

다이아몬드 기판상에 증착된 ZnO 압전박막의 탄성표면파 특성

김영진, 정영호, 양형국*, 박종철*, 이용의**, 김진용**, 김형준**

경기대학교 전자 및 신소재공학부, *전자부품종합기술연구소, **서울대학교 재료공학부

Surface Acoustic Wave Properties of ZnO Thin Films Deposited on Diamond Substrate

Y. J. Kim, Y. H. Jong, H. K. Yang*, J. C. Park*, Y. E. Lee**, J. Y. Kim**, H. J. Kim**

School of Elec. and Advanced Mat. Eng., Kyonggi Univ. Suwon 442-760

*Korea Electronic Technology Institute, Kyonggi-Do 451-860

**School of Mat. Sci. and Eng., Seoul National Univ., Seoul 151-742

요 약

ZnO 박막의 증착 거동에 대한 기본 실험을 하기 위하여 우선 코닝 7050 유리 기판을 사용하여 증착 변수에 따른 박막의 성장특성을 규명하였다. 산소가스의 영향을 보면, ZnO 박막의 경우 산소를 주입시키지 않은 경우에는 배향성을 갖지 못하고 있으며, 일정양의 산소가 있어야 (002) 배향성을 가진 ZnO 박막이 증착되고 있음을 알 수 있었다. 또한 실험결과에 의하면 rf 전력과 기판온도에 따라서 ZnO 박막의 결정성 및 성장면의 큰 변화가 관찰되고 있는데, 이들 변수의 크기가 증가할수록 SAW 소자에 적합한 양질의 배향성 박막을 얻을 수 있었다. 실험에서 얻은 최적 조건은 rf 전력 300W, 기판 온도 300°C, Ar/O₂=50/50 이다. SAW 특성을 분석하기 위하여 diamond/Si 기판위에 Al 박막을 증착시킨 후 자체 제작한 마스크를 이용하여 건식 식각법에 의한 IDT 제작을 시도하였다. 그 다음 위의 최적 조건에서 ZnO 박막을 증착하고 탄성표면파 특성을 분석하였다. 측정에 사용한 디자인은 λ (파장)는 24 μ m으로서 측정결과 simulation 값과 실험치가 잘 일치하고 있었다. 측정된 중심주파수는 250MHz이고, 이로 부터 계산한 ZnO/diamond 구조의 전단 속도는 약 6000m/s의 값을 나타냈으며, 이 값은 실제 이론치와 거의 일치하고 있었다.

Abstract

ZnO thin films were deposited on Corning 7059 glass substrates to study fundamental properties of films. According to the experimental results, (002) preferred ZnO thin films were grown by purging Ar/O₂ mixed gas, but not without oxygen gas. The structure and the orientation of ZnO thin films were much affected by the substrate temperature and rf power. High quality ZnO films were obtained by increasing their values. Optimum deposition parameters were : 300W rf power, 300°C substrate

temperature, $Ar/O_2=70/30$. To characterize SAW propagation properties, IDT was fabricated by etching Al films deposited on diamond/Si wafer with RIE. Measured λ (wavelength) was $24\mu m$ and experimental results were well matched with simulation. Center frequency was 250MHz, and the calculated phase velocity of ZnO/ diamond structure was about 6000m/s.

1. 서 론

향후 이동통신의 고주파화에 따라서 관련 부품도 이에 대응한 연구가 활발히 진행되고 있다. 표면탄성과 (surface acoustic wave, SAW) 필터는 고주파 부품의 주요 핵심 부품으로서 앞으로의 시장전망이 매우 유망한 부품중의 하나이다.

특히 국내에서도 이동통신의 급격한 보급증가로 수년내에 주파수 대역을 현재의 900MHz에서 1.5~2GHz로 변경할 수 밖에 없기때문에 GHz 대역용 SAW 필터의 개발이 시급한 실정이다. SAW필터에 있어서 사용 중심주파수, f_0 는 다음식에 의해서 결정된다.

