

## Growth and characterization of the high quality ZnTe epilayers for optoelectronic devices

Yang-June Jung<sup>†</sup>, Dae-Jung Kim\*, Young-Moon Yu\* and Yong Dae Choi\*\*

Department of Physics, Mokpo National University, Muan 534-729, Korea

\*Natural Science Research Institute, Mokwon University, Taejeon 302-729, Korea

\*\*Department of Optical and Electronic Physics, Mokwon University, Taejeon 302-729, Korea

(Received March 6, 2003)

(Accepted May 14, 2003)

**Abstract** High quality zincblende ZnTe(100) epilayers have been grown on semi-insulating GaAs(100±2°) substrate by hot-wall epitaxy. To grow high quality ZnTe epilayers, the growth temperature dependence of the surface topography, the growth rate, and the crystalline properties were investigated. From the photoluminescence measured at 10 K, the light hole and heavy hole free exciton emissions splitted by thermal tensile strain were observed and their first excited state emissions were also measured. The low temperature doublet of the heavy hole free exciton is because of the energy separation between longitudinal exciton and transverse exciton due to exciton-polariton coupling.

**Key words** Hot-wall epitaxy, ZnTe epilayers, The crystalline properties, Photoluminescence

## 광전소자를 위한 고품질 ZnTe 단결정 박막의 성장과 특성

정양준<sup>†</sup>, 김대중\*, 유영문\*, 최용대\*\*

목포대학교 물리학과, 목포, 534-729

\*목원대학교 자연과학연구소, 대전, 302-729

\*\*목원대학교 광·전자물리학과, 대전, 302-729

(2003년 3월 10일 접수)

(2003년 5월 14일 심사완료)

**요약** zincblende 구조를 갖는 양질의 ZnTe(100) 박막을 GaAs(100±2°) 기판에 HWE법으로 성장하였다. 기판온도에 따른 표면상태와 성장률 그리고 결정성의 변화를 관측하였고, 기판온도가 470°C일 때 결정성이 가장 우수하였다. 10 K 광발광 측정으로부터 열적 인장스트레인에 의하여 분리된 가벼운 양공과 무거운 양공을 관측하였고 이들의 일차 들뜬상태를 관측하였다. 무거운 양공의 자유 엑시톤의 이중구조는 엑시톤-폴라리톤 결합에 의한 세로방향 엑시톤과 가로방향 엑시톤 사이의 에너지 차이 때문이다.

### 1. 서론

ZnTe와 다른 II-VI족 화합물 반도체 그리고 그들의 삼원화합물들은 청녹색 영역의 광전소자로의 응용 가능성이 높은 물질들이다. 이러한 물질들을 소자로 응용하기 위해서는 일차적으로 양질의 단결정 박막을 성장하는 것이 중요하다. 뿐만 아니라 그 물질들의 기본인자들에 대한 광범위한 정보를 알아내는 것도 중요하다. 최근의 ZnTe에 대한 연구는 주로 라만 산란을 포함한 광학적

특성에 대한 연구에 초점이 맞춰져왔다. 벌크 ZnTe의 전기 광학적 특성과 격자진동 특성은 이미 잘 알려져 있을지라도, 성장방법과 열적스트레인 효과의 차이 때문에 생기는 광발광(PL) 특성의 몇몇 불일치한 결과들이 보고되어 왔다[1, 2]. Zhang 등[2]은 벌크 그리고 ZnTe/GaAs와 ZnTe/GaSb 단결정 박막에 대한 광발광 피크 에너지와 다른 문헌의 피크 에너지를 비교하였다. 그리고 가장 최근의 보고는 Yu 등[3]에 의하여 자유엑시톤과 속박엑시톤의 피크 에너지와 세기 그리고 반치폭의 온도 의존성에 관한 보고가 있다. ZnTe의 라만 산란 연구는 Thomas 등[4]에 의하여 벌크와 단결정 박막에 대한 LO 포논의 압력에 따른 특성과 Camacho 등[5]에 의한 공명라만 산란에 관한 보고가 있다.

