

논문 97-6-2-10

超音波 噴霧 熱分解法으로 r-plane 사파이어 위에 蒸着된 ZnO 膜의 特性

마대영(馬大泳)* 문현열(文鉉烈)* 이수철(李壽哲)*

Properties of ZnO Films on r-plane Sapphires Prepared
by Ultrasonic Spray Pyrolysis

Tae-Young Ma*, Hyun-Yul Moon*, Soo-Chul Lee*

요 약

zinc acetate를 포함하는 용액으로부터 r-plane 사파이어 기판 위에 ZnO 膜을 증착하였다. 超音波 發生器로 용액을 진동시켜 증기입자를 만든 후 이것을 고온 反應爐 내에서 熱分解 시켜 膜을 증착하였다. 제조된 膜의 결정성, 표면형태 및 조성을 XRD, SEM 및 AES로 각각 분석하였다. 기판온도가 膜의 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 기판온도 300 °C에서 (110) 방향으로 강하게 성장된 膜을 얻을 수 있었다. 구리의 添加와 濕式酸化에 의해 膜의 저항율을 $3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상으로 높일 수 있었다.

Abstract

Zinc oxide(ZnO) thin films were deposited on r-plane sapphires from a solution containing zinc acetate. The films were obtained in a hot wall reactor by the pyrolysis of an aerosol produced by an ultrasonic generator. The crystallinity, surface morphology and composition of the films have been studied using the x-ray diffraction method(XRD) scanning electron microscopy(SEM) and Auger electron spectroscopy (AES) respectively. The influences of the substrate temperature on the crystallinity of the films were studied. Strongly (110) oriented ZnO films were obtained at a substrate temperature of 350 °C. The resistivity was increased to above $3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ with copper doping and vapor oxidation.

I. 序 論

c-축 背向성을 갖는 ZnO를 薄膜化 하여 그것의 壓電性を 이용하려는 시도가 최근까지 지속적으로 이루어지고 있다.^[1] ZnO의 壓電特性을 이용한 素子로는 音

響變換器^[2-4], 光導波管^[5] 및 表面彈性波 필터^[6] 등이 있으며 이들을 위한 ZnO 膜 제조법으로는 高周波 스퍼터링(rf-sputtering)^[7-8], ion beam sputtering^[9] 및 chemical vapor deposition(CVD)^[10-13] 등이 연구되고 있다.

高周波 스퍼터링법은 두께의 균일성이나 c-축 背向성이 우수하고 低溫蒸着이 가능하다는 잇점이 있으나 전자충돌로 인한 결함발생 가능성이 높아 결함의 존재가 문제 되는 고체레이저나 광디스플레이 등에는 적합하지 않다.^[15] 한편 CVD법의 경우 비교적 결함은 적으

* 경상대학교 전기공학과
(Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University)

※ 본 논문은 한국과학재단(project # 94-0300-05-01-3) 및 경상대학교 생산기술연구소의 연구지원에 의한 것임
<접수일자 : 1997년 1월 20일>

나 膜 두께가 불균일하고 膜의 抵抗率이 낮으며 蒸着溫度가 너무 높기 때문에 용융점이 낮은 基板을 사용할수 없다는 단점이 있다. 용융점이 낮은 基板을 CVD에서 사용하기 위해서는 반응온도를 낮추어야 하는데 MOCVD(metalorganic CVD)^[14-15] 및 PECVD(plasma enhanced CVD)^[16] 등을 통해 해결을 시도하고 있다. 그러나 아직까지 장비와 시료의 가격이 너무 높거나 미흡한 膜 特性으로 인해 실용화에 이르지 못하는 못하고 있다. 최근 Labeau 등^[17-18]은 超音波 噴霧 熱分解法(ultrasonic spray pyrolysis method)을 이용하여 c-축 背向性을 갖는 薄膜을 제조한 바 있다. 이 방법은 실험장치가 간단하고 사용하는 원료의 가격이 저렴하며, 미세한 입자의 분해로 膜을 형성하기 때문에 치밀하고도 평탄한 膜을 성장시킬 수 있다. 그러나 超音波 噴霧 熱分解法으로 제조된 ZnO 膜도 CVD의 단점인 낮은 抵抗率은 극복하지 못하고 있다.

