



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](#)

2019년 2월
박사학위 논문

유기발광소자용 투명전극 제작 및 형상 분석에 관한 연구

조선대학교 대학원

자연과학과(물리학전공)

마 혜 준

유기발광소자용 투명전극 제작 및 형상 분석에 관한 연구

**A study on the fabrication and morphological analysis of transparent
electrode for organic light emitting diode**

2019년 2월 24일

조선대학교 대학원

자연과학과(물리학전공)

마 혜 준

유기발광소자용 투명전극 제작 및 형상 분석에 관한 연구

지도교수 최 은 서

이 논문을 이학 박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

자연과학과(물리학전공)

마 혜 준

마혜준의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	<u>신용진 (인)</u>
위원	한국광기술원	센터장	<u>신인희 (인)</u>
위원	고등광기술연구소	연구원	<u>신준근 (인)</u>
위원	한국전자통신연구원	연구원	<u>민기현 (인)</u>
위원	조선대학교	교수	<u>최은서 (인)</u>

2018년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 목표 및 내용	4
제 2 장 이론적 배경	6
제 1 절 유기발광소자용 투명전극 제작 공정	6
1. 박막 증착을 위한 스퍼터링 공정	6
2. 투명전극 패터닝을 위한 포토 리소그래피 공정	10
제 2 절 박막 소자 형상 측정 방법	17
1. 주사전자현미경을 이용한 형상 측정	17
가. 주사전자현미경의 구성 및 특성	17
2. 디지털 홀로그래피를 이용한 형상 측정	24
가. 디지털 홀로그래피의 기본 원리	24
나. 위상 정보 추출 방법	32
제 3 장 유기발광소자용 투명전극 제작	38
제 1 절 투명전극 제작을 위한 박막 증착 공정	38
1. 박막 증착 최적화 조건 도출	38
2. 박막 증착 후처리	51

제 2 절 투명전극 제작을 위한 포토 리소그래피 공정	58
1. 투명전극 패턴 형성	58
2. 투명전극 소자 전기적 특성 계측	61
제 4 장 유기발광소자용 투명전극 형상 측정 및 분석	64
제 1 절 열전계방출형 주사전자현미경을 이용한 형상 측정	64
1. 열전계방출형 주사전자현미경 시스템	64
2. 시료 전처리 및 측정 과정	70
3. 형상 측정 결과 및 특성 분석	77
제 2 절 광학적 위상이동 디지털 홀로그래피	79
1. 위상 이동 디지털 홀로그래피 시스템	79
가. 디지털 홀로그래피 시스템	79
나. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템	83
다. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템 특성	88
2. 형상 측정 결과 및 분석	91
가. 표준 시편 측정 결과 및 분석	91
나. ITO 박막 측정 결과 및 분석	94
다. 투명전극 소자 측정 결과 및 분석	98
라. Cr 박막 측정 결과 및 분석	102
제 5 장 결 론	106
참고문헌	109

List of Figures

그림 2-1. 고체 타겟에서 발생하는 입사 이온의 상호 작용	7
그림 2-2. 스퍼터링 구조도. (a) DC 스퍼터링 시스템, (b) RF 스퍼터링 시스템, (c) DC 또는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템	8
그림 2-3. 포토 리소그래피 공정 개요도	11
그림 2-4. 포토 리소그래피 공정 순서도	11
그림 2-5. 스핀 코팅 과정 개요도. (a) PR 도포, (b) 저속회전, (c) 고속회전, (d) 용매 증발	13
그림 2-6. 노광 방법 개요도. (a) 접촉식 방법, (b) 근접식 방법, (c) 투영 노광 방법 ..	14
그림 2-7. 현상 공정 과정 개요도. (a) 현상 과정 (b) 현상 결과	15
그림 2-8. SEM 시스템의 내부 구조도	17
그림 2-9. 패턴이 생성된 박막 시료 측정을 통한 광학현미경과 SEM의 피사계 심도 차이의 비교. (a) 광학현미경으로 측정한 영상, (b) SEM으로 측정한 영상	20
그림 2-10. SEM 측정 방법에 따른 반도체소자 및 나노와이어 측정 영상. 반도체 소자의 (a) 표면 형상, (c) 단면 형상, (e) 기울어진 면의 형상. 나노와이어의 (b) 표면 형상, (d) 단면 형상, (f) 기울어진 면의 형상 측정	21

그림 2-11. BSE 모드로 측정된 반도체 소자 및 나노와이어의 형상 측정 결과. (a) BSE 모드로 측정된 SEM 이미지, (b) BSE 모드로 측정된 SEM 이미지에서 측정된 길이 및 각도 22

그림 2-12. EDS 모드로 측정된 반도체 소자의 측정 결과. (a) EDS 모드로 측정된 SEM 이미지, (b) EDS 모드로 측정된 결과로부터 분석된 성분 분포표, (c) EDS 모드로 측정된 성분의 원소 대응 이미지 23

그림 2-13. 디지털 홀로그래피 개략도. (a) 홀로그래피 기록 과정, (b) 참조파로 재구성, (c) 왜곡 되지 않은 실상을 재생하기 위한 복소공역 참조파로 재구성 25

그림 2-14. 디지털 홀로그래피 복원을 위한 설정된 좌표계 27

그림 2-15. 위상 이동 간섭계의 일반적인 실험 장치 개략도 32

그림 3-1. In-line 방식의 RF 마그네트론 스퍼터 구조도 40

그림 3-2. In-line 방식의 RF 마그네트론 스퍼터 시스템 사진 40

그림 3-3. O₂ 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화 그래프 44

그림 3-4. O₂ 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 두께 변화 그래프 45

그림 3-5. O₂ 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화 그래프 45

그림 3-6. Ar 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화 그래프 46

그림 3-7. Ar 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 두께 변화 그래프 47

그림 3-8. Ar 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화 그래프 47

그림 3-9. Ar 가스 주입량이 90 sccm일 때 증착 시간에 따른 ITO 박막의 두께 및 면저항 변화 그래프 48

그림 3-10. 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화 그래프 49

그림 3-11. 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 두께 변화 그래프 49

그림 3-12. 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화 그래프 50

그림 3-13. 공정 압력이 2.5 mtorr일 때 증착 시간에 따른 ITO 박막의 두께 및 면저항 변화 그래프 50

그림 3-14. 후처리 공정에 따른 ITO 박막의 면저항 측정 위치 및 면저항 측정 결과 52

그림 3-15. 측정 위치에 대한 면저항 변화 결과 그래프 52

그림 3-16. 후처리 공정된 ITO 박막의 균일도 평균값 및 면저항 평균값 변화 그래프 53

그림 3-17. 후처리 공정된 ITO 박막의 광투과율 변화 그래프 54

그림 3-18. 후처리 공정된 ITO 박막의 표면 거칠기 변화 그래프 56

그림 3-19. 원자힘현미경으로 5 μm ×5 μm 영역에서 측정한 후처리 공정된 ITO 박막의 3차원 형상. (a) Sample A, (b) Sample B, (c) Sample C, (d) Sample D 57

그림 3-20. 포토 리소그래피 공정을 통해 제작된 소자 영상. (a) OLED용 투명전극 소자, (b) 제작된 투명전극 소자를 적용한 OLED 테스트 소자 61

그림 3-21. 투명전극 제작 조건에 따른 OLED 테스트 소자 전압-전류밀도 특성 변화 그래프 62

그림 3-22. 투명전극 제작 조건에 따른 OLED 테스트 소자 전류밀도-전류효율 특성 변화 그래프 63

그림 3-23. 투명전극 제작 조건에 따른 OLED 테스트 소자 전압-발광 특성 변화 그래프 66

그림 4-1. 전자총의 전자원 이미지. (a) W 단결정으로 만들어진 열방출형 전자총 전자원, (b) ZrO_2 과 W으로 만들어진 열전계방출형 전자총 전자원 65

그림 4-2. 가속전압 변화에 따른 CNT 시료 표면 측정 영상. (a) 1 kV, $\times 7,000$ 측정, (b) 1 kV, $\times 12,000$ 측정, (c) 5 kV, $\times 7,000$ 측정, (d) 5 kV, $\times 12,000$ 측정, (e) 15 kV, $\times 7,000$ 측정, (f) 15 kV, $\times 12,000$ 측정. 67

그림 4-3. 가속전압 1 kV에서 프로브 전류값 차이에 의한 CNT 시료 표면 측정 영상. (a) 100 nA, $\times 7,000$ 측정, (b) 100 nA, $\times 12,000$ 측정, (c) 50 nA, $\times 7,000$ 측정, (d) 50 nA, $\times 12,000$ 측정 68

그림 4-4. 금속막 코팅 전과 후의 스캔속도에 따른 W 분말 시료의 영상 비교. (a) 비코팅, 고속스캔 측정, (b) 비코팅, 저속스캔 측정, (c) 코팅, 고속스캔 측정, (d) 코팅, 저속스캔 측정 69

그림 4-5. 금속 재료에 따른 코팅된 전도성막 표면 형상. (a) Cr 3 nm 코팅, (b) Pt 3 nm 코팅, (c) Au 3 nm 코팅, (d) C 3 nm 코팅. 71

그림 4-6. 코팅 시간 증가에 따른 Pt 전도성막 표면 형상. (a) 비코팅, (b) 5 sec, (c) 10 sec, (d) 15 sec, (e) 20 sec, (f) 25 sec, (g) 30 sec, (h) 35 sec, (i) 40 sec, (j) 45 sec, (k) 50 sec, (l) 55 sec. 73

그림 4-7. 전도성막 형성 유무에 따라 ×100,000 배율에서 측정된 금속박막 단층 영상. (a) 비코팅된 Pd 박막, (b) 20 sec 코팅된 Pd 박막, (c) 비코팅된 Cr 박막, (d) 20 sec 코팅된 Cr 박막, (e) 비코팅된 Mo 박막, (f) 20 sec 코팅된 Mo 박막 74

그림 4-8. 전도성막 형성 조건에 따라 ×100,000 배율에서 측정된 산화막 단층 영상. (a) 비코팅된 ITO 박막, (b) 20 sec 코팅된 ITO 박막, (c) 30 sec 코팅된 ITO 박막, (d) 비코팅된 AZO 박막, (e) 20 sec 코팅된 AZO 박막, (f) 30 sec 코팅된 AZO 박막, (g) 비코팅된 SiO₂ 박막, (h) 20 sec 코팅된 SiO₂ 박막, (i) 30 sec 코팅된 SiO₂ 박막 75

그림 4-9. 전도성막 형성 조건에 따라 ×100,000 배율에서 측정된 분말 시료 표면 영상. (a) 30 sec 코팅된 ZnO 시료, (b) 40 sec 코팅된 ZnO 시료, (c) 30 sec 코팅된 TiO₂ 시료, (d) 40 sec 코팅된 TiO₂ 시료, (e) 30 sec 코팅된 Al₂O₃ 시료, (f) 40 sec 코팅된 Al₂O₃ 시료 76

그림 4-10. 스퍼터링 증착 조건에 따라 증착된 ITO 박막을 FE-SEM으로 ×100,000에서 측정된 단면 영상 및 두께 측정 결과. (a) sample1, 112 nm, (b) sample2, 134 nm, (c) sample3, 152 nm, (d) sample4, 165 nm, (e) sample5, 174 nm, (f) sample6, 153 nm, (g) sample7, 142 nm (h) sample8, 131 nm (i) sample9, 155 nm 78

그림 4-11. 위상이동 간섭계의 개략도. (a) 마하젠더 간섭계, (b) 마이켈슨 간섭계. 79

그림 4-12. 벌크 광학계 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도. (MO는 microscope objective lens를 의미함) 81

그림 4-13. 벌크 광학계 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도. (ND filter는 neutral density filter를 의미함) 82

그림 4-14. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템 신호처리 과정 순서도 85

그림 4-15. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도 86

그림 4-16. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템의 구현된 모습 86

그림 4-17. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도 87

그림 4-18. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템의 구현된 모습 87

그림 4-19. Yb 도핑된 광섬유에 의한 4-step 위상 제어를 통한 간섭신호의 이동 88

그림 4-20. Yb 도핑된 광섬유에 의한 8-step 위상 제어를 통한 간섭신호의 이동 79

그림 4-21. 980 nm 레이저 다이오드 광펌핑을 통한 위상 잠금 90

그림 4-22. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 표준 분해능 타겟의 측정 결과. (a) 측정된 간섭무늬 영상, (b) 위상 이미지, (c) 3차원 형상으로 복원된 결과, (d) 표준 패턴 프로파일의 분석 결과 93

그림 4-23. 벌크 광학계 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 ITO 박막 단차 측정 결과 (a) 유리기판 위에 증착된 ITO 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 지도 이미지, (c) 프로파일 측정 결과 95

그림 4-24. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 ITO 박막 단차 측정 결과 (a) 유리기판 위에 증착된 ITO 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 지도 이미지, (c) 프로파일 측정 결과 96

그림 4-25. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 ITO 박막 형상 측정 결과 (a) 유리기판 위에 증착된 ITO 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 이미지, (c) 3차원 형상 이미지 97

그림 4-26. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 투명전극 형상 측정 결과. (a) OLED용 투명전극 소자 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 3차원 형상 영상 99

그림 4-27. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 투명전극 단차 측정 결과. (a) OLED용 투명전극 소자 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 프로파일 측정 결과 100

그림 4-28. FE-SEM으로 $\times 100,000$ 로 측정한 단면 측정 영상. (a) ITO 박막 소자 단차 측정 결과, (b) 투명전극 소자의 단차 측정 결과 101

그림 4-29. 벌크 광학계 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템에 의한 Cr 박막 두께 측정 결과. (a) 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 Cr 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 특정 영역에서의 프로파일 측정 결과 103

그림 4-30. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 Cr 박막 경계면 측정 결과. (a) 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 Cr 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 3차원 형상 이미지 104

그림 4-31. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템에 의한 Cr 박막 두께 측정 결과. (a) 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 Cr 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 특정 영역에서의 프로파일 측정 결과 105

List of Tables

표 2-1. 광학현미경과 SEM의 특성 비교	19
표 3-1. 예비 실험으로 결정된 증착 조건	42
표 3-2. ITO 박막 스퍼터링 증착 조건 및 특성 측정 결과	43
표 3-3. 후처리 공정된 ITO 박막의 균일도 평균값 및 면저항 평균값 비교표	53
표 3-4. 원자힘현미경으로 측정한 표면 거칠기 결과	56
표 4-1. SEM 전자총 특성 비교표	65
표 4-2. 스퍼터링 증착 조건에 따른 ITO 박막 두께 측정 결과	77
표 4-3. 표준 분해능 타겟의 표준패턴 선폭값	91
표 4-4. 디지털 홀로그래피 시스템과 주사전자현미경 측정 결과 비교	101

ABSTRACT

A study on the fabrication and morphological analysis of transparent electrode for organic light emitting diode

Hye Jun Ma

Advisor : Prof. Eun Seo Choi, Ph.D.

Department of Physics

Graduate School of Chosun University

In this study, optimal conditions for the fabrication process of ITO thin films were derived and transparent electrodes were fabricated by patterning on the ITO thin films through photolithography. The characteristics of the fabricated ITO thin films and its transparent electrode devices were measured by field emission-scanning electron microscopy(FE-SEM) and digital holography based on fiber optics and similar results were obtained.

The ITO thin films were fabricated by varying the various process conditions. As a result, the ITO thin films were grown under the conditions: The pressure of Ar gas and O₂ gas were adjusted to 90 and 0.1 sccm, respectively. the RF power was 300 W, the deposition temperature was 250°C, and deposition time was 1350 sec. The ITO thin films

produced at this optimum condition had the thickness of 155 nm, the area resistance of 25.3 ohm/sq and the surface roughness uniformity of 9.1%. After post-treatment at 380°C, the light transmittance reached 97.1%, the surface roughness R_{pv} and R_a were 15.644 nm, and 1.708 nm. After the photolithography process for the transparent electrodes, the electrical characteristics of the ITO thin films and transparent electrodes device were measured and showed similar performance in electrical characteristics.

In order to observe the topological characteristics of the fabricated ITO thin films and the transparent electrode devices, measurements were performed using high-resolution FE-SEM. After metal coating with Pt, the thickness of the ITO thin film was found to be in the range of 112~174 nm for each process condition. For the measurement of the topology of the ITO thin film and transparent electrodes, a transmission and reflection type digital holography system was implemented by using bulk optics. We also developed a digital holography capable of phase shifting based on fiber optics, and compared the feasibility of the proposed measurement technique by performing measurements on the same sample. In the proposed optical fiber-based digital holography, the degree of phase shift could be precisely controlled by the pump light, and it was confirmed that the interference fringe control for 4-step or 8-step phase shifting is desirable by using this optical phase control method. In addition, phase lock effect could be confirmed by controlling phase shift in real time. Thickness of the ITO thin film and the transparent electrode devices were measured by using the developed optical fiber-based digital holography system and the results were 159.6 nm and 57.8 nm, which showed the error of 3.3% and 3.6%, respectively, when comparing with the results measured by FE-SEM. However, considering the external vibration and the error in measurement, the optical fiber-based digital holography method, which can measure in an in-situ non-intrusive environment, can be improved the performance and it is expected to be an alternative technology.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

스마트폰에 사용되는 평판 디스플레이용 유기발광소자(Organic Light Emitting Diode, OLED)는 기존의 디스플레이 패널에 비해 저전압 구동, 자기 발광, 박막형, 넓은 시야각, 그리고 빠른 응답속도 등의 장점을 갖는다 [1-3]. 이러한 장점으로 인해 유기발광소자는 최근 대형 TV용 패널을 비롯해 조명사업까지 그 시장이 점차 확대되고 있다 [4]. 하지만 일반적인 반도체 LED와는 다르게 양 전극에서 주입된 정공과 전자가 유기 분자 내에서 재결합하여 여기자를 형성하여 발광하므로 OLED의 전기적 특성은 양극 전극에 영향을 받는다 [3-5].

OLED의 양극 전극은 투명 전도성 산화막(Transparent Conducting Oxides, TCO)을 사용한다. TCO는 전기 전도도가 1×10^{-3} ohm/cm 이며, 광 투과율이 80% 이상이다 [6]. 또한 에너지 밴드갭이 3.3 eV 이상으로 가시광선 영역의 빛을 모두 투과시키고, 자외선 영역에서는 높은 반사도를 보인다 [6,7]. 인듐주석산화물(Indium Tin Oxide, ITO)은 투명 전도성 물질로 우수한 전기적 특성 및 광학적 특성을 가지고 있으며 가시광선 영역에서 85% 이상의 높은 투과율을 보인다 [6-11].

ITO는 In을 주원료로 제작하는데 In은 Zn, Pb, Fe 등 다른 금속 광석에 소량 함유되어 있으며 Al과 비슷한 화학적 특성을 지니고 있다. 디스플레이 시장이 확대되면서 인듐의 수요도 증가하여 가격이 상승하였고, 자원 고갈로 인듐의 희소성이 극대화되었다. 이러한 이유로 ITO의 대체 물질에 대한 연구가 수행되었지만, 아직까지도 ITO의 마땅한 대안 물질이 확보되지 않아 여전히 활발히 사용되고 있다 [11,12]. 이에 ITO의 효율을 높이기 위해 최적화된 증착법이 필요하게 되었다. 이를 위해 증착된 TCO를 사용하는 투명전극으로 활용하기 위해 적절한 공정조건을 결정하고 포토 리소그래피 공

정을 통해 필요한 패턴을 제작할 필요가 증가되고 있다 [13]. TCO는 제작과정에서 공정에 사용하는 가스의 분압, 고주파수 전력, 박막 증착률, 그리고 후처리 공정 온도 조건에 따른 박막의 두께, 광 투과율, 면저항, 전류전도 특성 등이 민감하게 바뀌게 된다 [14]. 그러므로 최적의 공정조건을 도출하고 그 조건에 따라 제작된 박막 및 소자의 특성을 검사할 필요가 있다.

제작된 박막 및 소자의 형상을 관찰하기 위해서 주로 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하고 있다. SEM은 집속된 전자빔을 시료 표면에 조사하면서 전자빔과 시료와의 상호작용에 의해서 발생하는 전자를 이용하여 시료의 표면을 관찰하는 장비이다 [15]. 1942년 미국 RCA 연구소의 V.A Zworykin, J. Hiller, R.L. Snyder에 의해 발명되어 1965년 영국의 케임브리지 인스트루먼트사에서 최초로 상용 SEM인 스테레오 스캔 MK1을 개발하였다 [15,16]. SEM은 재료, 부품, 생체 등 다양한 시료의 표면을 확대하여, 관찰 및 분석하는 연구 장비로 반도체산업의 성장과 더불어 비약적으로 발전해 왔다. 반도체산업의 발달과 반도체소자의 소형화로 인하여, 보다 높은 분해능과 높은 배율로 시료표면을 관찰할 수 있는 현미경의 필요성이 증가하고, 분해능 한계를 가지고 있는 광학현미경보다 높은 분해능과 높은 배율로 시료표면 관찰이 가능한 SEM과 같은 정밀측정 연구 장비산업이 성장하였다 [17].

SEM은 반도체 공정을 통해서 만들어진 시료를 평가하는데 무엇보다도 필수적이지만 현재 기술로는 여러 가지 단점과 한계를 가지고 있다 [15-17]. SEM은 전자빔을 가속시키기 위한 고전압을 이용하여 진공 중에서 전자를 가속시켜야 하며, 무엇보다 전처리가 필요한 일반적인 샘플에 대한 준비시간이 요구된다 [15,18,19]. 또한 금속 코팅을 수행하지 않는 경우 심한 이미지 왜곡 현상이 발생할 수 있다 [19]. 무엇보다도 샘플을 훼손해야 단차 정보와 같은 형상 특성을 분석할 수 있다. 이를 예방하기 위해 반도체 시료의 경우 시료 표면에 Au이나 Pt 등의 전도성 금속을 코팅하여 측정을 수행한다 [20]. 이러한 과정은 시료에 손상을 줄 수 있고, 고분해능의 단층영상을 획득할 수 있지만 생체 시료를 대상으로 측정하는데는 적합하지 않다. 또한 박막의 두께가 나

노 단위에 이르는 경우 일반적인 SEM으로는 정확한 두께 측정에 어려움을 겪게 된다 [18-20].

이러한 단점을 극복하기 위한 대안기술의 도입 및 개발이 필요하며 진공이 아닌 일반적인 환경에서도 비접촉식이고 비파괴적으로 측정이 가능한 기술의 개발이 절대적으로 필요하다. 고분해능으로 대기압 환경에서 관찰 가능한 대표적인 방법은 현미경을 이용하는 방법이다 [21]. 하지만 광학 현미경은 회절 한계가 존재하기 때문에 파장보다 작은 크기를 구분하는데 한계를 가지고 있다 [22]. 광학 현미경 중에서 공초점 현미경은 측정단 앞에 핀홀을 이용하여 해상도를 향상시킨 방법이다. 공초점 현미경의 개발은 해상도의 향상을 가져왔지만 현대 반도체 산업에서 요구하는 나노 단위의 측정에 있어서는 한계성을 보인다 [21-24].

이를 대체할 수 있는 대안기술로써 디지털 홀로그래피 기법을 이용하여 단차를 측정하는 방법이 제시되었다 [25]. 대부분의 디지털 홀로그래피 시스템은 벌크 광학계를 기반으로 개발되어 정밀한 광정렬이 필요하며 외부 환경 변화에 민감하게 반응하여 케이지와 같은 외부 환경과는 격리된 실험 환경을 필요로 한다. 최근 들어 이러한 문제를 광섬유 기반으로 시스템을 개발하면서 광정렬의 불편함을 해결하고, 보다 간소화된 시스템을 구성하면서도 성능에서는 유사한 결과를 얻을 수 있게 되었다. 이러한 점에서 광섬유 기반의 디지털 홀로그래피 시스템의 개발 및 활용도가 향상되고 있다 [25,26]. 이러한 대안 기술을 기반으로 나노 단위의 단차와 패턴을 가지는 박막을 이용한 소자의 계측 및 형상 평가는 실시간 *in situ*로 이루어 질수 있는 장점을 가질 수 있어 활발한 연구가 필요한 시점이다.

제 2 절 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 ITO 박막을 증착시켜 OLED 투명전극 소자로 활용하기 위한 공정 최적화를 위해 여러 공정 조건들에 따른 박막 및 소자의 전기적인 특징을 측정함으로써 공정의 적합성을 파악하고자 하였고, 제작된 박막 및 소자의 형상을 고분해능으로 측정하기 위해서 현재 수행되고 있는 파괴적 샘플 측정 방법과 이 방법에 대안이 될 만한 비파괴적 샘플 측정 방법을 동시에 소개하고자 한다. 공정 최적화를 위해 공정의 세부 조건들의 변화에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성을 측정하였다. 고분해능 박막의 두께를 측정하기 위한 방안으로는 열전계방출형 주사전자현미경과 디지털 홀로그래피를 이용하여 제작된 박막 및 소자의 두께 및 3차원 형상에 대한 분석 결과를 소개하고자 한다. 이러한 연구 내용을 효과적으로 전달하기 위해서 공정 최적화에 대한 연구내용과 형상 측정 결과에 대한 내용으로 본 논문을 구성하였다.

첫 번째 연구 주제는 요구되는 ITO 박막 및 투명전극소자를 제작하기 위한 공정의 최적화 과정과 그에 대한 시료의 특성을 측정하는 것이다. 이를 위해서 기존의 박막 개발 공정과 노광에 의한 패턴 제작 공정을 소개하고, 이 공정 범위 내에서 ITO 박막 및 투명전극소자의 전기적 특성을 최적화하기 위한 공정조건을 도출한 과정 및 공정 조건별 박막의 특성을 계측한 결과를 제시하고자 한다. 또한 공정 조건 조정에 따른 박막 특성의 최적화가 이루어 질 수 있다는 점을 설명하고자 한다. ITO의 활용성을 고려할 때 ITO 박막을 이용하는 OLED의 투명전극소자에 대한 계측 및 평가도 매우 중요하다. 그러한 점에서 투명전극소자가 보이는 광 투과도와 전기 전도도의 특성 평가를 통해 ITO 증착을 위한 최적 스퍼터링 공정 조건을 찾고, 투명전극으로서의 효율을 증가시키기 위해 낮은 면전기 저항을 갖는 전기적 특성을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 투명전극 제작을 위한 ITO에 최적화된 포토 리소그래피 최적 공정 조건을 동시에 도출한 결과를 제시하였다.

두 번째 연구 주제인 박막 및 개발소자의 형상 측정에 대한 연구 범위는 크게 샘플을 훼손하면서 단층을 관찰하는 SEM 기반 고분해능 기법을 이용한 측정 결과와 in situ 실시간 측정이 가능한 광학 디지털 홀로그래피 기법을 통한 측정 결과 이 두 가지로 한정하여 연구 결과를 설명하고자 하였다. 파괴적인 샘플 관찰법인 SEM 중에서 나노 단위의 단차 측정이 가능한 열전계방출형 SEM은 현재 국내에서 도입되어 사용가능한 인력이 제한적인 연구장비로써 희소성을 가지는 연구장비이다. 이러한 고분해능 장비를 이용하여 제작된 ITO 박막 및 투명전극소자의 단차 및 표면 특성의 변화를 관찰한 결과와 절개된 단면의 모습을 측정한 결과와 제시하여 박막 공정의 최적화를 확인하고자 하였다. 이러한 샘플을 훼손하는 방법을 극복할 수 있는 대안기술로써 광학적 디지털 홀로그래피를 제시하고자 하였다. 이를 위해서 보편적으로 많이 사용되는 벌크 광학계 기반 디지털 홀로그래피 시스템을 먼저 구성하여 박막 형상을 측정 하였으며 이후 비선형 굴절률 변화에 기반을 둔 위상 이동 기법을 활용한 결과를 제시하고자 하였다. 측정 결과를 통해서 최적 공정조건에서 개발된 박막 형상에서의 특징을 비교 분석 하였다.

본 논문에서는 구체적인 연구 내용을 다루기 전에 기초적인 이론 및 배경지식을 설명하고 이를 바탕으로 최적 공정 도출의 과정과 실험과정을 설명하였다. 이어 관련 주제별 연구결과를 제시하고 분석함으로써 박막의 제작, 소자로의 활용, 제작된 박막의 특성 측정에 이르는 전과정을 다루도록 하고자 하였다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 유기발광소자용 투명전극 제작 공정

1. 박막 증착을 위한 스퍼터링 공정

박막을 형성하는 기술은 크게 물리적 기상증착(Physical Vapor Deposition, PVD)과 화학적 기상증착(Cheical Vapor Deposition, CVD)으로 나눌 수 있다 [27]. PVD는 원하는 박막 재료의 고체 타겟을 물리적인 작용을 통해 기판 위에 박막을 형성하는 방법이다. 스퍼터링은 PVD 방법 중 하나로 Grove가 1852년에 처음으로 개발하였다. 이 방법은 Cr, Al, Mo 등의 박막 형성에 이용되고 있다 [28]. 스퍼터링은 플라즈마를 이용하는 박막 증착 공정으로 높은 운동에너지를 갖는 이온이 고체 타겟 표면에 충돌하면 이온의 운동에너지와 운동량이 고체 표면과 내부의 원자에 전달되어 연속적인 충돌이 일어난다. 이 과정에서 표면결합에너지보다 큰 운동에너지를 갖는 고체 타겟 표면 원자들이 진공으로 떨어져 나온다 [27-31]. 입사하는 이온이 큰 에너지(20~30 eV)를 가져야 고체 타겟에서 원자를 방출시키는데, 이는 스퍼터링이 일어나기 위한 문턱 에너지가 존재한다는 것을 의미한다. 보통 금속 원자 한 개를 승화시키는데 필요한 에너지는 3~5 eV인데, 20~30 eV는 이에 비하면 상당히 큰 값이다. 이렇게 큰 에너지가 필요한 이유는 대부분의 에너지가 열로 방출되며 극히 일부분에 해당하는 에너지만이 스퍼터링에 이용되는 것을 의미한다. 문턱에너지보다 작은 에너지를 갖고 입사하는 이온들은 고체 타겟의 원자들을 원래의 위치에서 이동시키거나 고체 타겟의 원자에 에너지를 전달하여 확산시킬 수 있다. 스퍼터링으로 떨어져 나간 원자의 주변에 있던 원자들도 원래의 위치에서 이동하거나 확산되기도 한다 [32-34]. 입사된 모든 이온들은 고체 타겟 표면에서 중성원자가 된다. 중성입자로서 산란되면서 고체 타겟 표면의 원자층에 변형

을 일으키며 점차 그들의 에너지를 잃게 되고 동시에 고체 타겟 원자들에 의해서 산란
 된다 [35,36]. 입사된 이온들 중 일부는 고체 타겟으로부터 방사되기도 한다 [36]. 입사
 된 이온들에 의해 이탈된 고체 타겟 원자들의 일부는 고체 타겟 표면으로 확산하거나
 그들의 에너지가 결합에너지를 극복할 정도로 매우 큰 경우에 스퍼터링이 된다
 [37,38]. 이때 고체 타겟 원자들끼리도 운동량을 교환하기도 하며 매우 큰 에너지를 가
 진 이온들은 고체 타겟 표면에 중화되어 고체 타겟 내부로 주입되기도 한다 [35-41].
 그림 2-1은 고체 타겟 표면과 이온의 상호 작용을 나타낸다.

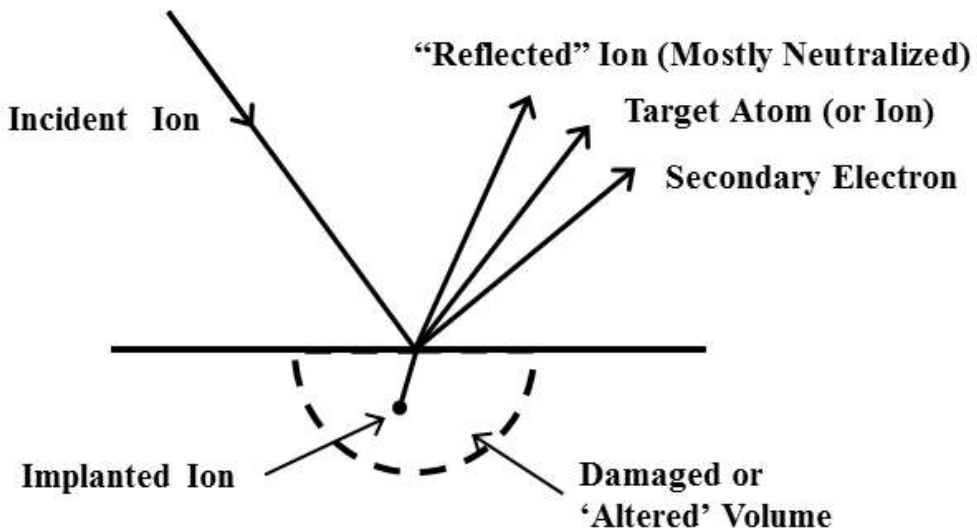


그림 2-1. 고체 타겟에서 발생하는 입사 이온의 상호 작용

스퍼터링은 전력을 인가해주는 방식에 따라 직류(Direct Current, DC) 스퍼터링, 고주파(Radio Frequency, RF) 스퍼터링으로 나뉘며, 영구자석을 이용하여 성막 효율을 높은 마그네트론 스퍼터링 방식이 있다 [6-15]. 그림 2-2는 스퍼터링 시스템의 구조를 보여준다.

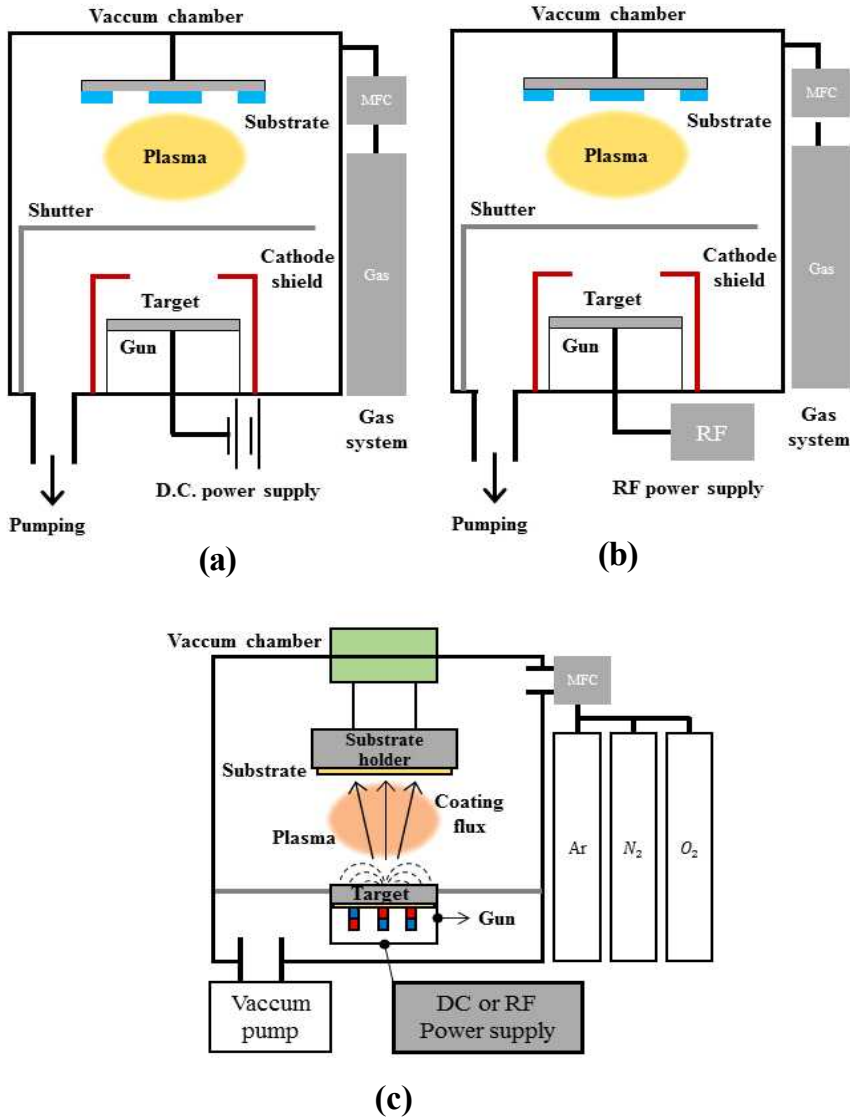


그림 2-2. 스퍼터링 구조도. (a) DC 스퍼터링 시스템, (b) RF 스퍼터링 시스템, (c) DC 또는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템

그림 2-2(a)는 DC 스퍼터링 시스템의 대표적인 개략도이다. 한 쌍의 양극과 음극으로 구성된 2극 방전관 구조이며, 음극은 고체 타겟으로 양극은 기판 홀더의 역할을 한다 [31]. 전극 간에 수 kV의 DC 전압을 인가하면 전극 사이에 글로우 방전이 일어나 플라즈마가 형성되며, 플라즈마 속의 Ar 양이온이 고체 타겟 근방의 음극 전위 강하로 인해 가속되어 고체 타겟 표면에 충돌하여 고체 타겟 입자가 기판에 침착되면서 박막이 형성된다 [40]. DC 스퍼터링 방법에서 고체 타겟으로 유리 기판 또는 유전체와 같은 절연체를 사용할 경우 방전 개시 직후에 절연체의 표면이 양으로 대전되면서 고체 타겟으로 이온 입사가 이루어지지 않는 단점을 가진다. 하지만 장치의 기본 구조가 간단하기 때문에 실험용에서 공업용에 이르기까지 오래전부터 널리 사용되고 있다 [42,43]. DC 스퍼터링 방법에서의 단점은 100 kHz 이상의 RF로 전력을 인가함으로써 해결 가능하다 [34-38,45]. 이렇게 하면 절연체 타겟 표면에 이온과 전자의 교차 충돌이 일어나며 플라즈마 속의 전자는 이온보다 이동도가 크므로 타겟 표면에 전자의 축적이 발생하고 고체 타겟 표면은 음으로 대전되므로 절연물 타겟의 스퍼터링이 가능해진다 [37-40].

그림 2-2(b)는 RF 스퍼터링 시스템의 구조도이며 공업용 주파수로 할당된 13.56 MHz의 RF를 가장 많이 사용한다 [34-38,49]. RF 스퍼터링에서 방전 공간의 전자는 RF 전기장에 의해서 전극 간을 왕복 진동한다. 그러므로 DC 스퍼터링보다 전자에 의한 전리가 효과적으로 발생하므로 낮은 압력에서도 스퍼터링이 가능하다. RF 글로우 방전을 이용한 스퍼터링은 도체와 절연체 재료를 박막으로 만들 수 있다는 장점이 부각되면서 1970년대 이후 스퍼터링 시스템의 주요 방식으로 사용되었다 [44-46]. RF 스퍼터링의 경우에 전력이 방전에 잘 도입할 수 있도록 RF 전원과 전극 사이에 임피던스 정합회로가 필요하다. 또한 임피던스 정합회로와 타겟 사이에 직렬로 콘덴서가 연결된다. 고체 타겟에는 냉각과 동시에 RF 고전압이 인가되기 때문에 수냉 배관에는 전기 절연물을 이용하고 전기 저항이 높은 냉각수를 사용해야 한다 [35-40].

