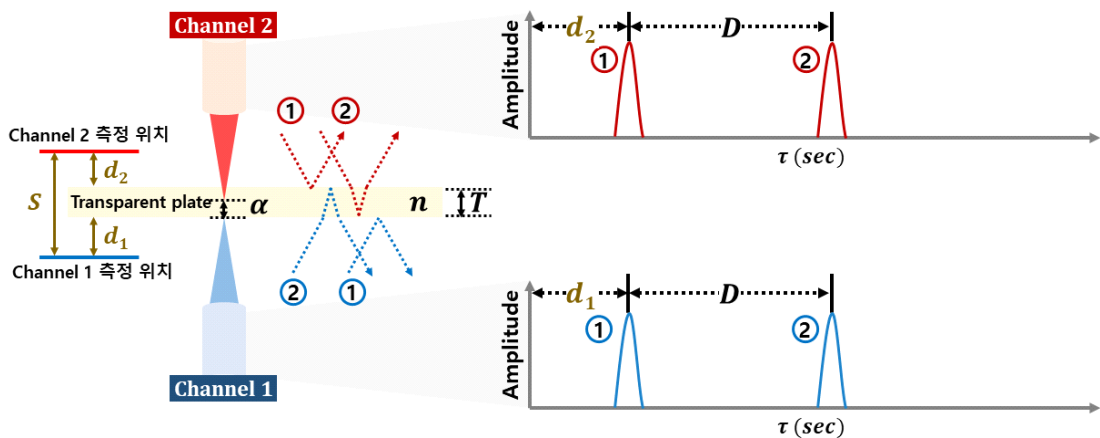


그림 2-11. 분산 간섭계의 투명 판 구조 분석 이론

### 2.3.3 박막 시편

그림 2-12는 금속 기판의 양면에 박막이 도포되어 있는 단층 박막 시편을 측정할 분산 간섭 신호의 푸리에 변환 결과를 나타낸다. 이 경우, 각 채널의 측정 프로브에서는 박막의 표면과 금속 기판의 표면에 해당하는 두 개의 신호가 획득되며, 두 신호의 정점의 위치 차이는 저간섭성 주사 간섭계와 마찬가지로 박막의 광학적 두께를 나타낸다. 한편, 시편의 전체 물리적 두께는 앞서 박막이 없을 때와 마찬가지로 측정할 수 있기 때문에, 박막의 굴절률을 알고 있으면, 이를 통해 금속 기판의 물리적 두께도 계산할 수 있다. 그림 2-12에서 알 수 있듯이, 금속 기판의 윗면, 아랫면에 해당하는 박막의 광학적 두께는  $n_1t_1$ ,  $n_3t_3$ 이며, 박막의 굴절률 ( $n_1$ ,  $n_3$ )를 통해, 각각의 박막의 물리적 두께 ( $t_1$ ,  $t_3$ )를 계산할 수 있다. 또한, 측정된 시편의 전체 물리적 두께로부터, 금속 기판의 물리적 두께 ( $t_2$ )는 식 (2-14)로 계산할 수 있다.

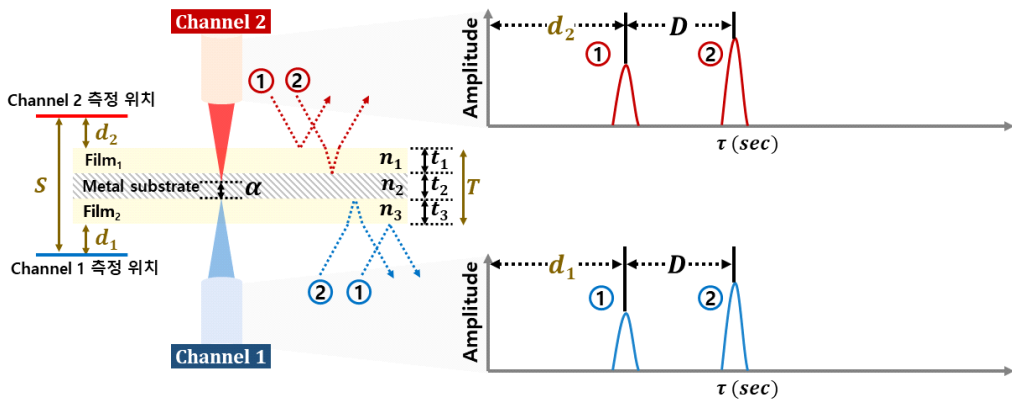


그림 2-12. 분산 간섭계의 박막 시편 구조 분석 이론

저간섭성 주사 간섭계와 마찬가지로 분산 간섭계에서도 다층 박막 시편을 측정하는 경우 역시 동일한 방법을 이용하면, 각 박막의 굴절률을 알고 있다는 가정 하에, 박막의 광학적, 물리적 두께와 금속 기판의 물리적 두께, 시편의 전체 두께를 측정할 수 있다. 하지만, 박막의 두께들이 서로 유사한 경우, 간섭 신호들의 푸리에 변환 결과들이 중복되어, 다층 박막 시편을 측정하는 경우에는 응용의 한계를 가진다.



## 제3장 실험 결과 및 분석

제2장에서는 박막 구조 분석을 위한 시스템의 측정 원리와 분석 이론에 대해 설명하였다. 제3장에서는 본 논문에서 제안하는 박막 구조 분석을 위한 이중 광간섭계 시스템을 구성하고, 이를 실험적으로 검증한다. 시편을 측정하기 앞서, 시스템 보정을 위한 측정점 오차 측정을 수행하고, 이후 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 원리로 다양한 구조의 시편들을 측정하였으며, 측정 결과 분석을 통해 제안하는 시스템의 성능을 평가하였다.

### 1. 이중 광간섭계 시스템 구성

- 시스템 광학 구성
- 측정 소프트웨어 구성

### 2. 이중 광간섭계의 측정점 매칭 및 시스템 보정

- 측정점 매칭
- 초점 위치 검증 및 시스템 보정

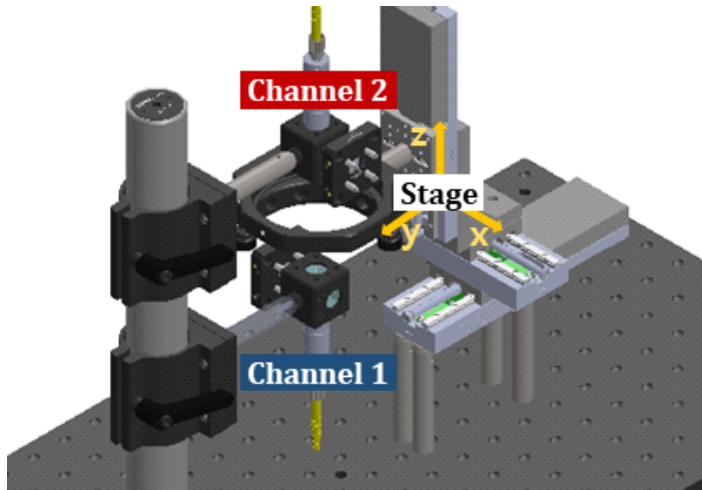
### 3. 실험 및 결과 분석

- 투명 판 (Transparent plate)
- 제작한 박막 시편 (Home-made film specimen)
- 파우치형 이차전지 셀 (Pouch-type secondary battery cell)

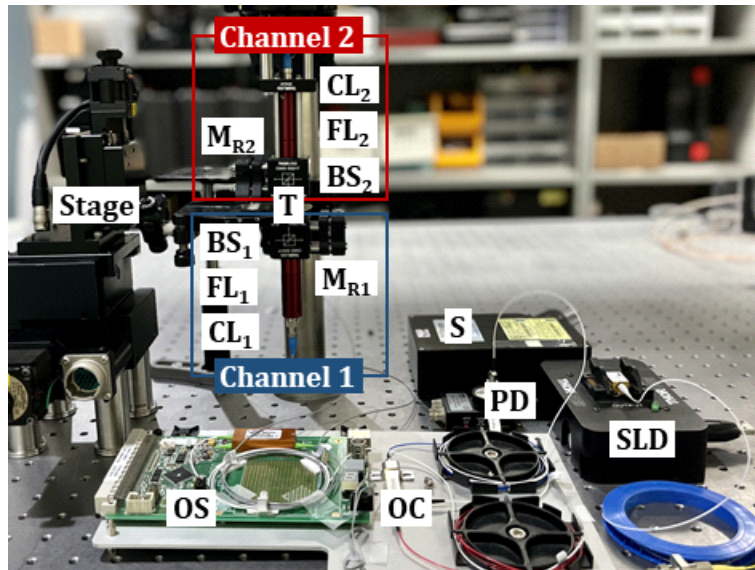
## 제1절 이중 광간섭계 시스템 구성

### 1. 시스템 광학 구성

본 논문에서는 제안하는 시스템을 구성하기 위해 그림 3-1(a)와 같이 3D CAD 설계 소프트웨어인 SOLIDWORKS 프로그램을 이용하여, 이중 광간섭계의 측정 프로브를 3차원 모델링하였고, 이를 기반으로 그림 3-1(b)와 같이 시스템을 구성하였다. 광원으로는 그림 3-2와 같이 1050 nm의 중심 파장에서 50 nm의 반치폭 (Full Width at Half Maximun, FWHM)을 가지는 SLD (SLD1050S, Thorlabs) 광원을 사용하였으며, 광원으로부터 단일 모드 광섬유를 통해 입사한 광은 광 서큘레이터 (CIR1064-FC, Thorlabs)와 광 스위치 (OSW12-980E, Thorlabs)를 통해 시편의 양면에 위치한 2개 채널의 측정 프로브로 전달되도록 구성하였다. 각각의 측정 프로브는 그림 3-1(b)와 같이 시준 렌즈 (#88-190, Edmund Optics)와 집속 렌즈 (#88-184, Edmund Optics)를 이용하여 광이 시편에 집속할 수 있도록 구성하였으며, 마이켈슨 타입의 간섭계를 통해 간섭 신호를 획득하였다. 또한, 신호 검출부는 표 3-1과 같이 광검출기 (DET10C/M, Thorlabs)와 분광기 (HR4000, Ocean Optics)로 구성하여, 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 원리로 박막 시편의 구조를 분석하였다. 이때, 저간섭성 간섭 신호를 획득하기 위해 측정 시편은 마이크로 스텝 모터 스테이지를 이용하여 광축 방향으로 100 nm 간격으로 이동하였으며, 채널 1과 채널 2의 측정 프로브는 광 스위치를 이용하여 측정 시편의 매 위치마다 광량을 측정하여 저간섭성 주사 간섭 신호를 획득하였다. 동시에 분광기에서는 분산 간섭계의 측정 영역을 고려하여 분산 간섭 신호를 획득하였다.



(a)



(b)

그림 3-1. 이중 광간섭계 시스템의 (a) 3차원 모델링과 (b) 실제 광학 구성  
 (SLD, super luminescence diode; OC, optical circulator; OS, optical switch; CL<sub>1&2</sub>,  
 collimating lens; FL<sub>1&2</sub>, focusing lens; BS<sub>1&2</sub>, beam splitter; MR<sub>1&2</sub>, reference mirror;  
 T, target; S, spectrometer; PD, photo defector)

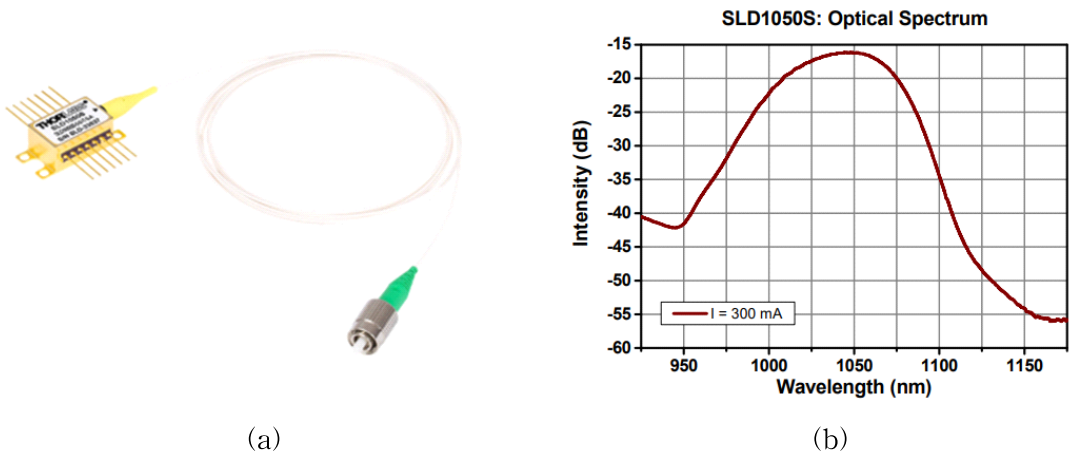




그림 3-2. 실험에 사용된 (a) 광원과 (b) 광원의 스펙트럼

표 3-1. 광 검출기와 분광기의 성능

장비		성능		
광 검출기		Wavelength range	Detector	Peak response
		900 - 1700 nm	InGaAs PIN	1.05 A/W
분광기		Spectral range	Pixel size	No. of elements
		950 - 1100 nm	8 $\mu\text{m}$ x 200 $\mu\text{m}$	3648 pixels

## 2. 측정 소프트웨어 구성

본 논문에서 제안하는 이중 공간섭계 시스템은 시편의 광축 이동에 따라 각 채널별로 신호를 검출해야 하며, 동시에 신호 검출부의 광검출기와 분광기에서 각각의 광량과 스펙트럼을 측정해야 한다. 이러한 시스템의 동작을 위해서는 시편의 구동을 위한 스테이지 제어와 광 스위치 제어가 필수적이며, 본 연구에서는 National Instruments사의 소프트웨어 프로그램인 LABVIEW 프로그램을 이용하여 그림 3-3과 같이 측정 소프트웨어를 구성하였다.

