

논문 95-4-2-07

표면탄성과 필터를 위한 ZnO 박막의 특성

김 영 진*, 박 옥 동**, 김 기 완*

Characteristics of ZnO thin film for surface acoustic filters

Young-Jin Kim, Wuk-Dong Park, and Ki-Wan Kim

Abstract

The excellent c-axis oriented zinc oxide thin films were prepared by the RF magnetron sputtering method on glass substrates. Optimum fabrication conditions of the ZnO films were such that RF power, substrate temperature, and gas pressure of mixture Ar(50%):O₂(50%) were 150 W, 200 °C, and 5 mTorr, respectively. In these conditions, the deposition rate was 310 Å/min, and the resistivity of the film was $1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$. The ZnO film also showed high c-axis orientation and crystallinity according to XRD pattern and SEM photograph. A fabricated interdigital transducer generated 1st mode surface acoustic wave at 46.6 MHz and 2nd mode surface acoustic wave at 52.5 MHz. At the 1st mode, the phase velocity of surface acoustic wave and the electromechanical coupling coefficient were 2795 m/sec and 0.031 %, respectively. At the 2nd mode, they were 3149 m/sec and 0.019 %, respectively.

I. 서 론

ZnO(zinc oxide)는 육방정계의 위자이트(wurtzite) 결정구조를 가지는 II-VI족 화합물 반도체로서 박막으로 제조할 경우 강한 압전성을 나타낸다. ZnO의 압전 특성을 이용하여 acoustic wave transducers,^[1] acousto-optic,^[2] optical waveguides^[3], 센서 디바이스^[4] 등에 응용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

ZnO는 유리기판위에 성장시켰을 경우 기판에 수직인 방향인 c-축 방향으로 강한 배향성을 가진다^[6]. 이러한 c-축 방향의 배향성은 표면탄성파를 여기시키고 검출하는데 효과적으로 이용될 수 있다. 또한, 기판 물질을 사파이어로 사용하였을 경우 에피택셜 성장이 가

능하여 표면탄성파의 속도를 증가시킬 수 있으므로 1 GHz이상의 고주파용 표면탄성파 소자에 응용가능하다.^[5] 이러한 ZnO막을 제조하기 위한 방법에는 스퍼터링법^[6], CVD법^[7]등 여러가지가 있다. 본 연구에서는 고주파 마그네트론 스퍼터링법^[3]을 이용하여 고주파 전력, 기판온도를 변수로 하여 ZnO막을 제조하고 제조 조건에 따른 결정성을 평가하고 전기적 특성을 연구하였다. 그리고 표면탄성파 여기에 대한 특성을 측정하기 위해 유리기판위에 ZnO를 성장시킨 후 알루미늄 IDT (interdigital transducer)를 형성시켜 네트워크 분석기를 이용하여 주파수 특성에 대해서 연구하였다.

II. 실험 및 측정

ZnO막은 유리기판(Corning 7059) 위에 고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 제조하였다. 표 1은 ZnO막의 제조조건을 나타낸 것이며, 표 2는 IDT전극의 규격을 나타낸 것이다.

* 경북대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics, Kyungpook Nat'l Univ.)

** 동양공대 전자공학과
(Dept. of Electronics, Dongyang Univ.)

<접수일자 : 1995년 3월 31일>

표 1. ZnO막의 제조 조건

Table 1. Fabrication conditions of ZnO films.

Deposition parameter	value
O ₂ /(Ar+O ₂) ratio	0.5
Gas pressure	5 mTorr
RF power	50 W ~ 200 W
Substrate temperature	100 °C ~ 400 °C

표 2. IDT의 제조 조건

Table 2. Fabrication conditions of IDT.

Parameter	Value
Electrode width	4.00 mm
Electrode length	3.00 mm
λ/4 width	15 μm
Electrode pairs	100
Thickness of ZnO film	2.3 μm

제조된 ZnO막의 두께는 Alpha-step으로 측정하였으며, 결정구조는 XRD로 분석하였다. ZnO막의 표면과 결정성장 형태는 SEM사진으로 관찰하였으며, 이 때 성장방향과 표면을 동시에 보기 위하여 시료를 45° 기울였다. ZnO막의 전기적 저항률은 四探針法으로 측정하였다.

