



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](#)

공학박사학위논문

백색광 간섭계를 이용한 표면 형상과
박막 두께의 동시 측정에 관한 연구

Study on simultaneous measurement
of surface profile and film thickness
using white light interferometry

2017 년 2 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 민 수

국문 초록

김민수

기계항공공학부

서울대학교 대학원

본 논문에서는 백색광 간섭계를 이용하여 시료의 표면 형상과 박막의 두께 분포를 동시에 측정 할 수 있는 방안에 관한 연구를 진행하였다. 반도체와 디스플레이 산업이 발달함에 따라 패턴이 미세화 되고 박막의 두께가 얇아지면서 표면 형상과 박막의 측정에 관한 요구가 증가하고 있다. 투명 박막의 두께가 얇아지면서 간섭계를 이용한 표면 형상 측정이 어려워지고 있으며, 패턴이 미세화 되면서 박막의 두께 측정도 어려워지고 있다. 따라서 기존의 방법으로 측정이 어려운 투명 박막이 있을 때의 표면 형상 측정과 박막의 두께 분포를 동시에 측정 할 수 있는 방법에 관한 연구를 진행하였다.

표면 형상과 박막의 두께를 측정하기 위해 백색광 간섭 신호로부터 단색광 성분을 복원하였으며, 높은 파장 분해능과 짧은 연산 시간을 위해 zoom FFT를 적용하였다. 복원된 파장 별 성분을 이용하여 표면 형상과 박막의 두께를 동시에 체적으로 측정하였다.

박막의 두께를 측정하기 위해 복원된 파장 별 성분의 크기와 위상을 모두 이용하기 때문에 파장 별 성분 중 크기와 위상 중 하나만 사용하는 기존의 두께 측정 방법에 비해 정확하고 안정적인 두께 측정이 가능하다. 또한 기존의 두께 측정 방법과 달리 두께를 직접 계산하기 때문에 빠른

측정이 가능하다.

표면 형상인 높이를 측정하기 위해 복원된 파장 별 성분 중 위상을 이용하였으며, 파장 별 위상으로부터 두께 성분을 제거하였기 때문에 박막의 영향을 받지 않는 참된 높이 측정이 가능하다. 그렇기 때문에 불투명 시료만 측정 가능하던 기존의 방법과 달리 투명 박막이 있는 시료의 표면 형상 측정이 가능하다.

제안한 측정 방법의 성능을 검증하기 위해 다양한 시뮬레이션과 실험을 진행 하였다. 그 결과 높이 측정 오차율은 3 % 이하, 두께 측정 오차율도 3 % 이하, 640 x 480개의 총 307200개 픽셀의 높이와 두께를 측정하는데 약 12초의 시간이 걸리는 것을 확인 하였다.

주요어: 백색광 간섭계(white light interferometry), FFT, 표면 형상 측정, 두께 분포 측정, 동시 측정, 체적 측정(volumetric measurement), 개선된 위상 추출법

학번: 2010-20658

목차	
국문 초록.....	i
그림 목차.....	vii
표 목차.....	xii
기호 설명.....	xiv
약어 설명.....	xvi
Chapter 1. 서론.....	1
1.1. 서론.....	1
1.2. 연구 동향.....	7
1.3. 연구 내용.....	11
Chapter 2. 배경 이론.....	13
2.1. 반사도 이론.....	13
2.1.1. 복소 굴절 계수.....	13
2.1.2. 빛의 반사 및 굴절.....	15
2.1.2.1. 스넬의 법칙.....	15
2.1.2.2. 프레넬 방정식.....	15
2.1.3. 단층 막에서의 반사.....	17
2.1.4. 다층 막에서의 반사.....	19
2.2. 간섭 신호 이론.....	21
2.3. 측정 방법.....	23
2.3.1. 두께 측정 방법.....	23
2.3.2. 높이 측정 방법.....	26
2.3.2.1. 위상 천이 간섭계(Phase Shifting Interferometry, PSI)	27
2.3.2.2. 백색광 주사 간섭계(White-light Scanning Interferometry, WSI).....	29

2.3.2.3. 백색광 위상 천이 간섭계(White Light Phase Shifting Interferometry, WLPSI)	3 2
2.3.2.4. 주파수 영역 분석법(Frequency Domain Analysis, FDA)	3 3
2.3.2.5. 칼라 간섭계(Color interferometry, 3-PSI)	3 4
2.3.3. 간섭계를 이용한 두께 측정 방법	3 6
Chapter 3. 투명 박막의 영향	3 9
3.1. 투명 박막의 영향	3 9
3.1.1. 단파장 위상에의 영향	4 1
3.1.2. 백색광 간섭 신호에의 영향	4 2
3.1.3. 가시도 함수에의 영향	4 4
3.1.4. 파장 별 위상에의 영향	4 6
3.2. 박막에 의한 높이 측정 오차	4 8
Chapter 4. 파장 별 성분 복원 방법	5 1
4.1. 분광 방법(Spectral resolved method)	5 1
4.1.1. 시스템 구성	5 2
4.1.2. 파장 별 성분 복원 방법	5 3
4.2. 푸리에 변환 방법(Fourier transform method)	5 5
4.2.1. 시스템 구성	5 5
4.2.2. 파장 별 성분 복원 방법	5 6
4.2.3. Zoom FFT	5 7
4.2.3.1. Zoom FFT 과정	5 8
4.2.3.2. Zoom FFT의 효과	6 0
Chapter 5. 두께 측정 방법	6 3
5.1. 기존 두께 측정 방법	6 3
5.2. Phase Extraction Method(PEM)	6 5
5.2.1. 위상 추출	6 7

5.2.2. 두께 계산 방법.....	7 1
5.3. Advanced Phase Extraction Method (APEM)	7 2
5.3.1. 위상 추출 방법.....	7 3
5.3.2. 두께 계산 방법.....	7 7
5.3.3. 측정 분해능.....	7 8
5.3.4. 측정 가능 범위.....	8 0
5.4. APEM 과 PEM 의 비교.....	8 2
5.4.1. 소광 계수의 영향.....	8 3
5.4.2. 측정 민감도(measurement sensitivity)	8 5
Chapter 6. 높이 측정 방법	9 1
6.1. 반사도만 이용한 두께 측정.....	9 4
6.2. 참된 높이 측정	9 6
6.2.1. 높이 성분의 위상 분리.....	9 6
6.2.2. 높이 측정.....	9 7
6.3. 복소수를 이용한 두께 측정 방법	9 8
6.3.1. 두께 성분의 위상 분리.....	9 8
6.3.2. 복소수를 이용한 두께 측정 방법.....	9 9
6.4. 반복 연산.....	1 0 0
Chapter 7. 시뮬레이션	1 0 2
7.1. 높이 측정 시뮬레이션.....	1 0 2
7.1.1. SiO ₂ /Si 의 높이 측정	1 0 3
7.1.2. PR/Si 의 높이 측정.....	1 0 5
7.1.3. SiO ₂ /BK7 의 높이 측정	1 0 7
7.1.4. 높이 측정 결과.....	1 0 9
7.2. 두께 측정 시뮬레이션.....	1 1 0
7.2.1. SiO ₂ /Si 의 두께 측정	1 1 0
7.2.2. PR/Si 의 두께 측정.....	1 1 2

7.2.3. SiO ₂ /BK7 의 두께 측정	1 1 4
7.2.4. 두께 측정 결과.....	1 1 6
Chapter 8. 실험	1 1 7
8.1. 시스템 구성	1 1 8
8.2. 파수 분해능에 관한 실험	1 2 0
8.3. 반복 연산에 관한 실험.....	1 2 7
8.4. 시료에 관한 실험.....	1 3 3
8.4.1. 표준 시편.....	1 3 3
8.4.2. 표준 4 분할 시편.....	1 4 1
8.5. 연산 시간.....	1 4 8
Chapter 9. 결론.....	1 5 1
References.....	1 5 3
APPENDICES	1 6 2
A. 개구수에 의한 영향.....	1 6 2
B. 기존 높이 측정 방법의 노이즈에 대한 강건성	1 6 6
B1. 광원에 의한 오차(n_1).....	1 6 6
B2. 외부 진동에 의한 오차(n_2)	1 6 7
B3. 검출기에 의한 오차(n_3)	1 6 8

그림 목차

그림 1 - 1 반도체의 CMP 공정.....	2
그림 1 - 2 OLED 픽셀 내부의 밝기 균일성.....	3
그림 1 - 3 OLED 패널 전체의 밝기 균일성.....	3
그림 2 - 1 두 매질의 경계에서의 빛의 굴절과 반사.....	1 3
그림 2 - 2 실리콘(Si)의 복소 굴절 계수.....	1 4
그림 2 - 3 입사 평면, p파와 s파.....	1 6
그림 2 - 4 단층 막에서의 빛의 반사.....	1 7
그림 2 - 5 다층 막에서의 빛의 반사.....	1 9
그림 2 - 6 간섭계의 원리.....	2 1
그림 2 - 7 복원된 반사도.....	2 4
그림 2 - 8 비 선형 최소 자승법을 이용한 두께 측정.....	2 5
그림 2 - 9 백색 LED의 파장 분포.....	2 9
그림 2 - 10 백색광 간섭 신호.....	3 0
그림 2 - 11 백색광 간섭 신호와 가시도 함수.....	3 1
그림 2 - 12 백색광 위상 천이 간섭계 높이 측정 방법.....	3 2
그림 2 - 13 푸리에 변환으로 복원된 파장 별 위상.....	3 3
그림 2 - 14 칼라 간섭계에서 복원한 위상.....	3 4
그림 2 - 15 3-PSI를 이용한 높이 측정 방법.....	3 5
그림 2 - 16 위상 모델링을 통한 높이와 두께 측정 방법.....	3 7
그림 2 - 17 두께 성분 위상의 선형성과 비 선형성.....	3 8
그림 3 - 1 박막이 있을 때의 간섭 신호.....	3 9
그림 3 - 2 박막 두께에 따른 단파장 위상 변화.....	4 1

그림 3 - 3 박막 두께에 따른 백색광 간섭 신호 변화;	4 3
그림 3 - 4 박막 두께에 따른 가시도 함수 변화;	4 5
그림 3 - 5 박막 두께에 따른 파장 별 위상 변화;	4 7
그림 3 - 6 백색광 위상 천이 간섭계의 막 두께에 따른 높이 측정 오차..	4 8
그림 3 - 7 주파수 영역 분석법의 막 두께에 따른 높이 측정 오차	4 9
그림 3 - 8 다 파장 간섭계의 막 두께에 따른 높이 측정 오차	5 0
그림 4 - 1 백색광 분산형 간섭계;	5 2
그림 4 - 2 백색광 간섭계	5 5
그림 4 - 3 Zoom FFT 과정;	5 9
그림 4 - 4 Zoom FFT와 FFT 분해능 비교	6 0
그림 4 - 5 Zoom FFT와 FFT의 변환 오차	6 1
그림 4 - 6 Zoom FFT와 FFT의 연산 시간	6 2
그림 5 - 1 지역 최소값과 전역 최소값	6 4
그림 5 - 2 PEM의 두께 측정 방법	6 6
그림 5 - 3 PEM의 추출된 위상과 펼쳐진 위상	7 0
그림 5 - 4 APEM의 두께 측정 방법	7 2
그림 5 - 5 APEM의 추출된 위상과 펼쳐진 위상	7 6
그림 5 - 6 APEM의 두께 측정	7 7
그림 5 - 7 APEM의 측정 분해능	7 8
그림 5 - 8 APEM의 측정 가능 범위	8 0
그림 5 - 9 각 물질의 굴절 계수와 소광 계수;	8 3
그림 5 - 10 소광 계수에 의한 PEM과 APEM의 측정 오차율	8 4
그림 5 - 11 막 두께에 따른 반사도;	8 6
그림 5 - 12 반사도의 측정 민감도	8 7

그림 5 - 13 박막 두께에 따른 반사도의 민감도.....	8 8
그림 5 - 14 박막 두께에 따른 반사도와 위상의 민감도.....	8 9
그림 5 - 15 측정 민감도에 의한 PEM와 APEM의 측정 오차율.....	9 0
그림 6 - 1 참된 높이와 두께 측정 순서.....	9 3
그림 6 - 2 복원된 파장 별 위상의 구성 성분.....	9 4
그림 6 - 3 반사도를 이용한 두께 측정.....	9 5
그림 6 - 4 복원된 위상으로부터 분리한 높이 성분의 위상.....	9 6
그림 6 - 5 분리된 높이 성분의 위상.....	9 7
그림 6 - 6 복원된 위상으로부터 분리한 두께 성분의 위상.....	9 8
그림 6 - 7 높이와 두께를 이용하여 복원한 표면 형상.....	1 0 1
그림 7 - 1 SiO ₂ /Si의 높이 측정 결과.....	1 0 3
그림 7 - 2 SiO ₂ /Si의 높이 측정 오차율.....	1 0 4
그림 7 - 3 PR/Si의 높이 측정 결과.....	1 0 5
그림 7 - 4 PR/Si의 높이 측정 오차율.....	1 0 6
그림 7 - 5 SiO ₂ /BK7의 높이 측정 결과.....	1 0 7
그림 7 - 6 SiO ₂ /BK7의 높이 측정 오차율.....	1 0 8
그림 7 - 7 각 재질에 따른 높이 측정 결과.....	1 0 9
그림 7 - 8 SiO ₂ /Si의 두께 측정 결과.....	1 1 0
그림 7 - 9 SiO ₂ /Si의 두께 측정 오차율.....	1 1 1
그림 7 - 10 PR/Si의 두께 측정 결과.....	1 1 2
그림 7 - 11 PR/Si의 두께 측정 오차율.....	1 1 3
그림 7 - 12 SiO ₂ /BK7의 두께 측정 결과.....	1 1 4
그림 7 - 13 SiO ₂ /BK7의 두께 측정 오차율.....	1 1 5
그림 7 - 14 각 재질에 따른 두께 측정 결과.....	1 1 6

그림 8 - 1 미라우 백색광 간섭계.....	1 1 8
그림 8 - 2 할로겐 램프의 스펙트럼.....	1 1 9
그림 8 - 3 파수 분해능에 따른 높이 측정 결과.....	1 2 1
그림 8 - 4 파수 분해능에 따른 높이 측정 오차율.....	1 2 1
그림 8 - 5 파수 분해능에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과.....	1 2 3
그림 8 - 6 파수 분해능에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 오차율.....	1 2 3
그림 8 - 7 파수 분해능에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과.....	1 2 4
그림 8 - 8 파수 분해능에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 오차율.....	1 2 5
그림 8 - 9 반복 연산에 따른 높이 측정 결과.....	1 2 7
그림 8 - 10 반복 연산에 따른 높이 측정 오차율.....	1 2 8
그림 8 - 11 반복 연산에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과.....	1 2 9
그림 8 - 12 반복 연산에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 오차율.....	1 3 0
그림 8 - 13 반복 연산에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과.....	1 3 1
그림 8 - 14 반복 연산에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 오차율.....	1 3 1
그림 8 - 15 표준 시편의 구성.....	1 3 4
그림 8 - 16 표준 시편의 높이 측정 결과.....	1 3 5
그림 8 - 17 표준 시편의 높이 측정 오차율.....	1 3 5
그림 8 - 18 표준 시편의 두께 측정 결과.....	1 3 8
그림 8 - 19 표준 시편의 두께 측정 오차율.....	1 3 9
그림 8 - 20 표준 4분할 시편의 구성.....	1 4 2
그림 8 - 21 표준 4분할 시편의 높이 측정 결과.....	1 4 3
그림 8 - 22 표준 4분할 시편의 높이 측정 오차율.....	1 4 3
그림 8 - 23 표준 4분할 시편의 두께 측정 결과.....	1 4 6
그림 8 - 24 표준 4분할 시편의 두께 측정 오차율.....	1 4 6

그림 8 - 25 측정 방법 별 연산 시간.....	1 4 9
그림 A - 1 렌즈의 개구수(N.A).....	1 6 2
그림 A - 2 배율에 따른 높이 측정 결과.....	1 6 4
그림 A - 3 배율에 따른 두께(0.8 μm) 측정 결과.....	1 6 4
그림 A - 4 배율에 따른 두께(0.9 μm) 측정 결과.....	1 6 5
그림 B - 1 n_1 에 의한 측정 오차.....	1 6 7
그림 B - 2 n_2 에 의한 측정 오차.....	1 6 7
그림 B - 3 n_3 에 의한 측정 오차.....	1 6 8

표 목차

표 4 - 1 Zoom FFT와 FFT의 연산 시간.....	6 2
표 8 - 1 측정 시스템 구성.....	1 1 9
표 8 - 2 파수 분해능에 따른 높이 측정 결과.....	1 2 2
표 8 - 3 파수 분해능에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과.....	1 2 4
표 8 - 4 파수 분해능에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과.....	1 2 5
표 8 - 5 반복 연산에 따른 높이 측정 결과.....	1 2 8
표 8 - 6 반복 연산에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과.....	1 3 0
표 8 - 7 반복 연산에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과.....	1 3 2
표 8 - 8 표준 시편의 측정 조건.....	1 3 4
표 8 - 9 표준 시편의 각 측정 방법 별 높이 측정 결과.....	1 3 6
표 8 - 10 표준 시편의 각 측정 방법 별 높이 측정 오차율.....	1 3 6
표 8 - 11 표준 시편의 각 측정 방법 별 높이 측정 반복도.....	1 3 7
표 8 - 12 표준 시편의 두께 측정 결과.....	1 3 9
표 8 - 13 표준 시편의 두께 측정 오차율.....	1 3 9
표 8 - 14 표준 시편의 두께 측정 반복도.....	1 4 0
표 8 - 15 표준 4분할 시편의 측정 조건.....	1 4 1
표 8 - 16 표준 4분할 시편의 높이 측정 결과.....	1 4 4
표 8 - 17 표준 4분할 시편의 높이 측정 오차율.....	1 4 4
표 8 - 18 표준 4분할 시편의 높이 측정 반복도.....	1 4 4
표 8 - 19 표준 4분할 시편의 두께 측정 결과.....	1 4 7
표 8 - 20 표준 4분할 시편의 두께 측정 오차율.....	1 4 7
표 8 - 21 표준 4분할 시편의 두께 측정 반복도.....	1 4 7

표 8 - 22 해석 조건 및 PC 사양.....	1 4 8
표 A - 1 각 렌즈 별 개구수(N.A)	1 6 3
표 A - 2 배율에 따른 높이 측정 결과.....	1 6 4
표 A - 3 배율에 따른 두께(0.8 μm) 측정 결과.....	1 6 5
표 A - 4 배율에 따른 두께(0.9 μm) 측정 결과.....	1 6 5
표 B - 1 n_1 에 의한 측정 오차.....	1 6 7
표 B - 2 n_2 에 의한 측정 오차.....	1 6 8
표 B - 3 n_3 에 의한 측정 오차.....	1 6 8

기호 설명

\tilde{n}	Complex index of refraction
n	Index of refraction
k	Extinction coefficient
θ_i	Angle of incident
θ_t	Angle of transmission
E_p	p-wave of electric wave
E_s	s-wave of electric wave
r_{12}	Fresnel reflection coefficient (when light goes from material 1 to material 2)
t_{12}	Fresnel transmission coefficient (when light goes from material 1 to material 2)
R	Total reflection coefficient
β	Phase change in film layer
λ	Wavelength of light
k	Wave number of light
d	Thickness of film
\mathfrak{R}	Spectral reflectance
\bar{S}	Scattering matrix
\bar{I}	Interface matrix
\bar{L}	Layer matrix
E_i	Electric wave from light source
E_{obj}	Electric wave reflected from sample

E_{ref}	Electric wave reflected from reference mirror
ρ	Penetration ratio of beam splitter
l	Common path of light
h	Surface profile of sample
z	Position of scanner
φ	Phase change in reflection
I	Intensity of interferogram
A	Average intensity of monochromatic interferogram
B	Visibility magnitude of monochromatic interferogram
ϕ	Phase of monochromatic interferogram
$F(\lambda)$	Spectrum intensity according to wavelength
I_{DC}	Average intensity of white light interferogram
γ	Visibility function of white light interferogram
λ_c	Central wavelength of white light source
$\tilde{I}(u)$	Fourier transform of white light interferogram
C	Replacement coefficient of APEM
S	Measurement sensitivity

약어 설명

LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light-Emitting Diode
BLU	Back Light Unit
CMP	Chemical Mechanical Polishing
CVD	Chemical Vapor Deposition
EML	Emitting Layer
CS	Column Spacer
CF	Color Filter
TFT	Thin Film Transistor
SEM	Scanning Electron Microscope
PR	Photoresist
PZT	Piezo-electric Transducer
OPD	Optical Path Difference
CCD	Charge-Coupled Device
PEM	Phase Extraction Method
APEM	Advanced Phase Extraction Method
LMA	Levenberg-Marquardt Algorithm
PSI	Phase Shifting Interferometry
WSI	White-light Scanning Interferometry
WLPSI	White Light Phase Shifting Interferometry
FDA	Fourier Domain Analysis
SNR	Signal-to-Noise Ratio

Chapter 1. 서론

1.1. 서론

최근 십여 년간 반도체와 디스플레이 산업은 크게 발달하고 있다. 반도체는 제품의 부피를 줄이면서 성능과 수명을 크게 늘릴 수 있는 3D 패키징 기술에 관한 많은 연구가 진행 중이며, 디스플레이는 LCD에서 OLED로 공정이 바뀌고 있고 터치 패널이 발달함에 따라 구조가 복잡해지고 있다. OLED는 LCD에 비해 비교적 생산 공정이 간단하고, 두께가 얇으며, 자체적으로 발광하기 때문에 추가적인 BLU가 필요하지 않다. 이런 다양한 장점으로 인해 플렉시블 디스플레이 혹은 투명 디스플레이를 구현하기 유리하기 때문에 OLED에 관한 많은 연구들이 진행 중이다. 또한 터치 패널이 발달함에 따라 미세 패턴의 구조가 복잡해지고 투명 박막의 두께가 얇아지고 있다. 이렇게 반도체와 디스플레이 공정이 발달함에 따라 막의 두께가 얇아지고 패턴이 미세화 되기 때문에 고품질의 제품을 생산하고 생산 수율을 높이기 위해서 각 공정에서의 측정 및 검사 기술 또한 높은 성능이 요구된다.

반도체의 CMP 공정은 CVD를 통해 증착한 막의 표면을 평탄화해주는 작업이다. 그림 1-1과 같이 CMP 공정을 통해 더 많은 layer를 쌓을 수 있고, 더 높은 성능을 확보 할 수 있다. 따라서 CMP 공정은 반도체 제작 공정에서 매우 중요한 공정이며, CMP 공정 후의 평탄도와 균일성의 측정과 검사 또한 그 중요성이 높아지고 있다. 특히 최근 반도체의 3D 패키징 기술이 발달하여 구조가 더욱 입체화 되었기 때문에 박막의 수가 증가하고, 박막의 두께가 얇아져 CMP 공정 후의 측정 및 검사 기술 또한 더 빠른 측정과 더 높은 정확도가 요구되고 있다.

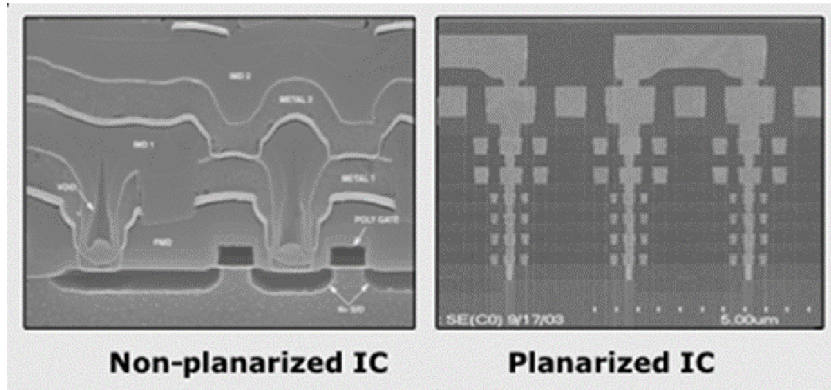


그림 1 - 1 반도체의 CMP 공정¹

OLED는 LCD에 비해 명암비가 뛰어난 장점이 있다. 뛰어난 명암비와 높은 밝기 균일성을 유지하기 위해서는 빛을 발하는 EML의 막 두께 균일성이 확보 되어야 한다. 그림 1-2에서 볼 수 있듯이, 픽셀 내부의 EML 막 두께가 다른 경우 그 영향으로 픽셀 내부의 밝기 또한 균일하지 못한 문제가 있다. 또한 그림 1-3과 같이 패널 전체의 밝기 균일성을 유지하기 위해서는 각 픽셀간의 두께도 일정해야 한다. 그렇기 때문에 미세 패턴 내의 막 두께 분포와 패널 전체의 막 두께 분포의 측정 및 검사에 관한 중요성이 증가하고 있다.

¹ <http://www.linx-consulting.com>

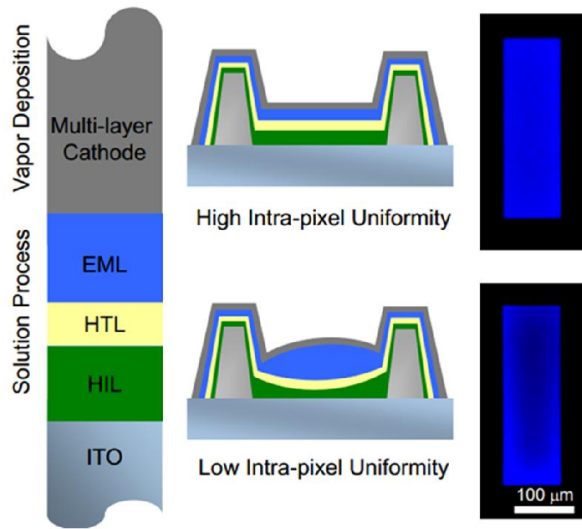


그림 1 - 2 OLED 픽셀 내부의 밝기 균일성²

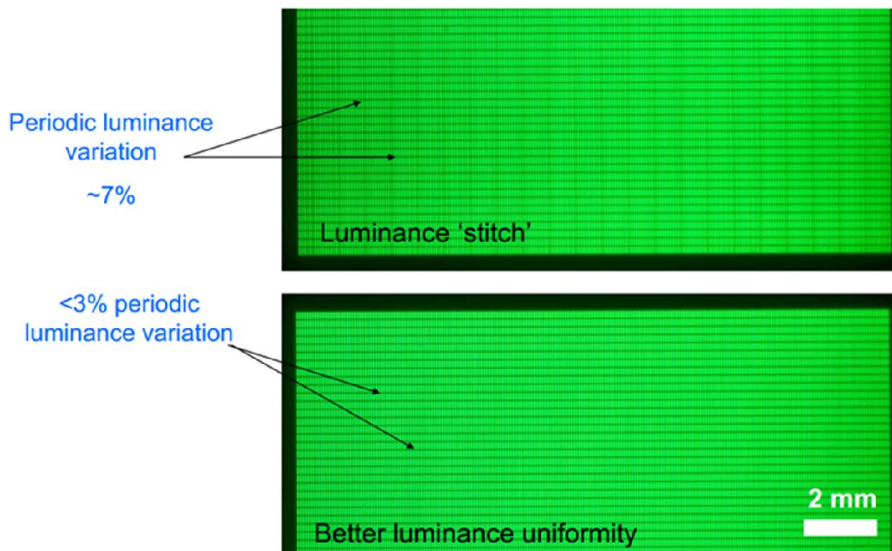


그림 1 - 3 OLED 패널 전체의 밝기 균일성³

² <http://informationdisplay.org>

³ <http://semieurope.omnibooksonline.com>

LCD는 터치 패널이 발달함에 따라 구조가 복잡해 지고 있다. 특히 LCD에 필수인 LC의 주입량을 결정하기 위한 CS를 CF 뿐 아니라 TFT에 만드는 공정이 발달하고 있다. CS는 일반적으로 PR 재질로 구성되는데 CF와 TFT 양쪽에 모두 CS가 존재함에 따라 그 높이가 1 μm 수준으로 낮아지고 있으며 구조가 복잡한 TFT위에 CS가 존재함으로써 주위의 투명 박막에 의한 영향으로 그 높이를 측정하기 매우 어렵다.

이와 같이 반도체와 디스플레이 산업이 발달함에 따라 패턴이 미세화 되고 박막의 두께가 얇아지고 있다. 박막의 두께가 얇아짐에 따라 두께 1 μm 이하의 투명 박막이 있을 때의 표면 형상 측정 기술에 관한 필요성이 증가하고 있다. 패턴의 크기가 μm 수준으로 미세화 되기 때문에 패턴 내부의 막 두께 측정을 위해서는 수백 nm 혹은 수십 nm 영역의 두께 측정 필요성이 증가하고 있다. 또한 디스플레이 산업의 경우 생산의 효율성을 높이기 위해서 원판 글라스의 크기가 커지기 때문에 측정 횟수가 증가하므로 수 초 혹은 수 십 초 이내로 빠른 측정이 가능한 측정 방법에 관한 요구도 동시에 증가하고 있다. 따라서 미세 패턴의 표면 형상 및 박막의 두께 분포를 짧은 시간에 정확히 측정하는 기술에 관한 중요성과 요구가 꾸준히 증가하고 있다.

표면 형상을 측정하는 장비로는 전자 주사 현미경(SEM), 스타일러스 프로파일러(stylus profilometry), 간섭계(interferometry) 등이 있다. 전자 주사 현미경은 높은 에너지의 전자를 샘플에 주사시켰을 때 발생하는 여러 가지 신호를 분석하는 것으로 표면 형상을 매우 정확하게 측정 할 수 있다. 하지만 측정 준비 시간이 오래 걸리고 샘플의 크기가 진공 챔버보다 작아야 하기 때문에 생산 공정의 in-line 장비로는 많이 활용되지 않고 있다.

스타일러스 프로파일러는 프로브(probe)를 시료에 접촉 시킨 후 프로브를 수평 방향으로 움직이며 시료의 수직 방향 변화를 측정하는 장비이다. 프로브가 시료에 접촉하기 때문에 시료의 표면 형상을 정확하게 측정 할 수 있지만, 프로브를 누르는 힘에 의해 시료 표면이 손상되는 문제가 발생 할 수 있다. 또한 한번에 하나의 라인에 관한 표면 형상만 얻을 수 있기 때문에 전체 영역을 측정하기 위해서는 수십 회 혹은 수백 회 측정을 해야 하기 때문에 긴 측정 시간이 필요한 단점이 있다.

간접계는 시료에 직접 접촉하지 않고 시료에서 반사되는 빛을 이용하여 간접 무늬를 생성한 후 이 간접 무늬를 해석하여 표면 형상을 측정한다. 그렇기 때문에 시료에 손상을 주지 않고 측정 가능하며 한번에 전체 영역의 표면 형상을 한번에 얻을 수 있다. 또한, 측정 시간이 수초 이내로 매우 빠르다는 장점이 있다.

두께를 측정하는 장비로는 타원계(ellipsometry)와 분광 반사계(spectroscopic reflectometry)가 주로 사용되고 있다. 타원계는 시료의 특성에 따라 빛이 반사될 때 편광 상태가 달라지는 성질을 이용하는 장비로 편광된 빛을 특정 각도로 입사한 후 반사된 빛의 편광 상태를 통해 두께를 측정한다. 옴스트롬 단위의 매우 얇은 막의 두께도 안정적으로 측정할 수 있지만, 한 지점의 두께만 측정 가능한 스팟형(spot type) 측정 장비이다. 또한 특정 각도로 빛을 입사함에 따라 측정 영역의 크기가 커지기 때문에 두께를 측정하기 위해 평탄한 영역이 넓어야 한다.

분광 반사계는 시료의 특성에 따라 반사되는 파장 별 빛의 세기가 달라지는 현상을 이용하는 장비이다. 프리즘(prism)과 같은 분광기를

이용하여 시료에서 반사되는 빛을 파장에 따라 분산하여 파장 별 밝기를 얻는 장비이다. 장비 구성이 간단하고 현미경 렌즈를 사용하여 측정 지점의 크기를 줄일 수 있기 때문에 디스플레이 산업에서 두께를 측정하는데 많이 사용되고 있다. 타원계와 분광 반사계는 모두 스폿 측정이기 때문에 미세 패턴내의 막 두께와 막 두께 분포를 측정하기에는 어려움이 있다.

반도체와 디스플레이 산업이 발달함에 따라 미세 패턴의 형상과 박막의 두께 분포를 측정하는 것이 더욱 중요해 지고 있다. 또한 측정 횟수가 늘어나면서 빠른 측정 방법에 관한 요구도 증가하고 있다. 이런 이유들로 인해 간섭계에 관한 연구가 증가하고 있다. 간섭계는 측정 시간이 수 초 이내로 매우 짧고, 현미경 렌즈의 배율을 통해 수백 nm의 미세 패턴까지 측정이 가능하며 높이 측정 분해능이 sub-nm로 매우 뛰어나다. 또한 최근에는 간섭계를 이용하여 표면 형상뿐만 아니라 박막의 두께를 측정하는 방법에 관한 연구가 진행되면서 간섭계를 통한 표면 형상과 박막의 두께를 sub-nm 분해능으로 동시에 측정하는 방법에 관한 관심이 높아지고 있다.

1.2. 연구 동향

간섭계는 1966년 P. Carre[1]가 표면 형상 측정 방법을 제안한 이래로 최근까지 다양하게 연구되고 있으며, 시료를 손상시키지 않고 짧은 시간에 정확한 측정이 가능하기 때문에 연구실 수준의 간단한 표면 형상 검사부터 반도체와 디스플레이 공정의 in-line까지 다양하게 활용되고 있다.

간섭계는 1970년대부터 본격적으로 연구되기 시작했는데, 레이저를 이용한 위상 천이 간섭계[2-11]에 관한 연구가 주를 이루었다. 이 시기에는 주로 압전 구동기(PZT)의 이송 오차 혹은 압전 구동기의 이송 비선형성이나 외부 오차들을 최소화 하여 위상을 복원하는 방법들에 관한 연구들이 진행되었다. 위상 천이 간섭계는 높이 방향의 측정 분해능이 sub-nm로 매우 뛰어나지만, 위상 모호성으로 인해 사용하는 광원의 파장의 1/4 이상의 단차는 측정하지 못하는 치명적인 단점이 있다. 그렇기 때문에 매끄러운 표면만 측정 가능하거나 단차가 1/4 이하만 존재하는 시료의 표면 형상만 측정이 가능하였다.

이런 단점을 극복하기 위해 다파장 간섭계(multi-wavelength interferometry)와 백색광 간섭계(white light interferometry)에 관한 연구가 진행되었다. 다파장 간섭계[12-20]는 위상 천이 간섭계와 동일한 시스템 구성에 광원으로 서로 다른 2가지 이상의 레이저를 사용한다. 여러가지 광원들을 사용함에 따라 측정 분해능을 sub-nm로 유지하면서 측정 범위가 사용하는 광원들의 파장의 최소 공배수에 해당하는 등가 파장(equivalent wavelength)의 1/4까지 증가하기 때문에 파장들의 선택에 따라 10 μm 이상의 단차를 측정하는 것도 가능해 졌다.

하지만 여전히 모호성이 존재하고, 광원으로써의 레이저의 불안정성 및 사용의 어려움으로 인해 백색광 간섭계에 관한 연구가 활발히 진행되었다.

백색광 간섭계[21-28]는 광원으로 짧은 간섭 거리를 가지는 백색광을 사용함에 따라 측정 범위의 제한이 사라졌다. 다양한 파장이 모두 포함된 백색광을 광원으로 사용하면 광 경로 차이(OPD)가 0이 되는 거리에서 간섭 무늬가 가장 크게 나타나고 광 경로 차이가 커질수록 간섭무늬의 크기가 작아진다. 따라서 간섭무늬의 크기를 계산한 가시도 함수의 정점을 찾는 방법으로 표면 형상을 측정한다. 이런 가시도 함수를 이용한 백색광 간섭계는 측정 범위가 무한대로 늘어나지만 측정 분해능이 수 십 nm로 위상 천이 간섭계에 비해 떨어지는 단점을 가지고 있다.

1990년대 중반부터 백색광 간섭계와 위상 천이 간섭계를 결합한 백색광 위상 천이 간섭계에 관한 연구가 진행되며 간섭계에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 백색광 위상 천이 간섭계[29-32]는 광원으로 백색광을 사용하고, 위상 천이 간섭계에 사용되던 위상 천이 기법을 적용하여 측정 범위의 제한이 없으면서도 측정 분해능이 sub-nm로 뛰어난 방법이다. 짧은 간섭 거리를 가지는 백색광을 이용하기 때문에 가시도 함수를 이용하여 간섭무늬 차수를 결정한 후 위상 천이 방법을 이용하여 위상을 복원한다. 그 후 복원된 위상에 간섭무늬 차수를 더하여 표면 형상을 측정한다.

백색광 위상 천이 간섭계가 제안된 이후, 간섭계는 성능을 향상시키기 위해서 많은 연구[33-57]가 진행되었다. 간섭계는 높이 방향인 Z축으로 이동하며 얻은 간섭 신호를 이용하여 표면 형상을 측정하기

때문에 태생적으로 Z축 진동에 취약하다. 이런 단점을 보완하기 위해 위상 오차를 보완하는 연산 방법[35-37]과 피드백 시스템을 통한 오차 보정[42-45], 편광 분할기[46-50], spatial phase shift[52, 53], 칼라 카메라[55] 등 다양한 방법을 이용한 원 샷 측정(one shot measurement)에 관한 다양한 연구가 이루어졌다. 또한 압전 구동기를 이용하여 Z축 주사(scanning)를 하지 않고 분광기 혹은 프리즘과 같은 광학 부품(optical part)을 이용한 분광 간섭계[58-62]에 관한 연구도 진행 되었다. 분광 간섭계는 표면 형상뿐 아니라 절대 거리도 측정 할 수 있는 장점이 있지만, 영역 측정이 불가능하고 점 측정 혹은 라인 측정만 가능하다는 단점이 있다.

최근에는 칼라 카메라를 이용한 칼라 간섭계[63-83]에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 칼라 카메라는 CCD 앞에 칼라 필터가 있기 때문에 레이저가 아닌 백색광을 사용하더라도 다 파장 간섭계와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 높이에 비 선형적인 가시도 함수를 이용하지 않고, 선형적인 위상만 이용하기 때문에 백색광 위상 천이 간섭계보다 정확하고 안정적인 측정이 가능한 장점이 있지만 여전히 측정 가능 범위가 수 십 μm 이내로 낮은 문제점이 있다. 그렇기 때문에 측정 범위를 증가시키기 위한 방법에 관한 연구[84]도 진행 되고 있다.

간섭계는 시료에서 반사되는 빛을 이용하여 표면 형상을 측정하기 때문에 측정 결과가 시료의 표면 특성에 큰 영향을 받는다. 특히 시료의 표면에 투명한 막이 있는 경우, 투명 박막에 의한 간섭 현상으로 간섭 신호가 왜곡[85] 되어 정상적인 측정이 불가능해 진다. 이런 문제를 해결하여 투명 박막의 영향을 받지 않는 참된 표면 형상과 기존의 두께 측정 장비에서 측정이 어렵던 미세 패턴의 두께 분포를 측정하기 위해

간섭계를 이용한 표면 형상과 두께의 동시 측정 방법에 관한 많은 연구[85-118]들이 진행 되었다.

간섭계를 이용한 두께 측정 방법은 크게 백색광 간섭계로 획득한 백색광 간섭신호를 이용한 방법과 분광 간섭계를 이용한 방법으로 분류할 수 있다. 백색광 간섭계를 이용한 방법[86-96]은 Z축 주사를 통해 획득한 백색광 간섭 신호를 FFT 혹은 HCF를 통해 파장 별 크기와 파장 별 위상으로 변환하여 표면 형상과 두께를 측정한다. 따라서 미세 패턴의 형상과 두께를 체적으로 측정할 수 있는 장점이 있지만 파장 분해능이 떨어져 측정 안정성이 낮은 단점이 있다.

반면에 분광 간섭계를 이용한 방법[98-112]은 파장 분해능이 매우 뛰어나지만 한 지점 혹은 라인 측정만 가능하다. 이 방법 또한 FFT 혹은 위상 복원을 통해 파장 별 위상을 복원하여 표면 형상과 두께를 측정한다. 두 가지 방법 모두 파장 별 위상을 복원한 후 높이와 두께를 측정하는 방법은 모델링이나 라이브러리를 이용하여 복원한 파장 별 위상과 가장 유사한 결과를 찾는 간접적인 방법이 주로 연구되고 있다.

1.3. 연구 내용

이 논문에서는 백색광 간섭계를 이용하여 표면 형상인 높이와 투명 박막의 두께를 동시에 측정하는 방법에 관한 연구를 진행하였다. 할로겐 램프를 광원으로 사용한 미라우 간섭계(Mirau interferometry)와 Z축 주사를 통해 화면 전체의 간섭 신호를 획득하여 표면 형상과 두께 분포를 측정하였다.

획득한 백색광 간섭 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 단색광 간섭 신호의 성분인 파장 별 크기와 위상으로 복원하여 표면 형상인 높이와 박막의 두께를 측정하였다. 푸리에 변환 과정에서 연산 시간의 증가 없이 높은 분해능을 얻고 외부 진동에 의한 오차를 최소화 하기 위해 zoom FFT를 적용하였다. Zoom FFT를 통해 복원한 파장 별 성분의 크기와 위상을 모두 이용하여 높이와 두께를 측정하였다.

