

OLED용 ITO박막의 공정조건과 품질특성 추론에 근거한 품질관리

Quality Management of ITO Thin Film for OLED Based on Relationship of Fabrication and Characteristics

서 정 민, 박 근 영, 이 상 룡, 이 춘 영*

(Jeong Min Seo, Keun-Young Park, Sang-Ryong Lee, and Choon-Young Lee)

Abstract : Recently, research on a flat panel display(FPD) has focused on organic light-emitting display(OLED) which has wide angle of view, high contrast ratio and low power consumption. ITO(Indium-Tin-Oxide) films are the most widely used material as a transparent electrode of OLED and also in many other display devices like LCD or PDP. The performance and efficiency of OLED is related to the surface condition of ITO coated glass substrate. The typical surface defect of glass substrate is measured for electric characteristics and physical condition for transmittance and roughness. Since ITO coated glass substrate can be destroyed for inspection about surface roughness, sheet resistance, film thickness and transmittance, precise fabrication condition should be made based on the estimated relationship. In this paper, ITO films were prepared on the commercial glass substrate by the Ion-Plating method changing the partial pressure of gas(Ar, O₂) and the chamber temperature between 200°C and 300°C. The characteristics of films were examined by the 4-point probe, supersonic thickness measurement, transmittance measurement and AFM. We estimated the relationship between processing parameters(Ar gas, O₂ gas, Temperature) and properties of ITO films (Sheet Resistance, Film Thickness, Transmittance, Surface Roughness).

Keywords : OLED(Organic Light-Emitting Display), ITO(Indium-Tin-Oxide), linear regression model, ion plating

I. 서론

과거 디스플레이 시장을 주도해 온 CRT(Cathode Ray Tube)는 부피가 크고 무겁다는 단점 때문에 점차 사용하기 편리한 LCD(Liquid Crystal Display)로 대체되고 있으며, PDP (Plasma Display Panel)는 40인치 이상의 대화면 시장을 중심으로 보급률을 높여가고 있다. 하지만 LCD는 자체 발광형이 아니므로 별도의 광원이 필요하고 시야각, 응답 속도 등의 측면에서 한계를 지닌다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 새로운 평판디스플레이 기술로, 넓은 시야각과 대조비가 우수하며 백라이트가 필요하지 않기 때문에 경량박형이 가능하고 소비전력이 낮은 OLED(Organic Light-Emitting Display)가 전 세계적으로 활발하게 연구되고 있다. 이것은 직류 저 전압 구동이 가능하고 응답속도가 빨라 선명한 동영상 구현이 가능하며, 전부 고체이기 때문에 외부 충격에 강하고, 사용 온도 범위가 넓은 뿐만 아니라 특히 제조비용 측면에서도 저렴하다는 장점 때문이다. OLED용 애노드(anode)기판으로 보편적으로 사용되어지고 있는 ITO(Indium-Tin-Oxide) 투명도전박막은 유리기판 위에 박막을 형성하기 쉽고 우수한 광 투과 특성과 전기 도전성을 갖고 있으며, 이미지 센서, 자동차, 항공기 등의 발열유리, 조명 장치, 태양전지, 광 스위치 등으로 광범위하게 사용되고 있다[1-4].

박막을 제조하는 기술은 크게 물리적 방식을 이용하는 PVD(Physical Vapor Deposition)와 화학적 방식을 이용하는 CVD(Cheical Vapor Deposition)로 분류될 수 있다. PVD는 CVD에 비해 작업조건이 깨끗하고, 진공상태에서 전자 빔(electron beam), 레이저 빔(laser beam) 또는 플라즈마(plasma)를 이용하여 고체상태의 물질을 기체 상태로 만들어 기판에 직접 증착시키는 박막 제조방식이다. 다양한 ITO박막의 제조법 중에 있어 증착 조건의 제어가 쉽고 대면적 증착에 적합한 반응성 DC 스퍼터링(sputtering)이 디스플레이용 ITO 박막의 제조에 가장 많이 사용되고 있다 [2,7,8]. 현재 일반적으로 사용되고 있는 스퍼터링의 경우 성장속도가 늦으며 박막의 불균일성, 그리고 이로 인한 손상(damage)발생이 문제시되어지고 있다.