$$f_0 = V_p/\lambda \quad (1)$$

여기서 f_0 는 중심주파수, V_p 는 전단속도, λ 는 파장을 나타낸다. 따라서 f_0 가 커짐에 따라서 Inter digital transducer (IDT)의 폭이 작아져야 한다. GHz용인 경우 현재 전단속도가 가장 빠른 $LiTaO_3$ 기판상에서도 약 $0.5\sim 0.6\mu m$ 폭의 IDT 전극을 만들어야 한다. 이 크기는 반도체의 VLSI 공정과 비슷한 수준으로 고가의 장비와 낮은 생산성 때문에 어려움을 갖고 있다. 따라서 일부에서는 전단속도 (V_p)를 증가 시키는 목적으로 새로운 재료의 개발을 시행하고 있다. 그 중의 하나가 ZnO/diamond의 2층 구조를 갖고 있는 것이다.⁽¹⁾

ZnO박막은 주로 rf magnetron reactive sputter법^{(2)~(7)}에 의해 입히는 것이 보편화 되어 있으나 기존의 방법으로는 GHz 대역에 사용하

기에는 전단속도가 너무 느린것이 단점이다. 그러나 사용기판을 유리 대신 다이아몬드 기판을 사용할 경우에는 V_p 를 획기적으로 올릴 수 있다고 보고되고 있다.⁽¹⁾ 다이아몬드는 높은 Young's modulus 때문에 모든 물질중에서 가장 높은 음속을 갖는다. 따라서 가장 높은 SAW 속도는 다이아몬드가 SAW 소자의 기판 재료에 응용될 때 기대될 수 있다.

다이아몬드와 최상의 압전재료인 ZnO의 층상 구조에서 SAW 특성의 이론적 계산들의 보고가 있고, 그것은 10000 m/s 속도까지의 SAW 속도가 이 구조에서 기대될 수 있다고 한다. 이 값은 $LiTaO_3$, $LiNbO_3$ 와 quartz와 같은 전통적인 재료를 사용하여 얻은 결과 보다 2배보다 더 큰 값이다. 즉, 이 속도는 현재 가장빠른 $36^\circ Y-X LiTaO_3$ (LT) 압전단결정의 속도인 4,178m/s보다도 2배 가량 빠른 것이다. 이러한 V_p 를 사용하면 2.5GHz의 경우에 LT를 사용한 SAW필터의 경우 IDT 폭이 $0.35\mu m$ 이어야 하지만, ZnO/diamond는 $1\mu m$ 로도 실현할 수 있다고 보고 되고 있다. 따라서 ZnO/diamond 구조는 상업화가 성공되면 기존의 압전단결정에 비해 저가, 고생산성의 장점을 갖을 수 있을 것이다.

2. 실험방법

증착된 박막의 물성은 타겟의 조성, 방전가스의 종류와 압력, 인가한 RF의 전력, 기판의 종류, 기판과 전극사이의 거리, 증착속도, 기판온도와 챔버 형태에 따라서 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 RF 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 Corning 7059 기판

과 diamond/Si 기판 위에 박막을 제조하였다. 타겟으로는 지름 6 inch의 ZnO (고순도 화학, 5N) 소결체를 사용하였으며, 초기 진공을 5×10^{-7} 로 유지시킨후 Ar/O₂의 혼합가스를 챔버내로 주입시켰다. 이때 Ar/O₂의 조성비는 0%-100%로 변화시켰으며, 기판의 온도는 25°C-300°C로 변화시켰으며 인가한 RF Power는 100~500W였다. 실험에 사용한 다이아몬드 기판은 미국의 Diamonex 사의 CVD diamond thin films on silicon wafer로서 사양은 다음 Table. 1과 같다.

Table. 1 Specification of CVD diamond thin films on Si wafer

Item	Spec.	Measuring
Size	φ4"	2-wavelength
Thickness	5,78μm	ellipsometer
Surface roughness(Ra)	440Å	12,5μm radius tip
Wafer bow(dzo)	4,40μm	80mm scan
Structure	polycrystalline	
Uniformity	±10% for φ4"	

증착된 박막의 결정학적 특성을 알아보기 위하여 XRD 분석을 하였다. 분석에 사용된 기기는 일본 Rigaku사의 제품으로 분석 조건은 35KeV, 20mA에서 scan speed 4°/min였다. 사용한 X-ray는 CuKα선으로 파장은 1.5406 Å이다. 2θ는 30~75°로 하였다. 증착속도는 박막의 두께를 구한 후, 이 값을 증착시간으로 나누어서 계산하였다. 증착된 박막의 두께는 stylus profiler type의 측정기구인 Tencor Instrument사의 α-step을 사용하였다.

