

논문 20-11-2

O₂/Ar 혼합 유량비를 변수로 갖는 라디오파 마그네트론 스퍼터링으로 성장된 ZnO 박막의 특성

Properties of ZnO Thin Films Grown by Radio-frequency Magnetron Sputtering in terms of O₂/Ar Mixture Flow Ratio

조신호^{1,a}
(Shinho Cho^{1,a})

Abstract

The structural, optical, and electrical properties of ZnO thin films grown on glass by radio-frequency (rf) magnetron sputtering were investigated. The mixture flow ratio of O₂ to Ar, which was operated with sputtering gas, was chosen as a parameter for growing high-quality ZnO thin films. The structural properties and surface morphologies of the thin films were characterized by the X-ray diffraction and the atomic force microscope, respectively. As for the optical properties of the films, the optical absorbance was measured in the wavelength range of 300-1100 nm by using UV-VIS spectrophotometer. The optical transmittance, absorption coefficient, and optical bandgap energy of ZnO thin films were calculated from the measured data. The crystallinity of the films was improved and the bandgap energy was increased from 3.08 eV to 3.23 eV as the oxygen flow ratio was increased from 0 % to 50 %. Furthermore, The ultraviolet and violet luminescences were observed by using photoluminescence spectroscopy. The hall mobility was decreased with the increase of oxygen flow ratio.

Key Words : ZnO thin film, Rf magnetron sputtering, Absorbance, Bandgap

1. 서론

직접 전이를 하는 II-VI족 반도체인 산화 아연 (zinc oxide: ZnO)은 광전 분야에서 기존의 GaN를 대체하고, 다양한 분야에 응용이 가능하기 때문에 반도체 분야에서 연구 대상의 물질이다. 특히, ZnO가 갖는 넓은 밴드갭 에너지 (상온에서 E_g=3.37 eV)와 큰 엑시톤 결합 에너지 (60 meV)는 상온에서 엑시톤 자극 방출을 제공하기 때문에 안정한 청색/자외선 발광 다이오드[1], 태양 전지의 원도우층[2], 압전 소자[3], 수소 센서, 건물의 열 반사층

으로 구현하기에 적합한 물질로 부상하고 있다.

최근 양질의 ZnO 박막을 증착시키는 기술의 발달로 인하여 ZnO 이중 접합 에피 성장 (hetero-epitaxy)이 가능해 졌으나, 여전히 ZnO를 기반으로 하는 광전 소자를 제조하기 위해서는 양질의 ZnO를 안정적이고 용이하게 성장하는 기술이 요구된다. 일반적으로, ZnO를 엑시톤 관련된 광전 소자로 응용하기 위해서는 가시광 영역에서 80 % 이상의 높은 투과율을 갖는 고전도성 박막이 필요하다. 이러한 박막을 성장시키기 위하여, 많은 연구자들은 금속유기 화학기상 증착법 (metal-organic chemical vapor deposition)[4], 분자빔 에피 증착법 (molecular beam epitaxy)[5], 졸겔 (sol-gel)[6], 라디오파 마그네트론 스퍼터링 (rf magnetron sputtering)[7], 분무 열분해법 (spray pyrolysis)[8], 펄스 레이저 증착법 (pulsed laser deposition)[9] 등의 방법들을

1. 신라대학교 전자재료공학과

(부산시 사상구 폐법동 산 1-1)

a. Corresponding Author : scho@silla.ac.kr

접수일자 : 2007. 9. 4

1차 심사 : 2007. 10. 16

심사완료 : 2007. 10. 18

사용해 왔다. 이 중에서, 라디오파 마그네트론 스퍼터링 증착법은 비교적 간단하게 구성되는 증착 장비, 고압에서 우수한 동작 조건, 저온에서 다양한 기판 위에 양질의 박막을 성장시키기에 적합한 증착 기술로 널리 알려져 있다. 특히, 유리 기판은 사파이어에 비해 경제적으로 저렴한 물질이며, 양질의 광전도 ZnO 박막을 증착시킬 수 있는 장점을 갖고 있다.