박막의 두께를 측정하기 위해 백색광 간섭 신호로부터 복원된 파장 별 크기와 위상을 모두 이용하였다. 이 방법은 파장 별 크기와 위상을 모두 이용하기 때문에 기존 측정 방법에 비해 더욱 정확하고 안정적인 측정이 가능하다. 또한 두께를 직접 계산하기 때문에 간접적으로 두께를 측정하는 방법에 비해 매우 빠르게 측정 할 수 있다.

표면 형상인 높이를 측정하기 위해서 백색광 간섭 신호로부터 복원된 파장 별 위상을 이용하였다. 파장 별 위상은 높이와 두께에 모두 영향을 받으므로 투명 박막에 의해 왜곡되지 않는 참된 높이를 측정하기 위해 두께 성분을 제거하였다. 또한 측정한 두께와 높이를 이용하여 측정 값을 다시 계산하는 반복 연산 과정을 통해 외부 진동과 노이즈에 따른 오차를 최소화 하였다.

제안한 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 진행 하였다. 시뮬레이션은 3가지 시료에 관해서 투명 박막의 두께에 따라 높이와 두께 측정 결과를 확인 하였다. 높이 측정 방법에 많이 활용되는 WLPSI 방법과 높이와 두께를 동시에 측정 할 수 있는 비 선형 최소 자승법 두 가지의 기존 측정 방법과 이 논문에서 제안하는 방법의 측정 결과를 비교하여 성능을 검증하였다.

시뮬레이션과 실험을 진행한 결과 이 논문에서 제안한 방법은 높이와 두께를 동시에 측정 할 수 있으며, 측정 시간도 비 선형 최소 자승법에 비해 매우 짧다는 것을 알 수 있었다. 또한, 투명 박막에 의한 영향을 받지 않는 참된 높이를 측정 할 수 있으며, 측정 영역 내의 모든 지점의 높이와 두께를 측정 할 수 있기 때문에 미세 패턴의 표면 형상과 박막의 두께를 측정 할 수 있는 것을 확인 하였다.

Chapter 2. 배경 이론

2.1. 반사도 이론

2.1.1. 복소 굴절 계수

빛이 서로 다른 두 매질의 경계를 만났을 때, 그림 2-1과 같이 일부분은 첫 번째 매질로 반사되고 나머지는 두 번째 매질로 굴절된다. 이때, 굴절된 빛은 진행 방향과 속도가 변하고 흡수되기도 한다. 이런 매질의 특성을 결정하는 값이 복소 굴절 계수(complex index of refraction, \tilde{N})이며 식 2-1과 같이 표현된다.

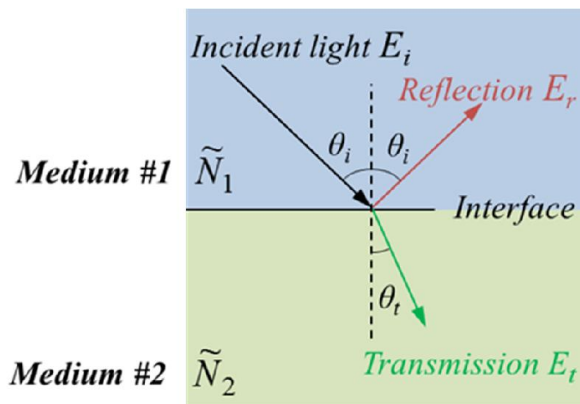


그림 2 - 1 두 매질의 경계에서의 빛의 굴절과 반사

$$\tilde{N} = n - ik \quad \text{식 2-1}$$

이 때, n 은 굴절 계수(index of refraction), k 는 소광 계수(extinction coefficient), i 는 복소수($\sqrt{-1}$)이다. 굴절 계수는 공기($n_{air}=1$)와 비교하였을 때의 빛의 진행 속도의 역수를 의미한다. 예를 들어 굴절 계수가 2인 매질에서의 빛의 속도는 공기에서의 속도의

절반이다. 소광 계수는 빛이 매질을 지나갈 때 단위 두께 당 빛이 흡수되는 양을 의미한다. 다시 말해 소광 계수가 크다면 빛이 매질을 지남에 따라 빛의 세기가 빨리 약해진다는 것이다. 복소 굴절 계수는 파장에 따른 함수로 실리콘의 파장에 따른 복소 굴절 계수는 그림 2-2와 같다.

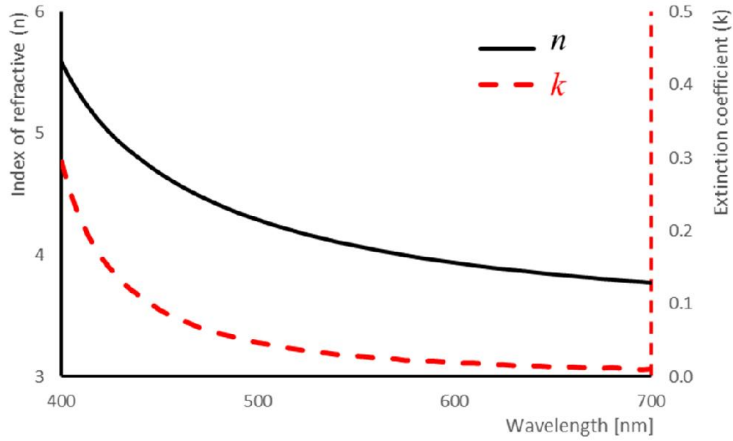


그림 2 - 2 실리콘(Si)의 복소 굴절 계수

2.1.2. 빛의 반사 및 굴절

2.1.2.1. 스넬의 법칙

앞서 설명한 것과 같이 빛이 다른 매질을 만났을 때 반사되거나 굴절된다. 이때, 반사되는 빛은 그림 2-1과 같이 입사각과 동일한 각을 가지고 반사된다. 그리고 굴절되는 빛은 식 2-2와 같이 표현되는 스넬의 법칙(Snell's law)에 따라 굴절 각이 정해진다.

$$\tilde{N}_1 \sin \theta_i = \tilde{N}_2 \sin \theta_t \quad \text{식 2-2}$$

이 때, \tilde{N} 은 각 매질의 복소 굴절 계수, θ_i 는 입사각, θ_t 는 굴절 각이다.

2.1.2.2. 프레넬 방정식

빛이 시료의 표면에 입사할 때, 그림 2-3과 같이 시료의 수직한 선과 빛이 이루는 평면을 입사 평면(plane of incident)라 하며, 입사 평면과 평행한 전기장(electric wave)을 E_p (p-wave), 입사 평면과 수직한 전기장을 E_s (s-wave)라 한다.

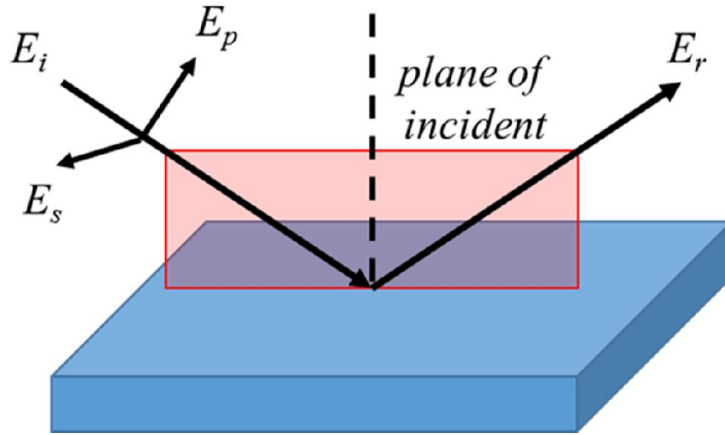


그림 2 - 3 입사 평면, p파와 s파

시료 표면에서 반사되는 전기장의 크기는 p파와 s파가 서로 다르며, 각 매질의 복소 굴절 계수와 입사각에 따라 결정된다. 반사된 전기장의 크기와 입사된 전기장의 크기 비율을 프레넬 반사 계수(Fresnel reflection coefficient)라 하며 식 2-3과 같이 표현된다.

$$r_{12}^p = \frac{E_r^p}{E_i^p} = \frac{\tilde{N}_2 \cos \theta_1 - \tilde{N}_1 \cos \theta_2}{\tilde{N}_2 \cos \theta_1 + \tilde{N}_1 \cos \theta_2}$$

$$r_{12}^s = \frac{E_r^s}{E_i^s} = \frac{\tilde{N}_1 \cos \theta_1 - \tilde{N}_2 \cos \theta_2}{\tilde{N}_1 \cos \theta_1 + \tilde{N}_2 \cos \theta_2}$$

식 2-3

또한 두 번째 매질로 굴절되어 투과되는 전기장의 비율은 식 2-4로 표현된다.

$$t_{12}^p = \frac{E_t^p}{E_i^p} = \frac{2\tilde{N}_1 \cos \theta_2}{\tilde{N}_2 \cos \theta_1 + \tilde{N}_1 \cos \theta_2}$$

$$t_{12}^s = \frac{E_t^s}{E_i^s} = \frac{2\tilde{N}_1 \cos \theta_1}{\tilde{N}_1 \cos \theta_1 + \tilde{N}_2 \cos \theta_2}$$

식 2-4

2.1.3. 단층 막에서의 반사

단층 막에서의 빛의 반사는 그림 2-4에서 보는 것과 같이 복잡하게 이루어진다. 공기에서 필름으로 입사한 빛은 일부가 반사되고 일부가 투과된다. 투과된 빛은 필름과 기판(substrate)의 경계에서 다시 반사되거나 기판으로 투과된다. 공기와 필름의 경계로 반사된 빛은 다시 공기로 투과되거나 필름으로 반사되며, 공기로 투과된 빛은 처음에 반사된 빛과 합쳐진다. 이런 과정을 무한히 반복하며 단층 막에서 최종적으로 반사되는 전기장의 비율을 최종 반사 계수(total reflection coefficient)라 하며, 식 2-5와 같이 표현된다.

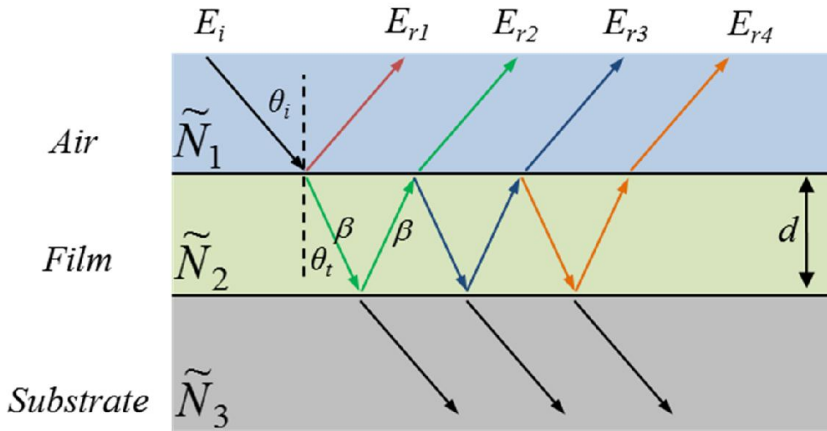


그림 2 - 4 단층 막에서의 빛의 반사

$$R^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \exp(-j2\beta)}{1 + r_{12}^p r_{23}^p \exp(-j2\beta)}$$

$$R^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(-j2\beta)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(-j2\beta)}$$

식 2-5

where

$$\beta = kd\tilde{N}_2 \cos\theta_t, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

이 때, r 은 프레넬 반사 계수, β 는 빛이 필름을 지날 때 발생하는 위상 변화량으로 첫 번째 경계 면에서 투과된 빛이 두 번째 경계 면에서 반사되어 다시 공기로 투과되기까지 2번의 위상 변화를 거치기 때문에 2β 만큼의 위상 변화량을 가진다.

반사되는 빛의 세기(intensity)는 자기장 크기의 제곱에 비례하므로, 반사된 빛의 세기와 입사된 빛의 세기 비율인 반사도(reflectance, \mathfrak{R})는 최종 반사 계수의 크기의 제곱으로 정의된다. 특히 수직 입·반사를 가정하면 p파와 s파가 같아지고 반사도는 식 2-6으로 나타난다.

$$\mathfrak{R} = |R|^2 = \left| \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-j2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-j2\beta)} \right|^2 \quad \text{식 2-6}$$

2.1.4. 다층 막에서의 반사

그림 2-5와 같이 단층 막이 아닌 다층 막으로 구성되어 있는 경우에는 단층 막에서의 최종 반사 계수를 이용하여 다층 막의 최종 반사 계수를 계산 할 수 있다. 식 2-7과 같이 첫 번째 매질을 제외한 막 구성에서의 최종 반사 계수는 식 2-7과 같이 나타나며, 이를 이용하여 계산한 다층 막의 최종 반사 계수는 식 2-8과 같이 표현된다.

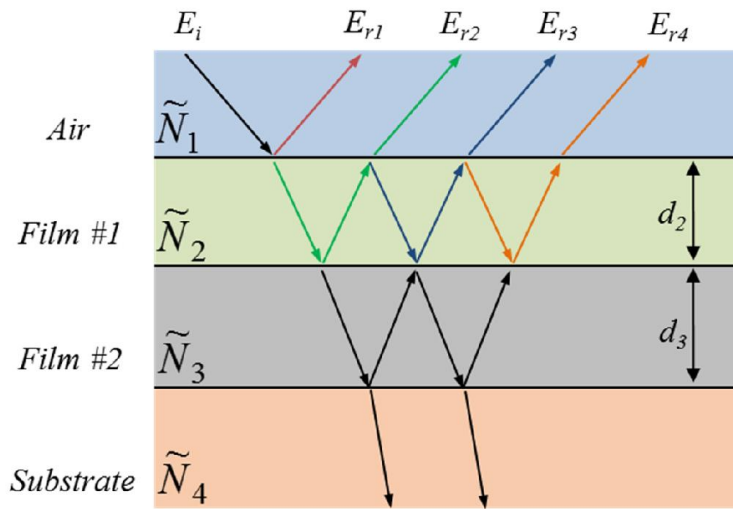


그림 2 - 5 다층 막에서의 빛의 반사

$$r_{234} = \frac{r_{23} + r_{34} \exp(-j2\beta_3)}{1 + r_{23}r_{34} \exp(-j2\beta_3)} \quad \text{식 2-7}$$

where $\beta_3 = kd_3\tilde{N}_3 \cos \theta$

$$R = r_{1234} = \frac{r_{12} + r_{234} \exp(-j2\beta_2)}{1 + r_{12}r_{234} \exp(-j2\beta_2)} \quad \text{식 2-8}$$

where $\beta_2 = kd_2\tilde{N}_2 \cos \theta$

이와 같이 다층 막으로 구성되어 있는 경우에는 위와 같은 과정으로 계산할 수 있지만, 일반적으로는 산란 행렬(scattering matrix, \bar{S})의 형태로 표현한다. 산란 행렬은 매질 경계에서의 작용을 나타내는 계면 행렬(interface matrix, \bar{I})과 필름에서의 작용을 나타내는 층 행렬(layer matrix, \bar{L})로 정의하며, 산란 행렬은 아래와 같이 표현된다.

$$\bar{S} = \bar{I}_{01} \bar{L}_1 \bar{I}_{12} \bar{L}_2 \cdots \bar{L}_N \bar{I}_{N,N+1} \quad \text{식 2-9}$$

$$\bar{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} : \text{Scattering matrix} \quad \text{식 2-10}$$

$$\bar{I}_{ab} = \frac{1}{t_{ab}} \begin{pmatrix} 1 & r_{ab} \\ r_{ab} & 1 \end{pmatrix} : \text{Interface matrix} \quad \text{식 2-11}$$

$$\bar{L}_c = \begin{pmatrix} \exp(j\beta_c) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta_c) \end{pmatrix} : \text{Layer matrix} \quad \text{식 2-12}$$

이 때, a, b, c는 각 매질을 의미하며, 다층 막에 의한 최종 반사 계수는 식 2-13과 같이 산란 행렬의 원소값 비율로 나타난다.

$$R = \frac{S_{21}}{S_{11}} \quad \text{식 2-13}$$

2.2. 간섭 신호 이론

간섭계는 하나의 광원에서 나온 빛을 광 분할기 (beam splitter, BS)를 이용하여 두 개의 경로로 분할한 후 다시 합쳤을 때 발생하는 간섭 현상을 이용하여 시료의 표면 형상을 측정하는 장비이다. 그림 2-6에서 보는 것과 같이 광원에서 나온 전기장을 E_i , 시료에서 반사되는 전기장을 E_{obj} , 기준 거울에서 반사되는 전기장을 E_{ref} 라 하면 식 2-14와 같이 표현 할 수 있다.

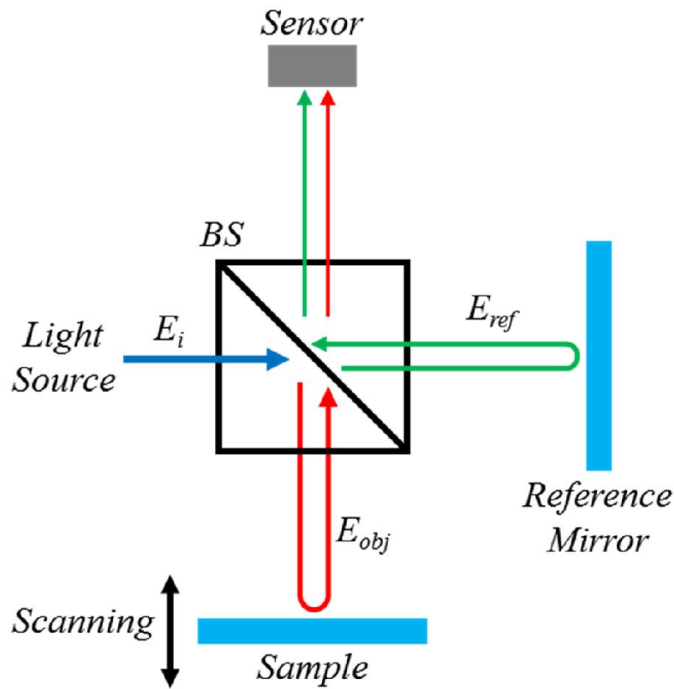


그림 2 - 6 간섭계의 원리

$$\begin{aligned}
 E_{ref} &= E_i \rho (1 - \rho) |r_{ref}| \exp[j(2kl + \varphi_{ref})] \\
 E_{obj} &= E_i \rho (1 - \rho) |r_{obj}| \exp[j(2k(l + h - z) + \varphi_{obj})]
 \end{aligned}
 \tag{2-14}$$

이 때, ρ 는 광 분할기의 투과율, $|r|$ 은 기준 거울과 시료의 프레넬 반사 계수의 크기, l 은 공통 경로(common path), h 는 시료의 표면 형상인 높이, z 는 스캐너의 위치, k 는 파수(wave number, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$), ϕ 는 기준 거울과 시료에서 반사 될 때 발생하는 위상 변화량을 뜻한다.

센서를 통해 측정 가능한 물리양인 빛의 세기는 전기장의 크기의 제곱에 비례하므로 식 2-15와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
 I(z, k) &= (E_{ref} + E_{obj}) (\bar{E}_{ref} + \bar{E}_{obj}) \\
 &= (E_i \rho (1 - \rho))^2 \left[|r_{ref}|^2 + |r_{obj}|^2 \right] \\
 &\quad + (E_i \rho (1 - \rho))^2 \left[2r_{ref} r_{obj} \right] \cos[2k(h - z) + \Delta\phi] \\
 &= A(k) + B(k) \cos\phi(k)
 \end{aligned}
 \tag{식 2-15}$$

A 와 B 그리고 ϕ 는 모두 k 에 관한 함수로 각각 배경 광과 가시도의 크기, 위상을 뜻하며, E_{obj} 와 E_{ref} 각 전기장이 이동한 경로차(optical path difference, OPD)인 $(h - z)$ 에 의해 보강 및 상쇄 간섭이 결정되어 획득되는 빛의 세기가 달라져 간섭 무늬 형상이 나타난다. OPD를 변경하며 간섭 신호를 획득하여 높이를 측정한다.

2.3. 측정 방법

2.3.1. 두께 측정 방법

두께를 측정하는 장비로는 타원계 (ellipsometry)와 분광 반사계 (spectroscopic reflectometry)가 많이 활용 되고 있다. 타원계는 매우 얇은 막의 두께 측정도 가능하지만 장비의 구성이 복잡하고 측정에 오랜 시간이 걸린다. 따라서 수십 nm 이하의 얇은 막을 정밀하게 측정해야 하는 상황에는 타원계가 많이 활용되고 있다. 반면에 반사계는 구성이 매우 간단하고 측정 속도가 타원계에 비해 빠르기 때문에 100 nm 이상의 두께를 측정 할 때 주로 사용되고 있다.

분광 반사계는 두께를 측정하기 위해 시료의 파장에 따른 반사도를 획득하여야 한다. 반사도는 입사광의 세기와 반사광의 세기의 비율이므로 두 가지를 각각 측정하여야 한다. 입사광의 세기를 측정하는 다양한 방법이 있지만 시스템 구성이 복잡해지기 때문에 입사광을 직접 측정하지 않고 반사도를 알고 있는 기준 시료(reference sample)의 반사광의 세기(I_{ref})를 획득한 후 측정하고자 하는 시료의 반사광 세기(I_{sample})를 획득하여 식 2-16과 같이 반사도를 획득한다.

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_{sample} &= \frac{(E_r)_{sample}}{E_i} = \frac{I_{sample}}{I_{ref}} (\mathfrak{R}_{ref})_{modeling} \\ &= \frac{(E_r)_{sample}}{\frac{E_i}{(E_r)_{ref}}} (\mathfrak{R}_{ref})_{modeling} \end{aligned} \quad \text{식 2-16}$$

기준 시료와 측정하고자 하는 시료의 반사광 세기를 각각 획득한 후, 두 빛의 세기의 비율에 기준 시료의 반사도 모델링 값($(R_{ref})_{modeling}$)을 곱하여 측정하고자 하는 시료의 반사도를 복원한다. 복원된 파장 별 반사도는 그림 2-7과 같다.

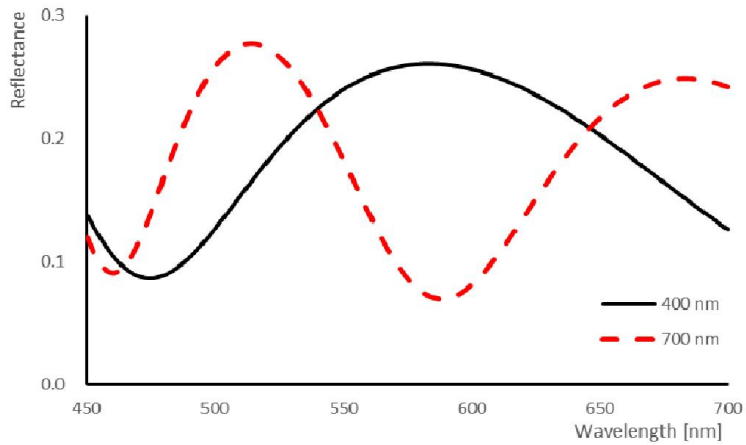


그림 2 - 7 복원된 반사도

일반적으로 반사도는 파장에 따른 비 선형성을 가지며 막의 두께가 두꺼워 질수록 비 선형성이 커져 최고점(peak)과 최저점(valley)의 개수가 늘어난다. 또한 기질과 필름의 굴절률 차이가 커질수록 반사도의 크기가 커진다.

복원한 반사도를 이용하여 두께를 측정하는 방법은 비 선형 최소자승법(non-linear least square fitting) 방법이 널리 활용되고 있다. 이 방법은 그림 2-8과 같이 복원된 반사도를 두께에 따라 모델링한 반사도와 비교하여 가장 유사한 모델링을 찾아 두께를 측정하는 방법이다.

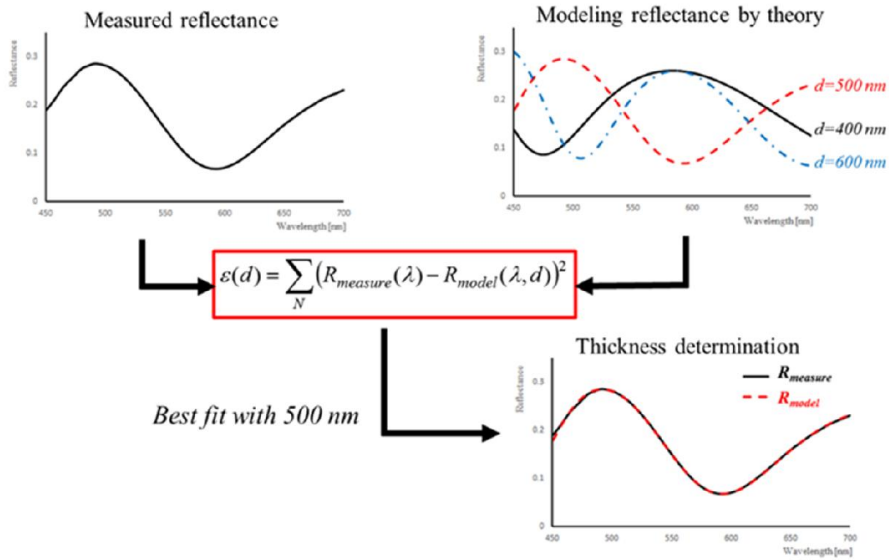


그림 2 - 8 비 선형 최소 자승법을 이용한 두께 측정

비 선형 최소 자승법을 풀기 위해 Levenberg-Marquardt Algorithm(LMA)이 가장 흔히 사용된다. 이 방법은 빠르고 안정적으로 최적값을 찾을 수 있지만 지역 최소값(local minimum)으로 수렴하는 문제가 발생 할 수 있기 때문에 초기값 설정에 주의가 필요하다.

2.3.2. 높이 측정 방법

표면 형상인 높이를 측정하는 장비는 스타일러스 프로파일러(stylus profilometry)와 간섭계(interferometry)가 많이 활용되고 있다. 프로파일러는 프로브를 직접 시료의 표면에 접촉하여 표면 형상을 측정하는 장비로, 시료의 재질에 상관없이 정확한 표면 형상을 측정하는 것이 가능하지만 시료에 직접 접촉하기 때문에 시료에 손상을 줄 수 있고 한번 측정으로 하나의 라인에 대한 측정만 가능하기 때문에 미세 패턴의 전체 형상을 측정하기 위해서는 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다. 반면에 간섭계는 시료에서 반사되는 빛을 이용하여 표면 형상을 측정하기 때문에 시료를 손상시키지 않고 빠르게 측정할 수 있다는 장점이 있어 다양한 분야에 활용되고 있다.

2.3.2.1. 위상 천이 간섭계(Phase Shifting Interferometry, PSI)

PSI는 광원으로 단파장인 레이저를 사용하고, Z축 방향으로 주사하며 간섭 신호의 변화를 관찰하여 높이를 측정하는 방법이다. 식 2-15를 간단히 정리한 식 2-7에서 Z값을 변경하며 빛의 세기(intensity)를 획득한다. 일반적으로 압전 구동기를 이용하여 위상 값을 $\frac{2\pi}{3}$ 혹은 $\frac{\pi}{2}$ 씩 변경하며 한번의 주기에 3개 혹은 4개의 빛의 세기를 얻어 위상을 복원하고 높이를 측정한다.

$$I(x, y, z) = A + B \cos \left[2 \frac{2\pi}{\lambda} (h(x, y) - z) \right] \quad \text{식 2-17}$$

널리 사용되는 5-bucket[11] 방법은 일정한 간격 Δ 으로 획득한 5개의 세기로 식 2-18과 같이 위상을 복원한다.

$$\begin{aligned} I_{-2} &= A + B \cos(\phi_0 - 2\Delta) \\ I_{-1} &= A + B \cos(\phi_0 - \Delta) \\ I_0 &= A + B \cos(\phi_0) \\ I_1 &= A + B \cos(\phi_0 + \Delta) \\ I_2 &= A + B \cos(\phi_0 + 2\Delta) \end{aligned} \quad \text{식 2-18}$$

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{2(I_{-1} - I_1)}{2I_0 - I_{-2} - I_2} \frac{1}{\sin \alpha} \right)$$

$$\text{where } \sin \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{-2} - I_2}{2(I_{-1} - I_1)} \right)^2}$$

복원된 위상을 이용하여 식 2-19와 같이 높이를 계산 할 수 있으며 가시광 영역을 파장을 광원으로 사용하면 높이 분해능이 sub-nm로 매우 뛰어나다.

$$h(x, y) - z_0 = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_0 \quad \text{식 2-19}$$

하지만 복원된 위상 ϕ_0 은 $-\pi$ 에서 π 사이의 값으로 구해지기 때문에 실제 위상 ϕ 과 다르며, 두 위상의 관계는 아래 식과 같다.

$$\phi = \phi_0 + 2m\pi (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \text{식 2-20}$$

이 때, m 은 간섭무늬 차수 (fringe order) 로 정수 값을 가진다. PSI에서는 간섭무늬 차수를 구할 수 없기 때문에 측정 데이터 간의 상대적인 높이 차이만 측정할 수 있으며, 위상 차이가 π 이상인 상대 높이가 $\frac{\lambda}{4}$ 이상의 단차를 측정할 수 없는 위상 모호성 (phase ambiguity) 이 존재한다. 따라서 PSI는 단차가 낮은 매끄러운 표면 형상 측정에 활용되고 있다.

2.3.2.2. 백색광 주사 간섭계(White-light Scanning Interferometry, WSI)

백색광 주사 간섭계는 광원으로 단파장의 레이저가 아닌 그림 2-9과 같이 다양한 파장을 모두 포함하고 있는 할로겐 램프 혹은 백색 LED를 사용한다.

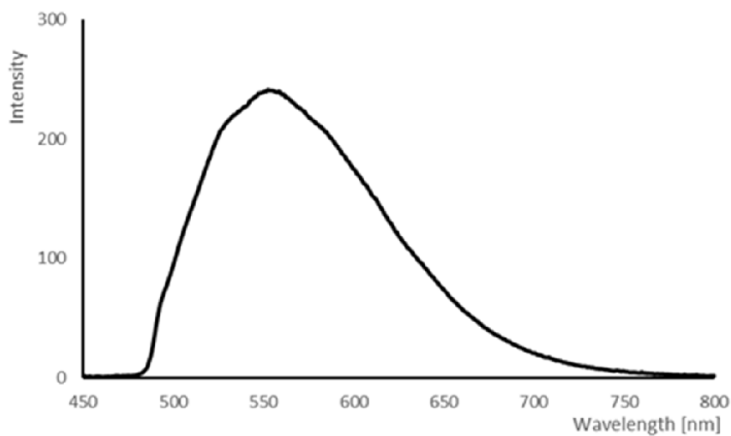


그림 2 - 9 백색 LED의 파장 분포

백색 광원은 다양한 파장을 모두 포함하고 있으므로 WSI로 획득한 간섭 신호는 앞서 설명한 PSI의 합으로 표현 할 수 있다. 그림 2-10에서 보듯이 백색광 간섭 신호는 단파장 간섭 신호와 다르게 $2 \mu\text{m}$ 이내로 짧은 범위에서만 간섭 신호가 나타난다. 이는 모든 단파장 간섭 신호의 위상이 0이 되는 위치, 즉 OPD가 0인 위치에서 모든 단파장 간섭 신호의 보강 간섭이 일어나고 OPD가 $1 \mu\text{m}$ 이상 커지면 서로 상쇄되기 때문이다. WSI는 이런 백색광의 짧은 간섭성을 이용하여 간섭 신호의 크기가 가장 큰 위치, 즉 OPD가 0인 위치를 찾아 높이를 측정하는 방법이다.

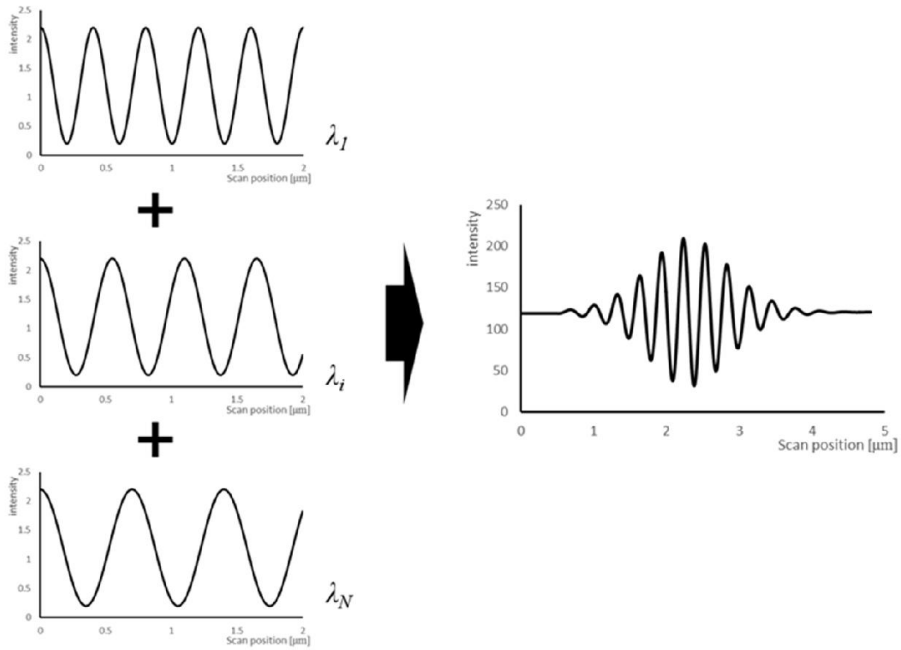


그림 2 - 10 백색광 간섭 신호

백색광 간섭 신호는 식 2-21과 같이 파장 범위내의 단파장 간섭 신호의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 I(z) &= \int_{\lambda} F(\lambda) \left(A(\lambda) + B(\lambda) \cos \left[2 \frac{2\pi}{\lambda} (h-z) \right] \right) d\lambda \\
 &= I_{DC}(z) + \gamma(z) \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda_c} (h-z) \right]
 \end{aligned}
 \tag{식 2-21}$$

이 때, $F(\lambda)$ 는 광원의 파장 별 빛의 세기, I_{DC} 는 배경광의 크기, γ 는 가시도 함수(visibility function), λ_c 는 광원의 중심 파장이다.

높이를 측정하기 위해서는 백색광 간섭 신호로부터 가시도 함수를 계산하여 정점의 위치를 찾아야 하는데, 위상을 $\frac{\pi}{2}$ 만큼 변화 시키며 얻은 5개의 빛의 세기를 이용한 Larkin modulus 방법[29]이 널리

사용되며 식 2-22와 같이 계산 할 수 있다.

$$\gamma = \frac{(I_{-1} - I_1)^2 \sqrt{4(I_{-1} - I_1)^2 - (I_{-2} - I_2)^2 + (2I_0 - I_{-1} - I_1)^2}}{4(I_{-1} - I_1)^2 - (I_{-2} - I_2)^2} \quad \text{식 2-22}$$

이 때, 가시도 함수를 구하기 위해 사용된 5개의 빛의 세기의 가시도 크기는 동일하다고 가정한다. 추가적으로 식 2-23과 같이 가시도의 제곱 값이 특정 값에 비례하는 것을 이용하여 연산량을 줄여 사용하기도 한다.

$$\gamma^2 \propto (I_{-1} - I_1)^2 - (I_{-2} - I_0)(I_0 - I_2) \quad \text{식 2-23}$$

계산된 가시도 함수는 그림 2-11과 같이 나타나며, 최고점의 위치를 찾음으로써 높이를 측정 할 수 있다. 따라서 PSI와 같은 위상 모호성 문제가 없어 높은 단차 측정이 가능하다. 하지만 주사 간격(scan interval)이 수십 nm이기 때문에 측정 분해능이 10 nm정도로 PSI에 비해 떨어진다.

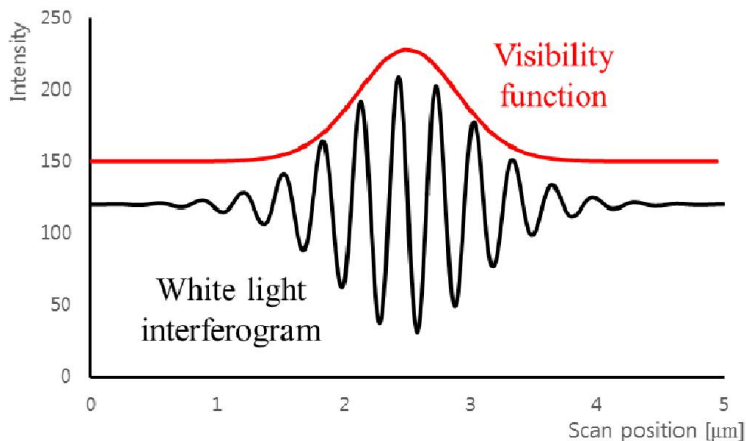


그림 2 - 11 백색광 간섭 신호와 가시도 함수

2.3.2.3. 백색광 위상 천이 간섭계(White Light Phase Shifting Interferometry, WLPSI)

WLPSI는 WSI와 PSI를 결합한 것으로, 광원으로 백색광을 사용하고 주사 간격을 광원의 중심 파장의 1/4로 하여 기존의 WSI와 PSI 알고리즘을 그대로 활용한다. 백색광 간섭 신호를 획득한 후 가시도 함수의 최고점 위치를 찾고, 위상을 복원하여 위상 정점을 찾는다. 이 방법은 WSI를 이용하여 간섭무늬 차수를 결정하고, PSI를 이용하여 정밀한 높이를 측정하는 것으로 이해 할 수 있으며 식 2-24와 같이 높이를 계산한다.

$$h_{WLPSI} = h_{WSI} - \frac{\phi_{PSI}}{2\pi} \lambda_c \quad \text{식 2-24}$$

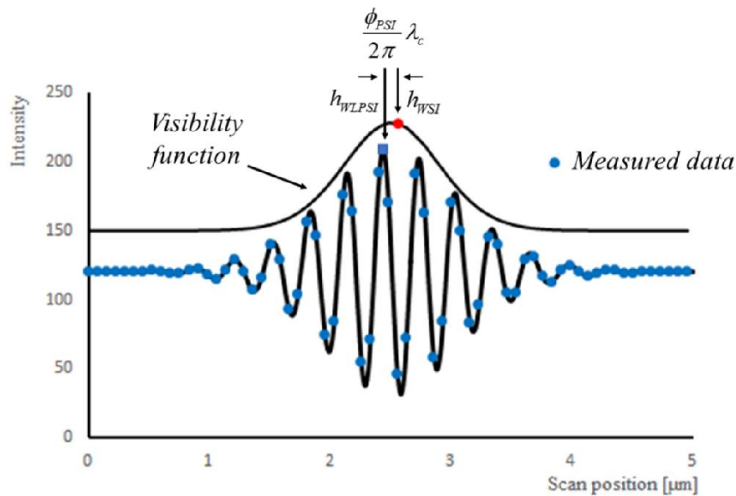


그림 2 - 12 백색광 위상 천이 간섭계 높이 측정 방법

2.3.2.4. 주파수 영역 분석법(Frequency Domain Analysis, FDA)

주파수 영역 분석법은 광원으로 백색광을 사용한다는 점에서는 WSI와 동일하지만 백색광 간섭 신호에서 OPD가 0인 위치를 찾는 것이 아니라 각 단파장 간섭 신호의 위상을 복원하여 높이를 측정하는 방법[26]이다. 식 2-25와 같이 Z축 방향 주사를 통해 얻은 백색광 간섭 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 주파수 영역으로 변환하여 각 단파장의 위상을 복원한다.

$$I(u) = I_{DC}\delta(u) + FT(\gamma(z)) \times FT(\cos[2k(h-z)]) \quad \text{식 2-25}$$

복원된 위상은 그림 2-13에서 보는 것과 같이 파수(wave number, k)와 높이 h 에 선형적인 관계를 가지기 때문에 높이를 식 2-26과 같이 계산 할 수 있다.

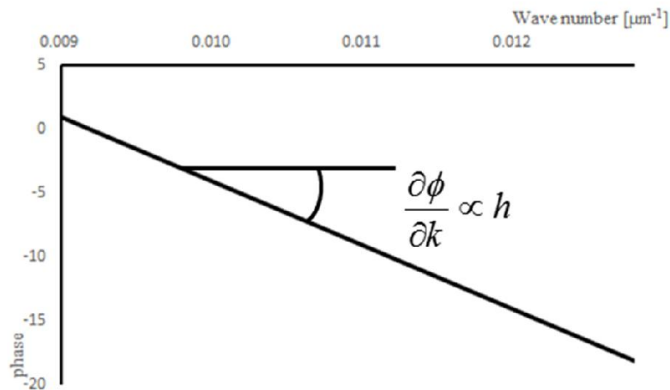


그림 2 - 13 푸리에 변환으로 복원된 파장 별 위상

$$h_{FDA} = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial \phi}{\partial k} \right| \quad \text{식 2-26}$$

2.3.2.5. 칼라 간섭계(Color interferometry, 3-PSI)

칼라 간섭계는 백색광 간섭계에서 데이터 획득에 사용되는 카메라를 흑백 카메라(black-white camera)에서 칼라 카메라(color camera)로 변경한 것이다. 칼라 카메라는 기존의 흑백 카메라 앞에 Red, Green, Blue에 해당하는 칼라 필터(color filter)가 있어, 센서에서는 필터에 해당하는 파장의 빛만 획득된다. 따라서 광원으로 백색광을 사용하더라도 다파장 위상 천이 간섭계(multi-wavelength phase shifting interferometry)와 유사한 결과를 얻을 수 있다. RGB 각 파장의 간섭 신호를 얻은 후 PSI에서 사용한 5-bucket 방법을 이용하여 복원한 위상은 그림 2-14과 같다.

