

실험계획법을 이용한 세슘보조 스퍼터링 공정의 특성분석

민철홍^{a*}, 박성진^b, 윤능구^b, 김태선^a

^a가톨릭대학교 정보통신전자공학부, ^b(주)소로나

Characterization of Cesium Assisted Sputtering Process Using Design of Experiment

Chul Hong Min^{a*}, Sung-Jin Park^b, Neung-goo Yoon^b, Tae Seon Kim^a

^aSchool of Information, Communications and Electronics Engineering,
Catholic University of Korea, Bucheon, Korea

^bSORONA Inc., Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do, Korea

(Received July 13, 2007 ; accepted August 24, 2007)

Abstract

Compared to conventional Indium Tin Oxide (ITO) film deposition methods, cesium (Cs) assisted sputtering offers higher film characteristics in terms of electrical, mechanical and optical properties. However, it showed highly non-linear characteristics between process input factors and equipment responses. Therefore, to maximize film quality, optimization of manufacturing process is essential and process characterization is the first step for process optimization. For this, we designed 2 level design of experiment (DOE) to analyze ITO film characteristics including film thickness, resistivity and transmittance. DC power, pressure, carrier flow, Cs temperature and substrate temperature were selected for process input variables. Through statistical effect analysis methods, relation between three types of ITO film characteristics and five kinds of process inputs are successfully characterized and eventually, it can be used to optimize Cs assisted sputtering processes for various types of film deposition.

Keywords : Design of Experiment(DOE), Cesium assisted sputtering, Indium tin oxide(ITO), Statistical analysis

1. 서 론

최근 디스플레이(display) 산업의 급속한 성장과 기술의 발달로 디스플레이 시장을 선점하기 위한 업체간 경쟁이 치열해 지고 있으며, 그에 따라 부품의 경량화와 생산단가의 절감이 요구되어 지고 있다. 이러한 이유로 기존의 무기박막 디스플레이 소자를 유기박막으로 대체하여 효율을 높이고 비용을 줄이기 위한 연구가 진행되고 있는데, 그 대표적인 것이 투명 전도막으로 많이 사용되는 Indium Tin Oxide(ITO) 박막이다^{1,2)}. ITO 박막은 가시광선 영역에서 높은 전도도와 투과도를 갖는 특성 때문에 디스플레이 기판과 태양광 기판 등의 투명전극

으로 널리 사용되며 유리 기판을 중심으로 하여 합성되어 왔지만 최근에는 유리 기판 대신 폴리머(polymer)를 이용하기도 한다³⁻⁶⁾. 기존에는 OLED나 평판디스플레이 기판에 ITO 박막을 성막 시키기 위해 DC 또는 RF 전원장치와 마그네트 스퍼터링 방법을 사용하였다. 그러나 DC 전원장치를 사용할 경우 높은 증착속도와 합금타겟 제조의 용이성이 있는 반면에 박막의 저항증가나 타겟 아킹(target arcing)이 발생하는 문제가 발생할 수 있으며, RF 전원장치를 사용할 경우 재연성이 있고 박막의 물성을 향상시킬 수 있는 장점이 있으나 증착속도가 매우 느린 단점이 있다. 또한 플라즈마 밀도를 높이기 위해서는 타겟 전원 장치에 높은 에너지를 인가하여야 하는데 이 경우 ITO 타겟에 물리적인 균열이 발생할 수 있는 문제점도 있다. 그리고 DC와

*Corresponding author. E-mail : tkim@catholic.ac.kr

RF 전원장치 모두는 ITO 박막의 높은 투과도와 낮은 비저항을 갖기 위해서 섭씨 300°C 이상으로 기판온도를 가열시키거나 후속공정으로 열처리를 해주어야 한다. 그러나 ITO 박막은 열이나 자외선과 같은 광자 또는 이온의 충돌 등에 의해 쉽게 손상을 입을 수 있기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위해 음이온화 된 세슘이온을 이용하여 기존의 마그네트론 스퍼터링 장비보다 플라즈마 밀도와 성막 속도, 증착막의 미세구조, 전기적, 광학적 특성이 우수한 박막을 제작할 수 있다. 그러나 박막특성은 공정변수나 세슘이온 공급장치 변수에 따라 비선형적으로 변화기 때문에 스퍼터링 특성을 최적화하기 위해서는 이들 변수에 따른 특성분석이 요구되어진다.