본 연구에서는 제조 장치가 간단하며 경제적인 잇점이 있는 超音波 噴霧 熱分解法을 이용하여 ZnO 膜을 제조하였다. 수직형의 超音波 噴霧 裝置를 자체 제작 하였으며 기존의 장치와는 달리 hot-wall 反應器를 채택하였다. hot-wall 反應器는 cold-wall 反應器에 비해 온도 조절이 용이하며 膜이 성장되는 공간의 온도분포가 균일하므로 표면이 평탄한 膜을 얻을 수 있다.

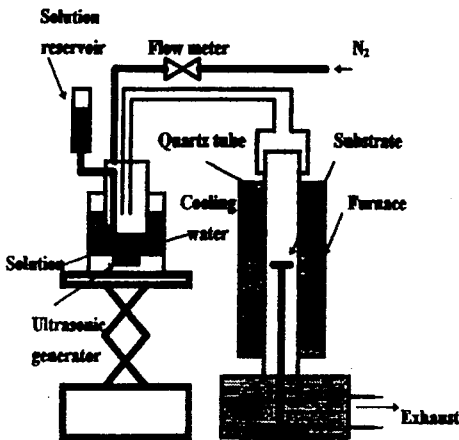


그림 1. 超音波 噴霧 熱分解 장치의 개략도
Fig. 1. A schematic diagram of the ultrasonic spray pyrolysis apparatus.

基板溫度에 따른 ZnO 膜의 構造的 및 電氣的 特性을 조사하였으며 ZnO 膜의 抵抗率을 높이기 위하여 구리를 添加 하거나 수분증기 분위기에서 濕式酸化(vapor oxidation)하였다. 본 실험의 제조방법을 통해 기존 CVD의 단점인 膜 두께의 불균일성 및 낮은 抵抗率 문제를 해결하고자 한다.

II. 實驗 및 測定

ZnO 膜 蒸着을 위해 본 연구에서 사용한 超音波 噴霧 熱分解 裝置를 그림 1에 나타내었다. 基板을 反應器의 중앙에 두고 超音波 發生器에서 만들어진 ZnO를 함유하는 증기입자를 가열된 基板 위에 운반가스(N₂)로 운송하였다. 이때 反應器 내로 운반된 입자들이 熱分解 되면서 基板 위에 닿아 ZnO 膜이 蒸着되게 된다. 질소가스의 유량은 1 l/min 또는 3 l/min로 하였다. zinc acetate를 메틸알콜에 녹여 반응용액으로 사용하였으며 구리를 불순물로 첨가 하기 위해 copper acetate를 0~1.5 wt.% 섞었다. zinc acetate의 메틸알콜에 함유된 농도는 0.03 mol/l였다. 基板溫度는 200 °C에서 350 °C까지 변화시켰다. 超音波 發生器와 反應器 사이는 pyrex 유리관으로 연결시켰으며 反應器는 길이 20 cm 지름 5 cm인 quartz 管을 사용하였다. 回折角(2θ)을 20°~60°까지 변화시켜 가면서 XRD로 결정성을 관찰하였다. 膜의 표면형태는 SEM으로, 膜의 원소 조성은 AES로 측정하였다. 膜의 抵抗率은 Van der Pauw법을 이용해 측정하였다.

III. 結果 및 考察

1. 蒸着率

사파이어 基板 위에 ZnO 膜을 蒸着하였다. 그림 2에 蒸着된 ZnO 膜의 基板溫度와 蒸着率과의 관계를 나타내었다. 용액농도 0.03 mol/l, 基板溫度 200 °C의 조건에서 蒸着된 ZnO 膜의 蒸着率은 10 Å/min으로 매우 낮게 나타났다. 온도가 증가함에 따라 300 °C까지는 蒸着率이 급격히 증가하였다. 그러나 이보다 높은 온도에는 蒸着率이 급격하게 떨어지는 현상을 보였다. 이는 蒸着溫度가 증가함에 따라 ZnO 분자가 基板에 도달하기 전에 소실되든지 또는 基板에서 ZnO 분자의 再蒸發이 일어나기 때문일 것이다. SiO₂/Si 基板의 경우^[19]에 비해 낮은 온도에서 蒸着率 遷移현상을 보였다. 이는