측정 소프트웨어에서는 스테이지의 주사 유무에 따라 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계로 나뉘어진다. 우선, 저간섭성 주사 간섭계 원리로 측정하는 경우, 그림 3-4(a)와 같이 광검출기를 통해 먼저 채널 1 측정 프로브에서의 광량을 측정하고, 이후 스위칭 과정을 통해 동일한 위치에서 채널 2 측정 프로브에서의 광량을 측정한다. 모든 채널의 광량이 측정되면 시편이 부착되어 있는 스테이지는 100 nm의 간격으로 이동하며, 이후 이러한 측정 과정이 반복된다. 한편, 분산 간섭계에서는 그림 3-4(b)와 같이 먼저 채널 1을 통해서 시편의 분산 간섭 신호에 해당하는 스펙트럼 및 스테이지의 위치를 획득한다. 또한, 시편의 위치가 이동하여 채널 2에서의 분산 간섭 신호 획득이 가능해지면, 채널 1에서와 같이 시편의 분산 간섭 신호에 해당하는 스펙트럼 및 스테이지의 위치를 획득하며, 이후 측정된 스테이지의 위치들과 분산 간섭계의 측정 결과들로부터 시편의 구조를 분석한다.

실험 과정에서 저간섭성 주사 간섭계로 시스템을 동작시키기 위해 시편의 전체 두께에 해당하는 영역만큼을 전체 측정 영역으로 설정하였으며, 분산 간섭계의 측정 영역인  $6 \mu\text{m} (L_{\min}) - 6.7 \text{ mm} (L_{\max})$  내에서 분산 간섭계의 분산 간섭 신호를 획득하였다.

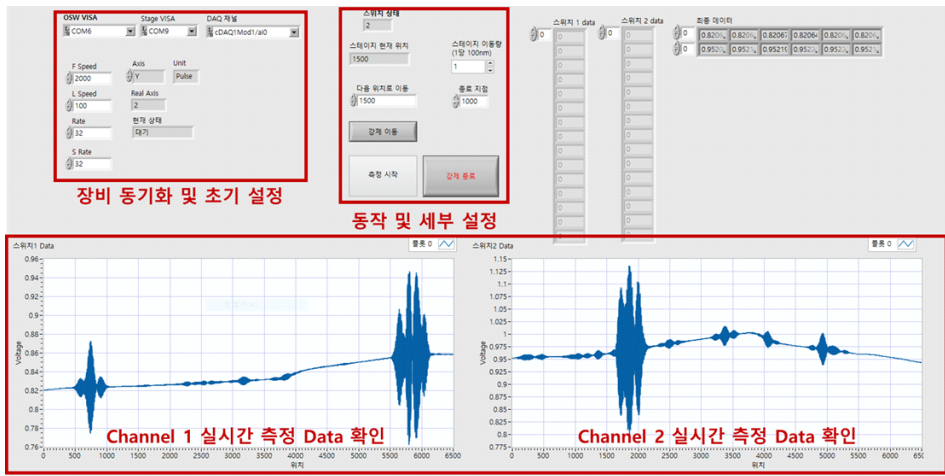


그림 3-3. LABVIEW로 구성된 이중 공간섭계 시스템 측정 알고리즘

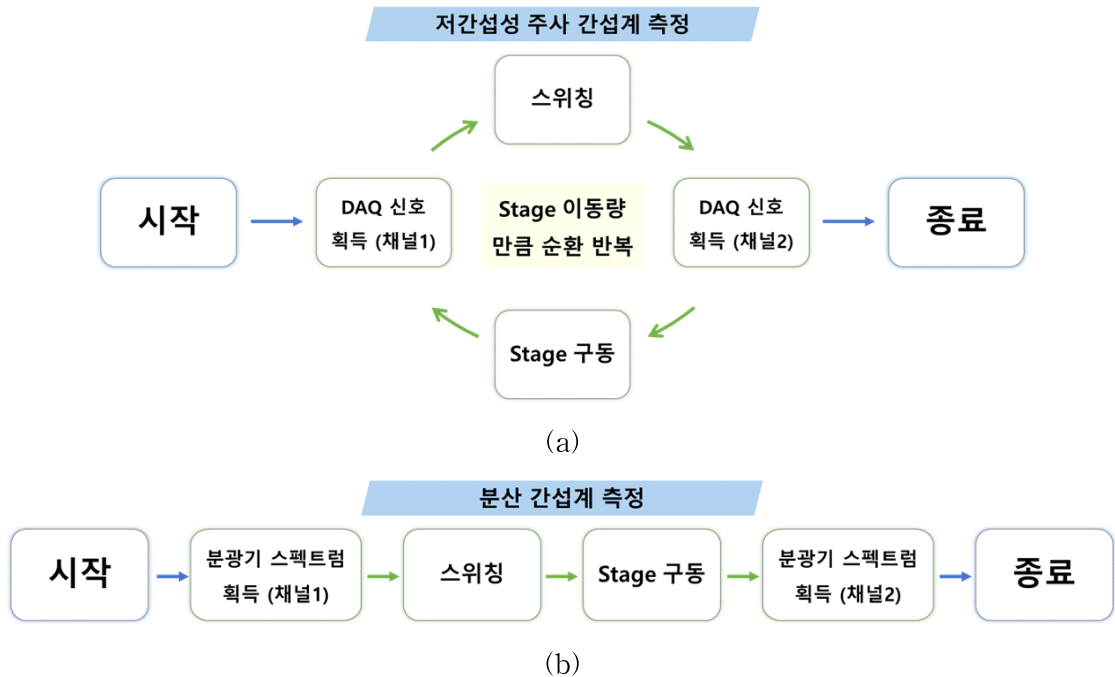


그림 3-4. 측정 방식에 따른 측정 순서도 (a) 저간섭성 주사 간섭계와 (b) 분산 간섭계

## 제2절 이중 광간섭계의 측정점 매칭 및 시스템 보정

본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템은 채널 1과 채널 2의 측정 프로브의 초점이 3차원 공간 상에서 서로 떨어지도록 설계되었다. 그래서 실제로 시스템을 구성하기 위해서는 두 채널의 측정 프로브의 초점이 횡방향으로 서로 동일하도록 시스템 측정점 매칭 (Matching) 작업이 필수적이다. 본 연구에서는 측정 프로브들의 횡방향 및 광축 방향의 광학 정렬을 위해 광섬유를 이용한 측정점 매칭을 진행하였으며, 이후 단일 반사면으로 가정할 수 있는 펠리클 광분할기 (Pellicle beam splitter)를 이용하여 초점 위치를 측정하고 이를 통해 시스템을 보정하였다.

- 채널 1, 채널 2 측정 프로브의 측정점 매칭
- 펠리클 광분할기를 이용한 초점 위치 검증 및 시스템 보정

### 1. 측정점 매칭

채널 1, 2 측정 프로브들의 초점 위치가 동일하면, 시편이 없는 경우 기하학적 관계에 의해 각 채널에서 출사한 광은 다른 채널에 모두 입사해야 한다. 이러한 특징을 이용하여 본 연구에서는 그림 3-5(b)와 같이 50  $\mu\text{m}$ 의 코어 직경 (Core diameter)을 가지는 다중 모드 광섬유와 3.6 - 5.3  $\mu\text{m}$ 의 Mode Field Diameter를 가지는 단일 모드 광섬유를 이용하여 측정점 매칭을 진행하였다. 채널 2 측정 프로브를 광 스위치와 분리한 후 광량 측정을 위한 광섬유를 연결하고, 채널 1 측정 프로브에서 출사한 광의 입사 광량을 측정하면서 채널 2 측정 프로브의 광학 정렬을 수행하였다. 최대 광량 측정 결과 각각 입사 광량의 62%, 20%였다. 이를 토대로 본 연구에서 구성한 이중 광간섭계는 횡방향으로 광섬유 코어 크기에 해당하는 5  $\mu\text{m}$  정도의 정밀도로 측정점이 매칭되었다고 판단하였다. 참고로 측정된 광량이 입사 광량에 비해 비교적 작은 이유는 광축 방향의 초점 불일치와 광섬유로 광이 입사하는 경우 발생하는 광손실 때문으로 판단된다.

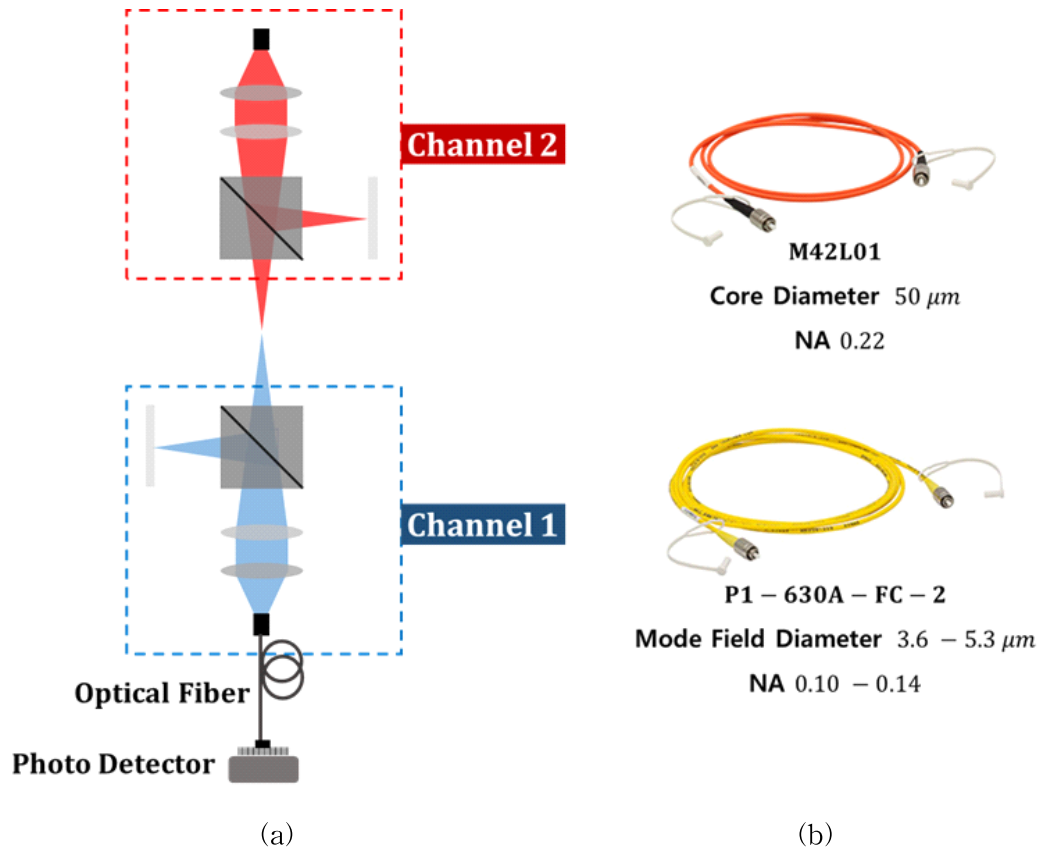
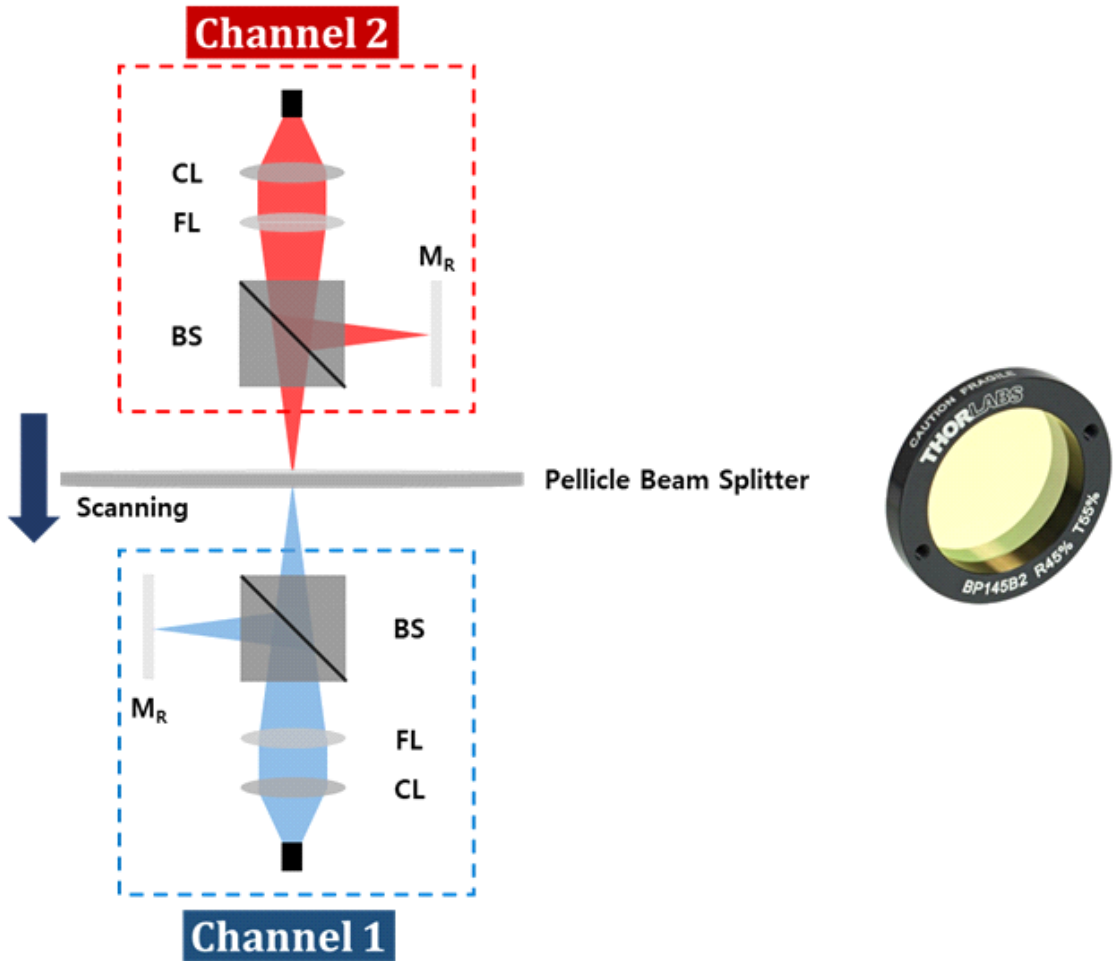