본 논문에서는 이온 플레이팅(ion-plating)법을 이용하여 ITO 투명전도성 박막의 표면을 양질의 상태로 얻기 위해 운전파라미터와 ITO 투명전도성 박막의 품질과의 상관관계를 분석하고 추론하는 것을 목적으로 한다. 먼저항 측정기로 ITO 투명전도성 박막 코팅유리의 면저항(Surface Resistance)을 측정하고 AFM(Atomic Force Microscopy) 측정을 통하여 표면 조도값을 얻어 운전파라미터들과 ITO 품질과의 상관관계를 분석하였고 투과율을 통한 ITO의 광학특성 또한 분석하였다. 이 결과들로부터 박막형성에 필요한 평가 파라미터들과 운전 파라미터 사이의 상관 매트릭스를 구하여, 생산 공정에서 필요한 요구조건에 따른 운전 조건을 설정할 수 있도록 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II절에서는 배경 이론에 대해서 설명 하고 III절에서는 실험장치와 측정방법

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 1. 31., 채택확정 : 2008. 2. 24.

서정민 : LG전자 연구원(seo0818@paran.com)

박근영, 이상룡, 이춘영 : 경북대학교 기계공학과
(geniusca@knu.ac.kr/srlee@knu.ac.kr/kylee@knu.ac.kr)

에 대해 기술하며, IV절과 V절에서는 실험을 통해 얻은 결과와 박막형성 관계 추론에 대한 내용을 다루고 마지막 VI절에서는 결론과 추후 연구과제를 기술한다.

II. 배경이론

OLED(Organic Light Emitting Display)는 유기 물질(organic material)에 전기(electricity)를 가해서 발광(luminescence)하도록 하는 소자를 말한다. OLED 디스플레이는 유리기판(glass substrate)위에는 여러 가지 물질이 적층되는데 이들의 양호한 증착과 작동을 위해 기판의 우수한 표면조건을 확보해야 한다.

ITO(Indium Tin Oxide) 박막은 현재 가장 많이 사용하고 있는 투명 전도성 박막이다. ITO가 디스플레이용 유리의 박막으로 사용되어지는 이유는 낮은 비저항, 유리 기판에 대한 강고한 부착력, 높은 투명도, 적절한 내약품성, 전기·화학적 안정성 등에 기인한다. ITO 투명전도성 박막의 비저항치는 다른 투명전도성 물질(예: SnO₂, ZnO막)의 비저항치의 1/2 이하 즉, 2.0×10⁻⁶Ωm 정도로 현저히 낮은 값을 가진다. 그리고 ITO는 강력한 부착력을 가지는 것으로 알려진 TiO₂와 금속크롬막과 동등한 부착력을 가진다. 염화철계의 부식액(etchant)에서 수십에서 수백 Angstrom(Å)의 크기로 깨끗하게 용해된다. ITO막은 가시성 중앙부(사람의 시각도가 최고로 높음)에서 동일한 조건에서 투명도가 높기로 알려진 SnO₂막 보다 더 높은 투명성을 가진다. 뿐만 아니라 OLED에는 관측자의 투명전극에는 보다 많은 전류를 흐르게 하는 것이 가능한 ITO막이 사용되어지고 있다. 이런 ITO막은 PET film에 gas barrier막과 내용제성이 있는 얇은 film을 덧붙이게 한 것(luminant)에 ITO 코팅이 행해진다[9]. 일반적으로 ITO 박막은 스퍼터링(sputtering)에 의하여 형성된다. 현재 사용되는 LCD용 ITO 코팅 유리는 표면거칠기가 약 200Å정도로 상부에 유기물이 다층박막이 증착된다. 이렇게 생산된 OLED 소자를 제작시 층간 접목면의 두께 편차에 기인한 다크 스팟(dark spot)등이 발생되어 소자의 신뢰성을 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 표면형상이 비정질이고 표면 거칠기가 균일한 OLED전용의 ITO 코팅 유리가 개발되고 있다. OLED는 캐리어(전하와 전공) 주입방식에 의한 발광 소자이므로 유기물의 경계면으로 침투하는 캐리어의 주입효율이 소자의 특성에 큰 영향을 준다. 낮은 저항(Ω/□)과 균일한 표면 거칠기 그리고 투과도가 높은 ITO 박막을 양극으로 적용함으로써 소자의 특성을 향상시킬 수 있다.

ITO 박막은 투명 전도성 박막 중 최고의 전도도와 투명성을 가지며 화학적 식각이 용이하여 광전기 소자(LCD, LED 등), 태양전지의 투명전극 등에 이용되고 있다. 박막 증착의 종류는 크게 PVD(물리증착)와 CVD(화학증착)으로 분류할 수 있다. 현재 가장 많이 쓰이는 기술이 스퍼터링 방법으로 플라즈마를 형성한 다른 기체의 운동에너지를 이용한 방법이다. 이 방법은 치밀한 미세 조직을 갖는 박막을 형성하나 증착속도가 느리고 제조 공정상 particle이 생길 가능성을 가지고 있다. 또한 고분자기판에의 증착 시에 문제가 되는 기판과의 접착력도 문제시 되고 있다. 이외는 다

표 1. 스퍼터링과 이온 플레이팅 공정의 비교.

