



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

위상 추출법과 이미징 분광 반사계를 이용한  
박막 두께 형상 측정

**Measurement of Volumetric Film Thickness using  
Phase Extraction Method and  
Imaging Spectroscopic Reflectometry**

2015 년 2 월

서울대학교대학원  
기계항공공학부  
김광락

## 국문 초록

본 논문에서는 투명 박막의 두께 분포를 측정하기 위하여 이미징 분광 반사계의 새로운 해석 알고리즘인 위상 추출법을 제안하였다. 반도체 및 디스플레이 분야의 지속적인 성장에 따라 미세하고 복잡한 형태의 패턴에 대한 두께 분포 측정이 필요하다. 기존의 반사계 해석 알고리즘들은 정확도와 연산속도를 동시에 만족시키지 못하기 때문에 이미징 분광 반사계에 적용하기가 어렵다. 비선형 피팅법은 높은 정확도를 가지지만 연산 속도가 느리고, 피크 검출법은 연산 속도는 빠르지만 정확도가 낮다.

이 논문에서 제시하고 있는 위상 추출법은 비선형적인 특성을 가지는 반사도 수식에서 선형적인 특성을 가지는 위상 수식을 추출함으로써 빠르고 정확한 두께 측정이 가능하다. 또한 실제 측정 환경에서 발생할 수 있는 왜곡의 원인에 대하여 분석하였고, 이를 보정하기 위하여 정규 반사도의 변형과 유효 입사각을 이용하는 방법을 제안하였다.

시뮬레이션을 통해 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께 100 - 4000 nm 범위 내에서 0.01 % 이내의 측정 정확도를 가짐을 확인하였다. 또한 실제로 SiO<sub>2</sub> 박막 시편을 준비하여 측정한 실험에서도 최대 0.3 % 이내의 측정 정확도를 보였다. 측정 속도를 확인하여 위하여 640\*480 픽셀을 가지는 CCD 카메라를 이용하여 측정을 수행한 결과, 데이터 획득에서 해석까지 모든 과정을 포함하여 3 초 이내에 완료하는 빠른 연산 속도를 보였다.

주요어: 박막, 두께 형상 측정, 이미징 분광 반사계(Imaging Spectroscopic Reflectometry, ISR), 위상 추출법, 음향 광학 변조 필터(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF), NA(Numerical Aperture)

학번: 2009 - 30160

# 목차

국문 초록 .....	2
그림 목차 .....	iv
표 목차 .....	viii
기호 설명 .....	ix
약어 설명 .....	x
1. 서론 .....	1
1.1. 연구 배경 .....	1
1.2. 선행 연구 동향 .....	4
1.3. 연구 내용 .....	12
2. 배경 이론 .....	13
2.1. 분광 반사계 이론 .....	13
2.2. 비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정 방법 .....	20
2.3. 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 방법 .....	24
2.4. 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 박막 두께 측정 방법 .....	27
3. 위상 추출법 .....	29
3.1. 개요 .....	29
3.2. 위상 추출법을 이용한 막두께 측정 이론 .....	31
3.2.1. 위상 추출 단계 .....	31
3.2.2. 위상 복원 단계 .....	34
3.2.3. 두께 계산 단계 .....	36
3.3. 오차 원인 분석과 보상법 .....	38
3.3.1. 오차 원인 분석 및 반사도 왜곡 형상 .....	38
3.3.2. 노이즈 제거를 위한 전처리 .....	43
3.3.3. 확대·축소 및 오프셋에 의한 오차와 보정 .....	46

3.3.4. 렌즈 NA 에 의한 오차와 보정 .....	49
3.4. 시뮬레이션을 통한 위상 추출법의 성능 검증.....	54
3.4.1. 두께 측정 정확도 .....	54
3.4.2. 연산 속도 .....	57
3.4.3. 시뮬레이션 결과 평가.....	60
4. 이미징 분광 반사계 시스템.....	61
4.1. 개요.....	61
4.2. 하드웨어 구성 .....	62
4.2.1. 광원.....	62
4.2.2. 광학계와 대물렌즈.....	63
4.2.3. CCD 카메라.....	65
4.2.4. 음향 광학 변조 필터 .....	67
4.3. 데이터 획득 과정 .....	69
5. 실험 .....	71
5.1. 개요.....	71
5.2. 분광 반사계를 이용한 측정 실험 .....	72
5.2.1. 분광 반사계 시스템과 측정 대상.....	72
5.2.2. 측정 정확도.....	75
5.2.3. 렌즈의 NA 에 의한 입사각 효과 보정.....	77
5.2.4. 파장 범위 설정에 따른 측정 정확도.....	80
5.3. 이미징 분광 반사계를 이용한 측정 실험.....	82
5.3.1. 측정 속도 .....	82
5.3.2. 측정 정확도 및 정밀도.....	84
5.3.3. 두께 형상 측정.....	86
5.3.4. 다양한 재질의 측정 .....	89
5.3.5. 외부 진동에 대한 강건성.....	95
6. 결론 .....	98

References .....	100
<b>Appendices</b> .....	109
A. 총 반사계수의 유도.....	109
B. 음향 광학 변조 필터.....	111
B.1 굴절각 .....	111
B.2 구동 주파수와 필터링 파장의 관계 .....	113
C. 빛의 편광 상태에 따른 반사계수 .....	115
C.1 수직 입사하는 경우.....	115
C.2 대물렌즈를 사용한 경우 .....	116
D. 소광계수가 높은 경우의 측정 .....	119
<b>Abstract</b> .....	121

## 그림 목차

<그림 1.1 분광기를 이용한 박막 두께 측정 장치> .....	2
<그림 1.2 TFT-LCD 생산 과정 중 하프톤 공정에서의 PR 두께 형성>3	
<그림 1.3 OLED 의 구조와 EML 평탄도에 따른 픽셀의 밝기 특성> .3	
<그림 1.4 WLSI 장치 구성> .....	7
<그림 1.5 DWLI 장치 구성(U. Schnell, 1996)>.....	7
<그림 1.6 분광 반사계의 장치 구성>.....	9
<그림 1.7 이미징 분광 타원계의 장치 구성(C.-Y. Han, 2006)>.....	11
<그림 2.1 박막 물질에서의 빛의 다중 반사>.....	13
<그림 2.2 서로 다른 매질에서의 빛의 반사와 굴절>.....	14
<그림 2.3 빛의 편광 상태에 따른 P파와 S파의 구분>.....	16
<그림 2.4 프레넬 방정식을 이용해 모델링한 반사도의 예 (SiO <sub>2</sub> 1 um)> .....	19
<그림 2.5 피선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정>.....	21
<그림 2.6 백색광 간섭계에서 추출한 위상 (S.-W. Kim, 1999)>.....	23
<그림 2.7 AOTF 를 이용한 파장주사 간섭계 (D. Kim, 2002)> .....	25
<그림 2.8 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 (D. Kim, 2002)>....	26
<그림 2.9 웨이블릿 변환을 이용해 복원한 위상의 형태 50 – 1000 nm (T.-Y. Jo, 2013)>.....	28
<그림 2. 10 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 두께 측정 순서도 (T.-Y. Jo, 2013)>.....	28
<그림 3.1 위상 추출법을 이용한 두께 측정의 순서도>.....	30
<그림 3.2 위상 추출 과정>.....	33
<그림 3.3 위상 복원 순서도>.....	34

<그림 3.4 복원 전의 위상(실선)과 복원 알고리즘을 통해 복원된 위상 (점선)>.....	35
<그림 3.5 반사도 왜곡의 형태 분류>.....	38
<그림 3.6 렌즈의 NA 로 인한 입사각 효과> .....	41
<그림 3.7 렌즈의 NA 로 인한 반사도의 수평 이동 현상>.....	41
<그림 3.8 센서의 ADC 에 따른 반사도 노이즈 비교>.....	42
<그림 3.9 노이즈 제거 방법들에 따른 결과 비교> .....	45
<그림 3.10 반사도와 정규화 반사도>.....	47
<그림 3.11 왜곡된 반사도에서 보정을 거치지 않고 추출된 위상>...	48
<그림 3.12 왜곡된 반사도에서 보정을 거쳐 추출된 위상>.....	48
<그림 3.13 렌즈의 NA 에 따른 두께 해석 오차>.....	51
<그림 3.14 대물렌즈에 의해 입사되는 빛과 유효각>.....	51
<그림 3.15 유효각을 적용한 경우의 반사도 모델링의 정확성>.....	53
<그림 3.16 위상 추출법 및 다른 해석 방법간의 측정 정확도 비교>	56
<그림 3.17 ISR 에 사용된 데이터 구조> .....	57
<그림 3.18 병렬 처리 연산을 이용한 연산 시간 단축>.....	59
<그림 4.1 실험에 사용된 LED 의 스펙트럼> .....	62
<그림 4.2 이미징 분광 반사계 시스템의 구성도> .....	64
<그림 4.3 음향 광학 변조 필터의 구조>.....	68
<그림 4.4 데이터 획득 과정>.....	70
<그림 4.5 획득된 이미지들과 3차원 데이터 배열의 구조>.....	70
<그림 5.1 프로브형 분광 반사계 시스템>.....	73
<그림 5.2 현미경형 분광 반사계 시스템>.....	74
<그림 5.3 프로브형 분광 반사계를 이용한 SiO <sub>2</sub> 박막 두께 측정 오차 >.....	76

<그림 5. 4 렌즈 NA 를 보정하지 않은 경우의 SiO <sub>2</sub> 두께 측정 오차> .....	79
<그림 5. 5 렌즈 NA 를 보정한 경우의 SiO <sub>2</sub> 두께 측정 오차> .....	79
<그림 5. 6 SiO <sub>2</sub> 두께 형상 측정 결과 (ISR)> .....	87
<그림 5. 7 SiO <sub>2</sub> 표면 형상 측정 결과 (AFM)> .....	87
<그림 5. 8 ISR 과 AFM 의 프로파일 비교> .....	88
<그림 5. 9 PR 두께 형상 측정 결과>.....	90
<그림 5. 10 PR 두께 형상 측정 결과에서 추출된 프로파일>.....	90
<그림 5. 11 패터닝되어 있는 PR 두께 형상 측정 결과>.....	92
<그림 5. 12 패터닝되어 있는 PR 두께 형상 측정 결과에서 추출된 프 로파일>.....	92
<그림 5. 13 SiN <sub>x</sub> 두께 형상 측정 결과>.....	94
<그림 5. 14 SiN <sub>x</sub> 두께 형상 측정 결과로부터 추출된 프로파일> .....	94
<그림 5. 15 외부 진동에 대한 강건성 실험을 위한 시스템 구성> ....	96
<그림 5. 16 진동 상황에서의 10회 반복 측정 평균값> .....	97
<그림 5. 17 진동 상황에서의 10회 반복 측정 재현성> .....	97

<그림 B. 1 AOTF 의 회절각도> .....	112
<그림 B. 2 AOTF 의 구동 주파수와 필터링 파장의 관계> .....	114
<그림 C. 1 빛의 편광 상태에 따른 반사 계수의 변화>.....	118
<그림 C. 2 대물렌즈의 방위각에 따른 P파 S파의 구분>.....	118
<그림 D. 1 소광계수에 따른 반사도의 변화 시뮬레이션(ITO 300 nm)> .....	120

## 표 목차

<표 3.1 노이즈 제거 방법들의 연산 시간 비교>.....	45
<표 3.2 연산에 사용된 PC 의 사양>.....	45
<표 3.3 유효각 적용 유무에 따른 두께 측정값의 변화>.....	52
<표 3.4 실험에 사용된 렌즈의 NA 값과 유효각>.....	53
<표 3.5 위상 추출법 및 다른 해석 방법간의 연산 소요 시간 비교>	58
<표 3.6 병렬 처리 연산을 적용하기 전후의 연산 시간 비교> .....	59
<표 4.1 실험에 사용된 대물렌즈의 사양>.....	64
<표 4.2 실험에 사용된 CCD 카메라의 사양>.....	66
<표 4.3 대물렌즈의 따른 픽셀당 해상도와 FOV>.....	66
<표 4.4 실험에 사용된 AOTF 의 사양>.....	68
<표 5.1 실험에 사용된 분광기의 사양> .....	73
<표 5.2 위상 추출법을 이용한 SiO <sub>2</sub> 박막 두께 측정 정확도>.....	76
<표 5.3 렌즈 NA 보정 효과 (10x 대물렌즈)>.....	78
<표 5.4 렌즈 NA 보정 효과 (20x 대물렌즈)>.....	78
<표 5.5 렌즈 NA 보정 효과 (50x 대물렌즈)>.....	78
<표 5.6 파장 범위 설정에 따른 SiO <sub>2</sub> 두께 측정 결과> .....	81
<표 5.7 파장 범위 설정에 따른 시간 단축 효과> .....	83
<표 5.8 이미징 분광 반사계와 위상 추출법을 이용한 SiO <sub>2</sub> 두께 측 정 정확도>.....	84
<표 5.9 이미징 분광 반사계와 위상 추출법을 이용한 SiO <sub>2</sub> 두께 측 정 정밀도 (3σ)>.....	85
<표 5.10 함수 발생기의 사인과 발생 조건>.....	95

## 기호 설명

$R$	Spectral Reflectance
$I_{\text{inc}}$	Intensity of Incident Light
$I_{\text{ref}}$	Intensity of Reflected Light
$N$	Refractive Index (Complex Number)
$n$	Refraction Coefficient
$k$	Extinction Coefficient
$r_{\text{total}}$	Total Reflection Coefficient
$r_{12}$	Fresnel's Reflection Coefficient (when light goes from material 1 to material 2)
$t_{12}$	Fresnel's Transmission Coefficient (when light goes from material 1 to material 2)
$\lambda$	Light Wavelength
$\theta_1$	Incident Angle
$\theta_2$	Refraction Angle in Film Layer
$d$	Film Thickness
$\beta$	Phase Change in Film Layer
$m$	Phase Order in Unwrapping Process
$p$	The Number of Data
$\kappa$	Order of Phase Offset
$\theta_M$	Maximum Incident Angle for Objective Lens

## 약어 설명

TFT-LCD	Thin Film Transistor Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light Emitting Diode
WLI	White-Light Interferometry
WLSI	White-Light Scanning Interferometry
DWLI	Dispersive White-Light Interferometry
ISR	Image Spectroscopic Reflectometry
NA	Numerical Aperture
AOTF	Acousto-Optic Tunable Filter
LED	Light Emitting Diode
FOV	Field of View
CCD	Charge-Coupled Device
LCTF	Liquid-Crystal Tunable Filter
SNR	Signal-to-Noise Ratio
PR	Photoresist

# 1. 서론

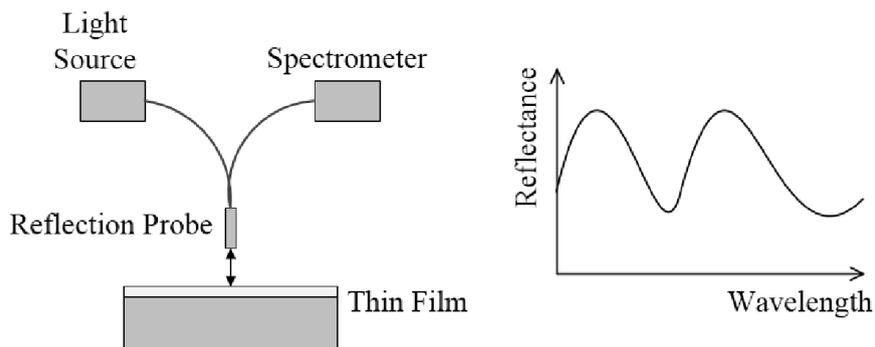
## 1.1. 연구 배경

미세 패턴의 형상을 측정하는 기술은 반도체와 디스플레이 산업에서 중요한 기술 중에 하나이다. 반도체와 디스플레이 산업은 그 동안 빠르게 발전하여 이제 전세계에서 주목 받는 산업 중에 하나가 되었다. 지금도 많은 기업과 연구소에서 관련 기술을 연구하고 있으며 앞으로도 많은 발전이 기대되고 있다. 반도체, 디스플레이의 생산 공정에서는 수 많은 미세 구조가 사용된다. 패턴의 집적도를 향상시켜 생산 효율을 높이려는 시도는 수 년 동안 지속되어 온 트렌드이기도 하다. 반도체 분야에서는 이미 패턴의 미세화가 측정 기술의 한계를 뛰어 넘어 극한을 향해 가고 있으며, 디스플레이 분야에서도 화소의 크기를 줄여 더 높은 화소 밀도(Pixels per inch, PPI)를 구현하려는 시도가 계속되고 있다. 따라서 미세 패턴의 형상을 정확하게 측정하는 것은 최근의 반도체 및 디스플레이 분야의 트렌드에 따라 필수적이고 기본적으로 요구되는 기술 중에 하나이며, 공정의 수율을 향상시키기 위해 반드시 필요하다.

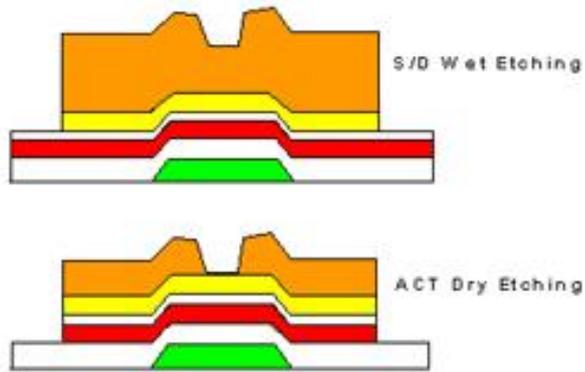
박막(Thin Film)의 두께를 측정하는 기술은 미세 패턴의 구조를 파악하는데에 필수적 기술 중에 하나이다. 반도체와 디스플레이에서의 미세 구조는 수 많은 막(Layer)이 겹겹이 쌓여서 이루어지게 된다. 각각의 막은 얇게는 수 나노미터(nm)에서 두껍게는 수십 마이크로미터(um)에 이르는 두께를 가지며, 박막의 두께가 정확하게 관리가 되지 않을 경우 디바이스의 기능과 성능에 영향을 미치게 된다. 특히 포토 리소그래피(Photo Lithography) 공정에서 필수적인 재료인 PR(Photo Resist)과 디스플레이에서 투명전극의 역할을 하는 ITO(Indium Tin Oxide) 등의 두께는 관리가 반드시 필요한 요소들이다.

최근에는 박막의 두께 형상을 측정해야 하는 요구도 많이 발생하고 있다. 기존의 박막 두께 측정의 경우 <그림 1.1> 과 같이 분광기(Spectrometer)와 같은 디텍터를 이용하여 한 지점의 두께를 측정하는 경우가 대부분이었으며, 이

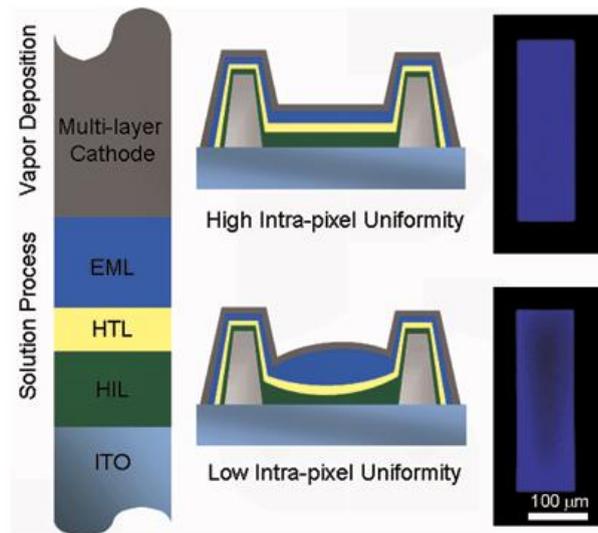
경우 측정이 가능한 지점의 크기는 수 마이크로미터에서 수 밀리미터에 이른다. 하지만 최근의 공정에서는 박막의 두께가 넓은 영역에 걸쳐 균일한 것이 아니라, 특정한 미세 패턴 형상을 가지고 영역별로 두께가 다른 경우가 많이 있다. 그 일례로 LCD(Liquid Crystal Display)에서의 하프톤(Halftone) 공정을 들 수 있는데, <그림 1.2> 과 같이 PR 특정한 두께 형상을 띄며 도포되어 있으며 공정 단계에 따라 그 형상과 두께가 달라진다. 그 패턴의 크기가 좁게는 수 마이크로미터에 이르기 때문에 기존의 한 지점만을 측정하는 측정기로는 그 특성을 정확하게 알아낼 수 없다. 또한 최근 많은 관심을 받고 있는 유기발광다이오드(Organic Light Emitting Diode, OLED) 디스플레이에서는 <그림 1.3> 과 같이 EML(Emission Material Layer)의 두께 평탄도에 의해서 픽셀의 휘도 및 광학 특성이 결정되기 때문에 EML의 두께 형상 측정이 매우 중요하다. 이와 같이 두께 형상을 측정할 수 있는 기술이 다양한 상황에서 요구되고 있으며, 제품의 양산을 위한 전수 검사를 위해서 고속 측정 등의 요구도 함께 증가하고 있다.



<그림 1.1 분광기를 이용한 박막 두께 측정 장치>



<그림 1.2 TFT-LCD 생산 과정 중 하프톤 공정에서의 PR 두께 형상><sup>1</sup>



<그림 1.3 OLED 의 구조와 EML 평탄도에 따른 픽셀의 밝기 특성><sup>2</sup>

<sup>1</sup> <http://pk1.narapia.com>

<sup>2</sup> <http://informationdisplay.org>

## 1.2. 선행 연구 동향

박막의 두께를 측정하기 위한 대표적인 광학적 기술은 백색광 간섭계(White-light Interferometry, WLI), 분광 반사계(Spectroscopic Reflectometry), 타원계(Ellipsometry)가 있다. 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)를 이용한 측정 역시 많이 사용되는 방법이지만, 이는 측정 대상물의 단면을 관찰하는 방식이기 때문에 측정 대상을 파괴해야만 한다. 따라서 전수검사가 불가능하고, 샘플링 검사를 실시하는 경우에도 시간이 많이 소요되므로 양산 검사를 위해서는 적합하지 않다. 백색광 간섭계, 분광 반사계, 타원계는 모두 박막의 광학적인 특성을 이용하여 두께를 측정하는 기술로 비접촉, 비파괴 특성을 가진다. 양산 과정에서 생산되는 제품을 특별한 처리 없이 라인 내에서 곧바로 측정할 수 있기 때문에 많이 사용되고 있으며, 측정 속도만 충분히 빠르다면 전수 검사를 시행할 수도 있다.

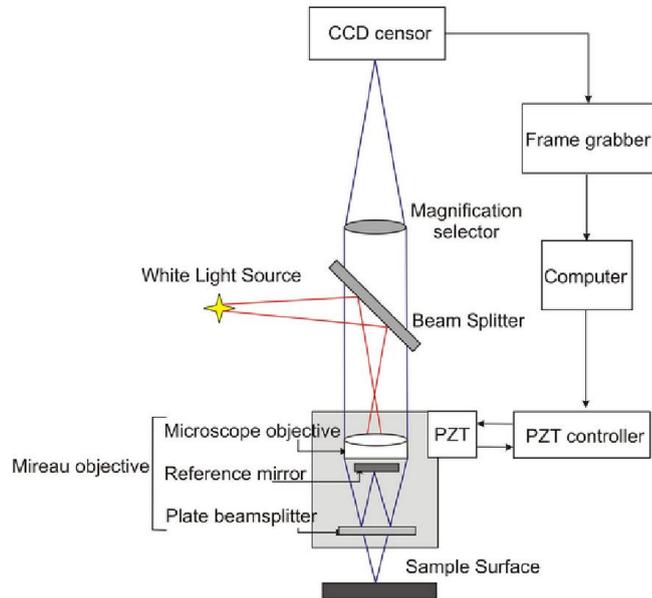
백색광 간섭계, 분광 반사계, 타원계의 이론적인 기반은 오래 전에 마련되어 이미 많은 연구가 이루어진 바 있다. 그러나 본 논문에서 다루고자 하는 바는 두께 형상 측정에 관한 것으로, 선행 연구 역시 두께 형상을 측정하기 위한 연구를 위주로 분석하였다[1-50]. 박막의 두께 형상을 측정하기 위한 기술은 비교적 최근에 들어서 연구되기 시작하였다. 일반적으로 두께 형상을 측정하기 위하여 현미경 광학계와 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라를 이용하여 광학적 신호를 획득하는 방식을 사용한다. 신호를 획득하는 방식 및 해석하는 방식에 따라 아래와 같은 연구들이 진행되었다.

## 백색광 간섭계

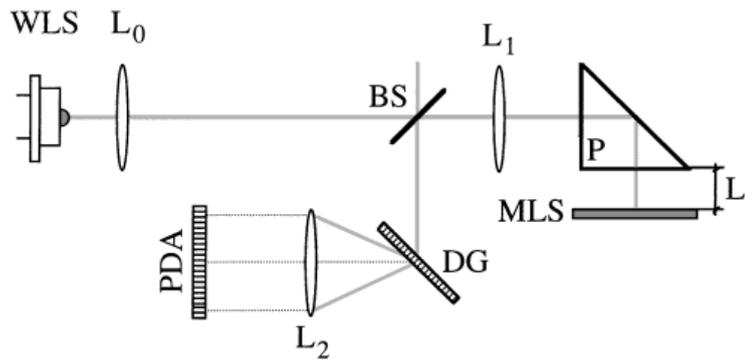
백색광 간섭계(White-Light Interferometry) 중 백색광 위상 천이 간섭계(White-Light Scanning Interferometry, WLSI)는 빛의 광경로 차이에 의해서 보강·상쇄 간섭이 발생하는 원리를 이용하는 기술이다. 수직 방향으로 광학계를 이동시켜 간섭 신호를 획득할 수 있으며 이를 분석하여 높이를 계산해낼 수 있다. <그림 1.4> 는 WLSI 의 장치 구성을 도식적으로 표현한 것이다. 미라우(Mirau) 간섭 대물 렌즈가 사용되었으며 대물렌즈는 PZT 액츄에이터를 통해 수직 방향으로 이동된다. WLSI 는 1990년대에 활발하게 개발되어 최초에는 단차 측정 등 표면 형상의 관찰을 위해서 개발되었으나 이후에 박막의 두께를 측정하는 알고리즘도 개발되었다[1-14]. 백색광 간섭계를 이용하는 경우, 표면의 형상과 박막의 두께를 동시에 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 수직 방향의 진동에 민감하기 때문에 수 많은 진동 요소가 존재하는 양산 라인에 적용하기 위해서는 진동을 저감시켜줄 수 있는 고가의 장치가 필수적이다. 백색광 간섭계를 이용하여 박막의 두께 형상을 측정하려는 연구는 1990년대 후반부터 시작되었으며, 특히 S.-W. Kim 은 1999년 푸리에 변환을 이용하여 WLSI 의 간섭 신호로부터 위상을 추출하였고, 추출된 위상의 비선형 성분을 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용하여 피팅하여 박막의 두께를 측정한 바 있다[15].

백색광 간섭계의 또 다른 형태로 분산형 백색광 간섭계(Dispersive White-Light Interferometry, DWLI)가 있다. 백색광 위상 천이 간섭계와 유사하지만, 광학계를 기계적으로 이동시키지 않는 대신에 입사되는 빛을 분광하여 파장별 신호를 분석한다. 최초에는 절대 거리 측정을 위해서 개발되고 연구되었으나, 이후에 박막의 두께 측정을 위한 연구도 시작되었다[16-23]. 기존의 연구에서는 <그림 1.5> 와 같이 주로 백색광 광원에서 입사되는 빛을 그레이팅(Grating)을 이용하여 분광한 뒤, 각 파장의 빛을 센서 배열(Photo Detector Array, PDA)을 이용하여 획득하는 방식을 이용하였다. 최근에는 두께 형상을 측정하기 위하

여 CCD 카메라를 디텍터로 이용하고 백색광을 분광하기 위하여 음향 광학 변조 필터 등을 사용하는데, 파장을 순차적으로 변경하는 것을 가리켜 파장 주사 간섭계(Wavelength Scanning Interferometry, WSI) 라고 부르기도 한다[24-34].



<그림 1.4 WLSI 장치 구성><sup>3</sup>



<그림 1.5 DWLI 장치 구성(U. Schnell, 1996)>

<sup>3</sup> <http://cnx.org>

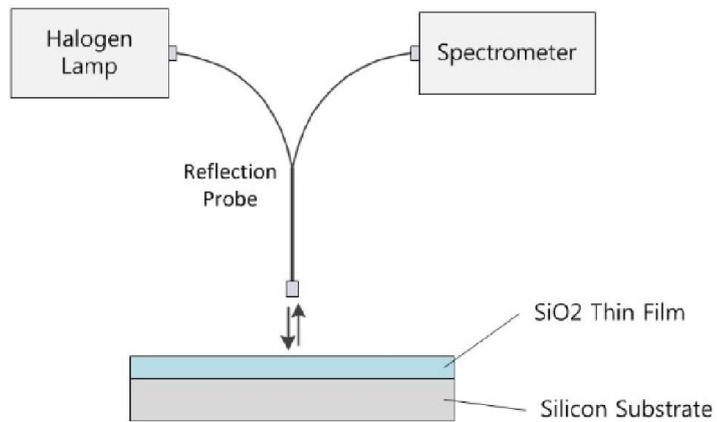
## 분광 반사계

분광 반사계(Spectroscopic Reflectometry)는 박막의 두께에 따라 반사도가 변하는 현상을 이용한 측정 기술이다. 어떤 박막물질에 조사된 빛이 반사되었을 때의 반사도는 물질의 굴절률(Refractive Index), 입사각(Incident Angle) 그리고 박막의 두께에 의해서 결정된다. 따라서 분광기(Spectrometer)와 같은 센서를 이용하여 파장별 반사도를 획득한 뒤 이를 분석하여 물질의 두께와 굴절률을 계산해낼 수 있다. 특히 분광 반사계는 매우 간단한 장치 구성으로 박막의 두께를 측정할 수 있어 매우 유용하게 사용되고 있다. <그림 1.6> 는 백색광 광원과 광파이버, 분광기(Spectrometer)로 이루어진 분광 반사계 장치를 간단하게 표시한 것이다. 분광기는 내부에 그레이팅과 CCD 센서 배열로 이루어져 있어 파장별 광 강도를 측정할 수 있는 장치이다.

