



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](#)

碩士學位論文

DC 마그네트론 스퍼터링을 이용한
ITO 전극 단선 repair에 관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지 공학 학과

金昇炫

2016 年 2 月



DC 마그네트론 스퍼터링을 이용한 ITO 전극 단선 repair에 관한 연구

指導教授 李憲周

金昇炫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 12月

金昇炫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 千院基



委 員 _____ 李憲周



委 員 _____ 劉榮勳



濟州大學校 大學院

2015 年 12月



Study on the ITO electrode break repair using of DC magnetron sputtering

Seung-Hyeon Kim
(Supervised by professor Heon-Ju Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Engineering

December 2015

This thesis has been examined and approved.



Thesis director, Heon-Ju Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



Won-Gee Chun, Prof. of Nuclear and Energy Engineering



Young-Hun Yu, Prof. of Physics



Date 2015. 12.

Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY



목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iii
SUMMARY	iv
I. 서론	1
II. 이론적 배경	3
.....	3
1. 투명 전도성 재료	3
2. ITO 박막	4
1) ITO 박막 구조	4
2) ITO 박막의 전기적, 광학적 특성	5
3) ITO 박막 제조방법 및 repair 필요성	7
3. 스퍼터링	9
1) 스퍼터링	9
2) 마그네트론 스퍼터링	11
3) 반응성 스퍼터링	14
III. 실험장치 구성 및 방법	17
1. Magnetron sputtering system 구성	19
2. ITO 박막 증착조건 및 시편준비	18
3. Slit을 이용한 단선 수리	20
4. 박막 특성 평가	21
IV. 실험 결과	23
1. DC power에 따른 ITO 박막 증착율	23
2. 인가전력(DC power)에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성	24
3. 산소유량 변화에 따른 ITO 박막의 전기적 특성	26

4. 기판 온도 변화에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성	28
5. Slit을 이용한 ITO 전극 수리	30
 V. 결론	 31

REFERENCE

감사의 글

LIST OF TABLES

[Table. 1] Formed film to reactive gas	14
--	----

LIST OF FIGURES

[Fig. 1] In ₂ O ₃ 격자 구조	4
[Fig. 2] Interaction of ions with target surface	10
[Fig. 3] Applied fields and electron motion in planar magnetron	13
[Fig. 4] Schematic of a magnetron target	13
[Fig. 5] Hysteresis curve in reactive sputtering (a) pressure vs reactive gas flow rate (b) cathode voltage vs reactive gas flow rate	16
[Fig. 6] DC Magnetron sputtering system	18
[Fig. 7] Magnetron sputter gun	18
[Fig. 8] Concept of the ITO disconnection repair	20
[Fig. 9] 4-point probe methode	22
[Fig. 10] Thickness dependence on deposition time	23
[Fig. 11] Sheet resistance of ITO film with DC power	24
[Fig. 12] Transmittance of ITO film with DC power	24
[Fig. 13] Sheet resistance of ITO film with oxygen rate	26
[Fig. 14] Transmittance of ITO film with oxygen rate	26
[Fig. 15] Sheet resistance of ITO film with substrate temperature	29
[Fig. 16] Transmittance of ITO film with substrate temperature	29
[Fig. 17] Repair of the ITO electrode	30

SUMMARY

Combined technologies of display (display) and input devices widely employed a touch screen technologies in the second half of the 20th century. Due to the rapid development and the miniaturization of communication equipments, the touch screen and its importance is growing up. Various types of touch screen panels (TSP), such as pressure type, resistive type and capacitive type using a transparent electrode has been developed. Capacitive type TSP can be largely divided into two groups: surface capacitive type and the projected capacitive type.

Recently, among wide-bandgap oxide semiconductors ITO is widely used due to its relatively low resistance (resistivity) and high visible light transmittance. ITO thin film exhibits the lowest resistivity among the ceramic conductors due to the increased carrier electrons by a non-stoichiometric doping configuration (nonstoichiometry) with Sn. And the high transmittance in the visible region, the low absorption rate in the blue wavelength that is good for the implementation of colors. based on its outstanding electrical and optical properties ITO thin film has a wide range of applications in many fields.

However, current ITO based touch screen technology with glass-ITO film G1F(glass-ITO film) method has a failure rate of 10 to 20%, and for glass only G2(glass only) method about 30%. It means that 240 millions of smartphones are being discarded as defective out of total 800 million smartphone produced in worldwide considering the 30% failure rate of the G2 ITO based touch screens. If the defects of ITO touch screens, such as disconnections/cross-linking could be repaired, it would provide a big

economical benefits.

The objective of this study is to develop a technique for repairing an ITO based electrode by partial deposition through a slit with DC magnetron sputtering technique. By controlling the process parameters (DC Power, introducing oxygen flow rate, substrate temperature control) a large area and uniform ITO film could be deposited on glass substrate by using a DC magnetron sputtering method. Moreover, electrical and optical properties of as prepared ITO thin film were characterized and discussed.

I. 서 론

20세기 후반 표시장치(display)와 입력장치의 결합기술은 터치스크린을 양산하였고, 현재 이르러서 터치스크린은 통신기기의 급속한 발전과 소형화에 힘입어 그 중요성이 커지고 있다. TSP(Touch Screen Panel)의 구동방식은 과거 압력에 의한 방식을 벗어나 투명전극을 활용한 저항 또는 정전용량방식 등이 개발되었다. 정전용량 방식은 크게 표면형 정전용량방식(Surface capacitive)과 투영형 정전용량방식(Projected capacitive)으로 나눌 수 있으며, 최근에는 투영형 정전용량방식을 주로 사용한다. 다양한 디스플레이와 태양전지, 대전방지막, 열반사막, 면발열체, 광전 변환 소자 등과 같이 투명전극을 필요로 하는 제품에는 wide-bandgap oxide semiconductor로 ZnO 혹은 SnO₂에 비해 상대적으로 낮은 저항(resistivity)과 높은 가시광 투과율을 갖는 ITO가 사용되고 있다.

인듐 틴 옥사이드(Indium tin oxide: ITO) 박막은 Sn의 첨가와 oxide의 비화학양론적 구성(nonstoichiometry)으로 발생한 캐리어전자의 증가로 낮은 비저항을 보이며 가시광 영역에서 높은 투과도, 청색파장의 흡수율이 낮아 색의 구현이 좋아 많은 부분에서 사용되고 있다. 하지만 현재 ITO 기반 터치스크린 생산 과정 G1F(glass-ITO film)방식의 경우 불량률이 10 ~ 20 %, G2(glass only)방식의 경우에는 30 % 정도로 나타나고 있다. 이는 전 세계적으로 스마트폰이 8억 대 이상 생산되고 있는 현재 시점에서 ITO 기반의 터치스크린의 불량률이 30 %를 기준으로 2억 4천만대 가량의 터치스크린이 불량으로서 폐기되고 있는 상황이다. 대표적인 불량률의 주된 요인인 단선/교차결합을 확인하고 이를 해결 할 수 있다면 자원과 경제적 이익을 창출 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 단선/교차결합을 확인한 후 불량 전극 수리기술을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 확인된 단선 point을 slit을 이용, DC 마그네트론 스퍼터링법으로 부분 증착실험을 진행하였다. DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 대면적 증착을 통하여 공정변수 변화(DC power, 도입산소유량, substrate 온도조절)에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성 변화를 확인하고, slit을 이용한 ITO 박막의 부분

증착하여 단선 수리를 수행하였다.

II. 이론적 배경

1. 투명전도성 재료

투명 전도성 재료는 금속박막과 세라믹 계열의 산화물 박막이 있다. Au, Ag, Cu 등 저온으로 증착이 가능한 금속 박막은 두께를 조절함으로써 광투과율을 높일 수 있다. 하지만 먼 저항과 광투과율이 반비례하기 때문에 높은 전기저항에서 낮은 가시광 투과도로 부분전극으로만 사용되고, 시간경과에 따라 화학적 안정성이 낮아 일부의 위치에 제한적으로 사용되고 있다. 금속박막의 이러한 이유로 인해 투명전극에는 산화물 박막이 주로 사용되고 있다.

투명 전도성 산화물 (Transparent Conducting Oxide: TCO)이 투명전극으로 사용하기 위해서는 빠른 스위칭과 응답속도를 위해 10^{-4} $\Omega \cdot \text{cm}$ 대 이하의 비저항, 85% 이상의 가시광 투과율을 가져야 한다. 화학량론적(stoichiometric) 재료를 도핑하지 않은 상태에서 80% 이상의 높은 광투과율과 10^{-3} $\Omega \cdot \text{cm}$ 대 이하의 비저항을 동시에 구현하기는 불가능하다. 따라서 SnO₂, In₂O₃, CdO, ZnO 등의 산화물 박막에 도핑 또는 비화학량론성을 도입하면 3eV 이상의 넓은 밴드갭(band gap)을 가지는 산화물 내에 전자 degeneracy를 형성시켜 가시광 영역에서 높은 투과율을 나타내고 적외선 영역에서는 높은 반사율, 금속에 가까운 전도도를 가진다. 위와 같은 특수 산화물의 증착 시 공정변수를 제어함으로써 박막의 광학특성 뿐만 아니라 전기적 특성을 변화시킬 수 있다.[1]

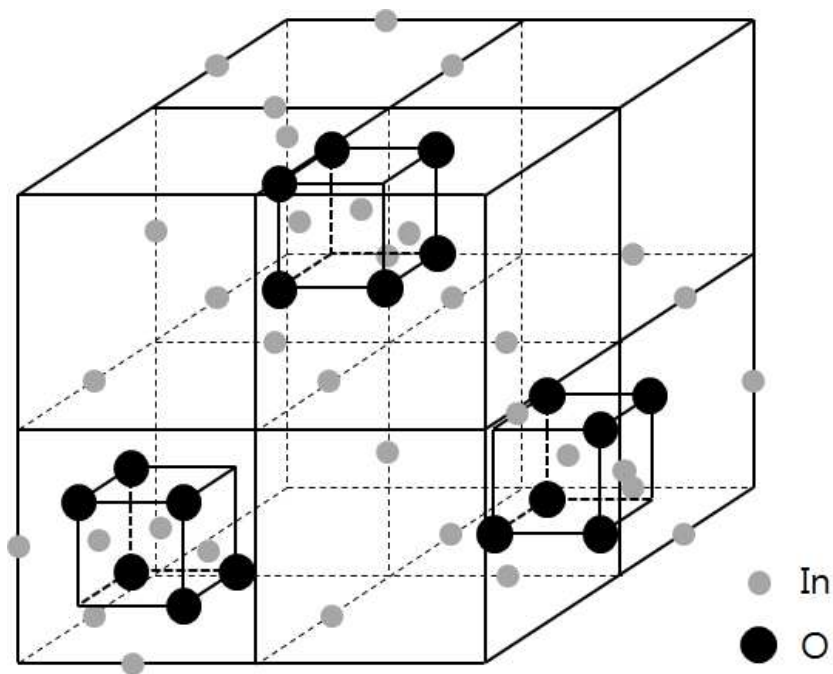
Wide-bandgap oxide semiconductor 중 최초로 발견되어진 산화물은 1907년 Badeker가 Cd oxide로 박막을 발견 후 투명 전도성 산화물에 대한 많은 기술개발의 관심을 불러 일으켰고, antimony tin oxide(ATO), fluorine tin oxide(FTO), indium tin oxide(ITO) 등의 활용 가능성이 높은 투명 전도성 산화물에 대한 증착기술들이 개발되었다.[2]

2. ITO 박막

1) ITO 박막의 구조

ITO는 산화인듐 (In_2O_3)과 산화주석 (SnO_2)의 화합물로 일반적으로 90 % In_2O_3 , 10 % SnO_2 비중을 갖는다. 얇은 레이어는 투명하고, 덩어리 상태에서는 노란회색을 나타낸다.

