

Molecular Beam Epitaxy로 성장한 ZnSe 박막의 결정성 및 계면 특성의 평가

정명훈*, 박승환*, 김광희*, 김홍승*, 양민*, 안형수*, 오동철**, 송준석***, 장지호*

*한국해양대학교 반도체물리전공, **동북대학교 금속재료연구소, ***네오세미테크 .

Characterization of Crystallinity and Interfacial Quality of ZnSe Thin Films Grown by Molecular Beam Epitaxy

M. H. Jung*, S. H. Park*, K. H. Kim*, H. S. Kim*, M. Yang*, H. S. Ahn*,
D. C. Oh**, J. S. Song***, and J. H. Chang*

*Major of Semiconductor Physics, Korea Maritime University

**Institute for Materials Research, Tohoku University

***Neosemitech Corp.

요 약 : GaAs 기판 위에 molecular beam epitaxy (MBE) 법으로 성장된 ZnSe 박막의 특성을 조사하였다. Photoluminescence (PL) 측정에서 좁은 반치폭을 갖는 강한 밴드단 발광과 온도에 따른 발광 특성을 통해 우수한 광학적 특성을 볼 수 있었다. 또한 X-ray diffraction (XRD) 측정으로 구한 $9.485 \times 10^7 \text{ dis/cm}^2$ 의 전위 밀도에서도 결정성이 양호함을 알 수 있었다. 반면 광전류 측정을 통하여 박막의 질을 평가하는데 있어 중요한 이종 계면에 기인하는 결함 및 불순물의 존재를 확인하였다. 이런 특성 평가를 통하여 고품질의 박막을 얻기 위해 저온 완화층을 도입한 성장 방법을 제안하였다.

핵심용어 : ZnSe, MBE, GaAs, XRD, PL, photocurrent, reflectance

ABSTRACT : Various properties of ZnSe thin films grown on GaAs substrates by molecular beam epitaxy (MBE) have been investigated. Photoluminescence (PL) measurement shows high optical quality of the sample in terms of narrow linewidth, strong luminescence intensity of band edge emission, and temperature dependence of luminescence properties. The dislocation density is estimated as $9.485 \times 10^7 \text{ dis/cm}^2$ by X-ray diffraction (XRD) measurements. Serious degradation of the crystallinity was not observed from XRD results. However, photocurrent measurement shows various deep states related with defects and impurities located at the hetero-interface, which strongly stress the importance of this measurement for the evaluation of the quality of thin films. To improve the quality further, the growth of low temperature buffer is discussed.

KEY WORDS : ZnSe, MBE, GaAs, XRD, PL, photocurrent, reflectance

1. 서 론

ZnSe는 첨가연광 (Zinc blende) 구조를 가지고 있고 상온에서 약 2.7 eV의 넓은 직접 천이형 에너지띠 간격을 가지고 있

으며 고속 광변환기 제작에 유망한 물질이다 [1]. ZnSe의 박막 성장에는 격자정수의 부정합이 약 0.27 % 로 작은 GaAs 기판을 주로 이용한다. 하지만 ZnSe/GaAs의 경우에도 격자

* jungmh@bada.hhu.ac.kr 051) 410-4784

정수의 부정합에 의해, 이종계면을 따라 이축성 응력 (biaxial compressive stress)이 발생되어 격자 구조의 변형 (strain) 및 결합을 발생시키는 원인이 된다 [2]. 물론 박막이 임계 두께 이하일 경우 탄성 변형을 일으키며 전위 (dislocation)가 억제되지만, 대부분의 응용을 위해서는 임계 두께 이상의 박막 성장이 필요하므로 적절한 성장 기법을 도입하여 결합을 최소화하는 것이 필요하다. 이종 결정성장 시 박막은 기판과의 격자 정수의 부정합, 원자의 부정합, 열팽창계수의 부정합, 결정 구조의 부정합 등 네 가지 부정합이 발생한다. 이 중 GaAs 기판상의 ZnSe 이종 성장 시에는 열팽창계수의 차가 비교적 작고 결정구조의 부정합은 없어, 격자정수의 부정합과 원자의 부정합이 주된 부정합으로 작용한다. 따라서 성장된 박막의 평가 시에도 격자정수의 부정합에 의한 전위의 발생과 원자가 부정합에 의해 계면에서 기인하는 결합에 대해서 종합적인 평가가 필요하다. 특히 GaAs기판 상에 ZnSe를 성장할 때 Ga-Se 결합에 의한 안정된 계면층의 발생은 ZnSe 결정성에 큰 영향을 주는 요인으로 보고 되어있다 [3]. 하지만 종래의 연구에서는 이러한 요인들에 대한 평가가 종합적으로 이뤄지지 않고 주로 박막의 구조적, 광학적 특성 평가에 집중되어 계면에서 발생하는 결합과 박막의 특성과의 상관관계에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 분자선 에피택시법 (molecular beam epitaxy)으로 ZnSe박막을 성장하였고 X선 회절법 (X-ray diffraction measurement), 광여기 발광 분광법 (photoluminescence), 반사 분광법 (reflectance) 등의 다양한 측정을 통해 구조적 특성과 광학적 특성을 알아보았다. 그리고 전기적 특성을 살펴보기 위해 광전류 분광법 (photocurrent spectroscopy)을 이용하여 계면에 존재하는 결합의 관계에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