본 논문에서는 개발된 세슘보조 스퍼터링 장치의 박막 특성을 알아보기 위하여 5가지 입력변수인 DC 파워, 공정압력(Pressure), 전송가스양(Carrier Flow), 세슘 저장용기의 온도(Cs Temp.), 기판의 온도(Sub. Temp.)을 설정하고 2수준의 실험 계획법(2-level design of experiment)을 설계하여 입력 변수에 따른 박막특성을 분석하였다⁷⁾. 실험계획법을 이용한 분석 방법은 몇 가지의 실험 결과로 장비의 박막특성을 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있어 특성분석 시간과 비용을 절약할 수 있다.

2. 실험 방법

측정 기판은 Si 웨이퍼와 유리를 사용하였으며, 예비실험을 바탕으로 박막의 특성에 영향을 미치는 변수를 5가지 인자로 정의하였다. 공정변수는 DC 파워, 공정압력, 전송가스유량, Cs 저장용기의 온도, 기판 온도로 정의 하였으며, 그 후 각 요소의 수준은 장치의 설계값을 반영하여 정해졌다. DC 파워와 공정압력은 예비 시험을 통해 낮은 power에서 일반적으로 우수한 특성을 보이는 것으로 예상되는 범위로 선택되었다. 저장용기의 온도는 장치가 가진 특성을 고려하여 선택되었고, 기판 온도는 가급적 낮은 범위에서 공정을 최적화하기 위해 설정하였다. 표 1은 세슘보조 스퍼터링의 공정변수와

Table 1. Parameters ranges for DOE input data

Parameter	Range	Units
DC power	50, 100	W
Pressure	2, 10	mTorr
Carrier flow	3, 10	sccm
Cs Temp.	80, 150	°C
Sub. Temp.	27, 100	°C

Table 2. Response parameters for characterization analysis of ITO film

Parameter	Units
Thickness	Å
Resistivity	Ωcm
Transmittance	%

범위이며, 표 2는 박막의 특성분석을 위한 파라메타 값이다.

표 1에서 정의된 공정변수 범위를 기준으로 2 수준의 full factorial design에 1개의 중간치(center point)를 추가하여 DOE를 구성하였다. 여기서 중간치는 각 입력범위의 중간값인 DC 파워 75(W), Pressure 6(mTorr), Carrier Flow 6.5(sccm), Cs Temp. 115(°C), Sub Temp. 63.5(°C)이다. 결과치의 측정에 있어서 실제 기판 온도와 설정온도 사이의 온도 차이는 thermo-couple wafer(process probe 1530, Sensarray Co, USA)를 이용하여 측정되었다. 박막의 증착 후 증착두께는 surface profiler(alpha step 200, Tencor Instruments, USA)를 이용하여 측정되었으며, 면저항은 4-point probe(SR-1000N, AIG, 한국)를 이용하여 측정되었다. 그리고 이 값에 두께를 고려하여 비저항 값을 산출하였다. 또한 박막의 투과율은 UV-Vis Spectrophotometer를 이용하여 측정되었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 박막두께