ITO의 모상 In_2O_3 의 결정구조는 cubic bixbyte 구조를 하고 있으며, In^{3+} 이온이 면심입방 자리, O^{2-} 이온이 3/4 tetra 자리를 차지하고 있다. 단위 격자 내에는 16개의 분자로 이루어져 있는 구조로 Fig. 1과 같다. In_2O_3 구조에 Sn^{4+} 이온이 In^{3+} 이온을 대신하여 치환된 구조가 ITO 기본 구조이다. 벌크(bulk)의 경우 격자상수는 10.118\AA , 박막의 경우 공정 변수에 따라 10.118\AA 에서 10.31\AA 까지 격자상수를 갖는다.

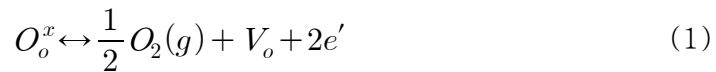


[Fig. 1] In_2O_3 격자 구조

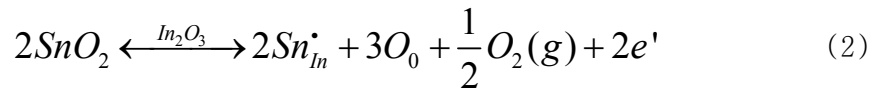
2) ITO 박막의 전기적, 광학적 특성

대부분의 세라믹스는 넓은 밴드갭 에너지와 화학적으로 안정한 조성을 통해 전기적으로 절연성을 보인다. 하지만 몇 가지 산화물 ZnO, SnO₂ 등은 비화학량론적 조성을 가짐으로 전기적으로 반도체적 특성을 나타내고, ITO 또한 반도체 물질로 이루어져 있다. In₂O₃

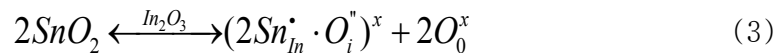
온전한 In₂O₃ 는 식 (1)에서 나타낸 분해반응에 의해 In₂O_{3-x} 의 비화학량론적 조성을 형성하며 n-형 전도 특성을 가진다. [3]



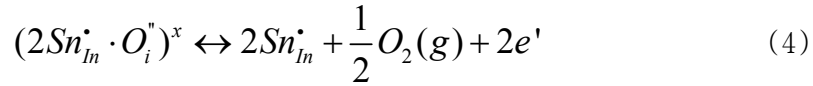
하지만, 위의 반응은 제한적이고, 생성되는 자유전자의 수 또한 제한적이기 때문에 투명 전극으로 활용하기에는 부족한 물질의 성질을 보인다. 이에 따라 비화학량론적 조성을 제어하고 가전자수가 다른 불순물을 도입함으로 carrier 농도를 증가시키기 위한 노력이 이루어졌고, Sn⁴⁺ 이온을 첨가한 ITO(indium tin oxide)를 형성하는 방법이 가장 우수한 방법이다. ITO는 몇 가지 캐리어 생성기구가 가능하다.



식(2)은 Metallic Sn을 donor로 도핑하는 캐리어 생성기구를 나타내었다. 하지만 대부분의 실험들에서 Sn 도핑은 식(3)과 같이 전기적 중성인 Sn:O_i 혹은 Sn₄⁺:O₂⁻=2:1 비율의 유효전하량이 0인 결합체를 형성하는 자기 보상 반응에 의한 도입을 증명한다.



다른 생성기구로 donor 활성화를 위한 결합체 분해를 생각 할 수 있으며, 식(4)에 따른 침입형 O_i''의 제거로 볼 수 있다.



모든 donor가 활성화 될 경우, 높은 환원분위기에서 식(1)에서 나타내어진 산소 비공공(disvacancy)을 형성하기 시작하는 분해반응을 통해 전하캐리어 농도가 변화한다.

In₂O₃에 SnO₂를 첨가하는 경우 Sn⁴⁺ 이온은 In³⁺ 이온을 치환하고, 화학량론적 조성을 형성하기 위해 산소는 In₂O₃의 결정구조에서 비어있는 산소자리를 채우게 된다. Sn 치환과 산소공공은 ITO 전도도 향상에 관여하며, 이에 따라 생성된 물질은 In_{2-x}Sn_xO_{3-2x}와 같이 나타낼 수 있다. 도입되어진 산소는 환원 분위기에서의 열처리를 통하여 분해반응을 유도하며 캐리어의 수를 증가시킬 수 있다.

ITO에 적절한 SnO₂의 첨가량은 5 ~ 10 wt%로 알려져 있으며, 이 이상 첨가되는 경우 In₄Sn₃O₁₂ 화합물의 생성 또는 Sn₂O_i의 전기적 중성인 덩어리(cluster)를 야기하여 캐리어전하의 mobility를 방해하여 전기전도성을 감소시킨다.

ITO 박막은 약 3.5 ~ 4.3 eV 이상의 넓은 밴드갭을 가져 가시광에서 높은 투과율을 보인다. ITO 박막은 파장에 따라 흡수영역, 투과영역, 반사영역 등으로 구분할 수 있다. 가시광선 영역에서는 높은 투과율 (>85 %)을 나타내고, 적외선 영역에서 높은 자유 전자 농도로 높은 반사율을 보여 photothermal conversion device로 이용된다. 또한 자외선 영역에서는 직접 천이에 의한 빛의 흡수율이 증가하게 된다.

ITO 박막은 500 Å 정도의 두께에서 85 %, 1000 Å에서 80 % 정도의 가시광선의 투과율을 보인다. ITO 박막의 투과도는 박막 두께, 내부 캐리어전하의 수, 결정화 정도, 균일한 표면과 박막의 미세구조 특성에 영향을 받는다.[4],[5],[6],[7]

3) ITO 박막 제조 방법 및 repair 필요성

투명 전도성 산화물(TCO) 박막 제조방법은 크게 화학적 제조법과 물리적 제조법으로 구분 할 수 있다. 화학적 제조법에는 스프레이법, 도포법, CVD법 등이 있으며, 물리적 제조법에는 진공증착법, 스퍼터법등이 있다.

TCO 박막의 화학적 제조법은 염화물의 가수분해와 유기화합물의 열분해를 이용하여 박막을 제조 하는 방법으로 단순한 공정으로 경제적이지만 높은 공정온도(400 ℃ 이상)으로 기판 선택이 제한적이며, 산소공공의 미세제어가 어려워 높은 전도성의 박막생성의 어려움 등의 단점을 가진다.

TCO 박막의 물리적 제조법은 공정과정에서 산소 주입을 제어함으로 산소공공의 최적화가 가능하여 낮은 저항의 박막을 얻기 쉬우며, 저온공정이 가능하여 기판선택에 자유롭다.

위의 소개와 같이 여러 가지의 공정방법이 알려져 있지만, 최근 공정온도에 제한적인 TFT(thin film transistor) 소자, 칼라필터등의 수요가 증가하면서 물리적 공정이 주를 이루고 낮은 진공도를 요구하여 생산비용이 저렴한 스퍼터링 방식이 가장 많이 사용되고 있다. 스퍼터(sputter)법은 아르곤(Ar)과 같은 불활성기체를 주로 사용하며 기체의 양이온이 글로우영역에서 발생하여 음극강하전압으로 가속 후 target에 입사되어 스퍼터시킨다. 또한 스퍼터법은 제조공정의 제어와 박막의 안정성이 우수하고, 면적이 큰 기판에 균일한 제조와 연속적 제조가 가능한 장점이 있다.

투명 전도성 물질은 저항기(resistors), 항공기 및 자동차 창유리용 투명발열체(transparent heating elements for aircraft and automobile windows), 열반사 거울(heat-reflecting mirrors for glass windows and incandescent bulbs), 저반사 코팅(antireflection coating), 가스센서(gas sensor), 대전방지 코팅(antistatic coating for instrument windows), 디스플레이 소자 등의 투명전극(electrodes for display device, electrochromic and ferroelectric photoconductor storage), 태양전지(CdS/Cu₂O and amorphous hydrogenated silicon(a-Si:H) solar cell), 내마모 코팅(protective and wear-resistant coatings for glass containers)등 다방면으로 응용되고 있고 최근 스마트폰에 적용되고 있는 터치스크린 디스플레이이 수요가 증가하고 있다.

스마트폰 터치스크린의 생산은 G1, G2 방식이 주를 이루고 G1 방식은 커버원도우

뒷면에 1개 층의ITO를 증착하고 ITO에 X, Y 센서를 패터닝하여 제조하는 방식이며 G2 방식은 커버윈도우 뒷면에 2개 층의 ITO를 절연체를 사이에 두고 증착하고 X, Y 센서를 각 층에 패터닝하는 방식이다.

국내 스마트폰의 수출량이 연간 1억대 이상, 세계적으로 연간 8억대 이상이 생산되고 있지만 생산 공정 중에서 G1F 방식의 경우 불량률이 10 ~ 20 %, G2 방식의 경우 30 % 가량으로 나타나고 있다. 이는 최대 30 % 기준으로 연간 2억 4천만대 가량의 불량품이 발생하는 것을 의미한다. 발생한 불량품은 전량 폐기 되고있는 실정이며 자원적, 경제적 낭비를 야기하고 있다. 제한된 자원의 절약과 생산단가의 절감을 위하여 터치스크린 패널에 사용되고 있는 투명전극의 보수(repair)에 관한 연구가 요구되고 있다.