그림 3-5. (a) 시스템 측정점 매칭 실험 구성과 (b) 사용된 Thorlabs 사의 단일 모드 광섬유와 다중 모드 광섬유



## 2. 초점 위치 검증 및 시스템 보정

측정점 매칭을 통한 이중 공간접계의 광학 정렬 이후, 광축 방향의 초점 위치를 검증하기 위해 펠리클 광분할기의 반사면을 측정하였다. 펠리클 광분할기는 2  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 막의 한쪽 면은 반사 코팅, 다른 한쪽 면은 무반사 코팅되어 있는 광학 부품으로, 재질 (Nitrocellulose)의 굴절률은 1.51이므로 광경로 차이가 1.02  $\mu\text{m}$  정도로 매우 작기 때문에, 이를 단일 반사면으로 가정할 수 있다. 그래서 그림 3-6(b)와 같은 펠리클 광분할기를 스테이지에 부착하고, 100 nm의 간격으로 스테이지를 구동하면서 저간섭성 주사 간섭계로 반사면의 위치를 측정하였다. 측정 결과, 각 채널에서 측정된 반사면의 위치는 그림 3-7과 같이 37.5  $\mu\text{m}$ , 128.4  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이러한 측정 결과는 본 시스템의 이상적인 상황과는 달리 두 측정 프로브의 초점 위치가 일치하지 않는 것을 의미하는 것으로 두 초점 간의 거리는 90.9  $\mu\text{m}$  차이를 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 펠리클 광분할기의 두께에 의해 발생하는 광경로 차이를 고려하면 ( $128.4 - 37.5 - 1 = 89.9$ ), 두 초점 간의 거리는 89.9  $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 이러한 실험 결과를 통해 두 측정 프로브 간의 관계를 다시 나타내면 그림 3-8과 같으며, 두 채널의 측정 프로브의 초점이 떨어져 있기 때문에, 이 측정값은 이후 시편의 측정 결과를 분석할 때, 시스템 보정값으로 사용되었다.



(a)

(b)

그림 3-6. 초점 위치 검증의 (a) 실험 구성과 (b) 사용된 Thorlabs 사의 펠리클 광분할기

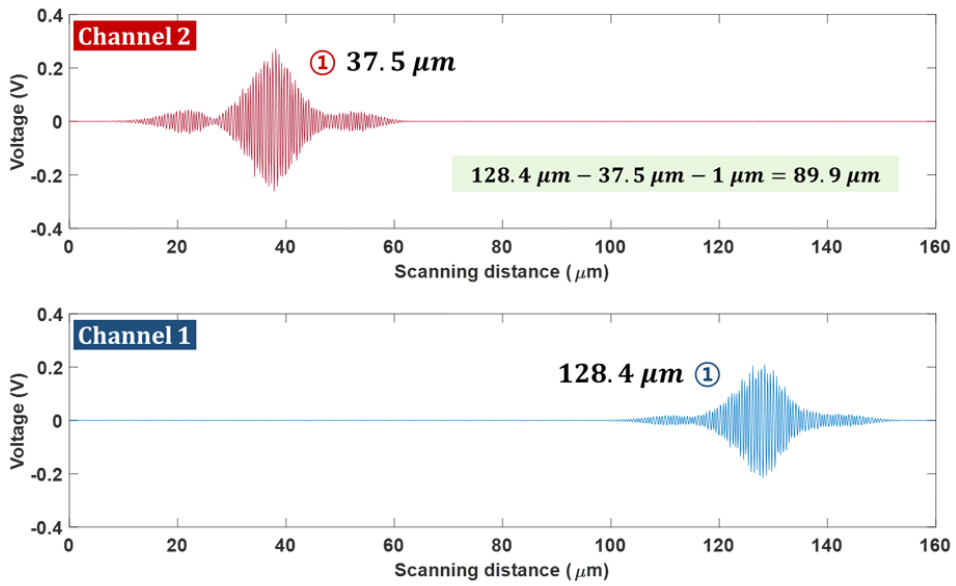


그림 3-7. 저간섭성 주사 간섭계로 측정한 펠리클 광분할기 결과

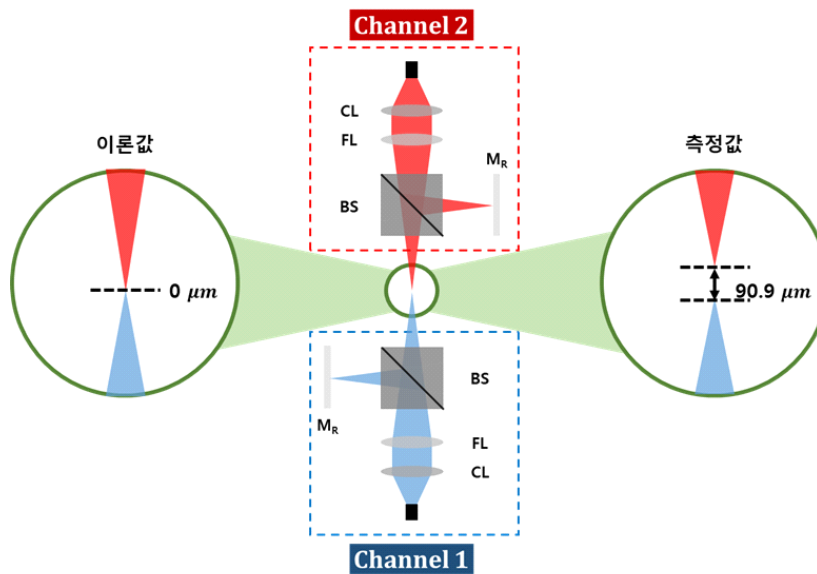


그림 3-8. 시스템의 측정점 매칭 작업 후 이론값과 측정값

## 제3절 실험 및 결과 분석

전체적인 시스템 정렬 및 보정을 수행한 후, 제안하는 이중 광간섭계 시스템을 이용하여 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 원리로 다음과 같은 다양한 시편들을 측정하였다. 또한, 결과 분석을 통해 시스템의 성능을 검증하였다.

- 투명 판 (Transparent plate)
  - 커버 글래스 (Cover glass)
  - 실리콘 웨이퍼 (Silicon wafer)
- 제작한 박막 시편 (Home-made film specimen)
  - 단층 박막 시편 (Single layered film specimen)
- 파우치형 이차전지 셀 (Pouch-type secondary battery cell)

### 1. 투명 판 측정

#### 1.1 커버 글래스

본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템을 이용해서 커버 글래스의 광학적, 물리적 두께 및 균굴결함을 측정하였다. 사용한 시편은 DURAN GROUP 사의 제품으로 그림 3-9(a)와 같은 150  $\mu\text{m}$ 의 두께의 Borosilicate glass 커버 글래스로 시편을 스테이지에 부착한 이후 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계로 실험을 수행하였다. 그림 3-9(b)는 예상되는 광경로이다. 측정 결과, 그림 3-10과 같이 저간섭성 주사 간섭계에서 각 채널 별로 커버 글래스의 양면에서 반사된 광들의 간섭 신호를 획득할 수 있었으며, 분산 간섭계에서는 그림 3-11과 같이 간섭 신호의 푸리에 변환된 신호를 확인하였다. 그림 3-10을 살펴보면, 채널 1의 광학적 두께 ( $465.4 - 239.5 = 225.9$ )는 225.9  $\mu\text{m}$ 이며 채널 2의 광학적 두께 ( $297.5 - 72 = 225.5$ )는 225.5  $\mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 또한,

그림 3-9(b)에서 알 수 있듯이, 각 채널에서 측정된 ①번 간섭 신호들의 위치로부터 커버 글래스의 물리적 두께를 측정하였다. 이때, 이론적으로는 채널 1과 채널 2의 ①번 간섭 신호들의 위치 차이가 커버 글래스의 물리적 두께이지만, 두 측정 프로브 간의 초점 간 거리로 인하여 커버 글래스의 물리적 두께 ( $297.5 - 239.5 + 89.9 = 147.9$ )는  $147.9 \mu\text{m}$ 로 결정되는 것을 확인하였다. 그리고 커버 글래스의 광학적 두께와 물리적 두께로부터 커버 글래스의 굴절률은  $1.526$ 으로 계산되었다. 이는 Borosilicate glass의  $1050 \text{ nm}$ 의 파장에서의 굴절률인  $1.521$ 과 매우 근사함을 확인하였다. 또한, 분산 간섭계에서 측정된 신호를 분석한 결과, 그림 3-11과 같이 각 채널별 신호 간의 측정 결과로부터 채널 1의 커버 글래스의 광학적 두께 ( $361.39 - 223.14 = 223.14$ )는  $223.14 \mu\text{m}$ 이며, 채널 2의 광학적 두께 ( $285.7 - 62.53 = 223.17$ )는  $223.17 \mu\text{m}$ 로 측정됨을 확인하였다. 그리고 커버 글래스의 물리적 두께 ( $259.1 - 62.53 - 138.25 + 89.9 = 148.22$ )는  $148.22 \mu\text{m}$ 이기 때문에 굴절률은  $1.505$ 로 측정되었다. 두 측정 방식에서 커버 글래스의 측정 결과들이 거의 같음을 확인하였다.