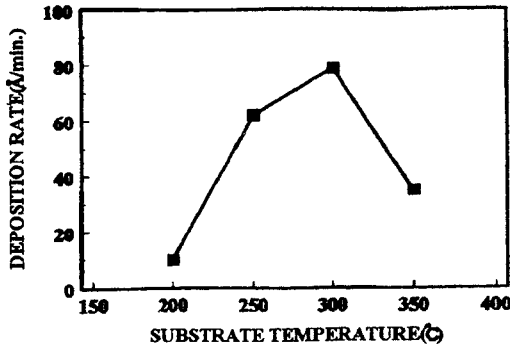


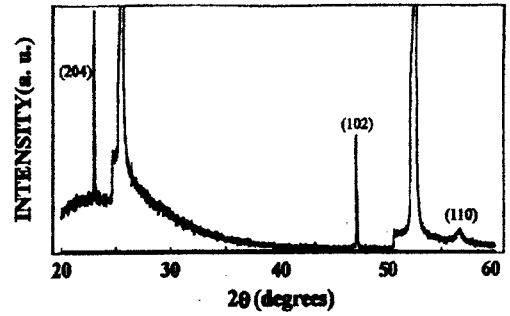
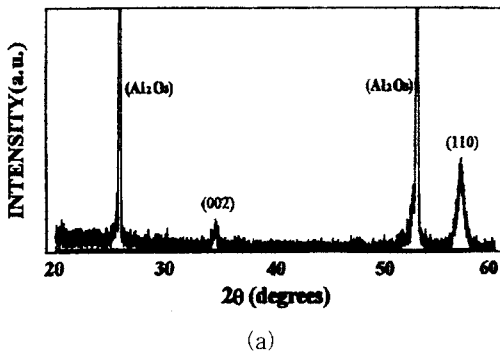
그림 2. 사파이어 基板위에 蒸着된 ZnO 膜의 基板 溫度에 따른 蒸着率

Fig. 2. Deposition rate vs substrate temperature for ZnO films deposited on the sapphires.

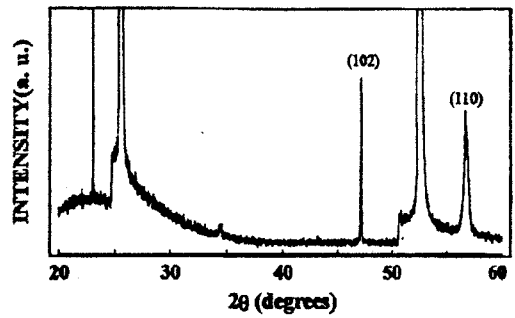
horizontal type과 vertical type 反應器의 내부 온도 분포 차이 때문인 것으로 사료된다

2. 結晶構造 및 組成

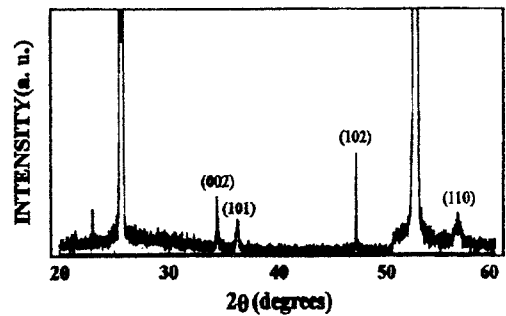
0.03 mol/l 용액으로 증착한 ZnO 膜의 基板溫度에 따른 XRD 결과를 그림 3에 나타내었다. 이때 운반가스의 flow rate는 1 l/min였다. (002) 방향의 ZnO 膜은 c-축이 基板에 대해 수직으로 성장된 형태이고, (110) 방향의 ZnO 膜은 c-축이 基板에 수평으로 분포한 형태이다. 基板溫度 230 °C에서는 (002) (110) 피크가 관찰되고 온도가 증가함에 따라 (002) 피크는 없어지고 (102) (110) 피크가 나타나기 시작했다. 280 °C에서는 (110) (102) 피크치가 약간 더 증가하였으나 300 °C에서는 다양한 방향의 피크치가 나타났다. 基板溫度를 다양하게 변화시켜 보았으나 본 실험에서 원하는 (110) 단일방향의 ZnO 膜은 얻어지지 않았다. 基板溫度를 300 °C 이상으로 높인 경우 제조된 膜의 표면이



(b)



(c)



(d)

그림 3. (a) 230 °C, (b) 250 °C, (c) 280 °C 및 (d) 300 °C 에서 蒸着된 ZnO 膜의 XRD 패턴
Fig. 3. XRD patterns of ZnO films deposited on the sapphires at the substrate temperature of (a) 230 °C, (b) 250 °C, (c) 280 °C and (d) 300 °C.