실험에 사용된 마스크는 Dupont Korea에서

제작한 hard mask를 사용하였으며, 디자인 사양은 Table. 2와 같다. 이때 각각의 의미하는 바는 Fig.7의 상단에 나타내었다. Inter digital transducer(IDT)의 제작은 스퍼터링 법에 의하여 Al 박막을 약 1200Å 정도 증착을 하고, 일반적인 식각 공정에 의하여 photo resist 작업을 하고, Al 박막을 건식 식각법으로 ZnO 박막에 손상을 주지 않고, 패턴 제작을 할 수 있었다. Fig. 1은 전반적인 제작 공정도를 보여주고 있다.

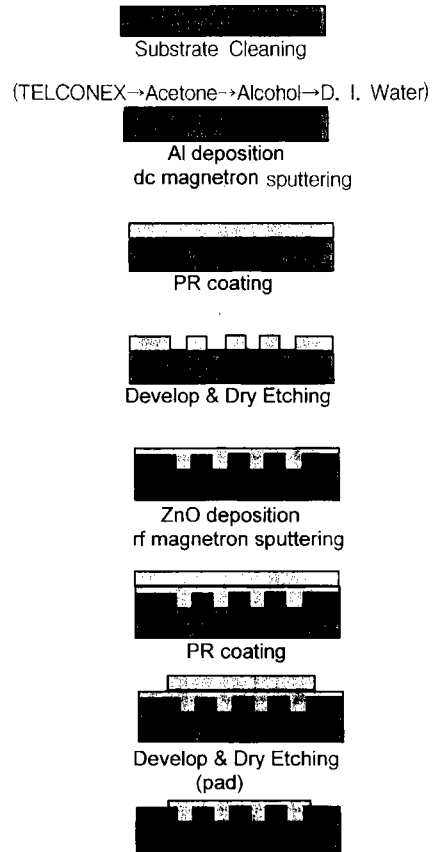


Fig. 1 Fabrication flow chart for ZnO/Al/Diamond/Si SAW device.

Table. 2 IDT design rule

Type	Pairs	λ(μm)	Metallization Ratio	Aperture (w)	center to center distance	electrode width/ space(μm)
Double	50	24	0.5	200λ	150λ	3/3

다음 IDT가 제작된 소자를 probe station을 이용하여 network analyzer로서 주파수 특성을 분석하고 전단 속도와 삽입손실을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

스퍼터링법에 의해 ZnO 박막을 증착할 경우 일반적인 산화물 박막 증착 거동과 마찬가지로 크게는 Ar/O₂의 유입량과 기판온도에 의해서 주로 우선배향성 및 결정성등과 같은 결정학적인 물성과 조성 및 전기적 특성이 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 실험에서도 스퍼터링시 유입시키는 산소비(Ar/O₂)와 기판온도의 변화에 따른 다결정 박막의 증착 거동을 살펴보았다. 일반적으로 금속 타겟이나 산화물 타겟을 사용할 경우 모두 금속 성분이 과잉인 막이 증착되는데, 이때 부족한 산소를 공급하기 위해서 산화물 박막의 스퍼터링의 경우 산소를 반응챔버 내로 직접 투입시킨다.

Fig. 2, 3, 4는 유리 기판상에 각각 상온, 100 °C, 300°C에서 증착한 ZnO 박막의 XRD 결과이다. Ar/O₂ 비에 따라서 성장 구조의 변화가 관찰되어지고 있다. 특히 산소를 주입 시키지 않은 경우에는 기판온도를 300°C까지 증가 시키더라도 양질의 ZnO 박막이 성장되고 있지 못

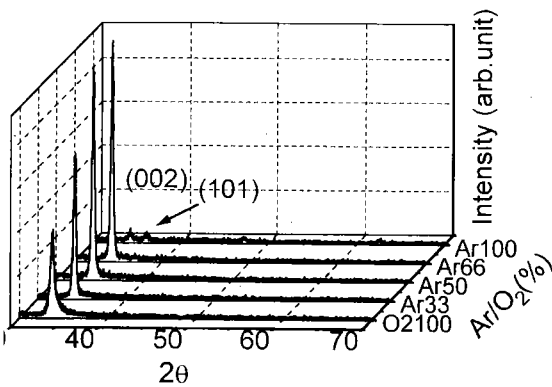


Fig. 2 XRD patterns of ZnO thin films deposited on the glass substrate at room temperature.

