

# RF 마그네트론 스퍼터링에 의한 ZnO 박막의 증착 및 구리 도우핑 효과

論 文  
49C - 12 - 2

## Deposition of ZnO Thin Films by RF Magnetron Sputtering and Cu-doping Effects

李進馥\* · 李惠靜\*\* · 徐洙瑩\*\*\* · 朴珍奭§  
(J.B.LEE\* · H.J.LEE\*\* · S.H.SEO\*\*\* · J.S.PARK§)

**Abstract** - Thin films of ZnO are deposited by using an RF magnetron sputtering with varying the substrate temperature(RT ~ 390 °C) and RF power(50 ~ 250 W). Cu-doped ZnO(denoted by ZnO:Cu) films have also been prepared by co-sputtering of a ZnO target on which some Cu-chips are attached. Different substrate materials, such as Si, SiO<sub>2</sub>/Si, sapphire, DLC/Si, and poly-diamond/Si, are employed to compare the c-axial growth features of deposited ZnO films. Texture coefficient(TC) values for the (002)-preferential growth are estimated from the XRD spectra of deposited films. Optimal ranges of RF powers and substrate temperatures for obtaining high TC values are determined. Effects of Cu-doping conditions, such as relative Cu-chip sputtering areas, O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) mixing ratios, and reactor pressures, on TC values, electrical resistivities, and relative Cu-compositions of deposited ZnO:Cu films have been systematically investigated. XPS study shows that the relative densities of metallic Cu(Cu<sup>0</sup>) atoms and CuO(Cu<sup>2+</sup>)-phases within deposited films may play an important role of determining their electrical resistivities. It should be noted from the experimental results that highly resistive(> 10<sup>10</sup> Ωcm) ZnO films with high TC values(> 80%) can be achieved by Cu-doping. SAW devices with ZnO(or ZnO:Cu)/IDT/SiO<sub>2</sub>/Si configuration are also fabricated to estimate the effective electric-mechanical coupling coefficient(k<sub>eff</sub><sup>2</sup>) and the insertion loss. It is observed that the devices using the Cu-doped ZnO films have a higher k<sub>eff</sub><sup>2</sup> and a lower insertion loss, compared with those using the undoped films.

**Key Words** : ZnO, Cu-doping effect, RF magnetron sputtering, structural and electrical properties, SAW device

### 1. 서론

표면탄성파(surface acoustic wave, SAW)소자[1],[2]는 최근 통신용 수동소자의 하나로 널리 사용되고 있으며, LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> 등과 같은 단결정 재료가 압전(piezoelectric)기판의 주종을 이루고 있다. 그러나, 최근에 대부분의 통신용 소자 및 부품이 소형화, 경량화 및 고주파화되는 추세에 따라 SAW 소자의 경우에도 sub-micron 이하의 미세 공정 및 새로운 박막형 압전재료의 개발에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다. SAW 소자용 압전재료는 효과적인 탄성파의 발생, 전달 및 검출이 가능하고, 높은 전기기계 결합계수(electric-mechanical coupling coefficient)를 나타내기 위하여 구조적으로 c-축 (002) 우선 성장 특성을 가져야 하며, 소자의 주파수응답에서 나타나는 삽입손실(insertion loss) 및 특성의 왜곡현상을 줄이기 위하여 충분히 높은 전기적 비저항을 가져야 한다.[3] ZnO 박막은 (002) 배향성이 비교적 잘 나타나 압전 물성이 우수하고, 기존의 반도체 공정 기술을 그대로 적용할 수 있으며, 특히 다이아몬드, 사파이어

등과 함께 다층막을 형성하는 경우 표면에서의 SAW 전달속도가 매우 높기 때문에[4],[5] 특히 수 백 MHz ~ 수 GHz 범위의 고주파 SAW 소자용 압전재료로서 매우 이상적인 박막재료로 평가되고 있다.

일반적으로 ZnO 박막의 증착은 RF 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 방법이 널리 이용되고 있는데, 기판의 종류에 거의 제한을 받지 않으며, 상온 근처의 저온에서도 증착이 가능한 장점을 가지고 있다. ZnO 박막의 비저항을 높이는 방법으로 스퍼터링 증착시 산소를 첨가하여 Ar/O<sub>2</sub> 가스의 혼합비를 변화시킴으로써 박막내 Zn/O의 조성이 화학양론적 조성비에 근접하도록 하는 방법이 있으나, 이 방법을 사용하는 경우에는 산소가 과량 첨가되면 증착율이 저하되고 c-축 성장이 저하될 수 있다는 연구결과가 보고된 바 있다.[6] 따라서, 최근에는 Li, Cu 등과 같은 산화물 형성이 가능한 금속성 불순물을 첨가하여 박막의 비저항을 증가시키는 연구도 활발히 시도되고 있다.[7],[8] 이와 관련하여, 불순물의 첨가가 ZnO 박막의 c-축 우선 성장에 영향을 미칠 수 있으며, Li 또는 Cu 등이 첨가된 ZnO 박막은 수분의 흡착에 대한 저항성을 증대시키기 때문에 SAW 소자의 작동시 누설전류에 따른 여러 현상들이 제거될 수 있다는 결과들이 발표된 바 있다.[9] 그러나, 아직까지 불순물 첨가시 다양한 첨가조건이나 불순물의 종류 등에 따른 ZnO 박막의 구조적 물성과 전기적 비저항의 변화에 대한 체계적인 연구나 도출된 결과에 대한 명확한 원인 규명 등이 이루어지고 있지 않으며, 특히, ZnO 박막을 이용하여 SAW 소자를 제작하고 그 소자 특성을 ZnO

\* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程  
\*\* 準 會 員 : 漢陽大 電子電氣制御計測工學科 碩士課程  
\*\*\* 正 會 員 : 漢陽大 電子材料 및 部品 研究센터 Post-Doc  
§ 正 會 員 : 漢陽大 電子컴퓨터學部 副教授 · 工博  
接受日字 : 2000年 10月 25日  
最終完了 : 2000年 11月 9日

박막의 물성 및 불순물의 첨가 효과 등과 관련하여 분석한 연구는 매우 미흡하다.

따라서, 본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 방법에 의한 ZnO 박막의 증착시, 다양한 기판 종류에 따른 c-축 우선 배향성 여부를 관찰하고, 양호한 (002) 성장 특성을 나타내는 최적 기판온도 및 RF 인가전력을 도출하였으며, Cu가 첨가된 ZnO 박막(이후부터, ZnO:Cu로 표기) 증착시 Cu의 첨가량, O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 가스 혼합비, 반응기내 압력 등에 따른 박막의 구조적 물성 및 전기적 비저항의 변화를 분석하고, 이러한 박막 물성과 증착변수 사이의 상관관계를 XPS 분석을 통하여 규명하였다. 또한, ZnO 및 ZnO:Cu 박막을 이용하여 SAW 소자를 제작하고, Cu의 첨가량에 따른 유효(effective) 전기기계 결합계수(이후, k<sub>eff</sub><sup>2</sup>로 표기) 및 삽입손실 등의 변화를 정량적으로 산출하였다.

## 2. 실험방법

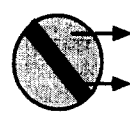
RF 마그네트론 스퍼터링에 의한 ZnO 및 ZnO:Cu 박막 증착시, oil diffusion pump를 사용하여 약 1×10<sup>-6</sup> Torr의 초기 고진공을 유지하였고, 균일한 박막 증착을 위하여 증착 중에 기판은 저속으로 회전시켰으며, 스퍼터링용 가스는 Ar(99.999%)을 사용하였다. ZnO 타겟은 4 inch 크기의 99.999%의 순도를 갖는 소결체를 사용하였으며, 면적 조절이 가능한 Cu-chip을 ZnO 타겟 위에 부착하여(표1의 삽입 그림 참조) 반응성 동시-스퍼터링(reactive co-sputtering)을 수행하여 다양한 Cu 조성비를 가지는 ZnO:Cu 박막을 증착하였다. 또한, 기판의 종류에 따른 ZnO 박막의 c-축 (002) 우선 배향성 및 성장구조의 차이를 비교하기 위하여, Si, SiO<sub>2</sub>/Si, DLC(diamond-like carbon)/Si, sapphire, poly-diamond/Si 등의 다양한 기판 재료를 사용하여 ZnO 박막을 증착하였다. 여기서, SiO<sub>2</sub>는 RF 마그네트론 스퍼터링 장치를 이용하여 100 W, 5 mTorr, Ar/O<sub>2</sub> = 7/3, 250 °C 조건에서 2000 Å의 두께로 증착하였고, sapphire는 (0001) hexagonal 구조를 가진 단결정 기판을 사용하였으며, DLC 박막은 FCVA(filtered cathodic vacuum arc)[10] 증착 장치를 이용하여 상온에서 3000 Å의 두께로 증착한 것이다. 또한, 다결정 다이아몬드는 MPCVD(microwave plasma chemical vapor deposition)[11] 증착 장치를 이용하여 900 W, 3 Torr, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> = 2%의 조건에서 4 μm의 두께로 증착하였으며, 증착된 다이아몬드 기판은 XRD 분석 결과 (111)면으로 성장된 것으로 나타났다. 표1은 ZnO 및 ZnO:Cu 박막의 증착을 위해 사용한 주요 변수들의 범위를 요약하여 나타낸 것으로서, ZnO 박막의 물성 분석 결과를 토대로 ZnO:Cu 박막의 증착시에는 RF 전력을 100 W, 기판온도를 200 °C로 각각 설정하고 Cu-chip의 면적비, O<sub>2</sub>/(Ar+O<sub>2</sub>) 가스의 혼합비, 증착시 반응기내 압력 등의 변화에 따른 물성 변화를 집중적으로 분석하였다.