외견상으로 확인될 정도로 거칠어졌다. 이는 온도가 높을 경우 基板에 닿는 반응입자의 성분 및 농도에 변화가 생기기 때문인 것으로 사료된다. 그림 4는 제조된 膜의 표면을 관찰하기 위해 각각 다른 基板溫度에서 蒸着된 膜의 표면을 찍은 SEM 사진이다. 온도가 증가함에 따라 그레인의 크기가 증가함을 알 수 있다. 300 °C에서 蒸着한 膜의 표면에 굵은 알갱이 형태의 입자를

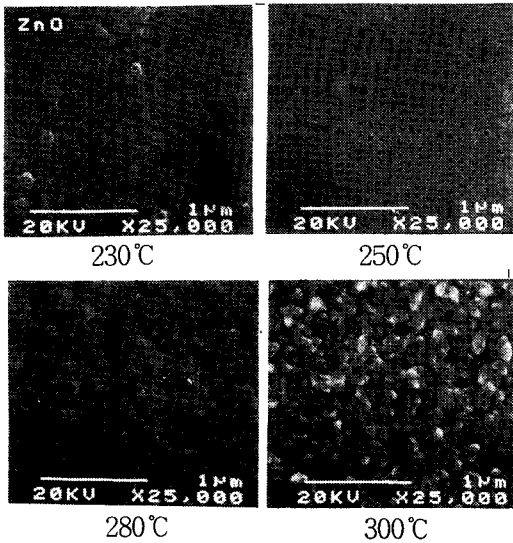
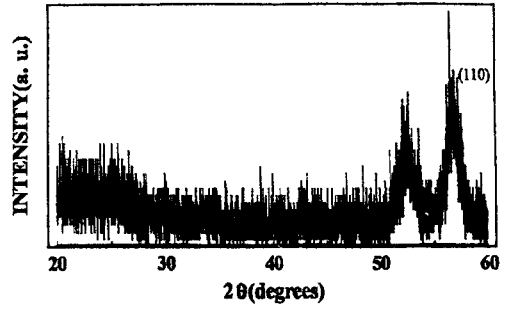
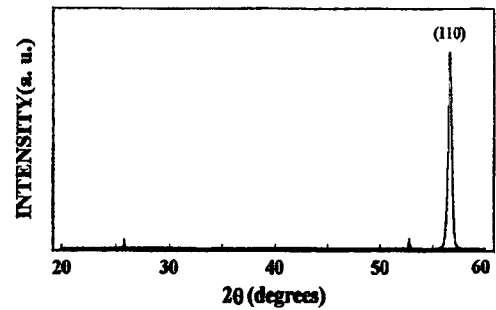


그림 4. 사파이어 基板 위에 蒸着된 ZnO 膜의 SEM 사진
 Fig. 4. SEM photographs of ZnO films deposited on the sapphires.

를 볼 수 있는데 이것은 膜의 표면이 매우 거칠어졌다
 는 것을 나타낸다. 表面彈性波 素子로 이용하기 위해서
 는 표면이 치밀하고도 평탄해야 하는데 蒸着溫度가 증
 가할 경우 이 특성이 저하되는 문제가 발생된다. (110)
 단일방향의 결정을 얻기 위해서는 基板溫度를 높여야
 하며 높은 基板溫度에서도 基板에 닿는 蒸氣粒子의 농
 도를 저온의 경우와 동일하게 유지하려면 운반가스의
 flow rate를 높여야 한다. 따라서 운반가스의 flow
 rate를 1 l/min에서 3 l/min로 증가시킨 後 ZnO 膜
 을 제조하였다. 그림 5에 증가된 flow rate 하에서 제
 조된 ZnO 膜의 XRD 결과를 나타내었다. 250 °C의 경
 우 다양한peak가 관찰되지만 350 °C의 경우 (110) 방
 향의 피크만을 뚜렷하게 볼 수 있다. 운반가스의 flow
 rate를 3 l/min로 높임으로써 기판온도 300 °C 이상
 에서도 표면의 상태가 양호한 막을 제조할 수 있었다.
 특히 기판온도 350 °C에서는 (110)의 단일면을 갖는
 ZnO 막을 얻을 수 있었다. 그림 6은 350 °C에서 제조
 된 膜의 성분을 조사하기 위한 AES 분석 결과이다.
 이 결과로부터제조된 膜의 표면에 다량의 탄소가 함유
 되어 있음을 알 수 있다. 이 탄소는 膜의 抵抗率을 감
 소시키는 하나의 요인이다. 그림 7은 AES 깊이 방향
 분석 결과이다. 膜 전체에 걸쳐 아연과 산소의 비가 일
 정하며 탄소는 膜의 표면에 집중적으로 존재한다. 아연
 과 산소의 비에 차이가 많이 나는 것은 AES 분석시



