

논문 2000-9-2-09

Li이 도핑된 ZnO 박막의 구조적 및 전기적 특성

유권규*, 권대혁**, 전춘배***, 김정규*, 박기철*

The Structural and Electrical Properties of Li doped ZnO Thin Films

Gyeon Gue You*, Dae Hyuk Kwon**, Choon Bae Jun***,

Jeong Gyoo Kim* and Ki Cheol Park*

요약

고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 Li이 도핑된 ZnO(ZnO:Li) 박막을 코닝 7059 글라스 기판상에 증착하였다. 도핑량은 스퍼터링용 ZnO타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량을 달리하여 조절하였다. 타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량에 따른 구조적 특성을 XRD, AFM 및 SEM으로 조사하였으며 기판온도, 고주파출력 및 O₂/Ar 가스비에 따른 Li이 도핑된 ZnO박막의 전기적 특성을 조사하였다. 타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량과 증착조건이 막의 구조적 및 전기적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. Li₂CO₃의 첨가량이 1wt%이하인 타겟으로 기판온도 200℃, O₂/Ar 가스비 100%, 고주파 출력 100W에서 스퍼터된 ZnO:Li 박막이 표면거칠기가 낮은 우수한 표면형상, 강한 c-축 우선배향성 및 10⁸Ωcm이상의 큰 비저항을 보였다.

Abstract

Lithium doped zinc oxide(ZnO:Li) films are prepared by rf magnetron sputtering on Corning 7059 glass substrate using specifically designed ZnO targets containing different amount of Li₂CO₃ powder as the Li doping source. The structural properties of the Li doped ZnO films are investigated by XRD, SEM and AFM. The electrical properties of the ZnO:Li films are measured for various deposition conditions, such as the substrate temperature, O₂/Ar gas ratio and rf power. The effects of the Li₂CO₃ content in target and the deposition conditions on the structural and electrical properties were studied. When ZnO:Li films were sputtered at the substrate temperature of 200℃, O₂/Ar gas ratio of 100% and rf power of 100W with a target containing less than 1wt% content of Li₂CO₃, showed good surface morphology, strong c-axis orientation and high resistivity of more than 10⁸Ωcm.

1. 서론

ZnO는 육방정계의 wurtzite 결정구조를 갖는 금속산

화물로 다양한 방법으로 박막의 제조가 용이할 뿐 아니라 제조변수의 조절을 통해 막의 특성을 쉽게 조절할 수 있다. ZnO 박막의 제조방법으로는 고주파 마그네트론 스퍼터링법¹¹⁻³¹, CVD법¹⁴, 이온빔 스퍼터링법¹⁵, 초음파 분무열분해법¹⁶ 등 다양한 방법들이 연구되고 있다. 이들 방법중에서 고주파 마그네트론 스퍼터링법은 제조변수의 조절을 통한 막특성의 변화가 용이할 뿐 아니라 저온공정에 막의 균질성도 우수한 대표적인 방법이다. 일반적으로 고주파 마그네트론 스퍼터링법

* 경상대학교 전기전자공학부 및 항공기부품기술연구센터(School of Electronic and Electrical Eng., the Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National Univ.)