분광 반사계는 1960-1970년대부터 연구되어 두께 형상을 측정하기 위하여 활용되었다. 초기의 분광 반사계 연구는 특정 파장 범위에서 발생하는 물결 형태 신호의 최대점의 개수를 이용하여 박막의 두께를 분석하였다. 이후 여러 가지 두께 분석 방법이 제안되었고, 최근에는 비선형 피팅 방법을 이용한 두께 측정 방법이 가장 신뢰도 높은 방법으로 사용되고 있다[35-43].

두께 형상 측정을 위한 이미징 분광 반사계(Imaging Spectroscopic Reflectometry, ISR)에 대한 연구는 주로 2000년대 이후로 이루어졌으며[39-43], 본 논문이 제안하는 연구의 범위에 속하는 분야이기도 하다. ISR 에서 가장 최초의 연구는 CCD 카메라를 이용하여 파장별 데이터를 획득한 후 기존의 분광 반사계에서 사용하는 방식인 비선형 피팅을 이용하여 분석하는 방법이다. 그러나 이러한 방식은 각각의 CCD 카메라 픽셀을 모두 해석하기에는 너무 오래 걸려 실용적이지 못하다. 다른 시도 중에 하나로 D. Kim 은 2002년 마이켈슨(Michelson) 간섭계의 기준 미러로 향하는 빛을 차단하는 블록을 이용하여 ISR 과 WSI 의 혼합으로 이루어진 장치를 제안한 바 있다. 또한 반사도를 빠르게 해석하기 위하여 피크 검출법(Peak Detection Method)을 제안하였

는데, 두께 형상을 고속으로 측정할 수 있는 장점이 있는 반면 정밀도가 다소 떨어진다는 단점이 있다 [39]. T.-Y. Jo 는 2013년 웨이블릿 변환을 이용한 위상 복원법을 사용하여 ISR 에서 박막의 두께를 측정한 바 있다. 이 연구는 뛰어난 정밀도를 가지면서도 기존 비선형 피팅법보다 향상된 연산 속도를 가지는 방법임을 보여주었다[41].



<그림 1.6 분광 반사계의 장치 구성>

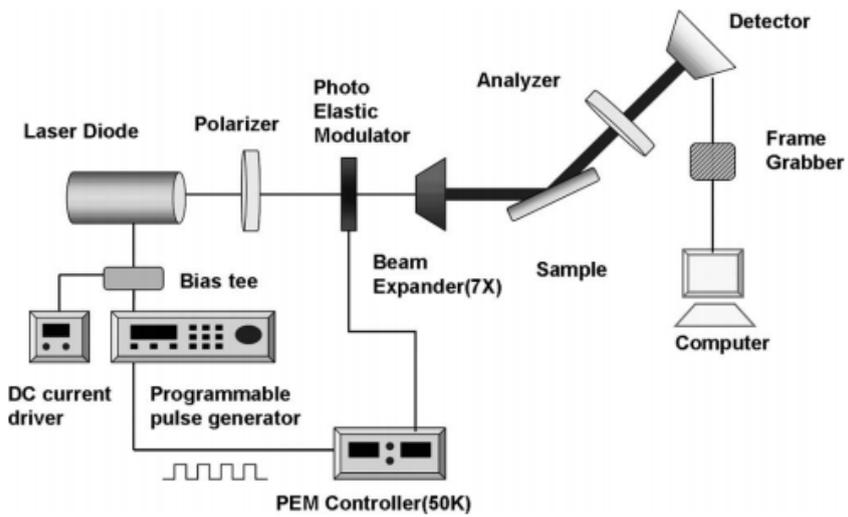
## 타원계

타원계(Ellipsometry)는 빛의 편광 상태의 변화를 분석하여 박막의 두께와 굴절률 등을 분석하는 측정 기술이다. 빛이 물질에 반사될 때 물질의 특성에 따라 편광 상태가 변화하게 되는데, 타원계에서는 편광판을 이용하여 빛의 편광 상태를 측정하여 이를 분석한다. 타원계는 두께와 굴절률 뿐만 아니라 물질의 조성이나 표면 거칠기 등을 측정하는 데에도 사용할 수 있어 매우 활용도가 높은 기술이다. 또한 백색광 간섭계나 분광 반사계와 비교할 때, 수 옴스트롬( $\text{\AA}$ ) 두께에 해당하는 초박막의 두께 측정이나 다층막의 두께를 측정하는 데에도 매우 뛰어난 성능을 가지고 있다.

타원계에 대한 연구는 1950년대부터 시작되어 매우 오래된 역사를 가지고 있다. 하드웨어 구성에 따라 그 분류도 매우 다양하여 광원의 종류에 따라 단색광 타원계(Monochromatic Ellipsometer), 분광 타원계(Spectroscopic Ellipsometer) 등으로 나눌 수 있고, 분광 타원계 안에서도 사용하는 파장에 따라 가시광(Visible) 영역 타원계, 자외선(Ultraviolet) 영역 타원계, 적외선(Infrared) 영역 타원계로 나눌 수 있다. 편광 상태를 측정하는 방식에 따라 RPE(Rotating Polarizer Ellipsometer), RAE(Rotating Analyzer Ellipsometer), PME(Phase Modulated Ellipsometer) 등으로 나뉘기도 한다. 타원계는 다양한 형태와 분류만큼이나 많은 연구가 이루어져 왔다[44-46].

타원계 역시 최근에는 두께 형상을 측정하려는 요구가 증가하고 있는데, 이러한 시도는 1990년대에 시작되어 2000년대 이후부터 많이 연구되어 오고 있다[47-50]. 두께 형상을 측정하기 위하여 CCD 카메라를 디텍터로 사용한 것을 이미징 타원계(Imaging Ellipsometer)라고 부른다. <그림 1.7> 은 이미징 타원계의 장치 구성이다. 그러나 타원계는 빛의 편광 상태의 변화를 민감하게 분석해야 하기 때문에 하드웨어를 구성하기 위한 광학 부품의 사용이 까다로운 편이고, CCD 카메라를 디텍터로 사용하기에는 기존의 타원계에 비해 감도가 많이 떨어져 데이터 분석이 쉽지 않다. 또한 타원계의 경우 분석을 자동화하

기가 쉽지 않아 반도체나 디스플레이 분야에서 양산 측정에 활용하기에는 어려움이 있다.



<그림 1.7 이미징 분광 타원계의 장치 구성(C.-Y. Han, 2006)>

### 1.3. 연구 내용

분광 반사계의 새로운 해석 방법으로 위상 추출법을 제안하였다. 기존의 분광 반사계의 해석 방법들이 연산속도를 향상시키는 것에 한계가 있었던 것은 반사도가 비선형적인 특성을 가지기 때문이었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 비선형적인 특성을 가지는 반사도로부터 위상을 추출함으로써 선형적인 수식으로 변환하였다. 추출된 위상으로부터 선형시스템의 해를 구함으로써 박막의 두께를 빠르고 정확하게 계산할 수 있다.

반사도를 분석하는 과정에서 발생할 수 있는 오차 요인에 대한 분석과 그 보상 방법에 대하여 연구하였다. 이미징 분광 반사계에서는 CCD 카메라를 디텍터(Detector)로 사용하기 때문에 노이즈가 많이 발생하게 되는데, 이를 효과적으로 처리하기 위하여 평균 필터를 2차원 및 1차원의 복합으로 사용하였다. 반사도의 확대 및 축소에 의한 왜곡은 본 논문에서 정의된 정규화 반사도의 성질을 이용하여 효과적으로 보정하였다. 마지막으로, 렌즈의 NA(Numerical Aperture)에 의한 반사도의 왜곡을 보정하기 위하여 유효 입사각을 정의하였고 이를 통해 반사도가 효과적으로 보정됨을 확인하였다.

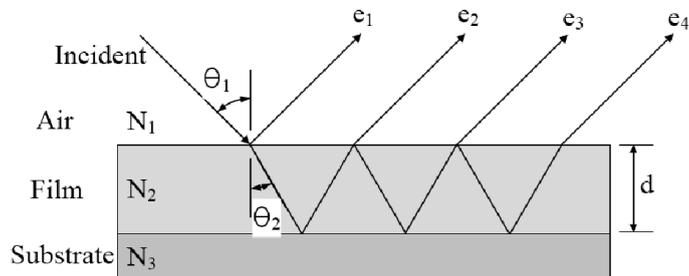
위상 추출법을 이미징 분광 반사계에 적용함으로써 빠른 연산속도를 달성하면서도 정확도를 높은 수준으로 유지하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션을 수행하여 기존의 해석 방법들과의 비교를 통해 연산속도와 정확도가 모두 높은 수준으로 달성되었음을 확인하였다. 실험을 통해서도 실제 박막 두께 측정을 빠르고 정확하게 수행함을 확인하였다. 특히 측정에 소요되는 모든 과정이 3초 이내로 매우 빠른 속도를 가짐을 확인하였다. 실제 반도체 및 디스플레이 산업 분야에서 많이 사용되는 재질들에 대해서도 실제 측정을 수행하여 그 두께 형상이 효과적으로 측정됨을 확인하였다.

## 2. 배경 이론

### 2.1. 분광 반사계 이론

분광 반사계는 투명 박막의 두께와 굴절률(Refractive Index)를 측정하기 위하여 파장별 반사도(Spectral Reflectance)를 분석한다. 박막 물질의 반사도는 박막의 두께와 굴절률의 함수로, 물질의 굴절률을 정밀하게 알고 있는 경우 이론적으로 계산해낼 수 있다. 이 절에서는 반사도를 계산하기 위한 이론적인 배경과 수식을 소개한다.

빛이 박막 물질에 조사되면 빛은 박막 내부에서 <그림 2.1> 과 같이 다중 반사를 일으킨다. 이러한 다중 반사에 의해서 서로 다른 위상을 가지는 여러 빛이 중첩되어 보강·상쇄 간섭이 발생한다. 보강·상쇄 간섭은 빛의 파장에 따라 다르게 발생하기 때문에 파장별 반사도를 관찰할 경우 보강과 상쇄가 반복적으로 발생하는 물결 모양을 확인할 수 있다. 이러한 다중 반사는 공기층과 박막층의 경계(Interface)에서 빛의 일부는 투과시키고 일부는 반사시키기 때문에 발생한다. 따라서 매질(Media)의 경계에서 발생하는 현상을 이해하는 것이 분광 반사계 이론에서 가장 기본적인 접근법이다.



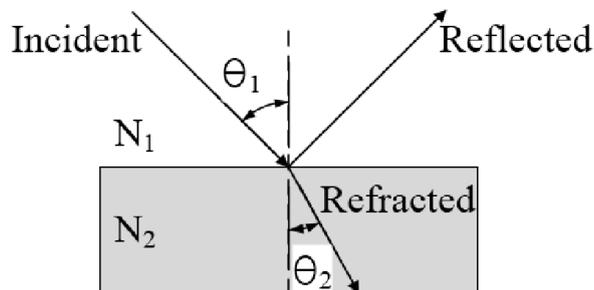
<그림 2.1 박막 물질에서의 빛의 다중 반사>

## 스넬의 법칙

스넬의 법칙(Snell's Law)은 굴절의 법칙(Law of Refractive)이라고 불리기도 하며, 빛이 서로 다른 매질의 경계를 지날 때의 입사각과 굴절각의 관계를 설명하는 법칙이다. 스넬의 법칙에 의하면 입사각과 굴절각에 사인(Sine)을 취한 값의 비는 각 매질에서의 굴절률의 비와 같으며, 또한 각 매질에서의 위상 속도(Phase Velocity)의 비와도 같다. 따라서 식 (2.1) 과 같이 표현될 수 있으며 여기서  $\theta_1$  은 <그림 2.2> 에서의 입사각,  $\theta_2$  는 굴절각이며  $N_1$  과  $N_2$  는 각 매질에서의 복소 굴절률이다. 복소 굴절률은 식 (2.2) 와 같이 굴절 계수  $n$  을 실수부로 가지고 소광 계수  $k$  를 허수부로 가지는 복소수로 표현되며 물질의 광학적인 성질을 나타내는 수치이다. 소광 계수는 빛이 매질을 지나는 동안 매질에 흡수되는 정도를 나타내는 값이다.

$$N_1 \sin \theta_1 = N_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

$$N(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \quad (2.2)$$



<그림 2.2 서로 다른 매질에서의 빛의 반사와 굴절>

## 프레넬 방정식

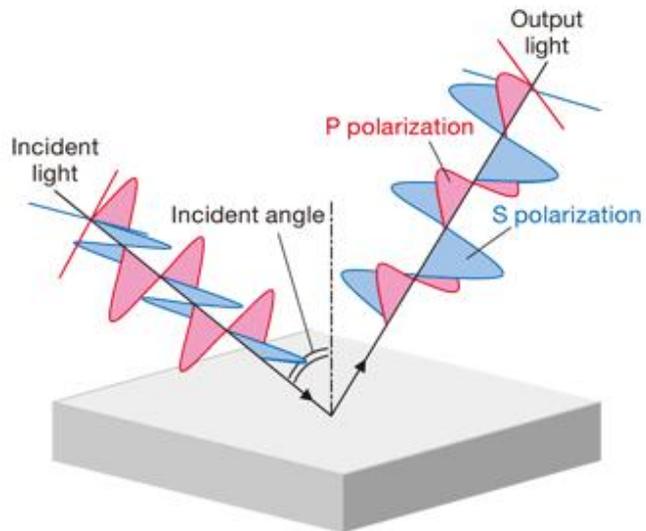
프레넬 방정식(Fresnel's Equations)은 서로 다른 굴절률을 가지는 매질의 경계에서의 빛의 변화를 정립한 수식이다. 매질이 균일(Homogeneous)한 평면이어야 하며, 빛이 평면파(Plane Wave)여야 한다는 가정이 필요하다. <그림 2.2>에서와 같이 빛이 매질을 지날 때 일부는 굴절되고 일부는 반사되는데, 프레넬은 반사의 법칙(Law of Reflection), 스넬의 법칙과 맥스웰 방정식(Maxwell's equations)을 이용하여 그 특성을 수식으로 정립하였다. 프레넬 반사 계수(Fresnel's Reflection Coefficients)는 그 중에서도 입사된 전자기파가 반사되는 비율과 굴절되는 비율을 P파와 S파로 나누어 정립한 것으로 반사계에서 매우 중요한 수식이다. 프레넬 반사 계수와 투과 계수는 식 (2.3 a-d) 과 같이 표현된다. 알파벳 r 은 반사된 전자기파의 비율을, 알파벳 t 는 굴절된 전자기파의 비율을 의미한다. 위 첨자 'p' 와 's' 는 <그림 2.3> 과 같이 각각 입사면(Incident Plane)과 평행한 방향으로 편광(Polarized)된 전자기파와 입사면과 수직인 방향으로 편광된 전자기파를 의미한다. 아래 첨자 '12' 는 빛이 매질 1 에서 매질 2 방향으로 진행하고 있음을 뜻한다.

$$r_{12}^p = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} \quad (2.3 a)$$

$$r_{12}^s = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} \quad (2.3 b)$$

$$t_{12}^p = \frac{2N_1 \cos \theta_1}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2} \quad (2.3 c)$$

$$t_{12}^s = \frac{2N_1 \cos \theta_1}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} \quad (2.3 d)$$



The definition of S polarization and P polarization

<그림 2.3 빛의 편광 상태에 따른 P파와 S파의 구분><sup>4</sup>

<sup>4</sup> <http://www.products-sigmakoki.com>

## 파장별 반사도의 모델링

프레넬 반사 계수와 빛의 다중 반사 현상을 이용하여 박막에서의 파장별 반사도(Spectral Reflectance)를 모델링할 수 있다. 모델링을 위해서는 박막의 두께와 빛의 입사각, 물질의 복소 굴절률을 알고 있어야 한다. 프레넬 반사 계수를 적용하면 <그림 2.1> 에서와 같이 빛이 박막 내에서 몇 번의 반사를 거쳐서 박막을 빠져 나오는지에 따라 전자기파  $e_i$  의 크기 및 위상의 변화를 계산할 수 있다. 식 (2.4) 는 박막 내부에서의 반사 횟수에 따른 전자기파의 수식을 정리한 것이다. P 파와 S 파는 동일한 수식 형태를 가지므로 식 (2.4) 에서는 위 첨자를 생략하여 표시하였다. 식 (2.4) 에서  $\beta$  는 전자기파가 박막 내부의 두께  $d$  만큼을 종단하는 동안 발생한 위상의 변화로, 식 (2.5) 와 같다.

$$\text{Reflection at Air-Film Interface: } e_1 = r_{12} \quad (2.4 \text{ a})$$

$$1 \text{ Reflection in the Film Layer: } e_2 = t_{12} \cdot r_{23} \cdot t_{21} \exp(-i2\beta) \quad (2.4 \text{ b})$$

$$2 \text{ Reflections in the Film Layer: } e_3 = t_{12} \cdot r_{23}^2 \cdot r_{21} \cdot t_{21} \exp(-i4\beta) \quad (2.4 \text{ c})$$

$$3 \text{ Reflections in the Film Layer: } e_4 = t_{12} \cdot r_{23}^3 \cdot r_{21}^2 \cdot t_{21} \exp(-i6\beta) \quad (2.4 \text{ d})$$

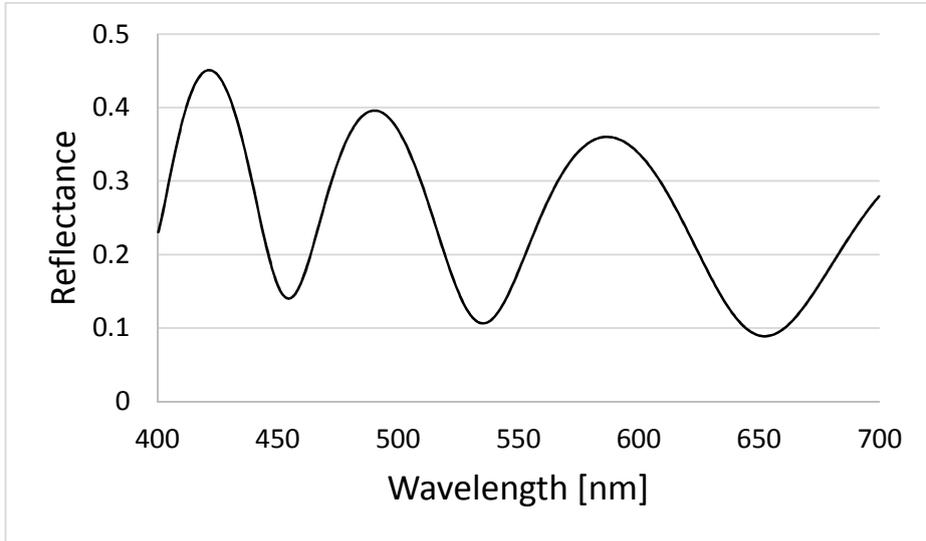
$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi d}{\lambda} N_{film}(\lambda) \cos \theta_2 \quad (2.5)$$

총 반사 계수(Total Reflection Coefficient)는 모든 다중 반사에 의한 전자기파를 합한 것과 같다. 위의 식 (2.4) 에서 확인할 수 있듯이 빛이 박막의 내부에서  $i$  회의 다중 반사를 일으킨 뒤 공기층으로 빠져 나오는 전자기파  $e_i$  는 규칙적인 수식으로 표현된다. 따라서 식 (2.6) 와 같이 최종적으로 정리될 수 있다. 수식에 대한 정리 과정은 Appendix A 에 설명하였다.

$$r_{total} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\beta)} \quad (2.6)$$

파장별 반사도는 총 반사 계수를 제공하여 얻을 수 있다. 총 반사 계수는 입사되는 빛의 전자기파와 반사된 빛의 전자기파의 비이고, 반사도는 입사된 빛의 강도(Intensity)와 반사된 빛의 강도의 비이다. 빛의 강도는 전자기파의 크기의 제곱과 비례하므로, 반사도는 총 반사 계수의 제곱이다. 식 (2.7) 은 반사도와 총 반사 계수의 관계를 표현한 것이고, <그림 2.4> 는 모델링된 반사도의 예시이다. 반사도 모델링 시에 실리콘 기판에 SiO<sub>2</sub> 박막이 형성되어 있는 경우를 가정하였다. 파장은 400 – 700 nm 를 사용하였다.

$$R(\lambda) = \frac{I_{ref}(\lambda)}{I_{inc}(\lambda)} = |r_{total}(\lambda)|^2 \quad (2.7)$$

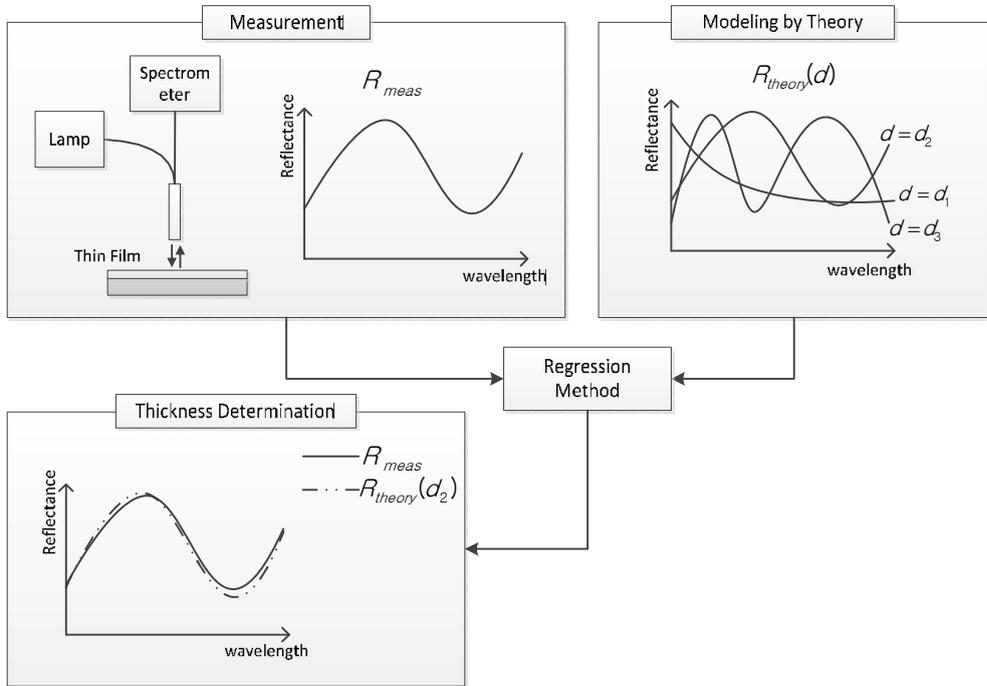


<그림 2.4 프레넬 방정식을 이용해 모델링한 반사도의 예 (SiO<sub>2</sub> 1 um)>

## 2.2. 비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정 방법

비선형 피팅법(Nonlinear Fitting Method)을 이용한 박막 두께 측정은 분광 반사계에서 가장 보편적으로 사용되는 방법이다. 일반적으로 비선형 피팅을 이용한 박막 두께 측정은 아래 (a) - (e) 와 같은 과정을 거친다. 위의 2.1 절에서 박막의 두께와 물질의 복소 굴절률을 알고 있는 경우 식 (2.3) - (2.7) 을 통해 파장별 반사도를 이론적으로 계산할 수 있음을 이미 설명하였다. 초기값으로부터 시작하여 반사도의 반복적인 비교를 통해 가장 유사한 반사도를 가지는 두께를 찾아내는 것이 비선형 피팅법의 요점이다. 여러 가지 비선형 피팅 알고리즘이 연구된 바 있으나, Levenberg-Marquardt 알고리즘(LMA)이 두께 측정 분야에서 가장 많이 사용되고 있다[54]. <그림 2.5> 는 비선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정을 도식적으로 표현한 것이다.

- (a) 초기값 선정: 두께 및 물질의 굴절률 초기값
- (b) 두께 및 굴절률 정보를 이용하여 이론적인 반사도 모델링 생성
- (c) 측정된 반사도와 모델링 반사도의 유사도를 평가
- (d) 두께와 굴절률 값을 변경하며 (b) - (c) 단계를 반복
- (e) 가장 유사도가 높은 두께와 굴절률을 최종 결과로 출력

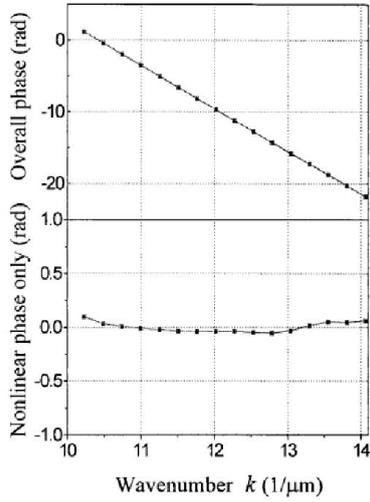


<그림 2.5 피선형 피팅법을 이용한 박막 두께 측정>

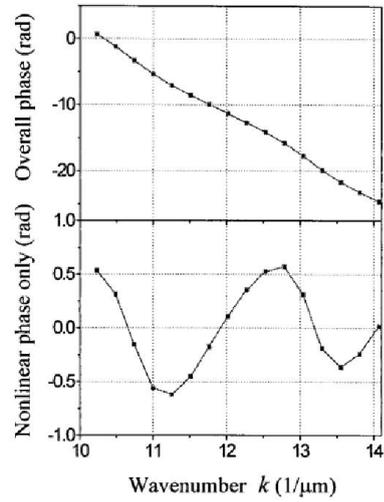
비선형 피팅법은 백색광 간섭계에서의 박막 두께 측정에서도 활용될 수 있다. 가장 대표적인 것이 S.-W. Kim 이 1999년에 제안한 백색광 간섭계를 이용한 표면 형상 및 박막 두께의 측정이다.[15]. 이 논문에서 S.-W. Kim 은 수직 방향으로 광학계를 이동하며(Vertically Scanning Interferometer) 얻은 간섭 신호를 푸리에 변환하여 파장 도메인에서의 위상을 얻어내었다. 이 위상은 식 (2.8) 과 <그림 2.6> 과 같이 표면 형상의 영향을 받는 선형적인 위상과 두께의 영향을 받는 비선형적인 위상으로 이루어진다. 이 중 비선형적인 위상에 대하여 반사도 모델링 수식을 적용한 Levenberg-Marquardt 비선형 피팅을 사용하여 두께를 측정하였다.

비선형 피팅법을 이용한 두께 측정의 장점은 박막의 두께와 물질의 굴절률을 동시에 측정할 수 있고 정확도가 매우 뛰어나다는 점이다. 그러나 반복적인 연산으로 인해 계산 시간이 오래 걸리고 초기값 설정이 잘못되었을 경우 잘못된 결과를 얻을 수 있다는 단점이 있다.

$$\Phi^e(k; h, d) = 2hk + \psi(k, d). \quad (2.8)$$



(a)



(b)

Actual phase distributions measured from two representative surfaces: (a) an uncoated mirror and (b) a SiO<sub>2</sub>-coated Si substrate.

<그림 2.6 백색광 간섭계에서 추출한 위상 (S.-W. Kim, 1999)>

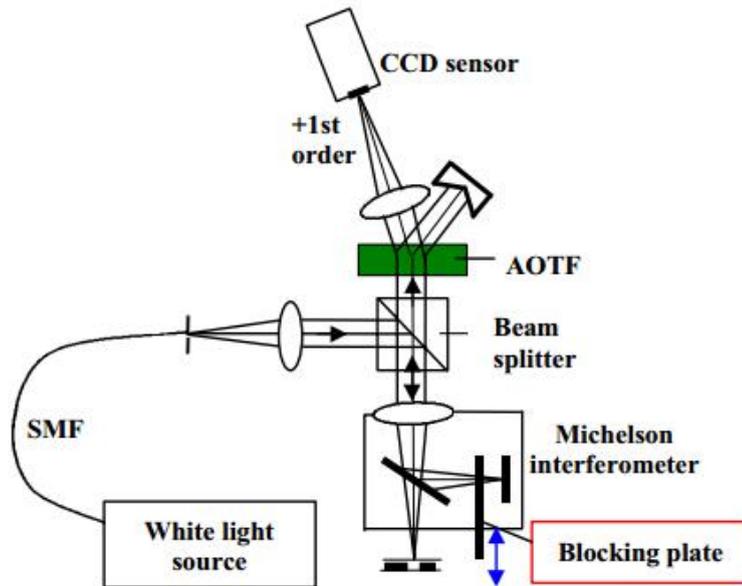
### 2.3. 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 방법

피크 검출법(Peak Detection Method)을 이용한 박막 두께 측정 방법은 D. Kim 에 의해서 2002년 제안된 방법으로 연산 속도가 매우 빠르다[39]. 비선형 피팅 방법을 사용하여 두께 형상을 측정하는 경우 반복적인(iterative) 피팅 과정을 모든 CCD 카메라의 화소에 대해 수행해야만 한다. 일반적으로 많이 사용되는 산업용 CCD 카메라의 경우 화소수가 적게는 20만개에서 많게는 100만개 이상에 달하므로 이러한 연산은 실용적으로 사용되기가 매우 어렵다. 피크 검출법을 사용하는 경우 매우 간단한 계산만을 사용하기 때문에 많은 화소수에 반복적으로 적용하기에 적합한 방법이다.