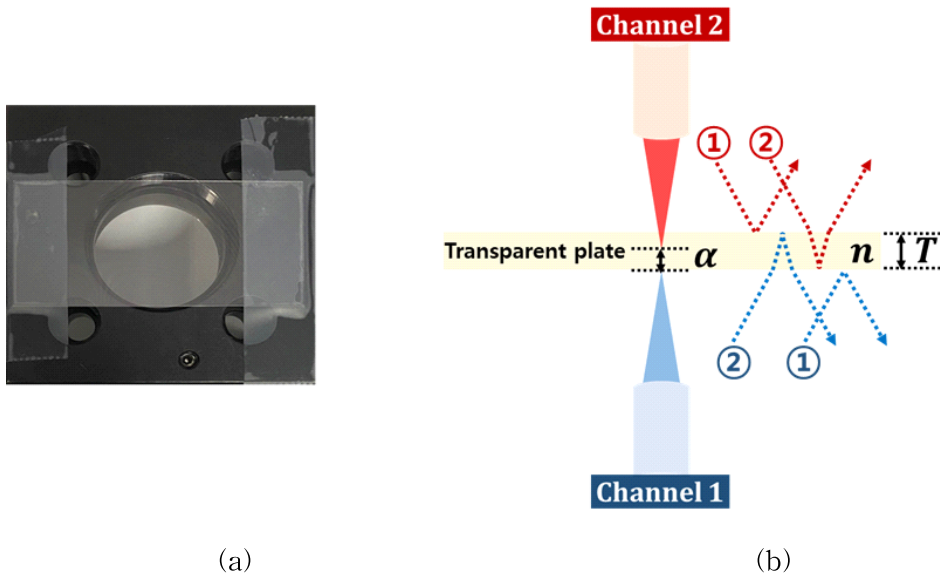


그림 3-9. 측정된 (a) 커버 글래스와 (b) 시편에 대한 예상 광경로

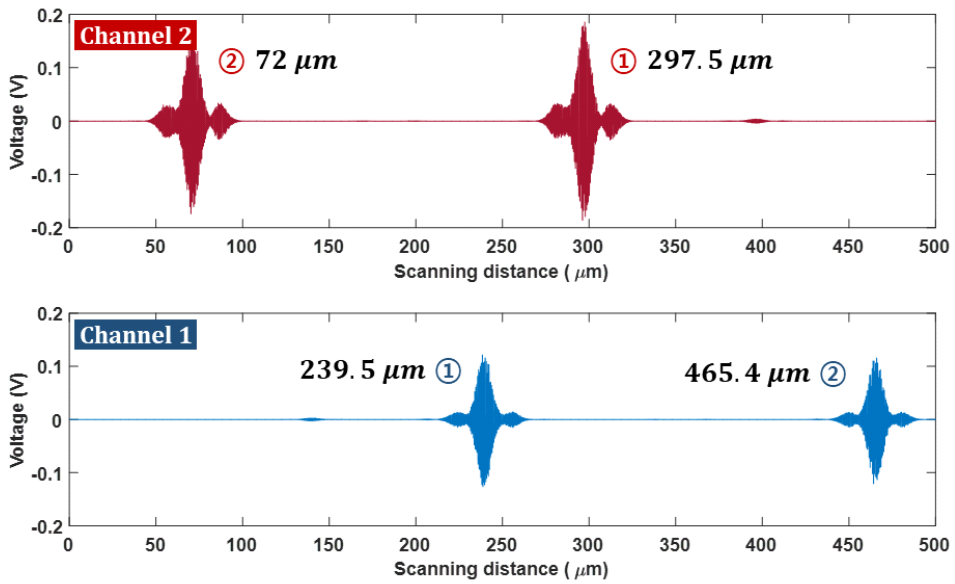


그림 3-10. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 커버 글래스 결과

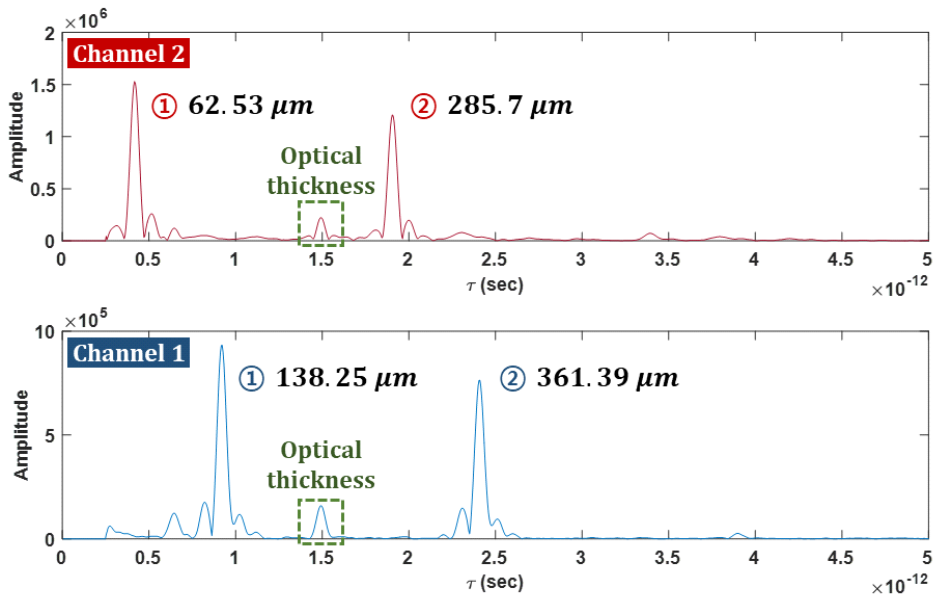
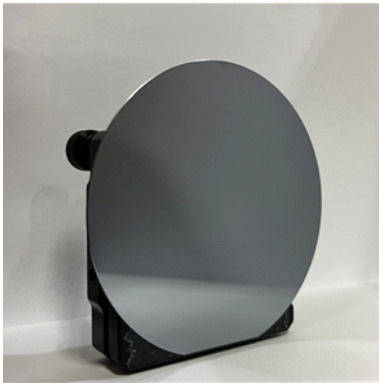


그림 3-11. 분산 간섭계로 측정된 커버 글래스 결과

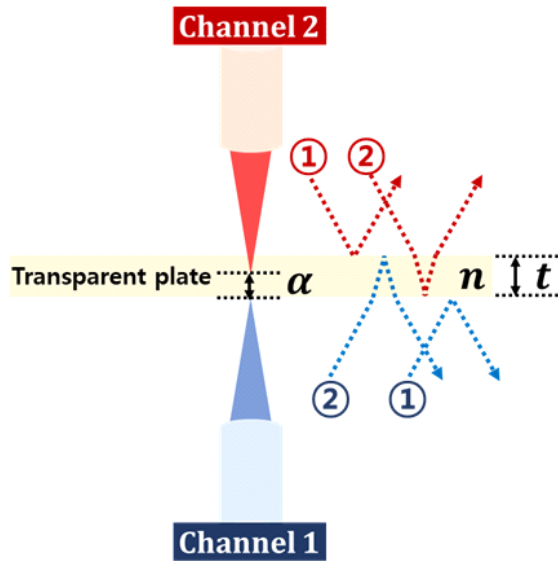
## 1.2 실리콘 웨이퍼

두 번째로 이중 공간접계 시스템을 이용해서 실리콘 웨이퍼의 광학적, 물리적 두께 및 균굴절률을 측정하였다. 실리콘 웨이퍼는 가시광 대역의 광은 투과하지 못하지만, 본 연구에서 사용하는 1050 nm 대역의 근적외선 광은 투과할 수 있는 특징이 있다. 그래서 실리콘 웨이퍼도 제안하는 시스템에서는 투명 판 중의 하나임을 알 수 있다. 측정한 실리콘 웨이퍼는 그림 3-12(a)와 같은 SILICON TECHNOLOGY CORPORATION 사의 제품으로  $475 \pm 25 \mu\text{m}$ 의 두께를 가지고 있다. 커버 글래스와 동일한 방식으로 실험을 수행하였으며, 광경로는 그림 3-12(b)와 같다. 실험 결과 그림 3-13과 같이 저간섭성 주사 간섭계에서 각 채널별 2개의 간섭 신호들을 획득하였으며, 분산 간섭계에서도 그림 3-14와 같이 커버 글래스의 결과와 유사한 간섭 신호들을 획득하였다. 이때, 저간섭성 주사 간섭계에서는 각 채널 별로 실리콘 웨이퍼의 광학적 두께가 1.853 mm, 1.838 mm임을 확인하였으며, 물리적 두께 ( $2495 - 2100 + 89.9 = 484.9$ )는  $484.9 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 이를 토대로 균굴절률은 3.805였다. 참고로 실리콘의 1050 nm의 파장에서의 균굴절률은 3.874로 측정된 균굴절률과 거의 같음을 확인하였다.

한편, 분산 간섭계에서도 실리콘 웨이퍼의 광학적 두께를 각 채널 별로 각각 1.844 mm, 1.832 mm를 측정하였으며, 물리적 두께 ( $585.4 - 98.06 - 115.96 + 89.9 = 461.28$ )는  $461.28 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 그리고 그 결과 실리콘 웨이퍼의 균굴절률은 3.984로 확인되었다. 두 측정 방식에서 실리콘 웨이퍼의 측정 결과들이 거의 같음을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 3-12. 측정한 (a) 실리콘 웨이퍼와 (b) 시편에 대한 예상 광경로



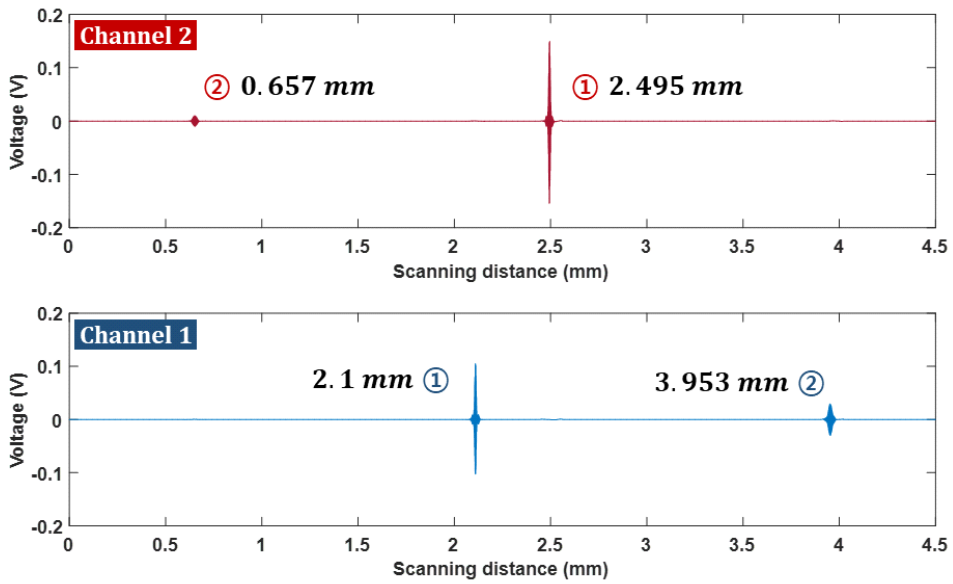


그림 3-13. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 실리콘 웨이퍼 결과

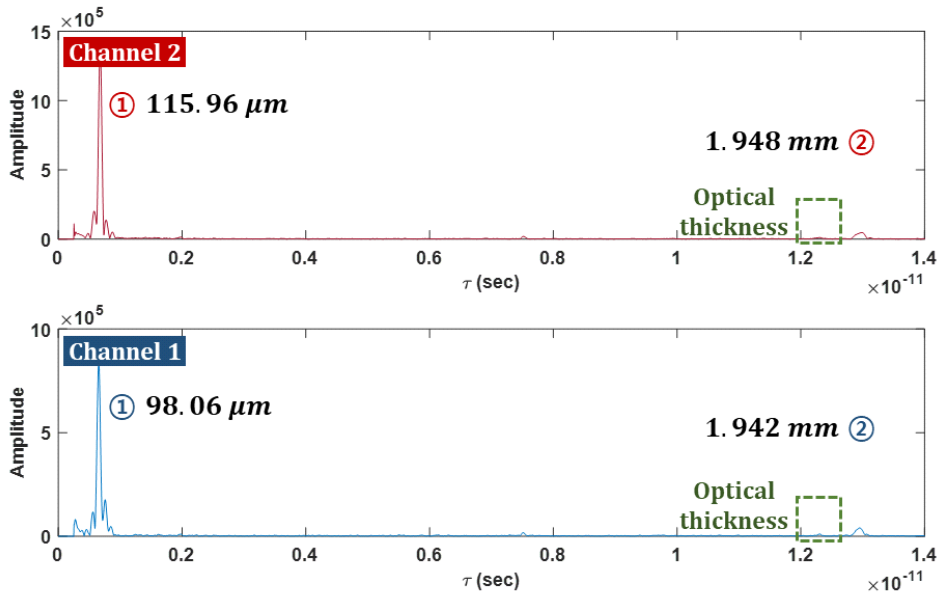


그림 3-14. 분산 간섭계로 측정된 실리콘 웨이퍼 결과

## 2. 제작한 박막 시편 측정

### 2.1 기저판 및 코팅 재료 측정

투명 판에 대한 실험을 통해 본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템의 기본적인 성능은 검증하였으며, 이를 토대로 박막 시편에 대한 구조 분석 실험을 수행하였다. 실제 산업계에 적용되는 파우치형 이차전지 셀을 측정하기에 앞서, 이와 비슷한 구조를 가지는 박막 시편을 직접 제작하여 실험을 진행하였으며, 실험 결과와 제작시 결정된 박막 시편의 설계값을 통해 제안하는 시스템의 박막 측정 성능 분석을 수행하였다. 제작 시편은 알루미늄 PET 증착 필름 2종을 기저판 (Substrate)으로 이용하였으며, 일반적인 라미네이팅 파우치 필름을 박막으로 가정하여 코팅면을 생성하였다.

#### 2.1.1 알루미늄 PET 증착 필름 두께 측정

기저판으로 사용된 알루미늄 PET 증착 필름은 코오롱인더스트리 사에서 제작되었으며, 두께가 서로 다른 2개의 필름 (①100  $\mu\text{m}$ , ②125  $\mu\text{m}$ )을 이용하였다. 기저판의 두께를 측정하기 위해 라미네이팅 파우치 필름을 코팅하기 전에 커버 글래스와 동일한 방식으로 실험을 수행하였으며, 두께 100  $\mu\text{m}$  필름의 저간섭성 주사 간섭계의 측정 결과는 그림 3-15와 같다. 채널 2에서는 시편의 윗면에 해당하는 1개의 간섭 신호를 획득하였으며, 채널 1에서는 시편의 아랫면에 해당하는 2개의 간섭 신호가 측정되는 것을 확인하였다. 이렇고 이러한 측정 결과는 그림 3-16과 같이 분산 간섭계의 측정 결과와 일치하였다. 이를 통해 그림 3-15와 같이 알루미늄 PET 증착 필름의 윗면에는 반사율이 높은 알루미늄층과 밑면에는 PET 소재의 박막으로 구성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 저간섭성 주사 간섭계를 통해 알루미늄 PET 증착 필름의 전체 물리적 두께 ( $118.2 - 118 + 89.9 = 90.1$ )는 90.1  $\mu\text{m}$ 였으며, 분산 간섭계에서 ( $250 - 203.85 - 48.288 + 89.9 = 87.76$ )는 87.76  $\mu\text{m}$  였다.

마찬가지로, 두께 125  $\mu\text{m}$  필름에 대해서도 동일한 실험을 수행하였으며, 필름의 물리적 두께는 그림 3-18과 같이 저간섭성 주사 간섭계에서 114  $\mu\text{m}$ , 그림 3-19와 같이 분산 간섭계에서 113  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이를 통해, 두 필름의 물리적 두께차이는 대략 25  $\mu\text{m}$ 만큼 차이가 나는 것을 확인하였다.