Table 1. Comparison of sputtering process & Ion plating process.

Item	Ion Plating	Sputtering	Merit of Ion Plating
Low resistivity	1.3~1.5μΩm (200℃)	1.6~2.0μΩm (200℃)	◎
High transparency	95~98% @λ550nm @t150nm	93~95% @λ550nm @t150nm	○
Fine structure and smooth surface(200℃)	(222) dominant Roughness Rz=10nm	(400)(222) dominant Roughness Rz=30nm	◎
Super smooth surface (Room Temp. Coat)	Roughness Rz=4nm	Roughness Rz=10nm	◎
Thickness uniformity	≤±5%	≤±7%	○
Uniformity of quality	≤±5%	≤±7%	○

르게 이온 플레이팅(ion plating)방법은 빠른 증착속도와 우수한 미세 조직을 형성할 수 있는 장점을 지니고 있으며 접착력 또한 우수하다[5].

본 논문에서 실험방법으로 사용되어질 이온 플레이팅 방법은 금속물질의 이온화를 증대시켜 증착하는 방식으로 기존에 널리 사용되어지고 있는 스퍼터링법에 비하여 성막 후 반응시간이 짧을 뿐만 아니라 우수한 조도와 함께 저저항을 나타내는 장점을 지니고 있다. 또한 이온 플레이팅법의 경우 스퍼터링에서 불균일한 자장에 의하여 생성되어지는 금속 타겟을 강력한 에너지를 지닌 이온건의 사용으로 균일하게 증착시킴으로써 성막 시 발생되어지는 스파이크(spike)와 이물부착 등을 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있다[6,10-17].

III. 실험방법

OLED용 ITO 코팅 공정 시스템은 실제 증착이 이루어지는 챔버(chamber)와 가스 공급 장치로 구성된다. 코팅 공정에서 운전 조건에 해당하는 파라미터들을 측정하기 위한 센서들과 센서에서 측정된 데이터를 AD변환하여 수집 및 모니터링하는 장치를 이용하였다.

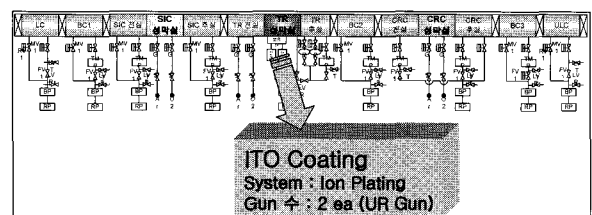


그림 1. ITO 코팅 공정.

Fig. 1. ITO coating process.

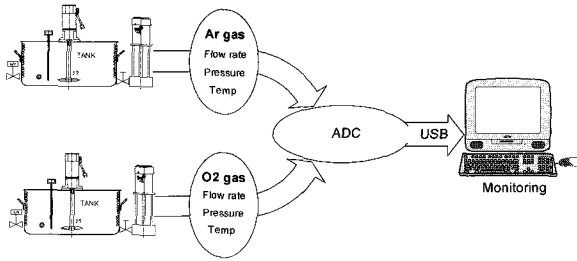


그림 2. PC기반 데이터 획득 시스템.
Fig. 2. PC based DAQ system.

표 2. 이온 플레이팅 공정에서 고려된 파라미터.

Table2. Parameter list for Ion plating process.

Section	Detailed Parameters	
운전파라미터	Ar gas[sccm]	
	O ₂ gas[sccm]	
	Chamber Temp[°C]	
고정파라미터	Target	In ₂ O ₃ : SnO ₂ = 95% : 5%
	진공도(성막시)	2.8~3×10 ⁻³ torr
	진공도(carrier gas)	6~8×10 ⁻⁴ torr
평가파라미터	면저항(Sheet Resistance)	
	막두께(Film Thickness)	
	투과율(Transmittance)	
	조도(Ra, Rpv)	

표 3. 운전 파라미터의 조건.

Table3. Test condition.

운전파라미터	범위	증가량	수준수
Ar gas	100[sccm]~300 [sccm]	100[sccm]	3
O ₂ gas	30 [sccm]~50 [sccm]	10[sccm]	3
Chamber Temp	200[°C]~300[°C]	30[°C]~40[°C]	4

증착이 완료된 OLED용 ITO 기판은 주요 부위의 5~9개의 시편을 채취하여 면저항, 막두께, 투과율, 조도를 측정하였다.