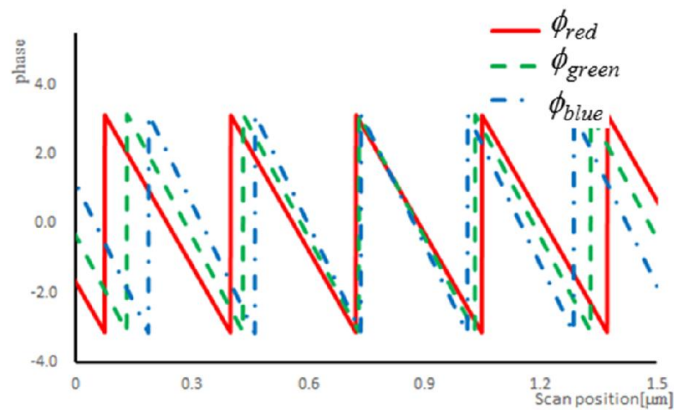


그림 2 - 14 칼라 간섭계에서 복원한 위상

RGB 위상으로부터 식 2-27과 그림 2-15와 같이 오차가 가장 작은 위치를 찾음으로써 간섭무늬 차수를 구하여 높이를 측정 할 수 있다. 이 방법은 위치에 선형적인 위상을 이용하여 높이를 측정하기 때문에 높이에 비 선형적인 가시도 함수를 이용하여 높이를 구하는 백색광 간섭계보다 정확하고 안정적인 결과를 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = |\phi_R - \phi_G| + |\phi_G - \phi_B| + |\phi_B - \phi_R| \quad \text{식 2-27}$$

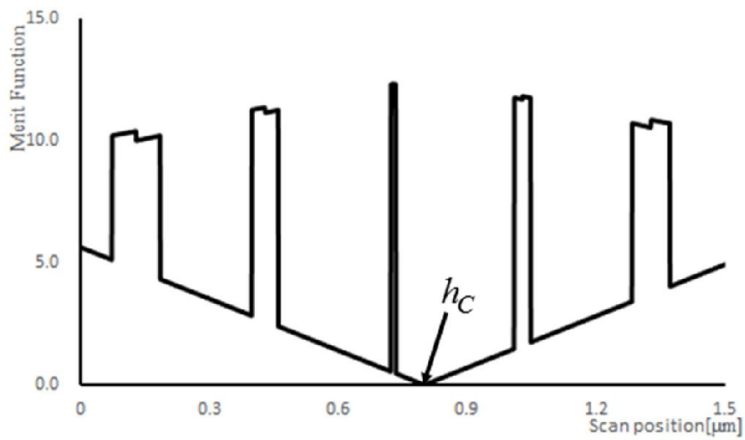


그림 2 - 15 3-PSI를 이용한 높이 측정 방법

2.3.3. 간섭계를 이용한 두께 측정 방법

1999년 백색광 주사 간섭계를 이용하여 높이와 두께를 동시에 측정하는 방법[86]이 제안된 이후 간섭계를 이용하여 두께를 측정하거나, 높이와 두께를 동시에 측정하는 방법에 관한 다양한 연구들이 진행되었다. 단파장 간섭 신호는 식 2-15에서 볼 수 있듯이 배경광 $A(k)$, 가시도 크기 $B(k)$, 그리고 위상 ϕ 으로 구성된다. 시료의 표면에 투명 박막이 있는 경우에 식 2-28과 같이 배경광, 가시도 크기, 위상 모두 박막의 영향을 받아 간섭 신호의 형상이 변한다.

$$\begin{aligned}
 I(z, k) &= (E_{ref} + E_{obj}) (\bar{E}_{ref} + \bar{E}_{obj}) \\
 &= (E_i \rho (1 - \rho))^2 \left[|r_{ref}|^2 + |r_{obj}|^2 \right] \\
 &\quad + (E_i \rho (1 - \rho))^2 \left[2r_{ref} r_{obj} \right] \cos \left[2k(h - z) + \phi_{ref} - \phi_{obj}(k) \right] \\
 &= A(k) + B(k) \cos \phi
 \end{aligned}$$

식 2-28

배경광과 가시도의 크기는 박막의 영향만 받으며, 위상은 높이와 박막의 영향을 모두 받는다. 그렇기 때문에 위상을 이용하여 높이와 두께를 동시에 측정하려는 연구들[85-118]이 다양하게 진행 되었다. 1999년 Kim.S.W가 제안한 방법은 백색광 간섭신호를 푸리에 변환을 이용하여 파장 별 위상을 복원한 후 이를 이용하여 그림 2-16과 같이 박막의 두께와 표면 형상인 높이를 변수로 하는 위상 모델링과 비 선형 최소 자승법으로 높이와 두께의 최적 값을 계산하였다. 이 방법은 높이와 두께를 모두 변수로 가지기 때문에 최적 값을 찾기 위한 연산 시간이 오래 걸리고, 초기값에 더욱 민감한 단점이 있다.

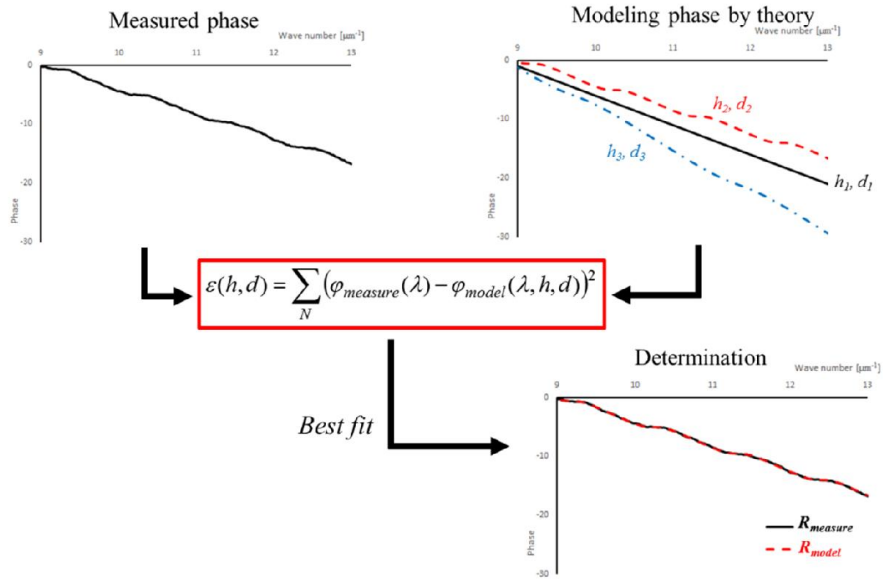


그림 2 - 16 위상 모델링을 통한 높이와 두께 측정 방법

2006년에 제안된 HCF를 이용한 방법 [89-96]은 위상뿐 아니라 가시도의 크기 즉, 반사 계수의 크기와 위상을 모두 이용하여 두께를 측정하였다. 앞서 설명한 것과 같이 가시도의 크기는 두께의 영향만 받지만 위상을 두께와 높이에 모두 영향을 받기 때문에 위상으로부터 두께 성분을 분리하는 과정이 필요하다. 식 2-28에서 볼 수 있듯이 위상은 높이와 두께 성분을 모두 포함하고 있지만, 높이는 선형성만 가지고 있다. 반면에 두께는 그림 2-17에서 보듯이 선형과 비 선형성을 모두 가지고 있기 때문에 위상에서 비 선형성만 분리하면 두께에만 영향을 받는 성분만 추출 할 수 있다. 이 방법은 가시도의 크기와 분리된 위상의 비 선형성을 이용하여 모델링을 통한 비 선형 최소자승법으로 두께를 측정한다. 크기와 위상 즉, 복소수를 모두 이용하기 때문에 다른 측정 방법보다 안정적인 측정이 가능하다.

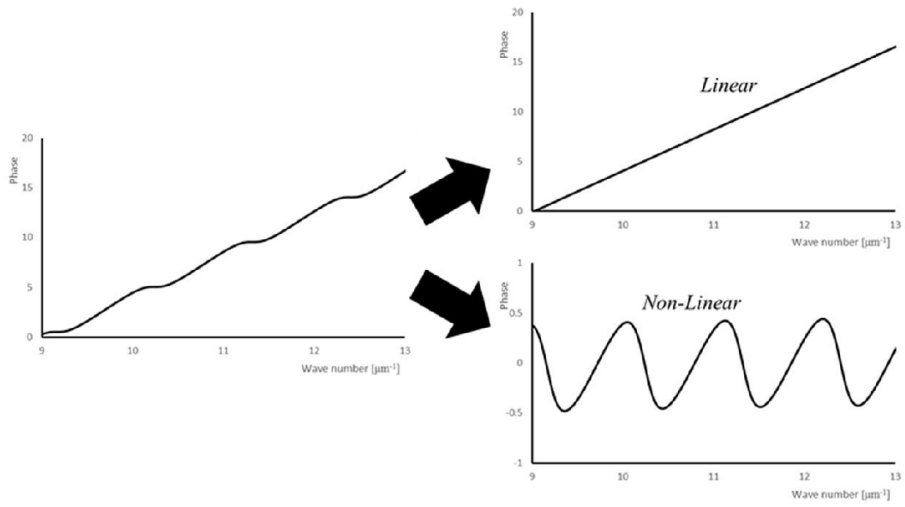


그림 2 - 17 두께 성분 위상의 선형성과 비 선형성

Chapter 3. 투명 박막의 영향

3.1. 투명 박막의 영향

시료의 표면에 박막이 있으면 박막에 의한 다중 반사 때문에 간섭 신호의 형태가 변한다. 그림 3-1과 같이 시료의 표면에서 반사되는 빛과 박막을 투과한 후 반사되는 빛, 그리고 기준 거울에서 반사되는 빛이 모두 합쳐져 간섭 신호가 형성되기 때문에 박막이 없을 때와 다른 형태의 간섭 신호가 나타난다.

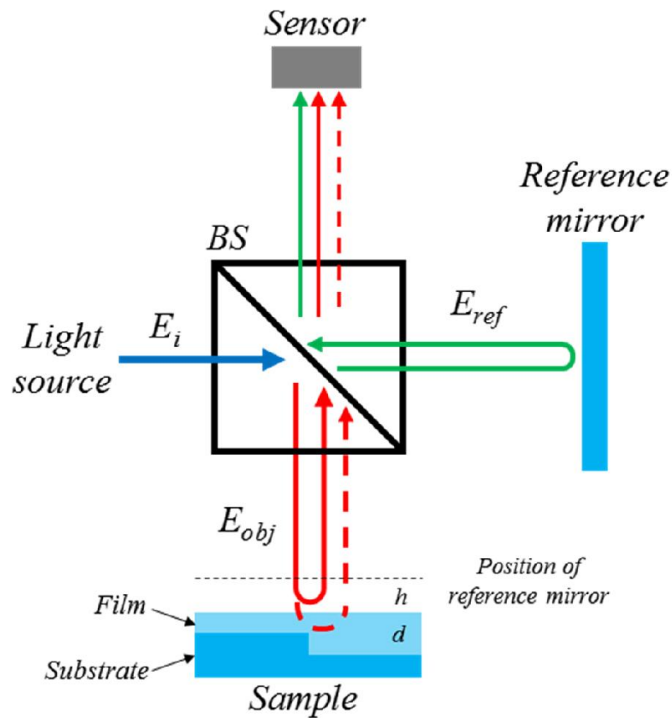


그림 3 - 1 박막이 있을 때의 간섭 신호

단파장 간섭 신호는 식 3-1에서 보는 것과 같이 기준 거울의 반사 계수와 시료의 반사 계수 그리고 시료의 표면 형상에 영향을 받는다.

$$I_{mono}(z) = \left(|r_{ref}|^2 + |r_{obj}|^2 \right) + 2|r_{ref}||r_{obj}|\cos[2k(h-z) + \varphi_{ref} - \varphi_{obj}(k)] \quad \text{식 3-1}$$

식을 간단히 하기 입사광과 광 분할기와 관련된 항목은 생략하였다. 식 3-1에서 보듯이 기준 거울과 시료의 반사 계수의 크기가 배경광과 가시도의 크기에 영향을 주며, 각 반사 계수의 위상이 간섭 신호의 위상에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

백색광 간섭 신호는 파장 범위 내의 모든 단파장 간섭 신호가 합쳐진 것으로 식 3-2과 같이 표현된다

$$I_{white}(z) = \int_k F(k) I_{mono}(z, k) dk = \int_k F(k) \left(|r_{ref}|^2 + |r_{obj}|^2 \right) dk + \int_k 2F(k) |r_{ref}||r_{obj}|\cos[2k(h-z) + \varphi_{ref} - \varphi_{obj}(k)] dk \quad \text{식 3-2}$$

단파장 간섭 신호의 배경광이 합쳐져 백색광 간섭 신호의 배경광이 결정되고, 각 단파장 간섭신호의 위상에 따른 가시도 크기가 합쳐져 백색광 간섭 신호의 가시도 함수가 결정된다. 백색광 간섭 신호의 가시도 함수는 박막에 의한 가시도 크기의 변화와 위상 변화 모두의 영향을 받기 때문에 그 형상을 예측하거나 박막에 의한 영향을 분리하기 어렵다.

이와 같이 간섭 신호는 박막의 영향을 받는다. 따라서 기존의 측정 방법과 같이 시료의 재질과 박막의 두께를 고려 하지 않는 높이 측정 방법은 필연적으로 측정 오차가 발생한다.

3.1.1. 단파장 위상에의 영향

위상 천이 간섭계와 칼라 간섭계에 사용되는 단파장 위상은 그림 3-2와 같이 박막의 두께에 많은 영향을 받는다. 특히 이 방법은 측정 되는 위상이 $-\pi$ 에서 π 사이의 값을 가지는 위상 모호성이 존재하기 때문에, 박막의 위상 변화에 의한 측정 오차가 치명적으로 작용한다. 박막에 의한 위상 변화가 $-\pi$ 혹은 π 와 비슷할 경우 두 측정 지점의 두께 차이에 의한 실제 표면 형상은 수 nm로 매우 작지만 박막에 의한 영향으로 수백 nm의 측정 오차가 발생할 수도 있다. 그렇기 때문에 위상 천이 간섭계는 막 두께가 100 nm 이하로 매우 얇은 경우에는 측정 오차가 크지 않지만, 수백 nm의 두께에서는 측정 오차가 매우 커질 수 있는 문제가 있다.

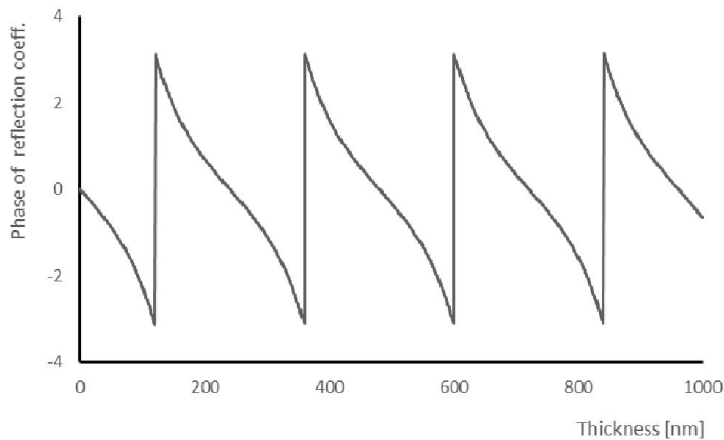


그림 3 - 2 박막 두께에 따른 단파장 위상 변화

3.1.2. 백색광 간섭 신호에의 영향

박막이 있을 때, 박막 두께에 따른 백색광 간섭 신호의 형태를 살펴보면 박막 표면의 간섭 신호와 박막을 투과한 후 기질과의 경계에서 반사되는 간섭 신호 2개가 겹쳐진 형태로 나타난다. 박막의 두께가 100 nm 이하인 초 박막에서는 간섭 신호에 큰 변화가 없지만, 박막의 두께가 200 nm 이상이면 눈에 띄는 변화가 나타나기 시작한다. 박막의 두께가 얇을 때는 2개의 간섭 신호가 겹쳐져 박막이 없을 때에 비해 폭이 두꺼워지고, 박막의 두께가 좀 더 두꺼워지면 서로 겹쳐진 부분이 상쇄되어 간섭 신호가 2개로 분리되어 보인다. 하지만 박막이 조금 더 두꺼워져 겹쳐진 부분이 보강되면 다시 폭이 넓은 하나의 간섭 신호처럼 보이는 현상이 나타나는 과정이 반복된다. 그 후 박막의 두께가 광원의 간섭 거리보다 두꺼워지면 분리된 2개의 간섭 신호가 나타난다. 그림 3-3은 막 두께에 따른 백색광 간섭 신호의 변화를 나타낸 것이다.

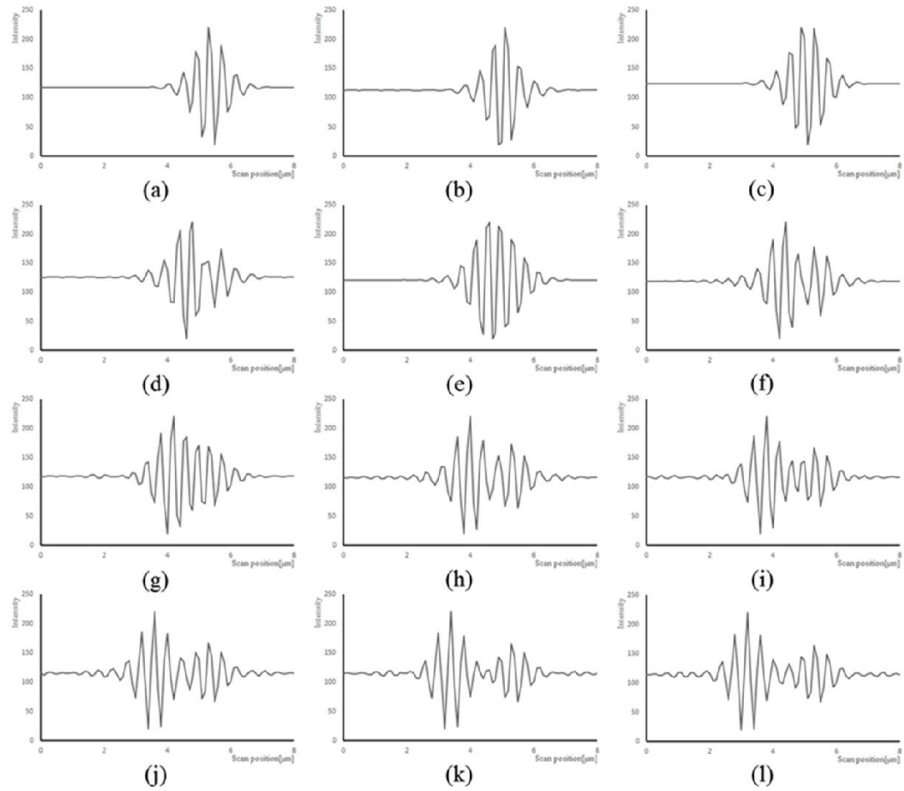


그림 3 - 3 박막 두께에 따른 백색광 간섭 신호 변화;

- (a) 0 nm, (b) 100 nm, (c) 200 nm, (d) 300 nm,
- (e) 400 nm, (f) 500 nm, (g) 600 nm, (h) 700 nm,
- (i) 800 nm, (j) 900 nm, (k) 1000 nm, (l) 1100 nm

3.1.3. 가시도 함수에의 영향

백색광 간섭계에 사용되는 가시도 함수도 백색광 간섭 신호와 마찬가지로 2개의 가시도 함수가 겹쳐진 것처럼 나타난다. 박막의 두께가 얇은 경우에는 큰 변화가 없지만 막이 두꺼워짐에 따라 가시도 함수의 폭이 두꺼워 지거나 2개의 가시도 함수가 겹쳐져 있는 형태로 나타난다. 특히 2개의 가시도 함수의 형태로 나타나면 가시도 함수의 최고점 위치가 앞으로 당겨지고, 폭이 두꺼운 형태로 나타날 때는 최고점 위치가 뒤로 미뤄진다. 박막의 두께에 따라 두 가지 형태가 번갈아 나타나기 때문에 가시도 함수를 이용하여 높이를 측정하는 방법은 박막의 두께에 크게 영향을 받는다. 또한 가시도 함수의 형태가 비 선형적이기 때문에 박막의 두께를 측정하거나 박막에 의한 영향을 분리 하기 어렵다. 그림 3-4는 박막의 두께에 따른 가시도 함수의 변화이다.

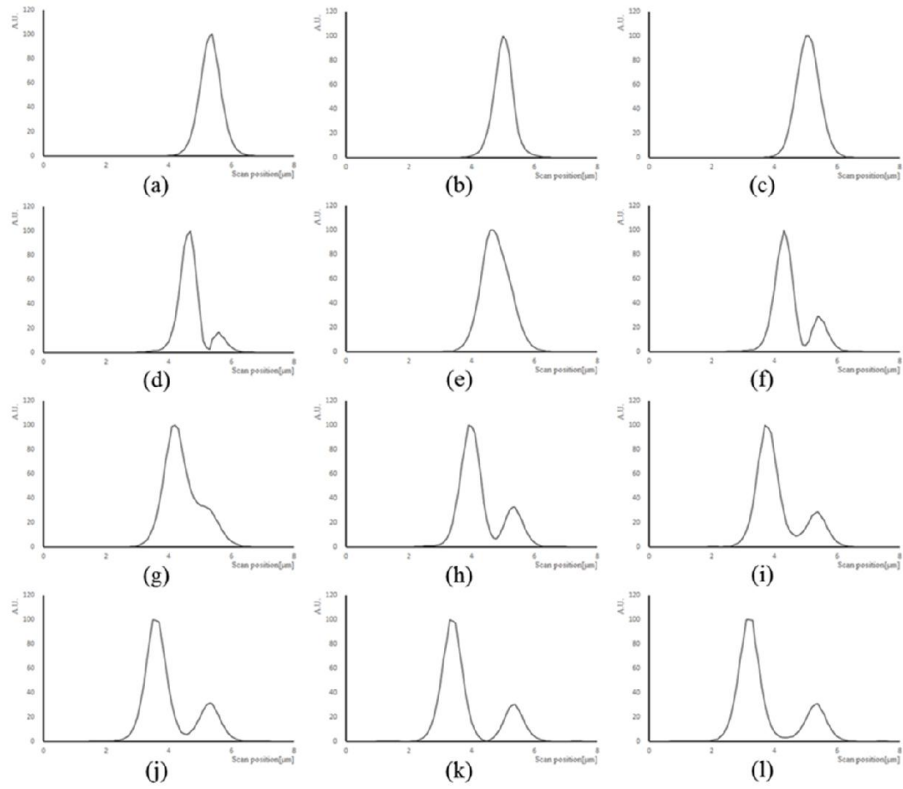


그림 3 - 4 박막 두께에 따른 가시도 함수 변화;
 (a) 0 nm, (b) 100 nm, (c) 200 nm, (d) 300 nm,
 (e) 400 nm, (f) 500 nm, (g) 600 nm, (h) 700 nm,
 (i) 800 nm, (j) 900 nm, (k) 1000 nm, (l) 1100 nm

3.1.4. 파장 별 위상에의 영향

주파수 영역 분석법에 사용되는 파장 별 위상 또한 박막의 영향을 받는다. 박막이 없을 때의 파장 별 위상은 선형적이지만 박막이 있을 때는 박막에 의한 위상 변화 ϕ 가 선형성과 비 선형성을 모두 포함하고 있기 때문에 선형적이지 않다. 박막에 의한 위상 변화의 선형성은 높이 측정에 직접적으로 영향을 주기 때문에 위상 변화의 선형성이 커지면 그에 따른 측정 오차가 커지게 되는데 위상 변화의 선형성은 박막의 두께가 두꺼워지면 커진다. 따라서 박막이 두꺼울 때 선형성에 의한 측정 오차가 커진다. 위상 변화의 비 선형성은 그 주파수가 높을 때는 높이 측정에 영향을 많이 주지 않지만 광원의 파장 범위보다 주파수가 낮을 때는 높이 측정 오차가 커진다. 박막의 두께가 얇을 때는 비 선형성의 주파수가 낮기 때문에 비 선형성에 의한 측정 오차가 크다. 즉, 박막의 두께가 얇을 때는 주로 위상 변화의 비 선형성에 의해 측정 오차가 발생하고, 박막의 두께가 두꺼울 때는 주로 위상 변화의 선형성에 의해 측정 오차가 발생한다. 그림 3-5는 박막의 두께에 따른 파장 별 위상의 변화이다.

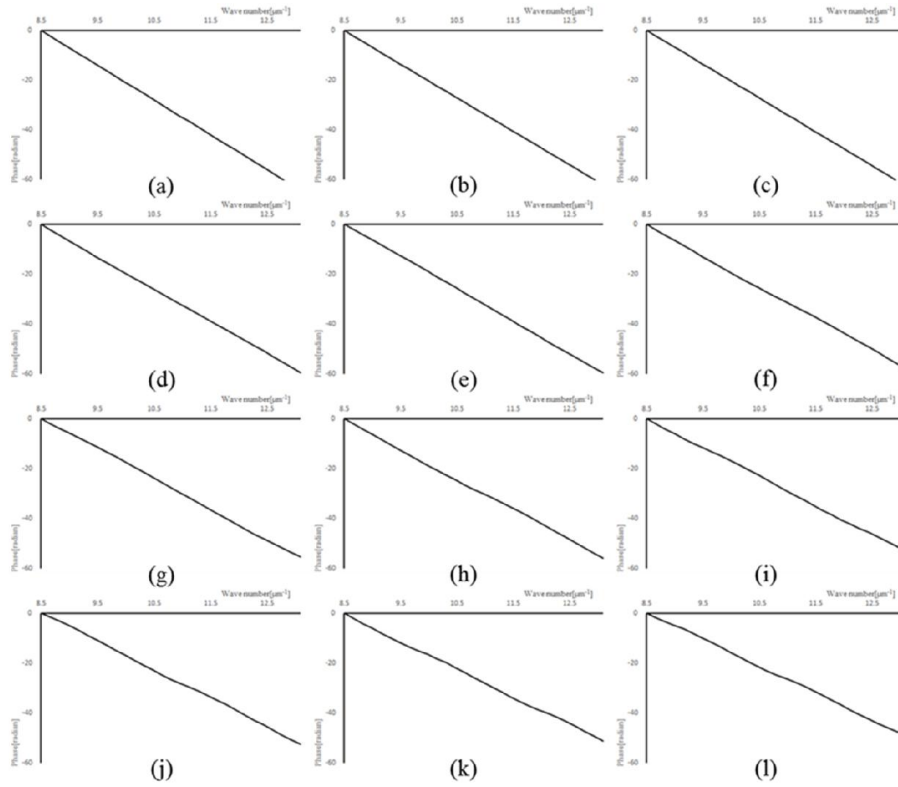


그림 3 - 5 박막 두께에 따른 파장 별 위상 변화;
 (a) 0 nm, (b) 100 nm, (c) 200 nm, (d) 300 nm,
 (e) 400 nm, (f) 500 nm, (g) 600 nm, (h) 700 nm,
 (i) 800 nm, (j) 900 nm, (k) 1000 nm, (l) 1100 nm

3.2. 박막에 의한 높이 측정 오차

앞 절에서 설명한 것과 같이 시료의 표면에 투명 박막이 존재 하면 투명 박막의 영향을 받아 간섭 신호가 왜곡되고 높이 측정 오차가 발생한다. WLPSI, FDA, 3-PSI와 같이 다양한 측정 방법이 있지만 모두 투명 박막의 영향을 고려하지 않기 때문에 높이 측정 오차가 발생한다.

WLPSI는 그림 3-6에서 보는 것과 같이 약 1 μm 까지는 박막의 영향을 많이 받지만 그 이상의 두께에서는 측정 오차가 작은 것을 알 수 있다. 이는 앞 절에서 설명한 것처럼 두께가 두꺼워짐에 따라 두 개의 간섭 신호가 분리되어 박막의 영향을 적게 받기 때문이다. 따라서 백색광 위상 천이 간섭계는 박막의 두께가 광원의 간섭 거리보다 두꺼우면 박막의 영향을 무시 할 수 있다.

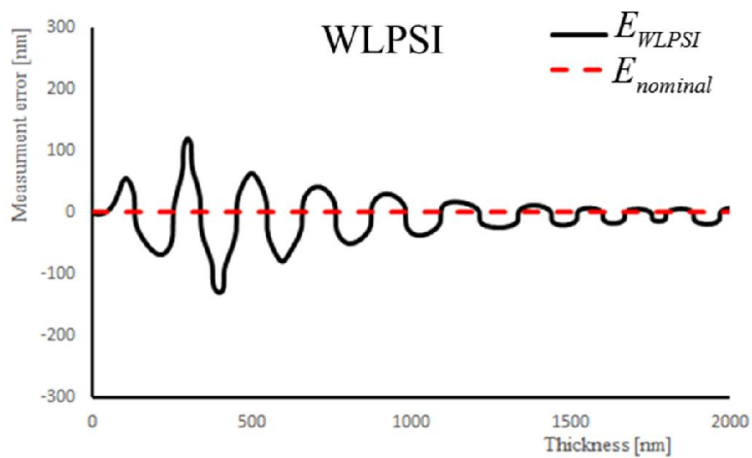


그림 3 - 6 백색광 위상 천이 간섭계의
막 두께에 따른 높이 측정 오차

그림 3-7에서 볼 수 있듯이 FDA의 측정 오차도 WLPSI와 비슷하게 약 1 μm 까지는 오차가 크지만 막 두께가 그 이상이면 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 WLPSI에 비해 박막이 두껍더라도 측정 오차가 크기 때문에 박막의 영향을 무시 할 수 없다. 이를 통해 박막에 의한 위상 변화의 선형성에 의한 측정 오차보다 비 선형성에 의한 측정 오차가 더 크다는 것을 알 수 있다.

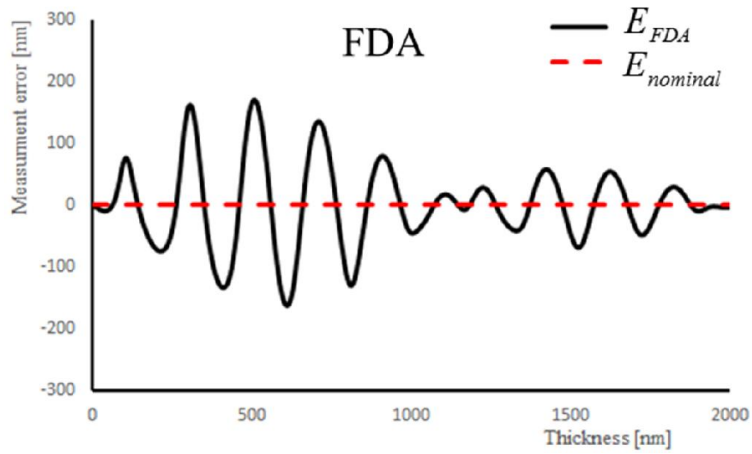


그림 3 - 7 주파수 영역 분석법의
막 두께에 따른 높이 측정 오차

그림 3-8과 같이 다 파장 간섭계는 박막이 두껍더라도 측정 오차가 매우 크며, 약 1 μm 까지의 측정 오차가 반복되는 형태인 것을 확인할 수 있다. 박막에 의한 위상 변화에 영향을 받는 단 파장 간섭 신호의 위상을 그대로 이용하기 때문에 박막의 두께가 두껍더라도 그 영향을 무시할 수 없다는 것을 알 수 있다.

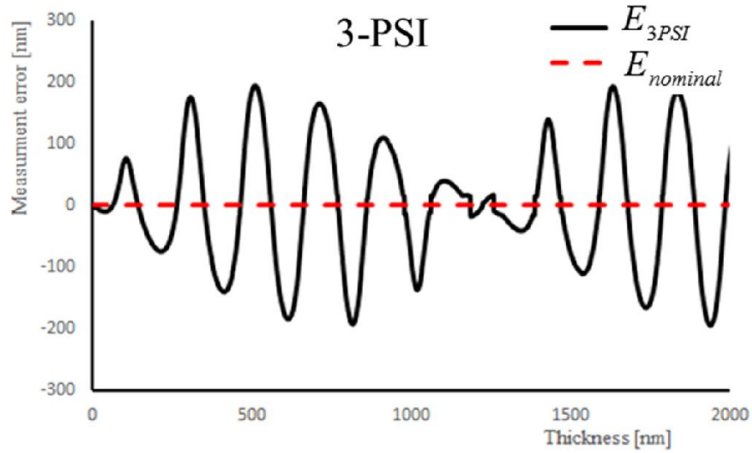


그림 3 - 8 다 파장 간섭계의
막 두께에 따른 높이 측정 오차

Chapter 4. 파장 별 성분 복원 방법

간접 신호로부터 파장 별 성분을 복원하여 높이와 두께를 측정 할 수 있다. 앞장에서 설명한 것처럼 파장 별 크기(spectra reflectance)는 박막의 두께에 영향을 받고, 파장별 위상(spectral phase)는 높이와 두께에 모두 영향을 받는다. 그렇기 때문에 파장 별 크기와 파장 별 위상을 복원하여 높이와 두께를 측정 할 수 있다. 이 장에서는 파장 별 성분을 복원하는 방법에 대해 설명한다.

4.1. 분광 방법(Spectral resolved method)

파장 별 성분을 복원하기 위해 분광 간섭계를 사용 할 수 있다. 분광 간섭계를 이용하면 파장 별 단파장 간섭 신호를 직접 획득 할 수 있기 때문에 파장 별 성분을 복원하기에 적합하다. 또한 파장 분해능이 뛰어나기 때문에 안정적인 측정 결과를 얻을 수 있다. 하지만 점 측정 혹은 라인 측정만 가능하기 때문에 미세 패턴의 형상을 측정하기에 적합하지 않다.

4.1.1. 시스템 구성

분광 간섭계는 그림 4-1과 같이 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그림 4-1(a)는 일반적인 분광 간섭계로 프리즘을 이용하여 백색광을 파장 별로 분광한다. 이 방법은 파장 분해능이 매우 뛰어나고 각 센서에서 획득되는 파장의 폭이 좁기 때문에 레이저와 유사한 준 단 파장 간섭 신호를 얻을 수 있다. 그림 4-1(b)는 칼라 카메라를 이용한 간섭계로 미러 간섭계에서 광학 부품을 추가하지 않고 흑백 카메라를 칼라 카메라로 교체하여 RGB 3가지에 해당하는 파장의 간섭 신호를 간단하게 획득 할 수 있다. 이 방법은 카메라 앞에 칼라 필터가 있어 각 센서에서 필터에 해당하는 파장 대역의 간섭 신호만 획득이 가능하다. 획득되는 파장의 폭이 넓고 파장 분해능이 매우 낮지만 전체 영역의 간섭신호를 모두 획득 할 수 있기 때문에 미세 패턴의 형상을 측정하기에 적합하다.

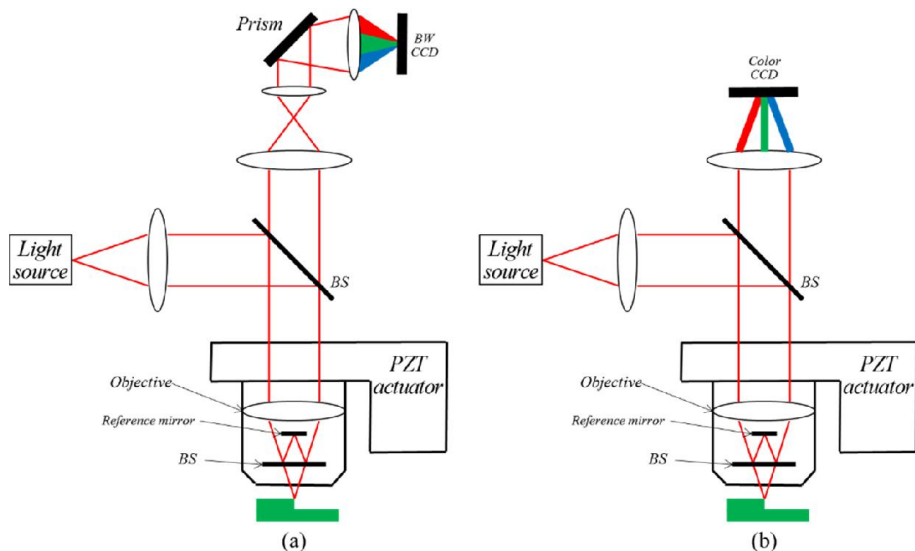


그림 4 - 1 백색광 분산형 간섭계;

(a) 프리즘을 이용한 분산 간섭계, (b) 칼라 간섭계

4.1.2. 파장 별 성분 복원 방법

분광 간섭계로 획득한 간섭 신호는 준 단파장 간섭 신호이기 때문에 간섭 신호의 배경광과 가시도 크기를 이용하여 파장 별 크기를 복원 할 수 있다. 배경광과 가시도 크기는 식 4-1과 같이 기준 거울과 시료의 반사 계수 크기로 표현된다. 따라서 Z축 주사를 통해 얻은 준 단파장 간섭 신호를 식 4-2를 통해 계산 할 수 있다.

$$I(z, k) = A(k) + B(k) \cos[2k(h - z) + \Delta\varphi]$$

where

$$A(k) = E_i^2 \left[\rho^4 |r_{ref}|^2 + (1 - \rho)^2 |r_{obj}|^2 \right] \quad \text{식 4-1}$$

$$B(k) = 2E_i^2 \left[\rho^2 (1 - \rho)^2 |r_{ref}| |r_{obj}| \right]$$

$$A(k) = \frac{(2I_0 + I_{-2} + I_2) + (2I_1 + 2I_{-1})}{8}$$

$$B(k) = \frac{\sqrt{(2I_0 - I_{-2} - I_2)^2 + (2I_{-1} - 2I_1)^2}}{4} \quad \text{식 4-2}$$

이 때, I_i 는 식 2-18과 같다. 복원된 배경광과 가시도 크기의 비율은 식 4-3과 같이 기준 거울과 시료의 반사 계수의 크기의 비율로 표현된다.

$$\frac{A}{B} = \frac{(1 - \rho)^2 |r_{ref}|}{2\rho^2 |r_{obj}|} + \frac{\rho^2 |r_{obj}|}{2(1 - \rho)^2 |r_{ref}|} \quad \text{식 4-3}$$

각 반사 계수의 크기 비율을 식 4-4와 같이 정의 하면

$$X = \frac{\rho^2 |r_{obj}|}{(1 - \rho)^2 |r_{ref}|} \quad \text{식 4-4}$$

식 4-5와 같이 정리 된다.

$$2\frac{A}{B} = X + \frac{1}{X}$$

$$X = \frac{A}{B} - \sqrt{\frac{A^2}{B^2} - 1} \left(\because X < 1 < \frac{A}{B} \right) \quad \text{식 4-5}$$

따라서 최종적으로 반사 계수의 크기의 제곱에 해당하는 반사도는 식 4-6과 같이 표현된다.

$$\therefore |r_{obj}|^2 = \frac{(1-\rho)^4}{\rho^4} |r_{ref}|^2 \left(\frac{A}{B} - \sqrt{\frac{A^2}{B^2} - 1} \right)^2 \quad \text{식 4-6}$$

위와 같이 계산된 반사도는 측정된 간섭 신호와 시스템에 사용된 광학 부품의 성질로만 표현되기 때문에 기존의 분광 반사계에서 필수적으로 진행되던 기준 시료의 반사도 측정을 통한 입사광의 크기 측정이 불필요하다. 다시 말해, 기존의 기준 시료의 데이터를 이용하여 측정하고자 하는 시료에서 얻은 데이터로부터 반사 계수를 복원하는 과정이 필요 없기 때문에 시료에 따라 입사광의 세기를 조절 할 수 있어 높은 SNR(Signal to Noise Ratio)을 얻을 수 있다.

분광 간섭계를 이용하면 파장 분해능이 매우 뛰어나기 때문에 파장별 성분을 정밀하게 복원 할 수 있지만 프리즘과 같은 추가적인 광학 부품을 사용해야 하고 선 측정 혹은 점 측정만 가능하기 때문에 미세 패턴의 형상을 측정하기는 힘들다. 반면에 칼라 카메라를 이용하면 영역 전체의 데이터를 얻을 수 있어 미세 패턴의 형상 측정은 가능하지만 RGB에 해당하는 3가지의 파장만 측정하기 때문에 파장 분해능이 낮아 안정적인 측정이 힘든 단점이 있다.

4.2. 푸리에 변환 방법(Fourier transform method)

푸리에 변환 방법은 미라우 간섭계를 이용하여 획득한 백색광 간섭 신호를 푸리에 변환을 통해 파장 별 성분으로 복원하는 방법이다. 백색광 간섭신호는 Z축 영역의 데이터를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환하여 그 크기와 위상을 복원한다. 그렇기 때문에 푸리에 변환을 하기 위한 연산 시간이 필요하며 변환 후의 파장 분해능이 높지 않기 때문에 높은 파장 분해능을 얻기 위해 추가적인 방법도 필요하다.