그림 2-2(c)는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템의 구조도이다. 1970년대에 약자기장

을 이용한 마그네트론 스퍼터링 장치는 반도체 IC(integrated circuit)의 박막 형성 공정으로 주목을 받기 시작해 지금까지 널리 이용되고 있다 [34-44]. RF 마그네트론 스퍼터링은 영구 자석의 도입으로 이전 스퍼터링 장치의 느린 성막 속도를 극복하고, 반도체 IC 구성에 필요한 각종 합금 박막을 재현성이 뛰어나게 형성 할 수 있다는 장점을 갖는다 [39,40]. 또한 스퍼터링 방전으로 인한 반도체 소자의 손상도 실용상 문제가 없는 수준으로 줄일 수 있고, RF를 이용함으로써 절연물 박막 형성이 가능하다는 장점이 있다. 고체 타겟 뒷면에 영구자석을 배치하여 자기장을 형성하며, 자석에 의해 형성되는 타겟 표면의 자기장 세기는 수 백 가우스 정도이다 [36-38]. 자기장과 타겟에 의해 형성된 자기장에 의해서 전자는 타겟 근처에 포획되므로 고체 타겟 근처에서의 전자 밀도가 높아진다. 포획된 전자와 기체 분자의 충돌 빈도가 높아지므로 낮은 압력에서도 플라즈마 형성이 가능하다 [49].

2. 투명전극 패터닝을 위한 포토 리소그래피 공정

포토 리소그래피(photo lithography) 공정은 자외선 광을 특정 패턴을 가지는 금속 마스크를 통과시켜 감광물질(Photo Resist, PR)이 도포된 웨이퍼나 유리 기판에 전사시켜 기하학적 형상을 가지는 패턴을 기판 위에 형성시킨다. 반도체 제조공정에서 기본 설계 패턴을 기판 위에 형성하는데 있어서 중요한 공정이다 [50].

그림 2-3은 포토 리소그래피 공정 개요도이다. 진공 척 위에 기판을 올려놓고 레지스트 디스펜서로 PR을 기판 위에 뿌린다. 그리고 진공 척을 회전시키며 PR을 균일하게 기판 위에 도포시킨다. PR이 도포된 기판 위에 금속 마스크를 올려놓고 자외선 광을 조사하여 PR을 전사 시킨 후, 식각 공정 통해 PR을 제거하면 기판 위에 디자인된 패턴이 형성된다.

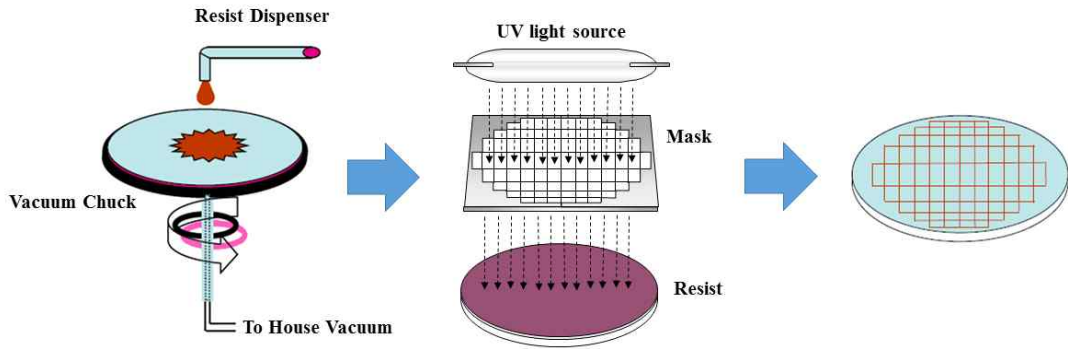


그림 2-3. 포토 리소그래피 공정 개요도

그림 2-4는 포토 리소그래피 공정의 일반적인 흐름을 정리한 내용이다. 세부적으로는 기판의 세정 및 표면처리, 감광제의 도포, 약하게 굽기, 정렬 및 노광, 후노광 굽기, 현상, 강하게 굽기, 현상 후 검사의 단계로 구성되어진다 [50-56].

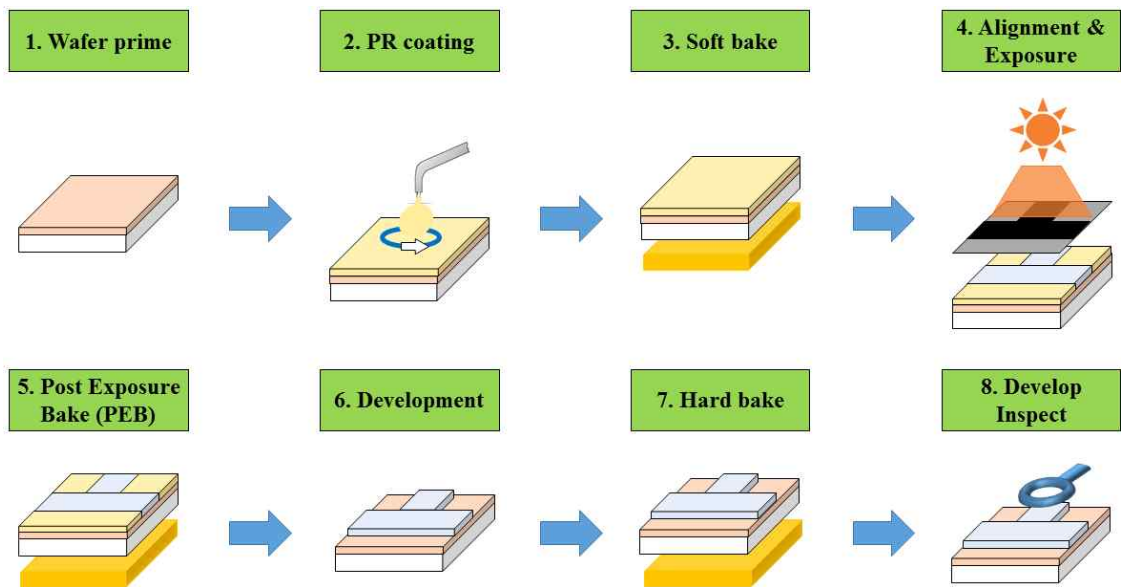


그림 2-4. 포토 리소그래피 공정 순서도

첫 번째는 기판을 준비하는 과정으로 표면 세정 과정이다. 세정은 리소그래피를 시작하는 공정에서 반드시 행하는 것으로, 표면 청정화를 위한 공정이다. 이 공정에서 표면의 불순물 제거하고 밀착 향상제 HMDS(hexa methy disilazane)을 도포하여 PR막 및 표면과의 접착도를 향상시키는 과정이다 [50,51]. HMDS를 이용하는 방법 외의 표면 처리 방식에는 고온에서 굽는 방식인 건조 굽기, 친수성 자연 산화막을 제거하는 희석된 HF 용액 식각법, SiO₂ 또는 Cr 등의 박막 형성법 등이 사용되고 있다 [51]. 패턴이 미세할수록 수용성 알칼리 현상액에 대한 용해 속도차를 증대시키기 위해 PR을 점점 더 소수성을 가지도록 개발하는 경우가 많아져 사용하는 PR의 종류와 특성에 따라 HMDS 처리 유무 및 처리 방법을 결정하게 된다 [51].

두 번째는 접착력이 향상된 웨이퍼 표면에 코팅장비를 활용하여 PR 도포(PR coating)하는 과정이다. PR은 특정 파장대의 빛을 받으면 반응하는 일종의 감광성 고분자 화합물로 PR의 종류에 따라 빛을 받은 부분의 폴리머 사슬이 끊어지거나 혹은 더 강하게 결합한다. 일반적으로 빛을 받은 부분의 폴리머 사슬이 끊어져 현상액에 잘 녹는 PR을 양성 PR이라 하며 그 반대의 경우를 음성 PR이라 한다. PR 도포에서 중요 포인트는 접착력, 두께, 그리고 균일도이며 이는 코팅 장비에서 여러 가지 변수를 제어함으로써 원하는 PR막을 얻을 수 있다. 일반적으로 회전력에 의해 코팅이 이루어지는 스펀코팅방식을 주로 이용하며, 스펀코팅의 순서는 그림 2-5에서 보는 바와 같이 도포, 저속 회전, 고속 회전, 그리고 최종 저속 회전 순서로 진행된다. 도포 단계에서는 정지해 있거나 낮은 속도로 회전하고 있는 기판 위에 PR을 도포하게 되며, 저속 회전 단계에서는 저속으로 회전하여 도포된 PR를 기판 표면 전체를 덮게 하는 단계이다. 고속 회전은 PR의 두께를 원하는 수준으로 맞추어 주며, 고속 회전 후 용매를 증발시키고 잔여물을 제거하는 최종 저속 회전 단계를 거치게 된다.

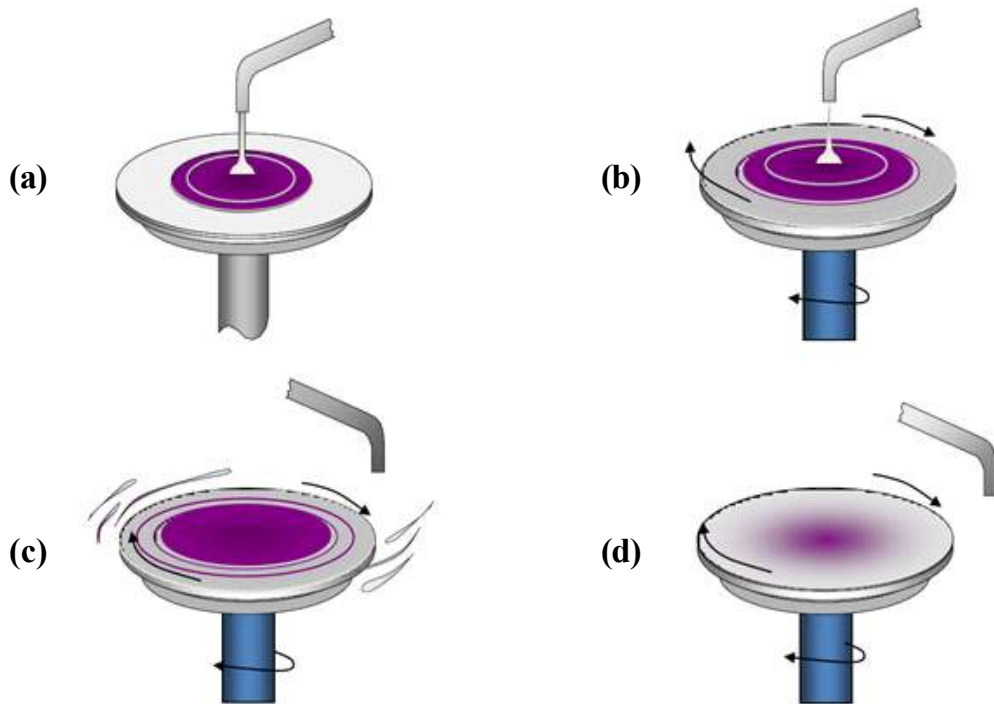


그림 2-5. 스핀 코팅 과정 개요도. (a) PR 도포, (b) 저속회전, (c) 고속회전, (d) 용매 증발

세 번째는 기판 위에 얇은 박막 형태로 형성된 PR 용제를 70% 이상 증발시켜 단단하게 만드는 약하게 굽기 공정이다. 80~120℃의 핫플레이트 또는 오븐에서 기판에 열을 가해 PR을 견고하게 한다. 이 공정을 통하여 기판과 용제의 접착력을 증대시키고 PR의 균일도를 증진시킨다. 이때 과도한 온도와 시간으로 약하게 굽기 공정을 진행하면 현상이 되지 않거나 현상 후 패턴에 문제가 발생하게 되므로 스핀 코팅에서와 같이 PR의 종류에 따라 적정 온도로 공정을 진행해야 한다 [50-53].

네 번째는 PR이 도포된 표면에 자외선 광을 조사하여 PR을 전사하는 노광 공정이다. 노광 공정은 어떤 특정한 화학약품이 빛을 받으면 화학반응을 일으켜 물리적 또는 화학적 성질이 변화하는 원리를 이용한다. 원하는 패턴을 마스크에 생성한 뒤 이를 이용하여 선택적으로 PR에 자외선 광을 조사함으로써 마스크의 패턴과 동일한 패턴을

기판에 형성시킬 수 있다. 노광 공정은 사용 방법에 따라 접촉식 방법(contact printing), 근접식 방법(proximity printing), 그리고 투영 노광 방법(projection printing)으로 분류된다. 그림 2-6(a)와 같은 접촉식 노광법은 노광기 장비를 사용하여 마스크를 정렬시킨 후 마스크와 기판을 밀착시켜 노광하는 방법으로 빛의 회절이 현상이 일어나지 않아 정확한 패턴 전사가 이뤄지지만 감광막을 손상시키는 단점을 가진다. 이러한 단점을 보완하고자 그림 2-6(b)와 같은 근접식 노광 방법을 사용한다. 이 방식은 마스크와 기판을 10~25 μm 의 간격을 두어 전사하는 방법으로 마스크와 감광막의 손상 없이 패턴을 전사시킬 수 있지만 빛의 회절이 다소 발생하여 제작된 패턴의 분해능이 접촉식 방법에 비해 다소 떨어진다. 마지막으로 투영 노광 방법은 그림 2-6(c)와 같이 렌즈를 이용한 결상 광학계를 활용하여 투영하는 노광 방법으로 렌즈의 개구수(numerical aperture, NA)에 따라 분해능에 따라 기판 표면에 전사되는 마스크의 패턴의 최소 크기를 결정된다. 분해능이 작을수록 더 작은 선폭의 패턴을 전사할 수 있는 장점을 가지는 방법이다 [54-56].

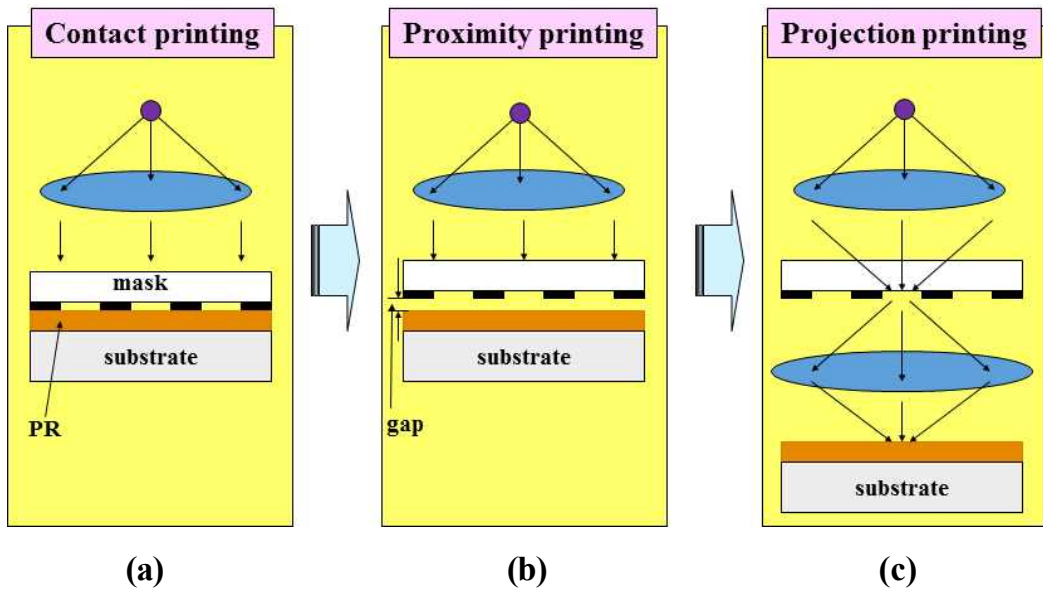


그림 2-6. 노광 방법 개요도. (a) 접촉식 방법, (b) 근접식 방법, (c) 투영 노광 방법

다섯 번째는 후노광 굽기(Post Expose Bake, PEB) 공정으로 노광 후 패턴이 전사된 기판에 PR의 종류에 따라 실시하며, 일반적으로 1~2 min 동안 90~130°C에서 진행된다. PEB 공정은 접착력을 향상시키고 정재파들을 줄이기 위해 수행한다 [50].

여섯 번째는 필요한 부분의 PR만 남기는 현상 공정으로 노광 공정을 통해 변화된 PR에만 반응하는 현상액을 이용하여 패턴을 형성한다. PR의 종류에 따라 현상 후 형성되는 패턴의 형상이 바뀌게 된다 [51-53]. 그림 2-7(a)는 현상 공정에 의해 PR이 제거되는 과정을 보여주며 그림 2-7(b)는 현상 공정 결과를 모식도로 나타낸 것이다. 현상 공정을 하면 PR 패턴 형상이 수직에 가깝게 형성되어야 하는데 under developing과 incomplete developing은 노광 시간 조정 실패로 인하여 잔여 PR이 존재하고, severe over develop은 현상 전 공정의 공정 조건이 최적화되지 못해 균일하지 못한 PR 패턴 형상이 만들어진다.

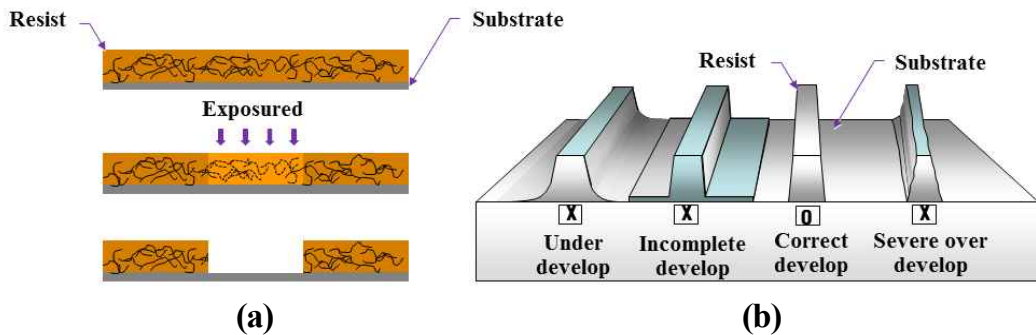


그림 2-7. 현상 공정 과정 개요도. (a) 현상 과정 (b) 현상 결과

일곱 번째는 강하게 굽기 공정으로 현상된 기판 표면을 식각하기 전에 감광막에 함유된 용제를 제거하고 감광막 내 폴리머의 응집력이 많이 생기도록 하여 접착성 및 내성을 향상시키기 위한 열처리 과정이다. 과도한 열처리는 식각 후 진행되는 PR 제거 과정에서 완벽한 PR 제거가 어렵고, 반대로 부족한 열처리는 식각 공정 과정에서 약한 접착력으로 인하여 원하는 패턴을 제작할 수 없다 [54].

여덟 번째는 현상 후 검사 공정으로 패턴의 정렬 상태, 패턴 크기의 오차, 그리고 오염원으로 인한 소자 불량 등을 확인하며, 주로 광학현미경 및 SEM을 사용한다 [50-56].

제 2 절 박막 소자 형상 측정 방법

1. 주사전자현미경을 이용한 형상 측정

가. 주사전자현미경의 구성 및 특성

SEM은 집속된 전자빔을 시료 표면에 주사하면서 전자빔과 시료와의 상호작용에 의해서 발생하는 이차전자(Secondary Electron, SE) 혹은 후방산란전자(Back Scattered Electron, BSE)를 이용하여 시료의 표면을 관찰하는 장비이다 [15].

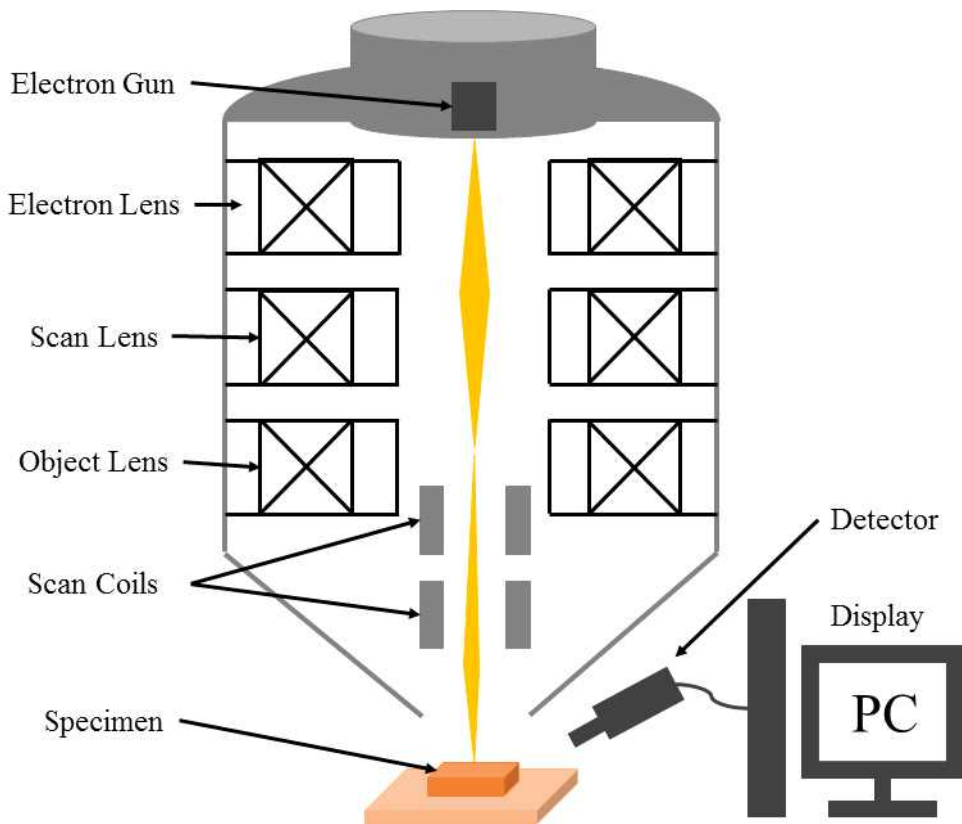


그림 2-8. SEM 시스템의 내부 구조도

SEM은 측정 방법에 따라 SE 모드, BSE 모드, 전압 대비(voltage contrast, VC) 모드가 있으며, 부가 장치를 부착하여 후방산란 전자 회절(back scattered electron diffraction, BSED) 모드, 전자빔 유도 전류(electron beam-induced current, EBIC) 모드, 에너지 분산 X선 분광법(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) 모드 등이 있다 [15,19]. 그림 2-8는 SEM의 내부 구조도이다. SEM은 크게 기구부와 제어부로 나눌 수 있다. 기구부는 전자총, 렌즈, 시료스테이지, 진공시스템으로 구성되고, 제어부는 장비를 제어하는 전원과 검출기의 신호처리, 시료스테이지 제어로 구성된다. 상단에 전자총에서 방출된 전자는 가속전압에 의해서 가속이 되고, 가속된 전자들은 전자빔 형태로 방출된다. 방출된 전자빔은 전자렌즈와 스캔렌즈를 통과하면서 빔이 집적된다. 집적된 전자빔은 스캔코일에 의해 편향된다. 편향된 전자빔은 대물렌즈에 의해 시료에 주사되고 주사된 전자빔에 의해 시료표면에서 이차전자가 발생하게 되는데 이차전자검출기를 이용하여 이차전자를 수집하여 시료 표면을 관찰한다 [15-18].

박막의 형상 측정을 위해 보편적으로 광학현미경을 많이 사용한다. 광학현미경은 다른 형상 측정 장비들에 비해 짧은 시간 안에 시료 측정이 가능하며, 측정 방법이 간단하고 가시광 영역에서 1,000배의 배율로 200 nm의 최소 분해능을 갖는다. 하지만 나노기술 개발로 인해 나노 공정에서 광학현미경은 측정 한계를 보이고 있다. 이로 인해 전자빔을 이용한 SEM의 이용 빈도가 증가하게 되었다 [57]. 표 2-1에서 보는 바와 같이 SEM의 장점으로는 첫째로 광원으로 사용하는 전자빔의 파장이 약 0.008 nm (가속 전압 20 kV)으로 매우 작아 높은 분해능을 가지며, 광학현미경보다 100배 이상의 배율로 측정이 가능하다 [58]. 둘째는 구동 전류 변화를 통해 배율 조정으로 고배율 뿐만 아니라 100배 이하의 저배율도 가능하다 [58]. 셋째로 피사계 심도가 커서 시료 표면의 높낮이 차이가 있어도 표면 전체의 입체적인 측정이 가능하다. 피사계 심도는 피사체에 초점을 맞추면 그 앞쪽과 뒤쪽의 일정한 거리 내에 초점이 맞는 범위를 말하며, 피사계심도가 클수록 표면의 전체를 선명하게 측정이 가능하다 [15,57,58].

표 2-1. 광학현미경과 SEM의 특성 비교

	광학현미경	SEM
Source	가시광선	전자빔
Medium	대기	진공 (10^{-3} mbar 이하)
Lens	광학렌즈	전자렌즈
Resolution	200 nm	열방사형 : 3~5 nm 전계방사형 : 0.5~5 nm
Magnification	$\times 10 \sim \times 1,000$	$\times 10 \sim \times 500,000$
Depth of field	수백 μm	수십 mm

그림 2-9은 광학현미경과 SEM으로 두께가 일정하지 않게 패턴이 만들어진 박막 시료 표면을 측정한 영상이다. 그림 2-9(a)와 같이 광학현미경은 피사계 심도가 낮아 표면의 높낮이가 비슷한 부분만 초점이 잡힌다. 그림에서 표시된 (1)영역은 초점거리에서 벗어나 시료의 패턴 형상이 선명하게 보이지 않지만 초점거리와 일치하는 (2)영역에서는 패턴의 형상이 선명하게 보이는 것을 확인하였다. 반면 SEM 영상은 그림 2-9(b)와 같이 (1)영역과 (2)영역에서 패턴의 형상이 일정하게 선명한 것을 확인할 수 있다. 넷째는 SEM은 다양한 검출기 및 주변기기를 손쉽게 장착할 수 있어 응용분야의 확장이 용이하다.

이러한 SEM은 전자빔을 만들어 내는 전자총의 종류에 따라 열방출형, 전계방출형, 그리고 열전계방출형 등으로 구분이 가능하다. 종류별로 휘도, 수명, 방사원의 크기, 방출전자 에너지 분산도, 방출전류 안정성, 필요 진공도 그리고 영상 분해능 외 측정 대

상 등이 달라진다. 열방출형 SEM은 분해능이 3~5 nm로 보편적으로 가장 많이 쓰인다. 이에 더 높은 분해능을 갖기 위해 전계방출형 전자총을 이용한 전계방출형 SEM(Field Emission SEM, FE-SEM)이 개발되었다. FE-SEM은 0.5~5 nm의 높은 분해능을 갖는다 [18-20].

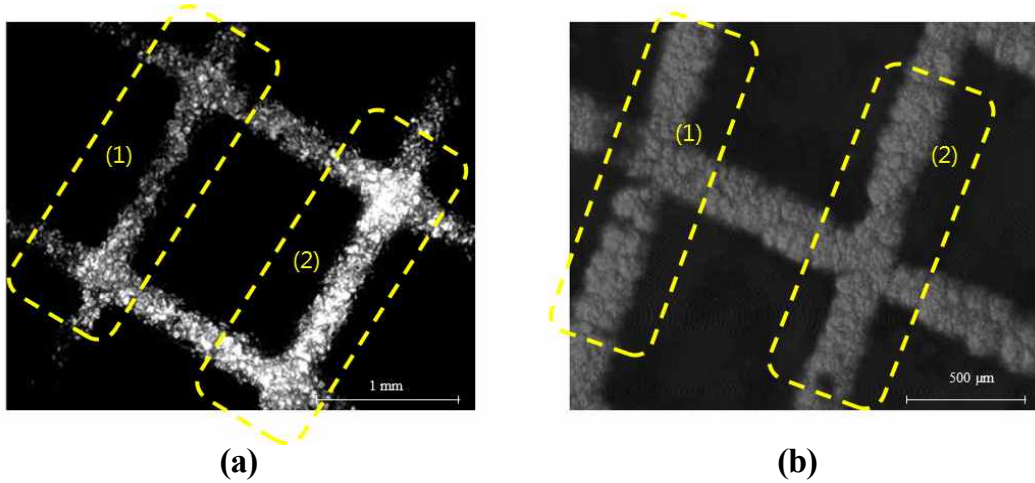


그림 2-9. 패턴이 생성된 박막 시료 측정을 통한 광학현미경과 SEM의 피사계 심도 차이의 비교. (a) 광학현미경으로 측정한 영상, (b) SEM으로 측정한 영상

SEM의 주요 적용 분야는 측정 시료의 형상 측정이다. SEM은 표면, 단면, 기울어진 면 측정이 가능하다. 그림 2-10은 실리콘 웨이퍼에 집적된 반도체 소자와 실리콘 웨이퍼에 성장시킨 나노와이어 샘플을 표면, 단면, 기울인 면을 SEM을 이용해서 측정한 결과이다. 또한 SEM은 그림 2-11와 같이 BSE 모드로 측정이 가능하다. 그 결과 반도체 소자의 형상 뿐만 아니라 길이 및 각도 계측이 가능하다. BSE 모드는 후방산란 전자의 발생율이 원자번호가 증가함에 따라 증가하므로 서로 다른 물질로 구성된 시료들을 구분하는데 효과적인 방법이다. 또한 낮은 전압에서 측정이 가능하고 원자의 종류에 따라 음영값이 달라져 구성 원소에 대한 구분이 가능한 장점을 가지고 있다. EDS 모드는 측정 시료의 조성 및 구성비를 측정하여 성분 분석이 가능하다. EDS 장비를 이용하면 점, 선, 그리고 영역에 대한 분석이 가능하고 원소별 구분도 가능하다. 그

그림 2-12은 성분 분석한 예시를 보여준다 [37-41]. 그림 2-12(a)에서 보이는 영역이 측정 영역이다.

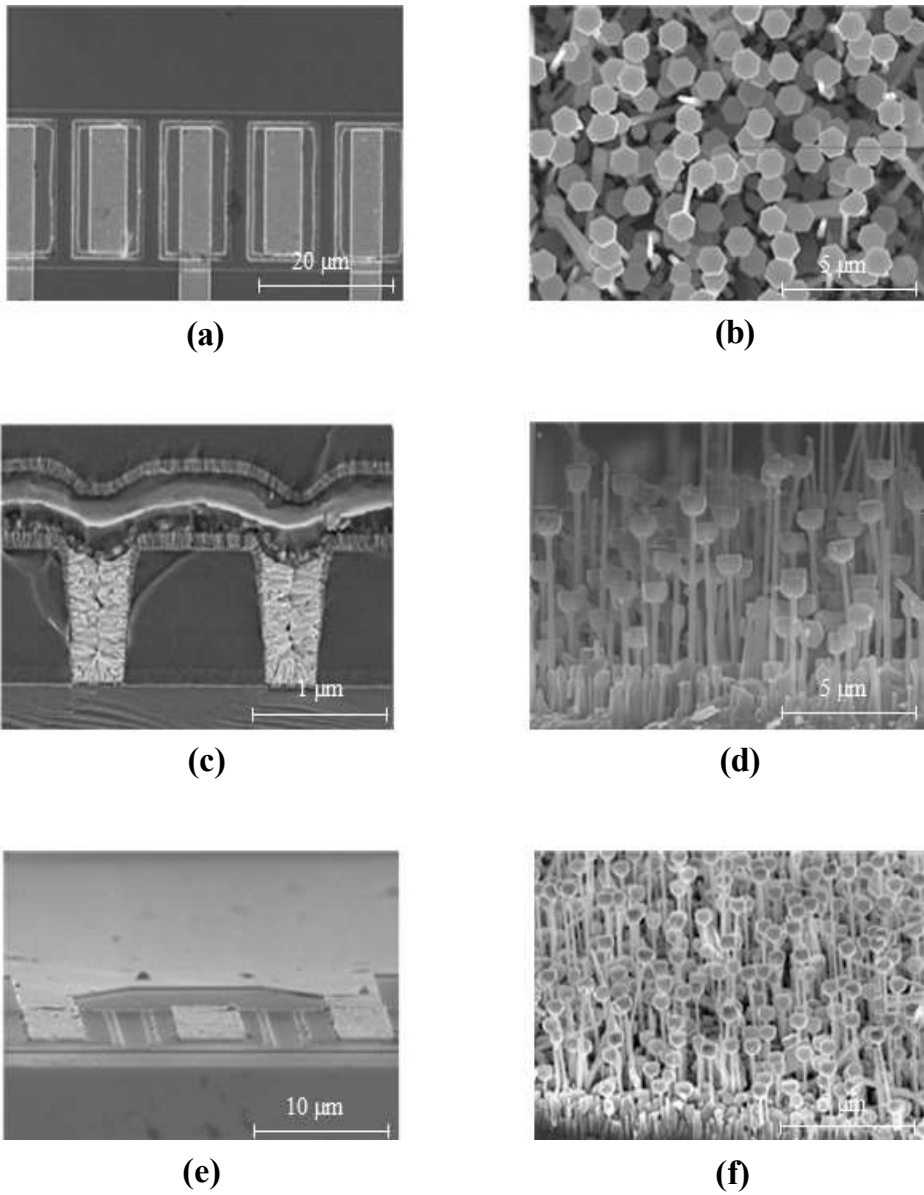
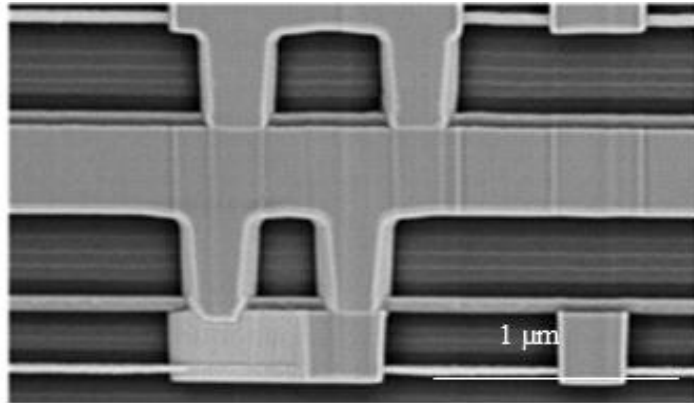
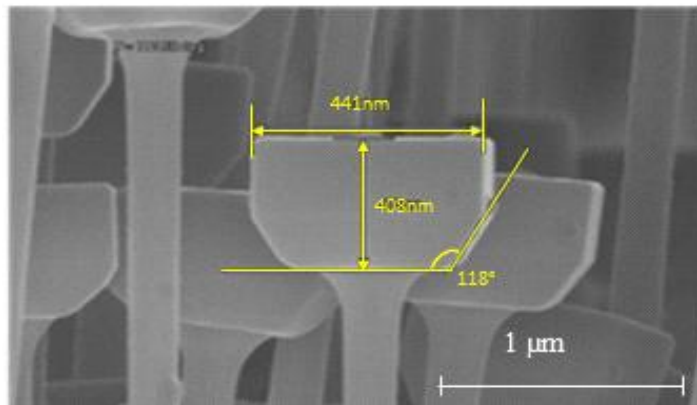


그림 2-10. SEM 측정 방법에 따른 반도체소자 및 나노와이어 측정 영상. 반도체 소자의 (a) 표면 형상, (c) 단면 형상, (e) 기울어진 면의 형상. 나노와이어의 (b) 표면 형상, (d) 단면 형상, (f) 기울어진 면의 형상 측정



(a)



(b)

그림 2-11. BSE 모드로 측정된 반도체 소자 및 나노와이어의 형상 측정 결과. (a) BSE 모드에서 측정된 SEM 이미지, (b) BSE 모드에서 측정된 SEM 이미지에서 측정된 길이 및 각도

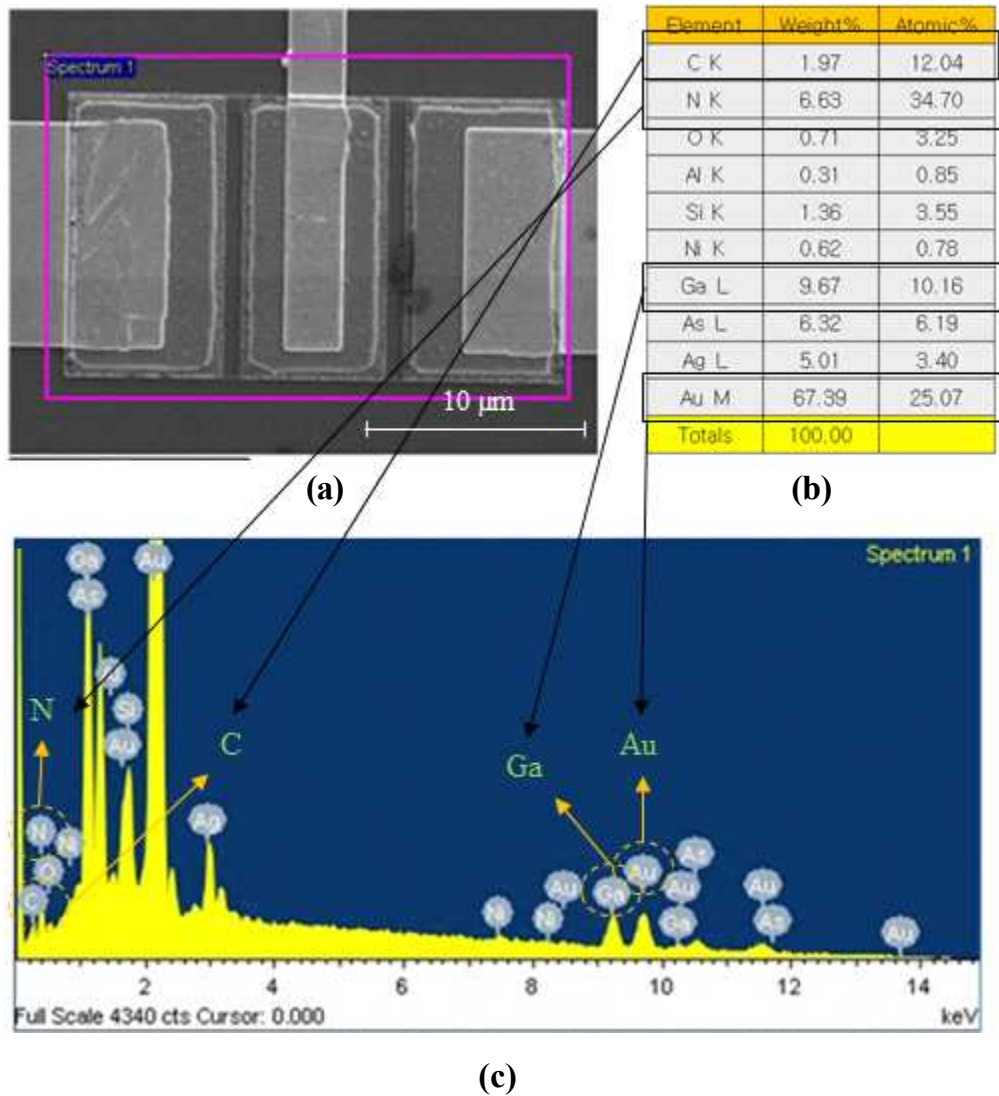


그림 2-12. EDS 모드로 측정된 반도체 소자의 측정 결과. (a) EDS 모드로 측정된 SEM 이미지, (b) EDS 모드로 측정된 결과로부터 분석된 성분 분포표, (c) EDS 모드로 측정된 성분의 원소 대응 이미지

2. 디지털 홀로그래피를 이용한 형상 측정

가. 디지털 홀로그래피의 기본 원리

홀로그래피는 간섭계의 참조파와 물체로부터 반사된 물체파가 중첩된 간섭무늬를 측정함으로써 물체의 형상을 복원할 수 있는 광측법이다. 개발 초기에는 측정된 간섭무늬는 참고광을 조사할 경우 원래의 물체파로 복원할 수 있는 광학 재생매체를 이용하는 기법을 이용하였다. 이러한 홀로그래피 기법은 1948년 Dennis Gabor에 의해서 제안되었다. 초기에는 사진판에 간섭무늬를 기록하였으나, 현재에는 기존의 홀로그래피의 사진판 대신 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라를 이용함으로써 기록과 복원을 컴퓨터를 통해서 수행할 수 있는 디지털 홀로그래피로 발전하였다 [62-64].