그림 1은 각 변수인자가 두께에 얼마나 유의한지를 알아보기 위한 효과의 정규 확률도 그래프이다. 그림 1에 나타난 점들 중 직선에서 많이 벗어

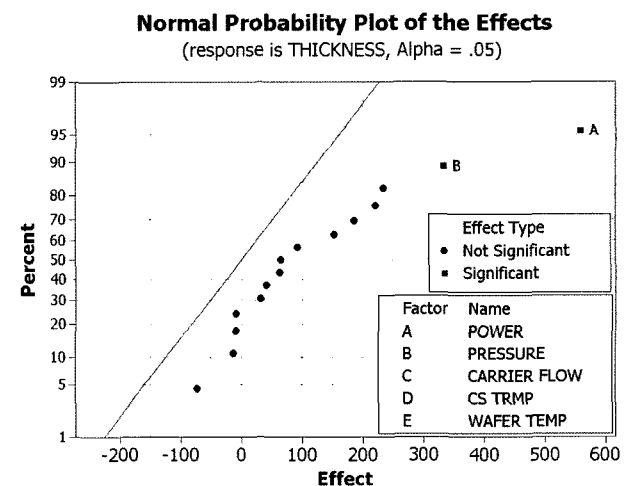
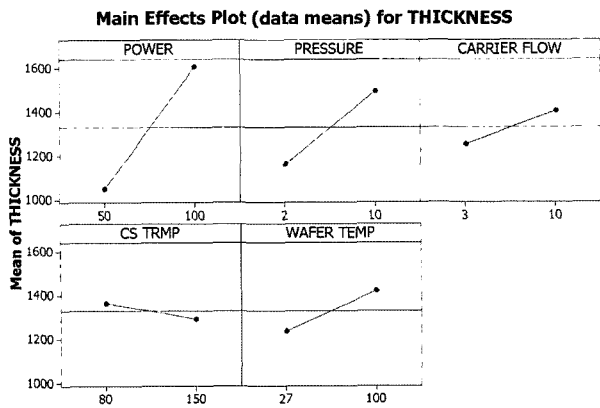
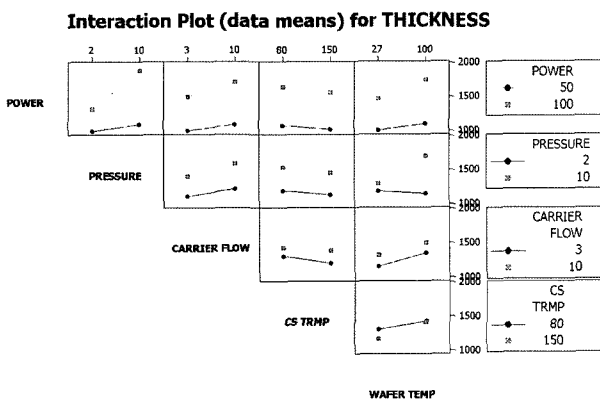


Fig. 1. Normal probability plot of the effects for ITO film thickness.



(a) Main effect plot for thickness.

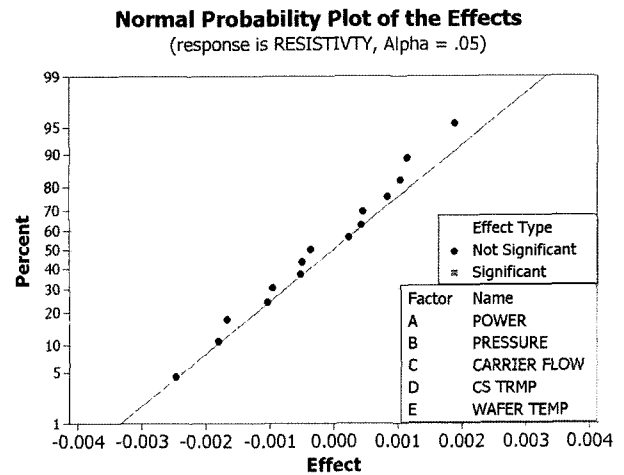


(b) Interaction plot for thickness.