증착된 ZnO 및 ZnO:Cu 박막에 대하여 XRD(x-ray diffractometer, Bede D3 system) 분석을 통하여 (002) 우선 배향성을 확인하였고, FE-SEM(field emission scanning electron microscope, JEOL JSM-6330F)으로 박막의 단면 형상을 관찰하였으며, EDXS(energy dispersive x-ray spectrometer, oxford 7168)를 이용하여 박막내 Cu와 Zn의 상대적인 성분비를 산출하였다. 그리고, XPS(x-ray photoelectron spectroscopy, ESCALAB 22ci-XL)를 이용하여 ZnO 박막내에서 Cu<sup>0</sup>, Cu<sup>1+</sup>, Cu<sup>2+</sup> 등과 같이 다양한 형태로 산화된 Cu-O 결합을 검출하여 증착조건에 따른 변화를 분석하였다. 또한, 증착된 박막의 전기적 비저항을 측정하기 위하여 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 1000 Å의 두께와 0.06 cm<sup>2</sup>의 면적을 가진

Al 전극을 형성하고 gold wire로 접촉시킨 후, test fixture(HP 16055A)에 설치하여, pico-ampere meter/DC voltage source(HP 4140B) 장비로 0 ~ 1 V의 전압 범위에서 0.01 V의 간격으로 전압을 인가하여 측정된 전류-전압 특성을 측정하였다. 전류-전압 특성의 Ohmic 영역으로부터 기울기를 계산하고, 박막의 두께 및 접촉 면적을 고려하여 ZnO 및 ZnO:Cu 박막의 비저항을 산출하였다. 또한, 사진식각 공정을 통하여 IDT(interdigital transducer) 패턴을 먼저 형성하고, 그 위에 ZnO 및 ZnO:Cu 박막을 증착하여 SAW 소자를 제작하고, network analyzer(HP 9720)를 이용하여 주파수 응답 특성을 측정하고 impedance/gain-phase analyzer(HP 4194)로 임피던스를 측정하여 cross-field 모델로부터 도출된 등가회로를 적용하여 SAW 소자에서 실제 나타나는 k<sub>eff</sub><sup>2</sup> 및 삽입손실을 정량적으로 산출하였고 이를 Cu의 첨가량에 따라 분석하였다.

표1 ZnO 및 ZnO:Cu 박막의 주요 증착조건

Table1 Deposition conditions of ZnO and ZnO:Cu films

	Undoped (ZnO)	Cu-doped (ZnO:Cu)
Target configuration	 <p>ZnO target (99.999%) Cu-chip (only for ZnO:Cu films) Area ratio of Cu-chip to ZnO target = 2 ~ 25 %</p>	
Substrate temperature	RT ~ 390 °C	200 °C
Target configuration	50 ~ 250 W	100 W
O <sub>2</sub> /(Ar + O <sub>2</sub> ) mixing ratio	0 ~ 50 %	0 ~ 90 %
Deposition pressure	3, 5 mTorr	3 ~ 12 mTorr

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 증착 조건에 따른 ZnO 박막의 물성 변화

ZnO 박막의 기판재료에 따른 c-축 (002) 우선 성장 특성 및 주상구조 성장 등을 조사하기 위해 증착시 반응기의 압력을 3 mTorr, 기판온도를 200 °C로 각각 고정하고, Si (100) 및 Si (111) 기판외에, SiO<sub>2</sub>(2000 Å)/Si (100), DLC(3000 Å)/Si (100), poly-diamond(4 μm)/Si (100) 및 sapphire 기판 등의 위에 ZnO 박막을 증착한 후 XRD 및 FE-SEM을 관찰하였다.

그림1은 상기한 기판재료 위에 증착된 ZnO 박막들에 대한 XRD 분광 분석 결과를 비교하여 나타낸 것으로서, Si (100) 기판을 사용한 경우를 제외하고 모든 기판재료에 대하여 ZnO 박막이 (002) 방향으로 우선 성장하였음을 알 수 있다. Si (100) 기판의 경우와는 달리, Si (111)기판위에서 (002) 우선 성장이 잘 나타나는 이유는 cubic 구조의 Si (111) 방향이 ZnO의 hexagonal 구조와 유사하기 때문이며, 동일한 이유로 (111)면으로 성장된 다결정 다이아몬드를 기판위에서도 (002) 우선 성장이 잘 나타난 것을 알 수 있으나, Si (100)위에서는 기판 배향성의 영향으로 (100)과 (110) 방향의 성장이

오히려 더 우선적임을 알 수 있다. 또한, 사파이어와 같이 hexagonal의 단결정 (002) 방향으로 성장된 기판을 사용한 경우는 ZnO 박막도 (002) 우선 성장 특성을 보였으며, DLC와 SiO<sub>2</sub>/Si과 같은 비정질 박막을 기판으로 사용한 경우는 기판 자체가 특정 방향으로의 성장 특성이 없기 때문에 기판의 영향을 받지 않고 ZnO 박막 자체가 가지고 있는 (002) 성장이 관찰되었다. XRD 분석 결과에서 ZnO 박막의 (002) 우선 성장의 경향을 보다 정량적으로 비교하기 위하여 (002) 방향에 대한 peak의 세기를 다른 성장면들의 peak에 대한 상대적인 크기로 나타낸 TC(texture coefficient)값[12]을 비교한 결과, Si (100) 기판의 경우를 제외하고 본 실험에서 사용된 모든 기판에 대하여 약 72 ~ 82.4 %의 TC값을 가지는 것으로 나타났다.

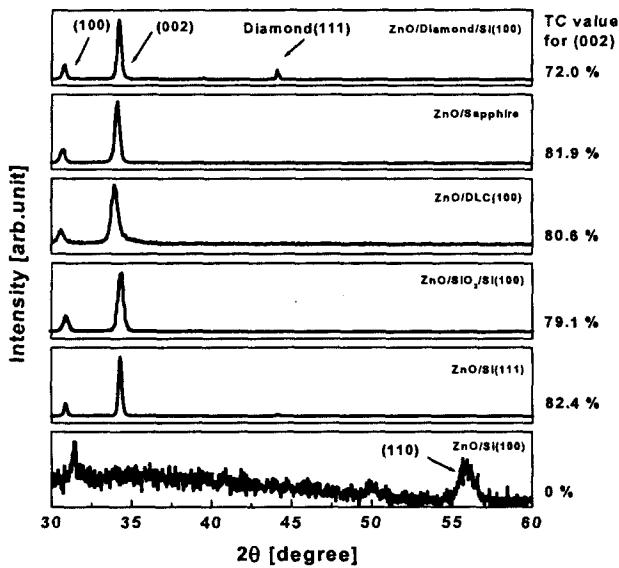


그림1. 다양한 기판재료위에 증착된 ZnO 박막의 XRD 패턴  
Fig.1 XRD patterns of ZnO films deposited on various substrate materials

또한, 그림2는 상기 실험에서와 같이 각기 다른 기판재료위에 증착된 ZnO 박막에 대하여 FE-SEM을 이용하여 각각의 단면형상을 관찰한 결과로서, 그림1의 XRD 결과로부터 확인한 바와 같이 Si (100)을 기판으로 이용한 경우를 제외한 다른 기판재료들에 대하여 모두 비교적 명확한 주상구조(columnar structure)의 형태로 ZnO 박막이 성장되었음을 알 수 있는 바, 이후 실험부터는 박막 증착에 모두 SiO<sub>2</sub>/Si 기판을 사용하였다.

그림3은 기판의 온도를 상온 ~ 390 °C 범위에서 각각 달리하여 증착한 ZnO 박막의 XRD 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 상온에서 증착된 경우에는 (002) 방향으로의 우선 성장보다 오히려 (101) 방향으로의 성장이 더 잘 나타나지만, 기판의 온도가 높아짐에 따라서 TC값의 큰 차이 없이 모두 (002) 방향으로의 성장이 지배적인 것을 알 수 있다. 이는 ZnO 박막의 증착시 기판온도가 어느 정도 높은 경우에는 스퍼터링되어 기판에 도달하는 기상 입자들이 기판의 표면 위에서 (002) 방향으로 성장할 수 있는 충분한 이동도를 가질 수 있지만, 기판온도가 낮은 경우에는 표면 이동도가 낮아 어느 특정한 방향으로의 우선 성장이 이루어지기보다는 (101) 방향과 같이 다른 방향으로의 성장도 가능하기 때문이라 사료되며, 이와 유사한 결과는 기존의 Hickernell의 연구[13]에서도 찾아 볼 수 있다.

