

압전 소자용 ZnO 박막의 증착 및 물성 분석

이진복*, 김귀현, 신양호, 서수형^U, 박진석
 한양대학교 전기공학과, 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터^O

Deposition and characterization of ZnO thin films for piezo-electric devices

Jin-Bock Lee, Kwi-Hyun kim, Yang-Ho Shin, Soo-Hyung Seo^U, Jin-Seok Park
 Dep. of Electrical Engineering, EM&C^O, Hanyang Univ.

Abstract - ZnO thin films are deposited by using an RF magnetron sputtering system. Structural and electrical properties are analyzed as a function of deposition conditions, such as RF power, Ar/(Ar+O₂) ratio, and substrate temperature. The c-axial growth of ZnO is observed to be preferable to the SiO₂/Si substrate, rather than the Si substrate. By adding the oxygen gas during deposition, the electrical resistivity of films is increased, but the c-axial growth is inhibited. A piezoelectric resonator of Al/ZnO/Al is also fabricated to estimate the electric-mechanical coupling coefficient(k²) of ZnO film. The value of k² obtained from our work is about 10.14 %.

표1 ZnO 박막의 증착 조건

Base pressure	3~4 × 10 ⁻⁶ Torr
Working pressure	3 × 10 ⁻³ mTorr
Gas flow rate(Ar/(Ar+O ₂))	25~100 %
RF power	50~200 W
Sub. temperature	RT~350 °C
Deposition time	1 hr.
Substrate	Si(100)

2.2 증착 변수에 따른 물성 분석

2.2.1 기판 및 기판온도의 영향

그림1에서 단결정 Si(100) 기판의 경우 증착된 ZnO 박막은 (100) 방향으로의 성장이 우선적임을 알 수 있다. 따라서, Si(100) 방향의 기판에 RF 스퍼터를 사용하여 약 1400Å의 비정질 SiO₂ 막을 증착한 후, 그 위에 ZnO 박막을 증착시켰다.

1. 서 론

최근 ZnO 압전 변환기는 주로 높은 주파수 영역, 즉 VHF(30~300MHz)나 UHF(0.3~3GHz) 또는 그 이상의 영역에서 BAW(Bulk Acoustic Wave)나 SAW (Surface Acoustic Wave) 변환기, 소형 음향 센서 등의 넓은 분야에서 응용이 가능한 것으로 알려져 있다.^[1] 통신용 소자로 응용이 가능하기 위해서는 근본적으로 기존의 Si공정과의 연계성이 중요한 바, Si 기판 위에 압전 특성이 우수한 ZnO 박막의 증착기술이 확립 되어야 한다.

본 연구에서는 SAW 필터의 응용을 위한 ZnO/SiO₂/Si의 다층막 구조의 박막을 반응성 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 온도, 전력, Ar/O₂의 유량비 등 다양한 증착 조건을 이용하여 ZnO 박막을 증착하였다. 증착된 박막은 XRD로 결정성 및 배향성, SEM으로 주상구조, surface profiler로 두께, 4 point probe로 박막의 비저항을 측정하여 압전 소자의 응용을 위한 양질의 박막을 증착하였다. 또한, ZnO 압전 진동자를 제작하여 LRC-meter로부터 impedance를 측정하고, 전기 기계 결합 계수를 계산하여 ZnO의 압전 특성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

ZnO박막은 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Si(100)과 SiO₂/Si(100) 기판을 사용하여 증착하였다. 기판의 세척은 일반적인 실리콘 공정의 세척 과정과 동일하게 수행하였으며, ZnO 박막 증착을 위해 사용된 주요 공정 조건은 표1과 같다.

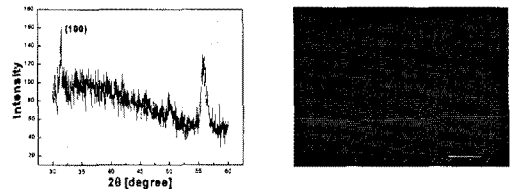


그림1 Si(100) 위에 증착된 ZnO 박막 XRD사진과 단면의 전자 현미경 사진

그림2는 SiO₂막 위의 ZnO 구조이다. Si 기판 위에서 성장한 박막에서는 주상구조의 배향 특성을 관찰할 수 없었으나, 그림2의 경우 주상구조 형태로 보아 (002)방향의 우선 성장 조건이 이루어진 것으로 판단되며, 이러한 특성은 XRD의 결과로 확인할 수 있었다.