다수의 연구자들은 라디오파 (radio frequency: rf) 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 양질의 ZnO 박막을 성장하기 위한 조건으로 성장 온도, rf 파워의 세기, 스퍼터링 가스의 압력, 박막 성장 후 열처리 조건을 제시하였다[10-12]. Xue 등[10]은 50 °C의 증착 온도에서 ZnO 박막을 증착한 다음에, 각각 진공과 산소 분위기에서 1시간 동안 300 °C에서 열처리를 수행하는 최적의 성장 조건을 발표하였다. Jeong 등[11]은 rf 파워의 세기를 증착 변수로 선택하여 60-300 W 세기에서 ZnO 박막을 성장시켰으며, 180 W에서 약 $10^{-4} \Omega\text{cm}$ 의 비저항을 갖는 최적의 박막을 성장시켰다. Jayaraj 등[12]은 비축(off-axis) 구조를 갖는 rf 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 기판 온도 100-400 °C 영역에서 ZnO 박막을 성장시켰으며, 기판 온도가 감소함에 따라 박막의 비저항 값이 약간씩 증가함을 관측하였고, 모든 증착 시편은 가시광 영역에서 85 % 이상의 투과율을 나타냄을 보고하였다.

본 연구에서는 rf 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 유리 기판 위에 ZnO 박막을 성장시켰다. 이때, 양질의 박막을 성장시키기 위하여 증착 변수로 챔버 압력을 3.5×10^{-2} Torr로 고정된 상태에서 스퍼터링 가스로 사용하는 산소 (O_2)와 아르곤 (Ar)의 혼합 가스에서 산소의 유량비, $\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)$ 를 채택하였다. 산소 유량비를 각각 0 %, 10 %, 30 %, 50 %로 변화시키면서 성장된 ZnO 박막의 구조, 광학, 전기적 특성을 분석하였다. 특히, 산소 유량비 변화에 따른 광학 흡수율, 투과율, 흡수 계수, 광학 밴드갭 에너지, 전하 운반자의 농도, 홀 이동도와 비저항 값을 조사하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 ZnO 박막은 rf 마그네트론 스퍼터링 장치를 사용하여 유리 기판 (Corning 7059) 위에 성장시켰다. 유리 기판은 시편 고정대의 크기에 맞게 두께 0.5 mm와 넓이 10 mm x 10 mm의

크기로 절단하였고, 아세톤, 메탄올, 증류수의 순서대로 각각 10분 동안 초음파 세척을 한 다음에, 질소 가스로 습기를 제거하고 스퍼터링 챔버에 장입하였다. 스퍼터링 타겟으로는 상업적으로 이용 가능한 직경 2", 두께 0.25"를 갖는 ZnO (순도: 99.99 %)를 사용하였으며, 타겟과 기판 사이의 간격은 4 cm로 고정하였다. 챔버의 초기 진공도는 터보 펌프를 사용하여 4×10^{-6} Torr 이하로 배기하였으며, 스퍼터링 가스로는 O_2 와 Ar의 혼합 가스를 적당한 비율로 공급하였다. 특히, 혼합 가스 중 산소의 유량비, $\text{O}_2/(\text{Ar}+\text{O}_2)$ 가 ZnO 박막의 결정성, 광학 및 전기적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 가스 투입 후에 챔버의 진공도를 3.5×10^{-2} Torr로 고정하고, 산소 유량비를 0 %, 10 %, 30 %, 50 %로 변화시켜 ZnO 박막을 각각 성장시켰다. 증착시 기판의 온도는 시편 고정대 뒤에 장착되어 있는 할로젠 램프를 사용하여 400 °C로 유지하였고, 균일한 박막을 합성하기 위하여 모터를 사용하여 시편 고정대를 15 rpm 속도로 회전시켰다. 30분 동안 예비 스퍼터링을 수행하여 타겟 표면의 이물질을 제거한 후에 박막 합성을 위한 스퍼터링을 수행하였다.