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-61-450-2322

Fax: +82-61-453-6738

E-mail: yjjung@mokpo.ac.kr

소자응용을 위한 양질의 ZnTe 단결정 박막 성장을 위해서 주로 GaAs(100) 기판이 사용되어 왔다[3, 6]. 이러한 이종접합구조는 격자부정합, 열팽창계수의 차이, 가전자대 불일치(valence mismatch), 분극 불일치(polarity mismatch) 등 몇몇 불일치한 양들이 나타나고, 성장한 단결정 박막에 결함을 일으켜 결정성에 심각한 영향을 미친다[7]. 경사진 GaAs 기판을( $100 \pm 2^\circ$ ) 사용하면 이종접합의 불일치한 양들 중에서 가전자대 불일치를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 경사진 GaAs 기판에 성장한 ZnTe 단결정 박막에 대한 연구는 매우 희박하여 MOVPE 법을 이용한 Wagner 등[8]의 광발광 특성에 대한 보고뿐이다.

본 연구에서는 기울어진 GaAs(100) 기판에 ZnTe 단결정 박막을 성장하였다. Nomarski 간섭현미경 사진 및 XRD(X-ray diffraction)와 DCRC(double-crystal rocking curve)를 측정하여 기판온도에 따른 박막의 표면상태와 결정성을 조사하였고, 저온에서 광발광 특성을 조사하여 강한 자유엑시톤 관련 발광을 관측하였다.

## 2. 실험 방법

ZnTe 단결정 박막을 성장하기 위하여 4" 반절연 GaAs( $100 \pm 2^\circ$ ) 기판을  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  크기로 잘라 사용하였다. 원료물질은 ZnTe(5 N, Kurt J. Lesker) 다결정 분말을 사용하였다. GaAs 기판은 트리클로로에틸렌, 아세톤 및 메틸 알코올에 각각 5분씩 초음파 세척한 후  $50\text{--}60^\circ\text{C}$ 의  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 3 : 1 : 1$ 의 용액 속에서 1분간 화학 에칭하였다. 그리고 흐르는 초순수(비저항 :  $18.6 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ )에 넣어 충분히 행구고, 잠시 메탄올에 담았다가 고순도 Ar 가스로 불어 건조시켰다. 그 후에 HWE(hot-wall epitaxy) 장치 속의 기판 지지대에 신속하게 GaAs 기판을 올려놓았다. 박막을 성장하기 전에 화학 에칭 후에도 남아 있는 잔여불순물과 산화막을 제거하기 위하여 진공도  $\sim 10^{-7}$  torr 속에서  $590^\circ\text{C}$ 의 온도로 20분간 열 에칭 후 서서히 성장 온도로 낮추었다. HWE 장치의 진공은 디퓨전 펌프와 로터리 펌프를 이용하여 뽑았고, 디퓨전 펌프와 진공챔버 사이에  $\text{LN}_2$  트랩을 사용하여 박막성장 중 진공도를  $2\text{--}7 \times 10^{-7}$  torr 정도로 유지하였다.

ZnTe 박막 성장은 원료부와 열벽부 온도를 각각  $560^\circ\text{C}$ 와  $530^\circ\text{C}$ 로 하여 성장률이  $1\text{--}3 \text{ \AA}/\text{sec}$ 가 되도록 유지하였고, 기판온도는  $320^\circ\text{C}$ 에서  $480^\circ\text{C}$ 까지 변화시켰다. 성장한 박막의 두께는 분광광도계로 상온 반사스펙트럼의 Franz-Keldysh 진동을 이용하여 측정하였다. 모든 박막의 두께는  $3\text{--}4 \mu\text{m}$ 를 유지하였다. 단결정 박막의 결정구조와 결정성을 조사하기 위하여 XRD와 DCRC를 측정

하였다. 광발광 특성을 조사하기 위하여 여기광원으로 He-Cd 레이저  $442 \text{ nm}$ 를 사용하였고, 분광기는 CCD(charge coupled device) 검출기가 장착된 초점거리  $0.85 \text{ m}$ 인 이중 모노크로메터(Spex, 1404)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 논의

양질의 ZnTe 박막을 기울어진 GaAs(100) 기판 위에 성장하였고, 성장한 ZnTe 박막의 결정구조를 알아보았다. Fig. 1은 대표적인 ZnTe/GaAs 박막의 XRD 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 ZnTe와 GaAs 각각의 (200)와 (400) 회절피크만이 강하게 관측되고 다른 피크는 관측되지 않는다. 이것으로부터 성장한 모든 ZnTe 박막이 (100) 방향의 zincblende 구조를 갖는 박막임을 알 수 있었다.