디지털 홀로그래피에서의 기록과 재생은 그림 2-13와 같다. 그림 2-13(a)처럼 참조파와 CCD 카메라에서 d 만큼 떨어져 있는 물체에서 반사되는 물체파가 CCD 카메라의 측정면에서 간섭되어 간섭무늬가 기록된다. 참조파에 의해 재구성된 물체의 영상은 실제 물체가 있던 방향과는 반대방향에 그림 2-13(b)와 같이 실상이 위치하게 되고 원래의 물체의 위치에는 허상이 나타나게 된다. 하지만 참조파를 그대로 이용하게 되면 영상의 왜곡이 발생하게 되는 문제점을 가진다. 이러한 왜곡된 영상을 방지하기 위해서는 2-13(c)와 같이 참조파 대신 복소공액 참조파를 이용함으로써 이러한 문제를 해결할 수 있다. 이러한 과정을 보다 깊이있게 이해하기 위해서는 디지털 홀로그래피의 기본 원리를 수학적으로 살펴볼 필요가 있다.

디지털 홀로그래피는 측정된 간섭무늬로부터 수치적 복원과정을 통해서 물체파의 형상을 재구성할 수 있다 [65,68,73]. CCD 카메라에 기록된 간섭무늬는 간섭파의 광량 정보만을 가지고 기록된다. 간섭무늬로부터 광세기 분포에 해당되는 진폭 정보뿐만 아니라 간섭무늬에 포함된 위상정보를 모두 추출하기 위해서는 파동 광학을 이용한 이론적 접근이 필요하다 [65,66,75-79].

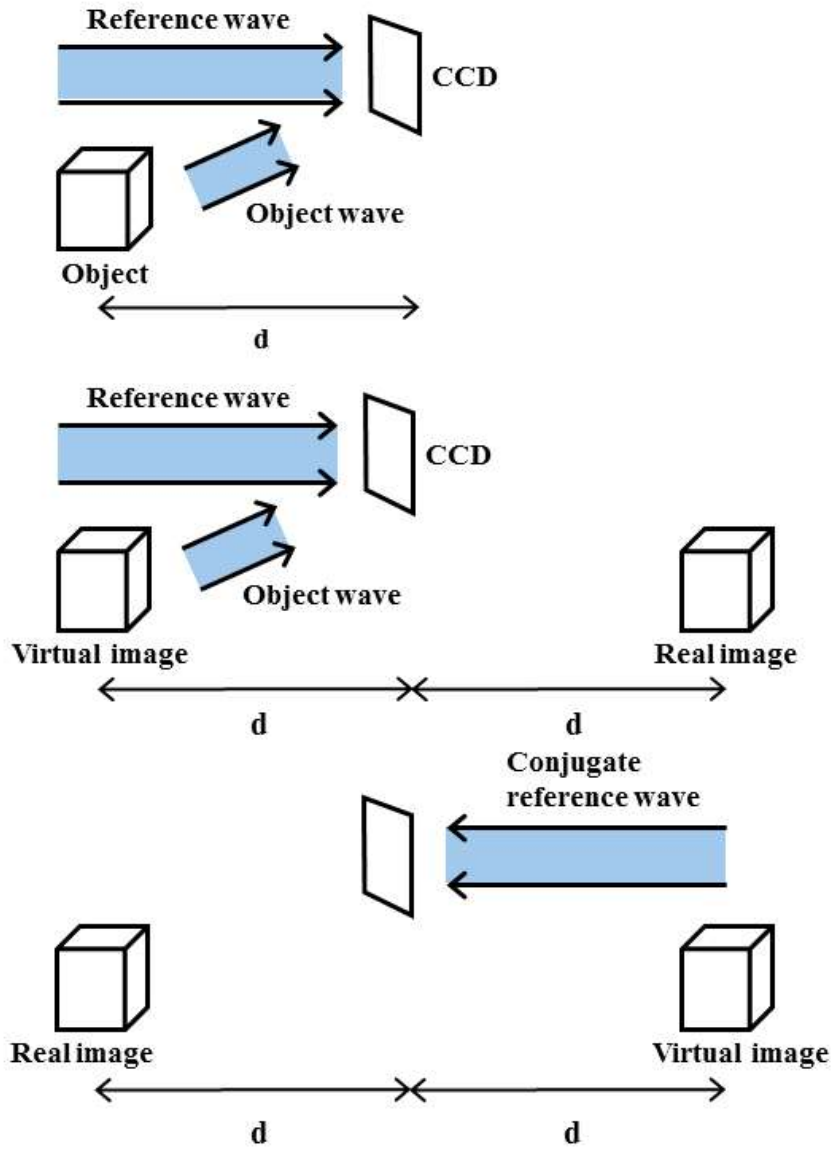


그림 2-13. 디지털 홀로그래피 개략도. (a) 홀로그래피 기록 과정, (b) 참조파로 재구성, (c) 왜곡 되지 않은 실상을 재생하기 위한 복소공액 참조파로 재구성

물체파의 물체파 E_O 는 식 (2-1)과 같이 주어진다.

$$E_O(x, y) = a_O(x, y) \exp(i\phi_O(x, y)) \quad (2-1)$$

여기서 a_O 와 ϕ_O 는 물체파의 진폭과 위상이다. 이와 유사하게 참조파 E_R 은 식 (2-2)로 주어진다.

$$E_R(x, y) = a_R(x, y) \exp(i\phi_R(x, y)) \quad (2-2)$$

여기서 a_R 와 ϕ_R 는 물체파의 진폭과 위상이다. 이 두 전자기파가 중첩되어 형성된 간섭무늬 $h(x, y)$ 는 식 (2-3)과 같다. 여기서 (x, y) 는 샘플의 평면에서의 위치이다.

$$\begin{aligned}
 h(x, y) &= |E_O(x, y) + E_R(x, y)|^2 \quad (2-3) \\
 &= |E_O|^2 + |E_R|^2 + E_O E_R^* + E_O^* E_R \\
 &= a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \cos(\phi_R - \phi_O)
 \end{aligned}$$

위 식에서 $|E_O|^2$ 항은 물체파의 광세기 정보이고, $|E_R|^2$ 항은 참조파의 광세기 정보이다. 이 두 항은 변조되지 않은 항이며 CCD 카메라에 균일하게 기록되는 DC 성분이다. 이 $|E_O|^2 + |E_R|^2$ 항은 빛이 샘플을 통과할 때 0차 회절인 DC 항과 같은 역할을 한다. 실제로 디지털 홀로그래피에서 이 항은 샘플에 대한 정보를 가지고 있지 않다. 나머지 $E_O E_R^*$ 와 $E_O^* E_R$ 는 물체에 의한 허상과 실상에 대한 정보를 포함하고 있다. 이 중에 $E_O E_R^*$ 는 물체파가 재구현된 허상이고 $E_O^* E_R$ 은 재구현된 실상이다. 허상은 원래 물체에 놓여있게 되고 실상은 CCD 카메라를 기준으로 반대편에 놓여있게 된다. 획득한 간섭무늬로부터 샘플의 형상 정보를 복원하기 위해서는 식 (2-3)에 참조파가 곱해져야 하

고 그 결과는 식 (2-4)으로 주어진다.

$$E_R(x,y)h(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R + |E_R|^2E_O + E_O^*E_R^2 \quad (2-4)$$

재생된 실상은 곱해져 있는 E_R^2 이 복소수의 제곱으로 변조되기 때문에 왜곡된 결과를 주게 된다. 그러므로 왜곡되지 않은 상을 얻기 위해서는 참조파 E_R 의 복소공역 (conjugate)인 E_R^* 를 식 (2-3)에 곱해야만 얻을 수 있다. 이는 식 (2-5)로 표현된다.

$$E_R(x,y)^*h(x,y) = (|E_O|^2 + |E_R|^2)E_R^* + E_O(E_R^*)^2 + E_O^*|E_R|^2 \quad (2-5)$$

허상은 변조가 되지만 실상은 변조되지 않고 원래 물체의 정보로 복원될 수 있다.

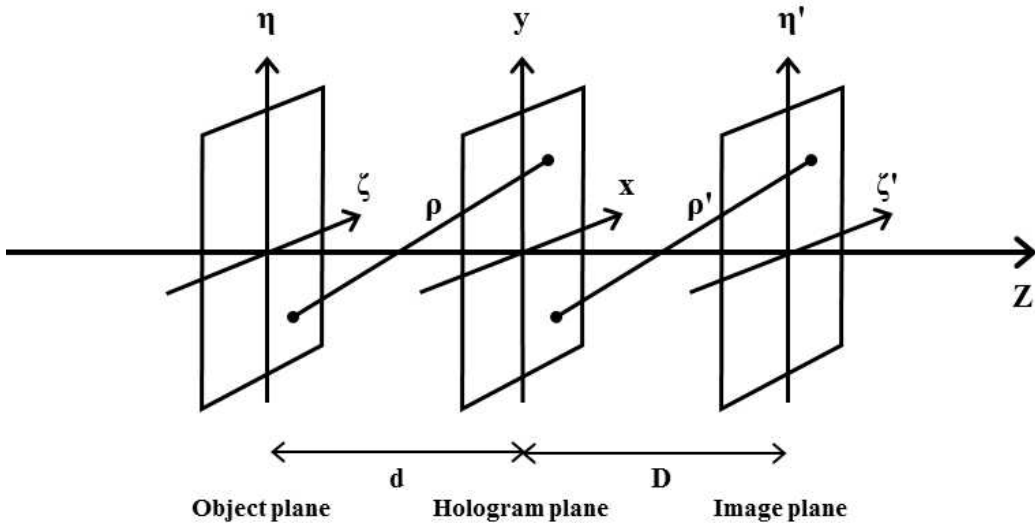


그림 2-14. 디지털 홀로그래피 복원을 위한 설정된 좌표계

임의의 거리에서 원래 물체에서 반사된 파면을 재생하기 위해서는 홀로그램 평면에서 이미지 평면에서 현상을 고려하여 회절효과를 바탕으로 하는 수치해석적인 접근

이 필요하다. 이 과정을 설명하기 위해 그림 2-14에서 보이는 좌표계를 도입하였다. 물체 평면의 복소 진폭을 $U_o(\zeta, \eta)$ 라 하면 홀로그래피 평면에서의 복소 진폭 $U(x, y)$ 은 프레넬 변환에 의해 얻을 수 있다. 여기서 광이 진행하는 방향인 광축을 z 축으로 정하였다. 아래와 같이 두 평면 간의 변환은 회절에 의한 효과와 동일한 결과이다. 여기서 k 는 광원의 파장에 대응되는 파수이고 d 는 두 평면간의 거리차이다. D 는 홀로그래피 평면과 상이 결상되는 평면과의 거리차이다 [75].

$$U(x, y) = \iint U_o(\zeta, \eta) \exp\left(ikd + ik\frac{(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2}{2d}\right) d\zeta d\eta \quad (2-6)$$

이는 다시 프레넬 변환을 이용하여 이미지 평면에서의 복소 진폭 $U_I(\zeta', \eta', d)$ 을 계산할 수 있게 된다. 이 적분은 CCD 카메라의 크기에 대한 영향을 받는다. 그 이유는 홀로그래피 평면에 기록되는 정보는 연속적이지 않고 디지털화 되어 저장되는 기록으로 유한한 크기를 가지는 픽셀을 단위로 하기 때문이다.

$$U_I(\zeta', \eta') = \iint U(x, y) \exp\left(ikD + ik\frac{(\zeta' - x)^2 + (\eta' - y)^2}{2D}\right) dx dy \quad (2-7)$$

식 (2-6)을 식 (2-7)에 대입하면 식 (2-8)같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 U_I(\zeta', \eta') &= \exp\left[ik\left(d + D + \frac{\zeta'^2 + \eta'^2}{2D}\right)\right] \\
 &\times \iint \iint U_o(\zeta, \eta) \exp\left[ik\left\{\frac{x^2 + y^2}{2}\left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D}\right)\right\} + \frac{\zeta^2 + \eta^2}{2d} - x\left(\frac{\zeta}{d} + \frac{\zeta'}{D}\right) - y\left(\frac{\eta}{d} + \frac{\eta'}{D}\right)\right] d\zeta d\eta dx dy
 \end{aligned} \quad (2-8)$$

여기서 $\zeta' = \zeta$, $\eta' = \eta$, $D = -d$ 를 취하면 $U_I(\zeta', \eta', -d) = U_0(\zeta, \eta)$ 와 같이 된다. 이와 같이 홀로그래프 평면으로부터 이미지를 재구현하는 과정은 식 (2-6)을 계산하는 과정과 같다 [75]. 이러한 회절된 상을 계산하는 방법으로는 대표적으로 푸리에 변환의 회선을 적용하는 방법과 각 스펙트럼 방법이 있다 [79].

회선 방법은 식 (2-6)에서 영상 평면에서의 복소 진폭과 포물선 형태 위상항과의 회선 적분하는 표현하는 것이다.

$$\begin{aligned}
 U_I(\zeta', \eta') &= \exp(ikD) \iint U(x, y) \exp\left(ik \frac{(\zeta' - x)^2 + (\eta' - y)^2}{2D}\right) dx dy & (2-9) \\
 &= \iint U(x, y) g(\zeta' - x, \eta' - y) dx dy \\
 &= U * g
 \end{aligned}$$

$$g(x, y) = \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2D}\right)$$

식 (2-9)는 CCD면에서 물체의 복소 위상의 역 푸리에 변환에 포물선 항을 곱한 후, 푸리에 변환을 하면 이미지 평면에서의 복소 진폭을 단순하게 계산할 수 있는 방법이 된다. 그렇지만 회선 방법 역시 프레벨 근사를 사용하며, 물체나 CCD 카메라의 픽셀 크기보다 복원 거리가 가까우면 오차가 발생하는 문제가 있다. 그러므로 본 논문에서는 프레벨 근사가 필요 없는 이미지 재생 알고리즘인 각 스펙트럼 방법을 사용하였다. CCD 면에서 물체파의 복소 진폭 $U(x, y)$ 를 푸리에 변환하여 표현하면 식 (2-10)와 같다.

$$\begin{aligned}
 \hat{U}(f_x, f_y) &= \iint U(x, y; 0) \exp(-i2\pi(f_x x + f_y y)) dx dy & (2-10) \\
 U(x, y; 0) &= \iint \hat{U}(f_x, f_y) \exp(i2\pi(f_x x + f_y y)) df_x df_y
 \end{aligned}$$

식 (2-10)에는 CCD 면에서 복소수 지수항인 $\exp(i2\pi(f_x x + f_y y))$ 는 진폭이 1인 평면파 ($\exp(i2\pi(ax + \beta y + \gamma z)/\lambda), \gamma = \sqrt{1 - a^2 - \beta^2}$)와 같음을 알 수 있다. 식 (2-10)은 식 (2-11)로 변형이 가능하며, $U(x, y; 0)$ 의 각 스펙트럼이라 부른다.

$$\hat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}\right) = \iint U(x, y; 0) \exp\left(-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right) dx dy \quad (2-11)$$

$U(x, y; 0)$ 에서 D 만큼 떨어진 이미지 면에서의 복소 진폭도 식 (2-12)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{U}_I\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right) = \iint U_I(\zeta', \eta'; D) \exp\left(-i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\zeta' + \frac{\beta}{\lambda}\eta'\right)\right) d\zeta' d\eta' \quad (2-12)$$

각 스펙트럼과 $\hat{U}_I\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right)$ 사이의 관계식을 구함으로써 물체파가 전파될 때 복소 진폭이 어떻게 변화하는지 알 수 있다. 이를 위해 U_I 를 식 (2-13)와 같이 표현하고, 이 식이 헤르모츠 방정식을 만족하는 것을 이용한다.

$$U_I(\zeta', \eta'; D) = \iint \hat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right) \exp\left(i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\zeta' + \frac{\beta}{\lambda}\eta'\right)\right) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2-13)$$

$$\nabla^2 U_I + k^2 U_I = 0 \quad (2-14)$$

식 (2-14)을 식 (2-13)에 적용하면, \hat{U}_I 는 식 (2-15)의 미분방정식을 만족하며 그 해는 식 (2-16)과 같다.

$$\frac{d^2}{dz^2} \widehat{U}_I\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right) + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \alpha^2 - \beta^2) \widehat{U}_I\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right) = 0 \quad (2-15)$$

$$\widehat{U}_I\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; D\right) = \widehat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; 0\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} D\right) \quad (2-16)$$

최종적으로 $z = D$ 에서 물체파의 복소 진폭은 식 (2-16)을 역변환으로 구한다.

$$\begin{aligned}
 U_I(\zeta, \eta; D) &= \iint \widehat{U}\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} D\right) \exp\left(i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}\zeta + \frac{\beta}{\lambda}\eta\right)\right) d\frac{\alpha}{\lambda} d\frac{\beta}{\lambda} \quad (2-17) \\
 &= \iint \widehat{U}(\zeta, \eta) \exp\left(i\frac{2\pi D}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda\zeta)^2 - (\lambda\eta)^2}\right) \exp(i2\pi(f_x\zeta + f_y\eta)) d\zeta d\eta \\
 &= F^{-1}\{\widehat{U} \cdot h\} \\
 &= F^{-1}\{F\{U\} \cdot h\} \\
 h &= \exp\left(i\frac{2\pi D}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda\zeta)^2 - (\lambda\eta)^2}\right) \quad (2-18)
 \end{aligned}$$

즉, CCD 면에서의 복소 진폭을 푸리에 변환하고 위상 항인 h 를 곱한 뒤 전체를 푸리에 역변환하면 원하는 위치에서의 물체의 상 U_I 를 구할 수 있다. 각 스펙트럼 방법은 프레넬 근사가 사용되지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 복원 이미지가 맺히는 복원 거리의 경계조건이 존재하지 않으며, 특히 물체와 복원 지점 거리의 정보가 불확실한 현미경 시스템을 응용한 디지털 홀로그래피 분야에 활발히 사용되고 있다.

나. 위상 정보 추출 방법

디지털 홀로그래피에서 복원 알고리즘의 핵심은 복소 진폭으로부터 수치적으로 거
 리별 회절 이미지를 획득하는 것이다. 이를 위해서는 간섭 이미지로부터 복소 진폭을
 유추해야 하는데, 위상 이동 간섭계를 이용하여 간섭 이미지를 획득하고 이로부터
 복소 진폭을 환산 할 수 있다. 그림 2-15는 위상 이동 간섭계의 개략도를 보여주고 있
 다.

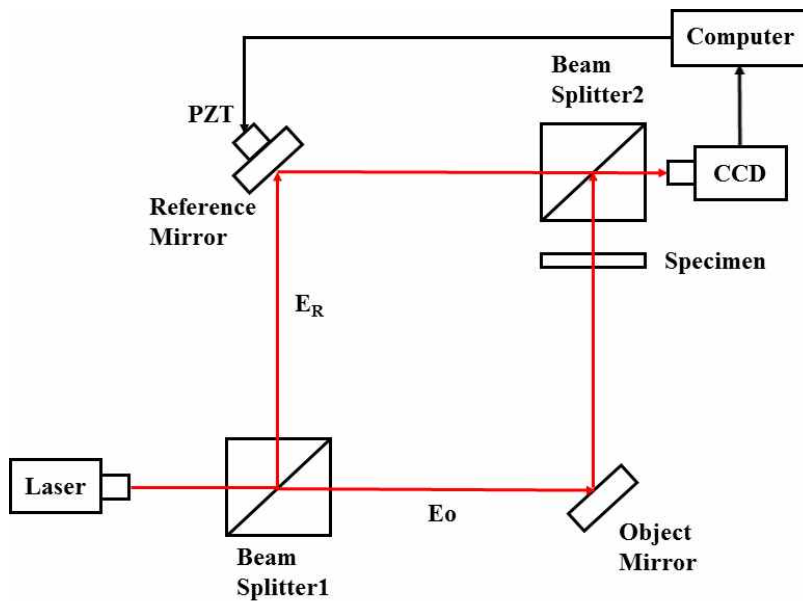


그림 2-15. 위상 이동 간섭계의 일반적인 실험 장치 개략도

위상 이동 간섭계는 참조파의 위상을 인위적으로 변화시켜 변화된 참조파의 위상
 과 간섭무늬의 관계를 파악하여 물체파와 참조파 사이의 위상차를 결정할 수 있다. 위
 상 이동을 위해 참조파는 압전소자(piezoelectric transducer, PZT)와 연결된 거울을 이용
 하여 일정한 간격으로 이동하면서 위상을 변화시킨다. 식 (2-19)는 위상 이동에 의한
 광의 세기를 나타낸 식이다.

$$I(x, y) = a + b \cos(\varphi_O - \varphi_R) \quad (2-19)$$

여기서 $a = a_O^2 + a_R^2$, $b = 2a_O a_R$ 이고, a , b , $\varphi_O - \varphi_R$ 는 물체파의 복원 변수이다. 식 (2-19)에서 알려지지 않은 변수는 3개이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 적어도 3개의 방정식이 필요하다 [87,88].

빛의 위상 변화에 의한 광세기 변화를 얻기 위해서는 광원 파장보다도 작은 거리 변화에 대응하는 매우 작은 위상의 변화가 필요하다. 이를 위해 사용되는 기준단의 PZT는 수 nm 정도로 변위를 변화시켜 참조파의 위상 변화를 유도하면서 적어도 간섭무늬를 3회 이상 측정한다. 이때 광의 세기를 식 (2-20)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_M(x, y) = a + b \cos(\varphi_O - \varphi_R + \phi_M) \quad (2-20)$$

M 은 참조파의 거울 이동 횟수이다. 보통 3-step 이상의 위상 이동을 통해 3개 이상의 간섭무늬를 획득한다 [87-97]. 그중, 4-step 위상 이동 알고리즘은 Owner-Petersen에 의해 제안되었다. 4번의 간섭무늬 측정을 통해 잡음을 감소시킬 수 있어 보다 안정적으로 홀로그램 이미지의 복원이 가능함을 보여주었다 [89]. 한주기 파장을 기준으로 $\phi = 0, \pi/2, \pi, \pi/3$ 정도의 위상차를 유도함으로써 식 (2-20)에 간섭무늬는 식 (2-21)과 같이 주어지게 된다.

$$I_1(x, y, 0) = a + b \cos(\varphi_O - \varphi_R), \quad (2-21)$$

$$I_2(x, y, \frac{\pi}{2}) = a - b \sin(\varphi_O - \varphi_R),$$

$$I_3(x, y, \pi) = a - b \cos(\varphi_O - \varphi_R),$$

$$I_4(x, y, \frac{\pi}{3}) = a + b \sin(\varphi_O - \varphi_R)$$

위의 식으로부터 상대적 위상차 $\varphi_O - \varphi_R$ 는 식 (2-22)과 같이 구할 수 있다.

$$\varphi_O - \varphi_R = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (2-22)$$

Owner-Petersen 알고리즘은 변형 위상과 매우 빠른 계산을 동시에 수행이 가능하여 디지털 홀로그래피 외에도 위상이동 간섭계를 사용하는 다른 광학 시스템에서도 적용이 가능하다 [90-95].

앞선 위상 추출 기법은 연산이 빠르며, 정확도가 높은 장점을 가지고 있다. 하지만 복소 진폭 중 위상 정보만을 획득하므로 실험적으로 획득한 광량 정보를 잃어버린다는 단점이 있다. 또한 위상 이동 오차를 처리하는 다양한 방법이 있지만, 간섭 이미지의 개수와 위상 이동 성능에 대한 제한이 필요했다. 이를 해결하기 위해 PZT의 비선형적 움직임에도 물체파의 복소 진폭을 획득할 수 있는 광량 보정 방법(Interframe intensity correction, IIC)을 이용하였다. IIC 방법은 간섭 이미지 간의 체계적인 변화에 대한 정보를 이용하여 복소 진폭을 획득할 수 있다. 위상 이동량을 δ 라 정의할 경우 CCD 카메라에 기록된 간섭 이미지 I 는 식 (2-23)과 같이 행렬로 표현할 수 있으며, 이 표현식으로부터 위상에 관한 정보를 가지고 있는 행렬 A 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I(x,y) &= a + b \cos(\delta + \varphi) & (2-23) \\
 &= a + b \cos\delta \cos\varphi - b \sin\delta \sin\varphi \\
 &= (1 \ \cos\delta \ \sin\delta) \begin{pmatrix} a \\ b \cos\varphi \\ -b \sin\varphi \end{pmatrix} = DA
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A(x,y) &= (D^+ D)^{-1} D^+ I & (2-24) \\
 &= b \cos \varphi - ib \sin \varphi = b \exp(i\varphi) \\
 &= A_r A_o \exp(i(\phi - \phi_r))
 \end{aligned}$$

참조광의 경우 공간적으로 균일하여 전체 위상이 거의 일정하므로 A_r 과 ϕ_r 은 상수로 변환하여 물체파의 복소 진폭 $U = A \exp(i\phi)$ 를 계산할 수 있다.

식 (2-24)는 위상 이동된 간섭 이미지를 이용하여 복소 진폭을 획득하는 단순한 방법을 이용한 결과이다. 다수의 위상 이동 이미지들을 이용할 경우, PZT의 비선형적 움직임에 대한 오류들이 제거된 복소 진폭을 획득할 수 있다. 광량의 노이즈가 포함된 간섭 이미지들은 식 (2-25)와 같이 기술할 수 있다.

$$I_{Mn}(x, y) = a_n + b_n \cos(\varphi_{On} - \varphi_{Rn}) + \Delta I_{Mn} \quad (2-25)$$

$m = 1, 2, 3, \dots, M$, $n = 1, 2, \dots, N$ 이고 M 은 위상 이동 횟수, N 은 픽셀수, ΔI_{Mn} 은 전기 신호에 의한 측정 과정에서의 오류이다. 식 (2-25)를 행렬로 표현하면 식 (2-26)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{1}{2} UA^+ + \Delta I \quad (2-26)$$

이때 $^+$ 는 $u_m \equiv \exp(i\varphi)$ 와 $Z_n \equiv b_n \exp(i\varphi_{On})$ 행렬의 공액 전치를 의미하며, U 와 A 는 식 (2-27)과 식 (2-28)로 나타낼 수 있다.

$$U = \begin{pmatrix} u_1 & u_1^* & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_M & u_M^* & 1 \end{pmatrix} \quad (2-27)$$

$$A = \begin{pmatrix} z_1 & z_1^* & 2a_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_n & z_n^* & 2a_n \end{pmatrix} \quad (2-28)$$

식 (2-26)은 총 Mn 개의 방정식을 가지고 있고 $3N+M-1$ 개의 변수를 가지고 있다. 만약 $M \geq 4$ 를 만족한다면, 방정식의 수는 변수보다 많아지고 식 (2-26)는 계산이 가능해진다. 위상 이동 행렬인 U 를 유추할 경우 물체파의 복소 진폭을 의미하는 행렬 A 는 CCD 카메라를 통해 획득한 간섭 이미지 행렬인 I 행렬을 이용하여 계산할 수 있다. 잡음을 제거한 정확한 A 를 획득하기 위해서는 우선 상관 행렬 $C^{(1)}$ 을 획득해야 한다.

$$\begin{aligned}
 C^{(1)} &\equiv \frac{1}{N} II^+ & (2-29) \\
 &\simeq \frac{1}{4N} UA^+AU^+ + \sigma_0^2 1_M
 \end{aligned}$$

여기서 N^{-1} 은 표준화 요소이고, σ_0 는 광량 오류의 변화값, 1_M 은 M 차 단위행렬을 의미한다. 두 번째로 고려해야 할 점은 σ_0 를 찾기 위해 $C^{(1)}$ 의 가장 작은 고유치를 정의해야 한다. μ 를 고유벡터에 상응하는 $C^{(1)}$ 의 고유치이면 식 (2-29)는 $C^{(1)}\nu = \mu\nu$ 로 표현할 수 있다. 식 (2-22)를 헤밀토니안 행렬로 표현하면 식 (2-30)과 같이 표현 된다.

$$\frac{1}{4N} UA^+AU^+\nu \simeq (\mu - \sigma_0^2)\nu \quad (2-30)$$

헤밀토니안 행렬은 선형적으로 독립적인 3개의 열을 가지고 있고 음수가 아니다. 이것은 만약 $M \geq 4$ 을 만족하면, $UA^+AU^+/4N$ 은 둘 이상의 0인 고유치를 가지며, $C^{(1)}$ 의 가장 작은 고유치가 σ_0^2 임을 의미한다. 그러므로 U 의 반복적인 대입을 통해 잡음이 제거된 상관 행렬 $C^{(ns)}$ 를 유도할 수 있다.

$$C^{(ns)} \simeq \frac{1}{4N} UA^+AU^+ \quad (2-31)$$

식 (2-32)는 식 (2-31)에서 k 번째 값 U_k 를 대체 한 후에 얻을 수 있다. U_k 는 임의로 선택된 초기 추측 값 U 로부터 k 번 반복 후에 얻는다.

$$\hat{A}_k = (U_k^+ U_k)^{-1} U_k^+ C^{(ns)} U_k (U_k^+ U_k)^{-1} \quad (2-32)$$

그리고 $\hat{A}_k = A^+A/N$ 이라면 U_{k+1} 은 $C^{(ns)} = U_{k+1}' \hat{A}_k U_k^+$ 이고, 식 (2-33)으로 표현된다.

$$U_{k+1}' = C^{(ns)} U_k (U_k^+ C^{(ns)} U_k)^{-1} U_k^+ U_k \quad (2-33)$$

U 는 첫 번째 참조광의 Zero 위상으로 정의되기 때문에, U_{k+1}' 의 모든 열 구성요소가 열의 첫 번째 값으로 나뉜다. i 와 j 가 $1, 2, \dots, M$ 라면

$$U_{k+1} = Proj\{U_{k+1}'\} = \begin{pmatrix} u_k'(i,j) \\ u_k'(1,j) \end{pmatrix} \quad (2-34)$$

U_k 와 U_{k+1} 와의 차이들의 평균값이 첫 번째 행을 제외한 임의의 작은 값보다 작으면 반복이 중지된다. 물체의 복소 진폭 정보는 수렴된 U 를 식 (2-26)에 대입하되 ΔI 는 고유치 연산으로 배제할 수 있고 최종식 (2-35)는 간섭 이미지에 담긴 잡음 정보를 감쇄시킨 물체파의 복소 진폭과 같음을 알 수 있다.

$$A = I^+ U (U^+ U)^{-1} \quad (2-35)$$

제 3 장 유기발광소자용 투명전극 제작

제 1 절 투명전극 제작을 위한 박막 증착 공정

1. 박막 증착 최적화 조건 도출

스퍼터링 공정에서 가장 많이 사용되는 방식은 DC 스퍼터링 방법으로 고진공 상태의 챔버 양단에 직류 전압을 인가시키고 전압을 서서히 증가시켜 방전 상태에 이르게 하는 방식이다 [27]. 설비가 타 공정에 비해 비교적 간단하며 투입 전력량, 공정 온도, 스퍼터링 가스의 압력에 따른 스퍼터링 효율 조절이 가능하며 금속 물질을 대면적으로 증착시킬 수 있는 장점을 갖는다 [28,29]. 하지만 높은 공정압력에서의 진행으로 인해 가스 분산에 따른 챔버 오염이 발생하므로 타겟에 얇은 산화 절연막이 형성하여 전류와 증착 속도를 저하시킨다. 또한 도체 물질만 증착이 가능하다는 단점을 갖는다 [27-29]. 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안 중 하나로 RF 스퍼터링 방식이 있다 [32]. RF 스퍼터링 방식은 스퍼터링 타겟 물질에 대한 전하가 축적되는 문제를 회피하기 위해 RF를 이용하여 전류의 전위를 번갈아 변화시켜 양이온들이 타겟 표면에 축적되지 못하도록 방지한다. 절연체 박막을 증착이 가능한 스퍼터링 방법으로 13.56 MHz의 주파수를 사용한다 [37-39]. RF 스퍼터링은 절연체뿐만 아니라 금속, 합금, 산화물, 질화물, 탄화물 등 거의 모든 종류의 물질을 증착시킬 수 있다 [27]. 전자들이 RF 전기장에 따라 주기적으로 움직이므로 전자와 가스원자의 충돌 확률이 증가하고, 2~5 mtorr의 낮은 가스 압력에서도 플라즈마 상태 유지가 가능한 장점을 갖는다 [39].

마그네트론 스퍼터링은 타겟의 뒷면에 영구자석이나 전자석을 배열하여 전기장에 의해 타겟으로부터 방출되는 전자를 타겟 주변에 형성되는 자기장 내에 국부적으로 모아 스퍼터링 가스 기체 원자와의 충돌을 촉진시킴으로써, 스퍼터링율을 높이는 방법이

다 [35]. RF 스퍼터에 마그네트론 스퍼터링 방법을 적용시킨 장비가 RF 마그네트론 스퍼터링 장비며, 이 방법은 높은 증착율과 낮은 기판온도 유지가 가능하다. 그리고 박막의 조성을 제어할 수 있는 장점을 갖는다 [37-39].

본 실험에서 사용한 스퍼터 장비(SUNICCOAT-IS3000, SUNIC SYSTEM)는 인라인 방식의 RF 마그네트론 스퍼터이다. 그림 3-1은 RF 마그네트론 스퍼터 개요도이며 그림 3-2는 실험에 사용된 RF 마그네트론 스퍼터 모습이다. 로드 록 모듈은 진공 펌프와 별도로 연결되어 다른 챔버들과 별도로 진공을 변화시킬 수 있어 기판을 거치하는 챔버이다. 플라즈마 트리트먼트 모듈은 플라즈마를 형성 할 수 있는 챔버로 기판에 플라즈마 트리트먼트 공정을 수행 할 수 있는 챔버이다. 프로세스 모듈은 Gun #1과 Gun #2에 타겟을 연결하여 스퍼터링 공정을 수행하는 챔버이다. In-line 방식은 증착 방법이 일반적인 스퍼터링 다운 방식이 아닌 스퍼터링 사이드 방식을 사용하고, 이는 증착 과정에서 발생하는 미세먼지가 중력에 영향을 받아 기판에 도포되는 현상을 방지한다. 또한 증착 공정 중에 기판 거치대가 레일을 따라 이동하며 증착되는 방식이라 타겟으로부터 다량의 열이 방출되어 기판이 가열되는 현상이 없고, 전자의 입사에 의한 기판의 손상율이 감소된다. 스퍼터링에 사용되는 타겟은 Cr, Mo, Ni, Al, ITO등이 사용되며 106 mm×500 mm×6.35 T의 크기를 갖는다. 타겟 뒷면에 영구 자석을 장착하여 마그네트론 스퍼터로써 증착율을 높였다. 진공펌프는 초기 배기 단계에서 드라이 펌프를 사용하여 1×10^{-3} torr까지, 고진공 펌프로 크라이오 펌프를 사용하여 최고 1×10^{-7} torr의 진공을 만들 수 있다. 질량 유량 제어기(Mass Flow Controller, MFC)를 설치하여 플라즈마 발생 기체인 Ar 가스를 0~200 sccm까지 흘려보낼 수 있다. 반응성 기체로는 O₂ 가스를 사용하였고 High-grade MFC (Model3200, KOFLOC)를 설치하여 0~10 sccm 범위에서 0.1 sccm씩 O₂ 가스의 유량을 미세조절이 가능하도록 하였다. Ar 가스와 O₂ 가스 모두 99.99%의 초고순도 가스를 사용하였다.

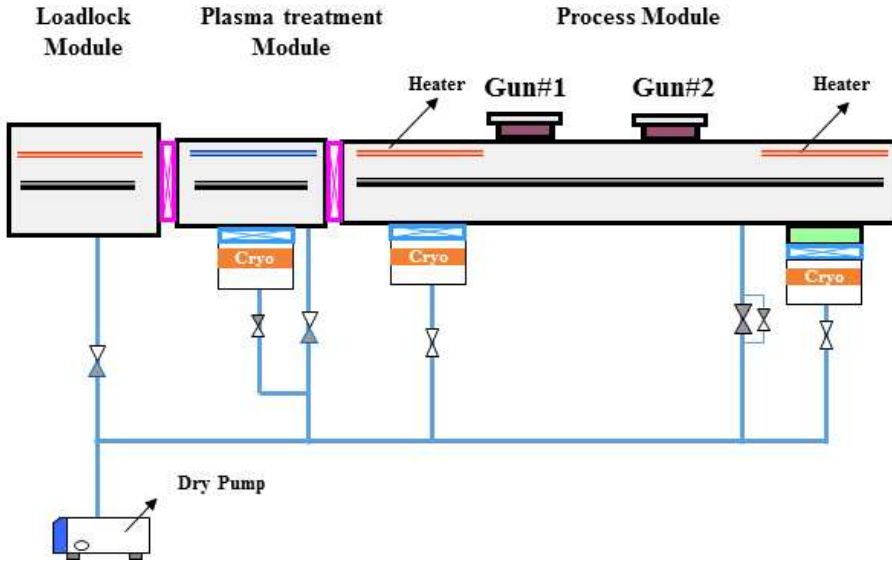


그림 3-1. In-line 방식의 RF 마그네트론 스퍼터 구조도

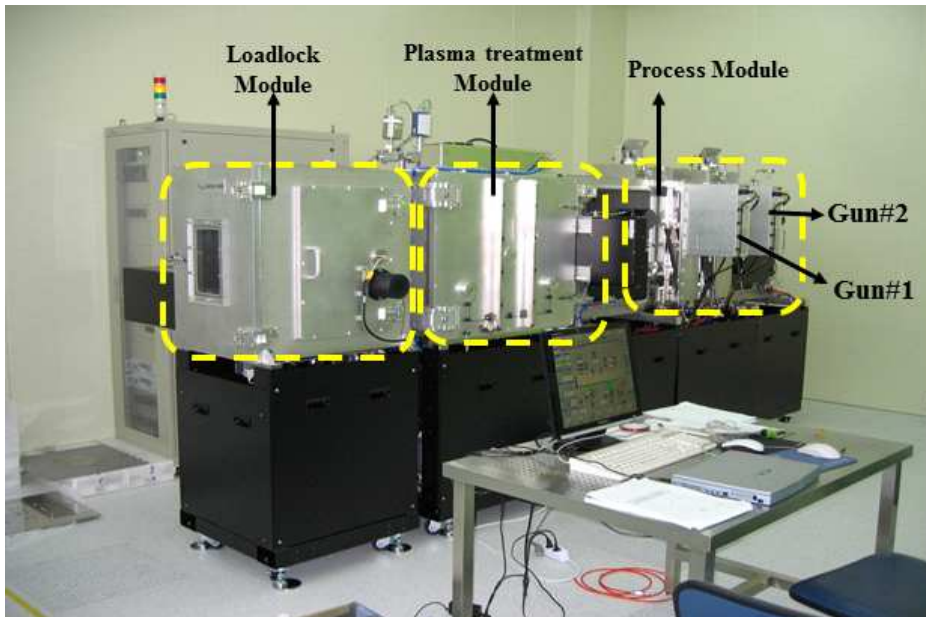


그림 3-2. In-line 방식의 RF 마그네트론 스퍼터 시스템 사진

TCO는 제작 방법, 식각특성, 안정성 등이 우수한 ITO 박막이 가장 많이 사용되어 지고 있다. ITO 박막은 인듐산화물에 주석산화물을 도핑한 형태로써 n형 반도체의 특성을 가지고 있다. 다른 투명 박막에 비하여 매우 낮은 전기저항을 가지고 있다. ITO 박막은 3.5 eV 이상의 비교적 높은 밴드갭을 가짐으로 인해 가시광선 영역에서 85% 이상의 높은 투과도를 갖는다.