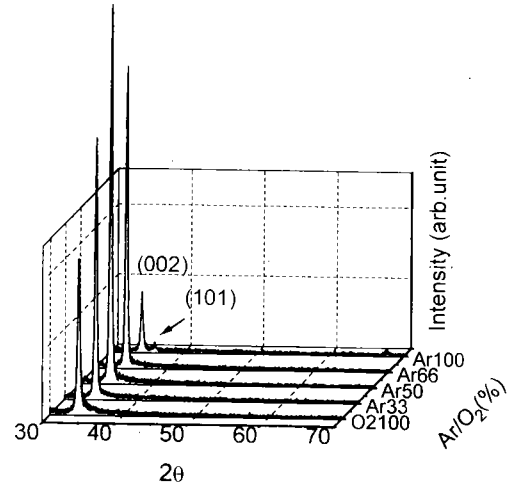


Fig. 3 XRD patterns of ZnO thin films deposited on the glass substrate at 100°C

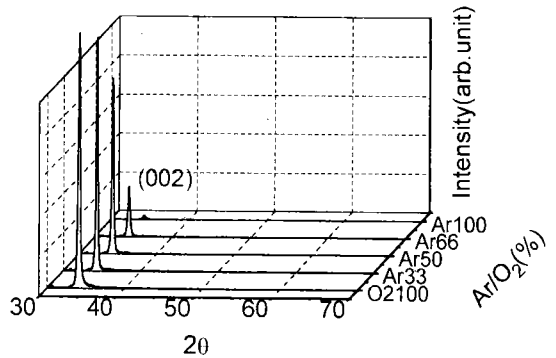


Fig. 4 XRD patterns of ZnO thin films deposited on the glass substrate at 300°C

함을 관찰할 수 있었다. 이는 다음과 같은 몇가지 이유로 설명된다. 첫째, 산소결핍의 박막이 형성되기 때문이다. 결합에너지를 고려하지 않을 경우 타겟에 충돌하는 입자와 스퍼터링되는 입자 사이의 에너지전달은 두 입자의 무게가 비슷할 경우 최대가 된다. 따라서 산소의 유입이 없을 경우 Zn가 O에 비해 상대적으로 많이 스퍼터링되므로 산소 결핍의 ZnO 박막이

증착된다. Baren등⁽⁸⁾에 의하면 ZnO 타게트를 산소의 유입없이 스퍼터링할 경우 Zn, O가 Zn-O 등의 agglomerate들에 비해 상대적으로 스퍼터링되는 양이 우세한 것으로 알려져 있다. 따라서 단원자 상태로 스퍼터링될 경우에는 상대적으로 Zn의 양이 O의 양에 비해 많을 것으로 판단된다. 또한 본 실험의 경우 산소의 유입이 없이 ZnO 박막을 증착할 경우 약 34nm/min의 증착속도를 가지는 반면 O₂/Ar=33%의 경우 약 22nm/min의 증착속도를 가지며, 전체적으로 산소비의 증가에 따라 증착속도는 감소함을 알 수 있었다. 그러므로 산소의 유입이 없을 경우 높은 증착속도에 의해서 기판에 도달한 스퍼터링된 입자들이 안정된 격자자리로 이동할 충분한 시간적 여유없이 이후에 스퍼터링된 입자들이 증착되므로 이러한 이유에서도 결정성이 산소를 유입시킨 경우에 비해서 악화되는 것으로 판단된다. 한편, 그 밖의 Ar/O₂ 비에서는 XRD의 결과상으로는 거의 모두 (002)로 배향성을 갖는 박막으로 성장되었으나 결정질 측면에서 보면 다른 것이 관찰되고 있다. 이것은 Fig. 5의 X-ray rocking curve의 σ 값으로 부터 확인할 수 있다. ZnO 압전 박막을 SAW 소자에 응용하기 위해서는 박막의 성장방향인 c 축이 기판의 수직 방향과 얼마나 잘 일치하고 있는지가 중요하며, 이를 확인하는 방법이 X-ray rocking curve의 표준편차 값(σ)이다. Rocking curve는 (002) 회절피크의 최대강도가 나오는 2 θ 점에 X-선 검출기를 위치시키고, 측정할 시편을 회전시켜서 정규분포의 회절강도를 얻는 방법으로서 이때 얻은 회절강도의 분포로부터 표준편차 값을 계산하여 형성된 박막에서의 c축이 기판에 수직한 배열정도를 나타내게 된다. 기판온도 100°C의 경우에는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 (002)의 σ 가 약 4-6° 정도의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 O₂/Ar 비가 증가할수록 σ 값이 감소하며 가스비 50/50 이상에서는 일정함을 알 수 있다. 그러나 기판온도 300°C의 경우에 증착한 박막은 50% 이상의 산소

