



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](#)

2017년 2월

석사학위논문

3차원 박막 두께 측정을 위한 영상타원계측기에 관한 연구

조선대학교 대학원

광기술험공학과

서용범

3차원 박막 두께 측정을 위한 영상타원계측기에 관한 연구

Spectral imaging ellipsometry for measuring
3D film thickness profiles

2016년 12월 09일

조선대학교 대학원

광기술공학과

서 용 범

3차원 박막 두께 측정을 위한 영상타원계측기에 관한 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 12월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

서 용 범

서 용 범의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 종 락 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2016년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	4
제3절 연구목표 및 내용	9
제2장 영상타원계측기	10
제1절 타원계측기의 기본 원리	10
1. 타원계측기의 기본적인 원리 및 이론	10
2. 타원계측기의 분류	13
2.1 Null 타원계측기	13
2.2 Photometric 타원계측기	14
2.3 영상타원계측기	15
제2절 박막 분석 이론	16
1. 덩이(Bulk) 표면에서 측정 이론	16
2. 단층 박막 측정 이론	19
3. 다층 박막 측정 이론	21
제3장 실험 결과 및 분석	23
제1절 Calibration	24
1. 영상타원계측기 Calibration	24
1.1 영상타원계측기 하드웨어 Calibration 방법	24
1.2 영상타원계측기 소프트웨어 Calibration 방법	28

제2절 Null 영상타원계측기	30
1. Null 영상타원계측기 구성	30
2. Null 영상타원계측기 실험 결과	32
2.1 덩이 물질 측정	32
2.2 단층 박막 측정	34
제3절 Photometric 영상타원계측기	38
1. Photometric 영상타원계측기 구성	38
2. Photometric 영상타원계측기 실험 및 결과	41
2.1 단층 박막 측정	41
2.2 다층 박막 측정	45
제4장 고찰 및 논의	47
1. 정밀도와 정확도	48
2. 측정 속도 개선	49
제5장 결론	50
[참고문헌]	51
[감사의 글]	56

그림 목차

그림 1. 산업 분야에 따른 적층형 박막 구조물	1
그림 2. 반도체 칩의 단면 구조	1
그림 3. 평판 디스플레이의 단면 구조	2
그림 4. 백색광 주사 간섭계 개략도	4
그림 5. 분산 백색광 간섭계 개략도	5
그림 6. 반사광측정법 개략도	6
그림 7. 타원계측기 개략도	8
그림 8. 타원계측기 구성도 (PCSA type은 회전하는 편광소자에 따라 P _R CSA _R type과 PC _R SA type으로 각각 표현됨)	14
그림 9. Si wafer에서 입사각도에 따른 p-파와 s-파의 비율	17
그림 10. 단일박막(대기층/박막/기판)의 광학적 모델	19
그림 11. (a) 광축 기준으로 광학부품들의 정렬 (b) Iris를 이용한 영상 타원계측기 시편 스테이지 Calibration	25
그림 12. Glan-Thompson 기준 편광기 및 원리	26
그림 13. 편광기와 검광기의 Calibration 방법	26
그림 14. 삼각 함수법을 이용한 샤임플러그 원리	27
그림 15. 샤임플러그 원리를 적용한 광학 구성	27
그림 16. DOF와 삼각 함수법을 이용한 카메라의 측정 영역	28
그림 17. Null, Photometric 영상타원계측기 Calibration Flow Chart ..	29
그림 18. (a) Null 영상타원계측기의 광학 구성도 (b) 실제 구성된 광학 구성도	30
그림 19. Null 영상타원계측기의 광원 LD(Laser Diode)	31

그림 20. 편광기와 검광기를 회전시키기 위한 Motorized Stage, Controller	31
그림 21. Imaging Lens(1X)와 영상 소자인 CCD 카메라(1024 X 768 pixel)	31
그림 22. 편광기와 검광기 회전에 따른 소광점 네 곳의 광량분포 ..	32
그림 23. 편광기와 검광기 회전에 따른 소광점 한 곳의 광량분포 ..	33
그림 24. (a) 영상 소자에 획득 된 Si 웨이퍼 이미지 (b) 측정 된 Si 웨 이퍼의 굴절률 분포 (c) 측정된 Si 웨이퍼의 소광계수 분포	33
그림 25. 단층 박막 시편(Si - SiO ₂ , Ocean optics inc.)	34
그림 26. (a) 단층 박막 시편 #3(200 nm)과 #4(300 nm) 이미지 (b) 편광기와 검광기의 회전으로 빛의 세기가 최소가 되는 여덟 곳의 지점	34
그림 27. 단층 박막 시편을 적용한 이론적인 복소반사계수비(ρ)	35
그림 28. (a) SiO ₂ 박막의 반사계수 비 분포 (b) SiO ₂ 박막의 두께 분포	36
그림 29. 단층 박막 시편(#3-#4)의 3D profile	36
그림 30. (a) Photometric 영상타원계측기 광학 구성도 (b) 실제 구성된 광학 구성도	38
그림 31. 넓은 파장 대역 광원 및 스펙트럼	39
그림 32. Photometric 영상타원계측기 광량분포 및 실험결과	42,43
그림 33. 단층 박막 시편 (#2-#3) 3차원 영상 측정결과	44
그림 34. 한국표준과학연구원(KRISS)에서 제공한 표준시편	45
그림 35. (a) 2층 박막 시편 정보 (b) 2층 박막 실제 시편	45
그림 36. (a) Photometric 영상타원계측기 영상 소자에서의 2층 박막 측	

정 영역 (b) 2층 박막(Cr-ZTO-IZTO)시편 3차원 영상 측정결과 .. 46

ABSTRACT

Spectral imaging ellipsometry for measuring 3D film thickness profiles

By Yong Bum Seo

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

As the rapid developments of semiconductor, display, and LED industries, thin film technology which is a key issue in these fields has become increasingly important. Particularly, in the semiconductor and display fields, the thin film in the manufacturing process has various thicknesses from μm to nm and the thickness of the thin film is becoming thinner in order to make the product smaller. Furthermore, the structure of the thin film having nm thickness is made more complicated. And it is being utilized in various forms in accordance with the rapid development of manufacturing technology in today's several fields. It is expected that the utilization will gradually increase. So the technique for precisely measuring and inspecting geometrical dimensions and material properties of these film layers has been attractive in order to manufacture such thin film structures with much more attention. A superior approach of the these is an ellipsometry that obtains the film thickness profiles of the film layers. This technique has been reported to have a repeatability of less than 0.1 nm and widely used to measure film

thicknesses. The principle of ellipsometry uses the polarization change between the incident and reflected lights on the specimen. However, the typical ellipsometry focuses on not an area measurement but a point measurement, which is not enough to reconstruct 3D film thickness profiles.

In this investigation, I describe the imaging ellipsometric methods to measure the 3D thickness profiles of a multi-layered film. In order to measure 3D profile at once, an imaging technique is combined with the ellipsometry. I adopt a low magnification imaging lens approximately 1x to extend the measuring area. And two kinds of ellipsometry techniques (null imaging ellipsometry and photometric imaging ellipsometry) are implemented and compared in this thesis. The whole system of two type imaging ellipsometry was constructed as the Polarizer - Compensator(quarter wave plate) - Specimen - Analyzer (PCSA) type. And the calibration of each imaging ellipsometry is essential for measurement to know incident angle for specimen and the rotation angles of the optical components accurately. It was performed with two steps; One is the hardware calibration by hand. The other is the software calibration which uses the computer program(matlab) to confirm the accurate variables that are an incident angle and rotation angles of the polarizer and the analyzer.

In the null imaging ellipsometry, I used a laser diode with a monochromatic wavelength as the source. Then the refractive index of the silicon (Si) wafer was measured and the thickness of the single layer film were measured in 3D. However, this method has the disadvantage that the measurement time is very long. So, to overcome this limitation, a photometric imaging ellipsometry was introduced.

In the photometric imaging ellipsometry, I used the monochromatic light transmitted through the optical filter with the broadband light source in order to measure the multi layers of film structure. And I measured the 3D profiles of the single layer and the multi layers of thin films. Thereafter, the

certificated reference materials (CRMs) for the single layered film structure provided in KRISS were successfully measured by photometric imaging ellipsometry and the repeatability for 15 consecutive measurements was less than 0.5 nm.

Key words : Multi-layered film, Imaging ellipsometry, 3D thickness profile

제1장 서론

제1절 연구 배경

최근 반도체, 디스플레이, LED, 태양전지 등 IT 및 NT, 에너지 산업 분야가 급속하게 발전함에 따라 제조에 있어 핵심이 되는 박막 기술이 점차 중요해지고 있다. 특히 반도체 및 디스플레이 분야에 있어 제조 공정상의 박막은 수 μm 에서 수 nm 에 이르기까지 다양한 두께로 패턴이 형성되고 있고, 또한 제품의 소형화를 위해 박막 두께는 더욱 얇아지는 추세이다. 이와 함께, 박막 구조물은 제품의 다양한 기능 및 고성능을 위해 그림 1과 같이 다층으로 적층되고, 그 구조 또한 매우 복잡하다.[1-3]

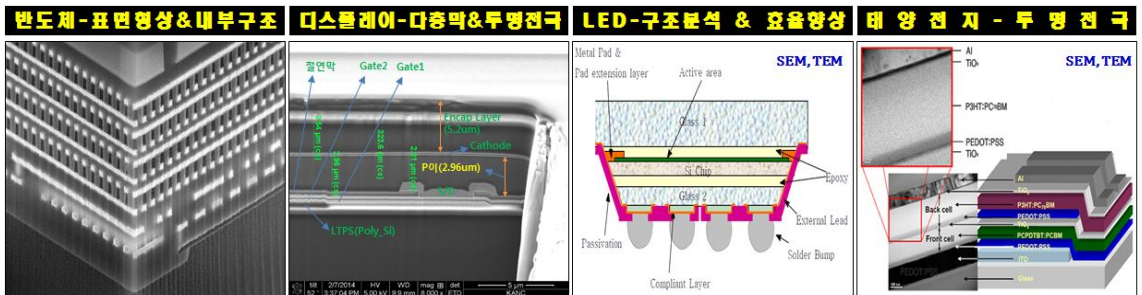


그림 1. 산업 분야에 따른 적층형 박막 구조물

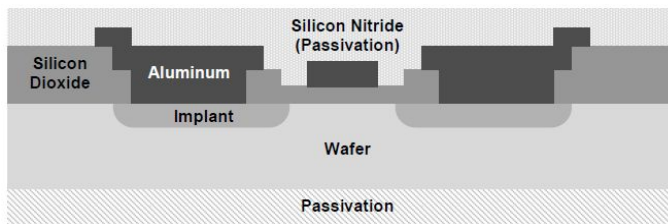


그림 2. 반도체 칩의 단면 구조

반도체 분야에서 고집적도 회로를 구성하기 위해 그림 2와 같은 박막 구조물은 필수적이며,[4] 산업계에서는 이러한 박막 구조물을 제조하기 위해 여러 층으로 겹겹이 쌓아 올려 패터닝을 제작하는 식각(Etching)과 마이크로미터 이하에 칩 제조를 위한 CMP(Chemical Mechanical Polishing)[5-6] 그리고 초미세 기계구조물을 만드는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 등의 다양한 공정들이 사용되고 있다. 이러한 제조 공정에서는 설계된 대로 박막의 구조를 제조해야 하므로 정밀하게 공정 조건을 설정하는 것이 가장 중요하며 또한 이를 검사 측정하기 위한 기술이 필수적으로 요구된다.

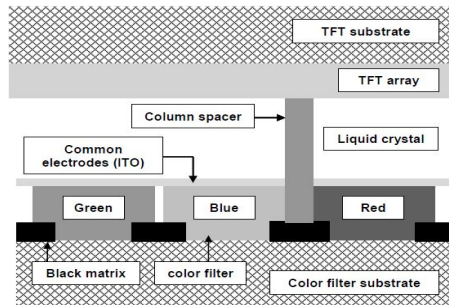


그림 3. 평판 디스플레이의 단면 구조

또한, 디스플레이 산업에서도 그림 3과 같이 다양한 형태의 박막 구조물이 활용되고 있고, 이러한 박막 구조물은 LCD, LED 뿐만 아니라 최근 들어 주목받고 있는 OLED에서도 필수적인 요소로 자리매김하였다.[7,8] 특히, 디스플레이 분야의 박막 구조물은 넓은 기판 위에 기존의 무기막과 더불어 유기막이 증착되고 있고, 또한 수 nm 수준의 미세 박막이 다층으로 구성되는 등 그 구조가 더욱 복잡해지고 있다. 그래서 이러한 박막 구조물의 안정적인 생산 및 생산성 증대를 위해서는 박막 측정/검사 기술을 토대로 제조 공정을 제어해야 한다.

이처럼 오늘날의 첨단 분야에서 박막 구조물은 제조 기술의 비약적인 발전에 따라 다양한 형태로 활용되고 있고, 점차 그 활용도는 높아질 것으로 예상된다. 그리고 이러한 박막 구조물들의 제조를 위해서는 이를 정밀하게 측정/검사하는 기술이 크게 주목되고 있다. 물론 응용 분야에 따라 개발되는 박막 구조물에서 박막의 물질이나 두께,

구조는 각각 다른 양상을 보이지만, 이들 박막 구조물의 전체적인 제조, 개발 경향은 얇은 박막, 복잡한 형상을 가지는 적층형 구조로 되어 있기 때문에 이러한 특징들을 모두 분석할 수 있는 박막 측정, 분석 기술이 요구된다.

일반적으로 박막의 두께 및 형상을 측정하는 박막 구조 분석 기술로는 크게 파괴(Destructive)와 비파괴(Non-Destructive) 방법으로 분류할 수 있다. 파괴 방법은 접촉식(Contact)방법과 더불어 전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy)과 투과전자현미경(AFM, Atomic Force Microscopy)이 사용되고 있고, 이러한 방법들은 표면 형상 패턴의 높이를 고 분해능으로 측정 가능할 뿐 아니라 박막의 두께 및 측면 형상까지 측정이 가능한 장점이 있다. 하지만 측정을 위해 많은 시간이 소요되는 동시에 분석을 위한 사전작업이 요구되며 측정 시 시편의 손상이 발생하는 등의 단점이 있어 [9] 현재 산업계에서 요구하는 현장적용 박막 구조 분석 방법으로는 효율성이 떨어진다. 한편, 비파괴 측정 방법은 빛을 이용한 광학식 측정법이 주를 이루며, 그 종류로는 간섭계(Interferometry), 반사광측정법(Reflectometry) 그리고 타원계측기(Ellipsometry) 등이 있다. 이들 3가지의 광학식 측정법은 빛을 이용하기 때문에 접촉식 방법과 다르게 시편에 영향을 미치지 않고 빠른 측정이 가능한 장점을 보인다.

본 논문에서는 광학식 박막 측정법 중의 하나인 타원계측기 방법을 이용한다. 산업계의 요구에 따른 다층 박막 구조물을 3차원으로 측정, 분석하기 위해 영상타원계측기(Imaging Ellipsometry)에 대한 연구를 진행한다. 얇은 박막의 두께를 정밀하게 측정하기 위해 빛의 편광 상태 변화를 이용하는 타원계측기의 장점과 박막 구조물의 복잡한 형상을 측정하기 위한 이미징 기법을 결합한 영상타원계측기를 개발하고, 이를 활용하여 산업적 수요에 맞는 박막 검사/측정을 수행한다.

제2절 연구 현황

박막 측정을 위한 광학식 측정법은 과거 많은 연구가 진행되었으며, 이들 연구는 측정 원리 및 구현 방법에 따라 다음과 같이 크게 분류할 수 있다.