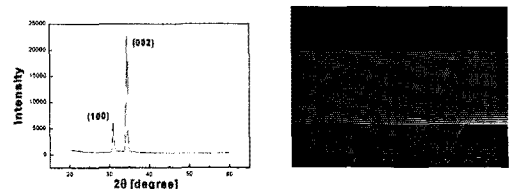


그림2 SiO₂/Si(100)위에 증착된 ZnO 박막 XRD사진과 단면의 전자 현미경 사진

이와 같이 결정성이 있는 기판보다는 다결정이나 비정 질막을 기판으로 사용할 경우 ZnO의 (002)방향의 배향성을 관찰할 수 있을 것으로 사료된다.

또한, 기판 온도를 변화시킨 경우 200°C 이상에서 증착된 ZnO 박막은 주상구조의 (002) 피크가 보다 명백함을 확인하였다. 따라서, 기판온도는 200°C로 고정하여 이후의 실험을 진행하였다.

2.2.2 산소의 영향

ZnO 박막의 비저항을 변화시키기 위해 증착시 산소 가스를 주입하고 박막의 물성을 분석하였다. 전체 유량에 대한 산소 유량비는 표1에 나타난 바와 같은 비율로 증착하였다.

스퍼터링으로 ZnO박막을 증착할 경우 Zn과 O의 화학 양론적 조성비는 ZnO박막의 저항율에 크게 영향을 미치게 되는데, 산소를 첨가하지 않는 경우는 박막내에 Zn이 O보다 과잉화 되는 현상이 발생하고, 이러한 Zn이 ZnO박막에서 전도 전자 수를 증가시키게 되어 증착된 박막의 저항을 감소시키게 된다. 본 연구에서도 첨가된 산소의 양이 감소할수록 전기 저항이 작아지는 경향을 관찰할 수 있었으며, 산소가 포함되지 않은 경우 비저항이 0.01Ωcm에서 산소가 10% 정도 포함된 경우 $1.8 \times 10^5 \Omega \text{cm}$ 이다. 이것은 기존의 연구에서 보고된 것과 같이 산소의 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.⁽²⁾

그러나, 그림3에서 보는 바와 같이 산소의 유량이 증가할수록 (002) 방향의 성장이 저하되는 것을 알 수 있다. 이것은 스퍼터링에 의해 ZnO 타겟으로부터 분해된 이온과 산소 이온들은 수 eV를 갖는데 비해 산소가스를 첨가한 경우 분해된 산소이온은 수백 eV~수keV를 가지고 기판에 도착한다⁽³⁾. 따라서 높은 에너지를 갖는 산소이온의 수가 많은 경우에는 특정한 방향으로 성장이 이루어지기 어렵기 때문에 그림3의 (a)와 (b)에 나타난 것과 같이 (100), (110)등의 다양한 성장 방향을 갖는 박막이 증착되는 것으로 판단된다.

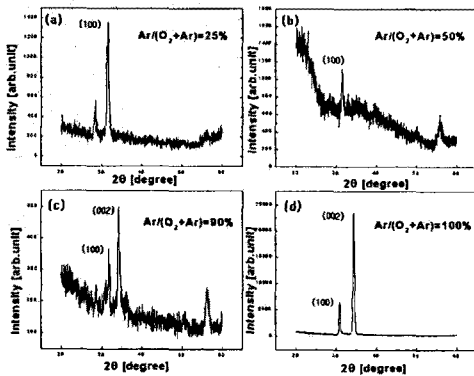


그림3 산소의 유량에 따른 XRD 결정성
Ar/(Ar+O₂) (a)25% (b)50% (c)90% (d)100%

그림4는 산소의 첨가에 따른 박막 증착율의 변화를 관찰한 것이다. 산소의 주입량이 증가함에 따라 증착율이 현저하게 감소한다. 이는 산소가 주입됨에 따라 전체 가스의 유량에 대한 Ar의 상대적인 양이 감소하게 되고 또한, 높은 에너지를 갖는 다량의 산소 이온에 의한 박막의 스퍼터링 현상이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.⁽²⁾⁽⁴⁾