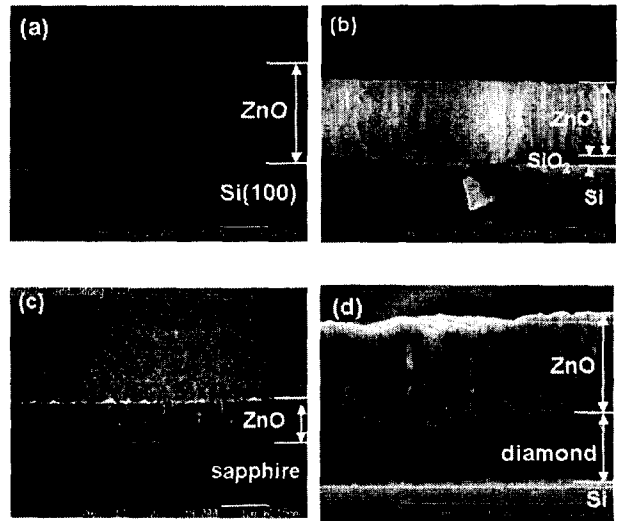


그림2. ZnO 박막의 기판재료에 따른 FE-SEM 단면형상 :  
(a) Si(100), (b) SiO<sub>2</sub>/Si, (c) sapphire, (d) poly-diamond(111)/Si  
Fig.2 FE-SEM cross-sectional morphologies of ZnO films deposited on (a) Si(100), (b) SiO<sub>2</sub>/Si, (c) sapphire, (d) poly-diamond(111)/Si

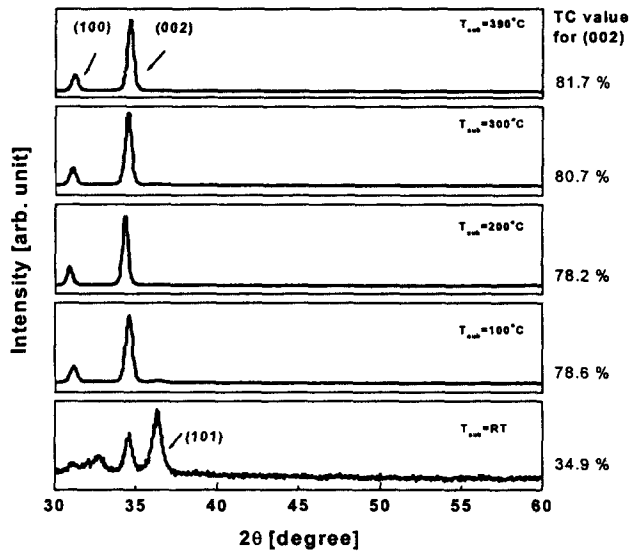
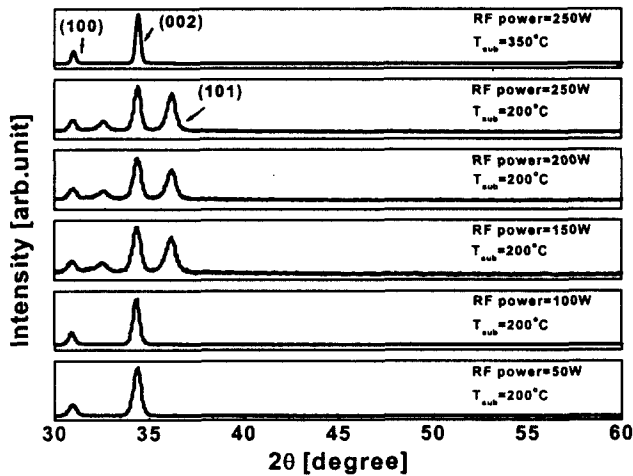


그림3. 증착시 기판온도(T<sub>sub</sub>)에 따른 ZnO 박막의 XRD 결과  
(100 W, 3 mTorr)

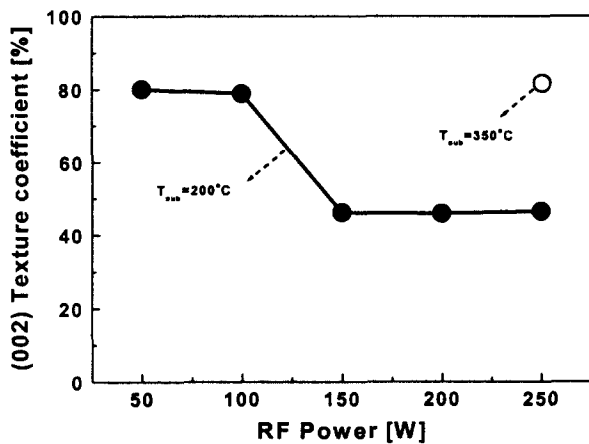
Fig.3 XRD results of ZnO films deposited at various substrate temperatures(T<sub>sub</sub>) (100 W, 3 mTorr)

그림4는 기판온도를 200 °C로 고정하고, RF 인가전력을 50 ~ 250 W의 범위로 변화시키면서 증착한 ZnO 박막들에 대한 XRD peak의 변화를 나타낸 것으로서, 100 W 이하의 비교적 낮은 RF 전력에서 증착된 박막의 경우는 (002) 우선 성장이 우세한 반면, 더 높은 RF 전력을 인가한 경우는 (002)를 비롯한 다양한 방향으로의 박막 성장이 이루어짐을 알 수 있다. 이는 인가 전력이 높은 경우에

박막 증착에 참여하는 원자들이 충분히 격자 평형 위치로 이동하지 못한 상태로 지속적으로 스퍼터링된 다른 입자들이 기판에 도달하기 때문에 특정 방향으로의 우선 성장이 이루어지지 못하기 때문이라 사료되며,[14] 이와 같이 기판 표면에서의 원자 이동도가 ZnO 박막의 (002) 우선 성장 특성에 영향을 미친다는 해석은 그림4에 함께 나타낸 바와 같이, 인가전력이 250 W로 높은 경우에도 기판의 증착 온도를 200 °C에서 350 °C로 증가시켜 스퍼터링된 입자들의 에너지를 증가시키면 기판 표면에서의 원자 이동도가 증가하기 때문에 ZnO 박막이 다시 (002) 우선 성장 특성을 가지게 되는 결과로부터 간접적으로 검증할 수 있었다.



(a)



(b)

그림4. ZnO 박막의 RF 인가전력에 따른 (a) XRD peak 및 (b) TC값의 변화

Fig.4 (a) XRD peaks and (b) TC values of ZnO films deposited at different RF powers

또한, 이상과 같이 각기 다른 RF 인가전력과 기판온도에서 증착된 ZnO 박막들에 대하여 FE-SEM을 이용하여 성장 단면구조를 관찰하고 이를 그림5에 비교하여 나타내었다. 동일한 기판온도에서 RF 인가전력을 변화시킨 경우(즉, 그림5의 (a)와 (b)), 100 W 에서는 기판에 거의 수직(c-축) 방향으로의 주상구조로 박막이 성장하

였음을 뚜렷이 볼 수 있는 반면에, 200 W의 경우에는 특정한 방향성이 없이 비교적 임의의 방향으로 막이 성장하였음을 알 수 있으며, 그림5의 (c)를 (b)와 비교할 때, RF 인가전력을 250 W로 높게 한 경우에도 기판온도를 350 °C로 증가시키면 주상구조로 막이 성장하였음을 알 수 있다. 또한, 그림5의 (d)를 (a)와 비교할 때, 확연히 구별하기는 어려우나 동일한 RF 인가전력에서도 상온에서와 같이 기판온도가 낮으면 c-축 성장이 상대적으로 다소 명확하지 못함을 알 수 있다.

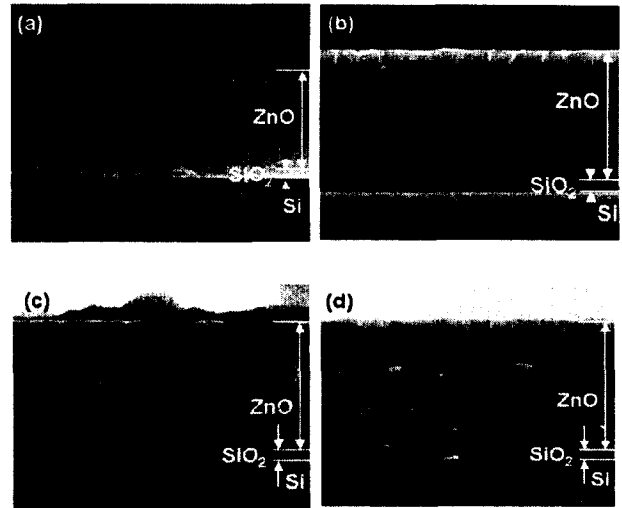


그림5. 다양한 RF 전력 및 온도에서 증착된 ZnO 박막의 FE-SEM 단면 사진 :

(a) 100W, 200°C, (b) 200W, 200°C, (c) 250W, 350°C, (d) 100W, RT

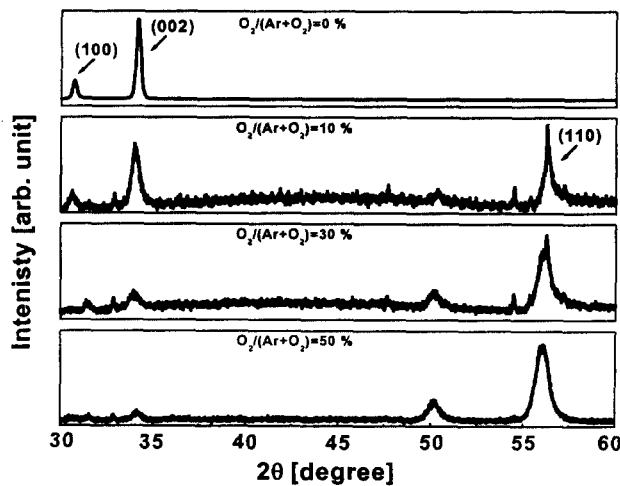
Fig.5 FE-SEM cross-sectional images of ZnO films deposited at various RF powers and substrate temperatures :