본 실험에서는 분자선 에피택시법으로 GaAs (001) 기판 위에 ZnSe 박막을 성장하였다. GaAs 기판의 유기물을 제거하기 위하여 아세톤, 메탄올 순으로 10분씩 유기 세척하였다. 그리고 기판 표면의 산화막을 제거하기 위하여 $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ (1 : 2 : 50) 용액에 약 2 분 동안 에칭하였다. 세척 후 시료 홀더에 In을 이용하여 기판을 부착하였다. 성장 개시 전 VI/II 공급비를 결정하기 위해 이온 게이지로 각 셀의 등가분자선 강도 (beam equivalent pressure ; BEP)를 측정하였다. GaAs 기판의 표면 산화막을 제거하기 위하여 행하는 열세척 (heat cleaning)은 600 °C에서 10 분가량 진행하였으며, 열처리 후 Se으로 인해 Ga_2Se_3 등의 화합물이 형성되어 박막 내에 많은 적층 결합이나 전위 등이 생기지 않도록 Zn 셀의 셔터를 열어 Zn를 먼저 조사하였다. 성장은 290 °C에서 1 시간동안 실시하였다. 성장한 박막은 AFM으로 표면 형상을 관찰하였고, XRD ω -2 θ rocking curve 측정을 통해 결정성과 전위 밀도를 알아보았다. 그리고

He-Cd 레이저의 325 nm파장을 여기광으로 이용하여 10 K에서 300 K까지 온도를 증가시키며 PL 측정을 하였다. 광전류 측정을 위해 In으로 전극을 형성하였고 약 25 V의 전압을 인가한 상태에서 Xe 램프를 분광기를 사용하여 분광한 여기광을 시료에 입사하여 광전류 측정을 하였다. 또한 광전류 측정 시 밴드갭의 위치를 확인하기 위하여 할로겐 램프를 사용하여 반사 측정 하였다.

3. 결과 및 토의

성장된 ZnSe의 광학적 특성을 알아보기 위해 10 ~ 300 K에서 PL 을 측정하였으며 각 측정 온도에서의 다른 발광 스펙트럼은 Fig 1에 보였다. 10 K의 발광 스펙트럼에서 관찰된 2.7996 eV의 발광피크는 주개에 속박된 엑시톤 (D_0, X)과 관련된 발광 피크로 알려져 있으며 반치폭은 4.2 meV였다 [4]. (D_0, X) 발광은 In이나 Ga 같은 불순물의 중성 주개에 속박된 엑시톤에 의한 발광으로 분자선 에피택시 성장한 ZnSe 박막에서 흔히 관찰되는 것으로 알려져 있다 [4][5][6][7]. 그림 1에 삽입된 그래프는 10 K에서 측정한 발광 스펙트럼으로 깊은 준위의 발광을 확대하여 나타내었다. 먼저 2.2 eV 근처의 폭이 넓은 발광은 자기활성화 (self-activated : SA) 발광으로 알려져 있다 [8]. SA 발광은 Zn 공공 (V_{Zn})과 이웃한 주개로 구성된 복합체 결합에 의한 발광으로 알려져 있다. 또한 2.5 eV의 폭이 넓은 발광은 그 원인이 아직 밝혀지지 않았으며 [9], 2.6 eV 근처의 발광은 전위와 관련된 발광 (Y)으로 알려져 있다 [10]. 이는 전위 밀도와 밀접한 관계가 있어 박막이 높은 전위 밀도를 갖는 경우 강한 발광 강도를 갖는 것으로 알려져 있다. 그리고 2.7 eV에서는 약한 주개와 받개의 상호작용에 의해서 나타나는 DAP (donor-acceptor pair) 발광이 나타났다 [11].