OLED용 ITO 코팅 유리 기판의 증착조건의 수립을 위하여 관련 변수를 기존에 품질과 연관이 있다고 알려진 변수와 생산에 필수적인 운전조건들을 사용하여, 다음과 같이 운전파라미터, 고정파라미터 그리고 평가파라미터로 구분하였다.

표 2에 제시된 운전파라미터들을 조절함으로써 평가파라미터의 변화량을 분석하여 ITO 기판 품질과 파라미터들 간의 관계를 추론하고자 한다. 본 실험에서 사용되는 운전파라미터의 변화량은 표3에 제시되어 있다.

위의 파라미터들의 범위는 현재 현장에서 적용되고 있는 범위를 모두 포함하고 있으며 보다 넓은 파라미터의 영역에서 결과를 분석하고자 하였다.

한 장의 기판 유리 당 9개소의 면저항을 4점 프로브(4-points probe) 면저항 측정기를 이용하였고, 막두께 측정은

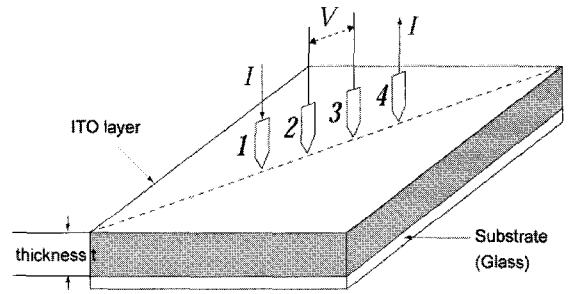


그림 3. 4점 프로브를 이용한 면저항 측정.
Fig. 3. Resistance measurement using 4-points probe.

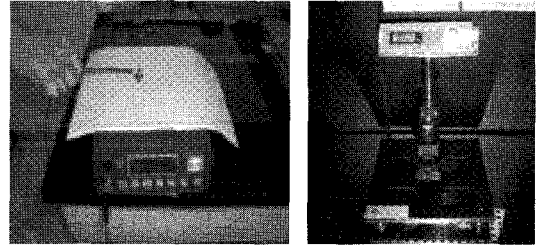


그림 4. 막두께와 투과율 측정.
Fig. 4. Supersonic Thickness measurement and Transmittance measurement.

초음파 두께 측정기를 이용하여 기판 유리 당 5개 요소를 측정하여 평균의 값을 사용하였다. 투과율은 가시광선 전파장 영역 (400nm~700nm)에서 측정 가능한 투과율 측정기(MT-976)를 사용하여 기판 유리 당 5개 요소에서 시편을 채취하여 측정하였으며, 표면 조도는 AFM을 이용하여 유리기판을 5개소로 구분하여 측정하여, 조도 평균값과 피크 값을 분석하였다.

IV. 실험결과

1. 막두께(film thickness)

그림 5는 Ar gas가 200[sccm]일 때 O₂ gas가 증가할수록

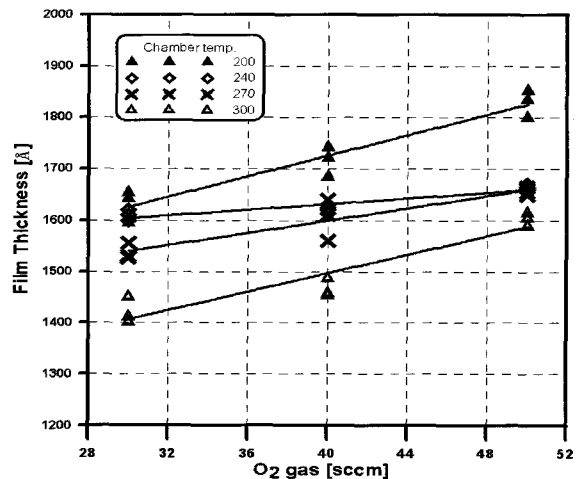


그림 5. 막두께와 O₂ gas의 상관관계.
Fig. 5. Relation between film thickness and O₂ gas.

막두께가 증가함을 보이며, 챔버내의 온도가 올라갈수록 막두께는 감소하는 경향을 보였다. Ar gas가 다른 값일 때도 같은 경향을 보였다. 또한, O₂ gas가 40[sccm] 일 때 막두께와 Ar gas와의 관계는 Ar gas가 증가할수록 챔버내의 온도가 올라 갈수록 막두께가 선형 적으로 감소함을 알 수 있었고, O₂ gas가 40[sccm] 일 때 챔버내의 온도가 증가할수록, 그리고 Ar gas양이 증가할수록 막두께가 선형 적으로 감소함을 실험적으로 알 수 있었다.