ITO 박막이 투명전극으로 사용되기 위해서는 일정한 두께와 낮은 면저항값을 갖아야 한다. 투명전극에서 요구되는 ITO 박막의 두께는 가시광선 투과율이 가장 높은 150 nm이고, 원활한 전류 흐름을 유지하기 위해 면저항 값은 50 ohm/sq 이하이다. 이에 본 실험에서는 이 두 가지 조건을 만족하는 공정 조건을 찾기 위해 조건을 바꿔가며 증착 공정을 수행하였다. 면저항 값은 ITO 박막의 밀도와 밀접한 연관이 있다. 보다 낮은 면저항 값을 얻기 위해 증착 후 열처리 과정과 플라즈마 과정을 추가로 수행하여 박막 밀도를 향상 시켜 면저항을 측정하였다.

ITO 박막 증착을 위해 먼저 기판 홀더에 200 mm×200 mm 유리 기판을 장착하고 로드 록 모듈 챔버에 넣고 모든 챔버 내의 기압을 드라이 펌프로 1×10^{-3} torr 이하로 낮추고, 크라이오 펌프로 6×10^{-7} torr 까지 낮추었다. 이후 프로세스 모듈에 Ar 가스 30 sccm을 주입 후, 교류 전압을 200 W를 인가하여 예비 스퍼터링을 3 min 동안 수행하여 ITO 타겟 표면의 세척하였다. 스퍼터링에서는 기체가 타겟 표면과 반응하여 타겟 오염을 일으켜 타겟 표면에 화합물을 형성 할 수 있다. 이것이 증착 속도의 불안정 및 증착 박막의 색상이 변하는 문제를 야기시킬 수 있으므로 반드시 타겟의 예비 스퍼터링이 필요하다. 예비 스퍼터링 후 챔버 내부 증착온도와 타겟에 가해진 교류 전압은 예비 실험을 수행하여 각각 250℃와 300 W로 결정하였다. 표 3-1은 예비 실험에서 스퍼터링 증착 조건을 나타내는 표이다. 이후 표 3-2와 같이 Ar 가스와 O₂ 가스의 주입량을 적절히 변화시키고, 증착 시간과 공정 압력 등의 공정 조건을 바꿔가며 ITO 박막을 증착하였다. 공정 조건에 따라 증착된 박막의 증착률 및 두께, 면저항을 측정하여 서로 비교하였다. 박막의 증착률은 Ar 가스와 O₂ 가스 주입량 비와 공정 압력에 따라

RF 마그네트론 스퍼터에서 구할 수 있으며, 박막의 두께는 박막 증착 후 SEM을 이용하여 두께를 측정하였고, 면저항 값은 4-point probe를 이용하여 측정하였다. 4-point probe는 1 mm 간격으로 일렬로 구성된 프로브를 사용하며, 4개의 탐침으로 전류와 전압을 측정하여 저항값을 구한 후, 면저항 단위인 ohm/sq로 환산한다.

표 3-1. 예비 실험으로 결정된 증착 조건

	Step 1	Step 2	Step 3
Step name	Ignition	Pre-sputter	Sputter
Ar gas (sccm)	100	100	100
O₂ gas (sccm)	0.5	0.5	0.5
Pressure (mtorr)	5	2	2
RF. Power (W)	200	300	300
Temperature (°C)	250	250	250
Process Time (sec)	30	180	1400

표 3-2. ITO 박막 스퍼터링 증착 조건 및 특성 측정 결과

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
Step name	Sputter	Sputter	Sputter	Sputter	Sputter	Sputter	Sputter	Sputter	Sputter
Ar gas (sccm)	100	100	100	95	90	90	90	90	90
O₂ gas (sccm)	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pressure (mtorr)	3	3	3	3	3	3	2.5	2	2.5
RF. Power (W)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Temperature (°C)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Process Time (sec)	1400	1400	1400	1400	1400	1230	1230	1230	1350
Thickness (nm)	112	134	152	165	174	153	142	131	155
Ave. Rs (ohm/sq)	802	101.2	70.8	43.2	20.4	30.3	33.1	54.2	25.3
Uniformity (%)	18.6	15.8	10.4	9.8	8.6	9.4	9.6	10.1	9.1

그림 3-3은 O₂ 가스의 주입량을 0.5~0.1 sccm으로 감소시키며 증착 공정을 수행하였을 때 증착률 변화를 보여주고 있고 O₂ 가스 주입량이 0.1 sccm일 때, 증착률이 가장 좋은 0.018 nm/min의 결과를 나타내었다. 그림 3-4와 같이 O₂ 가스 주입량이 0.1 sccm일 때 ITO 박막의 두께는 152 nm로 가시광 투과도가 가장 뛰어난 150 nm 정도의 값을 얻을 수 있었다. 하지만 그림 3-5에서 보이는 바와 같이 면저항 값이 70.8 ohm/sq로 투명전극에서 요구하는 50 ohm/sq 이하의 값을 충족시키지 못하였다. 투명전극이 면저항 값 50 ohm/sq 이상의 값을 갖게 되면 OLED 소자를 제작하였을 때 구동 전압이 높아져 소자의 전기적 효율이 감소하게 된다.

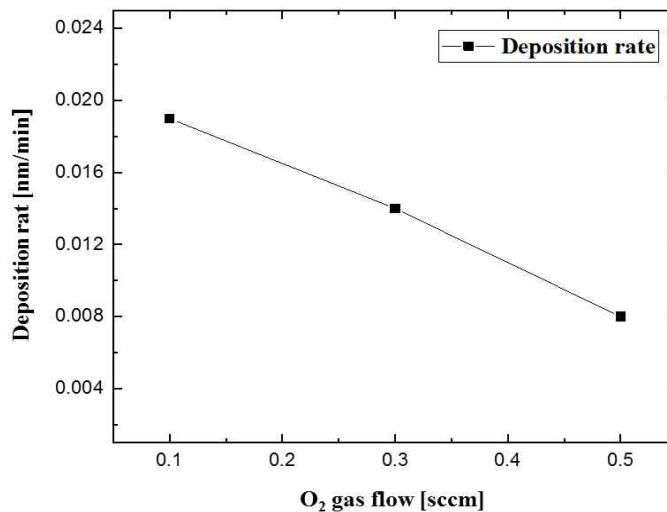


그림 3-3. O₂ 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화 그래프

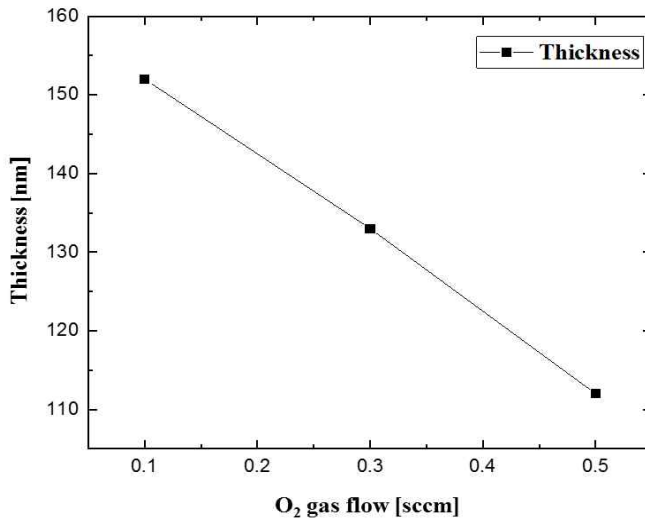


그림 3-4. O₂ 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 두께 변화 그래프

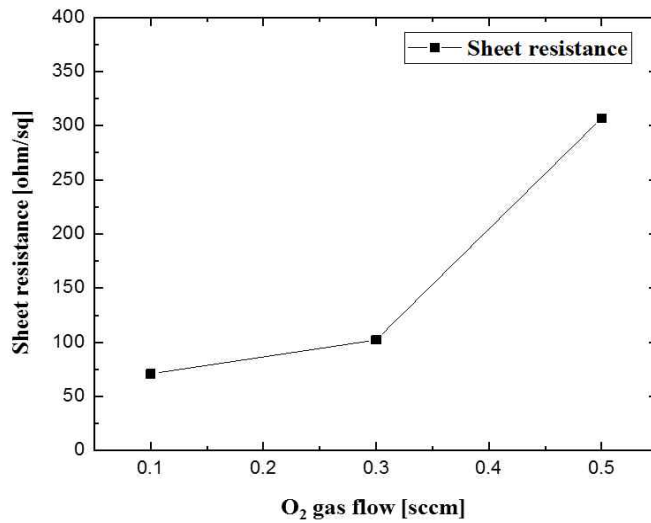


그림 3-5. O₂ 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화 그래프

이에 Ar 가스 주입량을 100~90 sccm으로 줄이면서 다시 증착 공정을 수행하였다. 그림 3-6은 Ar 가스 주입량 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화를 보여준다. Ar 가스 주입량이 90 sccm일 때 증착률은 0.124 nm/min으로 증가하였고, 그림 3-7과 같이 ITO 박막의 두께는 174 nm로 증가하였다. ITO 박막이 두꺼워짐에 따라 면저항은 20.4 ohm/sq 낮아졌다. 그림 3-8은 Ar 가스 주입량 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화이다. 이에 ITO 박막의 두께를 150 nm로 유지하기 위해 증착률을 고려하여 증착 시간을 1400 sec에서 1230 sec로 변화를 주어 증착을 수행하였다. 그림 3-8와 같이 ITO 박막의 두께는 153 nm로 증착이 되었으며 면저항 값이 30.3 ohm/sq로 감소하여 전기 전도도가 향상 가능함을 확인하였다.

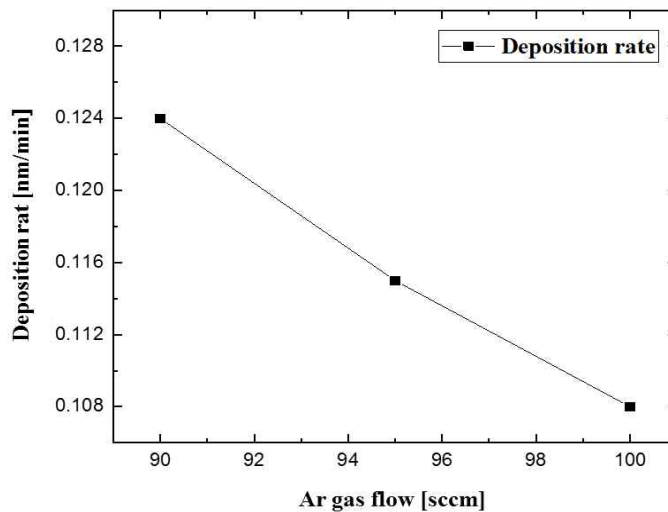


그림 3-6. Ar 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화 그래프

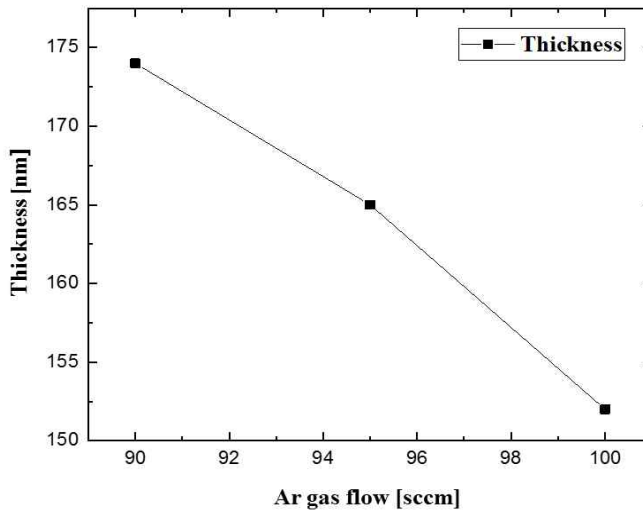


그림 3-7. Ar 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 두께 변화 그래프

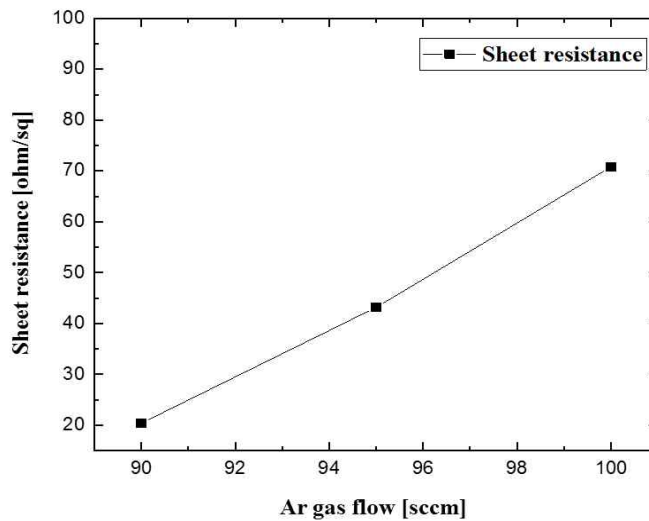


그림 3-8. Ar 가스 주입량의 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화 그래프

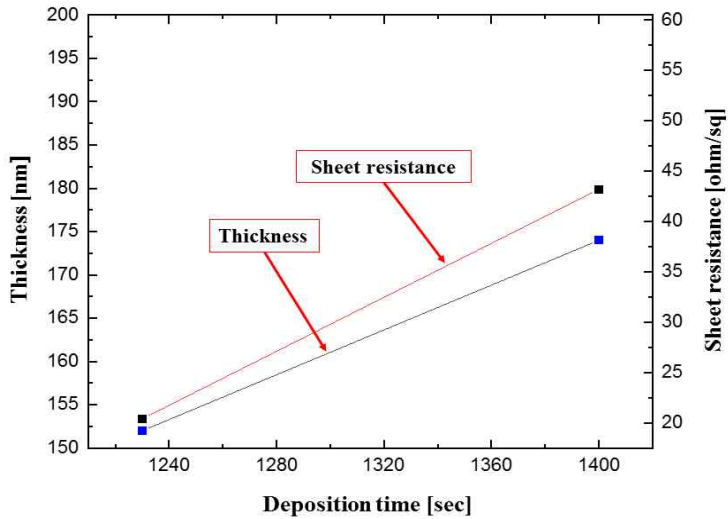


그림 3-9. Ar 가스 주입량이 90 sccm일 때 증착 시간에 따른 ITO 박막의 두께 및 면저항 변화 그래프

면저항 값을 30 ohm/sq 미만으로 ITO 박막을 증착하기 위해 공정 압력을 3~2 mtorr로 감소시키며 증착 공정을 수행하였다. 그림 3-10은 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화이다. 그림 3-11과 같이 공정 압력이 줄어들수록 증착률이 감소하여 ITO 박막의 두께가 감소함을 알 수 있었다. 그림 3-12에서는 공정 압력이 2 mtorr일 때 면저항 값이 54.2 ohm/sq로 급격히 증가하여 ITO 박막의 밀도가 감소함을 알 수 있었다. 이에 공정 압력을 2.5 mtorr로 하여 ITO 박막의 두께를 150 nm로 유지하기 위해 증착시간을 변화하여 다시 증착하였다. 그림 3-13에서 보는 바와 같이 1350 sec일 때 박막 두께가 155 nm이고, 면저항이 25.3 ohm/sq로 측정되었다. 이와 같은 실험을 통해 표 3-4에서 sample9를 제작한 조건인 교류 전압 300 W, 증착 온도 250°C 조건에서 Ar 가스 90 sccm, O₂ 가스 0.1 sccm로 주입하고, 공정 압력 2.5 mTorr, 증착 시간 1350 sec로 증착하였을 때 155 nm의 두께로 박막이 증착되었고, 이때 25.3 ohm/sq의 가장 낮은 면저항 값을 갖게됨을 확인 할 수 있었다.

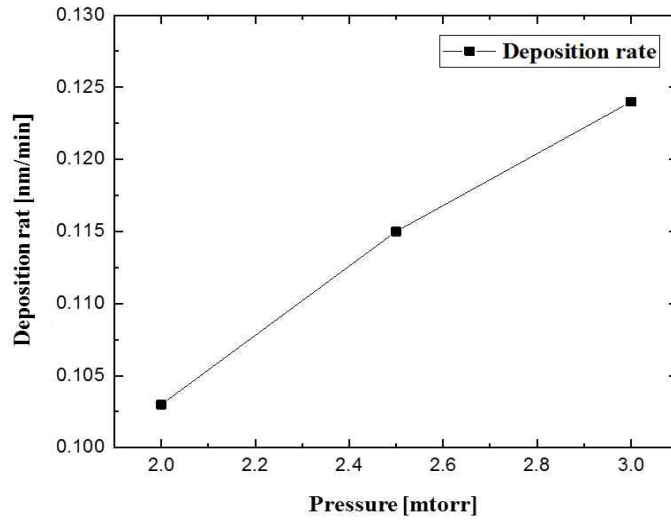


그림 3-10. 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 증착률 변화 그래프

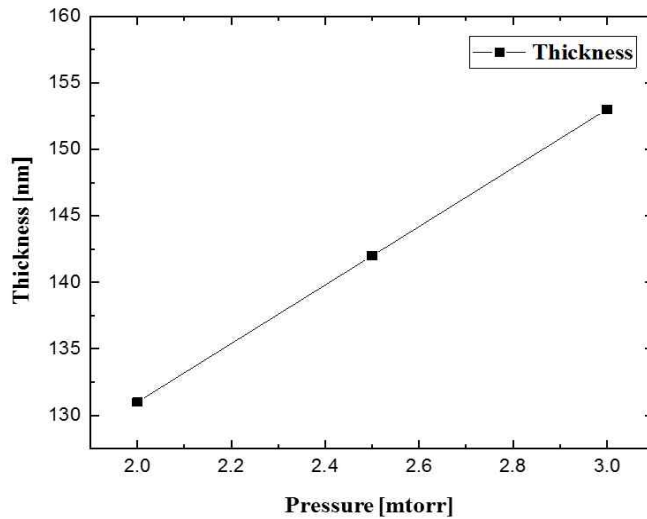


그림 3-11. 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 두께 변화 그래프

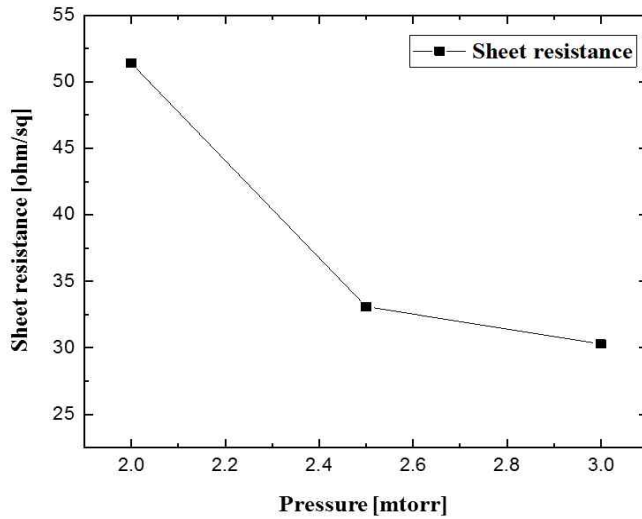


그림 3-12. 공정 압력 변화에 따른 ITO 박막의 면저항 변화 그래프

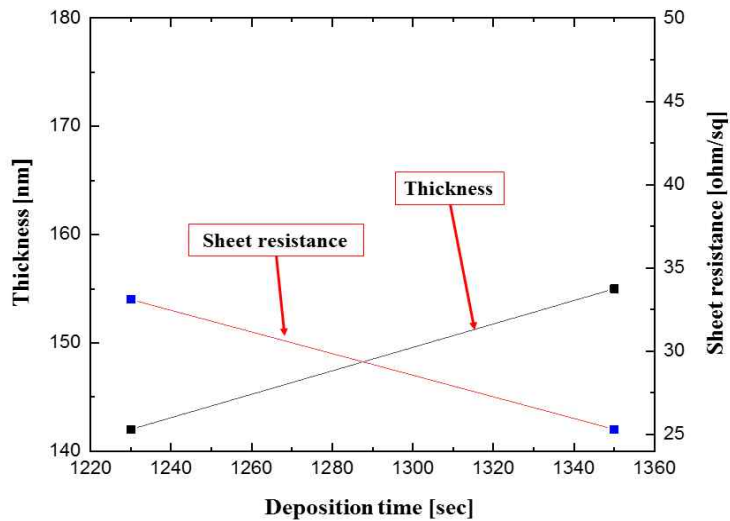


그림 3-13. 공정 압력이 2.5 mtorr일 때 증착 시간에 따른 ITO 박막의 두께 및 면저항 변화 그래프

2. 박막 증착 후처리

증착한 ITO 박막은 낮은 면저항 값을 갖을수록 전류가 잘 통하므로 투명전극으로써의 효율이 높다. 면저항을 낮추기 위해서는 ITO 박막의 밀도를 향상시켜야 하며, 이에 본 실험에서는 면저항을 낮출 수 있는 방법으로 증착 공정 후 열처리 공정을 수행하는 방법과 증착 공정 후 플라즈마 트리트먼트 공정을 수행하였다. 열처리는 ITO 박막이 증착된 기판을 프로세스 모듈 챔버에 넣어 250°C에서 1 hr, 380°C에서 1 hr을 각각 가열하여 열처리 과정을 수행하였다. 플라즈마 트리트먼트 공정은 플라즈마 트리트먼트 모듈 챔버에 ITO 박막이 증착된 기판을 넣고 ITO 박막 증착 조건과 동일한 Ar 가스를 90 sccm 주입하여 플라즈마 발생하여 10 min 동안 수행하였다. 그림 3-14은 열처리 공정과 플라즈마 트리트먼트 공정을 수행한 후 ITO 박막의 전기적 특성을 측정 한 결과이다. 그림 3-14(a)와 같이 4 포인트에서 면저항을 측정하여 각 위치별 면저항 값을 확인하였다. ITO 박막만 증착한 Sample A는 25.08 ohm/sq, 25.45 ohm/sq, 25.64 ohm/sq, 25.03 ohm/sq 값을 갖었다. 250°C에서 열처리한 Sample B는 20.53 ohm/sq, 20.72 ohm/sq, 20.79 ohm/sq, 20.48 ohm/sq의 면저항 값을 갖으며, 380°C에서 열처리한 Sample C는 13.91 ohm/sq, 14.02 ohm/sq, 14.11 ohm/sq, 13.86 ohm/sq의 면저항 값을 갖었다. 플라즈마 트리트먼트 공정을 수행한 Sample D는 23.65 ohm/sq, 23.98 ohm/sq, 23.84 ohm/sq, 23.47 ohm/sq의 면저항 값을 보였다. 표 3-3은 각 측정 위치별 면저항 값에 대한 평균값과 측정 위치의 평균 균일도 값을 보여 준다. 플라즈마 트리트먼트 공정 후 면저항 값은 23.74 ohm/sq로 낮아졌지만, 균일도에서는 기존 9.1%에서 9.3%로 저하되었다. 열처리 공정 온도가 250°C 일 때 면저항 값은 20.63 ohm/sq, 균일도는 8.3%로 향상되었고, 380°C일 때 면저항 값은 13.98 ohm/sq, 균일도는 6.4%로 크게 향상되었다. 이를 통해 후공정 이후에 박막의 면저항 값이 낮아져 더 효율적인 박막을 형성할 수 있었고, 380°C의 열처리 조건이 가장 효과적임을 확인하였다.

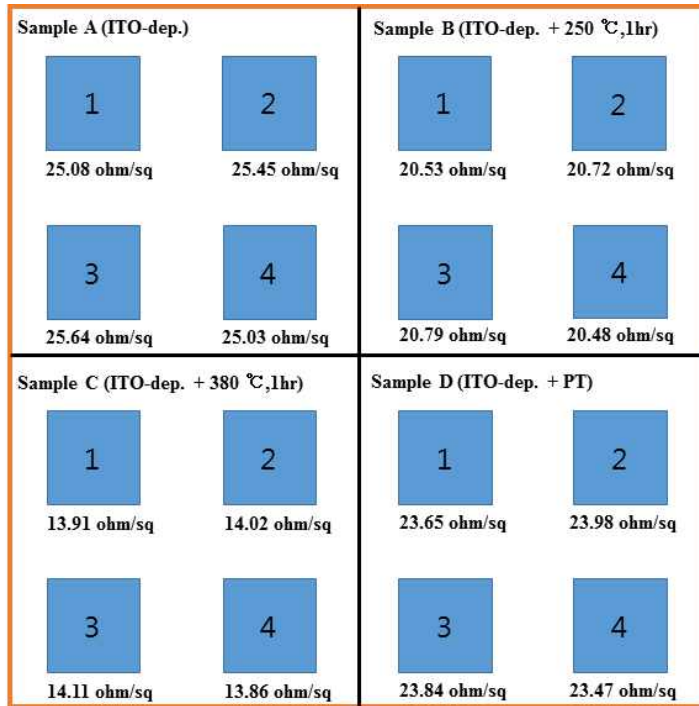


그림 3-14. 후처리 공정에 따른 ITO 박막의 면저항 측정 위치 및 면저항 측정 결과

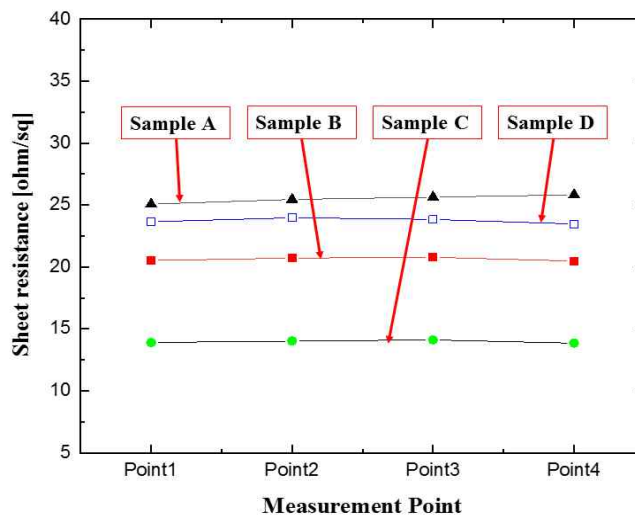


그림 3-15. 측정 위치에 대한 면저항 변화 결과 그래프

표 3-3. 후처리 공정된 ITO 박막의 균일도 평균값 및 면저항 평균값 비교표

	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
Ave. Rs (ohm/sq)	25.30	20.63	13.98	23.74
Uniformity (%)	9.1	8.3	6.4	9.3

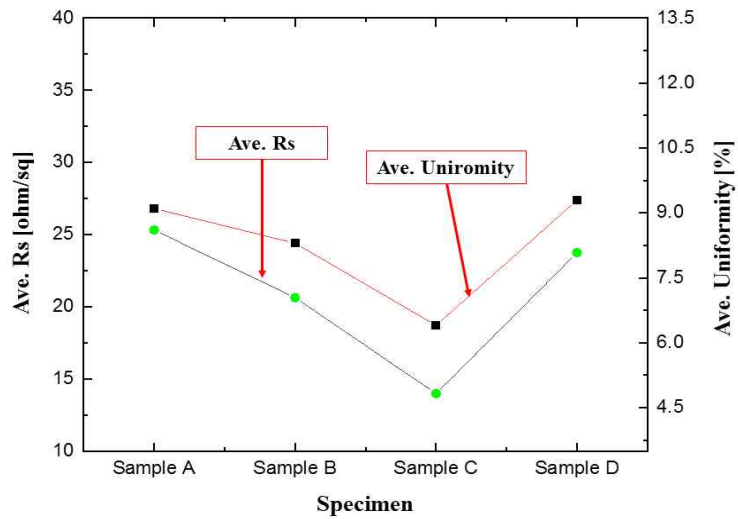


그림 3-16. 후처리 공정된 ITO 박막의 균일도 평균값 및 면저항 평균값 변화 그래프

증착된 ITO 박막이 투명전극으로 활용되기 위해서는 가시광 영역(380~780 nm)에서 85% 이상의 투과도를 가져야 한다 [33]. 박막이 어느 파장대에서 흡광도가 얼마나 되는지 측정하기 위해 UV-Vis-Spectrometer를 이용하여 투과도를 측정하였다. 램프로부터 방사된 자외선과 가시광선을 박막이 증착된 기판에 조사하면 분자의 결합 전자가 들뜨면서 흡수가 일어나게 되고 투과되어 나온 빛의 세기를 투과전의 빛의 세기로 나누면 박막의 투과도를 구할 수 있다. 그림 3-17은 제작한 박막의 광투과도를 측정한 결과이다. 파장 550 nm를 기준으로 후공정된 박막들은 90% 이상의 광투과도를 보였으며, 380°C 열처리 후 박막이 97.1%로 광투과도가 가장 우수하다는 것을 확인하였다.

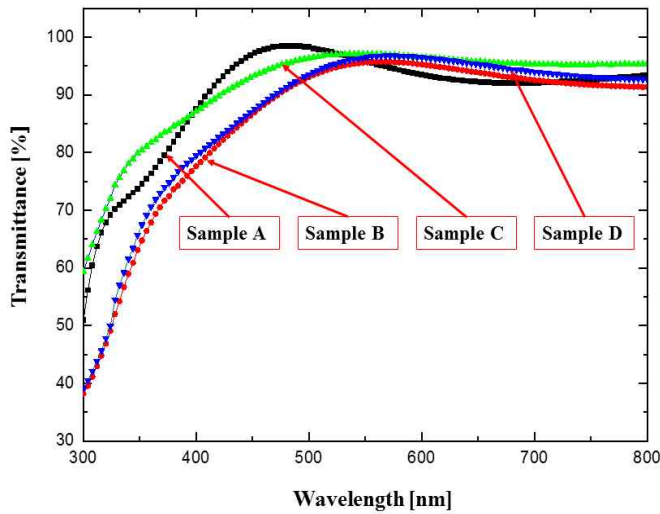


그림 3-17. 후처리 공정된 ITO 박막의 광투과율 변화 그래프

증착된 ITO 박막을 원자힘현미경(PSIA XE-200, PARK SYSETM)을 통하여 증착된 ITO 박막 표면 거칠기를 측정하였다. 켈틸레버라는 얇은 막대기에 부착된 미세한 탐침을 고유진동수로 진동시키면서 시료 표면을 따라 이동시키면 이때 인력, 척력에 의해 발생하는 진폭의 변화를 측정하여 표면 입자의 높낮이 정보를 입력하여 3차원 이미지화 한다. 표면 거칠기는 박막의 구조 특성에서 매우 중요한 값으로 표면 거칠기가 높으면 대면적 OLED를 제작하였을 때 과전류 쇼트 현상이 생겨 소자 일부분에 암점이 생기는 문제점을 야기시킬 수 있다. 이에 낮은 표면 거칠기를 갖는 박막을 증착하는 것도 중요하다. 원자힘현미경 측정 조건은 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 의 영역에서 0.8 line/sec의 속도로 스캔하였다. 얻어진 원자힘현미경 영상의 해상도는 512×512 픽셀이다. 원자힘현미경 측정 후 결과는 R_a 값과 R_{pv} 값으로 분석하였다. R_a 는 측정된 영역 내의 모든 포인트의 높이를 합한 뒤 포인트 개수로 나눈 값을 기준으로 모든 높이 절대값을 합한 후 측정 영역의 넓이로 나눈 값이다. 이는 표면의 평균 거칠기 값이 되며 값이 낮을수록 균일한 거칠기를 나타낸다. R_{pv} 는 측정 영역 내에서 가장 높은 값에서 가장 낮은 값의 차이를 나타내며, R_a 값과 같이 낮을수록 균일한 거칠기를 나타낸다. 표 3-4과 그림 3-18은 원자힘현미경 측정 결과를 보여 준다. 후공정 전 ITO 박막만 증착된 조건에서 표면 거칠기는 2.294 nm이다. 250°C 열처리 공정 후 2.066 nm로 감소하였고 380°C 열처리 공정 후 1.708 nm로 크게 감소하였다. 플라즈마 트리트먼트 공정 후 표면 거칠기는 2.061 nm로 감소하였지만 250°C 열처리 공정 후 표면 거칠기와 유사함을 확인하였다. 그림 3-19은 원자힘현미경으로 측정한 ITO 박막의 표면 형상을 3차원 영상이다.

표 3-4. 원자힘현미경으로 측정한 표면 거칠기 결과

	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
R_a (nm)	2.294	2.066	1.708	2.061
R_{pv} (nm)	26.164	23.247	15.644	25.680

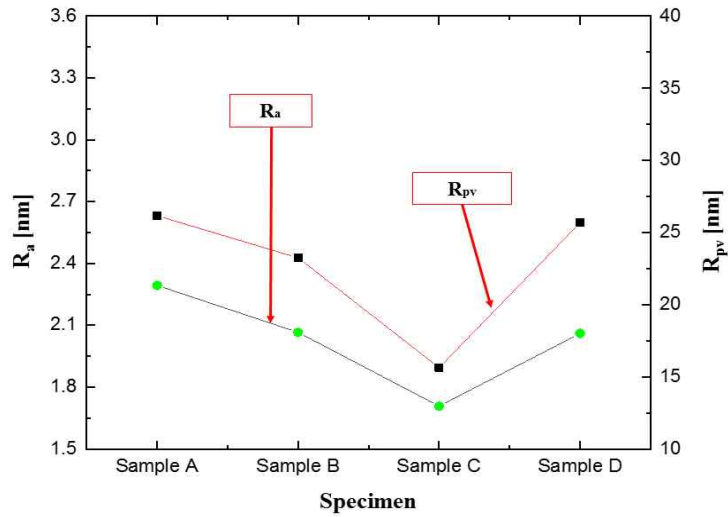


그림 3-18. 후처리 공정된 ITO 박막의 표면 거칠기 변화 그래프

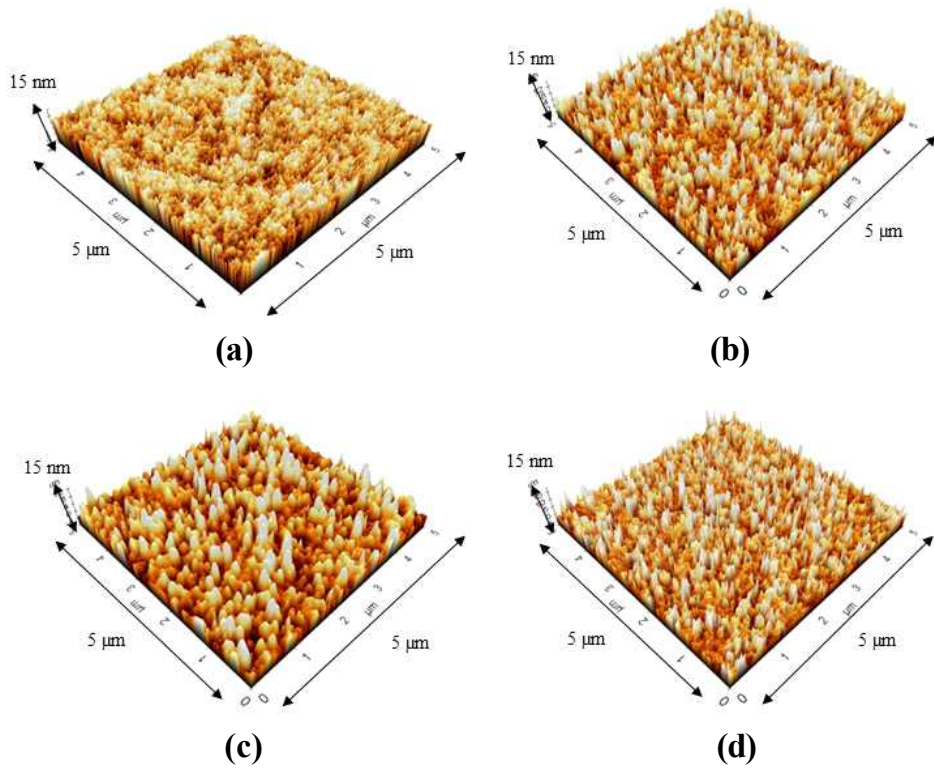


그림 3-19. 원자힘현미경으로 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 영역에서 측정된 후처리 공정된 ITO 박막의 3차원 형상. (a) Sample A, (b) Sample B, (c) Sample C, (d) Sample D

제 2 절 투명전극 제작을 위한 포토리소그래피 공정

제 2 절에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착된 ITO 박막을 포토 리소그래피 공정을 통해 OLED용 투명전극으로 사용하기 위한 패턴을 형성하는 방법을 설명한다. ITO 박막 전용 PR를 사용하여 노광을 수행하였고, PR 특성에 따라 스펀 코터와 노광기의 최적 구동 조건을 도출하고자 하였다.

1. 투명전극 패턴 형성

포토 리소그래피 공정 전 과정은 클린룸(class 100)에서 이루어졌으며 RF 마그네트론 스퍼터로 증착한 ITO 박막을 대상으로 패터닝 공정을 수행하였다.

1) 기판 세정(cleaning)

ITO 박막 기판을 세척 및 표면 처리하는 단계로 세정 스테이션 및 오븐을 이용하여 수행하였다. 먼저 ITO 박막 기판을 세정 용액이 담긴 Bath에서 30 min동안 초음파로 물리적 세정을 실시한 후 초순수를 이용하여 기판 표면을 충분히 린스 후 초고순도(99.999%) 질소를 이용하는 회전 건조기(spin rinse dryer, SRD)을 이용하여 1200 rpm의 속도로 회전 후 건조시킨다. 이후 SPM 프로세스와 아세톤, 아이코사펜타엔산(icosapentaenoic acid, IPA)를 이용하여 각각 10 min동안 침액한 후 각각의 공정 후 초순수를 이용한 린스 및 SRD를 이용한 건조를 실시하였으며, 오븐에서 100℃로 10 min 동안 건조하여 세정하였다.