이러한 저온 스펙트럼으로부터 성장된 ZnSe 박막은 전위나 결합에 의한 발광이 지배적인 발광 강도를 보이지 않으며 강한 밴드단 발광을 갖는 점으로 판단할 때 양호한 광특성을 가지고 있는 것을 알 수 있었다.

Fig 2는 온도 변화에 따른 반치폭 그리고 발광 에너지의 변화를 정리한 결과이다. 삽입된 그래프는 온도에 따라 각 스펙트럼에서 변화된 발광 강도를 보여준다.

PL 발광 강도는 온도가 증가 할수록 지수 함수적으로 감소하였다. 이러한 경향을 보이는 경우, 활성화 에너지 ΔE 는 다음의 Arrhenius 식으로 표현 된다 [10].

$$I = \frac{I_0}{1 + C \exp(\Delta E / k_B T)} \quad (1)$$

여기서 I_0 , C는 상수이고, k_B 는 Boltzmann 상수이다. ΔE 는 계산한 결과 25 meV이었고, 이는 (D_0, X) 발광 피크의 위치로부터 예상되었던 대로 이 피크가 In이나 Ga 같은 불순물에 의한 것임을 시사하고 있다 [12].

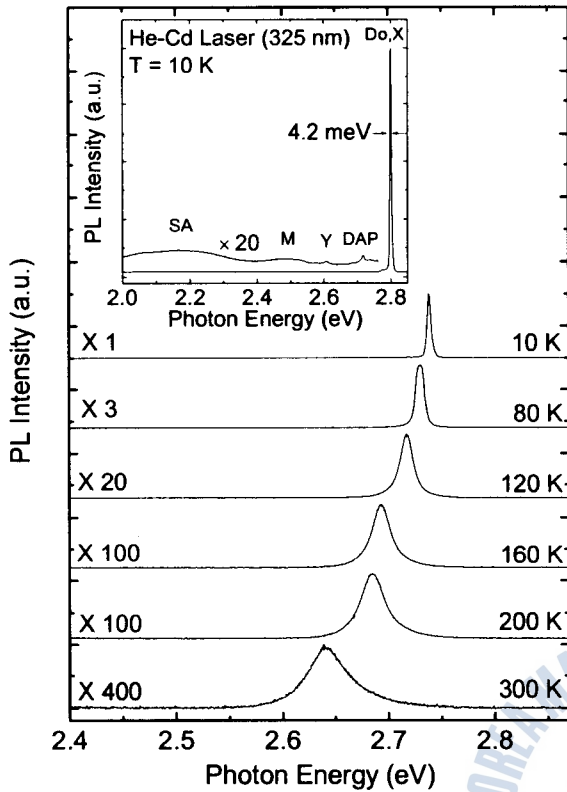


Fig. 1 Temperature dependence PL spectra of ZnSe thin film.

또한 Fig 2에서 온도 변화에 따른 밴드단 발광의 반치폭의 변화는 Varshni 식을 이용하여 해석 하였다 [13].

$$E(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (2)$$

$E_g(0)$ 는 0 K일 때 밴드갭을 의미하며 α , β 는 피팅 계수이다. 본 연구에서는 $E_g(0) = 2.801$ eV, $\alpha = 7.9 \times 10^{-4}$ eV, $\beta = 380$ K의 값을 얻을 수 있었으며, 벌크 ZnSe 일 경우의 계수 ($\alpha = 7.5 \times 10^{-4}$ eV/K, $\beta = 295$ K)와 비슷하였다 [14]. 이는 성장한 박막이 결함이나 불순물 등의 영향이 적고 결정성이 양호함을 나타내는 결과로 판단된다.