먼저 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 ZnO막을 제조한 후 진공증착법으로 알루미늄IDT 전극을 제조하였다. 여기서 전극의 간격과 전극사이의 간격은 모두 15 μm였고 ZnO막의 두께는 2.3 μm였다. 그리고 알루미늄 IDT 패턴은 lift off 방법으로 제작하였다.

제조된 IDT의 표면탄성과 여기 특성의 측정은 40 MHz ~ 200 MHz의 주파수 범위에서 네트워크 분석기가 사용되었다.

III. 결과 및 고찰

1. 고주파 전력에 따른 ZnO막의 특성

기판온도는 400 °C, 분위기압 5 mTorr 그리고 O₂/(Ar+O₂)는 50 % 로 고정시켜 놓고 고주파 전력을 50 W에서 200 W로 변화시키면서 증착시킨 ZnO막의 증착률의 변화와 저항률의 변화를 그림 1에 나타내었

다. 증착률은 고주파 전력이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 일반적으로 고주파 전력이 증가함에 따라 이온의 운동에너지가 증가하므로 스퍼터링되는 양도 증가한다. 저항률은 고주파 전력이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 고주파 전력이 증가함에 따라 캐리어 농도에 영향을 미치는 트랩 중심(trapping center)의 수적 증가와 캐리어의 이동도에 영향을 미치는 산란 중심(scattering center)의 수적 증가를 가져오므로 저항률이 증가되는 것으로 보고되고 있다.^[8]

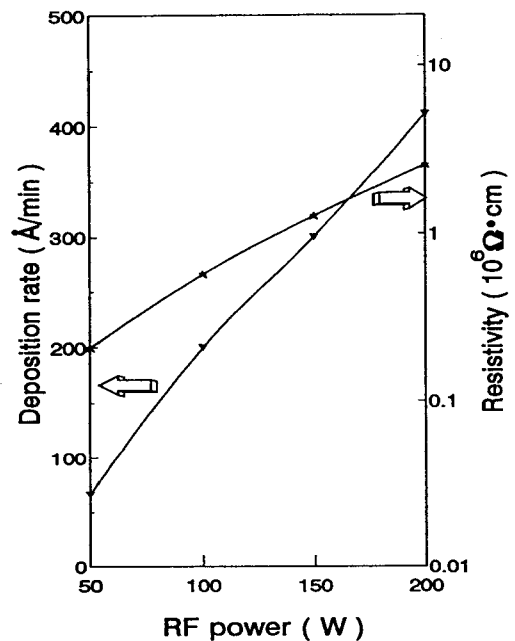


그림 1. 고주파 전력에 따른 ZnO막의 증착률과 저항률

Fig. 1. Deposition rate and electrical resistivity of ZnO films as a function of RF power during sputter deposition.

고주파 전력의 변화에 따른 XRD 분석도 그림 2(a)에 나타나 있다. 고주파 전력의 변화에 따른 XRD 분석에서 (002) 방향 피크의 반치폭(FWHM)과 전 피크에 대한 (002) 방향 피크의 상대적인 면적비는 그림 2(b)에서와 같다. 반치폭은 고주파 전력이 증가함에 따라 감소하다가 거의 일정해지는 경향을 나타내었다. 그러나 (002) 방향 피크의 상대적 면적비는 50 W에서 가장 큰 값을 나타내었고 100 W 이상에서는 고주파 전력의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 이는

고주파 전력 50 W 에서 가장 높은 c-축 배향성을 나타내나 결정의 품질면에서는 그렇게 좋지 않고, 고주파 전력 100 W이상에서는 c-축 배향성이 증가하고 결정의 품질은 큰 변화가 없음을 알 수 있었다. 고주파 전력 200 W에서는 고주파 전력 50 W에서와 비슷한 결정정확도를 나타내고 결정성은 더 좋았다. 그러나 고주파 전력 200 W에서는 증착입자의 가속에너지가 상대적으로

증가하여 ZnO막 표면의 평탄성이 저하되는 경향을 나타내었다. 이에 본 연구에서는 증착률, 결정화도 및 표면의 평탄성을 고려하여 고주파전력을 150 W로 고정하였다.

