

논문 96-5-6-09

고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 제조한 ZnO박막의 기판에 따른 효과

김 영 진*, 권 오 준**, 유 상 대*, 김 기 완*

Substrate effects of ZnO films deposited by rf magnetron sputtering

Y. J. Kim*, O. J. Kwon**, S. D. Yu*, and K. W. Kim*

요 약

고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 유리 및 (012)면인 사파이어 기판위에 ZnO박막을 제조하였다. 유리기판위에는 (002)면을 갖는 ZnO 다결정박막이 제조되었으며, (012)면인 사파이어 기판위에는 (110)면인 ZnO에 피택셜 박막이 제조되었다. 유리 및 사파이어 기판위에 제조된 ZnO박막의 표면탄성과 특성을 조사하였다. 유리 및 사파이어 기판에 대한 중심주파수에서의 전파속도는 각각 2680 m/sec 및 5980 m/sec였으며, 기본모드에서 구한 결합계수는 각각 0.98 % 및 1.44 %였다.

Abstract

ZnO thin films were prepared on glass and (012) sapphire substrates by rf magnetron sputtering. Polycrystalline ZnO films with a (002) orientation were obtained on glass substrates. (110) ZnO films were epitaxially grown on the (012) sapphire substrates. Surface acoustic wave properties were also measured for propagating along the c axis of ZnO film on the glass and sapphire substrates. The phase velocities (V_p) on glass and sapphire substrate at center frequency were 2680 m/sec and 5980 m/sec and the effective coupling coefficient (k^2) on the 0th mode were 0.98 % and 1.43 %, respectively.

1. 서론

ZnO(zinc oxide)는 육방 정계의 워자이트(wurtzite) 결정 구조를 갖는 II-VI족 화합물 반도체로서 박막으로 제조할 경우 강한 압전성을 나타낸다^[1]. c축이 기판에 수직하게 배향된 ZnO 결정 중에서 아연 표면 원자는 양전하를 가지며, 산소 표면 원자는 음전하를 가진다. 이러한 결정 대칭성에 따라 다결정 박막이라 하더라도 c축 방향과 극성이 일치하면 단결정 박막과 비슷한 압전성을 나타낸다. ZnO박막의 c축이 기판에 수직으로 배향된 박막에서는 (001)면이 기판표면에 나타나고, c축이 기판과 평행하게 배향된 ZnO박막에서는 (100) 또는 (110)면이 표면에 나타나게 된다^[2-6]. ZnO막은 유리기판 위에서 c축이 기판에 대해 수직으로 배향되나, 낮은 전파속도와 결정 경계면에서 생기는 큰 전파손실로 인해 고주파용 SAW(Surface acoustic wave)소자로는 적절하지 않다. 그러나 100 MHz근처의 대역통과필터^[2-3] 및 각종센서^[7] 등에서는 저렴한 기판으로 인해 응용이 기대된다. 한편 사파이어 기판위에는 에피택셜 ZnO박막을 제조하는 것이 가능하며, 특히 (110)ZnO/ (012)Al₂O₃구조의 압전재료는 큰 전파속도와 적은 손실값을 갖기 때문에 고주파용 SAW필터

* 경북대학교 전자공학과

(Dept. of Electronics, Kyungpook National University)

** 한국전자통신연구소

(Electronics and Telecommunications Research Institute)

※ 본 연구는 한국과학재단 연구비 지원(과제번호 : 94-0300-05-01-3)에 의하여 수행된 연구임

<접수일자 : 1996년 10월 4일>

의 재료로 사용이 가능하다^[4-5].

본 연구에서는 고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 유리 및 사파이어 기판위에 ZnO막을 제조하여 ZnO박막의 우선배향에 대하여 조사하였다. 또한 제조된 ZnO박막을 이용하여 IDT/ZnO/유리 및 IDT/ZnO/사파이어 구조의 SAW필터를 제조하고 주파수 특성을 분석하였다.