- 백색광 간섭계(White Light Interferometry)
- 반사광측정법(Reflectometry)
- 타원계측기(Ellipsometry)

1. 백색광 간섭계(White Light Interferometry)

백색광 간섭계는 단색광을 사용한 간섭계의 문제점인 위상 모호성을 극복할 수 있는 장점을 가지기 때문에 표면 형상 분야에서 많은 연구가 진행되었다. 백색광 간섭계는 주사 방식에 따라 백색광 주사 간섭계(White Light Scanning Interferometry)[10-12]와 분산 백색광 간섭계(Dispersive White Light Interferometry)로 나눌 수 있다.[13-15]

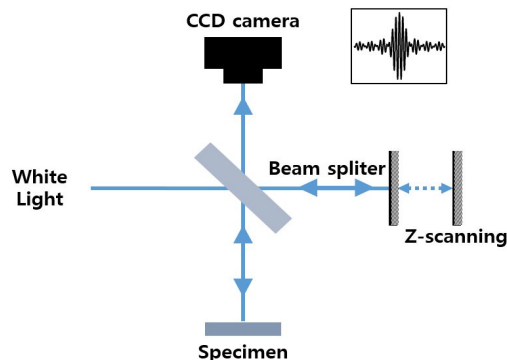


그림 4. 백색광 주사 간섭계 개략도

이 중에서 백색광 주사 간섭계는 그림 4와 같이 광원으로 텅스텐 - 할로겐 (Tungsten-Halogen) 램프나 제논(Xenon) 램프와 같은 넓은 스펙트럼을 갖는 백색광을 사용하고,[16,17] 간섭계의 광경로가 일치하는 구간에서 간섭 신호 획득이 가능하다

는 특징으로 측정 시편의 형상을 측정한다. 또한, 백색광 주사 간섭계는 박막의 두께를 측정하기 위한 연구에도 활용되어, 박막에 의한 위상(Phase)의 비선형성으로부터 박막 구조물의 표면 형상 및 박막의 두께를 측정한 연구가 보고되었다. 백색광 주사 간섭계를 이용한 박막 측정은 3차원 측정이 가능한 장점과 복잡한 형상을 동시에 측정한다는 특징을 가지고 있으나, 주사할 때 발생하는 구동 오차 및 분석에서 필연적으로 나타나는 위상 오차들로 인해 100 nm 이하의 박막에 대해서는 측정의 정밀도가 나빠지는 단점을 가진다.[18]

한편, 1994년에 J. Schwider와 U. Schnell에 의해서 처음으로 제안된 분산 백색광 간섭계는 간섭 신호를 분광기를 통해 분광시켜 파장별 간섭 신호를 획득함으로써 거리 및 두께를 측정하는 방법으로 그림 5와 같이 구성된다.[19,20] 분산 백색광 간섭계는 한 번의 측정으로 거리를 측정할 수 있는 장점이 있어 백색광 주사 간섭계와 비교하여 측정시간이 빠르다는 장점을 갖고 있다. 하지만 분산 백색광 간섭계는 분광기의 사용으로 인해 측정 시편의 3차원 측정에 한계를 가지며 이를 위해서는 횡 방향의 구동기를 사용해야 한다. 이와 동시에, 박막 측정 시 최소 측정 영역 문제로 인해 미세 박막 측정에 한계가 발생하며,[21] 이를 개선하기 위한 최적화 알고리즘의 적용에서도 백색광 주사 간섭계에서와 같이 분석에서 발생하는 위상 오차로 인해 미세 박막 측정에 한계를 보인다.

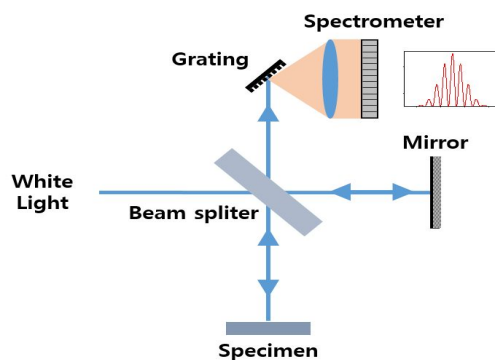


그림 5. 분산 백색광 간섭계 개략도

2. 반사광측정법(Reflectometry)

반사광측정법은 그림 6과 같이 넓은 스펙트럼을 가지는 광이 박막 구조물에 수직으로 입사하여 반사하는 광을 파장에 따라 획득하고 이를 수학적으로 해석함으로써 박막의 두께 정보를 측정하는 방법이다. 반사광측정법은 이론적으로 측정 물질의 복소굴절률인 $N(n + ik)$ 를 알고 있을 때 이를 통해 두께 계산이 가능하며, 물질의 굴절률은 Cauchy 방정식, Sellmeier 방정식 등의 굴절률 모델을 사용하여 간접적으로 계산할 수 있다.[22,23] 반사광측정법은 일반적으로 미세 박막을 측정하기 위한 타원계측기에 비해 비교적 두꺼운 박막 측정에 주로 활용되고 있으며 사용법이 간편하고 빠르다는 장점이 있다. 또한, 대물렌즈를 이용함에 따라 아주 좁은 부위의 측정이 가능하므로 미세 패턴 및 다양한 패턴을 갖는 두께를 측정할 수 있다.[24] 반사광측정법과 타원계측기는 시편에 빛이 반사함으로써 인해 발생하는 광량 변화를 측정함으로써 박막의 특성을 확인한다는 면에서 공통점을 갖는다. 하지만 반사광측정법은 타원계측기에 비해 접근 가능한 정보량이 부족하여 정밀도가 낮고 일반적으로 점 측정 방식이 사용되기 때문에 넓은 영역을 측정할 수 없는 한계점을 가진다.

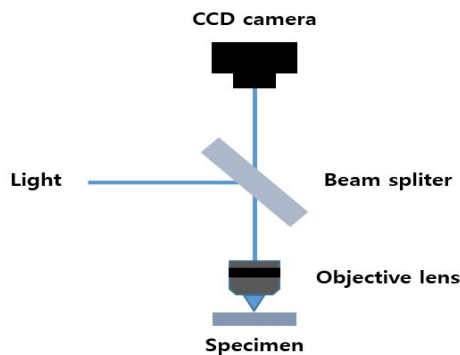


그림 6. 반사광측정법 개략도

3. 타원계측기(Ellipsometry)

타원계측기는 시편으로 입사되는 빛의 편광 방향과 반사되는 빛의 편광 변화를 이용하여 시편의 광학적 정보(두께 및 굴절률)를 측정하는 박막 두께 측정기술이다.[25-27] 상대적인 위상 차이, 빛의 세기만으로 측정할 수 있으므로 박막 측정에 있어서 효과적인 분석 기술이다. 1887년 Drude에 의해 박막에서 반사된 빛의 위상이 변화하는 현상이 발견된 이후 박막 관련 연구에 사용되기 시작하였다.[28] 타원계측기의 이론적인 식들을 이용한 박막 모델값과 빛의 편광 상태 변화를 통한 측정 데이터 값 Δ, Ψ 를 분석함으로써 박막 두께의 측정에 사용됐다. 그리고 p-편광과 s-편광의 위상 차이를 나타내는 값은 특히 민감하게 변화하므로 박막의 두께 측정에서 우수한 성능을 나타낸다. 초기에 개발된 타원계측기는 Null 타원계측기로 단파장의 광원을 사용하고 광학부품들 회전으로 인해 시편에서 반사되는 빛이 소멸하는 조건을 찾아 시편의 정보를 측정하는 원리이다. Null 타원계측기는 정밀도가 좋지만 측정 속도가 느린 단점으로 인하여 그동안 매우 제한적으로 사용되었으나,[29] 오늘날 데이터의 고속 처리가 가능해지자 단파장 회전형 Null 타원계측기가 개발되어 박막측정에 응용되고 있다.[30-38] 한편, 타원계측기는 그동안 많은 연구가 진행되었고 다양한 파장의 광원을 사용하는 분광 타원해석법(Spectroscopic Ellipsometry), 입사각을 변화시켜 측정하는 다중입사 분광 타원해석법(Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry) 등 다양한 타원계측기가 개발되어 박막 측정 분야에 활용되고 있다. 또한 NA(Numerical Aperture)가 크고 높은 배율의 대물렌즈를 이용한 다중입사 타원편광법을 구현한 마이크로 타원계측기에 대한 연구도 수행된 바 있다.[39,40] 마이크로 타원계측기는 여러 개의 입사각이 각각 편광 변화가 다르기 때문에 구동부 없이 한 번에 측정이 가능한 특징이 있다.

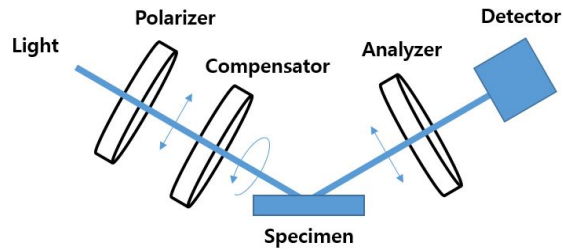


그림 7. 타원계측기 개략도

일반적으로 타원계측기는 다른 광 측정 기술에 비해 측정 환경에 있어서 융통성을 가지며, 높은 정밀도와 초박막 민감도(0.1\AA)를 갖는 비파괴, 실시간, 비접촉식 광 측정법이다. 또한 박막의 두께와 복소굴절률(Complex Refractive Index) 및 산화막의 박막 성장, 박막 표면의 물질변화, 표면 거칠기 등의 분석이 가능하여 반도체, 디스플레이, 태양광 전지 분야인 박막 특성 연구에 주목을 받고 있다. 그러나 타원계측기 역시 반사광측정법과 유사하게 점 측정 방법을 이용하기 때문에 면적 측정에 있어서 한계점을 가진다.

제3절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 여러 산업 분야에서 요구하는 박막 구조물의 3차원 측정 및 분석을 위한 측정기술에 대한 연구를 진행한다. 이를 위해 타원계측기의 원리를 파악하고, 기존의 방법들의 한계를 보완하기 위한 영상타원계측기를 제안하여 가능성을 검증한다. 그래서 본 연구의 목표는 영상기법을 활용한 대면적 영상타원계측기를 제안하고, 이를 설계, 제작하여 다양한 박막 구조물을 측정하는 것이며, 그리고 이를 통해 산업계에 적용 가능한 기술을 개발하는 것이다.

본 연구의 목표 달성을 위한 세부 연구 내용은 다음과 같다.

- 타원계측기의 기본 원리 및 박막 분석 이론
- 타원계측기의 단점을 보완하기 위해 영상타원계측기 제안
- Null 영상타원계측기 이론, 검증, 실험 및 결과 분석
- Photometric 영상타원계측기 제안
- Photometric 영상타원계측기 이론, 검증, 실험 및 결과 분석

본 논문에서는 제2장에서 타원계측기의 이론, 제안한 영상타원계측기의 간략한 설명과 박막 분석 이론에 대한 설명, 제3장 두 종류의 영상타원계측기에 대한 교정시험 및 실험결과 분석, 제4장 고찰 및 논의, 마지막으로 제5장은 결론으로 구성되어 있다.

제2장 영상타원계측기

제1절 타원계측기의 기본 원리

1. 타원계측기의 기본적인 원리 및 이론

일반적으로 선형 등방성 매질 내에서 진행하는 단색 광파의 전기장 E 는 Maxwell 방정식으로부터 다음과 같이 표현된다.

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

(ω : 각속도, c : 진공 중 빛의 속도)

여기서 N 은 복소굴절률(Complex Refractive Index)을 의미하며, 일반적인 매질의 굴절률(Refractive Index, n)과 소광계수(Extinction Coefficient, k)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = n + ik \quad (2)$$

또한, N 은 광학적 상대 복소 유전함수(Relative Dielectric Constant, ϵ)로 식(3)과 같이 나타낼 수 있고 이들의 관계를 통해 매질의 굴절률과 소광계수는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = N^2 \quad (3)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_1 + \frac{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad , \quad k = \sqrt{-\epsilon_1 + \frac{\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad (4)$$

이때, 타원계측기의 광원에서 편광된 빛이 매질에 입사하는 경우, 측정 시편에서 반사하는 빛은 입사하는 빛의 입사각 및 시편 매질의 굴절률, 박막의 두께에 따라 편광 상태가 달라진다. 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

먼저, 광원에서 시편에 입사하는 빛은 편광 상태에 따라 p-파와 s-파로 구분할 수 있고(입사면에 대해 평행한 성분을 p-로, 수직인 성분을 s-로 표시), 각각의 전기장은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{ip} = |E_{ip}| \cos(\omega t - \delta_{ip}) \quad , \quad E_{is} = |E_{is}| \cos(\omega t - \delta_{is}) \quad (5)$$

($\delta_{ip(is)}$: $E_{ip(is)}$ 의 초기 위상)

이후, 시편에서 반사된 빛은 식(5)에서 표현한 편광에 따른 전기장에서 각각 진폭 및 위상이 변화하게 되고, 결국 반사된 빛은 서로 다른 위상과 진폭을 가진 p-파와 s-파가 중첩되어 일반적인 타원편광을 가지게 된다. 이 경우, p-파와 s-파에 대한 각각의 반사계수(Reflection Coefficient, r)를 정리하면 다음과 같다.

$$r_p = |r_p| e^{i\delta_p} = \left| \frac{E_{rp}}{E_{ip}} \right| e^{i(\delta_{rp} - \delta_{ip})} \quad , \quad r_s = |r_s| e^{i\delta_s} = \left| \frac{E_{rs}}{E_{is}} \right| e^{i(\delta_{rs} - \delta_{is})} \quad (6)$$

($\delta_{ip(s)}$: 입사파에 대한 위상, $\delta_{rp(s)}$: 반사파에 대한 위상)

또한, 이들 반사계수들의 복소반사계수비(ρ)는 식(7)로 표현할 수 있다.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| e^{i(\delta_p - \delta_s)} = \tan\Psi \cdot e^{i\Delta} \quad (7)$$

($\tan\Psi$: 반사계수 p-파와 s-파의 크기 비, Δ : 반사계수 p-파와 s-파의 위상차)

입사각이 0° 인 경우, 광학적 등방성을 가진 시편의 측정에 있어서 반사계수는 같아지기 때문에 식(7)의 두 각(Δ, Ψ)은 의미가 없게 된다. 그래서 타원계측기에서는 p-파와 s-파에 대한 반사계수비를 정의하기 위해, 입사하는 빛은 시편에 대한 입사각도를 항상 가지고 있어야 한다. 또한, 복소반사계수비는 매질의 굴절률과 박막의 두께에 따라 달라지므로, 측정된 타원계측기 각으로부터 박막의 정보를 얻을 수 있다. 타원계측기는 덩이 물질, 단층 박막 그리고 다층 박막 등의 다양한 시편에 대해 적용할 수 있는 특징이 있고, 덩이 물질의 경우에는 측정 시편 매질의 굴절률을, 박막 시편에 대해서는 박막의 굴절률 및 두께를 측정한다. 각각의 경우에 대한 타원계측기의 측정 이론은 제 2절에서 자세히 다루도록 한다.