3. 스퍼터링

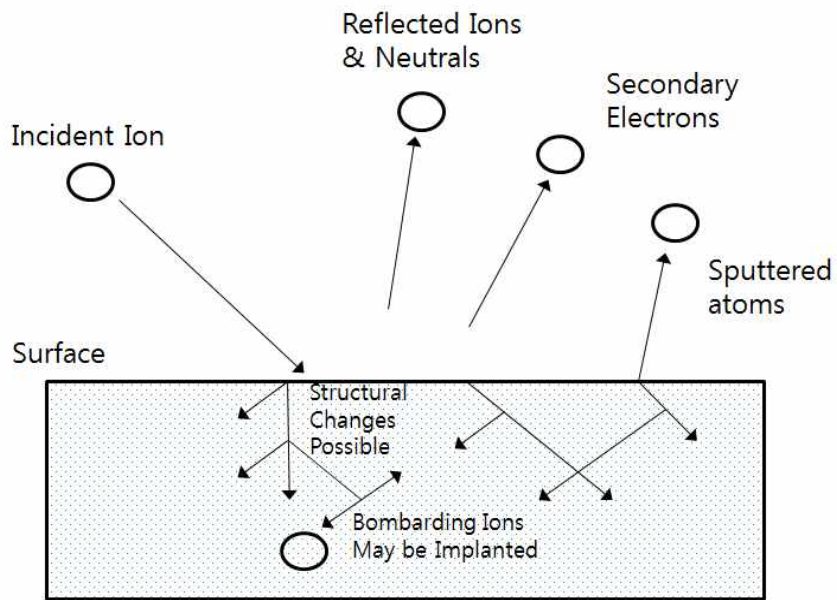
1) 스퍼터링

1852년 Grove에 의해 처음 발견된 스퍼터링(sputtering)현상은 여러 가지 박막형성에 다방면으로 활용되고 있다. 스퍼터링은 고에너지(20 ~ 30 eV 이상)의 입자가 target 표면에 입사되며 운동에너지를 target 표면 입자에 전달하고, 표면 입자의 결합에너지 이상 에너지를 받을 경우 표면의 입자가 방출되는 현상이다.

보통 스퍼터링에는 양이온을 사용하는데, 이는 양이온의 진장속이 용이하기 때문이다. 기체의 글로방전으로 인해 생성된 양이온은 음극강하전압을 통해 가속된 후 음극인 target 표면을 포격하고 target 표면 입자를 방출 할 뿐만 아니라 방전을 유지하기 위한 2차전자도 만들어 낸다. Fig. 2.에 입사 이온과 target의 방출 입자간 상호작용을 도식화 하였다. Target의 표면에 이온이 충돌할 경우 이온반사, 2차전자 방출, radiation damage, 스퍼터링 등이 발생하며, 이 밖에 기체원자의 탈착, 국부적 가열, X-ray 방출, 광자 발생, 화합물 형성이 있을 수 있다.

스퍼터링에는 주로 전원으로 직류(DC), 고주파(RF) 전원을 사용하고 있다. DC 전원을 이용한 스퍼터 증착에는 장치가 간단하지만, 합당한 증착률을 위하여 1 [mA/cm²] 이상의 이온전류를 필요하기 때문에 target 선정에 있어 금속과 반도체로 한정적이다. 반면 RF 전원을 이용하면 절연체 물질의 스퍼터 증착도 가능하다. 고주파수 전압을 절연체에 가해주면, target 표면에 자체바이어스 전위가 발생하고 이로 인해 이온이 target으로 가속된다. 하지만 전기 전도성 매질의 target을 사용하면 자체바이어스 전위가 발생하지 않기 때문에 전극을 띄우기 위해 자체바이어스 전위를 만들어 주어야 한다.

스퍼터링은 주로 불활성 기체인 아르곤(Ar)을 사용하고, 반응성 스퍼터링에는 금속 산화물이나 질화물같이 서로 다른 증발성을 가진 화합물을 증착시키는 경우 증착박막과 target의 조성이 다를 때가 있는데, 화합물의 분해로 산소와 질소와 같이 높은 증기압을 가진 성분이 증착된 박막 내에서 농도가 희박해지며 target의 조성이 바뀌기 때문에 이를 보완하기 위하여 높은 증기압을 갖는 반응성 기체로 산소(O₂), 수소(H₂) 등의 반응성 기체를 사용한다.



[Fig. 2] Interaction of ions with target surface

2) 마그네트론 스퍼터링

마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering)은 target의 이온화율을 증가시키기 위해 cathode에 영구자석을 장착시켜 전자가 target 주위의 자기장에 머무르게 하여 이온화를 지속시키는 방법으로, 스퍼터링이 집중적으로 발생하여 이온화를 유발 하여 증착율을 증가시키는 방법이다.

마그네트론 스퍼터링은 자장이 target 표면과 평행하여 전장에 대해서는 수직인 방향을 갖는다. 이로 인해 전자는 Lorentz 힘에 의한 선회운동을 하며 가속되기 때문에 나선운동을 한다. 따라서 전자가 target 주변을 이탈하지 못하도록 하기 때문에 target 주변 밀접한 곳에 플라즈마가 유지되고, target 주변 플라즈마 밀도가 높아지게 되어 이온화율이 증가한다. Fig. 3에 applied field 와 전자운동에 관하여 나타내었다.

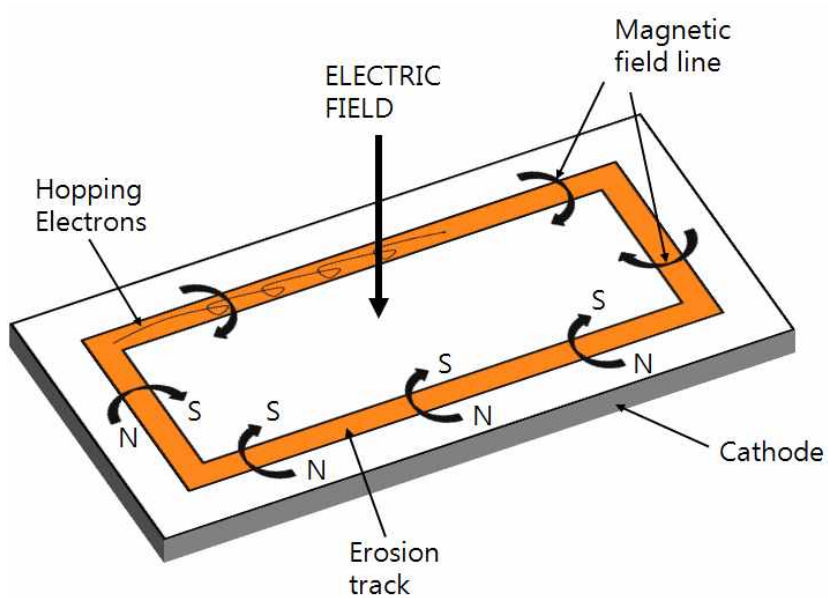
이온화율의 증가로 discharge 전류가 증가하며, 스퍼터 속도가 증가한다. 기판에 대한 전자의 충돌 감소로 인해 증착속도가 향상되고, 스퍼터가 가능한 압력도 감소시킬 수 있다. 50 배 가량 증착 속도를 향상 시킬 수 있으며, 증착 압력도 1 mTorr 까지 낮출 수 있다. 이 외 chamber 벽과 기판으로 부터의 스퍼터링이 감소하고 공정 중 기판가열 또한 감소한다.

앞선 장점들과 달리 마그네트론 스퍼터링은 target의 불균일한 소모가 단점으로 알려져 있다. Fig. 4은 target 불균일 손실에 대한 그림이다.

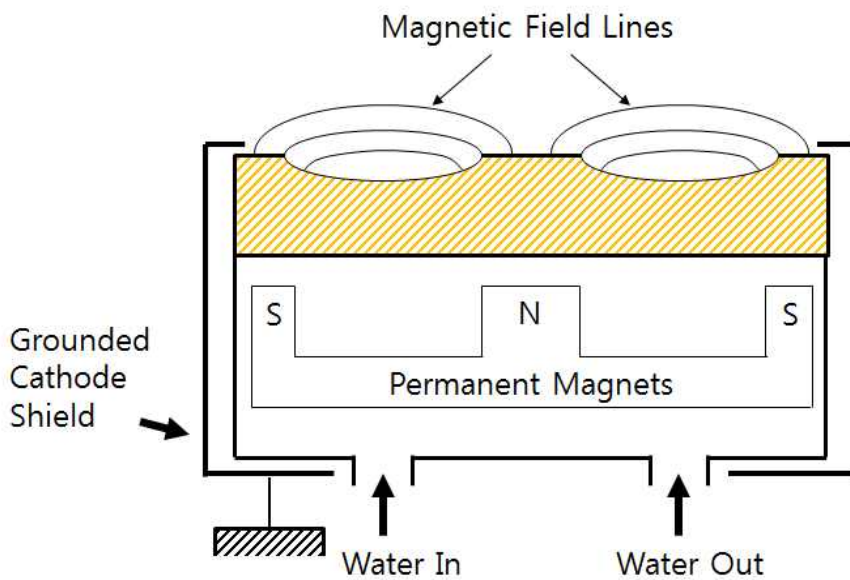
Fig. 4.의 그림과 같이 magnetron sputtering에서 target의 손실을 줄이고자 비평형 마그네트론 스퍼터링(Unbalanced magnetron sputtering: UBM)이 개발 되었다. 비평형 마그네트론 스퍼터링의 구성은 일반적인 마그네트론 스퍼터링과 같지만 내부와 외부의 자장의 세기가 다르다. 비평형 마그네트론 스퍼터링 장치의 자장은 자장과 전기장이 유사한 방향을 보여 전자가 자장을 따라 나선운동을 하며 기판을 향하게 된다.