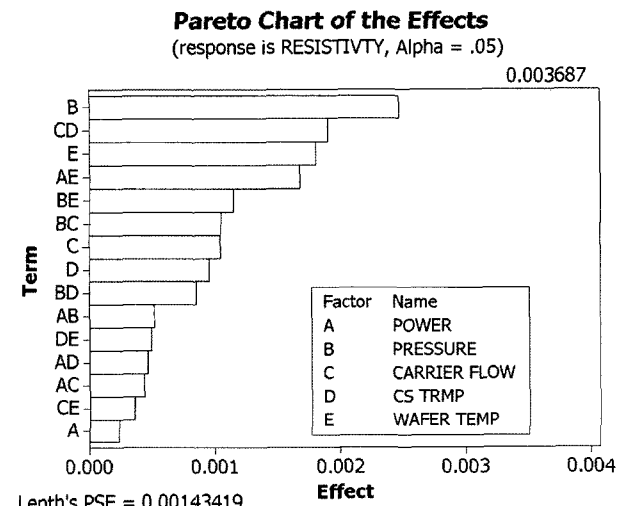
Fig. 2. Main effects and interaction plot for ITO film thickness.

난 인자들은 박막의 두께에 영향이 큰 공정변수들이다. 다시 말하면, 박막의 두께에 유의하지 않은 효과는 직선 근처에 모여, ITO 박막의 두께에 영향력이 큰 공정변수는 플라즈마 파워와 압력을 알 수 있다.

그림 2의 (a)는 ITO 박막 두께와 공정인자간의 주효과도이며 Y축은 증착두께, X축은 각 요인의 입력범위 값이다. 플라즈마 파워와 압력이 증가하면 박막의 두께도 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있으나 다른 인자들은 영향이 작은 것을 알 수 있다. 그림 2의 (b)는 상호효과도에 대한 분석이다. 상호효과도를 보면 플라즈마 파워와 압력의 교호작용 효과가 있으며 압력과 기판 온도에서도 교호작용이 있음을 볼 수 있다. 다시 말해, 플라즈마 파워인자의 낮은 수준이 압력인자와 상호작용하여 변하는 추이와 플라즈마 파워의 높은 수준이 압력 인자와 상호작용하여 변화하는 추이의 정도가 다르게 분석되었다. 따라서, 높은 파워조건에서 압력의 증가는 ITO 박막의 두께 증가에 비례하여 증가한다고 볼 수 있고, 반대로 낮은 파워에서 압력은 박막두께에 큰 영향이 없음을 나타내고 있다.



(a) Normal probability plot of the effects for ITO film resistivity.



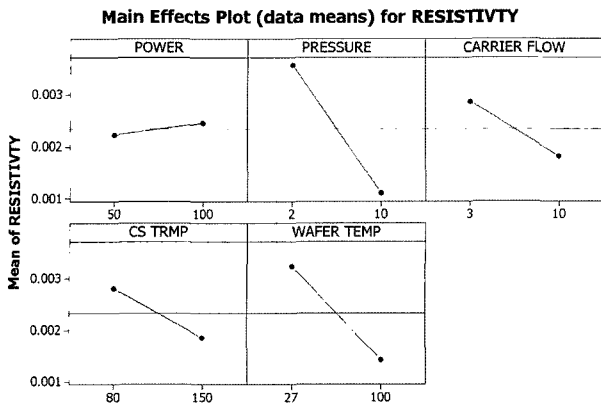
(b) Pareto plot of the effects for ITO film resistivity.

Fig. 3. Normal probability and pareto plot for ITO film resistivity.