2. 타원계측기의 분류

타원계측기는 응용분야에 따라 그에 맞는 기능과 특성을 강조하다 보니 수많은 종류가 있으나, 전체적으로 사용하는 광원에 따라 단과장 및 다과장 타원계측기로 구분할 수 있다. 단과장 타원계측기의 경우, 경제적이고 측정 속도가 빠른 이점이 있어 실시간 측정에 유용하다. 반면, 다과장 타원계측기는 시편의 정보(굴절률 및 두께) 측정 및 분석에 있어서 여러 과장을 동시에 이용하기 때문에 측정값에 대한 신뢰도가 크고 다층 박막과 같이 구해야 할 미지수가 많은 경우에도 적용할 수 있으며 물질의 과장 영역에 따른 광특성을 측정할 수 있으므로 광전자적 구조를 연구할 수 있다. 이와 더불어 타원계측기는 측정 원리 및 방식에 따라 크게 3가지로 나눌 수 있는데, 소광점을 찾아 시편을 측정하는 Null 타원계측기, 편광에 따른 빛의 변화량을 이용하여 측정 물질을 분석하는 Photometric 타원계측기 그리고 간섭현상을 이용한 Interferometric 타원계측기가 사용되고 있다. 본 논문에서는 가시광 영역대의 빛을 이용하여 박막을 측정하는 가시광 대역의 타원계측기에 대한 연구를 수행하기 때문에 적외선 영역에서 널리 활용되는 Interferometric 타원계측기보다 Null 타원계측기 및 Photometric 타원계측기에 대해 초점을 맞추어 이론을 정리하고, 이를 바탕으로 본 연구의 핵심적인 내용인 영상 타원계측기에 대해 설명한다.

2.1 Null 타원계측기

Null 타원계측기는 단과장의 광원과 회전되는 광학부품을 이용해 시편에서 반사되는 빛이 완전히 소멸하는 조건을 찾아 타원계측기 각 (Δ, Ψ)를 분석하여 박막의 두께 측정하는 기술이다. Null 타원계측기는 광학부품의 위치에 따라 다양한 형태로 구성될 수 있으나 기본적인 분석 방법은 서로 유사하다. 최근에 사용되는 광학 구성으로는 그림 8과 같이 구성된 편광기(P_R)-위상지연기(C)-시편(S)-검광기(A_R) P_RCSA_R type이 있다. P_RCSA_R type의 Null 타원계측기에서는 시편에서 반사되는 빛이 선형편광이 되도록 편광기와 위상지연기의 회전각이 조합을 이루어야 하고, 검광기의 편광축이 반사되는 빛의 편광과 수직이 되도록 회전하여 검출부에 입사되는 빛이 소광된다. 그리고 이때의 편광기, 위상지연기, 검광기의 회전각도를 통해 시편을 분석한다. Null 타원계

측기는 비교적 역사가 깊고 높은 정밀도를 가진다는 장점이 있으나 측정을 위한 변수들의 정보량이 적을 뿐 아니라 측정 속도가 수 분 이상 걸린다는 가장 큰 단점을 갖고 있어 사용되는 분야가 매우 제한적이다. 이러한 단점을 보완하기 위해 편광기와 검광기에 회전 모터를 장착하는 등의 자동식 Null 타원계측기가 개발되었으나 여전히 소광점을 검출함에 있어 측정 속도에 지속적인 단점을 갖고 있다. 하지만 Null 타원계측기는 덩이 시편 및 단층 박막 시편 등의 비교적 단순한 응용 및 영상타원계측기 분야에서 높은 정확도와 정밀도 때문에 현재 산업계에서 많이 이용되고 있다.

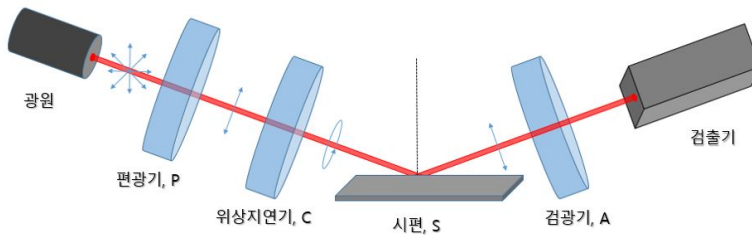


그림 8. 타원계측기 구성도 (PCSA type은 회전하는 편광소자에 따라 $PrCSAr$ type과 $PCrSA$ type으로 각각 표현됨)

2.2 Photometric 타원계측기

Null 타원계측기의 단점을 보완한 Photometric 타원계측기는 최근에 가장 널리 사용하는 타원계측기로 시편의 정보를 분석하기 위해 연속적인 편광 변화를 주고 이에 따른 광량 변화를 통해 타원계측기 각 (Δ, Ψ)을 분석 후 박막의 두께를 측정하는 기술이다. Photometric 타원계측기 역시 구성에 따라 많은 종류가 있으나 대표적인 구성으로 위상변조(Phase Modulation) 방법과 그림 8과 같이 $PCrSA$ type 2가지의 방법을 많이 이용하는 추세이다. 위상변조 방법은 위상을 변조시키기 위해 기계적인 방법을 사용하지 않고 전자적으로 EOM(Electro-Optic Modulator) 또는 LC(Liquid Crystal)을 사용함으로써 측정 속도가 수 분 또는 수 십초 걸리는 Null 타원계측기에 비교하면 굉장히 빠른 장점이 있으나 변조기의 광특성이 온도에 민감하여 정밀도가 나빠지는 단점이 있다. 한편, $PCrSA$ type은 고정된 편광기와 검광기, 회전하는 위상지연기(1/4 파장

지연판, Quater Wave Plate)를 통해 편광 변화를 발생시키고 이때 측정된 광량 변화를 분석하여 박막의 두께를 측정하는 원리이며, 이때 편광 변화는 사용되는 광원, 시편의 두께 그리고 박막의 굴절률에 의해 각각 달라진다. 현재 산업계에서는 Photometric 타원계측기가 고정밀도를 가지며 측정 속도가 굉장히 빨라서 실시간으로 측정을 해야 하는 반도체 및 디스플레이 분야에서 많이 이용되고 있다.

2.3 영상타원계측기

위에서 언급한 많은 종류에 타원계측기는 일반적으로 단색광원을 이용한 점 측정 방법을 이용한다. 그리고 좀 더 넓은 영역을 측정하기 위해서 점 측정이 아닌 라인 측정 방법으로 진보되었고 검출부에서 파장에 따른 결과를 라인에 대해서 획득하기 위한 이미징 분광기를 사용한 Spatially Resolved Ellipsometry의 연구가 진행되었다. 이 방법은 여러 파장에 대한 결과를 획득하기 때문에 신뢰성이 높다. 더 나아가서 시편에 미세한 면적의 박막 두께 균질성과 미세 패턴을 측정하는 데 사용되는 Micro Imaging Ellipsometry가 연구가 진행되었다. 이러한 타원계측기들은 대면적을 측정하기 위해 한계점들이 존재한다. 첫 번째로는 대면적을 측정하기 위해 구동기를 사용해서 결과를 획득해야 하므로 구동 오차를 갖는 단점을 갖고 있다. 두 번째로 영상타원계측기는 2.1 절에서 언급한 Null 타원계측기를 기반으로 사용되고 있기 때문에 Null 타원계측기 자체만으로 측정시간이 오래 걸리는 단점을 갖고 있다. 그래서 본 논문에서 사용한 영상 타원계측기는 저배율 렌즈를 이용하여 미소면적이 아닌 대면적을 빠른 시간 안에 측정하고자 Photometric 타원계측기를 기반으로 한 Photometric 영상타원계측기를 도입하였다.

제2절 박막 분석 이론

1. 덩이(Bulk) 표면에서 측정 이론

‘덩이(Bulk)’란 보통 표면층이 없는 두꺼운 기판 그 자체, 박막이 도포되어 있더라도 매우 두꺼워서 이를 박막으로 판단하기 불가능한 경우, 박막이 금속의 물질로 코팅이 되어 빛이 투과하지 못하는 경우를 나타낸다. 덩이 표면에서 p-파와 s-파에 대한 반사는 식(8)과 같이 Fresnel 반사계수(r_p, r_s)로 나타낼 수 있다.

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{N_2 \cos \theta_1 - N_1 \cos \theta_2}{N_2 \cos \theta_1 + N_1 \cos \theta_2}, \quad r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{N_1 \cos \theta_1 - N_2 \cos \theta_2}{N_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2} \quad (8)$$

위의 식에서 N_1 과 N_2 는 입사매질과 측정매질의 복소굴절률, 그리고 θ_1, θ_2 는 각각 입사각과 굴절각이며 Snell 법칙으로부터 유도된다. 식(8)에서 알 수 있듯이, p-파와 s-파에 대한 Fresnel 반사계수는 각각 복소굴절률로 인하여 복소수인 동시에 반사계수의 크기도 편광에 따라 서로 다르다. 또한, Fresnel 반사계수는 시편에 대한 빛의 입사각에 따라 달라지는 특징이 있고, 수직입사의 경우에는 입사면이 정의되지 않으므로 p-파와 s-파의 구분이 없게 되어, 편광 상태와 상관없이 반사계수가 동일해진다. 한편, 복소굴절률의 소광계수 $k=0$ 인 물질(유전체)의 경우, Fresnel 반사계수는 실수로 표현할 수 있다. 일반적으로 r_p 와 r_s 는 입사각(θ_1)이 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 일 때만 서로 다른 값을 가지며, 입사각에 따른 p-파와 s-파에 대한 반사율(Reflectance)은 그림 9처럼 s-파의 반사율이 p-파보다 항상 크다는 것을 알 수 있다.

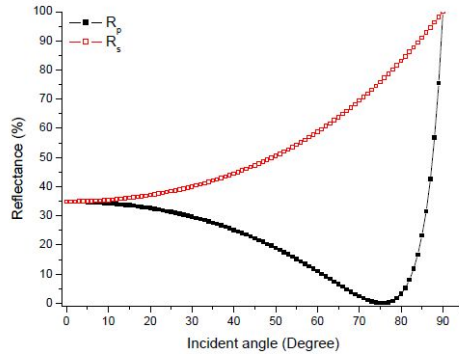


그림 9. Si wafer에서 입사각도에 따른 p-파와 s-파의 비율

식(8)에서 나타낸 시편에 대한 반사계수를 이용하여 타원계측기의 측정값인 Δ, Ψ 를 표현하기 위해 식(8)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = |r_p| e^{i\delta_p} \quad , \quad r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = |r_s| e^{i\delta_s} \quad (9)$$

여기에서 δ_p, δ_s 는 시편에서 빛이 반사 후 발생하는 위상 변화를 나타내며, 식(9)을 이용하여 복소반사계수비 ρ 를 표현하면 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \left| \frac{r_p}{r_s} \right| e^{i(\delta_p - \delta_s)} \quad (10)$$

위의 식으로부터 타원계측기의 측정값 Δ, Ψ 은 식(12)-(14)로 표현된다.

$$\rho = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (12)$$

$$\Delta = (\delta_p - \delta_s) \quad (13)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left| \frac{r_p}{r_s} \right| \quad (14)$$

타원계측기의 측정값 중의 하나인 Δ 는 같은 초기 위상을 가지고 입사하는 p-파와 s-파가 반사 후에 발생하는 위상 변화에 따른 상호간의 위상차를 의미하고, $\tan \Psi$ 는 반사계수의 크기 비를 나타낸다. 이때, 덩이 물질의 표면에서 빛이 반사하는 경우, $|r_p| < |r_s|$ 이고 위상차는 0° 에서 180° 사이의 값을 가지게 되어 타원계측기는 다음과 같은 측정 범위를 알 수 있다.

$$0^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ, \quad \tan \Psi = \frac{r_p}{r_s} \leq 1 \quad \text{또는} \quad \Psi \leq 45^\circ \quad (15)$$

한편, 타원계측기로 덩이 물질을 측정하는 경우 식(8)과 식(10)을 이용하면 추가적인 분석 과정 없이 덩이 물질의 광학적 성질을 유도할 수 있다. Snell의 법칙과 식(8)을 이용하여 복소반사계수비 ρ 를 다시 나타내면,

$$\rho = \frac{\sin^2 \theta - \left(\frac{N^2}{N_a^2} - \sin^2 \theta_1 \right)^{1/2} \cos \theta_1}{\sin^2 \theta + \left(\frac{N^2}{N_a^2} - \sin^2 \theta_1 \right)^{1/2} \cos \theta_1} \quad (16)$$

이를 정리해 보면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$N^2 = N_a^2 \sin^2 \theta \left[1 + \tan^2 \theta \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \right] \quad (17)$$

여기서 N_a 는 입사 매질인 공기의 복소굴절률을 나타낸다. 만약 공기의 복소굴절률을 1 이라고 가정하면, 식(17)로부터 시편의 복소굴절률 N 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \sin \theta \sqrt{1 + \tan^2 \theta \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2} = \tan \theta \sqrt{1 - \sin^2 \theta \frac{4\rho}{(1 + \rho)^2}} \quad (18)$$

따라서 덩이 물질의 경우는 측정한 복소반사계수비(ρ)로부터 물질의 굴절률을 분석과정 없이 직접 얻을 수 있다.

2. 단층 박막 측정 이론

단층 박막은 일반적으로 그림 10과 같이 기판 위에 단일 층의 박막이 도포되어 있는 구조로 전체 영역을 대기층, 박막, 기판으로 나눌 수 있다.

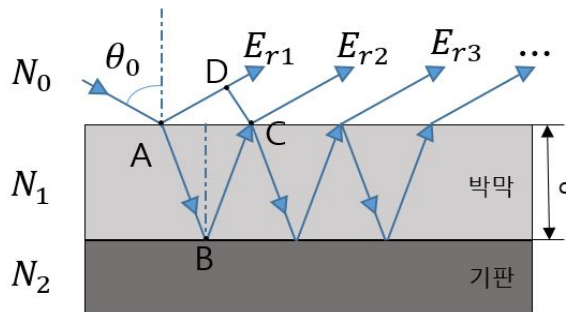


그림 10. 단일박막(대기층/박막/기판)의 광학적 모델

여기서 각 층의 복소굴절률은 공기는 N_0 , 박막은 N_1 그리고 기판은 N_2 로 나타내었다. 빛이 공기에서 두께가 d 인 박막에 임의의 각도 θ_0 로 입사할 때, 박막에서는 그림 10과 같이 박막 표면에서 반사한 빛과 박막을 투과한 후 기판에서 반사한 빛들이 발생하게 되며, 다중 반사에 의한 빛들 사이에는 박막의 두께 d 와 박막의 복소굴절률로 인한 위상 차이가 발생한다. 이때, 박막을 다중 반사하는 빛들 사이의 위상차(2β)는 빛들이 지나가는 광경로 차이에 의해 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$2\beta = 2K_1(\overline{AB} + \overline{BC}) - 2K_0\overline{AD} = \frac{4\pi d}{\lambda}(N_1 \cos \theta_1) \quad (19)$$

그래서 단층 박막에서 반사하는 빛은 그림 10과 같이 박막 내부에서 발생하는 반복적인 반사와 투과에 의해 발생하는 빛들의 합으로 표현되고, 이에 대한 반사계수는 각 경계면에서 유도되는 Fresnel 반사 및 투과 계수 및 식(19)에서 표현된 위상차를 이용하여 식(20)과 같이 무한급수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$r = r_{01} + t_{01}t_{10}r_{12}e^{-i2\beta} + t_{01}t_{10}r_{12}^2e^{-i4\beta} + \dots \quad (20)$$

이 무한급수를 정리하면, 식(21)과 같이 반사된 빛의 총합을 구할 수 있고

$$r = \frac{r_{01} + r_{12}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01}r_{12}\exp(-i2\beta)} \quad (21)$$

이를 p-파와 s-파에 대해 적용하면 각각의 반사계수를 식(22)와 같이 표현할 수 있다.

$$r_p = \frac{r_{01,p} + r_{12,p}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,p}r_{12,p}\exp(-i2\beta)}, \quad r_s = \frac{r_{01,s} + r_{12,s}\exp(-i2\beta)}{1 + r_{01,s}r_{12,s}\exp(-i2\beta)} \quad (22)$$

결국, 식(22)를 통해 단층 박막에 대한 타원계측기의 복소반사계수비에 대한 이론적 모델이 정립되고, 이러한 이론적 모델과 타원계측기에서 측정되는 값과의 비교를 통해 최적화의 과정으로 박막의 두께가 측정된다.