** 경일대학교 전자공학과 (Dept. of Electronic Eng., Kyungil Univ.)

*** 연암공업대학 전자공학과(Dept. of Electronic Eng., Yonam College of Eng.)

<접수일자 : 2000년 1월 31일>

로 제조되는 ZnO 박막은 제조변수 조절과 불순물의 도핑을 통하여 조절된 특성에 따라 크게 세 분야에 응용된다. 첫째, 비화학적인 조성을 가지며 높은 전기전도도와 광투과도를 갖는 Al이나 Ga를 도핑한 ZnO 박막은 태양전지와 액정디스플레이 등의 투명도전막으로 응용된다^[7,9]. 둘째, In, Al, Pd 및 Ca 등을 가스반응의 촉매제로 도핑하여 수십 kΩ에서 수백 kΩ사이의 저항을 갖는 ZnO박막은 NH₃, CO, NO 등의 가스센서에 응용된다^[10,11]. 마지막으로 높은 비저항과 c-축으로의 큰 우선배향성을 갖는 ZnO 박막은 압전박막으로 UHF/VHF 영역의 신호처리소자나 대역통과필터용 압전박막으로 응용되고 있다^[12,14]. 본 연구에서는 수십 MHz에서 수백 MHz의 중간주파수영역에서의 SAW 필터의 압전박막으로서 요구되는 큰 c-축 우선배향성과 10⁹Ωcm 이상의 높은 비저항을 갖는 ZnO 박막을 얻기 위해 Li이 도핑된 ZnO 박막을 제조하고 기판온도, O₂/Ar 가스비 및 작업압력 등의 제조조건 변화에 따른 구조적 및 전기적 특성의 변화를 조사하여 SAW 필터로의 활용가능성을 알아보고자 하였다.

2. 실험 및 측정

ZnO 압전박막을 증착하기 위해 코닝 7059 글라스를 기판으로 사용하였다. 기판은 실리콘 표준세척공정으로 세척한 다음, 박막 증착전에 300℃로 미리 가열하여 기판표면의 습기를 제거하였다. 타겟은 순수한 ZnO 타겟과 Li₂CO₃를 0.5~5wt% 첨가하여 제작된 타겟을 사용하였다. ZnO 박막을 증착하기 위해 최대 고주파전력이 800W이며, 텅스텐 할로겐 램프를 사용하여 기판온도를 800℃까지 가열할 수 있는 고주파 마그네트론 스퍼터링 시스템을 사용하였다. 표 1은 제조된 타겟과 박막증착 시스템을 사용하여 순수한 ZnO 및 Li이 도핑된 ZnO(이하 ZnO:Li으로 표기)박막을 제조하기 위한 증착조건을 나타낸 것이다. 기판온도를 실온에서 400℃, 고주파 인가전력을 50~300W, O₂/Ar 가스비를 0~100%로 변화시켜 가며 박막을 제작하였다.

각각의 증착조건에 따라 제조된 박막의 두께는 알파스텝으로 측정하였으며, 제조된 박막의 결정성장방향, 결정성을 조사하기 위해 XRD 분석을, 표면거칠기, 결정의 크기, c-축 배향성을 조사하기 위해 AFM 분석 및 SEM 분석을 하였다. 일렉트로미터로 저항을 측정 후 저항의 기하학적 구조를 이용하여 박막의 비저항을 계산하였다.

표 1. ZnO 박막의 증착조건

Table 1. Deposition conditions of ZnO:Li thin films

Deposition parameters	Deposition conditions
Li ₂ CO ₃ content in a target	0~5 wt%
Working pressure	5~100 mTorr
Substrate temperature	0 °C ~ 400 °C
RF power	50~300 W
O ₂ /Ar gas ratio	0~100 %
Initial vacuum	5×10 ⁻⁶ Torr
Substrate-target distance	6 cm

3. 결과 및 고찰

그림 1과 그림 2는 각각 순수한 ZnO 박막과 타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량을 1wt%, 2 wt% 및 5 wt%로 변화시켜 제조된 ZnO:Li 박막의 x-선 회절 패턴의 변화와 반치폭(FWHM) 및 회절피크강도의 변화를 나타낸 것이다. 기판온도는 200℃, O₂/Ar 가스비는 100%, 작업압력은 10mtorr, 고주파전력은 100W로 하였으며 막 두께는 1μm정도로 하였다. Li 첨가량에 따른 x-선 회절피크강도는 1 wt% 첨가된 경우에는 순수한 ZnO 박막과 비슷하게 나타났으며, 2wt%의 Li₂CO₃가 첨가된 경우에는 회절피크강도는 크게 감소하였으나 반치폭에는 큰 변화가 없었다. 5wt%의 Li₂CO₃가 첨가된 경우에는 회절피크강도와 반치폭이 함께 급격히 감소하였다.