(a)



(b)

그림 5. 운반가스량 3 l/min으로 蒸着된 ZnO막의 XRD 패턴 : (a) 250 °C 및 (b) 350 °C.
 Fig. 5. XRD patterns of ZnO films deposited at the flow rate of carrier gas 3 l/min : (a) 250 °C and (b) 350 °C.

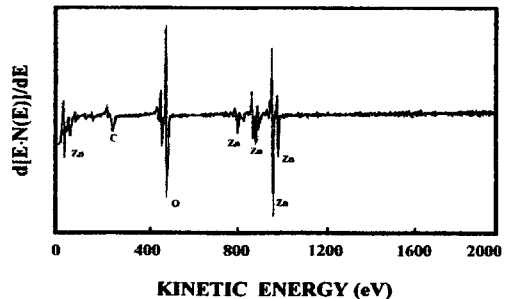


그림 6. ZnO 膜의 濕式酸化 前 AES 스펙트럼
 Fig. 6. AES spectra of the as-deposited ZnO film.

주어지는 아연과 산소의 敏感度(sensitivity)가 실제 敏
 感도와 차이가 나기 때문일 것으로 사료된다.

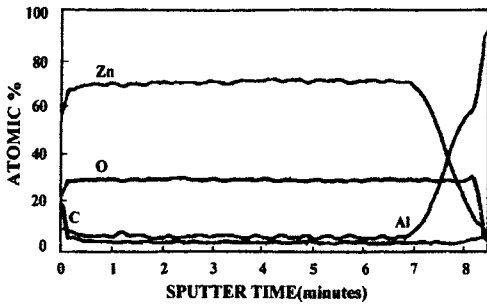


그림 7. ZnO 膜의 濕式酸化 前 AES 깊이 방향분석
Fig. 7. AES depth profile of the as-deposited film.

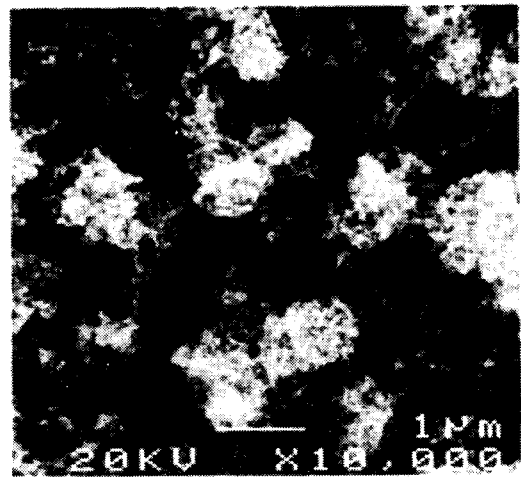
3. 不純物 도핑 및 濕式酸化 效果

일반적으로 ZnO의 電氣的 性質은 미세구조와 첨가제의 종류에 의하여 변화되는 것으로 알려져 있다.^[20] +3 이상의 이온가를 가지는 양이온의 산화물이 첨가되면 전자평형을 위하여 전자가 발생되므로 電氣 傳導度가 증가되는 반면 +1이온가의 금속산화물이 첨가되면 전자평형으로 발생한 정공으로 인하여 電氣 傳導度는 감소된다. +2이온가의 금속산화물의 첨가는 동종 불순물 첨가(isovalent doping)이므로 電氣 傳導度의 변화는 없게 된다. 그러나 구리의 첨가는 ZnO의 電氣 傳導度를 감소시키는 것으로 보고되어 있다.^[21, 22] 본 실험에서는 ZnO 막의 저항율을 증가시키기 위해서 구리를 첨가하였다. 이때 운반가스의 flow rate는 3 l/min였으며 기판온도는 350 °C였다. zinc acetate 용액에 구리를 첨가한 경우 및 濕式酸化 前, 後의 抵抗率 變化를 표 1에 나타내었다. 구리를 첨가하지 않았을 때는 0.3 Ω·cm의 낮은 抵抗率을 나타낸 반면 0.3 wt.%의 구리를 첨가한 경우 100 Ω·cm로 증가하였으며 이것을 濕式酸化 한 後의 抵抗率은 3×10⁶ Ω·cm를 나타내었다. 또한 1 wt.%의 구리를 첨가했을 경우에는 약 2×10⁴ Ω·cm의 抵抗率을 보였다. 그러나 다량의 구리 첨가는 표면의 평탄도를 저하시켰다. 그림 8(a)는 1 wt.% 구리를 첨가한 ZnO 膜의 표면사진이고 (b)는 구리를 첨가하지 않은 ZnO 膜의 濕式酸化 後의 사진이다. 1 wt.% 구리가 첨가된 ZnO 膜의 표면은 외견상으로도 매우 거칠어 보였다. 그림에서는 제시되지 않았으나 0.3 wt.%의 구리를 첨가하여 제조된 ZnO 膜의 표면은 구리를 첨가하지 않은 경우와 차이를 보이지 않았다. 650 °C에서 2 시간 동안 濕式酸化시킨 後에는 그레이인