3. 다층 박막 측정 이론

기본적으로 다층 박막에 대한 이론적 모델은 단층 박막 이론으로부터 유도할 수 있다. 그래서 식(22)를 각 층에 대해 연속적으로 적용하면, 다층 박막 이론을 정리할 수 있으나, 이 경우 전체적인 수식 표현이 매우 복잡해진다. 이를 해결하기 위해 다층 박막 측정에서는 단층 박막에 대한 행렬인 경계면 행렬(Interface Matrix)과 층간 행렬(Layer Matrix)을 이용하여 다층 박막에 대한 Scattering 행렬을 구하고 이를 박막 두께 측정에 응용한다. 그림 12와 같이 다층 박막에 빛이 입사하는 경우, 각 경계면에서는 반사와 투과가 일어나고 박막 매질 내에서는 흡수와 위상 변화 등이 발생한다. 이들 현상을 각각 경계면 행렬(I)과 층간 행렬(L)로 나타내면, 전체 (n+1)개의 박막을 가지는 다층 박막에 대한 Scattering 행렬은 식(23)과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서 I_{jj+1} 은 j번째와 (j+1)번째 경계면 행렬이고 L_{j+1} 은 (j+1)번째 층을 지날 때 표현한 층간 행렬을 표현한다. 이 행렬들은 앞에서 정의한 Fresnel 반사계수 및 투과계수 등으로 식(24)와 같이 표현이 가능하다.

$$I_{jj+1} = \begin{pmatrix} 1 & r_{jj+1} \\ t_{jj+1} & t_{jj+1} \\ r_{jj+1} & 1 \\ t_{jj+1} & t_{jj+1} \end{pmatrix}, \quad L_j = \begin{pmatrix} e^{i\beta_j} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_j} \end{pmatrix} \quad (24)$$

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

$$\beta = \frac{2\pi d_j N_j \cos \theta_j}{\lambda} \quad (25)$$

이때 Scattering 행렬은 2×2 의 인자를 갖는데 p-파와 s-파 대한 Scattering 행렬을 각각 계산 후 반사계수 및 복소반사계수비를 구할 수 있다.

$$r_p = \frac{S_{21p}}{S_{11p}}, \quad r_s = \frac{S_{21s}}{S_{11s}} \quad (26)$$

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \frac{S_{21p}}{S_{11p}} \times \frac{S_{11s}}{S_{21s}} \quad (27)$$

그리고 단층 박막에서와 같이 다층 박막의 이론적인 값과 타원계측기의 실험값을 일치시키는 최적화가 진행된다면, 타원계측기를 통해 다층 박막 두께를 측정할 수 있다.

제3장 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 제안한 두 종류 Null과 Photometric 영상타원계측기를 검증하기 위해 다양한 시편의 3차원 박막 두께를 측정하는 실험을 수행하였다. 시편의 측정에 앞서 제안한 타원계측기의 Calibration을 위해 사용한 편광 부품의 회전각, 입사광의 입사각도, 시편의 정렬에 대한 측정을 수행하였으며, 이를 이용하여 구성된 영상타원계측기의 정밀도를 향상시켰다.

본 3장은 두 종류의 영상타원계측기의 구성 및 Calibration, 실험 내용을 기반으로 다음과 같이 세 단계로 나누어 구성되었다.

- Calibration
 - 하드웨어 Calibration
 - 소프트웨어 Calibration

- Null 영상타원계측기
 - Null 영상타원계측기 구성
 - Null 영상타원계측기 실험 및 결과

- Photometric 영상타원계측기
 - Photometric 영상타원계측기 구성
 - Photometric 영상타원계측기 실험 및 결과

제1절 Calibration

1. 영상타원계측기 Calibration

타원계측기는 광학부품들의 회전각과 시편에 대한 입사각도 등이 측정결과에 직접 영향을 미치기 때문에 이들을 정확히 측정해야 한다. 그래서 본 연구에서 구성된 영상타원계측기에서도 광학부품들의 회전각 및 시편에 입사되는 입사각도에 대한 Calibration 과정을 수행하였으며 전체적인 Calibration 과정은 다음과 같이 두 단계로 나누어 진행되었다.

- 하드웨어 Calibration 방법
 - 영상타원계측기의 입사각도 Calibration
 - 광학부품의 회전각도 Calibration
 - 영상소자에 결상 영역 Calibration
- 소프트웨어 Calibration 방법
 - 광학부품의 회전각도 및 입사각도

1.1 영상타원계측기 하드웨어 Calibration 방법

(1) 영상타원계측기의 입사각도 Calibration

타원계측기에서는 일반적으로 시편에 대한 입사각도로 반사하는 빛의 복소반사계수비가 최대가 되는 브루스터 각(Brewster's Angle)을 이용한다. 브루스터 각은 프레넬 계수에 의해 반사하는 빛에 대한 p-파와 s-파의 반사계수의 차이가 가장 커질 때의 조건으로, 브루스터 각으로 입사각도가 설정된 타원계측기는 측정 시편의 표면 상태에도 상당히 민감한 특징이 있다. 그러나 브루스터 각은 측정 시편마다 각각 다르므로 이를 매 측정 시 설정하는 것은 불가능하다. 그래서 실제로는 기준 시편 및 기저판(Substrate)으로 널리 사용되는 Si 웨이퍼(Silicon Wafer)의 브루스터 각도인 70° 가 타원 계측기의 입사각으로 사용된다. 본 영상타원계측기에서도 시편에 대한 입사각도로

70°를 사용하였고 이를 설정하기 위해 각도가 표시된 회전 스테이지를 이용하였다. 먼저, 광원부에서 그림 11 (a)처럼 광원과 광학부품들과의 광축을 일치시킨 이후에 빛의 진행 방향에 대해 측정 시편이 70°의 각도에 위치하도록 정렬하였으며 반사한 빛의 진행 방향에 대해 광검출부에 사용되는 광학부품들의 광축을 일치시켰다. 한편, 측정 시편의 정확한 정렬 및 교체 시 정렬 오차를 줄이기 위해 각도 조절이 가능한 스테이지를 추가로 구성하였으며 정렬 상태를 확인하기 위해 레이저 다이오드(LD, Laser Diode)와 아이리스(Iris)를 그림 11 (b)와 같이 사용하였다. 측정 시편의 종류에 따라, 구성된 영상타원계측기에 측정 시편을 교체할 때마다 최대 0.01° 정도의 각도 편차가 발생할 가능성이 있으므로 시편의 기울어진 각도에 대해 광 삼각법(Optical Triangulation)의 원리로 이를 확인하고 수동적으로 시편의 스테이지를 조절하여 이러한 정렬 오차를 최소화하였다.

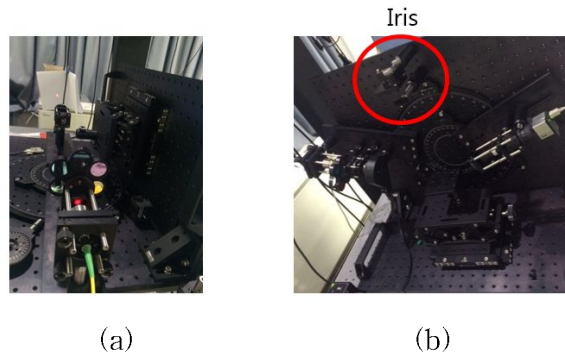


그림 11. (a) 광축 기준으로 광학부품들의 정렬 (b) Iris를 이용한 영상타원계측기 시편 스테이지 Calibration

(2) 광학부품의 회전각도 Calibration

타원계측기에는 편광기 및 위상지연기와 같은 편광 광부품들이 사용되며 이들의 편광 각도, 즉 부품들의 회전각도를 정확히 측정하고 이를 Calibration해야 한다. 본 연구에서 구성된 영상타원계측기 중에서 Null 영상타원계측기는 위상지연기가 고정되어 있고, 편광기와 검광기가 회전하면서 얻어지는 빛의 최소 점으로부터 시편의 광학적 정보를 획득하는 방법으로 구성되었기 때문에 고정된 위상지연기의 회전각도에 대한 Calibration이 매우 중요하다. 한편, Photometric 영상타원계측기는 편광기와 검광기가

고정되어 있고 위상지연기가 회전을 하여 측정 물질의 정보를 얻기 때문에 고정된 편광기와 검광기의 회전각도가 중요해진다. 먼저, Null 영상타원계측기에서 고정된 위상지연기의 회전각도는 45°로 설정하였으며 이를 위해 제조사에서 제공하는 Fast Axis 표시와 회전 스테이지의 각도 눈금을 이용하였다. 또한, Photometric 영상타원계측기에서는 편광기와 검광기의 투과 축(Transmission Axis)들이 서로 수직이 되도록 설정하기 위해서, 그림 12와 같은 Glan-Thompson 편광기를 편광 기준으로 Calibration을 수행하였다. 그림 13과 같이, 광원으로 단색광원을 이용하여 기준 편광기와 검광기의 투과 축들이 수직관계가 되도록 정렬하였으며, 이후 검광기의 투과 축을 기준으로 편광기의 투과 축이 수직이 되도록 각도를 조정하였다. 이때 편광기와 검광기의 회전각도는 각각 42°, -48°의 각도임을 확인하였다.

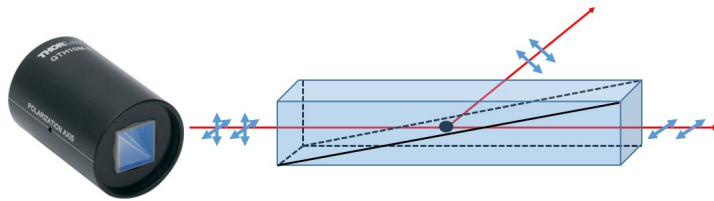


그림 12. Glan-Thompson 기준 편광기 및 원리

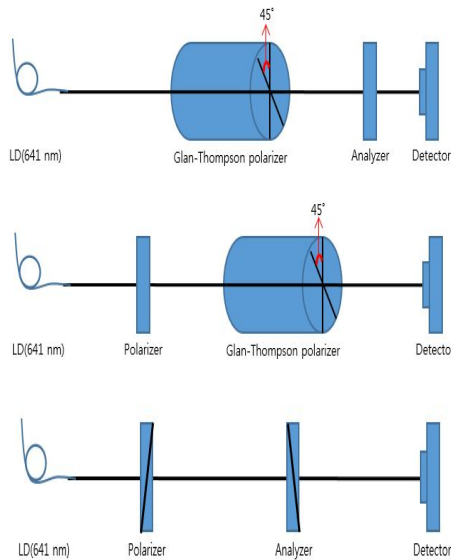


그림 13. 편광기와 검광기의 Calibration 방법

(3) 영상 소자 결상 영역 Calibration

본 영상타원계측기는 타원계측기와 영상기법을 결합한 시스템으로 측정 시편에 대한 결상이 매우 중요하다. 그러나 타원계측기는 구조상 시편을 광검출부의 광축에 정렬된 영상 소자에 결상시키는 것이 불가능하다. 시스템 구성을 자세히 살펴보면 시편이 결상 렌즈(Imaging Lens)의 광축과 기울어져 있음을 확인할 수 있고 이로 인해 결상면에서는 결상이 이루어지는 영역의 위아래로 초점이 흐려지는 현상이 발생한다. 이를 보완하기 위해 그림 14와 같이 결상에 있어 물체면과 렌즈의 주요면, 결상면의 연장선이 항상 한 점에서 일치하도록 하는 샤임플러그 원리(Scheimpflug Principle)을 이용하여 그림 15와 같이 물체와 영상 소자를 정렬하면 이러한 현상을 제거할 수 있다.

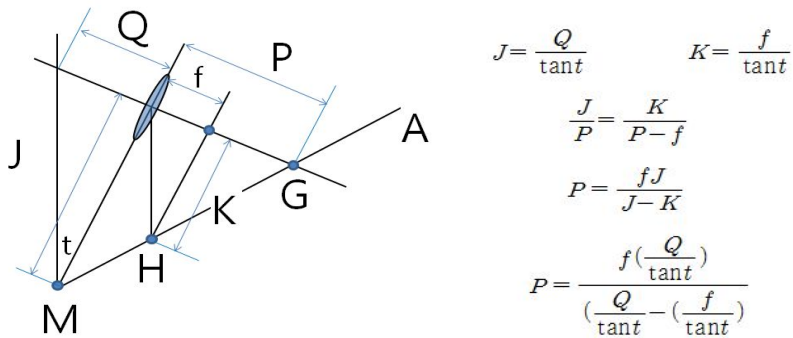


그림 14. 삼각 함수법을 이용한 샤임플러그 원리

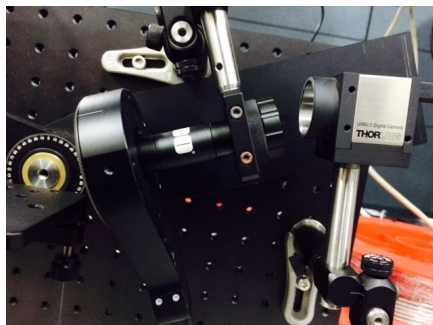


그림 15. 샤임플러그 원리를 적용한 광학 구성

그러나 이러한 샤임플러그 원리를 적용하여 영상 소자 전체 면에서 시편에 대한 이미지를 획득하더라도 렌즈의 수차 등에 의해 여전히 결상 영역 외에서는 영상이 흐려지는 현상이 발생할 수 있다. 그래서 또 다른 방법으로 영상 소자를 렌즈와 광축이 일치하도록 정렬한 후에 영상을 획득하여 측정 범위를 그림 16과 같이 제한할 수 있다. 이때 측정 영역은 렌즈의 DOF(Depth Of Field)와 삼각 함수법을 이용하여 계산되기 때문에 측정되는 영역의 범위가 작아지는 단점이 있으나 비교적 시스템 구성이 간단해지는 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 두 가지 방법에 대해서 각각을 Null 영상타원계측기와 Photometric 영상타원계측기에 적용하였다.

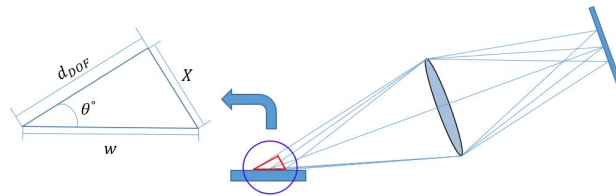


그림 16. DOF와 삼각 함수법을 이용한 카메라의 측정 영역

1.2 영상타원계측기 소프트웨어 Calibration 방법

입사각도와 광학부품의 회전각은 타원계측기에서 시편을 측정하기 위해 굉장히 민감한 값들이기 때문에 하드웨어 Calibration을 수행하였다고 해도 좀 더 세밀하게 조정해야 할 필요가 있다. 이는 하드웨어 Calibration에서 발생하는 오차를 최소화하여 타원계측기의 분석에 있어 보다 정확한 이론적 모델과 측정값의 제시를 통해 측정 시편의 정보(두께, 굴절률)를 정확하게 측정하기 위함이다. 하드웨어 Calibration에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 본 연구에서는 구성된 두 영상타원계측기에 대해 소프트웨어 Calibration을 수행하였다. Null 영상타원계측기에서는 기준 시편으로 복소굴절률이 잘 알려진 Si 웨이퍼의 복소굴절률을 측정함으로써 소프트웨어 Calibration을 수행하였다. 시편에 대한 입사각도 및 위상지연기의 회전각도 값을 분석 과정에서 조절하면서 측정된 결과와 참고 문헌에서 제시된 기준값과의 차이가 최소가 되도록 최적화 과정을 진행하였다. 그 결과 위상지연기의 회전각은 $45^\circ \rightarrow 46.2^\circ$ 로 결정되었으며, 시

편에 대한 입사각도는 $70^\circ \rightarrow 68.6^\circ$ 로 확인되었다.