II. 실험 및 측정

1. ZnO박막의 제조

ZnO박막은 유리 및 사파이어(α -Al₂O₃)기판 위에 고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 제조되었다. 본 연구를 위해 제작한 고주파 마그네트론 스퍼터링 장치는 3 인치의 타겟을 장착할 수 있으며 타겟과 기판사이의 거리는 7 cm였다. ZnO박막을 제조하기전 초기진공 상태는 5×10^{-6} Torr였다. 작동 및 반응가스로 사용되는 아르곤과 산소는 MFC(mass flow controller)로 그 흐름을 조절하였다. 표 1과 같은 조건으로 유리 및 사파이어기판 위에 ZnO박막을 제조하였다.

ZnO박막을 SAW필터의 압전재료로 이용하기 위해서는 높은 저항값이 요구된다. 이에 본 연구에서는 저항률 증가가 필요한 경우 ZnO타겟 제조시 Li₂CO₃를 0.5 wt%의 무게비로 첨가하였다. ZnO/유리 박막을 SAW필터의 압전재료로 사용하기 위해서는 ZnO박막의 c축이 기판에 수직인 (002) 방향의 높은 배향성이 필요하다. 한편 ZnO/(012)사파이어 박막을 SAW필터에 응용하기 위해서는 ZnO박막의 c축이 기판에 평행한 (110)방향의 높은 배향성이 필요하다^[5]. 따라서 본 연구에서는 유리기판위에서 (002)방향의 배향성을, 사파이어 기판위에서 (110)방향의 배향성을 갖는 ZnO 박막을 제조하기 위한 연구를 수행하였다. 제조된 ZnO 박막의 두께는 α -step 100(Tencor Co.)으로 측정되었다. 제조조건에 따른 결정성, 결정구조 및 결정성장방향 등을 조사하기 위해 XRD(Philips-X'PERT) 분석을 하였다. ZnO막의 표면과 단면 SEM(Zeol 5400)사진을 통하여 막 표면의 거칠기, 결정입자의 크기 및 결정성장 형태를 관찰하였으며, 이 때 성장방향과 표면을 동시에 보기 위하여 시료를 45° 기울였다. ZnO 박막의 전기적 저항률은 미소 전압계(electrometer : Keithley 617)를 이용하여 저항을 측정된 후 막의 두께와 전극의 면적을 고려하여 산술적으로 구했다.

표 1. ZnO막의 제조 조건

Table 1. Fabrication conditions of ZnO thin films.

	ZnO/ α -Al ₂ O ₃	ZnO/glass
O ₂ :Ar (sccm)	5 : 5	5 : 5
Gas pressure	5 mTorr	5 mTorr
RF power	70 W	150 W
Substrate temperature	520 °C	200 °C
Initial vacuum	5×10^{-6} Torr	5×10^{-6} Torr
Substrate-target distance	7 cm	7 cm

2. ZnO-SAW 필터의 제작

본 연구에서 제조된 IDT(interdigital transducer)전극의 규격은 표 2와 같다. 단순 IDT형태로 전극을 설계하였으며, 입력 및 출력 IDT를 각각 40.5쌍으로 하였다. 비 압전기판위에 충을 이루는 박막 SAW필터의 경우 박막 표면 탄성과 소자의 전파 속도(v)는 $f_0 \cdot \lambda$ 로 나타난다. 여기서 f_0 는 SAW의 중심주파수이며, λ 는 IDT의 공간주기를 나타낸다. 따라서 표면 탄성과 소자에서 전파 속도는 두께 및 결정성이 같은 ZnO박막 위에서는 IDT의 주어진 크기에서 동작 주파수가 결정된다.

표 2. IDT의 제조 규격

Table 2. Fabrication specifications of IDT.