2. 기판온도에 따른 ZnO막의 특성

고주파 전력 150 W, 분위기압 5 mTorr 그리고 O₂/(Ar+O₂)를 50 % 로 고정시켜 놓고 기판온도를 100 °C에서 400 °C로 변화시키면서 증착시킨 ZnO막의 증착률의 변화와 저항률 변화는 그림 3에 나타내었다. 낮은 기판온도에서는 기판온도의 증가에 따라 증착률이 증가하는 경향을 나타내는데 이는 높은 기판온도가 증착되는 ZnO막의 결정화를 촉진시키는 작용을 하기 때문이라고 보고되고 있다.^[9] 이러한 결과는 그림 5의 기판온도에 따른 SEM사진의 표면 형태에 잘 나타나 있다. 기판온도 200 °C이상에서는 증착률이 거의 동일하다. 이는 기판온도가 증가할수록 증착된 ZnO 분자들

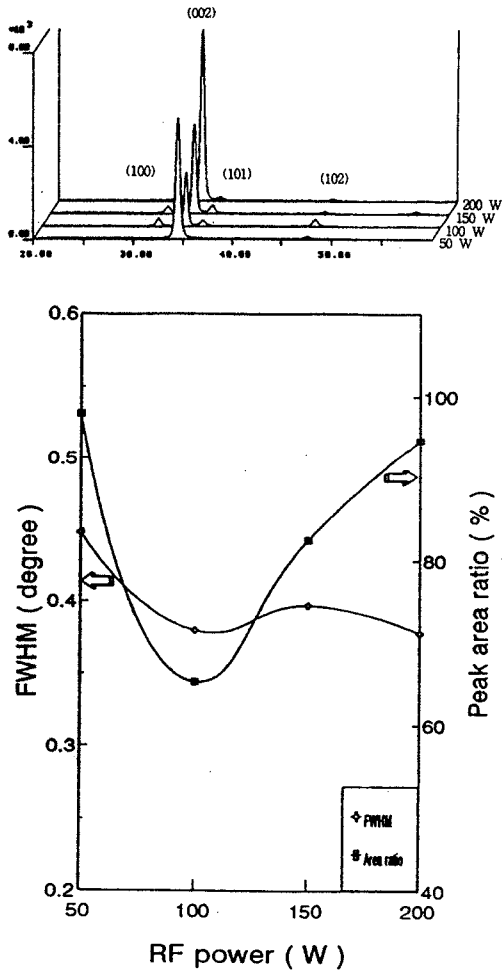


그림 2. 고주파 전력에 따른 ZnO막의 특성
 (a) XRD분석도
 (b) (002) 방향 피크 반치폭과 (002) 방향 피크의 상대적 면적비

Fig. 2. Characteristics of ZnO films as a function of RF power.
 (a) X-ray diffraction pattern.
 (b) FWHM and area ratio of (002) orientation peak

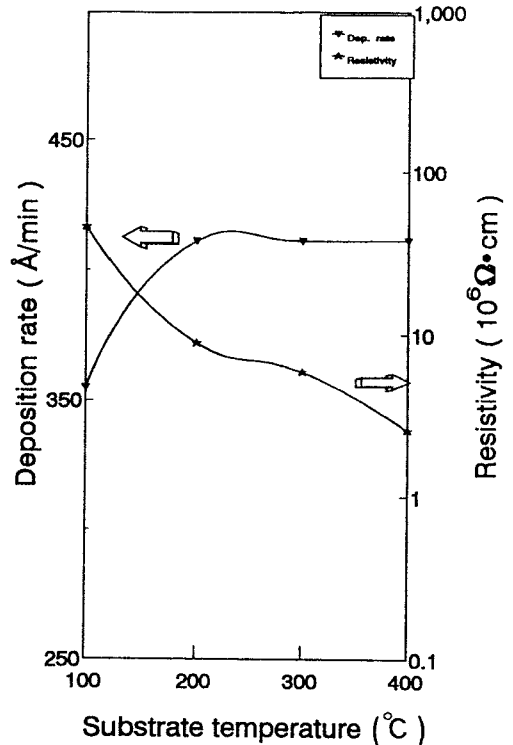


그림 3. 기판온도에 따른 ZnO막의 증착률과 저항률
 Fig. 3. Deposition rate and resistivity of ZnO films as a function of substrate temperature during sputter deposition.