한편, Photometric 영상타원계측기는 Si 웨이퍼 상에 SiO_2 박막이 도포된 기준 단층 박막 시편을 이용하여 측정결과와 제조사에서 제공하는 박막 두께와의 비교를 통해 소프트웨어 Calibration을 수행하였다. Null 영상타원계측기와 유사하게 시편에 대한 입사각도 및 편광기, 검광기의 회전각도 값을 분석 과정에서 변화시키면서 측정된 결과와 실제 박막의 두께가 최소가 되도록 최적화 과정을 진행되었고 그 결과 편광기(P)는 $42^\circ \rightarrow 39.22^\circ$, 검광기(A)는 $-48^\circ \rightarrow -50.78^\circ$, 마지막으로 시편에 대한 입사각도는 $70^\circ \rightarrow 66.51^\circ$ 로 각각 설정되었다. 그림 17은 본 연구에서 사용한 소프트웨어 Calibraion에 대한 진행 과정을 나타낸다.

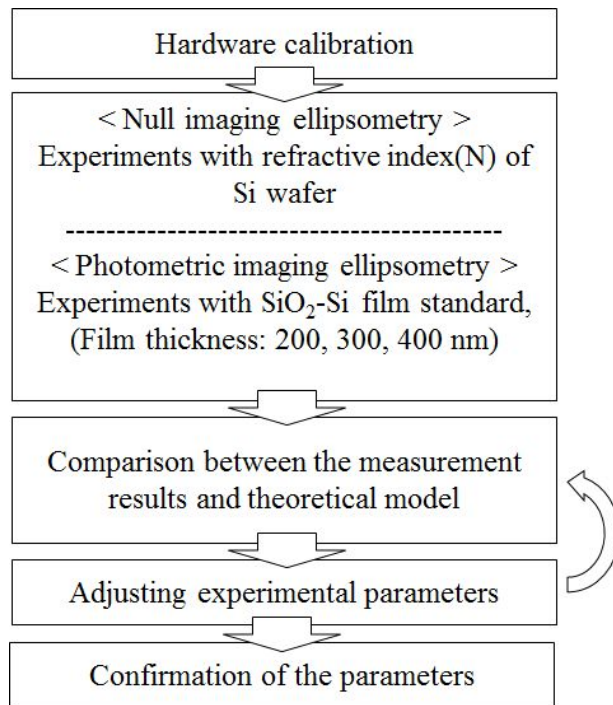


그림 17. Null, Photometric 영상타원계측기 Calibration Flow Chart

제2절 Null 영상타원계측기

1. Null 영상타원계측기 구성

본 논문에서는 그림 18과 같은 광학 구성으로 Null 타원계측기의 기본원리와 영상기법을 결합한 Null 영상타원계측기를 설계, 제작하였다.

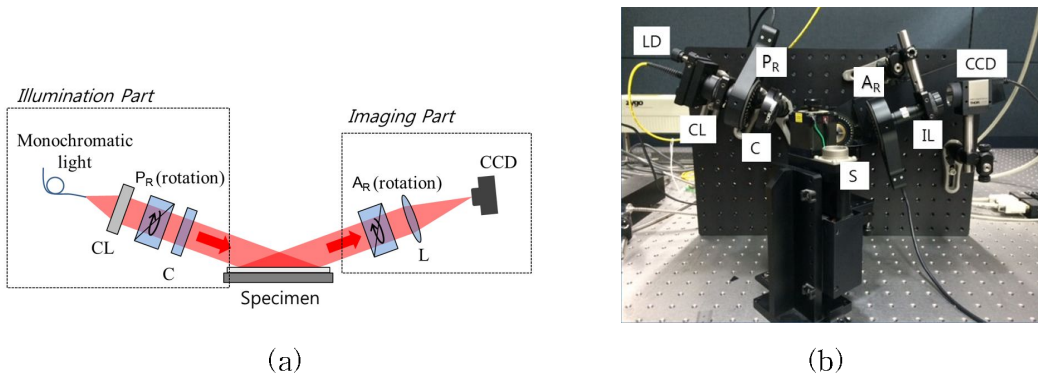


그림 18. (a) Null 영상타원계측기의 광학 구성도 (b) 실제 구성된 광학 구성도; 광원, Monochromatic light; CL, 시준렌즈(Colimation Lens); P_R, 편광기(Rotation Polarizer); C, 위상지연기(Compensator, Quarter wave plate); A_R, 검광기(Rotation Analyzer); L, 이미징 렌즈(Imaging Lens, 1X); CCD, 영상 소자 CCD 카메라(1024 X 768 pixel);

광원(Monochromatic Light)으로 그림 19와 같이 Thorlab사의 635 nm 레이저 다이오드(Laser Diode, LD)를 이용하였고, 가시 광 대역을 투과할 수 있는 편광기, 위상지연기 그리고 검광기를 사용하였다. 빛의 소광점을 찾기 위한 편광기와 검광기의 회전을 위해 그림 20과 같은 Thorlab사의 Motorized Stage(TDC001, PRM1Z8)를 이용하였다. 또한, 측정 시편의 영상을 획득하기 위해 그림 21과 같은 Edmund사의 결상 렌즈(Compact Telecentric Lens, WD : 65 mm, 1X)와 영상 소자인 Thorlab사의 CCD 카메라(1024 × 768 pixel)를 이용하였다. 구성을 살펴보면 광원으로부터 나온 무편광의 빛은 광 시준기를 통해 평행광이 되고 회전하는 편광기를 투과한 빛은 선형편광이 된다. 그리고 위상지연기를 지난 빛은 원편광, 혹은 타원편광이 되어 고정된 입사각도로

시편에 입사한다. 그리고 시편에서 반사한 빛은 회전하는 검광기, 결상 렌즈를 통해 영상 소자에서 획득된다. 편광기와 검광기의 회전에 따라 검출되는 빛의 세기가 최소가 되는 지점에서의 광학부품들 회전각을 측정하였고, 시편에 입사되는 입사각도와 측정 결과를 이용하여 타원계측기의 이론을 통해 시편의 광학적 정보(굴절률, 두께)를 추출하였다.



그림 19. Null 영상타원계측기의 광원 LD(Laser Diode)



그림 20. 편광기와 검광기를 회전시키기 위한 Motorized Stage, Controller



그림 21. Imaging Lens(1X)와 영상 소자인 CCD 카메라(1024 X 768 pixel)

2. Null 영상타원계측기 실험 결과

2.1 텅이 물질 측정

텅이 물질 측정으로 Si 웨이퍼의 복소굴절률을 측정하였다. 측정은 빛의 소광점을 검출하기 위해 편광기와 검광기를 낮은 분해능으로 회전시키면서 전체 범위에서 측정하고, 이후 높은 분해능으로 소광점 부근을 검출하는 과정으로 진행되었다. 처음에 빛의 최소 점이 가장 낮은 곳을 빠르게 찾기 위해 편광기와 검광기를 5°씩 회전하였고, 그림 22와 같이 네 군데에서 빛의 최소 점이 발생하는 결과를 확인하였다. 이 중에서 빛의 최소 점이 되는 한 곳을 보다 정확하게 측정하기 위해 편광기는 130°에서 140°, 검광기는 -10°에서 -20°까지 회전각도를 1°, 0.1°씩 줄여가며 같은 실험을 수행하였고 그 결과 그림 23과 같이 더욱 정밀한 광량 변화량을 획득하였다.

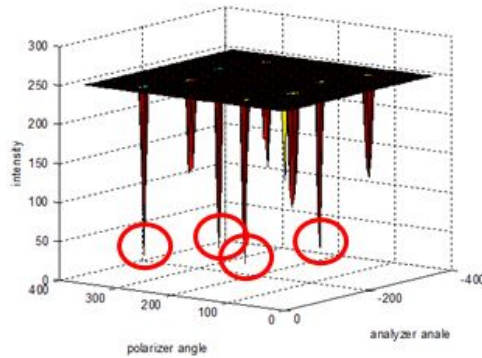


그림 22. 편광기와 검광기 회전에 따른 소광점 네 곳의 광량분포

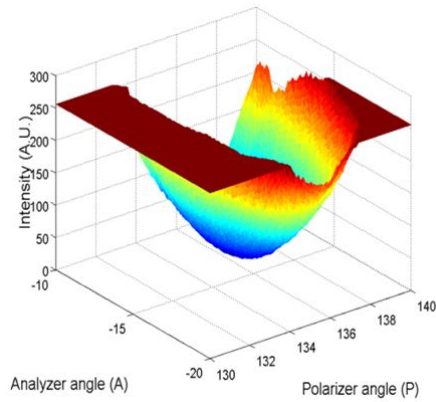
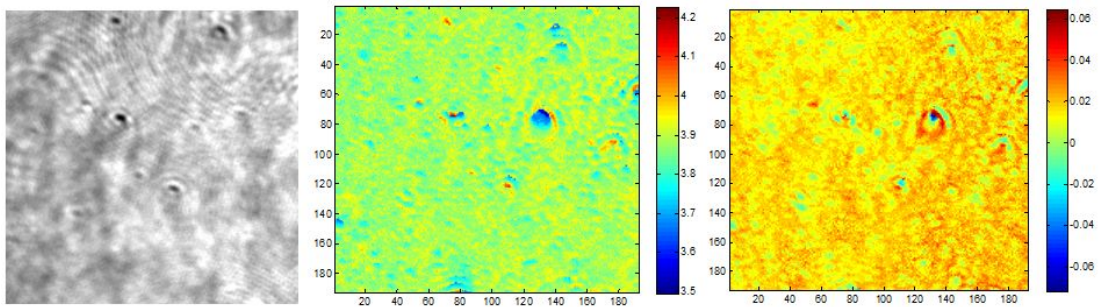


그림 23. 편광기와 검광기 회전에 따른 소광점 한 곳의 광량분포

Si 웨이퍼의 복소굴절률은 측정된 편광기와 검광기의 각도 및 입사각도와 식(10)으로부터 유도된 복소반사계수비를 이용하여, 식(18)로부터 계산하였으며 그 결과 굴절률과 소광계수는 각각 3.8807, 0.0161였다. 참고문헌을 통한 Si 웨이퍼의 굴절률과 소광계수는 3.879, 0.016으로, [41] 측정결과가 참고문헌 값과 거의 일치함을 확인하였고, 또한 그림 24와 같이 측정 시편의 측정 영역에 대한 굴절률 및 소광계수 분포를 측정하였다. 그림 24 (a)는 영상 소자에 획득된 Si 웨이퍼 이미지, (b)는 굴절률 분포, (c)는 소광계수 분포를 나타낸다.



(a)

(b)

(c)

그림 24. (a) 영상 소자에 획득된 Si 웨이퍼 이미지 (b) 측정된 Si 웨이퍼의 굴절률 분포 (c) 측정된 Si 웨이퍼의 소광계수 분포

2.2 단층 박막 측정

단층 박막 측정으로는 그림 25와 같이 Ocean optics사의 Si 기판 위에 100 nm 두께의 간격을 가지며 박막이 5단계 증착된 SiO₂ 박막 시편을 이용하였다. 측정 과정은 덩이 물질 측정과 같게 진행되었으며, 측정은 #3(200.5 nm)과 #4(300.1 nm) 경계 영역에서 진행되었다.

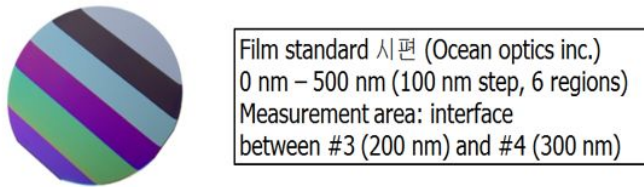


그림 25. 단층 박막 시편(Si - SiO₂, Ocean optics inc.)

단층 박막 시편의 빛의 최소가 되는 지점은 그림 27 (b)처럼 Si 웨이퍼 시편과는 다르게 전체 여덟 군데에서 확인되었다.

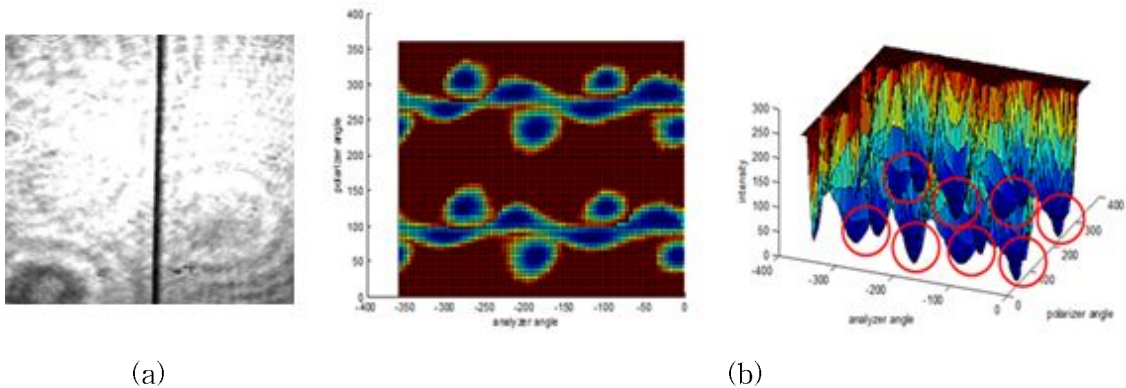


그림 26. (a) 단층 박막 시편 #3(200 nm)과 #4(300 nm) 이미지 (b) 편광기와 검광기의 회전으로 빛의 세기가 최소가 되는 여덟 곳의 지점

덩이 물질 측정과 같게 빛의 최소인 지점의 정확한 위치를 알기 위해 빛의 세기가 약해지는 구간을 확인하고 편광기와 검광기의 회전각도를 미세하게 움직이며 빛의 소광 지점을 검색하였다. 이후 측정 시편에 대한 빛의 소광점에서 광학부품 회전각과 시편

에 대한 입사각도로부터 박막 두께에 따른 복소반사계수비를 계산하였다. 이론적인 복소반사계수비는 참고문헌에서 제공된 Si 웨이퍼와 박막 물질의 복소굴절률, 박막을 다중 반사하는 빛들 사이의 위상차를 나타내는 식(19), p-파와 s-파에 대한 각각의 Fresnel 반사계수를 이용한 식(22)를 통해 그림 27과 같이 박막 두께에 대해 나타내었다.