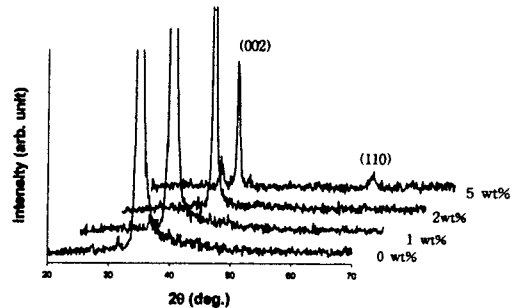


그림 1. 타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량에 따른 ZnO:Li 박막의 x-선회절패턴

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of ZnO:Li films prepared at various Li₂CO₃ contents in target.

Li₂CO₃의 첨가량이 2 wt%까지는 순수한 ZnO 박막과 동일하게 주로 (002)면으로 성장되었으나 5 wt%가 첨가된 첨가된 경우에는 (002)면으로의 회절피크 외에 (110) 방향의 또 다른 회절피크가 나타나는 것으로 관찰되었다. 불순물은 ZnO 투명도전막의 응용에서 비저항의 감소를 위해 흔히 도핑되며 대표적인 불순물로 Al^[15]과 Ga^[16]을 들 수 있으며, 이들의 도핑에서도 도핑 농도가 증가함에 따라 (002)면으로의 성장이 저하되는 것으로 보고되어 있다.

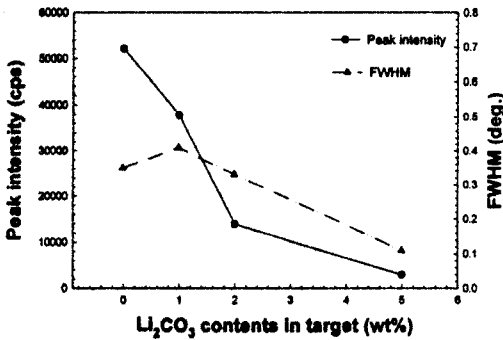


그림 2. 타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량에 따른 ZnO:Li 박막의 반치폭과 회절피크강도

Fig. 2. FWHM and peak intensity values of ZnO:Li films prepared at various Li₂CO₃ contents in target.

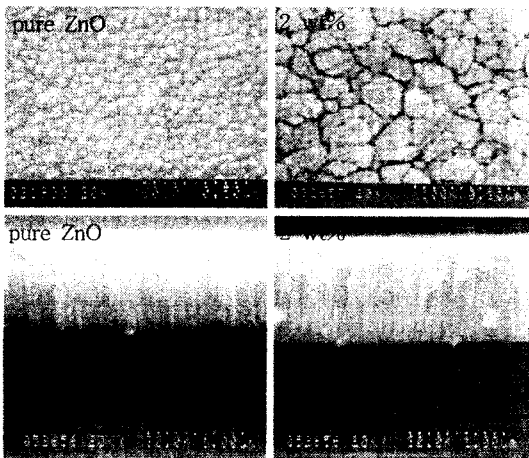


그림 3. 타겟내의 Li₂CO₃의 첨가량에 따른 ZnO:Li 박막의 표면 및 단면 SEM 사진

Fig. 3. SEM surface and cross-section micrographs of the ZnO:Li films prepared at various Li₂CO₃ contents in target .

그림 3은 기판온도 200℃, O₂/Ar 가스비가 100%, 작업압력이 10 mtorr, 고주파 인가전력을 100 W 인가하였을 때, 순수한 ZnO 박막 및 Li₂CO₃의 첨가량에 따른 ZnO:Li 박막의 표면 및 단면사진을 나타낸 것으로 박막의 두께는 1μm 정도로 하였다. 순수한 ZnO 박막과 Li₂CO₃의 첨가량 1 wt%인 경우의 ZnO:Li 박막의 표면 및 단면사진은 구별하기 어려울 정도로 유사하나 Li₂CO₃의 첨가량이 2 wt%인 ZnO:Li 박막의 경우 표면 입자가 커지면서 입도가 균질하지 못하고 표면거칠기가 증가하였으나 주상구조로 기판에 수직으로 성장하였다.