또한, 온도 변화에 따른 반치폭의 변화는 다음 식을 이용하여 고찰하였다 [16].

$$\Gamma(T) = \Gamma_{inh} + \Gamma_{LA}T + \frac{\Gamma_{LO}}{\exp(E_{LO}/k_B T) - 1} \quad (3)$$

Γ_{inh} 는 샘플의 내재적 비균질성을 보여주는 인자로, 0 K일 때의 반치폭을 나타내며, 두 번째, 세 번째 항은 각각 격자의 longitudinal acoustic (LA)과 longitudinal optical (LO) 포논 모드와 엑시톤의 상호작용의 정도를 나타내는 인자이다. 식 (3)을 적용하여 얻어진 LO 포논의 에너지는 31 meV로 ZnSe의 LO 포논 에너지 31.7 meV와 비슷한 값을 얻을 수 있었다 [17].

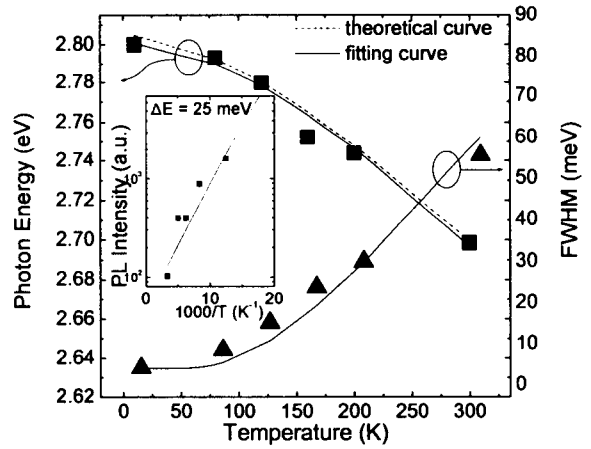


Fig. 2 Temperature dependence of intensity, peak position, and linewidth of (Do,X) emission. The solid lines are fitting results, and the dashed line is calculated result with the coefficients $E_g(0) = 2.805$ eV, $\alpha = 6.7 \times 10^{-4}$ eV/K, and $\beta = 270$ K [15].

이러한 결과는 측정 온도 증가 시, 발광 피크의 반치폭이 증가하는 주원인이 격자 진동과의 상호작용에 있음을 보여주는 것으로 시료가 균질하여, 격자 진동 이외의 영향에 의한 반치폭의 증가가 거의 없음을 나타내고 있다. 이는 앞에서 설명한 발광 특성 평가 결과들과 마찬가지로 양호한 광학적 특성을 가지고 있음을 보여주는 결과로 판단된다.

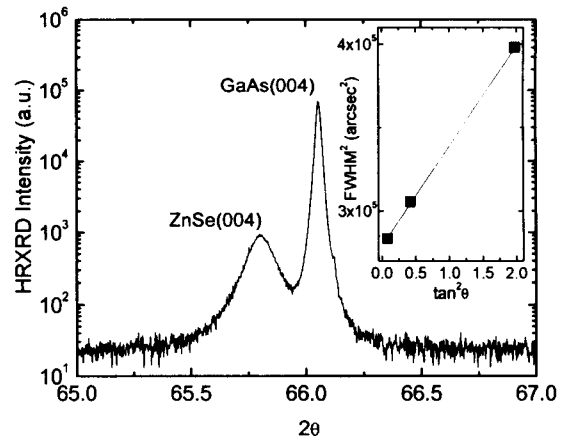


Fig. 3 (004) ω - 2θ rocking curve of ZnSe thin film grown on GaAs(100). The inset shows the variation of XRD FWHM for various reflection planes.

Fig 3은 ZnSe (004) 면의 XRD ω - 2θ scan 결과이다. 이 결과로부터 ZnSe의 격자 상수를 계산한 결과 5.670 Å이었고 피크의 반치폭은 396 arcsec였다. 두께에 따른 격자 상수 값에 대한

종래 연구와 비교하여 비슷한 격자 상수 값을 가졌고, 임계 두께 보다 두꺼워 ZnSe 박막내의 응력은 완화되어 있음을 확인할 수 있었다 [18].