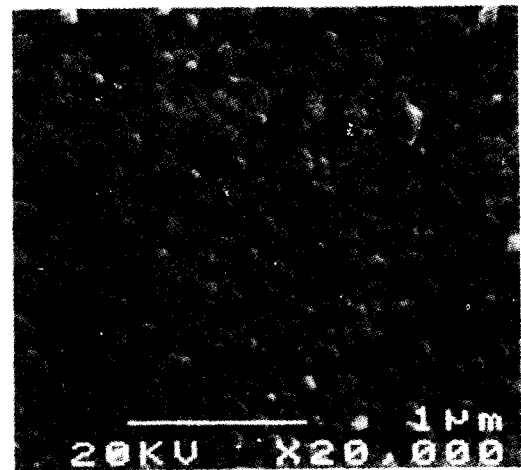
표 1. 사파이어 基板위에 蒸着된 ZnO 膜의 抵抗率 變化

Table 1. The resistivity variation of ZnO films deposited on the sapphires.

Cu wt.% in solution	ρ (Ω·cm)	
	as-deposited	after vapor oxidation
0	0.3	4×10 ⁴
0.3	100	3×10 ⁶
1	2×10 ⁴	≤10 ⁷



(a)



(b)

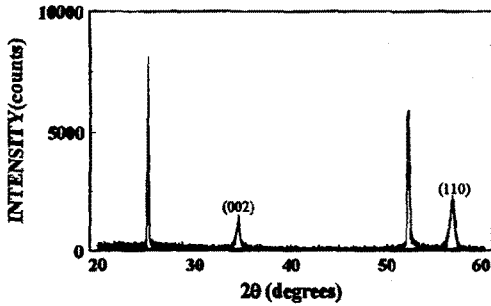
그림 8. (a) 1 wt.% 구리가 첨가된 ZnO 膜과 (b) 濕式酸化시킨 ZnO 膜의 SEM 사진

Fig. 8. SEM photographs of (a) 1 wt.% Cu-oped ZnO film and (b) vapor oxidized ZnO film.

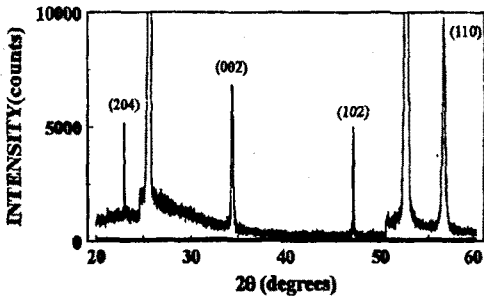
을 볼 수 있다. 일반적으로 그레인의 크기가 증가하면 저항률이 떨어지지만 습식산화의 경우에는 그레인의 증가에도 불구하고 저항률이 증가한 이유는 화학량론적 결합성의 향상때문인 것으로 이해될 수 있다. 특히超音波 噴霧 熱分解法으로 제조된 ZnO 막의 경우 표면 및 그레인 境界面의 화학량론적 결합상상이 저항률 증가의 큰 원인으로 생각된다. 그림 9는 습식산화 前, 後의 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다. 기판온도 230 °C, flow rate 1 l/min의 조건에서 제조된 ZnO 막의 경우이며 산화 前, 後의 피크변화가 가장 뚜렷하였다. 산화 後에 모든 피크치가 급격하게 증가했음을 볼 수 있다. 이것은 SEM 사진에 관측되었던 그레인 크기의 증가와 일치하는 결과이다. 그림 10은 습식산화 後의 AES 결과를 보여주고 있다.