Fig. 2는 ZnTe/GaAs 단결정 박막의 기판온도에 따른 Nomarski 간섭현미경 사진이다. 육안으로 보기에 모든 표면은 거울면처럼 보이지만, 현미경 사진은 많은 피라미드 모양의 구조를 볼 수 있다. 기판온도가 낮으면 매우 높은 밀도의 작은 피라미드 모양의 구조가 보이지만 기판온도가 증가하면 밀도는 감소하고 크기는 증가한다. 그리고 기판온도가 증가함에 따라 이 피라미드의 높이는 감소하지만 폭은 증가하고, 한 쪽 방향을 따라 기울어져 정렬한 모양을 나타낸다. 기판온도가  $470^\circ\text{C}$ 가 되면 ZnTe

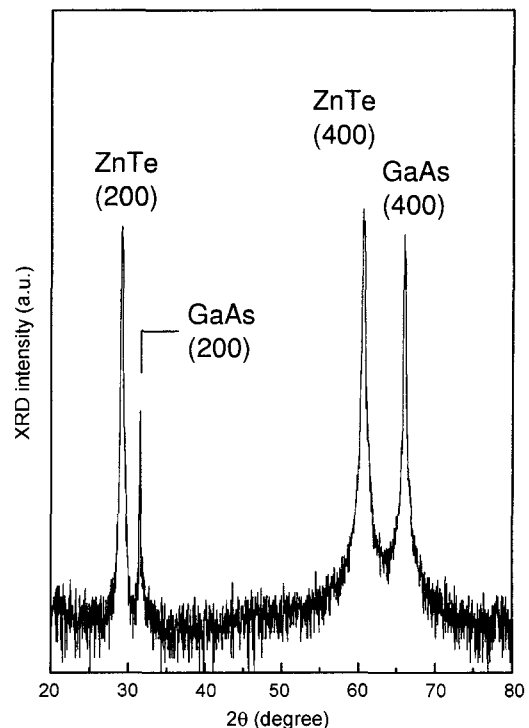


Fig. 1. Typical XRD spectrum for ZnTe/GaAs film.

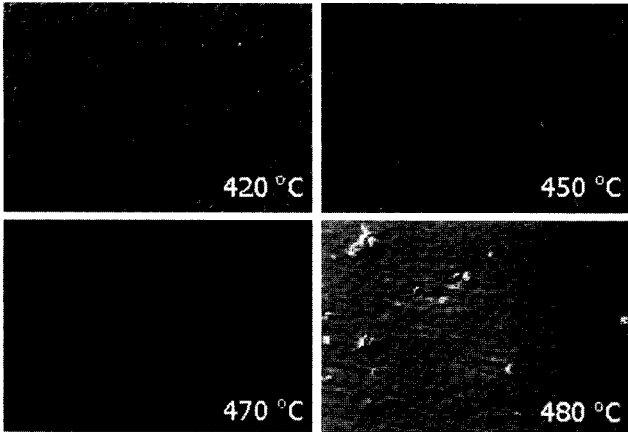


Fig. 2. Nomarski surface images for ZnTe/GaAs samples grown at different growth temperature.

박막의 표면은 매우 평평한 면을 나타내고, 결함과 관련된 구조는 거의 관측되지 않는다. 그러나 기판온도가 480°C 이상으로 높아지면 표면은 다시 거칠어지고, 결함과 관련된 구조들이 나타낸다.