Parameter	value
Electrode width	100 λ
Electrode length	50 λ
$\lambda/4$ width	5 μ m
Input electrode	40.5 pairs
Output electrode	40.5 pairs

ZnO-SAW필터의 제조공정은 다음과 같다. 먼저 마

그네트론 스퍼터링법을 이용하여 ZnO박막을 제조한 후 박막위에 사진공정을 이용하여 IDT전극이 형성될 부분의 감광제를 제거하였다. 다음으로 진공증착법으로 알루미늄을 증착시키고 lift off 방법으로 IDT전극을 제작하였다. 스퍼터링된 ZnO막이 산 및 알칼리 용액에 심한 손상을 받기 때문에 습식 식각방법은 사용에 제한을 받는다. 제조된 ZnO-SAW필터의 주파수 특성은 spectrum analyzer (HP-8592A) 및 rf 신호발생기 (HP-8640B)를 이용하여 분석하였으며, 외부 잡음을 최소화하기 위해 제작된 SAW필터를 케이스(TO-5)에 차폐시키고 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

표 1에서와 같이 고주파 전력 및 기판온도가 사파이어기판의 경우 70 W 및 520 °C이나 유리기판의 경우 150 W 및 200 °C이다. 고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 ZnO박막을 제조할 경우 적절한 제조변수의 조절에 의해 유리기판 위에서는 다결정 ZnO박막이 성장되며, 사파이어 기판위에서는 에피택셜 ZnO박막이 성장된다고 보고되고 있다^{12,6)}. ZnO박막 제조시 기판표면의 온도는 증착되는 막의 표면 이동도를 증가시켜 막의 구조적인 특성을 향상시킨다. 또한 높은 기판온도에서는 낮은 결합에너지를 가진 원자들의 재회발을 증가시켜 결정성 및 표면 평탄성이 우수한 ZnO박막을 제조할 수 있다. 본 연구에서 유리기판 위에 제조된 ZnO박막은 고주파 전력 및 기판온도가 150 W 및 200 °C일 때 가장 좋은 결정성을 나타내었다. 낮은 고주파 전력에서는 ZnO박막의 평탄성은 우수하였으나 결정성에는 큰 차이가 없었다. 또한 높은 기판온도에서는 결정성에는 큰 차이가 없었으나 표면원자의 재회발로 표면의 평탄성이 저하되는 특성을 나타내었다. 한편 사파이어 기판 위에 에피택셜 ZnO박막을 제조하기 위해서는 유리기판에 비해 낮은 증착률과 높은 기판온도가 필요하다. Hickemell 등¹⁸⁾에 의하면, 마그네트론 스퍼터링법으로 ZnO에피택셜 박막을 제조하기 위한 기판온도는 ZnO의 녹는점(약 2200 °C)의 약 1/3이 되는 온도가 필요하다. 이러한 온도는 증착률에 따라 변화하며 증착률이 증가하면 기판온도 또한 증가해야 하는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서도 증착률이 증가할수록 높은 기판온도에서 ZnO박막을 제조하는 것이 박막의 평탄성 및 결정성을 향상시키는 것으로 나타났다. 그러

나 기판온도에 따른 영향보다는 증착률에 따른 변화가 더 큰 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 결정의 품위와 표면의 평탄성 등을 고려하여 사파이어 기판 위에서는 고주파 전력 및 기판온도를 70 W 및 520 °C로 유지하였다.

그림 1은 표 2의 조건에 따라 유리기판 위에 제조된 ZnO박막의 XRD회절도 및 SEM사진을 나타낸 것이다. 그림 1의 X-ray 회절도에서는 평판형 마그네트론 스퍼터링법에 의해 제조된 ZnO박막에서 통상적으로 나타나는 32°근처의 (100)피크와 36°근처의 (101)피크는 나타나지 않고 있으며 SAW의 여기 및 전파에 영향을 미치는 34.5°근처의 (002)피크가 우세하게 나타나고 있다. 그림 1의 X-ray회절도로 부터 구한 반가폭(FWHM)은 0.42°로 본 연구에서 제조한 ZnO/유리 박막은 SAW필터의 압전재료로 적합하다고 판단된다. 또한 그림 1의 SEM사진에서 c축, 즉 (002)방향의 주상구조가 발달해 있다. 이는 통상적인 스퍼터링 공정으로 제조한 ZnO 다결정 박막에서 나타나는 현상이며, SEM사진으로 부터 표면의 평탄성은 비교적 양호함을 알 수 있다.