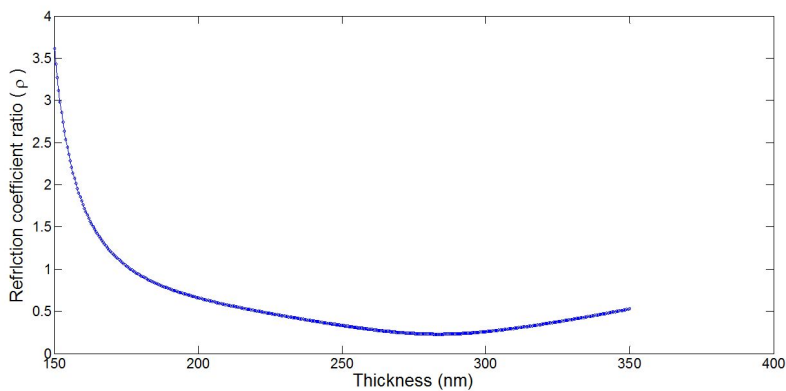


그림 27. 단층 박막 시편을 적용한 이론적인 복소반사계수비(ρ)

그림 27에서 알 수 있듯이 박막의 두께에 따라 이론적인 복소반사계수비가 변화하기 때문에 측정된 복소반사계수비로부터 박막의 두께를 추출하기 위해서는 이론적인 모델 값과 측정값에 최적화 과정이 필요하다. 최적화를 통해 박막의 두께를 측정한 결과, 제공 두께 #3(200.5 nm)과 #4(300.1 nm)의 경계면에 대해 측정결과는 각각 측정 영역의 평균값으로 #3(194.1 nm), #4(296.2) nm로 획득되었다. 그림 28 (a)는 각각 두께에 따라 복소반사계수비의 분포를 나타내고 있으며 이를 이용한 박막 두께 분포는 (b)와 같이 획득하였고 이를 통해 측정 시편의 박막 구조는 그림 29와 같이 3차원으로 도출되었다. 측정결과, 본 Null 영상타원계측기를 이용하여 기준 단층 박막 시편의 두께를 정밀하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

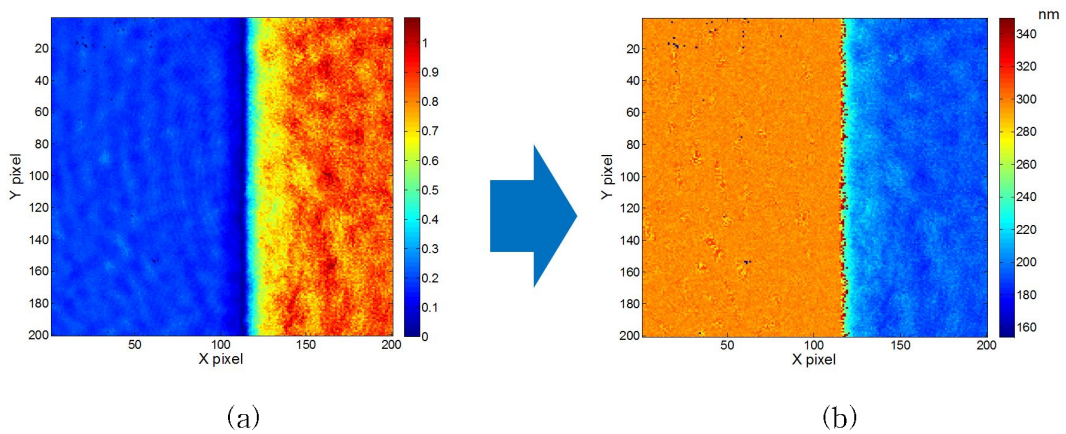


그림 28. (a) SiO₂ 박막의 반사계수비 분포 (b) SiO₂ 박막의 두께 분포

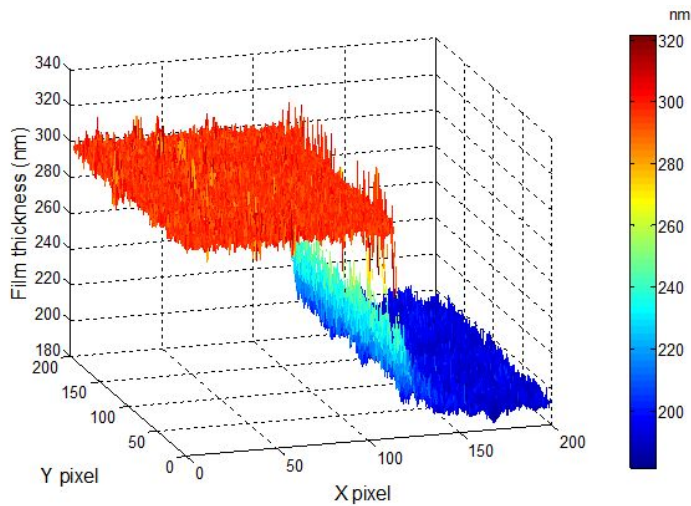


그림 29. 다층 박막 시편(#3-#4)의 3차원 영상

Null 영상타원계측기에서 덩이 물질 및 다층 박막을 측정하기 위하여 반복 과정을 통해 빛의 소광점 위치를 검출, 확인할 수 있었다. 그러나 Null 영상타원계측기는 측정을 위해 많은 시간이 소비되는 문제점이 발생하고 또한 많은 양의 이미지를 획득해야 하는 한계가 있다. 또한, 다층 박막에 대해서는 더 많은 소광점이 존재하기 때문에 이들

을 검출하는 과정에서 많은 노력이 필요하다. 그래서 비록 Null 영상타원계측기가 정밀한 3차원 박막 측정이 가능한 장점이 있으나 다층 박막 측정에 있어서는 응용에 있어 많은 한계를 가지고 있음을 확인하였다.

제3절 Photometric 영상타원계측기

1. Photometric 영상타원계측기 구성

본 논문에서 그림 30 (a)와 같은 광학 구성으로 구성된 Photometric 영상타원계측기는 Photometric 타원계측기의 기본원리와 영상기법을 결합한 방법을 그림 30 (b)와 같이 설계 및 제작하였다.

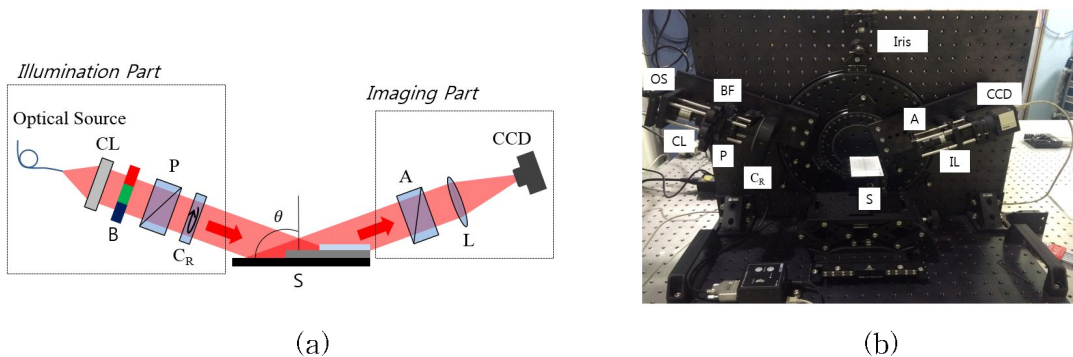


그림 30. (a) Photometric 영상타원계측기 광학 구성도 (b) 실제 구성된 광학 구성도; CL, 시준렌즈(Collimation Lens); B, 광학필터(Band Pass Filter); P, 편광기(Polarizer); C_R, 위상지연기(Rotating Compensator, Quarter Wave Plate); S, 시편(Specimen); A, 검광기(Analyzer); L, 이미징 렌즈(Imaging Lens); CCD, 영상 소자 CCD 카메라(1024 X 768 pixel);

Photometric 영상타원계측기는 Null 영상타원계측기와 비교하여 빠른 측정 속도 및 사용 메모리의 감소 등의 장점으로 인해 다층 박막 측정에 유리한 장점이 있다. 그러나 이를 위해서는 광원으로 다 파장 광원을 이용해야 하며 각 파장에 대한 측정 과정이 필요하다. 본 연구에서는 광원으로 그림 31과 같은 NKT Photonics사의 넓은 파장 대역 광원(450 to 2400 nm)인 SuperK COMPACT 광원을 사용하였다. 그리고 광원에서 나온 빛을 평행광으로 만들기 위해 시준기(CL)와 단색광 적용을 위한 광학필터(B)를 사용하였다. 광학 필터를 투과한 빛은 편광기(P)를 투과하여 선형편광이 되고 회전하

는 위상지연기(C, Quarter Wave Plate)를 통과하여 빛의 편광상태가 원편광, 타원편광, 선편광으로 지속적으로 바뀌게 된다. 이렇게 편광성분이 변화하는 빛은 시편에서 반사하여 검광기(A)를 투과한 후 결상 렌즈(Telecentric Lens, WD : 110 mm, X1)를 통해 영상 소자에서 결상되고 이를 통해 측정 시편 영역에 대한 광량정보가 획득된다. 본 연구에서 구성한 Photometric 영상타원계측기는 편광기와 검광기가 고정되어 있고 편광 변화를 주기 위한 위상지연기의 회전으로 시편에서 반사되는 빛의 광량 변화를 획득한 결과와 이론적인 모델과의 최적화를 통해 시편의 광학적 정보를 추출해 내는 원리이다.

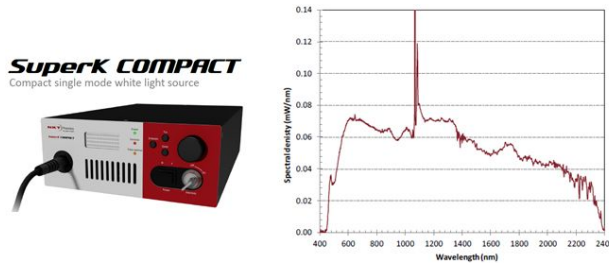


그림 31. 넓은 파장 대역 광원 및 스펙트럼

위상지연기의 회전으로 시편에서 반사되는 빛의 광량 변화를 확인하기 위해 그림 32의 Photometric 영상타원계측기의 광학계를 존스 행렬(Jones Matrix)로 표현하면 식 (28)과 같다. 여기에서 P는 편광기의 회전각도, A는 검광기의 회전각도, C는 위상지연기의 회전각도를 나타내며 r_p, r_s 는 Fresnel 반사계수, δ 는 위상지연각이며 마지막으로 ρ 는 복소반사계수비이다.

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos A & \sin A \\ -\sin A & \cos A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 & C_1 \\ C_3 & C_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P & -\sin P \\ \sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos C & -\sin C \\ \sin C & \cos C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos C & \sin C \\ -\sin C & \cos C \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$E = E_0 [\rho \cos C \cos (P - C) \cos A - \rho \rho_c \sin C \sin (P - C) \cos A + \sin C \cos (P - C) \sin A + \rho_c \cos C \sin (P - C) \sin A] \quad (30)$$

전기장 E 로부터 Detector가 인식하는 빛의 밝기 I 에 관한 표현을 식(31)과 같이 나타낼 수 있으며

$$I = |E E^*| \quad (31)$$

식(31)을 이용하여 두께에 따른 빛의 변화를 도출하고 이론적인 모델과 측정값의 최적화를 통해 시편의 광학적 정보를 추출할 수 있다.

2. Photometric 영상타원계측기 실험 결과

2.1 단층 박막 측정

단층 박막 측정으로는 그림 25의 단층 박막 시편(Si - SiO₂)을 측정하였다. 위상 변화를 주기 위한 위상지연기의 회전범위는 360°이며 한 스텝씩 회전을 하면서 빛의 광량 변화를 확인하는 과정으로 진행되었다. 이때 빛의 광량 변화는 동일한 시편을 측정 하더라도 사용하는 광원의 파장에 의해 결과 값이 다른 것을 확인하였으며, 같은 파장의 광원을 이용할 때는 두께에 따라 빛의 광량 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 본 단층 박막 측정에서는 파장 변화 없이 두께에 따른 광량 변화만을 확인하면서 이론적인 모델과의 최적화를 통해 시편의 광학적 정보를 추출하는 방법으로 수행하였다. 광원으로 넓은 파장 대역의 광원에서 광학필터(650 ± 5 nm)를 투과한 빛을 이용하였고 단층 박막 시편에 각각의 영역 다섯 곳을 측정하였다. 아래의 식(30)과 식(31)을 이용하여 이론적인 모델값의 광량 분포를 획득하고 측정을 통한 광량 분포와의 최적화 과정을 통해 시편의 두께 정보를 추출하였고 그 결과는 그림 32와 같다.

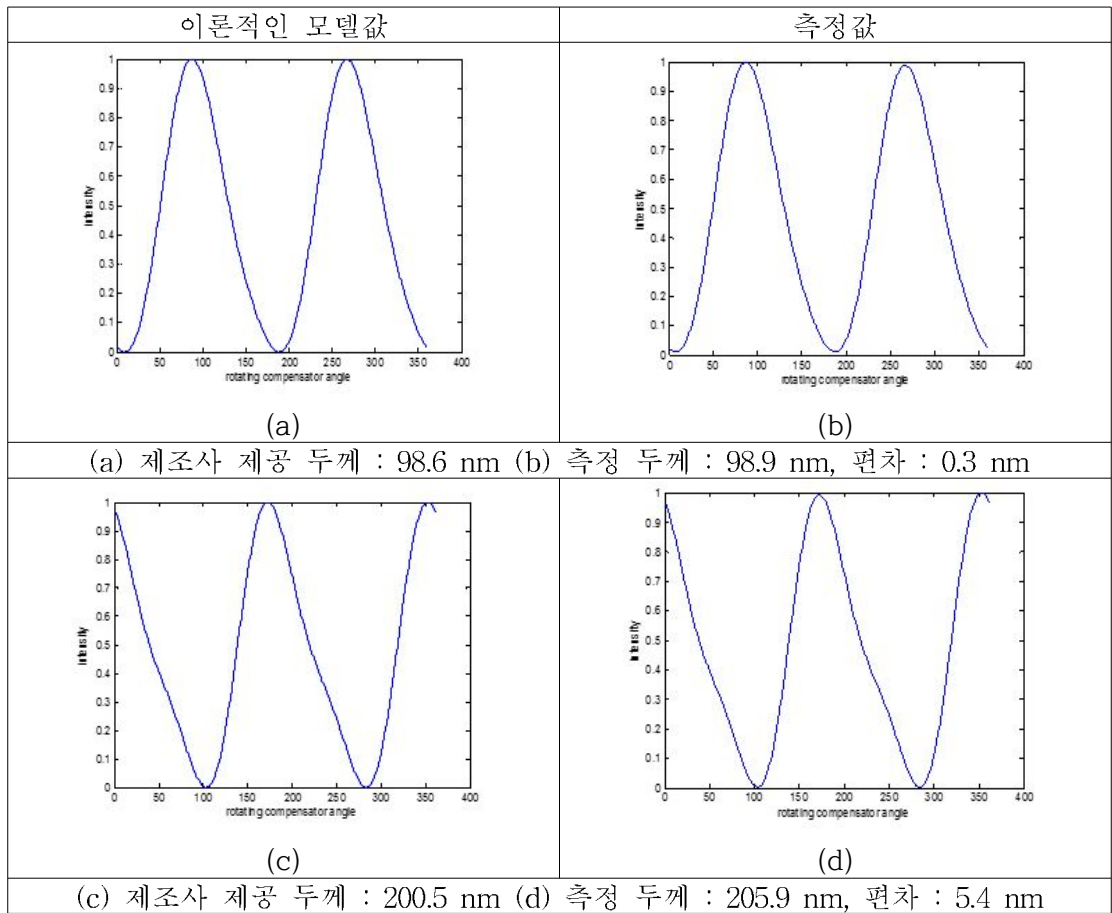


그림 32. Photometric 영상타원계측기 광량분포 및 실험 결과(1)