비평형 마그네트론 스퍼터링은 장점은 이온화 에너지와 이온 유속을 독립적으로 조절 가능하기 때문에 증착 막의 미세구조와 공정변수간의 상관관계를 명확히 할 수 있다. 비평형 마그네트론 스퍼터링은 기판에 입사하는 전류밀도가 낮아 이온 충돌 효과를 증대시키기 위해 -1 ~ 500 V의 bias를 걸어주지만 bias 증가에 따라 공공은 작아지지만 입내 결합으로 잔류응력이 증가하여 접착력이 감소하고 막 품질이

나빠진다. 그러므로 이온 전류밀도를 증가시키고, bias voltage를 낮게 유지해 이온 에너지를 낮춰야 한다.[5]



[Fig. 3.] Applied fields and electron motion in planar magnetron



[Fig. 4.] Schematic of a magnetron target

3) 반응성 스퍼터링

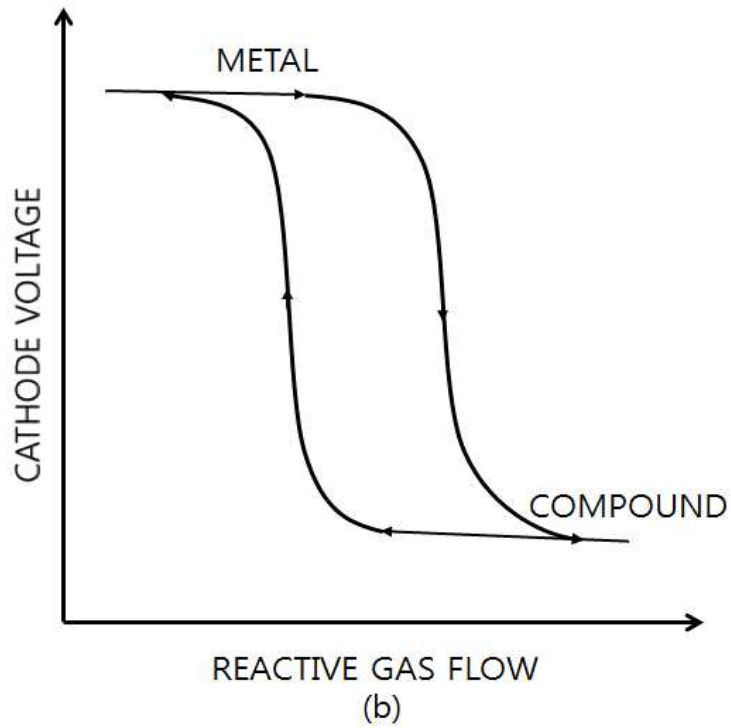
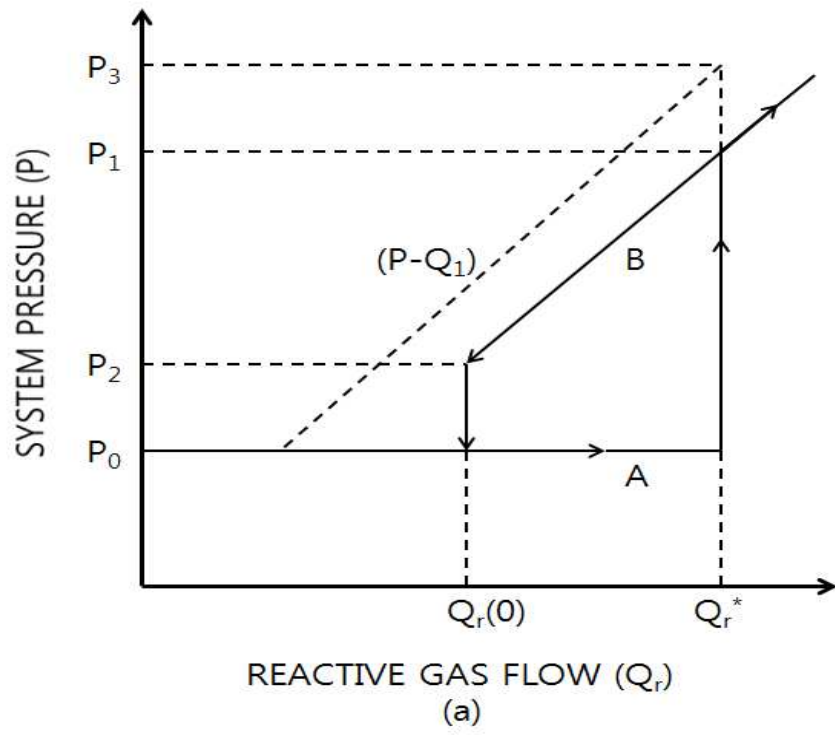
반응성 스퍼터링(reactive sputtering)은 금속 target의 공정 스퍼터링 과정에서 불활성 기스와 반응성 기스를 동시에 주입함으로써 화합물 박막 형성에 주로 이용된다. Table. 1.에 반응성기스에 대한 형성 박막을 나타내었다.

<Table. 1> Formed film to reactive gas

반응성 기스	박막
Oxides (oxygen)	Al ₂ O ₃ , In ₂ O ₃ , SnO ₂ , SiO ₂ , Ta ₂ O ₅
Nitrides (nitrogen, ammonia)	TaN, TiN, AlN, Si ₃ N ₄
Carbides (methane, acetylene, propane)	TiC, WC, SiC
Sulfides (H ₂ S)	CdS, CuS, ZnS
Oxycarbides and oxynitrides of Ti, Ta, Al, Si	

반응성 스퍼터링 과정에서 박막은 반응성 기스 입자가 섞여있는 고용체 합금 또는 화합물 그리고 이 둘의 혼합물 형태로 형성된다. Westwood는 박막이 합금 혹은 화합물이 되는지 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Fig. 5.에서 보듯이 반응성 기스의 주입량에 따른 증착 압력과 cathode 전압에 hysteresis가 나타난다. Q_r 이 반응성 기체의 유량, Q_i 가 불활성 기스이다. 펌핑 속도가 일정하면 Q_r 이 $Q_r(0)$ 에서 증가할 때 증착압력은 P_0 로 남아있게 된다(A 상태). 이는 반응성 기스가 금속과 반응하여 모두 증착되기 때문이다. 하지만 Q_r 이 임의의 임계값 Q_{r*} 를 넘게 되면 증착압력이 P_1 으로 변한다. 여기서 Q_r 이 감소하면 증착압력은 반응성 기스의 유량에 따라 선형으로 감소하다 P_0 가 된다(B 상태). 이처럼 hysteresis가 존재하는 이유는 A 상태와 B 상태가 현격히 다르기 때문이다. A 상태에서 반응성 기스가 모두 증착에 이용되기 때문에 Q_r 의 증가에 따라 박막내 반응성 기스의 양도 증가한다. A 상태에서 B 상태로 천이는 박막 형성에 사용되고 남은 반응성 기스가 target과 반응해 화합물을 생성하기 때문이다. Target 표면이 화합물로 도포되면 금속 target이 아니라 화합물 target으로 변환되어 반응한다. 이로 인해 반응성 기스는 더 이상 박막 증착에 소모되지 못해 챔버 내에 잔류하기 때문에 Q_r 이 감소하며, 증착압력도 감소한다. 화학양론적 박막은 반응성 기스 유량이 Q_{r*} 부근일 때 얻을 수 있다.

화합물이 금속보다 이온에 의한 2차 전자의 발생이 많이 일어나기에 cathode 전압은 화합물에서 더 낮아진다. Fig. 5.에 반응가스 유량에 따른 cathode 전압의 변화를 증착압력에 대해 나타내었다.[6]



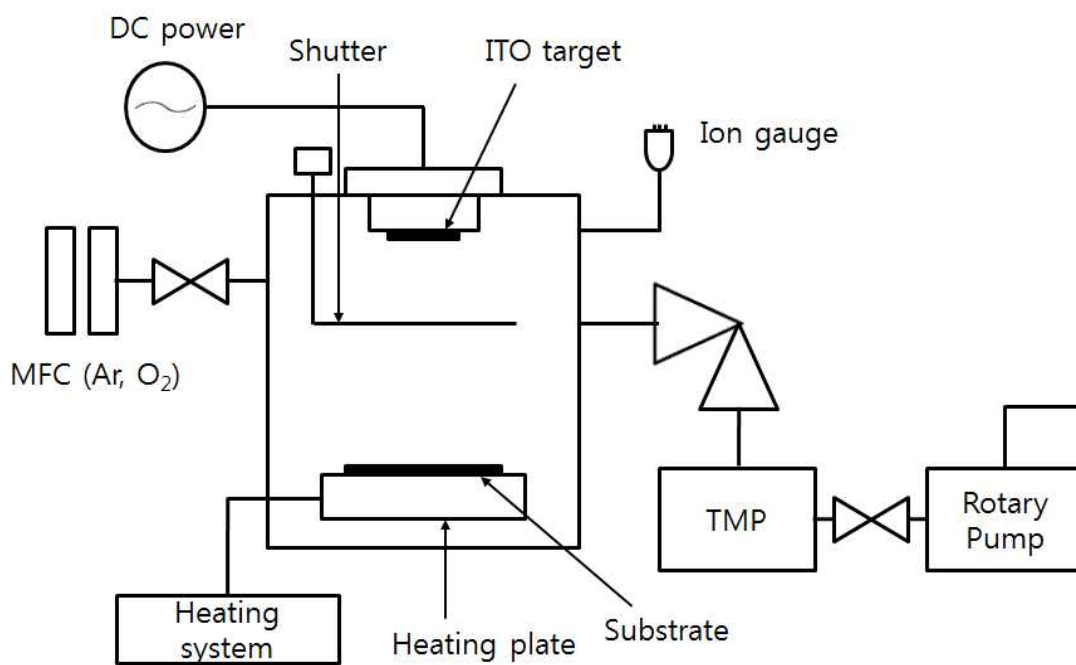
[Fig. 5] Hysteresis curve in reactive sputtering
 (a) pressure vs reactive gas flow rate,
 (b) cathode voltage vs reactive gas flow rate