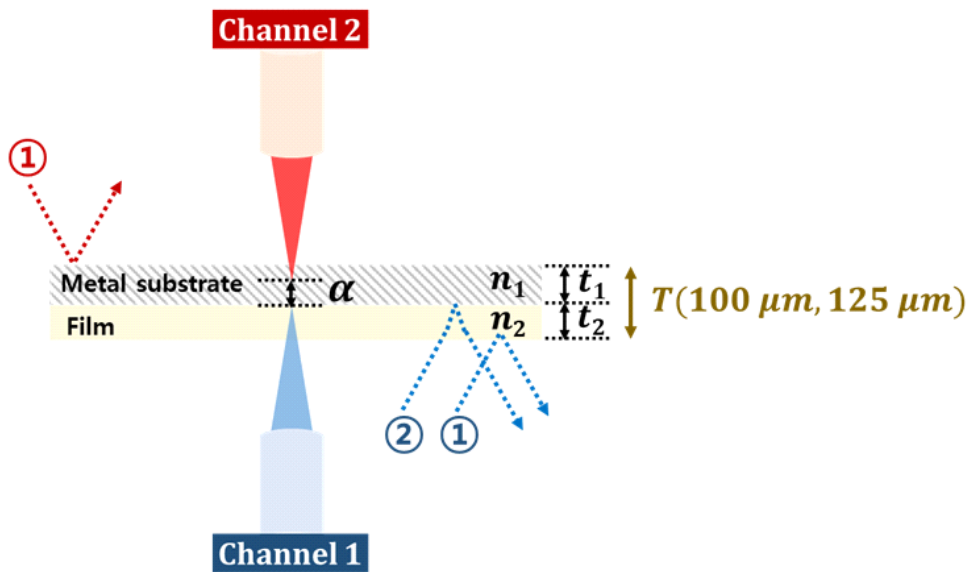


그림 3-15. 알루미늄 PET 증착 필름 모식도 및 예상 광경로

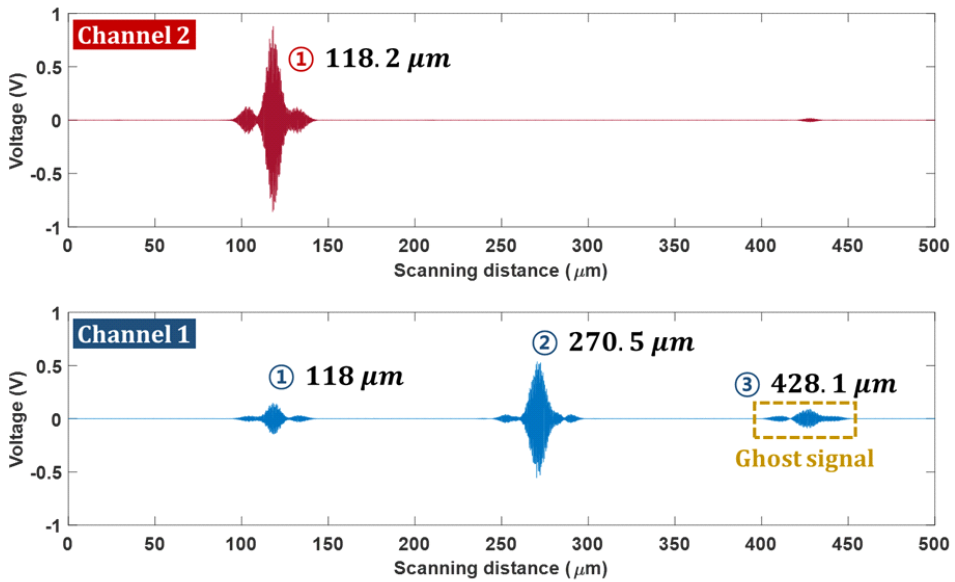


그림 3-16. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 알루미늄 PET 증착 필름 ① 측정 결과

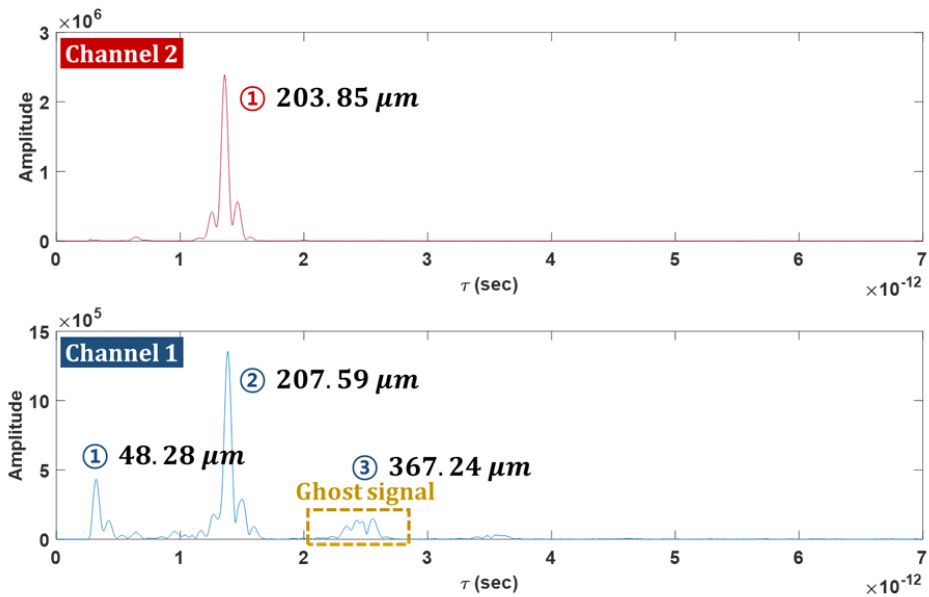


그림 3-17. 분산 간섭계로 측정된 알루미늄 PET 증착 필름 ① 측정 결과

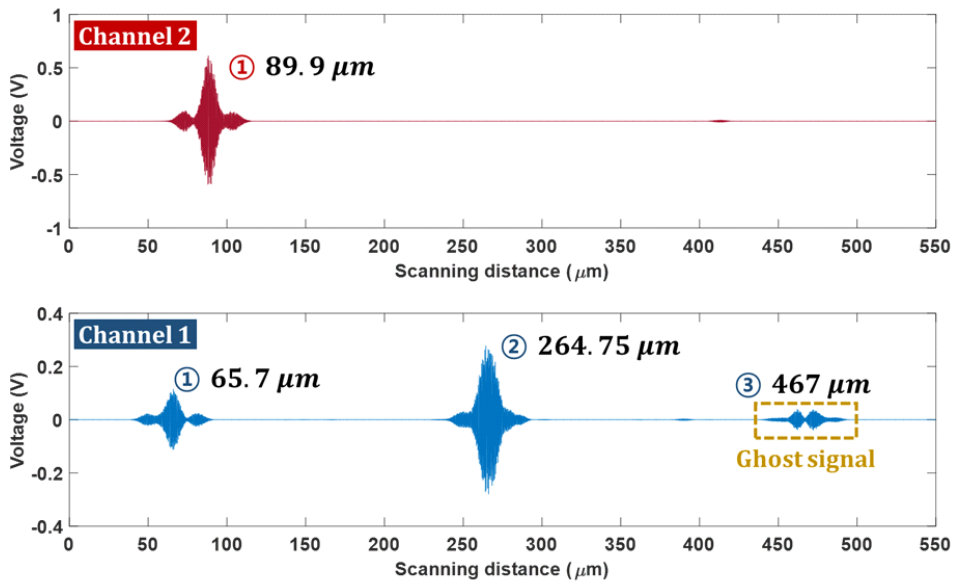


그림 3-18. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 알루미늄 PET 증착 필름 ② 측정 결과

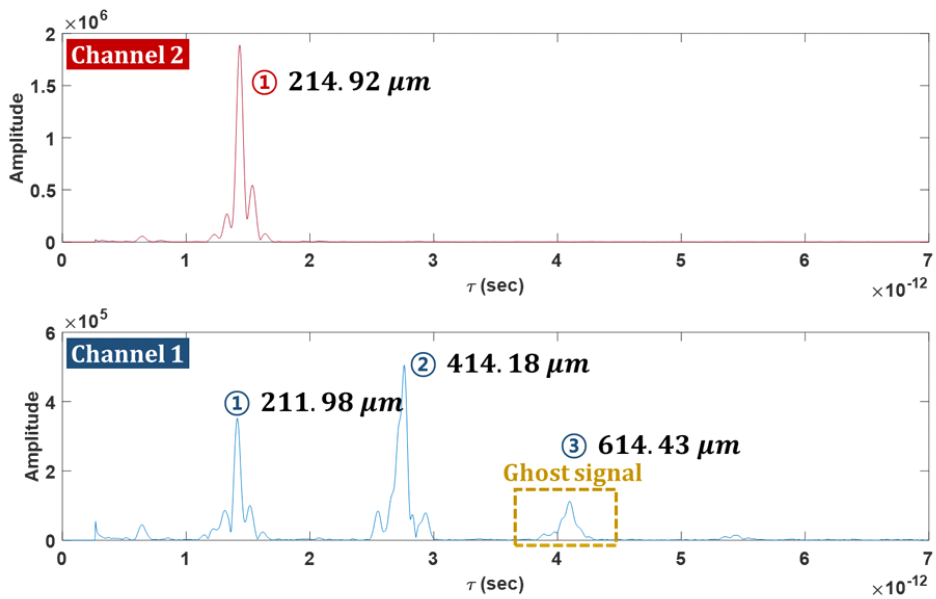


그림 3-19. 분산 간섭계로 측정된 알루미늄 PET 증착 필름 ② 측정 결과

### 2.1.2 라미네이팅 파우치 필름 두께 측정

박막으로 사용된 라미네이팅 파우치 필름은 일반적인 사무기기용으로 제조된 라미네이팅 파우치 필름 (A4코팅필름, 현대오피스)을 이용하였다. 박막 시편을 제작하기에 앞서, 박막의 두께를 측정하기 위해 라미네이팅 파우치 필름 자체만으로 코팅하여 그림 3-20(a)와 같이 커버 글래스와 유사하게 투명 판을 만들었으며, 실험을 통해 광학적 두께 및 물리적 두께를 측정하였다. 실험 결과, 그림 3-21 및 그림 3-22와 같이 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 신호를 획득하였다. 각 채널 별로 측정된 라미네이팅 파우치 필름의 광학적 두께는 각각  $304.85 \mu\text{m}$ ,  $304.1 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 또한, 라미네이팅 파우치 필름의 물리적 두께 ( $411.8 - 314 + 89.9 = 187.7$ )는  $187.7 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 따라서 라미네이팅 파우치 필름의 광학적 두께와 물리적 두께로부터 라미네이팅 파우치 필름의 균굴절률은 1.526으로 계산되었다. 라미네이팅 파우치 필름의 재질인 PET (PolyEthylene Terephthalate)의 1050 nm의 파장에서의 균굴절률은 1.548로, 본 실험에서 측정된 결과와 매우 근사함을 확인하였다.

한편, 분산 간섭계에서 측정된 신호를 분석한 결과, 그림 3-22와 같이 각 채널별 신호 간의 측정 결과로부터 라미네이팅 파우치 필름의 광학적 두께가 각각  $302.15 \mu\text{m}$ ,  $313.84 \mu\text{m}$ 로 측정됨을 확인하였으며, 물리적 두께 ( $300 - 85.561 - 117.44 + 89.9 = 186.89$ )는  $186.89 \mu\text{m}$ 이기 때문에 균굴절률은 1.648로 측정되었다. 두 측정 방식에서 라미네이팅 파우치 필름의 측정 결과들이 거의 같음을 확인하였다.