Fig. 3은 기판온도에 따른 ZnTe 박막의 성장률을 나타낸다. 경사진 GaAs 기판에 성장한 ZnTe 박막의 성장률은 기판온도가 증가함에 따라 증가하다가 450°C 이상의 온도에서는 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 기판온도에 따른 성장률의 변화는 기울지 않은 GaAs 기판을 사용한 Nam 등의 결과와 많은 차이를 보인다[6]. Nam 등의 결과를 보면 낮은 기판온도에서 성장률이 높고 기판

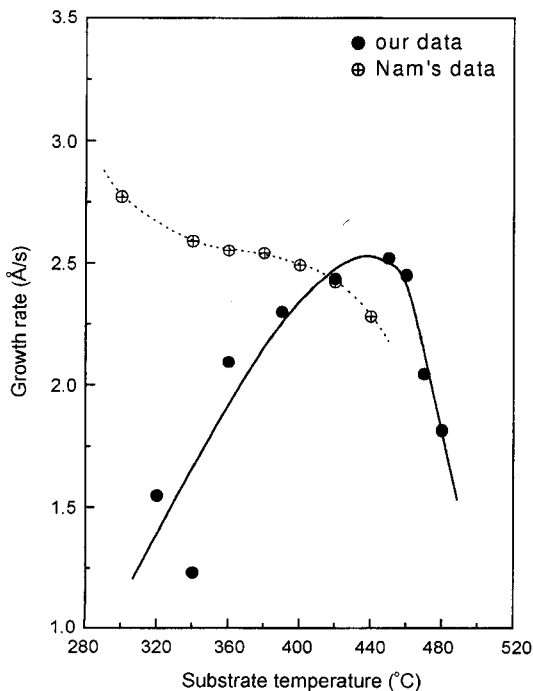


Fig. 3. Growth rate as a function of growth temperature.

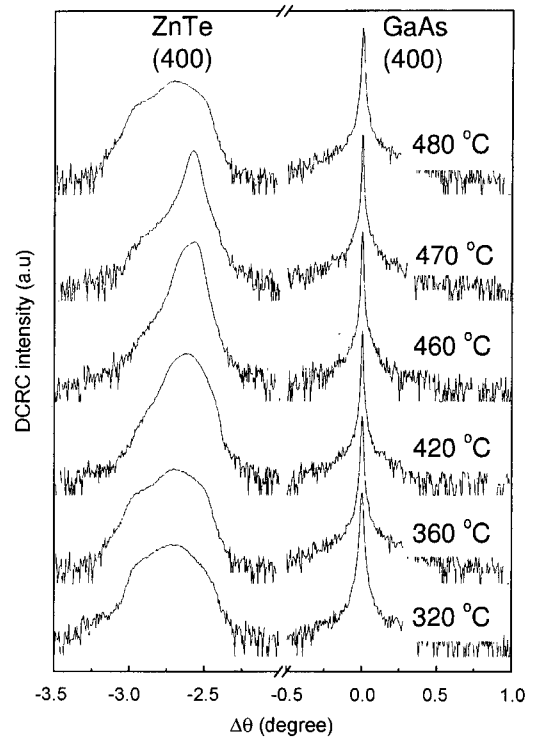


Fig. 4. DCRC spectra for ZnTe/GaAs epilayers grown at different growth temperature.

온도 증가에 따라 성장률이 지수 함수적으로 감소하며, 기판온도가 420°C 이상으로 증가하면 성장률은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 기판온도에 따른 성장률의 변화는 기판온도가 감소함에 따라 물리흡착이 증가하여 성장률이 증가하는 것과, 높은 기판온도에서 재증발 현상이 증가하여 성장률이 감소하는 것으로 설명될 수 있다.