Ⅲ. 실험장치 구성 및 방법

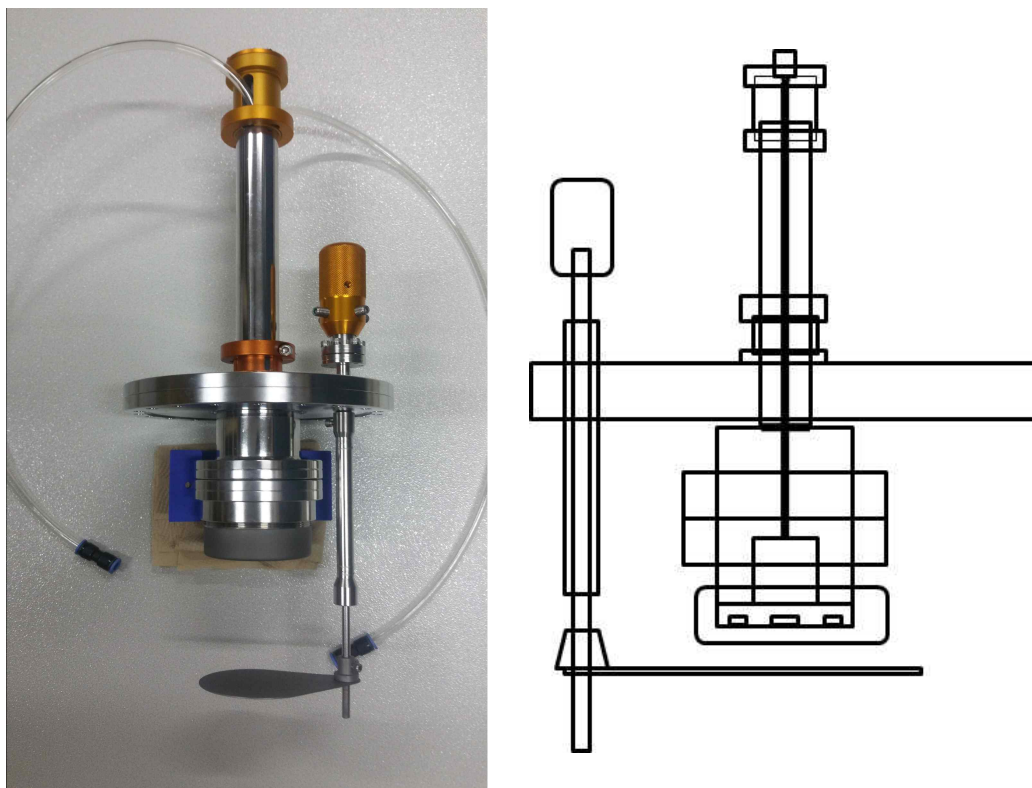
1. Magnetron sputtering system의 구성

본 연구에서는 마그네트론 스퍼터링을 이용한 ITO 박막의 증착을 위해 Fig. 6.과 같은 진공 시스템을 이용하였다. 지름 30 cm, 폭 30 cm의 원통형 챔버를 활용하였고, 코리아바쿰테크(주)에서 제작된 마그네트론 스퍼터건이 챔버 상단에 위치하였다 (Fig. 7). 진공시스템 하단에는 시편장착 및 시편의 가열을 위해 제작된 heating plate로 구성하였다. 마그네트론 스퍼터건의 DC power source로는 최대출력 1000 W 까지 가능한 (주)피에스프라즈마의 DC power supply(SDC1022A)를 사용하였다. 진공 시스템의 진공펌프는 550 L/min 의 배기능력을 가진 로터리 베인 펌프(Rotary vane pump; KODIVAC 550)와 345 L/s 의 배기능력을 가진 터보 분자 펌프(Turbo molecular pump; TMP361)를 사용하여 챔버 base pressure가 10^{-6} torr 이하로 가능하게 하였다. 진공도 측정을 위하여 이온게이지를 사용하였다.

박막제작에는 방전 기본 기체로 Ar, 반응가스로 O₂를 사용하였다. 진공시스템의 용적, 진공펌프의 용량 등을 고려하여 Ar 유량의 조절을 위해 max flow 100 sccm의 mass flow controller와 반응 가스 O₂의 미세 컨트롤이 가능하도록 max flow가 10 sccm인 mass flow controller를 사용하였다.



[Fig. 6] DC Magnetron sputtering system



[Fig. 7] Magnetron sputter gun

2. ITO 박막 증착조건 및 시편준비

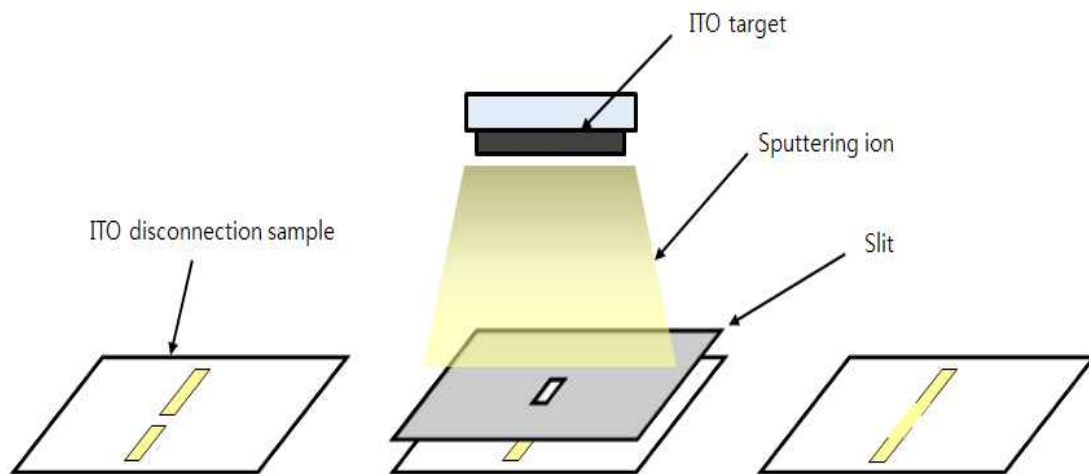
본 연구에서는 직경 2 inch, 두께 1/4 inch 크기의 순도 99.99 %의 ITO target을 DC power를 사용한 마그네트론 스퍼터링법으로 박막을 증착하였다.

진공 시스템의 base pressure가 1×10^{-5} 이하가 되면 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하여 Ar, O₂ 혼합 가스를 40 sccm 주입하였다. 3.5×10^{-3} Torr 정도의 압력이 되면 shutter를 이용하여 target의 오염제거와 증착시 조성을 일치시키기 위하여 5분간 pre-sputtering을 선행하였다. Sputtering 증착 변수로는 DC power의 변화에 따른 변수, 증착 시 Ar과 O₂의 혼합가스에서 O₂의 함량에 따른 변수, Heating plate를 이용하여 증착 시 기판온도에 따른 변수를 설정하여 실험을 진행 하였다.

우선적으로 cover glass를 이용하여 대면적 실험을 진행하였다. cover glass 시편의 크기는 20 × 20 mm이며, 시편 세척은 acetone 5분, ethanol 5분, DI water에 5분 세척, 50 °C 열화 건조 후 시편을 사용하였다. 대면적 증착에서 얻어진 최적 변수를 이용하여 printing 되어진 ITO 단선 시편을 이용하여 수리 실험을 진행하였다.

3. Slit을 이용한 단선 수리

단선된 ITO 전극 위에 slit을 두어 부분적으로 증착 실험을 진행하였다. Glass표면 위에 wet etching을 통하여 단선된 sample을 제작하였으며, 단선부 위에 DC magnetron sputter법을 이용하여 부분 증착하였다. 부분증착은 압력 3.5 Torr, DC power 180 W, 혼합가스 Ar(39 sccm), O₂(1 sccm), 기판의 온도 200 °C의 조건에서 수행하였다. 부분증착 시 ITO입자의 산란을 방지하기 위해 시편과 밀착시켜 진행하였다. Fig. 8에 부분증착에 대한 개념도를 나타내었다.



[Fig. 8] Concept of the ITO disconnection repair

4. ITO 박막 특성 평가

1) 면저항 측정기 (4-point probe, K-503RX100, Kyowariken)

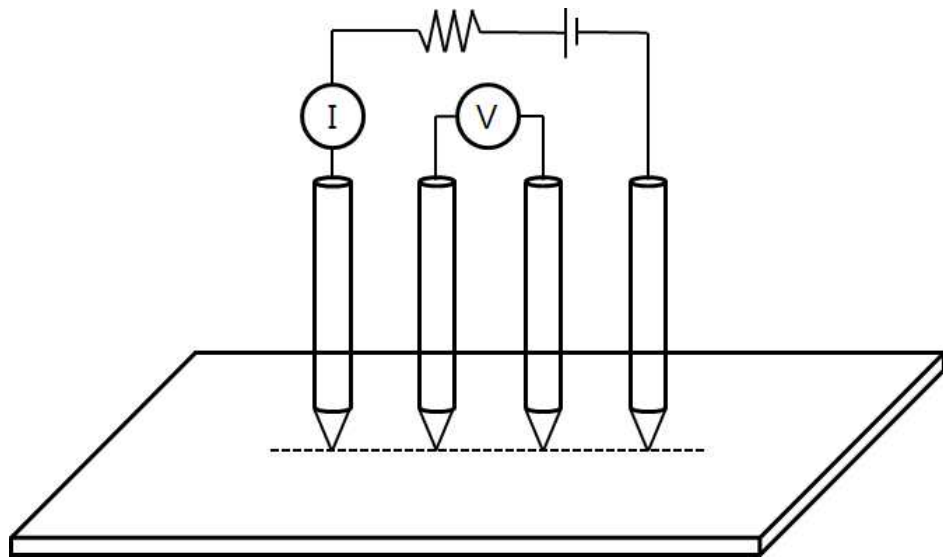
시편에 증착된 ITO의 면저항을 파악하기 위해 4-point probe를 사용하였고, Fig. 8에 나타내었다. 4-point probe는 4개의 바늘형태의 전극을 이용해 측정하며 두 전극 접촉사이에 놓인 금속 막의 저항은

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (5)$$

으로 주어진다. S는 막의 단면적, l은 길이, ρ 는 비저항이다. Fig. 8.에서 나타내듯이 4개의 바늘형태의 전극이 시편 위에 직선적으로 위치하게 된다. 저항을 측정하기 위해서는 2개의 외부 탐침사이 전류와 내부 2개의 탐침 간 전위차가 측정되어야 한다. 이를 통하여 측정되어진 저항에 시료 두께와 보정계수(Correction Factor: CF)를 곱하면 체적 비저항을 구할 수 있다. 4-point probe는 측정 절차 과정이 단순하고 용이하여 4-terminal 방법과 같이 따로 전극을 형성하지 않아도 되어 더욱 효율적이다.

2) UV-VIS Spectrophotometer (S-3100, sino Inc.)

ITO 박막 품질 선정에 중요한 가시광 투과도를 측정하기 위하여 UV-VIS-NIR Spectrophotometer를 사용하여 파장에 따른 ITO 박막의 가시광 투과도를 측정하였다. 200 - 800 nm 파장영역에서 광투과도를 측정하였다.