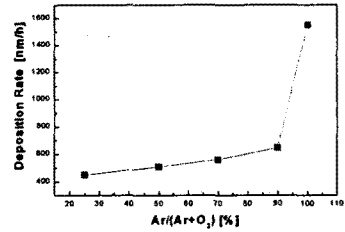


그림4 산소의 유량에 따른 ZnO 박막의 두께

2.2.3 RF 전력의 영향

그림5는 인가된 RF 전력에 따른 ZnO박막의 배향성을 나타낸다. 50W, 100W의 RF 전력에서는 (002)방향의 성장이 우세한 반면, 그 이상의 높은 RF 전력에서는 (002)방향 외에 다른 방향의 성장을 볼 수 있다. 이러한 인가 전력에 따른 결정성이나 c-축 배향성의 변화는 주로 인가 전력에 의한 증착 속도변화의 관점으로 설명된다. 적절한 RF 전력이 인가될 경우 원자들의 표면 이동도가 충분히 증가하여 우수한 결정질의 박막을 증착할 수 있다. 그러나, 과도한 인가 전력의 증가는 증착속도의 과도한 증가로 인하여 표면 원자들이 충분히 격자 평형 위치로 이동하지 못한 상태에서 이후에 스퍼터링되는 입자들이 기판에 도달하여 결정성을 저하시킨다.⁽⁵⁾

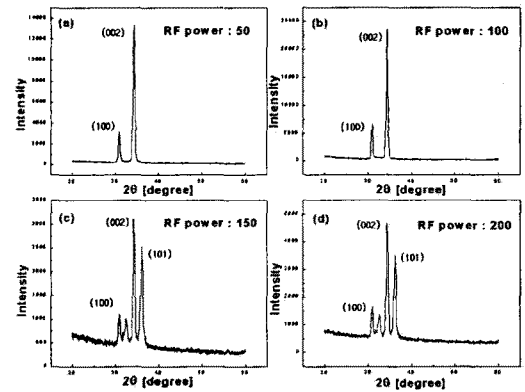
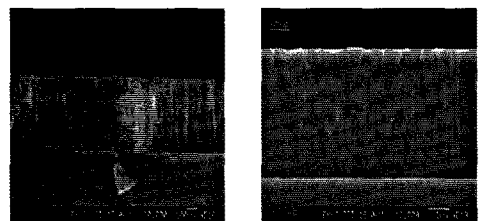


그림5 전력의 변화에 따른 XRD 결정성
(a)50W (b)100W (c)150W (d)200W

그림6은 50W와 200W의 RF 전력에서 ZnO박막의 단면을 관찰한 것이다. (a)50W의 경우에는 기판에 비교적 수직인 방향으로 성장한 주상구조의 형상이며, (b)200W의 경우에는 기판에 수직인 방향에 비해서 비교적 임의의 방향으로 성장한 것을 볼 수 있었다. 이것은 그림5의 XRD 결과와 일치함을 알 수 있다. 또한, 박막의 증착율도 RF 전력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 볼 수 있었다.



(a) (b)
그림6 전력에 따른 ZnO박막의 전자현미경 단면 사진
(a)50W (b)200W

2.3. 압전 진동자의 제작 및 특성 분석

2.3.1 압전 진동자의 제작

압전 진동자는 그림7과 같이 Al/ZnO/Al 구조로 제작하였으며, 상하의 전극은 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 증착하였고, 이 전극은 probe station을 이용하여 LRC-meter와 연결하였다. 압전 진동자는 100W, 200°C, 3mTorr, Ar/(Ar+O₂)=90%의 조건에서 증착된 (002)방향의 우수하고 비저항이 큰 ZnO 박막으로 사료된다.