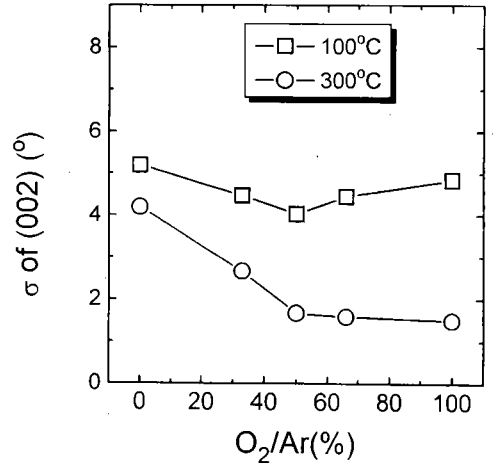


Fig. 5 Standard deviation of X-ray rocking curves of (002) ZnO thin films.

유입에 의해 σ 값이 2° 이하의 c축 배향성이 우수한 박막이 증착됨을 알 수 있다. 이는 여분의 산소유입에 의해 보다 화학양론적 조성에 가까운 ZnO 박막의 증착과 기판온도에 의한 결정성의 향상에 의한 복합적 결과로 판단된다. 이상의 결과로 부터 최적의 ZnO 박막의 증착 조건을 rf 전력 300W, 기판온도 300°C, Ar/O₂=50/50로 결정하였다.

다음에 상기 조건에서 증착된 2 μ m 두께의 ZnO 박막을 이용하여 ZnO/Al/Diamond/Si 구조의 SAW 소자를 제작하였다. Fig. 6은 ZnO/diamond/Si 구조의 XRD 패턴으로서 (002) 면으로 성장된 즉, c 축 배향성을 가진 ZnO 박막을 확인할 수 있다. 보고된 바에 의하면⁽¹⁾ 본 실험과 같이 다층 구조의 SAW 소자는 Al IDT(Interdigital Transducer)의 위치에 따라서 SAW 전단 특성이 많이 다른데, 본 실험에서는 diamond 기판의 효과를 최대화하기 위하여 ZnO 박막과 다이아몬드 박막 사이에 IDT가 위치하도록 하였다. 이렇게 함으로써 높은 Young's modulus를 갖는 다이아몬드 기판 위에서 탄성파가 높은 전단속도를 갖을 수 있도록 유도하였다.

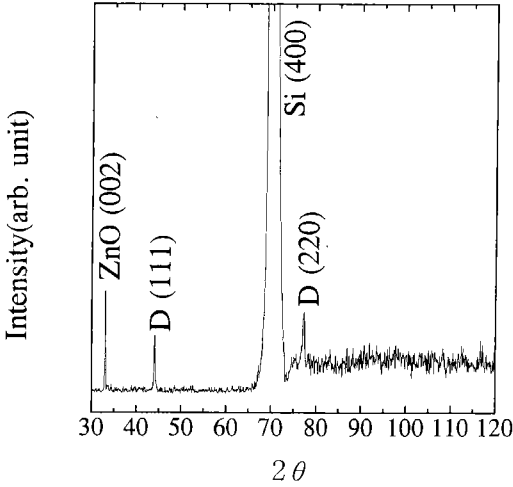


Fig. 6 XRD patterns of ZnO thin films deposited on diamond/Si substrate.