표면처리는 기판 전면이 HMDS 프라이미 균일하지 않은 경우 국부적으로 현상 시간의 차이가 발생하여 PR 패턴 형성이 제대로 이루어지지 않으며, 습식 식각 공정시 언더컷 형태의 패턴이 발생하게 된다. 또한 프라이미 정도가 적절치 않을 때는 PR 코팅 과정에서 습윤성 불량 발생하게 되며 PR 패턴의 들뜸 현상으로 패턴 전체가 무너지

게 된다. 따라서 본 공정에서는 이러한 문제들로 인해 별도의 표면처리를 진행하지 않았으며, 별도의 표면처리를 진행하지 않았음에도 불구하고 기판 표면에 ITO가 증착되어 있어 PR 코팅 시 충분한 접착력을 얻을 수 있었다.

2) PR 도포(photoresist coating) 및 약하게 굽기(soft bake)

기판 세정 후 ITO 박막 기판 표면에 PR을 도포 하는 단계로 트레이킹 시스템을 사용하여 PR 도포 및 약하게 굽기를 실시하였다. 실험에 사용된 PR는 positive PR(HKT-601(CP-10), AZ CHEMICAL)으로 최대속도 900 rpm으로 스핀 코터를 회전하여 1 μm 두께의 PR 막을 형성하였으며, 도포된 PR의 접착력을 향상시키기 위해 핫플레이트에서 110 $^{\circ}\text{C}$ 온도로 100 sec 동안 약하게 굽는 공정을 수행하였다.

3) 노광(exposure) 및 후노광 굽기(post expose bake, PEB)

PR 도포 후 노광에 사용된 노광기(MA-8 model, SUSS MICROSTEC)는 노광 모드에 따른 분해능이 1 μm 급의 사양을 가지고 있다. 이 노광기를 이용하여 마스크 오염이 적어 큰 패턴 형성에 적합한 proximity mode로 노광 공정을 수행하였다. 포토마스크를 PR이 코팅된 ITO 박막 기판과 정렬하여 10 mW/cm^2 의 출력을 가지는 파장 365 nm 자외선을 6.5 sec 동안 65 mJ을 선택적으로 조사하였다. 이후 핫플레이트를 이용하여 60 sec 동안 120 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 PEB를 수행하였다.

4) 현상(development)

노광 공정이 끝난 후 PR를 제거하기 위해 현상액을 사용하여 현상 공정을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 현상 공정 방법은 퍼들 방식으로 기판을 스핀 코터를 이용하여 현상 초기에 회전시키며 현상액(AZ-MIF-300, AZ CHEMICAL)을 10 sec 동안 분사하며 초기 현상을 진행하였다. 이후 현상액을 기판 전체에 표면장력을 이용해 웨이퍼 아래로 흐르기 전까지 조심스럽게 흘린 후 35 sec 동안 반응시켰다. 모든 반응이 진행

된 후 빠른 속도로 회전시키며 잔여 현상액 및 PR막에 함유된 용제를 제거하기 위해 초순수를 분사하며 충분히 행구는 과정을 진행하였다. 퍼들 방식은 PR에 가해지는 분사에 의한 물리적 힘 때문에 작은 패턴의 현상이 가능하고 부분적으로 용해된 PR 성분이 분사에 의해 쓸려가는 장점이 있다. 또한 분사압에 의해 현상시간이 획기적으로 줄어들어 현상공정 시간을 크게 줄일 수 있으며, 노광 시 자외선에 노출되지 않은 부분에 대해 초기 PR 두께와 동일한 두께를 가진다는 장점이 있다. 현상 후 기판과 PR막과의 물리적 접촉력 향상을 위해 핫플레이트 위에서 120°C의 온도로 120 sec 동안 강하게 굽기를 수행하였다.

5) 식각(Etching) 및 PR 제거(strip)

ITO 패턴을 형성하기 위해 ITO 박막을 선택적으로 제거하기 위해선 식각 공정을 진행하였다. 식각은 전용 식각액에 담그는 습식 식각 방법을 사용하였으며, ITO 전용 식각액(MA-SO₂, WOJIN CHEMICAL)을 사용하여 45°C에서 130 sec 동안 수행하였다. ITO 식각 후 PR 전용 제거제(EKC-830, DOW-DOUPONT)로 80°C에서 10 min 동안 초음파를 이용하여 PR을 제거하였다.

6) 절연층 패터닝(insulator layer patterning)

ITO 전극 패턴 형성이 완료된 후 유기물의 전극 분리를 위한 절연층을 형성하였다. 절연층은 절연체 전용 PR(CP1010-14, 14CP, ZEON)을 사용하여 포토 리소그래피 공정을 수행하였다. ITO 패턴을 형성하기 위한 공정들을 수행하면서 ITO 기판은 충분히 세척되었기 때문에 세정 과정은 생략하였으며, PR 코팅은 최대 속도 1200 rpm으로 회전시켜 1 μm 두께로 수행하였다. ITO 패턴 형성시 사용한 PR과는 정도의 차이가 있어 최대 속도를 300 rpm을 증가시켜 코팅 두께를 유지하였다. 이때 약하게 굽기는 동일하게 진행하였다. 노광은 절연체 전용 PR의 에너지 범위가 ITO 패턴용 PR보다 높기 때문에 ITO 패턴과 정렬하여 10 mW/cm²의 자외선을 10.5 sec 동안 105 mJ을 선택

적으로 조사하였다. 이후 핫플레이트를 이용하여 100 sec 동안 120℃의 온도로 PEB를 수행하였다. 현상은 ITO 패턴 형성 공정과 동일한 조건으로 진행하였다. 강하게 굽기의 경우 절연체 PR 내에 존재하는 용제를 완벽히 제거하기 위해 오븐을 이용하여 240℃ 고온에서 1 hr 동안 진행하였다.

2. 투명전극 소자 전기적 특성 계측

그림 3-20(a)는 포토 리소그래피 공정을 통해 만들어진 OLED 조명용 투명전극 소자이고, 만들어진 소자를 이용하여 OLED 조명 테스트 소자를 그림 3-20(b)와 같이 제작하였다. 제작된 OLED 소자의 특성은 전류-전압 특성과 전압-발광 특성을 분석한다. 전류-전압 특성 분석에서는 OLED 소자에 인가시키는 전압을 증가시키면서 흐르는 전류의 변화를 측정하여 전압변화에 따른 전류밀도를 확인하고 제작된 OLED 소자별로 그 특성을 확인 하였다. 전압-발광 특성에서는 OLED 소자에 인가시키는 전압을 증가시키면서 OLED 발광층으로부터 방출되는 휘도를 측정하였다. 휘도는 광원의 단위면적당 밝기의 정도로 발광면의 표면 밝기를 나타낸다.



(a)



(b)

그림 3-20. 포토 리소그래피 공정을 통해 제작된 소자 영상. (a) OLED용 투명전극 소자, (b) 제작된 투명전극 소자를 적용한 OLED 테스트 소자

그림 3-21은 전류밀도의 변화를 측정한 결과이다. 높은 전류 밀도는 많은 전자의 주입으로 인하여 OLED 소자의 높은 효율을 얻을 수 있다. 전류 밀도는 전극의 저항이 낮을수록 높은 값을 갖으며 380℃ 열처리한 투명전극으로 제작된 OLED 소자가 높은 전류밀도를 보여주고 있다. 그림 3-22는 전류밀도 변화에 따른 전류효율 변화이다.

그림 3-23는 인가전압의 변화에 따른 휘도를 측정한 결과이다. 380℃ 열처리한 투명전극으로 제작된 OLED 소자가 높은 전류밀도로 인하여 높은 휘도를 보이고 있다. OLED 소자의 전류-전압 특성과 전압-발광 특성 분석을 통해 투명전극의 전기저항이 낮을수록 OLED 소자의 효율이 증가함을 확인하였다.

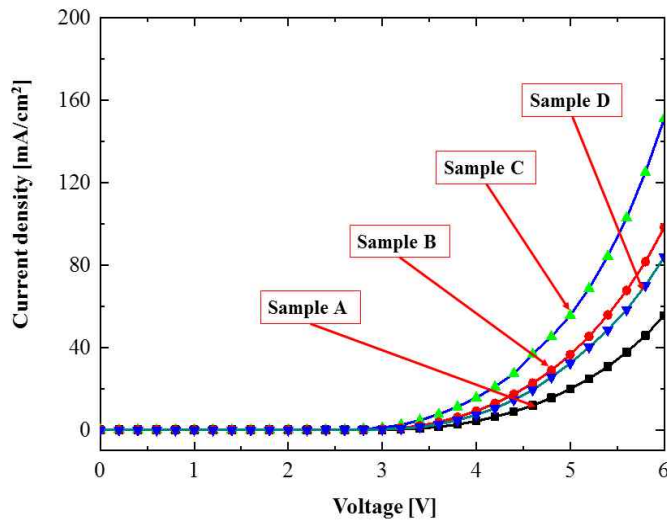


그림 3-21. 투명전극 제작 조건에 따른 OLED 테스트 소자 전압-전류밀도 특성 변화 그래프

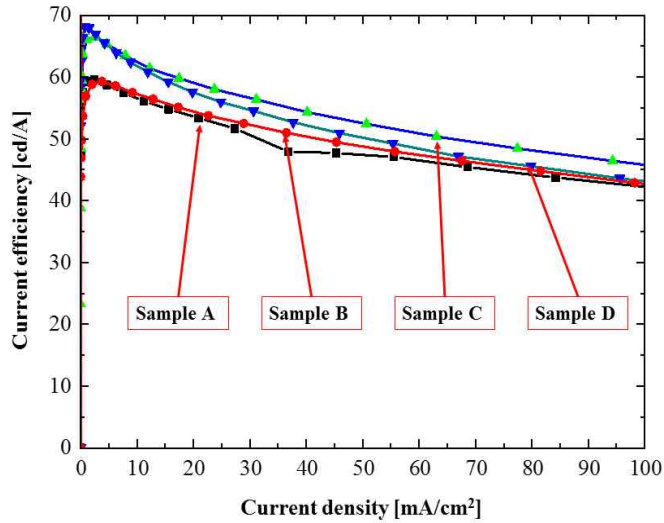


그림 3-22. 투명전극 제작 조건에 따른 OLED 테스트 소자 전류밀도-전류효율 특성 변화 그래프

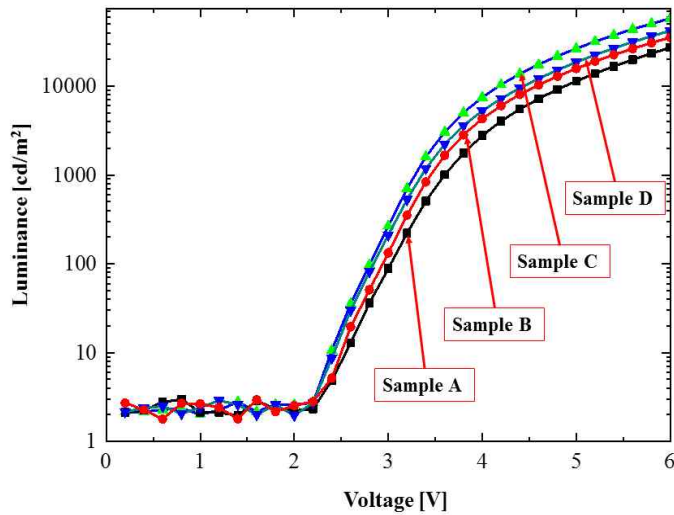


그림 3-23. 투명전극 제작 조건에 따른 OLED 테스트 소자 전압-발광 특성 변화 그래프

제 4 장 유기발광소자용 투명전극 형상 측정 및 분석

제 1 절 열전계방출형 주사전자현미경을 이용한 형상 측정

1. 열전계방출형 주사전자현미경 시스템

SEM은 전자빔을 만들어 내는 전자총의 종류에 따라 열방출형, 전계방출형, 그리고 열전계방출형으로 구분되어 진다. 표 4-1은 SEM 전자총 특성 보여준다. 열방출형 전자총은 열에너지를 공급하여 전자를 발생시킨다 [15]. 사용되는 W 필라멘트는 2700 K 정도의 온도로 가열되면 많은 열전자를 발생시킨다. 생산단가가 낮고 전자빔의 안전성이 우수하나 고배율 이미지 측정에는 적합하지 않다. 보편적으로 사용되는 SEM은 열방출형 전자총을 이용하고 있다 [16]. 이것은 W 필라멘트의 낮은 가격과 낮은 요구 진공도로 상대적으로 장비 단가가 낮아 장비 구축에 용이하기 때문이다. 하지만 반도체 산업의 발달과 반도체 소자의 소형화로 인해 보다 높은 분해능과 고배율 측정을 요구하고 있다. 이에 일함수에너지 효율이 좋은 전계방출형 전자총을 사용한 전계방출형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, FE-SEM)이 개발되었다 [17].

전계방출형 전자총은 열에너지로 공급하는 열방출형 전자총과는 달리 높은 전기장을 가하여 전자를 방출시킨다. 전계방출형 전자원은 전자방출 효율이 좋은 단결정 W 을 사용하며, 최근에는 W에 ZrO_2 을 증착시켜서 전자방출 효율을 증가시킨 열전계방출형 전자총을 사용한다 [19]. 전계방출형 전자총은 열방출형 전자총보다 높은 분해능을 갖지만 그림 4-1(b)와 같이 날카로운 팁을 사용하기 때문에 팁 표면에 흡착이 일어나 전계방출 효율 및 빔안정성이 나빠지는 단점이 있다. 이에 매일 흡착물 제거를 위한 플래쉬 과정이 필요로 하며 초고진공을 필요로 하기 때문에 장비 가격이 상대적으로 고가인 문제점이 있다 [16].

표 4-1. SEM 전자총 특성 비교표

Electron gun	Thermionic electron gun		Field emission electron gun	
	Tungsten filament (W)	Lanthanium hexaboride filament (LaB ₆)	Schottky (ZrO/W)	Cold W(310)
Luminance (A/cm ² sr)	~10 ⁵	~10 ⁶	~10 ⁷	~10 ⁸
Energy (eV)	1	1	0.3~1.0	0.2~0.3
Beam stability (1%)	1	1	≤2	≤4
Life time (hr)	40~100	200~1000	1~2 (year)	~10 (year)
Required vacuum degree (mbar)	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸

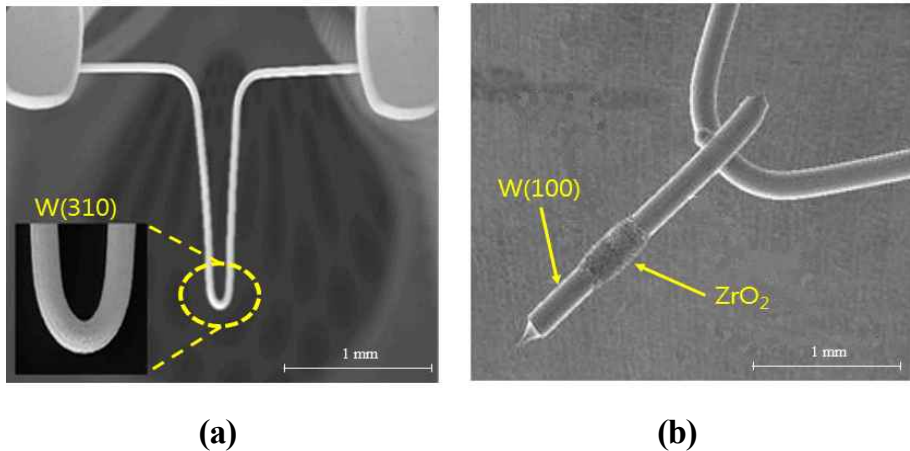
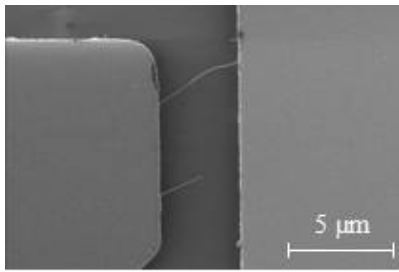


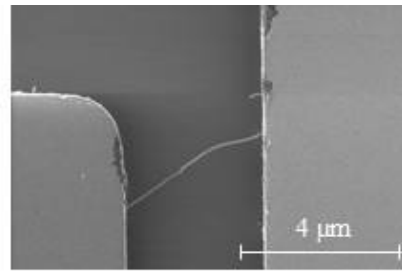
그림 4-1. 전자총의 전자원 이미지. (a) W 단결정으로 만들어진 열방출형 전자총 전자원, (b) ZrO₂과 W으로 만들어진 열전계방출형 전자총 전자원

본 연구에서 제작한 박막 소자가 나노 단위에 박막 두께를 갖고 있어 일반적인 SEM으로는 정확한 두께 측정이 불가능하다. 그러한 이유로 높은 분해능으로 고배율 측정이 가능한 FE-SEM(Quanta 200 FEG, FEI)을 사용하였다. 쇼트키 전계방출형 전자총을 사용하며 SE 모드에서 최대 30 kV에서 0.5 nm 분해능을 갖으며 측정 배율은 $\times 25 \sim \times 500,000$ 까지 측정할 수 있다 [15-19]. 측정 시 챔버 내부 진공도는 6×10^{-7} mbar 값을 갖는 고진공 SEM이다. FE-SEM으로 형상 측정 시 이미지 형성에 관련된 주요 변수들은 가속 전압, 프로브 전류, 작동 거리, 시편의 전도성 등이 있다 [15,16].

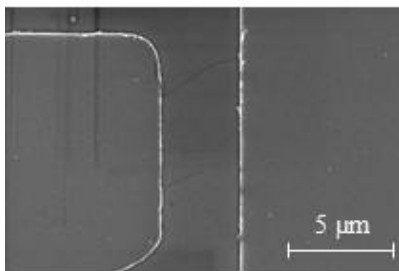
가속전압의 변화에 분해능의 성능이 바뀐다. 가속전압이 1 kV에서 최대 3 nm의 분해능을 갖으며 증가하면서 분해능이 높아져 30 kV에서 최대 0.5 nm 분해능 값을 갖는다. 가속전압이 증가할수록 높은 분해능을 갖지만, 표면 정보 획득은 어려워지고 대전 효과가 강해져서 비전도성 시료의 관찰이 어려워진다. 하지만 가속 전압이 감소하면 이차전자 발생율이 증가하고, 이에 따라 표면 오염이 심해진다. 이에 측정 시료의 종류에 따라 적절한 가속전압의 선택이 중요하다. 그림 4-2는 가속전압을 1 kv, 5 kV, 15 kV로 증가시키며 $\times 7,000$ 배율과 $\times 12,000$ 배율에서 측정한 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT) 시료의 표면 영상이다. CNT 시료의 경우 낮은 가속전압에서 더욱 선명한 이미지 획득이 가능하였다.



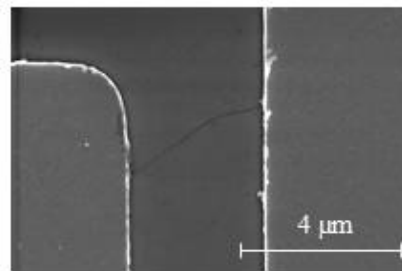
(a)



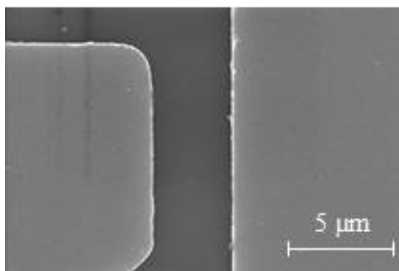
(b)



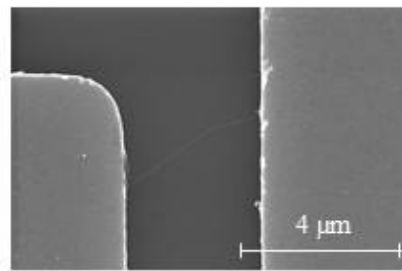
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 4-2. 가속전압 변화에 따른 CNT 시료 표면 측정 영상. (a) 1 kV -
 ×7,000 측정, (b) 1 kV, ×12,000 측정, (c) 5 kV, ×7,000 측정, (d) 5 kV,
 ×12,000 측정, (e) 15 kV, ×7,000 측정, (f) 15 kV, ×12,000 측정

FE-SEM이 갖는 프로브 전류는 2 nA~1 mA 값을 갖는다. 프로브 전류가 증가할수록 분해능은 감소하고, 전자빔에 의한 시료 손상이 증가한다. 하지만 이차 신호가 증가하여 부드러운 영상을 얻을 수 있다. 그림 4-3은 가속전압 1 k에서 프로브 전류값을 100 nA와 50 nA로 CNT시료 표면을 측정하는 영상이다. $\times 7,000$ 배율과 $\times 12,000$ 배율로 측정하였고 프로브 전류값이 높을수록 이미지가 부드러워지는 것을 확인하였다.

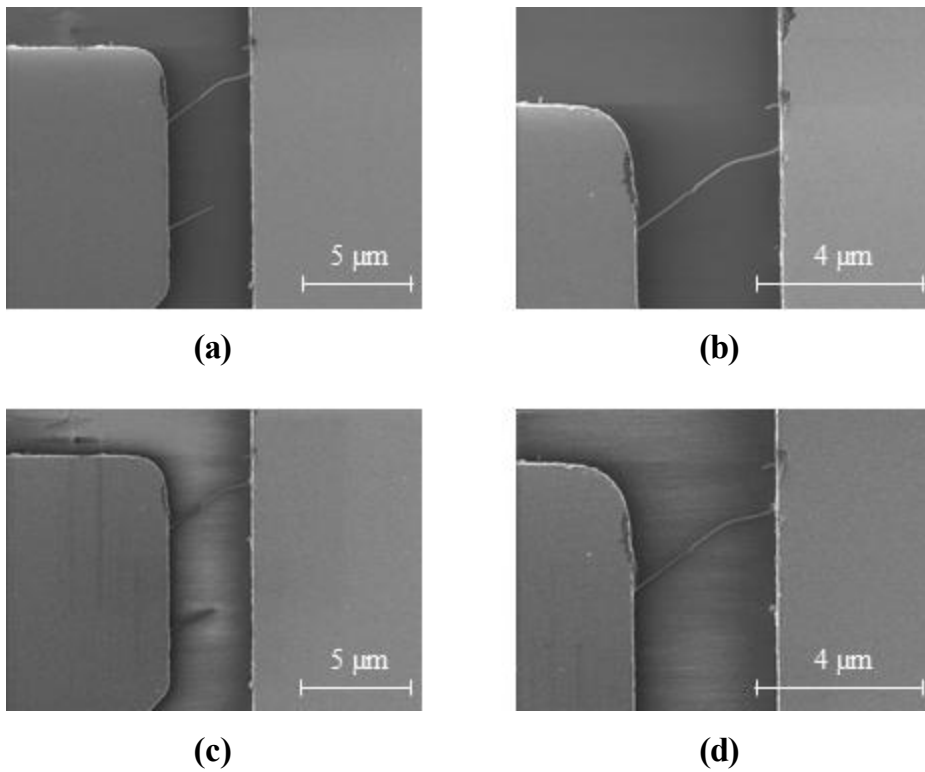


그림 4-3. 가속전압 1 kV에서 프로브 전류값 차이에 의한 CNT 시료 표면 측정 영상. (a) 100 nA, $\times 7,000$ 측정, (b) 100 nA, $\times 12,000$ 측정, (c) 50 nA, $\times 7,000$ 측정, (d) 50 nA, $\times 12,000$ 측정

FE-SEM 측정시 시료의 전도도에 따라 영상 왜곡이 일어날 수 있다. 특히, 비전도성 시료의 경우 영상 관찰시 시료 표면에 쌓인 음전하로 인하여 영상 왜곡이 발생한다. 이러한 영상 왜곡을 방지하기 위해 시료 위에 금속막을 2~3 nm 두께로 얇게 증착하여 코팅한다. 금속막 코팅에 사용되는 금속은 Au, Pt, Cr 등이 많이 사용되며, 표면의 미세구조 관찰을 위해서 금속막 코팅의 두께는 최소화되어야 한다. 대전 효과를 최소화하기 위한 다른 방법으로 영상 스캔 속도를 조절한다. 영상 스캔속도가 느려질수록 대전되는 음전하에 의한 영상 왜곡이 심해지며 비전도성 시료의 경우 고속스캔으로 영상을 획득해야 한다. 그림 4-4는 비전도성을 갖는 W 분말 시료의 금속막 코팅 전과 후의 FE-SEM 영상이다. 금속막이 코팅되지 않은 경우 FE-SEM 영상에 왜곡이 생김을 알 수 있었다. 영상 왜곡을 최소화하기 위해 고속스캔이 필요하였다.

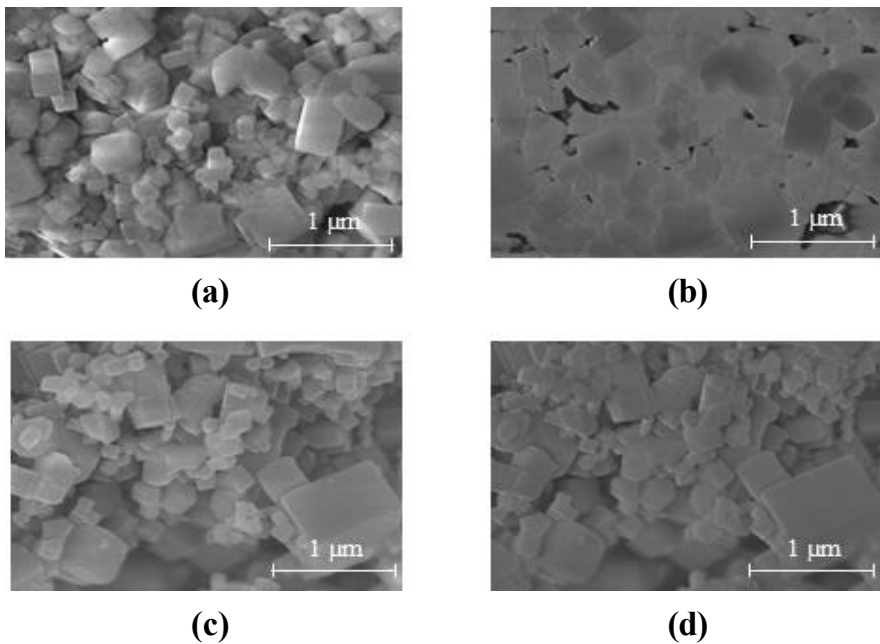
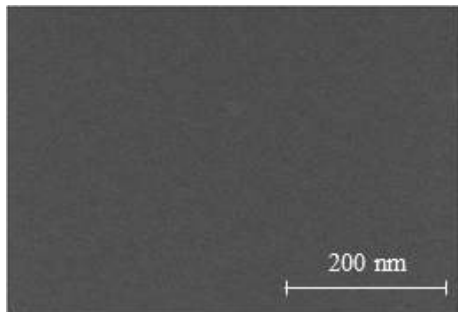


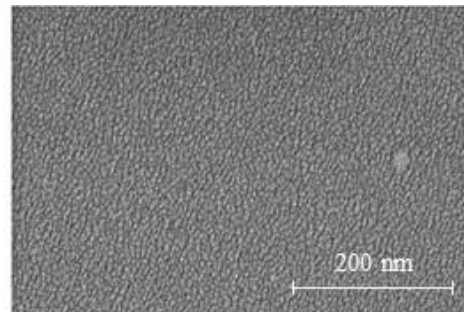
그림 4-4. 금속막 코팅 전과 후의 스캔속도에 따른 W 분말 시료의 영상 비교. (a) 비코팅, 고속스캔 측정, (b) 비코팅, 저속스캔 측정, (c) 코팅, 고속스캔 측정, (d) 코팅, 저속스캔 측정

2. 시료 전처리 및 측정 과정

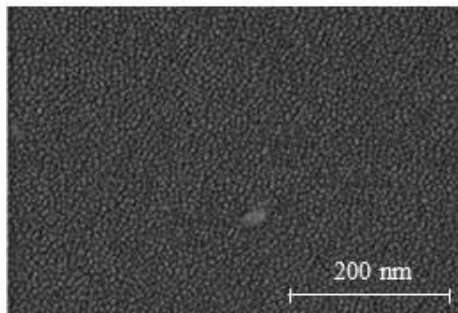
FE-SEM을 이용한 측정은 벌크, 박막, 분말시료 등의 표면 형상 관찰 및 미세 분석이 가능하다. 전도성 벌크 혹은 박막 시료는 특별한 시료준비 과정이 없이도 FE-SEM 측정이 가능하나, 동·식물 또는 수분을 포함하고 있는 시료의 경우 일반적으로 사용하는 고진공에 의해서 시료의 변형이 일어나고 진공계에도 문제를 야기하므로 별도의 시료 준비가 필요로 한다. 시편을 준비할 시 주의해야 할 점은 시료를 시료대 위에 단단히 장착해야 한다. 보통의 경우 탄소 테이프를 많이 사용하는데 경우에 따라서 탄소 페이스트나, 은 페이스트 등을 사용한다. 고배율 관찰을 위해서는 탄소 테이프 보다는 물리적인 방법이나 페이스트를 이용하여 고정시켜 측정한다. 그리고 관찰하고자 하는 시편의 표면이 오염되지 않도록 주의하여야 하며, 시료의 높이가 FE-SEM 제조사에서 정한 높이와 일치할 수 있도록 조절한다. 분말 시료의 경우 탄소 테이프가 붙어있는 시료대에 시료를 뿌리고 과다한 분말은 질소나 고압 공기를 이용하여 날린 후 시료를 압착하여 사용한다. 이후 대전효과에 의한 영상 왜곡 현상을 제거를 위해 Pt, Au, Cr, C과 같은 전도성막을 증착하여 표면 코팅을 한다. 표면 코팅된 전도성막의 두께가 너무 두꺼우면 고배율 관찰시 시료의 표면이 아닌, 코팅된 전도성막의 표면이 관찰되는 문제가 발생된다. 그림 4-5는 전도성 금속 재료에 따른 표면 형상 변화를 측정한 이미지로 금속막을 각각 3 nm 증착 후 표면을 FE-SEM으로 측정하였다. 고배율 측정시 일반적으로 많이 쓰이는 Au보다 Pt, Cr 등의 재료를 사용하는 것이 표면 입자 크기가 작아서 유리함을 확인할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 전기전도도가 우수하고 증착된 박막의 입자가 작은 Pt을 사용하여 표면 코팅을 하였다.



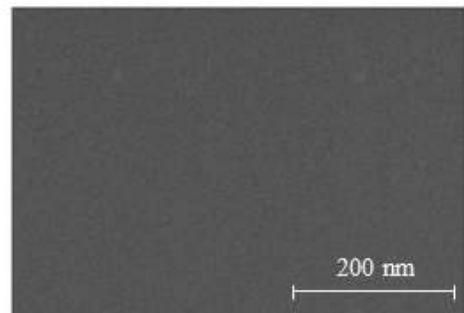
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4-5. 금속 재료에 따른 코팅된 전도성막 표면 형상. (a) Cr 3 nm 코팅, (b) Pt 3 nm 코팅, (c) Au 3 nm 코팅, (d) C 3 nm 코팅

전도성막으로 Pt를 증착하기 위해 사용된 스퍼터는 각종 시료 표면에 스퍼터링하여 시료의 전도성막을 증착하거나 전자 및 이온 빔에 의한 시료의 열적 손상을 줄여주기 위해 제작된 소형 스퍼터(SCD 005, BAL TEC)이다. 챔버는 4인치 웨이퍼 까지 수용 가능하였다. 진공 펌프는 2 게이지 로터리 펌프를 사용하여 1×10^{-3} torr까지 진공을 유지할 수 있고, 사용된 Pt는 순도 99.95%인 고순도 타겟을 사용하였다.

유리 기판을 5 mm×5 mm 크기로 잘라 소형 스퍼터로 5 sec 간격으로 Pt를 증착 하였다. 그림 4-6은 시간에 따른 표면 형상을 SEM으로 100,000의 배율에 측정된 결과이다. 10 sec까지는 박막이 형성되지 않았고 15 sec부터 미세하게 박막이 형성된 결과가 관측되었다. 30 sec부터는 약 2 nm 두께로 형성된 박막이 보이기 시작하였고 45 sec부터 3 nm 두께 이상의 박막이 형성됨을 알 수 있었다.

전도성막 코팅은 시료에 따라 증착 조건이 달라진다. 그림 4-7은 Pd, Cr, Mo등의 금속 박막을 전도성막 코팅 없이 측정된 결과와 미세하게 증착을 수행하여 측정된 결과를 보여주고 있다. 금속 박막은 전도성막이 없이도 측정이 가능하지만 전도성막이 있을 때 좀 더 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 그림 4-8은 전도성막 형성 유무에 따른 금속 산화막을 측정된 결과이다. ITO 박막과 AZO 박막은 전도성은 좋으나 산화막이기 때문에 전도성막 코팅을 하지 않았을 때는 대전현상에 의해 측정에 어려움이 있다. 또한 영상이 선명하지 않은 문제점이 있다. 30 sec동안 코팅을 수행하였을 때 선명하게 구분 가능한 두께를 가지는 영상을 얻을 수 있었다. 또한 실리카라고도 불리는 SiO_2 는 30 sec 이상의 코팅 후 전도성막이 형성이 되어 박막의 구분이 가능하였다. 그림 4-9는 분말 시료의 전도성막 유무에 따른 측정 결과이다. 실험에 사용된 분말 시료로는 ZnO, TiO_2 , Al_2O_3 분말 시료로 전도성막 형성이 없이는 측정이 불가능하였고, 얇은 막에서도 대전현상에 의한 이미지 왜곡이 심해 측정이 불가능하였다. 그러므로 충분한 전도성막이 형성이 되어야 측정이 가능하였으며, 40 sec 동안의 코팅을 수행한 뒤 매우 선명하게 구분 가능한 표면 영상을 얻을 수 있었다.

