

RF 마그네트론 스퍼터링에 의한 ZnO 박막증착 및 SAW 필터 특성 분석

이용의 · 양형국* · 김영진** · 한정인*** · 김형준

서울대학교 무기재료공학과, (주)대우전자부품*
경기대학교 재료공학과**, 전자부품종합기술연구소 광전부품 연구실***

Deposition of ZnO Thin Films by RF Magnetron Sputtering and Characterization
of the ZnO thin film SAW filter

Yong Eui Lee, Hyoung Kook Yang*, Yong Jin Kim**, Jeong In Han***, Hyeong Joon Kim
Dept. of Inorg. Mat. Eng., Seoul National University, Seoul 151-742

*DAEWOO Electronic Components Co., LTD

**Dept. of Mat. Sci. Eng., Kyonggi University, Suwon 440-760

***Korea Electronics Technology Institute

초 록 rf 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 7059 유리기판 위에 ZnO 압전박막을 증착하고, 공정변수인 rf 인가전력, 반응기 압력, O₂/Ar의 조성비등이 증착되는 박막의 결정성 및 전기적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

증착된 ZnO박막은 문헌에 보고된 증착속도보다 높은 값(200~1000 Å/min)을 가졌으며, XRD (002)피크의 rocking curve 표준편차가 SAW 필터로의 응용이 가능한 6° 미만의 값을 가졌다. O₂/Ar 유입비가 25% 이상의 경우에는 매우 높은 저항치를 가짐을 알 수 있었다.

ZnO박막의 두께와 파장의 비, $\frac{h}{\lambda} = 0.25$ 인 조건에서 필터를 제조하였다. 측정된 주파수 응답특성과 이론치에 의해 계산한 주파수응답특성은 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이때 중심주파수는 39.08 MHz였으며, 상속도는 약 2501 m/sec, 삽입손실은 약 29 dB였다.

Abstract Piezoelectric ZnO thin films were deposited on 7059 glass substrate by rf magnetron sputtering. The effects of deposition parameter, such as rf power, gas pressure and O₂/Ar gas ratio, on the crystallinity and electrical properties of the deposited ZnO thin films were studied.

It was found that the deposition rate was higher than the previously reported values. ZnO films were suitable for SAW filter since a standard deviation of XRD (002) peak rocking curve was less than 6°. ZnO thin films, which were deposited at O₂/Ar ratio larger than 25%, showed high resistance. SAW filter was fabricated using ZnO film, of which thickness was 0.25 of the wavelength of the propagating surface acoustic wave. The measured frequency response was consistent with the calculated one. The SAW filter had center frequency 39.08 MHz, phase velocity 2501 m/sec and insertion loss 29 dB.

1. 서 론

ZnO는 wurtzite 결정구조를 가지는 물질로서 가시광 영역에서의 투광성과 높은 굴절율, 큰 압전상수, 강한 전기기계 및 비선형 전기광학 계수를 가져 저주파 영역센서에 있어서 압전 트랜스듀서, 집적화된 광도파로, 산화 또는 환원 가스검출 센서, 발광 다이오드와 태

양전지의 투명 전도막등 그 이용 범위가 매우 다양하다¹⁾. 특히 LiNbO₃에 상응하는 기계결합계수와 ST-cut quartz에 비견하는 우수한 열적안정성으로 인해 표면 탄성파(Surface Acoustic Wave : SAW)를 이용한 대역통과필터²⁾, 공진기³⁾, convolvers⁴⁾등의 통신기기용 필터 및 신호처리소자에 가장 활발히 연구되는 재료 중의 하나이다.

더우기 비압전기판 위에 압전박막의 구조를 이용한 SAW 필터의 응용 가능성에 대한 G. S. Kino⁵⁾의 이론적인 발표이후에 기존의 단결정을 이용한 SAW 필터를 대체할 ZnO 박막을 이용한 대역통과 SAW 필터의 연구는 가장 널리 진행되고 있으며, 현재 TV용 VIF 대역통과 필터는 실용화되어 있다⁶⁾.

SAW 필터의 탄성과 발생, 전달 및 검출에 사용되는 ZnO 박막은 평활한 표면, 우수한 c축 배향성과 높은 비저항을 가져야 한다. 박막의 표면이 거칠면 국부적인 속도변화에 따른 주파수 변화가 심하게 되므로 평활한 표면의 박막이 필요하다. 또한 높은 기계결합계수를 갖기 위해서 c축 배향성이, 외부의 전기신호의 왜곡을 막기 위해서는 충분히 높은 비저항값을 가져야 한다. 그러나 이러한 특성은 스퍼터링시의 타겟의 조성, 방전 가스의 종류와 압력, 인가 전력, 기판의 종류, 기판과 전극사이의 거리, 증착속도, 기판온도와 반응기 압력등에 따라서 크게 변화하는 것으로 알려져 있다. 따라서 ZnO 박막의 물성 조절은 SAW 필터 제조에 있어서 일차적으로 중요한 것이라 할 수 있다.