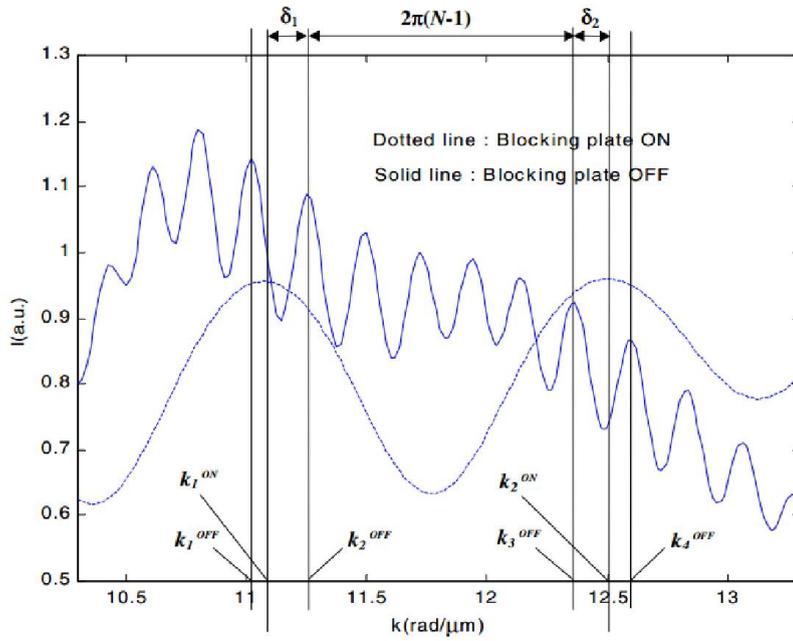
D. Kim 은 박막의 두께 측정을 위해서 <그림 2.7> 과 같은 장치를 구성하였다. 백색광 광원에서 조사되는 빛을 음향 광학 변조 필터(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)로 필터링하여 파장 주사(Wavelength Scanning)을 수행한다. 특이점은 마이켈슨(Michelson) 간섭계에서 기준 거울(Reference Mirror)로 향하는 빛을 블록을 이용하여 차단할 수 있도록 한 것이다. 기준 거울로 향하는 빛이 차단된 경우 CCD 카메라에서 얻는 신호는 순수하게 박막의 두께에 대한 정보만을 가지고 있는 파장별 반사도이며, 이 신호를 피크 검출법으로 분석하여 박막의 두께를 결정한다.

피크 검출법에서 두께를 측정하는 방법은 다음과 같다. 파장별 반사도는 일반적으로 <그림 2.8> 과 같이 최고점과 최저점이 반복적으로 나타나는 물결 형태를 가진다. 반사도에서 처음 나타나는 최고점과 마지막에 나타나는 최고점을 검출한 뒤, 이 지점의 파수(Wavenumber)  $k_1$ ,  $k_2$  와 이에 상응하는 박막의 굴절률  $n(k_1)$ ,  $n(k_2)$  로부터 식 (2.9) 와 같이 박막의 두께를 계산할 수 있다. 식 (2.9) 은 매우 간단한 수식임을 알 수 있으며 매우 빠르게 계산된다. 그러나 피크 검출법은 다른 두께 측정법에 비하여 정확도가 떨어지고, 비교적 얇은 두께를 가지는 박막에서는 반사도에서 최고점과 최저점을 검출할 수 없기 때문에 사용이 불가능하다는 한계점이 있다.

$$d = \frac{\pi}{2\{k_2^{ON}n(k_2^{ON}) - k_1^{ON}n(k_1^{ON})\}} \quad (2.9)$$



<그림 2.7 AOTF 를 이용한 파장주사 간섭계 (D. Kim, 2002)>



<그림 2.8 피크 검출법을 이용한 박막 두께 측정 (D. Kim, 2002)>

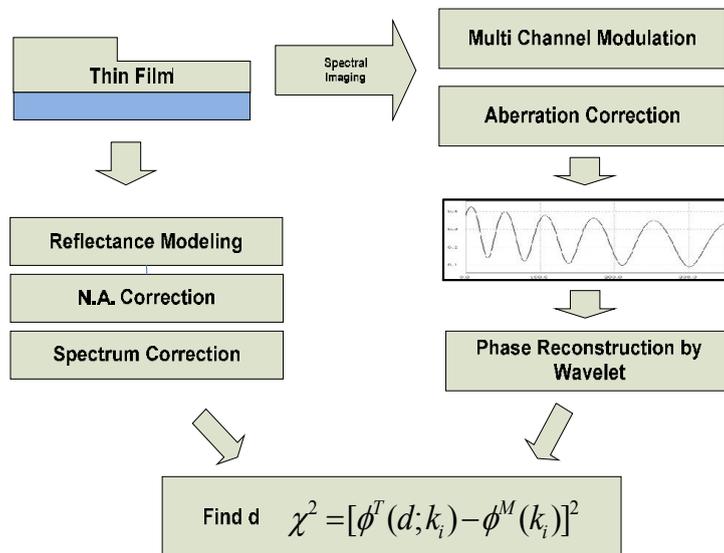
#### 2.4. 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 박막 두께 측정 방법

웨이블릿 변환(Wavelet Transform)을 이용한 위상 복원법은 T.-Y. Jo 에 의해서 2013년 제안된 방법으로, 두께 형상을 빠르게 측정하기 위하여 개발된 방법이다[41]. 하드웨어는 백색광 광원과 음향 광학 변조 필터를 이용한 광학 시스템을 구성하였다. <그림 2.7> 의 장치 구성과 유사하나, 마이켈슨 간섭계 대신에 일반 렌즈를 사용한 것과 음향 광학 변조 필터가 카메라 앞이 아니라 광원의 앞에 설치되어 있는 것이 다르다. 이는 D. Kim 이 제안한 장치 구성에서 블록을 이용하여 기준 거울로 향하는 빛을 차단한 것과 근본적으로 동일한 장치 구성이며, 따라서 동일한 형태의 반사도 신호를 얻을 수 있다.

이 방법은 복원된 위상의 초기 위상과 기울기를 이용하여 박막의 두께를 측정한다. 장치를 통하여 획득한 반사도 신호를 웨이블릿 변환을 이용하여 위상을 복원할 경우 <그림 2.9> 과 같은 위상 그래프를 얻을 수 있다. <그림 2.9> 는  $\text{SiO}_2$  박막의 두께가 50 nm 에서 1000 nm 인 경우에 대하여 위상을 복원한 것을 표시한 것이다. 각각의 위상은 서로 다른 초기 위상과 기울기를 가짐을 확인할 수 있다. 측정 반사도로부터 복원된 위상은 이론적으로 모델링된 반사도로부터 복원된 위상과 유사도를 비교하는 방식을 통하여 가장 유사도가 높은 두께를 찾아내게 된다. <그림 2.10> 는 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 두께 측정의 알고리즘 순서도이다.

웨이블릿 변환 위상 복원법은 비선형 피팅 방법과 유사한 수준의 측정 정확도를 유지하면서도 측정 속도를 개선시켰다. 그러나 반사도 모델링과 웨이블릿 변환을 이용한 위상 복원을 반복적으로 수행해야 하기 때문에 연산량이 적지 않은 편이다. T.-Y. Jo 의 웨이블릿 변환 위상 복원법은 비선형 피팅법에 비해서는 매우 빠르지만 피크 검출법에 비해서는 느린 연산 속도를 보였다.

<그림 2.9 웨이블릿 변환을 이용해 복원한 위상의 형태 50 – 1000 nm  
(T.-Y. Jo, 2013)>



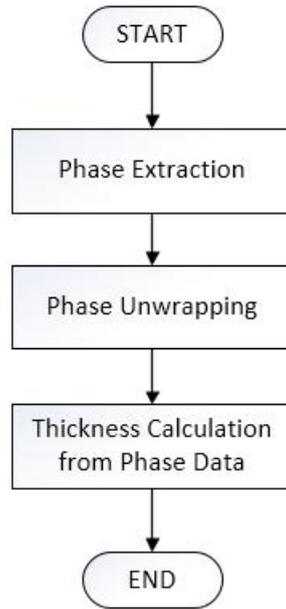
<그림 2.10 웨이블릿 변환 위상 복원법을 이용한 두께 측정 순서도  
(T.-Y. Jo, 2013)>

### 3. 위상 추출법

#### 3.1. 개요

분광 반사계에서 기존의 두께 측정 방식은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 모델링기반의 측정법으로, 측정한 반사도와 모델링한 반사도와의 비교를 통해 두께를 찾아낸다. 앞서 설명한 비선형 피팅법과 웨이블릿 위상 복원법이 이에 해당한다. 이 경우 측정 정밀도가 우수하지만 반사도 모델링을 반복적으로 수행해야 하기 때문에 측정 속도가 느리다. 두 번째는 반사도 신호 자체를 분석하여 직접적으로 두께를 계산하는 방식으로, 피크 검출법이 이에 해당한다. 피크 검출법은 계산 속도가 매우 빠르지만 측정 정밀도가 다소 떨어져 더 신뢰도 있는 측정법이 필요하다.

이 논문에서 제안하는 위상 추출법(Phase Extraction Method)을 이용한 막두께 측정법은 신호 자체를 분석하는 두 번째 분류에 해당하는 방법으로, 빠른 계산 속도를 유지하면서도 우수한 측정 정확도를 가진다. 위상 추출법은 박막 물질과 서브스트레이트(Substrate) 물질의 굴절률 정보를 알고 있다는 가정 하에 박막 물질의 두께를 측정할 수 있다. 위상 추출법을 이용한 두께 측정의 전체적인 순서도를 <그림 3.1>에 표시하였다.



<그림 3.1 위상 추출법을 이용한 두께 측정의 순서도>

## 3.2. 위상 추출법을 이용한 막두께 측정 이론

### 3.2.1. 위상 추출 단계

분광 반사계 이론을 설명한 2.1 절에서, 식 (2.6) 의 프레넬 반사 계수  $r_{12}$  와  $r_{23}$  는 일반적으로 복소수이고  $\exp(-i2\beta)$  역시 복소수이다. 그러나 반도체 및 디스플레이 분야에서 사용되는 박막 물질은 대부분 매우 낮은 소광계수 (Extinction Coefficient)를 갖는 물질로, 복소 굴절률의 소광계수를 0 으로 가정 할 수 있다. 이러한 경우 식 (2.3) 에 의하여 프레넬 반사 계수  $r_{12}$  는 실수가 되므로  $r_{23}$  과  $\exp(-i2\beta)$  만을 복소수로 처리하여 식 (3.1) 과 같이 실수부와 허수부로 나누어 정의하였다.

$$\begin{aligned} r_{23}(\lambda) &= A(\lambda) + iB(\lambda) \\ \exp(-i2\beta) &= \cos(2\beta) - i \cdot \sin(2\beta) \end{aligned} \quad (3.1)$$

위의 식 (3.1) 을 총 반사계수를 정의한 식 (2.6) 에 대입하면 식 (3.2) 와 같이 정리할 수 있다. 또한 이를 이용하여 반사도를 계산하면 식 (3.3) 과 같이 정리된다. 아래의 식에서 프레넬 반사 계수  $r_{12}$  와 A, B,  $\beta$  는 모두 파장에 대한 함수이지만 이는 생략하여 표기하였다.

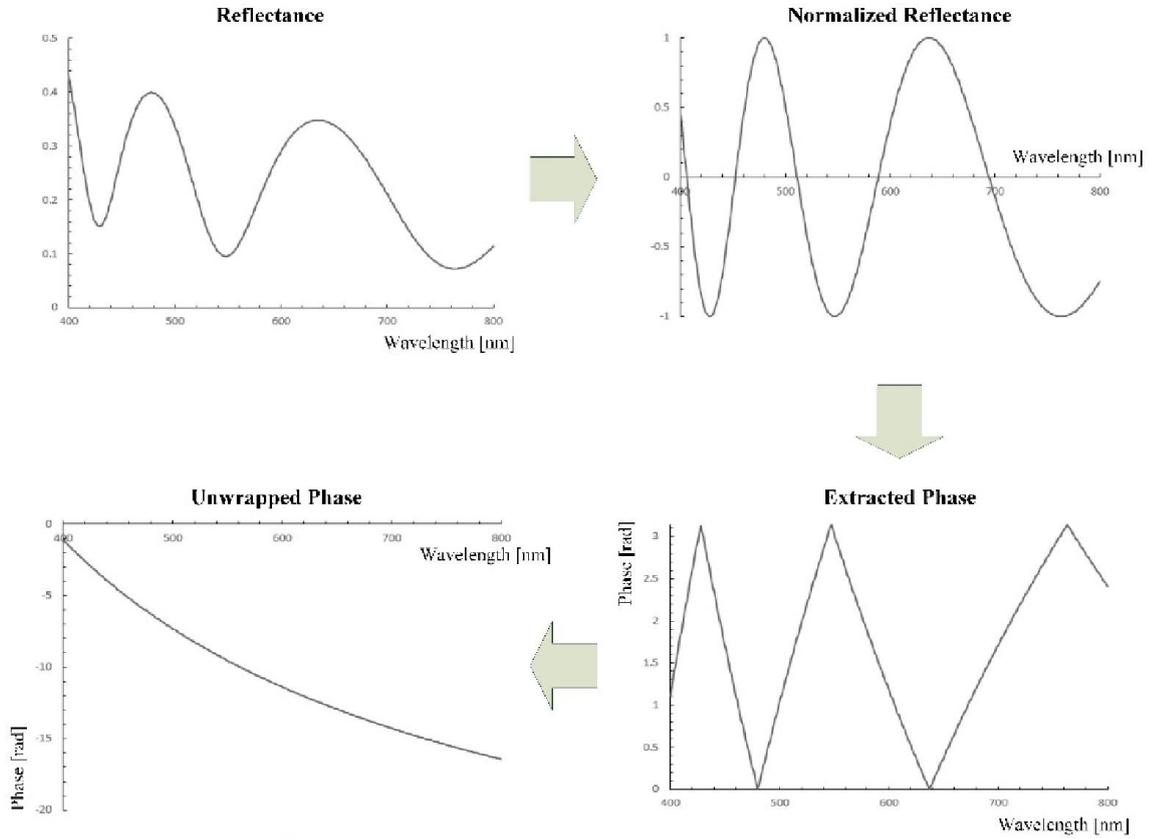
$$r_{total} = \frac{(r_{12} + A \cos(2\beta) + B \sin(2\beta)) + i(B \cos(2\beta) - A \sin(2\beta))}{(1 + r_{12}A \cos(2\beta) + r_{12}B \sin(2\beta)) + i(r_{12}B \cos(2\beta) - r_{12}A \sin(2\beta))} \quad (3.2)$$

$$R = |r_{total}|^2 = \frac{r_{12}^2 + (A^2 + B^2) + 2r_{12}(A \cos(2\beta) + B \sin(2\beta))}{1 + r_{12}^2(A^2 + B^2) + 2r_{12}(A \cos(2\beta) + B \sin(2\beta))} \quad (3.3)$$

식 (3.3) 에서 반사도  $R$  은 측정된 물리량이고,  $r_{12}$  와  $A, B$  은 물질의 복소 굴절률로부터 계산하여 알고 있는 값이므로 위상  $\beta$  가 유일한 미지수 (Unknown)임을 알 수 있다. 미지수  $\beta$  를 구하기 위하여 아래와 같이 정의한  $X$  에 대하여 식 (3.3) 을 정리하면 식 (3.4) 를 얻을 수 있다. 최종적으로, 위상  $\beta$  는 삼각함수를 이용하여 식 (3.5) 와 같이 간단하게 계산된다. 식 (3.5) 에서 코사인의 역함수는  $0$  과  $\pi$  사이의 범위의 함수값을 가지므로 이를 복원 (Unwrapping) 하는 과정을 반드시 거쳐야 한다. <그림 3.2> 은 측정된 반사도  $R$  로부터 위상  $\beta$  를 추출해내는 과정을 표시한 것이다.

$$X = A \cos(2\beta) + B \sin(2\beta) = \frac{R + R \cdot r_{12}^2 (A^2 + B^2) - r_{12}^2 - (A^2 + B^2)}{2r_{12}(1-R)} \quad (3.4)$$

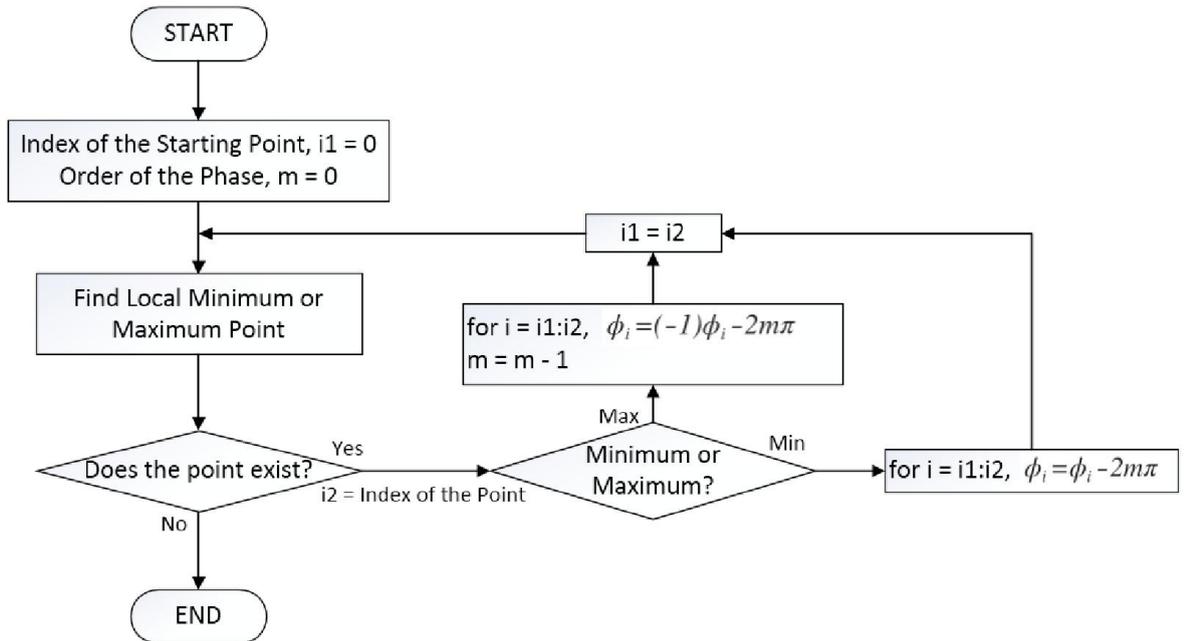
$$2\beta = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{X}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) \quad (3.5)$$



<그림 3.2 위상 추출 과정>

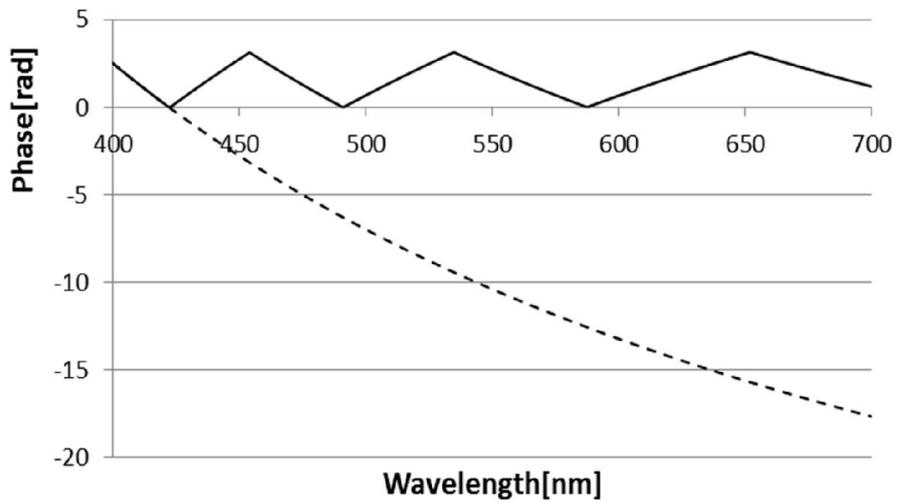
### 3.2.2. 위상 복원 단계

위상 추출법의 과정 중 식 (3.5) 에서 코사인의 역함수( $\cos^{-1}$ )는 0 과  $\pi$  사이의 함수값을 가지므로 이를 복원(Unwrapping) 하는 과정을 반드시 거쳐야 한다. 1차원 위상 복원(One-Dimensional Phase Unwrapping)은 기존의 WLI 에서 이미 많이 연구되어온 분야이지만, WLI 에서의 위상 복원의 경우 탄젠트의 역함수( $\tan^{-1}$ )에 대한 위상 복원을 목적으로 하기 때문에 기존의 위상 복원 연구를 그대로 사용할 수 없다[55-57]. 본 논문에서 사용한 위상 복원 알고리즘의 순서도를 <그림 3.3> 에 표시하였다.



<그림 3.3 위상 복원 순서도>

이와 같은 위상 복원 알고리즘을 이용하여 위상 데이터 중에서 최고점과 최저점의 위치를 찾아 감소하는 방향으로 정렬되도록 복원하였다. <그림 3.4>는 톱니 모양으로 0 과  $\pi$  사이의 함수값을 가지던 위상(실선 표시)과 복원 알고리즘을 통해 복원된 위상(점선)을 함께 표시한 것이다.



<그림 3.4 복원 전의 위상(실선)과 복원 알고리즘을 통해 복원된 위상(점선)>

### 3.2.3. 두께 계산 단계

위상 복원 단계를 거친 후의 위상은 위상 오프셋을 가지게 된다. 따라서 측정된 반사도를 처리하여 얻는 위상은 식 (3.6) 과 같이 표현될 수 있다.  $\beta_{unwrap}$  은 식 (3.5) 를 이용하여 계산된 뒤 복원 과정까지 완료된 위상이며,  $\kappa\pi$  는 위상 복원 단계에서 발생하게 되는 위상 오프셋이다. 위상 오프셋 상수  $\kappa$  은 정수값을 갖는다. 위상  $\beta$  는 이론적으로 식 (2.5) 에 의하여 정의되므로, 식 (3.6) 과 (2.5) 를 등식 관계로 놓으면 식 (3.7) 을 얻을 수 있다. 식 (3.7) 에서 박막의 두께  $d$  와 오프셋 상수  $\kappa$  만이 미지수이며, 두께  $d$  는 위상 복원 법에서 최종적으로 계산해 내고자 하는 값이기도 하다.

$$\beta = \beta_{unwrap} + \kappa\pi \quad (3.6)$$

$$\beta_{unwrap} + \kappa\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} N_2 \cos \theta_2 \quad (3.7)$$

분광 반사계는 반사도 데이터를 획득하기 위하여 스펙트로미터의 디텍터 배열 또는 CCD 카메라를 사용하므로, 실제 측정 과정을 통하여 얻어지는 데이터는 센서로부터 얻는 이산 데이터이다. 따라서 식 (3.7) 은 아래 식 (3.8) 과 같은 행렬식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \beta_{unwrap,1} \\ \beta_{unwrap,2} \\ \vdots \\ \beta_{unwrap,p} \end{bmatrix} = \pi \begin{bmatrix} 2N_{2,1} \cos \theta_{2,1} / \lambda_1 & -1 \\ 2N_{2,2} \cos \theta_{2,2} / \lambda_2 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ 2N_{2,p} \cos \theta_{2,p} / \lambda_p & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

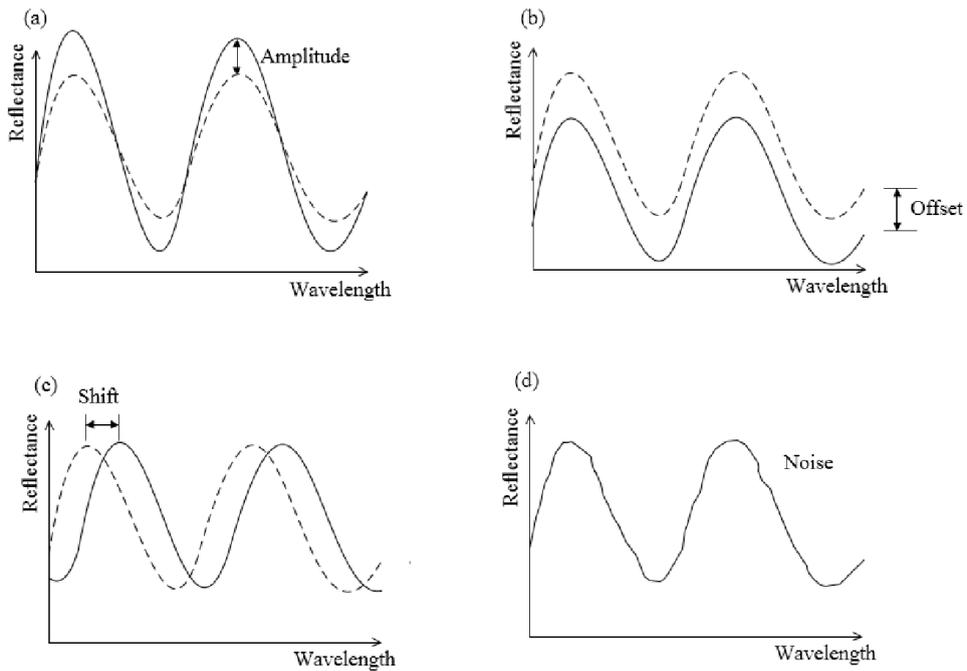
위의 식 (3.7) 은 ‘ $Ax=b$ ’ 와 같은 선형 시스템의 형태로, 의사역행렬 (Pseudo-inverse)를 통해 간단하게 해를 계산해 낼 수 있다. 따라서 최종적으로 두께  $d$  를 식 (3.9) 을 통하여 얻을 수 있다. 식 (3.1)–(3.9) 의 과정에서 알 수 있듯이 위상 추출법에서 두께를 해석하는 과정은 사칙연산과 삼각함수와 같은 기본적인 수식들로만 이루어져 있으며, 매우 빠른 연산 속도를 보일 것이라 예상할 수 있다. 또한 식 (3.8) 을 통해 정의된 행렬식은 선형 방정식의 형태로, 비선형적인 수식인 반사도를 위상 추출을 통해서 선형 방정식으로 변환하였음을 보여주고 있다.

$$d = \frac{1}{2\pi} \frac{p \sum_{i=1}^p (\beta_{unwrap,i} N_{2,i} \cos \theta_{2,i} / \lambda_i) - \sum_{i=1}^p \beta_{unwrap,i} \sum_{i=1}^p (N_{2,i} \cos \theta_{2,i} / \lambda_i)}{p \sum_{i=1}^p (N_{2,i} \cos \theta_{2,i} / \lambda_i)^2 - [\sum_{i=1}^p (N_{2,i} \cos \theta_{2,i} / \lambda_i)]^2} \quad (3.9)$$

### 3.3. 오차 원인 분석과 보상법

#### 3.3.1. 오차 원인 분석 및 반사도 왜곡 형상

실제 측정 상황에서는 수 많은 환경적 요인으로 인하여 반사도 신호가 왜곡되고, 이로 인하여 두께 측정 결과가 부정확해질 수 있다. 일반적으로 반사도 신호의 왜곡은 <그림 3.5> 과 같은 네 종류로 분류될 수 있다. 각 종류의 왜곡을 발생시키는 원인은 아래와 같다.



<그림 3.5 반사도 왜곡의 형태 분류>

## 확대 및 축소(Amplitude) 및 오프셋(Offset)

확대·축소는 <그림 3.5> 의 (a) 와 같이 반사도 신호의 최대점과 최소점 간의 간격이 커지거나 작아지는 종류의 변형이다. 센서의 선형성(Linearity)과 광원의 광량 변화가 원인이 될 수 있다. 오프셋은 <그림 3.5> 의 (b) 와 같이 반사도 신호가 수직 방향으로 커지거나 작아지는 종류의 변형이다. 광원의 광량 변화가 원인일수 있고, 측정시 렌즈와 측정물 간의 거리가 변하는 경우 이런 변형이 발생할 수 있다.

이러한 반사도의 변형의 원인을 파악하기 위해서는 반사도 측정 과정에 대한 이해가 필요하다. 일반적으로 분광 반사계에서는 측정 대상물의 반사도를 측정하기 위해서 반사도를 사전에 알고 있는 기준 물질(Reference Material)에 반사된 광 스펙트럼을 획득한 뒤, 측정 대상물에 반사된 광 스펙트럼을 획득하는 두 단계를 거친다. 기준 물질로는 실리콘(Silicon)을 가장 많이 사용한다. 획득된 두 스펙트럼을 식 (3.10) 와 같이 계산하면 측정 대상물의 반사도가 된다. 따라서 기준 물질의 스펙트럼을 획득할 때와 측정 대상물의 스펙트럼을 획득할 때의 조건이 상이한 경우, 왜곡된 형태의 반사도가 얻어진다.