그림 4는 그림 3과 같은 조건으로 증착된 ZnO:Li 박막의 표면거칠기를 확인하기 위해 AFM 분석을 행한 것이다. 순수한 ZnO 박막 및 Li₂CO₃의 첨가량이 2wt% 및 5wt%인 ZnO:Li 박막의 평균거칠기(average roughness)값은 각각 49Å, 58Å 및 86Å 으로 나타났다. 순수한 ZnO 박막에 비해 Li₂CO₃의 첨가량이 2wt% 및 5wt%인 경우 표면거칠기가 크게 증가하는데 이는 그림 1과 그림 2에서의 Li의 도핑량이 증가함에 따른 기판에 (002)면으로의 성장(c-축으로의 우선배향성)이 크게 저하되는 XRD의 분석결과와도 잘 일치한다. 이처럼 Li₂CO₃의 첨가량이 2wt% 및 5wt%인 경우에 표면거칠기가 증가하는 것은 과잉의 Li 도핑이 (002)면으로의 성장을 저해하기 때문으로 보인다.

이상에서 소량의 Li 도핑은 표면거칠기와 (002)면으로의 성장에 영향을 주지 않으나 다량의 Li의 도핑은 표면거칠기를 증가시키고 (002)면으로의 성장을 방해하여 표면탄성과 필터의 성능을 저하시킬 것으로 판단된다. SAW 필터가 좋은 전달특성을 갖기 위해서는 압전체가 우수한 구조적 특성과 함께 높은 비저항을 가져야 한다.

그림 5는 순수한 ZnO 박막과 Li₂CO₃의 첨가량이 0.5~5 wt% 첨가된 타겟으로 증착된 ZnO:Li 박막의 기판온도에 따른 비저항 변화를 나타낸 것이다. 증착조건은 기판온도가 200℃, O₂/Ar 가스비가 100%, 작업압력이 10 mtorr, 고주파 인가전력이 100 W였으며 막두께는 1μm로 하였다. 순수한 ZnO 박막의 경우 비저항이 10⁷Ωcm 정도로 나타났으며, Li₂CO₃의 첨가량이 0.5 wt% 및 1 wt% 첨가된 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막은 이보다 10배 이상 높은 2×10⁸Ωcm 정도로 나타났다. 이는 일반적인 압전체로 사용되는 압전박막의 비저항이 10⁶Ωcm인 것에 비해 상대적으로 매우 높은 것이