증착된 박막의 결정 구조는 파장 0.154 nm를 갖는 Cu-K α 복사선을 사용하여 X-선 회절법 (X-ray diffraction: XRD)으로 조사하였으며, 박막의 미세 표면 상태는 원자 주사 현미경 (atomic force microscope: AFM)을 사용하여 관찰하였다. 박막의 두께는 표면 측정기 (Dektak 3030 Surface Profiler)를 사용하여 측정하였는데, 모든 시편의 두께는 약 400 nm 이었다. ZnO 박막의 광학 특성은 자외선-가시광 분광계 (UV-VIS spectrophotometer)를 사용하여 파장 300-1100 nm 영역에서 광학 흡수율을 측정하였고, 이 측정 결과를 사용하여 광학 투과율, 흡수 계수, 광학 밴드갭 에너지를 계산하였다. 박막의 전하 운반자 농도, 홀 이동도와 비저항은 van der Pauw 방법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 산소 유량비 0 %, 10 %, 30 %, 50 %로 각각 성장된 ZnO 박막을 XRD로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 산소 유량비 10 %, 30 %, 50 %로 성장 시킨 시편의 경우에 관측된 34.3°와 72.4°의

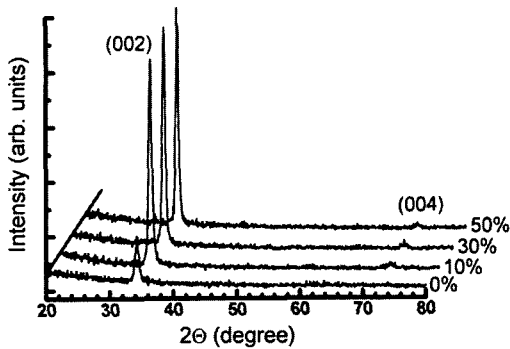


그림 1. 여러 산소 유량비로 증착된 ZnO 박막의 XRD 패턴.

Fig. 1. XRD patterns of ZnO films grown at various oxygen flow ratios.

피크는 각각 ZnO (002)와 (004) 면에서 발생한 회절 패턴을 나타낸다. 이것은 ZnO 박막이 기판에 수직인 c-축을 따라 우선 배향됨을 나타내며, 산소 유량비 0%로 성장된 시편의 경우에는 ZnO (002) 회절 피크만 관측되었다[7]. 또한, 산소 유량비가 0%에서 50%로 증가함에 따라 (002)면 회절 피크의 상대적인 세기는 점차적으로 증가하였으나, 피크의 위치는 이동하지 않았다. 이것은 산소 유량비가 증가함에 따라 c-축 방향으로 결정성이 향상됨을 의미한다. 이 결과는 rf 마그네트론 증착법으로 증착할 때, rf 파워의 세기가 감소함에 따라 (002)면 회절 피크의 세기가 증가하는 결과와 더불어 결정성 향상을 위한 새로운 증착 변수를 제공한다 [13]. 산소 유량비 50%로 성장된 시편의 경우에, (002)면 회절 피크의 세기는 산소 유량비 0%로 증착된 경우와 비교하여 약 4.4배 증가하였으며, 회절 피크의 반치폭 크기는 0.51° 이었다.

그림 2는 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막을 AFM으로 촬영한 결과를 나타낸 것이다. 산소 유량비 50%로 성장된 ZnO 박막의 경우에, 비교적 균일한 나노 크기의 분포를 갖는 작은 육각형 형태의 결정 나알들이 유리 기판 위에 성장되어 있음을 관측할 수 있다[그림 2(d) 참조]. 약 1.5 nm의 직경과 2 nm의 높이를 갖는 결정 나알들이 균일하게 형성되었다. 그림 2(c)-(a)에서 보듯이, 산소 유량비가 점점 감소함에 따라 형성되는 결정 나알의 크기와 제곱 평균값 (root mean square:RMS)은 전반적으로 증가하였으며, 결정 나알의 경계면들이 증폭되어 합쳐지는 경향을 보였다. RMS는 박막의 표면 거칠기 정도를 나타내는

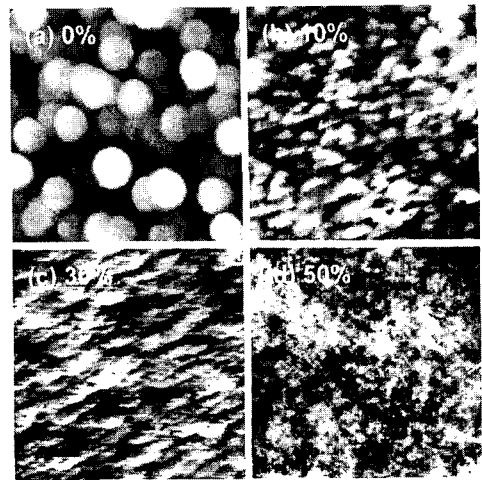


그림 2. 산소 유량비 0%, 10%, 30%, 50%로 증착된 ZnO 박막의 AFM 상.