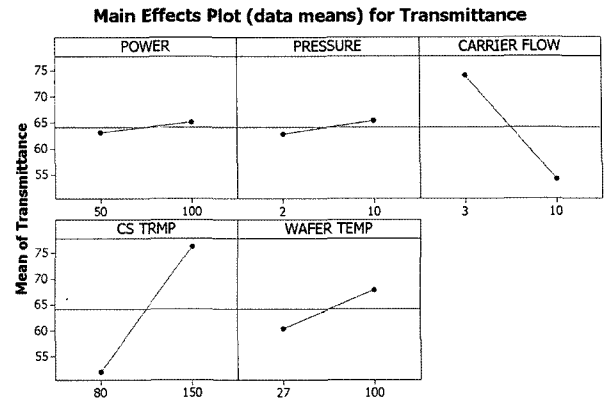
3.2 박막 비저항

그림 3의 (a)는 박막 비저항의 정규 확률도와 (b)는 파레토(pareto) 차트 그림이다. 그림 1과 다르게 박막의 비저항에는 어떠한 공정인자도 통계적으로 중요한 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 그림 3의 (b)를 보더라도 알파 수준 0.05에서 점선으로 나타난 유의선을 넘는 인자들이 없음을 알 수 있다. 인자들 중에서 압력인자가 박막 비저항 특성에 상대적으로 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으나 이는 통계적으로는 유의한 수준이 아니었으므로 추가 실험을 통한 확인이 필요하다고 본다.

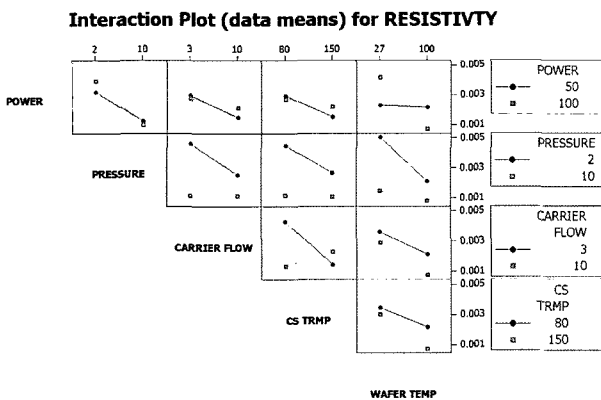
그림 4의 (a)는 박막 비저항에 대한 각 인자들의 주효과도이다. 여기서, Y축은 박막의 비저항, X축은 각 요인의 입력범위 값을 나타낸다. 앞서 설명한 것과 같이 압력이 다른 인자들에 비해 박막의 비저항에 가장 큰 영향을 주며 압력이 낮아수록 박



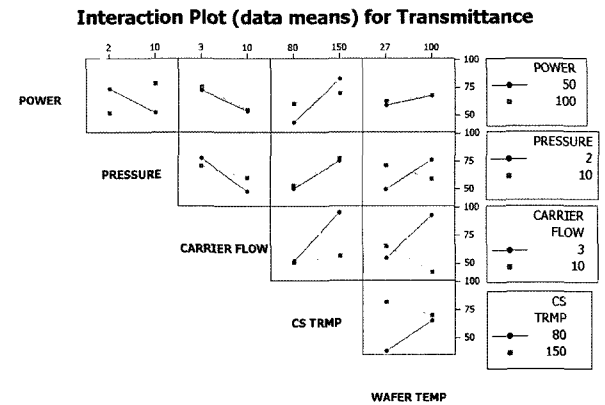
(a) Main effect plot for resistivity.



(a) Main effect plot for transmittance.



(b) Interaction plot for resistivity.



(b) Interaction plot for transmittance.

Fig. 4. Main effects and interaction plot for ITO film resistivity.

Fig. 5. Main effects and interaction plot for ITO film transmittance.

막의 비저항이 높고 압력이 높을수록 박막의 비저항이 낮음을 알 수 있다. 그림 4의 (b)는 박막 비저항과 공정인자들 간의 상호효과도이다. 그림에서 보면 낮은 수준의 압력은 캐리어 가스 및 세슘 온도, 기판 온도 인자에 영향이 큰 것으로 나타났으며, 플라즈마 파워와 기판 온도 그리고 캐리어 가스와 세슘 온도가 교호효과가 큰 것을 알 수 있다. 특히 캐리어 유입유량과 세슘온도간에는 유입유량의 증가에 따라 세슘온도의 영향이 음에서 양으로 변함을 알 수 있다.

3.3 박막투과율

정규확률도를 통한 분석 결과, 알파수준 0.05에서 박막투과율 역시 통계적으로 유의한 수준을 나타내는 공정변수는 없었으나 일부 입력 항목(term)을 제외한 대부분의 변수들이 박막투과도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 각 항목의 구체적인 영향을 분석하기 위해 주효과와 상호효과를 분석하였다.