본 연구에서는 rf 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 ZnO 박막의 제조시에 인가전력, 기판온도, Ar/O₂의 조성비등의 공정 변수가 ZnO 박막에 미치는 영향을 고찰하고, 제조한 SAW 필터의 특성을 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

rf 마그네트론 스퍼터 장치(Varian VKS-50)을 이용하여 ZnO 박막을 제조하였다. 본 장치는 타겟의 효율과 제조한 박막의 평활도를 높이기 위하여 스퍼터링시 타겟 뒷면에 부착한 자석이 회전하도록 고안되었다. 이때 타겟으로는 6" 지름의 ZnO 소결체(일본 고순도화학사, 4N)를 사용하였다.

스퍼터링전 반응기 진공도를 9×10^{-7} Torr로 유지한 후, 지름이 3"인 7059 유리 기판위에 반응기 압력, 기판온도, 인가전력, Ar/O₂의 조성비를 변화시키면서 증착하여 박막의 표면 및 단면 형상과 결정학적, 전기적 특성을 고찰하였다. 이때 증착된 박막의 두께는 약 1 μ m였다. 자세한 공정변수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The conditions of rf sputtered ZnO thin films

Target	Sintered 6-inch ZnO
Gas Pressure	25, 6.5 mTorr
Target-Substrate distance	4.8cm
Substrate	Corning 7059 glass
Sputtering Gas	Ar/O ₂ (100/0, 90/10, 75/25, 50/50, 25/75)
Substrate Temperature	200~400°C
RF Power	300~1000W

전기적 특성은 ZnO 박막 표면에 Al 전극을 부착하여 HP 4145B semiconductor analyzer를 이용하여 측정하였다. 또한 dc 마그네트론 스퍼터링법으로 증착한 Al을 이용하여 전극폭 8 μ m의 IDT(Inter-digital transducer)를 기판과 ZnO 박막 사이에 형성하여 SAW 필터를 제조하였으며, HP 8753C network analyzer를 이용하여 주파수 응답, 임펄스 특성, 군지연 특성을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 반응기 압력 6.5, 25mTorr, Ar/O₂ = 50/50, 기판온도 200~400°C의 영역에서 증착시킨 ZnO 박막의 인가 전력에 따른 증착속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 인가 전력을 증가시킬수록 증착속도는 거의 직선적으로 변화하는 것을 알 수

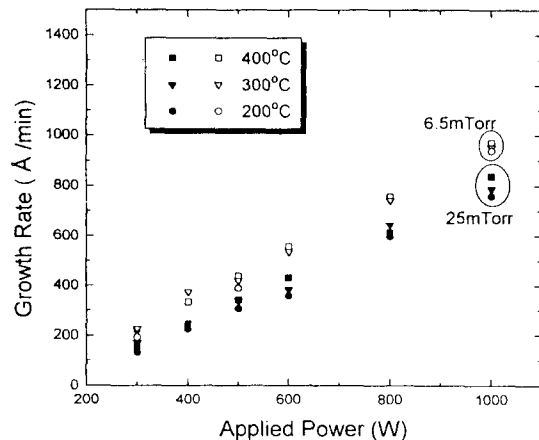


Fig. 1. Variations of deposition rate as a function of the rf power.

있으며, 이는 인가 전력이 증가함에 따라 증착속도는 직선적으로 증가하는 것으로 알려져 있는 일반적인 경우와 잘 일치하는 결과이다.

한편 기판온도의 변화에 따른 증착속도 변화를 보면 온도에 따라 증착속도가 다소 증가함을 알 수 있으며, 이는 아마도 기판 표면에서의 스퍼터링된 Zn 입자와 O 입자와의 반응이 기판에 가해지는 열에너지에 의해 촉진되기 때문인 것으로 생각된다. 실제 ZnO 타겟에서 스퍼터링되어 나오는 입자는 Zn와 O가 결합하여 있는 입자들과 함께 Zn와 O가 따로 스퍼터링되는 것으로 알려져 있었으므로⁷⁾ 단원자 상태로 스퍼터링된 입자들은 기판 표면에 도달하여 추가의 반응을 하여야 ZnO가 형성될 수 있기 때문이다.

또한 반응기 압력이 25 mTorr보다 6.5 mTorr에서 스퍼터링한 경우가 더 높은 증착속도를 가짐을 알 수 있는데 이는 반응기압력이 증가할수록 스퍼터링된 입자들이 플라즈마 공간을 지나면서 산란이 증가하여 최종적으로 기판에 도달하는 입자들의 양이 감소하기 때문이다.