Fig. 7은 측정에 사용된 $\lambda(\text{파장})=24\mu\text{m}$ 의 마스크 패턴과 실제 건식 식각된 Al IDT를 보여주고 있다. Fig. 8은 simulation 결과와 측정치를

비교한 것으로 매우 잘 일치하고 있다. 측정된 중심주파수는 250MHz이고, 이로 부터 계산한 ZnO/diamond 구조의 전단 속도는 약 6000m/s이다. 이 값은 이론치와 거의 일치하고 있었으며, 유리기판 상에 증착된 ZnO 박막의⁽⁹⁾ 전단 속도인 2500m/s 보다 월등히 높은 값을 보여주고 있다. H. Nakahara⁽¹⁰⁾ 등의 이론식에 의하면 Schmidt's method⁽¹¹⁾를 사용하여 ZnO(001)/Diamond(001)[100]/Si(001)[100] 구조에서 레이리파의 위상속도를 KH1과 KH2의 함수로서 계산하였다. 여기서 H1는 ZnO 층의 두께, H2는 Diamond 층의 두께, $K=2\pi/\text{파장}$ ⁽¹²⁾이다. 그들의 결과에 의하면, KH2 값이 1.0, 2.0, 4.0 일때 계산된 위상속도는 kH1 의존성을 보이고 있으며 모든 경우에서 각각의 SAW mode마다 다른 속도를 나타내고 있다고 보고하고 있다. 또한 모든 파는 전통적 SAW 재료보다 더 높은 속도를 갖으며, 그들은 KH1과 KH2가 증가함에 따라 전단속도가 증가하고, 특히 KH2가 4이상

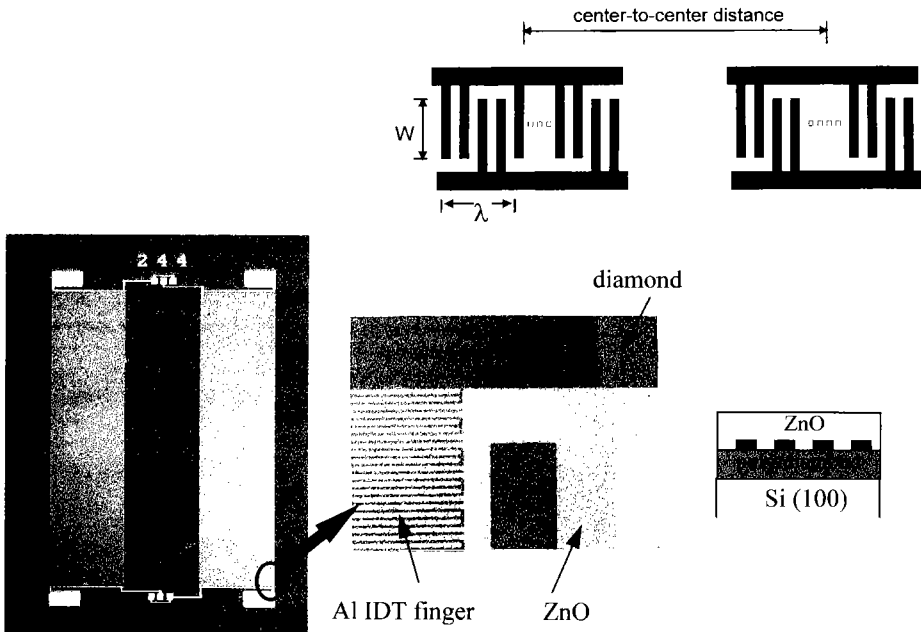


Fig. 7 Mask pattern and optical photograph of $\lambda=24\mu\text{m}$ IDT

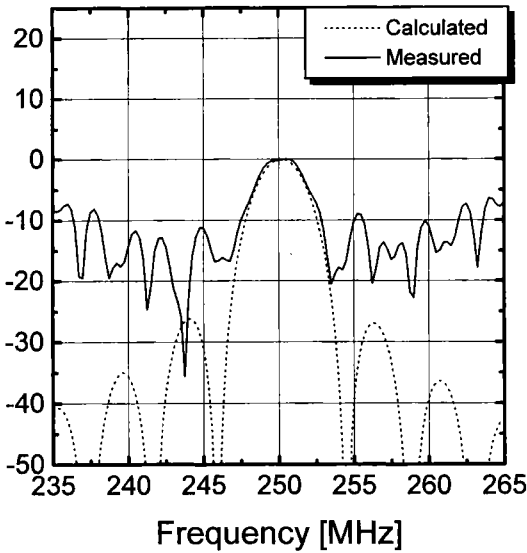


Fig. 8 Frequency response of ZnO/Al/Diamond/Si SAW device (measured & calculated)

