

## 퇴적 온도와 열처리에 따른 SiC에 퇴적된 Ga 도핑된 ZnO의 구조 및 전기적 특성

이정호<sup>1</sup>, 구상모<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 광운대학교 전자재료공학과

### Deposition Temperature and Annealing Temperature Dependent Structural and Electrical Properties of Ga-doped ZnO on SiC

Jung-Ho Lee<sup>1</sup> and Sang-Mo Koo<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronics and Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 133-000, Korea

(Received January 6, 2012; Revised January 17, 2012; Accepted January 24, 2012)

**Abstract:** The characteristics of Ga-doped zinc oxide (GZO) thin films deposited at different deposition temperatures (TS ~ 250 to 550°C) on 4H-SiC have been investigated. Structural and electrical properties of GZO thin film on n-type 4H-SiC(0001) were investigated by using x-ray diffraction(XRD), atomic force microscopy(AFM), Hall effect measurement, barrier height from I-V curve and Auger electron spectroscopy(AES). XRD 2  $\theta$  scan shows GZO thin film has preferential orientation with c-axis perpendicular to SiC substrate surface. The lowest resistivity ( $\sim 1.9 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ) was observed for the GZO thin film deposited at 400°C. As deposition temperature increases, barrier height between GZO and SiC was increased. Whereas, resistivity of GZO thin films as well as barrier height between GZO and SiC were increased after annealing process in air atmosphere. It has been found that the c-axis oriented crystalline quality as well as the relative amount of activated Ga<sup>3+</sup> ions and oxygen vacancy may affect the electrical properties of GZO films on SiC.

**Keywords:** PLD, GZO, SiC

#### 1. 서 론

투명 전도성 산화물 (transparent conductive oxide)은 LED (light emitting diode), solar cells, LCD (liquid crystal display), 그리고 평판 디스플레이에 적용 가능함에 따라 주목을 받고 있다. 그러나 대부분의 투명 전도성 산화물의 연구는 ITO (indium tin oxide)를 기반으로 진행이 되어왔다. 하지만 인듐의 높은 가격과 제한된 자원의 양에 비추어 볼 때 낮

은 가격, 높은 전도성, 그리고 투명한 TCO (transparent conductive oxide)의 연구가 필요하다 [1,2].

고 에너지 갭 반도체인 실리콘 카바이드 (SiC)는 poly형에 따라 약 3~3.26 eV의 밴드갭을 가지고 있다. 이러한 고 에너지갭으로 인해 자외선 수광 소자로써 적합하다. 이러한 수광 소자를 위해 표면의 텍스처링과 투명전극이 요구된다 [3]. 따라서 본 연구에서는 4H-SiC 기반 수광 소자에 응용 가능한 Ga 도핑된 ZnO (GZO)의 퇴적온도와 열 처리에 따른 구조적, 전기적 특성을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

N형 4H-SiC ( $\rho \sim 0.019 \Omega\text{cm}$ ) 웨이퍼를 세척 하였다. Ni를 4H-SiC 뒷면에 퇴적하고 RTA (rapid thermal annealing, Newyoung Inc.)를 이용하여 오믹 콘택을 형성하였다. PLD (pulsed laser deposition) 챔버 내에 2% Ga 도핑된 ZnO 세라믹 타겟과 4H-SiC을 장착 후 GZO 박막을 각각 250, 400, 그리고 550°C에서 퇴적하였다. 355 nm의 파장, 10 Hz의 주파수, 240  $\mu\text{s}$ 의 delay time의 레이저를 사용하여 10분 간 GZO 박막을 퇴적하였다. 20 mTorr의 산소 분위기와 600°C 열처리를 하여 열처리 전 후의 GZO/SiC의 특성을 분석하였다.

GZO 박막의 구조적 특성 분석을 위해 XRD (PANalytical Inc.) 2  $\theta$  패턴을 측정하였다. GZO 박막의 전기적 특성은 상온에서 Van der Pauw Hall 방법으로 상온에서 측정을 하였다. 비저항이 높은 에피층 ( $\rho \sim 0.98 \Omega\text{cm}$ )을 가지는 n형 4H-SiC를 사용하여 GZO 박막 내에서 전류가 수평으로 흐르게 유도하였다. GZO의 표면 분석은 AFM (atomic force microscopy, Bruker AXS Inc.)을 이용하였다. GZO/SiC의 장벽전위 (barrier height,  $\Phi_b$ )를 구하기 위해 식 1을 사용하였다.

$$\Phi_b = -\frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{J_s}{A^* T^2}\right) \quad (1)$$

$A^*$ 는 Richardson 상수 ( $\text{SiC} \sim 146 \text{ Acm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ),  $J_s$ 는 전압이 0일 때의 전류밀도이다.