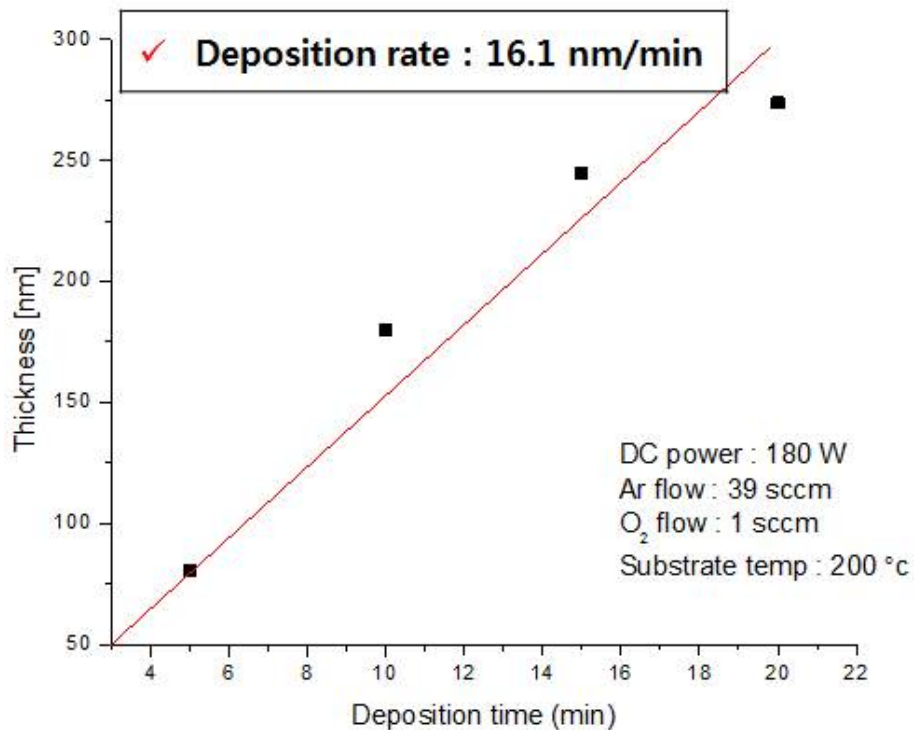


[Fig. 9] 4-point probe methode

IV. 실험 결과

1. DC power에 따른 ITO 박막 증착율

마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 ITO 박막을 증착하였다. DC power 180W를 인가하여 5분, 10분, 15분, 20분 증착시간의 변화를 주어 증착하였을 때 박막 두께 변화를 Fig. 10.에 나타내었으며, 시간의 변화에 따른 박막 두께의 선형적 증가를 확인할 수 있었다. 이를 통하여 얻은 증착율은 16.1 nm/min 이었다. 본 연구에서는 증착 시간을 5분으로 유지하여 80 nm 정도 두께의 ITO 박막을 증착하여 진행하였다.



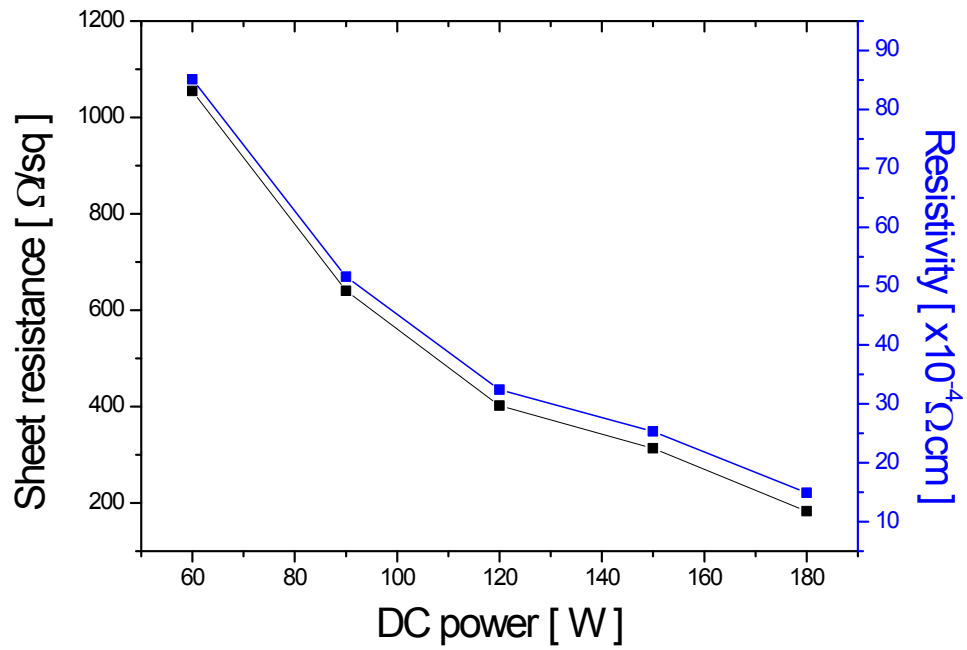
[Fig. 10] Thickness dependence on deposition time

2. 인가전력(DC power)에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성

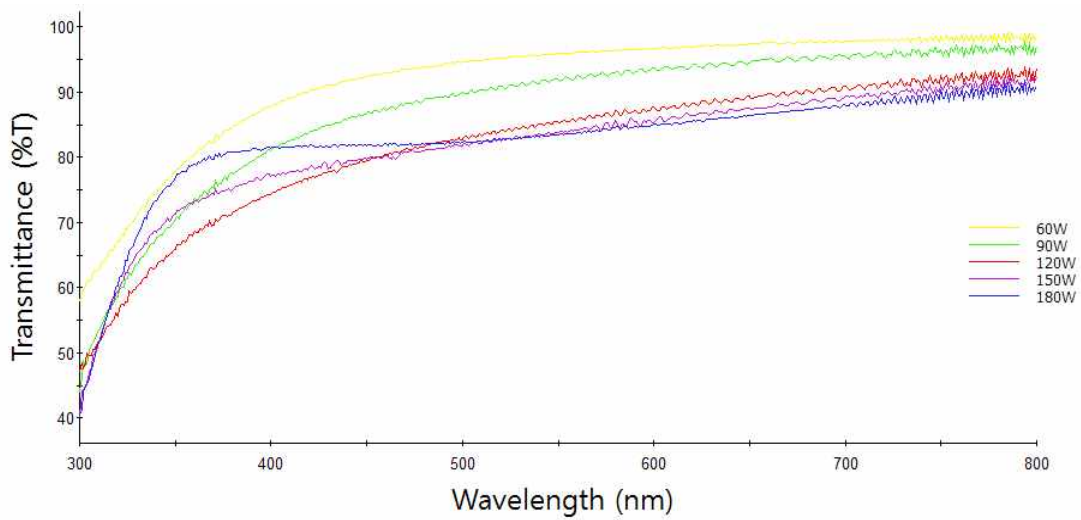
Fig. 11.는 DC magnetron sputtering system을 이용하여 20×20 mm cover glass 시편위에 인가전력(DC power)의 변화에 따라 증착한 ITO 박막의 전기적 특성을 나타낸 그래프이다. 혼합가스 유량을 40 sccm(Ar; 39 sccm, O₂; 1 sccm), 시편의 온도를 200 °C, 증착시간을 5 min 으로 고정하였고 인가전력을 60 ~ 180 W변화시켰다.

인가전력 60 W조건에서 ITO 박막은 1,054.86 Ω/□의 면저항과 8.513×10^{-3} Ω·cm의 비저항을 나타내었다. 이후 인가전력을 증가시키며 전기적 특성이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다. 이를 통하여 DC power 180 W를 인가하였을 때 183.02 Ω/□의 면저항과 1.477×10^{-3} Ω·cm의 비저항을 보여 가장 좋은 전기전도성을 보였다. 이와 같은 전기전도도의 향상은 인가전력의 향상에 따라 스퍼터율의 증가로 인한 박막형성 속도증가에 따른 전기적 특성 향상으로 생각된다.

Fig. 12.에는 인가전력 변화에 따른 ITO 박막의 광투과도에 대한 그래프를 나타내었다. Fig. 12.를 보면 인가전력의 증가에 따라 광투과도가 감소하는 경향을 확인할 수가 있다. 이는 인가전력이 증가함에 따라 성막의 증가로 인하여 광투과도가 감소하는 것으로 보이며, 120 W에서 180 W로 인가전력의 증가함에 따라 미세한 증가추세를 보이는 것은 인가전력의 증가로 고에너지 입자와 박막간의 충돌로 인한 박막의 밀도 증가로 인한 것으로 보인다.



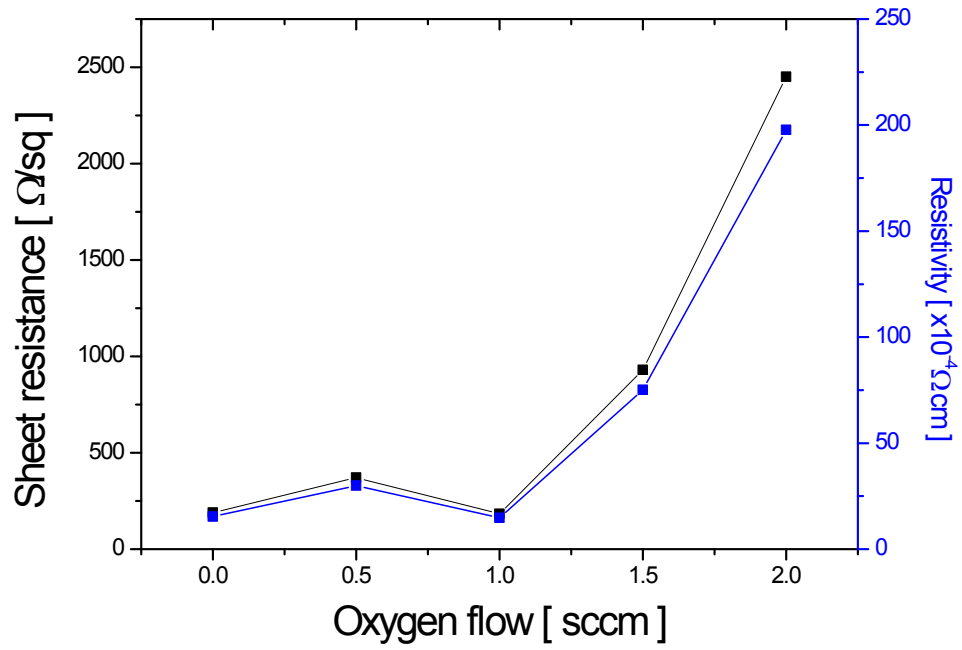
[Fig. 11] Sheet resistance of ITO film with DC power