(a) 100W, 200°C, (b) 200W, 200°C, (c) 250W, 350°C, (d) 100W, RT

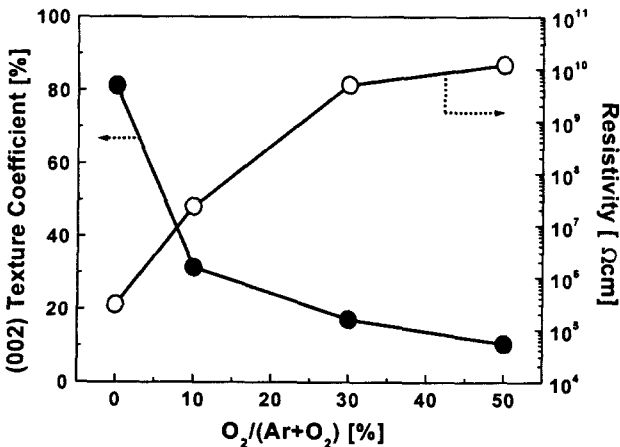
스퍼터링을 이용한 ZnO 박막의 증착시 증착조건의 설정 범위에 따라서는 간혹 ZnO 타겟 자체에 포함되어 있는 산소만으로는 박막 내 Zn와 O의 화학양론비를 충족시키기에 산소의 양이 상대적으로 부족한 경우가 있다. 이와 관련하여 본 연구에서는 ZnO 박막 증착시 산소 가스를 첨가하여 반응성 스퍼터링이 이루어지게 하고, 산소의 첨가가 박막의 구조적 물성 및 전기적 비저항의 변화에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여, 기판온도를 200 °C, RF 인가전력을 100 W, 증착시 반응기의 압력을 5 mTorr로 각각 고정하고, O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>)의 가스 혼합비를 0 ~ 50 %의 범위로 변화시키면서 박막을 증착하였다.

그림6의 (a)와 (b)는 산소 첨가에 따른 ZnO 박막의 XRD 결과와 이로부터 산출된 TC값 및 전기적 비저항의 변화를 나타낸 것으로서, 산소 가스를 첨가하지 않은 경우에는 박막의 (002) 우선 성장 특성이 잘 나타났으나, 산소의 첨가량을 증가시킬수록 (002) 우선 성장이 현저히 저해되는 경향을 보였다. 이와 같이 본 실험에서 산소의 첨가량이 많을수록 ZnO 박막의 (002) 우선 성장 특성이 저하되는 이유는, ZnO 박막의 증착시 높은 에너지를 갖는 산소 중성 입자들이 증착이 이루어지는 동안 기판 표면에 도달하여 박막의 격자나

특세에 침입하여 특정한 방향으로의 박막 성장을 저해하거나,[15] 높은 에너지의 중성 산소입자에 의해 증착되는 박막의 표면에서 재스퍼터링(re-sputtering) 현상이[16] 나타나기 때문이라 사료된다. 기존의 다른 일부 연구에서는 산소 가스를 첨가하는 경우에만 ZnO 박막의 (002) 우선 성장이 가능하다는 결과[3]가 발표된 바 있었으나, 본 연구에서 사용한 증착시스템의 사양이나 증착조건의 범위 등에 다소 차이가 있기 때문에 상기와 같은 기존의 견해를 본 연구에 그대로 적용하기는 어렵다고 판단된다. 또한, 그림6의 (b)에 나타낸 바와 같이, 산소의 첨가량이 증가할수록 박막의 비저항이 증가하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 산소 가스가 첨가되지 않거나 첨가량이 작을 경우에는 증착된 ZnO 박막내에 Zn가 충분히 ZnO화 되지 못하고 금속성 Zn로 존재하게 되고 이에 따라 자유전자의 밀도가 증가하기 때문에 상대적으로 낮은 비저항을 가지게 되며, 산소의 공급이 충분한 경우에는 ZnO화가 충분히 이루어지고 금속성 Zn의 밀도가 현저히 감소하여 높은 비저항을 나타내게 된 것이라 판단된다.



(a)



(b)

그림6. 산소 첨가에 따른 ZnO 박막의 (a) XRD peak, (b) TC값 및 비저항의 변화

Fig.6 Effects of oxygen incorporation on (a) XRD peaks, (b) TC values and resistivities

### 3.2 Cu 첨가에 따른 ZnO 박막의 물성 변화

서론에서 언급한 바와 같이, ZnO 박막의 전기적 비저항과 화학적 내구성을 높이기 위하여 Li 또는 Cu를 박막내에 첨가하는 방법이 사용되고 있고, 일부 연구에서는 불순물의 첨가가 기판에 수직인 (002) 방향으로의 성장에 영향을 미칠 수 있다는 결과도 보고된 바 있다.[17] 본 연구에서는, Cu의 첨가가 ZnO 박막의 물성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하기 위하여 Cu-chip이 부착된 ZnO 타겟에 대한 반응성 동시-스퍼터링(co-sputtering) 방법을 이용하여 기판 온도를 200 °C, RF 인가전력을 100 W, 증착압력을 5 mTorr, O₂/(Ar+O₂) 혼합비를 10 %로 각각 고정하고, 타겟 전체에 대하여 Cu-chip이 스퍼터링되는 상대적인 면적비를 2 ~ 25 %의 범위로 변화시켜 박막내에 Cu 조성비가 각기 다른 다양한 ZnO:Cu 박막을 증착하여, Cu 첨가량, O₂/(Ar + O₂) 산소가스 혼합비 및 증착시 반응기 압력 등에 따른 물성의 변화를 조사하였다.

그림7의 (a)와 (b)는 ZnO 타겟에 대한 Cu-chip의 상대적인 면적비에 따른 ZnO:Cu 박막의 XRD 패턴 및 TC값의 변화를 각각 나타낸 것이다. Cu-chip의 면적비가 2 ~ 19 % 범위에서 증착된 박막의 경우에는 (002) 우선 배향성 및 TC값에 거의 차이가 없었으나, 면적비를 25 %로 증가시킨 경우에는 (002) 방향 이외에 2θ = 38 ° 근처에서 (111)-CuO상이 관찰되었고, (002) 방향에 대한 TC값이 현저히 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나, 면적비가 25 %로 높은 경우에도 산소 가스의 혼합비를 10 %에서 50 %로 증가시키면 다시 (002) 우선 성장 특성이 나타났으며, TC값도 약 80 % 정도로 면적비가 낮은 경우에 증착된 박막들과 거의 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는, 박막내에 Cu의 첨가량이 많고 산소의 공급이 충분하지 않은 경우에는 박막내 Cu가 대부분 Zn-O 결합의 격자간(interstitial)에 금속성 Cu로 존재하게 되고, 또한 일부는 (002) 방향으로 성장하는 ZnO의 Zn를 효과적으로 치환하지 못하고 (111)-CuO상과 같이 다른 방향으로의 막 성장에 참여하게 된다는 것을 의미한다. ZnO:Cu 박막내의 금속성 Cu는 다음의 실험에서와 같이 박막의 비저항 변화에 많은 영향을 미친다.

그림8은 Cu-chip의 면적비에 따른 ZnO:Cu 박막의 전기적 비저항과 박막내 Cu의 Zn에 대한 상대적인 조성비의 변화를 함께 나타낸 것으로서, 우선 Cu-chip의 스퍼터링 면적이 증가할수록 예측한 대로 박막내의 Cu 함유량이 증가함을 알 수 있다. 박막의 비저항은 산소 가스의 혼합비가 낮은(10 %) 경우에는 Cu-chip의 스퍼터링 면적이 증가할수록 현저히 낮아지지만, 산소 가스의 혼합비가 높은(50 %) 경우에는 Cu의 함유량에 거의 관계없이 비교적 높은 비저항값을 유지하는 것을 알 수 있는데, 이는 산소의 공급이 충분한 경우 CuO의 형성으로 박막내 금속성 Cu의 밀도가 낮아지기 때문이다. 여기서, 산소 가스의 혼합비가 50 %인 경우 Cu의 상대적인 조성비가 다소 감소한 이유는, 반응기내 압력이 일정한 상태에서 산소 혼합비를 증가시키면 상대적으로 Ar 가스의 유량이 낮아지고 이에 따라 Cu와 Zn에 대한 스퍼터링 조건이 약화되지만 Zn에 비하여 상대적으로 스퍼터링 효율이 더 높은 Cu[18]가 이러한 영향을 더 많이 받았기 때문이다. 또한, 그림6 ~ 그림8에 제시한 실험결과들을 통하여 주목할 만한 점은, Cu를 첨가하지 않은 ZnO 박막의 경우에는 박막의 비저항을 높이기 위하여 산소를 첨가했을 때 (002) 우선 성장이 저해되는 상호 trade-off의 경향을 보였지만, Cu가 첨가된 ZnO:Cu 박막의 경우에는 적정 범위의 산소 첨가에 의해 약 80 % 이상의 TC값을 유지하면서도 10<sup>10</sup> Ωcm 이상의 높은 비저항을 동시에 가질 수 있는 박막을 얻을 수 있었다는 것이다. 이러한 Cu 첨가 효과는

향후 ZnO 박막의 SAW 소자 응용시 유리한 측면으로 작용할 것이라 사료되며, 본 연구에서는 특히, ZnO:Cu 박막내의 금속성 Cu의 존재와 박막의 전도현상과의 상관관계를 3.3절에서 XPS 분석을 통하여 다시 검토하였다.