이 재증발(re-evaporation)될 확률이 높아지기 때문이라고 보고되고 있다.^[9] 그리고 기판온도가 증가함에 따라 ZnO막의 저항률은 감소하는 경향을 나타냈으며 이는 기판온도 증가에 따른 어셉터로 작용하는 산소의 양적감소와 막의 치밀화에 따른 결함의 감소로 캐리어의 이동도가 증가하여 저항률이 감소하는 것으로 생각된다.

그림 4는 XRD 분석에서 (002) 방향 피크의 반치폭의 크기와 전체 피크에 대한 (002) 방향 피크의 면적비를 기판온도의 변화에 따라 나타낸 것이다. 기판온도가 증가할수록 반치폭의 크기가 감소하다가 200 °C 이상에서는 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 (002) 방향 피크의 면적비는 300 °C를 제외한 나머지에서 매우 높은 값을 가짐을 알 수 있었다. 여기서 기판온도가 200 °C 이상에서는 매우 양질의 c-축 배향막이 얻어지나 300 °C에서는 결정화도가 매우 낮아진다는 것을 알 수 있었다. 이에 본 연구에서는 기판온도를 200 °C로 고정하고 실험을 행하였다.

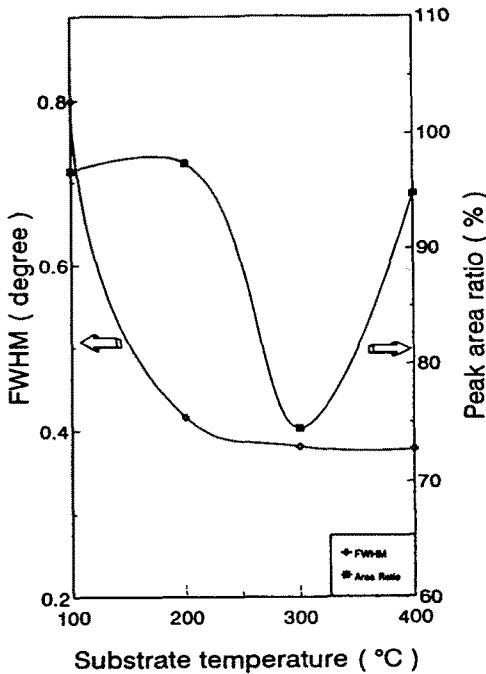


그림 4. 기판온도에 따른 ZnO막의 (002) 방향 피크 반치폭과 (002) 방향 피크의 상대적 면적비
 Fig. 4. FWHM and area ratio of (002) orientation peak of ZnO films as a function of substrate temperature.

그림 5(a)는 기판온도에 따른 ZnO막의 XRD 분석도이다. 200 °C에서 (002) 방향 피크 외에 다른 피크는 거의 나타나지 않은 우수한 c-축 배향성과 결정성을 나타냄을 볼 수 있었다. 그리고 그림 5(b)는 기판온도에 따른 ZnO막의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 초기성장장에서 무작위 배향(random orientation)이 보였으나 어느 정도 두께 이상에서는 주상구조가 형성된다는 것을 알 수 있었다. 이러한 무작위 배향 현상은 성장되는 ZnO의 입자들이 기판의 표면과 부정합(non-matching)에 의해서 발생한다고 보고되고 있다.^[10] 그러나 통상적으로 고주파 마그네트론 스퍼터링법에 의한 박막의 증착은 일반 스퍼터링법에 비해 증착물이 10 배 정도로 높다. 따라서 초기의 높은 막 성장이 기판과 표면의 부정합과 더불어 초기성장에서 무작위 배향을 유발하는 것으로 추측된다.