일 때 포화된다. 이는 SAW 전파에 있어서 실리콘기판의 영향은 KH_2 가 4보다 클때 무시될 수 있고, 이 때 SAW 에너지는 ZnO와 다이아몬드층에 집중되고 이 다이아몬드층 두께에서 실리콘기판에 거의 도달하지 않기 때문이다. 본 실험의 경우 KH_2 는 약 1.5이고, KH_1 는 약 0.5이다. 이것을 전술한 KH_2 가 1.0, 2.0 인 경우의 이론적 계산과 비교해 보면, KH_1 가 0.5일때 계산된 0차 mode의 전단속도가 각각 약 5000m/s, 6200m/s이고, 이론식에 의하면 KH_2 의 증가에 따라서 V_p 의 속도가 증가하므로, 본 실험결과인 이 둘의 중간값인 $KH_2=1.5$ 인 경우의 계산값을 유추해보면 실험결과인 6000m/s와 거의 일치하고 있다고 볼 수있다. 그러나 본 실험결과에 의한 전단속도 6000m/s는 이상적인 ZnO/diamond 구조의 그것 보다는 큰 오차를 보이는데 이는 다이아몬드 박막의 두께가 얇아서 SAW의 에너지가 ZnO와 다이아몬드에 집중되지 못하고 Si 기판에 일부 손실이 일어났기 때문이다. 이론식에 의하면 10000m/s 정도의 속도가 나오기 위해서는 지름 4 inch 이상의 Si

기판위에 균질한 다이아몬드가 약 15 μ m 이상의 두께로 균일하게 코팅되어야 하는데 이는 현 단계에서 생산성이나 경제적 측면에서 볼 때 당장 실용화 되기는 어렵다고 보여진다.

결국 본 실험의 주파수 응답 특성은 0 차 mode 특성으로 볼 수 있으며, simulation 결과와 잘 일치하고 있고, 또한 전단속도도 이론적 계산값과 측정치가 거의 일치하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

ZnO 압전 박막을 rf 마그네트론 스퍼터법으로 diamond/Si 기판위에 증착하여 SAW의 전단 특성을 분석하였다. 실험결과는 주파수 응답 특성은 simulation 결과와 잘 일치하고 있으며, λ (파장)=24 μ m인 IDT를 이용하여 측정한 0차 mode SAW 전단속도는 약 6000m/s로서 이는 이론적 계산값과 일치하고 있다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 핵심전문지원사업에 의해 수행되었습니다.

(KOSEF 951--0803-004-1)

5. 인용문헌

- 1) Nakahata, A. Hachigo, S. Shikata and N. Fujimori, IEEE Ultrason. Symp. 377 (1993)
- 2) T. Hata, K. Toriya, J. Kawabata, M. Ozaki, Thin Solid Films, 108, 325 (1983)
- 3) M. D. Ambersely, C. W. Pitt, Thin Solid Films, 111, 167 (1984)
- 4) B. T. Khuri-Yakub, J. G. Smith, T. Barbee, J. Appl. Phys., 52, Jul., 4772 (1981)
- 5) C. X. Qiu, I. Shih, Solar Energy Materials, 13, 75 (1986)

- 6) C. T. Lee, Y. K. Su, H. M. Wang, Thin Solid Films, 150, 283 (1987)
- 7) J. B. Webb, D. F. Williams, and M. Buchanan, Appl. Phys. Lett., 39(8), 15, 640 (1981)
- 8) J. O. Barends, D. J. Leary, and A. G. Jordan, J. Electrochem., Soc., 7 1636 (1980).
- 9) Y. E. Lee, H. K. Yang, Y. J. Kim, J. I. Han, and H. J. Kim, Korean J. Mat. Res. vol. 4, No. 7, p783 (1994)
- 10) H. Nakahara, A. Hachigo, S. Shikata and N. Fujimori, 1992 Ultrason. Symp., p377 (1992)
- 11) R. V. Schmidt and F. W. Voltmer, IEEE. Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-17, No.11 p.920 (1969)
- 12) K. Yamanouchi, N. Sakurai, and T. Satoh, IEEE Ultrasonics Symposium, Proceedings p.351(1989)