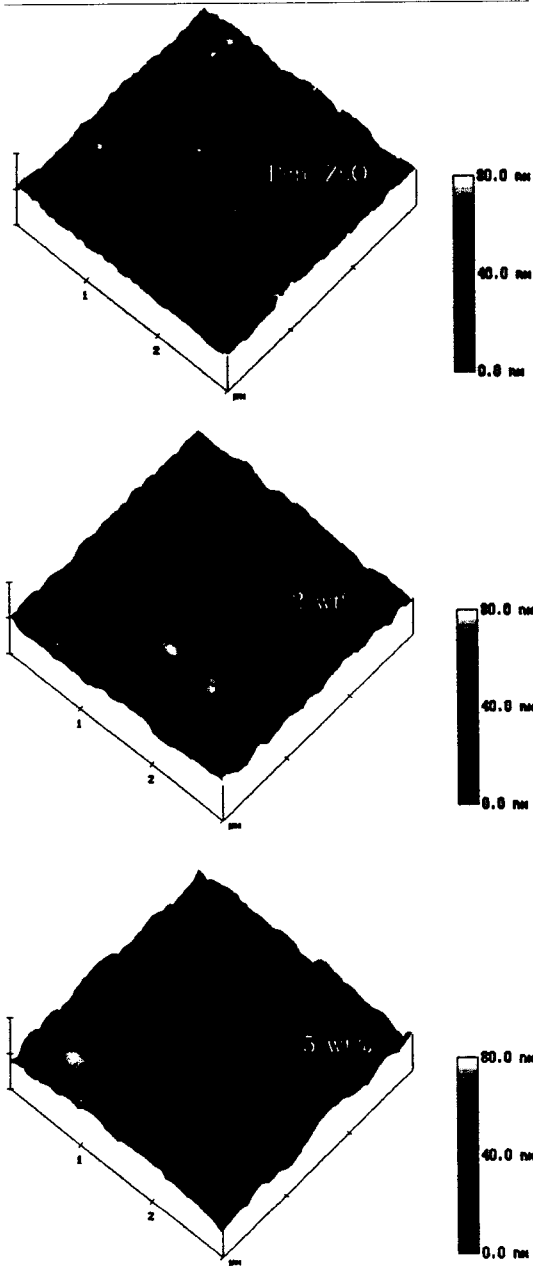


그림 4. 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에 따른 ZnO:Li 박막의 AFM 사진

Fig. 4. AFM images of the ZnO:Li films prepared at various Li_2CO_3 contents in target.

다. 하지만 Li_2CO_3 의 첨가량이 2 wt%인 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막은 비저항이 순수한 ZnO 박막과 비슷하였으며, Li_2CO_3 의 첨가량이 5 wt%인 타겟으로 제조된 ZnO 박막은 순수한 ZnO 박막의 비저항보다 오히

려 10배 정도 감소하여 $10^6 \Omega\text{cm}$ 로 나타났다. 일반적으로 ZnO 박막은 n형 반도체 금속산화물 박막으로 Zn 과잉이나 O 공공이 도너의 역할을 한다. 이들에 의한 자유전자가 전기전도에 기여하게 된다. 하지만 미량의 Li이 도핑된 ZnO 박막에서는 Zn 대신에 I족의 Li이 치환되어 억셉터로 기여하게 되고 자유전자가 감소하게 되므로 비저항이 증가하는 것으로 판단된다. 반면에 Li_2CO_3 의 첨가량이 2wt%이상인 타겟으로 제조된 다량의 Li이 도핑된 ZnO:Li 박막의 경우 오히려 비저항이 감소하는데 이는 Zn 자리를 대체하고 남은 과잉의 Li이 도너역할을 하여 박막의 비저항이 감소하는 것으로 판단된다. Mitsuyu 등^[17]은 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에 따른 비저항의 변화를 측정 한 바 있다. Li_2CO_3 의 첨가량이 증가함에 따라 비저항이 증가하고 특정 첨가량 이상에서는 비저항이 감소하여 그림 5와 비슷한 변화형을 나타내는 결과를 보고하였다. 이와 함께 Li을 도핑하여 비저항을 증가시킴으로써 표면탄성과 필터의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 보고하였다.

한편 Li의 도핑량에 무관하게 기판온도에 따른 비저항의 큰 변화는 관찰되지 않았으나 Li_2CO_3 의 첨가량이 5 wt%인 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막은 기판온도가 증가함에 따라 미소하게나마 비저항이 증가하였다.

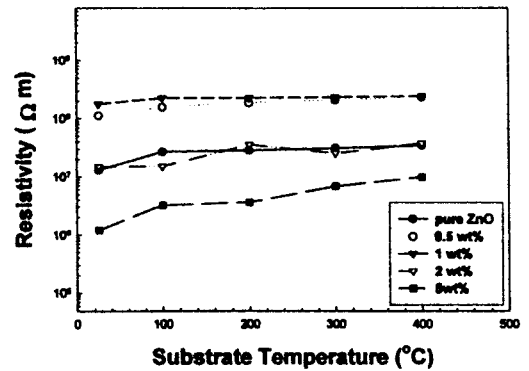


그림 5. 여러 가지 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에서의 기판온도에 따른 ZnO:Li 박막의 비저항변화

Fig. 5. Variation of the resistivity of ZnO:Li films as a function of the substrate temperature at various Li_2CO_3 contents in target.