반응기압력 6.5 mTorr, 기판온도 300°C, rf 인가전력 400, 600W에서 산소 유입비에 따른 증착속도의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 모든 인가전력의 구간에서 O₂의 비가 증가할수록 증착속도는 감소함을 알 수 있다. 이는 O₂의 유입량이 증가할수록 Ar의 양은 감소하여 스퍼터링되는 입자의 양이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

증착된 ZnO 박막의 인가전력에 따른 결정성의 변화를 알아보하고자 XRD를 이용하였으며, 이의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이후 특별한 언급이 없는 한 박막 증착시의 기판온도는 300°C이다. 이때 회절패턴의 강도는 박막의 두께를 일정하게 두고 계산한 값이다. 모든 조건에서 (002) 회절 피크만이 관찰되며, 이는 기판에 수직인 방향으로 (002) 면이 우선 배향된 ZnO 박막이 증착되었음을 나타내는 것이다. 전체적으로 인가전력이 증가할수록 회절피크의 강도가 감소하는 경향을 나타내며, 특히 인가전력이 300, 400W의 경우 XRD 회절 패턴의 강도는 큰 변화가 없으나 500W 이상의 경우에는 (002) 회절피크의 강도가 현저히 감소함을 알 수 있다. 이는 우선

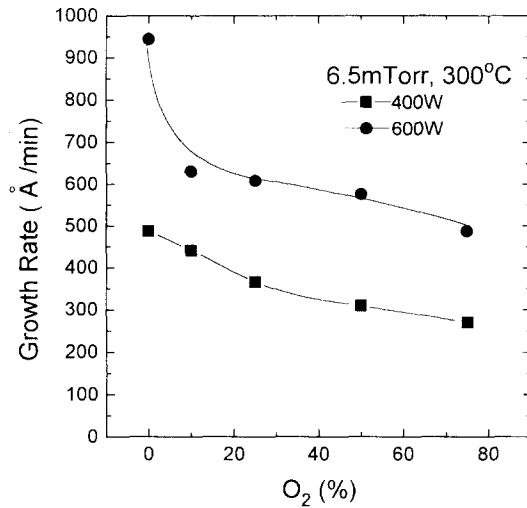


Fig. 2. Variation of deposition rate as a function of the O₂/Ar ratio.

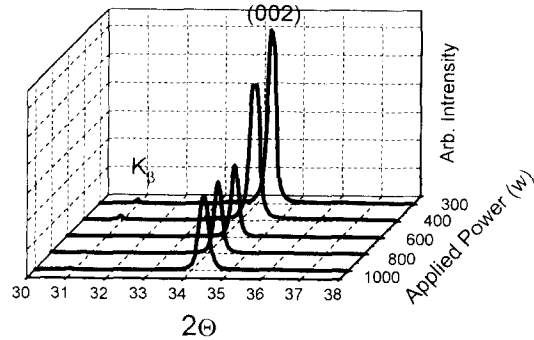


Fig. 3. XRD patterns of the ZnO films as a function of the rf power.

적으로 증착속도와 직접적인 관련이 있는 것으로 생각되어진다. 앞의 증착속도 결과에서 보듯이 인가전력이 증가할수록 박막의 증착속도는 증가하게 되어, 초기에 도달한 입자들이 기판 표면위에서 결정화될 충분한 시간적인 여유를 가지지 못한 상태에서 다른 입자들이 계속하여 스퍼터링되어 기판에 도달하므로 ZnO박막의 결정화가 제대로 진행되지 못한 것이다. 또한 rf 인가전력이 증가하면 타겟에 충돌하는 입자들의 에너지가 커져서 기판에 도달하는 입자들 또한 큰 에너지를 가지게 된다. 이러한 입자들이 형성되는 막의 표면에 충돌하여 막 표면에 손상을 주어 결정화를 저

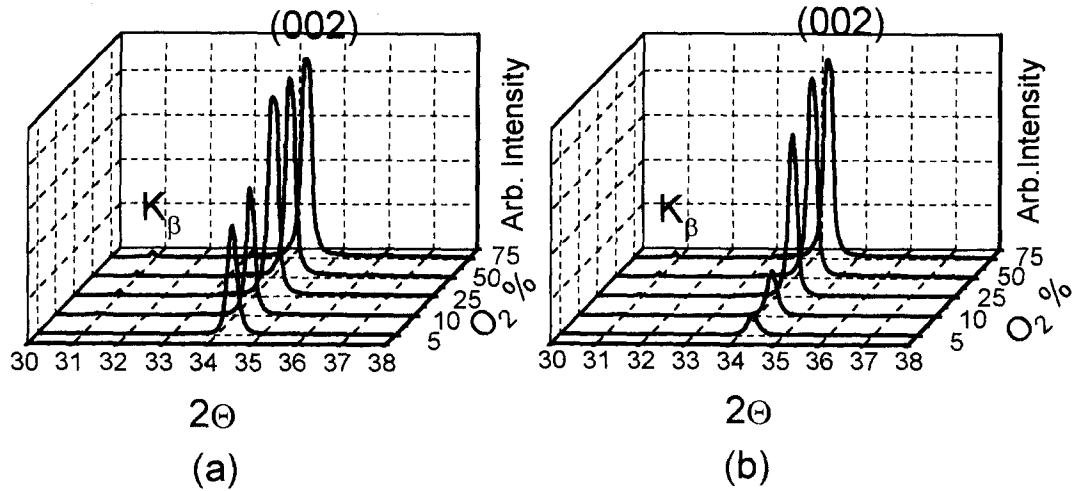


Fig. 4. XRD patterns of the ZnO films deposited at rf power; (a) 400W and (b) 600W as a function of the O_2/Ar ratio.