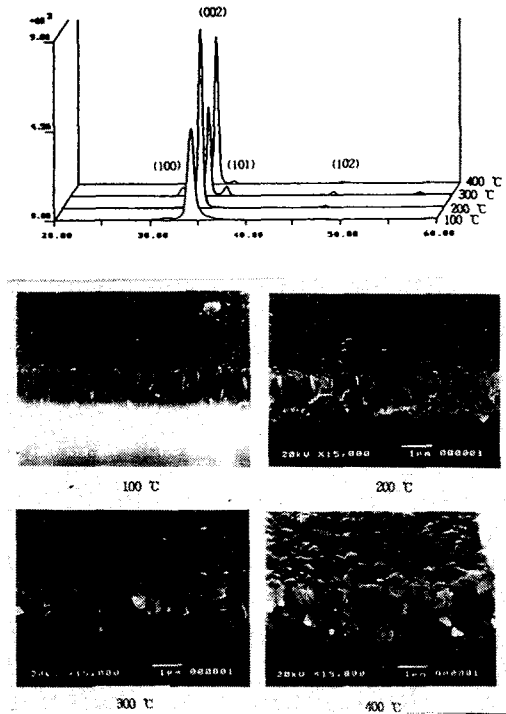


그림 5. 기판온도에 따른 ZnO막의 XRD 분석도와 SEM 사진
 (a) XRD 분석도
 (b) SEM 사진
 Fig. 5. X-ray diffraction pattern and SEM photographs of ZnO films on substrate temperature.
 (a) X-ray diffraction pattern
 (b) SEM photographs

3. IDT의 특성

그림 6은 네트워크 분석기로 측정된 IDT 전극의 주파수특성을 나타낸 것이다. 중심주파수 46.6 MHz(② point)에서 1st mode 표면탄성파가 발견되었고, 중심주파수 52.5 MHz(① point)에서 2nd mode 표면탄성파가 발견되었다. 표면탄성파의 위상 속도(phase velocity)는 다음의 식 (2)에서 계산되었다.

$$v_0 = f\lambda \quad (2)$$

여기서 v_0 는 표면탄성파의 위상 속도이고 f 는 주파수 및 λ 는 IDT 사이의 간격을 나타낸다. 계산된 표면탄성파의 위상속도는 1st mode에서 2795 m/sec, 2nd mode에서 3149 m/sec로 나타났다.

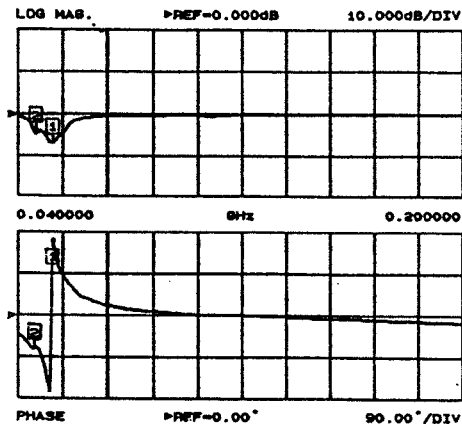


그림 6. IDT 전극의 반사계수
Fig. 6. The S_{11} parameter of IDT electrode.

그림 7은 네트워크 분석기로 측정된 IDT 전극의 임피던스를 나타낸 것이다. ① point는 2nd mode 표면탄성파의 임피던스를 나타낸 것이고 ② point는 1st mode 표면탄성파의 임피던스를 나타낸 것이다. 1st mode에서 측정된 임피던스의 값은 $36.24\Omega - j67.50\Omega$ 였고 2nd mode에서의 임피던스 값은 $19.67\Omega + j6.49\Omega$ 였다. 이런 임피던스 값을 이용하여 구한 전기기계적결합계수는 식 (3)과같아진다.

$$k^2 = \frac{F\pi^2 R_a f_0 C_T}{2N-1} \quad (3)$$

여기서 k^2 은 전기기계적결합계수, F 는 filling factor,

R_a 는 acoustic 임피던스의 저항성분, f_0 는 중심주파수, C_T 는 IDT의 커패시턴스 및 N 은 전극의 finger 수를 나타낸다. 측정된 R_a 의 값은 36.24Ω 이었고, C_T 의 값은 2.34 pF 이었다. 주파수 46.6 MHz에서 계산된 전기기계적결합계수의 값은 0.031%로 나타났다. 그리고 주파수 52.5 MHz에서는 0.019%였다. 이 값은 일반적인 ZnO/유리 구조의 전기기계적결합계수(약 1%^{[6])에 비해 상당히 낮은 값이다. 전기기계적 결합계수는 박막의 드께에 의존하므로 ZnO막의 두께(본 연구에서는 ZnO막의 두께가 2.3 μm 였다)를 증가시킴에 의하여 유사하거나 높은 값을 가지는 결과를 얻을 수 있을 것이라고 생각된다.}