4.2.1. 시스템 구성

푸리에 변환에 사용되는 간섭계는 그림 4-2와 같은 미라우 간섭계이다. 광원으로는 백색 LED 혹은 할로겐 램프를 사용하고, 압전 구동기(PZT)를 이용하여 Z축으로 주사하며 간섭 신호를 획득한다. 획득된 간섭 신호는 광원이 포함하는 모든 파장의 단파장 간섭 신호를 포함하고 있기 때문에 푸리에 변환을 통해 각 파장의 크기와 위상을 복원 할 수 있다.

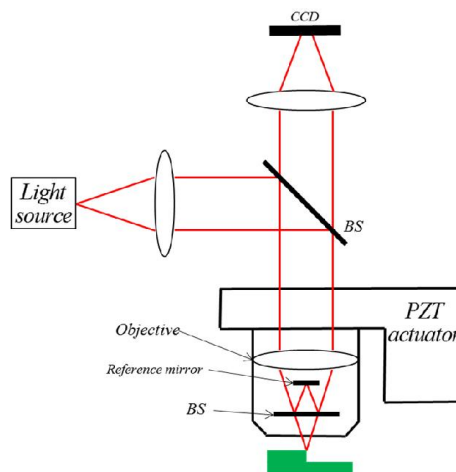


그림 4 - 2 백색광 간섭계

4.2.2. 파장 별 성분 복원 방법

획득한 백색광 간섭신호는 단파장 간섭신호의 합이며 이를 푸리에 변환하는 과정은 식 4-7과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{I}(u) &= FT(I(z)) \\
 &= FT\left(\int_k A(k) + B(k)\cos[k(h-z) + \Delta\varphi]dk\right) \\
 &= \int_k A(k)FT(1)dk \\
 &\quad + \frac{1}{2}\int_k \gamma(k)FT\left(e^{i(kh-kz+\Delta\varphi)} + e^{-i(kh-kz+\Delta\varphi)}\right)dk \\
 &= \int_k A(k)dk \times \delta(u) \\
 &\quad + \frac{1}{2}\gamma(-u)e^{i(-uh+\Delta\varphi)} \times \delta(u+k) + \frac{1}{2}\gamma(u)e^{-i(uh+\Delta\varphi)} \times \delta(u-k)
 \end{aligned}$$

식 4-7

변환된 신호는 주파수에 따라 표현되며, 0을 기준으로 양의 영역과 음의 영역이 대칭으로 나타난다. 식에서 볼 수 있듯이 $\tilde{I}(0)$ 는 위상이 0이며 크기로만 표현되고, 그 크기는 단파장 간섭 신호의 가시도 크기의 합이다. 이 값을 이용하면 입사광의 세기가 바뀌더라도 기준 시료의 데이터를 다시 획득하는 과정을 생략 할 수 있다. 또한 0이 아닌 파장에서의 크기 $|\tilde{I}(u)|$ 는 각 단 파장의 가시도 크기 $\gamma(u)$ 를 의미하고, 위상 $\angle\tilde{I}(u)$ 은 각 단 파장의 위상 $(uh+\Delta\varphi)$ 을 의미한다. 그렇기 때문에 측정 시료의 가시도 크기 $|\tilde{I}(u)|_{obj}$ 와 기준 시료의 가시도 크기 $|\tilde{I}(u)|_{ref}$ 를 이용하여 분광 반사계와 같은 과정을 거쳐 시료의 반사도를 계산 할 수 있다. 이렇게 푸리에 변환을 통해 복원된 크기와 위상을 통해 두께와 높이를 모두 측정 할 수 있다.

4.2.3. Zoom FFT

파장 별 성분을 이용하여 두께와 높이를 측정 할 때 안정적인 측정 결과를 얻기 위해서는 넓은 파장 폭과 높은 파장 분해능이 요구된다. 파장 폭은 사용되는 광원에 의해 결정되는 것으로 할로겐 램프는 약 400 nm에서 800 nm까지의 파장을 포함하고 있고, LED는 500 nm에서 700 nm의 파장을 포함하고 있다. 주사 간격이 충분하다면 푸리에 변환을 통해 복원되는 파장 영역은 광원의 파장을 모두 포함 할 수 있다. 따라서 넓은 파장 영역을 복원하기 위해서는 넓은 파장을 포함한 광원을 사용해야 한다. 반면에 복원된 파장 별 성분의 파장 분해능은 푸리에 변환의 영향을 받으며 식 4-7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta k = \frac{\pi}{N\Delta z} \quad \text{식 4-7}$$

이 때, Δk 는 파수 분해능(wave number resolution), N 은 푸리에 변환의 총 데이터 개수, Δz 는 Z축 주사 간격(scan interval)이다. 높은 분해능을 얻기 위해서는 zero padding을 통해 총 데이터 개수 N 를 늘리거나, 주사 간격 Δz 을 크게 하여야 한다. 주사 간격은 일반적으로 광원의 중심 파장의 1/4이며, 복원되는 주파수가 데이터 획득 주파수의 1/3까지라는 Nyquist 이론에 의해 주사 간격을 더 크게 하면 광원이 포함하고 있는 모든 파장을 복원 할 수 없다. 따라서 높은 분해능을 얻기 위해서는 총 데이터 개수를 늘려야 하는데 푸리에 변환은 데이터 개수가 늘어남에 따라 연산 시간이 증가하기 때문에 분해능과 연산 시간은 서로 대립되는 관계가 있다. 즉, 높은 분해능을 얻기 위해서는 연산 시간이 길어지는 단점이 있기 때문에 이런 단점을 보완하고자 zoom FFT 기법을 적용하였다.

4.2.3.1. Zoom FFT 과정

Zoom FFT는 관심 주파수 영역이 복원되는 주파수 영역의 전체가 아닌 특정 범위일 때, 특정 범위의 주파수만 확대하여 결과를 얻는 방법이다. zoom FFT는 그림 4-3과 같은 과정을 걸쳐 진행된다. 먼저 푸리에 변환(4-3(b))한 후 원하는 파장 영역의 중심 파장이 0이 되도록 주파수 이동(4-3(c))을 한다. 그 후 노이즈를 방지하기 위해 저주파 통과 필터링(4-3(d))을 하여 푸리에 역 변환(4-3(e))을 한다. 역 변환된 신호를 원하는 확대 배율만큼 샘플링(4-3(f))한 후 푸리에 변환(4-3(g))하게 되면 원하는 파장이 확대된 결과를 얻을 수 있다.

주파수 이동 후 저주파 필터링을 하고 푸리에 역변환을 함으로써 원하는 파장 범위의 정보만 포함한 신호를 만든다. 그 후 샘플링을 통해 주사 간격을 크게 한 것과 동일한 효과를 얻어 높은 분해능을 얻을 수 있다. 그렇기 때문에 zoom FFT를 통해 연산 시간이 증가하거나 복원되는 파장 영역의 손실 없이 높은 분해능을 얻을 수 있다.

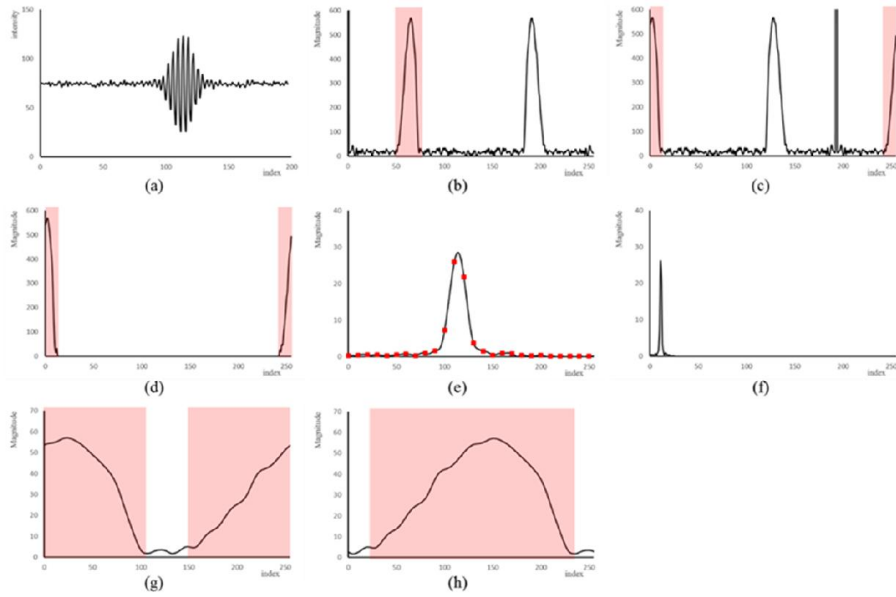


그림 4 - 3 Zoom FFT 과정;

- (a) 백색광 간섭 신호, (b) 푸리에 변환, (c) 주파수 이동,
- (d) 저주파 통과 필터링, (e) 푸리에 역 변환, (f) 샘플링,
- (g) 푸리에 변환, (h) 재 정렬

4.2.3.2. Zoom FFT의 효과

10배 확대한 zoom FFT의 분해능을 FFT의 분해능과 비교해보면 그림 4-4와 같다. 주사 간격이 80 nm, 총 데이터 개수가 256개 일 때 FFT의 파수 분해능은 $0.153 \mu\text{m}^{-1}$ 이지만 zoom FFT의 분해능은 FFT의 1/10인 $0.015 \mu\text{m}^{-1}$ 로 분해능이 10배 좋아진 것을 알 수 있다.

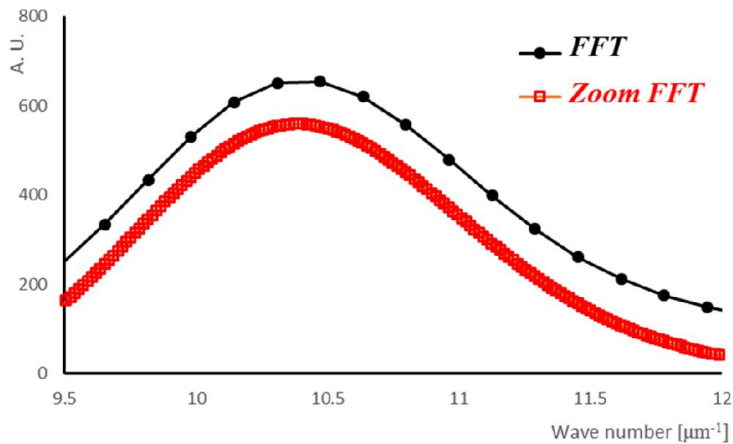


그림 4 - 4 Zoom FFT와 FFT 분해능 비교

또한 외부 진동 혹은 전기 노이즈 등 여러 가지의 외부 요인에 의해 노이즈가 포함된 간섭신호를 푸리에 변환하면 복원된 파장 별 성분 오차가 발생한다. 그림 4-5는 노이즈가 포함된 간섭 신호를 파장 별 성분으로 복원 했을 때 발생하는 변환 오차를 비교한 것이다. 시뮬레이션을 통해 노이즈가 포함되지 않은 간섭 신호와 노이즈가 포함된 간섭 신호를 각각 zoom FFT와 FFT를 통해 파장 별 성분으로 복원한 후 각각의 오차를 비교하였다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 FFT에 비해 zoom FFT의 변환 오차가 더 작은 것을 알 수 있다. 따라서 외부 진동이나 노이즈가 포함 되어 있을 때, zoom FFT를

적용하면 측정 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

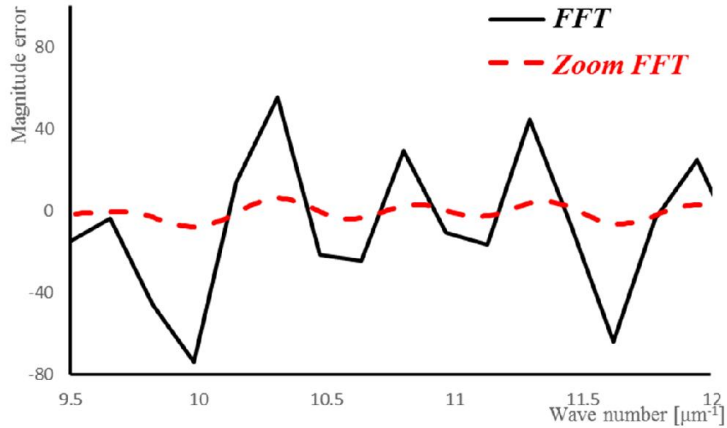


그림 4 - 5 Zoom FFT와 FFT의 변환 오차

표 4-1과 그림 4-6은 1000개의 간섭 신호의 zoom FFT와 FFT의 연산 시간을 비교한 것이다. zoom FFT는 3번의 변환을 해야 하므로 분해능이 1/1인 FFT에 비해 약 3배 정도의 연산 시간이 소모된다. 하지만 FFT는 분해능이 좋아짐에 따라 그 연산 시간이 계속 증가하지만 zoom FFT는 분해능에 상관없이 연산 시간이 일정하다. 이는 FFT에서는 분해능을 높이기 위해 데이터 개수가 많아 지면서 연산량이 증가하지만, zoom FFT는 데이터 개수를 증가시키지 않고 샘플링을 통해 높은 분해능을 얻기 때문에 연산량이 증가하지 않는 것이다. 따라서 $1/4(0.038 \mu\text{m}^{-1})$ 이상의 높은 분해능을 얻을 때는 zoom FFT를 활용하는 것이 효율적이라는 것을 확인 할 수 있다.

표 4 - 1 Zoom FFT와 FFT의 연산 시간

	FFT	Zoom FFT
Resolution		
1/1 (0.153 μm^{-1})	0.022	0.072
1/2	0.031	0.053
1/4	0.061	0.060
1/8	0.114	0.050
1/16	0.298	0.053
1/32	0.971	0.043
1/64	1.655	0.066
1/128	4.183	0.056
1/256	8.685	0.035
1/512	28.453	0.059

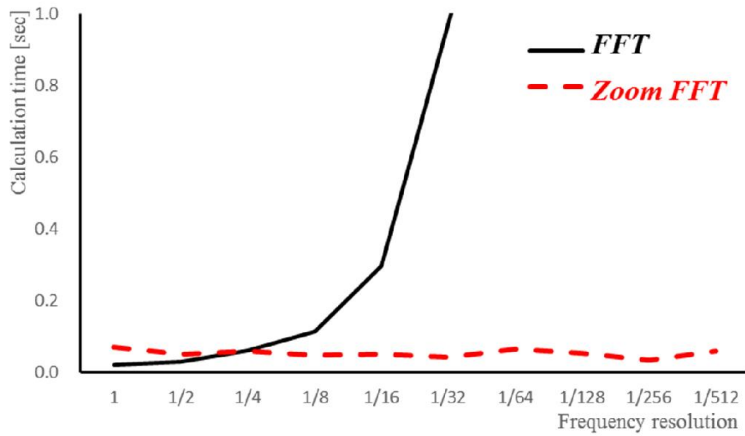


그림 4 - 6 Zoom FFT와 FFT의 연산 시간

Chapter 5. 두께 측정 방법

5.1. 기존 두께 측정 방법

두께 측정을 위한 방법으로는 모델링과 비선형 최소 자승법을 이용한 방법이 널리 활용되고 있다. 이 방법은 2장에서 설명 했던 것처럼 측정한 파장 별 반사도를 두께에 따라 모델링한 파장 별 반사도와 비교하여 오차가 가장 작은 모델링을 찾아 그 모델링의 두께를 측정값으로 하는 방법이다. 이 방법은 수 많은 모델링과 측정값을 비교해야 하기 때문에 연산 시간이 매우 오래 걸린다. 최적값을 빠르게 찾기 위해 LMA를 적용하지만, 여전히 영역 전체의 두께 분포를 측정하기에는 매우 긴 시간이 소모된다. 또한 LMA의 고유한 문제로 초기값 설정에 따라 지역 최소값(local minimum)으로 수렴하는 현상이 발생하기도 한다. 그림 5-1과 같이 여러 개의 지역 최소값이 존재 하며, 전역 최소값(global minimum)을 찾기 위해서는 지역 최소값을 벗어 날 수 있도록 탐색 간격을 크게 설정하여야 한다. 하지만 탐색 간격을 너무 크게 설정하면 전역 최소값도 찾지 못하는 문제가 발생할 수 있기 때문에 LMA의 변수 설정에 어려움이 있다.

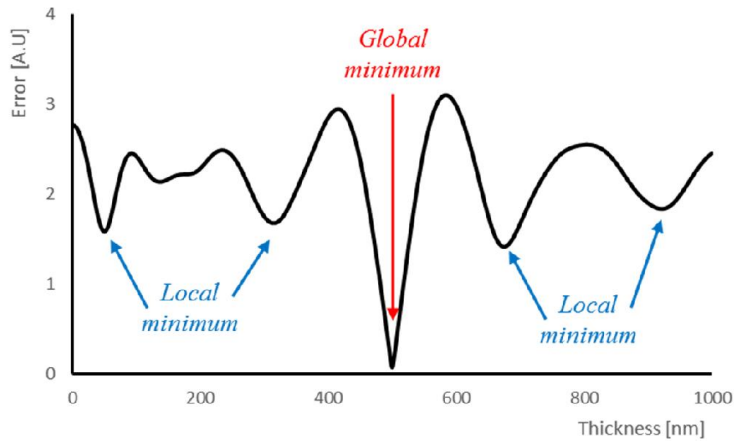


그림 5 - 1 지역 최소값과 전역 최소값

긴 연산 시간과 지역 최소값으로 수렴하는 문제를 해결하기 위해 peak detection[119] 방법이 제안되었다. 이 방법은 반사도의 최고점들의 간격을 이용하여 두께를 직접 계산하는 방법이다. 비 선형 최소 자승법과 같이 간접적으로 두께를 유추하는 것이 아니기 때문에 연산 시간이 매우 빠르다. 하지만 최고점이 2개 이상일 때 두께를 측정할 수 있기 때문에 측정 가능한 최소 막 두께가 수백 nm 이상이다. 또한 측정 분해능이 비 선형 최소 자승법에 비해 떨어지기 때문에 얇은 막 두께 측정에는 많이 활용되고 있지 않다.

5.2. Phase Extraction Method (PEM)

PEM은 2014년에 제안된 방법 [120]으로 높은 측정 분해능과 측정 안정성을 유지하면서도 빠른 측정이 가능하기 때문에 미세 패턴의 두께 분포 측정에 유리하다. 식 5-1에서 볼 수 있듯이 최종 반사 계수에서 β 를 제외한 나머지는 시료의 재질에 따른 특성으로 박막의 두께에 영향을 받지 않는다. 오직 β 만 두께에 영향을 받기 때문에 최종 반사 계수에서 β 를 복원할 수 있다면 두께를 측정 할 수 있다.

$$R = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\beta)} \quad \text{식 5-1}$$
$$\text{where } \beta = \frac{2\pi}{\lambda} d\tilde{N}_2 \cos \theta$$

제안된 두께 측정 방법의 순서는 그림 5-2에서 보는 것과 같이 측정한 반사도로부터 새롭게 제안한 정규화 된 반사도를 복원하여 두께 성분을 포함한 β 를 추출한다. 추출된 β 는 0과 π 사이의 값을 가지므로 위상 펼침을 하여야 한다. 그 후 펼쳐진 위상을 이용하여 두께를 측정한다.

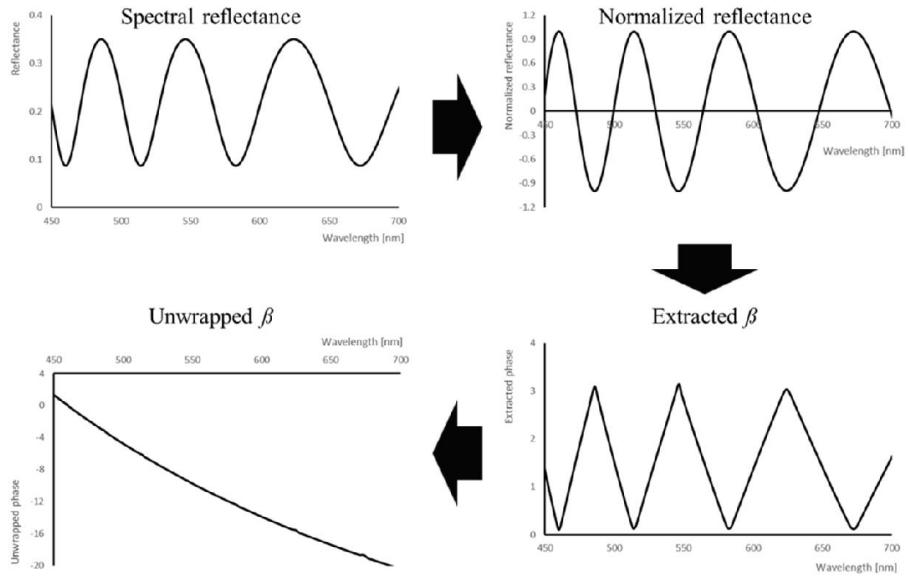


그림 5 - 2 PEM의 두께 측정 방법

5.2.1. 위상 추출

PEM은 두께 측정이 필요한 대부분의 측정 시료의 소광 계수 (extinction coefficient)가 0이며, 소광 계수가 있더라도 그 크기가 매우 작기 때문에 박막의 소광 계수를 0으로 가정하여 위상 추출 과정을 간단히 하였다. 박막의 소광 계수가 0이면 최종 반사 계수는 식 5-2과 같이 정리 된다.

$$\begin{aligned}
 r_{12} &= A_{12} \\
 r_{23} &= A_{23} + iB_{23} \\
 R &= \frac{A_{12} + (A_{23} + iB_{23})\exp(-i2\beta)}{1 + A_{12}(A_{23} + iB_{23})\exp(-i2\beta)}
 \end{aligned}$$

식 5-2

$$\begin{aligned}
 &= \frac{[A_{12} + A_{23} \cos(2\beta) + B_{23} \sin(2\beta)] + i[B_{23} \cos(2\beta) - A_{23} \sin(2\beta)]}{[1 + A_{12}A_{23} \cos(2\beta) + A_{12}B_{23} \sin(2\beta)] + i[A_{12}B_{23} \cos(2\beta) - A_{12}A_{23} \sin(2\beta)]}
 \end{aligned}$$

기질의 굴절률과 박막 두께에 따른 위상 β 이 복소수이므로 최종 반사 계수 또한 복소수 형태로 표현된다. 실제로 측정 가능한 물리량인 최종 반사 계수 크기의 제곱에 해당하는 반사도는 식 5-3과 같이 정리된다.

$$\Re = |R|^2 = \frac{A_{12}^2 + A_{23}^2 + B_{23}^2 + 2A_{12}(A_{23} \cos(2\beta) + B_{23} \sin(2\beta))}{1 + A_{12}^2(A_{23}^2 + B_{23}^2) + 2A_{12}(A_{23} \cos(2\beta) + B_{23} \sin(2\beta))}$$

식 5-3

식 5-3에서 측정 시료의 굴절률을 모두 알고 있으며 반사도는 측정을 통해 획득 할 수 있으므로, 유일한 미지수인 위상 β 를 계산 할 수 있다. 식 5-4와 같이 X 를 정의하면

$$\begin{aligned}
X &= A_{23} \cos(2\beta) + B_{23} \sin(2\beta) \\
&= \frac{\Re\left(1 + A_{12}^2(A_{23}^2 + B_{23}^2)\right) - (A_{12}^2 + A_{23}^2 + B_{23}^2)}{2A_{12}(1 - \Re)} \quad \text{식 5-4}
\end{aligned}$$

정규화 된 반사도(normalized reflectance)는 식 5-5와 같이 정리 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
\Re_N &= \frac{X}{\sqrt{A_{23}^2 + B_{23}^2}} \\
&= \cos(2\beta - \alpha) \quad \text{where } \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{B_{23}}{A_{23}}\right) \quad \text{식 5-5}
\end{aligned}$$

정규화 된 반사도가 β 의 삼각 함수 형태로 표현되기 때문에 식 5-6과 같이 반사도와 시료의 굴절률로부터 반사 계수의 위상을 추출 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
2\beta &= \cos^{-1} \left(\frac{\Re\left(1 + A_{12}^2(A_{23}^2 + B_{23}^2)\right) - (A_{12}^2 + A_{23}^2 + B_{23}^2)}{2A_{12}(1 - \Re)} \right) / \sqrt{A_{23}^2 + B_{23}^2} \\
&+ \tan^{-1}\left(\frac{B_{23}}{A_{23}}\right) \quad \text{식 5-6}
\end{aligned}$$

이렇게 추출된 위상은 0에서 π 사이의 값을 가지기 때문에 실제 위상을 구하기 위해 위상 펼침(phase unwrapping) 과정을 거쳐야 한다. 위상 펼침 과정은 간섭계에서 활용되는 2π 의 배수를 더하거나 빼는 방법이 아닌 파장이 증가함에 따라 위상도 단조롭게 증가하거나 감소되도록 위상을 대칭 시켜야 한다. 기존의 간섭계에서 활용되던 위상 펼침 과정은 탄젠트 함수를 이용하여 추출한 위상으로 $-\pi$ 에서 π

사이의 값을 가지며 경계 값에서 위상이 불연속적이긴 하지만 단조롭게 증가하거나 감소하기만 한다. 하지만 반사 계수로부터 추출된 위상 β 은 코사인 함수를 이용하여 계산된 것으로 0에서 π 사이의 값을 가지며 경계 값에서 연속적이다. 또한 증가와 감소를 반복하기 때문에 기존 방법인 2π 의 배수를 더하는 방법으로는 위상 펼침을 하지 못한다. 따라서 반사계수에서 추출된 위상의 위상 펼침을 위해서는 경계 값에서 위상을 대칭 시키고 π 의 배수를 더하거나 빼는 과정을 진행해야 한다. 그림 5-3은 반사 계수로부터 추출된 위상과 위상 펼침 과정을 통해 펼쳐진 위상은 나타낸 것이다.

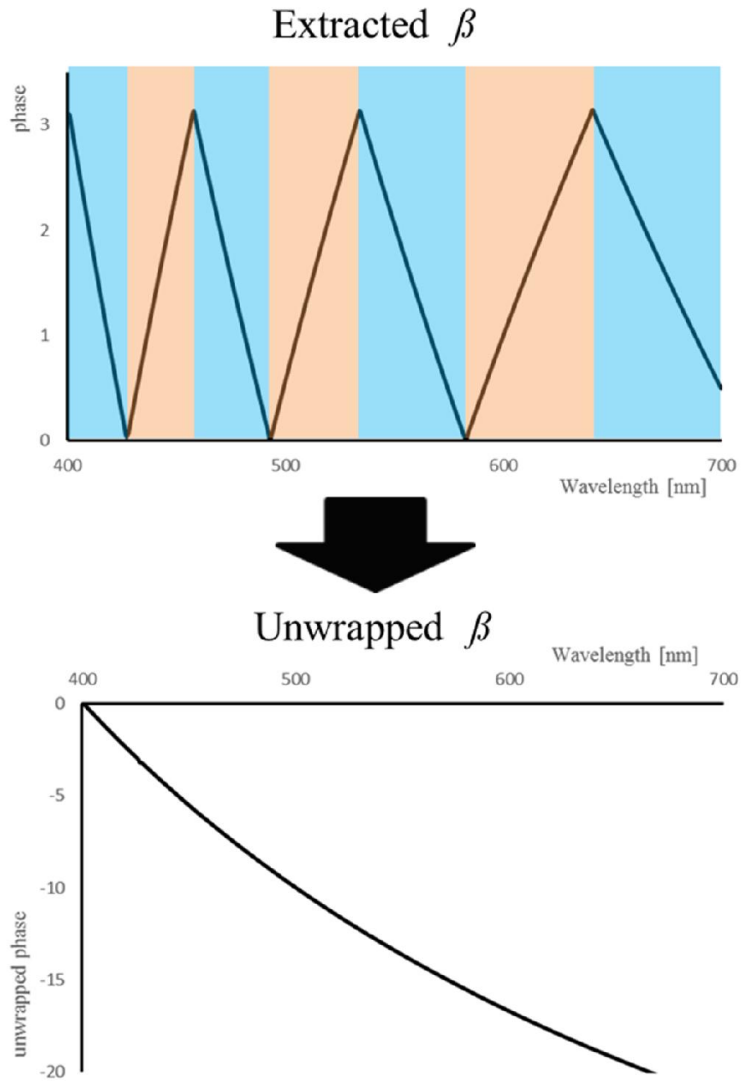


그림 5 - 3 PEM의 추출된 위상과 펼쳐진 위상

5.2.2. 두께 계산 방법

펼쳐진 위상을 이용하여 박막의 두께를 측정 할 수 있다. 식 5-1에서 알 수 있듯이 위상은 파장과 두께 그리고 박막의 굴절률로 표현되기 때문에 위상을 통해 두께를 측정 할 수 있다. 펼쳐진 위상으로부터 두께를 계산하는 과정은 식 5-7과 같다.

$$d = \frac{1}{2\pi} \frac{n \sum \left(\frac{\beta_{unwrap}(\lambda) \tilde{N}_2}{\lambda} \right)^2 - \sum \beta_{unwrap}(\lambda) \sum \frac{\tilde{N}_2}{\lambda}}{n \sum \left(\frac{\tilde{N}_2}{\lambda} \right)^2 - \left(\sum \frac{\tilde{N}_2}{\lambda} \right)^2} \quad \text{식 5-7}$$

두께를 직접 계산하기 때문에 모델링을 통해 간접적으로 두께를 구해야 하는 비 선형 최소 자승법에 비해 연산 시간이 매우 짧으며, 최고점의 위치를 찾아 두께를 측정하는 것이 아니기 때문에 얇은 박막의 두께 측정도 가능하다. 즉, 빠르고 안정적으로 두께를 측정 할 수 있으며, 얇은 박막의 두께도 측정 가능하다.

5.3. Advanced Phase Extraction Method (APEM)

이 논문에서 제안하는 APEM은 앞 절에서 설명한 PEM을 개선하고 보완한 두께 측정 방법이다. 필름의 소광 계수를 고려하지 않았던 PEM과 달리 필름의 소광 계수를 고려하였으며, 최종 반사 계수의 크기인 반사도만 사용하는 것이 아니라 최종 반사 계수의 위상도 같이 사용하여 β 를 계산한다. 그렇기 때문에 소광 계수가 0이 아닌 폴리머 재질 혹은 ITO와 같은 투명 금속 재질의 막 두께를 더욱 정확하게 측정할 수 있다. 또한 그림 5-4와 같이 최종 반사 계수의 크기와 위상을 모두 사용하여 두께를 측정하기 때문에 측정 정확도와 안정성이 증가한다. PEM과의 차이점은 다음 절에서 자세히 언급하기로 한다.

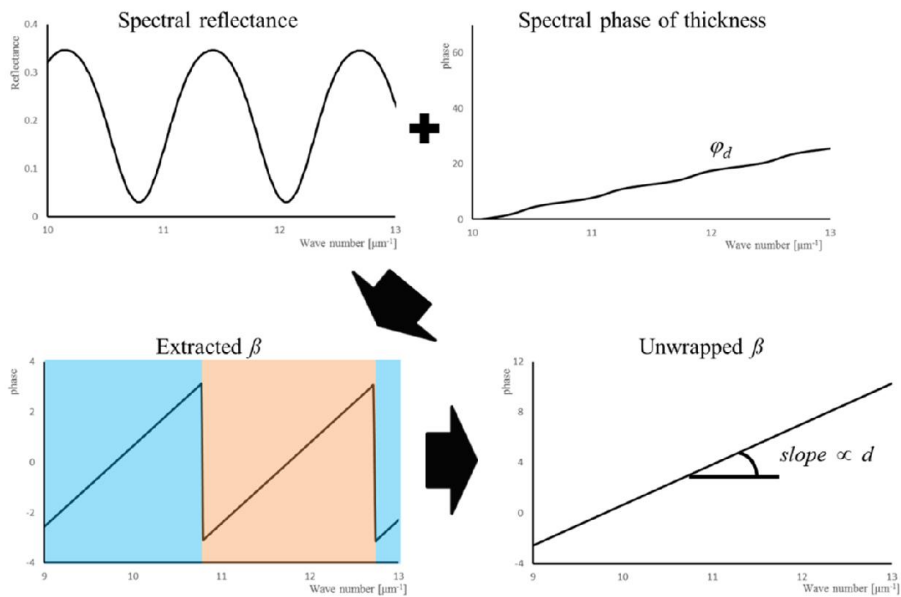


그림 5 - 4 APEM의 두께 측정 방법

5.3.1. 위상 추출 방법

APEM은 PEM과 다르게 박막의 소광 계수를 고려하여 식 5-8과 같이 최종 반사 계수를 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 r_{12} &= A_{12} + iB_{12} \\
 r_{23} &= A_{23} + iB_{23} \\
 R &= \frac{[A_{12} + A_{23} \cos 2\beta + B_{23} \sin 2\beta] + i[B_{12} + B_{23} \cos 2\beta - A_{23} \sin 2\beta]}{[1 + (A_{12}A_{23} - B_{12}B_{23})\cos 2\beta + (A_{12}B_{23} + A_{23}B_{12})\sin 2\beta] + i[(A_{12}B_{23} + A_{23}B_{12})\cos 2\beta - (A_{12}A_{23} - B_{12}B_{23})\sin 2\beta]}
 \end{aligned}$$

식 5-8

복소수로 표현된 최종 반사 계수를 그 크기인 반사도 \mathfrak{R} 와 위상 φ 으로 변환하면 식 5-9와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 \mathfrak{R} &= |R|^2 \\
 &= \frac{(A_{12}^2 + A_{23}^2 + B_{12}^2 + B_{23}^2) + 2(A_{12}A_{23} + B_{12}B_{23})\cos 2\beta + 2(A_{12}B_{23} - A_{23}B_{12})\sin 2\beta}{1 + (A_{12}^2 + B_{12}^2)(A_{23}^2 + B_{23}^2) + 2(A_{12}A_{23} - B_{12}B_{23})\cos 2\beta + 2(A_{12}B_{23} + A_{23}B_{12})\sin 2\beta}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varphi &= \angle R \\
 &= \tan^{-1} \left(\frac{B_{12}(1 - A_{23}^2 - B_{23}^2) + B_{23}(1 - A_{12}^2 - B_{12}^2)\cos 2\beta - A_{23}(1 - A_{12}^2 - B_{12}^2)\sin 2\beta}{A_{12}(1 + A_{23}^2 + B_{23}^2) + A_{23}(1 + A_{12}^2 + B_{12}^2)\cos 2\beta + B_{23}(1 + A_{12}^2 + B_{12}^2)\sin 2\beta} \right)
 \end{aligned}$$

식 5-9

변환된 반사도와 위상은 박막과 기질의 굴절률 및 막 두께에 해당하는 β 의 삼각함수 형태로 표현되며, 식을 간단히 하기 위해 각 변수들을 치환하면 식 5-10과 같이 표현된다.

$$\Re = \frac{C_2 + C_3' \cos 2\beta + C_4' \sin 2\beta}{C_1 + C_3 \cos 2\beta + C_4 \sin 2\beta}$$

$$\tan \varphi = \frac{C_6 + C_7' \cos 2\beta + C_8' \sin 2\beta}{C_5 + C_7 \cos 2\beta + C_8 \sin 2\beta}$$

where

$$C_1 = 1 + (A_{12}^2 + B_{12}^2)(A_{23}^2 + B_{23}^2) \quad C_5 = A_{12}(1 + A_{23}^2 + B_{23}^2)$$

$$C_2 = A_{12}^2 + A_{23}^2 + B_{12}^2 + B_{23}^2 \quad C_6 = B_{12}(1 - A_{23}^2 - B_{23}^2)$$

$$C_3 = 2(A_{12}A_{23} - B_{12}B_{23}) \quad C_7 = A_{23}(1 + A_{12}^2 + B_{12}^2)$$

$$C_3' = 2(A_{12}A_{23} + B_{12}B_{23}) \quad C_7' = B_{23}(1 - A_{12}^2 - B_{12}^2)$$

$$C_4 = 2(A_{12}B_{23} + A_{23}B_{12}) \quad C_8 = B_{23}(1 + A_{12}^2 + B_{12}^2)$$

$$C_4' = 2(A_{12}B_{23} - A_{23}B_{12}) \quad C_8' = A_{23}(-1 + A_{12}^2 + B_{12}^2)$$

식 5-10

치환된 변수들은 모두 박막과 기질의 굴절률로 표현되고, 반사 계수의 크기와 위상은 치환된 변수와 β 의 삼각 함수로 표현된다. 따라서 두 연립 방정식을 통해 β 를 간단히 구할 수 있다. 식 5-10을 행렬 형태로 표현하면 식 5-11과 같이 나타나며, 이를 통해 최종적으로 식 5-12와 같이 β 를 계산 할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Re C_3 - C_3' & \Re C_4 - C_4' \\ \tan \varphi C_7 - C_7' & \tan \varphi C_8 - C_8' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 2\beta \\ \sin 2\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_2 - \Re C_1 \\ C_6 - \tan \varphi C_5 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos 2\beta \\ \sin 2\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Re C_3 - C_3' & \Re C_4 - C_4' \\ \tan \varphi C_7 - C_7' & \tan \varphi C_8 - C_8' \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} C_2 - \Re C_1 \\ C_6 - \tan \varphi C_5 \end{pmatrix}$$

식 5-11

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sin 2\beta}{\cos 2\beta} \right) \quad \text{식 5-12}$$

이렇게 추출된 위상은 파장 또는 파수에 관한 함수이며, $-\pi$ 에서 π 사이의 값을 가지기 때문에 위상 펼침 과정을 거쳐야 한다. PEM과 다르게 추출된 위상이 $-\pi$ 에서 π 사이인 것은 크기와 위상을 모두 사용하여 탄젠트 함수를 통해 위상을 추출 할 수 있기 때문이다. 따라서 추출된 위상은 간섭계에서 흔히 사용되는 경계 값에서 2π 의 배수를 더하거나 빼주는 위상 펼침 과정을 적용하여 펼쳐진 위상을 구할 수 있다. 그림 5-5는 추출된 위상을 펼치는 과정을 나타낸 것이다.

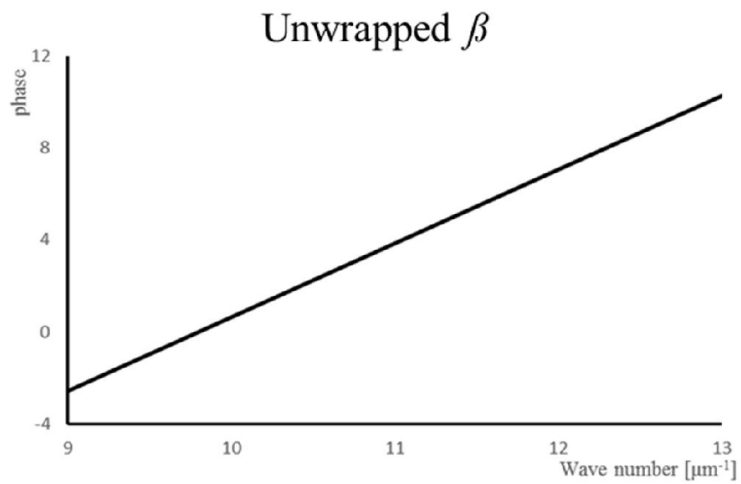
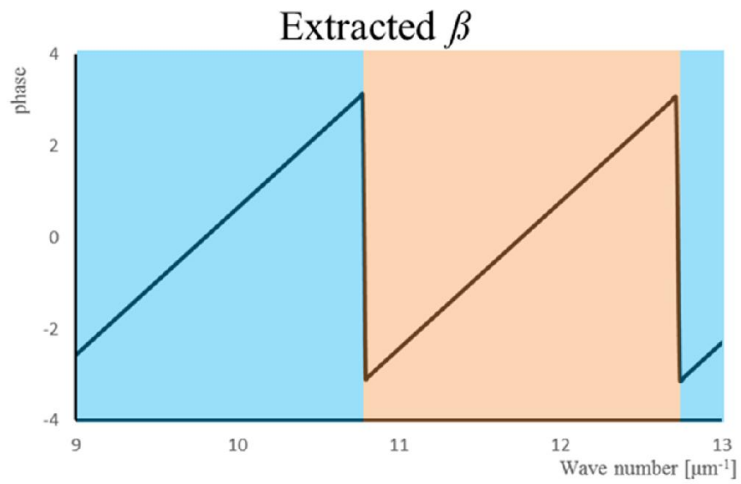


그림 5 - 5 APEM의 추출된 위상과 펼쳐진 위상

5.3.2. 두께 계산 방법

펼쳐진 위상으로부터 두께를 측정하는 방법은 PEM와 유사하다. 식 5-1과 같이 펼쳐진 위상은 파장에서는 반비례하지만, 식 5-13과 같이 파장과 반 비례 관계인 파수에는 비례한다.

$$\beta_{unwrapped} = kd\tilde{N}_2 \cos \theta \quad \text{식 5-13}$$

펼쳐진 위상은 그림 5-6과 같이 파수에 비례하므로 파수에 따른 위상의 기울기를 계산하면 박막의 두께가 아닌 박막의 굴절률이 곱해진 광학적 두께가 구해진다. 따라서 박막의 두께는 계산된 기울기를 박막의 굴절률로 나눈 값으로 측정 할 수 있다.