보다 구체적으로 성장된 박막의 결정성을 평가하기 위하여 XRD를 이용한 전위 밀도를 계산하여 보았다. 전위 밀도를 구하기 위해 ZnSe (002), (004), (006) 면에 대한 XRD 측정을 실시하였다. 전위 밀도의 계산 원리는 다음과 같다.

$$\beta_m^2(hkl) = \beta_o^2(hkl) + \beta_d^2(hkl) + \beta_c^2(hkl) + \beta_L^2(hkl) + \beta_a^2(hkl) + \beta_e^2(hkl) \quad (4)$$

$\beta_m^2(hkl)$ 는 서로 다른 면지수를 갖는 면에서 측정된 회절 피크의 반치폭에 의해 결정된다 [19]. $\beta_o^2(hkl)$ 는 완전한 결정 물질의 고유 rocking curve의 폭이고, $\beta_d^2(hkl)$ 는 장비 해상도에 관여한 첫 번째 결정의 고유 rocking curve의 폭으로 약 10 arcsec 정도의 작은 값들을 가진다.

$$\beta_L^2(hkl) = 4 \ln 2 \lambda^2 / \pi h^2 \cos^2 \theta \quad (5)$$

$\beta_L^2(hkl)$ 는 입사각 θ 와 박막층 두께 h , $\beta^2(hkl)$ 는 샘플의 곡면 반지름에 따라 변하게 된다. $\beta_L^2(hkl)$, $\beta_d^2(hkl) \ll \beta_m^2(hkl)$ 으로 일반적인 경우 이 값들은 무시할 수 있고 $\beta_a^2(hkl)$ 는 threading 전위 밀도, $\beta_e^2(hkl)$ 는 60° 전위 밀도에 따른 반치폭을 나타낸다.

$$\beta_m^2(hkl) - \beta_o^2(hkl) - \beta_d^2(hkl) = \beta_{adv}^2(hkl) \approx K_a + K_e \tan^2 \theta \quad (6)$$

$$K_a = \beta_a^2(hkl) = 2\pi \ln 2 b^2 D_1 \quad (7)$$

$$D_1 = K_a / 4.36 b^2 \quad (8)$$

$$K_e = \beta_e^2(hkl) = 0.16 b^2 D_2 | \ln(2 \times 10^{-7} \sqrt{D_2}) | \quad (9)$$

$$D_2 = K_e / 0.16 b^2 | \ln(2 \times 10^{-7} \sqrt{D_2}) | \quad (10)$$

버거스 벡터 $b = a_0/2^{1/2}$ 이고, a_0 는 벌크의 격자 상수이다. 그리고 D_1 , D_2 는 threading 전위 밀도, 60° 전위 밀도를 각각 나타낸다. 이때 K_a 는 전위 부근에서의 결정 격자 변형과 기울어짐과 관련되어 있고, K_e 는 전위를 둘러싸는 변형력을 받는 영역의 크기와 관련이 있다.

Fig 3에 삽입된 그래프에서 $\tan^2 \theta$ 에 따른 $\beta_{adv}^2(hkl)$ 의 함수를 보여주고 있으며 다음의 관계식을 갖는다.

$$\beta_{adv}^2 = 2.79 \times 10^5 (\text{arc sec})^2 + 0.6 \times 10^5 (\text{arc sec})^2 \tan^2 \theta \quad (11)$$

이 식을 이용하여 구한 전위 밀도는 $9.485 \times 10^7 \text{ dis/cm}^2$ 였다. 이는 0.6 μm 정도의 두께를 가지는 ZnSe 박막의 종래 실험 결과와 비슷한 결과로 결정성도 비교적 양호함을 알 수 있었다 [20].

ZnSe 박막과 GaAs 기판 사이의 계면의 결함을 알아보기 위해 광전류 측정을 실시하였으며 우선 제작된 시료에 인가 전압을 달리 하며 측정하였다. 인가 전압이 증가하면 전압에 의한