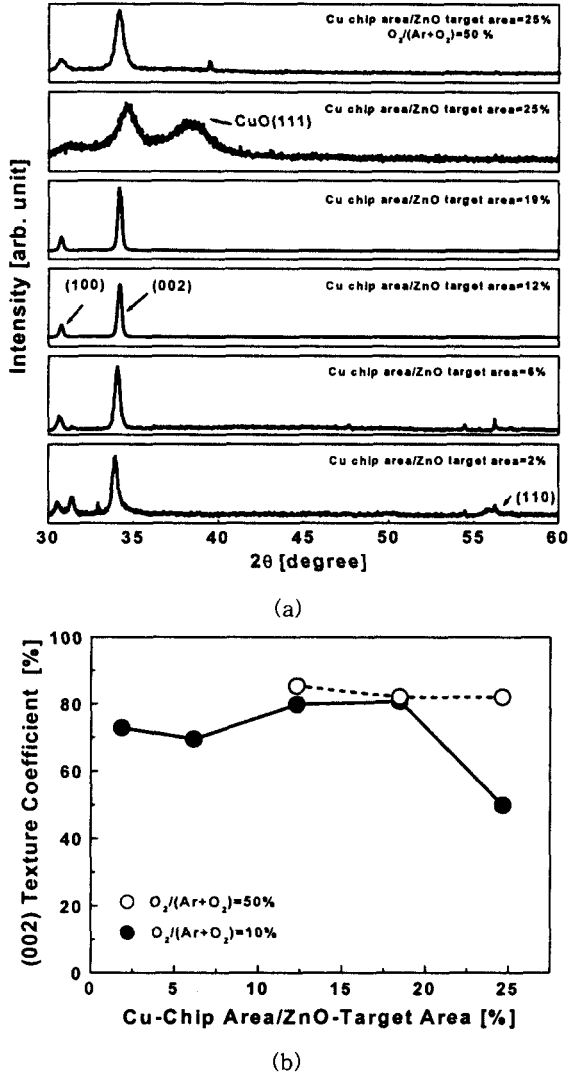


그림7. Cu-chip의 스퍼터링 면적비에 따른 ZnO:Cu 박막의 (a) XRD peak 및 (b) (002) peak에 대한 TC값

Fig.7 Effects of sputtering area ratios of Cu-chip on (a) XRD peaks and (b) TC values for (002) peak of ZnO:Cu films, respectively

또한, ZnO 박막의 경우와 마찬가지로, ZnO:Cu 박막 증착시 산소 가스의 첨가가 박막의 구조적 물성 및 비저항에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여, Cu-chip의 면적비를 12%로 고정하고, O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 혼합비를 0 ~ 90% 범위로 변화시키면서 박막을 증착하였다. 이와 관련하여 O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 혼합비에 따른 ZnO:Cu 박막의 XRD peak 및 TC값의 변화를 그림9의 (a)와 (b)에 나타내었고, 그림10에는 박막의 비저항 및 Cu의 상대적인 조성비의 변화를 각각 나타내었다.

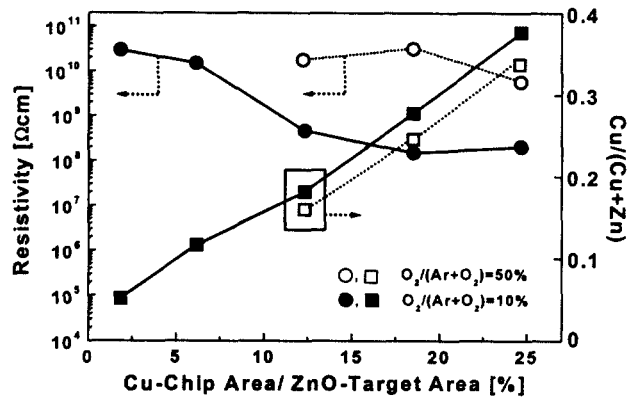


그림8. Cu-chip의 스퍼터링 면적비에 따른 ZnO:Cu 박막의 비저항 및 Cu 조성의 변화

Fig.8 Effects of sputtering area ratios of Cu-chip on resistivities and Cu-compositions of ZnO:Cu films

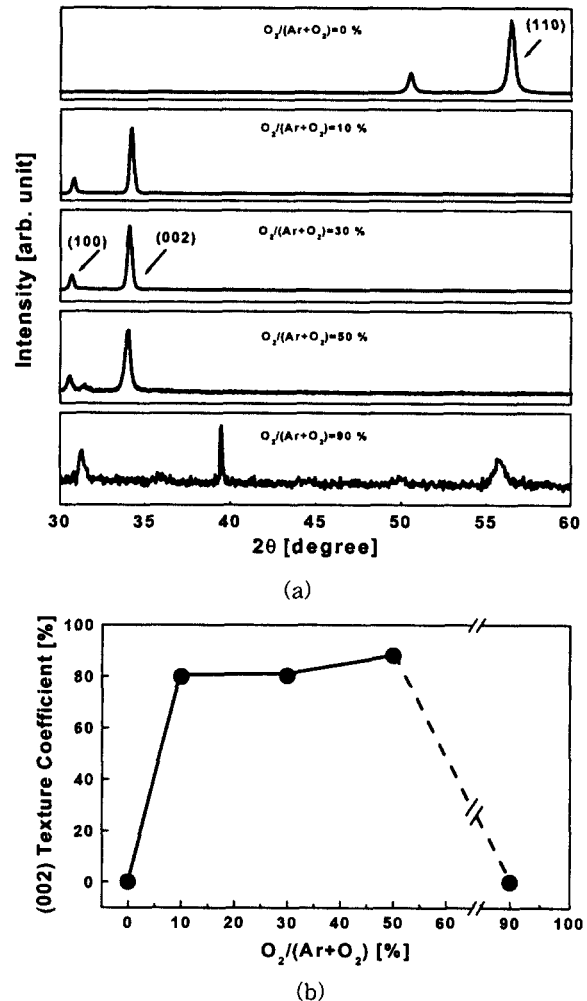


그림9. O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 혼합비에 따른 ZnO:Cu 박막의 (a) XRD peak 및 (b) (002) peak의 TC값 변화

Fig.9 Effects of O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) mixing ratio on (a) XRD peaks and (b) TC values for (002) peak of ZnO:Cu films, respectively

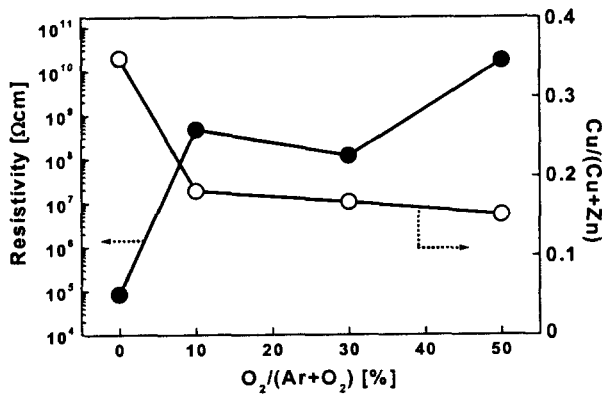
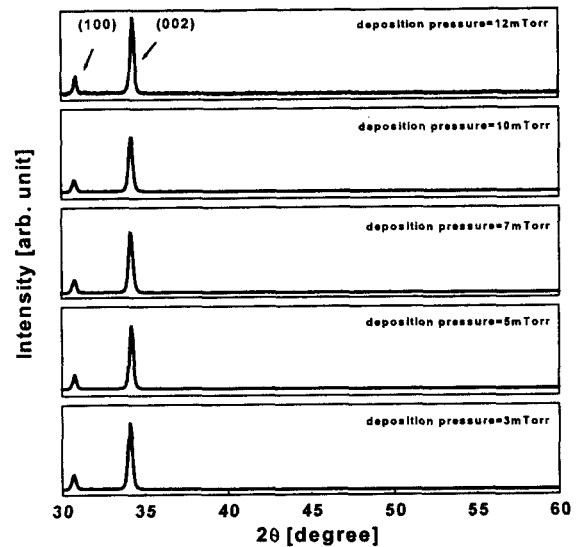


그림 10. O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 혼합비에 따른 ZnO:Cu 박막의 비저항 및 Cu 조성비의 변화

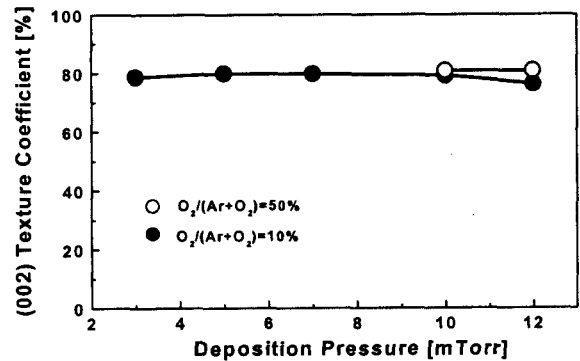
Fig.10 Effects of O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) mixing ratio on resistivities and Cu-compositions of ZnO:Cu films

산소가 첨가되지 않은 경우에는 (002) 성장이 나타나지 않았지만, 산소가 10 ~ 50 % 범위로 첨가된 경우에는 약 80 % 이상의 TC값을 갖는 (002) 우선 성장 특성이 잘 나타났으며, 박막의 비저항이 산소가 첨가됨에 따라 매우 현저히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 산소가 첨가되지 않은 경우에는 대부분의 Cu가 금속성 Cu로 존재하여 박막의 비저항을 낮추게 되고, 그림7의 (b)에서도 이미 고찰한 바와 같이 이 경우에도 스퍼터링된 Cu의 양이 이와 반응하는 산소에 비해 과잉 상태가 되므로 (002) 우선 성장 특성이 나타나지 않지만, 약 50 % 정도 이하의 산소 혼합비 범위에서는 첨가된 대부분의 산소가 박막 표면에서 재스퍼터링을 야기시키기 보다는 증착되는 박막의 표면위에서 적당한 이동도를 가지고 Zn 혹은 Cu와 반응하여 산화물의 형태로 존재하기 때문에 (002) 방향으로 우선 성장되고, 박막의 비저항도 높아지는 결과가 나타난 것이라 판단된다. 그러나, 산소 가스의 혼합비를 90 %로 증가시킨 경우는 오히려 (002) 성장이 다시 매우 저하되는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 과량의 산소에 의한 재스퍼터링 효과가 다시 영향을 미쳤기 때문이라고 사료된다.