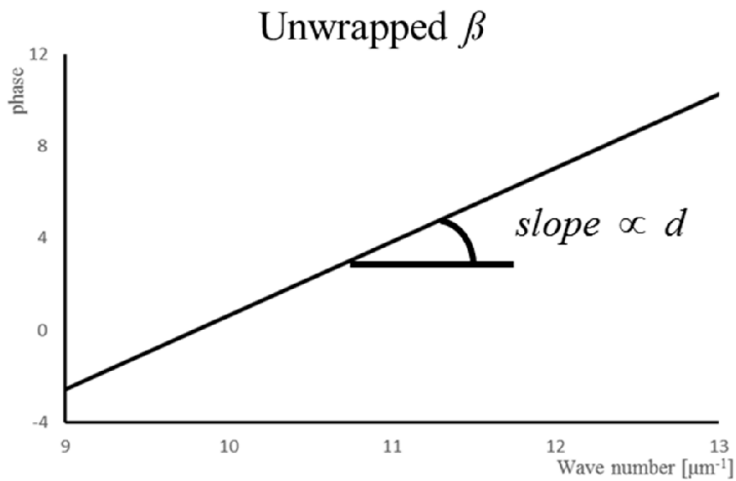


그림 5 - 6 APEM의 두께 측정

5.3.3. 측정 분해능

측정 분해능은 구분 할 수 있는 최소 측정값 차이로 측정 분해능이 높을수록 정확하고 안정적인 측정이 가능하다. APEM은 앞서 설명한 것과 같이 추출된 위상의 기울기를 통해 두께를 측정하는 방법이다. 그렇기 때문에 구분 가능한 최소 두께 차이는 구분 가능한 최소 기울기 차이에 비례한다. 위상의 기울기는 전체 영역에서의 위상 변화량을 뜻하므로 구분 가능한 최소 기울기 차이는 전체 영역에서의 위상 분해능과 동일하다. 즉, 그림 5-7과 같이 전체 파수 영역 Δk_{sw} (spectral width)에서 위상 분해능 $\Delta\beta$ (phase resolution)만큼의 변화가 있을 때 기울기 구분이 가능하며, 동시에 두께 구분도 가능하다.

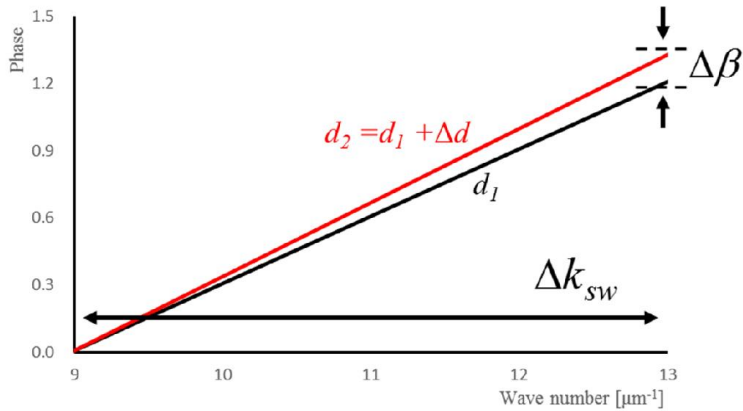


그림 5 - 7 APEM의 측정 분해능

이를 수식으로 정리하면 추출된 위상은 식 5-14와 같으며

$$\beta = kdN \quad \text{식 5-14}$$

두께 측정 분해능은 식 5-15와 같이 표현된다.

$$\Delta d = \frac{\Delta\beta}{\Delta k_{sw} N} \quad \text{식 5-15}$$

이 때, 전체 파수 영역 Δk_{sw} 은 할로겐 램프를 사용하는 경우 약 $4 \mu\text{m}^{-1}$ 이며 삼각 함수를 통해 복원한 위상의 분해능은 약 1/1000으로 알려져 있다. 또한 박막의 굴절률은 대부분 1에서 2사이의 값을 가진다. 따라서 APEM의 두께 측정 분해능은 약 0.167 nm 이다.

$$\Delta d = \frac{0.001}{4 \times 1.5} \mu\text{m} \cong 0.167 \text{ nm} \quad \text{식 5-16}$$

5.3.4. 측정 가능 범위

측정 가능 범위는 측정 할 수 있는 최대 측정값이다. 측정 범위 이하의 값은 문제 없이 측정 가능하지만 측정 범위 이상의 값은 측정되지 않거나 측정 범위 내의 두께로 잘못 측정된다. APEM은 펼쳐진 위상의 기울기를 통해 두께를 측정하는데 위상 펼침 과정에서 위상 모호성에 의해 위상의 기울기 최대값이 정해진다.

위상 모호성은 복원된 위상의 절대값은 알지 못하며 오직 상대적인 값만 알 수 있기 때문에 발생하는 것이다. 위상 펼침은 불연속적인 위상에 2π 의 배수를 더함으로써 인접한 위상의 차이가 π 이하가 되도록 만드는 것이다. 따라서 위상 펼침 과정에서 복원 가능한 최대 기울기는 그림 5-8과 같이 인접한 위상의 차이가 π 일 때이다.

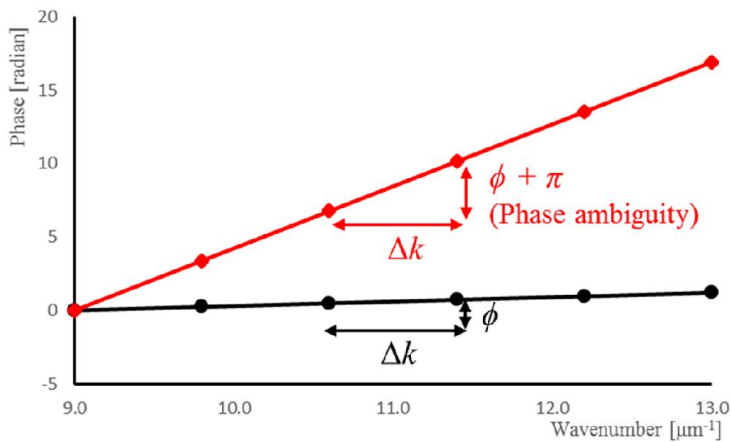


그림 5 - 8 APEM의 측정 가능 범위

위상은 식 5-14와 같이 파수, 두께, 박막의 굴절률에 비례하므로 측정 가능한 최대 두께는 식 5-17과 같이 표현된다.

$$d_{max} = \frac{\pi}{\Delta k N} \quad \text{식 5-17}$$

이 때, Δk 는 파수 분해능으로 zoom FFT를 통한 파수 분해능은 약 $0.019 \mu\text{m}^{-1}$ 이다. 따라서 측정 가능한 최대 두께는 약 $110 \mu\text{m}$ 이다.

$$d_{max} = \frac{\pi}{0.019 \times 1.5} \mu\text{m} \cong 110 \mu\text{m} \quad \text{식 5-18}$$

5.4. APEM과 PEM의 비교

앞 절에서 언급한 것처럼 APEM과 PEM의 차이점은 필름의 소광 계수의 고려 여부와 β 를 복원 할 때 최종 반사 계수의 크기만 사용하는 것이 아닌 크기와 위상 즉, 복소수를 모두 사용하는 것이다. PEM은 식을 간단히 하기 위해 소광 계수를 고려하지 않고 표준 반사도를 이용한 보정 방법을 사용하였지만, 소광 계수가 작은 경우에만 유효하며 소광 계수가 커지면 그 효과가 줄어든다. 또한 PEM은 β 를 추출 할 때 최종 반사 계수의 크기만 고려하는데, 이는 수백 nm 이상의 두께에서는 큰 영향이 없지만 200 nm보다 얇은 초 박막에서는 측정 민감도가 감소하여 정확한 두께 측정이 어려운 단점이 있다. 이 절에서는 APEM이 PEM과 비교하여 어떤 차이점이 있는지에 대해 설명하겠다.

5.4.1. 소광 계수의 영향

소광 계수는 빛이 매질을 지나갈 때 흡수되는 양을 뜻하는 것으로, 두께 측정 시료의 대부분은 소광 계수가 0 이거나 매우 작기 때문에 그 영향을 무시 할 수 있다. 하지만 금속 물질은 소광 계수가 굴절 계수와 비슷하거나 크기 때문에 그 영향을 무시 할 수 없다. 그림 5-9는 각 물질들의 굴절 계수와 소광 계수를 나타낸 것이다.

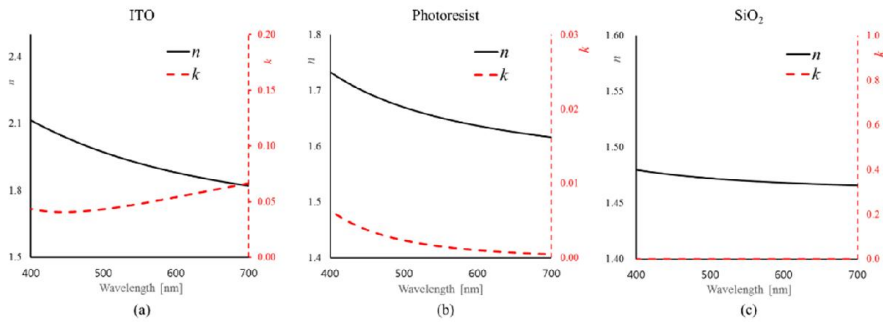


그림 5 - 9 각 물질의 굴절 계수와 소광 계수;

(a) ITO, (b) Photoresist, (c) SiO₂

SiO₂는 소광 계수가 0이고, PR(photoresist)는 소광 계수의 평균값이 0.002로 굴절 계수(1.6)에 비해 무시할만한 수준이다. 따라서 소광 계수를 고려하지 않더라도 측정 오차가 크지 않다. 하지만 투명 금속 물질인 ITO는 소광 계수의 평균값이 0.05로 다른 물질에 비해 크기 때문에 소광 계수를 고려하지 않으면 측정 오차가 매우 커질 수 있다. 그렇기 때문에 박막의 소광 계수를 고려하여야 정확한 두께를 측정 할 수 있다.

PEM과 APEM의 소광 계수에 의한 두께 측정 오차를 비교하기 위해 Si($\tilde{N}=3.9-i0.02$) 기질에 PR($\tilde{N}=1.65-i0.002$) 박막이 증착 되어

있는 시료를 이용하여 두께 측정 결과를 시뮬레이션을 하였으며 그 결과는 그림 5-10과 같다.

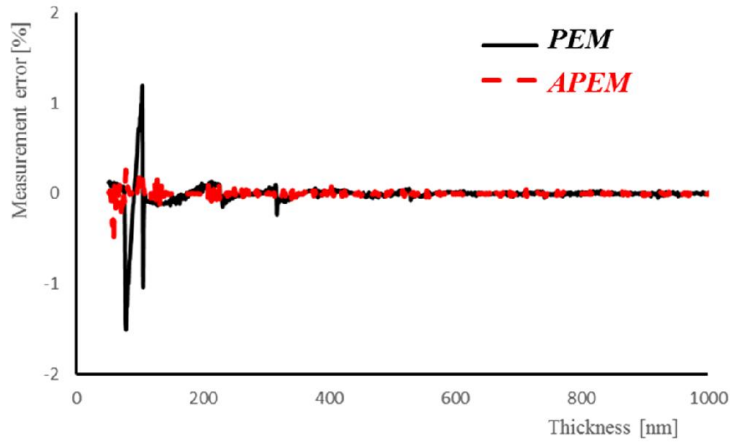


그림 5 - 10 소광 계수에 의한 PEM과 APEM의 측정 오차율

두 가지 측정 방법 모두 500 nm 이상의 두께에서는 측정오차가 거의 없지만 그 이하의 얇은 막에서는 측정 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 특히 200 nm 이하의 초 박막에서는 측정 오차율을 큰 것을 알 수 있는데, 이 영역에서 PEM의 최대 측정 오차율은 1.507 %, APEM의 최대 측정 오차율은 0.504 %이다. 박막의 두께가 두꺼울 때는 소광 계수를 무시하더라도 그 영향이 작아 측정 오차율이 작지만, 두께가 얇아질수록 소광 계수의 영향이 커져 박막의 소광 계수의 영향을 고려하지 않은 PEM은 측정 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 반면 APEM은 소광 계수를 고려하기 때문에 200 nm 이하의 초 박막에서 측정 오차율이 PEM에 비해 작은 것을 알 수 있다. 다시 말해 막 두께가 두꺼울 때는 소광 계수의 영향이 작지만 두께가 얇아지면 소광 계수의 영향을 무시 할 수 없어 진다는 것이다.

5.4.2. 측정 민감도(measurement sensitivity)

반사도를 이용하여 두께를 측정하는 분광 반사계 방법은 편광을 이용하여 두께를 측정하는 타원계 방법에 비해 초 박막에서의 측정 정확도가 떨어진다고 알려져 있다. 반사도를 이용한 측정 방법은 1 μm 이상의 두께는 측정 정확도가 매우 높지만, 200 nm 이하의 초 박막에서는 측정 정확도는 매우 낮기 때문에 초 박막의 측정에는 많이 활용 되지 못하고 있다. 이는 초 박막에서는 측정 민감도가 타원계에 비해 낮기 때문이다.

반사도는 그림 5-11에서 볼 수 있듯이 막이 두꺼워 질수록 비 선형성이 커지며, 두께가 수백 nm 이상이 되면 최고점 혹은 최저점이 나타나고 더욱 두꺼워지면 최고점과 최저점의 개수가 많아지고 그 간격이 좁아진다. 따라서 두께가 얇을 때는 비 선형성이 작아 최고점과 최저점이 없기 때문에 두께를 정확하게 측정하기 어렵다. 하지만 막이 두꺼워 질수록 비 선형성이 커지며 최고점과 최저점의 개수가 늘어나기 때문에 정확한 두께를 측정 할 수 있다. 즉, 비 선형성이 작을 때는 측정 민감도가 낮아 정확한 두께 측정이 어렵지만, 비 선형성이 클 때는 측정 민감도가 높아 정확한 두께 측정이 가능하다고 볼 수 있다.

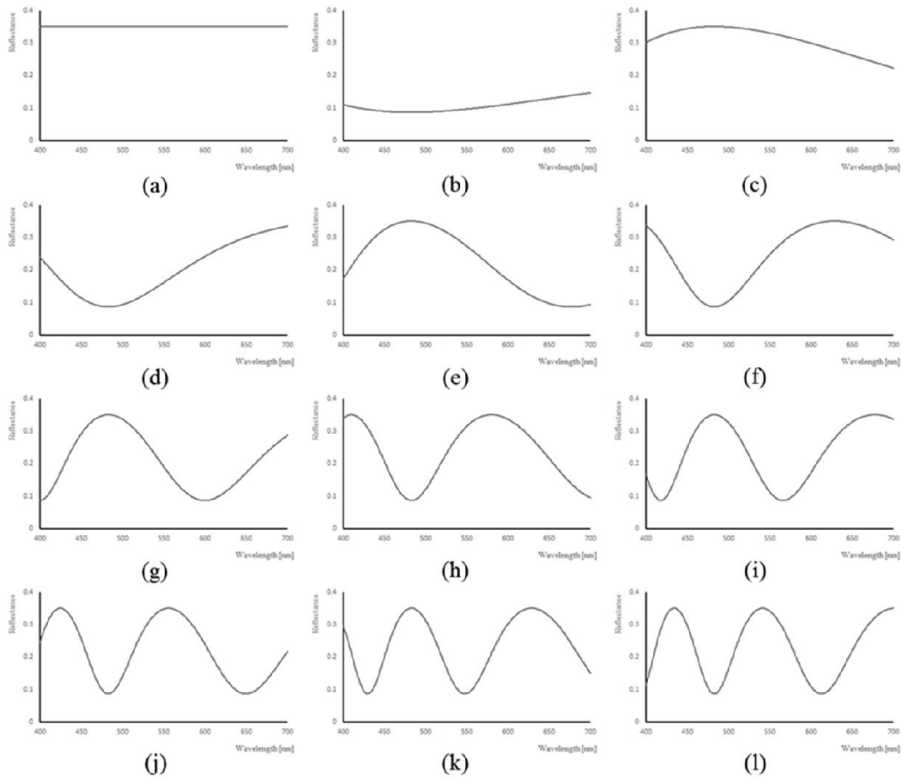


그림 5 - 11 막 두께에 따른 반사도;

- (a) 0 nm, (b) 100nm, (c) 200 nm, (d) 300 nm,
 (e) 400 nm, (f) 500nm, (g) 600 nm, (h) 700 nm,
 (i) 800 nm, (j) 900nm, (k) 1000 nm, (l) 1100 nm,

2006년 Sanjit K. Debnath[99]는 측정 민감도(S)를 그림 5-12와 반사도의 최고값과 최저값의 차이로 정의 하였는데, 박막의 두께가 두꺼워 최고점과 최저점이 항상 존재하면 민감도가 일정하지만 박막의 두께가 얇아 최고점과 최저점이 없으면 민감도가 낮아진다.

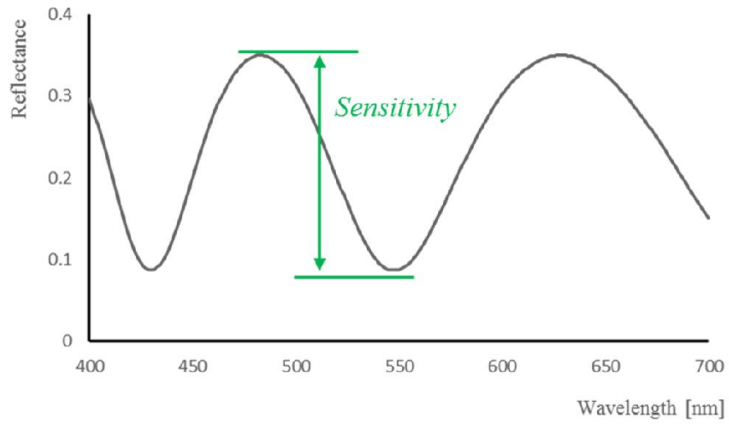


그림 5 - 12 반사도의 측정 민감도

그림 5-13은 BK7(glass) 기질 위에 SiO₂ 박막이 증착된 시료의 반사도로 각각의 두께는 85 nm, 165 nm, 210 nm이다. 165 nm의 민감도는 85 nm의 민감도보다 크지만 210 nm의 민감도는 165 nm의 민감도보다 작은 것을 알 수 있다. 이와 같이 막 두께가 증가함에 따라 민감도가 같이 증가하는 것이 아니라 두께는 증가하지만 민감도는 감소하는 경우도 있다.

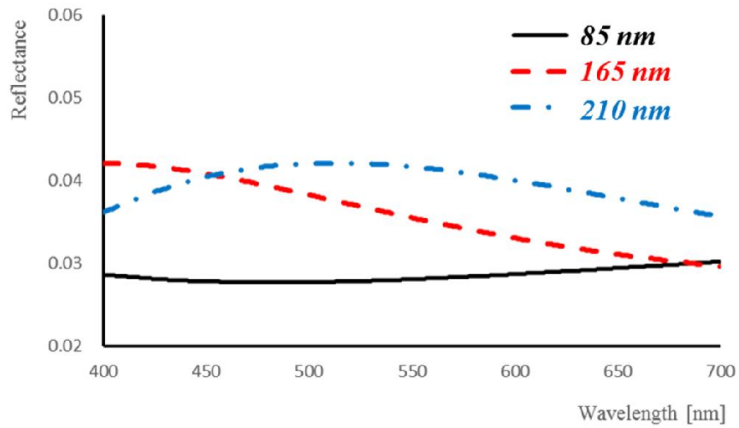


그림 5 - 13 박막 두께에 따른 반사도의 민감도

2012년 Jing-tao Dong과 Rong-sheng Ru[114]이 언급한 것처럼 최종 반사 계수의 크기인 반사도의 민감도와 최종 반사 계수의 위상의 민감도가 서로 다르며, 최종 반사 계수의 크기와 위상을 서로 보완하여 사용하면 정확하고 안정적인 두께를 측정할 수 있다. 그림 5-14는 BK7 기질에 SiO₂ 박막이 증착된 시료의 막 두께에 따른 정규화 된 민감도이며, 크기 민감도의 최고점과 최저점 위치와 위상 민감도의 최고점과 최저점의 위치가 서로 상반되는 것을 알 수 있다. 특히 막 두께가 87 nm 일 때는 크기 민감도가 56 nm 보다 낮지만, 이때의 위상 민감도는 크기 민감도보다 매우 높기 때문에 크기인 반사도만 이용하여 두께를 측정하는 것에 비해 반사도와 위상을 모두 사용하는 것이 유리한 것을 알 수 있다.

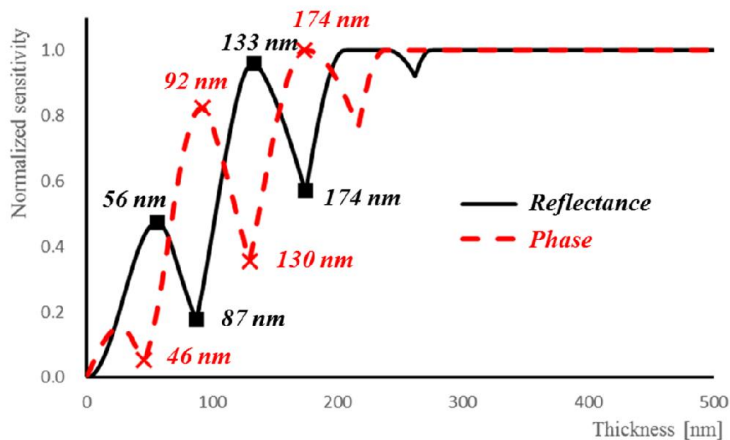


그림 5 - 14 박막 두께에 따른 반사도와 위상의 민감도

PEM과 APEM의 측정 민감도의 영향을 확인 하기 위해 BK7($\tilde{N}=1.517$) 기질에 SiO₂($\tilde{N}=1.457$) 박막이 증착된 시료를 각각의 방법을 이용하여 측정한 시뮬레이션을 진행 하였으며, 측정 오차율은 그림 5-15와 같다.

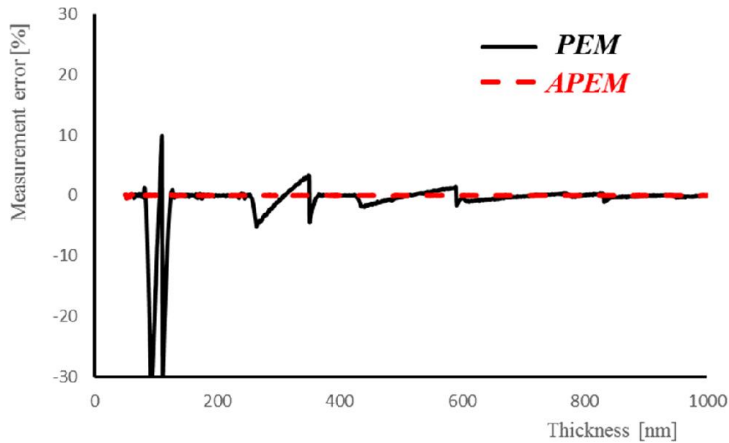


그림 5 - 15 측정 민감도에 의한 PEM와 APEM의 측정 오차율

박막의 소광 계수가 0이기 때문에 소광 계수의 고려 여부에 따른 PEM과 APEM의 차이점은 없으며, 두 방법의 결과 차이는 두께 측정에 반사도만 사용하거나 반사도와 위상 즉, 복소수를 사용하는 것에 의한 것이다. PEM은 박막의 두께가 두꺼울 때는 측정 오차율이 낮지만 박막의 두께가 얇아질수록 측정 오차가 매우 커진다. 반면 APEM은 막 두께에 상관없이 낮은 측정 오차율을 보이는 것을 알 수 있다. 특히 100 nm 정도의 두께일 때 PEM의 측정 오차가 매우 커지는데 이는 그림 5-14에서도 볼 수 있듯이 반사도의 민감도가 매우 작기 때문이다. 하지만 APEM은 반사도와 위상을 모두 사용하기 때문에 민감도가 높아 측정 오차가 작은 것이다. 또한 500 nm 이상의 두께에서도 PEM에 비해 APEM의 측정 오차율이 낮기 때문에 측정 민감도가 높더라도 반사도와 위상을 모두 사용하면 높은 측정 정확도와 안정성을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

Chapter 6. 높이 측정 방법

백색광 간섭 신호를 이용하여 높이를 측정하기 위해서는 가시도 함수를 사용하거나 파장 별 위상을 사용해야 한다. 하지만 시료에 투명 박막이 있으면 그 영향을 받아 가시도 함수와 파장 별 위상이 변하기 때문에 참된 높이를 측정 할 수 없다. 박막의 영향을 받지 않는 참된 높이를 측정하기 위해서는 가시도 함수와 파장 별 위상에서 두께의 영향을 제거해야 한다.

가시도 함수는 모든 단파장 간섭 신호의 가시도 크기의 합으로 박막이 없으면 OPD가 0인 위치를 중심으로 하여 가우시안 형태의 대칭적인 형태로 나타난다. 그렇기 때문에 가시도 함수는 표면에 투명 박막이 없더라도 높이에 해당하는 위치에 따라 비 선형적으로 변한다. 또한 박막이 있을 때 박막에 의한 변화도 비 선형적이기 때문에 가시도 함수는 높이와 두께에 모두 비 선형적이다.

파장 별 위상은 각 단파장 간섭 신호의 위상으로 박막이 없을 때 파장이 증가함에 따라 위상이 감소하는 반비례 관계에 있으며, 파수와는 선형적인 비례 관계에 있다. 또한 시료의 높이가 커짐에 따라 위상의 증가 폭이 커지기 때문에 파장 별 위상은 높이와 선형적인 관계를 가진다. 박막이 있을 때의 파장 별 위상은 선형적인 변화와 비 선형적인 변화를 모두 보인다. 즉, 파장 별 위상은 높이와 두께에 모두 선형적이며, 두께에 비 선형적인 성분도 포함하고 있다.

정리하자면 가시도 함수는 높이와 두께에 모두 비 선형적인 성분만을 포함하고 있으며, 파장 별 위상은 높이에 선형적인 성분과 두께에 선형적인 성분 그리고 두께에 비 선형적인 성분을 포함하고 있다.

박막의 영향을 받지 않는 참된 높이를 측정하기 위해서는 높이와 관련된 성분과 두께에 관련된 성분을 분리하여야 한다. 앞서 설명한 것처럼 가시도 함수는 비 선형적인 성분들의 합이며, 파장 별 위상은 선형적인 성분들과 비 선형적인 성분의 합이다. 그렇기 때문에 높이와 두께 성분을 분리하기 위해서는 비 선형 성분들로 이루어진 가시도 함수가 아닌 선형과 비 선형 성분으로 이루어진 파장 별 위상을 이용하는 것이 유리하다. 또한 가시도 함수는 모든 단파장 간섭 신호의 가시도 크기의 합이므로 그 형상을 예측하기 어렵다. 따라서 박막의 영향을 받지 않는 참된 높이를 구하기 위해서 파장 별 위상을 사용하는 것이 효과적이다.

이 장에서는 푸리에 변환을 통해 복원한 파장 별 위상을 이용하여 박막의 영향을 받지 않는 참된 높이를 빠르게 측정하는 방법에 대해서 설명한다. 앞서 설명한 것처럼 참된 높이를 측정하기 위해서는 파장 별 위상을 높이와 두께 성분으로 분리 하여야 한다. 파장 별 위상에서 두께 성분을 제거하기 위해 5장에서 제안했던 APEM 방법을 이용하여 두께를 측정한 후 이를 이용하여 위상으로부터 높이 성분과 두께 성분을 분리한다. 그 후 분리된 높이 성분의 위상만을 이용하여 참된 높이를 측정한다.

측정 순서는 그림 6-1과 같다. 먼저 획득한 백색광 간섭 신호를 이용하여 파장 별 성분을 복원한다. 복원된 파장 별 성분 중 크기만 이용하여 두께를 측정한다. 그 후 측정한 두께를 이용하여 파장 별 위상으로부터 높이를 측정하고, 측정한 높이를 이용하여 파장 별 위상을 복원한 후 파장 별 크기와 위상을 모두 이용하여 정확한 두께를 측정한다. 그 후 측정한 정확한 두께를 이용하여 다시 높이를 구하는 반복 연산 과정을 거쳐 수렴된 높이와 두께값을 획득하여 최종 3차원 결과물을 만들어낸다.

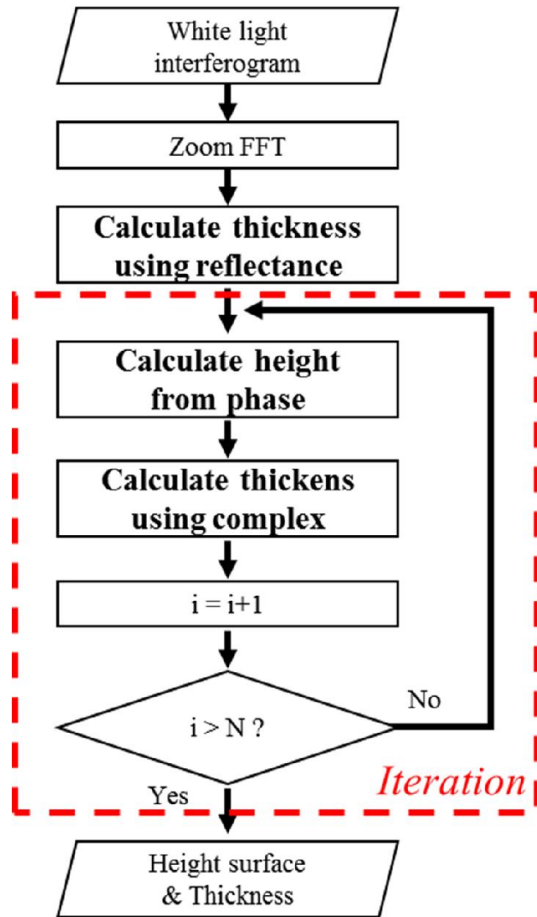


그림 6 - 1 참된 높이와 두께 측정 순서

6.1. 반사도만 이용한 두께 측정

앞서 설명한 것처럼 파장 별 위상은 그림 6-2와 같이 선형적인 높이 성분과 선형적인 두께 성분, 그리고 비 선형적인 두께 성분으로 구성된다. 높이와 두께가 모두 선형 성분을 포함하고 있고, 두께만 비 선형 성분을 포함하고 있다. 그렇기 때문에 높이 혹은 두께 중 하나를 알고 있어야 높이 성분과 두께 성분을 분리할 수 있다.

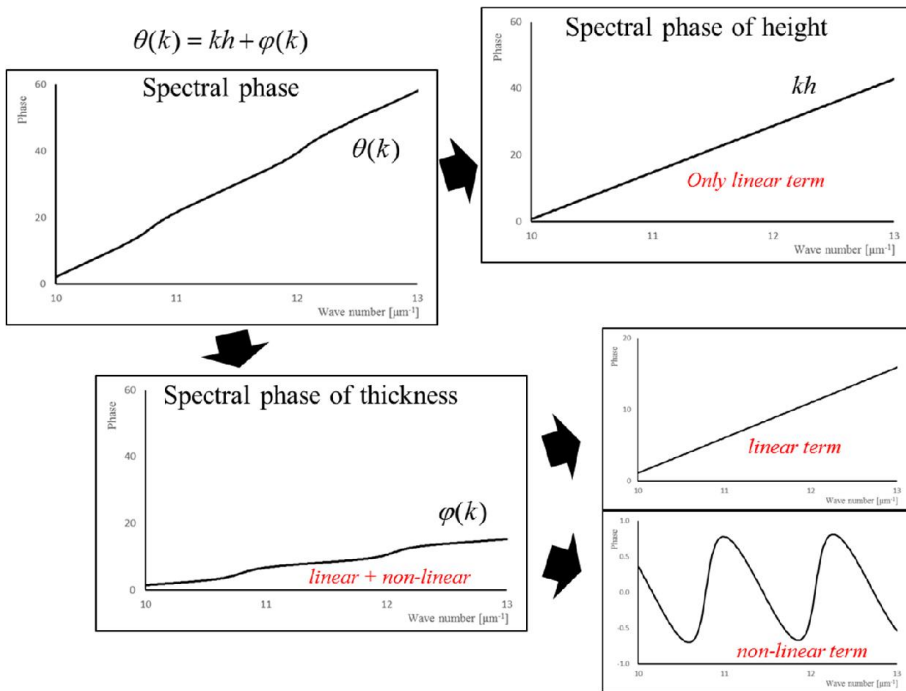


그림 6 - 2 복원된 파장 별 위상의 구성 성분

위상의 비 선형성을 모델링 하여 최소 자승법으로 두께를 측정하는 기존의 방법은 연산 시간이 많이 걸려 빠른 측정이 불가능하다. 따라서 5장에서 제안했던 APEM 방법을 응용하여 최종 반사 계수의 크기만으로 두께를 측정한다. APEM은 크기와 위상을 모두 이용하여 두께를 측정하지만, 복원된 위상은 높이와 두께 성분을 모두 포함하고

있기 때문에 두께 측정에 위상을 사용 할 수 없다. 따라서 높이 성분을 포함하지 않는 파장 별 크기만 이용하여 두께를 측정한다. 크기만 이용한 두께 측정은 PEM과 그 방법이 유사하며 박막의 소광 계수를 고려한 반사도를 간단히 정리 하면 식 6-1과 같다.

$$\begin{aligned}
 (\Re C_3 - C_3') \cos 2\beta + (\Re C_4 - C_4') \sin 2\beta &= C_2 - \Re C_1 \\
 2\beta &= \cos^{-1} \left(\frac{C_2 - \Re C_1}{\sqrt{(\Re C_3 - C_3')^2 + (\Re C_4 - C_4')^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\Re C_4 - C_4'}{\Re C_3 - C_3'} \right)
 \end{aligned}$$

식 6-1

이 때, \Re 은 반사도, C 는 식 5-10에서의 치환 계수들이다. 추출된 β 는 PEM과 마찬가지로 0에서 π 사이의 값을 가지므로 위상 펼침을 한 후 펼쳐진 위상의 기울기를 통해 두께를 측정한다. 그림 6-3은 반사도를 이용하여 두께를 측정하는 과정을 나타낸 것이다.

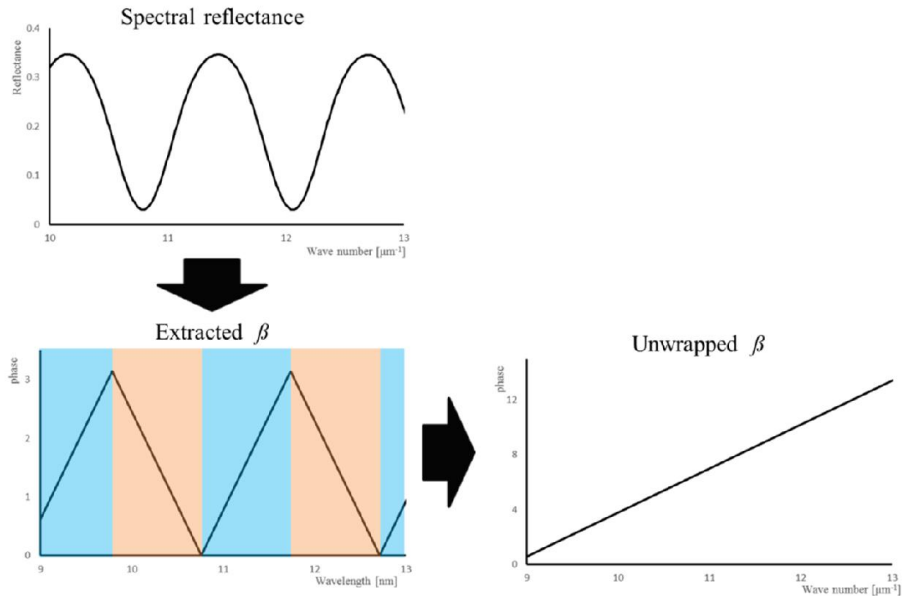


그림 6 - 3 반사도를 이용한 두께 측정

6.2. 참된 높이 측정

6.2.1. 높이 성분의 위상 분리

높이를 측정하기 위해 파장 별 위상으로부터 높이와 두께를 분리해야 하므로 앞서 반사도만 사용하여 측정한 두께를 이용해야 한다. 측정한 두께를 이용하여 최종 반사 계수를 모델링 하고 두께 성분의 위상을 계산한다. 그 후 복원된 파장 별 위상으로부터 계산한 두께 성분의 위상을 제거하여 높이 성분의 위상만 추출한다. 분리된 높이 성분의 위상은 박막에 의한 영향을 제거하였기 때문에 박막의 영향을 받지 않는 참된 높이를 측정 할 수 있다. 그림 6-4는 복원된 파장 별 위상으로부터 두께 성분을 제외하여 높이 성분만 분리하는 과정이다.

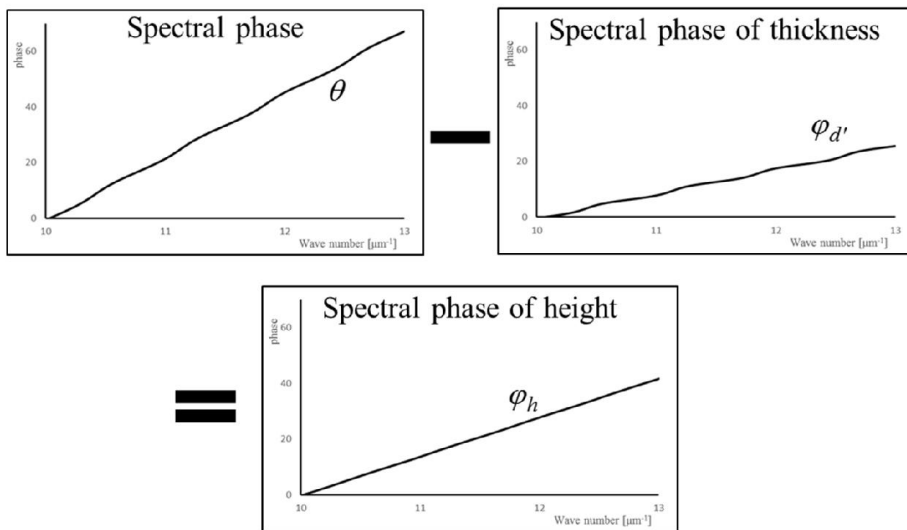


그림 6 - 4 복원된 위상으로부터 분리한 높이 성분의 위상

6.2.2. 높이 측정

분리된 높이 성분의 위상은 식 6-2와 같이 파수와 높이에 선형적으로 비례한다.

$$\varphi_h = 2kh \quad \text{식 6-2}$$

따라서 그림 6-5와 같이 분리된 높이 성분의 위상의 파수에 따른 기울기를 계산함으로써 높이를 측정 할 수 있다.

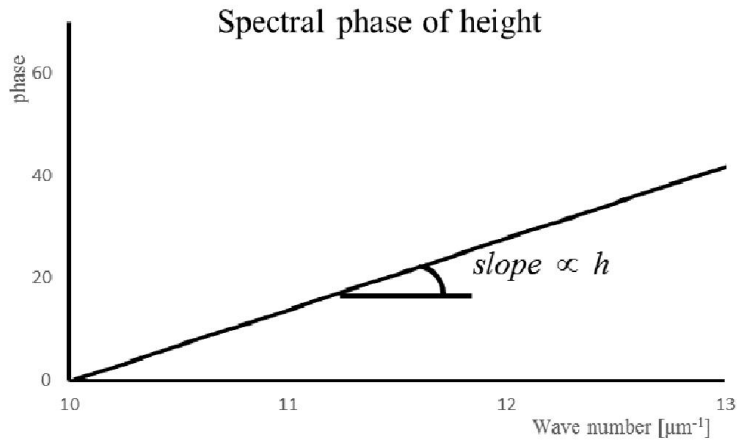


그림 6 - 5 분리된 높이 성분의 위상

6.3. 복소수를 이용한 두께 측정 방법

6.3.1. 두께 성분의 위상 분리

정확한 두께를 측정하기 위해서는 복원된 위상으로부터 두께 성분만 분리하여 5장에서 언급한 것과 같이 파장 별 성분의 크기와 위상을 모두 이용하여야 한다. 그렇기 때문에 앞 절에서 측정한 높이를 이용하여 복원된 위상으로부터 높이 성분을 제거 하여야 한다. 이를 위해 그림 6-6과 같이 측정한 높이의 선형적인 위상을 계산하여 복원된 위상으로부터 제거함으로써 두께 성분의 위상을 분리한다.

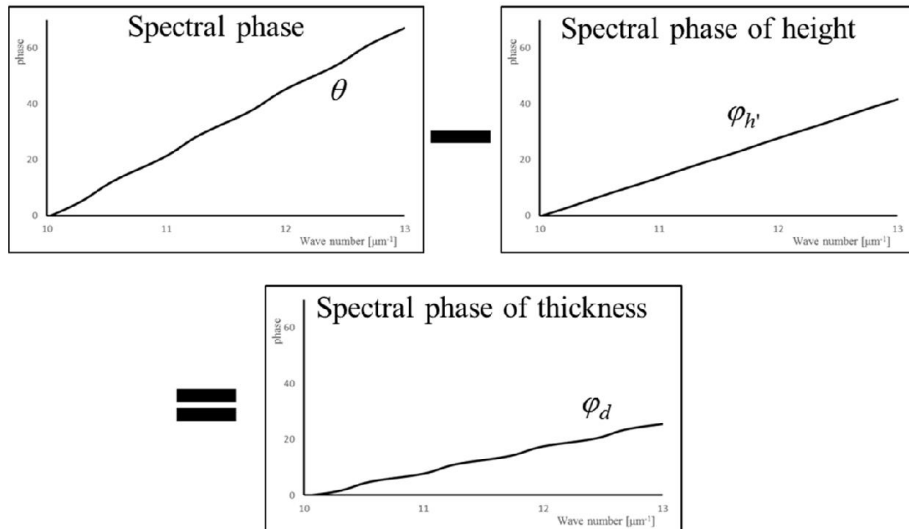


그림 6 - 6 복원된 위상으로부터 분리한 두께 성분의 위상

6.3.2. 복소수를 이용한 두께 측정 방법

복원된 반사 계수의 크기와 분리된 위상을 이용하여 더욱 정확한 두께를 측정 할 수 있다. 크기와 위상 즉, 복소수를 이용하여 두께를 측정하는 방법은 5장에서 설명한 APEM과 동일하다. 식 5-11과 같이 반사 계수의 크기인 반사도와 분리된 위상을 이용하여 β 를 추출한 후 그 기울기로부터 박막의 두께를 측정 할 수 있다.