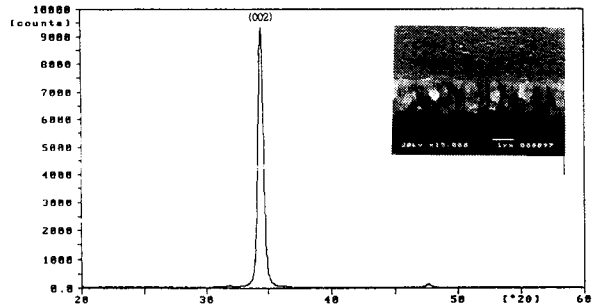


그림 1. ZnO/유리 박막의 XRD분석

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of ZnO/glass thin film.

그림 2는 표2의 조건에 따라 (012)면인 사파이어 기판위에서 (110)면으로 배향된 ZnO박막의 XRD분석도 및 SEM사진을 나타낸 것이다. 통상적으로 유리기판 등에서 나타나는 c축이 기판에 수직($2\theta = 34.3^\circ$)인 (002)방향의 피크는 나타나지 않았으며, 그림에서와 같이 ZnO박막의 c축이 기판에 평행한 (110)면으로만 배향되었다. 그림 2의 X-ray회절도로 부터 구한 반가폭(FWHM)은 0.41°였다. 그림 2의 x-ray분석에서 a_0 값이

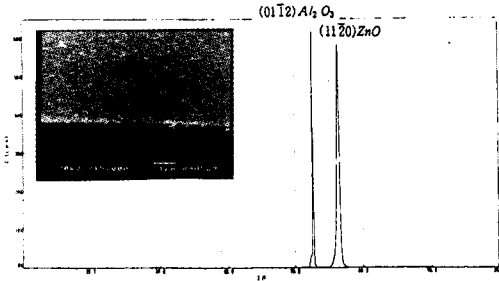


그림 2. ZnO/사파이어 박막의 XRD분석

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of ZnO/sapphire films.

3.256 Å으로 ZnO분말의 a_0 값 3.243 Å보다 크게 나타났다. 이는 기판과 박막의 열팽창 계수 차이에 의한 ZnO박막에 작용하는 스트레스로 설명된다. (110)ZnO/(012) Al_2O_3 구조에서 ZnO와 사파이어의 c축인 즉 기판에 평행한 방향의 열팽창 계수는 3.8 ppm/°C와 6.58 ppm/°C로 사파이어가 ZnO보다 크다. 따라서 고온에서 제조된 ZnO 박막은 냉각과정에서 표면에 평행한 방향으로 압축력을 받게되며, 기판에 수직인 방향으로 팽창력을 가지게 된다. 따라서 기판에 대해 수직으로 놓여 있는 a_0 값이 증가하게 된다. 사파이어 기판위에 제조한 ZnO박막을 고주파용 SAW 필터의 압전재료로 사용하기 위해서는 배향성과 표면의 평탄성이 우수해야 한다. 일반적으로 유리기판 위에 제조된 다결정 ZnO박막은 섬유상(fibrous grain)이나 거친 주상구조에서 나타나는 큰 전파손실 때문에 고주파용 재료로는 부적절하다. 그림 2의 SEM사진에서와 같이 사파이어 기판 위에서는 ZnO박막의 평탄성이 우수하며, 섬유상이나 주상구조가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제조한 ZnO/사파이어 박막은 고주파용 SAW필터의 압전재료로 적합하다고 판단된다.

그림 3은 표 2의 설계 규격에 따른 ZnO-SAW 필터의 마스크 형태를 나타낸 것이다. 그림 3과 같이 ZnO-SAW필터는 ZnO 압전박막과 압전박막위에 형성된 IDT로 구성된다. 이러한 압전박막을 이용한 정상형태의 IDT 주파수 응답은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$A(f) = \frac{\sin N\pi X}{N\pi X}, \quad X = \frac{f - f_0}{f} \quad (1)$$

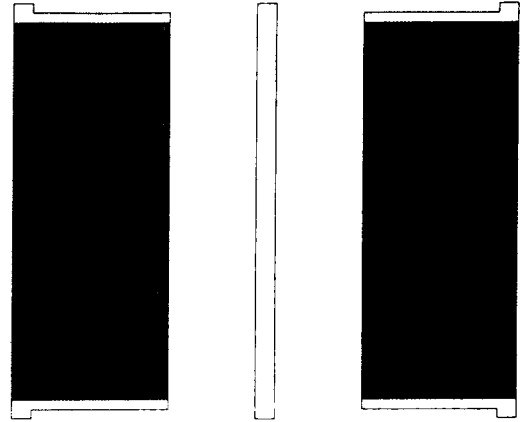


그림 3. ZnO-SAW 필터의 마스크 레이아웃

Fig. 3. Mask layout of ZnO-SAW filter.