하시켰을 가능성도 있다. 본 실험에서 인가전력의 증가에 따라서 (002)회절피크의 면간거리가 300W의 경우 2.608에서 600W의 경우 2.615로 증가함을 알 수 있었으며, 이는 인가전력의 증가에 따라 기판에 평행한 방향으로 압축응력이 증가함을 의미한다. 또한 rf 인가전력이 증가하면 타겟에서 스퍼터링 되어져 나오는 입자들의 상대적인 양이 변화하는 것에도 그 이유를 찾을 수 있다. Aita⁷⁾등에 의하면 rf 인가전력이 증가할수록 Zn/ZnO 이온의 비가 증가하는 것으로 보고되었다. 그러므로 rf 인가전력이 증가할수록 단원자 상태로 스퍼터링되는 양이 많아지므로 결국 형성되는 막의 표면에는 Zn가 과잉인 상태가 되게 된다. 따라서 이들은 화학양론적 ZnO 박막보다 결정화가 덜 진행된다.

Fig. 4에 산소유입비에 따른 ZnO 박막의 XRD 회절패턴을 나타내었는데 그림에서 보듯이 초기 10%까지는 (002)의 회절강도가 낮으나 25%이상의 산소가 반응기내로 유입되면 (002)회절피크가 상당히 큰 강도를 가져 증착된 박막의 (002)면이 기판과 수직인 방향으로 잘 발달하였음을 알 수 있다. 이는 앞서 말한 바와 같이 우선 O_2 가스조성비의 증가에 따른 타겟로부터의 스퍼터링되는 입자의 양이 감소하여 기판 표면위에서 입자들이 낮은 에너지 상태로 배열하는데 충분한 시

간을 갖게 되어 결정성이 증가한다고 생각되어 진다. 또한 기판에 도달하는 입자들은 에너지 전달이 최대가 되는 Zn가 과잉인 것이므로 상대적으로 산소는 결핍상태이고 따라서 외부에서 유입되는 O_2 가 없거나, 적을 경우에 Zn과잉의 결정성이 나쁜 상태로 존재할 것이다. 이는 Fig. 4의 (b)에 나와 있듯이 600W의 경우 더욱 현저히 나타나며, rf 인가전력이 증가할수록 앞서 말한 바와 같은 이유로 400W보다 덜 결정화가 진행될 것이다. 그러

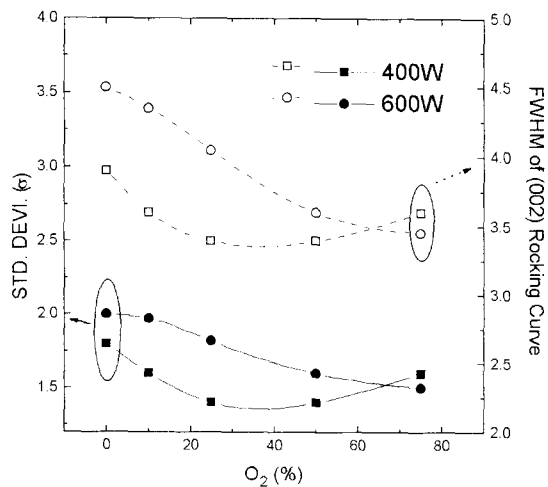


Fig. 5. Variation of standard deviation of (002) rocking curve as a function of the O_2/Ar ratio.

나 O₂가 25% 이상 반응기내로 유입될 경우에는 외부에서 유입되는 산소가 타겟과 기판 표면에서 산화반응에 참여하게 되므로 이러한 산소 결핍의 막은 형성되지 않으며, XRD 회절패턴에서 보는 바와 같이 우수한 결정성을 가진 ZnO 박막이 형성되었음을 알 수 있다.

그러나 이러한 XRD 측정은 증착된 박막을 구성하는 입자들의 기판에 수직인 방향으로

배열한 정도를 알 수는 없으므로, 이는 보통 Rocking curve라고 불리는 측정방법을 이용해서 평가된다. Rocking curve는 (002) 회절피크의 최대강도가 나오는 2θ 지점에 X선 검출기를 위치시키고, 측정할 시편을 회전시켜서 정규분포의 회절강도를 얻는 방법으로서 이때 얻은 회절강도의 분포로부터 표준편차(σ)를 계산하여 형성된 박막이 기판에 수직인 배열 정도를 나타내게 된다. Fig. 5는 산소유입량에