앞의 실험들에서 알 수 있듯이 막두께는 Ar gas와 챔버내의 온도와의 그 값들이 증가할수록 선형적으로 감소하였고, O₂ gas의 양이 증가할수록 선형적으로 막두께도 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

2. 면저항(film thickness)

그림 6에 나타낸 것과 같이 Ar gas가 200[sccm]일 때 면저항과 O₂ gas는 비선형적인 관계를 보였고, 챔버내의 온도는 앞에서와 같이 온도가 증가할수록 면저항은 감소하였다. O₂ gas가 40[sccm] 일 때 면저항과 Ar gas와의 관계는 Ar

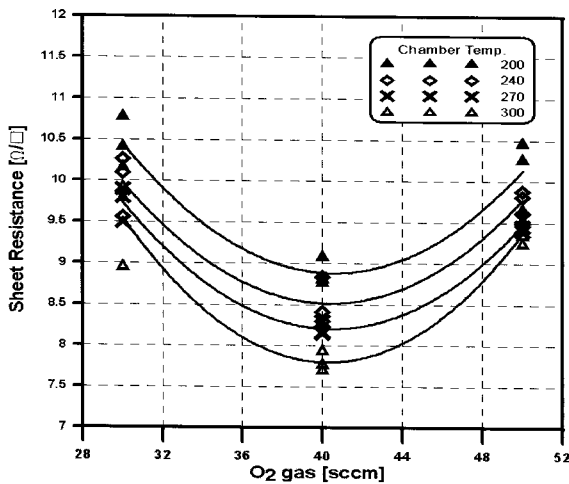


그림 6. 면저항과 O₂ gas의 상관관계.
Fig. 6. Relation between Sheet Resistance and O₂ gas.

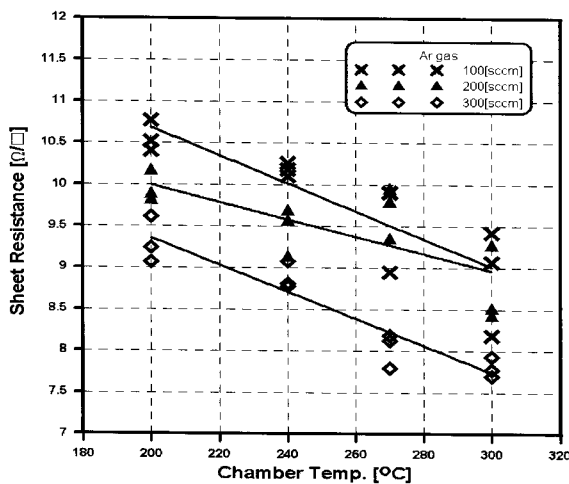


그림 7. 면저항과 챔버 온도의 상관관계.
Fig. 7. Relation between Sheet Resistance and Chamber Temperature.

gas가 증가할수록 챔버 내의 온도가 올라 갈수록 면저항이 감소함을 알 수 있었다. 그림 7은 O₂ gas가 40[sccm] 일 때 면저항과 chamber내의 온도와의 관계를 나타낸 결과로, 챔버내의 온도가 증가할수록 Ar gas양이 증가할수록 면저항이 선형 적으로 감소함을 알 수 있다.

3. 투과율(transmittance)

그림 8은 Ar gas가 200[sccm]일 때 투과율과 O₂ gas와의 비선형적인 관계를 나타낸 실험결과이다. 챔버내의 온도가 증가할수록 투과율은 감소하였다. 또한, O₂ gas가 40[sccm] 일 때, Ar gas가 증가할수록 투과율은 증가하였고, 챔버내의 온도가 올라갈수록 투과율은 감소하였다.

투과율은 Ar gas가 증가할수록 선형적으로 증가하는 관계를 가졌고, 챔버내의 온도가 증가할수록 선형적으로 감소하는 관계를 보였다. O₂ gas와는 비선형적인 관계를 보였다.