여기서 f_0 는 SAW의 중심 주파수이며, 전파속도 (v_s)/과장 (λ_0)로 주어진다. 또한 N은 IDT쌍의 수를 의미한다. 따라서 SAW의 전파속도를 알고 있다면 원하는 주파수 대역의 필터나 공진자의 간단한 구성이 가능하다. 그러나 SAW필터의 실제 응용을 위해서는 박막재료, 박막의 두께, 기판물질 및 패키징(package) 등을 종합적으로 고려하여 전극을 설계하는 것이 필요하다. SAW필터 특성 측정시 필터 특성에 영향을 미치는 반사파와 BAW(bulk acoustic wave)를 방지하기 위한 부가적인 공정이 필요하다. SAW의 반사는 입력 IDT와 출력 IDT의 사이와 필터의 양쪽 모서리에서 주로 발생한다. 입력 IDT와 출력 IDT사이에서 발생한 반사파는 SAW필터에서 TTE(triple transit echo)를 유발하며 이를 방지하기 위해 입력과 출력 사이에 반사방지 전극을 형성하거나 이중전극($f=4f_0$)의 형태로 전극을 설계하는 방법이 사용된다. 한편 필터의 양쪽 모서리에서 발생하는 반사파는 흡수체인 왁스(wax) 등을 양쪽 모서리에 도포하여 반사를 방지하여야 한다. 입력 IDT로부터 발생된 BAW가 기판 뒷면에서 반사하여 출력 IDT에서 검출되면 필터의 특성을 왜곡하게 된다. 이를 방지하기 위해서는 기판 뒷면을 거칠게 연마 하든가 기판 뒷면에 흡수체를 도포 하여 BAW의 영향을 줄여야 한다. 본 연구에서는 반사방지 전극을 형성하여 TTE의 발생을 억제하였으며, 필터의 양쪽모서리와 기판 뒷면에 왁스를 도포하여 반사에 의한 영향을 줄였다.

그림 4는 표 2의 IDT제조규격에 의해 제조한 IDT/ZnO/

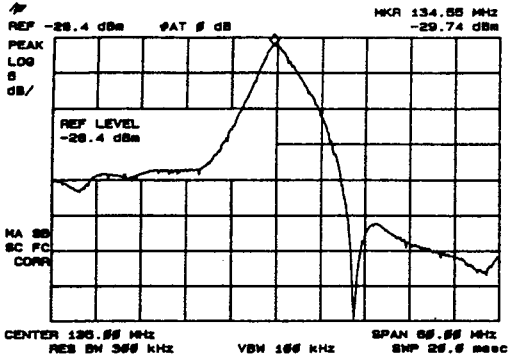


그림 4. IDT/ZnO/glass구조에 대한 SAW 필터의 주파수 응답

Fig. 4. Frequency response of SAW filter on a IDT/ZnO/glass structure.

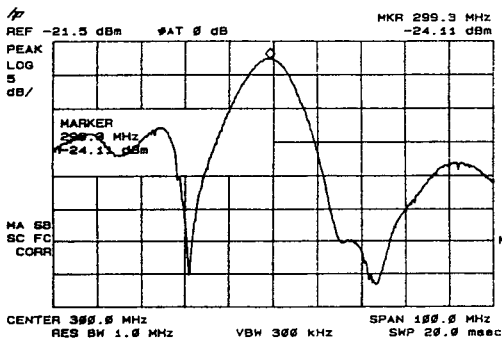


그림 5. IDT/ZnO/sapphire구조에 대한 SAW 필터의 주파수 응답

Fig. 5. Frequency response of SAW filter on a IDT/ZnO/sapphire structure.