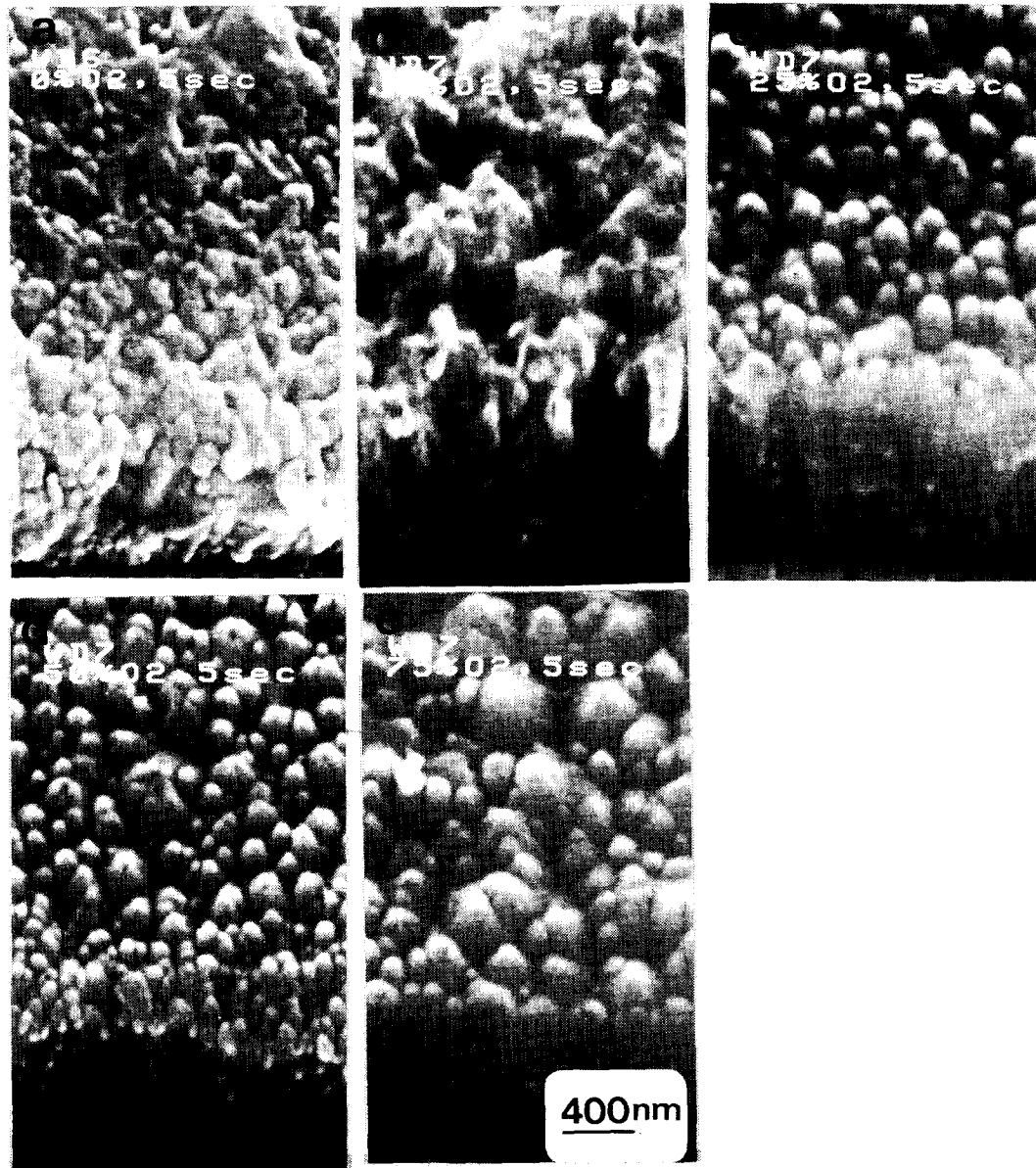


Fig. 6. Scanning electron micrographs of ZnO films after 10% HNO₃ etching during 5sec : (a) O₂/Ar=0%, (b) O₂/Ar=10%, (c) O₂/Ar=25%, (d) O₂/Ar=50% and (e) O₂/Ar=75%.

따른 Rocking curve의 표준편차 값의 변화를 나타낸 것이다. rf 인가전력 600W의 경우 10% O₂까지는 약 1.8~2.0이다가 25% 이후의 경우에는 1.4~1.5로 감소함을 알 수 있으며, 이는 앞서 말한 XRD 회절패턴의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 본 실험에서 rf 인가전력이 증가할수록 앞에서 언급한 이유로 Rocking curve의 표준편차값은 증가하여 기판에 수직한 방향으로 ZnO 박막의 배향정도가 나빠짐을 알 수 있었다. 그러나 모든 조건에서 Rocking curve의 표준 편차값이 6° 이하의 값을 가져 일반적인 SAW 필터의 제조가 가능한 막의 배향정도를 모두 만족하는 것⁸⁾으로 생각되어진다. 10% HNO₃에 5초 동안 에칭한 시편들의 산소유입비에 따른 주사 전자현미경 사진 (SEM)을 Fig. 6에 나타내었다. 산소의 유입비가 10%까지는 증착시킨 ZnO 박막이 제대로 결정화 되지 않아서 에칭 후의 표면 및 단면형상이 거칠어지며 불균일함을 알 수 있다. 그러나 산소 유입비가 25% 이상으로 증가할 경우에는 주상형태로 잘 자란 결정질의 ZnO 박막이 형성되었음을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서 ZnO의 결정성을 증진시키기 위해서는 25% 이상의 O₂를 추가로 진공반응기내로 유입시켜야 함을 알 수 있다.