Fig. 2. Surface AFM images of ZnO films grown at oxygen flow ratios of (a) 0%, (b) 10%, (c) 30%, and (d) 50%.

척도인데, 산소 유량비가 50%에서 0.3 nm 이었으며, 산소 유량비가 30%로 감소함에 따라 RMS 값은 0.7 nm로 증가하였다. 계속하여 산소 유량비를 감소함에 따라 RMS 값은 증가하였는데, 유량비가 0%에서 31 nm 이었다. 또한, 산소 유량비가 감소할수록 결정 나알의 형태는 육각형에서 구형으로 바뀌면서 나알의 크기는 상당히 증가하여 산소 유량비 0%인 경우에는 112 nm로 최대값을 나타내었다.

일반적으로, 잘 알려진 Scherrer의 식[14],

$$d [nm] = c \frac{\lambda}{B \cos\theta} \quad (1)$$

을 사용하면 측정된 XRD 실험 데이터로부터 ZnO 박막의 결정 나알의 크기를 계산할 수 있다. 여기서 B 는 XRD 신호의 반치폭 (단위: 라디안), λ 는 x-선의 파장 (0.154 nm), θ 는 Bragg 회절각, c 는 상수 ($c=1$)를 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 계산한 결정 나알의 크기는 AFM 촬영을 통해 직접 측정된 결과와 비교하기 위하여 그 값을 그림 3에 나타내었다. 산소 유량비 50%로 성장된 시편의 경우에 XRD로 계산한 나알의 크기는 18 nm 인데 반하여, AFM 측정의 경우에 1.4 nm 이었다. 두 측정 사이에 상당한 나알 크기의 차이가 발생한

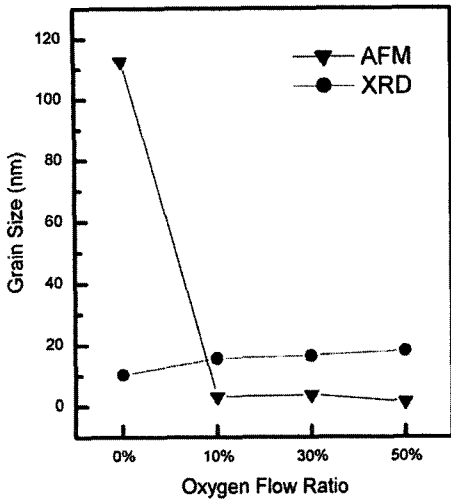


그림 3. AFM 측정과 XRD 데이터로 계산한 ZnO 박막 결정 난알의 크기.
 Fig. 3. Grain size of ZnO films calculated from XRD data and AFM measurements.

것은 AFM으로 관측되는 박막 표면의 난알들은 실제적으로 작은 난알들이 서로 합쳐져 있는 것이기 때문에 XRD 측정 결과로 얻은 난알의 크기와 차이가 나는 것으로 판단된다. 이 결과는 종래에 박막 성장시 기판 온도와 rf 파워의 세기 변화를 달리하여 결정 난알의 크기를 제어하는 것과 같이, 산소 유량비의 변화를 증착 변수로 선택하여 박막을 성장시키면 결정성이 향상되는 양질의 ZnO 박막을 성장시킬 수 있음을 나타낸다.