유리 구조의 SAW필터에 대한 주파수 응답을 나타낸 것이며, 그림 5는 IDT/ZnO/사파이어 구조의 SAW필터에 대한 주파수 응답을 나타낸 것이다. 그림 4에서 h/λ 는 0.15였으며, SAW의 전파 거리는 50λ 였다. 주파수 응답의 측정시 정합회로는 구성하지 않았다. 그림 4에서 유리기판위에 제조된 SAW필터의 중심주파수는 134.6 MHz, 전파속도는 2680 m/sec를 나타내었다. 한편 사파이어 기판위에 제조된 SAW필터의 기본모드(0th mode)에서 중심주파수는 299.3 MHz, 전파속도는 5980 m/sec를 나타내었다. 또한 스미스의 등가회로로부터 유도된 공식($k^2 = \pi^2 f_0 c_T R_a / 2N$)을 이용하여

유효결합계수를 구하였다. 여기서 c_T 는 IDT의 정전용량, R_a 는 방사저항 및 N 은 IDT쌍의 갯수 이다. 계산된 유효 결합계수는 유리기판 위에서 0.98 %, 사파이어 기판 위에서 1.43 %였다.

IV. 결론

고주파 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 유리 및 사파이어 기판위에 ZnO박막을 제조하고 특성을 조사하였다. 유리기판 위에 제조된 ZnO박막은 반가폭(FWHM)이 0.42° 로 나타났으며, SEM사진에서 c축, 즉 (002)방향의 주상구조가 주상구조가 발달된 박막이 제조되었다. 한편 (012)면인 사파이어 기판에는 (110)면으로 배향된 ZnO박막이 성장되었으며, 반가폭(FWHM)은 0.41° 였다. SEM사진에서 사파이어 기판 위에 제조된 ZnO박막은 평탄성이 우수하며, 섬상상 이나 주상구조가 나타나지 않았다.

유리 및 사파이어 기판 위에 ZnO-SAW필터를 제작하고 제조된 필터의 주파수 응답을 조사하였다. h/λ 는 0.15였으며, SAW의 전파 거리는 50λ 였다. 주파수 응답의 측정시 정합회로는 구성하지 않았다. 유리기판 위에 제조된 SAW필터의 중심주파수는 134.6 MHz, 전파속도는 2680 m/sec였다. 한편 사파이어 기판위에 제조된 SAW필터의 기본모드(0th mode)에서 중심주파수는 299.3 MHz, 전파속도는 5980 m/sec였다. 또한 유효 결합계수는 유리기판 위에서 0.98 %, 사파이어 기판 위에서 1.43 %를 나타내었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 제조한 ZnO막은 SAW필터의 압전재료로 이용 가능할 것이다.

V. 참고문헌

- [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] O. Yamazaki, T. Mitsuyu, and K. Wasa, "ZnO thin film devices," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-27, no. 6, pp. 369-379, 1980.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] D. L. Polla, H. Yoon, and T. Tamagawa, "Integration of surface-micromachined zinc-oxide sensors in n-well CMOS technology," *IEEE IEDM 89*, pp. 495-498, 1989.
- [8] Fred S. Hickernell, "Zinc oxide films for acoustoelectric device application," *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, vol. SU-32, no. 5, pp. 621-629, 1985.

 著 者 紹 介

김 영 진

「센서학회지 제2권 제1호」 논문 93-13, p.99 참조
 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정.

권 오 준

1951년 7월 18일생. 1977년 2월 경북대학교 전자공학과 학사. 1977년 3월~1985년 5월 한국전자기술연구소 선임연구원 웨이퍼 가공실장. 1985년5월~1986년 4월 한국전자통신연구소 반도체 사업단 생산부장. 1986년 3월~1989년 2월 경북대학교 대학원 석사. 1989년~현재 한국전자통신연구소 물성분석실장 및 종합공정연구실장.

유 상 대

「센서학회지 제5권 제4호」 논문 96-5-4-10, p.81 참조
 현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수.

김 기 완

「센서학회지 제1권 제1호」 논문 92-01, p.8 참조
 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수.