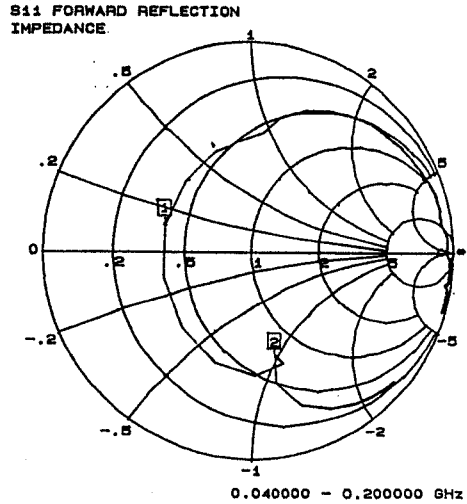


그림 7. Smith chart 상에 나타난 IDT 전극의 임피던스
Fig. 7. The impedance of IDT electrode on Smith chart.

IV. 結 論

고주파 마그네론 스퍼터링을 이용하여 유리기판 위에 ZnO막을 제조하여 그 특성을 조사하였다. 기판온도 200 $^{\circ}\text{C}$, 고주파 전력 150 W, $\text{O}_2 / (\text{Ar} + \text{O}_2)$ 50% 그리고 분위기압 5 mTorr로 하였을 때 제조된 ZnO막은 증착률 310 $\text{\AA}/\text{min}$, 저항률 $1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 였다. 이때 XRD 분석과 SEM 사진에서 좋은 c-축 배향성과 결정성을 나타내었다.

이러한 ZnO막의 특성을 바탕으로 하여 ZnO막 위

에 알루미늄 IDT를 제작하여 표면탄성과 여기 특성을 조사하였다. 중심주파수 46.6 MHz에서 1st mode 표면탄성파가 여기되었으며 이 때의 임피던스 값은 $36.24 \Omega - j67.50 \Omega$ 였고, 중심주파수 52.5 MHz에서는 2nd mode 표면탄성파가 여기되었고 이 때의 임피던스 값은 $19.67 \Omega + j6.49 \Omega$ 였다. 각각의 주파수에서의 표면탄성파의 위상 속도는 1st mode에서 2795 m/sec, 1st mode에서 3149 m/sec였다. 그리고 전기기계적 결합계수는 0th mode에서 0.031 %, 2nd mode에서 0.019 % 였다.

參考文獻

- [1] 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.
- [2] N. Goto, Y. Miyazaki, and Y. Akao, "Material dependance of strain distribution of surface acoustic waves in multilayered thin film acousto-optic devices," *Japan J. Appl. Phys.*, vol 24, no. 2, pp. 145-155, 1985.
- [3] 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. 2482-2484, 1987.
- [4] D. L. Polla, H. Yoon, and T. Tamagawa, "Integration of surface-micromachined zinc-oxide sensors in n-well CMOS thecnology," *IEEE IEDM 89*, pp. 495-498, 1989.
- [5] T. Mitsuyu, S. Ono, and K. Wasa, "2.2GHz SAW using ZnO/Al₂O₃ structure," *Japan J. Appl. Phys.*, vol 20, suppl. 20-3, pp. 99-102, 1981.
- [6] O. Yamazaki, T. Mitsuyu, and K. Wasa, "ZnO thin film devices," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-27, no. 6, pp. 369-379, 1980.
- [7] F. T. J. Smith, "Metalorganic chemical vapor deposition of oriented ZnO films over large areas," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, no. 12, pp. 1108-1110, 1983.
- [8] Y. Igasaki and H. Saito, "The effects of deposition rate the structural and electric properties of ZnO:Al films deposited on (1120) oriented sapphire substrates," *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 7, pp. 3613-3619, 1991.
- [9] C. T. Lee, Y. K. Su, and H. M. Wang "Effect of R.F. sputtering parameters on ZnO films deposited onto GaAs substrate," *Thin Solid Films*, vol. 150, pp. 283-289, 1987.
- [10] I. Petrov and V. Orlinov, "Highly oriented ZnO films obtained by D.C. reactive sputtering of zinc target," *Thin Solid films*, vol. 120, pp. 55-67, 1984.

著 者 紹 介

金 永 振

『센서학회지 제2권제1호』 논문 93-13, p.99 참조.
현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정.

金 基 完

『센서학회지 제1권제1호』 논문 92-01, p.95 참조.
현재 경북대학교 전자공학과 교수.

朴 昱 東

『센서학회지 제1권제1호』 논문 92-20, p.181 참조.
현재 동양공과대학 전자공학과 전임강사.