그림 6과 비교해 볼때 습식산화에 의해 표면의 탄소가 감소했음을 알 수 있다. 그림 11은 습식산화한 ZnO 막의 깊이방향 분석을 나타낸 것이다. 표면에서 탄소의

감소와 산소의 증가를 볼 수 있다. 그러나 막 내부의 산소는 증가하지 않았다. 이 결과는 습식산화에 의해 표면 및 그레인 境界面에 산소가 보충된다는 앞의 예측과 부합된다. 구리를 0.3 wt.% 첨가한 後 습식산화 함으로써 표면의 변화가 거의 없는 저항률 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 ZnO 막을 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

그림 9. ZnO 막의 XRD 패턴 : (a) 습식산화 前 및 (b) 습식산화 後
Fig. 9. XRD patterns of ZnO films : (a) as-deposited and (b) after vapor oxidation.

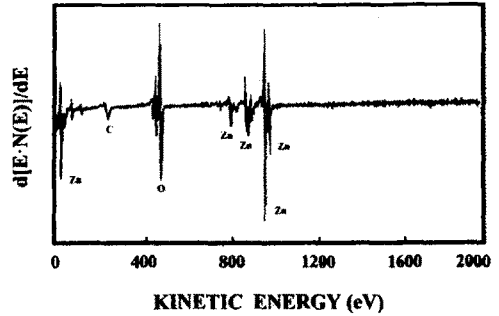


그림 10. 습식산화시킨 ZnO 막의 AES 스펙트럼
Fig. 10. AES spectra of the vapor-oxidized ZnO film.

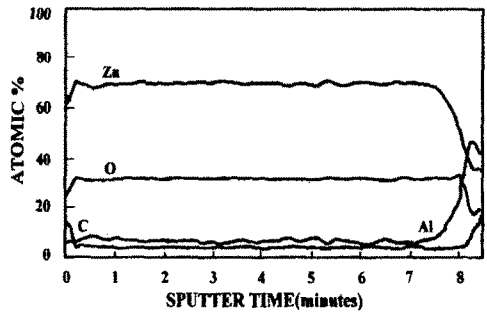


그림 11. 습식산화시킨 ZnO 막의 AES 깊이방향 분석
Fig. 11. AES depth profile of the

IV. 結 論

超音波 噴霧 熱分解法으로 ZnO 막을 r-plane 사파이어 基板 위에 성장시켰다. zinc acetate를 메탄올에 녹인 후 噴霧하였으며 噴霧液 속의 zinc acetate 농도는 0.03 mol/l 로 고정시켰다. 운반가스의 flow rate는 1 l/min 또는 3 l/min였으며 基板溫度는 200 °C에서 350 °C까지 변화시켰다. 온도가 증가함에 따라 (102) 및 (110) 면의 성장이 두드러졌으며 그레인의 크

기 또한 증가하였다. 그러나 300 °C 이상의 온도에서는 굵은 알갱이가 형성되는 등 매우 거친 표면이 형성되었으며 성장된 결정면도 다양하게 나타났다. 운반가스의 flow rate를 3 l/min로 높여 反應器에 주입되는 증기의 농도를 높인 결과 基板溫度 350 °C에서 (110) 방향의 단일 결정면을 갖는 ZnO 膜을 얻을 수 있었다. 구리를 0.3 wt.% 첨가한 後 650 °C에서 2시간 동안 濕式 酸化 함으로써 抵抗率을 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상으로 높였다.