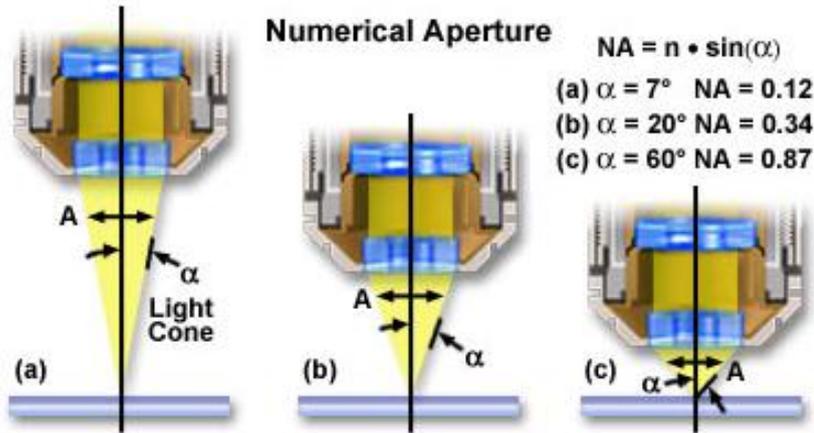
위에서 언급된 왜곡의 원인들 중 가장 영향이 큰 것은 거리의 변화이다. 기준 물질과 측정 대상물의 스펙트럼을 얻는 과정에서 렌즈의 초점을 맞추는 작업이 수반되기 때문이다. 특히 양산 과정에서 측정을 하기 위해서는 자동 초점 기능(Autofocus, AF)이 필수적인데, 이 기능의 성능에 따라 거리가 달라지게 된다.

$$R(\lambda) = \frac{I_{target}(\lambda)}{I_{reference}(\lambda)} R_{reference}(\lambda) \quad (3.10)$$

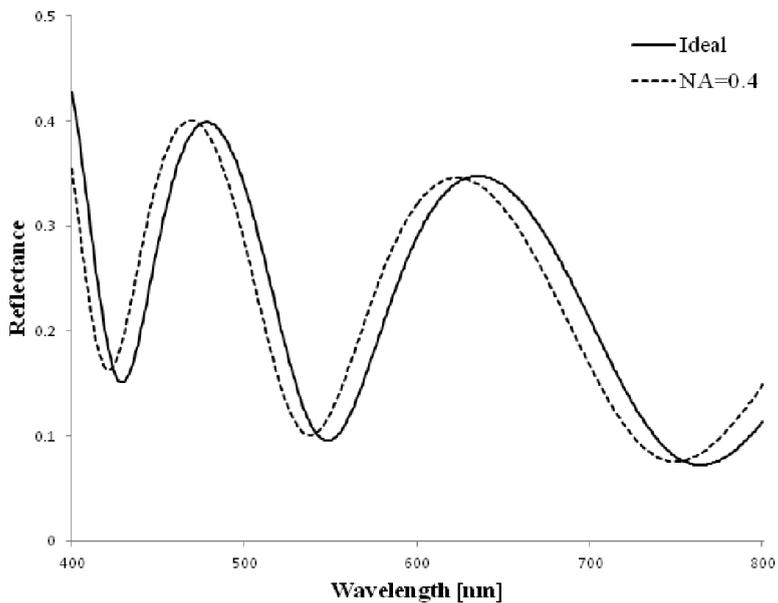
## 수평 이동(Shift)

수평 이동은 <그림 3.5> 의 (c) 와 같이 반사도 신호가 파장 축을 따라 이동하는 종류의 변형이다. 주로 렌즈의 NA(Numerical Aperture)에 의한 입사각 효과 때문에 발생한다. NA 는 렌즈의 최대 입사각을 결정하는 값으로 식 (3.11) 과 같이 정의되며, 렌즈를 통과한 빛은 <그림 3.6> 와 같이 원뿔 모양으로 입사된다. 식 (3.11) 에서  $n$  은 빛이 지나는 매질의 굴절률이며  $\theta_M$  은 최대 입사각이다. 분광 반사계 이론에서 확인하였듯이 물질의 반사도는 빛의 입사각에 따라서 달라지므로 이를 모델링 시에 적용해야 하는데, 렌즈를 지난 빛은 원뿔 모양으로 입사되므로 수 많은 입사각을 가지는 성분으로 나뉘어 입사되고 입사각을 특정할 수가 없다. 이 문제를 해결하기 위하여 W. A. Pliskin 은 렌즈의 NA 에 의한 유효각(Effective Angle)을 정의하여 반사도 모델링에 사용한 바 있다[58]. 이 이론을 이용하여 빛이 수직으로 입사되는 경우와 NA 가 0.4 인 렌즈의 경우를 각각 모델링하여 비교하면 <그림 3.7> 와 같이 반사도가 수평 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

$$NA = n \cdot \sin(\theta_M) \quad (3.11)$$



<그림 3.6 렌즈의 NA 로 인한 입사각 효과><sup>5</sup>

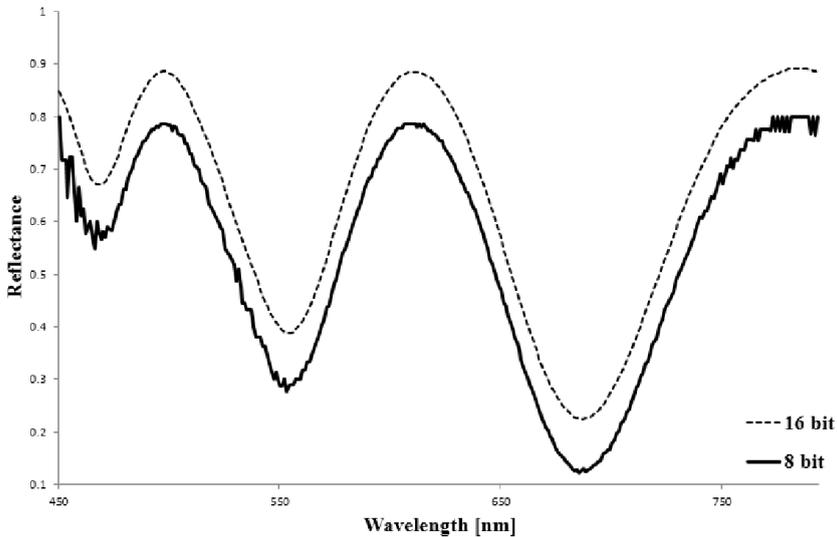


<그림 3.7 렌즈의 NA 로 인한 반사도의 수평 이동 현상>

<sup>5</sup> <http://www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasna.html>

## 노이즈(Noise)

노이즈는 <그림 3.5> 의 (d) 와 같이 반사도 형상을 비정형적으로 변형시키는 종류의 왜곡이다. 디텍터의 SNR(Signal-to-Noise Ratio)가 낮은 경우 이러한 형태의 왜곡도 커지게 된다. 또는 디텍터의 ADC(Analog-Digital Converter)의 해상도가 충분하지 않은 경우에도 발생할 수 있다. 특히, CCD 카메라를 디텍터로 사용하는 ISR 의 경우 대부분 8 - 12 비트 사이의 ADC 를 사용하기 때문에 이러한 노이즈가 비교적 크며 신호 처리에 주의해야만 한다. <그림 3.8> 은 동일한 실험 환경에서 ADC 가 8비트인 경우와 16비트인 경우에 대하여 반사도를 획득하여 비교한 것이다. ADC 외에는 모든 환경이 동일한데도 불구하고 8비트 ADC 를 사용한 경우 노이즈가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. <그림 3.8> 에서 관찰을 용이하게 하기 위하여 16비트 데이터에 오프셋이 적용되었다.



<그림 3.8 센서의 ADC 에 따른 반사도 노이즈 비교>

### 3.3.2. 노이즈 제거를 위한 전처리

노이즈 성분을 제거하기 위한 방법에는 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법이 있다. 앞서 설명하였듯이 센서의 성능이 노이즈에 미치는 영향이 매우 크므로, 노이즈가 적고 분해능이 높은 센서를 사용하는 것이 하나의 방법이다. 그러나 ISR 에서는 CCD 카메라를 디텍터로 사용하기 때문에 센서의 성능을 높이는 것에 한계가 있다. ADC 성능을 높일 경우 처리해야 하는 데이터량이 많아지기 때문에 영상의 전송 속도가 느려지고 측정 속도에 악영향을 미친다. 본 논문의 목적인 ‘빠르고 정확한 두께 측정’과 배치되는 방법이다. 또한 대부분의 산업용 카메라의 경우 ADC 성능이 8-12 비트 정도로 제한되어 있다. 따라서 소프트웨어적인 방법을 통해 노이즈 성분을 제거하는 것이 더 적합한 방법이며, 위상 추출법으로 분석을 진행하기 전에 측정된 원본 데이터에 노이즈 성분을 제거하는 전처리 과정을 적용하도록 하였다.

노이즈 성분을 제거하는데 있어서 가장 중요한 것은 반사도 신호의 원형을 최대한 그대로 유지시키는 것이다. 노이즈 처리 단계에서 신호 형상이 왜곡된다면 더 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 특히, 반사도 신호의 최대점·최소점의 위치는 위상 복원의 기준이 되는 지점이기 때문에 노이즈 제거 단계에서 신호가 왜곡되어 최대점·최소점의 위치가 달라진다면 측정 오차를 증가시키는 원인이 된다. 따라서 전처리 과정은 최대점·최소점의 위치를 변형시키지 않으면서도 노이즈를 최대한 완화시킬 수 있는 방법을 선정하는 것이 관건이다.

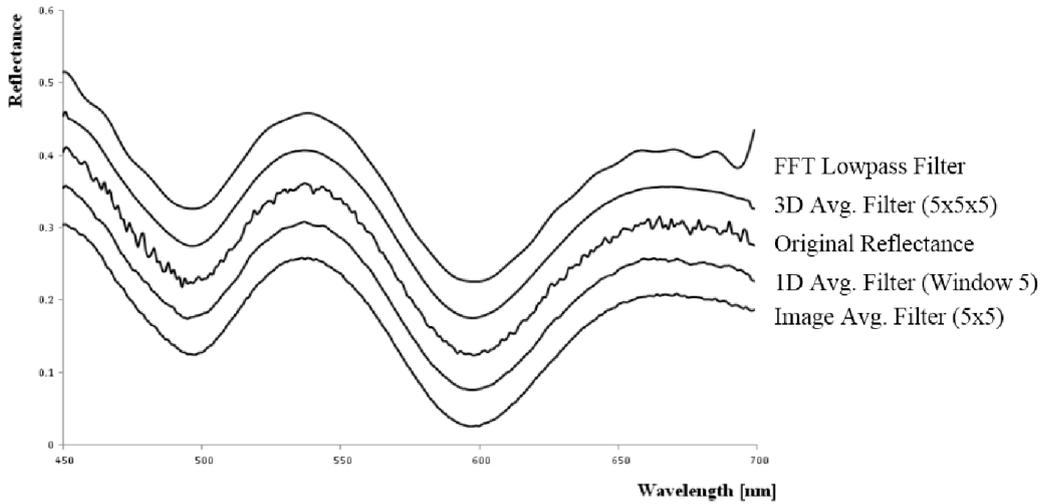
ISR 에서 데이터 획득 시 CCD 카메라를 이용해  $n$  개의 이미지를 얻으므로, 노이즈 제거는 크게 세 가지 방식으로 접근할 수 있다. 하나는 각각의 픽셀을 기준으로  $n$  개의 1차원 신호에 대해서 노이즈 제거를 하는 방법으로, 신호 처리(Signal Processing) 분야에서 많은 연구가 진행되어 왔다[59-62]. 다른 하나는  $n$  개의 이미지에 대해서 각각 영상 노이즈 제거를 하는 방법으로, 영상처리(Image Processing) 분야에서 사용되는 방식들을 적용할 수 있다[63-66]. 마지막으로  $n$  개의 이미지를 3차원 데이터 배열로 보고 처리하는 방법이 있

다[67-68]. 여기에서는 아래의 네 가지 방법들에 대하여 성능을 비교하였다.

- (a) 1D 평활화(Smoothing) 방식에 의한 노이즈 제거
- (b) 1D 푸리에 변환(Fourier Transform)을 이용한 고주파 성분 필터링
- (c) 이미지 평활화 방식에 의한 노이즈 제거
- (d) 3D 평활화 방식

각각의 노이즈 제거 방법들에 의해 처리된 반사도가 <그림 3.9>에 표시되었다. 반사도 프로파일들이 명확하게 비교될 수 있도록 Y 축으로 오프셋이 적용되었다. 또한 각각의 방법들의 연산에 소요되는 시간이 <표 3.1>에 표시되었다. 처리된 데이터는 640\*480 해상도를 가지는 CCD 카메라에서 250개의 이미지를 획득한 것이며, 연산 시간은 이 데이터의 모든 픽셀을 해석하는 데에 소요되는 시간을 기준으로 하였다. 연산에 사용된 PC의 사양은 <표 3.2>와 같다.

비교 결과 <그림 3.9>에서 가장 노이즈를 효과적으로 제거한 방법은 3D 평활화 방법임을 알 수 있다. 이 방법은 1D 평활화 또는 이미지 평활화 방법과 기본적으로 동일한 방식이지만 3차원 배열 데이터에서 5x5x5의 많은 데이터를 참조하여 연산함으로써 더 평활화 효과가 더 크다. 푸리에 변환을 이용한 방법은 반사도의 신호 형상을 왜곡시키기 때문에 사용이 불가능한 것으로 평가된다. 연산 시간을 비교한 <표 3.1>로부터는 1차원 신호 처리 방식이 가장 연산이 빠르고, 이미지와 3차원 배열을 처리한 방법에서는 연산이 느림을 알 수 있다. 이미지와 3차원 배열 방식의 연산은 노이즈 처리를 위한 전처리기로 사용하기에는 너무 오랜 시간이 걸리는 것으로, 실용적으로 사용이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 노이즈 전처리기로 1D 평활화 필터와 이미지 평활화 방법을 복합적으로 사용하였다. 연산 시간의 단축을 위하여 전처리에 병렬 처리 연산을 적용하였다.



<그림 3.9 노이즈 제거 방법들에 따른 결과 비교>

<표 3.1 노이즈 제거 방법들의 연산 시간 비교>

	1D Smoothing	FFT Lowpass	Image Avg. Filter	3D Avg. Filter
Computation Time	0.578 s	0.875 s	4.250 s	7.969 s

<표 3.2 연산에 사용된 PC 의 사양>

Parts	Specifications
CPU	Intel i7 (3.33 GHz)
Threads	8
RAM	8 GB

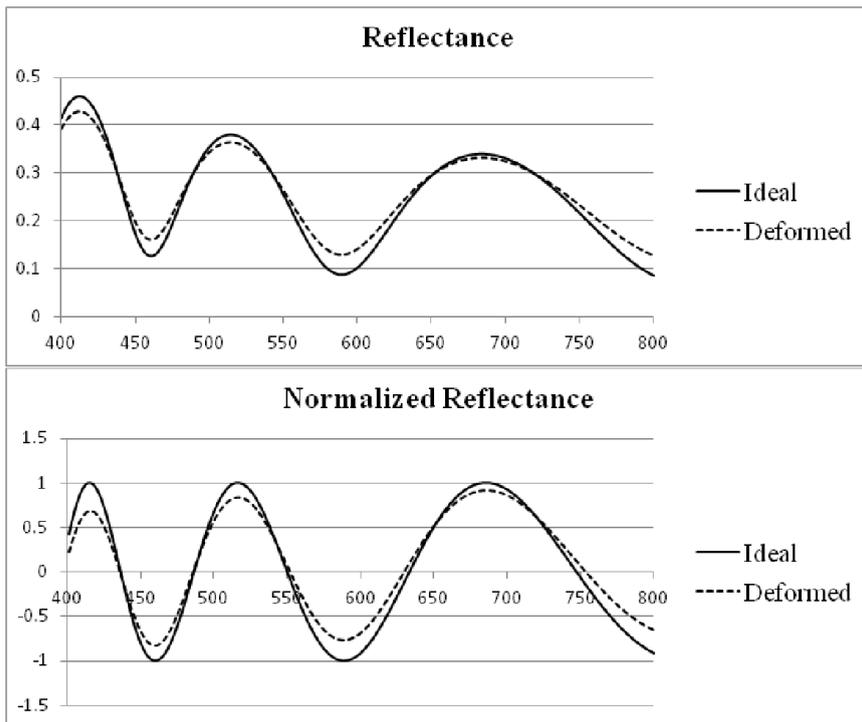
### 3.3.3. 확대·축소 및 오프셋에 의한 오차와 보정

앞서 설명하였듯이, 측정을 진행할 때 마다 렌즈의 초점을 맞추는 작업이 항상 새로 진행되어야 하기 때문에 확대·축소 및 오프셋 왜곡은 피하기가 어렵다. 또한, 렌즈의 NA 에 의해서도 반사도가 축소되는 현상이 다소 발생하기 때문에 현미경 구조를 사용하는 ISR 에서는 축소 왜곡이 반드시 발생하게 된다. 이러한 종류의 왜곡 상황에서도 정밀한 측정을 수행하기 위해서는 이에 대한 보상 작업이 이루어져야 한다.

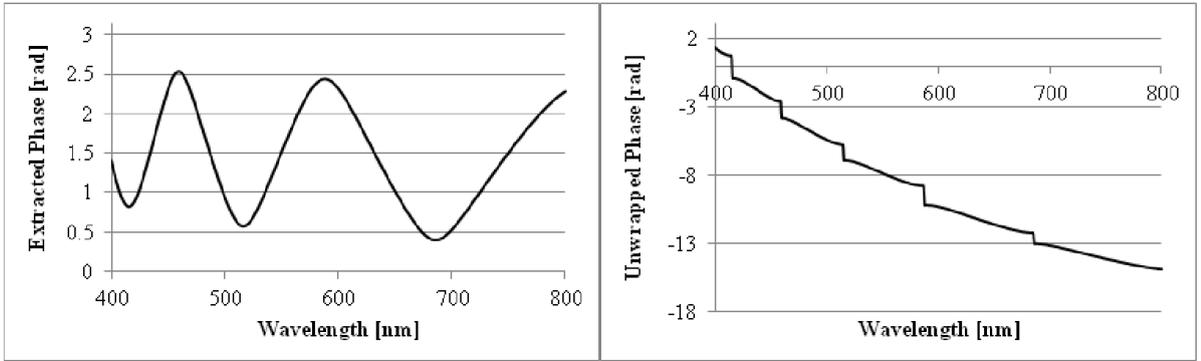
위상 추출법을 이용한 두께 측정에서 반사도의 확대·축소 및 오프셋 왜곡을 해결하기 위해서, 정규화 반사도(Normalized Reflectance)의 성질을 이용한다. 위상 추출을 위한 수식 전개 과정 중, 식 (3.5) 에서의 코사인의 역함수 항의 위상을 식 (3.12) 와 같이 정규화 반사도로 정의하였다. 이상적인 반사도 신호에서 정규화 반사도를 계산해 냈을 경우, 식 (3.12) 과 같이 정규화 반사도의 최대점·최소점은 반사도와 비교했을 때 과장축에서 동일하다. 또한 정규화 반사도의 크기는 -1 과 +1 사이의 값을 갖는다. 이는 왜곡 현상을 해결하는 데 유용하게 사용될 수 있는 성질이다. 시뮬레이션을 통해 이와 같이 현상을 확인해 보았다. <그림 3.10> 는 이상적인 반사도와 확대·축소되어 변형된 반사도에서 각각 정규화 반사도를 계산한 결과를 비교한 것이다. 이상적인 반사도에서 계산된 정규화 반사도는 정확하게 -1 와 +1 사이의 값을 가지지만, 변형된 반사도에서 계산된 것은 그렇지 못하다. 따라서 변형된 반사도로부터 위상을 추출하여 두께를 해석할 경우 <그림 3.11> 과 같이 위상 오차가 발생하게 된다.

$$\text{Normalized Reflectance: } -1 \leq \frac{X}{\sqrt{A^2+B^2}} \leq 1 \quad (3.12)$$

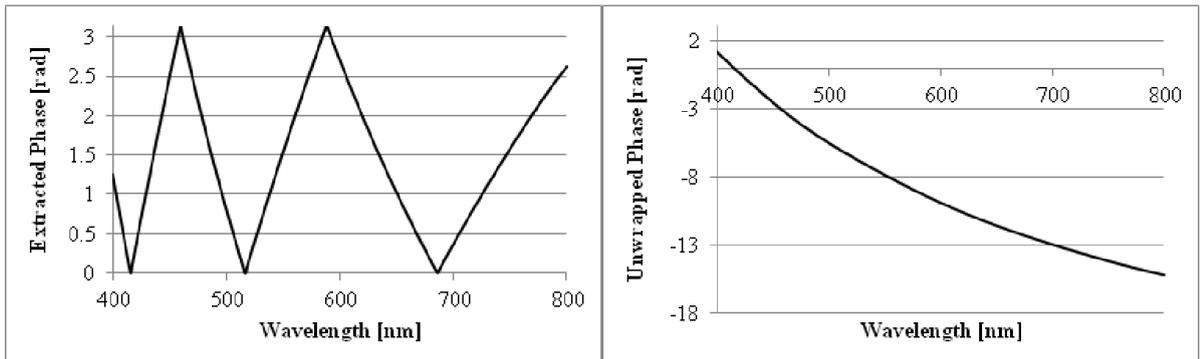
반사도의 확대·축소 및 오프셋 왜곡을 해결하기 위하여 위에서 확인한 정규화 반사도의 성질을 이용한다. 왜곡된 반사도로부터 계산된 정규화 반사도가 최대점은 +1, 최소점은 -1 의 값을 가지도록 보정 처리해 주는 것이다. 보정 과정을 거친 정규화 반사도로부터 위상을 추출한 뒤 두께를 계산하면 오차를 감소시킬 수 있다. 보정을 거치지 않은 경우에 추출된 위상은 <그림 3.11> 에서 볼 수 있듯이 불연속적으로 나타나며, 이는 왜곡에 의한 오차 성분을 포함하고 있기 때문이다. 보정을 거친 후에 추출된 위상은 <그림 3.12> 과 같이 연속적으로 이어져 있는 것을 볼 수 있으며, 두께 측정 시 오차를 감소시킬 수 있다.



<그림 3.10 반사도와 정규화 반사도>



<그림 3.11 왜곡된 반사도에서 보정을 거치지 않고 추출된 위상>



<그림 3.12 왜곡된 반사도에서 보정을 거쳐 추출된 위상>

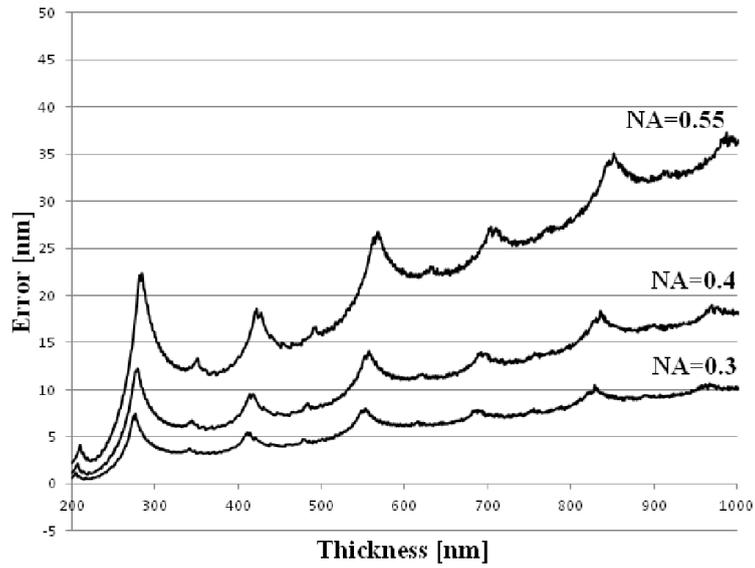
### 3.3.4. 렌즈 NA 에 의한 오차와 보정

렌즈의 NA(Numerical Aperture)는 빛이 박막으로 입사될 때 경사도를 가지고 입사하도록 만들어 반사도의 형상을 변화시킨다. 렌즈 NA 에 의한 반사도의 변형은 주로 수평으로의 평행 이동 형태로 이루어지는데, 이러한 종류의 변형은 박막 두께 측정의 정확도에 매우 치명적인 영향을 미친다. 일반적으로 박막의 두께가 변하면 반사도의 굴곡이 많아지면서 수평으로 이동하는 것과 비슷한 효과가 발생하게 되는데, 렌즈 NA 로 인한 수평 이동 역시 이와 비슷한 현상을 보여주기 때문이다.

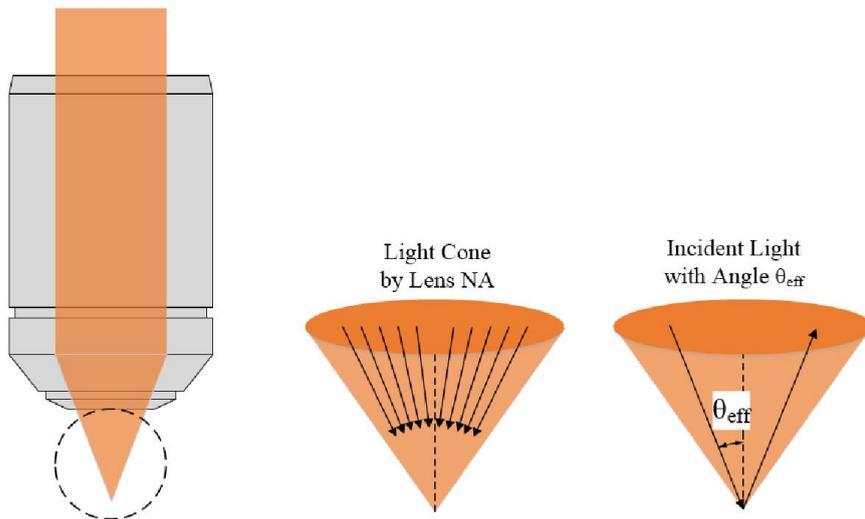
렌즈 NA 에 의한 측정 오차를 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. <그림 3.13> 는 렌즈의 NA 가 0.3, 0.4, 0.55 인 경우에 대해 두께 200–1000 nm 범위에서 반사도를 모델링한 뒤, 이를 렌즈의 NA 를 고려하지 않고 수직 입사로 가정하여 해석한 오차를 표시한 그래프이다. 모델링 시에 렌즈의 NA 에 의한 빛의 입사각을 고려하기 위하여 W. A. Pliskin 의 유효각 이론을 이용하였다[58]. 모델링 결과 <그림 3.13> 로부터 렌즈의 NA 가 클수록 측정 오차가 커지는 것을 확인할 수 있으며, 박막의 두께가 두꺼울수록 오차 역시 증가하여 최대 35 nm 의 오차가 발생한다. NA 가 0.55 인 경우 평균 3.5% 이상의 오차율로 실제 측정 상황에서는 무시하기 힘든 매우 큰 오차이다.

두께 측정 오차를 줄이기 위하여 렌즈 NA 에 의한 빛의 입사를 특정 유효각(Effective Angle)을 가지며 입사되는 빛으로 가정하여 반사도를 해석하였다. 렌즈를 지난 빛은 <그림 3.14> 과 같이 원뿔 모양으로 입사되며 수 많은 각도 성분을 가지고 있다. 그러나 이러한 수 많은 각도 성분은 대표 성분인 유효각으로 입사되는 하나의 빛으로 가정할 수 있다. 본 논문에서는 W. A. Pliskin 의 유효각 대신 자체적으로 구한 유효각 수식인 식 (3.13) 에 의해 유효각을 정의하여 사용하였다. 이 식에 의하여 정의된 유효각  $\theta_{eff}$  는 분광 반사계 이론에서 소개되었던 식 (2.3) 의 프레넬 반사 계수의 계산에서 입사각  $\theta_1$  에 대입되어 사용될 수 있다. 또한 프레넬 반사 계수의 계산을 위해서는 굴절각  $\theta_2$  의 값도 필요한데, 이는 스넬의 법칙 식 (2.1) 을 통해 구해낼 수 있다. 이렇게 계산된 프레넬 계수와 굴절각은 식 (3.1) - (3.8) 에 대입되어 두께를 계산하게 된다.

$$\tan(\theta_{eff}) = \frac{2}{3} \tan(\theta_M) \quad (3.13)$$



<그림 3.13 렌즈의 NA 에 따른 두께 해석 오차>

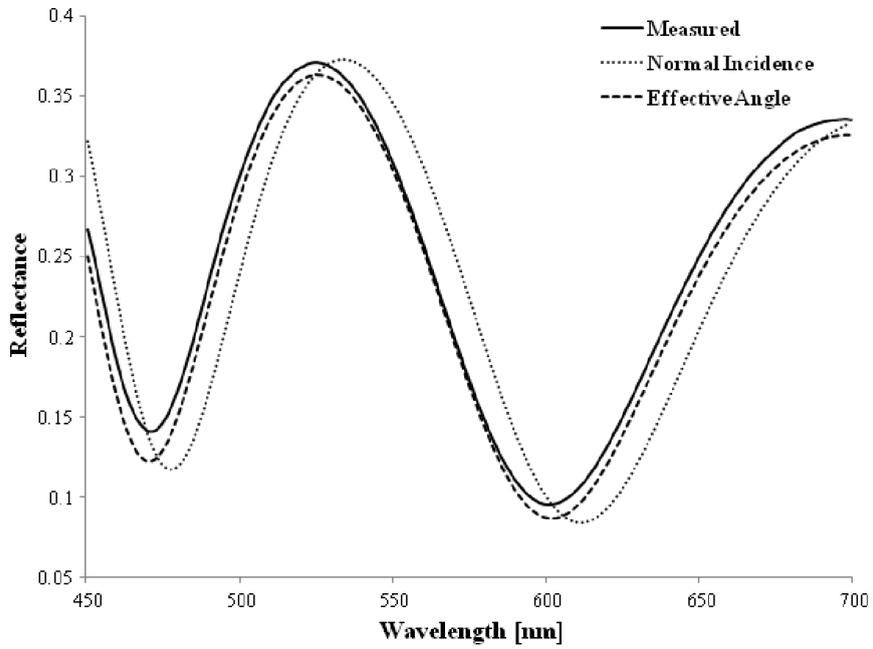


<그림 3.14 대물렌즈에 의해 입사되는 빛과 유효각>

렌즈의 NA 에 의한 오차를 보상하기 위하여 식 (3.13) 의 유효각을 적용하는 것이 타당한지에 대하여 검증을 진행하였다. <표 3.3> 은 SiO<sub>2</sub> 박막 표준시편을 측정 할 때 유효각을 적용한 것과 적용하지 않은 것 사이의 두께 측정값 비교이다. 이 결과로부터 식 (3.13) 에 의해서 정의된 유효각이 3 nm 이 내의 매우 정확한 수준으로 두께 오차를 보상해 주는 것을 확인할 수 있다. 또한 <그림 3.15> 은 박막 표준시편 #3 에 대해서 실제 측정된 반사도를 유효각을 적용해 모델링한 반사도, 적용하지 않은 반사도와 함께 표시한 것이다. 그래프로부터 유효각을 적용한 모델링이 더 정확하게 실제 측정된 반사도와 일치하는 것을 확인할 수 있다. <표 3.4> 는 본 논문의 실험에서 사용된 렌즈들의 유효각을 식 (3.13) 에 의해 계산한 값이다.