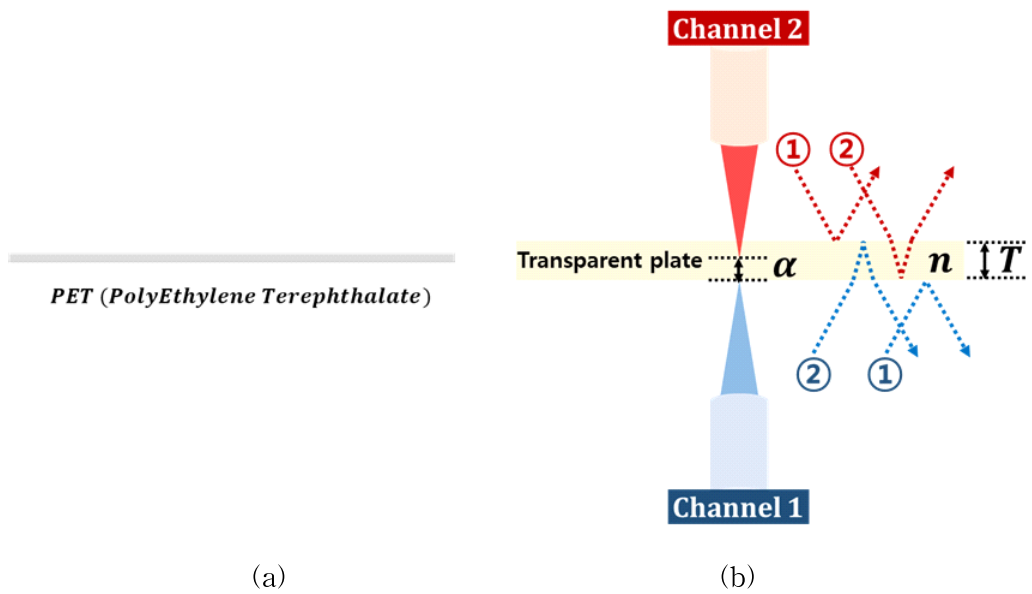


그림 3-20. (a) 라미네이팅 파우치 필름 모식도와 (b) 시편에 대한 예상 광경로

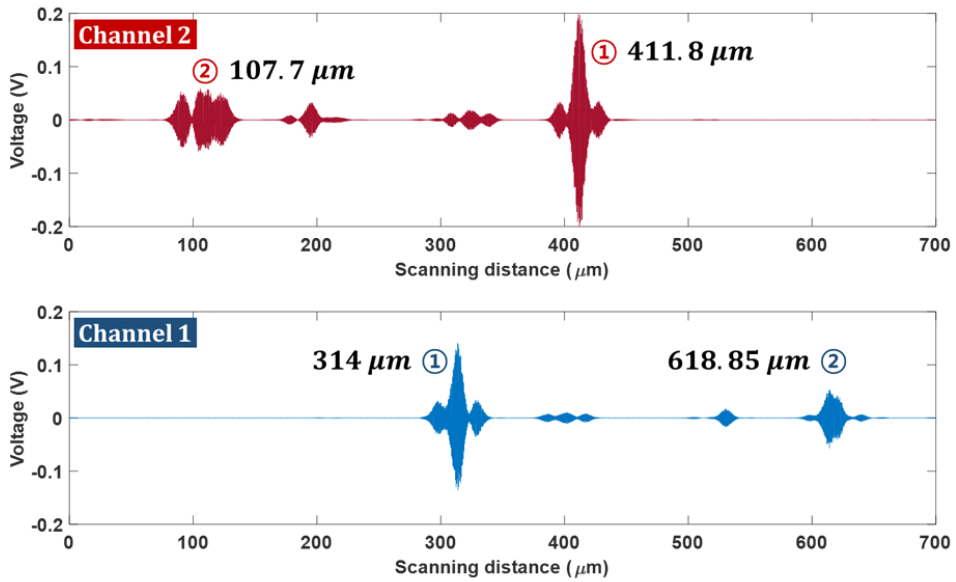


그림 3-21. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 라미네이팅 파우치 필름 측정 결과

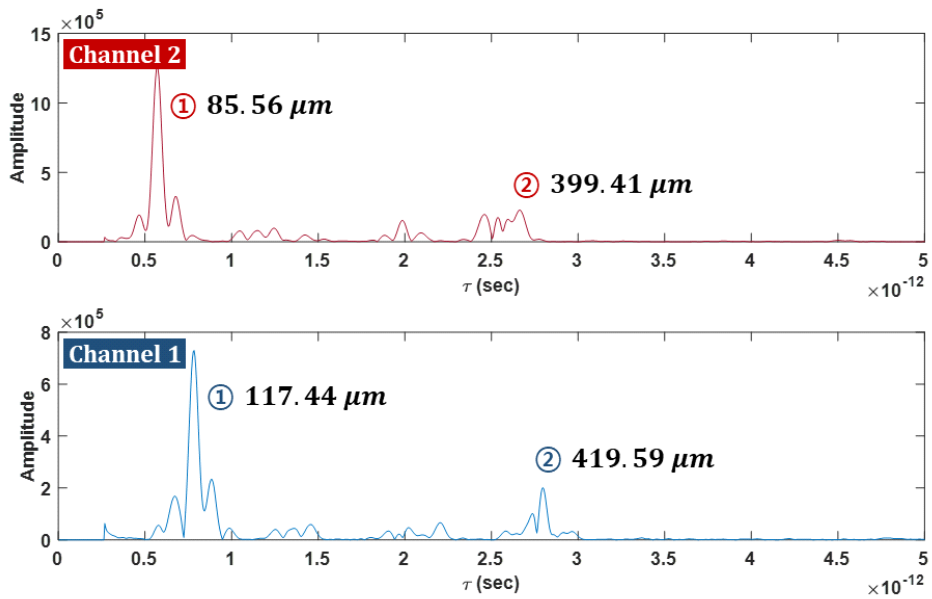


그림 3-22. 분산 간섭계로 측정된 라미네이팅 파우치 필름 측정 결과



## 2.2 단층 박막 시편

금속층을 포함한 박막의 구조 분석 가능성을 확인하기 위해, 본 논문에서는 두께가 서로 다른 2개의 알루미늄 PET 증착 필름 (①100  $\mu\text{m}$ , ②125  $\mu\text{m}$ )에 라미네이팅 파우치 필름을 양면으로 코팅하여 그림 3-23과 같은 단층 박막 시편을 제작하였다. 이후, 이중 광간섭계 시스템으로 단층 박막의 구조를 분석하였다. 먼저, 100  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 알루미늄 PET 증착 필름의 박막 시편의 경우에는 그림 3-24와 같이 저간섭성 간섭 신호를 확인하였으며, 그림 3-25와 같은 분산 간섭계의 푸리에 변환 결과를 획득하였다. 이때, 그림 3-23에서 알 수 있듯이, 각 채널에서 측정된 ①번 간섭 신호들의 위치로부터 단층 박막 시편의 전체 물리적 두께를 측정하였으며, 박막 시편의 윗면 박막의 광학적 두께는 채널 2의 측정 프로브의 신호들로부터, 박막 시편의 아랫면 박막의 광학적 두께는 채널 1의 측정 프로브의 신호들로부터 계산하였다. 그 결과, 저간섭성 주사 간섭계에서는 박막 시편의 전체 물리적 두께 ( $266 - 69.8 + 89.9 = 286.1$ )가 286.1  $\mu\text{m}$ 로 계산되었으며, 박막의 광학적 두께는 각각 312  $\mu\text{m}$ 와 150  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 한편, 분산 간섭계에서는 박막 시편의 전체 물리적 두께는 저간섭성 주사 간섭계의 결과와 유사하게 ( $600 - 337.68 - 67.63 + 89.9 = 284.59$ ) 284.59  $\mu\text{m}$ 로 계산되었으며, 박막의 광학적 두께 역시 각각 314.86  $\mu\text{m}$ 와 151.1  $\mu\text{m}$ 로 측정되어 저간섭성 주사 간섭계의 결과와 매우 유사함을 확인하였다.

125  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 알루미늄 PET 증착 필름의 박막 시편의 경우에도, 마찬가지로 그림 3-26과 그림 3-27과 같이 저간섭성 주사 간섭 신호와 분산 간섭계의 푸리에 변환 결과를 획득하였으며, 측정 결과 전체 시편의 물리적 두께는 320.5  $\mu\text{m}$  (저간섭성 주사 간섭계)와 307.84  $\mu\text{m}$  (분산 간섭계)로 계산되었다. 또한, 박막의 광학적 두께 역시, 윗면의 경우 155.9  $\mu\text{m}$  (저간섭성 주사 간섭계)와 148.73  $\mu\text{m}$  (분산 간섭계)로, 아랫면의 경우 417.5  $\mu\text{m}$  (저간섭성 주사 간섭계)와 352.52  $\mu\text{m}$  (분산 간섭계)로 측정되었다.