그림 4는 자외선-가시광 분광계를 사용하여 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막에서 측정된 광학 흡수율 (absorbance) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 산소 유량비 50%로 성장된 시편의 경우에 엑시톤 피크는 364 nm에서 관측되었고, 산소 유량비가 감소함에 따라 엑시톤 피크의 파장은 낮은 파장 쪽으로 청색 이동 (blueshift) 하였다. 다른 세 종류의 시편과 달리, 산소 유량비 0%로 성장된 시편의 경우에 엑시톤 피크는 358 nm에서 나타났으며, 흡수단의 기울기는 아주 완만하게 감소하였다. 본 연구에서 측정된 흡수율 A 와 투과율 $T(\%)$ 는 $A = -\log [T(\%)/100]$ 의 관계를 갖기 때문에, 투과율 $T(\%)$ 는

$$T(\%) = 10^{2-A} \quad (2)$$

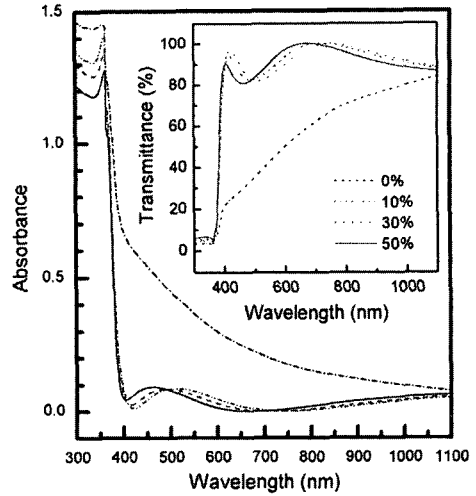


그림 4. 여러 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막의 광학 흡수율 스펙트럼. 삽입 그림은 투과율을 파장의 함수로 나타낸 것이다.
 Fig. 4. Optical absorbance spectra of ZnO thin films prepared at various oxygen flow ratios. The inset indicates the transmittance spectra measured as a function of wavelength.

으로 계산할 수 있다. 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막의 광학 투과율 스펙트럼을 파장의 함수로 그림 4의 삽입 그림에 나타내었다. 산소 유량비 10%, 30%, 50%로 성장된 시편의 경우에는 큰 차이 없이 파장 영역 300-1100 nm에서 ZnO 박막의 평균 투과율은 90% 이상이었다. 이때, 투과율 스펙트럼에서 관측되는 진동은 박막과 기판에서 반사되는 입사 빛의 간섭 현상에 의해 발생하는 간섭 무늬이며, 이 현상은 증착된 ZnO 박막과 유리 기판과의 경계면이 광학적으로 균일한 표면으로 되어 있음을 나타낸다. 산소 유량비 50%로 성장된 시편의 경우에 파장 600 nm에서 투과율은 97%이었다. 이것은 XRD와 AFM 측정에서 보듯이, 산소 유량비가 50%일 때 결정 난알의 크기 분포가 비교적 균일하여 미세 틈 (void)의 형성이 작아 결정성이 양호하며, 입사 빛이 박막 내부에 존재하는 미세 틈과 산란되는 확률이 감소되어 가시광 영역에서 우수한 투과 특성을 나타내는 것으로 사료된다.

ZnO 박막의 광학 밴드갭 에너지는 광학 흡수계수와 투과율 사이의 관계식을 이용하여 유도할 수 있다. 광학 흡수계수 α , 투과율 $T(\%)$, 반사율

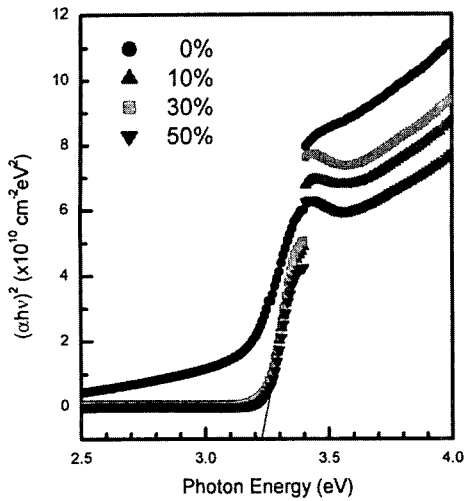


그림 5. 여러 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막에서 $(\alpha h\nu)^2$ 대 광자 에너지 함수로 나타낸 그림.