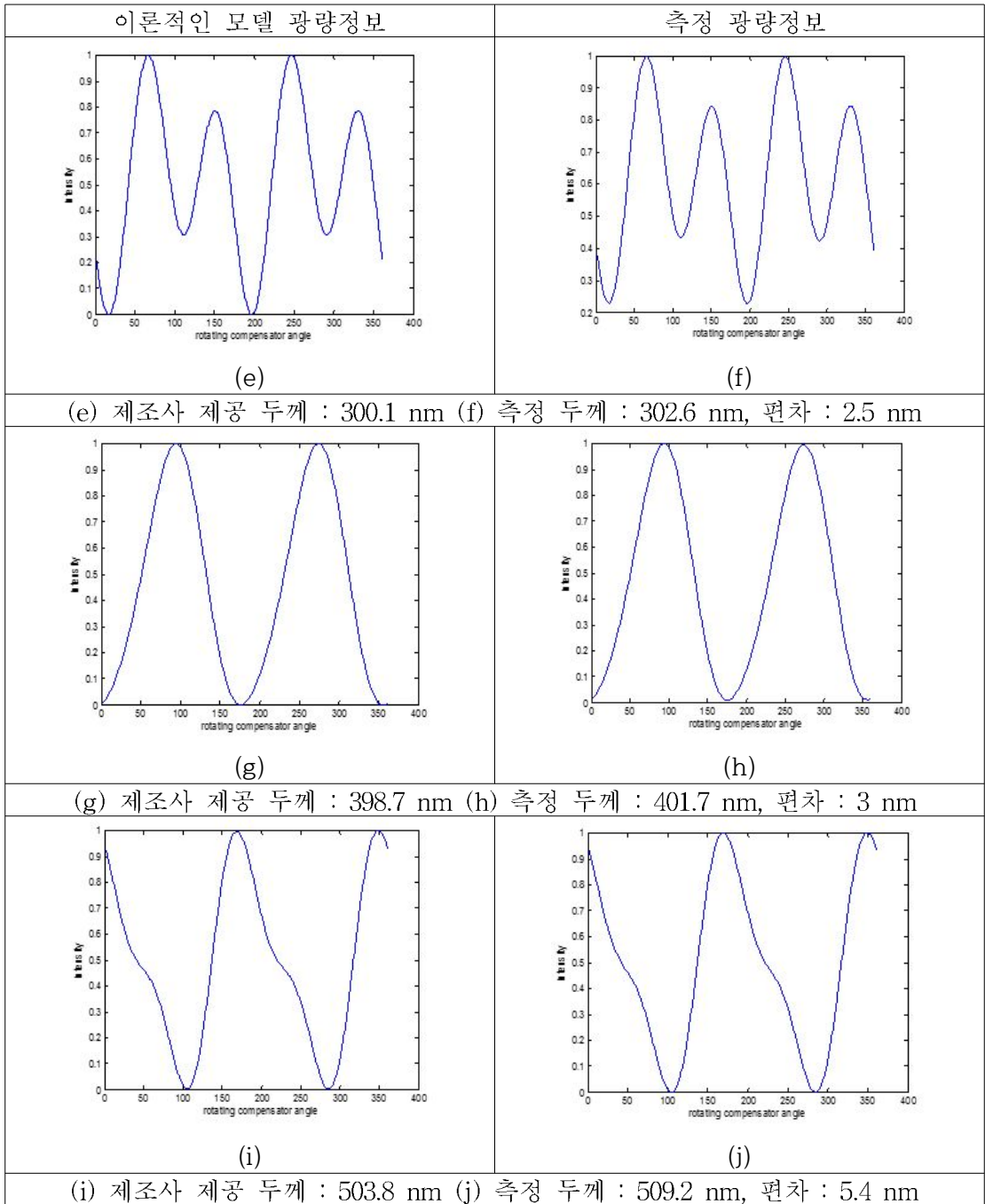


그림 32. Photometric 영상타원계측기 광량분포 및 실험 결과(2)

실험 결과를 각각 확인하면 약간의 편차가 있지만 제조사 제공 두께에 근접한 실험 결과를 확인할 수 있다. 또한, 시편의 3차원 박막 측정을 위해 단층 박막 시편의 #2(398.7 nm)과 #3(300.1 nm)의 경계면에 대해 측정을 수행하여 분석을 통해 각각의 영역에서 각각 407.7 nm, 303.8 nm 박막 두께를 획득하였고 이를 통한 단층 박막 측정 시편의 박막 구조를 그림 33과 같이 도출하였다. 전체적으로 제조사에서 제공하는 두께에 비교하면 오차 값이 큰 편이지만 이는 시편 표면에 발생한 공기 노출에 의한 산화막 형성 때문으로 판단된다.

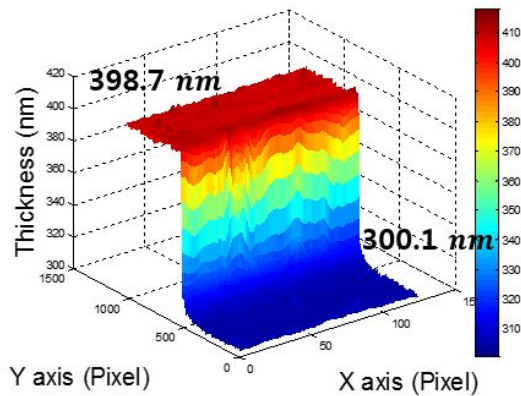


그림 33. 단층 박막 시편(#2-#3) 3차원 영상 측정결과

한편, 구성된 Photometric 영상타원계측기의 성능을 검증하기 위해 한국표준과학연구원에서 제공한 표준시편(CRM, Certified Reference Materials)을 측정하였다. 표준 시편은 단층 박막 시편으로 실리콘 기저층 위에 SiO_2 박막이 도포되어 있는 단층 박막 시편이다. 측정 시편은 그림 34와 같이 총 3개로, 박막 두께는 각각 55.8 nm, 14.3 nm, 2.1 nm이다. 박막 두께가 55.8 nm인 시편의 경우, 실험결과는 54.8 nm, 반복능은 0.4 nm의 결과를 획득하였으며, 14.3 nm 두께 시편의 경우, 측정 두께는 13.1 nm, 반복능은 0.3 nm의 결과를 확인하였다. 마지막으로 2.1 nm 두께 시편에서는 측정결과, 박막의 두께가 2.08 nm였고, 반복능은 0.19 nm였다. 이때 각각 반복능은 15번의 반복 측정을 통한 RMS(Root Mean Square) 값으로 획득하였다. 표준 시편을 본 연구에서 제안하고 구성된 Photometric 영상타원계측기로 측정한 결과, 각각의 경우에 대해 조금씩

차이를 보이기는 하나 전체적은 반복능이 0.5 nm 이하임을 확인하였다.



그림 34. 한국표준과학연구원(KRISS)에서 제공한 표준시편(2.1 nm, 14.3 nm, 55.8 nm)

2.2 다층 박막 측정

다층 박막 측정은 그림 35 (a)와 같이 (주)영우 DSP사에서 제공한 Cr - ZTO - IZTO의 구조로 제조된 2층 박막 시편을 이용하여 실험을 수행하였다. 시편은 Cr(Chromium)을 기판 위에 ZTO(Zinc Tin Oxide) 박막이 대략 109 nm, IZTO(Indium Zinc Tin Oxide)박막이 대략 55 nm 도포되어 있으며, 시편에 대한 기준 두께와 파장에 따른 굴절률 정보는 각각 접촉식 방법인 알파스텝과 참고문헌을 통해 확보하였다.

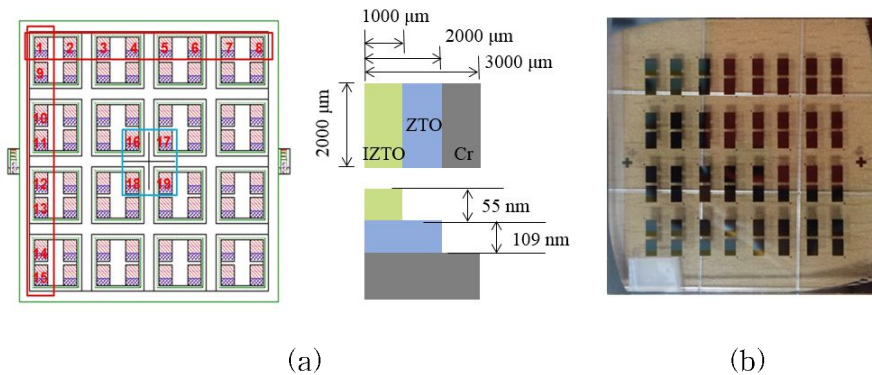


그림 35. (a) 2층 박막 시편 정보 (b) 2층 박막 실제 시편

2층 박막 측정에서는 타원 계측기의 측정 원리상 최소 2개 이상의 파장에 대한 측정결과를 획득해야 하며, 또한 서로 다른 파장에 관한 측정결과가 많을수록 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 광원으로는 넓은 파장 대역 광원에서 광학필터 $((650, 700, 750) \pm 5 \text{ nm})$ 를 이용하여 3개의 파장에 따른 실험을 반복적으로 수행하였으며, 그림 36 (a)는 결상 영역에서의 시편의 영상을 보여준다. 이때, 측정 영역은 가로 방향으로 카메라의 전체 픽셀에서 획득되었지만, 세로 방향은 약 2 mm 정도였다.

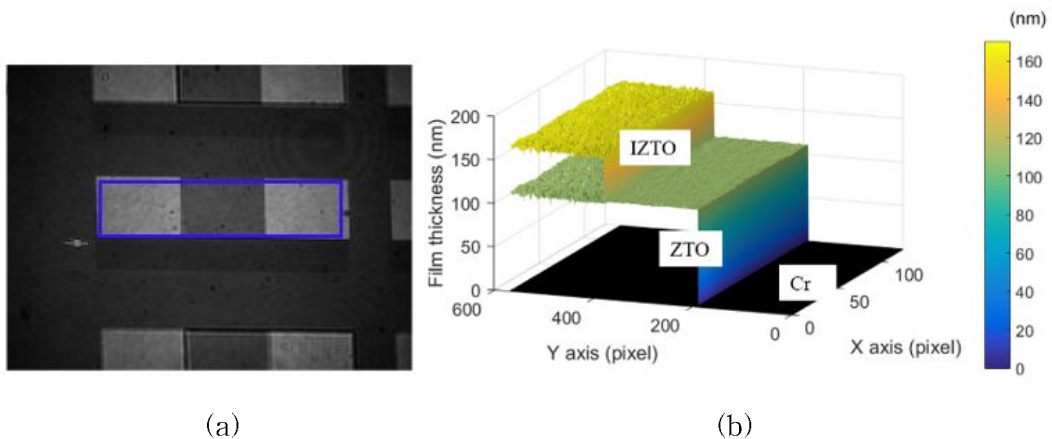


그림 36. (a) Photometric 영상타원계측기 영상 소자에서의 2층 박막 측정 영역
(b) 2층 박막(Cr-ZTO-IZTO)시편 3차원 영상 측정결과

다층 박막에 대한 이론적 모델은 Scattering 행렬을 표현한 식(23), 층을 지날 때 발생하는 위상 변화량을 나타낸 식(25) 그리고 복소반사계수비를 구하기 위한 Fresnel 반사계수 식(26), 식(30) 그리고 식(31)을 이용하여 박막의 두께에 따른 광량변화로 설정하였으며, 이를 측정값과의 차이가 최소가 되도록 최적화 과정을 통해 ZTO, IZTO의 박막 두께를 각각 측정하였다. 그 결과는 ZTO의 측정 두께는 111.2 nm, IZTO의 측정 두께 55.1 nm였다. 측정결과를 토대로 측정 시편의 박막 구조는 그림 36 (b)와 같이 3차원으로 도출되었고, 제안한 Photometric 영상타원계측기로 단층 박막에 이어 2층 박막 시편 두께를 측정할 수 있음을 확인하였다.

제4장 고찰 및 논의

1. 측정된 방법에 있어서 정밀도와 정확도

본 논문에서는 Null, Photometric 영상타원계측기를 구성하고 실험적으로 검증하였다.

두 영상타원계측기에서 가장 큰 실험오차의 원인은 크게 3가지로 나눌 수 있다.

- 시편에 입사되는 입사각도
 - 광원부와 광검출부의 정렬
 - 측정 시편을 놓을 수 있는 스테이지 정렬
 - 입사각도 정렬
- 광부품의 회전에 사용되는 스테이지
- 박막 측정 참조데이터를 이용한 모델링

첫 번째 오차 원인은 빛이 시편에 입사되는 입사각도이다. 영상타원계측기에서 소프트웨어 Calibration을 했음에도 불구하고, 최적화된 입사각도가 큰 편차를 갖는 값으로 확인되었다. 이는 광원부와 광검출부를 제작하면서 생긴 공차와 2 부분이 독립적으로 구성되면서, 조립시 발생한 상대적인 각도 오차 때문으로 판단된다. 시스템을 구성함에 있어 육안을 이용하여 수동적으로 정렬하는 것에 한계가 있기 때문에 발생하는 문제로 이를 해결하기 위해서는 일체형으로 시스템을 제작하거나, 광원부 및 광검출부 제작시 정렬을 정확히 하기 위한 측정 장비들을 이용할 수 있다. 또한, 시편 정렬을 위해 본 연구에서 이용한 한 점에 대한 아이리스 구성이 아닌 여러 개의 아이리스를 이용하거나 Align Telescope를 사용한다면 보다 정밀하게 각도 오차를 Calibration할 수 있다. 이와 더불어 본 논문에서 구성한 영상타원계측기의 입사각도는 광학 구성에 사용된 원판형 회전 스테이지의 각도 눈금을 통해 육안으로 정렬하였기 때문에 정렬 오차를 피하기 어려우나 이를 개선하기 위해 일정 각도로 제작된 프리즘을 이용하여 입사각을 Calibration하면 이러한 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

두 번째 오차 원인은 광학부품 회전을 위해 사용한 회전 스테이지의 오차이다. 두 종류의 영상타원계측기 모두에서 편광 부품의 회전을 위해 각각 회전 스테이지를 사용하였고, 측정을 수행함에 있어 회전 스테이지는 구동, 그리고 정지한 이후에 영상을 획득하였다. 이로 인해 회전 스테이지의 구동 및 정지에 따른 각도 위치 오차가 측정 정밀도에 영향을 주었다. 이를 개선하기 위해서는 회전 스테이지가 등속으로 회전하면서 CCD 카메라를 통해 트리거링(Triggering)과 적절한 노출 시간(Exposure time)을 통해 연속적으로 영상을 획득하면 이러한 측정 오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

마지막 오차 원인으로는 박막 구조에 대한 모델링에 있어 사용되는 참조 데이터들의 정확도이다. 참조 데이터 경우에는 일반적인 경우의 굴절률 및 소광계수에 대해서 제공되기 때문에 박막 제조시 발생하는 변화량에 대해서는 보장해주지 않는다. 그래서 이러한 참조 데이터를 기준으로 이론 모델을 구성하는 경우, 실제 시편에 대해 측정 오차를 유발할 수 있다. 본 연구에서도 실험을 수행함에 있어 여러 참조 데이터들을 활용하였는데, 참조 데이터들 사이에 값의 차이를 보이고 있어 어떤 데이터를 신뢰해야 할지 심사숙고하였다. 그래서 영상타원계측기에서는 정확한 참조데이터를 확보하는 것이 매우 중요하다.

2. 측정 속도 개선

Photometric 영상타원계측기는 위상 변화를 주기 위해 위상지연기를 1° 씩 구동, 정지한 이후에 영상을 획득하는 단계를 반복적으로 수행한다. 비록 본 연구에서 사용된 회전 스테이지가 분해능이 높고 비교적 빠른 회전이 가능하기는 하나 구동 및 정지 과정에서 가감속 속도가 있기 때문에 지정된 위치각에 도달할 때까지 불필요한 시간이 발생하였으며 이로 인해 전체 측정 시간이 지연되었다. 이를 개선하기 위해서는 앞서 회전 스테이지의 구동 오차를 줄이는 방법과 같이 회전 스테이지를 등속으로 구동하면서 스테이지의 구동과 동기화된 CCD 카메라를 사용하여 연속적으로 영상을 획득하면 측정 속도를 개선할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 위상 변화를 위해 기계적인 방법이 아닌 전자적인 EOM(Electro-Optic Modulator) 또는 LC(Liquid Crystal)를 이용하여 위상 변화를 발생시키면 측정 속도를 개선할 수 있다. 하지만 이 경우, 전자적인 위상

변조 장치는 온도에 민감하기 때문에 실험을 하기에 앞서 외부 환경에 주의가 각별히 필요하다.