압전박막을 SAW 필터로의 응용시에는 우수한 c축 배향성 뿐만 아니라 소자내에 형성되는 전기장을 왜곡시키지 않을 정도의 저항값도 요구 된다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 산소가 전혀 없을 경우에는 약 $5 \times 10^7 \Omega$ 의 저항치를 가졌으나, 산소비를 25% 이상으로 증가시켰을 경우에는 약 $3 \times 10^{10} \Omega$ 의 매우 높은 저항치를 가진 박막이 증착되었음을 알 수 있다. 산소비에 따른 이러한 저항값의 변화는 우선적으로 박막 내부의 Zn/O의 비에 의한 결과라고 생각되어진다. 일반적으로 ZnO의 경우 X-선 조사 분석에 의하면 약 $10^{20}/\text{cm}^3$ 의 Zn 침입형 결합자리가 존재하는 것으로 알려져 있으며,⁹⁾ 이러한 결합자리에 존재하는 과잉의 Zn나 산소공공 결합은 1가 이온의 donor로 작용하여 ZnO 전도성을 향상시키는 결과를 나타낸다. 즉,

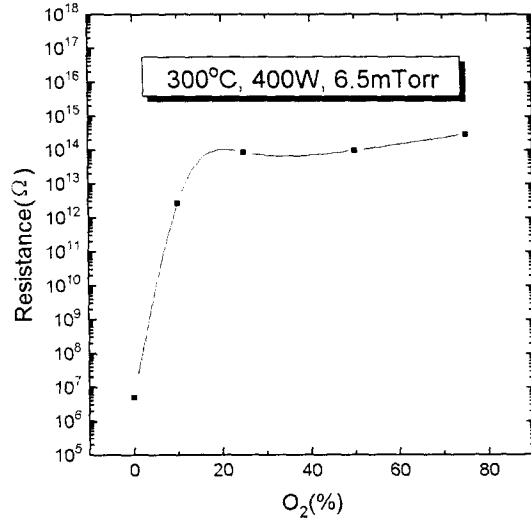


Fig. 7. Variation of the resistance of ZnO films as a function of O₂/Ar ratio.



의 관계식에 의해서 ZnO 박막의 전도성이 증가하게 된다. 이러한 이유로 산소가 없을 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 박막에 Zn과 과잉이 되어 낮은 저항치를 보이나, 잉여의 산소가 반응기 내로 유입되면 기판의 표면에서 단원자 상태의 Zn가 산소가 결합하여 화학양론비에 보다 가까운 ZnO 박막이 형성되므로 저항치가 높아지는 것이다.

증착된 ZnO 압전박막을 이용하여 SAW 필터를 제조시, IDT(Inter-digital transducer)는 표면탄성파의 여기와 검출을 담당할뿐 아니라 주파수응답의 형태를 결정하는 매우 중요한 부분이다. 실제로 사용하려는 목적에 맞게 디자인된 입력 IDT는 전극에 인가된 전압차에 의해 전기장이 형성되어 탄성파를 여기시키므로 IDT는 SAW 필터의 특성을 좌우하는 1차적인 요인이 된다. 본 연구에서는 dc-마그네토크론 스퍼터링으로 증착한 1 μm 두께의 Al을 IDT로 사용하였으며, 이를 기판인 7059 유리판과 증착시킨 ZnO 박막사이에 위치시켰다. Table 2는 제조된 IDT의 규격이다. 보통 TV용 필터는 중심주파수가 약 40MHz 근처로 파장 80 μm 의 IDT를 사용할 경우에 기계결합 계수가 최대가 되는 $\frac{h}{\lambda} = 0.5$ (h : ZnO 두께, λ : 파장)의 조건에서 소자를 제조하기 위해서

Table 2. Design parameter of the IDT

IDT arrangement	double electrode
type of electrode	without apodization
finger width/space	8 μ m/8 μ m
SAW wavelength	64 μ m
acoustic aperture	1.28mm(20 λ)
number of finger pairs	15 pairs
propagation length	1.59mm(24.8 λ)
h/ λ	0.25

는 40 μ m 두께의 ZnO 막이 요구된다.⁵⁾

하지만 이렇게 두꺼운 막의 제조는 13시간 이상의 스퍼터링을 요구하므로, 본 연구에서는 ZnO 박막을 인가전력 600W, 반응기압력 6.5 mTorr, 기판온도 300 $^{\circ}$ C, 가스조성비 Ar/O₂=50/50로 하여 증착하였다. 이때 막의 증착속도가 약 3.2 μ m/hr이고, 증착시간을 5시간으로 하였기 때문에 두께는 약 16 μ m였다. 즉 막의 두께와 파장의 비 $\frac{h}{\lambda}$ = 0.25인 조건에서 필터를 제조하였으며, 이 조건에서 fused silica를 기판으로 한 경우의 이론적인 기계결합 계수(k^2)는 약 0.12정도이다.¹⁰⁾

Fig. 8은 제조한 SAW 필터의 개략도이다. 이러한 구조를 가진 SAW 필터를 제조하였으며, 주사 전자현미경으로 관찰한 filter의 형상

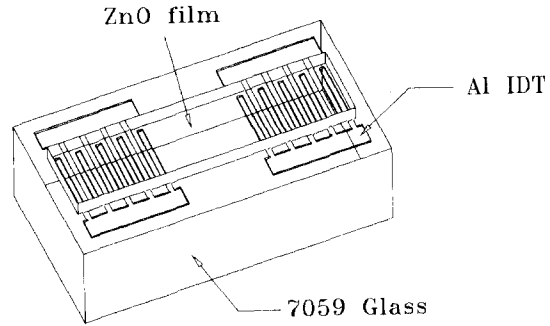


Fig. 8. Schematic diagram of SAW filter.