**<표 3.3 유효각 적용 유무에 따른 두께 측정값의 변화>**

	#1	#2	#3	#4	#5
Nominal Thickness [nm]	294.1	509.7	728.1	927.2	1124.7
Normal Incidence	288.0	501.2	715.0	911.0	1103.4
Effective Angle 15.7 °	294.6	510.2	727.1	926.7	1122.3



<그림 3.15 유효각을 적용한 경우의 반사도 모델링의 정확성>

<표 3.4 실험에 사용된 렌즈의 NA 값과 유효각>

Magnification	Numerical Aperture	Effective Angle
10x	0.3	11.6 °
20x	0.4	15.7 °
50x	0.55	22.2 °

### 3.4. 시뮬레이션을 통한 위상 추출법의 성능 검증

#### 3.4.1. 두께 측정 정확도

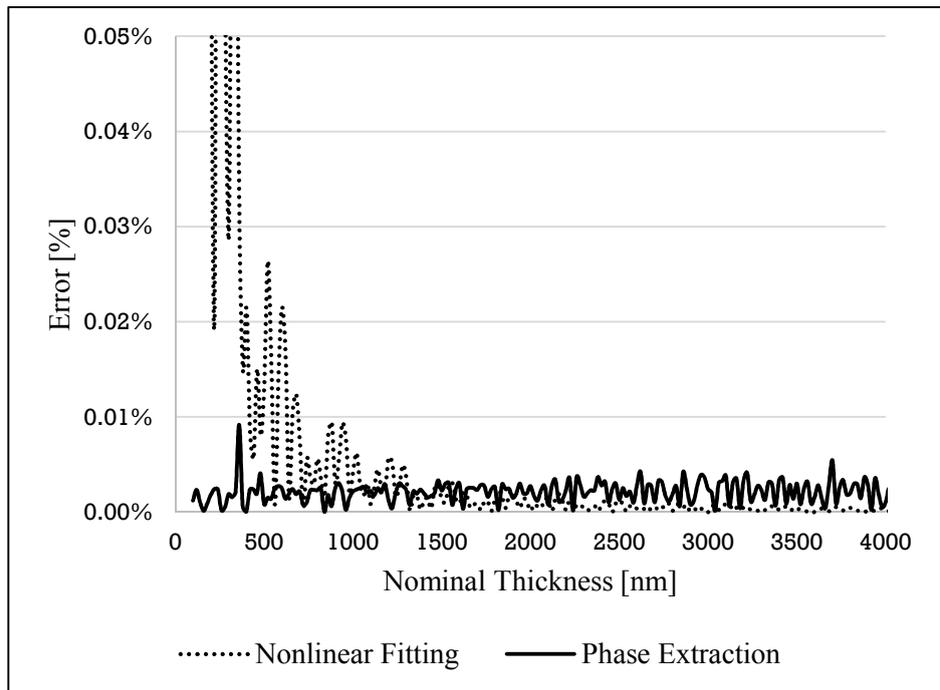
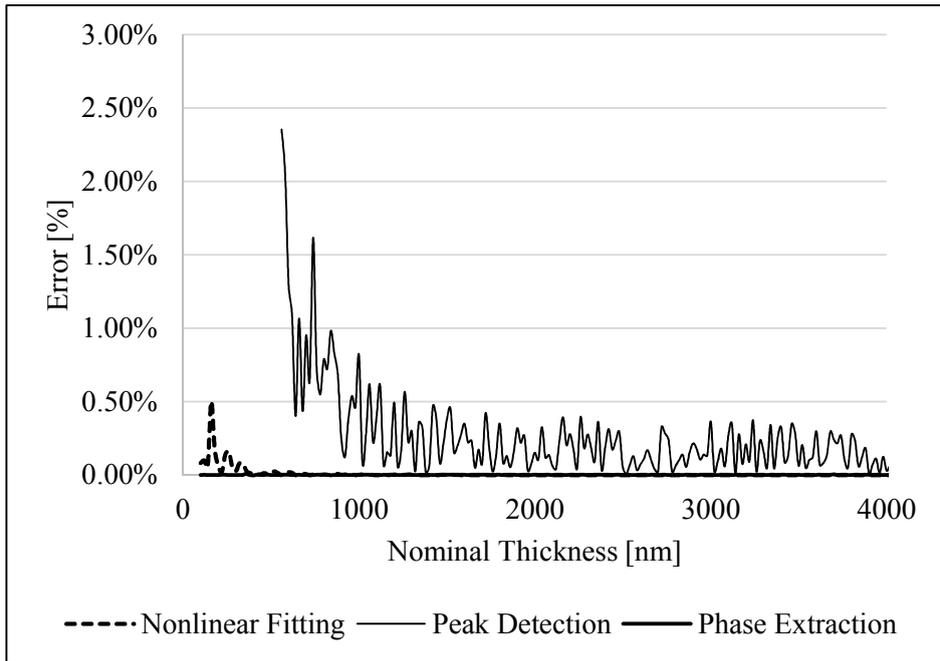
위상 추출법을 이용한 두께 측정의 측정 정확도를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 실리콘 웨이퍼 위에  $\text{SiO}_2$  박막이 형성되어 있는 것으로 가정하여 반사도를 모델링한 뒤, 이 반사도를 위상 추출법으로 해석하여 측정 오차를 확인하였다. 파장 400 – 700 nm 범위의 빛에 대하여 모델링하였고,  $\text{SiO}_2$  박막의 두께는 100 nm – 4  $\mu\text{m}$  범위에 대하여 시뮬레이션하였다. 또한 위상 추출법의 성능을 비교 검증하기 위해서 동일한 시뮬레이션을 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용한 비선형 피팅법과 피크 검출법(Peak Detection Method)에 대해서도 수행하여 그 결과를 함께 표시하였다. 주어진 두께 범위에 대한 오차 그래프가 <그림 3.16> 에 표시되었다. 상세한 비교를 위하여 위상 추출법과 비선형 피팅법의 결과는 <그림 3.16> 아래 편에 확대하여 표시하였다.

시뮬레이션 결과로부터 위상 추출법의 측정 정확도가 매우 우수함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션이 수행된 두께 100 nm – 4  $\mu\text{m}$  구간에서 측정 오차는 최대 0.01 % 이하로 매우 낮은 수준을 보인다. 두께가 얇거나 두꺼운 지에 관계 없이 일정한 수준을 유지하고 있어 전 영역의 측정에서 안정적으로 사용될 수 있다.

피크 검출법은 다른 방법들에 비하여 정확도가 많이 떨어짐을 알 수 있다. 특히 피크 검출법은 얇은 두께의 측정에 있어서 취약점이 있다. <그림 3.15> 의 그래프에서, 피크 검출법의 경우 두께가 500 nm 이하인 경우 오차 데이터가 존재하지 않는데, 이는 피크 검출법으로 측정이 불가능한 구간이다. 피크 검출법의 경우 반사도에서 최소 2 개의 피크가 존재해야 해석이 가능한데, 약 500 nm 이하의 두께에서는 피크가 하나밖에 없거나 존재하지 않기 때문이다. 또한 두께 1  $\mu\text{m}$  이하의 박막인 경우 측정이 가능한 경우에도 최대 오차 2.3 %

정도의 부정확한 측정 결과를 보이고 있다. 두께가 1  $\mu\text{m}$  이상인 경우에는 어느 정도 오차가 낮아지고 있으나 이 경우에도 최대 오차 0.5 % 정도의 비교적 좋지 않은 성능을 보이고 있다.

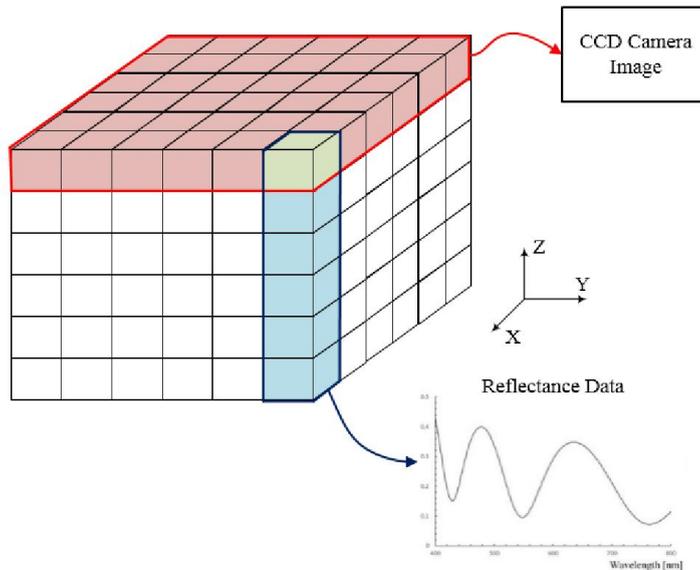
비선형 피팅법(Levenberg-Marquardt)과 위상 추출법의 비교에서는 서로 장단점이 있다. 비선형 피팅법의 경우 두께가 1.5  $\mu\text{m}$  이상인 경우 위상 추출법에 비해서 더 낮은 오차율을 보이지만, 얇은 두께의 박막을 측정하는 경우 위상 추출법에 비해 확연히 높은 오차를 보이고 있다. 비선형 피팅법의 최대 오차율을 약 0.5 % 정도이다. 전반적으로 실용적으로 많이 사용되는 박막의 두께인 500 nm – 2  $\mu\text{m}$  범위 내에서는 비선형 피팅법과 위상 추출법 모두 오차 0.1 % 이하의 매우 우수한 측정 정확도를 가진다. 그러나 500 nm 이하의 초박막을 측정하는 경우에는 비선형 피팅에 비해서 위상 추출법을 사용하는 것이 더 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.



<그림 3.16 위상 추출법 및 다른 해석 방법간의 측정 정확도 비교>

### 3.4.2. 연산 속도

위상 추출법을 이용하여 두께 형상 측정 시에 소요되는 연산 시간을 확인하는 시뮬레이션을 진행하였다. 실리콘 웨이퍼 위에 SiO<sub>2</sub> 박막이 형성되어 있는 것으로 가정하여 반사도를 모델링하였고, 모델링된 반사도를 3차원 배열의 데이터를 가지도록 구성한 뒤 해석하였다. 이는 CCD 카메라를 이용하여 획득한 데이터를 표현한 것으로써, 실제 ISR 측정에서 사용되는 데이터 형식을 그대로 적용한 것이다. <그림 3.17> 은 시뮬레이션에 사용된 데이터 구조를 도식적으로 표현한 것이다. 그래프의 X, Y 축은 CCD 카메라의 픽셀 위치를 의미하며, Z 축은 반사도를 모델링할 때 사용한 파장 축을 의미한다. 시뮬레이션을 위해 준비된 데이터는 카메라 해상도가 640\*480 이고, 반사도 파장 범위 450 - 700 nm 에 대해서 1 nm 간격으로 데이터를 획득한 것으로 가정하였다. 또한 다른 해석 방법들과의 비교를 위하여 비선형 피팅법과 피크 검출법을 동일하게 시뮬레이션하여 연산에 소요된 시간을 비교하였다. 연산에 사용된 PC 의 사양은 <표 3.2> 와 같다.



<그림 3.17 ISR 에 사용된 데이터 구조>

위상 추출법을 포함하여 세 가지 해석 방법의 연산 소요 시간을 <표 3.5>에 표시하였다. 위상 추출법을 이용할 경우 640\*480 카메라의 전체 영역을 5초 이내에 해석할 수 있다. 실용적으로 ISR에 적용하여 사용하기에 무리가 없는 속도로 판단된다. 가장 빠른 해석 방법은 피크 검출법으로, 전체 영역을 해석하는 데에 3초 이내로 소요되었다. 또한 비선형 피팅법의 경우 5분 이상이 소요되었는데, 비선형 피팅법의 경우 ISR에 적용하여 실용적으로 사용하기에는 어려움이 있다는 것을 확인할 수 있다.

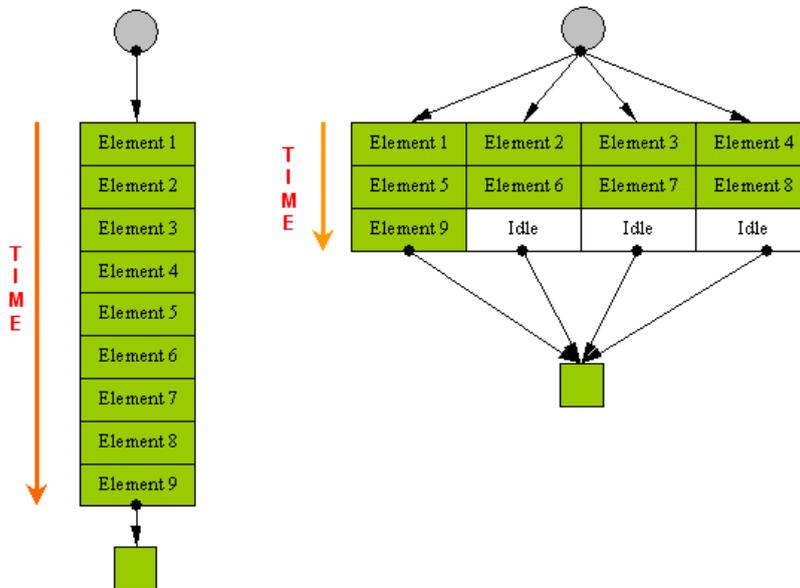
**<표 3.5 위상 추출법 및 다른 해석 방법간의 연산 소요 시간 비교>**

	Phase Extraction	Peak Detection	Levenberg-Marquardt
Computation Time	4.938 s	2.770 s	64.950 s

위의 시뮬레이션 과정을 통해서 위상 추출법을 이용해 5초 이내로 CCD 카메라 전면에 대한 데이터를 해석할 수 있음을 확인하였지만, 두께 해석을 위한 과정에 병렬 처리 연산(Parallel Computing) 기법을 적용할 경우 연산 소요 시간을 추가적으로 단축할 수 있다. 병렬 처리 연산은 CPU(Central Processing Unit) 또는 GPU(Graphic Processing Unit)의 스레드(Thread)들이 동시에 독립적으로 연산을 수행하도록 하여 동일한 결과를 더 빠르게 얻을 수 있게 해주는 기법이다. <그림 3.18>은 병렬 처리 연산으로 인한 연산 시간의 단축을 도식적으로 나타낸 것이다. 본 논문에서는 총 8개의 스레드를 가지는 CPU를 이용하였으며 인텔(Intel)의 Open MP 기술을 적용하여 CPU의 각 스레드가 독립적으로 각 픽셀의 반사도를 해석하도록 하였다. <표 3.6>은 병렬 처리 기법을 적용하기 전과 후의 연산 시간 비교이다. 연산 시간 비교를 위해서 위와 동일한 시뮬레이션 과정을 수행하였다. 병렬 처리 연산을 적용한 후에 소요된 시간은 1.344s로, 적용하기 전에 비해 약 70% 이상 감소되었다.

<표 3.6 병렬 처리 연산을 적용하기 전후의 연산 시간 비교>

	Without Parallel Computing	With Parallel Computing
Computation Time	4.938 s	1.344 s



<그림 3.18 병렬 처리 연산을 이용한 연산 시간 단축><sup>6</sup>

<sup>6</sup> <http://www.codeproject.com/Articles/28788/Distributed-Computing-in-Small-and-Medium-Sized-Of>

### 3.4.3. 시뮬레이션 결과 평가

시뮬레이션을 통해 위상 추출법의 측정 정확도와 연산 시간을 확인해 본 결과, 위상 추출법은 높은 측정 정확도와 빠른 연산 시간을 동시에 확보할 수 있는 유용한 방법임을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과인 <그림 3.16> 와 <표 3.5> 에서 확인할 수 있듯이, 피크 검출법은 가장 빠른 연산 속도를 갖추고 있지만 측정 정확도가 떨어지며 특히 반사도에서 피크가 2개 이상 발생하지 않는 얇은 두께의 박막 측정에는 적용이 어려운 단점이 있다. 반면 비선형 피팅법은 매우 높은 정확도를 갖추고 있지만 연산 시간이 많이 소요되어 실질적으로 ISR 에는 적용하기 어려울 것으로 판명되었다. 위상 추출법은 넓은 두께 범위에 대해서 0.01 % 이하의 우수한 측정 정확도를 갖추고 있으며, 특히 매우 얇은 박막의 측정에서는 다른 두 방법에 비해서 분명한 장점을 가지는 것을 확인하였다. 뿐만 아니라 연산 속도가 빨라 ISR 에 사용하기 적합한 알고리즘으로 보인다. 병렬 처리 연산을 적용한 경우 640\*480 카메라의 전체 영역에 대하여 1.5초 이내로 연산이 가능하다.

## 4. 이미징 분광 반사계 시스템

### 4.1. 개요

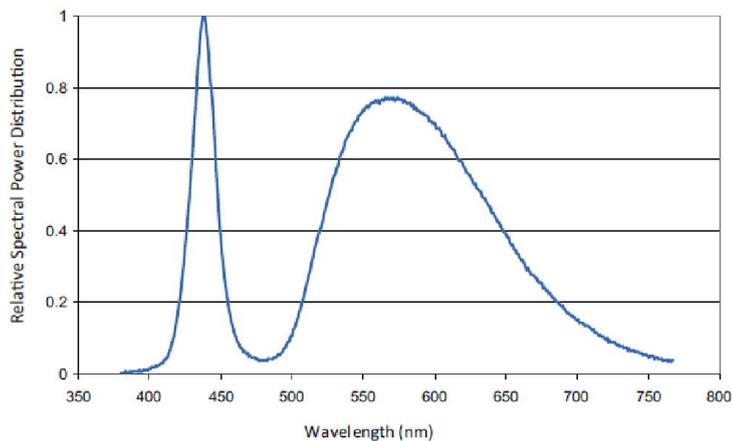
본 절에서는 실험을 위해 구성된 이미징 분광 반사계(Image Spectroscopic Reflectometer, ISR) 시스템의 각 부품들과 데이터 획득 과정을 소개하도록 한다.

분광 반사계는 크게 광원(Light Source), 광학계(Optic System), 분광 기능을 갖춘 디텍터로 구성되는데, 기존의 분광 반사계와 ISR 간에는 디텍터 및 분광 방식에서 차이가 있다. 기존의 한 지점을 측정하는 분광 반사계는 대부분의 경우 분광기(Spectrometer)를 디텍터로 사용하였다. 분광기는 그레이팅(Grating)과 1차원 배열 CCD 센서로 구성되어 있어 빛의 파장별 강도를 측정할 수 있는 기기이다. 따라서 광원과 분광기를 배치시키는 것만으로 파장별 반사도를 손쉽게 측정할 수 있었다. 반면 ISR 은 두께 형상을 측정하기 위하여 Area CCD 카메라를 디텍터로 채용한다. 따라서 빛의 파장별 강도를 측정하기 위해서는 광원으로부터 나오는 빛을 각각의 파장으로 순차적으로 필터링하는 파장 주사(Wavelength Scanning) 과정이 필요하며, 이를 위해 별도의 장치가 있어야 한다. 파장 주사 기능을 위한 장치로는 음향 광학 변조 필터(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)와 액정 변조 필터(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF), 그리고 필터 휠(Filter Wheel) 등이 있다. 본 논문에서는 이 중에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 AOTF 를 적용하였다.

## 4.2. 하드웨어 구성

### 4.2.1. 광원

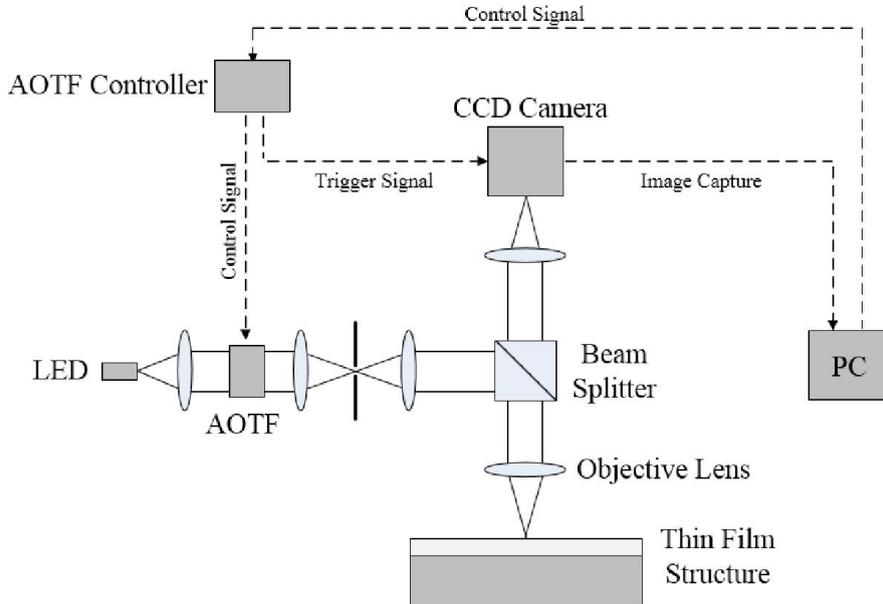
분광 반사계에서 광원은 대부분의 경우 가시광 영역의 백색광 광원을 사용한다. 웨이퍼 두께 측정 등의 경우 적외선 광원을 사용하기도 하지만 반도체 및 디스플레이 산업에서 활용되는 투명 박막의 측정에는 백색광 광원을 사용하는 것이 보편적이다. 이는 가시광 영역에서 물질의 굴절률이 가장 잘 알려져 있고 반사도가 특징적으로 잘 나타나며, 광학 부품을 쉽게 구성할 수 있기 때문이다. 많이 사용되는 백색광 광원으로는 텅스텐-할로젠 램프 (Tungsten-Halogen Lamp)와 LED(Light Emitting Diode)가 있다. 본 논문에서는 3.7 W의 출력을 가지는 백색 LED를 사용하였고, 해당 LED의 스펙트럼은 <그림 4.1>에 표시된 것과 같다. 광원의 스펙트럼은 약 420 - 750 nm의 범위를 가진다.



<그림 4.1 실험에 사용된 LED의 스펙트럼>

#### 4.2.2. 광학계와 대물렌즈

분광 반사계에서 미세 패턴의 측정을 위해서 현미경 광학계를 채용하는 경우가 많이 있다. 이 실험에 사용된 장치 역시 미세 패턴의 측정을 목적으로 하기 때문에 현미경 광학계를 제작하여 사용하였고, 총 3 종류의 대물렌즈를 이용하여 다양한 크기의 패턴을 측정할 수 있도록 하였다. <그림 4.2> 는 논문에 사용된 광학계 및 전체 시스템을 표시한 것이다. 파장 주사를 위한 장치인 AOTF 가 LED 앞에 설치된 것을 제외하고는 일반적인 명시야 현미경(Bright Field Microscopy) 광학계와 동일한 구성이다. <표 4.1> 은 실험에 사용된 3 개의 대물렌즈의 사양을 정리한 것이다.



<그림 4.2 이미징 분광 반사계 시스템의 구성도>

<표 4.1 실험에 사용된 대물렌즈의 사양>

Magnification	Numerical Aperture	Working Distance	Depth of Focus
10x	0.3	16.5 mm	3.06 um
20x	0.4	11.0 mm	1.72 um
50x	0.55	8.7 mm	0.92 um

### 4.2.3. CCD 카메라

이미징 분광 반사계에서 디텍터로 CCD 카메라를 채용하였다. 두께 형상 측정을 위해서는 2차원 배열을 가지는 디텍터가 필수적으로 필요한데, CCD 카메라는 많은 컴퓨터 비전(Computer Vision) 분야에서 이미 효과적으로 사용되고 있다. 본 논문에서는 CCD 카메라를 이용하여 각 파장별 이미지를 획득한 뒤, 이 이미지들을 3차원 배열로 구성하여 각 파장별 반사도 신호를 얻는다. 각 파장별 이미지를 획득하는 과정에 대해서는 4.3 절에서 자세하게 설명하도록 한다. 본 논문에서는 상용으로 판매되고 있는 산업용 CCD 카메라를 구입하여 사용하였으며 해당 카메라의 사양은 <표 4.2>에 기재하였다. 카메라는 640\*480 배열을 가지는 픽셀들로 구성되어 있으며, 광량이 충분하다면 초당 264 개의 이미지를 획득할 수 있는 고속 카메라이다. <표 4.3>은 실험에 사용된 3개의 대물렌즈를 적용했을 경우에 대한 카메라의 픽셀 해상도와 FOV(Field of View)를 표시한 것이다. 대물렌즈를 최대 배율인 50x 렌즈로 사용했을 경우 100 um 이하의 미세한 구조에 대해서도 분석이 가능하다.

<표 4.2 실험에 사용된 CCD 카메라의 사양>

Specification	
Resolution	640*480
Sensor Size	1/3 inch
Pixel Size	7.4 um
Data Bit	8 bit
Frame Rate	264 fps

<표 4.3 대물렌즈의 따른 픽셀당 해상도와 FOV>

Magnification	Pixel Resolution	Field of View
10x	0.74 um	473*355 um
20x	0.37 um	236*177 um
50x	0.148 um	94*71 um

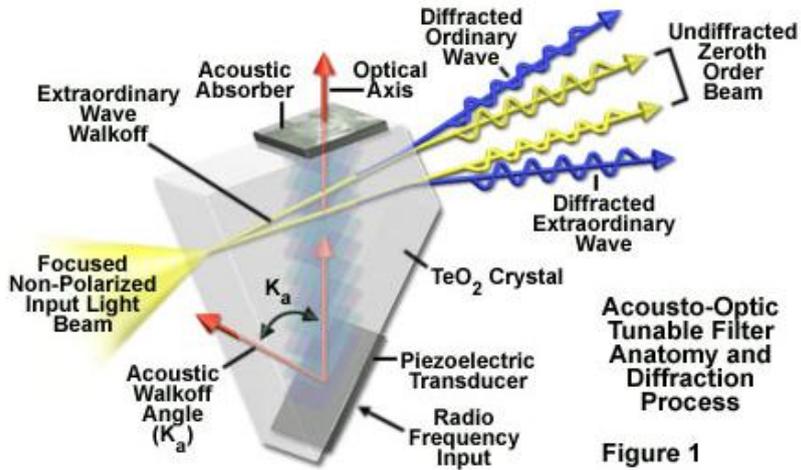
#### 4.2.4. 음향 광학 변조 필터

음향 광학 변조 필터(Acousto-Optical Tunable Filter, AOTF)는 이미징 분광 반사계에서 파장 주사를 위해 사용된다. 실험을 위하여 상용으로 판매되는 AOTF 및 컨트롤러를 사용하였으며, <표 4.4> 에 사용된 AOTF 의 사양을 기재하였다. 가시광 영역의 백색 LED 를 사용하기 때문에, AOTF 역시 400 – 700 nm 의 파장 영역에 대해서 파장 주사가 가능한 제품을 선정하였다.

음향 광학 변조 필터의 구조와 구동 원리는 다음과 같다. AOTF 는 <그림 4.3> 과 같이  $\text{TeO}_2$  결정에 압전 소자가 붙어 있는 구조로 이루어져 있는데, 압전 소자는 RF(Radio Frequency) 신호에 의하여 구동된다. 압전 소자가 일정한 주파수에 의하여 구동되면  $\text{TeO}_2$  결정에 음파(Sound Wave)가 발생하게 되고, 굴절률이 변화하는 효과가 발생한다.  $\text{TeO}_2$  결정에 빛이 입사될 경우  $\text{TeO}_2$  내부의 굴절률 변화에 의하여 회절이 발생하게 되고, 상호간의 광 간섭 현상으로 인하여 특정 파장의 성분만 필터링되어  $\text{TeO}_2$  결정을 빠져 나오게 된다. 입사된 빛은 회절 현상으로 인해 입사된 방향과 일정한 각도만큼 굴절되는데, 굴절각에 대한 설명은 Appendix B 에 기술하였다. 또한 압전 소자의 구동 주파수와 필터링되는 파장의 관계 역시 Appendix B 에 따로 설명하였다.