6.4. 반복 연산

이와 같은 방법으로 참된 높이와 두께를 동시에 측정 할 수 있다. 높이와 두께는 서로 영향을 받으며, 둘 중 하나가 잘못 측정 된다면 나머지 하나도 잘못 측정된다. 따라서 높이와 두께의 정확한 측정이 더욱 중요해진다.

앞서 6.2절에서는 측정한 높이를 구하기 위해서 크기만 사용하여 측정한 두께를 이용하였다. 이는 복소수를 사용하여 측정한 두께보다 정확하지 않으므로 크기만 사용한 두께를 이용하여 측정한 높이는 복소수를 사용한 두께를 이용하여 측정한 높이보다 큰 측정 오차를 가진다. 그렇기 때문에 정확한 높이를 측정하기 위해서는 복소수를 사용한 두께를 이용해야 한다. 따라서 그림 6-1과 같은 반복 연산 과정이 필요하다.

먼저 크기만 사용하여 두께를 측정한다. 측정한 두께를 이용하여 높이를 측정한 후 복소수를 이용하여 정확한 두께를 계산한다. 정확하게 측정한 두께를 이용하여 다시 높이를 정확하게 측정한다. 그 후 다시 두께를 측정하고 또 다시 높이를 측정하는 반복 연산 과정을 통해 정확한 참된 높이와 두께를 측정 할 수 있다. 이런 반복 연산과정을 거쳐 외부 진동과 노이즈에 의한 측정 오차를 줄일 수 있다. 그림 6-7은 이와 같은 방법으로 측정한 높이와 두께를 통해 구현한 표면 형상이다.

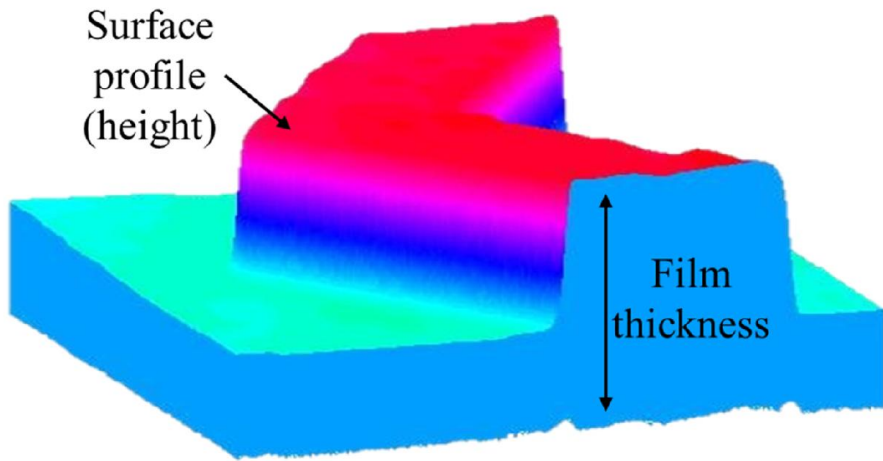


그림 6 - 7 높이와 두께를 이용하여 복원한 표면 형상

Chapter 7. 시뮬레이션

5장에서 제안한 두께 측정 방법과 6장에서 제안한 높이 측정 방법을 검증하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 측정 결과 비교를 위해 기존에 활용되던 가시도 함수를 이용한 측정 방법(WLPSI)과 모델링과 비 선형 최소 자승법을 이용한 측정 방법과 비교하였다. 가시도 함수를 이용한 측정 방법은 높이만 측정 가능하며 두께 측정은 불가능하다. 반면에 모델링을 이용한 방법과 이 논문에서 제안한 방법은 높이와 두께 측정이 가능하다. 각 방법을 이용한 높이 측정 오차율과 두께 측정 오차율을 확인 하였다. 박막의 두께 50 nm에서 1500 nm 사이의 각각의 측정 오차율을 확인 하였다. 또한 기질과 박막의 재질에 따라 측정 결과가 달라지므로, 산업계에서 많이 사용되는 재질들을 이용하여 시뮬레이션을 진행 하였다.

7.1. 높이 측정 시뮬레이션

가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI), 모델링을 이용한 방법 그리고 제안한 방법 3가지를 이용하여 박막의 두께에 따른 높이 측정 결과를 비교 하였다. 또한 SiO_2/Si ($\tilde{N}=1.457$ / $\tilde{N}=3.9-i0.02$), PR/Si ($\tilde{N}=1.65-i0.002$ / $\tilde{N}=3.9-i0.02$) 그리고 $\text{SiO}_2/\text{BK7}$ ($\tilde{N}=1.457$ / $\tilde{N}=1.517$) 3가지 시료에 관한 시뮬레이션을 진행하였다.

7.1.1. SiO₂/Si의 높이 측정

각 방법에 따른 높이 측정 결과는 그림 7-1과 같다. 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)에 비해 모델링을 이용한 방법과 제안한 방법이 높이 측정 정확도가 높은 것을 알 수 있다.

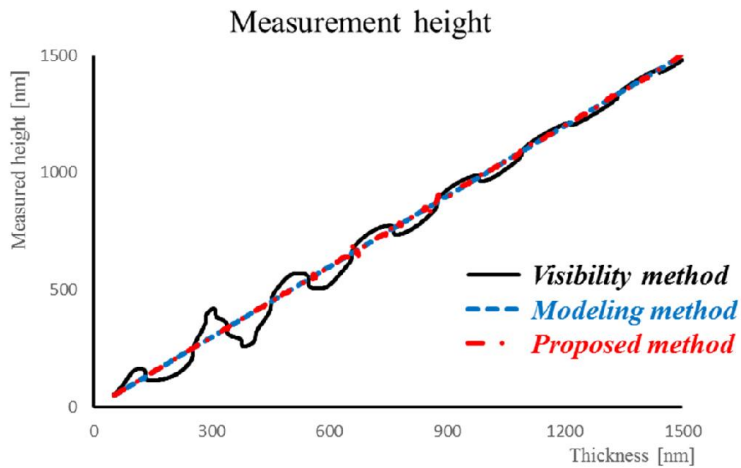


그림 7 - 1 SiO₂/Si의 높이 측정 결과

높이 측정 결과에 따른 측정 오차율은 그림 7-2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 박막이 얇을 때는 측정 오차율이 매우 크지만 두께가 두꺼워질수록 오차율이 작아진다. 반면에 모델링을 이용한 방법과 제안한 방법은 막 두께에 상관없이 그 오차율이 작은 것을 알 수 있다. 전체 두께 중 가장 큰 오차율은 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 53.302 %, 모델링을 이용한 방법은 4.757 %, 제안한 방법은 4.726 %이다. 따라서 모델링과 제안한 방법으로 측정한 높이가 가시도 함수를 이용하여 측정한 높이에 비해 매우 정확하다는 것을 알 수 있다.

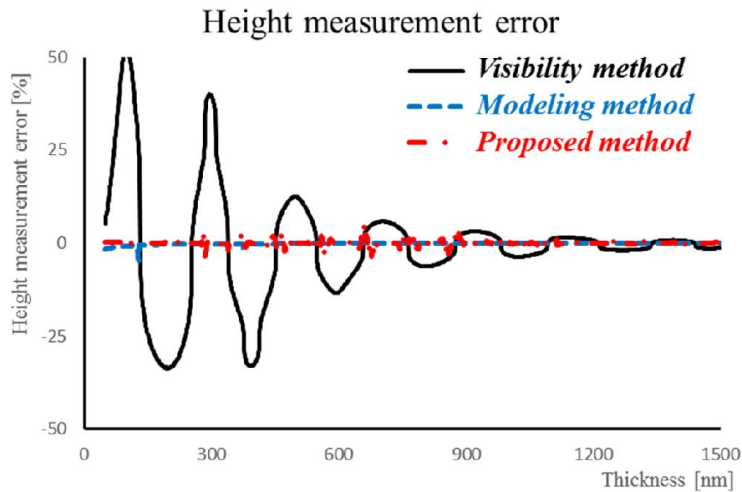


그림 7 - 2 SiO₂/Si의 높이 측정 오차율

7.1.2. PR/Si의 높이 측정

각 방법에 따른 높이 측정 결과는 그림 7-3과 같다. 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)에 비해 모델링을 이용한 방법과 제안한 방법이 높이 측정 정확도가 높은 것을 알 수 있다.

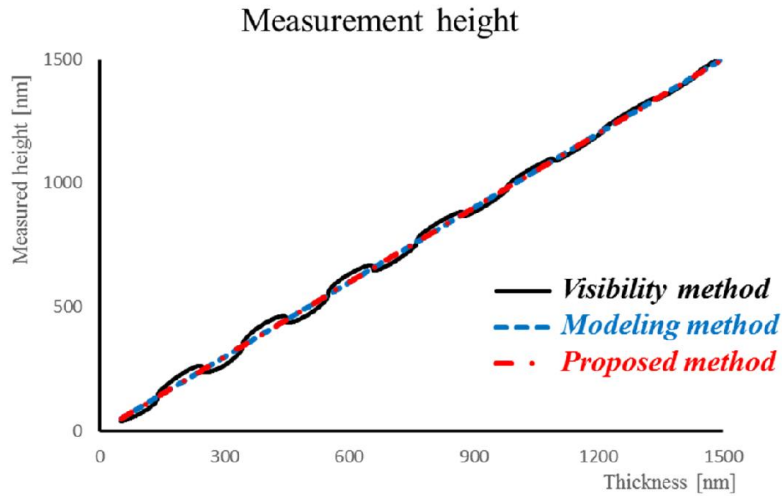


그림 7 - 3 PR/Si의 높이 측정 결과

높이 측정 결과에 따른 측정 오차율은 그림 7-4와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 박막이 얇을 때는 측정 오차율이 매우 크지만 두께가 두꺼워질수록 오차율이 작아진다. 반면에 모델링을 이용한 방법과 제안한 방법은 막 두께에 상관없이 그 오차율이 작은 것을 알 수 있다. 전체 두께 중 가장 큰 오차율은 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 27.547 %, 모델링을 이용한 방법은 1.593 %, 제안한 방법은 0.386 %이다. 따라서 모델링과 제안한 방법으로 측정한 높이가 가시도 함수를 이용하여 측정한 높이에 비해 매우 정확하다는 것을 알 수 있다.

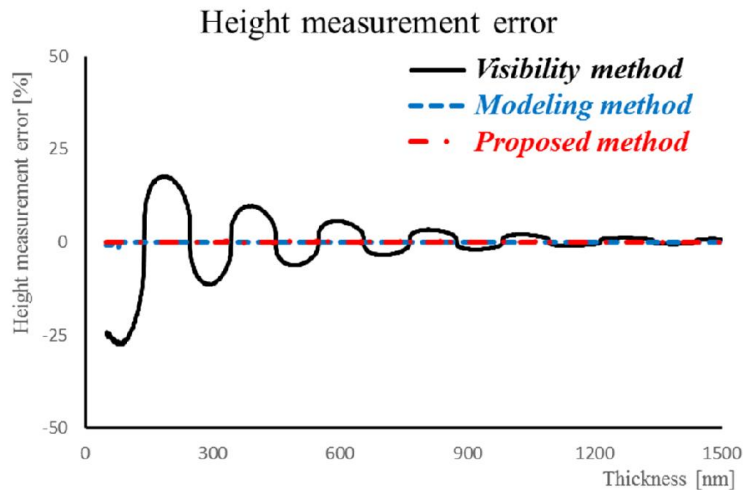


그림 7 - 4 PR/Si의 높이 측정 오차율

7.1.3. SiO₂/BK7의 높이 측정

각 방법에 따른 높이 측정 결과는 그림 7-3과 같다. 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)에 비해 모델링을 이용한 방법과 제안한 방법이 높이 측정 정확도가 높은 것을 알 수 있다.

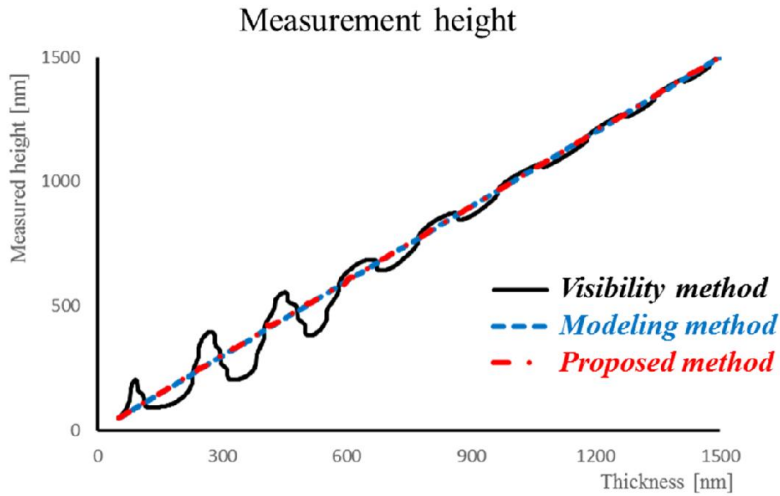


그림 7 - 5 SiO₂/BK7의 높이 측정 결과

높이 측정 결과에 따른 측정 오차율은 그림 7-6과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 박막이 얇을 때는 측정 오차율이 매우 크지만 두께가 두꺼워질수록 오차율이 작아진다. 반면에 모델링을 이용한 방법과 제안한 방법은 막 두께에 상관없이 그 오차율이 작은 것을 알 수 있다. 전체 두께 중 가장 큰 오차율은 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 129.288 %, 모델링을 이용한 방법은 5.809 %, 제안한 방법은 4.016 %이다. 따라서 모델링과 제안한 방법으로 측정한 높이가 가시도 함수를 이용하여 측정한 높이에 비해 매우 정확하다는 것을 알 수 있다.

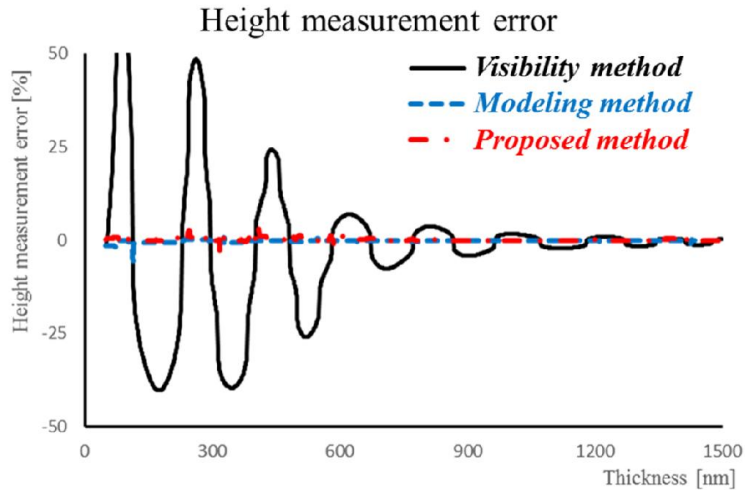


그림 7 - 6 SiO₂/BK7의 높이 측정 오차율

7.1.4. 높이 측정 결과

3가지 재질에 따른 높이 측정 결과를 정리하면 그림 7-7과 같다. 가시도 함수를 이용한 높이 측정 방법(WLPSI)은 재질에 관계 없이 모두 20 % 이상의 측정 오차율을 보이며, 모델링 방법과 제안한 방법은 모두 5 % 이하의 측정 오차율을 보이는 것을 알 수 있다. 가시도 함수를 이용한 높이 측정 방법(WLPSI)은 투명 박막의 영향을 고려하지 않았기 때문에 매우 큰 측정 오차율을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 모델링 방법과 제안한 방법은 시료의 재질에 무관하게 측정 오차율이 낮은 것을 알 수 있다.

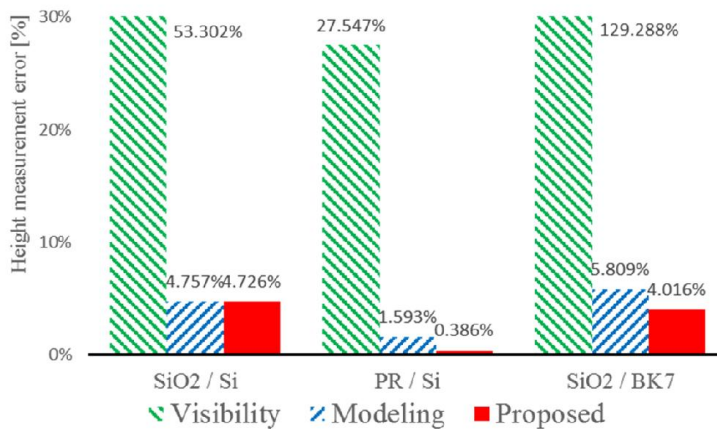


그림 7 - 7 각 재질에 따른 높이 측정 결과

모델링 방법과 제안한 방법이 모두 측정 오차율이 낮지만 모델링 방법이 제안한 방법에 비해 근소하게 오차율이 높으며, 연산시간이 긴 단점이 있다. 또한 LMA를 이용하기 때문에 초기값 설정에 따라 전역 최소값이 아닌 지역 최소값으로 수렴하는 문제가 있다.

7.2. 두께 측정 시뮬레이션

모델링 방법과 제안한 방법 2가지를 이용하여 두께 측정 결과를 비교하였다. 가시도 함수를 이용한 방법은 두께를 측정하지 못하기 때문에 앞서 높이 측정에 사용되었던 가시도 함수를 이용한 방법은 비교하지 않았다. 높이 측정 시뮬레이션과 마찬가지로 SiO_2/Si ($\tilde{N}=1.457 / \tilde{N}=3.9-i0.02$), PR/Si ($\tilde{N}=1.65-i0.002 / \tilde{N}=3.9-i0.02$) 그리고 $\text{SiO}_2/\text{BK7}$ ($\tilde{N}=1.457 / \tilde{N}=1.517$) 3가지 시료에 관한 시뮬레이션을 진행하였다.

7.2.1. SiO_2/Si 의 두께 측정

두 방법에 따른 두께 측정 결과는 그림 7-8과 같다. 모델링 방법과 제안한 방법 모두 정확한 두께를 측정한 것을 알 수 있다.

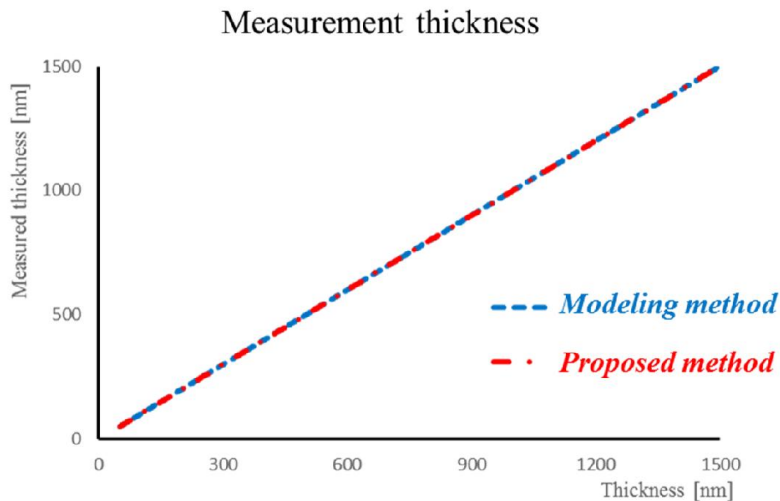


그림 7 - 8 SiO_2/Si 의 두께 측정 결과

두께 측정 결과에 따른 측정 오차율은 그림 7-9과 같이 두 방법 모두 측정 오차율이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 모델링 방법과 제안한 방법의 전체 두께 영역 중 가장 큰 오차율은 각각 2.627 %, 0.655 % 이다.

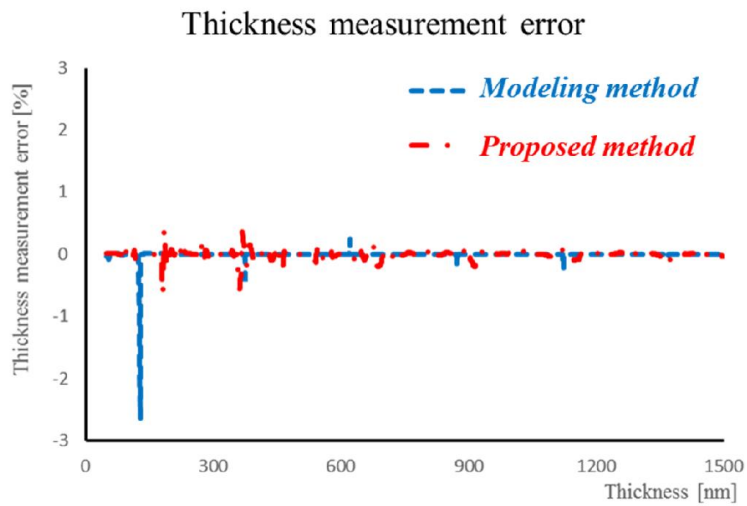


그림 7 - 9 SiO₂/Si의 두께 측정 오차율

7.2.2. PR/Si의 두께 측정

두 방법에 따른 두께 측정 결과는 그림 7-10과 같다. 모델링 방법과 제안한 방법 모두 정확한 두께를 측정할 수 있다.

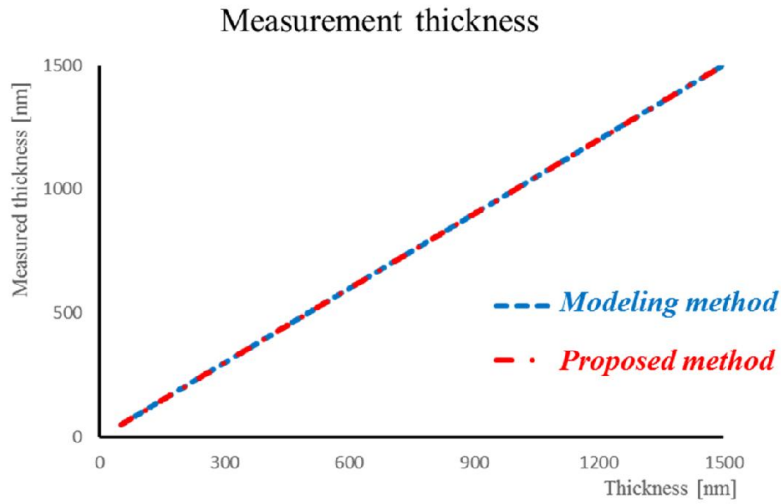


그림 7 - 10 PR/Si의 두께 측정 결과

두께 측정 결과에 따른 측정 오차율은 그림 7-11과 같이 두 방법 모두 측정 오차율이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 하지만 모델링 방법은 200 nm 이하의 얇은 박막에서 측정 오차율이 크다는 것을 알 수 있다. 모델링 방법과 제안한 방법의 전체 두께 영역 중 가장 큰 오차율은 각각 1.117 %, 0.017 % 이다.

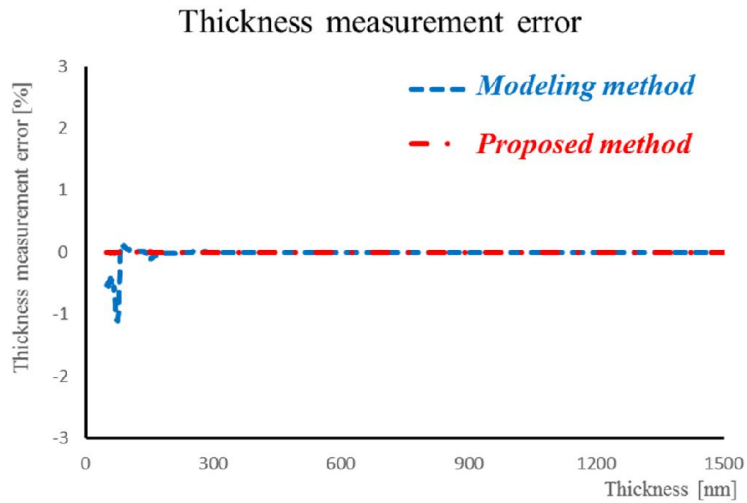


그림 7 - 11 PR/Si의 두께 측정 오차율

7.2.3. SiO₂/BK7의 두께 측정

두 방법에 따른 두께 측정 결과는 그림 7-12와 같다. 모델링 방법과 제안한 방법 모두 정확한 두께를 측정한 것을 알 수 있다.

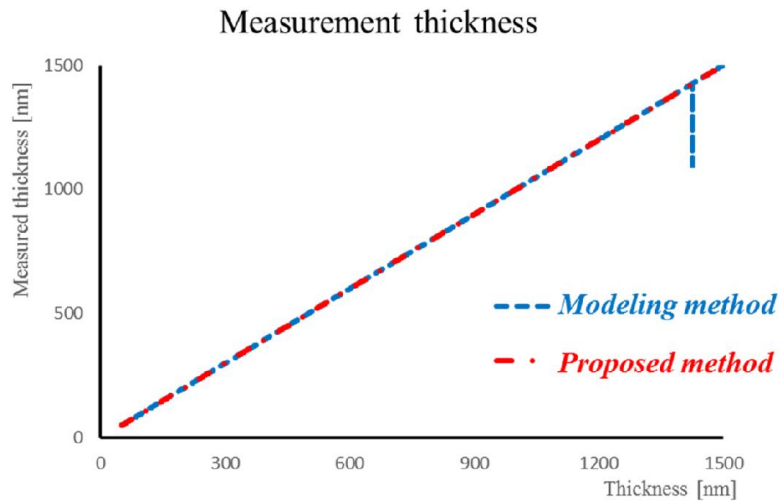


그림 7 - 12 SiO₂/BK7의 두께 측정 결과

두께 측정 결과에 따른 측정 오차율은 그림 7-13과 같이 두 방법 모두 측정 오차율이 크지 않은 것을 볼 수 있다. 모델링 방법은 LMA의 문제점인 지역 최소값으로 수렴하는 경우 큰 오차율을 보일 수 있다. 모델링 방법과 제안한 방법의 전체 두께 영역 중 가장 큰 오차율은 각각 22.897 %, 0.512 % 이다.

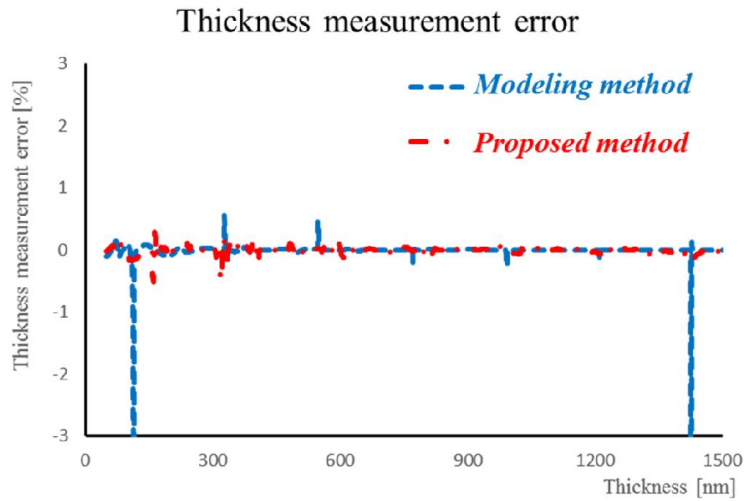


그림 7 - 13 SiO₂/BK7의 두께 측정 오차율

7.2.4. 두께 측정 결과

3가지 재질에 따른 두께 측정 결과를 정리하면 그림 7-14과 같다. 모델링 방법과 제안한 방법은 모두 일반적으로는 3 % 이하의 측정 오차율을 보이지만 모델링 방법의 경우 초기값 설정을 잘못하여 지역 최소값으로 수렴하면 측정 오차가 20 %가 넘는 측정 오차율을 보일 수 있음을 확인 할 수 있었다.

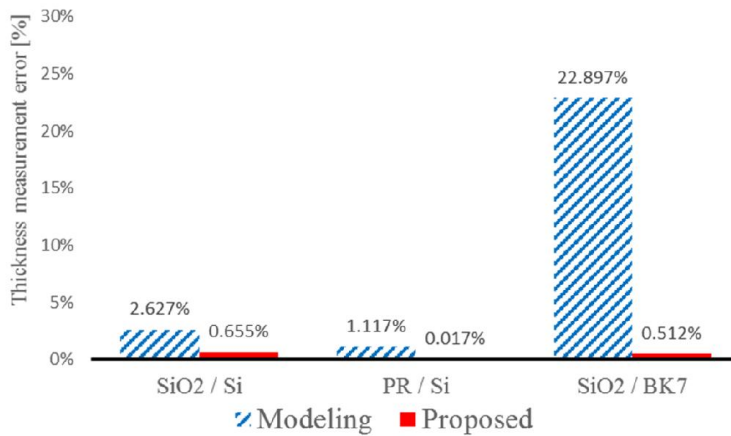


그림 7 - 14 각 재질에 따른 두께 측정 결과

Chapter 8. 실험

제안한 측정 방법의 성능을 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 먼저 푸리에 변환 후의 파장 분해능에 따른 측정 결과에 대한 실험을 진행하였다. 분해능이 높아짐에 따라 높이와 두께의 측정 정확도와 측정 반복도를 확인 함으로써 측정에 필요한 최소 분해능을 확인하였다.

다음으로 반복 연산에 관한 실험을 진행하였다. 6장에서 언급한 것처럼 높이와 두께의 측정 결과가 서로 영향을 받으므로 각각의 값을 이용하여 측정값을 다시 계산하는 반복 연산 많이 수행할수록 안정적인 측정 결과를 얻을 수 있다. 따라서 반복 연산의 횟수에 따른 높이와 두께의 측정 결과를 확인하여 측정에 필요한 최소 반복 연산 횟수를 확인하였다.

다양한 시료를 기존의 측정 방법들과 제안한 측정 방법으로 각각 측정하여 그 결과 비교를 통해 제안한 방법의 성능을 검증하였다. 기존의 측정 방법은 7장의 시뮬레이션에 사용했던 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)과 모델링과 비 선형 최소 자승법을 이용한 방법 두 가지이며, 측정 시료는 Si 기질에 SiO₂ 박막이 증착 되어 있는 표준 시편들과 실제 산업 현장에서 사용되는 시료들을 이용하였다.

마지막으로 미세 패턴의 전체 영역의 높이와 두께를 측정하는 연산 시간을 비교함으로써 in-line에 적용 가능 여부도 확인 하였다.

8.1. 시스템 구성

실험에 사용한 시스템은 그림 8-1과 같은 미라우 간섭계이다. 광원으로는 백색 광원인 할로겐 램프를 사용하였으며, 압전 구동기를 통해 Z축 방향으로 주사하며 백색광 간섭 신호를 획득하였다. 대물 렌즈는 10배 렌즈를 사용하였으며 개구수(numerical aperture, N.A)는 0.3 이다. 신호 획득에는 영역 카메라(area camera)를 사용하여 전체 영역의 간섭 신호를 모두 획득하여 미세 패턴의 높이와 두께 분포를 측정 할 수 있도록 하였다. 할로겐 램프의 스펙트럼은 그림 8-2와 같으며, 시스템 구성을 정리하면 표 8-1과 같다.

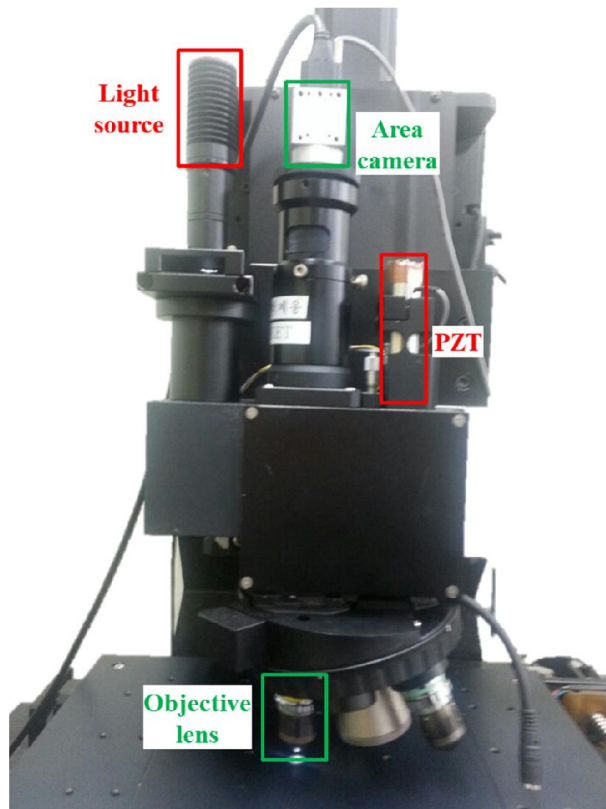


그림 8 - 1 미라우 백색광 간섭계

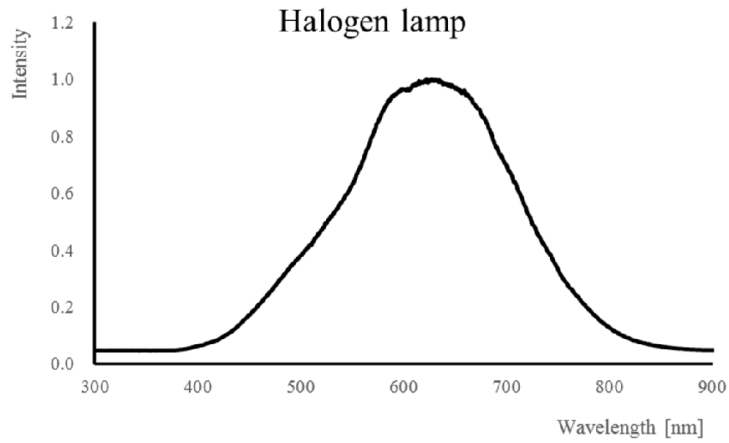


그림 8 - 2 할로젠 램프의 스펙트럼

표 8 - 1 측정 시스템 구성

Specification	
Interferometry	Mirau type
Light source	Halogen lamp
Objective lens	10x
CCD	Area camera(BW)
Scan range	15 μ m
Scan interval	80 nm

8.2. 파수 분해능에 관한 실험

파수 분해능을 4장에서 언급한 푸리에 변환 후 파장 별 성분 의 간격이다. 파수 분해능이 높으면 원하는 파장 대역의 데이터 개수가 늘어나고 외부 노이즈에 따른 변환 오차도 작아진다. 그렇기 때문에 두께에 의한 비 선형을 이용하기 유리해져 분해능이 높을수록 측정에 유리하다. 하지만 푸리에 변환은 높은 분해능을 얻기 위해서는 긴 연산 시간이 필요하다. 이를 극복하기 위한 zoom FFT도 복원하기 위한 파장 대역이 넓을수록 확대 가능한 배율이 줄어들기 때문에 분해능에 한계가 있다. 따라서 안정적인 측정 결과를 얻기 위한 최소 분해능을 확인하기 위한 실험을 진행 하였다.

측정 시료는 Si 기질에 SiO₂ 박막이 증착 되어 있는 표준 시편으로 0.8 μm 와 0.9 μm 가 증착 되어 있는 영역의 경계를 측정하여 각 위치의 단차인 높이와 각 위치의 두께를 측정하였다. 반복 연산은 2번 진행 하였으며, 파수 분해능은 $1/1(0.153 \mu\text{m}^{-1})$ 부터 1/2, 1/4, 1/8, 1/16까지 증가 시키며 실험하였다.

그림 8-1은 측정 높이, 그림 8-2는 높이 측정 오차율, 표 8-2는 측정 결과이다.

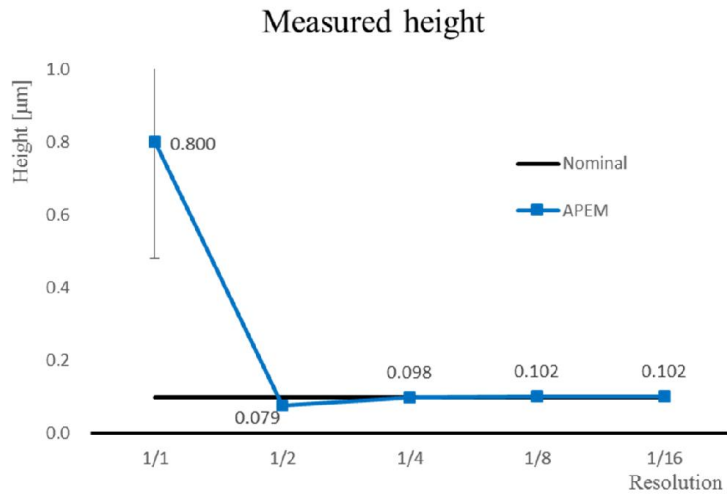


그림 8 - 3 파수 분해능에 따른 높이 측정 결과

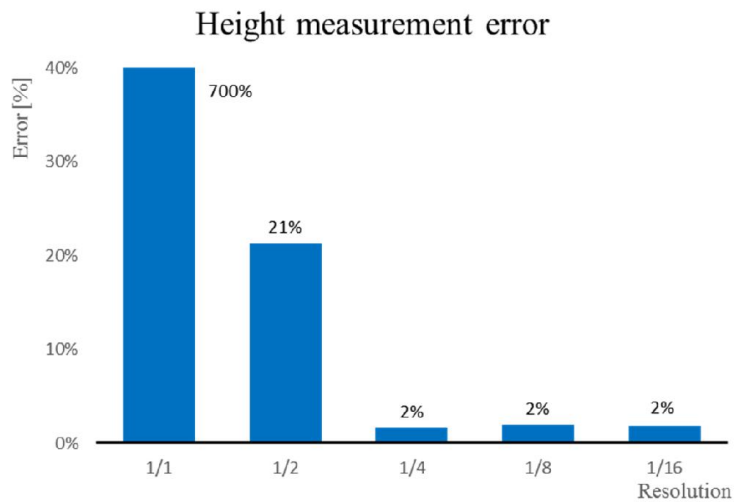


그림 8 - 4 파수 분해능에 따른 높이 측정 오차율

표 8 - 2 파수 분해능에 따른 높이 측정 결과

	Resolution 1/1	Resolution 1/2	Resolution 1/4	Resolution 1/8	Resolution 1/16
Nominal height [μm]	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Measured height [μm]	0.800	0.079	0.098	0.102	0.102
Measurement error [%]	700 %	21 %	2 %	2 %	2%
Repeatability (3σ) [μm]	0.639	0.011	0.006	0.006	0.006

높이 측정 결과를 보면 파수 분해능이 1/1 ($0.153 \mu\text{m}^{-1}$)일 때는 측정 오차율이 700 %, 측정 반복도가 $0.639 \mu\text{m}$ 로 정상적인 측정이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 하지만 파수 분해능이 증가함에 따라서 측정 오차율이 줄어들고 반복도가 향상되는 것을 알 수 있다. 파수 분해능이 1/4일 때 측정 오차율과 반복도가 안정되며, 파수 분해능이 1/8 일 때와 1/16일 때의 측정 결과가 동일하기 때문에 1/8 에서 수렴된 결과가 나온 것을 알 수 있으며, 1/8 이상의 파수 분해능은 필요하지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 파수 분해능을 최소 1/4 이상이어야 하며 1/8이 적당하다는 것을 알 수 있다.

두께 측정은 0.8 μm 영역과 0.9 μm 영역을 각각 측정하였다. 그림 8-3과 그림 8-4 그리고 표 8-3은 0.8 μm 의 측정 두께, 두께 측정 오차를, 두께 측정 결과이다.