ZnO:Cu 박막 증착시 반응기의 압력 변화에 따른 박막의 물성 변화를 조사하기 위하여 Cu-chip의 면적비를 12 %, 기판온도를 200 °C, RF전력을 100 W로 고정하고, 증착압력을 3 ~ 12 mTorr의 범위로 변화시키고 O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 혼합비가 각각 10 %와 50 %에서 박막을 증착하였다. 그림11의 (a)와 (b)에 나타난 바와 같이, 증착압력에 따른 ZnO:Cu 박막의 (002) 우선 성장 특성(XRD peak 및 TC값)의 변화는 거의 없었으나, 그림12에 제시한 바와 같이 전기적 비저항은 산소 가스의 혼합비가 10 %로 낮은 경우에는 증착압력이 높을수록 현저히 낮아지는 경향을 나타냈지만 산소 가스의 혼합비를 50 %로 증가시킨 경우는 비저항이 오히려 반대로 크게 높아진 것을 알 수 있다. 여기서 이러한 비저항의 변화는, 증착시 반응기내의 압력이 증가할수록 스퍼터링에 참여하는 Ar 이온이 증가하고 이에 따라 Zn에 비해 상대적으로 Ar에 대한 스퍼터링 효율이 높은 Cu가 다량 공급되고, 이러한 Cu는 산소의 공급이 적은 경우에는 금속성 Cu의 형태로 박막내에 포함되어 비저항을 낮추는 역할을 하지만, 산소가 충분히 공급되면 스퍼터링을 야기하는 Ar 이온의 밀도나 Ar에 의해 스퍼터링되는 Cu의 양이 상대적으로 모두 감소함에 따라 거의 대부분의 Cu가 산화물의 형태로 존재하기 때문에 박막의 비저항이 다시 높아진 것이라 사료된다.



(a)



(b)

그림 11. 증착압력에 따른 ZnO:Cu 박막의 (a) XRD peak 및 (b) TC 값의 변화

Fig.11 Effects of deposition pressure on (a) XRD peaks and (b) TC values of ZnO:Cu films, respectively

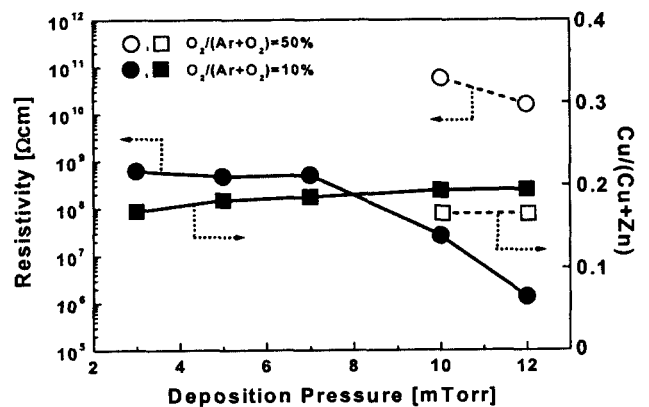


그림 12. 증착압력에 따른 ZnO:Cu 박막의 비저항 및 Cu 조성의 변화

Fig.12 Effects of deposition pressure on resistivities and Cu-compositions of ZnO:Cu films

### 3.3 ZnO:Cu 박막의 비저항 변화에 따른 XPS 분석

앞에서 ZnO:Cu 박막 증착시 Cu-chip의 면적비,  $O_2/(Ar + O_2)$  혼합비 및 증착압력 등에 따른 박막의 비저항 변화 결과를 분석함에 있어서 박막내 금속성 Cu 혹은 CuO 산화물의 상대적인 양이 비저항의 변화에 대한 주된 이유라 예측하였는데, 이에 대한 분석적 검증은 위하여 증착된 박막들에 대한 XPS 스펙트럼을 조사하고 이로부터 박막내의 금속성 Cu(즉,  $Cu^0$ )와 CuO상 Cu(즉,  $Cu^{2+}$ )을 구분하여 증착변수에 따른 각각의 변화를 비교함으로써 그 상관관계를 설명하였다. 일반적으로 ZnO:Cu 박막의 XPS 스펙트럼에서 금속성  $Cu^0$ 는 약 932.5 eV의 결합에너지에너지를 가지는 반가폭(FWHM)이 매우 작은 피크를 형성하게 되고, CuO상( $Cu^{2+}$ )이 존재하면 금속성 Cu(즉,  $Cu^0$ )에 의한 피크에 비해 중심 위치가 약 1 eV 정도 높은 에너지쪽으로 이동하며 반가폭이 더 넓은 피크의 형태로 나타나고, 특히 약 942.5 eV 근처에서 Cu-3d의 정공의 준위와 관련한 명확한 Cu-2p의 보다 넓은 에너지 범위를 갖는 위성 피크가 존재한다.<sup>[19]</sup> 금속성  $Cu^0$ 는  $3d^{10}4s^1$ 의 전자 구성을 가지고 있어서 쉽게 자유전자를 발생시키기 때문에 박막의 비저항을 감소시키고,  $Cu_2O$ 상 Cu(즉,  $Cu^{1+}$ )가  $3d^{10}4s^0(Cu)-2p^6(O)$ 의 구성으로 전자가 가득 채워져 있는 반면에, CuO상  $Cu^{2+}$ 는  $3d^94s^0(Cu)-2p^6(O)$ 의 구성을 가지기 때문에 Cu-3d에 전자를 포획하여 박막의 비저항을 높이는 역할을 하게 된다.<sup>[19]</sup>

그림13은 동일한  $O_2/(Ar + O_2)$  혼합비(10%)에서 Cu-chip의 면적비를 박막(a)는 2%, 박막(b)는 25%로 증착한 경우와 동일한 Cu-chip 면적비(25%)에서  $O_2/(Ar + O_2)$  혼합비를 박막(c)는 50%로 달리 증착한 경우들에 대하여 각각의 XPS 스펙트럼을 비교한 것이다. 그림8에 이미 제시한 바와 같이 박막(a), (b) 및 (c)의 비저항은 각각 약  $3 \times 10^{10} \Omega cm$ ,  $2 \times 10^8 \Omega cm$  및  $6 \times 10^9 \Omega cm$ 이었다. Cu-chip의 면적이 증가함에 따라(즉, 박막(a)와 비교하여 박막(b)의 경우) 거의 Cu 원자의 결합에너지와 가까운 약 932.5 eV에서의 금속성  $Cu^0$ 에 의한 예리한 peak를 관찰할 수 있는데, 이는 박막의 비저항이 상대적으로 낮다는 것을 의미하며, 산소 가스의 첨가량을 증가시킨 경우(즉, 박막(b)에 비하여 박막(c)의 경우)에는 금속성  $Cu^0$ 에 의한 peak의 세기가 감소하고 1 eV 정도 높은 에너지쪽에서의 CuO상  $Cu^{2+}$ 의 peak가 나타나고 약 942.5 eV 근처에서의 peak도 면적이 더 넓어짐으로써 결국 박막의 비저항이 상대적으로 더 증가하였음을 알 수 있다. 산소의 첨가에 따른 ZnO:Cu 박막의 비저항 변화는 그림10에서 이미 관찰한 바와 같이, 산소를 첨가하지 않은 경우에는 약  $10^5 \Omega cm$  정도로 낮았지만,  $O_2/(Ar + O_2)$  혼합비가 약 50%인 경우에는 약  $10^{10} \Omega cm$  이상으로 높아지는 것으로 나타났는데, 그림14에 ZnO:Cu 박막의 증착시 산소를 첨가하지 않은 경우와 50%의 혼합비로 산소를 첨가한 경우의 박막들에 대한 XPS 스펙트럼을 비교하였다. 산소가 첨가되지 않은 경우에는 약 932.5 eV에서의 거의 금속성  $Cu^0$ 에 의한 peak가 주로 나타나지만 산소가 첨가되면 이 peak의 중심이 약 933.5 eV로 이동하고 약 942.5 eV에서의 peak 면적도 증가하여 CuO상이 현저히 증가하였음을 알 수 있다. 또한, 그림12에 나타난 바와 같이 증착시 압력이 높아지면 박막의 비저항이 감소하는데, 이는 그림15에 나타난 XPS의 결과로 설명될 수 있다. 즉, 그림15는 증착시 압력이 3 mTorr와 12 mTorr에서 증착된 ZnO:Cu 박막들의 XPS 결과를 비교한 것으로서, 이 경우는 모두 금속성  $Cu^0$ 에 의한 peak는 매우 약하고, 약 933.5 eV 및 942.5 eV에서의 CuO상에 의한 두 개의 peak가 나타났는데, 상대적으로 압력이 낮은 경우 peak의 세기와 면적이 더 큰 것을 알 수 있는 바, 압력이 높을수록 상대적으로 박막의 비저항은 낮게됨을 의미한다.