<표 4.4 실험에 사용된 AOTF 의 사양>

	Specification
RF Tuning	106 – 225 MHz
Wavelength	400 – 700 nm
Resolution	1.15 – 7.0 nm
Aperture Size	5*5 mm
RF Power	0.4 – 1.2 W
Diffraction Efficiency	85 %

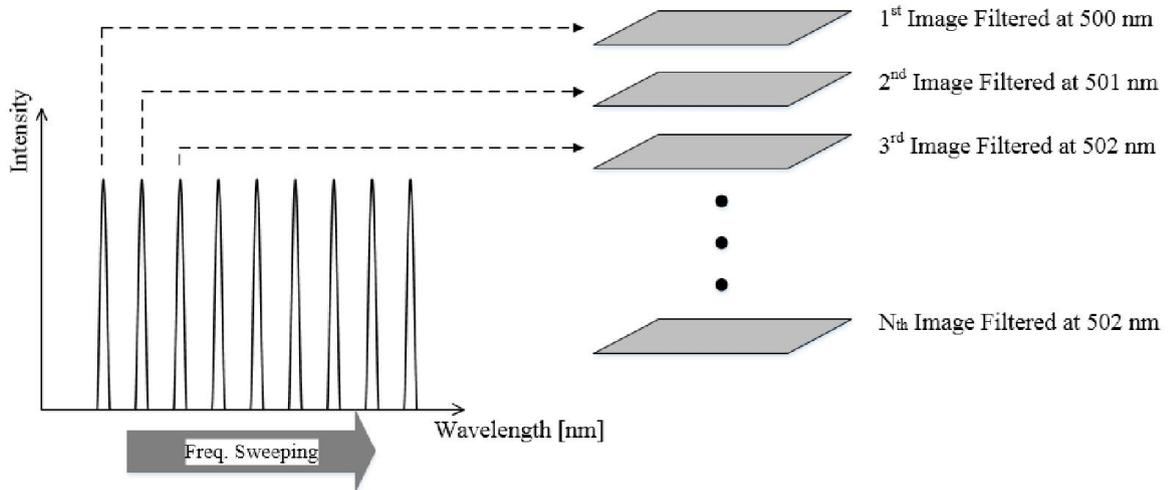


<그림 4.3 음향 광학 변조 필터의 구조><sup>7</sup>

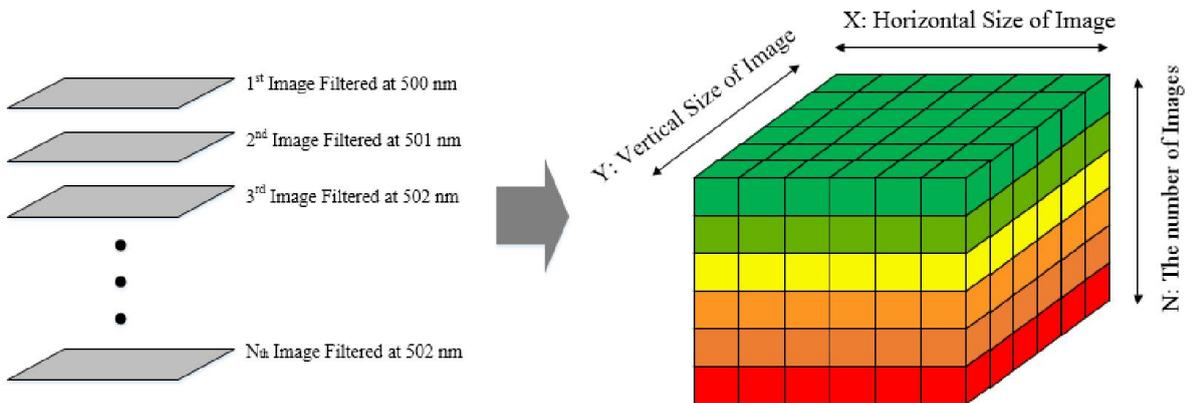
<sup>7</sup> <http://www.olympusfluoview.com>

### 4.3. 데이터 획득 과정

이미징 분광 반사계에서는 CCD 카메라와 AOTF 를 이용하여 여러 장의 이미지를 순차적으로 획득하는 과정을 거친다. AOTF 는 LED 에서 조사되는 빛을 일정한 범위의 파장에 대하여 차례로 필터링하는 파장 주사를 수행하는데, 이 때 AOTF 컨트롤러는 각각의 파장을 필터링하기 위하여 RF 신호를 AOTF 에 보냄과 동시에 CCD 카메라에 트리거(Trigger) 신호를 보낸다. 이러한 동기화된 동작에 의하여 CCD 카메라는 파장 주사가 이루어지는 동안에 N 개의 이미지를 획득하게 된다. <그림 4.4> 은 이와 같은 과정을 도식적으로 표현한 것이다. 획득된 N 개의 이미지들은 <그림 4.5> 와 같이 3차원 데이터 배열로 정렬되어 저장되며, 이는 <그림 3.16> 에 소개된 바와 같이 반사도 해석에 사용된다. N 개의 이미지에서 (x, y) 위치에 있는 픽셀의 데이터를 추출하여 정렬하면 이는 해당 위치의 반사도 신호가 됨을 알 수 있다. 모든 픽셀에 대하여 반사도 신호를 추출하여 해석하면 두께 형상을 얻을 수 있다.



<그림 4.4 데이터 획득 과정>



<그림 4.5 획득된 이미지들과 3차원 데이터 배열의 구조>

## 5. 실험

### 5.1. 개요

위상 추출법을 이용한 박막 두께 측정의 성능을 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험은 두 가지 실험 장치를 이용하여 진행하였는데, 하나는 스펙트로미터를 이용한 일반적인 분광 반사계 시스템이고 다른 하나는 본 논문에서 제시하고 있는 ISR 이다. 두 시스템은 기본적으로 동일한 광학계 구조를 가지고 있으며, 분광 소자 및 디텍터에서 차이가 있다.

스펙트로미터를 이용한 분광 반사계를 이용한 실험을 통해서 위상 추출법의 두께 측정 정확도를 파악할 수 있다. 스펙트로미터를 이용할 경우 반사도의 신호 상태가 CCD 카메라를 이용하는 경우보다 매우 좋기 때문에 노이즈가 거의 존재하지 않는 반사도 신호를 얻을 수 있다. 따라서 이상적인 경우에 가까운 반사도 신호를 해석하여 위상 추출법 알고리즘 자체의 성능을 파악할 수 있다. 분광 반사계를 이용한 실험에서 렌즈의 NA 에 의한 왜곡 보상 성능과, 파장 범위 설정에 따른 정확도 파악도 수행하였다.

이미징 분광 반사계 시스템(ISR)을 이용한 실험에서는 위상 추출법의 측정 정확도와 정밀도 외에도 측정 속도에 대한 성능 파악을 수행하였다. ISR 은 CCD 카메라를 디텍터를 사용하기 때문에 센서 성능의 한계로 인하여 반사도 신호의 노이즈가 많은 편이다. 이 실험을 통하여 비교적 신호가 좋지 않은 반사도에서의 위상 추출법의 성능을 파악할 수 있다. 또한 ISR 을 실용적으로 활용하는 데에 있어서 가장 큰 문제점 중 하나인 측정 속도에 대한 실험을 수행하였다. 데이터를 획득에 소요되는 시간과 반사도 해석에 소요되는 시간 각각에 대하여 평가하였다. 마지막으로, 실제 산업 현장에서의 활용도를 평가하기 위하여 다양한 재질의 샘플에 대하여 측정 테스트를 진행하였다.

## 5.2. 분광 반사계를 이용한 측정 실험

### 5.2.1. 분광 반사계 시스템과 측정 대상

위상 추출법의 측정 정확도를 확인하기 위한 분광 반사계를 이용하여 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께를 측정하여 기준값과 비교하였다. 실험에 사용된 분광 반사계 시스템의 구성은 <그림 5.1>, <그림 5.2> 와 같다. 측정 정확도를 확인하기 위한 실험에서는 <그림 5.1> 의 프로브(Probe)형 분광 반사계 시스템이 사용되었고, 대물렌즈의 NA 에 의한 입사각 보정 효과를 확인하기 위해서 <그림 5.2> 의 현미경형 분광 반사계 시스템을 사용하였다.

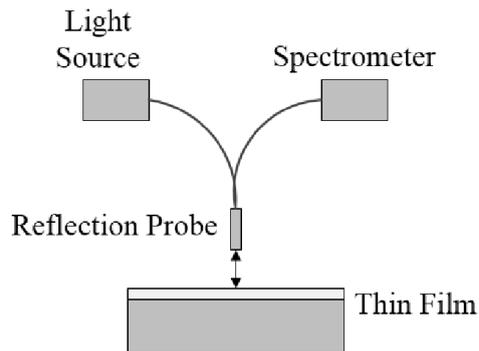
프로브형 분광 반사계를 이용하여 이상적인 경우에 가까운 반사도 데이터를 획득할 수 있다. 장치에 사용된 분광기가 높은 분해능과 SNR 을 가지고 있을 뿐만 아니라, 광학 부품을 최소화한 시스템 구성으로 인해 대물렌즈의 NA 등에 의한 반사도의 왜곡 요소를 제거하였기 때문이다. 이 실험을 통해 비교적 좋은 환경에서의 위상 추출법의 측정 정확도를 확인할 수 있다. 실험에 사용된 분광기의 사양은 <표 5.1> 와 같다.

현미경형 분광 반사계 시스템은 기본적으로 <그림 4.2> 의 이미징 분광 반사계와 유사한 구성이며, 분광기(Spectrometer)를 디텍터로 사용한다는 점이 다르다. 시스템 구성도에서 CCD 카메라는 측정 대상을 관찰하고 측정 위치를 확인하기 위해서 사용하는 것으로, 디텍터로서 사용되지는 않는다. 현미경형 분광 반사계 실험으로부터 대물렌즈의 NA 에 의한 왜곡을 효과적으로 보정할 수 있는지를 검증한다.

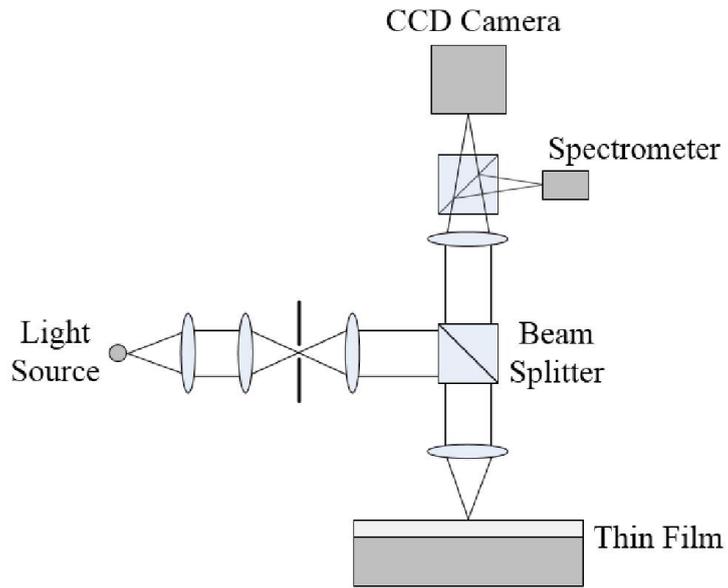
측정을 위해 제작된 SiO<sub>2</sub> 박막은 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 것으로, 동일한 공정을 이용하여 6 종류의 서로 다른 두께를 가지도록 제작되었다. 실제 반도체 및 디스플레이 공정에서 실용적으로 많이 활용되는 두께를 고려하여 100 - 1200 nm 의 범위를 가지도록 제작하였다. 제작된 시편들은 엘립소미터를 이용하여 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께를 측정하였고, 이를 기준값으로 사용하였다.

<표 5.1 실험에 사용된 분광기의 사양>

Specification	
Wavelength	200 – 1100 nm
Pixels	1024*58
Data Bit	16 bit
SNR	1000:1
Linearity	>99.8 %



<그림 5.1 프로브형 분광 반사계 시스템>



<그림 5.2 현미경형 분광 반사계 시스템>

### 5.2.2. 측정 정확도

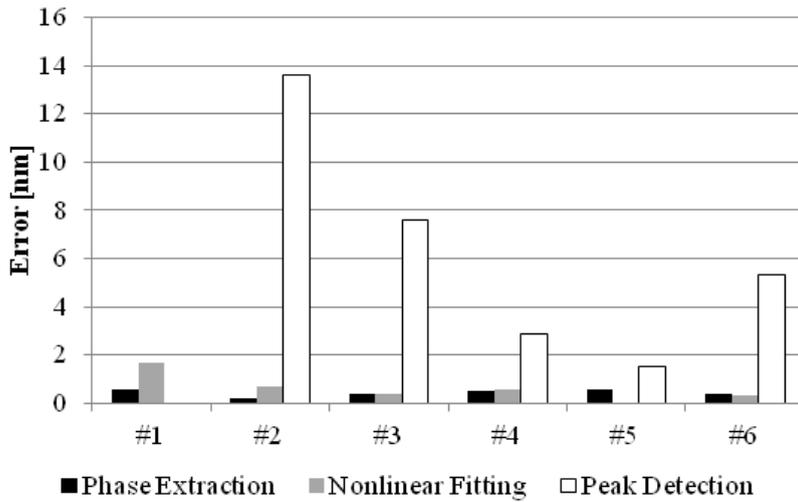
프로브형 분광 반사계 시스템을 이용하여 제작된 시편으로부터 반사도 신호를 획득한 뒤, 위상 추출법을 이용하여 두께를 해석하였다. <표 5.2> 는 6 개의 시편에 대하여 엘립소미터를 이용하여 측정된 기준값과 위상 추출법을 이용한 두께 측정값을 표시한 것이다. 측정 정확도의 비교를 위해 비선형 피팅법과 피크 검출법으로 동일한 시편을 측정한 결과도 함께 표시하였다. <그림 5.3> 은 각 해석 방법들의 기준값에 대한 오차를 그래프로 표시한 것이다.

본 실험을 통해 반사도 신호가 적절하게 획득될 경우 위상 추출법을 이용해 높은 정확도로 박막의 두께를 측정할 수 있음을 확인하였다. 아래의 결과들에서 위상 추출법과 비선형 피팅법은 최대 오차 2 nm 이하의 높은 수준의 정확도를 보이고 있으며, 피크 검출법의 경우 최대 오차가 13 nm 이상으로 비교적 큰 편이다. 이는 앞서 3.4.1 절에서 시뮬레이션을 통해 정확도를 확인한 것과 일치하는 결과이다. 시편 #1 의 경우 반사도에서 피크가 2개 이상 존재하지 않으므로 피크 검출법을 통한 두께 측정에 실패하였다.

<표 5.2 위상 추출법을 이용한 SiO<sub>2</sub> 박막 두께 측정 정확도>

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nominal Thickness	85.5	293.8	509.2	725.1	924.2	1121.7
Phase Extraction	84.9	294.0	509.6	725.6	923.6	1121.3
Nonlinear Fitting	83.8	294.5	509.6	724.5	924.2	1121.4
Peak Detection	FAIL	280.2	501.6	722.2	925.7	1127.0

\*All units are in nm



<그림 5.3 프로브형 분광 반사계를 이용한 SiO<sub>2</sub> 박막 두께 측정 오차>

### 5.2.3. 렌즈의 NA 에 의한 입사각 효과 보정

현미경형 분광 반사계 시스템에 다양한 배율의 대물렌즈를 장착하여 두께 시편을 측정하였다. 이 실험을 통하여 대물렌즈의 NA 에 의한 반사도의 왜곡과 보정 성능을 확인하였다. 렌즈의 NA 에 의한 효과를 보정하기 위하여 식 (3.12) 에서 제안한 유효각을 적용하여 박막의 두께를 해석하였다. 대물렌즈는 10x, 20x, 50x 의 총 3 종류를 이용하여 6 종류의 박막 시편을 측정하였고, 각각의 경우에 대하여 NA 보정을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우로 나누어 해석하였다. 각 대물렌즈의 NA 와 식 (3.12) 에 의하여 계산되는 유효각은 < 표 3.4 > 과 같다.

아래의 < 표 5.3 - 5.5 > 는 각각 대물렌즈를 10x, 20x, 50x 로 사용한 경우에 대한 두께 시편의 측정 결과이다. 유효각을 적용하여 렌즈의 NA 를 보정한 경우 오차가 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 특히, 렌즈의 배율이 큰 50x 렌즈에서는 오차가 최대 30 nm 이상에 달하여 보정이 없이는 신뢰할 만한 결과를 얻기 힘들다는 것을 알 수 있다. 렌즈 NA 보정을 적용한 경우, 모든 대물렌즈와 시편에서 최대 오차 3 nm 이하의 값을 가진다. < 그림 5.4 > 와 < 그림 5.5 > 는 각각의 경우에 대해 측정 오차를 그래프로 표시한 것이다. 렌즈 NA 가 크고 박막의 두께가 클수록 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 시뮬레이션을 통해 확인한 것과 같은 결과로, < 그림 3.12 > 를 < 그림 5.4 > 와 비교해 봤을 때 매우 일치도가 높은 것을 알 수 있다. 이는 결국 본 논문에서 제시한 렌즈 NA 보정 방법이 매우 효과적임을 확인한 것과 같다.

실험 결과로 보아 렌즈의 NA 에 의한 효과는 특히 고배율 대물렌즈를 사용하는 현미경형 분광 반사계 시스템에서 반드시 보정되어야 하며, 이는 동일한 광학계 구조를 사용하는 이미징 분광 반사계에서도 마찬가지이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 유효각은 고배율 대물렌즈의 NA 에 의한 오차를 보정하기 위한 적절한 해결책이 될 수 있다.

<표 5.3 렌즈 NA 보정 효과 (10x 대물렌즈)>

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nominal Thickness	85.5	293.8	509.2	725.1	924.2	1121.7
Without NA Correction	84.8	290.5	505.2	718.9	918.0	1111.0
Effective Angle 11.6 °	86.0	293.4	509.9	725.7	926.3	1121.5

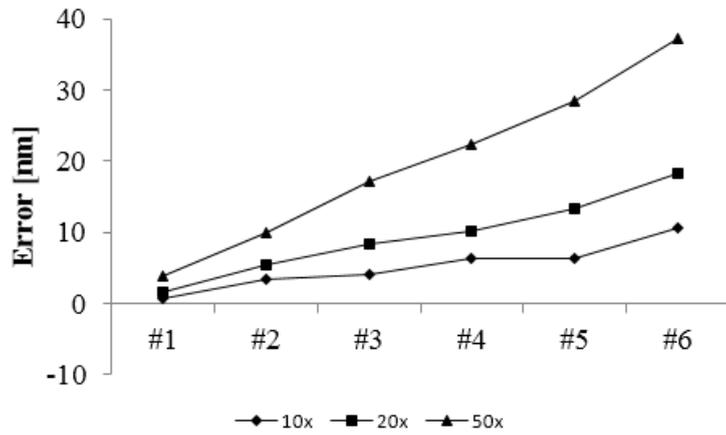
\*All units are in nm

<표 5.4 렌즈 NA 보정 효과 (20x 대물렌즈)>

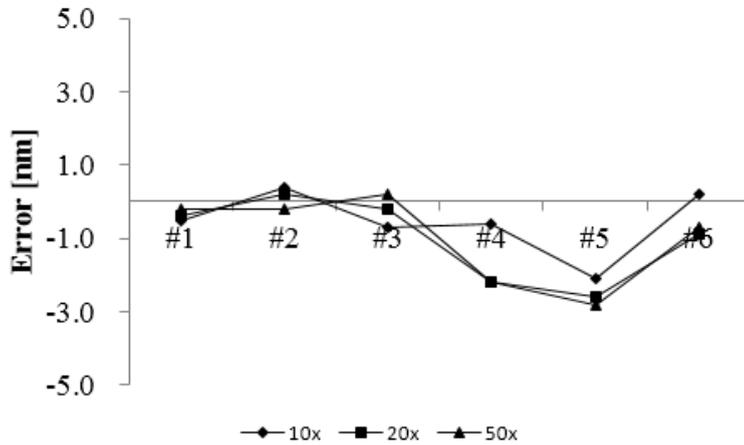
Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nominal Thickness	85.5	293.8	509.2	725.1	924.2	1121.7
Without NA Correction	84.0	288.5	500.8	714.9	910.9	1103.4
Effective Angle 15.7 °	85.9	293.6	509.4	727.3	926.8	1122.6

<표 5.5 렌즈 NA 보정 효과 (50x 대물렌즈)>

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nominal Thickness	85.5	293.8	509.2	725.1	924.2	1121.7
Without NA Correction	81.7	283.9	492	702.9	895.8	1084.6
Effective Angle 22.2 °	85.7	294.0	509.0	727.3	927.0	1122.4



<그림 5.4 렌즈 NA 를 보정하지 않은 경우의 SiO<sub>2</sub> 두께 측정 오차>



<그림 5.5 렌즈 NA 를 보정한 경우의 SiO<sub>2</sub> 두께 측정 오차>

#### 5.2.4. 파장 범위 설정에 따른 측정 정확도

파장의 범위는 측정의 정확도 및 연산 속도와 밀접하게 관련되어 있다. 일반적으로 분광 반사계에서는 해석에 활용하는 파장의 범위가 넓어질수록 더 많은 데이터를 활용할 수 있기 때문에 측정의 정확도·정밀도 및 신뢰도가 향상된다. 하지만 이미징 분광 반사계의 경우 파장 주사 과정을 통해 데이터를 획득하기 때문에 파장 범위가 넓어질수록 파장 주사에 소요되는 시간이 증가하는 단점 또한 존재한다. 해석해야 하는 데이터가 많아지기 때문에 해석 시의 연산량과 연산 시간도 증가하게 된다. 따라서 이미징 분광 반사계에서는 정확도 수준을 유지하면서도 파장 범위를 좁힐수록 유용하다.

본 절에서는 파장 범위 설정에 따라 위상 추출법의 정확도가 변화하는 양상을 확인한다. 프로브형 분광 반사계를 이용해 6 개의 시편에서 얻은 반사도 신호를 획득하였고, 각각의 반사도 신호에서 파장의 범위를 바꾸어 가며 두께를 해석하였다. 가장 넓은 파장 범위 400 – 700nm 로부터 가장 좁은 파장 범위 550 – 600 nm 까지 총 5 종류의 파장 범위에 대해서 실험을 수행하였고 그 결과는 <표 5.6> 과 같다.

아래의 결과로부터 위상 추출법은 좁은 파장 범위의 데이터만으로도 정확한 두께를 측정해내는 능력이 뛰어난 것을 알 수 있다. <표 5.6> 에서 파장 범위가 100 nm 인 경우까지는 최대 오차 2 nm 수준의 정확도를 유지하면서 두께를 측정해 내는 것을 확인할 수 있다. 파장 범위가 50 nm 수준으로 줄어들게 되면 시편 #2, 5, 6 과 같이 잘못된 두께를 해석해내는 경우가 발생한다. 따라서 위상 추출법을 이용하는 경우 기존의 방법들과 같이 가시광 영역 전체를 사용할 필요 없이 100 nm 정도의 좁은 파장 범위만으로도 충분히 정확한 측정이 가능하다.

<표 5.6 파장 범위 설정에 따른 SiO<sub>2</sub> 두께 측정 결과>

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nominal Thickness	85.5	293.8	509.2	725.1	924.2	1121.7
400 – 700 nm (300 nm)	85.5	294.1	509.7	725.4	923.9	1121.5
450 – 650 nm (200 nm)	85.3	294.4	509.6	724.9	924.1	1121.9
500 – 650 nm (150 nm)	83.6	293.8	509.0	724.6	923.9	1121.9
500 – 600 nm (100 nm)	83.7	294.7	509.3	726.9	923.8	1121.7
550 – 600 nm (50 nm)	82.7	489.5	510.5	728.9	738.1	930.1

\*All units are in nm

### 5.3. 이미징 분광 반사계를 이용한 측정 실험

#### 5.3.1. 측정 속도

이미징 분광 반사계에서 측정 속도는 크게 데이터 획득에 소요되는 시간과 데이터 해석에 소요되는 시간으로 나눌 수 있다. 데이터 획득에 소요되는 시간은 AOTF 를 이용하여 파장 주사를 수행하며 카메라로 이미지를 획득하는 데 소요되는 시간이다. 따라서 AOTF 의 응답 속도와 이미지 획득시의 카메라 노출시간, 그리고 파장 주사를 수행하는 파장 범위에 의해서 결정된다. 데이터 해석에 소요되는 시간은 노이즈 처리를 위한 전처리 과정과 위상 추출법을 이용한 해석 과정으로 나눌 수 있다. 위상 추출법을 이용한 해석 과정에 소요되는 시간의 경우 본 논문의 3.4.2 절에서 시뮬레이션을 통해  $640 \times 480$  이미지의  $450 - 700 \text{ nm}$  파장 범위에 대해서 해석할 경우 1.5 s 이내로 소요됨을 이미 확인한 바 있다.

이미징 분광 반사계에서 파장 범위를 줄이면 데이터 획득과 해석에 소요되는 시간을 동시에 단축시킬 수 있다. 본 논문 5.2.4 절의 <표 5.6> 의 결과로부터 위상 추출법을 이용할 경우 파장 범위를 100 nm 수준으로 줄여도 정확도를 유지할 수 있음을 확인하였다. 파장 범위를 100 nm 수준으로 줄였을 경우에 측정에 소요되는 시간을 확인하기 위하여 실험을 진행하였다. <표 5.7> 은 일반적인 경우와 같이 파장 범위를  $400 - 700 \text{ nm}$  로 설정한 경우와 파장 범위를  $500 - 600 \text{ nm}$  로 줄인 경우에 대해서 소요되는 시간을 비교한 것이다. 전처리 과정과 두께 해석 과정에서는 병렬 처리 연산이 적용된 것이다. 파장 범위가  $400 - 700 \text{ nm}$  인 경우 약 7.9 s 가 소요되던 것이  $500 - 600 \text{ nm}$  인 경우에는 2.9 s 가 소요되어 60 % 이상의 단축 효과를 얻었다.

<표 5.7 파장 범위 설정에 따른 시간 단축 효과>

Time	Acquisition	Preprocessor	Analysis	Sum
400 – 700 nm	4.610 s	1.781 s	1.516 s	7.907 s
500 – 600 nm	1.650 s	0.656 s	0.594 s	2.900 s

### 5.3.2. 측정 정확도 및 정밀도

위상 추출법을 이미징 분광 반사계에 적용하였을 경우의 두께 측정 정확도 및 정밀도를 확인하기 위하여 측정 실험을 수행하였다. 이미징 분광 반사계의 경우 CCD 카메라를 디텍터로 사용하기 때문에 일반 분광 반사계에 비하여 노이즈 수준이 높고 데이터의 해상도도 낮다. 따라서 반사도 신호의 질이 비교적 좋지 않은 편인데, 위상 추출법을 이용하여 해석할 경우의 정확도와 정밀도를 확인하여 이 시스템의 실질적인 성능을 파악하였다.

정확도 확인을 위하여 6 가지 서로 다른 두께의 SiO<sub>2</sub> 박막의 두께를 측정하여 기준값과 비교하였다. 이 6 종류의 시편은 5.2.2 절에서 프로브형 분광 반사계를 이용하여 측정한 시편과 동일한 것이다. 카메라 중심부의 100\*100 픽셀들의 두께 평균값과 기준값을 비교하였다. <표 5.8> 은 6 개의 시편을 10x, 20x, 50x 대물렌즈를 이용하여 측정한 결과를 표시한 것이다.

아래의 측정 결과에서 최대 오차는 약 3.8 nm 로, 20x 대물렌즈를 이용하여 시편 #2 를 측정하였을 경우에 발생하였다. 이는 ISR 을 이용한 두께 측정에 있어서 매우 뛰어난 정확도 성능을 보여주는 것이다. 렌즈에 따른 경향이나 박막의 두께에 따른 경향은 나타나지 않는다. 이러한 경향이 나타나지 않는다는 것은 렌즈 NA 에 대한 보정이 적절하게 적용되어 박막의 두께를 정확하게 측정해 내었음을 의미하는 것이다.

**<표 5.8 이미징 분광 반사계와 위상 추출법을 이용한 SiO<sub>2</sub> 두께 측정 정확도>**

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Nominal Thickness	85.5	293.8	509.2	725.1	924.2	1121.7
10x Obj. Lens	86.0	293.4	509.9	725.7	926.3	1121.5
20x Obj. Lens	85.9	293.6	509.4	727.3	926.8	1122.6
50x Obj. Lens	85.7	294.0	509.0	727.3	927.0	1122.4

\*All units are in nm

정밀도는 실제 산업 현장에서 매우 중요시되는 성능 중에 하나로, 반복 측정 시에 측정값들의 분포를 표준편차를 이용하여 평가한다. 주로 10 - 30 회 반복 측정한 결과의 표준편차를 구하고, 이 값에 3을 곱한 값을 통해 평가하는 경우가 많으며 이 값을 3 시그마(3 $\sigma$ )라고 부른다. 본 논문에서는 위와 동일한 6 종류의 시편들에 대하여 20 회 반복 측정하여 계산한 3 시그마 값을 통해 정밀도 성능을 확인하였다.

아래의 결과에서 3 $\sigma$ 의 최대값은 약 0.4 nm 로 10x 렌즈를 이용하여 시편 #3 을 측정한 경우에 발생하였다. 정밀도 역시 렌즈의 따른 경향이나 박막의 두께에 따른 경향은 나타나지 않는다. 디텍터로 CCD 카메라를 사용하기 때문에 노이즈의 영향을 많이 받음에도 불구하고 정밀도는 매우 뛰어난 성능을 보이고 있다. 이는 실제 산업 현장에 사용하기에 매우 유용한 성능이다.