그림 5의 (a)는 공정인자들의 투과도에 대한 주효과도이다. Y축은 투과도, X축은 각 요인의 입력범위 값을 나타낸다. 주효과 분석에서는 전송가스

유량과 세슘 온도가 투과도에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 전송가스유량이 작고 세슘의 온도가 높을수록 투과도가 높은 박막을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 나머지 인자들은 상대적으로 영향이 작은 것으로 나타났다. 그림 5의 (b)는 공정인자들의 투과도에 대한 상호효과도이다. 투과도의 상호효과들은 앞에서 분석한 박막두께나 비저항의 상호효과도들 보다 교호작용이 많이 발생하는 것으로 보인다. 특히 기판 온도의 경우 압력, 전송가스유입량 및 Cs 온도의 증가에 따라 각각 그 영향력이 양에서 음으로 변하는 특성을 보였다. 또한 DC 파워도 공정압력과 Cs 온도의 변화에 따라 영향력의 부호가 변하는 것으로 나타났다. 상호효과도를 바탕으로 볼 때, 전송가스유입량을 낮추고 동시에 Cs 온도를 높였을 때 높은 투과율의 박막을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 개발된 세슘보조 스퍼터링 장치의 박막 특성을 알아보기 위하여 5가지 입력변수

(DC 파워, 공정압력, 전송가스양, 세슘 저장용기의 온도, 기판의 온도)를 설정하고 2수준의 실험 계획법을 이용하여 입력 변수에 따른 박막의 두께(증착속도), 비저항, 투과율을 분석하였다. 분석 결과 박막의 두께에 영향을 미치는 인자는 플라즈마 파워와 공정 압력으로 분석되었으며 플라즈마 파워와 압력, 압력과 기판 온도가 교호작용하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 박막의 비저항에 큰 영향을 주는 주요인자는 없으나 그 중 압력과 기판 온도가 미비하지만 박막의 비저항 특성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 마지막으로 투과도 또한 통계적으로 박막의 투과도 특성에 큰 영향을 주는 주요인자는 없으나 그 중 캐리어 가스와 세슘의 온도가 상대적으로 투과도에 영향을 주는 요인으로 분석되었다. 실험계획법을 이용한 분석 방법은 몇 가지의 실험 결과로 장비의 박막특성을 분석할 수 있다는 장점을 가지고 있어 특성분석 시간과 비용을 절약할 수 있었고 본 논문에서 제시된 경향 분석 결과를 바탕으로 추후 공정의 최적화를 위한 모형 및 mini DOE의 기본 자료로써 활용 가능할 것으로 본다.

참고문헌

1. Y. S. Choi, J. W. Song, 유기절연재료 ; 유기박막의 전기적 특성 연구, 19(10) (2006) 953-959.
2. C. C. Lee, J. C. Ho, T. S. Hu, Y. W. Wang, Printing Organic Thin-film Transistor Technology, IEEE VLSI-TSA International Symposium, (2005) 49-52.
3. J. Jang, Displays Develop a New Flexibility, Materials Today, 9 (2006) 46-52.
4. L. Ke, R. S. Kumar, P. Chen, L. Shen, S. J. Chua, A. P. Burden, Au-ITO Anode for Efficient Polymer Light-emitting Device Operation, Photonics Technology Letters, IEEE, 17(3) (2005) 543-545.
5. D. R. Cairns, G. P. Crawford, Electromechanical Properties of Transparent Conducting Substrates for Flexible Electronic Displays, Proceedings of the IEEE, 93(8) (2005) 1451-1458.
6. K. Yamada, K. Tamano, T. Mori, T. Mizutani, M. Sugiyama, Organic Light-emitting Diodes Using Semi-transparent Anode for Flexible Display, Properties and Applications of Dielectric Materials, 1 (2003) 49-52.
7. 이승훈, Minitab을 이용한 공학통계 자료분석, 이레테크, (2006) 557-622.