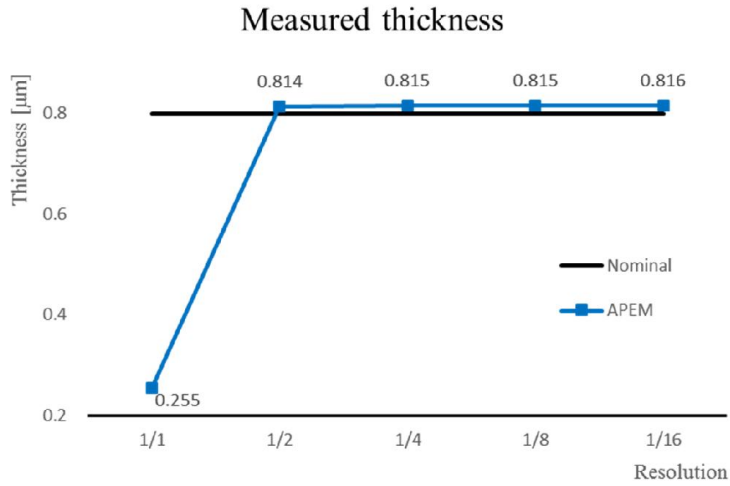


그림 8 - 5 파수 분해능에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과

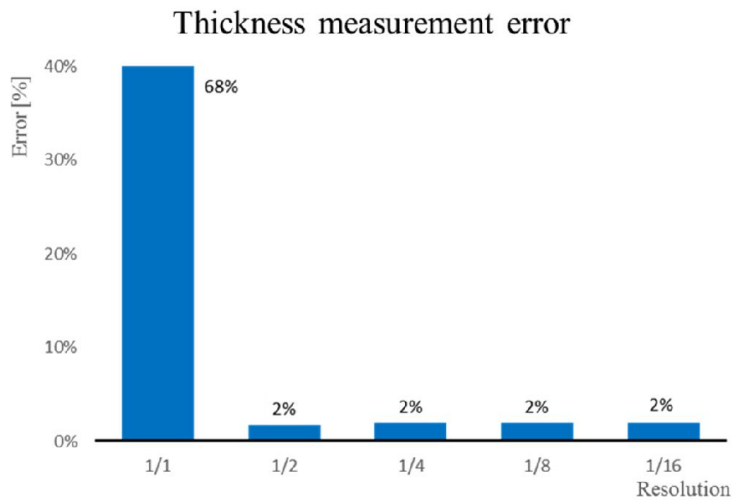


그림 8 - 6 파수 분해능에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 오차율

표 8 - 3 파수 분해능에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과

	Resolution 1/1	Resolution 1/2	Resolution 1/4	Resolution 1/8	Resolution 1/16
Nominal thickness [μm]	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
Measured thickness [μm]	0.255	0.814	0.815	0.815	0.816
Measurement error [%]	68 %	2 %	2 %	2 %	2 %
Repeatability (3σ) [μm]	0.021	0.005	0.006	0.006	0.006

그림 8-5, 그림 8-6 그리고 표 8-4는 0.9 μm 의 측정 두께, 측정 오차율, 측정 두께 결과이다.

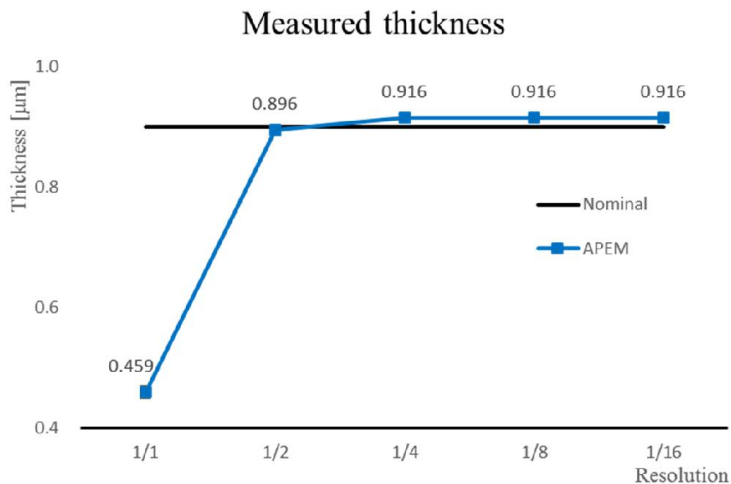


그림 8 - 7 파수 분해능에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과

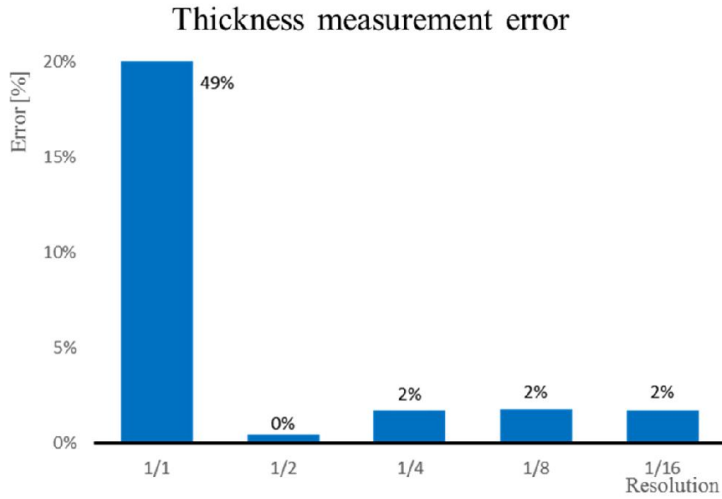


그림 8 - 8 파수 분해능에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 오차율

표 8 - 4 파수 분해능에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과

	Resolution 1/1	Resolution 1/2	Resolution 1/4	Resolution 1/8	Resolution 1/16
Nominal thickness [μm]	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
Measured thickness [μm]	0.459	0.896	0.916	0.916	0.916
Measurement error [%]	49 %	0 %	2 %	2 %	2%
Repeatability (3σ) [μm]	0.008	0.008	0.004	0.004	0.004

두 위치의 두께 측정 결과를 보면 파수 분해능이 $1/1 (0.153 \mu\text{m}^{-1})$ 일 때는 측정 오차율이 68 %와 49%로 매우 크지만 분해능이 $1/2$ 이상이 되면 측정 오차율이 작아지고 반복도가 안정되는 것을 알 수 있다. 따라서 두께 측정을 위한 파수 분해능은 최소 $1/2$ 이상 되어야 하며, $1/4$ 이면 안정적인 것을 알 수 있다. 두께 측정이 높이 측정에 비해 파수 분해능이 낮더라도 측정 결과가 정확한 것은 높이는 파장 별 위상만 사용하는 반면 두께는 파장 별 위상과 파장 별 크기를 모두 사용하기 때문이다.

파수 분해능에 따른 높이와 두께의 측정 오차율과 반복도를 확인한 결과 파수 분해능이 최소 $1/4$ 이상이어야 하며, 안정적인 결과를 얻기 위해서는 $1/8$ 이 적당하다는 것을 알 수 있다. 따라서 4장에서 설명한 zoom FFT 기법을 적용하여 연산 시간을 단축하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다.

8.3. 반복 연산에 관한 실험

반복 연산은 6장에서 제안한 높이와 두께를 다시 측정하는 과정이다. 높이와 두께 모두 파장 별 위상을 이용하여 측정하기 때문에 서로 영향을 받는다. 따라서 정확한 높이와 두께를 측정하기 위해서는 측정한 결과를 이용하여 다시 측정하는 반복 연산 과정을 거쳐야 한다. 반복 연산 과정을 거치며 높이와 두께의 수렴된 측정값을 얻을 수 있다.

측정 시료는 Si 기질에 SiO₂ 박막이 증착 되어 있는 표준 시편으로 0.8 μm와 0.9 μm가 증착 되어 있는 영역의 경계를 측정하여 각 위치의 단차인 높이와 각 위치의 두께를 측정하였다. 파수 분해능은 1/8로 진행하였으며, 반복 연산을 하지 않은 것부터 5번 반복 연산하는 것까지 다양한 실험을 진행 하였다.

그림 8-7, 그림 8-8 그리고 표 8-5는 반복 연산 횟수에 따른 측정 높이, 높이 측정 오차율, 높이 측정 결과이다.

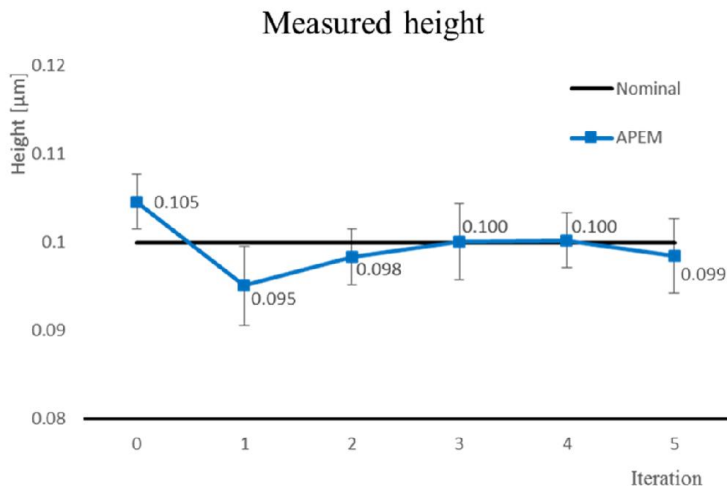


그림 8 - 9 반복 연산에 따른 높이 측정 결과

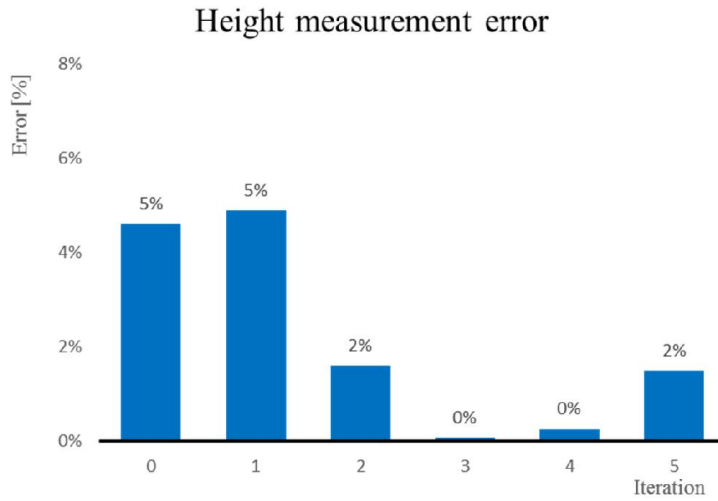


그림 8 - 10 반복 연산에 따른 높이 측정 오차율

표 8 - 5 반복 연산에 따른 높이 측정 결과

	Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Iteration 5
Nominal height [μm]	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Measured height [μm]	0.105	0.095	0.098	0.100	0.100	0.099
Measurement error [%]	5 %	5 %	2 %	0 %	0 %	1 %
Repeatability (3σ) [μm]	0.006	0.009	0.006	0.009	0.006	0.008

높이 측정 결과를 보면 측정 반복도는 반복 연산 횟수가 증가하더라도 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 측정 높이값은 반복 연산 횟수가 증가함에 따라 참값인 $0.1 \mu\text{m}$ 에 수렴하는 것을 알 수 있다. 반복 연산을 하지 않은 것과 1번 반복 연산한 것은 측정 오차율이 5 %이지만 참값에 수렴하는 과정으로 2번 이상 반복 연산을 했을 때 측정값이 $0.1 \mu\text{m}$ 으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 반복 연산 횟수는 2회 이상이 적당하다는 것을 확인 할 수 있다.

두께 측정은 $0.8 \mu\text{m}$ 영역과 $0.9 \mu\text{m}$ 영역을 각각 측정하였다. 그림 8-9과 그림 8-10 그리고 표 8-6은 $0.8 \mu\text{m}$ 의 측정 두께, 두께 측정 오차율, 두께 측정 결과이다.

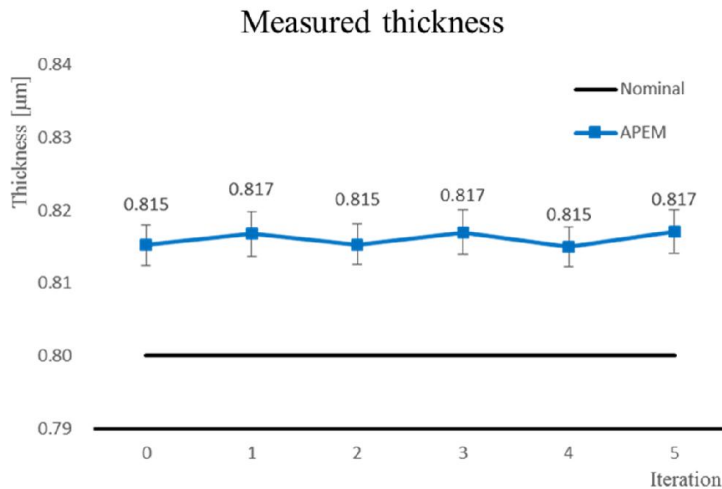


그림 8 - 11 반복 연산에 따른 $0.8 \mu\text{m}$ 의 두께 측정 결과

Thickness measurement error

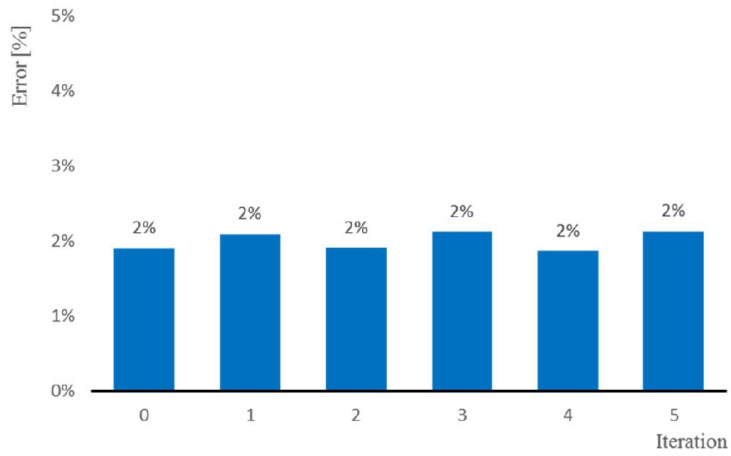


그림 8 - 12 반복 연산에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 오차율

표 8 - 6 반복 연산에 따른 0.8 μm 의 두께 측정 결과

	Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Iteration 5
Nominal thickness [μm]	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
Measured thickness [μm]	0.815	0.817	0.815	0.817	0.815	0.817
Measurement error [%]	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %
Repeatability (3σ) [μm]	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006

그림 8-11, 그림 8-12 그리고 표 8-7은 0.9 μm 의 측정 두께, 두께 측정 오차율, 두께 측정 결과이다.

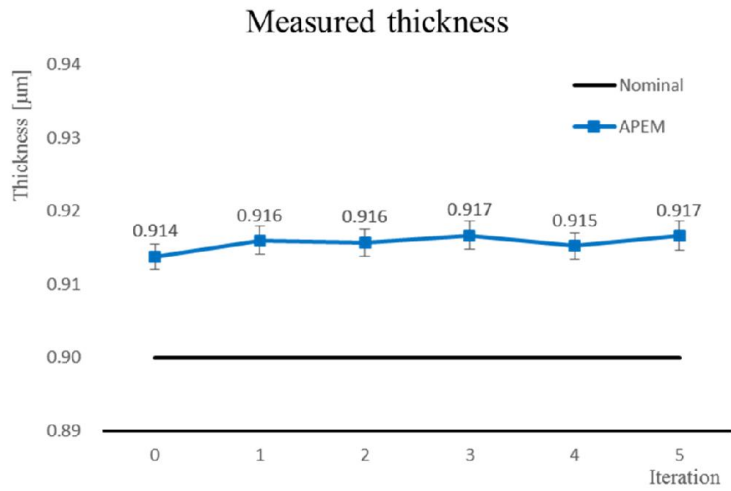


그림 8 - 13 반복 연산에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과

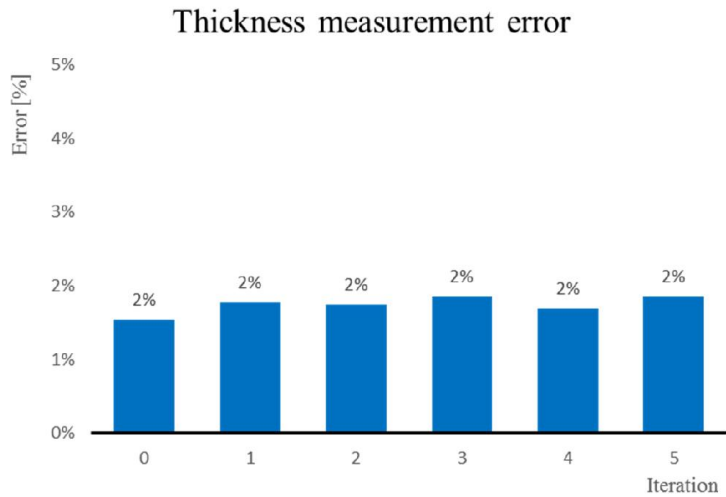


그림 8 - 14 반복 연산에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 오차율

표 8 - 7 반복 연산에 따른 0.9 μm 의 두께 측정 결과

	Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Iteration 5
Nominal thickness [μm]	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
Measured thickness [μm]	0.914	0.916	0.916	0.917	0.915	0.917
Measurement error [%]	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %
Repeatability (3σ) [μm]	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004

두 위치의 두께 측정 결과를 보면 반복 연산을 하지 않더라도 측정 오차율이 작고 반복도가 안정적인 것을 알 수 있다. 따라서 반복 연산을 하지 않아도 안정적인 두께 측정이 가능하다. 두께 측정은 반복 연산에 영향을 받지 않는 과장 별 크기도 이용하기 때문에 높이 측정에 비해 반복 연산에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

따라서 높이와 두께를 안정적으로 측정하기 위해서 2회 이상의 반복 연산을 진행 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

8.4. 시료에 관한 실험

제안한 측정 방법의 성능을 검증하기 위해 표준 시편과 다양한 시료를 측정하여 기존 측정 방법과 그 결과를 비교하였다. 표준 시편은 Si 기질에 SiO₂ 박막이 증착 되어 있는 것으로 0.1 μm 에서 1.1 μm 까지 다양한 두께를 가진다. 제안한 측정 방법을 7장의 시뮬레이션에서 사용한 두 가지의 기존 측정 방법과 비교하였다. 7장에서 언급 했듯이 높이 측정은 가시도 함수 방법(WLPSI), 모델링 방법 그리고 제안한 방법 세가지로 측정 했으며, 두께 측정은 모델링 방법과 제안한 방법 두 가지 방법으로 측정 하였다.

8.4.1. 표준 시편

표준 시편은 그림 8-13과 같이 Si 기질에 SiO₂ 박막이 두께 별로 증착 되어 있는 시료이다. 박막의 두께는 1.1 μm 에서 0.6 μm 까지 0.1 μm 간격으로 총 6개의 영역으로 구분된다. 각 영역의 경계를 측정하여 박막의 두께와 표면 형상인 높이를 측정 할 수 있다. 측정 조건은 표 8-8과 같으며, 동일한 위치를 10번 반복 측정하여 그 값들의 평균을 측정값으로 하였으며, 반복 측정값들의 표준 편차의 3배인 값을 측정 반복도로 계산 하였다.

표 8 - 8 표준 시편의 측정 조건

	Specification
Objective lens	10 x
Scan range	15 μm
Scan interval	80 nm
Spectral resolution	1/8 (0.019 μm^{-1})
Number of iteration	2
Initial value of non-linear least square fitting	Height : 9, 6, 7, 8.5, 7.5 μm Thickness : 1.05, 0.95, 0.85, 0.75, 0.65 μm

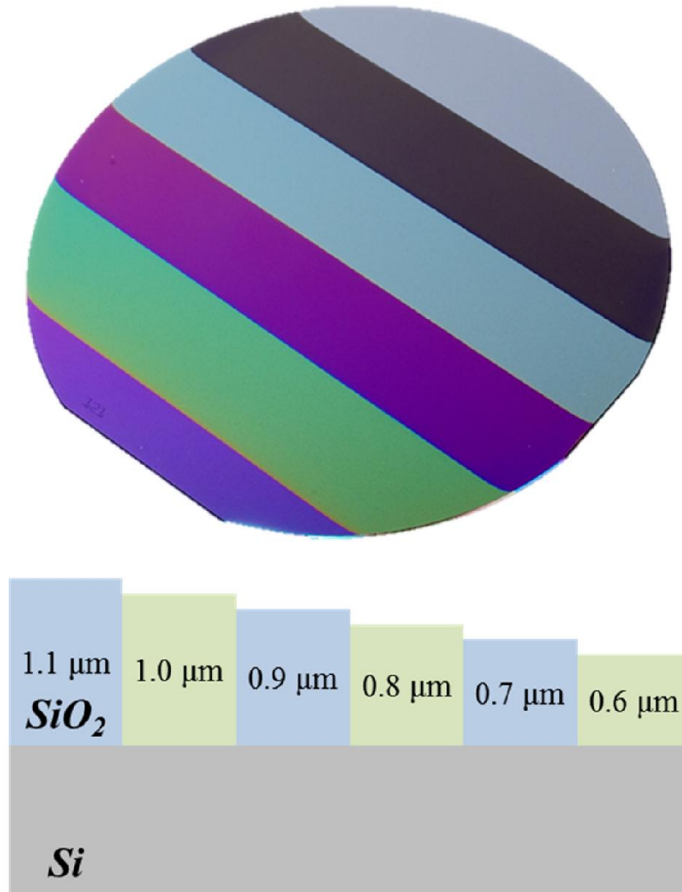


그림 8 - 15 표준 시편의 구성

그림 8-14, 그림 8-15, 표 8-9, 표 8-10 그리고 표 8-11은 측정 높이, 높이 측정 오차율, 높이 측정 결과, 높이 측정 오차율 결과, 높이 측정 반복도(3σ)를 정리한 것이다.

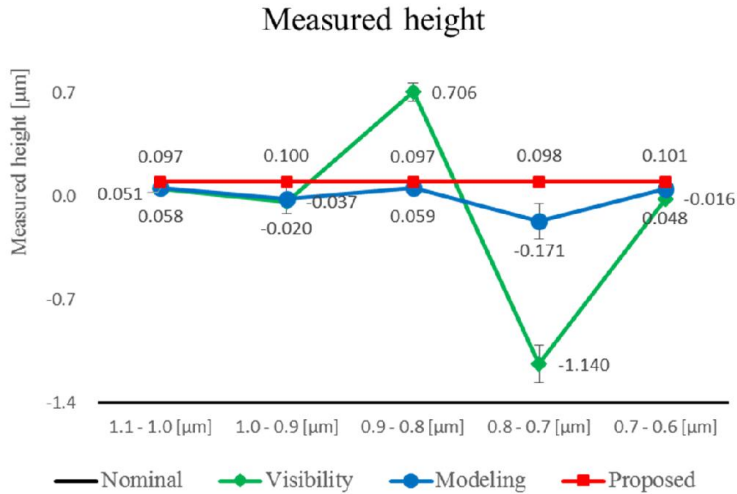


그림 8 - 16 표준 시편의 높이 측정 결과

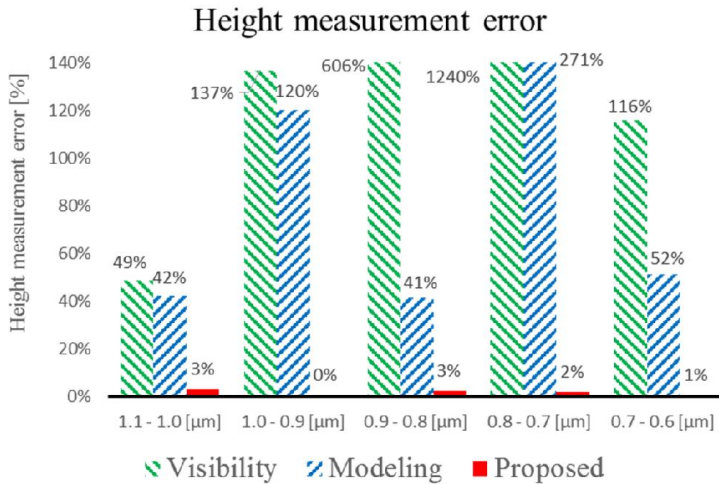


그림 8 - 17 표준 시편의 높이 측정 오차율

표 8 - 9 표준 시편의 각 측정 방법 별 높이 측정 결과

	1.1 - 1.0	1.0 - 0.9	0.9 - 0.8	0.8 - 0.7	0.7 - 0.6
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Nominal height [μm]	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
Visibility method [μm]	0.051	-0.037	0.706	-1.140	-0.016
Modeling method [μm]	0.058	-0.020	0.059	-0.171	0.048
Proposed method [μm]	0.097	0.100	0.097	0.098	0.101

표 8 - 10 표준 시편의 각 측정 방법 별 높이 측정 오차율

	1.1 - 1.0	1.0 - 0.9	0.9 - 0.8	0.8 - 0.7	0.7 - 0.6
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Visibility method [%]	49 %	137 %	606 %	1240 %	116 %
Modeling method [%]	42 %	120 %	41 %	271 %	52 %
Proposed method [%]	3 %	0 %	3 %	2 %	1 %

표 8 - 11 표준 시편의 각 측정 방법 별 높이 측정 반복도

	1.1 - 1.0	1.0 - 0.9	0.9 - 0.8	0.8 - 0.7	0.7 - 0.6
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Visibility method [μm]	0.006	0.064	0.126	0.254	0.001
Modeling method [μm]	0.010	0.193	0.009	0.244	0.056
Proposed method [μm]	0.007	0.009	0.006	0.006	0.012

각 측정 방법 별 높이 측정 결과를 확인해 보면 가시도 함수를 이용한 높이 측정 방법(WLPSI)은 박막의 영향으로 인해 측정 오차율이 매우 큰 것을 알 수 있다. 박막의 두께가 1 μm 이상일 때는 그 영향이 작아 측정 오차율이 박막의 두께가 1 μm 이하일 때보다 낮지만 약 50 %로 매우 큰 측정 오차율을 보인다. 그리고 박막의 두께가 1 μm 이하일 때에는 100 %가 넘는 측정 오차율을 보이며, 측정 오차가 매우 큰 경우 1000 %의 측정 오차율을 보이기 때문에 박막이 있는 경우에는 가시도 함수를 이용하는 기존의 WLPSI 방법으로는 표면 형상인 높이를 측정하는 것이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

모델링과 비 선형 최소 자승법을 이용하여 높이를 측정하는 방법은 측정 오차율이 40 ~ 50 % 정도이거나 100 % 넘는 것을 볼 수 있다. 측정 오차율이 100 %가 넘는 결과는 전역 최소값으로 수렴하지 않고 지역 최소값으로 수렴하여 측정 오차가 매우 커진 것이다. 지역 최소값으로 수렴하더라도 동일한 지역 최소값으로 수렴하지 못하기 때문에 측정 반복도 또한 매우 좋지 않다. 측정 오차율이 40 ~ 50 % 정도의 결과는 전역 최소값으로 수렴했지만 실제 복원된 파장 별 성분과

모델링한 과장 별 성분간의 차이로 인해 발생한 것으로, 모델링 시에 고려하지 않은 여러 가지 요인들에 의한 것이다. 이 때의 측정값들은 참값과 차이가 있지만 측정 반복도가 좋고 경향성이 일치 하기 때문에 충분히 주의하면 박막이 있더라도 표면 형상을 어느 정도 측정 가능하다고 할 수 있다. 하지만 시료와 측정 조건이 바뀌면 관련 연산 조건 등을 변경해야 하기 때문에 in-line에 사용하기에는 큰 어려움이 있다.

이 논문에서 제안한 방법으로 측정한 높이는 박막의 두께에 상관 없이 모두 3 % 이하의 측정 오차율을 보이며 측정 반복도도 안정적인 것을 알 수 있다.

그림 8-16, 그림 8-17, 표 8-12, 표 8-13 그리고 표 8-14는 측정 두께, 두께 측정 오차율, 두께 측정 결과, 두께 측정 오차율 결과, 두께 측정 반복도(3σ)를 정리한 것이다.

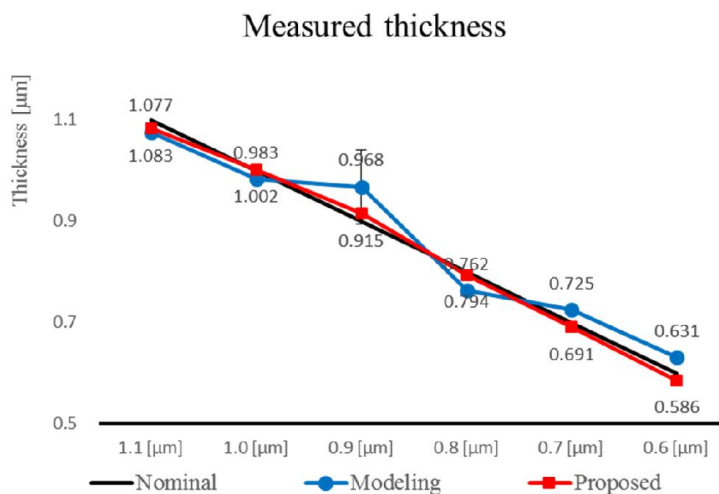


그림 8 - 18 표준 시편의 두께 측정 결과

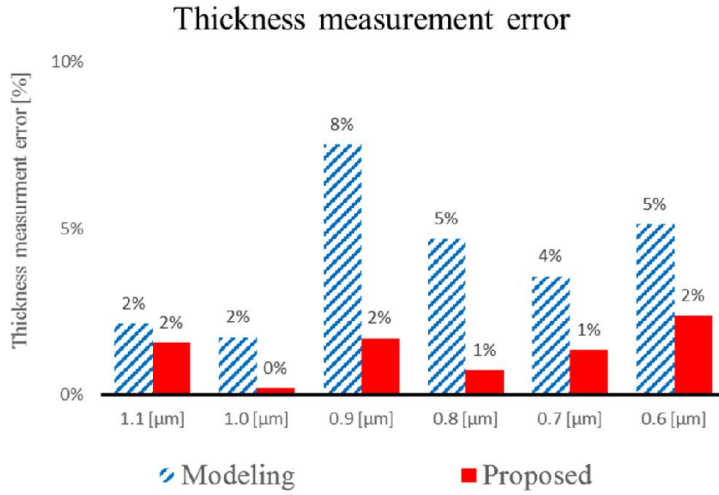


그림 8 - 19 표준 시편의 두께 측정 오차율

표 8 - 12 표준 시편의 두께 측정 결과

	1.1 [μm]	1.0 [μm]	0.9 [μm]	0.8 [μm]	0.7 [μm]	0.6 [μm]
Nominal thickness [μm]	1.100	1.00	0.900	0.800	0.700	0.600
Modeling method [μm]	1.077	0.983	0.968	0.762	0.725	0.631
Proposed method [μm]	1.083	1.002	0.915	0.794	0.691	0.586

표 8 - 13 표준 시편의 두께 측정 오차율

	1.1 [μm]	1.0 [μm]	0.9 [μm]	0.8 [μm]	0.7 [μm]	0.6 [μm]
Modeling method [%]	2 %	2 %	8 %	5 %	4 %	5 %
Proposed method [%]	2 %	0 %	2 %	1 %	1 %	2 %

표 8 - 14 표준 시편의 두께 측정 반복도

	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Modeling method [μm]	0.001	0.001	0.148	0.000	0.001	0.002
Proposed method [μm]	0.003	0.004	0.004	0.008	0.003	0.007

두께 측정 결과를 보면 모델링 방법과 제안한 방법 모두 측정 오차가 10 % 이하로 나타났으며 측정 반복도도 안정적인 것을 볼 수 있다. 하지만 모델링을 이용한 방법 중 0.9 μm 의 측정 반복도가 좋지 않은데 이는 반복 측정 중 대부분은 전역 최소값으로 수렴 했지만, 지역 최소값으로 수렴한 결과도 있기 때문이다. 그렇기 때문에 두께 측정도 높이 측정과 마찬가지로 지역 최소값으로 수렴하는 문제가 발생 할 수 있다. 반면에 제안한 방법은 모든 측정 오차율이 2 % 이하이며, 측정 반복도 또한 안정적인 것을 확인 할 수 있다.

8.4.2. 표준 4분할 시편

표준 4분할 시편은 그림 8-18과 같이 Si 시료에 SiO₂가 두께 별로 증착 되어 있으며, 각각의 영역을 한번에 측정 할 수 있는 시료이다. 박막의 두께는 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 μm 이며, 시편의 중앙을 측정함으로써 4개 영역을 한번에 측정 할 수 있다. 측정 조건은 표 8-15과 같으며, 동일한 위치를 10 번 반복 측정하여 그 값들의 평균을 측정값으로 하였으며, 그 값들의 표준편차의 3배인 값을 측정 반복도로 계산 하였다.

표 8 - 15 표준 4분할 시편의 측정 조건

	Specification
Objective lens	10 x
Scan range	15 μm
Scan interval	80 nm
Spectral resolution	1/8 (0.019 μm^{-1})
Number of iteration	2
Initial value of non-linear least square fitting	Height : 10 μm Thickness : 0.5 μm

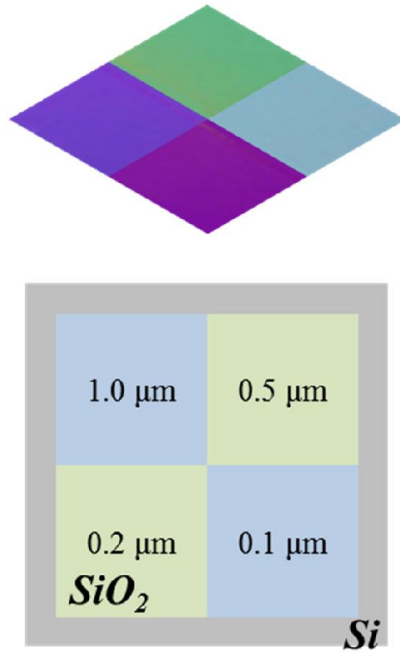


그림 8 - 20 표준 4분할 시편의 구성

그림 8-19, 그림 8-20, 표 8-16, 표 8-17 그리고 표 8-18은 측정 높이, 높이 측정 오차율, 높이 측정 결과, 높이 측정 오차율 결과, 높이 측정 반복도(3σ)를 정리한 것이다.

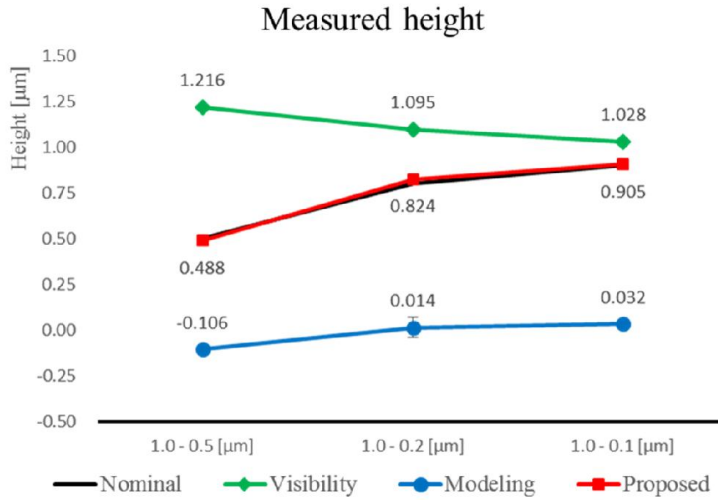


그림 8 - 21 표준 4분할 시편의 높이 측정 결과

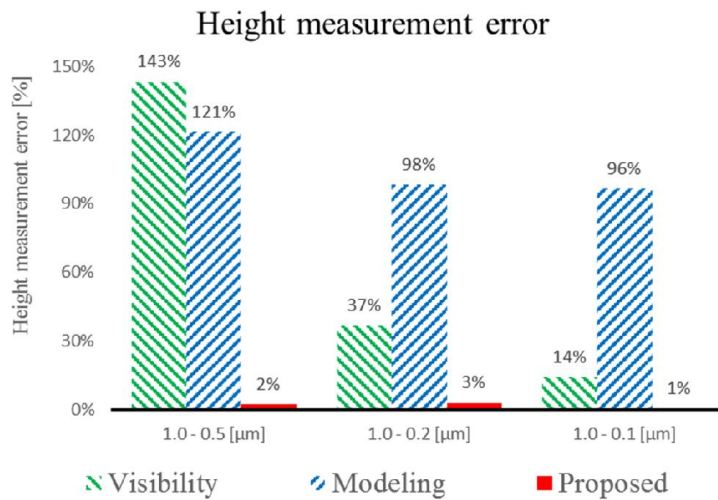


그림 8 - 22 표준 4분할 시편의 높이 측정 오차율

표 8 - 16 표준 4분할 시편의 높이 측정 결과

	1.0 - 0.5 [μm]	1.0 - 0.2 [μm]	1.0 - 0.1 [μm]
Nominal height [μm]	0.500	0.800	0.900
Visibility method [μm]	1.216	1.095	1.028
Modeling method [μm]	-0.106	0.014	0.032
Proposed method [μm]	0.488	0.824	0.905

표 8 - 17 표준 4분할 시편의 높이 측정 오차율

	1.0 - 0.5 [μm]	1.0 - 0.2 [μm]	1.0 - 0.1 [μm]
Visibility method [%]	143 %	37 %	14 %
Modeling method [%]	121 %	98 %	96 %
Proposed method [%]	2 %	3 %	1 %

표 8 - 18 표준 4분할 시편의 높이 측정 반복도

	1.0 - 0.5 [μm]	1.0 - 0.2 [μm]	1.0 - 0.1 [μm]
Visibility method [μm]	0.006	0.009	0.014
Modeling method [μm]	0.024	0.107	0.037
Proposed method [μm]	0.007	0.009	0.006

높이 측정 결과를 보면 가시도 함수를 이용한 방법(WLPSI)은 표준 시편과 마찬가지로 측정 오차가 매우 큰 것을 확인 할 수 있다. 하지만 $1.0 - 0.1 \mu\text{m}$ 의 높이는 측정 오차율이 작는데 이는 $1.0 \mu\text{m}$ 영역은 박막의 두께가 간섭 거리와 비슷한 두께이기 때문에 두 개의 간섭 신호가 어느 정도 분리되어 박막의 영향이 적으며, $0.1 \mu\text{m}$ 영역은 두께가 매우 얇기 때문에 그 영향이 적어 낮은 높이 측정 오차율을 보인다.

모델링을 이용한 방법은 $0.5 \mu\text{m}$ 영역을 제외한 모든 영역이 지역 최소값으로 수렴했기 때문에 측정 오차가 매우 큰 것을 볼 수 있다. 또한 다양한 지역 최소값으로 수렴하여 측정 반복도도 또한 좋지 않다. 이와 같이 잘못된 초기값 설정에 의해 전역 최소값이 아닌 지역 최소값으로 수렴하는 문제가 발생하기 때문에 높이 분포가 다양한 패턴에는 적용하기 어려운 문제점이 있다.

반면에 제안한 방법은 높이 측정 오차율이 모두 3 % 이내이며, 측정 반복도도 안정적이므로 가시도 함수를 이용한 방법과 모델링을 이용한 방법보다 박막이 있는 시료의 표면 형상 측정에 유리한 것을 알 수 있다.

그림 8-21, 그림 8-22, 표 8-19, 표 8-20 그리고 표 8-21은 측정 두께, 두께 측정 오차율, 두께 측정 결과, 두께 측정 오차율 결과, 두께 측정 반복도(3σ)를 정리한 것이다.

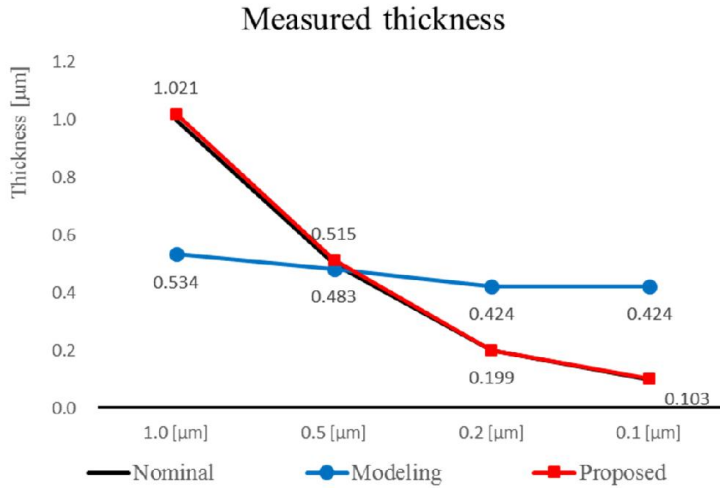


그림 8 - 23 표준 4분할 시편의 두께 측정 결과

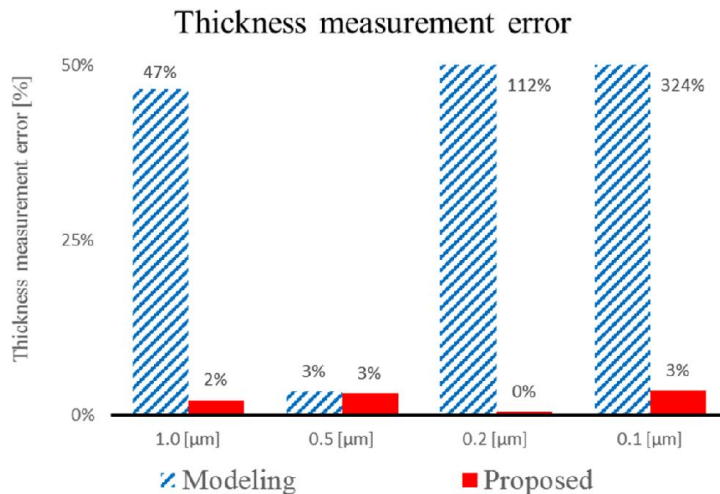


그림 8 - 24 표준 4분할 시편의 두께 측정 오차율

표 8 - 19 표준 4분할 시편의 두께 측정 결과

	1.0 [μm]	0.5 [μm]	0.2 [μm]	0.1 [μm]
Nominal thickness [μm]	1.000	0.500	0.200	0.100
Modeling method [μm]	0.534	0.483	0.424	0.424
Proposed method [μm]	1.021	0.515	0.199	0.103

표 8 - 20 표준 4분할 시편의 두께 측정 오차율

	1.0 [μm]	0.5 [μm]	0.2 [μm]	0.1 [μm]
Modeling method [%]	47 %	3 %	112 %	324 %
Proposed method [%]	2 %	3 %	0 %	3 %

표 8 - 21 표준 4분할 시편의 두께 측정 반복도

	1.0 [μm]	0.5 [μm]	0.2 [μm]	0.1 [μm]
Modeling method [μm]	0.001	0.001	0.000	0.000
Proposed method [μm]	0.004	0.004	0.007	0.004

두께 측정 결과도 높이 측정 결과와 마찬가지로 0.5 μm 을 제외한 다른 영역의 측정 오차율이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이는 높이 측정과 마찬가지로 지역 최소값으로 수렴했기 때문이다.