그림 6은 순수한 ZnO 박막 및 Li_2CO_3 의 첨가량이 0.5wt%, 1wt% 및 2wt%인 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막의 O_2/Ar 가스비에 따른 비저항 변화를 나타낸 것이다. 증착조건은 기판온도가 200°C , 작업압력이 10

mtorr, 고주파 인가전력이 100 W였다. 가스비에 따른 비저항 변화는 Li의 도핑량과 무관하게 순수한 Ar만을 분위기 가스로 주입하였을 경우보다 산소만을 주입했을 때 100배이상 높은 $2 \times 10^8 \Omega \text{cm}$ 정도의 비저항을 나타내었다. 또한 챔버중의 O_2/Ar 가스비가 40% 이상일 경우에는 비저항의 변화가 거의 없었다. O_2/Ar 가스비가 50%이하에서 산소의 양이 증가함에 따라 비저항이 증가하는 것은 막내에 존재하는 과잉의 Zn와 산화반응으로 ZnO 박막은 화학량론적 조성에 가깝게 되기 때문이다^[18]. 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에 따른 비저항 변화는 O_2/Ar 가스비가 50%에서 0.5 wt% 및 1 wt% 인 경우에는 순수한 ZnO박막에 비해 10배정도 높게, 2 wt% 인 경우에는 순수한 ZnO막과 비슷한 값을 나타내었다.

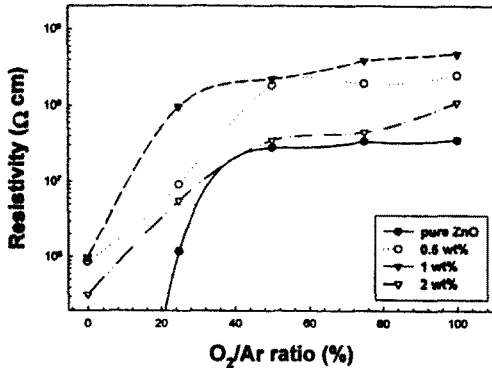


그림 6. 여러 가지 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에서의 O_2/Ar 가스비에 따른 ZnO:Li 박막의 비저항변화
Fig. 6. Variation of the resistivity of ZnO:Li films as a function of the O_2/Ar gas ratio at various Li_2CO_3 contents in target.

그림 7은 기판온도 200°C , O_2/Ar 가스비 100%, 작업압력 10 mtorr에서 고주파전력을 50W에서 300W로 변화시키면서 증착한 순수한 ZnO 박막 및 Li_2CO_3 의 첨가량이 0.5 wt%, 1wt% 및 2 wt%인 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막의 비저항 변화를 나타낸 것이다. 고주파전력이 증가할수록 비저항은 감소하는 것으로 나타났으며, 순수한 ZnO 박막의 경우에는 50 W에서 증착된 박막의 비저항이 300 W에서 증착된 박막보다 10배 정도 높게 나타났다. 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에 따른 비저항 변화는 고주파 출력에 무관하게 0.5 wt% 및 1 wt% 인 경우에는 순수한 ZnO박막에 비해 10배 정도 높게, 2 wt% 인 경우에는 순수한 ZnO막과 비슷한 값을 나타내었다.