제5장 결론

본 연구에서는 두 종류의 영상타원계측기를 이용하여 박막의 두께를 3차원으로 측정하는 시스템을 제안, 구성하였고, 각각의 시스템에 대한 이론 정립 및 실험적 검증을 수행하였다. 또한 타원계측기에 사용되는 광학부품의 정확한 회전각을 알기 위해 하드웨어와 소프트웨어 교정시험(Calibration)을 수행하였고, 이를 통해 두 종류의 측정 시스템 모두 박막 측정에 있어 nm 이하의 반복정밀도를 갖는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 두 종류의 Null과 Photometric 영상타원계측기는 각각의 기본적인 측정 원리를 바탕으로 광학시스템이 구성되었고, 실험을 통해 단층과 다층 박막을 3차원으로 측정할 수 있었다. Null 영상타원계측기에는 편광기와 검광기의 회전으로 빛의 소광점을 찾아 시편의 광학적 정보를 추출하는 원리를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 복소굴절률을 측정하였고, 단층 박막(Si-SiO₂)의 두께를 3차원으로 측정하였다. Null 영상타원계측기는 비교적 정확하게 굴절률 및 박막 두께를 측정할 수 있었으나 측정시간이 길어지는 단점이 있었다. 이 점을 보완하기 위해 본 연구에서는 빛의 광량 변화를 이용하여 시편의 광학적 정보를 추출하는 Photometric 영상타원계측기를 도입하였고, 이를 통해 단층 박막 및 2층 박막 두께를 3차원으로 획득하였다. 실험 결과, 참조데이터와 측정된 박막 두께는 큰 차이를 보이지 않았으며, 반복능은 표준 시편을 기준으로 0.5 nm 이하임을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 영상타원계측기의 측정 안정도는 교정시험과 구동기의 구동 오차에서 결정된다. 또한 박막에 대한 신뢰성 있는 참조데이터 확보와 민감도가 높은 CCD 카메라를 사용하면 더 좋은 결과를 획득할 수 있을 것이다. 그리고 실험 환경인 온도, 습도와 외부 진동 등을 고려하여 연구를 수행하면 오차를 현저히 줄일 수 있다. 마지막으로 분석 알고리즘을 개선하는 등의 추가 연구가 이루어져야 됨을 확인할 수 있었고, 이를 통해 추후에는 2층 이상의 박막에 대해서도 분석이 가능한 동시에 측정 속도도 크게 향상 될 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] Irving P,Herman, "Optical diagnostics for thin film processing", Academic press, 1996.
- [2] International Technology Roadmap for Semiconductors, 2000.
- [3] Jonh Lekner, "Ellipsometry of surface films on a uniform layer", Opt. Soc. Am. A, Vol 5, pp 1044-1047, 1988.
- [4] <http://www.auk.co.kr>
- [5] B.Robert, A. Harrus and R.L. Jackson, "Interconnect metallization for future device generations," Solid State Techonology, Vol 38, pp 69-78 (1995)
- [6] M.A. Fury, "Emerging developments in CMP ofr semiconfuction planariztion, Part2," Solid State Techonology, Vol 38, pp 81-88 (1995)
- [7] T.Tsukada, TFT/LCD (북스힐, 2005, 이충훈 역, 원서 1996년 발행)
- [8] 김영식, "백박막 두께 형상 및 굴절률 측정용 분산 백색광 간섭법", 한국과학기술원 기계공학과 박사학위 논문, 2007.
- [9] Irving P,Herman, "Optical diagnostics for thin film processing", Academic press, 1996.
- [10] L. Deck and P, de Groot, "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry", Appl. Opt. 33, 7334-7338 (1994)

- [11] B. L. Danielson et al., "Absolute optical raring using low coherence interferometry", *Appa. Opt* 30, 2975(1991)
- [12] Flournoy PA, McClure RW, Wyntjes G. "White-light interferometric thickness gauge.", *Appl Opt.* 1972 Sep3 1;11(9):1907-15. doi: 10.1364/AO. 11. 001907.
- [13] U.schnell et al., "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channeled spectrum interferometry", *pure Appl. Opt.*4, 643(1995)
- [14] U. Schnell et al., "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target", *Opt Lett.*21, 528(1996)
- [15] S. Costantino et al., "wide band interferometry for thickness measurement", *Opt Express* 11, 952(2003)
- [16] P. J Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces", *Appl. Opt* 32(19), 3438-3441(1993)
- [17] P. A. Flournoy, et al., "White-light interferometric analysis", *Appl. Opt* 11, 1907-1915(1972)
- [18] 강민구, "백색광 주사 간섭계를 이용한 표면형상 측정 알고리즘에 관한 연구", 한국과학기술원 기계공학과 박사학위 논문, 1999.

- [19] J. Schwider and Liang Zhou, "Dispersive interferometric profilometer", July 1, 1994 / Vol. 19, No. 13 / OPTICS LETTERS
- [20] U. Schnell, et al., "Absolute distance measurement with synchronously sampled white-light channeled spectrum interferometry," Pure Appl. Opt. 4, pp 643-651 (1994)
- [21] 김병권, "분산간섭계 원리를 이용한 다 채널 광학 꺾 센서에 관한 연구", 조선대학교 광기술공학과 석사학위 논문, 2016.
- [22] F. A. Jenkins and H. E. White, Fundamentals of Optics (McGraw-Hill 1976)
- [23] Sellmeier W.: Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spektrum einiger Substanzen, Annalen der Physik. 143, 1871, S. 272 - 282
- [24] 주우덕, "높은 개구수의 대물렌즈를 적용한 박막 두께 형상 및 굴절률 측정용 백색광 간섭계", 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문, 2008.
- [25] R.M.A. Azzam and N.M Bashara, Ellipsometry and polarized Light (North - Holland, New York, 1977)
- [26] 안일신, 엘립소메트리 (한양대학교 출판부, 2000)
- [27] 김상열, 타원법 (아주대학교 출판부, 2000)
- [28] P. Ann. Drude, Phys. (Leipzig), 32, p 584 (1887)

- [29] P. S. Hauge, "Recent development in instrumentation in ellipsometry," Surface Science, Vol. 96, pp. 104-140 (1980)
- [30] P. S. Hauge, "Design and operation of ETA, an automated ellipsometer," IBM Journal of Research and Development, Vol. 17, pp. 472-489 (1973)
- [31] D. E. Aspnes, A. A. Stunda, "High precision scanning ellipsometer," Appl. Opt. Vol. 14, pp. 220-228 (1975)
- [32] D. E. Aspnes, "Fourier transform detection system for rotation-analyzer ellipsometers," Opt Commun. Vol. 8, pp. 222-225(1973)
- [33] R. W. Collins, "Automatic rotating element ellipsometers: calibration, operation, and real-time allocation," Rev. Sci. Instrum., Vol. 61, pp. 2029-2061, (1990)
- [34] J. M. M. de Nijs, A. van Silfhout, "Systematic and random errors in rotating analyzer ellipsometer," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 5, pp. 773-781 (1988)
- [35] D. E. Aspnes, P. S. Hauge, "Rotating compensator, analyzer, fixed analyzer ellipsometer : analysis and comparison to other automatic ellipsometers," J. Opt. Soc. Am., Vol. 66, pp. 949-954, (1976)
- [36] D. E. Aspnes, "Effects of component optical activity in data reduction and calibration of rotating analyzer ellipsometers," J. Opt. Soc. Am., Vol. 64, pp. 812-819 (1974)

- [37] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, "Analysis of systematic errors in rotating analyzer ellipsometers," J. Opt. Soc. Am., Vol. 64, pp. 1459-1469 (1974)
- [38] D. E. Aspnes, "Optimizing precision of rotating analyzer ellipsometers." J. Opt. Soc. Am., Vol. 64, pp. 639-646 (1976)
- [39] A. Rosencwaig, et al., "Beam profile reflectometry: A new technique for dielectric film measurements," Appl. Phys. Lett. 60(11), 1992
- [40] J. A. Woollam, et al., "Overview of Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer(VASE), Part I: Basic Theory and Typical Applications," Proc. SPIE, CR72, 29 - 58, 1999
- [41] Green, M.A. and Keevers, M. "Optical properties of intrinsic silicon at 300 K ", Progress in Photovoltaics 3(3), 189-192 (1995)

[감사의 글]

조선대학교 광기술공학과에서 학부과정, 석사과정을 지낸지 어느덧 11년이 지났습니다. 11년이란 시간이 저에게 있어서는 정말 소중한 시간들이었습니다. 이렇게 제가 졸업하기까지 조연을 해주신 아버지, 어머니께 먼저 감사드리고 학교에 있으면서 많은 도움과 가르침을 주신 여러 교수님들께 감사의 뜻을 이렇게 글로 남깁니다.

학부 3학년 때부터 석사과정을 거치고 4년 동안 저를 지도해 주신 주기남 교수님 감사합니다. 학교에 있을 때는 잘 몰랐지만 처음 교수님을 뵈 때로 회상해 보니 대학원 생활부터 진로 문제, 사소한 것 하나하나까지 배려해주시고 광학에 기초적인 부분부터 열렬히 지도해주신 교수님, 항상 따뜻한 미소를 지어주시고 격려를 해주신 교수님, 다른 학교 학생들에게 풀리지 마라 하시면서 저에게 항상 자신감을 채워주신 교수님 진심으로 감사의 말씀 올립니다. 매일 같이 보고 싶을 것 같습니다.

학교생활을 하면서 취업에 고민과 진로, 학업 등 여러 가지에 있어서 상담을 해주시고 저를 이끌어주신 김진태 교수님, 김현수 교수님, 박종락 교수님, 안태정 교수님, 권민기 교수님 감사드립니다. 일반 광학 실험, 일반 광학 수업 시간에 후배들 앞에서 저에 기를 세워 주신 김진태 교수님 감사합니다. 저는 아직도 잊지 못할 수업인 거 같습니다. 학부 2학년 때 방향을 많이 했을 때 저에게 상담을 하면서 정말 좋은 말씀 많이 해주셨던 김현수 교수님 감사합니다. 교수님의 훌륭한 가르침 덕분에 제가 기하광학을 쉽게 배울 수 있었던 것 같습니다. 조선대학교 광기술공학과에서 세련되시고 멋있으신 그리고 제 학부 때 지도 교수님이셨던 박종락 교수님 감사합니다. 교수님에 전자기학 명 강의를 다시 한 번 듣고 싶습니다. 제가 활동했고 소속된 광기술공학과 LabVIEW 동아리에 스승님이신 안태정 교수님! 저는 교수님께 배운 광전자공학에 필기 자료를 지금도 참고하고 있습니다. 감사합니다. 마지막으로 권민기 교수님! 처음 주기남교수님 실험실에 들어왔을 때 공간이 없어서 한쪽에 공간도 내어주시고, 공부하라고 책상과 의자도 주시고 교수님 감사합니다.

교수님들께 감사의 표현을 이렇게 지면으로 밖에 하지 못 해서 송구스럽습니다. 그리고 감사하고 또 감사합니다.

이제 우리 실험실 동생들!!

김영광! 학부 2학년 때 같이 공부를 시작했지. 시험기간에 당구도 많이 치러 갔지! 알지? 나한테 항상 졌지. 그래도 학부 때 실험실 들어와서 2년 공부도 같이 하고 또 떨어져서 2년 공부한 후에 우리 학교가 아닌 지금 있는 연구소에서 다시 만났지. 우린 질기고 질린 관계지. 이 질긴 관계를 끊을 순 없는 건 알지? 실험실 처음 들어왔을 때처럼 우리 딱 4년만 고생해서 우리가 항상 말했던 삶, 행복을 누리면서 살자! 형은 항상 너한테 고맙고 언제나 고맙다. 이 글 쓰는 순간에도 고맙다는 생각이 든다! 파이팅 하자!

그리고 내 동생들 병권, 희원, 문성, 영호, 효미, 대희, 서윤, 진! 학교에 있을 때 그리고 지금은 가끔씩 학교에 가면 나를 항상 노망 취급해주고 정말 고맙다!! 너희들 덕분에 여기 생활이 적응이 잘 안된다. 많이 챙겨주지 못 해서 미안하고 항상 고맙게 생각한다.

마지막으로 우리 학교 동생들! 민우, 유현, 현선, 동원, 영훈, 준혁, 승진, 운혁, 기동 우리 동생들! 우리 롤드컵 기억나지? 참 그때가 재밌었는데 정말 좋은 추억 남겨줘서 고맙다.

이렇게 저를 졸업까지 도움과 가르침을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

2016 년 12 월

서 용 범

이 력 서

성 명 : 서 용 범 (徐 榕 範)

생 년 월 일 : 1987년 5월 2일(양력)

출 생 지 : 광 주

주 소 : 광주광역시 북구 용봉동 한신아파트 1동 1203호

학 력

2003.3. - 2006.2. 광주금호고등학교

2008.3. - 2014.2. 조선대학교 광기술공학과 학사과정

2014.3. - 2017.2. 조선대학교 광기술공학과 석사과정

2016.1. - 2016.12. 한국표준과학연구원 산업측정표준본부 우주광학센터
학생연구원

학위 논문

- [1] “3차원 박막 두께 측정을 위한 영상타원계측기에 관한 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2016).

학술지 게재 논문

- [1]. Y. B. Seo, Y. H. Yun and K. -N. Joo, “3D multi-layered film thickness profile measurements based on imaging ellipsometry” Int. J. Precis. Eng. Manuf., 17 989-993 (2016)
- [2]. Y. H. Yun, Y. B. Seo and K. -N. Joo, “Elimination of the direction ambiguity and the dead zone in spectrally-resolved interferometry” Meas. Sci. Technol., 27 035004 (7pp) (2016)
- [3]. Y. G. Kim, Y. B. Seo and K. -N. Joo, “ Low cost wafer metrology using a NIR low coherence interferometry ” Opt. Express 21, 13648-13655 (2013)

특허 등록 및 출원

- [1]. 보행자 보호를 위한 차량 알림 시스템 및 그 방법 (등록)
- [2]. 분산판을 이용한 방향판별 분산간섭계 및 이를 이용한 측정 시스템 (등록)
- [3]. 대면적 실시간 박막 측정 분광 영상 타원계측 장치 (출원)

국내·외 학회 발표

- [1] 서용범, 주기남, “3차원 박막 두께 측정을 위한 영상타원 계측기”, “Spectral imaging ellipsometry for measuring 3D film thickness profiles”, 구두발표, 정밀공학회 2016년도 하계학술발표회.
- [2] 서용범, 주기남, “분광 영상타원계측기를 이용한 박막 측정”, 포스터발표, 한국광학회 2015년도 하계학술발표회.
- [3] Ki-Nam Joo, Byeong Kwon Kim, Yong Bum Seo, “Multi-Channel Optical Gap Sensor Based on Spectrally-Resolved Interferometry”, Oral Presentation, The 5th Asia Pacific Optical Sensors Conference APOS 2015.
- [4] Yong Bum, Seo, Ki-Nam Joo, “Imaging ellipsometry for surface roughness measurements”, Poster Presentation, ICPT 2014.
- [5] 서용범, 주기남, “표면 형상 및 거칠기 측정을 위한 이미징 타원편광기 개발”, 포스터발표, 한국광학회 2014년도 하계학술발표회.
- [6] 서용범, 주기남, “근적외선 저 간섭성 간섭계의 활용 : Si wafer의 두께, 형상, 굴절률 3D 측정”, 구두발표, 한국광학회 2014년도 동계학술발표회.
- [7] 서용범, 김영광, 주기남, “실리콘 웨이퍼 측정을 위한 저간섭성 간섭계”, 포스터 발표, 한국광학회 2013년도 하계학술발표회.
- [8] Byeong Kwon Kim, Ho-Jae Lee, and Ki-Nam Joo, “Wafer Metrology Based on Combined optical interferometry”, Poster Presentation, CLEO-PR & OECC/PS 2013.