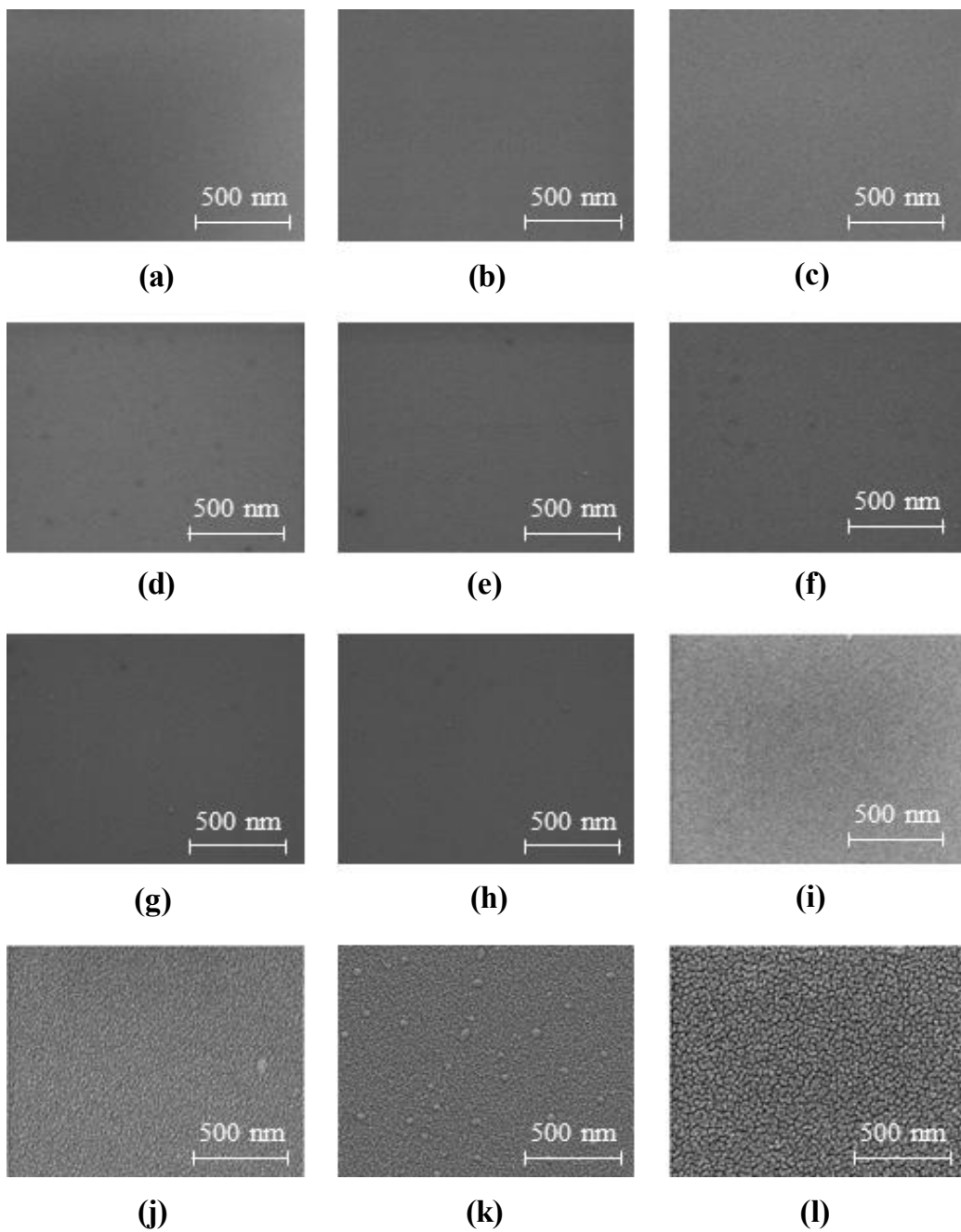
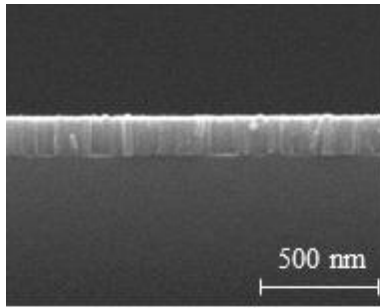
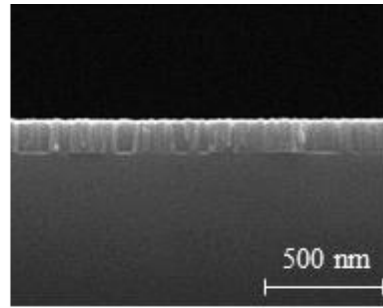


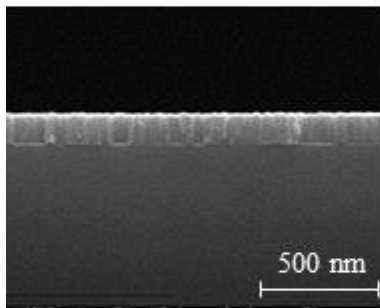
그림 4-6. 코팅 시간 증가에 따른 Pt 전도성막 표면 형상. (a) 비코팅, (b) 5 sec, (c) 10 sec, (d) 15 sec, (e) 20 sec, (f) 25 sec, (g) 30 sec, (h) 35 sec, (i) 40 sec, (j) 45 sec, (k) 50 sec, (l) 55 sec



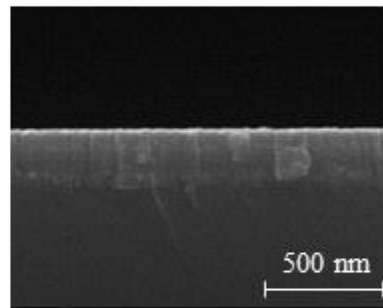
(a)



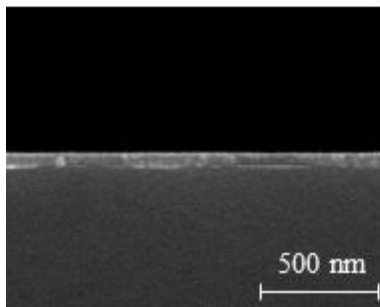
(b)



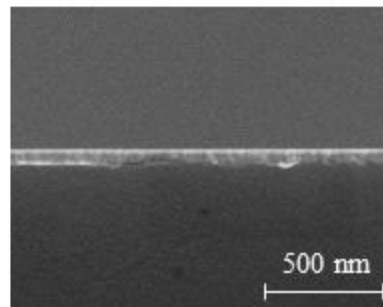
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 4-7. 전도성막 형성 유무에 따라 $\times 100,000$ 배율에서 측정된 금속박막 단층 영상. (a) 비코팅된 Pd 박막, (b) 20 sec 코팅된 Pd 박막, (c) 비코팅된 Cr 박막, (d) 20 sec 코팅된 Cr 박막, (e) 비코팅된 Mo 박막, (f) 20 sec 코팅된 Mo 박막

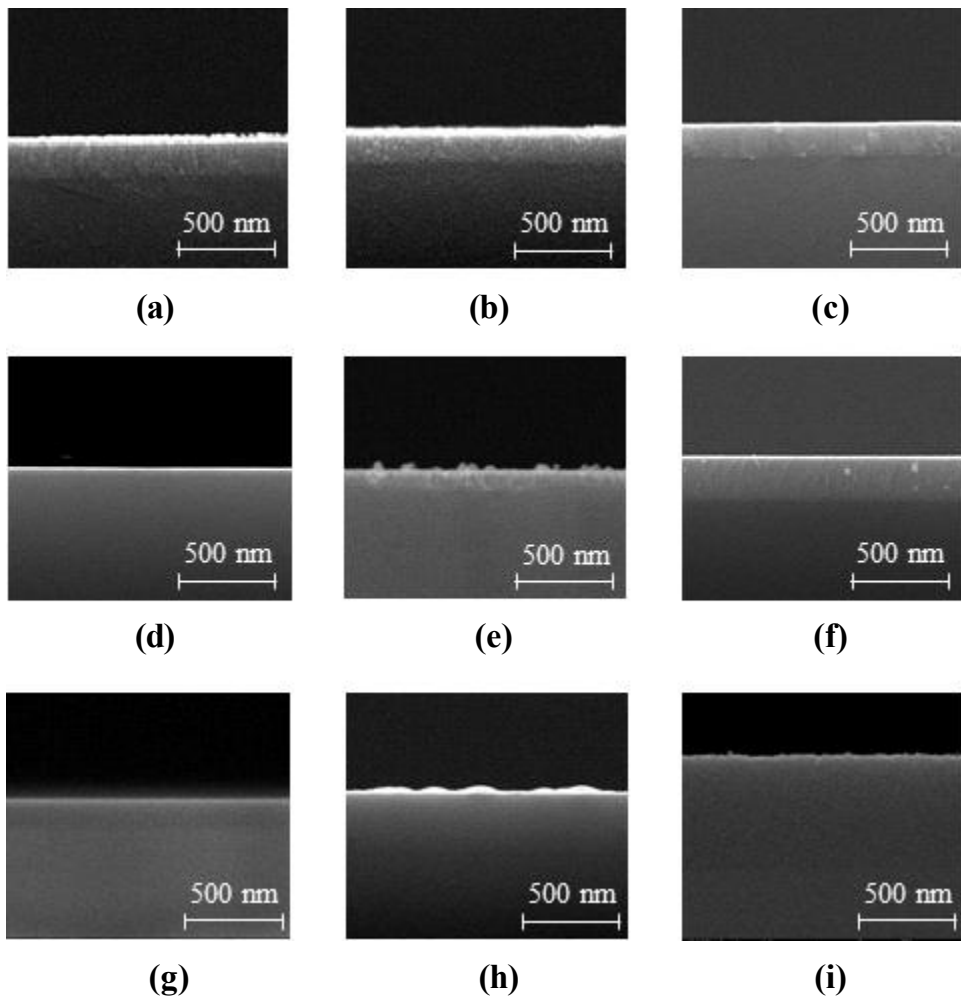
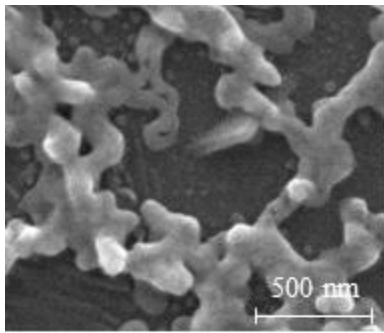
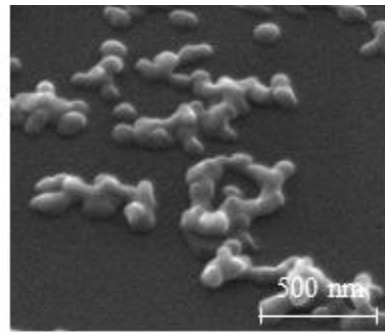


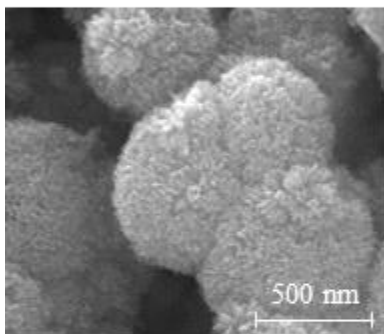
그림 4-8. 전도성막 형성 조건에 따라 $\times 100,000$ 배율에서 측정된 산화막 단층 영상. (a) 비코팅된 ITO 박막, (b) 20 sec 코팅된 ITO 박막, (c) 30 sec 코팅된 ITO 박막, (d) 비코팅된 AZO 박막, (e) 20 sec 코팅된 AZO 박막, (f) 30 sec 코팅된 AZO 박막, (g) 비코팅된 SiO₂ 박막, (h) 20 sec 코팅된 SiO₂ 박막, (i) 30 sec 코팅된 SiO₂ 박막



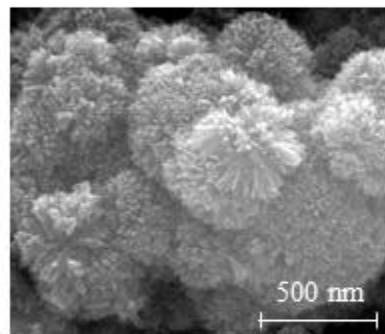
(a)



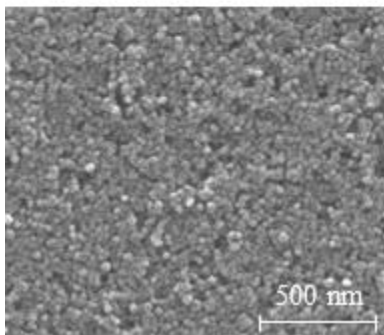
(b)



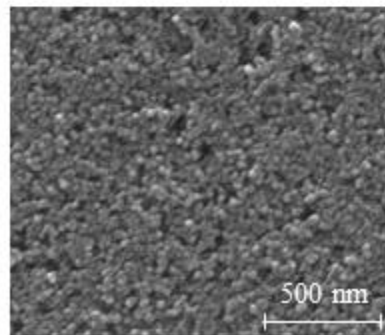
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 4-9. 전도성막 형성 조건에 따라 $\times 100,000$ 배율에서 측정된 분말 시료 표면 영상. (a) 30 sec 코팅된 ZnO 시료, (b) 40 sec 코팅된 ZnO 시료, (c) 30 sec 코팅된 TiO₂ 시료, (d) 40 sec 코팅된 TiO₂ 시료, (e) 30 sec 코팅된 Al₂O₃ 시료, (f) 40 sec 코팅된 Al₂O₃ 시료

3. 형상 측정 결과 및 특성 분석

본 실험에서 스퍼터링 증착 공정으로 제작된 ITO 박막을 FE-SEM으로 박막의 형상을 측정하였다. 전처리 공정 조건에 맞춰 증착된 박막에 Pt을 2 nm (30 sec)로 코팅하구 측정하였다. 표 4-2는 공정 조건 변화에 따라 증착된 시료의 두께를 측정한 결과이다. 그림 4-10은 측정한 FE-SEM 이미지이다. 이를 통해 박막 소자 측정에 있어 주사전 자현미경의 정밀도와 활용성을 확인 할 수 있었으나, 분석함에 있어 측정자의 측정 능력에 영향이 있고, 측정까지 시간이 오래 걸리며 진공 측정에 의한 ex situ 방식의 측정으로 측정 시료의 손상이 가는 단점이 있었다.

표 4-2. 스퍼터링 증착 조건에 따른 ITO 박막 두께 측정 결과

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6	Sample 7	Sample 8	Sample 9
Ar gas (sccm)	100	100	100	95	90	90	90	90	90
O ₂ gas (sccm)	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pressure (mtorr)	3	3	3	3	3	3	2.5	2	2.5
RF. Power (W)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Temperature (°C)	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Process Time (sec)	1400	1400	1400	1400	1400	1230	1230	1230	1350
Thickness (nm)	112	134	152	165	174	153	142	131	155

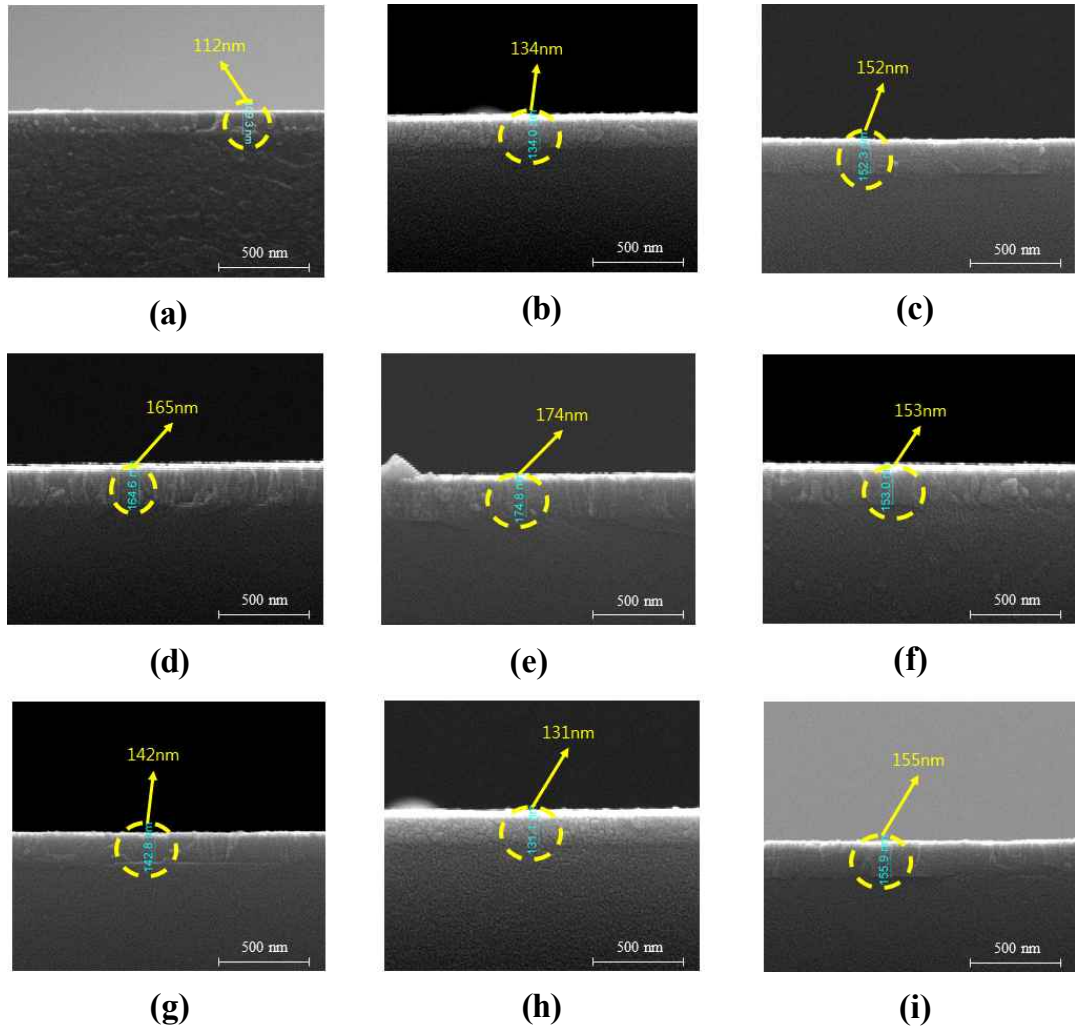


그림 4-10. 스퍼터링 증착 조건에 따라 증착된 ITO 박막을 FE-SEM으로 $\times 100,000$ 에서 측정된 단면 영상 및 두께 측정 결과. (a) sample1, 112 nm, (b) sample2, 134 nm, (c) sample3, 152 nm, (d) sample4, 165 nm, (e) sample5, 174 nm, (f) sample6, 153 nm, (g) sample7, 142 nm (h) sample8, 131 nm (i) sample9, 155 nm

제 2 절 광학적 위상이동 디지털 홀로그래피

1. 위상 이동 디지털 홀로그래피 시스템

가. 디지털 홀로그래피 시스템

벌크 광학계 기반 디지털 홀로그래피 시스템은 위상이동 디지털 홀로그래피에서 널리 사용되는 시스템이다. 그림 4-11에서 보이는 바와 같이 주로 마하젠더 간섭계와 마이켈슨 간섭계를 기반으로 구성되며, 이때 기준단의 광이 반사되는 거울에 PZT를 부착하여 기계적인 움직임을 통해서 위상이동을 조절하여 간섭신호를 획득하여 샘플의 형상 정보를 획득하였다.

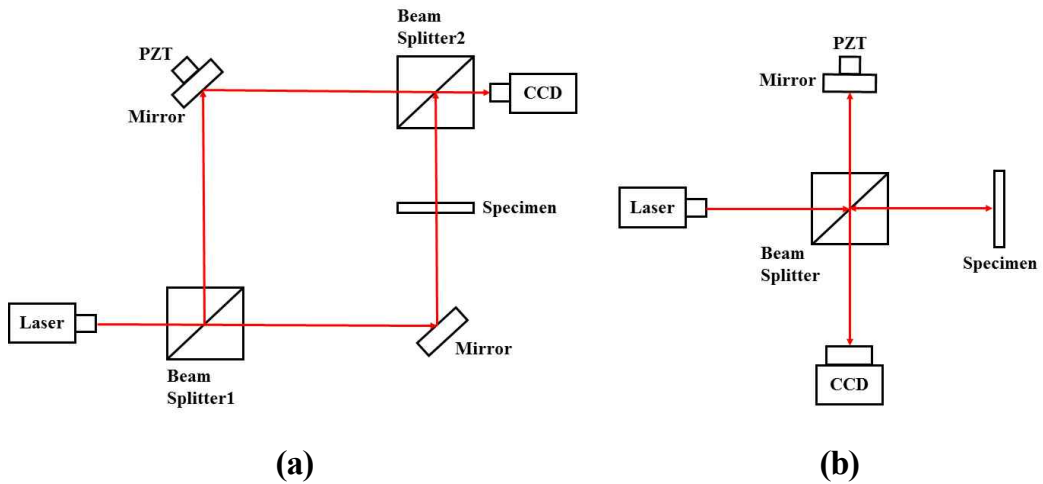


그림 4-11. 위상이동 간섭계의 개략도. (a) 마하젠더 간섭계, (b) 마이켈슨 간섭계

홀로그래피 시스템은 샘플을 관찰하는 방법에 따라서 투과형과 반사형으로 구분할 수 있다. 투과형의 경우 마하젠더 간섭계로 시스템이 구성된다. 주로 광투과도가 높은 시료를 측정하는데 사용된다. 그림 4-11(a)와 같이 입사된 광을 광분할기1을 이용하여 광을 분할시키고 각각 분할된 광들은 45°로 기울어진 거울에서 반사되어 진행 경로를 바꾼 후 다시 광분할기2를 통해 분할된 두 광이 만나게 되고 이때 발생한 광경로차에 따른 위상차에 의해서 주어지는 간섭무늬를 획득한다. 여기서 마하젠더 간섭계의 거울 중에 하나에 압전소자를 붙여 기계적으로 유도된 위상이동에 따라서 여러 개의 간섭무늬를 획득한다.

본 실험에서 사용한 시스템의 개략도는 그림 4-12와 같다. 레이저로부터 나온 광이 편광필터를 통과한 뒤 핀홀과 대물렌즈로 이루어진 공간필터에서 레이저 광이 렌즈를 통과하며 발생하는 노이즈가 필터링 된 후에 빔의 크기가 확대된다. 이 빔을 평행 렌즈를 이용해 평행광으로 만든 뒤 광분할기1에 의해 두 개의 서로 다른 경로로 나누어 진행하게 한다. 분할된 광 하나는 PZT가 부착된 거울에서 반사되는 참조광이 되고 다른 하나는 투명한 물체를 통과하는 물체광이 된다. 참고광의 경로에는 편광필터를 위치시켜 편광을 조절하는데 사용한다. 이 두 광은 다시 광분할기2를 통해 중첩된다. 이때 발생한 간섭무늬는 영상저장 장치인 CCD 카메라에 입사되어 측정된다. 측정된 데이터를 컴퓨터에서 신호 처리과정을 통해 복원하는 과정을 거쳐 시료의 형상 정보를 얻게 된다. 투과형 디지털 홀로그래피 시스템은 광투과도가 높은 투명한 시료 측정에 적합한 방식이다. 반도체 산업에서 많이 사용되는 TCO 박막 측정이 이 방식으로 가능하므로 제작한 ITO 투명전극 박막의 형상 측정하는데 투과형 방식으로 측정을 수행하였다.

마이켈슨 간섭계는 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 구성하는데 사용된다. 주로 반사도가 높은 재질의 시료를 측정하는데 이용된다. 그림 4-11(b)에서와 같이 마이켈슨 간섭계는 광원에서 조사된 광을 광분할기를 이용하여 분할시킨 후 각각의 광은 같은 거리만큼 떨어진 PZT가 연결된 거울과 측정 시료에서 반사되어 다시 광분할기를 통해

중첩되어 간섭이 이뤄지도록 광정렬을 한다. 거울에 붙어있는 PZT를 통해 위상 이동을 제어하고 이때 발생하는 간섭무늬를 CCD 카메라를 통해 측정한다.

반사형 디지털 홀로그래피 시스템의 개략도는 그림 4-13과 같다. 투과형의 경우와 유사하지만 차이점은 빔의 분할과 결합이 하나의 광분할기를 통해서 이루어진다는 것이다. 그러므로 시스템이 투과형보다는 간소한 장점을 가질 수 있다. 반사형 디지털 홀로그래피 시스템은 실리콘 웨이퍼 기반 반도체 소자 및 금속 박막 측정에 용이하다.

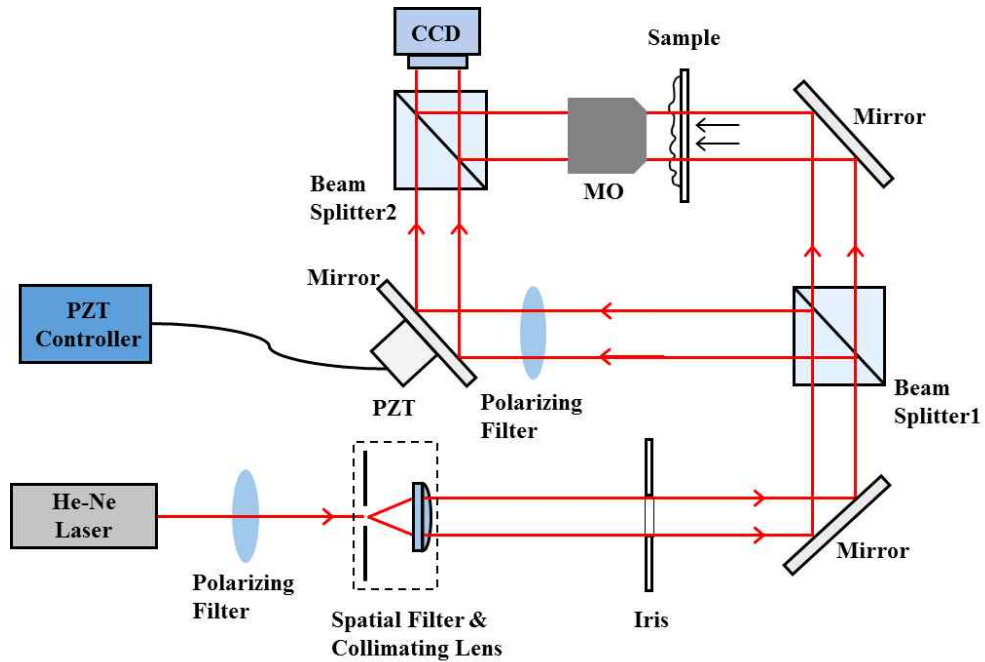


그림 4-12. 벌크 광학계 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도. (MO는 microscope objective lens를 의미함)

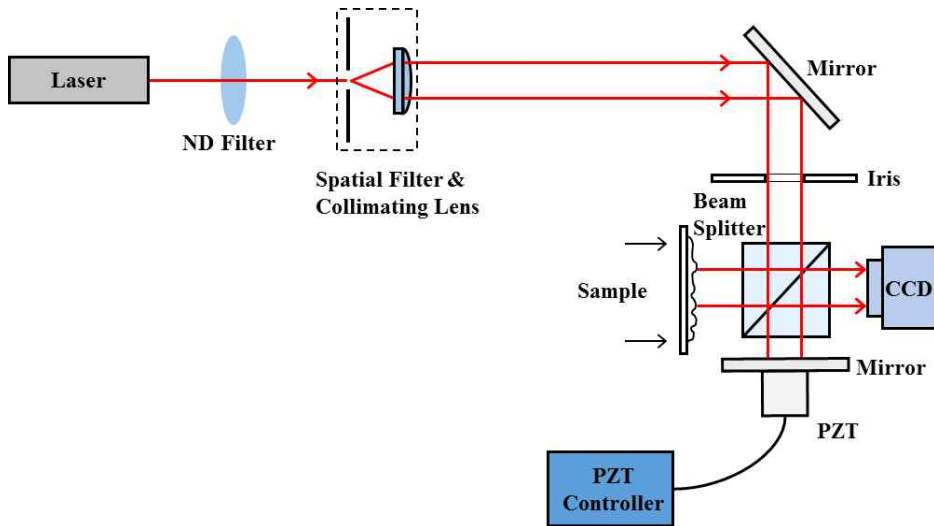


그림 4-13. 벌크 광학계 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도. (ND filter는 neutral density filter를 의미함)

나. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템

벌크 광학계 기반 디지털 홀로그래피는 여러 벌크 광학 부품들이 배치되어 있어 외부 진동에 민감하고 광 정렬이 쉽게 틀어지는 문제점을 가진다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방안으로 광섬유 소자를 이용하여 간섭계를 구성하여 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템을 구현하였다. 개발된 시스템은 광섬유를 이용하기 때문에 벌크 광학계 기반 시스템에 비해 1/3 정도의 공간만으로도 시스템 구성이 가능하였고, 진동에 의해 광 정렬이 틀어지는 문제점도 보완할 수 있었다. 또한 광학 부품 배치의 자유도가 높아 보다 간소화된 시스템을 구성할 수 있는 장점을 가질 수 있었다. 광섬유 기반으로 간섭계를 구현하는 경우 광섬유 내부에서 진행되는 광에 대해서 위상 이동을 유도할 수 있는 방법이 적절하지 않기 때문에 디지털 홀로그래피를 위한 위상 이동에 따른 간섭무늬를 획득할 수 없어 유용하지 않다. 그러므로 이러한 문제점을 극복하기 위해서 광섬유 내부에서 위상 이동을 제어할 수 있는 방법을 제안하고 이 방법을 이용하여 위상 이동된 간섭무늬를 획득하고자 하였다.

본 연구에서는 광섬유 기반 간섭계 시스템을 구성하고 기존 PZT에 의한 기계적인 방법이 아닌 Yb가 도핑된 광섬유의 굴절률 변화를 통한 위상 이동을 유도하기 위한 방법을 활용하였다 [98]. Yb가 도핑된 광섬유는 980 nm 파장을 갖는 펄스광을 인가시키면 인가된 광세기에 따라서 굴절률이 변화하는 특성을 갖는다 [99]. 굴절률의 변화로 인해 Yb가 도핑된 광섬유를 통과하는 광은 광경로가 변화되어 물리적인 길이 변화가 없이도 위상 이동이 발생할 수 있다. 이러한 이유로 간섭계에서는 위상변화가 발생하고 간섭무늬가 이동하는 효과를 얻을 수 있다 [100]. 펄스광의 광세기를 조절하여 유도되는 위상 이동이 2π 가 되는 조건을 찾도록 한다. 본 연구에서는 위상의 안정성을 향상시키기 위해서 8개의 간섭무늬를 이용하는 방법을 이용하였다 [101]. 그러기 위해서 펄스광 광세기와 위상 이동량이 선형적인 관계라고 가정하여 8장의 위상 이동된 간섭무늬를 얻기 위해서 위상 이동이 발생하는 펄스광 인가 전류값에서부터 한 주기 이동

이 되는 전류값을 균일하게 나누어 8번의 위상 이동이 발생하도록 하였다. 이 방법은 원하는 위상 이동을 조절하기 위해서 펄핑광의 광세기를 외부적으로 제어함으로써 위상 제어 자유도 부여가 가능하고, 광섬유 기반 위상 이동이 가능하게 되어 미세 위상 특성 제어의 광학적 제어가 가능하다.

광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템을 구현하기 위해서 마하젠더 간섭계를 기반으로 디지털 홀로그래피 시스템을 제작하였다. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템은 투과형과 반사형 모두 마하젠더 간섭계를 기반으로 구현하였다. 그림 4-15는 투과형으로 개발된 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템의 개략도이고 그림 4-16는 실제 구현된 시스템 사진이다. 레이저는 632.8 nm 중심파장을 갖고 최대 출력 17 mW인 He-Ne 레이저이다. 이 레이저 광원에서 출력된 광은 1×2 광섬유 커플러(파장: 632 nm, 분할: 90:10, TN632R2F2, THORLABS)를 통해 두 개의 경로로 나누어진다. 그 중 하나의 광은 2×1 WDM(wavelength division multiplexing) 커플러로 향하고 나머지 하나는 샘플단으로 향하게 된다. WDM 커플러의 한쪽 입력단은 펄핑광과 연결되어 Yb가 도핑된 광섬유(코어 크기: 10 μm, YB1200-10/125DC, THORLABS)로 향하게 된다. 펄핑광은 980 nm 중심파장을 가지고 있으며 300 mA의 인가전류에서 350 mW의 광출력을 가지는 레이저 다이오드이다.

다른 입력단을 통해서 입력된 레이저 광은 동일한 Yb가 도핑된 광섬유를 통과하면서 펄핑광 세기에 의존하여 변화된 굴절률에 따른 변화된 광경로를 따라서 진행하게 된다. Yb가 도핑된 광섬유는 광섬유 콜리메이터를 통해 평행광으로 진행하게 되고 참조광이 역할을 하게 된다. 다른 하나의 광은 단일 모드 광섬유를 통과하여 광섬유 콜리메이터에서 평행광으로 나와 시료를 통과하게 되는 물체광이 된다. 두 광은 벌크 광학계인 광분활기를 통해 다시 합쳐져 간섭무늬를 생성하게 된다. 이때 광분활기에 입사하는 물체광이 샘플을 투과하는지 표면에서 반사하는지에 따라서 시스템을 그림 4-15와 같은 투과형 또는 그림 4-17과 같은 반사형으로 구분할 수 있다. 그림 4-18은 광섬유 기반으로 개발된 반사형 디지털 홀로그래피 시스템 모습이다. 간섭무늬는 USB

타입 CCD 카메라(픽셀수: 1296×966, 픽셀 크기: 3.75 μm×3.75 μm, 속도: 120 kHz, acA1300-30um, Basler)를 사용하였다.

광학적 방법으로 위상 이동된 간섭무늬를 얻기 위해 Yb가 도핑된 광섬유에 펌프광을 인가하였다. 먼저 펌프광의 전류값을 10 mA씩 증가시키며 위상 변화를 확인하였다. 전류값이 40 mA까지는 위상 변화가 없었으나 50 mA부터 위상이 이동하는 것을 확인할 수 있었고, 전류값을 10 mA씩 계속 증가하여 120 mA에서 위상이 2π 이동하는 것을 확인하였다.

구성된 디지털 홀로그래피 시스템으로 위상 이동된 간섭무늬를 8장 획득하여 복소 진폭 분석 방법을 통해 위상 정보를 획득하고 각 스펙트럼 기법으로 복원 이미지를 획득하였다. 그림 4-14는 신호처리 과정을 보여 준다.

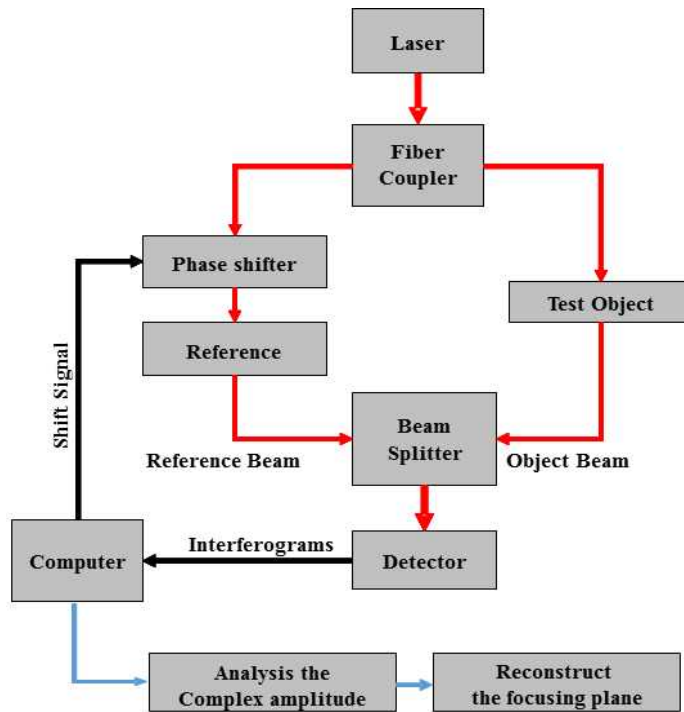


그림 4-14. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템 신호 처리 과정 순서도

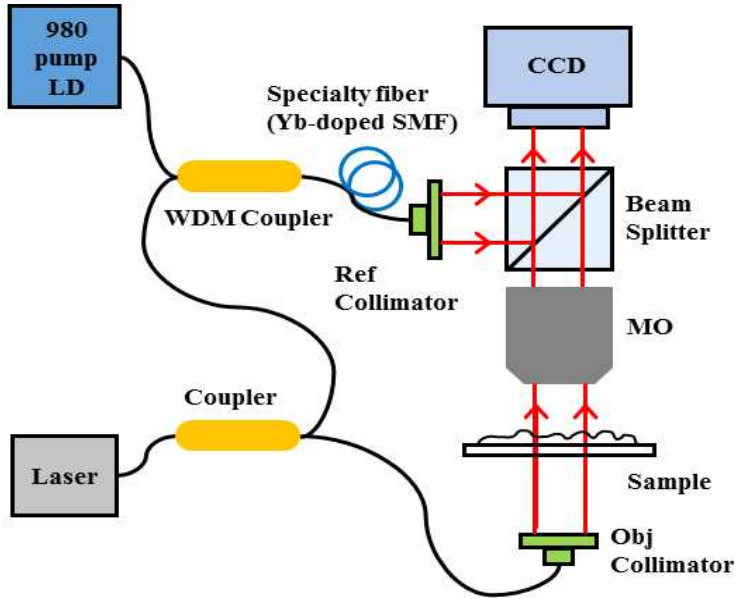


그림 4-15. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도

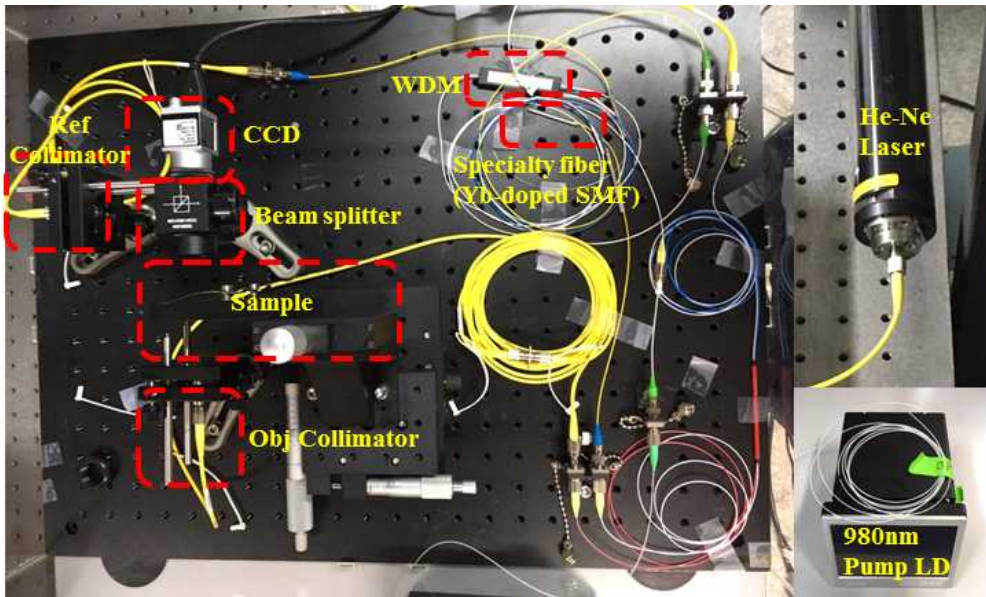


그림 4-16. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템의 구현된 모습

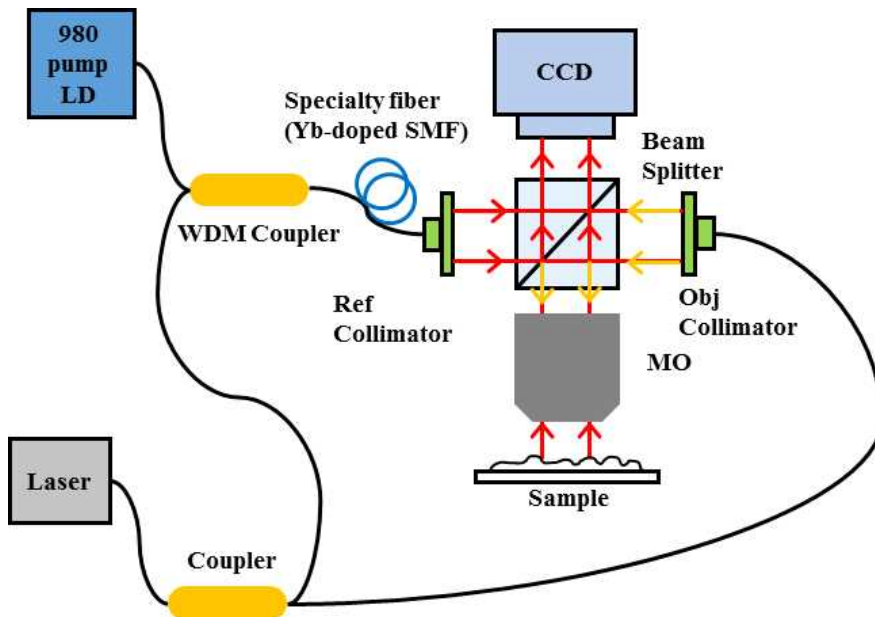


그림 4-17. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템 개략도

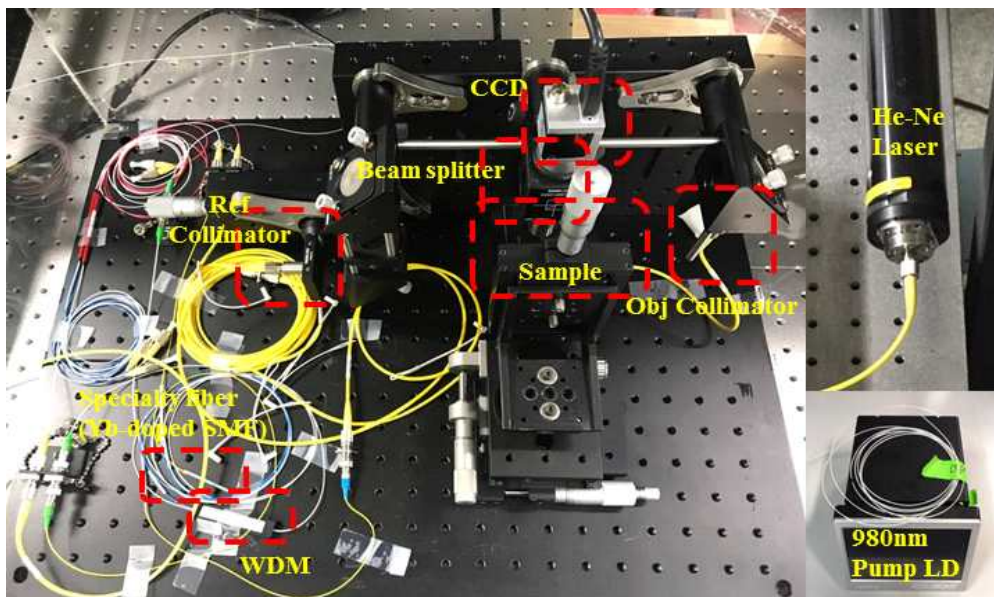


그림 4-18. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템의 구현된 모습

다. 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템 특성

그림 4-19에서 보이는 바와 같이 특수 광섬유에 980 nm 레이저 다이오드를 이용하여 펌핑하였을 때 위상 이동이 발생함을 볼 수 있었다. 광원 광세기를 증가시킴에 따라 $1/4\lambda$ 씩 위상이 변화시켜 4개의 위상 정보를 획득하고, 이를 통해 위상 이미지를 얻을 수 있었다. 펌프광 전류값을 40 mA에서부터 120 mA일 때 위상이 2π 이동하므로 20 mA씩 증가 시켜 4개의 위상 이미지를 획득 하였다. 40 mA에서 첫 번째 간섭무늬를 획득하고, 전류값을 60 mA로 20 mA를 증가 시키면 위상이 $1/2\pi$ 이동하여 두 번째 간섭무늬를 획득하였다. 전류값이 80 mA로 증가 시켰을 때 위상이 처음 위치에서 π 만큼 이동되어 세 번째 간섭무늬를 획득하고, 마지막으로 전류값을 100 mA로 증가 시켜 네 번째 간섭무늬를 획득하였다. 그림 4-19은 4-step 위상 제어를 통한 위상 이동결과를 보여 준다.