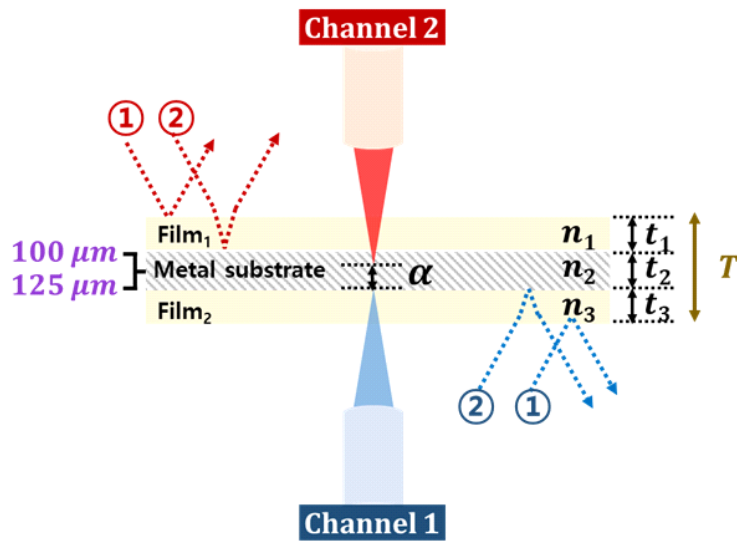


그림 3-23. 단층 박막 모식도 및 예상 광경로

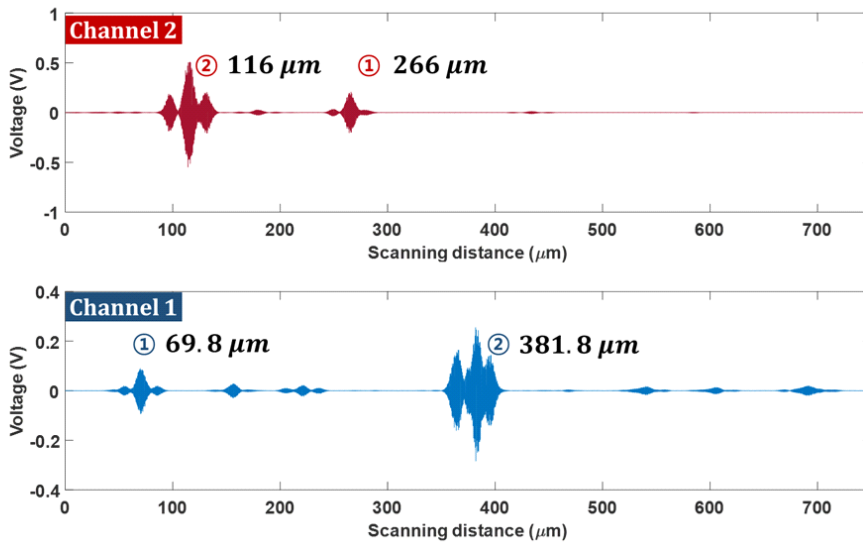


그림 3-24. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 단층 박막 ① 측정 결과

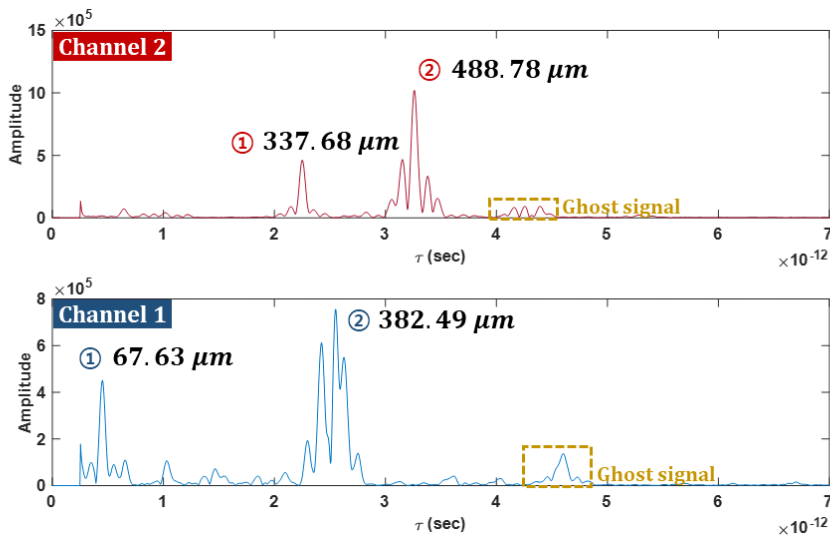


그림 3-25. 분산 간섭계로 측정된 단층 박막 ① 측정 결과

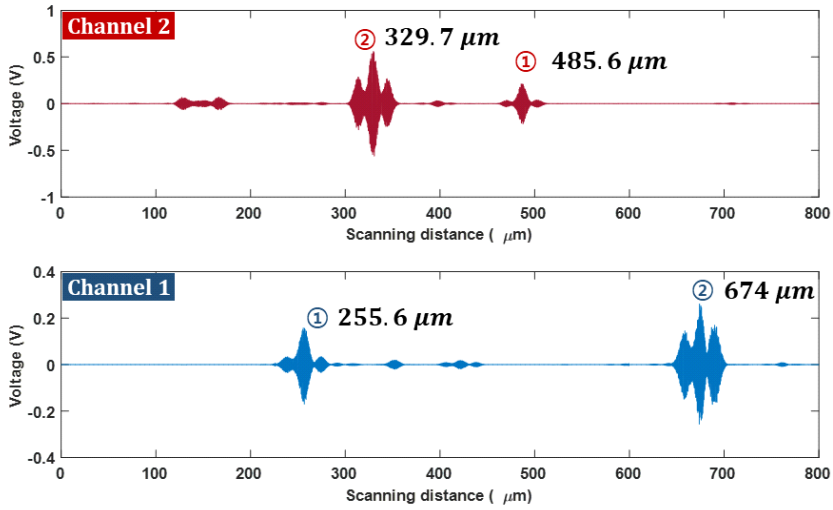


그림 3-26. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 단층 박막 ② 측정 결과

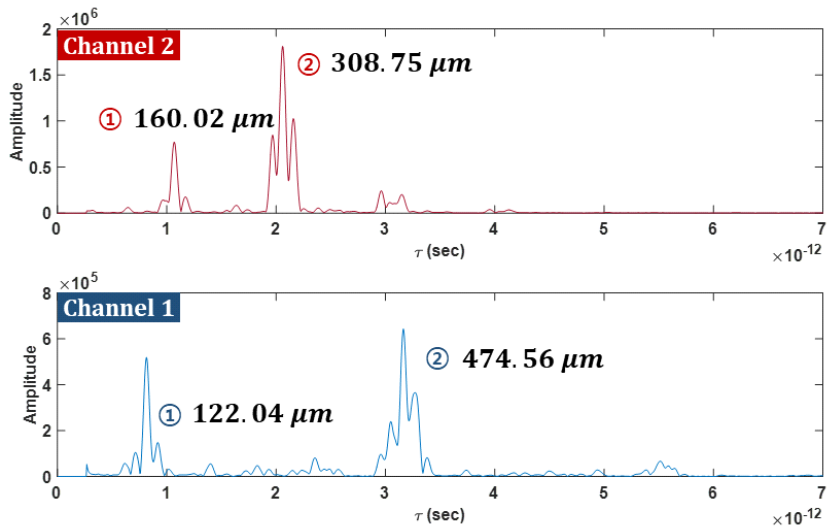


그림 3-27. 분산 간섭계로 측정된 단층 박막 ② 측정 결과

### 3. 파우치형 이차전지 셀 측정

제작한 박막 시편에 대한 실험을 통해 금속층을 포함한 박막의 구조 분석이 가능함을 확인하였으며, 이를 토대로 그림 3-28과 같은 실제 산업계에서 사용되고 있는 파우치형 이차전지 셀에 대한 구조 분석 실험을 수행하였다. 그림 3-28(a)에서 알 수 있듯이, 실험에 이용한 파우치형 이차전지 셀은 금속 기저층의 양면에 다층 박막이 도포되어 있으며, 박막은 유전층으로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계를 이용하여 단층 박막 시편의 측정과 동일한 방법으로 파우치형 이차전지 셀을 측정하였고, 그 결과 그림 3-29 및 그림 3-30과 같이 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 신호를 획득하였다. 그림 3-29를 살펴보면, 채널 1의 측정 프로브에서는 이차전지 셀의 윗면의 박막 구조에 해당하는 간섭 신호가 검출되었고, 채널 2에서는 아랫면의 박막 구조에 대한 간섭 신호가 획득되었다. 이를 통해, 이차전지 셀 양면의 박막들에 대한 광학적 두께를 측정할 수 있었으며, 그 결과 각각  $53.3 \mu\text{m}$ ,  $113.5 \mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 또한, 그림 3-28(b)에서 알 수 있듯이, 각 채널에서 측정한 ①번 간섭 신호들의 위치들로부터 이차전지 셀의 물리적 두께를 측정하였으며, 이차전지 셀의 물리적 두께 ( $384.7 - 323.7 + 89.9 = 150.9$ )는  $150.9 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 이는 이차전지 셀의 설계값인  $150 \mu\text{m}$ 와 비교했을 때, 매우 근사함을 알 수 있다. 한편, 분산 간섭계에서 측정된 신호를 분석한 결과, 금속층의 아랫면과 윗면에 해당하는 광학적 두께가 각각  $50.64 \mu\text{m}$ ,  $117.45 \mu\text{m}$ 로 측정됨을 확인하였으며, 물리적 두께 ( $850 - 461.95 - 328.79 + 89.9 = 149.16$ )는  $149.16 \mu\text{m}$ 로 계산되었다.

그러나 그림 3-28(a)를 보면 파우치형 이차전지 셀은 여러 층의 박막으로 이루어져 있어, 다층 박막에 의한 간섭 신호들이 측정되어야 하지만, 이들 박막들의 굴절률이 서로 비슷하여 각 박막들의 경계면에서 반사광이 검출되지 않았다. 이로 인해, 측정 결과에서는 파우치형 이차전지 셀의 양면 박막은 단층 박막으로 해석되었다. 이때, 측정된 단층 박막의 광학적 두께는 이차전지 셀의 박막들의 설계값과 굴절률을 고려할 때, 전체 박막의 광학적 두께와 동일함을 알 수 있다. 그리고 박막의 굴절률을 1.5로 가정하면, 금속 기저층의 두께는  $37.1 \mu\text{m}$ 로 계산되어, 설계값에 매우 근접함을 알 수 있다.

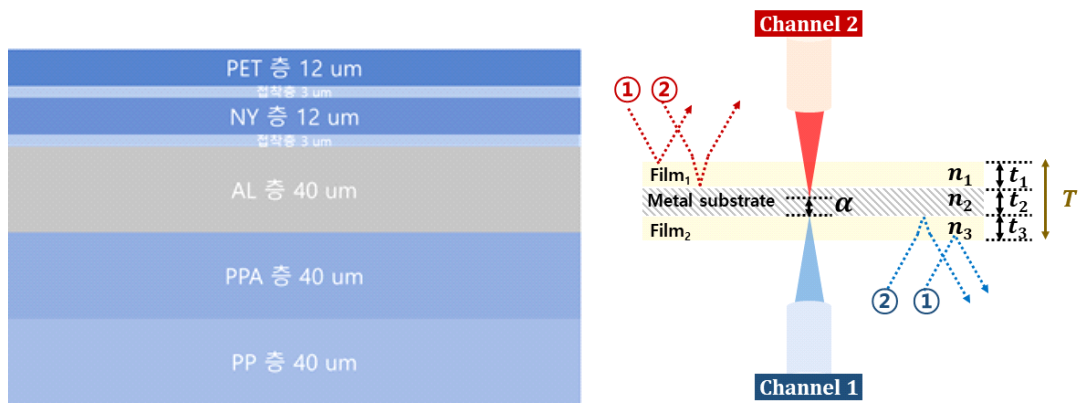


그림 3-28. 파우치형 이차전지 셀의 (a) 모식도와 (b) 예상 광경로

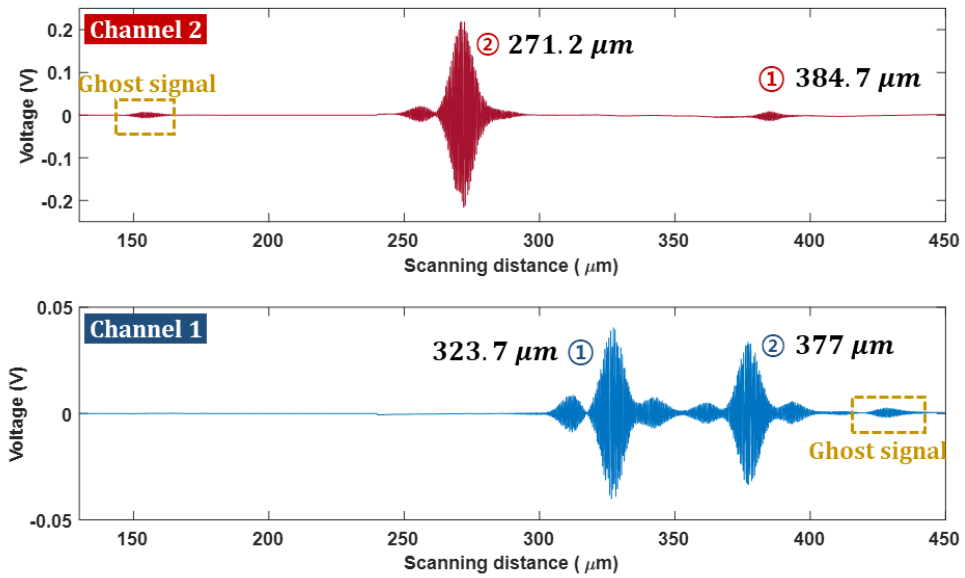


그림 3-29. 저간섭성 주사 간섭계로 측정된 파워치형 이차전지 셀 측정 결과

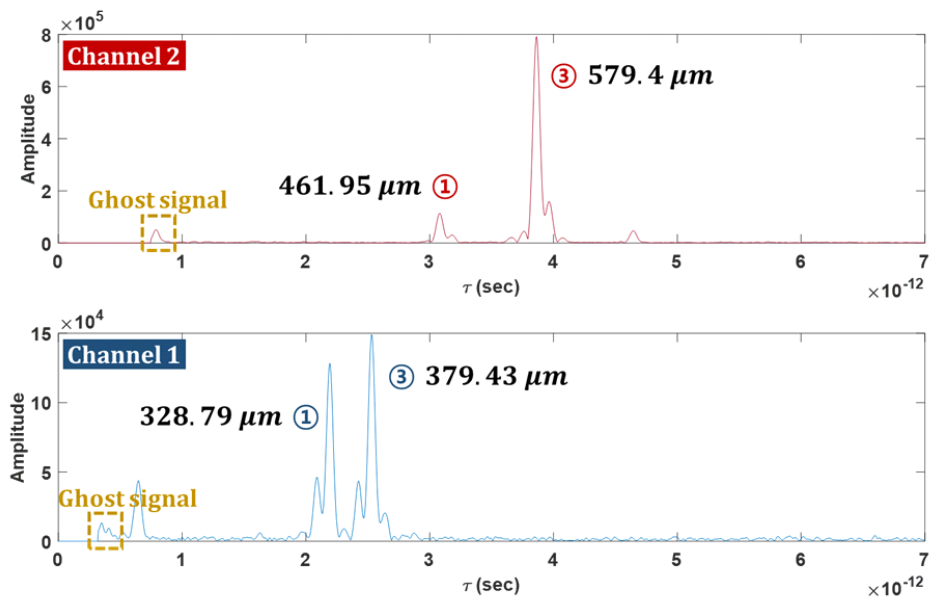


그림 3-30. 분산 간섭계로 측정된 파워치형 이차전지 셀 측정 결과

## 제4장 고찰 및 논의

본 논문에서는 박막 구조 분석을 위한 이중 광간섭계를 제안하고, 이를 이론 및 실험적으로 검증하였다. 그러나 제안하는 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 다음과 같은 내용들이 고려되어야 한다.

- 저간섭성 주사 간섭계의 측정 속도 및 구동 오차
- 두 채널 분산 간섭계의 두께 측정 오차
- 비정상적 간섭 신호
- 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 측정 결과 차이

### 1. 저간섭성 주사 간섭계의 측정 속도 및 구동 오차

제안하는 이중 광간섭계 시스템에서는 저간섭성 주사 간섭계의 원리를 이용하여 박막의 구조물을 분석한다. 그러나 저간섭성 주사 간섭계는 원리적으로 기계적 구동부를 이용하여 간섭 신호를 획득하기 때문에 측정 시간이 오래 걸린다는 한계가 있다. 특히, 저간섭성 주사 간섭계는 Nyquist 샘플링 이론에 따라, 사용하는 광원의 파장의 1/4 이하의 간격으로 광강도를 측정해야 간섭 신호를 복원할 수 있다. 본 연구에서 사용한 광원은 중심파장 1050 nm의 중심 파장에서 50 nm의 파장 대역을 가지는 근적외선 광원으로, 간섭 신호를 안정적으로 획득하기 위해서는 260 nm 이하의 간격으로 광강도를 획득하여야 한다. 실험에서는 이보다 작은 100 nm 간격으로 스테이지를 구동하였으며, 100  $\mu\text{m}$ 의 측정 영역을 확보하기 위해 1000개의 데이터를 획득하였다. 이로 인해 각 시편의 측정에 있어 30분 이상의 소요 시간이 걸리는 문제가 발생하였으며, 측정 시간이 길어진 만큼, 외부 환경 변화에 따른 오차가 발생하였다. 또한, 스테이지의 구동 정밀도에 의해 저간섭성 주사 간섭계의 정밀도가 결정되는 한계가 있다.

이러한 문제점들을 개선하기 위해서는 저간섭성 주사 간섭계의 측정 속도를 높이기 위한 서브 샘플링 기법을 적용할 수 있으며, 피드-백 (Feed-back) 제어를 통한 스테이



지 오차 보정 방법을 이용하여 저간섭성 주사 간섭계의 성능을 개선할 수 있다.

## 2. 두 채널 분산 간섭계의 두께 측정 오차

분산 간섭계는 사용하는 광원의 대역폭과 분광기의 주파수 분해능에 따라 측정할 수 있는 최소 측정 영역과 최대 측정 영역이 결정된다. 그래서 본 연구에서의 분산 간섭계는 이론적으로  $6 \mu\text{m} (L_{\min}) - 6.7 \text{ mm} (L_{\max})$ 의 측정 영역에서 시편 및 박막의 두께를 측정할 수 있다. 그래서 측정 시편의 높이 및 박막의 두께가 분산 간섭계의 측정 영역을 벗어나는 경우, 간섭 신호의 획득이 불가능하다. 특히, 분산 간섭계의 기준 거울과 시편 사이의 광경로차가 최소 측정 영역보다 작은 경우, 측정이 정상적으로 이루어지지 않았다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 각 채널에서의 분산 간섭계 측정을 서로 다른 위치에서 수행하고, 이때의 광축 방향 이동량을 고려하여 시편의 구조를 분석하였다. 그러나 이 과정에서 시편이 스테이지를 이용하여 광축 방향으로 이동하기 때문에, 스테이지의 구동 정밀도가 측정 결과에 영향을 주어 오차가 발생할 수 있다.