Fig. 5. Plot of $(\alpha h\nu)^2$ vs photon energy for the ZnO thin films grown at various oxygen flow ratios.

R 사이의 관계는 Tauc [15]에 의하면 $T = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d)$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서 d 는 박막의 두께를 나타낸다. 흡수단 근처에서 반사율은 무시할 정도로 작기 때문에, 투과율은 $T = \exp(-\alpha d)$ 으로 쓸 수 있고, 이 식의 양변에 자연 로그를 취하여 계산하면, 광학 흡수 계수 α 는

$$\alpha = \ln(1/T)/d \quad (3)$$

으로 표현된다. 본 연구에 사용된 모든 ZnO 박막의 두께 d 는 400 nm 이다. 한편, 박막의 광학 밴드갭 에너지를 Tauc 모델을 사용하여 높은 흡수 영역에서 결정할 수 있다[15]:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n. \quad (4)$$

여기서 A 는 반도체 물질과 관련되는 상수이며, $h\nu$ 는 입사 광자 (photon)의 에너지, E_g 는 광학 밴드갭 에너지를 나타낸다. 직접 전이의 경우에 $n = 1/2$ 혹은 $2/3$ 으로 주어지나, ZnO 박막의 경우에는 $n = 1/2$ 값이 밴드 흡수단 영역에서 잘 맞

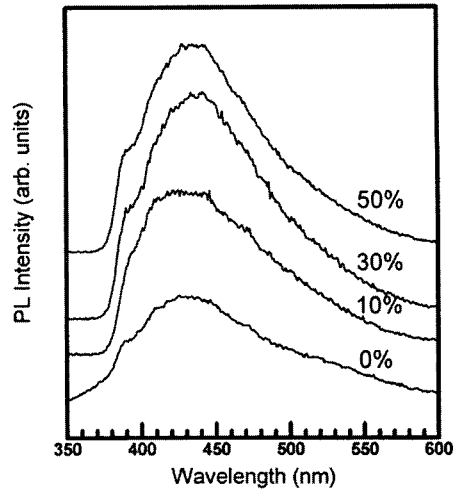


그림 6. 여러 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막의 상온 PL 스펙트럼.

Fig. 6. Room-temperature PL spectra of ZnO thin films prepared at various oxygen flow ratios.

추는 곡선으로 알려져 있으므로 이 값을 선택하였다. 그림 5는 입사 광자 에너지 $h\nu$ 를 x 축, $(\alpha h\nu)^2$ 의 값을 y 축으로 선택하여 실험 데이터를 나타낸 것이다. 이때, 광학 밴드갭 에너지 E_g 값은 그림 5에서 급격히 증가하는 흡수단 영역의 데이터 값을 가장 잘 맞추는 선을 광자 에너지 $h\nu$ 를 나타내는 x 축으로 그어서 x 축과 만나는 점으로 결정할 수 있다. 산소 유량비 50%로 성장된 박막의 경우에 밴드갭 에너지는 3.23 eV 이었다. 산소 유량비가 각각 30%, 10%, 0%로 감소함에 따라 밴드갭 에너지는 3.22, 3.22, 3.08 eV으로 감소하였다. 이것은 rf 파워가 증가하면 밴드갭 에너지가 증가하는 결과와 유사하였다[16].

그림 6은 유리 기판 위에 서로 다른 산소 유량비로 성장된 ZnO 박막의 광여기 발광 (photoluminescence: PL) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 모든 시편의 경우에 두 개의 발광 신호가 관측되었다. 하나의 신호는 388 nm에 피크를 갖는 자외선 발광 신호로써, 엑시톤의 복사선 소멸에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다[17]. 다른 신호는 자외선 발광 신호에 비해 피크의 세기가 상대적으로 매우 크고, 반치폭 (570 meV)이 넓고, 425 nm 근처에 피크를 갖는 보라색 발광 신호이다. 이 신호는 산소 빈자리 (vacancy)의 낮은 도너 (donor) 준위에