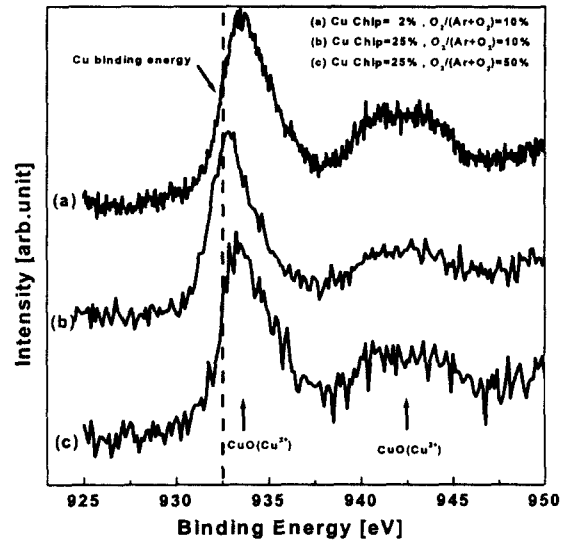


그림 13 다양한 Cu-chip 면적비 및 산소가스 혼합비에서 증착된 ZnO:Cu 박막의 XPS 스펙트럼

Fig.13 XPS spectra of ZnO:Cu films deposited at various Cu-chip area ratios and oxygen mixing ratios

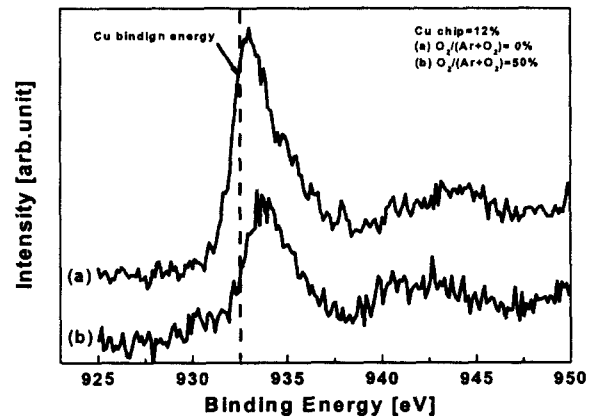


그림 14 증착시  $O_2/(Ar + O_2)$  혼합비에 따른 ZnO:Cu 박막의 XPS 스펙트럼  
Fig.14 Effects of  $O_2/(Ar + O_2)$  ratio on XPS spectra of ZnO:Cu films

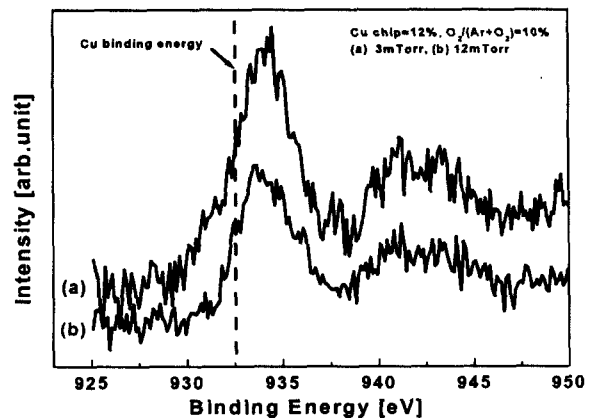


그림 15 증착압력의 변화에 따른 ZnO:Cu 박막의 XPS 스펙트럼  
Fig.15 Effects of deposition pressure on XPS spectra of ZnO:Cu films



3.4 전기기계 결합계수의 산출

이상과 같이 ZnO 박막이 SAW 소자용 압전재료로서 갖추어야 할 기본 물성인 (002) 우선 성장 및 전기적 비저항 등의 특성을 다양한 증착변수와 Cu의 첨가조건 등에 따라 분석한 바, 본 실험에서는 실제 SAW 소자의 주파수응답 특성에서 나타나는 삽입손실(insertion loss)과 이에 직접적인 영향을 미치는 유효 전기기계 결합계수(이후,  $k_{eff}^2$ 로 표기)를 산출하였다. SAW 소자는 SiO<sub>2</sub>/Si 기판위에 DC 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 Al(3000 Å)을 증착하고 사진식각 공정을 통하여 입출력 IDT를 형성하고, 그 위에 ZnO 및 ZnO:Cu 박막을 약 5000 Å의 두께로 증착하여 제작하였다. 여러 문헌을 통하여 전기기계 결합계수의 산출과 관련된 다양한 방법들이 제안되고 있는 바, 본 연구에서는 식 (1)과 같은 이론식<sup>[20]</sup>에 SAW 소자의 임피던스 특성 및 주파수응답 특성 등의 측정으로부터 얻어지는 특성값을 대입하여 산출하였다.

$$k_{eff}^2 = \frac{G_a}{8Nf_0C_T} \tag{1}$$

여기서, N은 SAW 소자 설계시 IDT쌍의 개수(25 및 50)이고, f<sub>0</sub>는 그림16의 (a)에 나타난 바와 같이 SAW 소자의 주파수응답 특성에서의 중심주파수로서 본 연구의 경우 소자들간에 다소의 차이는 있었으나 대부분 약 350 ~ 360 MHz의 범위에서 중심주파수를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 그림16의 (b)와 같이 cross-field 등가 회로를 적용하여, 제작된 SAW 소자가 가지는 입출력 IDT 전극 사이의 임피던스(impedance)를 각각 G<sub>a</sub>(conductance)와 C<sub>T</sub> (capacitance)로 구성하고, 각 소자에 대한 특성값을 측정하였다.

그림17은 동일한 증착조건에서 Cu칩의 면적비 즉, ZnO 박막내에 Cu의 첨가량을 변화시켜 증착하고 이러한 박막들을 이용하여 제작한 SAW 소자들로부터 상기와 같은 방법으로 산출한  $k_{eff}^2$  및 삽입손실을 나타낸 결과이다. Cu가 첨가되지 않은 ZnO 박막의  $k_{eff}^2$ 은 약 0.05 ~ 0.17 % 이었으나, Cu가 첨가된 ZnO:Cu 박막들에서는, Cu 첨가량에 따라 큰 차이 없이, 약 0.28 ~ 0.89 % 정도로 크게 증가하였으며, 이러한  $k_{eff}^2$ 의 증가는 그림17의 결과에 제시한 바와 같이 ZnO 박막을 이용한 SAW 소자의 삽입손실이 약 32.3 ~ 39.3 dB 정도로 비교적 높게 나타난 것에 비하여 ZnO:Cu 박막을 사용한 소자들의 삽입손실은 약 21.1 ~ 12.3 dB로 낮아지게 되는 결과를 얻게 하였다. 이와 같이 Cu의 첨가에 따라 SAW 소자의 특성( $k_{eff}^2$ , 삽입손실)이 향상된 이유는 앞에서 고찰한 바와 같이 본 실험에 사용된 증착조건 범위에서 ZnO 박막에 비하여 ZnO:Cu 박막의 (002) 우선 성장 특성이 더 우수하고 동시에 높은 전기적 비저항을 가지고 있기 때문이라 사료된다.

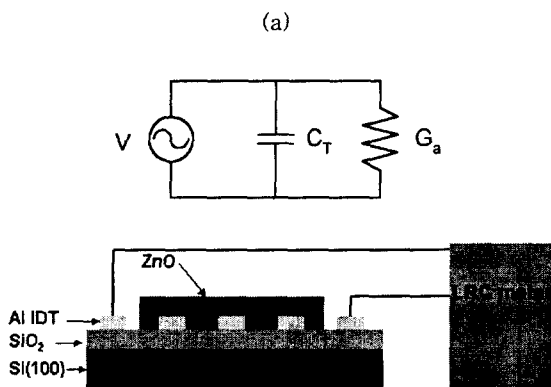
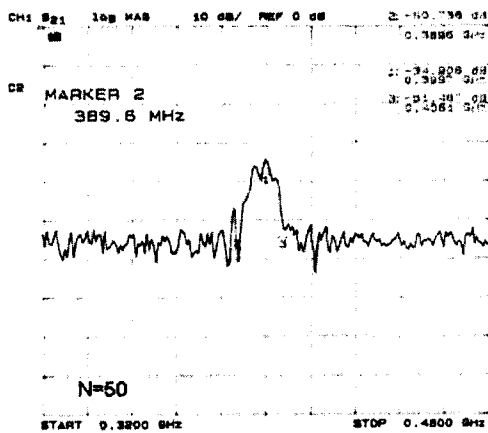


그림 16. ZnO(혹은 ZnO:Cu) 박막의 전기기계 결합계수의 산출을 위해 사용된 SAW 소자의 (a) 주파수응답 특성 및 (b) 등가회로와 임피던스 측정

Fig.16 Illustration of (a) frequency-response and (b) equivalent circuit of a ZnO (or ZnO:Cu) SAW device and impedance measurement, used to estimate the electro-mechanical coupling coefficient, respectively

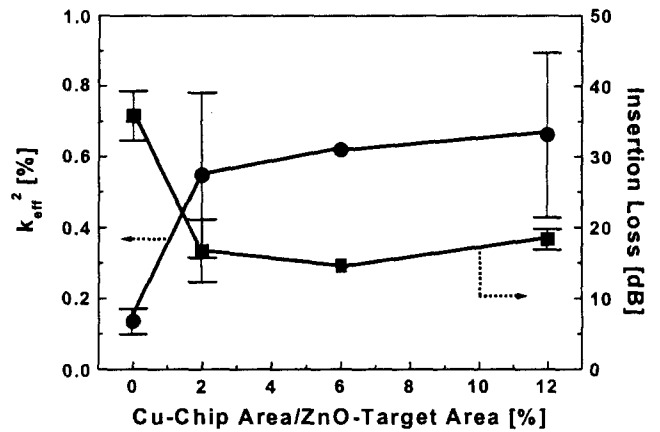


그림 17. Cu 첨가에 따른 ZnO SAW 소자의  $k_{eff}^2$  및 삽입손실 변화  
Fig.17 Effects of Cu-incorporation on  $k_{eff}^2$  and insertion loss of ZnO SAW devices