參考文獻

- [1] Takada. Syuichi, "Relation between optical property and crystallinity of ZnO thin films prepared by magnetron sputtering," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 10, pp. 4739~4742, 1993.
- [2] M. Kadota, C. Kondo, T. Ikeda and T. Kasqanami, "The polishing effect of ZnO thin films on SAW filters," *Japan J. Appl. Phys.*, vol. 29, Suppl. 29(1), pp. 159~161, 1990.
- [3] G. Carlotti, G. Socino, A. Petri and E. Verona, "Acoustic investigation of the elastic properties of ZnO films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 23, pp. 1889~1891, 1987.
- [4] Y. Yoshino, M. Kadota, H. Ieki, T. Kasanami and K. Wakino, "Production of ZnO SAW filters by using reactive sputtering method," in Proc. 8th Int. Symp. Plasma Chemistry, Tokyo, Japan, pp. 2271~2276, 1987.
- [5] M. S. Wu, A. Azuma, T. Shiosaki and A. Kawabata, "Low-loss epitaxial ZnO optical waveguides on sapphire by rf magnetron sputtering," *J. Appl. Phys.*, vol. 62, no. 6, pp. 2482, 1987.
- [6] T. Mitsuyu, S. Ono and K. Wasa, "Structure and SAW properties of RF sputtered single-crystal films of ZnO on sapphire," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 1061~1071, 1973.
- [7] Takada. Syuichi, "Relation between optical property and crystallinity of ZnO thin films prepared by rf magnetron sputtering," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, pp. 4739, 1993.
- [8] T. Mitsuyu and K. Wasa, "Structure and SAW properties of rf sputtered single-crystal films of ZnO on sapphire," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 1061~1071, 1973.
- [9] Antonio Valentini, Fabio Quaranta, Michele Penza and R. Rizzi. Federica, "The stability of zinc oxide electrodes fabricated by dual ion beam sputtering," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 3, pp. 1143~1145, 1993.
- [10] J. B. Webb, D. F. Williams and M. Buchanan, "Transparent and highly conductive films of ZnO prepared by rf reactive magnetron sputtering," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, no. 8, pp. 640~642, 1981.
- [11] M. G. Ambia, M. N. Islam and M. Obaidul Hakim, "Temperature effects on the electrical properties of ZnO thin films prepared by the pyrosol process," *Solar Energy Material and Solar Cells*, vol. 28, pp. 103, 1992.
- [12] Md. N. Islam, B. K. Samantaray, K. L. Chopra and H. N. Acharva, "Microstructural characterization of transparent conducting aluminium doped zinc oxide films prepared by spray pyrolysis," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 29, pp. 27~35, 1993.
- [13] M. Tammenmaa, T. Koskinen, L. Hiltunen and L. Niinisto, "Zinc chalcogenide thin films grown by the atomic layer eptaxy technidue using zinc acetate as source," *Thin Solid Films.*, vol. 124, pp. 125~128, 1985.
- [14] P. Souletie, B. W. Wessels, J. Mater, "Growth kinetics of ZnO prepared by organometallic chemical vapor deposition," *J. Mater. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 740~744, 1988.
- [15] F. Z. Omar, O' Brien. Khan and Paul, "On the use of zinc acetate as a novel precursor for the deposition of ZnO by low-pressure metal-organic chemical vapor deposition," *Thin Solid Films.*, vol. 173, pp. 95, 1989.
- [16] M. Shimizu, Y. Matasueda and T. J. Shiosaki, *Cryst. Growth*, vol. 71, pp. 209, 1985.
- [17] M. Labeau, P. Rey, J. L. Deschanvres, J. C. Joubert and G. Delabouglise, "Thin flms of

- high-resistivity zinc oxide produced by a modified CVD method," *Thin Solid Films.*, vol. 213, pp. 94, 1992.
- [18] A. Tiburcio-Silver, J. C. Joubert and M. Labeau, "ZnO transparent conducting thin films deposited by ultrasonic spray pyrolysis for solar energy conversion," *Thin Solid Films.*, vol. 197, pp. 195, 1991.
- [19] T. Y. Ma, S. H. Kim, H. Y. Moon and G. C. Park, "Substrate temperature dependence of ZnO films prepared by ultrasonic spray pyrolysis," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 12, pp. 6208~6211, 1996.
- [20] T. P. Gupta, "Application of zinc oxide varistor," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 73, pp. 1817, 1990.
- [21] N. Raghu and T. R. N. Kutty, "The influence of dislocation on the nonlinearity of ZnO : Cu varistors," *J. Mater. Soc.*, vol. 1, pp. 84, 1990.
- [22] B. S. Chiou, M. C. Chung, "Effect of copper additives on the microstructure and electrical properties of polycrystalline zinc oxide," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 75, pp. 3363, 1992.

 著 者 紹 介

마 대 영

『센서학회지 제 5권 1호』, 논문 96-5-1-06, p.42 참조.
현재 국립 경상대학교 전기공학과 교수.


문 현 열

1966년 3월 15일생. 1988년 경상대학교 졸업. 1997년 경상대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).
현재 : 경상대학교 전기공학과 박사과정.


이 수 철

1968년 2월 12일생. 1990년 경상대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1996년 경상대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 : 경상대학교 전기공학과 박사과정.