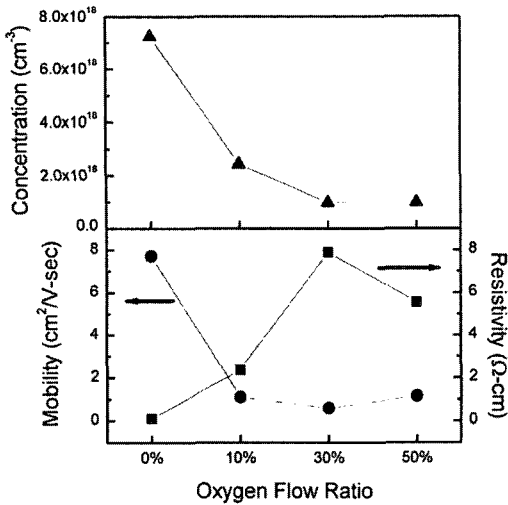


그림 7. 산소 유량비 함수로 측정된 ZnO 박막의 전하 운반자 농도, 홀 이동도, 전기 비저항.
Fig. 7. Charge carrier concentration, Hall mobility, and electrical resistivity of ZnO thin films measured as a function of oxygen flow ratio.

위치는 전자가 가전대로 전이하는 과정에서 발생하는 것으로 판단된다[18]. 산소유량비가 0%에서 50%로 증가함에 따라 보라색 발광 신호의 세기는 자외선 발광 신호의 세기에 비해 상대적으로 크게 증가하였고, 보라색 발광 신호의 피크 파장은 423 nm에서 436 nm으로 이동하는 경향을 나타내었다. 피크 파장 388 nm (3.20 eV)를 갖는 자외선 발광 신호의 밴드갭은 그림 4의 투과율 측정에서 결정된 광학 밴드갭 에너지의 크기와 실험 오차 범위 내에서 일치하였다.

그림 7은 산소 유량비를 변화시키면서 증착한 ZnO 박막의 전하 운반자의 농도, 홀 이동도, 비저항을 나타낸 것이다. 산소 유량비 0%로 성장된 박막의 경우에 전하 운반자의 농도는 $7.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 홀 이동도는 $7.7 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$, 비저항 값은 $1.1 \times 10^{-1} \text{ } \Omega\text{cm}$ 이었다. 산소 유량비가 증가함에 따라 전하 운반자의 농도와 홀 이동도의 값은 감소하였으나, 비저항값은 대체적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 산소 유량비가 증가함에 따라 더 많은 산소가 박막에 유입되어 결정 내에 존재하는 산소 빈자리의 수가 감소하기 때문으로 사료된다.

4. 결론

rf 마그네트론 스퍼터링 방법으로 박막 증착시 스퍼터링 가스로 사용하는 산소와 아르곤의 혼합 가스에서 산소 유량비를 각각 0%, 10%, 30%, 50%로 변화시키면서 유리 기판 위에 ZnO 박막을 성장시켜 그것의 구조, 광학, 전기적 특성을 조사하였다. 산소 유량비를 0%에서 50%로 증가시킴에 따라 (002)면 회절 피크의 상대적인 세기가 증가하면서 c-축 방향으로 결정성이 향상되었고, 나노 크기의 분포를 갖는 작은 육각형 형태의 결정 나알들이 균일하게 성장됨을 관측할 수 있었다. ZnO 박막의 광학 흡수율 스펙트럼 측정을 통하여 산소 유량비가 감소함에 따라 엑시톤 피크의 파장은 청색 이동을 하였고, 산소 유량비 10%, 30%, 50%로 각각 성장된 시편의 경우에 300-1100 nm의 파장 영역에서 ZnO 박막은 90% 이상의 평균 투과율을 나타내었다. 광학 흡수 계수와 투과율을 계산하여 ZnO 박막의 광학 밴드갭 에너지를 계산하였으며, 산소 유량비가 증가함에 따라 광학 밴드갭 에너지가 증가함을 확인하였으나, 전하 운반자의 농도와 홀 이동도는 감소하였다.