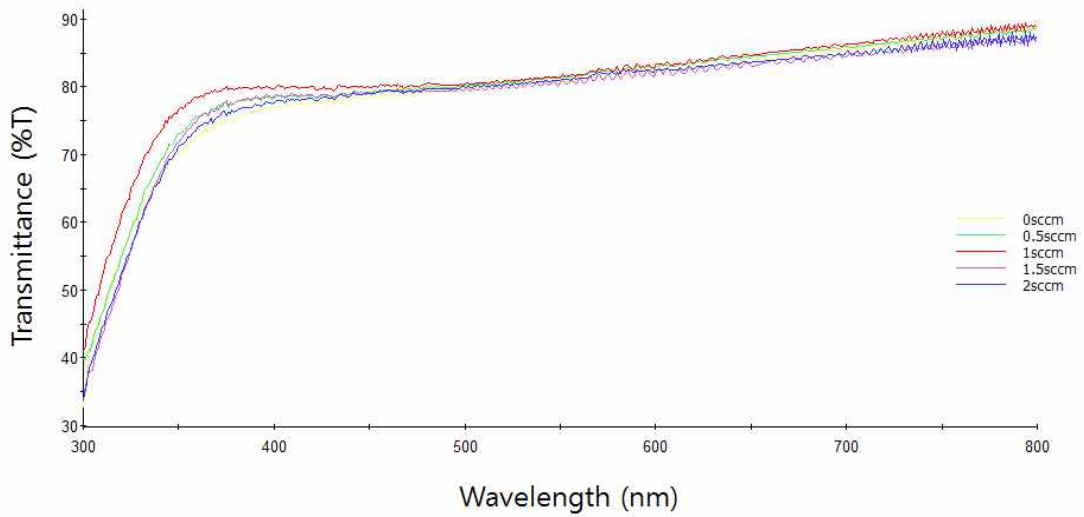
[Fig. 12] Transmittance of ITO film with DC power

3. 산소유량 변화에 따른 ITO 박막의 전기적 특성

DC magnetron sputtering을 이용한 ITO 증착 시 반응성 가스 도입량의 변화를 통한 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 13.는 산소도입량의 변화에 따른 ITO 박막의 전기적 특성 변화를 나타낸 그래프이다. 인가전력 DC power를 180 W, 기판온도를 200 °C로 고정하여 진행 하였고, 혼합가스의 총 유량을 맞추기 위하여 Ar 가스의 유량을 38 ~ 40 sccm으로 변화시켰다. 변수로 사용된 산소도입량을 0 ~ 2 sccm사이에서 변화시켰고 산소도입량이 1 sccm 일 때 면저항 183.02 Ω/\square , 비저항 $1.477 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 으로 가장 높은 전기전도특성을 보였다. 산소유량이 0 sccm에서 1 sccm까지 변화 시켰을 때 전기적 특성은 미세한 변화를 보이고 1.5 sccm부터 저항이 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 ITO 스퍼터링 증착 시 산소도입은 스퍼터링 과정에서의 ITO target의 산소 손실을 보충하기 위해 행해진다. 하지만 과다 산소 도입은 오히려 산소공공을 채우게 되며 ITO 박막의 저항을 증가시킨다. 산소도입량을 1 sccm이상 도입하였을 때 잉여산소의 생성으로 인하여 저항이 증가한 것으로 보인다.



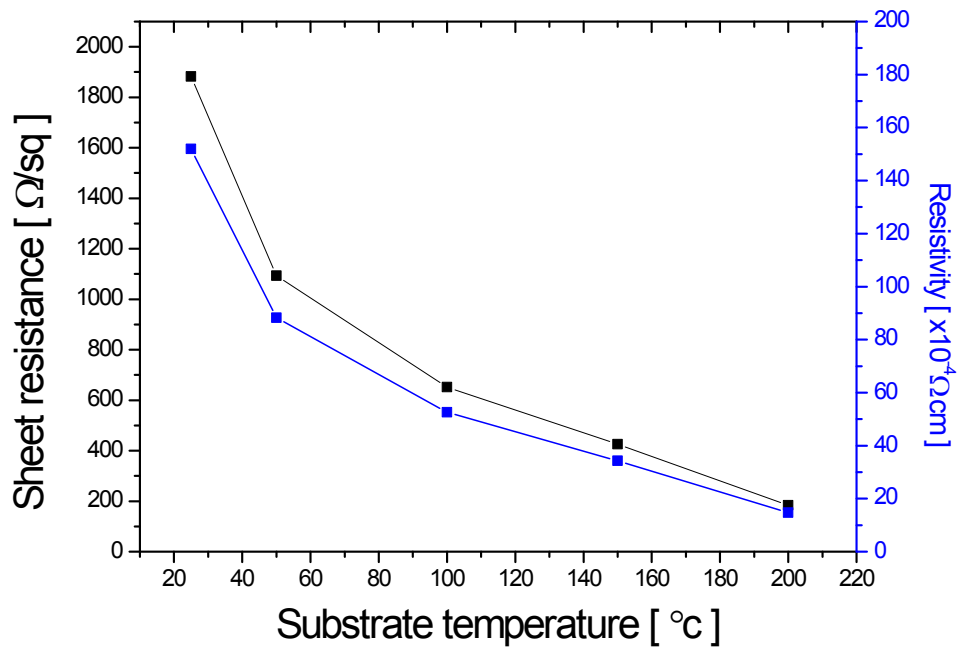
[Fig. 13] Sheet resistance of ITO film with Oxygen rate



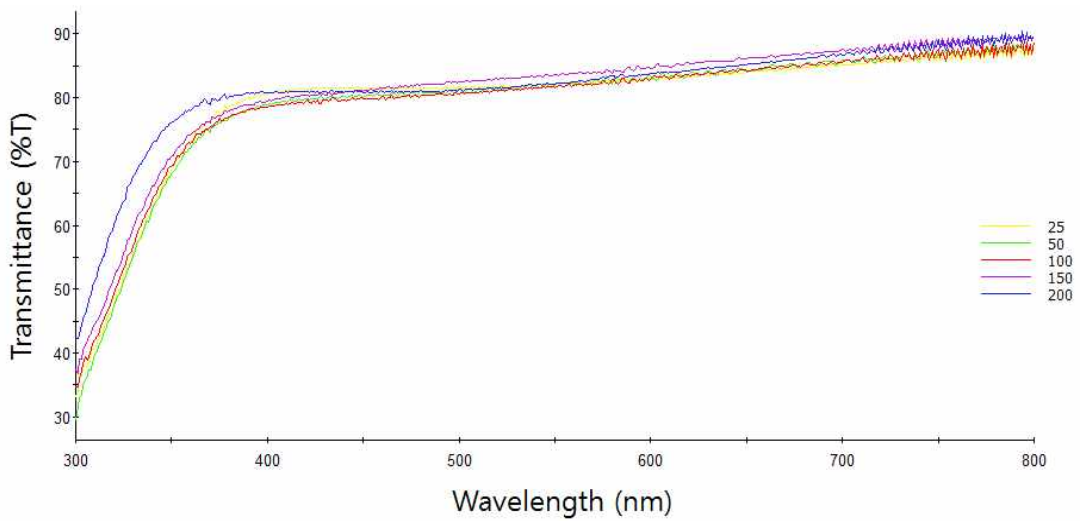
[Fig. 14] Transmittance of ITO film with Oxygen rate

4. 기판 온도 변화에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성

ITO 스퍼터링 증착 시 기판 온도에 따른 ITO 박막의 전기적 특성을 확인하고자 기판의 온도를 변화시켜 박막 증착을 진행하였다. 인가전력을 DC power 180 W, 혼합가스의 유량을 Ar 가스를 39 sccm, O₂ 가스를 1 sccm으로 고정 후 실험을 진행하였다. Fig. 15.에 기판온도 변화를 25 ~ 200 °C로 변화시켜 진행한 결과를 그래프로 나타내었다. 상온인 25 °C에서 전기적 특성은 면저항 1,882.62 Ω/□, 비저항 1.519×10^{-2} Ω·cm를 얻을 수 있었고 기판의 온도를 증가시켜 온도가 200 °C일 때 최저 면저항 183.02 Ω/□, 비저항 1.477×10^{-3} Ω·cm을 얻을 수 있었다. Fig. 16.에 기판 온도 변화에 따른 광학적 특성변화에 대한 그래프를 나타내었다. 기판의 온도가 증가함에 따라 광투과도가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 기판의 온도를 가열하면서 보이는 전기적, 광학적 특성의 변화는 기판을 가열하면서 박막 형성이 비정질 형성에서 결정질의 박막형성이 되고 밀착력이 향상되어 기판의 온도가 상승하며 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성의 향상을 보인다.



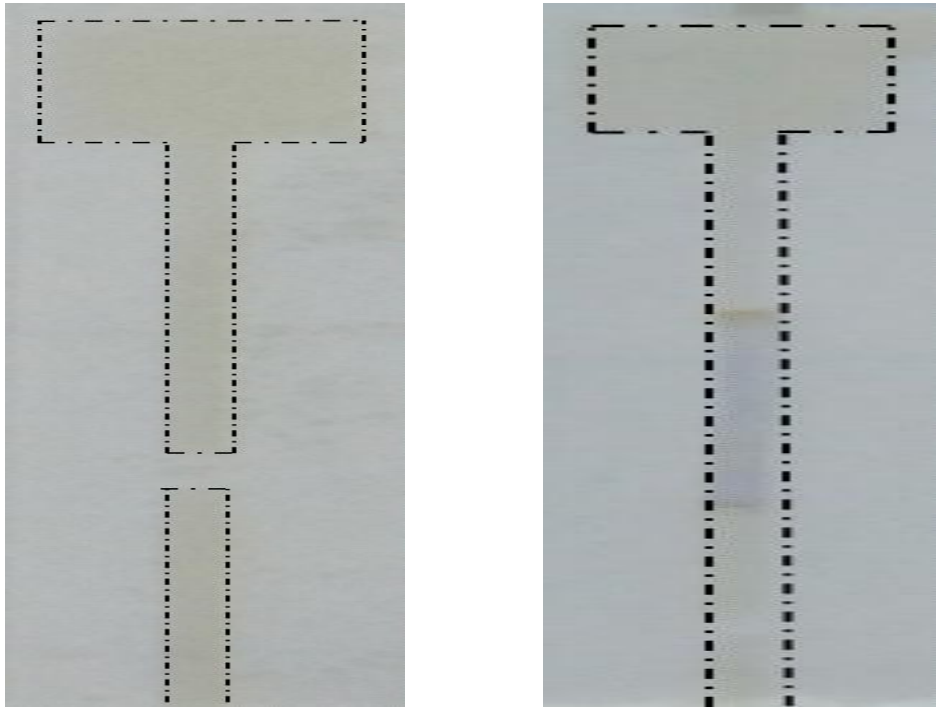
[Fig. 15] Sheet resistance of ITO film with substrate temperature



[Fig. 16] Transmittance of ITO film with substrate temperature

5. Slit을 이용한 ITO 전극 수리

Slit을 이용하여 ITO 전극 수리를 수행하였다. 앞선 실험에서 얻은 최적의 ITO 박막 특성을 통하여 실험을 진행하였다. 공정 압력 3.5 Torr, DC power 180 W, 혼합가스 Ar(39 sccm), O₂(1 sccm), 기판온도 200 °C의 조건에서 부분증착 하였다. Fig. 17에 부분증착을 통한 수리된 전극을 나타내었으며, 전극 특성상 자세히 보이지 않아 점선을 이용해 가이드라인을 그려 넣었다. 수리된 전극은 저항측정기를 통하여 960 Ω의 저항을 측정 할 수 있었으며 이를 통하여 전극의 수리 유무를 확인할 수 있었다.