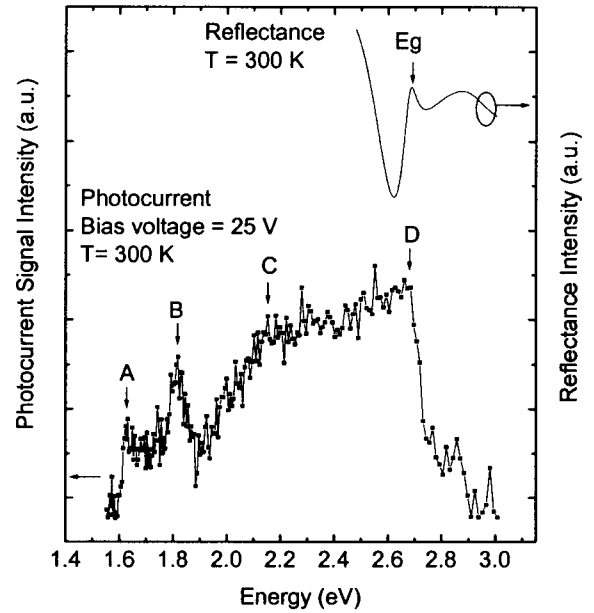


Fig. 4 Photocurrent and reflectance of the ZnSe thin film measured at room temperature.

장벽 저감 (voltage-induced barrier lowering) 효과에 의해 신호가 증가함을 볼 수 있었으며 [21], 본 실험에서는 광전류의 신호 대 잡음비를 고려하여 25 V에서 측정을 실시하였다.

Fig 4는 상온에서 측정된 광전류 스펙트럼과 반사 측정 결과이다. 반사 측정에서 2.68 eV의 밴드갭을 보여주고 있으며, 광전류는 A에서 D까지 표시된 4개의 피크를 보여주고 있다. 먼저 1.63 eV의 A 피크는 ZnSe의 전도대와 GaAs의 가전자대 사이의 천이를 나타낸다 [22]. 이는 광전류 분광법이 PL 처럼 표면 부근의 발광에 의한 평가가 아니라, 박막 내부 및 박막과 기판의 계면 부근에서 일어나는 광흡수에 의해 발생한 전하의 이동 과정을 통한 평가라는 점을 잘 나타내고 있다. 이러한 평가는 특히 ZnSe/GaAs와 같이 계면에서의 원자가 부정합에 의한 결함의 발생이 박막의 결정성에 큰 영향을 주는 경우에 매우 유용함을 알 수 있다.

1.82 eV의 피크 B는 전도대에서 깊은 받개 준위로의 천이를 나타낸다. 이 역시 PL에서 볼 수 없었던 준위로, GaAs의 전도대에서 ZnSe 가전자대 보다 0.48 eV만큼 큰 깊은 받개 준위로의 천이에 의한 것이다 [22]. 이 깊은 받개 준위는 V_{Zn} 와 계면에서 Ga이 확산에 의한 것으로 알려져 있어 [23] 본 실험에서 실시한 광특성 평가 결과 비교적 양호한 발광 특성이 관찰되었음에도 불구하고 계면에서의 불순물 확산 등의 영향이 배제되지 않았음을 알 수 있다. 또한 2.2 eV의 피크 C는 V_{Zn} 와 관련된 결함에 의한 것으로 보이며, 마지막으로 2.68 eV의 피크 D는 반사 측정값과 같은 위치로 ZnSe의 금지대폭을 보여준다.

본 연구에서 성장된 ZnSe는 비교적 양호한 발광특성과 구조적 특성을 보이는 것으로 판단되었지만, 광전류 분광법에 의한

평가를 통하여 이종 계면의 영향은 역시 완전히 배제되지 않았음을 알 수 있었다. 따라서 이러한 영향을 줄이기 위한 한 가지 제안으로, 결정성장 초기에 (계면부근에서) 성장 온도를 낮게 유지하며 일정 이상의 두께를 갖는 저온 버퍼층을 성장함으로써, 확산이나 계면층 형성에 의한 전체 박막에의 부정적 영향을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 생각한다.