참고 문헌

- [1] W. Z. Xu, Z. Z. Ye, Y. J. Zeng, L. P. Zhu, B. H. Zhao, L. Jiang, J. G. Lu, H. P. He, and S. D. Zhang, "ZnO light-emitting diode grown by plasma-assisted metal organic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 173506, 2006.
- [2] A. A. Ibrahim and A. Ashour, "ZnO/Si solar cell fabricated by spray pyrolysis technique", *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, Vol. 17, p. 835, 2006.
- [3] M. Tomar, V. Gupta, K. Sreenivas, and A. Mansingh, "Temperature stability of ZnO thin film SAW device on fused quartz", *IEEE Tran. Device Mater. Reliability*, Vol. 5, p. 494, 2005.
- [4] S. T. Tan, B. J. Chen, X. W. Sun, W. J. Fan, H. S. Kwok, X. H. Zhang, and S. J. Chua, "Blueshift of optical band gap in ZnO thin films grown by metal-organic chemical-vapor deposition", *J. Appl. Phys.*, Vol. 98, p. 013505, 2005.

- [5] M. Abouzaid, P. Tailpied, P. Ruterana, C. Liu, B. Xiao, S. J. Cho, Y. T. Moon, and H. Morkoc, "A TEM study of ZnO layers deposited by MBE and rf magnetron sputtering", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 39, p. 387, 2005.
- [6] J. H. Lee, K. H. Ko, and B. O. Park, "Electrical and optical properties of ZnO transparent conducting films by the sol-gel method", *J. Cryst. Growth*, Vol. 247, p. 119, 2003.
- [7] R. Ondo-Ndong, F. Pascal-Delannoy, A. Boyer, A. Giani, and A. Foucaran, "Structural properties of zinc oxide thin films prepared by r.f. magnetron sputtering", *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 97, p. 68, 2003.
- [8] R. Ayouchi, D. Leinen, F. Martin, M. Gabas, E. Dalchiale, and J. R. Ramos-Barrado, "Preparation and characterization of transport ZnO thin films obtained by spray pyrolysis", *Thin Solids Films*, Vol. 426, p. 68, 2003.
- [9] V. Craciun, J. Elders, J. G. E. Gardeniers, and I. W. Boyd, "Characteristics of high quality ZnO thin films deposited by pulsed laser deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, p. 2963, 1994.
- [10] Z. Y. Xue, D. H. Zhang, Q. P. Wang, and J. H. Wang, "The blue photoluminescence emitted from ZnO films deposited on glass substrate by rf magnetron sputtering", *Appl. Surface Sci.*, Vol. 195, p. 126, 2002.
- [11] W. J. Jeong and G. C. Park, "Electrical and optical properties of ZnO thin film as a function of deposition parameters", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 65, p. 37, 2001.
- [12] M. K. Jayaraj, A. Antony, and M. Ramachandran, "Transport conducting zinc oxide thin film prepared by off-axis rf magnetron sputtering", *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 25, p. 227, 2002.
- [13] H. W. Kim and N. H. Kim, "Structural studies of room-temperature RF magnetron sputtered ZnO films under different RF powered conditions", *Mater. Sci. Eng. B*, Vol. 103, p. 297, 2003.
- [14] M. L. Tu, Y. K. Su, and C. Y. Ma, "Nitrogen-doped p-type ZnO films prepared from nitrogen gas radio-frequency magnetron sputtering", *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, p. 053705, 2006.
- [15] F. Yakuphanoglu, M. Sekerci, and O. F. Ozturk, "The determination of the optical constants of Cu(II) compound having 1-chloro-2,3-0-cyclohexylidene propane thin film", *Opt. Comm.*, Vol. 239, p. 275, 2004.
- [16] G. H. Lee, Y. Yamamoto, M. Kouroggi, and M. Ohtsu, "Blue shift in room temperature photoluminescence from photo-chemical vapor deposited ZnO films", *Thin Solids Films*, Vol. 386, p. 117, 2001.
- [17] 황동현, 손영국, 조신호, "Al 도핑된 ZnO 박막에서 방출되는 보라색 발광 스펙트럼", *전기전자재료학회논문지*, 20권, 4호, p. 318, 2007.
- [18] B. J. Jin, S. Im, and S. Y. Lee, "Violet and UV luminescence emitted from ZnO thin films grown on sapphire by pulsed laser deposition", *Thin Solids Films*, Vol. 366, p. 107, 2000.