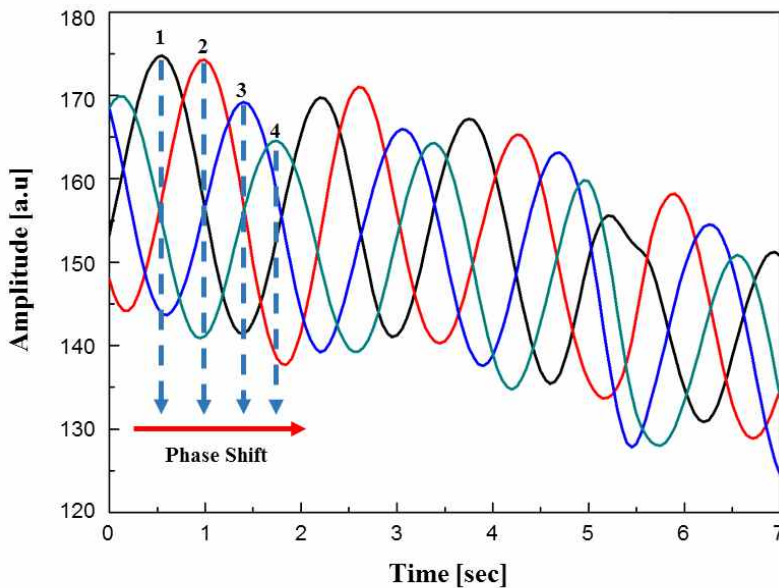


그림 4-19. Yb 도핑된 광섬유에 의한 4-step 위상 제어를 통한 간섭신호의 이동

실험에서는 4-step 보다 위상 안정성 및 위상 복원에서의 오차가 작은 8-step을 이용하여 실험을 수행하였다. 8-step에 대한 위상 이동 결과는 그림 4-20와 같다. 4-step과 같이 펌프광의 전류값이 40 mA에서 첫 번째 간섭무늬를 획득하였다. 이후 전류값을 10 mA씩 증가시키면 위상이 $1/8\pi$ 씩 이동하게 되고 전류값이 110 mA일 때 여덟 번째 간섭무늬를 획득하였다.

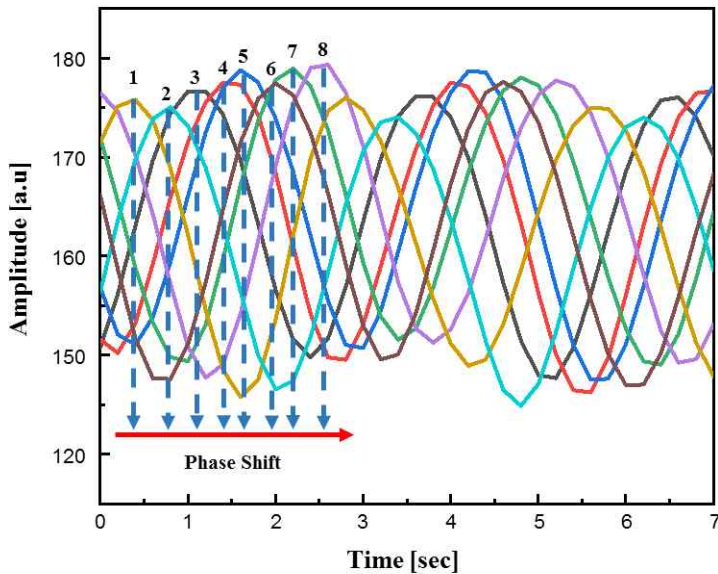


그림 4-20. Yb 도핑된 광섬유에 의한 8-step 위상 제어를 통한 간섭신호의 이동

간섭계는 진동에 매우 민감한 특징을 보인다. 특히 광섬유 기반 시스템은 외부 진동뿐만 아니라 실험을 수행하는 주변 공기에 흐름에 의해서도 간섭무늬가 이동한다. 그러므로 이러한 요소를 차단하고자 시스템을 케이지에 넣어서 외부 환경요소와의 상호작용이 없도록 차단하여 위상의 변화를 최소화하고자 하였다. 하지만 그럼에도 불구하고 미세하게 변화하는 위상까지 제어하기 어려움이 있었다. 이 문제를 해결하기 위해서 광펌핑을 통한 위상 제어를 통해 간섭무늬의 안정성을 확보하고자 하였다. Yb 광

섬유에 펄핑광을 인가하여 능동적으로 피드백을 함으로써 위상 이동을 뿐만 아니라 위상 잠금이 가능한 특성을 확인할 수 있었다. 동일한 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 펄핑광에 인가되는 전류값을 조절하면서 간섭무늬 피크 위치가 이동하는 특성을 확인해보았다. 위상이 변화하는 정도에 따라 펄핑광의 인가 전류값은 달라지는데 본 연구에서는 50 mA 이상의 전류값에 해당되는 펄핑광을 인가할 때부터 조금씩 위상 잠금이 되는 것을 확인할 수 있었다. 80 mA 전류를 인가하였을 때 순간적으로 위상 잠금이 가능하였다. 그림 4-21과 같이 펄핑광을 반복적으로 On/Off 했을 때 위상이 변화하는 모습을 나타내고 있다. 긴 시간 위상 잠금을 수행하지는 않았지만 위상 제어를 능동적으로 수행할 수 있는 장점을 가지고 있어 이러한 결과를 확보할 수 있었다. 이러한 위상을 안정적으로 제어할 수 있기 때문에 벌크 광학계보다 안정적인 위상 이동 간섭계의 구현이 가능하였고 이를 통한 광섬유 기반 디지털 홀로그래피의 개발이 가능할 수 있었다.

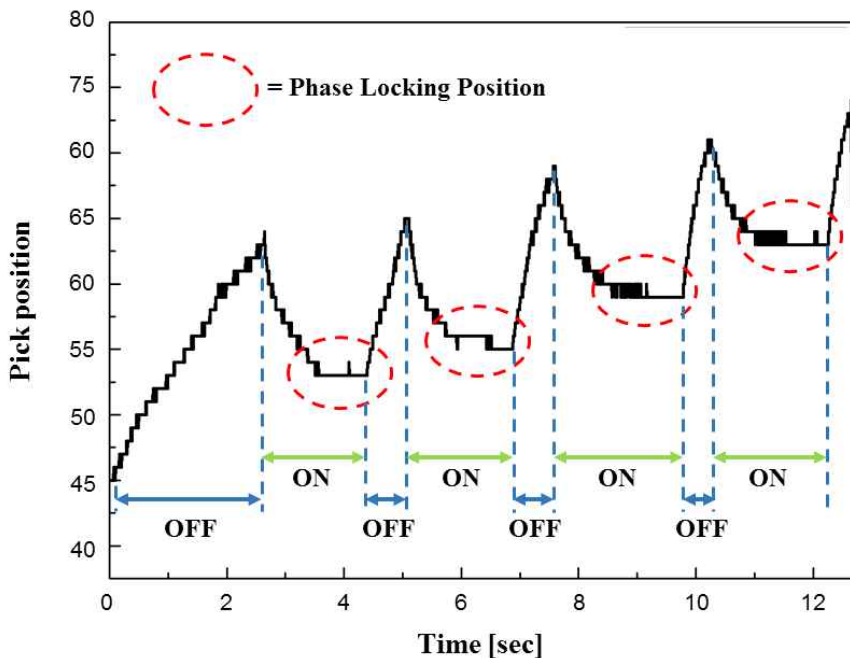


그림 4-21. 980 nm 레이저 다이오드 광펌핑을 통한 위상 잠금

2. 형상 측정 결과 및 분석

가. 표준 시편 측정 결과 및 분석

개발된 비선형 굴절을 변화 기반의 광섬유 디지털 홀로그래피 시스템의 성능을 확인하고자 표준 분해능 타겟을 대상으로 선폭을 측정하였다. 사용한 표준 분해능 타겟 (USAF 1951 target, EDMUND OPTICS)은 Positive형으로 투과형 디지털 홀로그래피 시스템과 반사형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정하였다. 분해능 타겟은 전체 표준 패턴을 9개의 그룹으로 구성하고 각 그룹은 6개의 요소로 구성되어 54개의 패턴으로 구성되어있다. 표 4-3은 표준 분해능 타겟의 그룹별 표준 패턴의 선폭 값을 보여준다. group number는 분해능 타겟이 갖고 있는 그룹을 나타내고 element는 각 그룹이 갖고 있는 요소를 나타낸다. 표에 기록된 수치는 해상도를 환산하여 계산되어 진다. 해상도 환산 식은 $R = 2^{GN+(EN-1)/6}$ 이다. 여기서 R 은 해상도, GN 은 group number, EN 은 element 이다. 이때 표준 패턴의 선폭은 $0.5/R$ 이고 각 그룹별 요소들의 해상도 값을 대입하여 표 4-3의 결과값을 도출하였다.

표 4-3. 표준 분해능 타겟의 표준패턴 선폭값 (단위 : μm)

Group Number												
Element	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2000.00	1000.00	500.00	250.00	125.00	62.50	31.25	15.63	7.81	3.91	1.95	0.98
2	1781.80	890.90	445.45	222.72	111.36	55.68	27.84	13.92	6.96	3.48	1.74	0.87
3	1587.40	793.70	396.85	198.43	99.21	49.61	24.80	12.40	6.20	3.10	1.55	0.78
4	1414.21	707.11	353.55	176.78	88.39	44.19	22.10	11.05	5.52	2.76	1.38	0.69
5	1259.92	629.96	314.98	157.49	78.75	39.37	19.69	9.84	4.92	2.46	1.23	0.62
6	1122.46	561.23	280.62	140.31	70.15	35.08	17.54	8.77	4.38	2.19	1.10	0.55

디지털 홀로그래피 시스템에서는 Group number 3번의 Element 4를 측정하여 개발된 시스템이 구분할 수 있는 측정 분해능을 확인하고자 하였다. 그림 4-22(a)는 간섭무늬가 포함되어 있는 현미경 영상으로 이 영상을 획득하여 신호처리를 수행한다. 가운데 원형의 뉴튼링이 보이는 것은 사용한 렌즈에 의한 효과이다. 8개의 서로 다른 위상을 가지는 간섭무늬로부터 재구현한 결과 중에서 그림 4-22(b)는 위상 영상을 얻을 수 있다. 그림 4-22(c)는 위상 영상으로부터 3차원 영상으로 복원된 결과이다. 그림에서 보이는 특정 프로파일 데이터를 선택해서 선폭을 알아본 결과 $41\ \mu\text{m}$ 의 선폭으로 계산되었다. Group number 3번의 Element 4는 약 $44.19\ \mu\text{m}$ 값을 갖고 있어 실험에서 측정값의 오차율이 7.2%로 매우 정확하게 측정되었음을 확인할 수 있었다. 프로파일 그래프에서 보이는 잡음요소는 물체광과 참조광의 광세기에 의한 잡음과 프로파일 데이터 획득 과정에서 발생하는 피팅 문제 때문으로 예상되며 이 문제를 해결하기 위해서는 평균을 취하는 방법 또는 중성 농도(neutral density, ND) 필터를 사용하여 물체광과 참조광의 광세기를 조절 하는 방법을 이용함으로써 개선될 것이라고 생각된다. 선폭을 계산함에 있어서 잡음요소가 남아있어 정확하게 측정하기 어려움이 있었다. 여기서는 선폭을 측정하는 기준으로 가장 인접한 최소값의 거리차를 계산하였다. 측정 결과로는 가공된 샘플의 선폭을 측정함에 있어서 작은 오차를 보이며 정확하게 측정함을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 제안한 광섬유 위상 이동 간섭계가 유용함을 확인할 수 있었다. 이 방법의 유용성을 확인하였으므로 원래의 목적인 ITO 박막의 형상 측정을 수행하였다.

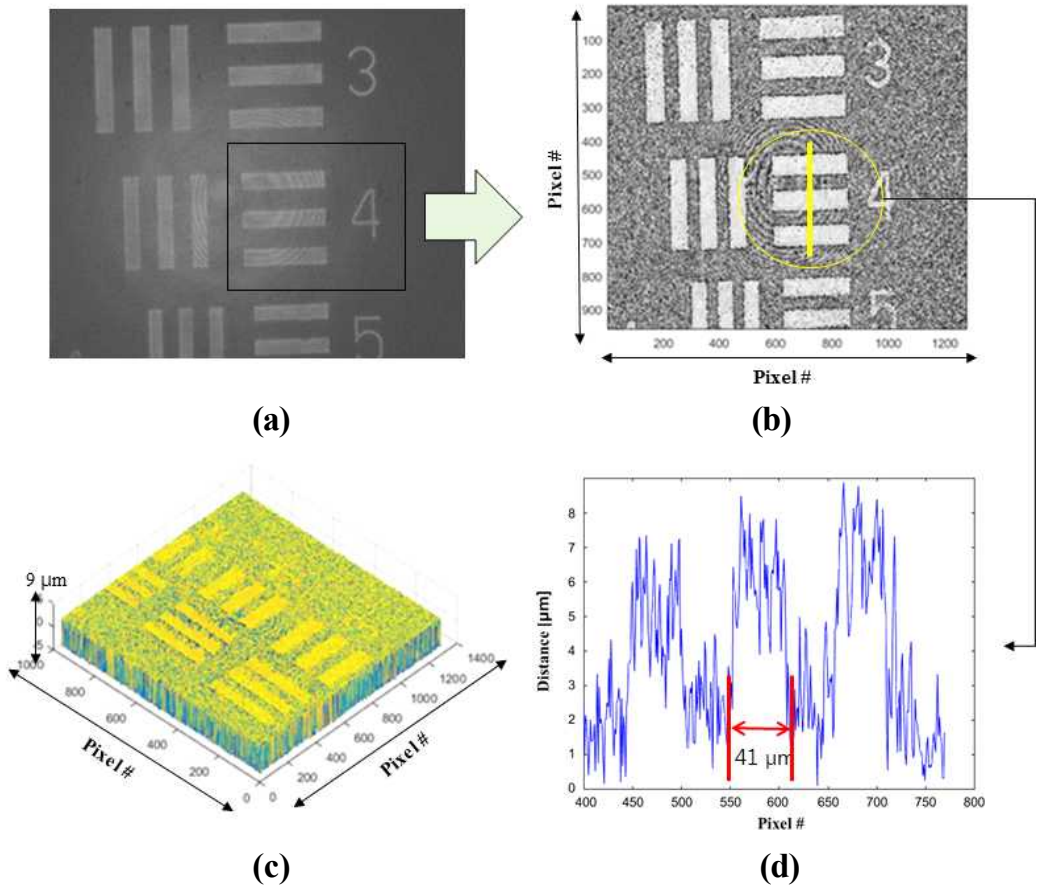


그림 4-22. 광성유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 표준 분해능 타겟의 측정 결과. (a) 측정된 간섭무늬 영상, (b) 위상 이미지, (c) 3차원 형상으로 복원된 결과, (d) 표준 패턴 프로파일의 분석 결과

나. ITO 박막 측정 결과 및 분석

구현한 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용해 직접 제작된 ITO 박막의 단차 및 형상을 측정하였다. 벌크 광학계 기반 디지털 홀로그래피 시스템으로 ITO 박막의 단차를 측정한 결과는 다음과 같다. 그림 4-23(a)는 제작된 ITO 박막에서의 측정 위치를 보여주고 있다. ITO 박막과 유리 기판의 경계면을 측정한 것으로 그림 2-23(b)는 측정된 위상 정보로부터 복원한 이미지이다. 복원된 결과로부터 경계면에서의 단차를 그림 4-23(c)와 같이 프로파일 정보를 통해 계산해 보았다. ITO 박막과 유리 기판의 단차는 프로파일 정보로부터 158.5 nm의 차이를 가지는 것으로 계산이 되었다. 프로파일에 단차는 유리 기판과 ITO 박막 경계면에서 피크가 급격하게 상승하였고 이때, 경계면의 낮은 피크와 높은 피크에서 단차가 시작된다는 가정하여 계산을 수행하였다.

개발한 광섬유기반 디지털 홀로그래피 시스템으로 ITO 박막의 단차를 측정한 결과는 다음과 같다. 그림 4-24(b)는 측정된 위상 정보로부터 복원된 이미지이다. ITO 박막이 증착된 곳과 그렇지 않은 유리 기판의 경계면을 측정한 것으로 복원된 결과에서도 서로 다른 톤을 가지는 두 영역으로만 구분되어 보였다. 이 두 다른 영역의 경계면에서의 단차를 복원된 결과로부터 계산해 보았다. ITO 박막과 유리 기판의 단차는 그림 4-24(c)에서 보는 바와 같이 프로파일 정보로부터 159.6 nm의 차이를 가지는 것으로 계산되었다. 단차를 계산하기 위해서 기울어진 경사면을 직선으로 근사하여 피팅하고 그 결과 단차가 발생하는 좌우의 경계면과 만나는 지점을 단차가 시작하고 마치는 부분으로 가정하여 계산을 수행하였다. 디지털 홀로그래피를 이용해서 복원한 결과는 그림 4-25에서 보이는 것과 같이 증착된 박막의 손상 부위를 3차원에서 확인할 수 있었다. 이러한 손상은 박막을 증착하는 공정과정에서 기판세정이 안되거나 챔버오염에 의해 기판에 미세입자가 존재하는 상태에서 증착이 이뤄져 발생할 수도 있고 증착 이후 챔버에서 증착된 기판을 꺼내는 과정이나 이동 과정에서 박막이 손상되어 나타날 수 있는 문제점이다. 이러한 박막의 손상은 기능에서 심각한 저하를 가져올 수 있고 전체

시스템의 기능상 문제점을 야기할 수 있기 때문에 실시간 모니터링을 통해서 관찰되어야 한다. 이러한 점에서 사용한 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템은 충분히 이러한 모니터링에도 사용이 가능할 것임을 확인할 수 있었다.

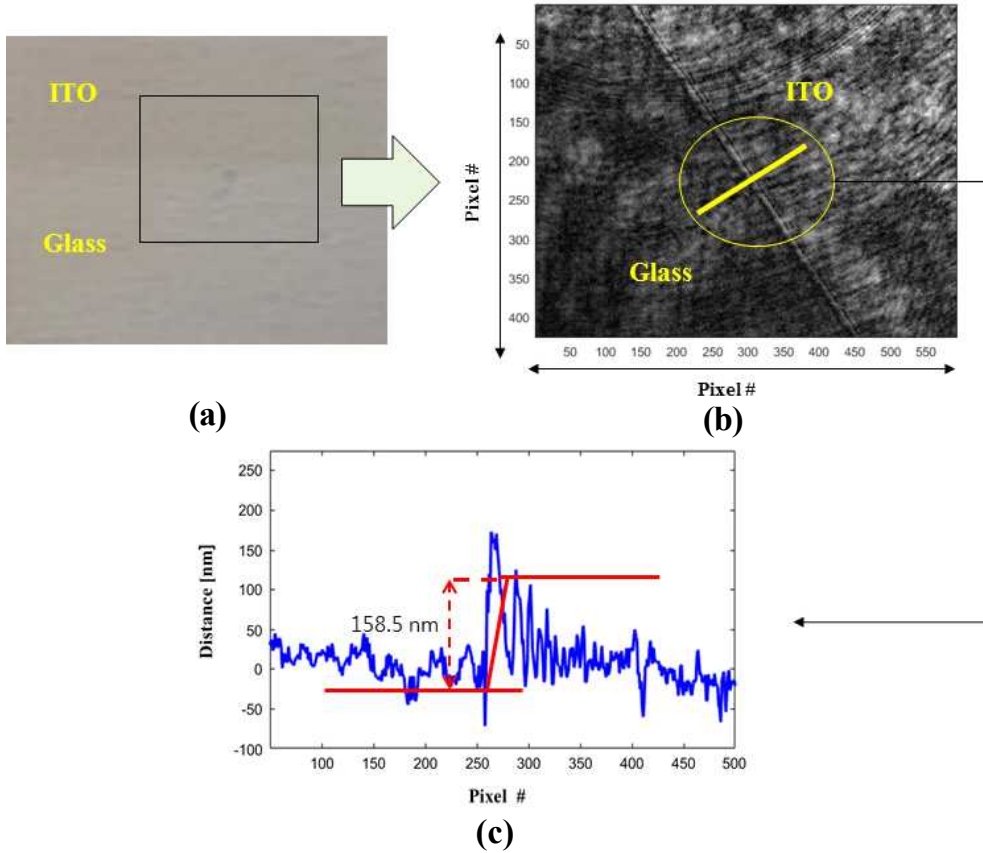


그림 4-23 벌크 광학계 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 ITO 박막 단차 측정 결과. (a) 유리기판 위에 증착된 ITO 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 지도 이미지, (c) 프로파일 측정 결과

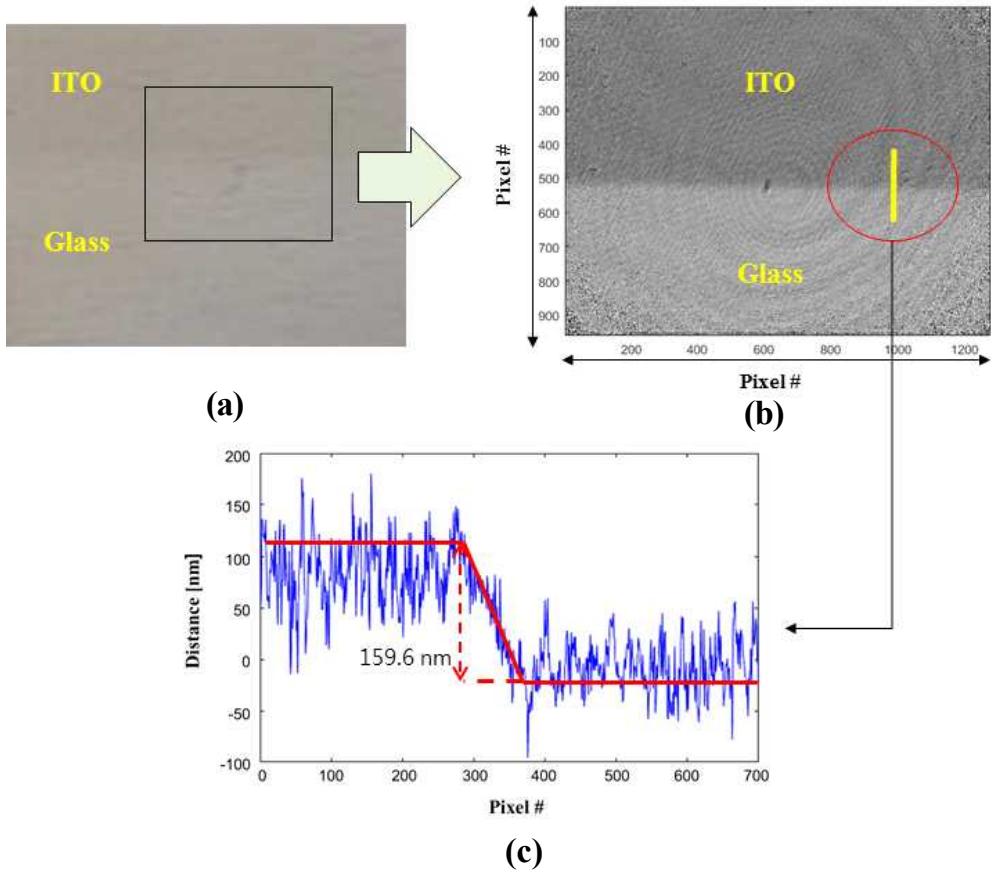


그림 4-24 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 ITO 박막 단차 측정 결과. (a) 유리기판 위에 증착된 ITO 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 지도 이미지, (c) 프로파일 측정 결과

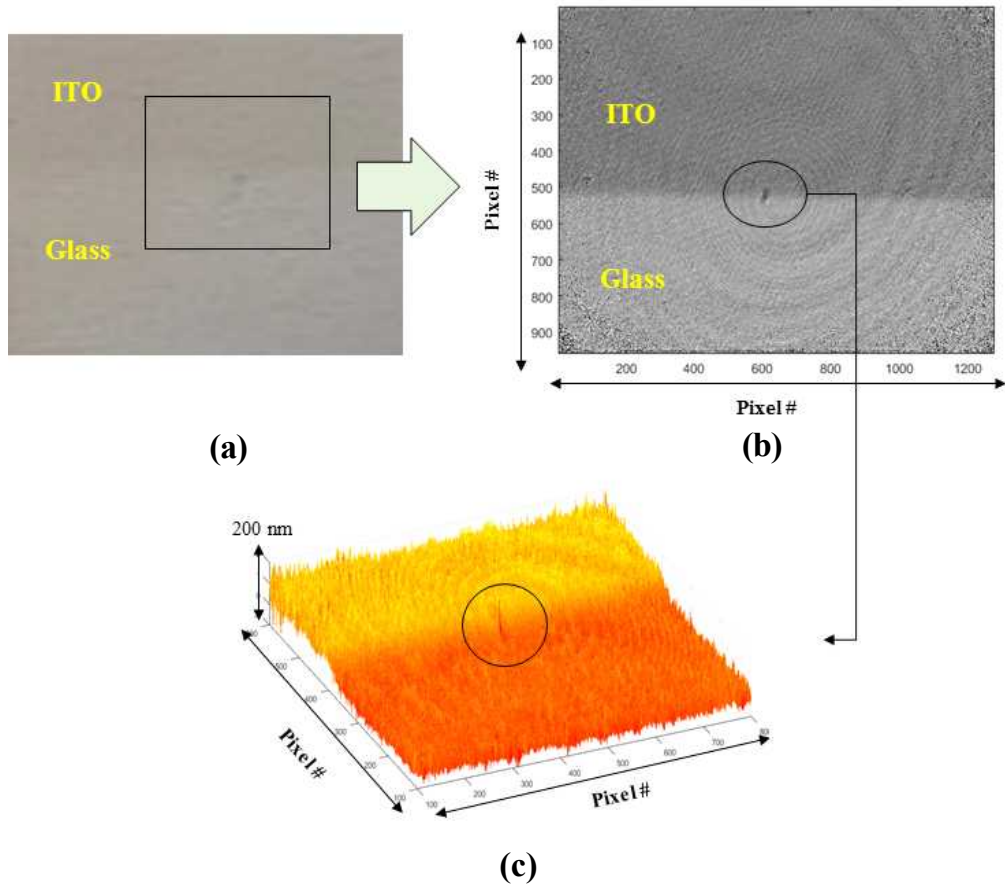


그림 4-25 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 ITO 박막 형상 측정 결과. (a) 유리기판 위에 증착된 ITO 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 이미지, (c) 3차원 형상 이미지

다. 투명전극 소자 측정 결과 및 분석

이번에는 제작된 OLED용 투명전극 소자를 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정을 수행하였다. 포토 리소그래피 공정으로 제작된 투명전극 소자는 모서리 부분의 식각 형태 확인이 중요하다. 식각면이 수직하게 식각이 되어야 공정이 바르게 수행되었다고 판단할 수 있기 때문이다. 지금까지는 SEM을 통해 측정 및 분석이 수행되었지만 본 연구에서 개발된 시스템을 이용함으로써 비파괴적으로 in-situ로 측정이 가능하였다. 그림 4-26는 in-situ 측정된 소자의 형상을 3차원으로 복원한 결과이다. 식각된 경계면을 위에서 보았을 때는 큰 문제점이 발생되지 않았지만 경계면을 면밀하게 관찰할 필요가 있어 3차원으로 복원 후 단차를 계산해 보았다. 식각 후 증착된 박막의 두께 변화를 확인을 위해 그림 4-27와 같이 단면 프로파일을 분석한 결과 단차가 157.8 nm로 계산되었다. 여기서 단차는 수직으로 변하는 경계면에서 주변 영역에서의 높이의 최소값의 차이로부터 계산하였다.

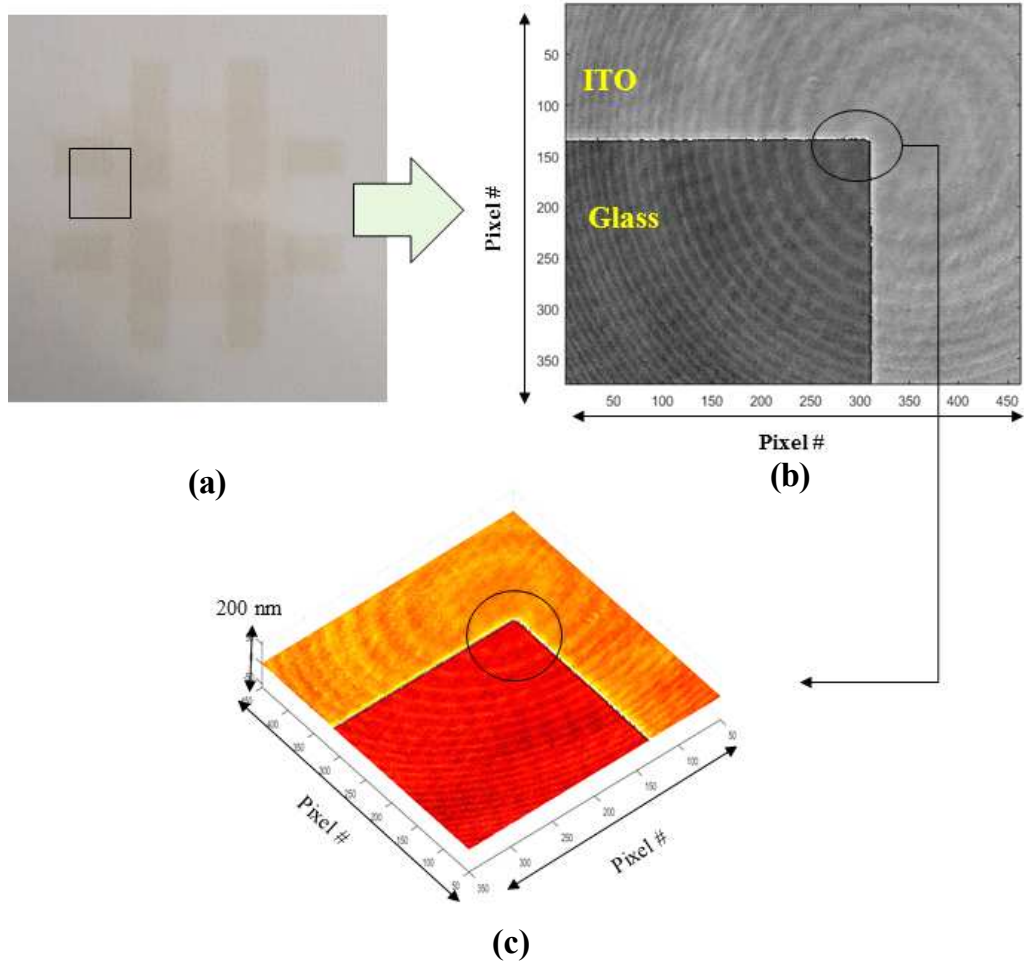


그림 4-26. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 투명전극 형상 측정 결과. (a) OLED용 투명전극 소자 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 3차원 형상 영상

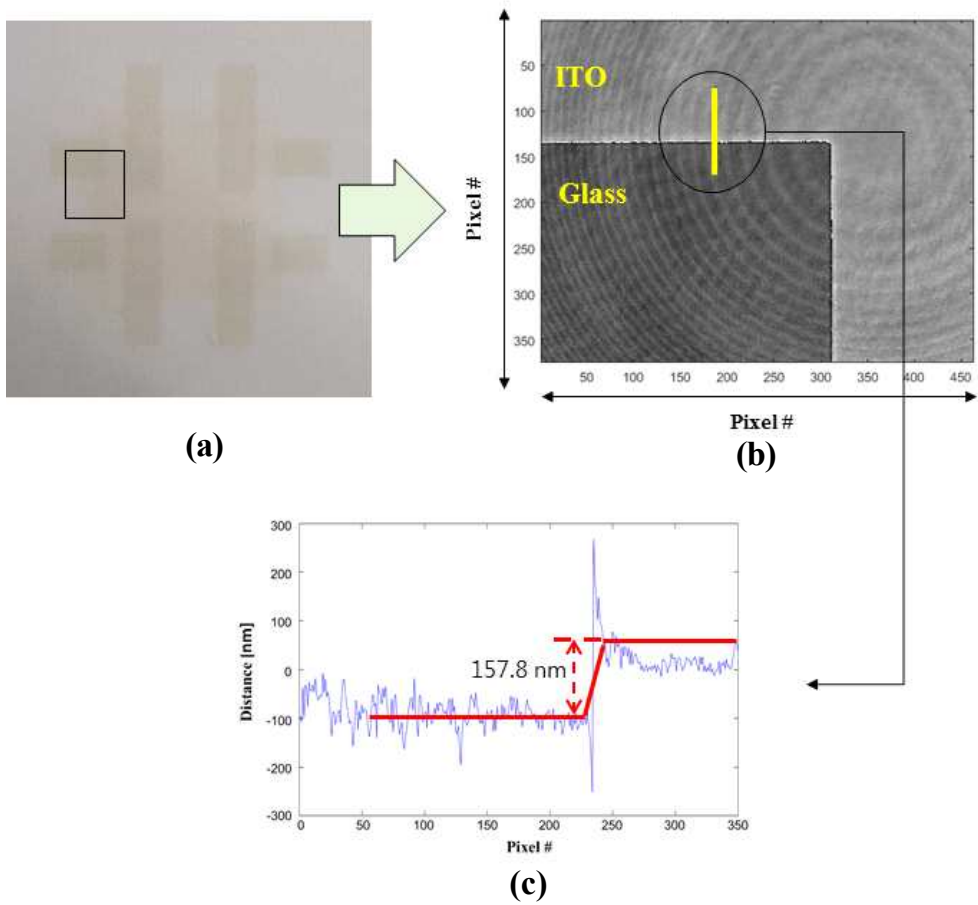
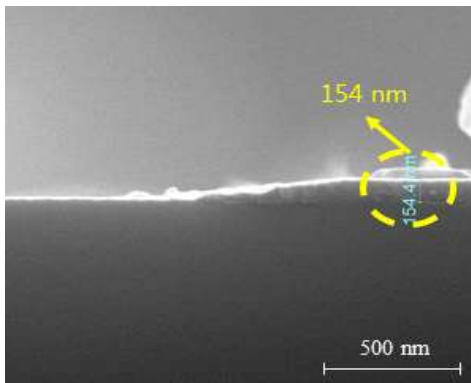


그림 4-27. 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 통한 투명전극 단차 측정 결과. (a) OLED용 투명전극 소자 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 프로파일 측정 결과

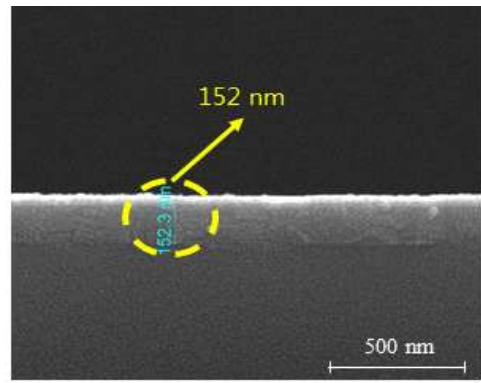
디지털 홀로그래피 시스템으로 측정된 결과를 FE-SEM으로 측정된 결과와 비교하고자 표 4-4에서 측정 결과를 비교하였다. ITO 박막을 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정하였을 때 159.6 nm의 단차를 가지는 것으로 계산되었고, FE-SEM으로 측정한 결과는 154.4 nm의 단차가 측정되었다. 투명전극 소자의 단차 측정 결과는 디지털 홀로그래피 시스템은 157.8 nm, FE-SEM은 152.3 nm로 측정되었으며, 각각의 오차율은 3.3%와 3.6%로 거의 일치하는 결과를 확인할 수 하였다.

표 4-4. 디지털 홀로그래피 시스템과 주사전자현미경 측정 결과 비교

	Digital Holography (nm)	FE-SEM (nm)	Error Rate (%)
ITO Thin Film	159.6	154.4	3.3
ITO Pattern	157.8	152.3	3.6



(a)



(b)

그림 4-28. FE-SEM으로 $\times 100,000$ 로 측정된 단면 측정 영상. (a) ITO 박막 소자 단차 측정 결과, (b) 투명전극 소자의 단차 측정 결과

라. Cr 박막 측정 결과 및 분석

반사형 디지털 홀로그래피 시스템으로 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에 Cr 박막을 $1\ \mu\text{m}$ 두께로 증착한 뒤 이 시료를 대상으로 측정을 수행하였다. 먼저 벌크 광학계 기반 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 실리콘 웨이퍼와 Cr 박막의 경계면을 측정하였다. 그림 4-29(a)는 제작된 Cr 박막에서의 측정 위치를 보여주고 있다. 그림 4-29(b)는 측정된 위상 정보로부터 복원한 이미지이며 복원된 결과로부터 경계면의 단차를 계산하게 되면 그림 4-29(c)와 같이 얻어진다. 계산된 단차는 $1.24\ \mu\text{m}$ 정도로 확인되었고 Cr 박막 제작 조건인 $1.06\ \mu\text{m}$ 와 비교하였을 때 16.8%의 오차율을 보였다.

제작된 Cr 박막을 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용하여 실리콘 웨이퍼와 Cr 박막 경계면을 측정하였다. 스퍼터링 공정 과정에서 박막의 경계면이 매끄럽지 못하게 제작되었음을 확인할 수 있었다. 그림 4-30(b)는 위상 이미지를 통해 복원된 이미지로 경계면에서의 불량인 상태를 보여주고 있다. 그림 4-30(c)는 3차원으로 복원된 이미지로써 불량 부분을 시각적으로 명확하게 확인할 수 있었다. 그림 4-31(b)에서 보이는 직선을 따라서 경계면에서의 박막 단차를 계산해보면 그림 4-31(c)의 프로파일과 같이 얻어진다. 계산된 단차는 $1.2\ \mu\text{m}$ 정도로 확인되었고 시료의 제작 조건인 $1.06\ \mu\text{m}$ 를 고려해볼 때 13.6%의 오차율을 보였다. 이 결과를 통해서 박막 공정에서 적절하지 않은 공정조건하에서 제작된 박막의 품질을 평가하는데 있어서 제안한 광섬유 기반 디지털 홀로그래피 시스템이 in-situ 검사를 수행하는데 유용할 것이라는 것을 다시 한번 확인할 수 있었다. 제안한 시스템은 간소화된 시스템으로 제작되는 박막이 제작되는 진공에서도 전파가 가능한 광을 이용하여 측정을 수행하기 때문에 제작되는 과정에서도 실시간 관측이 가능할 것이며 전처리없이 단차 정보를 높은 정확도로 측정할 수 있기 때문에 공정의 정확성과 안정성을 향상시키는데 있어서 활용도가 높을 것으로 예상된다.