반면 제안한 방법은 모든 영역의 측정 오차율이 3 % 이내이며, 반복도 또한 안정적인 것을 알 수 있다.

8.5. 연산 시간

각 측정 방법의 연산 시간을 비교하였다. 연산 시간은 in-line 적용에 중요한 요소로 많은 시료와 다양한 위치를 측정하기 위해서는 연산 시간이 짧은 것이 유리하다. 그렇기 때문에 연산 시간이 길다면 in-line에 적용하기 어려운 점이 있다.

제안한 방법과 앞에서 사용 했던 두 가지의 기존 측정 방법을 포함하여 3가지 방법에 관한 연산 시간을 비교하였다. 약 300,000개의 픽셀의 높이와 두께를 계산하는 시간을 측정 하였으며, 해석 조건과 사용한 PC의 사양은 표 8-22와 같다.

표 8 - 22 해석 조건 및 PC 사양

Specification	
Number of pixels	640 x 480
Spectral resolution of FFT	1/8 (0.019 μm^{-1})
Number of iteration of APEM	2
OS of PC	Windows 7 64 bit
CPU of PC	Intel Xeon E3-1225 @ 3.20 GHz(4core)
RAM of PC	8 GB

각 측정 방법 별 연산 시간은 그림 8-23과 같다.

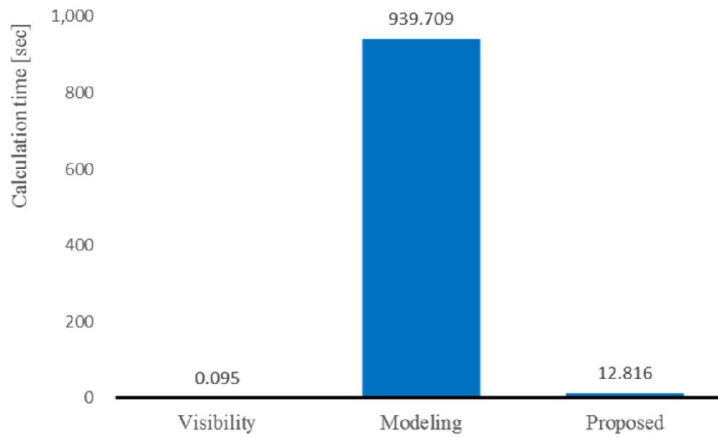


그림 8 - 25 측정 방법 별 연산 시간

가시도 함수를 이용한 방법은 약 0.1 초, 모델링을 이용한 방법은 약 900 초 그리고 이 논문에서 제안하는 방법은 약 12 초의 시간이 소모 되는 것으로 확인 되었다.

가시도 함수를 이용한 측정 방법(WLPSI)은 연산 속도가 매우 빠르지만 높이만 측정 할 수 있으며 두께를 측정 할 수 없다. 또한 투명 박막의 영향을 고려 하지 않았기 때문에 시료의 표면에 투명 박막이 있을 때 측정 오차가 매우 커진다. 그렇기 때문에 투명 박막이 없는 시료의 높이 측정에는 이 방법이 적합하지만 투명 박막이 있는 경우에는 사용이 불가능하다.

모델링과 비 선형 최소 자승법 및 LMA를 이용한 측정 방법은 높이와 두께를 동시에 측정 할 수 있는 장점이 있다. 또한 최소 자승법을 이용하기 때문에 안정적인 측정이 가능하다는 장점도 있다. 하지만 지역 최소값으로 수렴하는 문제와 시료 및 측정 조건에 따라 초기값을 다르게

설정해야 하며 연산 시간이 매우 길기 때문에 사용에 어려움이 있다.

제안한 방법은 모델링 방법과 마찬가지로 높이와 두께를 모두 측정 할 수 있다. 하지만 최소 자승법을 이용한 간접 측정 방법이 아닌 높이와 두께를 직접 계산하기 때문에 모델링 방법에 비해 연산 시간이 매우 짧다. 또한 지역 최소값으로 수렴하는 문제가 없기 때문에 시료 및 측정 조건에 관계없이 사용 할 수 있다.

Chapter 9. 결론

본 논문은 백색광 간섭계를 이용하여 시료의 표면 형상인 높이와 박막의 두께를 동시에 측정하는 방법에 관한 연구이다. 기존의 미라우 간섭계에 광학 부품을 추가하지 않고 박막의 영향을 받지 않은 참된 높이와 박막의 두께를 동시에 측정 할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 분광기와 같은 부품을 사용하지 않기 때문에 모든 영역의 높이와 두께를 측정 할 수 있어 미세패턴의 표면 형상과 두께 분포를 측정 하기에 적합하다.

백색광 간섭 신호로부터 푸리에 변환을 이용하여 각각의 단색광 성분을 복원하여 높이와 두께를 측정하는 방법을 제안하였다. 푸리에 변환 과정에서 좀 더 높은 분해능과 빠른 연산을 위해 zoom FFT를 적용하였으며, 복원된 파장 별 성분을 모두 이용하여 높이와 두께를 측정 하였다.

박막의 두께는 파장 별 크기와 파장 별 위상을 모두 이용하여 측정하기 때문에 기존의 측정 방법보다 정확하고 안정적인 측정이 가능하다. 기존의 측정 방법은 파장 별 크기와 파장 별 위상 중 하나만 사용하였지만 이 논문에서 제안한 방법은 두 가지를 모두 이용하기 때문에 박막의 두께를 정확하게 측정 할 수 있다.

표면 형상인 높이 측정은 파장 별 위상을 이용하였으며, 파장 별 위상으로부터 두께 성분을 제거하였기 때문에 박막의 영향을 받지 않는 참된 높이를 측정 할 수 있다. 기존의 높이 측정은 박막의 영향을 고려하지 않았기 때문에 시료의 표면에 투명 박막이 있을 때 정상적인 측정이 불가능하지만 제안한 방법은 두께 성분을 제거했기 때문에 참된

높이를 측정 할 수 있다.

제안한 측정 방법의 성능을 검증하기 위해 박막의 두께에 따른 시뮬레이션과 실험을 진행 하였다. 제안한 방법과 두 가지 기존 측정 방법을 이용하여 높이와 두께를 측정한 결과를 비교하여 제안한 방법의 성능을 확인 하였다. 기존의 측정 방법으로 높이 측정에 가장 많이 활용되는 WLPSI 방법과 높이와 두께를 동시에 측정 할 수 있는 모델링과 비 선형 최소 자승법을 이용한 방법을 사용하였다.

시뮬레이션과 실험을 진행한 결과 WLPSI 방법은 매우 빠르게 측정 할 수 있지만 높이 측정만 가능하고 두께 측정은 할 수 없다. 또한 박막의 영향을 고려하지 않았기 때문에 시료의 표면에 투명 박막이 있을 때는 높이 측정 오차가 매우 커져 사용이 불가능하다. 모델링과 비 선형 최소 자승법을 이용한 방법은 높이와 두께를 동시에 안정적으로 측정 할 수 있다. 하지만 측정 신호와 모델링을 비교하는 간접 측정법이기 때문에 연산 시간이 매우 길고 지역 최소값으로 수렴하는 문제가 있어 사용하기 어려운 단점이 있다.

이 논문에서 제안한 방법을 이용한 실험 결과는 다음과 같다.

1. 안정적인 측정을 위한 파장 분해능은 $0.019 \mu\text{m}^{-1}$ 이상이며, 반복 연산은 2회이상이다.
2. 박막 두께에 따른 높이 측정 오차율은 3 % 이내, 박막의 두께 측정 오차율은 3 % 이내이다.

이런 측정 결과를 통해 제안한 방법은 높이와 두께를 동시에 측정 할 수 있으며, 기존 방법들보다 정확하고 빠르게 측정 할 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

References

1. Carré, P., *Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Mesures*. Metrologia, 1966. **2**(1): p. 13.
2. Bruning, J.H., et al., *Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses*. Appl. Opt., 1974. **13**(11): p. 2693-2703.
3. Wyant, J.C., *Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems*. Appl. Opt., 1975. **14**(11): p. 2622-2626.
4. Wyant, J.C., *INTERFEROMETRIC OPTICAL METROLOGY-BASIC PRINCIPLES AND NEW SYSTEMS*. Laser Focus with Fiberoptic Technology, 1982. **18**(5): p. 65-71.
5. Schwider, J., et al., *Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources*. Appl. Opt., 1983. **22**(21): p. 3421-3432.
6. Wyant, J.C., et al., *An Optical Profilometer for Surface Characterization of Magnetic Media*. A S L E Transactions, 1984. **27**(2): p. 101-113.
7. Greivenkamp, J.E., *Generalized Data Reduction For Heterodyne Interferometry*. Opt. Eng. 1984. **23**(4): p. 234350-234350-.
8. Hariharan, P., B.F. Oreb, and T. Eiju, *Digital phase-shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm*. Appl. Opt., 1987. **26**(13): p. 2504-2506.
9. Osten, W., *Digitale Verarbeitung und Auswertung von Interferenzbildern*. 1991: Akad.-Verlag.
10. Surrel, Y., *Phase stepping: a new self-calibrating algorithm*. Appl. Opt., 1993. **32**(19): p. 3598-3600.
11. Stoilov, G. and T. Dragostinov, *Phase-stepping interferometry: Five-frame algorithm with an arbitrary step*. Opt. Laser. Eng. 1997. **28**(1): p. 61-69.
12. Tilford, C.R., *Analytical procedure for determining lengths from fractional fringes*. Appl. Opt., 1977. **16**(7): p. 1857-1860.
13. Cheng, Y.-Y. and J.C. Wyant, *Two-wavelength phase shifting interferometry*. Appl. Opt., 1984. **23**(24): p. 4539-4543.
14. Cheng, Y.-Y. and J.C. Wyant, *Multiple-wavelength phase-shifting interferometry*. Appl. Opt., 1985. **24**(6): p. 804-807.
15. Creath, K., *Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry*. Appl. Opt., 1987. **26**(14): p. 2810-2816.

16. Wang, D.N., et al., *Three-wavelength combination source for white-light interferometry*. Photonics Technology Letters, IEEE, 1993. **5**(11): p. 1350-1352.
17. de Groot, P.J., *Extending the unambiguous range of two-color interferometers*. Appl. Opt., 1994. **33**(25): p. 5948-5953.
18. Schmidt, J. *Two-wavelength interferometry combined with N-point technique*. 1999.
19. Iwata, K., T. Zhang, and H. Kikuta, *Consideration of Fractional Fringe Method on the Basis of the Least Squares Method*. Opt. Rev. 2003. **10**(4): p. 202-205.
20. Pfortner, A. and J. Schwider, *Red-green-blue interferometer for the metrology of discontinuous structures*. Appl. Opt., 2003. **42**(4): p. 667-673.
21. Kino, G.S. and S.S.C. Chim, *Mirau correlation microscope*. Appl. Opt., 1990. **29**(26): p. 3775-3783.
22. Danielson, B.L. and C.Y. Boisrobert, *Absolute optical ranging using low coherence interferometry*. Appl. Opt., 1991. **30**(21): p. 2975-2979.
23. Chim, S.S.C. and G.S. Kino, *Three-dimensional image realization in interference microscopy*. Appl. Opt., 1992. **31**(14): p. 2550-2553.
24. Dresel, T., G. Häusler, and H. Venzke, *Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar*. Appl. Opt., 1992. **31**(7): p. 919-925.
25. Caber, P.J., *Interferometric profiler for rough surfaces*. Appl. Opt., 1993. **32**(19): p. 3438-3441.
26. de Groot, P. and L. Deck, *Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms*. Opt. Lett. 1993. **18**(17): p. 1462-1464.
27. Deck, L. and P. de Groot, *High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry*. Appl. Opt., 1994. **33**(31): p. 7334-7338.
28. de Groot, P. and L. Deck, *Surface Profiling by Analysis of White-light Interferograms in the Spatial Frequency Domain*. J. Mod. Optic. 1995. **42**(2): p. 389-401.
29. Larkin, K.G., *Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry*. J. Opt. Soc. Am. A. 1996. **13**(4): p. 832-843.
30. Sandoz, P., *An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry*. J. Mod. Optic. 1996. **43**(8): p. 1545-1554.
31. Sandoz, P., R. Devillers, and A. Plata, *Unambiguous profilometry by fringe-*

- order identification in white-light phase-shifting interferometry*. J. Mod. Optic. 1997. **44**(3): p. 519-534.
32. Harasaki, A., J. Schmit, and J.C. Wyant, *Improved vertical-scanning interferometry*. Appl. Opt., 2000. **39**(13): p. 2107-2115.
 33. Smythe, R. and R. Moore, *Instantaneous phase measuring interferometry*. Opt. Eng. 1984. **23**(4): p. 234361-234361-.
 34. Wizinowich, P.L., *Phase shifting interferometry in the presence of vibration: a new algorithm and system*. Appl. Opt., 1990. **29**(22): p. 3271-3279.
 35. van Wingerden, J., H.J. Frankena, and C. Smorenburg, *Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry*. Appl. Opt., 1991. **30**(19): p. 2718-2729.
 36. Groot, P.d., *Derivation of algorithms for phase-shifting interferometry using the concept of a data-sampling window*. Appl. Opt., 1995. **34**(22): p. 4723-4730.
 37. Adachi, M., *Phase-shift algorithm for white-light interferometry insensitive to linear errors in phase shift*. Opt. Rev. 2008. **15**(3): p. 148-155.
 38. Schmit, J. and K. Creath, *Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry*. Appl. Opt., 1995. **34**(19): p. 3610-3619.
 39. Li, X., et al., *Full-field quantitative phase imaging by white-light interferometry with active phase stabilization and its application to biological samples*. Opt. Lett., 2006. **31**(12): p. 1830-1832.
 40. Sivakumar, N., B. Tan, and K. Venkatakrishnan, *Measurement of surface profile in vibrating environment with instantaneous phase shifting interferometry*. Opt. Commun., 2006. **257**(2): p. 217-224.
 41. Deck, L., *Vibration-resistant phase-shifting interferometry*. Appl. Opt., 1996. **35**(34): p. 6655-6662.
 42. Freschi, A.A. and J. Frejlich, *Adjustable phase control in stabilized interferometry*. Opt. Lett., 1995. **20**(6): p. 635-637.
 43. Zhao, C. and J.H. Burge, *Vibration-Compensated Interferometer for Surface Metrology*. Appl. Opt., 2001. **40**(34): p. 6215-6222.
 44. Chen, L.C., et al., *Development of innovative fringe locking strategies for vibration-resistant white light vertical scanning interferometry (VSI)*. Key Engineering Materials, 2010. **437**: p. 89-94.
 45. Jiang, X., et al., *Fast surface measurement using wavelength scanning interferometry with compensation of environmental noise*. Appl Opt, 2010.

- 49**(15): p. 2903-9.
46. Safrani, A. and I. Abdulhalim, *Real-time phase shift interference microscopy*. Opt. Lett. 2014. **39**(17): p. 5220-5223.
 47. Serrano-García, D.-I., et al., *Single shot interferometry using a two-interferogram phase shifting algorithm*. Advanced Optical Technologies, 2014. **3**(4): p. 401-406.
 48. Toto-Arellano, N.-I., V.H. Flores-Muñoz, and B. Lopez-Ortiz, *Dynamic phase imaging of microscopic measurements using parallel interferograms generated from a cyclic shear interferometer*. Opt. Express., 2014. **22**(17): p. 20185-20192.
 49. Lopez-Ortiz, B., et al., *Phase profile analysis of transparent objects through the use of a two windows interferometer based on a one beam splitter configuration*. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2014. **125**(24): p. 7227-7230.
 50. Shoji, E., et al., *High-speed phase-shifting interferometry using triangular prism for time-resolved temperature measurement*. Appl. Opt., 2015. **54**(20): p. 6297-6304.
 51. Kurtz, R. and R. Nesbitt, *Improving the accuracy of surface metrology*. Opt. Eng. 2011. **50**(7): p. 073605-073605-6.
 52. Arieli, Y., et al., *Surface measurements by white light spatial-phase-shift imaging interferometry*. Opt. Express., 2014. **22**(13): p. 15632-15638.
 53. Epshtein, S., et al., *Spatial-phase-shift imaging interferometry using a spectrally modulated white light source*. Opt. Lett. 2014. **39**(24): p. 6966-6968.
 54. Falldorf, C., R. Klattenhoff, and R.B. Bergmann, *Single shot lateral shear interferometer with variable shear*. Opt. Eng. 2015. **54**(5): p. 054105-054105.
 55. Upputuri, P.K., et al. *White light interferometer with color CCD for 3D-surface profiling of microsystems*. 2015.
 56. Hibino, K., *Phase-shifting algorithm inside an optical cavity for absolute length measurement*. Appl. Opt., 2016. **55**(5): p. 1101-1106.
 57. Lei, Z., et al., *A novel surface recovery algorithm in white light interferometry*. Measurement, 2016. **80**: p. 1-11.
 58. Suematsu, M. and M. Takeda, *Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier transform technique for fringe analysis*. Appl. Opt., 1991. **30**(28): p. 4046-4055.

59. Schnell, U., S. Gray, and R. Dändliker, *Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target*. Opt. Lett. 1996. **21**(7): p. 528-530.
60. Kuwamura, S. and I. Yamaguchi, *Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement*. Appl. Opt., 1997. **36**(19): p. 4473-4482.
61. Dai, X. and K. Seta, *High-accuracy absolute distance measurement by means of wavelength scanning heterodyne interferometry*. Meas. Sci. Technol., 1998. **9**(7): p. 1031.
62. Suratkar, A.R., *Absolute distance (thickness) metrology using wavelength scanning interferometry*. 2009, The University of North Carolina at Charlotte.
63. Pawlowski, M.E., et al. *Multispectral phase-crossing white-light interferometry*. 2005.
64. Skydan, O.A., M.J. Lalor, and D.R. Burton, *Using coloured structured light in 3-D surface measurement*. Opt. Laser. Eng. 2005. **43**(7): p. 801-814.
65. Zehra, S., et al., *Wavelet phase evaluation of white light interferograms*. Meas. Sci. Technol., 2005. **16**(9): p. 1878.
66. Pan, J., P.S. Huang, and F.-P. Chiang, *Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement*. Opt. Eng. 2006. **45**(1): p. 013602-013602-9.
67. Pawłowski, M.E., et al., *Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis*. Opt. Commun., 2006. **260**(1): p. 68-72.
68. Buchta, Z., et al. *White-light interference fringe detection using color CCD camera*. in *AFRICON, 2009. AFRICON '09*. 2009.
69. Kitagawa, K., *Fast Surface Profiling by Multi-Wavelength Single-Shot Interferometry*. International Journal of Optomechatronics, 2010. **4**(2): p. 136-156.
70. Buchta, Z., et al., *White-light fringe detection based on a novel light source and colour CCD camera*. Meas. Sci. Technol., 2011. **22**(9): p. 094031.
71. Desse, J.M., P. Picart, and P. Tankam, *Sensor influence in digital 3λ holographic interferometry*. Meas. Sci. Technol., 2011. **22**(6): p. 064005.
72. Kumar, U.P., N.K. Mohan, and M.P. Kothiyal, *Red-Green-Blue wavelength interferometry and TV holography for surface metrology*. Journal of Optics, 2011. **40**(4): p. 176-183.
73. Ma, S., et al., *Surface profile measurement in white-light scanning*

- interferometry using a three-chip color CCD*. Appl. Opt., 2011. **50**(15): p. 2246-2254.
74. Ma, S., et al., *Micro-profile measurement based on windowed Fourier transform in white-light scanning interferometry*. Opt. Commun., 2011. **284**(10–11): p. 2488-2493.
75. Kitagawa, K., *Single-shot surface profiling by multiwavelength interferometry without carrier fringe introduction*. J. Electronic. Imaging., 2012. **21**(2): p. 021107-1-021107-9.
76. Kumar, U.P., et al., *White light interferometry for surface profiling with a colour CCD*. Opt. Laser. Eng. 2012. **50**(8): p. 1084-1088.
77. Zhang, Z., C.E. Towers, and D.P. Towers, *Robust color and shape measurement of full color artifacts by RGB fringe projection*. Opt. Eng. 2012. **51**(2): p. 021109-1-021109-7.
78. Upputuri, P.K., et al., *Measurement of large discontinuities using single white light interferogram*. Opt. Express., 2014. **22**(22): p. 27373-27380.
79. Guo, T., et al. *Surface topography measurement based on color images processing in white light interferometry*. 2015.
80. Perciante, C.D., et al., *Wrapping-free phase retrieval with applications to interferometry, 3D-shape profiling, and deflectometry*. Appl. Opt., 2015. **54**(10): p. 3018-3023.
81. Upputuri, P.K., et al. *Two-wavelength microscopic speckle interferometry using colour CCD camera*. 2015.
82. Upputuri, P.K., et al. *White light single-shot interferometry with colour CCD camera for optical inspection of microsystems*. 2015.
83. Zhang, W., et al., *Principal component analysis based simultaneous dual-wavelength phase-shifting interferometry*. Opt. Commun., 2015. **341**: p. 276-283.
84. Koyama, N., *A method of step height measurement within the unambiguous range of two laser wavelengths interferometer*. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2015. **126**(3): p. 313-316.
85. Hariharan, P. and M. Roy, *Interferometric surface profiling with white light: Effects of surface films*. J. Mod. Optic. 1996. **43**(9): p. 1797-1800.
86. Kim, S.-W. and G.-H. Kim, *Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry*. Appl. Opt., 1999. **38**(28): p. 5968-5973.

87. de Groot, P. and X. Colonna de Lega, *Signal modeling for low-coherence height-scanning interference microscopy*. Appl. Opt., 2004. **43**(25): p. 4821-4830.
88. De Lega, X.C. and P. De Groot, *Optical topography measurement of patterned wafers*. Characterization and Metrology for ULSI Technology 2005, 2005. **788**: p. 432-436.
89. Mansfield, D. *The distorted helix: thin film extraction from scanning white light interferometry*. 2006.
90. Conroy, M. *Interferometry of thick and thin films*. 2007.
91. Mansfield, D. *Extraction of film interface surfaces from scanning white light interferometry*. 2008.
92. Conroy, M. *Measurement of thin films and interfacial surface roughness using SWLI*. 2008.
93. Conroy, M., *Advances in thick and thin film analysis using interferometry*. Wear, 2009. **266**(5–6): p. 502-506.
94. Maniscalco, B., P.M. Kaminski, and J.M. Walls, *Thin film thickness measurements using Scanning White Light Interferometry*. Thin Solid Films, 2014. **550**: p. 10-16.
95. Yoshino, H., et al. *The development of thin film metrology by coherence scanning interferometry*. 2016.
96. Yoshino, H., et al., *Refractive index determination by coherence scanning interferometry*. Appl. Opt., 2016. **55**(15): p. 4253-4260.
97. Birnie Iii, D.P., *Optical video interpretation of interference colors from thin transparent films on silicon*. Materials Letters, 2004. **58**(22–23): p. 2795-2800.
98. Kim, D. and S. Kim, *Direct spectral phase function calculation for dispersive interferometric thickness profilometry*. Opt. Express., 2004. **12**(21): p. 5117-5124.
99. Debnath, S.K., et al., *Spectrally resolved phase-shifting interferometry of transparent thin films: sensitivity of thickness measurements*. Appl. Opt., 2006. **45**(34): p. 8636-8640.
100. Ghim, Y.-S. and S.-W. Kim, *Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry*. Opt. Express., 2006. **14**(24): p. 11885-11891.
101. Debnath, S.K., et al., *Spectrally resolved white-light phase-shifting interference microscopy for thickness-profile measurements of*

- transparent thin film layers on patterned substrates*. Opt. Express., 2006. **14**(11): p. 4662-4667.
102. Hlubina, P., et al., *Dispersive white-light spectral interferometry with absolute phase retrieval to measure thin film*. Opt. Express., 2006. **14**(17): p. 7678-7685.
103. Ghim, Y.-S. and S.-W. Kim, *Fast, precise, tomographic measurements of thin films*. Appl. Phys. Lett., 2007. **91**(9): p. 091903.
104. Hlubina, P., et al., *Spectral interferometry and reflectometry used to measure thin films*. Appl. Phys. B, 2008. **92**(2): p. 203-207.
105. You, J.-W., S. Kim, and D. Kim, *High speed volumetric thickness profile measurement based on full-field wavelength scanning interferometer*. Opt. Express., 2008. **16**(25): p. 21022-21031.
106. Debnath, S., J. You, and S.-W. Kim, *Determination of film thickness and surface profile using reflectometry and spectrally resolved phase shifting interferometry*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009. **10**(5): p. 5-10.
107. Ghim, Y.-S. and S.-W. Kim, *Spectrally resolved white-light interferometry for 3D inspection of a thin-film layer structure*. Appl. Opt., 2009. **48**(4): p. 799-803.
108. Debnath, S.K., et al., *Spectrally resolved phase-shifting interference microscopy: technique based on optical coherence tomography for profiling a transparent film on a patterned substrate*. Appl. Opt., 2010. **49**(34): p. 6624-6629.
109. Ghim, Y.-S., A. Suratkar, and A. Davies, *Reflectometry-based wavelength scanning interferometry for thickness measurements of very thin wafers*. Opt. Express., 2010. **18**(7): p. 6522-6529.
110. Takumi, S., et al., *Simultaneous refractive index and thickness measurement with the transmission interferometric adsorption sensor*. Journal of Physics D: Appl. Phys., 2010. **43**(40): p. 405302.
111. Young-Sik, G., et al., *Thin-film thickness profile measurement using a Mirau-type low-coherence interferometer*. Meas. Sci. Technol., 2013. **24**(7): p. 075002.
112. Kim, Y., et al., *Surface measurement of indium tin oxide thin film by wavelength-tuning Fizeau interferometry*. Appl. Opt., 2015. **54**(23): p. 7135-7141.
113. de Groot, P. and X.C. de Lega, *Angle-resolved three-dimensional analysis*

- of surface films by coherence scanning interferometry*. Opt. Lett. 2007. **32**(12): p. 1638-1640.
114. Dong, J.-t. and R.-s. Lu, *Sensitivity analysis of thin-film thickness measurement by vertical scanning white-light interferometry*. Appl. Opt., 2012. **51**(23): p. 5668-5675.
115. Kitagawa, K., *Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis*. Appl. Opt., 2013. **52**(10): p. 1998-2007.
116. Kitagawa, K., *Surface and thickness profile measurement of a transparent film by three-wavelength vertical scanning interferometry*. Opt. Lett. 2014. **39**(14): p. 4172-4175.
117. Zhang, T., et al., *A single-element interferometer for measuring refractive index of transparent liquids*. Opt. Commun., 2014. **332**: p. 14-17.
118. Ilia, K., et al., *A white-light interferometer as a gauge to measure the thickness of thin film: a practical extension of the phase method and correlogram summation*. Journal of Optics, 2015. **17**(12): p. 125616.
119. Daesuk, K., et al., *Fast thickness profile measurement using a peak detection method based on an acousto-optic tunable filter*. Meas. Sci. Technol., 2002. **13**(7): p. L1.
120. 김광락, "위상추출법과 이미징 분광 반사계를 이용한 박막 두께 형상측정", 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2014)

APPENDICES

A. 개구수에 의한 영향

이 논문에서 두께를 측정하기 위해 사용한 파장 별 반사도와 위상은 수직 입•반사를 가정한 것이었다. 하지만 실제로는 그림 A-1과 같이 대물렌즈의 개구수에 의해 입사 각도가 존재하며, θ 보다 작은 모든 입사각을 가진다. 따라서 정확한 측정을 위해서는 개구수에 의한 입사각을 고려하여야 한다.

개구수를 고려하는 여러 가지 방법이 연구되었으며, 모든 입사각의 합으로 표현하는 적분 방법과 유효 입사각으로 표현하는 방법이 많이 활용된다.

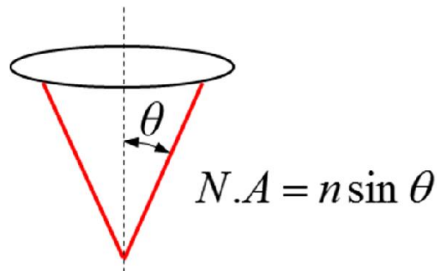


그림 A - 1 렌즈의 개구수(N.A.)

백색광 간섭 신호는 광원이 포함하고 있는 파장 영역의 모든 단파장 간섭 신호의 합이며, 각 단파장 간섭 신호의 렌즈에 의한 모든 입사각의 합이다. 따라서 백색광 간섭 신호는 파장에 의한 성분과 입사각에 의한 성분의 이중 적분으로 표현된다. 하지만 이 논문에서는 수식을 간단히 하기 위해 입사각에 의한 영향을 고려하지 않고 수직 입•반사를 가정하였으며 개구수에 의한 영향을 최소화 하기 위해 각 렌즈에 따른

보정을 진행하였다.

측정에 사용되는 렌즈의 배율은 10배, 20배, 50배이며 배율이 높아질수록 개구수가 커지기 때문에 입사각에 의한 영향이 커진다. 각 렌즈 별 개구수는 표 A-1과 같다.

표 A - 1 각 렌즈 별 개구수(N.A)

	Numerical aperture	Maximum incident angle
10x	0.30	17.458°
20x	0.40	23.578°
50x	0.55	33.367°

측정 시료는 8장에서 측정한 표준 시편이며, 0.8 μm 와 0.9 μm 의 경계 영역을 10회 반복 측정하여 높이와 두께를 측정하였다.

그림 A-2와 표 A-2는 배율에 따른 두 영역의 높이 차이 측정 결과, 그림 A-3과 표 A-3은 배율에 따른 0.8 μm 영역의 두께 측정 결과, 그림 A-4와 표 A-4는 배율에 따른 0.9 μm 영역의 두께 측정 결과이다.

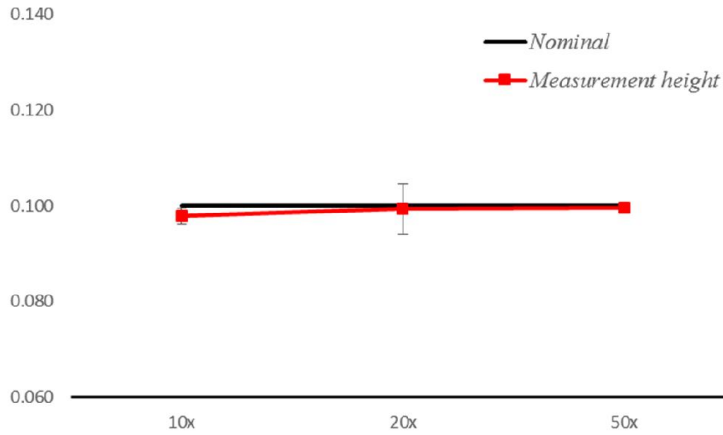


그림 A - 2 배율에 따른 높이 측정 결과

표 A - 2 배율에 따른 높이 측정 결과

	10x	20x	50x
Measurement height [μm]	0.098	0.099	0.100
3σ [μm]	0.003	0.011	0.001

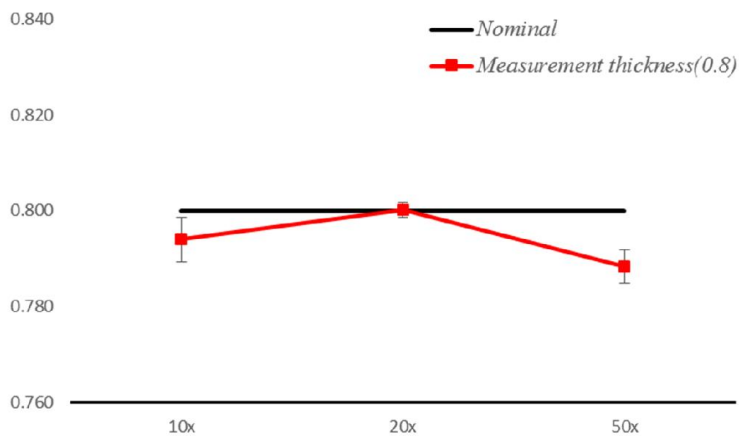


그림 A - 3 배율에 따른 두께 ($0.8 \mu\text{m}$) 측정 결과

표 A - 3 배율에 따른 두께 ($0.8 \mu\text{m}$) 측정 결과

	10x	20x	50x
Measurement			
height [μm]	0.794	0.800	0.788
3σ [μm]	0.009	0.003	0.007

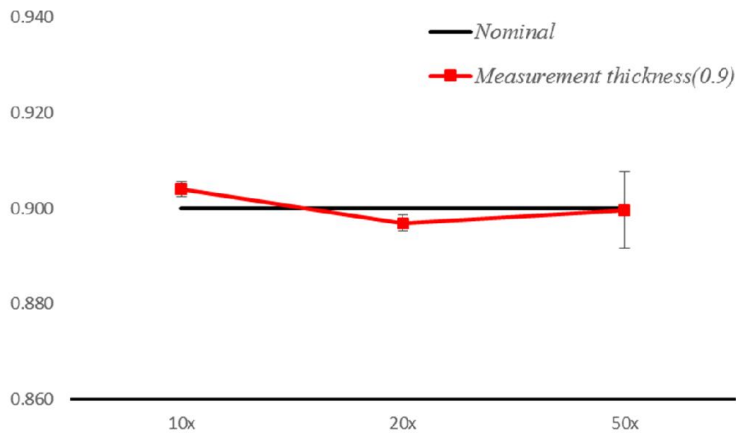


그림 A - 4 배율에 따른 두께 ($0.9 \mu\text{m}$) 측정 결과

표 A - 4 배율에 따른 두께 ($0.9 \mu\text{m}$) 측정 결과

	10x	20x	50x
Measurement			
height [μm]	0.904	0.897	0.900
3σ [μm]	0.003	0.003	0.016

측정 결과에서 확인 할 수 있듯이 렌즈에 따른 보정을 통해 개구수에 의한 영향을 최소화 할 수 있다는 것을 확인 할 수 있다.

B. 기존 높이 측정 방법의 노이즈에 대한 강건성

간섭계는 측정 시료에 직접적으로 접촉하지 않으면서 짧은 시간에 영역 전체의 표면 형상을 측정 할 수 있기 때문에 높이 측정에 많이 활용 되고 있다. 간섭계를 이용한 높이 측정 방법 중 백색광 위상 천이 간섭계(WLPSI)와 주파수 영역 분석법(FDA)이 많이 활용 되고 있으며, 최근에는 칼라 간섭계(3-PSI)에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 3가지 방법 모두 PZT를 이용하여 Z축 방향으로 주사하며 얻은 간섭 신호를 이용하며, 간섭 신호를 간단히 식 B-1과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = (I_{DC} + n_1)[1 + \gamma \cos(\theta + n_2)] + n_3 \quad \text{B-1}$$

이 때, n_i 는 노이즈 및 외부 요인에 의한 오차 요인들이다. n_1 은 주로 광원과 검출기에 의한 오차 요인이며 n_2 는 외부 진동 혹은 스캐너의 진동과 비 선형성에 의한 오차 요인, n_3 은 검출기에 의한 오차 요인이다.

각각의 노이즈가 있을 때 앞서 언급한 3가지 측정 방법의 오차를 비교하여 각 방법의 노이즈에 대한 강건성을 확인해 보았다. 시뮬레이션을 통해 노이즈에 의한 측정 오차를 확인 하였으며, 100 회 반복하여 측정 오차의 3σ 를 계산 하였다.

B1. 광원에 의한 오차(n_1)

n_1 에 의한 측정 오차는 그림 B-1과 같으며, 100회 반복 측정 중 가장 큰 오차와 측정 오차의 3σ 는 표 B-1과 같다.

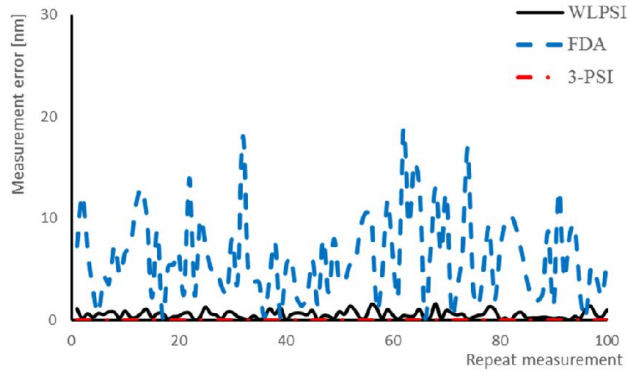


그림 B - 1 n_1 에 의한 측정 오차

표 B - 1 n_1 에 의한 측정 오차

	WLPSI	FDA	3-PSI
Maximum measurement error [nm]	1.616	18.745	0.004
3σ of measurement error [nm]	1.154	12.531	0.003

B2. 외부 진동에 의한 오차(n_2)

n_2 에 의한 측정 오차는 그림 B-2과 같으며, 100회 반복 측정 중 가장 큰 오차와 측정 오차의 3σ 는 표 B-2과 같다.

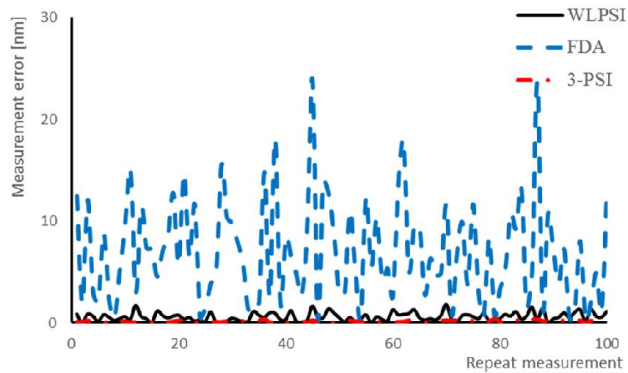


그림 B - 2 n_2 에 의한 측정 오차

표 B - 2 n_2 에 의한 측정 오차

	WLPSI	FDA	3-PSI
Maximum measurement error [nm]	1.820	23.919	0.360
3σ of measurement error [nm]	1.282	15.346	0.283

B3. 검출기에 의한 오차(n_3)

n_3 에 의한 측정 오차는 그림 B-3과 같으며, 100회 반복 측정 중 가장 큰 오차와 측정 오차의 3σ 는 표 B-3과 같다.

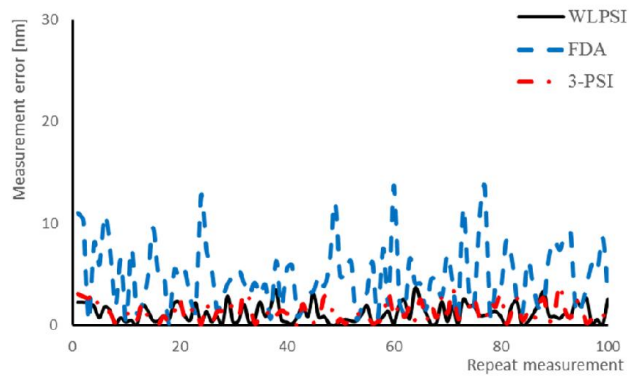


그림 B - 3 n_3 에 의한 측정 오차

표 B - 3 n_3 에 의한 측정 오차

	WLPSI	FDA	3-PSI
Maximum measurement error [nm]	3.652	13.733	4.042
3σ of measurement error [nm]	2.766	9.583	2.847

이 시뮬레이션을 통해 3-PSI가 노이즈에 가장 강건하며, FDA가 노이즈에 가장 취약하다는 것을 알 수 있다.

ABSTRACT

Study of simultaneous measurement of surface profile and film thickness using White Light Interferometry

Minsu Kim

School of Mechanical and Aerospace Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In this thesis, an analysis algorithm using White Light Interferometry is proposed for simultaneous and volumetric measurement of surface profile and film thickness. As semiconductor industry and display industry develop, film thickness gets thinner and size of micro-pattern gets smaller. Therefore, the demands on measurement of surface profile and film thickness distribution have been increased. It is difficult to measure surface profile and film thickness as thickness of transparent film gets thinner and pattern's size gets smaller. To overcome these difficulties, an analysis algorithm for measuring surface profile and film thickness is

proposed in this thesis.

For measuring surface profile and film thickness, spectral elements are retrieved from white light interferogram. Zoom FFT is applied for higher spectral resolution and less calculation time.

Thickness measurement results of proposed method are more accurate and stable than that of conventional methods because proposed method uses all of spectral elements. In addition, measurement time is short by calculating film thickness directly.

Surface profile is measured using spectral phase of height separated from retrieved spectral phase. For measuring true height that is not affected by transparent film, thickness property has to be removed from retrieved spectral phase.

Performance of proposed method is verified by simulations and experiments. As a result, it is confirmed that error rate of height measurement is under 3 % and error rate of thickness measurement is under 3 %. Also it is confirmed that calculation time of measuring height and thickness for 640 x 480 pixels is about 12 seconds.

Keyword: White light interferometry, FFT, Surface profile measurement, Thickness distribution measurement, Simultaneous measurement, Volumetric measurement, Advanced Phase Extraction Method