**<표 5.9 이미징 분광 반사계와 위상 추출법을 이용한  
SiO<sub>2</sub> 두께 측정 정밀도 (3 $\sigma$ )>**

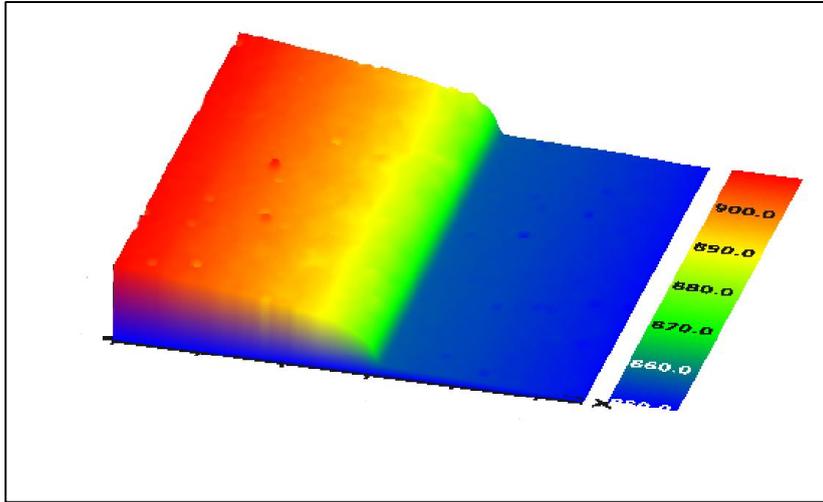
Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6
10x Obj. Lens	0.238	0.008	0.396	0.010	0.073	0.008
20x Obj. Lens	0.292	0.087	0.221	0.202	0.261	0.222
50x Obj. Lens	0.319	0.102	0.311	0.338	0.045	0.036

\*All units are in nm

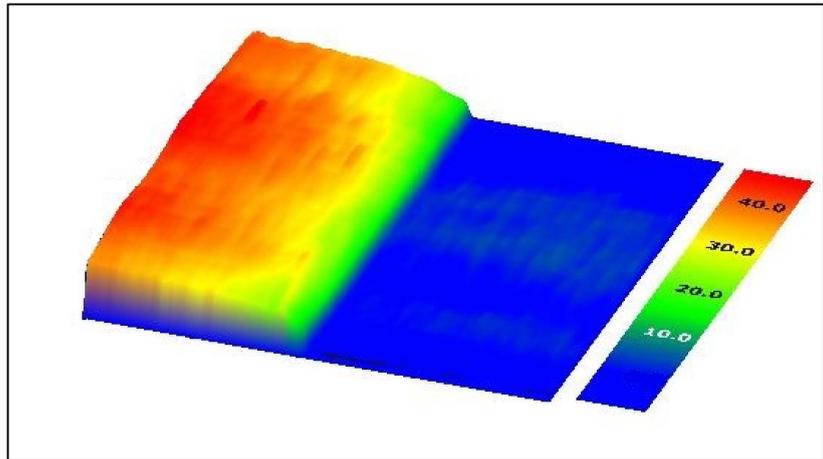
### 5.3.3. 두께 형상 측정

본 절에서는 이미징 분광 반사계와 위상 추출법을 이용하여 두께 형상을 측정한 결과를 제시하였다. 측정에 사용된 시편은 실리콘 웨이퍼에  $\text{SiO}_2$  박막을 증착한 것으로, 계단 형태로 박막의 두께가 변한다. 이미징 분광 반사계를 이용하여 박막의 두께가 변화하는 계단의 경계 부분이 카메라 화면 내에 포함되도록 측정하였으며, 그 결과를 3차원 형상으로 <그림 5.6>에 표시하였다.

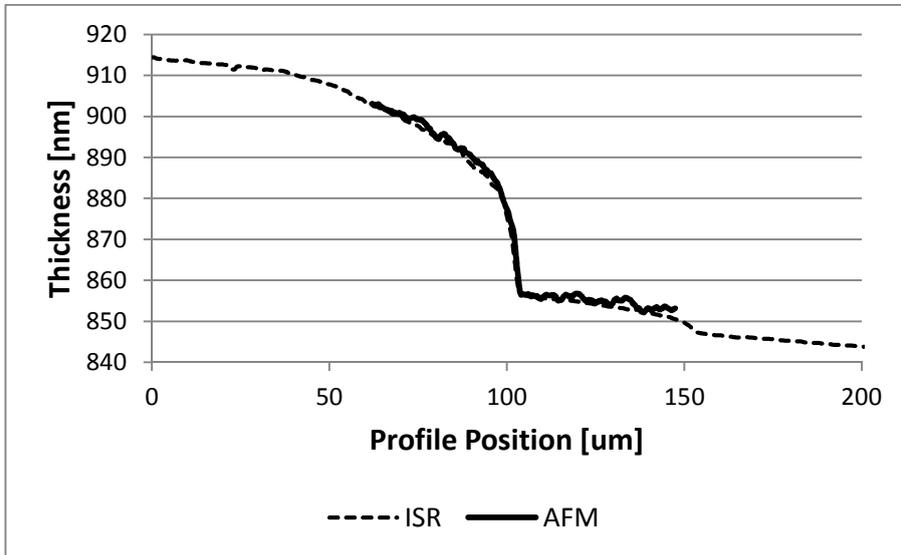
이미징 분광 반사계를 이용하여 측정 두께 형상이 정확하게 측정되었는지 검증하기 위하여 동일 위치에서 AFM을 이용하여 표면 형상을 측정하였다. AFM을 이용하여 측정한 결과는 <그림 5.7>과 같다. 측정 결과의 정확도를 판단하기 위하여 AFM 측정 결과에서의 표면 프로파일과 ISR에서의 두께 프로파일을 <그림 5.8>에 함께 표시하여 비교하였는데, 두 프로파일은 서로 다른 물리량이지만 두 프로파일에서 계단의 높이와 경사를 비교함으로써 간접적으로 ISR의 두께 측정 결과를 평가할 수 있다. 비교를 용이하게 하기 위하여 AFM 프로파일에는 일정 오프셋을 적용되었다. <그림 5.8>의 결과로부터 ISR을 이용하여 측정한 두께 형상의 프로파일이 AFM을 이용해 측정한 표면 형상의 프로파일과 일치함을 확인할 수 있다. 측정된 시편은 편평한 실리콘 웨이퍼 위에 계단형의 박막이 형성되어 있으므로, 이 결과를 통해서 ISR을 이용한 측정 결과가 실제 두께 형상을 정확히 반영하고 있음을 확인할 수 있다.



<그림 5.6 SiO<sub>2</sub> 두께 형상 측정 결과 (ISR)>



<그림 5.7 SiO<sub>2</sub> 표면 형상 측정 결과 (AFM)>

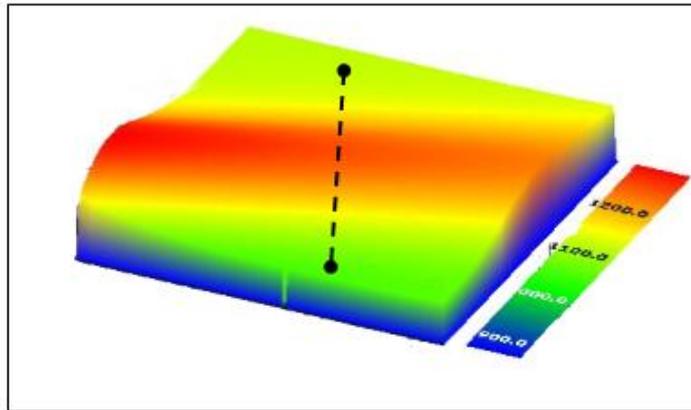


<그림 5.8 ISR 과 AFM 의 프로파일 비교>

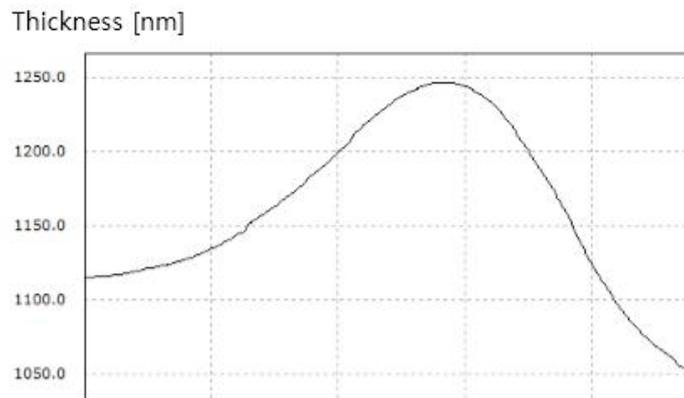
#### 5.3.4. 다양한 재질의 측정

본 논문에서 제시된 ISR 과 위상추출법을 이용한 두께 측정법이 SiO<sub>2</sub> 외에 다양한 재질에 대해서 측정이 잘 되는지를 평가하기 위해서 추가적인 시편을 준비하여 측정을 진행하였다. 박막의 재질과 서브스트레이트의 재질을 바꿔 가며 측정을 하여 그 결과를 확인하였다. 각각의 재질은 실제 반도체 및 디스플레이 산업 현장에서 자주 사용되는 재질들 중에서 선정하였다.

첫 번째 시편은 실리콘 웨이퍼에 PR(Photoresist) 이 도포된 것이다. PR 은 반도체 및 디스플레이 산업에서 포토리소그래피(Photo Lithography) 과정에서 패터닝을 위해 사용되는 필수적인 물질로, 많이 사용되는 재료 중에 하나이다. 일반적으로 스핀코팅(Spin Coating) 기법을 이용하여 도포하는데, 정상적으로 잘 도포가 된 경우 그 두께가 균일하다. 이 시편은 스핀코팅이 비정상적으로 진행되어 박막의 두께가 균일하지 않게 형성된 것을 측정한 것이다. <그림 5.9> 와 <그림 5.10> 의 측정 결과로부터 약 1.0 - 1.2 um 의 두께 굴곡이 형성 되어 있는 것을 확인할 수 있다.

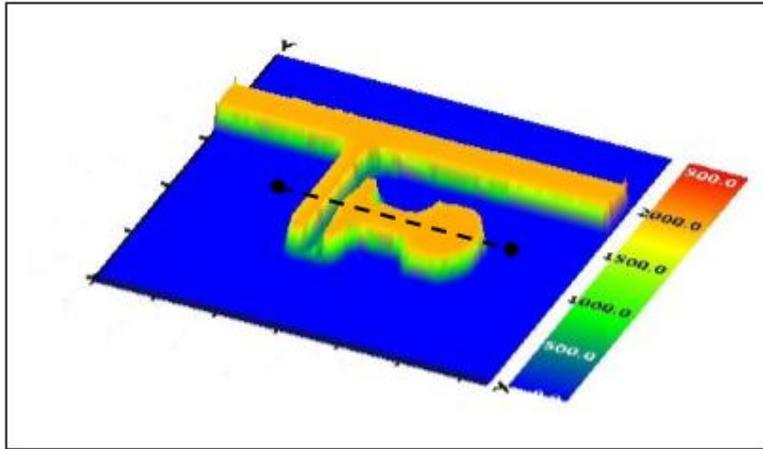


<그림 5.9 PR 두께 형상 측정 결과>

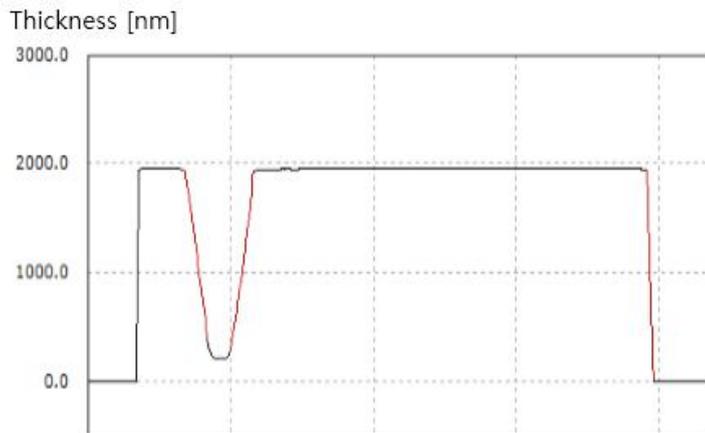


<그림 5.10 PR 두께 형상 측정 결과에서 추출된 프로파일>

두 번째 시편은 알루미늄 코팅이 되어 있는 글라스에 PR 이 도포된 뒤, 패터닝되어 있는 시편이다. 반도체 및 디스플레이 공정 중에 도선을 형성하기 위해서 구리 또는 알루미늄 재질을 많이 사용한다. 이 시편은 도선을 형성하기 위해서 알루미늄으로 글라스를 코팅하였으며, 도선의 형상을 만들기 위하여 PR 을 패터닝하였다. 이는 실제 공정 중에 매우 자주 사용되는 과정 중에 하나이다. 패턴의 크기가 매우 작기 때문에 대물렌즈를 50x 배율로 사용하였다. <그림 5.11> 과 <그림 5.12> 로부터 패턴의 형상이 잘 드러나도록 측정된 것을 확인할 수 있다. 특히 PR 의 두께가 약 2 um 정도로 두꺼운 부분과, 약 300 nm 정도로 상대적으로 얇은 부분의 두께가 모두 잘 측정된 것을 확인할 수 있다. 이렇게 한 패턴 내에 두꺼운 부분과 얇은 부분을 의도적으로 패터닝하는 것을 하프톤(Halftone) 기법이라고 부르기도 하는데, 이는 공정을 단축시키기 위해서 종종 사용된다. 특히 하프톤 기법이 사용되는 경우 두께가 얇은 부분의 두께를 모니터링하는 것은 매우 필수적이어서 ISR 을 이용한 측정의 필요성이 요구된다.

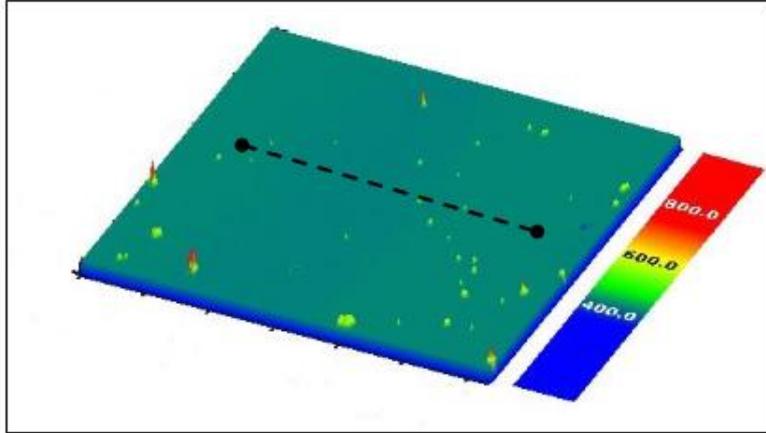


<그림 5.11 패터닝되어 있는 PR 두께 형상 측정 결과>

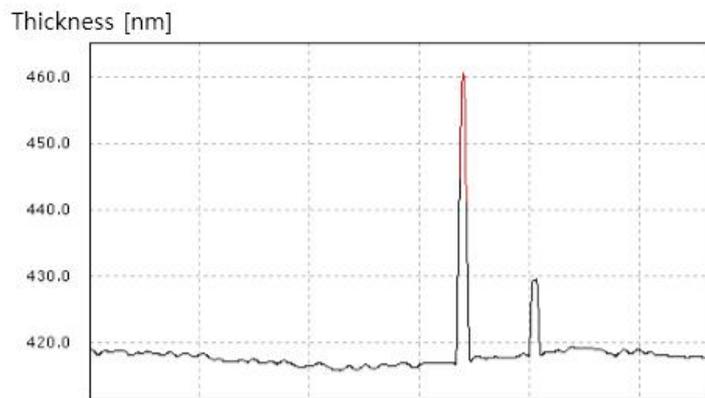


<그림 5.12 패터닝되어 있는 PR 두께 형상 측정 결과에서 추출된 프로파일>

세 번째 시편은 글라스에  $\text{SiN}_x$  박막의 증착된 것이다.  $\text{SiN}_x$  는 일종의 절연체로서 반도체 및 디스플레이 산업에서 많이 사용되는 재질이다. 특히 도선이 형성된 위치의 주변으로는 절연막을 형성하기 위하여  $\text{SiN}_x$  박막이 필수적으로 사용된다고 할 수 있다. 절연막 용도로 사용되기 때문에 특별한 패턴 없이 일정한 두께로 도포되는 것이 일반적이다. <그림 5.13> 과 <그림 5.14> 의 결과로부터 약 420 nm 내외 정도의 두께로 일정하게 박막이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.



<그림 5. 13 SiN<sub>x</sub> 두께 형상 측정 결과>



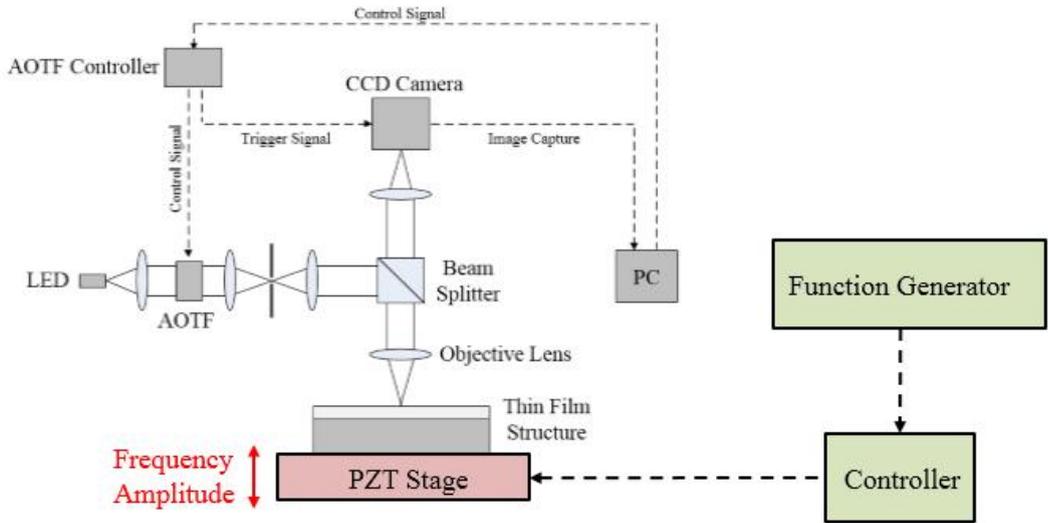
<그림 5. 14 SiN<sub>x</sub> 두께 형상 측정 결과로부터 추출된 프로파일>

### 5.3.5. 외부 진동에 대한 강건성

외부 환경에 의한 진동은 측정 장치에 있어서 가장 흔하게 접하게 되는 외부 에러 요인 중에 하나이다. 외부 진동에 의한 가진을 받고 있는 상황에서 이미징 분광 반사계의 측정 성능 변화를 확인하기 위하여 실험을 진행하였다. 외부의 진동을 받는 상황을 만들어 주기 위하여 <그림 5.15> 와 같이 측정 시스템에 PZT 스테이지를 설치하여 가진하였다. PZT 스테이지는 함수 발생기로부터 사인파(Sine) 신호를 받아 수직 방향의 진동을 발생시키도록 구성되어 있다. 함수 발생기에서 발생시키는 사인파의 진폭 및 주파수는 <표 5.10> 과 같이 총 8 종류로 선정하였고, 다양한 진폭과 주파수에 대해서 테스트가 되도록 하였다. 이러한 진동 상황 하에서 측정 성능의 변화를 확인하기 위하여 SiO<sub>2</sub> 박막 두께를 연속적으로 10회 반복 측정하도록 하였고, 그 평균 값과 반복 재현성을 평가하였다.

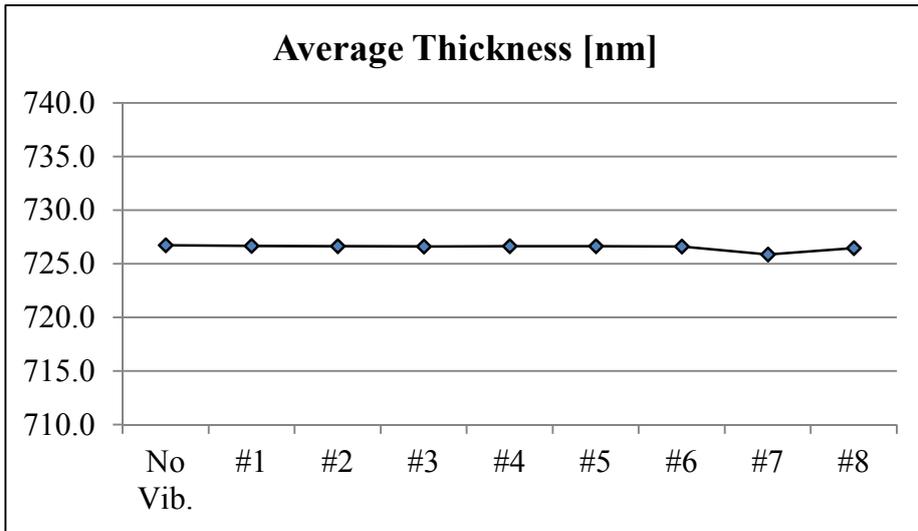
**<표 5.10 함수 발생기의 사인파 발생 조건>**

	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Frequency [Hz]	30	30	60	60	120	120	120	120
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	2.0	6.0

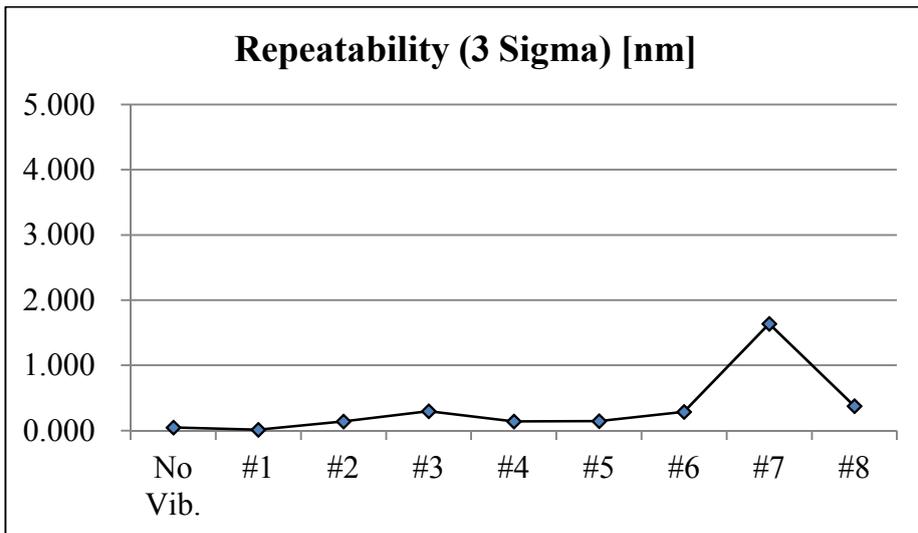


<그림 5.15 외부 진동에 대한 강건성 실험을 위한 시스템 구성>

진동이 가해지는 동안 측정된 결과는 <그림 5.16> 과 <그림 5.17> 에 표시하였다. 결과를 통하여 주어진 진동 상황 하에서도 10회 반복 측정의 평균값 및 재현성은 크게 변하지 않음을 확인할 수 있다. 평균값의 경우 주어진 모든 진동 조건 하에서 1 nm 이내의 차이를 보이고 있으며, 재현성의 경우 조건 #7이 약 1.7 nm 로 가장 큰 값을 가진다. 이 결과는 이미징 분광 반사계와 위상 추출법을 이용한 측정 시스템이 주변의 진동에 거의 영향을 받지 않는다는 것을 보여주는 실험 결과이다. 특히 함수 발생기를 이용해 가해진 진동의 진폭이 5  $\mu\text{m}$  이상의 매우 큰 경우도 있었음을 감안하면 이 시스템의 진동에 대한 강건성이 매우 뛰어남을 알 수 있다.



<그림 5.16 진동 상황에서의 10회 반복 측정 평균값>



<그림 5.17 진동 상황에서의 10회 반복 측정 재현성>

## 6. 결론

본 연구를 통해 위상 추출법을 ISR에 적용함으로써 정확도와 측정 속도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 위상 추출법은 비선형적인 특성을 가지는 반사도 신호로부터 위상을 추출함으로써 두께를 계산하기 위한 수식을 선형적인 수식으로 변환하였다. 따라서 기존의 방법들과는 달리 선형 시스템의 해를 통해 두께를 계산해 낼 수 있으며 매우 빠르고 정확한 측정이 가능하다.

반사도 획득 과정에서 발생할 수 있는 에러 요인들에 대하여 분석을 진행하였고, 각 에러 요인에 대한 보상 방법에 대하여도 연구하였다. 에러의 요인들에 대해 적절한 보상을 적용함으로써 측정 오차를 최소화할 수 있다.

시뮬레이션을 통해 기존의 해석법인 비선형 피팅법 및 피크 검출법과 정확도, 측정 속도를 비교하였다. 비교 결과 정확도는 비선형 피팅법과 동등한 수준으로 유지하면서도 측정 속도는 피크 검출법보다 더 빠른 측정이 가능함을 확인할 수 있었다. 기존의 해석법들의 경우 정확도와 측정 속도 사이에 트레이드오프 관계를 가지고 있었는데, 위상 추출법은 이를 극복하였다.

빠른 측정 속도와 높은 정확도를 모두 유지하는 이러한 특징은 특히 ISR에 적용하기에 매우 적합한 특성이다. CCD 카메라를 디텍터로 사용하는 ISR은 각각의 픽셀에서 동일한 해석 과정을 반복해야 하기 때문이다. 위상 추출법을 ISR에 적용함으로써 매우 빠르게 두께 형상 측정이 가능하다. 실험을 통해 이러한 위상 추출법의 빠른 측정 속도를 확인하였다. 특히 640\*480 픽셀을 가지는 CCD 카메라를 이용한 측정에서 모든 과정을 3초 이내에 완료하는 매우 빠른 속도를 보여주었다. 이는 반도체 및 디스플레이 산업에서 매우 유용하게 사용될 수 있는 시스템임을 보여주는 결과이다.

측정 속도와 정확도 외에 여러 가지 장점 역시 확인할 수 있었다. 외부 진동에 대한 측정 시스템의 강건성을 실험을 통해 확인할 수 있었는데, 외부 진동이 가해지는 상황에서도 높은 반복 재현성을 보여줌을 확인하였다. 파장 주사 과정에서 파장 범위를 탄력적으로 조절할 수 있는 점도 대물렌즈에 의한 색수차 문제를 해결하면서 측정 속도도 향상시킬 수 있는 매우 뛰어난 장점이다.

본 연구를 통해 위상 추출법을 제안함으로써 반도체 및 디스플레이 분야의 박막 두께 측정을 매우 효율적으로 수행할 수 있는 방법을 마련하였다. 기존의 해석 방법들보다 향상된 측정 정확도와 속도를 통해 공정 중에 실시간으로 박막의 두께를 모니터링하여 공정 안정화에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## References

- [1] de Groot, Peter, and Leslie Deck. "Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms." *Optics letters* 18.17 (1993): 1462-1464.
- [2] de Groot, Peter, and Leslie Deck. "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain." *Journal of modern optics* 42.2 (1995): 389-401.
- [3] Sandoz, Patrick. "Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry." *Optics Letters* 22.14 (1997): 1065-1067.
- [4] 안우정. "백색광 위상 천이 간섭계에서의 위상 오차의 수치해석 보정". 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2005).
- [5] 한건수. "광위상간섭법에서 기준위상의 수치해석 보정". 박사학위논문, 한국과학기술원 (1994).
- [6] Deck, Leslie, and Peter De Groot. "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry." *Applied optics* 33.31 (1994): 7334-7338.
- [7] Sandoz, Patrick. "An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry." *Journal of Modern Optics* 43.8 (1996): 1545-1554.
- [8] 강민구. "백색광 주사 간섭계를 이용한 표면 형상 측정 알고리즘에 관한 연구". 박사학위논문, 한국과학기술원 (1999).
- [9] Caber, Paul J. "Interferometric profiler for rough surfaces." *Applied optics* 32.19 (1993): 3438-3441.

- [10] Kino, Gordon S., and Stanley SC Chim. "Mirau correlation microscope." *Applied Optics* 29.26 (1990): 3775-3783.
- [11] Chim, Stanley SC, and Gordon S. Kino. "Three-dimensional image realization in interference microscopy." *Applied Optics* 31.14 (1992): 2550-2553.
- [12] Larkin, Kieran G. "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry." *JOSA A* 13.4 (1996): 832-843.
- [13] Olszak, Artur, and Joanna Schmit. "High-stability white-light interferometry with reference signal for real-time correction of scanning errors." *Optical Engineering* 42.1 (2003): 54-59.
- [14] Danielson, Bruce L., and C. Y. Boisrobert. "Absolute optical ranging using low coherence interferometry." *Applied Optics* 30.21 (1991): 2975-2979.
- [15] Kim, Seung-Woo, and Gee-Hong Kim. "Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry." *Applied Optics* 38.28 (1999): 5968-5973.
- [16] Schnell, U., E. Zimmermann, and R. Dändliker. "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channelled spectrum interferometry." *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A* 4.5 (1995): 643.
- [17] Schnell, U., S. Gray, and R. Dändliker. "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target." *Optics Letters* 21.7 (1996): 528-530.
- [18] Kuwamura, Susumu, and Ichirou Yamaguchi. "Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement." *Applied Optics* 36.19 (1997): 4473-4482.