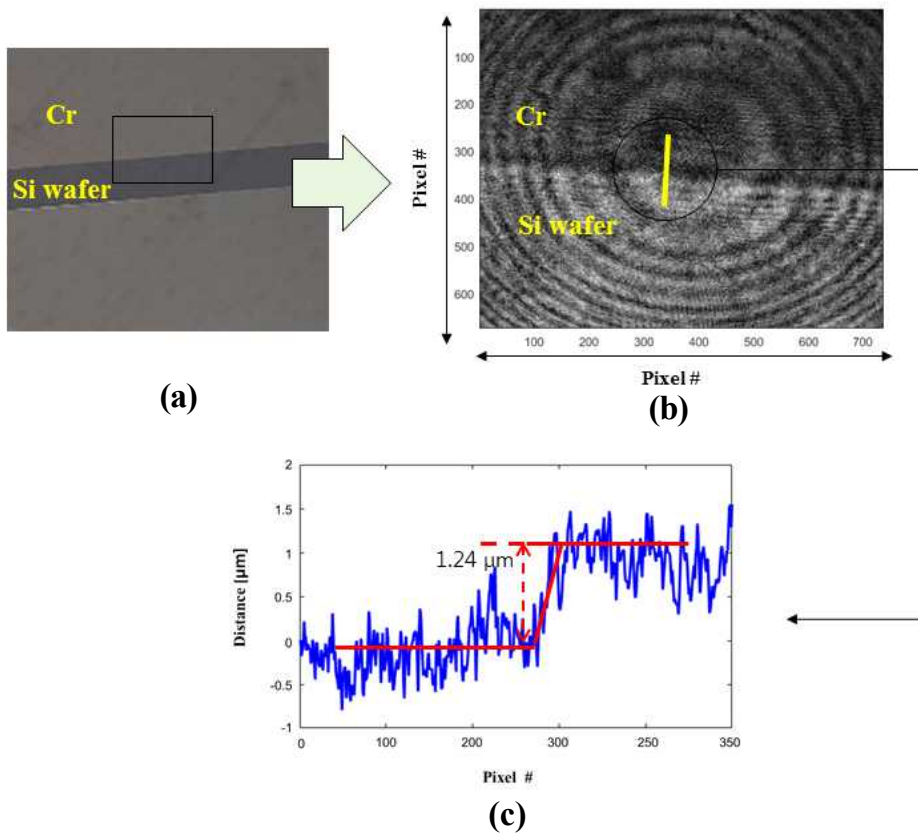


그림 4-29. 벌크 광학계 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템에 의한 Cr 박막 두께 측정 결과. (a) 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 Cr 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 특정 영역에서의 프로파일 측정 결과

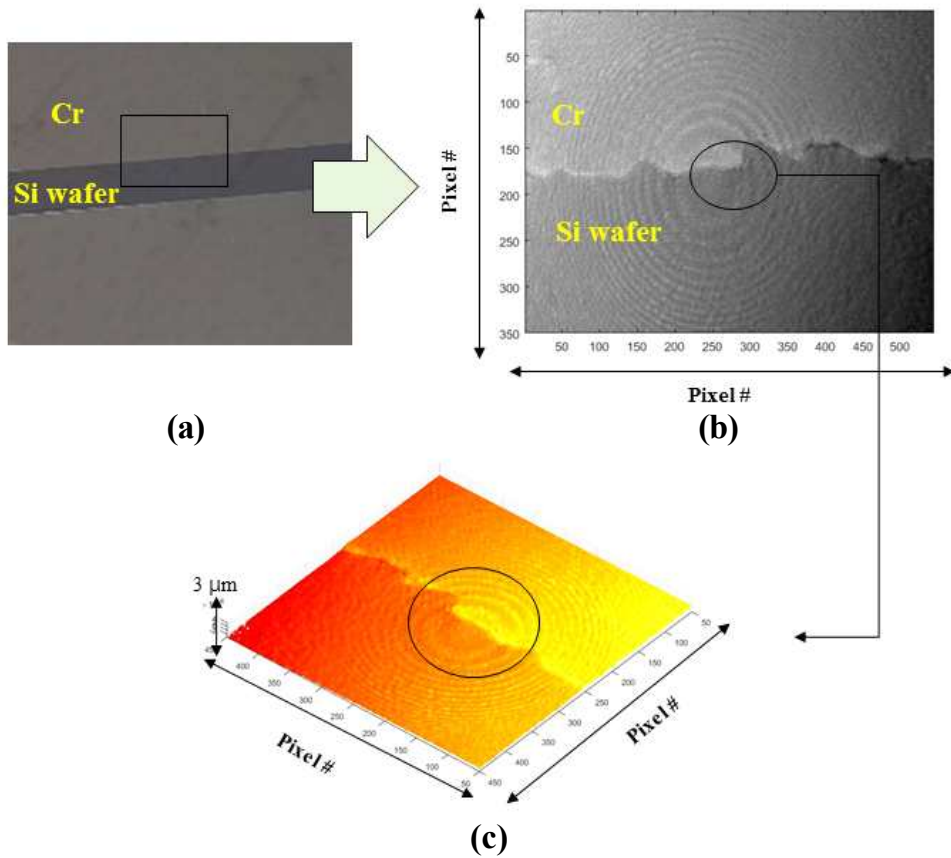


그림 4-30 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 Cr 박막 경계면 측정 결과. (a) 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 Cr 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 3차원 형상 이미지

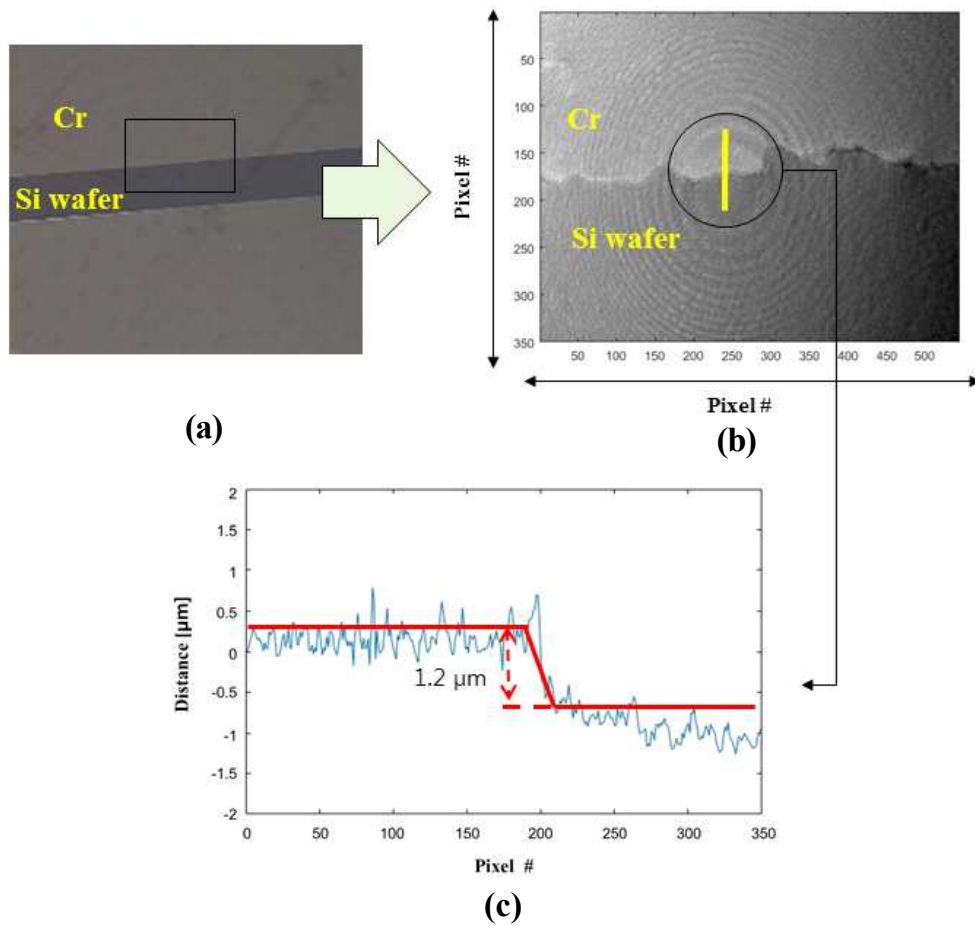


그림 4-31. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템에 의한 Cr 박막 두께 측정 결과. (a) 실리콘 웨이퍼 위에 증착된 Cr 박막 이미지, (b) 디지털 홀로그래피 위상 영상, (c) 특정 영역에서의 프로파일 측정 결과

제 5 장 결 론

본 논문에서는 박막 증착에 대한 기본지식을 전달하였으며, 특히 스퍼터링 기법에 의한 박막 생성의 원리 및 스퍼터링 시스템의 구조에 대한 구체적인 설명을 제시하였다. 또한 투명전극소자 제작을 위한 포토 리소그래피 공정을 단계별로 소개하여 관련 공정에 대한 이해를 향상시켰다. 동시에 제작된 박막 및 투명전극소자의 형상 특성 계측을 위한 SEM에 대한 장단점을 소개하였다. 또한 *in situ* 측정이 가능한 광학계측법 중에 하나인 디지털 홀로그래피 기법에 대해 기본적인 동작원리와 위상 추출에 대한 수학적 접근과정을 소개하였다.

ITO 박막을 제작하기 위해 인라인 방식의 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 기존 스퍼터방식의 문제점을 보완하고 증착률을 향상시킬 수 있었다. 예비실험을 통해서 증착조건의 범위를 한정하였고, 여러 공정조건을 변화시켜가며 ITO 박막을 성장시킨 결과 Ar 가스와 O₂ 가스의 압력을 각각 90, 0.1 sccm으로 조정하고 압력을 2.5 mtorr로 유지하면서 박막을 성장할 때 최적의 조건임을 확인할 수 있었다. 이 때, RF power는 300 W이었고, 증착 온도 250°C에서 1350 sec간 공정을 수행하였다. 이 최적조건에서 제작된 박막은 155 nm의 두께를 가지고 있었으며, 이는 가시광 투과도가 가장 큰 150 nm와 거의 유사한 두께였다. 이 ITO 박막은 낮은 25.3 ohm/sq 면저항과 9.1%의 균일도를 가지고 있었다. 380°C에서 후처리한 뒤 광투과도는 97.1%, 표면 R_a는 1.708 nm, R_{pV}는 15.644 nm로 가장 뛰어난 특성을 보였다. 투명전극을 위한 포토 리소그래피 공정 이후에도 380°C에서 후처리한 뒤 시료의 전기적 특성이 가장 우수하게 측정되었다.

제작된 시료의 형상 특성을 관찰하기 위해서 고분해능으로 영상구현이 가능한 FE-SEM을 이용하여 측정을 수행하였다. FE-SEM은 국내적으로 도입되어 있는 장비의 수가 제한적이며 이를 원활하게 운영하여 측정이 가능한 인원이 한정적이다. 이러한 장비를 직접 운영하여 제작된 박막 두께를 고분해능으로 측정할 수 있는 기술을 습득

하여 박막에 필요한 금속 코팅의 조건을 도출할 수 있었다. 제작된 박막의 경우 Pt로 금속 코팅이 가장 효율적임을 확인하고 시료에 코팅을 수행하였으며, 이후에 FE-SEM을 고진공 환경으로 조성한 뒤 시료 측정을 수행하였다. 각각의 공정조건별로 제작된 ITO 박막의 두께를 측정한 결과 112~174 nm의 두께를 가지고 성막되었으며 최적 조건에서 만들어진 박막의 두께는 155 nm로 앞서 측정한 결과와 동일한 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 측정 방법은 고분해능으로 시료의 두께 정보를 획득할 수 있었지만 샘플을 훼손하여 단면을 측정하는 방법으로 파괴적인 측정 방법의 한계를 벗어나지 못한다. 이러한 단점을 극복하고자 고분해능으로 단차 정보를 확인할 수 있는 광학적 디지털 홀로그래피 기법으로 동일한 샘플에 대한 형상 정보를 측정하였다.

박막 및 투명전극 소자의 형상 측정을 위해서 벌크 광학계를 이용하여 투과형 및 반사형의 디지털 홀로그래피 시스템을 구현하였다. 투과형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정한 ITO 박막의 단차는 158.5 nm로 FE-SEM으로 측정한 결과와 2.6%의 오차율로 매우 높은 유사도를 보이는 값을 확인하였다. 반사형 디지털 홀로그래피 시스템으로 Cr 박막의 단차를 측정한 결과값이 1.24 μm 로 제작 조건인 1.06 μm 와 16.8%의 오차율을 보였다. 또한 광섬유 기반의 위상 전이가 가능한 디지털 홀로그래피를 개발하여 같은 시료에 대한 측정을 수행하여 제안한 측정 기법의 효과를 비교 분석하였다. 제안한 광섬유 기반의 디지털 홀로그래피에서는 펄스광을 통해 위상 이동 정도를 정교하게 제어할 수 있었으며, 이러한 특성을 이용하여 4-step 또는 8-step 위상 이동을 위한 간섭무늬 제어가 원활함을 확인하였다. 부가적으로 위상 이동 정도를 실시간 제어함으로써 위상 잠금 효과를 확인할 수 있었다.

개발된 광섬유 기반 투과형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정한 ITO 박막과 투명전극의 단차는 159.6 nm, 57.8 nm로 FE-SEM으로 측정한 결과와 각각 3.3%, 3.6%의 차이를 보이는 것으로 확인되었으며, 이를 통해 유사도가 매우 높은 것으로 판단되었다. 광섬유 기반 반사형 디지털 홀로그래피 시스템으로 측정한 Cr 박막의 단차는 1.2 μm 로 시료의 제작 조건인 1.06 μm 를 고려해볼 때 13.6%의 오차율을 보였다. 박막 두

계를 나타내는 단차에서 다소 차이는 보였지만, 외부 진동이나 측정 시 오차 등을 고려할 때 in-situ로 비진공인 환경에서 측정하는 장점을 고려한다면 개선을 통해 충분히 오차율이 작은 측정법으로 FE-SEM의 대안기술이 될 수 있을 것이라고 예상된다.

본 논문에서는 ITO 박막 제작 공정에서의 최적 조건을 도출하였으며 포토 리소그래피를 통해 ITO 박막에 패턴을 형성하여 투명전극을 제작하였다. 제작된 박막 및 투명전극의 특성을 측정하여 분석함으로써 최적 공정조건에서 소자로써 동작하는데 최적의 조건으로 제작되었음을 확인할 수 있었다. 사용한 제작 장비인 RF 마그네트론 스퍼터를 운영하여 제작 공정의 최적화 조건을 도출할 수 있었으며, 패턴의 형성까지 수행함으로써 박막과 이를 기반으로 하는 소자의 개발에 이르는 과정을 전반적으로 수행할 수 있게 되었다. 또한 이 소자에 대한 특성을 측정하는 측정 장비인 희소성을 가지는 FE-SEM에 대한 운영기술 및 시료 코팅 조건의 최적 조건을 도출할 수 있었으며 샘플을 절개하지 않고도 실시간 관찰이 가능한 디지털 홀로그래피 기법을 통해서 다양한 방법으로 제작된 소자의 형상 특성을 관찰할 수 있었다. 디지털 홀로그래피 기법은 펄프광을 통한 위상 이동 기법을 새롭게 도입하여 적용함으로써 광섬유 기반의 디지털 홀로그래피 구현을 가능하게 할 수 있었다. 이 방법을 보다 정밀하게 제어 가능하게 개발하고 정확도를 향상시킬 수 있도록 잡음을 저하시키고 고속화하여, 측정 단계를 자동화함으로써 보다 보편적으로 박막 및 관련 소자의 형상을 측정하는데 유용하게 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 전반적으로 박막 및 소자의 제작 그리고 특성화를 위한 계측의 전과정을 수행함으로써 공정에 대한 이해 및 측정 기법의 기본 원리를 바탕으로 특성 분석까지 가능할 수 있었다. 이러한 과정을 통해 전체 개발과정을 폭넓게 이해할 수 있게 됨으로써 향후 개발에 필요한 전체 흐름을 이해하고 최적화된 개발 조건 및 측정 방법을 선정하는데 있어서 다양한 경험이 바탕이 된 효율적인 설계가 가능할 것으로 예상되는 바이다.

참고문헌

- [1] Govindjee, E. R. a, “Light absorption and fate of excitation energy”, 1969.
- [2] Tang, C. W., & VanSlyke, S. A., “Organic electro luminescent diodes”, *Applied Physics Letters*, 51(12), 913-915, 1987.
- [3] Castellano, J. A. “Handbook of display technology”, Elsevier, 2012.
- [4] Mentley, D. E. “State of flat-panel display technology and future trends”, *Proceedings of the IEEE*, 90(4), 453-459, 2002.
- [5] Ziemelis, K., “Display technology: Glowing developments”, *Nature*, 399(6735), 408-411, 1999.
- [6] S. P. Harvey, T. O. Mason, D. B. Buchholz, and R. P. H. Chang, “Carrier Generation and Inherent Off-Stoichiometry in Zn, Sn Codoped Indium Oxide (ZITO) Bulk and Thin-Film Specimens”, *J. Am. Ceram. Soc.* vol. 91, 467, 2008.
- [7] P. Carreras, A. Antony, F. Rojas, and J. Bertomeu, “Electrical and optical properties of Zn-In-Sn-O transparent conducting thin films”, *Thin Solid Films* vol. 520, 1223, 2011.
- [8] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, and H. Pettersson, “Dye-Sensitized Solar Cells” *Chem. Rev.* vol. 110, 6595, 2010.
- [9] C. A. Hoel, T. O. Mason, J. -F. Gaillard, and K. R. Poeppelmeier, “Transparent Conducting Oxides in the ZnO-In₂O₃-SnO₂ System”, *Chem. Mater.* vol. 22, 3569, 2010.

- [10] Y. D. Ko, C. H. Lee, D. K. Moon, Y. S. Kim, “Oxygen effect of transparent conducting amorphous Indium Zinc Tin Oxide films on polyimide substrate for flexible electrode.”, *Thin Solid Films* vol. 504, 32, 2013.
- [11] H. K. Park, J. A Jeong, Y. S. Park, H. K. Kim, W. J. Cho, “Electrical, optical, and structural properties of InZnSnO electrode films grown by unbalanced radio frequency magnetron sputtering”, *Thin Solid Films* vol. 517, 5563, 2009.
- [12] J. A. Lee, J. H. Lee, Y. W. Heo, J. J. Kim, H. Y. Lee, “Characteristics of Sn and Zn co-substituted In₂O₃ thin films prepared by RF magnetron sputtering Curr”, *Appl. Phys.* vol. 2, S89, 2012.
- [13] Levinson, Harry J. "Principles of lithography." Bellingham, Wash, USA: SPIE, 2005.
- [14] Gil-dong Lee. “The Effect of Sputtering Conditions on the Electro chromic Properties of Titanium Oxide Thin Films”, *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 26, pp. 55-61, 2006.
- [15] 일본전자현미경학회, “주사전자현미경의 기초”, 반도출판사, 1996.
- [16] L. Reimer, “Scanning Electron Microscopy”, Springer, Berlin, 1998.
- [17] A. Khursheed, “Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometers”, World Scientific, Singapore, 2011.
- [18] J.I.Goldstein, D.E.newbury, P.Echlin, D.C.Joy, C.E.Lyman et el, “Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis”, Springer, New York, 2007.
- [19] R.E.Egerton, “Physical Principles of Electron Microscopy An Introduction to TEM, SEM and AEM”, Springer, New York, 2005.

- [20] David C.Joy, “Monte Carlo Modeling for Electron Microscopy and Microanalysis”, Oxford, 1995.
- [21] T. Wilson, “Confocal mciroscopy”, San Diego, Academic Press, 1990.
- [22] B. Matsumoto, “Cell Biological Applications of Confocal Microscopy, in Methods in Cell Biology”, Vol. 70, New York, Academic Press, 2002.
- [23] C. J. R. Sheppard and D. M. Shotton, “Confocal Laser Scanning Microscopy”, Oxford, United Kingdom, BIOS Scientific Publishers, 1997.
- [24] J. B. Pawley, “Handbook of biological confocal mciroscopy”, 2nd edn, New York, Plenum press, 1995.
- [25] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” Appl. Phys. Lett. 11, 77-79, 1967.
- [26] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavski, “Reconstruction of holograms with a computer,” Sov. Phys-Tech. Phys. USA 17(2), 333-334, 1972.
- [27] K. Wasa, S. Hayakawa, “Handbook of sputter deposition technology”, Noyes publications 1992.
- [28] J.L.Vossen, Physics of Thin Films, vol.9, p.1, 1977.
- [29] W. R. Grove, Phil. Trans. Roy. Soc. London A142, p87, 1852.
- [30] J.H.Park, J.M.Shin, S.Y.Cha, J.W.Park, S.E.Jeong, “Deposition-temperature effectson AZO thin film sprepared by RF magnetron sputtering and their physical properties”, J.Korean. Phys.Soc, vol.49, p.584, 2006.

- [31] Q.B.Ma, Z.Z.Ye, H.P.He, L.P.Zhu, J.R.Wang, B.H.Zhao, “Structural, electrical, and optical properties of transparent conductive ZnO: Ga films prepared by DC reactive magnetron sputtering”, *J.Crystal.growth*, vol.304, p.64, 2007.
- [32] X.Yu, J.Ma, F.Ji, Y.Wang, C.Cheng, H.Ma, “Thickness dependence of properties of ZnO:Ga films deposited by RF magnetron sputtering”, *applied. surface. science*, vol.245, p.310, 2005.
- [33] Gil-dong Lee. “The Effect of Sputtering Conditions on the Electro chromic Properties of Titanium Oxide Thin Films”, *The Korean Solar Energy Society*, Vol. 26, pp. 55-61, 2006.
- [34] Wang-woo Lee, “Deposition and Analysis of Transparent Conductive Oxide AlZnO Thin Film by RF Magnetron Sputtering”, *Inha University*, 2008.
- [35] Jung-woo Kang, “Electrical and Optical Properties of AlGaZnO Films Deposited by Magnetron sputtering system”, *Inha University Metallurgical Engineering*, 2011.
- [36] Young-jin Lee, "A study on microstructure and mechanical properties of Ti-Al-N coatings deposited by unbalanced magnetron sputtering", *Ulsan University*, 2012.
- [37] Min-jae Park, "Effect of annealing temperature on the properties of ITO/TiO₂ films deposited with RF magnetron sputtering", *Ulsan University*, 2015.
- [38] Sang-bin Lee, “A study on the non-volatile resistive switching property of the thin solid films deposited by RF magnetron sputtering”, *Yonsei University Physics*, 2012.
- [39] Deposition and Analysis of Transparent conductive Oxide AlZnO Thin Film by RF Magnetron Sputtering“, *Inha University*, 2008.
- [40] “ThinFilm Technology”, *Leemunhu*

- [41] B.Chapman, "Glow Discharge Process", John Wiley & Sons, Inc. 1980.
- [42] B. Y. Oh, J. C. Park, Y. J. Lee, S. J. Cha, J. H. Kim, K. Y. Kim, T. W. Kim, and G. S. Heo, *J. Solid State Chem.* 184, 2462, 2011.
- [43] S. Jager , B. Szyszaka, J. Szcyrbowski 'Comparison of transparent Conductive Oxide Thin Films Prepared by AC, and DC reactive Magnetron sputtering', *Surface and Coatings Technology*, 98, 1304-1314, 1998.
- [44] K.C. Kao and W. Hwang, "Electrical Transport in Solids with Particular Reference to Organic Semiconductor", Pergamon Press, 1979.
- [45] S. Butler, G.S. Kino, *Phys. Fluids* 6, 1346, 1963.
- [46] B. Window and G. L. Harding, "Charged particle fluxes from planar magnetron sputtering sources", *J. Vac. Sci. Technol.* A4, 996, 1986.
- [47] Milton Ohring, "The Materials Science of Thin Films", Academic Press, Inc, Chapter 5, 1992.
- [48] J. A. Thornton and A.S. Perfold, "Thin Film Process", edited by j.L. Vossen and W.Kem, Academic Press, 75, 1978.
- [49] Byeong-Yun Oh, "Deposition and properties of ZnO:Al films for transparent electrodes by RF magnetron sputtering", Yonsei University, 2006.
- [50] Levinson, H. "Principles of Photolithography." 2001.
- [51] Levinson, Harry J. "Principles of lithography." Bellingham, Wash, USA: SPIE, 2005.
- [52] Bakshi, Vivek. EUV lithography. Vol. 178. Bellingham: Spie Press, 2009.

- [53] Park, Jeong-Gyu, Su-Hwa Jeong, and Hang-Bu Lee. "Development of Proximity Exposure System with Vertical Structure for Plasama Display Panel." Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A 24.9, 2371-2380, 2000.
- [54] Lee, Dong-Gun, and Jong-Rak Park. "Application of Transmittance-Controlled Photomask Technology to ArF Lithography." Korean Journal of Optics and Photonics 18.1, 74-78, 2007.
- [55] Lin, Burn Jeng. "Optical lithography: here is Why." Bellingham: SPIE, 2010.
- [56] Wallraff, G. M., and W. D. Hinsberg. "Lithographic imaging techniques for the formation of nanoscopic features." Chemical Reviews 99.7, 1801-1822, 1999.
- [57] Mohamaed M.El-Gomati, Christopher G.H.Walker, "Toward Quantitative Scanning Electron Microscopy", Advancesin Imaging and Electron Physics, Volume 183, 2014.
- [58] A. Khursheed, "Scanning Electron Microscope Optics and Spectrometers", World Scientific, Singapore, 2011.
- [59] B. Matsumoto, "Cell Biological Applications of Confocal Microscopy, in Methods in Cell Biology", Vol. 70, New York, Academic Press, 2002.
- [60] C. J. R. Sheppard and D. M. Shotton, "Confocal Laser Scanning Microscopy", Oxford, United Kingdom, BIOS Scientific Publishers, 1997.
- [61] J. B. Pawley, "Handbook of biological confocal mciroscopy", 2nd edn, New York, Plenum press, 1995.
- [62] D. Gabor, "A new microscopic principle," Nature, 161, 777-778, 1948.
- [63] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts," Proc. Roy. Soc. 197, 454-487, 1949.

- [64] D. Gabor, "Microscopy by reconstructed wavefronts: II," Proc. Phys. Soc. 64, 449-469, 1951.
- [65] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," Appl. Phys. Lett. 11, 77-79, 1967.
- [66] M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov and L. P. Yaroslavski, "Reconstruction of holograms with a computer," Sov. Phys-Tech. Phys. USA 17(2), 333-334, 1972.
- [67] W. Haddad, D. Cullen, J. Solem, J. Longworth, A. Mcpherson, K. Boyer and K. Rhodes, "Fourier-transform holographic microscope," Appl. Opt. 31(24), 4973-4978, 1992.
- [68] U. Schnars and W. Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction," Appl. Opt. 33(2), 179-181, 1994.
- [69] U. Schnars, "Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms," J. Opt. Soc. Am. A 11(7), 2011-2015, 1994.
- [70] Ichirou Yamaguchi and Tong Zhang, "Phase-shifting digital holography" Opt. Lett. 22(16), 1268-1270, Aug 1997.
- [71] Andrei A. Fotiadi, et al, "All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers," Opt. Lett, vol. 34, no. 122, 3574-3576, 2009.
- [72] F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti, Introduction to Optics, Prectice-Hall International, Inc., 2. edition, 1996.
- [73] B. Javidi, and E. Tajahuerce, "Three-dimensional object recognition by use of digital holography," Opt. Lett. 25, 610-612, 2000.

- [74] U. Schnars and W. Juptner, "Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction," *Appl. Opt.* 33(2), 179-181, 1994.
- [75] Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, 18-20, 2003
- [76] J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle", *Journal of the Optical Society of America*, Vol 66, pp.1145-1150, 1976.
- [77] K. Curtis, L. Dhar, A. Hill, W. Wilson, and M. Ayres, "Holographic Data Storage: From Theory to Practical Systems," 2010.
- [78] H. Coufal, D. Psaltis, and G. T., "Holographic data storage, Springer series in optical sciences", Sincerbox, 2000.
- [79] 손정영, "홀로그래피의 원리와 응용", pp.221, 2004.
- [80] JOSEPH W. GOODMAN, "Introduction to fourier optics", MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, (2000)
- [81] M. H. Horman, "An application of wavefront reconstruction to interferometry", *Appl. Opt.*, Vol. 4, 333-336, 1965.
- [82] B. C. Kim and S. W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile measurement of rough surfaces," *Opt. Lett.* 28, 528-530, 2003.
- [83] J. Schwider, R. Burow, K-E Elssner, J. Grznna, R. Spolaczyk, and K. Merkel, "Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources," *Appl. Opt.* 22, 3421-3432, 1983.
- [84] Y. Y. Cheng and J. C. Wyant, "Phase shifter calibration in phase shifting interferometry," *Appl. Opt.* 24, 3049-3052, 1985

- [85] D. S. Kim., “The measurement of fracture surface roughness of CT specimen by using Digital Holography.”, Chosun Univ, master's thesis, 4-7, 2010
- [86]. A. Naseem., “Numerical reconstruction of digital holograms and its application to three-dimensional imaging.”, Chosun Univ., ph.D Dissertation, 14-17, 2010
- [87] U. Schnars, “Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms,” J. Opt. Soc. Am. A 11(7), 2011-2015, 1994.
- [88] P. S. Huang and S. Zhang, “Fast three-step phase-shifting algorithm” Appl. Opt, 45, 21, 5086-5091, 2006.
- [89] M. Owner-Petersen, “Phase-map unwrapping: a comparison of some traditional methods and a presentation of a new approach”, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1508, 73–82, 1991.
- [90] H. Y. Yun, S. J. Jeong, J. W. Kang, and C. K. Hong, “3-dimensional micro-structure inspection by phase-shifting digital holography,” Key. Eng. Mater. 270-273, 2004.
- [91] H. Y. Yun, C.K. Hong, “. Interframe intensity correlation matrix for self-calibration in phase-shifting interferometry”, Appl. Opt, 44,23,4860-4869, 2005.
- [92] L. Yu and M. K. Kim, “Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method,” Opt. Lett. 30(16), 2092-2094, 2005.
- [93] G.Zongtao, T.Mitsuo, "Self-reference method for phase-shift interferometry", Proc.of SPIE Vol.4416, pp.152-157, 2001.
- [94] P.Huang, Q.HuandF. Chiang, "Doublethree-stepphase-shifting algorithm", Appl. Opt, vol. 41, N. 22, pp.4503-4509, 2002.

- [95] A.Yasuhiro, F.Atsushi, K.Toshihiro and M.Osamu "Parallel three-step phase-shifting digital holography", Appl. Opt, vol.45, No.13, pp.2995-3002, 2006.
- [96] P.Hariharan, "Digital Phase-Stepping Interferometry: Effects of Multiple Reflected Beams," Appl. Opt, vol.26, pp.2506-2508, 1987.
- [97] P. Hariharan, "Phase-shifting interferometry: minimization of systematic errors" Opt. Eng., vol.39, No.4, pp.967-969, 2000.
- [98] Augst, S. J.; Fan, T. Y. & Sanchez, A. "Coherent beam combining and phase noise measurements of Yb fiber amplifiers", Opt. Lett., vol. 29, pp. 474-476, 2004.
- [99] Barmenkov, Yu. O.; Kir'yanov, A. V. & Andres M. V. "Resonant and thermal changes of refractive index in a heavily doped erbium fiber pumped at wavelength 980 nm", Appl. Phys. Lett., vol. 85, pp.2466-2468, 2004.
- [100] Bellanger, C.; Brignon, A.; Colineau, J. & Huignard, J. P., "Coherent fiber combining by digital holography", Opt. Lett., vol.33, pp.293-295, 2008.
- [101] Andrei A. Fotiadi, et al, "All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers," Opt.Lett, vol. 34, no. 122, pp. 3574-3576, 2009.

Publication

Journal Papers(SCI)

1. 박소희, 최은서, 마혜준 이승석, 신용진, “Improvement of luminance and uniformity of light guide panel using scatterer pattern by laser processing”, OPTICS AND LASER TECHNOLOGY, Vol. 44, No. 5, pp. 1301-1306, 2012.

Journal Papers(KCI)

1. 신주엽, 마혜준, 강성훈, 권익환, 양승필, 홍정기, 정현철, 김경석, “Measurement of Width and Step-Height of Photolithographic Product Patterns by Using Digital Holography”, 한국비파괴검사학회지, Vol. 36, No. 1, pp. 18-26, 2016.
2. 신주엽, 마혜준, 정현일, 권익환, 양승필, 홍정기, 정현철, 김경석, “반사형 디지털 홀로그래피를 이용한 Molybdenum 박막의 손상 측정”, 한국비파괴검사학회지, Vol. 35, No. 2, pp. 141-149, 2015.
3. 마혜준, 이승석, 최은서, 신용진, “Application of Optical Coherence Tomography for the Characterization of a Laser-processed Plastic Optical Fiber”, 새물리, Vol. 62, No. 9, pp. 988-993, 2012.

Conference Papers(International)

1. 이승석, 김주하, **마혜준**, 권다음, 최은서, “Direct depth detection method based on self-interference in common-path interferometry”, The 7th Asia Pacific Optical Sensors Conference, Wed_P28, p. 36, 2018.
2. 이승석, 김주하, **마혜준**, 최은서, “Balanced detection for spectral-domain optical coherence tomography with fiber-based phase shifter”, Photonics West(SPIE Proceeding), 10488-42, pp. 1-6, 2018.
3. **마혜준**, 이승석, 이병일, 한수옥, 최은서 “Fiber-based full-field optical coherence tomography ”, Photonics West(SPIE Proceeding), p. 98, 2012.

Conference Papers(Domestic)

1. **마혜준**, 이승석, 권다음, 최은서 “특수 광섬유를 이용한 광섬유 디지털 홀로그래피 시스템 구현”, 한국광학회 동계학술발표회, WP-III-2, p. 78, 2018.
2. **마혜준**, 이승석, 권다음, 최은서 “간섭계 기반 위상 안정화를 위한 광학적 제어 기법”, Photonics Conference , TP-VII-3, p. 331, 2017.
3. **마혜준**, 이승석, 김주하, 최은서, “특수광섬유를 적용한 반사형 디지털 홀로그래피 구현”, 한국물리학회 가을학술논문발표회, P2-OP.009, p. 197, 2017.
4. 이승석, 김주하, **마혜준**, 김영섭, 신동혁, 최은서 “선택적 간섭무늬 발생에 따른 가공 깊이 계측 방법”, 한국광학회 하계학술발표회, WP-II-9, p. 60, 2017.
5. 이승석, 김주하, **마혜준**, 최은서 “소형 스펙트로메터를 이용한 형광 및 세포수 동시 분석 방법”, 한국광학회 하계학술발표회, WP-VI-2, p. 62, 2017.
6. 이승석, **마혜준**, 김주하, 최은서, “광펌핑을 이용한 광학 듀얼 밸런싱 시스템”, 제 24 회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), WP-E-2 , p. 22, 2017.

7. **마혜준**, 이승석, 김주하, 최은서, “광섬유 위상 천이 간섭계를 이용한 투과형 디지털 홀로그래피”, 제 24회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), WP-D-4, p. 21, 2017.
8. **마혜준**, 이승석, 김주하, 최은서, “특수 광섬유 기반 위상 천이 홀로그래피 구현”, 한국물리학회 봄학술논문발표회, P2-OP.26, p. 200, 2017.
9. 신주엽, **마혜준**, 박일철, 양승필, 정현철, 김경석, “반사형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 포토리소그래피 공정품의 패턴닝 선폭 측정”, 한국정밀공학회 추계 학술 발표회, pp. 450-451, 2015.
10. 신주엽, 정현일, **마혜준**, 권익환, 홍정기, 정현철, 김경석, “투과형 디지털 홀로그래피 시스템을 이용한 ITO박막의 결함측정”, 한국정밀공학회 추계 학술발표회, pp. 218-219, 2014.
11. 강찬근, 윤나연, **마혜준**, 정현철, 김경석, “디지털 스페클 패턴 전단 간섭법을 이용한 압력 배관 내부 결함 검출”, 한국비파괴검사학회 추계 학술발표회, pp. 333-336, 2014.
12. **마혜준**, 신주엽, 정현일, 권익환, 홍정기, 정현철, 김경석, “레이저 전단간섭계 시스템을 이용한 태양전지 이면결함 측정”, 한국광학회 하계학술발표회, 2014.
13. 신주엽, 정현일, **마혜준**, 권익환, 홍정기, 정현철, 김경석, “광계측 시스템을 이용한 CT시험편의 파단면 조도측정”, 한국비파괴학회 춘계 학술발표회, pp. 377-381, 2014.
14. 신주엽, 정현일, **마혜준**, 양승필, 정현철, 김경석, “Digital Holography를 이용한 하중별 피로시험에 따른 CT시험편의 파단면 조도 측정” 한국정밀공학회 춘계 학술발표회, pp. 346-347, 2014.
15. 이승석, **마혜준**, 김주하, 신용진, 최은서, “미세 단층촬영기법을 이용한 박막의 두께 측정”, 한국물리학회 추계 학술발표회, p. 149, 2013.

16. **마혜준**, 이승석, 김주하, 김현식, 최은서, “광분산기를 이용한 공초점 현미경 구현”, 한국광학회 하계 학술발표회, p. 43, 2012.
17. **마혜준**, 이승석, 김주하, 신용진, 최은서, “광영상기법을 이용한 도광판 가공조건 연구”, 제 19회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), p. 10, 2012.
18. **마혜준**, 이승석, 최은서, 신용진, “광섬유 커플러를 이용한 full-field optical coherence tomography 개발 및 특성평가”, 한국물리학회 춘계 학술발표회, p. 180, 2012.
19. **마혜준**, 이승석, 최은서, 신용진, “전산모사를 통한 LED 조명용 산란체의 광학적 패턴 설계”, 한국물리학회 춘계 학술발표회, p. 180, 2012.
20. **마혜준**, 이승석, 최은서, 신용진, “측면 발광 광섬유 광원을 이용한 도광판의 광학적 특성 분석을 위한 전산모사”, 광자기술학술발표회, pp. 419-420, 2011.
21. **마혜준**, 이승석, 최은서, 신용진, “레이저 가공 산란 패턴을 이용한 도광판의 성능 향상 ”, 한국레이저가공학회 학술발표회, pp. 42-47, 2011.
22. **마혜준**, 박소희, 이승석, 최은서, 신용진, “Improvement of Light Guide Panel Performance by CO2 Laser Patterning ”, 한국물리학회 추계 학술발표회, p. 104, 2011.
23. **마혜준**, 이승석, 신용진, 최은서, “측면 홀 가공 조건에 따른 플라스틱 광섬유 측면 발광 특성 전산모사”, 한국물리학회 추계 학술발표회, p. 104, 2011.