4. 평균 조도(roughness-Ra)

그림 9는 Ar gas가 200[sccm]일 때 Ra와 O₂ gas와의 비선형적인 관계를 나타내었고, 챔버내의 온도가 증가할수록 Ra는 감소하였다. 또한, O₂ gas가 40[sccm] 일 때 Ar gas가 증

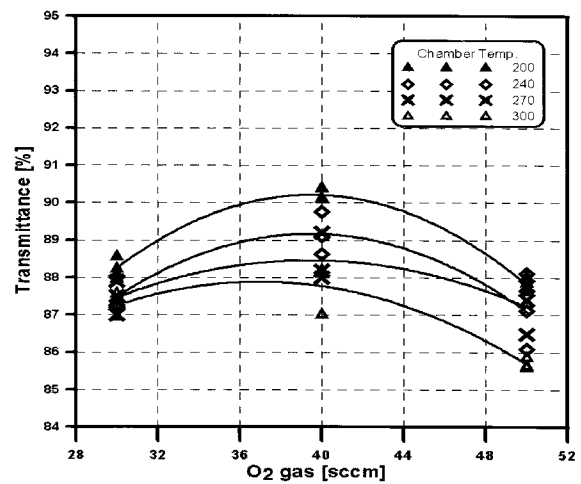


그림 8. 투과율과 O₂ gas의 상관관계.
Fig. 8. Relation between Transmittance and O₂ gas.

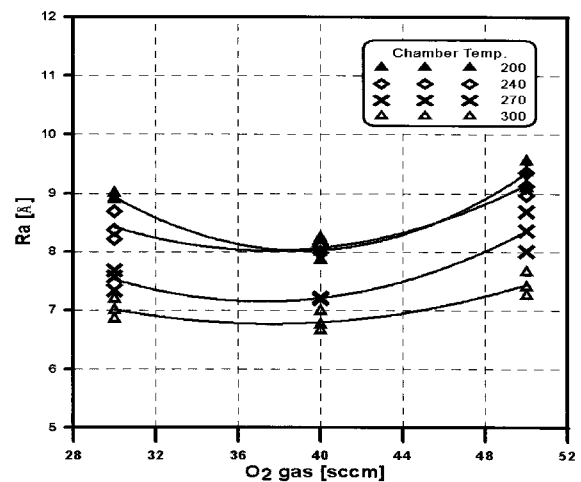


그림 9. 평균조도와 Ar gas의 상관관계.
Fig. 9. Relation between Ra and Ar gas.

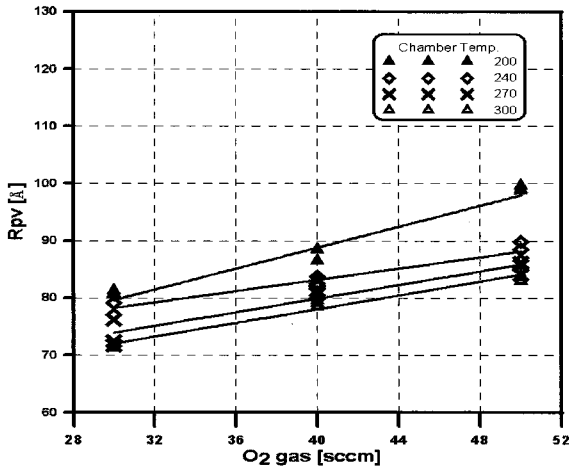


그림 10. 조도 피크값과 O₂ gas의 상관관계.
Fig. 10. Relation between Rpv and O₂ gas.

가할수록 챔버내의 온도가 올라갈수록 Ra는 감소하였으며, 결과적으로 Ra는 Ar gas가 증가할수록 chamber내의 온도가 증가할수록 선형적으로 감소하는 관계를 보였다.

5. 조도 최대값(roughness-Rpv)

그림 10은 Ar gas가 200[sccm]일 때 Rpv와 O₂ gas와의 관계를 도시화한 그래프로, Rpv는 O₂ gas가 증가할수록 증가하였고, 챔버내의 온도가 증가할수록 Rpv는 감소하였다. 또한, O₂ gas가 40[sccm] 일 때는, Ar gas가 증가할수록, 그리고, 챔버내의 온도가 올라갈수록 Rpv는 감소하였다.

V. 박막형성결과추론

실험 데이터로부터, O₂ gas는 면저항, 투과율과 Ra에 비선형 적인 관계를 보였고, 막두께와 Ppv에는 선형적인 관계를 보였다. Ar gas와 chamber내의 온도는 막두께, 면저항, 투과율, Ra와 Rpv에 선형적인 관계를 파악하였다. 분석된 결과를 토대로 하여 비선형 회귀모형(nonlinear regression model)인 아래의 모델을 통해, 다중회귀분석을 실시하여, 상관 매트릭스를 구하였다.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_3^2$$

박막 형성을 위한 운전파라미터와 평가파라미터와의 관계를 신뢰구간 95%로 도출한 결과는 다음 행렬식으로 표현되었다.