GZO 박막의 성분 분석 및 GZO/SiC의 계면 분석을 위해 AES (auger electron spectroscopy, Ulvac-Phi)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 GZO/SiC의 XRD 2  $\theta$  패턴을 나타낸다. 34.4°와 36.6° 픽은 각각 GZO (0002)와 SiC (0004)를 나타낸다. GZO는 표면 에너지 최소화를 위해 SiC의 수직 방향으로 c-축 성장하였음을 알 수 있다 [4]. 퇴적온도가 250°C에서 400°C로 증가할 때 피크의 강도는 증가하였으며 퇴적온도가 400°C에서 550°C로 증가할 때 피크의 강도는 감소하였다. 이는 퇴적온도가 400°C까지는 GZO의 결정배향성이 향상되고 퇴적온도가 550°C까지는 GZO의 결정배향성이 감소됨을 나타낸다.

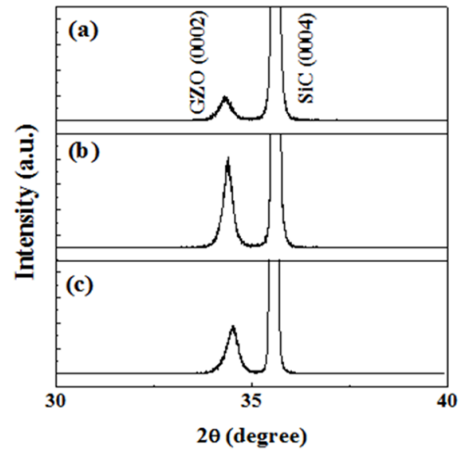


Fig. 1. XRD  $\theta$ -2  $\theta$  patterns of GZO thin film on SiC structure. GZO thin films were deposited at deposition temperatures of (a) 250°C, (b) 400°C, and (c) 550°C, respectively, by a PLD.

그림 2는 퇴적온도와 산소 분위기의 열처리에 따른 GZO 박막의 Hall 측정 결과를 나타낸다. 캐리어 농도는 산소공격자점 (oxygen vacancy)와  $\text{Zn}^{2+}$  자리에 치환된  $\text{Ga}^{3+}$  이온들에 의하여 결정되어진다 [5]. 퇴적온도가 250°C에서 400°C로 증가할 때 GZO 박막의 캐리어 농도는 증가하였고 퇴적온도가 400°C에서 550°C로 증가할 때 GZO 박막의 캐리어 농도는 감소하였다.

이는 퇴적 온도가 250°C에서 400°C로 증가할 때 산소공격자점과 활성화된  $\text{Ga}^{3+}$  이온의 증가를 나타내고, 퇴적 온도가 400°C에서 550°C로 증가할 때 GZO 표면에 흡착된 산소 이온에 의해 산소공격자점이 감소하였음을 나타낸다. 또한  $\text{O}_2$  분위기에서 열처리 후 캐리어 농도는 감소하였다. 이 또한 흡착된 산소 이온에 기인한 결과로 추정된다. 이동도는 입계산란 (grain boundary scattering)에 영향을 받는다. 결정립 (grain)의 크기가 커지면 결정립계 (grain boundary)의 양은 감소하게 되고 이에 따라 입계산란은 감소하게 된다. 결정립 크기의 분석은 그림 3에서 GZO 박막 표면의 AFM 이미지를 통하여 이루어졌다. 퇴적 온도가 250°C에서 400°C로 증가할 때 결정립 크기가 증가하였고 이는 입계산란의 감소에 따른 이동도 증가를 나타낸다 [6].

반면에 퇴적온도가 400°C에서 550°C 증가할 때 결정립 크기가 감소하였고 이는 입계산란의 증가에 따른 이동도 감소를 나타낸다.