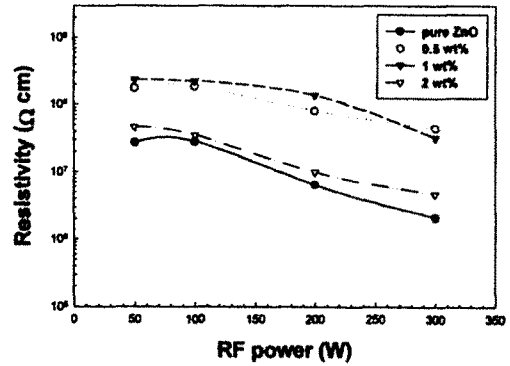


그림 7. 여러 가지 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량에서의 고주파전력에 따른 ZnO:Li 박막의 비저항변화
Fig. 7. Variation of the resistivity of ZnO:Li films as a function of the rf power at various Li_2CO_3 contents in target.

이상에서 SAW 필터용 ZnO박막은 (002)면으로의 성장(c-축의 우선배향성)과 비저항을 고려할 때 타겟내의 Li_2CO_3 의 첨가량은 1 wt%이하, 기판온도는 200°C 정도, O_2/Ar 가스비는 50%이상, 고주파출력은 100 W이하로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

고주파 마그네트론 스퍼터링법으로 SAW 필터에 적합한 압전박막을 제조하기 위해 순수한 ZnO 박막 및 Li_2CO_3 의 첨가량이 0.5 wt%, 1 wt%, 2 wt% 및 5 wt%인 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막을 코닝 7059 글라스 위에 여러가지 증착조건에 따라 제조하고 구조적 및 전기적 특성을 조사하였다.

SAW 필터용 압전박막으로 적합한 비저항이 높고, 표면이 균질하며, c-축 우선배향성이 우수한 ZnO 박막을 제조하기 위한 최적 증착조건은 기판온도 200°C , O_2/Ar 가스비 100%, 작업압력 10 mtorr, 고주파 인가전력 100 W였다. 최적 증착조건하에서 Li_2CO_3 의 첨가량이 0.5 wt% 및 1 wt%로 소량 첨가된 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막의 경우 (002)면으로의 우수한 성장성과 순수한 ZnO 박막보다 10배 이상 높은 $2 \times 10^8 \Omega \text{cm}$ 정도의 비저항을 가졌으며, 표면거칠기는 순수한 ZnO 박막과 비슷하였다. 반면에 Li_2CO_3 의 첨가량이 2 wt% 및 5wt%인 타겟으로 제조된 박막의 표면거칠기는 증