4. 결론

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 ZnO 박막을 증착하고, 다양한 증착변수에 따른 박막의 구조적, 전기적 물성 변화를 체계적으로 분석하였으며, 특히 Cu의 첨가가 박막의 물성 및 SAW 소자의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. Si, SiO<sub>2</sub>/Si, DLC/Si, poly-diamond/Si, sapphire 등의 다양한 기판재료위에 ZnO 박막을 증

착하고, 이들의 XRD peak 및 FE-SEM 단면형상들을 비교하여 기판 재료의 구조적 차이에 따른 (002) 우선 성장 특성을 비교하였다. 증착된 ZnO 박막의 XRD 결과로부터 (002) 성장에 대한 TC값을 산출하고 이를 증착조건에 따라 정량적으로 비교한 바, (002) 우선 성장은 스퍼터링된 입자들이 기판 표면에서 충분한 이동도를 가질 수 있는 조건에서 가능한 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 통하여 ZnO 박막 증착시 최적의 (002) 우선 성장 특성을 제공하는 기판온도 및 RF 인가전력의 범위를 도출하였다. ZnO 타겟위에 부착한 Cu-chip의 크기를 변화시켜 박막내 Cu 함유량이 각기 다른 ZnO:Cu 박막을 제작하고, Cu의 첨가량, O<sub>2</sub>/(Ar + O<sub>2</sub>) 가스 혼합비, 반응기 압력 등의 변화에 따라 박막의 (002) 성장 특성, 전기적 비저항, 박막내 Cu의 조성비 등의 변화를 분석한 결과, 상기한 박막의 물성들은 증착된 박막내의 금속성 Cu 및 산소와의 결합에 의한 CuO상 등의 상대적인 밀도와 긴밀히 연관되어 결정되는 것을 알 수 있었으며, 또한, XPS 분석을 통하여 Cu 첨가시 사용된 상기 조건들과 박막의 비저항과의 상관관계를 규명할 수 있었다. 특히, Cu를 첨가한 ZnO:Cu 박막에서는 10<sup>10</sup> Ωcm 이상의 높은 전기적 비저항과 동시에 약 80 % 이상의 TC값을 유지할 수 있는 증착조건의 범위를 도출할 수 있었으며, SAW 소자의 제작 및 특성 분석을 통하여 아직까지 소자의 설계 및 공정이 최적화되지 않았음에도 불구하고, Cu의 첨가에 의해 SAW 소자의 전기합계수 및 삽입손실 등이 현저히 낮아 질 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이상과 같은 본 연구는 ZnO 박막을 이용한 SAW 소자 응용시 기초 실험자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문은 1999년도 한국한술진흥재단의 연구비(KRF-99-041-EE0165)에 의하여 지원되었으며, 아울러 저자는 전자재료 및 부품 연구센터(EM&C)의 연구 시설 지원에 감사의 뜻을 표함.

#### 참고 문헌

- [1] J.Koike, H.Tanaka, and H.Ieki, "Quasi-microwave band longitudinally coupled surface acoustic wave resonator filters using ZnO/sapphire substrate", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.34 (1995) pp.2678-2682
- [2] S.J.Chang, Y.K.Su, and Y.P.Shei, "High quality ZnO thin films on InP substrate prepared by radio frequency magnetron sputtering. II. surface acoustic wave device fabrication", J. Vac. Sci. Tech. A 13(2), (1995) pp.385-388
- [3] 이용의, 양형국, 김영진, 한정인, 김형준, "RF 마그네트론 스퍼터링에 의한 ZnO 박막 증착 및 SAW 필터 특성 분석", 한국재료학회지, Vol.4, No.7 (1994) pp.783-791
- [4] H.Nakahata, A.Hachigo, K.Higaki, S.Fuhii, S.Shikata, and N.Fujimori, "Theoretical study on SAW characteristics of layered structures including a diamond layer", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.42, No.2, (1995) pp.362-374
- [5] T.Mitsuyu, S.Ono, and K.Wasa, "Structures and SAW properties of rf-sputtering single-crystal films of ZnO on sapphire", J. Appl. Phys. Vol.51 (5) (1980) pp.2464-2470
- [6] 이승환, 성영권, 김종관, "Magnetron sputtering으로 증착한 ZnO 박막의 특성과 열처리에 따른 비저항과 미세구조", 한국전자재료학회지, Vol.10, No.2, (1997) pp.126-133
- [7] M.Wu, W.Shih, and W.Tsai, "Growth of ZnO thin films on interdigital transducer/corning 7059 glass substrates by two-step fabrication methods for surface acoustic wave application", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.31, (1998) pp.943-950
- [8] A.Hartmann, M.K.Puchert, and R.N.Lamh, "Influence of copper dopants on the resistivity of ZnO films", Surface and Interface Analysis. Vol.24 (1996) pp.671-674
- [9] A.E.Jimenez-Gonzalez, "modification of ZnO thin films by Ni, Cu, and Cd doping", J. of Solid State Chemistry Vol.128, (1997) pp.176-180
- [10] 박창균, 엄현석, 서수형, 박진석, "거울형 자계 구조를 갖는 진공 여과 아크 증착법을 이용한 다이아몬드상 탄소 박막의 증착 및 물성 분석", 대한전기학회 2000학계학술대회 논문집, C (2000) pp.1717-1719
- [11] 이진복, 박진석, 류경선, 권상직, "MPCVD를 이용한 다결정 다이아몬드 박막의 증착 및 물성 분석", 대한전기학회 98학계학술대회 논문집, D (1998) pp.1330-1332.
- [12] B.T.Khuri-Yakub and J.G.Smits, "Reactive magnetron sputtering of ZnO" IEEE Ultrasonics Symp. (1980)pp.801-804
- [13] F.S.Hickernell, "ZnO process for Bulk-and Surface-wave devices", IEEE Ultrasonics Symp. (1980) pp.785-794
- [14] D.K.Murti and T.L.Biuhm, "Preferred orientation of ZnO films controlled by RF sputtering", Thin Solid Films, Vol.87, (1982) pp.57-61
- [15] C.R.Aita, A.J.Purdes, R.J.Lad, and P.D.Funkenbusch, "The effect of O<sub>2</sub> on reactively sputtered zinc oxide", J. Appy. Phys., Vol.51 (10) (1980) pp.1768-1772
- [16] K.H.Yoon, J.W.Choi, and D.H.Lee, "Characteristics of ZnO thin films deposited onto Al/Si substrates by r.f. magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol.302, (1997) pp.116-121
- [17] K.Wasa and S.Hayakawa, "Handbook of sputter deposition technology: principles, technology and applications", Materials Science and Process Technology Series, (Edited by R.F.Bunshah, et. al., 1991) pp.125-153.
- [18] 이용의, 김형준, 양형국, 박준섭, 박종철, 김영진, "ZnO 박막과 유전체 박막으로 구성된 이중구조의 물성 및 표면 탄성파 특성", Korean J. Crst., Vol.6, No.22, (1995) pp.134-140
- [19] M.K.Puchert, A.Hartmann, and R.N.Lamb, "Highly resistive sputtered ZnO films implanted with copper", J. Mater. Res., Vol.11, No.10, (1996) pp.2463-2469
- [20] M.Kadota and M.Minakata, "Piezoelectric properties of Zinc oxide films on glass substrates deposited by RF-magnetron-mode electron cyclotron resonance sputtering system", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.42, No.3, (1995) pp.345-350

저 자 소 개



이진복 (李進馥)

1975년 6월 9일생. 1997년 한양대 공학대 학 전기공학과 졸업. 1999년 한양대 대학 원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 031-400-4088

E-mail : leejb@hymail.hanyang.ac.kr



이혜정 (李惠靜)

1978년 2월 14일생. 2000년 한양대 공학대 학 전자컴퓨터전기제어공학부 졸업. 현재 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과 석사과정

TEL : 031-400-4088

E-mail : hjlee78@hymail.hanyang.ac.kr



서수형 (徐洙瑩)

1971년 1월 1일생. 1993년 강원대학교 공 대 재료공학과 졸업. 1995년 동 대학원 재 료공학과 졸업(석사). 1995년~1997년 영도 산업(주) 부설연구소 연구원. 1999년 한양 대학교 무기재료공학과 졸업(공학). 현재 한양대학교 전자재료 및 부품 연구센터

(EM&C) 박사후연구원(Post-Doc)

TEL : 031-400-4088

E-mail : shseo@emc.hanyang.ac.kr



박진석 (朴珍奭)

1961년 9월 25일생. 1985년 서울대학교 공 대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전 기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전 기공학과 졸업(공학). 1993년~1995년 영국 Cambridge 대학 Research Fellow. 현재 한양대학교 공대 전자컴퓨터 공학부 부교수. 대한전기학회 편집위원 및 국제위원. 한양 대학교 전자재료 및 부품 연구 센터(EM&C) 연구 교수

한양대학교 공대 전자컴퓨터 공학부 부교수. 대한전기학회 편집위원 및 국제위원. 한양 대학교 전자재료 및 부품 연구 센터(EM&C) 연구 교수

TEL : 031-400-5166

E-mail : jspark@emc.hanyang.ac.kr