[Fig. 17] Repair of the ITO electrode

IV. 결론

본 연구에서는 ITO 터치패널의 수요증가에 따라 생산과정에서 발생하는 불량 ITO 투명전극의 단선 수리 후 재활용을 위한 기술 개발에 대한 연구를 진행 하였다. 불량 ITO 전극의 단선/교차결합을 확인하고 slit을 이용한 부분증착을 통하여 ITO 투명전극 단선을 수리함에 목적을 두고 DC magnetron sputter법을 사용하여 우선적으로 대면적 ITO 박막 증착 후 전기적, 광학적 특성을 4-point probe, UV-VIS spectrophotometer를 이용하여 파악하였다. 첫 번째 실험으로는 인가전력의 변화에 따라 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성을 연구하였다. 최저 전력 60 W에서는 $1,054.86 \Omega/\square$ 의 면저항과 $8.513 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 나타내었다. 이후 인가전력을 180 W까지 증가 시켰을 때, ITO 박막은 $183.02 \Omega/\square$ 의 면저항과 $1.477 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 보여 가장 좋은 전기전도성을 보였다. 인가전력의 증가에 따라 스퍼터율의 증가로 박막 형성속도 또한 증가하여 ITO 박막의 전기적 특성이 향상되는 것을 확인 할 수 있었고, UV-VIS spectrophotometer를 이용한 광투과도 측정은 인가전력의 상승에 따라 박막의 투과도가 감소하는 경향을 보이다 미세한 증가추세를 보였다. DC 마그네트론 스퍼터링시 인가전력의 상승은 박막 형성의 증가를 불러오고 이로 인하여 ITO 박막의 광투과도는 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 150 W 이상에서 스퍼터링된 고에너지 입자의 경우 박막의 밀도를 증가시켜 미세한 광투과도 향상을 일으켰다. 두 번째 실험은 혼합가스에서 도입 산소의 유량을 변화시켜 도입산소량에 따른 박막의 전기적, 광학적 특성을 확인 하였다. 혼합가스의 총량을 고정하고 O₂ 가스의 유량을 0 ~ 2 sccm으로 변화시켰다. ITO 박막의 전기적 특성이 1 sccm을 기점으로 큰 변화폭을 보였다. 급격한 저항의 증가는 미량의 산소 도입의 경우 스퍼터과정에서의 산소손실을 보충해 주지만 과포화 산소는 ITO 내부 산소공공의 수를 저하시켜 전하 캐리어의 이동도를 저하시키기 때문이다. 세 번째 실험에서는 기관의 온도를 변화에 따른 ITO 박막의 전기적, 광학적 특성을 파악하였다. 가열하지 않은 ITO 박막은 면저항 $1,882.62 \Omega/\square$, 비저항 $1.519 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 의

값을 얻을 수 있었고, 기관의 온도를 증가시키며 저항의 감소를 확인 할 수 있었다. 200 °C에서 최소 면저항 183.02 Ω/□, 비저항 $1.477 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 을 얻을 수 있었다. 기관을 가열함으로써 박막의 결정성과 박막 밀착력의 상승을 통하여 전기전도도의 상승을 확인 할 수 있었다. 광투과도 또한 기관의 온도의 증가를 통하여 향상되는 것을 확인 할 수 있었다. 기관을 가열을 통하여 저온에서 비정질의 박막 형성이 고온에서 결정질의 박막을 형성함으로써 광투과도를 향상 시켰다.

Slit을 이용한 ITO 전극 수리에는 앞선 실험에 대한 결과를 토대로 변수를 선정 실험을 진행 하였으며, 저항측정기를 통하여 수리된 전극의 저항치 960 Ω을 얻을 수 있었다. 이로 통하여 ITO전극이 단선되어 흐르지 않던 전류가 흐르는 것을 확인 할 수 있었고, slit을 이용한 부분증착에 의한 전극 수리가 가능함을 확인 할 수 있었다.

연구를 통하여 조건에 따른 박막의 전기적, 광학적 특성을 파악 할 수 있었으며, slit을 이용하여 단선된 ITO 전극을 수리 할 경우 수리부분 박막의 특성을 유추 할 수 있었다. 이를 통하여 ITO 단선 수리 기술 개발에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

REFERENCE

- [1] 박미량, “마그네트론 스퍼터링법으로 증착한 유연성 표시소자용 ITO 박막의 물성연구”, 부산대학교 공학석사 학위논문
- [2] 김용남, “균일침전법에 의한 ITO 나노분말 제조 및 ITO 박막의 열화 특성에 관한 연구
- [3] Tania Konry, Robert S. Marks, Thin Solid Film 492 (2005) p.313-321
- [4] S. Ishibashi, Y. Higuchi, Y. Ota and K. Nakamura, J. Vac. Sci. Technol. A, 8(1990)
- [5] H. Enoki, J. Echigoya and H. Suto., J. Mater. Sci., 26, 1991, pp.4110-4115
- [6] B. W. Lee, J. kor. Ceram. Soc., 35(4), 385(1998)
- [7] W. J. Jeong, G. C. Park, and Y. T. Yoo, J. sensor., 4(2), 385(1998)
- [8] 조명희, “마그네트론 스퍼터링 증착법에 의한 TiO₂ 박막의 형성 및 특성 평가”, 동의대학교 공학 석사 학위논문
- [9] 허창우, “ITO 박막의 DC 마그네트론 스퍼터링 진공 증착”, 한국해양정보통신학회논문지 제14권 제4호
- [10] 이석열, 최재하, 김지수, 정재학, 이임수, 김재열, “저온 스퍼터링법으로 증착된 ITO박막의 온도 변화에 따른 구조, 표면 및 전기적 특성, 한국진공학회지. 제20권 1호. (2011), pp30-34
- [11] 이현준, “고품질 ITO, ITO:Ga 및 IZO 투명전도성산화물 박막 제조 및 물성평가”, 부산대학교 공학석사 학위논문
- [12] 이진우, “펄스 마그네트론 스퍼터링을 이용한 ITO 박막 증착에 대한 연구”, KAIST, 공학석사 학위논문
- [13] 안민형, “터치패널용 ITO/PET film 기술에 관한 연구”, 경원대학교, 공학박사 학위논문
- [14] K. Badeker, Ann. Phys.(Leipzig), 22 (1907) p.749
- [15] Cairns, D. R., R. P. Wittell, K. K. sparacin, S. M. Sachsman, D. C. Paine, G.

- P. Crawford and R. R. Newton, *Appl. Phys. Letters* 78(11) (2000) p.1425-1427
- [16] M. J. Matthewson, C. R. Kurkjian, and S. T. Gulati, *Journal of the American Ceramic Society* 69(11) (1986) p.815-821
- [17] Y. Leterrier, Piet Bouten, Xin Jiang, FLEXled, IST-2001-34215, September (2002)
- [18] 이희영, 이원재, “투명전도성 세라믹스 박막의 제조방법과 물성”, *The Monthly Magazine for Ceramics*, 16(4) (2003) p.76-79
- [19] Tania Konry, Robert S. Marks, *Thin Solid Films* 492 (2005) p.313-321
- [20] O. Bourbia, S. Achour, N. Tabet, M. Parlinska, A. Harabi, *Thin solid films*, 515, 6758 (2007)
- [21] M. Stowell, J. Muller, M. Ruske, M. Lutz, T. Linz, *Thin solid Films* 515 (2007) 7654

감사의 글

논문을 마무리하는 ‘감사의 글’을 쓰려고 하니 2년의 석사과정 기간 있었던 수많은 일들과 도움을 주셨던 분들이 떠오릅니다.

먼저, 많이 부족했던 저를 위해 항상 아낌없는 조언과 격려를 해주신 이현주 교수님께 진심어린 존경과 깊은 감사를 드립니다. 그리고 논문심사에서 아낌없는 조언을 해주신 유영훈 교수님, 친원기 교수님께도 감사를 드립니다. 또한 2년 동안 수업을 통한 많은 배움을 주신 최수석 교수님, 이연건 교수님, 김남진 교수님, 박재우 교수님께 감사드립니다.

플라즈마 연구실이라는 울타리 속에 후배들에게 격려와 조언을 해주신 지훈이형, 처음 아무것도 모르던 저에게 많은 것을 알려주셨던 상범이형, 민국이형, 힘든 순간 고민 상담과 함께 격려와 조언을 해주신 세민이형, 인제형, 투정, 짜증이 많았던 제 뒤에서 든든한 지원군이 되주었던 종근이형께 진심으로 감사드립니다. 그리고 부족하고, 잘해주지 못했던 선배지만 밑에서 잘 따라준 제원, 승울, 수연, 익준, 소원, 상현, 상윤, 민석, 다연에게 매우 고맙다는 말을 하고 싶습니다. 또한 다른 연구실이지만 고민상담, 조언을 해주셨던 영준이형, 영민이형, 바로형께 감사드립니다. 즐거운 일, 힘들일이 있을 때 마다 항상 씬터 같던 경호형, 용현이형 감사드립니다. 귀찮은 일, 쉬운일 마다하지 않고 잘 따라준 정환이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 2년이라는 시간동안 함께 즐겁고, 힘들었던 시간을 보낸 동재, 영규, 정민이에게 수고했다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 서로 멀리 떨어져 있지만 서로걱정하고 각자의 위치에서 최선을 다하며 열심히 달려가고 있는 친구들 민규, 기홍, 성대에게 고맙다는 말과 응원의 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 언제나 뒤에서 버팀목이 되어주고 힘들 때 씬터가 되어주는 가족, 항상 감사하고 사랑합니다. 저를 아껴주시고 사랑해주시는 모든 분들에게 이 논문을 드립니다.