- [19] Xiaoli, Dai, and Seta Katuo. "High-accuracy absolute distance measurement by means of wavelength scanning heterodyne interferometry." *Measurement Science and Technology* 9.7 (1998): 1031.
- [20] Hlubina, Petr. "Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements." *Optics communications* 212.1 (2002): 65-70.
- [21] Joo, Ki-Nam, and Seung-Woo Kim. "Absolute distance measurement by dispersive interferometry using a femtosecond pulse laser." *Optics express* 14.13 (2006): 5954-5960.
- [22] Hlubina, Petr, Dalibor Ciprian, and Jiří Luňáček. "Dispersive white-light spectral interferometry including the effect of thin-film for distance measurement." *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 118.7 (2007): 319-324.
- [23] Kim, Dae-Suk, and Yong-Jai Cho. "3-D surface profile measurement using an acousto-optic tunable filter based spectral phase shifting technique." *Journal of the Optical Society of Korea* 12.4 (2008): 281-287.
- [24] Sasaki, Osami, *et al.* "Sinusoidal wavelength-scanning interferometric reflectometry." *Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology (ICOSN'99)*. International Society for Optics and Photonics, 1999.
- [25] Akiyama, Hisashi, Osami Sasaki, and Takamasa Suzuki. "Thickness and surface profile measurement by a sinusoidal wavelength-scanning interferometer." *Optical review* 12.4 (2005): 319-323.
- [26] Hlubina, Petr, *et al.* "Dispersive white-light spectral interferometry with absolute phase retrieval to measure thin film." *Optics express* 14.17 (2006): 7678-7685.

- [27] Hlubina, Petr, *et al.* "Spectral interferometry and reflectometry used to measure thin films." *Applied Physics B* 92.2 (2008): 203-207.
- [28] Debnath, Sanjit Kumar, Joonho You, and Seung-Woo Kim. "Determination of film thickness and surface profile using reflectometry and spectrally resolved phase shifting interferometry." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 10.5 (2009): 5-10.
- [29] Kim, Daesuk, *et al.* "Measurement of the thickness profile of a transparent thin film deposited upon a pattern structure with an acousto-optic tunable filter." *Optics letters* 27.21 (2002): 1893-1895.
- [30] Kim, Daesuk, and Soohyun Kim. "Direct spectral phase function calculation for dispersive interferometric thickness profilometry." *Optics express* 12.21 (2004): 5117-5124.
- [31] Ghim, Young-Sik, and Seung-Woo Kim. "Thin-film thickness profile and its refractive index measurements by dispersive white-light interferometry." *Optics express* 14.24 (2006): 11885-11891.
- [32] Ghim, Young-Sik, and Seung-Woo Kim. "Fast, precise, tomographic measurements of thin films." *Applied Physics Letters* 91.9 (2007): 091903.
- [33] Gao, Feng, Hussam Muhamedsalih, and Xiangqian Jiang. "Surface and thickness measurement of a transparent film using wavelength scanning interferometry." *Optics express* 20.19 (2012): 21450-21456.
- [34] 황영민. "Wavelet 변환을 이용한 파장 주사 간섭계에서의 박막 두께 형상 측정". 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2005).

- [35] Ohlídal, Ivan. "Immersion spectroscopic reflectometry of multilayer systems. I. Theory." *JOSA A* 5.4 (1988): 459-464.
- [36] Maddaloni, Pasquale, *et al.* "Thickness measurement of thin transparent plates with a broad-band wavelength scanning interferometer." *Photonics Technology Letters, IEEE* 16.5 (2004): 1349-1351.
- [37] Benson, Tyrone E., *et al.* "In-situ spectroscopic reflectometry for polycrystalline silicon thin film etch rate determination during reactive ion etching." *Journal of electronic materials* 25.6 (1996): 955-964.
- [38] Özder, Serhat, *et al.* "Determination of the refractive index dispersion of thick films by continuous wavelet transform." *Thin solid films* 458.1 (2004): 257-262.
- [39] Kim, Daesuk, *et al.* "Fast thickness profile measurement using a peak detection method based on an acousto-optic tunable filter." *Measurement Science and Technology* 13.7 (2002): L1.
- [40] Ghim, Young-Sik, Amit Suratkar, and Angela Davies. "Reflectometry-based wavelength scanning interferometry for thickness measurements of very thin wafers." *Optics express* 18.7 (2010): 6522-6529.
- [41] 조태영. "투명 박막의 입체 형상 측정을 위한 광학 변조 필터 채용 분광 광도계 개발". 박사학위논문, 서울대학교 대학원 (2013).
- [42] 김광락. "선형가변필터와 CCD 카메라를 이용한 투명박막의 두께형상 측정". 석사학위논문, 서울대학교 대학원 (2009).

- [43] Kim, Kwangrak, *et al.* "Volumetric thin film thickness measurement using spectroscopic imaging reflectometer and compensation of reflectance modeling error." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15.9 (2014): 1817-1822.
- [44] Tompkins, Harland G., and William A. McGahan. *Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide*. New York: Wiley, 1999.
- [45] 안일신. "엘립소미트리" 한양대학교 출판부 (2000): 49-54.
- [46] Fujiwara, Hiroyuki. *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [47] Zhan, Qiwen, and James R. Leger. "High-resolution imaging ellipsometer." *Applied optics* 41.22 (2002): 4443-4450.
- [48] Jin, Gang, Roger Jansson, and Hans Arwin. "Imaging ellipsometry revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates." *Review of scientific instruments* 67.8 (1996): 2930-2936.
- [49] Chou, Chien, *et al.* "Polarization modulation imaging ellipsometry for thin film thickness measurement." *Optics communications* 273.1 (2007): 74-83.
- [50] Han, Chien-Yuan, and Yu-Faye Chao. "Photoelastic modulated imaging ellipsometry by stroboscopic illumination technique." *Review of scientific instruments* 77.2 (2006): 023107.
- [51] Hecht, Eugene. "Optics, 4th." International edition, Addison-Wesley, San Francisco (2002).

- [52] Osten, Wolfgang, ed. Optical inspection of microsystems. CRC Press, 2006.
- [53] Piegari, A., and E. Masetti. "Thin film thickness measurement: a comparison of various techniques." *Thin solid films* 124.3 (1985): 249-257.
- [54] Motulsky, Harvey J., and Lennart A. Ransnas. "Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review." *The FASEB journal* 1.5 (1987): 365-374.
- [55] Itoh, Kazuyoshi. "Analysis of the phase unwrapping algorithm." *Applied Optics* 21.14 (1982): 2470-2470.
- [56] Huntley, Jonathan M., and H. Saldner. "Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis." *Applied Optics* 32.17 (1993): 3047-3052.
- [57] Saldner, Henrik O., and Jonathan M. Huntley. "Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects." *Applied optics* 36.13 (1997): 2770-2775.
- [58] Pliskin, W. A., and R. P. Esch. "Effect of Numerical Aperture of Microscope Objectives on Film-Thickness Determinations." *Journal of Applied Physics* 39.7 (1968): 3274-3276.
- [59] Marchand-Maillet, Stéphane, and Yazid M. Sharaiha. *Binary digital image processing: a discrete approach*. Academic Press, 1999.
- [60] Jähne, Bernd. "Practical handbook on image processing for scientific and technical applications." (2004).

- [61] Oppenheim, Alan V., Ronald W. Schaffer, and John R. Buck. Discrete-time signal processing. Vol. 2. Englewood Cliffs: Prentice-hall, 1989.
- [62] Szeliski, Richard. Computer vision: algorithms and applications. Springer, 2010.
- [63] Sonka, Milan, Vaclav Hlavac, and Roger Boyle. Image processing, analysis, and machine vision. Cengage Learning, 2014.
- [64] Chambolle, Antonin, *et al.* "Nonlinear wavelet image processing: variational problems, compression, and noise removal through wavelet shrinkage." Image Processing, IEEE Transactions on 7.3 (1998): 319-335.
- [65] Faraji, Hilda, and W. James MacLean. "CCD noise removal in digital images." Image Processing, IEEE Transactions on 15.9 (2006): 2676-2685.
- [66] Chen, Tao, Kai-Kuang Ma, and Li-Hui Chen. "Tri-state median filter for image denoising." Image Processing, IEEE Transactions on 8.12 (1999): 1834-1838.
- [67] Nikolaidis, Nikos, and Ioannis Pitas. 3-D image processing algorithms. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [68] Hurt, Sharon Lee, and Azriel Rosenfeld. "Noise reduction in three-dimensional digital images." Pattern recognition 17.4 (1984): 407-421.
- [69] Suhre, Dennis R., *et al.* "Spatial resolution of imaging noncollinear acousto-optic tunable filters." Optical Engineering 31.10 (1992): 2118-2121.
- [70] 유장우, *et al.* "음향광학변조필터의 입사각 변화를 이용한 분해능 향상 방법." 대한기계학회 춘추학술대회 (2004): 607-612.

[71] Pustovoit, V. I., *et al.* "Double-AOTF spectral imaging system." Congress on Optics and Optoelectronics. International Society for Optics and Photonics, 2005.

[72] Bucher, Ewa G., and Jon W. Carnahan. "Characterization of an acousto-optic tunable filter and use in visible spectrophotometry." *Applied spectroscopy* 53.5 (1999): 603-611.

[73] Strang, Gilbert. "Introduction to linear algebra." Cambridge Publication (2003).

## Appendices

### A. 총 반사계수의 유도

총 반사계수는 그림 (2.1) 에서와 같이 박막 내부에서 다중반사를 거치며 공기중으로 빠져 나오는 모든 빛을 합한 것과 같다. 수식적으로는 식 (2.4 a) – (2.4 d) 와 같이 규칙적인 형태를 가지며 만들어지는 시리즈를 모두 더한 것과 같다. 이는 식 (A.1) 과 같이 쓸 수 있다. 또한 식 (A.1) 에서 우변의 두 번째 항 이후로는 동일한 형태로 시리즈가 반복되므로 이를 정리하면 식 (A.2) 와 같다.

$$\begin{aligned}
 r_{total} = r_{12} + & \hspace{15em} (A.1) \\
 & t_{12} \cdot r_{23} \cdot t_{21} e^{-i2\beta} + \\
 & t_{12} \cdot r_{23}^2 \cdot r_{21} \cdot t_{21} e^{-i4\beta} + \\
 & t_{12} \cdot r_{23}^3 \cdot r_{21}^2 \cdot t_{21} e^{-i6\beta} + \dots
 \end{aligned}$$

$$r_{total} = r_{12} + t_{12} t_{21} r_{23} e^{-i2\beta} \left[ 1 + (r_{21} r_{23} e^{-i2\beta}) + (r_{21} r_{23} e^{-i2\beta})^2 + (r_{21} r_{23} e^{-i2\beta})^3 + \dots \right] \quad (A.2)$$

정리된 총 반사계수의 식 (A.2) 는 규칙적인 형태를 가지며 지수항이 반복되고 있음을 알 수 있다. 따라서 아래의 식 (A.3) 의 관계를 이용하여 식 (A.2) 의 우변의 시리즈를 정리할 수 있음을 알 수 있다. 이를 대입하여 정리하면 식 (A.4) 과 같다.

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \quad (\text{A.3})$$

$$r_{total} = r_{12} + \frac{t_{12}t_{21}r_{23}e^{-i2\beta}}{1 - r_{21}r_{23}e^{-i2\beta}} \quad (\text{A.4})$$

프레넬 반사 계수와 투과 계수는 식 (A.5) 와 같은 성질을 가지므로, 이 성질을 이용하여 식 (A.4) 를 변형할 수 있다. 최종적으로 식 (2.6) 과 동일한 형태의 총 반사계수를 식 (A.6) 과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{ba} &= -r_{ab} \\ t_{ba} &= \frac{1 - r_{ab}^2}{t_{ab}} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

$$r_{total} = \frac{r_{12} + r_{23} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(-i2\beta)} \quad (\text{A.6})$$

## B. 음향 광학 변조 필터

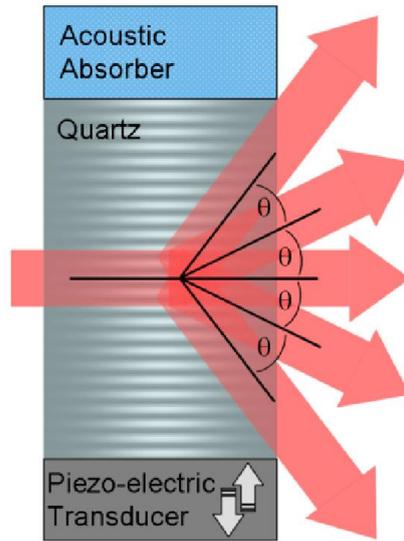
### B.1 굴절각

음향 광학 변조 필터(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)에서 회절된 빔의 각도는 광학계를 설계하는 데에 있어 매우 중요하다. AOTF 에 의해 필터링된 빛은 AOTF 에 입사되기 전의 광축과 일정 각도를 가지며 굴절되기 때문에 정확한 굴절각을 알지 못하는 경우 광학계의 광학 소자들을 적절한 위치에 배치할 수가 없다. 부정확한 광학 소자의 배치로 인해 측정 신호가 왜곡될 수 있으므로 AOTF 의 굴절각을 정확히 계산하여 광학계 설계에 반영하는 것이 중요하다.

음향 광학 변조 필터에 빛을 입력하고 압전 소자를 구동했을 경우, <그림 B.1> 에서와 같이 회절되는 얇은 빔과 회절된 빔들이 투과되어 나온다. 이러한 빔들은 <그림 B.1> 과 같이 일정한 각도를 가지는데, 그 각도는 일반적으로 다음 식 (B.1) 으로 정의된다. 식 (B.1) 에서  $\theta$  는 굴절각,  $\lambda$  는 빛의 파장,  $\Lambda$  는 진동에 의해서 발생하는 음파의 주기이다. 또한  $m$  은 회절의 차수를 의미하는데, 일반적으로 AOTF 를 이용하여 빛을 필터링 할 때  $m = \pm 1$  인 1차 회절된 빛을 사용한다. 따라서 AOTF 를 통과하여 필터링된 빛의 회절각은 식 (B.2) 와 같이 다시 쓰일 수 있다.

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2\Lambda} \quad (\text{B.1})$$

$$\theta = \pm \sin^{-1} \left( \frac{\lambda}{2\Lambda} \right) \quad (\text{B.2})$$



<그림 B. 1 AOTF 의 회절각도><sup>8</sup>

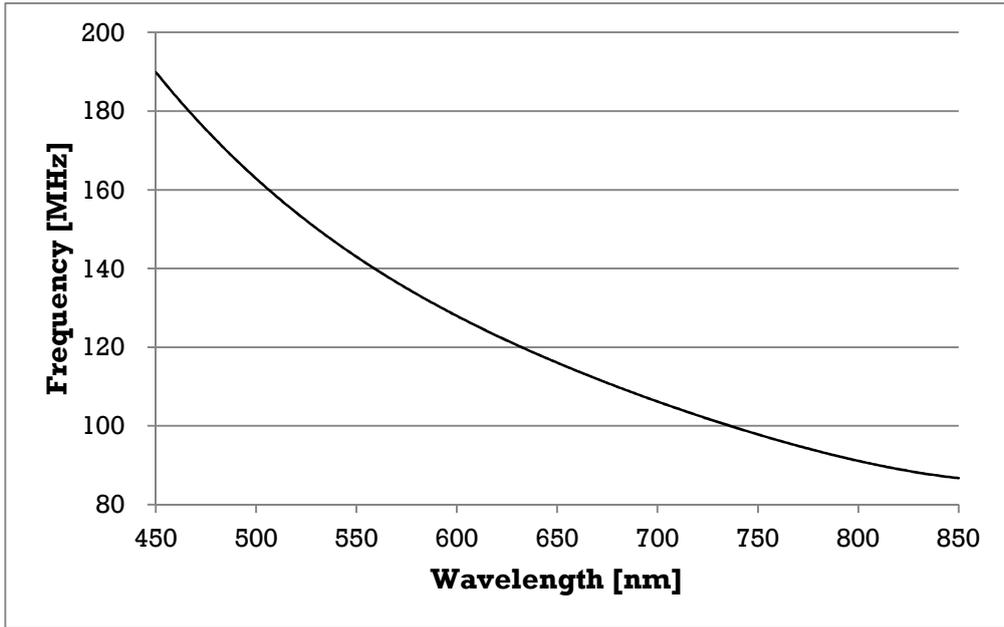
<sup>8</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic\\_modulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator)

## B.2 구동 주파수와 필터링 파장의 관계

음향광학변조필터에 의하여 필터링되는 빛의 파장은 AOTF 에 부착된 압전 소자의 구동 주파수에 의하여 결정된다. 필터링된 빛의 파장  $\lambda$  와 압전 소자의 구동 주파수  $f$  사이의 관계는 식 (B.3) 과 같이 정의된다. 식 (B.3) 에서  $\theta_i$  와  $\theta_a$  는 각각 빛의 입사각과 음파의 진행각이다. 또한  $\Delta n_b$  는 복굴절,  $v$  는 음파의 속도를 의미하는데 이 두 값은 AOTF 에 사용되는 재료에 의하여 결정된다.

식 (B.3) 에서 확인할 수 있듯이, 필터링되는 빛의 파장은 압전 소자의 구동 주파수와 반비례 관계를 가진다. <그림 B.2> 는 실제 이 논문에서 사용된 AOTF 의 파장-주파수 의 관계를 실험적으로 구한 그래프이다. 식 (B.3) 에서 확인한 것과 같이 반비례 관계의 그래프를 확인할 수 있다.

$$f = \frac{\Delta n_b(\lambda)v(\theta_a)}{\lambda} \frac{\sin^2 \theta_i}{\tan(\theta_i - \theta_a)} \quad (\text{B.3})$$



<그림 B. 2 AOTF 의 구동 주파수와 필터링 파장의 관계>

### C. 빛의 편광 상태에 따른 반사계수

프레넬의 반사 계수 및 투과 계수는 빛의 편광 상태에 따라 다르게 나타남을 이미 식 (2.3 a-d) 을 통해서 확인한 바 있다. 따라서 본 논문에서 수식을 전개할 때 사용한 프레넬 반사 계수  $r_{12}$  및  $r_{23}$  의 경우 엄밀하게는 빛의 편광 상태에 따라 P 파와 S 파를 구분하여 사용해야 하며, 편광 상태에 따라 반사도 역시 달라지는 것이 일반적이다. 그러나 본 논문에서 사용된 시스템에 한하여 다음과 같이 가정하였고, 본문에서는 P 파와 S 파의 구분 없이 이론을 전개하였다.

#### C.1 수직 입사하는 경우

시뮬레이션에서는 빛이 수직 입사되는 환경을 가정하였다. 빛이 수직 입사되는 경우  $\theta_1$  와  $\theta_2$  는 모두 그 값이 0 이므로 이를 대입하여 식을 다시 쓰면 식 (C.1 a-c) 와 같다. 투과 계수의 경우 P 파와 S 파가 동일한 값을 가지며, 반사 계수의 경우 서로 부호가 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이 값들을 각각 P 파와 S 파에 대해서 따로 반사도를 구해 보면 동일한 반사도 값을 가지는 것을 알 수 있다. 즉, 수직 입사되는 경우를 가정하면 P 파 또는 S 파에 대한 수식 중 어떤 것을 적용해도 동일한 반사도 값을 얻을 수 있다. 이에 따라 이 논문에서 수식을 전개할 때 P 파와 S 파의 구분 없이 표기하였다.

$$r_{12}^p = \frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_1} \quad (\text{C.1 a})$$

$$r_{12}^s = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \quad (\text{C.1 b})$$

$$t_{12}^p = t_{12}^s = \frac{2N_1}{N_2 + N_1} \quad (\text{C.1 c})$$

## C.2 대물렌즈를 사용한 경우

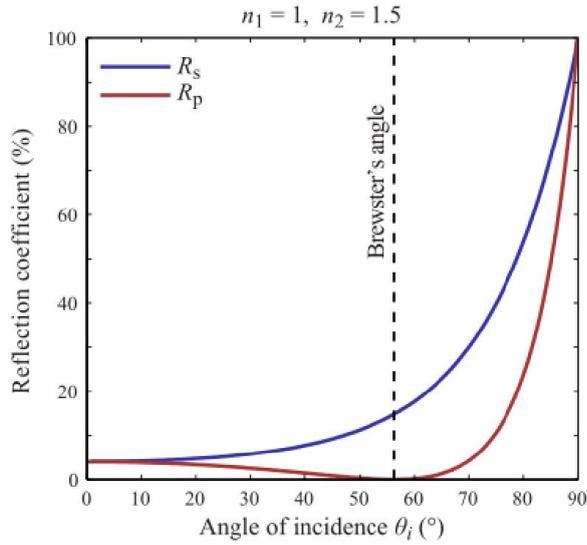
실제 실험 과정에서는 대물렌즈를 사용한 광학 시스템을 구성하였기 때문에 이를 고려해야 한다. 일반적으로 광학계에서 대물렌즈를 이용할 경우 렌즈의 NA 에 의하여 빛이 수직 입사되지 않고 각도 성분을 가지게 된다. 이 경우는 P 파와 S 파에 대한 프레넬 반사 계수가 입사각에 의하여 서로 다른 값을 가지게 되므로, 최종적으로 반사도 역시 P 파와 S 파가 서로 다르게 된다. 아래의 <그림 C.1> 은 입사각에 따른 P 파와 S 파의 반사 계수를 그래프로 표시한 것이다. 서로 다른 반사 계수를 가짐을 확인할 수 있다. P 파와 S 파에 대한 총 반사계수는 각각의 프레넬 반사 계수를 이용하여 식 (C.2 a-b) 와 같이 계산된다.

$$r^p = \frac{r_{12}^p + r_{23}^p \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}^p r_{23}^p \exp(-i2\beta)} \quad (\text{C.2 a})$$

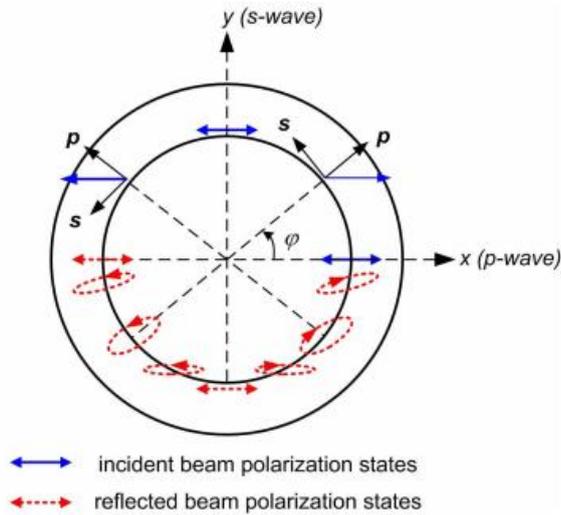
$$r^s = \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(-i2\beta)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(-i2\beta)} \quad (\text{C.2 b})$$

본 논문에서 사용된 실험 장치 구성에서는 빛을 특정 파장으로 필터링하기 위하여 AOTF 를 사용하였는데, AOTF 를 거쳐 필터링되는 1차 회절 빔은 <그림 4.3> 과 같이 정상광선(Ordinary Ray)과 이상광선(Extraordinary Ray)의 두 갈래로 나뉘게 된다. 정상광선과 이상광선은 서로 직교하는 방향으로 선형편광(Linearly Polarized)된 상태이다. 실험 장치에서는 정상광선만을 사용하므로 선형편광 상태의 정상광선만 대물렌즈로 입사되는 것이다. 선형편광된 상태의 빛이 대물렌즈로 입사되면 <그림 C.2> 과 같이 방위각(Azimuth Angle)을 따라 P 파와 S 파의 성분이 동등한 비율로 만들어진다. 따라서 최종적으로 얻는 반사도는 동일한 비율의 P 파와 S 파가 혼합되어 있는 결과물이라고 볼 수 있다. 이 경우의 프레넬 반사 계수는 식 (C.3) 에 의하여 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 r_{12} &= \frac{r_{12}^p + r_{12}^s}{2} \\
 r_{23} &= \frac{r_{23}^p + r_{23}^s}{2}
 \end{aligned}
 \tag{C.3}$$



<그림 C.1 빛의 편광 상태에 따른 반사 계수의 변화><sup>9</sup>



<그림 C.2 대물렌즈의 방위각에 따른 P와 S파의 구분><sup>10</sup>

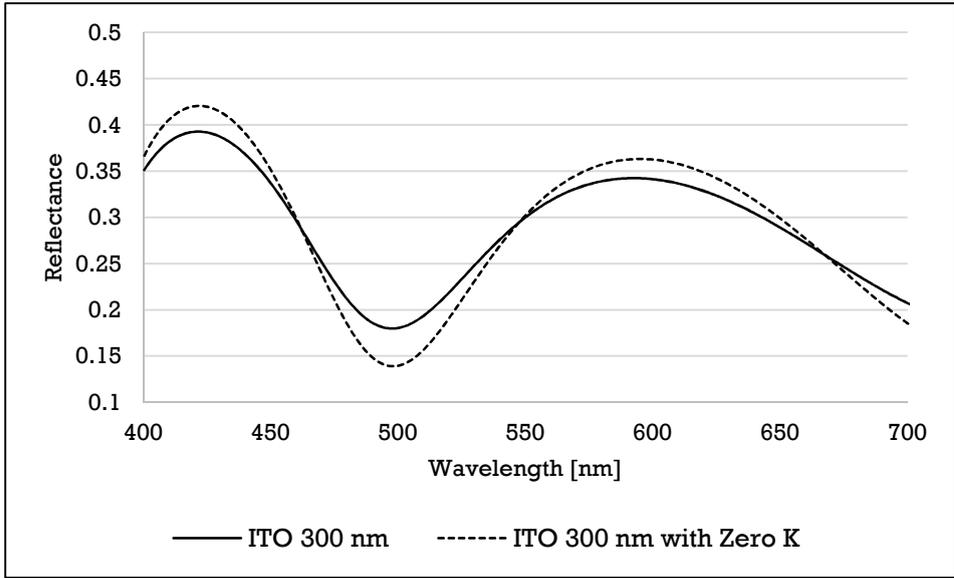
<sup>9</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations)

<sup>10</sup> Ye, Sang-Heon, *et al.* "Angle-resolved annular data acquisition method for microellipsometry." *Optics express* 15.26 (2007): 18056-18065.

#### D. 소광계수가 높은 경우의 측정

본 논문에서 제시하는 위상 추출법은 박막 물질의 소광 계수가 충분히 작다는 가정 하에 소광 계수를 0 으로 놓고 이론을 전개하였다. 반도체 및 디스플레이 산업에서 사용되는 많은 박막 물질들은 소광 계수가 매우 작은 것이 사실이나, 그렇지 않은 물질 역시 존재한다. 대표적으로 LCD 공정에서 투명 전극 물질로 사용되는 ITO(Indium-Tin-Oxide)가 있다.

위상 추출법을 이용한 해석에서도 소광계수가 무시할 수 없을 정도로 큰 물질도 해석이 가능하다. 이는 본 논문의 3.3.3 절에서 제시한 확대·축소 왜곡에 대한 보정 기능이 있기 때문이다. <그림 D.1> 은 ITO 박막이 300 nm 인 경우에 대한 시뮬레이션 그래프이다. 실선은 실제 ITO 의 굴절률을 그대로 이용한 반사도이며, 소광계수가 0 이 아니다. 파선으로 표시된 것은 ITO 의 굴절률에서 소광계수만 0 으로 수정하여 시뮬레이션을 수행한 반사도이다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 두 반사도는 소광계수의 유무에 따라 확대·축소 형태의 차이를 가지고 있으며 최대점과 최소점의 위치는 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 실제 소광계수가 0 이 아닌 박막 물질에 대해서 위상 추출법으로 해석을 진행하더라도 확대·축소 왜곡에 대한 보정을 통해 실제 박막의 두께를 측정할 수 있다.



<그림 D.1 소광계수에 따른 반사도의 변화 시뮬레이션(ITO 300 nm)>

## **Abstract**

### **Measurement of Volumetric Film Thickness using Phase Extraction Method and Imaging Spectroscopic Reflectometry**

In this thesis phase extraction method, a new analysis algorithm for imaging spectroscopic reflectometry(ISR), is proposed to measure volumetric thickness of thin film. In semiconductor and display industries, demands on measurement of micro-patterns have been increased. Particularly, thickness measurement of thin film such as photoresist is very important for process management. Conventionally, nonlinear fitting method such as Levenberg-Marquardt algorithm has been used for spectroscopic reflectometry. However, it is not proper for ISR due to slow computation speed.

Phase extraction method, the proposed method, can analyze film thickness with higher accuracy and much faster speed. Linear phase equation can be extracted from nonlinear reflectance equation, and film thickness can be calculated from matrix equation. In order to achieve higher accuracy, various types of error causes are presented. Particularly, the shift error due to numerical aperture of objective lens can be compensated by applying the effective angle of the objective lens. The amplitude error can be compensated effectively by modifying normalized reflectance.

Performance of phase extraction method is verified by simulations and experiments. The result of the simulations shows that accuracy of phase extraction method is 0.01 % for silicon dioxide film 100 – 4000 nm. In the experiments, six silicon dioxide specimens are measured and accuracy is 0.3 %. The result of experiments shows that phase extraction method has better accuracy than conventional methods such as nonlinear fitting method, peak detection method and phase reconstruction by WT. Measurement speed is also verified using ISR system with 640\*480 CCD camera. Entire measurement process is completed within 3 s with phase extraction method. The result shows that phase extraction method is the fastest for measurement of thin film.

Keywords: Thin Film, Volumetric Thickness, Measurement, Imaging Spectroscopic Reflectometry(ISR), Phase Extraction Method, Acousto-Optic Tunable Filter(AOTF), Numerical Aperture(NA)