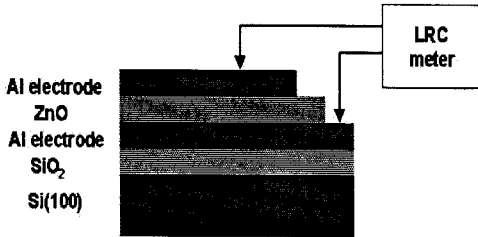
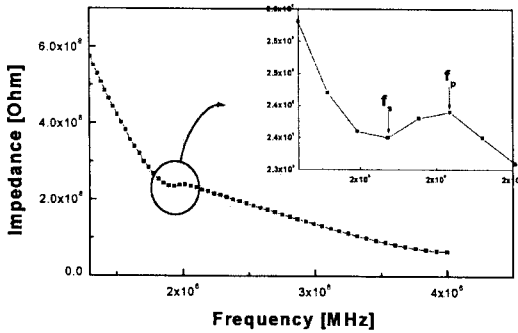


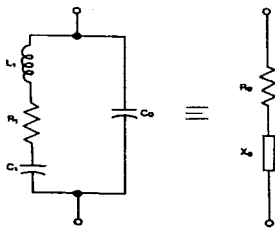
그림7 임피던스 특성 측정을 위한 압전 진동자 구조 및 장치 개략도

2.3.2 전기 기계 결합 계수 산출

전기기계 결합계수의 산출을 위해 압전 진동자의 주파수에 대한 impedance 특성을 측정한 결과가 그림8(a)에 나타났다. 또한 ZnO 압전 진동자에 대한 등가회로를 그림8(b)와 같이 구성하였다.^[6]



(a)



(b)

그림8 ZnO 압전 진동자의 (a)공진 특성및 (b)등가회로

측정된 직렬공진과 병렬공진 값으로 등가회로의 변수 (C₁, L₁, R₁, C₀)를 산출하고, 이를 이용하여 압전 진동자의 capacitance ratio를 구하면 식(1)과 같다.

$$r = \frac{C_0}{C_1} \quad \text{---(1)}$$

또한, 진동 mode에 의해 주어지는 상수 p(=0.766)와 위의 capacitance ratio로부터 전기 기계 결합계수 (k²)를 구하면

$$k^2 = \left(\frac{1}{rp+1} \right) \quad \text{---(2)}$$

와 같다.

본 측정에서 병렬 공진 주파수(f_p)는 2.017MHz, 병렬 공진 주파수(f_s)는 1.939MHz, r(capacitance ratio)=11.56를 구할 수 있었고, k²값은 10.14%이다.

3. 결 론

본 연구에서는 Si기판 위에 비정질 SiO₂의 중간층을 이용하여 (002) 방향의 주상구조로 성장된 양질의 ZnO박막을 증착하였다. 산소의 첨가가 비저항을 크게 하지만, 결정성을 저하시킴을 알 수 있었다. RF 전력이 100W 이하의 박막에서는 주상구조가 분명함을 이론적으로 설명하였다. 또한 압전 진동자를 제작하여 임피던스 특성을 측정하고 등가회로와 비교하여 전기기계 결합계수(k²)이 약 10.14%이며 압전 특성이 우수한 ZnO 박막을 증착하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tadashi, "High-speed fabrication of high-quality sputtered ZnO thin-films for bulk and surface wave application", IEEE Ultrasonic symposium, 1978.
- [2] G.A.Rozgonyi and W.J.Polito, "Preparation of ZnO thin films by sputtering of compound in oxygen and argon", Apply Physics Letters, Vol8.9,220p, 1966.
- [3] 이용의, "고주파 마그네트론 스퍼터링법에 의한 ZnO 박막의 증착 및 표면 탄성과 필터의 응용", 서울대학교 박사 학위 논문, 1996.
- [4] C.R.Aita, A.J.Purdes, R.J.La and P.D.Funkenbusch, "The effect of O₂ on reactively sputtered Zinc oxide", J.Appl.Physics, 51(10), 1980.
- [5] D.K.Murti and T.L. Bihm, "Preferred orientation of ZnO films controlled by RF sputtering", thin solid films, 87, 57-61, 1982.
- [6] Takuro Ikeda, "Fundamental of Piezoelectricity", Oxford university Press, 1996.

본 연구는 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터의 장비 지원과 한국과학재단의 지원 (981-0908-031-2)으로 이루어졌음.