을 Fig. 9에 나타내었다. 매우 균일한 ZnO 막이 형성되었음을 알 수 있으며, IDT 패턴 또한 잘 에칭되었음을 알 수 있다. 또한 단면 형상으로부터 IDT와 기판위에 자란 ZnO 막이 주상형태로 잘 자란 것을 알 수 있다. ZnO SAW 필터의 특성을 분석하기 위하여 network analyzer를 사용하였으며, 이때 기판의 모서리에 의한 표면탄성파의 반사를 막기 위해 유기물 흡음제를 입, 출력단자 끝부분에 부착하였다. Fig. 10은 측정된 주파수응답 특성과 제작한 IDT의 이론치를 비교하기 위한 것으로서 normalize한 주파수 응답을 나타낸

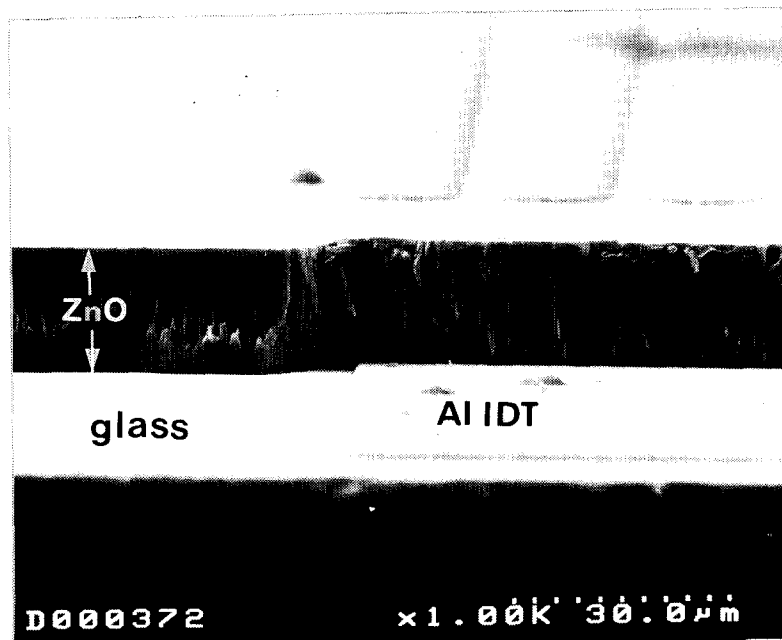


Fig. 9. Scanning electron micrograph of ZnO SAW filter.

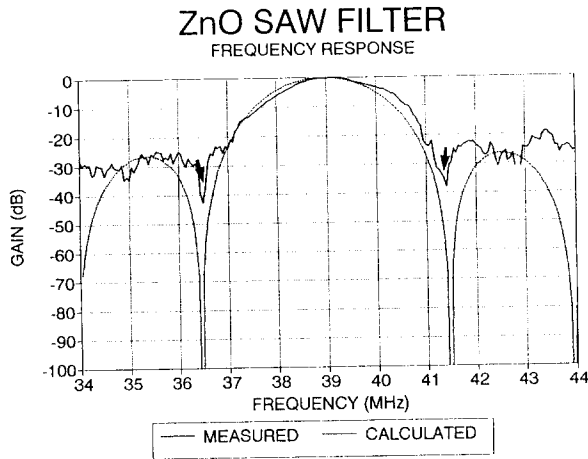


Fig. 10. Comparison of measured frequency response with calculated frequency response.

그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 통과 대역의 주파수 특성 및 첫번째 null(화살표)이 형성되는 주파수가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 약간의 파형 변화가 관찰되는데 이는 전극에 의한 회절과 박막 내부에 존재하는 결합동에 의해 파가 왜곡된 것에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. Fig. 11은 제작한 필터의 주파수(a)와 임펄스 응답(b)을 나타낸 것이다. 이때 중심주파수는 주파수가 최대가 되는 지점으로부터 3dB 떨어진 지점에서의 중간값을 취하였다.¹⁰⁾ 그림에서 보듯이 중심주파수는 39.08 MHz 임을 알 수 있다. SAW

의 상속도(v_p)는 $v_p = f_0 \cdot \lambda$ (f_0 : 중심주파수, λ : 파장)의 관계를 가지므로 이에 의해 약 2501 m/sec의 상속도를 가짐을 알 수 있다. 군지연특성은 통과대역내의 주파수에 따른 군지연 시간이 매우 일정함을 잘 나타내 주고 있으며, 측정된 군속도는 약 2538 m/sec였다. 삽입손실은 약 29 dB였다. 임펄스특성을 보면 0 sec에서의 피크(1)는 rf feedthrough를 나타낸 것이고, 650 nsec에서 주피크(2)가 나타나며, 낮은 이론적인 기계결합계수를 가지는 조건에서 SAW 필터를 제조한 까닭으로 인해 triple transit echo는 나타나지 않은 것으로 생각된다. 그러나 실제 CTV용 SAW 필터를 제조하기 위해서는 요구되는 중심주파수, attenuation, 통과대역폭, 삽입손실등의 필터 특성을 고려하여 IDT를 디자인해야하며, 이에 대한 연구는 진행중이다.