$$Y = M X$$

$$\begin{bmatrix} Y_{FT} \\ Y_{SR} \\ Y_{TM} \\ Y_{Ra} \\ Y_{Rpv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1652.656 & -1.267 & 8.555 & -0.585 & 0 \\ 27.602 & -0.005 & -0.905 & -0.0003 & 0.012 \\ 68.989 & 0.004 & 1.119 & -0.0133 & -0.142 \\ 18.117 & -0.006 & -0.406 & -0.005 & 0.005 \\ 80.266 & -0.068 & 0.761 & -0.046 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_2^2 \end{bmatrix}$$

- Y_{FT} : Film Thickness x_1 : Ar gas
- Y_{SR} : Sheet Resistance x_2 : O₂ gas
- Y_{TM} : Transmittance x_3 : Chamber Temp.
- Y_{Ra} : Roughness - Ra
- Y_{Rpv} : Roughness - Rpv

표 4. 상관 모델을 이용한 평가 파라미터 추론 정확도.

Table 4. Estimation accuracy based on the matrix model.

평가 파라미터	추론정확도
Film Thickness	92.6%
Sheet Resistance	89.2%
Transmittance	88.7%
Roughness - Ra	91.3%
Roughness - Rpv	92.8%

앞의 식을 이용하여 운전파라미터에 해당하는 Ar gas, O₂ gas와 챔버내의 온도에 대하여, OLED 용 ITO 박막의 막두께, 면저항, 투과율 그리고 조도를 예측할 수 있는 모델로 활용할 수 있다. 이 선형 모델을 이용하여, 원하는 품질의 박막 조건이 정해질 때, 필요한 운전파라미터는 행렬을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = M^{-1} Y$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01542 & 0.95027 & 0.020584 & -1.696 & 0.36832 \\ -25.332 & 1409.8 & 30.752 & -2510.3 & 576.92 \\ -0.49457 & 29.74 & 0.56822 & -55.239 & 11.936 \\ 2.3568 & 66.04 & -0.14053 & -162.49 & -34.44 \\ -12.324 & 729.57 & 8.3156 & -1314.8 & 292.48 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{FT} \\ Y_{SR} \\ Y_{TM} \\ Y_{Ra} \\ Y_{Rpv} \end{bmatrix}$$

위의 식을 통하여 원하는 막두께, 면저항, 투과율과 조도에 해당하는 Ar gas, O₂ gas 그리고 챔버내의 온도를 구하여, 정량적인 운전조건을 설정하여 품질관리에 효율적으로 이용할 수 있다.

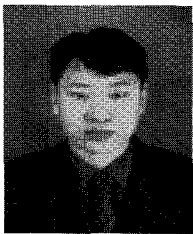
VI. 결론

본 연구에서는 OLED용 ITO 투명전도성 박막의 증착 실험을 위해 증착이 이루어지는 챔버와 챔버내의 가스로 사용되는 Ar gas와 O₂ gas공급 장치에서 운전파라미터를 설정하였다. 그리고 ITO박막의 평가파라미터에 해당하는 막두께, 면저항, 투과율 그리고 조도를 계측하여 파라미터들 간의 상관관계를 분석한 품질과 운전조건에 대응하여 관계 행렬을 도출하였다. 이 결과를 이용하여 원하는 품질의 ITO박막 형성을 위한 운전 조건을 설정할 수 있는 행렬식을 추론하였다. 추론식을 이용하여 실제 값을 비교했을 시 95% 신뢰 구간에 실제 값들이 포함되어 지는 것을 확인하였다. 이 추론 결과로 OLED용 ITO 투명전도성 박막 뿐 아니라, 다른 평판디스플레이용 소자의 생산에 있어서도 도출된 결과의 일부만 개선하면 적용 가능한 추론식으로서 생산현장과 품질관리에서의 활용도가 높다고 할 수 있다. 그리고 기존에 현장작업자들의 경험에만 의존하고 있던 부분들이 적량적인 데이터로 확립되면서 이를 통한 향후 생산공정 및 품질관리에 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 향후, 본 연구에서 구한 상관식과 경험적인 운전 조건과 결합하여, 지능 추론 시스템을 사용한 연구를 수행할 계획이다.