이러한 스테이지 구동에 의한 오차를 제거하기 위해서는 동일한 위치에서 두 채널의 측정이 수행되어야 하며, 이는 두 측정 프로브들의 초점 거리 차이를 최소화하여 구현할 수 있다.

## 3. 비정상적 간섭 신호

저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 측정 결과들을 살펴보면, 측정 시편의 구조와는 상관없는 간섭 신호들이 측정되고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 본 연구에서 제작한 박막 시편의 저간섭성 주사 간섭계의 측정 결과를 살펴보면, 그림 4-1과 같이 다양한 종류의 원하지 않는 간섭 신호들이 발생하였다. 이러한 간섭 신호들이 발생하는 원인은 시스템 내부에서 발생하는 반사광, 광원의 불균일한 주파수 분포, 박막 구조에 의한 다중 반사광 등 다양하며, 이러한 간섭 신호들은 이중 광간섭계의 측정에서 장애 요인으로 발생한다. 특히, 원인 미상의 신호가 발생하는 경우, 이를 박막 구조에 의한

신호로 오인할 수 있기 때문에 이러한 원인 미상의 간섭 신호들은 최소화되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 광원의 주파수 분포를 비교적 균일한 광원을 사용하여 간섭 신호의 사이드 신호를 제거해야 한다. 또한, 광섬유 부품에 의한 미세 반사광들을 최소화하기 위해 광섬유 용착을 통한 시스템 제작이 필수적이다.

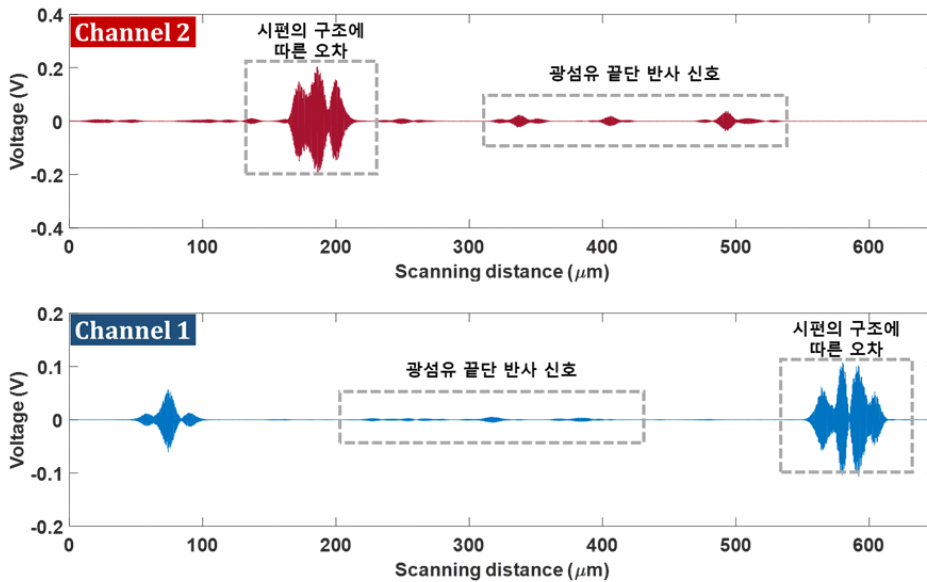


그림 4-1. 저간섭성 주사 간섭계로 획득한 원인 미상 신호

#### 4. 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 측정 결과 차이

제안하는 이중 광간섭계 시스템을 검증하기 위해, 각 시편마다 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계 원리를 이용하여 구조를 분석하였다. 그러나 두 원리에 의한 측정 결과들을 비교해보면, 상당한 측정 결과 차이가 발생함을 알 수 있다. 이는 기본적으로 저간섭성 주사 간섭계의 주사를 위한 스테이지 오차에 의한 영향으로 생각된다. 이와 더불어 분산 간섭계에서도 채널별로 측정 위치가 다르며, 이러한 위치는 스테이지의

이동량으로 결정하기 때문에, 스테이지의 구동 오차가 오차 요인으로 작용한다. 그래서 두 측정 원리에 의한 측정 결과의 차이를 최소화하기 위해서는 보다 정밀한 스테이지의 사용이 필요하다. 또한, 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계는 서로 측정 원리가 다르기 때문에 이로 인한 측정 결과의 차이가 발생할 수 있으며, 이러한 차이는 시스템 보정을 통해 제거되어야 한다.

## 제5장 결론

본 논문에서는 박막 구조 분석을 위한 이중 광간섭계 시스템을 제안하고, 측정 원리를 이론적으로 확립하였다. 이후 다양한 구조의 시편 측정을 통해 제안하는 시스템의 원리를 검증하였다.

제안하는 이중 광간섭계는 금속층을 포함한 박막의 두께를 측정하기 위하여, 시편의 양면을 동시에 측정할 수 있는 이중 구조의 측정 프로브로 구성되었다. 또한, 측정 프로브는 저간섭성 간섭계의 원리를 적용하여, 저간섭성 주사 간섭계 기반의 긴 거리 측정 모드와 분산 간섭계 기반의 고속 측정 모드로 시편을 측정할 수 있도록 설계되어, 다양한 시편을 측정할 수 있도록 구성되었다. 이와 더불어, 전체 시스템은 광섬유 소자 기반으로 구성되어 시스템이 소형화되었으며, 광 셔클레이터와 광 스위치를 사용하여 단일 광원과 검출기만으로 시편의 양면을 측정할 수 있도록 제작되었다.

이중 광간섭계의 두 측정 프로브들의 측정점 매칭을 위해, 시편의 양면을 측정하는 두 프로브의 측정점들에 대한 횡방향의 광학 정렬을 진행하였으며, 다중 모드 광섬유와 단일 모드 광섬유를 통해 두 측정점이  $5\ \mu\text{m}$  이내로 일치함을 확인하였다. 또한, 두 측정 프로브의 광축 방향 초점 위치를 확인하기 위해, 두께가  $2\ \mu\text{m}$ 인 펠리클 광분할기를 이용하여 저간섭성 주사 간섭계로 측정하였으며, 측정 결과 두 측정 프로브의 초점이  $89.9\ \mu\text{m}$ 만큼 떨어져 있는 것을 확인하였고, 이 값을 이용하여 측정 결과를 보정하였다.

이중 광간섭계를 구성한 이후, 먼저 측정 시스템의 정확도를 확인하기 위해 커버 글래스와 실리콘 웨이퍼와 같은 박막이 도포되어 있지 않은 투명 판의 두께를 측정하여 제조사에서 제공한 설계 사양과 비교하였다. 그 결과, 설계값과 비교하여 1%의 차이를 보였다. 한편, 시스템의 성능을 검증하기 위해 제작된 박막 시편과 실제 산업계에서 사용되는 파우치형 이차전지 셀의 박막 구조를 측정함으로써, 본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계의 성능을 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템은 본 논문에서 측정한 시편들을 포함하여 표 2-1과 같이 다양한 박막 구조물들을 측정할 수 있으며, 각각의 박막 구조물에

대해서 다양한 물리량을 추출할 수 있다. 박막이 도포되어 있지 않은 금속 기판 및 투명 판의 경우에는 각 프로브의 측정 결과 및 기하학적 관계를 통해 물리적 두께를 측정할 수 있으며, 이에 더하여 투명 판에서는 광학적 두께 측정을 통해 매질의 굴절률을 계산할 수 있다. 한편, 박막 시편의 경우에는 양면의 측정 프로브들을 이용하여 각면에 도포된 박막의 광학적 두께를 측정할 수 있다. 또한, 두 측정 프로브들의 기하학적 관계를 통해 전체 시편의 두께를 계산할 수 있다. 만약, 박막 및 기저층의 굴절률을 알 수 있다면, 금속층 및 기저층의 물리적 두께 측정도 가능하다.

결론적으로 본 논문에서 제안하는 이중 광간섭계 시스템은 시편의 종류에 따라 저간섭성 주사 간섭계와 분산 간섭계의 측정 원리를 적용할 수 있는 유연성을 가지며, 시편의 양면을 측정할 수 있는 이중 구조의 프로브 시스템을 통해 금속 층이 포함되어 있는 박막 구조뿐만 아니라, 다양한 구조의 박막 시편을 분석할 수 있기 때문에, 이차전지, 반도체, 디스플레이 분야 등 다양한 4차 산업 분야에서 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## [참고문헌]

- [1] Brinker, C. J., et al. "Structure-property relationships in thin films and membranes." *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 4.2 (1995): 117-133.
- [2] Frey, Hartmut, and Hamid R. Khan, eds. *Handbook of thin film technology*. Berlin: Springer, 2015.
- [3] Lu, Wenjing, et al. "Porous membranes in secondary battery technologies." *Chemical Society Reviews* 46.8 (2017): 2199-2236.
- [4] Yoshino, Akira, Kenichi Sanechika, and Takayuki Nakajima. "Secondary battery." (1990).
- [5] Park, Yoo Jung, et al. "Risk assessment of lithium-ion battery explosion: chemical leakages." *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* 21.6-8 (2018): 370-381.
- [6] Tanaka, Keiichi, and Akira Mitsushima. "A preparation method for observing intracellular structures by scanning electron microscopy." *Journal of microscopy* 133.2 (1984): 213-222.
- [7] Meyer, Gerhard, and Nabil M. Amer. "Novel optical approach to atomic force microscopy." *Applied physics letters* 53.12 (1988): 1045-1047.
- [8] Rothen, Alexandre. "The ellipsometer, an apparatus to measure thicknesses

- of thin surface films." *Review of Scientific Instruments* 16.2 (1945): 26-30.
- [9] Jellison Jr, Gerald E. "Data analysis for spectroscopic ellipsometry." *Thin Solid Films* 234.1-2 (1993): 416-422.
- [10] Rothen, Alexandre. "The ellipsometer, an apparatus to measure thicknesses of thin surface films." *Review of Scientific Instruments* 16.2 (1945): 26-30.
- [11] Lien, A. "Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid crystal display at oblique incidence." *Applied physics letters* 57.26 (1990): 2767-2769.
- [12] Pezzaniti, J. Larry, and Russell A. Chipman. "Mueller matrix imaging polarimetry." *Optical engineering* 34.6 (1995): 1558-1568.
- [13] Hauge, P. S. "Recent developments in instrumentation in ellipsometry." *Surface Science* 96.1-3 (1980): 108-140.
- [14] Shotton, David, and Nicholas White. "Confocal scanning microscopy: three-dimensional biological imaging." *Trends in biochemical sciences* 14.11 (1989): 435-439.
- [15] Bertero, M., P. Brianzi, and E. R. Pike. "Super-resolution in confocal scanning microscopy." *Inverse Problems* 3.2 (1987): 195.
- [16] Wyant, James C. "White light interferometry." *Holography: A Tribute to*

- Yuri Denisyuk and Emmett Leith. Vol. 4737. International Society for Optics and Photonics, 2002.
- [17] Deck, Leslie, and Peter De Groot. "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry." *Applied optics* 33.31 (1994): 7334-7338.
- [18] Kim, Seung-Woo, and Gee-Hong Kim. "Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry." *Applied Optics* 38.28 (1999): 5968-5973.
- [19] Jo, Taeyong, et al. "Thickness and surface measurement of transparent thin-film layers using white light scanning interferometry combined with reflectometry." *Journal of the Optical Society of Korea* 18.3 (2014): 236-243.
- [20] de Groot, Peter. "Coherence scanning interferometry." *Optical measurement of surface topography*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 187-208.
- [21] Harasaki, Akiko, and James C. Wyant. "Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry." *Applied optics* 39.13 (2000): 2101-2106.
- [22] Servin, M., J. C. Estrada, and J. A. Quiroga. "Spectral analysis of phase shifting algorithms." *Optics express* 17.19 (2009): 16423-16428.
- [23] Tu, Yaqing, et al. "CMF signal processing method based on feedback corrected ANF and Hilbert transformation." *Measurement Science Review*



14.1 (2014): 41.

- [24] Cochran, William T., et al. "What is the fast Fourier transform?." Proceedings of the IEEE 55.10 (1967): 1664-1674.
- [25] Landi, Gregorio. "Properties of the center of gravity as an algorithm for position measurements." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 485.3 (2002): 698-719.
- [26] Arosa, Yago, Elena López Lago, and Raúl de la Fuente. "Refractive index measurements in absorbing media with white light spectral interferometry." Optics express 26.6 (2018): 7578-7586.
- [27] Oksenhendler, Thomas, et al. "Self-referenced spectral interferometry." Applied Physics B 99.1 (2010): 7-12.
- [28] Hlubina, Petr, Dalibor Ciprian, and Jiri Lunacek. "Spectral interferometric technique to measure the ellipsometric phase of a thin-film structure." Optics letters 34.17 (2009): 2661-2663.
- [29] Tignon, Jerome, et al. "Spectral interferometry of semiconductor nanostructures." IEEE journal of quantum electronics 35.4 (1999): 510-522.
- [30] Dorrer, Christophe. "Influence of the calibration of the detector on spectral interferometry." JOSA B 16.7 (1999): 1160-1168.

- [31] Smith, L. Montgomery, and Chris C. Dobson. "Absolute displacement measurements using modulation of the spectrum of white light in a Michelson interferometer." *Applied Optics* 28.16 (1989): 3339-3342.