4. 결 론

SAW 필터의 표면탄성과 생성원인 ZnO 압전박막을 rf 마그네트론 스퍼터링법으로 제조하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

모든 공정 조건에서 (002) 회절피크만 존재하여, 증착시킨 박막의 c축이 기판에 수직하게 성장하였음을 알 수 있었으며, 더우기 (002) rocking curve의 표준편차가 6° 이하의 값을 가져 SAW 필터 제조에 적합한 결정성을 가지고 있었음을 알 수 있었다. 또한 반응기내로 O_2 유입이 없을 경우에는 증착시킨

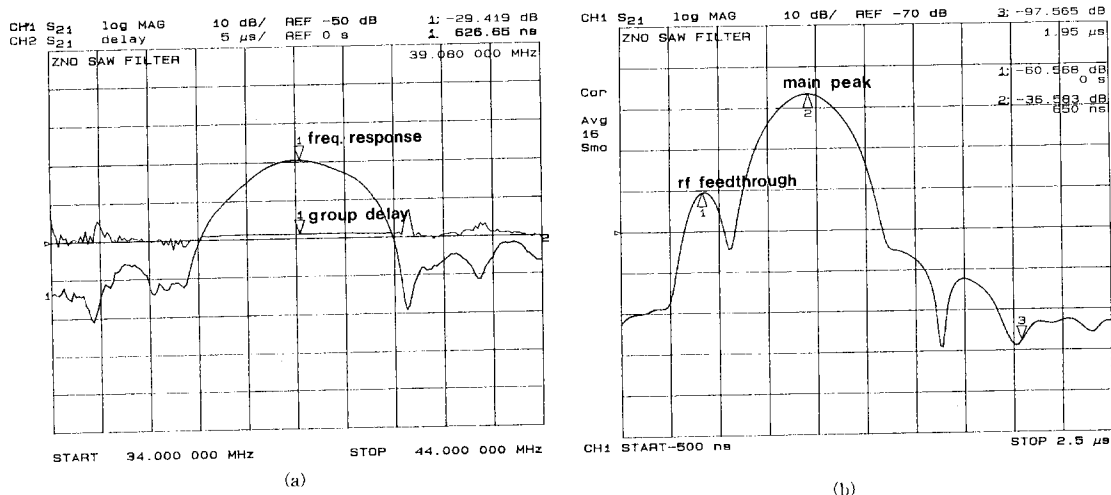


Fig. 11. (a) Frequency response and (b) impulse response of ZnO SAW filter.

ZnO 박막의 결정성과 저항값이 낮았으나, 25% 이상의 O₂를 반응기내로 유입시킬 경우 (002) rocking curve의 표준편차가 2° 미만의 우수한 결정성과 높은 저항값을 가짐을 알 수 있었다.

반응기 압력 6.5 mTorr, 인가전력 600W, 기판온도 300°C, Ar/O₂=50/50의 조건에서 ZnO막을 증착하여 이로 SAW 필터를 제조하였다. 이때 파장에 대한 막의 두께비가 0.25였다. 제조한 필터는 중심주파수가 39.08 MHz이며, 삽입손실은 약 29 dB였다. 중심주파수를 이용해 계산한 상속도는 2501 m/sec이며, 중심주파수에서 약 650 nsec의 군지연을 가져 2538 m/sec의 군속도를 가짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Frans. C. M. Van De Pol, *Ceram. Bull.*, 69 (12), 959 (1990).
2. F. S. Hickernell, *J. Appl. Phys.*, 44, 1061 (1973).
3. S. Ono, O. Yamazaki, K. Ohji, K. Wasa, and S. Hayakawa, *Appl. Phys. Lett.*, 33, 217 (1978).
4. S. Minagawa, T. Okamoto, T. Nitsuma, K. Tsubonshi, and N. Mikoshiba, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU-32(5), 670 (1985).
5. G. S. Kino and W. S. Wagers, *J. Appl. Phys.*, 44(4), 1480 (1973).
6. O. Yamazaki, T. Mitsuyu, and K. Wasa, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU-27(6), 369 (1980).
7. C. R. Aita, R. J. Lad and T. C. Tisone, *J. Appl. Phys.*, 51(12), 6405 (1980).
8. 彈性波素子技術 핸드ブック, pp.322 日本學術振興會彈性波素子技術 第150 委員會編, オーム社.
9. W. Hirschwald, *Current Topics in Materials Science*, edited by E. Kaldis, vol.7, pp.154, North-Holland Publishing Co., Amsterdam, New York, Oxford, (1981).
10. T. Yamamoto, T. Shiosaki and A. Kawabata, *J. Appl. Phys.*, 51(6) 3113~3120 (1980).
11. Andy Botka, *Hewlett Packard RF & MW Devices Test Seminar* (1993).