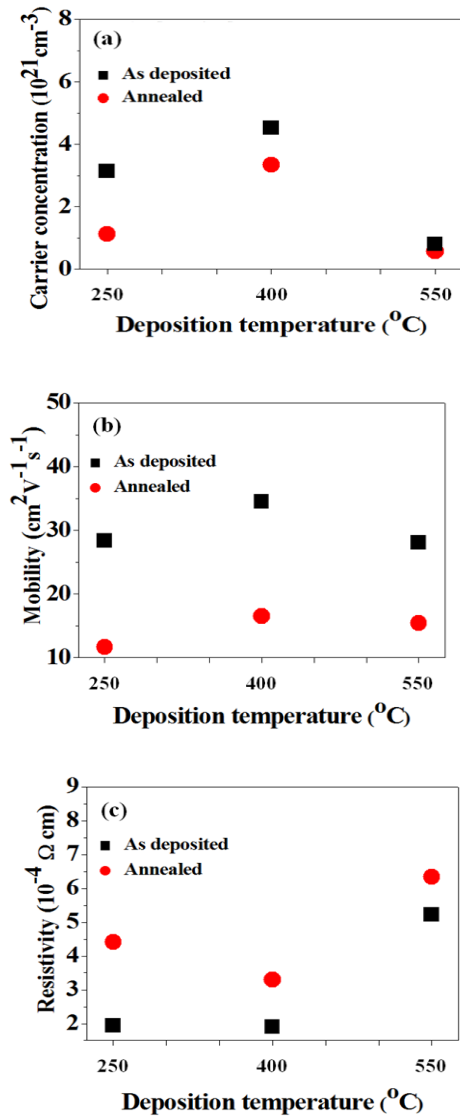


Fig. 2. Hall effect measurement data showing mobility, resistivity, and carrier concentration of GZO thin films on 4H-SiC as a function of the deposition temperature.

또한 열처리 후 결정립의 크기가 감소하였고 이는 입계산란의 증가에 따른 이동도 감소를 나타낸다. 홀 측정 결과 400°C에서 퇴적된 GZO의 높은 캐리어 농도 ( $4.51 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ )와 이동도 ( $34.4 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )에 의한 낮은 비저항 ( $1.9 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \text{ cm}$ )이 관찰되었다. 그림 4는 GZO와 SiC의 장벽전위를 나타낸다. 퇴적 온도가 증가함에 따라 장벽전위는 증가하였고, 산소분위기에서의 열처리 후 장벽전위가 증가하였다. 400°C에서 퇴적이 된 GZO 박막의 비저항이 가장 낮은 퇴적온도에

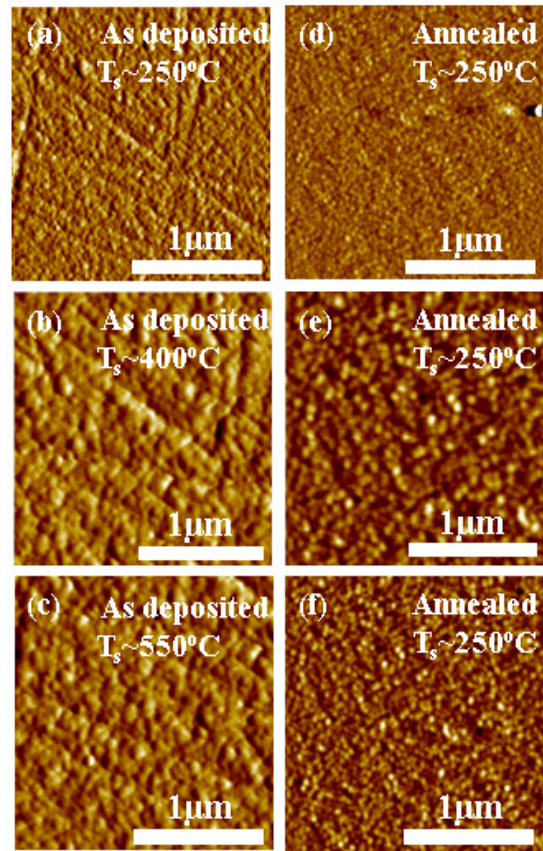


Fig. 3. AFM images for GZO deposited on SiC at substrate temperatures of (a) 250, (b) 400, and (c) 550°C, respectively. (d), (e), and (f) are AFM images of post annealing in 20 mTorr of air atmosphere for (a), (b), and (c), respectively.

따른 GZO 박막의 비저항 결과와 상응하지 않는다.

GZO/SiC의 전기적 특성 분석을 위하여 GZO 박막의 AES 측정을 하였다. 그림 5는 GZO 박막의 퇴적온도와 열처리에 따른 AES 측정 결과를 나타낸다. 퇴적온도가 250°C에서 400°C로 증가할 때 GZO 박막 내의 Ga의 비율이 증가하였고, O의 비율이 감소하였다. 이는  $\text{Zn}^{2+}$  자리에 치환된  $\text{Ga}^{3+}$  이온 양의 증가와 산소공격자점 비율의 증가를 나타낸다. 퇴적온도가 400°C에서 550°C 증가할 때 GZO 박막 내의 Ga의 비율은 감소하였고 산소의 비율은 증가하였다. 이는 산소공격자점 비율의 감소를 나타낸다.

또한 산소 분위기에서 열처리 후 GZO 박막 내의 O의 비율은 증가 하였다. 이는 흡착된 산소 이온들에 의한 것으로 해석된다.