참고문헌

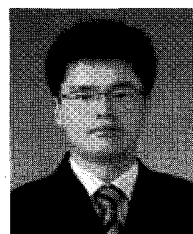
[1] 광동주, 조문수, 박강일, 임동진, “방전 플라즈마 해석

- 을 통한 PDP용 ITO 투명 정도막의 제작 및 특성,” *Korea Institute of Electrical*, vol. 16, no. 10, pp. 902, 2003.
- [2] 김영관, “유기 EL 디스플레이 현황과 전망,” *월간반도체*, no. 162, pp. 97-100, 2001.
- [3] K. Utsumi, O. Matsunaga, and Tsutomu Takahata, “Low resistivity ITO film prepared using the ultra high density ITO target,” *Thin Solid Films*, vol. 334, pp. 30-40, 1999.
- [4] 황인철, “ITO 투명전도막의 제조 조건에 따른 특성 변화,” *산업기술종합연구소 논문집*, vol. 17, pp. 395-401, 1999.
- [5] 최규만, “ITO 투명 전극의 제조 및 그 특성,” *관대논문집*, vol. 1994, no. 2, pp. 113-121, 1994.
- [6] K. S. Fancey, “Evaporative Ion Plating : Process mechanism and optimization,” *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol. 18, no. 6, 1990.
- [7] E. Terzini, P. Thilakan, and C. Minarini, “Properties of ITO thin film deposited by RF magnetron sputtering at elevated substrate temperature,” *Material Science Engineering*, vol. B77, pp. 110, 2000.
- [8] B. S. Chiou and S. T. Hsieh, “RF magnetron-sputtered indium tin oxide film on a reactively ion-etched acrylic substrate,” *Thin Solid Films*, vol. 229, pp. 146, 1993.
- [9] H. S. Kim et al. “Surface Characterization of O₂-Treated Indium-Tin-Oxide(ITO) Anodes for Organic Light-Emitting-Device Applications,” *J. Korea Physical Society*, vol. 41, no. 3, pp. 395-399, 2002.
- [10] 한국전기전자재료학회, “반응성 직류마그네트론 스퍼터링에 의한 ITO 박막 형성에 관한 연구,” *전기전자재료학회 논문지*, vol. 8, no. 6, pp. 699, 1995.
- [11] H. U. Habermeier, “Properties of indium tin oxide thin films prepared by reactive evaporation,” *Thin Solid Films*, vol. 80, pp. 157-160, 1981.
- [12] C. Qin, H. Chen, and M. Wong, “Dependence of the current and power efficiencies of organic light-emitting diode on the thickness of the constituent organic layers,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 48, pp. 2131-2137, 2001.
- [13] A. Balasubramanian, M. Radhakrishnan, and C. Balasubramanian, “Electrical properties of electron-beam evaporated indium oxide thin films,” *Thin solid Films*, vol. 91, pp. 71-79, 1982.
- [14] J. Dutta and S. Ray, “Electrical properties of magnetron sputtered indium-tin oxide films with deposition parameters,” *Thin Solid Films*, vol. 162, pp. 119-127, 1988.
- [15] Y.-H. Tak, K.-B. Kim, H.-G. Park, K.-H. Lee, and J.-R. Lee, “Criteria for ITO thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode,” *Thin Solid Films*, vol. 411, pp. 12-16, 2002.
- [16] 신성호, 김현후, 박광자, “DC 마그네트론 스퍼터링의 비대칭 자석구조에 의한 ITO 박막 제조 및 물성에 관한 연구,” *전기전자재료학회 논문지*, vol. 10, no. 7, pp. 700, 1997.
- [17] I. Baia, B. Fernandes, P. Nunes, M. Quintela, and R. Martins, “Influence of the process parameters on structural and electrical properties of r.f. magnetron sputtering ITO films,” *Thin Solid Films*, vol. 383, pp. 244-247, 2001.



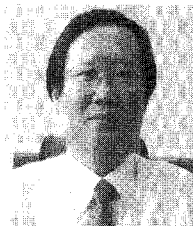
서 정 민

2002년 영남대 기계공학과 졸업. 2005년 경북대 대학원 석사. 현재 LG전자 디스플레이 생산 연구원. 관심분야는 생산 자동화.



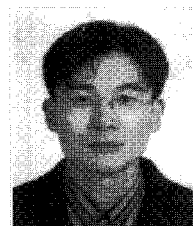
박 근 영

2007년 경북대 기계공학과 졸업. 2007년 동 대학원 석사과정. 관심분야는 지능제어 및 로보틱스.



이 상 룡

1980년 서울대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 석사. 1989년 Georgia Institute of Technology 박사. 1982년~현재 경북대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 시스템 제어 및 자동화.



이 춘 영

1996년 한양대 전자공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원 석사. 2003년 한국과학기술원 박사. 2005년~현재 경북대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 지능제어 및 메카트로닉스, 로봇 시스템.