4. 결 론

GaAs 기판 위에 분자선 에피택시법으로 성장한 ZnSe 박막의 다양한 특성들을 살펴보았다. 발광특성의 평가 결과로서는 저온에서는 주기에 속박된 엑시톤 발광을 관찰할 수 있었고 아주 약한 깊은 준위 발광을 보였다. 또한 측정 온도 변화를 통한 실험에서 균질하며 벌크 결정에 매우 가까운 우수한 광학적 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 그리고 XRD 측정 결과에서는 격자정수 부정합에 의한 옹측 옹력이 완화되어 있음을 확인하였고, 박막 내 전위 밀도가 $9.485 \times 10^7 \text{ dis/cm}^2$ 정도 됨을 알 수 있었다. 하지만 이러한 평가로 알 수 없었던 계면의 영향은 광전류 분광법을 통하여 평가하였으며 계면에서 기인하는 결함의 존재를 확인하였다. 이러한 다양한 평가를 통하여 보다 양질의 박막 성장을 위하여 ZnSe 박막의 성장 시에도 저온 버퍼층의 도입이 필요함에 대해 토의하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Babucke, P. Thiele, T. Prasse, V. Egorov, M. Rabe, and F. Henneberger, *J. Cryst. Growth* 159, 898-901, 1996.
- [2] T. Yao, *Jpn. J. Appl. Phys.* 25, L544, 1986.
- [3] S. Miwa, L. H. Kuo, K. Kimura, A. Ohtake, T. Yasuda, C. G. Jin, and T. Yao, *J. Cryst. Growth* 184/185, 41-45, 1998.
- [4] C. H. Su, S. Feth, D. Hirschfeld, T. M. Smith, L. J. Wang, M. P. Volz, and S. L. Lehoczky, *J. Cryst. Growth* 204, 41-51, 1999.
- [5] C. H. Su, S. Feth, L. J. wang, and S. L. Lehoczky, *J. Cryst. Growth* 224, 32-40, 2001.
- [6] K. Yoshino, H. Mikami, K. Imai, M. Yoneta, and T. Ikari, *Physica B* 302-303, 299-306, 2001.
- [7] G. Neu, M. Teisseire, P. Lemasson, H. Lahreche, N. Grandjean, F. Semond, B. Beaumont, I. Grzegory, S. Porowski, and R. Triboulet, *Physica B* 302-303, 39-53, 2001.
- [8] M. Yamaguchi, A. Yamamoto, and M. Kondo, *J. Appl. Phys.* 48, 5237, 1977.
- [9] T. Yao, M. Ogura, S. Matsuoka, and T. Morishita, *Jpn. J. Appl. Phys.* 22, L144, 1983.
- [10] J. C. Kim, H. Rho, L. M. Smith, H. E. Jackson, S. Lee, M. Dobrowolska, and J. K. Furdyna, *Appl. Phys. Lett.* 75, 214, 1999.
- [11] K. Wolf, S. Jilka, H. Sahin, H. Stanzl, T. Reisinger, A. Naumov, and W. Gebhardt, *J. Cryst. Growth* 152, 34-41, 1995.
- [12] G. E. Hite, D. T. F. Marple, M. Aven, and B. Segall, *Phys. Rev.* 156, 850, 1967.
- [13] Y. P. Varshni, *Physica* 34, 149, 1967.
- [14] L. Malikova, W. Krystek F. H. Pollak, N. Dai, A. Cavus, and M. C. Tamargo, *Phys. Rev. B* 54, 1819, 1996.
- [15] R. Bhargava, *Properties of Wide Bandgap II-VI semiconductors*, EMIS Datareviews Series No. 17 (INSPEC, The Institution of Electrical engineers, London, United Kingdom), p 117, 1997.
- [16] D. S. Chemla, S. Schmitt-Rink, and D. A. B. Miler, *Optical Nonlinearity and Instabilities in Semiconductors*, Academic Press, Boston, 1988.
- [17] S. Ten, F. Henneberger, M. Rab, and N. Peyghambarian, *Phys. Rev. B* 53, 12637, 1996.
- [18] S. Fujita, Y. Matsuda and A. Sasaki, *J. Cryst. Growth* 68, 231-236, 1984.
- [19] M. J. Kim, H. S. Lee, J. Y. Lee, T. W. Kim, K. H. Yoo and M. D. Kim *J. Materials Science* 39, pp. 323-327, 2004.
- [20] J. E. Ayers, *J. Cryst. Growth* 135, pp. 71-77, 1994.
- [21] D. Seghier, and H. P. Gislason, *Appl. Phys. Lett.* 71, 2295, 1997.
- [22] A. Souifi, R. Adhiri, R. Le Dantec, G. Guillot, P. Uusimaa, A. Rinta-Moykky and M. Pessa, *J. Appl. Phys.* 85, 7759, 1999.
- [23] A. D. Raisanen. L. J. Brillson, L. Vanzetti, A. Bonanni, and A. Franciosi, *Appl. Phys. Lett.* 66, 3301, 1995.

원고접수일 : 2005년 12월 20일

원고채택일 : 2006년 1월 6일