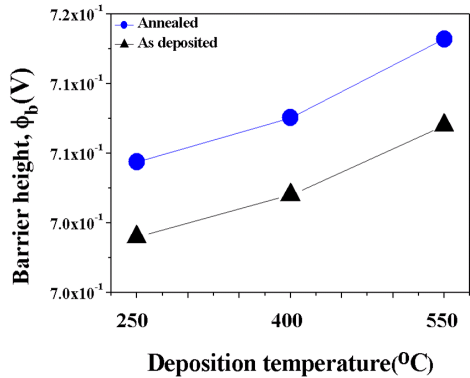


Fig. 4. Deposition temperature and annealing dependent various barrier heights for GZO/SiC are shown.

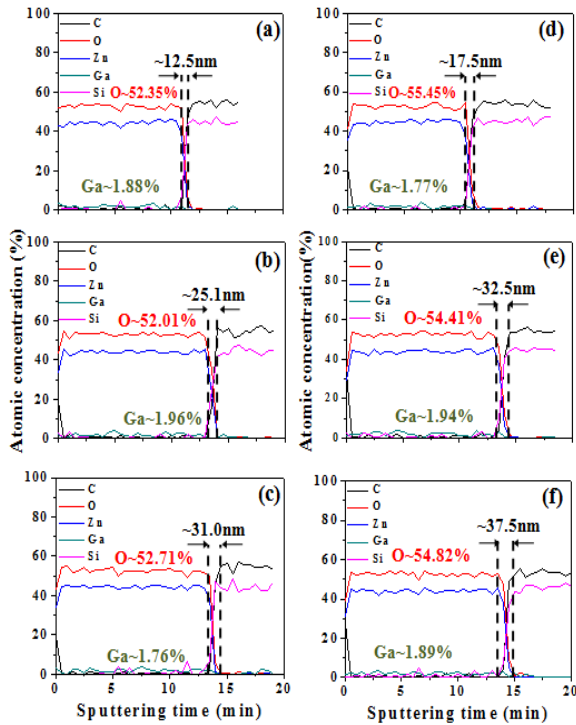


Fig. 5. Relative element profiles of Ga, Zn, O, Si, and C in GZO thin films on SiC deposited at (a) 250°C, (b) 400°C, and (c) 550°C, and relative amount of Ga, Zn, O, Si, and C for annealed GZO thin films deposited at (a) 250°C, (b) 400°C, and (c) 550°C.

또한 GZO/SiC 계면의 반절연층 (semi-insulating layer)의 두께는 퇴적온도가 증가할수록 그리고 산소 분위기에서 열처리 후 증가하였다. 두꺼운 반절연층은 GZO/SiC 계면의 장벽전위를 증가시킨 요인으로 추론된다.

#### 4. 결론

2% Ga 도핑된 ZnO 세라믹 타겟을 사용하여 GZO 박막을 n형 SiC에 퇴적하였다. 퇴적온도가 400°C일 때 박막의 비저항 ( $1.9 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ )이 낮게 측정이 되었다. 산소 분위기에서 열처리 후에는 열처리 전 보다 비저항 값이 낮게 측정되었다.

퇴적온도가 증가함에 따라 그리고 산소분위기에서 열처리 후 GZO/SiC의 장벽전위가 증가하였다.

AES 측정 결과 퇴적온도가 400°C일 때 Ga의 함유량이 높았고 O의 함유량이 낮았다. 산소분위기에서 열처리 후 GZO 박막의 O의 함유량이 증가하였다. 퇴적온도가 증가함에 따라 그리고 산소 분위기에서 열처리 후 GZO/SiC 계면의 반절연층의 폭이 증가하였다. 고에너지 밴드갭의 특성으로 인하여 자외선 수광소자로 응용 가능한 있는 SiC의 투명전극으로써 GZO가 응용이 가능하다.

#### 감사의 글

본 연구는 2012년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원 (2012-0017942) 및 광운대학교의 지원을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

#### REFERENCES

- [1] V. Bhoslea, J. T. Prater, Fan Yang and D. Burk, S. R. Forrest, and J. Narayan, *J. Appl. Phys.*, **102**, 023501 (2007).
- [2] L. J. Mandalapu, F. X. Xiu, Z. Yang, D. T. Zhao, and J. L. Liu, *J. Appl. Phys.*, **88**, 112108 (2006).
- [3] M. S. Kang, S. J. Joo, W. Bahng, J. H. Lee, N. K. Kim, and S. M. Koo *Nano. Res. Lett.*, **6**, 236 (2011).
- [4] J. H. Kim, D. H. Cho, W. Lee, B. M. Moon, W. Bahng, S. C. Kim, N. K. Kim, and S. M. Koo, *J. Al. Com.*, **489**, 179 (2010).
- [5] V. Bhoslea, A. Tiwari, and J. Narayan, *J. Appl. Phys.*, **88**, 032106 (2006).
- [6] J. Zhao, X. W. Sun, and S. T. Tan, *IEEE Trans. Elec. Dev.*, **56**, 12 (2009).