가하였으며, 특히 5wt%의 경우 ZnO 박막의 (002)면으로의 성장외에 (110)면으로의 성장도 관찰되었다. 2 wt%의 Li_2CO_3 가 첨가된 타겟으로 제조된 ZnO:Li 박막의 비저항은 감소하여 순수한 ZnO 박막과 비슷하게 나타났으나, 5 wt%의 순수한 ZnO 박막보다 10배 정도 감소한 $10^6 \Omega \text{cm}$ 로 나타났다. 따라서 소량의 Li 첨가는 비저항의 증가로 인해 표면탄성과 필터용 ZnO 압전박막의 특성을 향상시킬 수 있으나 다량의 Li를 첨가할 경우 비저항의 감소 및 표면 평탄성을 나쁘게 하여 ZnO 압전박막의 특성을 오히려 감소시킬 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] T. Yamamoto, T. Shiosaki and A. Kawabata, "Characterization of ZnO piezoelectric films prepared by rf planar magnetron sputtering", J. Appl. Phys., vol 51, no 6, pp 3113-3120, 1980.
- [2] C. R. Aita, A. J. Purdes, R. J. Lad and P. D. Funkenbusch. "the effect of O_2 on reactively sputtered zinc oxide", J. Appl. Phys., vol 51, no 10, pp 5533-5536, 1980.
- [3] S. B. Krupanidhi and M. Sayer, "Position and pressure effects in rf magnetron reactive sputter deposition of piezoelectric zinc oxide", J. Appl. Phys., vol 56, no 11, pp 3308-3318, 1984.
- [4] T. Shiosaki, S. Ohnishi and A. Kawabata, "Optical properties of single crystalline ZnO film smoothly chemical vapor deposited on intermediately sputtered thin ZnO film on sapphire", J. Appl. Phys., vol 50, no 5, pp 3113-3117, 1979.
- [5] F. Quaranta "Dual-ion beam sputter deposition of ZnO films", J. Appl. Phys., vol 74 pp 244-248, 1993.
- [6] M. Labeau, P. Rey, J. L. Deshanvres, J. C. Joubert and G. Delabouglise, "Thin films of high-resistivity zinc oxide produced by a modified CVD method", Thin solid Films, vol. 213, pp. 94-99, 1992.
- [7] B. T. Khuri-Yakub, G. S.Kino and P. Galle, "Study of the optimum conditions for growth of rf sputtered ZnO films", J. Appl. phys., vol 46, pp 3266-3272, 1975.
- [8] W. Tang and D. C. Cameron, "Aluminum doped Zinc Oxide transparent conductors deposited by the sol-gel process", Thin solid films, vol 238, pp 83-87, 1994.
- [9] K. Tominaga, N. Umezu and I. Mori et. al, "Properties of ZnO:In film prepared by sputtering of facing ZnO:In and Zn target", J. Vac. Sci. Technol A, vol 16, no 3, pp 1213-1217, 1998.
- [10] G. Sberveglieri, S. Groppelli, P. Nelli, A. Tinelli and G. Guinta, "A novel method for the preparation of NH_3 sensors based on ZnO-In thin films," Sensors and Actuators B, 24-25, pp. 588-590, 1995.
- [11] E. Traversa, A. Bearzott and M. Miyayama, "Influence of the Electrode materials on the electrical response of ZnO based contact", J. of the European Ceramic Society, vol 18, pp 621-631, 1998.
- [12] M. Hikita et al, "Recent and future RF SAW technology for mobile communications", IEEE. MTT-S Digest, TU3C-3, pp 173-176, 1997.
- [13] K. Higaki et al, "High frequency SAW filter on diamond", IEEE. MTT-S Digest, WE3F-20, pp 829-832, 1997.
- [14] T. Shiosak et al, "High coupling and high velocity SAW using ZnO and AlN films on a glass substrate", IEEE Trans. Sonics ultra, vol SF3C-33, no 3, pp 324-330, 1986.
- [15] Ki Cheol Park, Dae Young Ma and Kun Ho Kim, "Structural, electrical and optical properties of aluminium doped zinc oxide films prepared by radio frequency magnetron sputtering," J. Appl. Phys., vol 81, no 12, pp. 7764-7772, 1997.
- [16] Jianhua Hu and Roy G. Gordon, "Atmospheric pressure chemical vapor deposition of gallium doped zinc oxide thin film from diethyl zinc,

- water and triethyl gallium," J. Appl. Phys., vol 72, no 11, pp. 5381-5392, 1992.
- [17] T. Mitsuyu, S. Ono and K. Wasa, " Structures and SAW properties of rf sputtered single crystal films of ZnO on sapphire", J. Appl. Phys., vol 51, no 5, pp 2464-2470, 1980.
- [18] N. Croitoru, A. Seidmann and K. Yassin, Thin solid films, vol 150, pp 291-302, 1987.

著 者 紹 介

유 권 규

『센서학회지 제8권 2호』 논문 99-8-2-14 참조
현재 연암공업대학 조교

김 정 규

『센서학회지 제8권 6호』 논문 99-8-6-05 참조
현재 경상대학교 부교수

권 대 혁

『센서학회지 제7권 3호』 논문 98-7-3-1 참조
현재 경일대학교 부교수

박 기 철

『센서학회지 제8권 2호』 논문 99-8-2-14 참조
현재 경상대학교 교수

전 춘 배

『센서학회지 제8권 3호』 논문 99-8-3-10 참조
현재 연암공업대학 부교수