Fig. 4는 기판온도에 따른 DCRC 스펙트럼을 나타낸다. 기판온도가 낮을 경우 ZnTe (400) 회절 피크는 상당히 넓은 반치폭을 갖고, XRD 회절 스펙트럼에서 분해되지 않던 여러 어깨 피크가 중첩된 형태를 갖는다. 이 어깨 피크들은 단결정 성장에서 자주 나타나는 작은 크기의 단결정들이 약간씩 틀어진 상태로 한 방향을 따라 정렬하는 모자이크 구조[9]와 비슷하다. 그리고 이러한 모자이크 구조는 경사진 기판을 사용한 박막에서 나타날 수 있다[10]. 기판온도가 증가하면서 주 피크 이외의 작은 모자이크 회절 피크는 감소하고, 기판온도가 470°C일 때 주 피크만이 강하게 나타나고 다른 모자이크 피크는 거의 나타나지 않으며, DCRC 반치폭은 220 arcsec로 매우 양호한 것을 볼 수 있다. 그리고 이보다 기판온도가 더욱 증가하면 표면상태가 거칠어지는 것과 같이 DCRC 반치폭도 증가한다.

III-V족 GaAs 기판에 II-VI족 ZnTe 단결정 박막을 성장할 경우 둘 사이에 생기는 여러 불일치한 양들 중에서

가전자대 불일치는 경사진 기판을 사용함으로써 감소시킬 수 있다. 그러나 기판이 기울어져 있기 때문에 그 위에 성장하는 ZnTe의 격자가 기울어질 수 있다. 앞에서 나타낸 기판온도에 따른 표면상태와 DCRC 스펙트럼의 변화는 낮은 기판온도에서 ZnTe 결정격자가 기울어져 성장한 것을 반영한다. 성장하는 박막의 격자가 기울어져 있다면 박막 성장 과정에서 물리흡착에 관여하는 물리적인 힘과 반발력에 변화가 생길 수 있고 퍼텐셜 에너지 골의 깊이도 변화할 것이다. 만약 격자의 기울어짐이 반발력의 증가로 나타난다면 물리흡착은 감소할 것이고 박막 성장은 화학흡착에 의하여 지배될 것이다.

ZnTe 단결정 박막이 성장할 때 격자의 기울어짐 때문에 물리흡착은 감소하고 화학흡착이 지배적이 된다고 가정하자. 이 경우 물리흡착물은 작고 흡착시간도 짧기 때문에 기판온도 변화에 대하여 물리흡착에 의한 성장률 변화는 거의 없을 것이다. 즉, 낮은 기판온도에서 약하게 물리흡착한 분자가 기판으로부터 충분한 활성화 에너지를 공급받지 못하여 화학흡착하기 전에 쉽게 이탈한다. 그러므로 성장률은 낮을 것이고 화학흡착한 ZnTe 분자들도 안정한 격자 위치를 점유하지 못할 것이다. 따라서 기판온도가 낮은 ZnTe 박막에서 모자이크 구조가 나타나고 표면에 많은 피라미드 구조가 나타난다고 설명할 수 있다. 한편 기판온도가 증가함에 따라 활성화 에너지가 증가하기 때문에 짧은 흡착시간 동안 표면에 머물러 있던 ZnTe 분자들이 화학흡착할 확률이 증가할 것이다. 그러므로 성장률은 증가하고 ZnTe 분자들은 안정한 격자 위치를 점유할 것이다. 따라서 박막 내에 모자이크 구조가 사라지고 표면상태는 좋아진다고 설명할 수 있다. 그리고 450°C 이상에서 성장률이 감소하는 것은 표면에서의 재증발이 증가하기 때문으로 설명할 수 있다. 480°C 이상에서 DCRC 반치폭이 증가하고 표면이 거칠고 결함과 관련된 구조가 나타나는 원인도 재증발 현상 때문으로 본다.

Fig. 5는 기판온도 470°C에서 성장한 ZnTe 단결정 박막의 에너지 띠 간격 근처의 10 K 광발광 스펙트럼이다. 모든 피크들은 명확하게 분리되어 관측할 수 있다. 자유엑시톤과 속박엑시톤 같은 엑시톤 관련 피크들이 에너지 띠 근처에서 폭이 좁고 세기가 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 그림에는 나타나지 않았지만 Y-밴드나 [11] 산소에 포획된 엑시톤 [12] 피크들의 깊은 준위 발광은 상대적으로 아주 약하였다. 광발광 스펙트럼의 모양은 앞선 연구자들이 [3, 8, 13] 보고한 모양과 매우 유사하며 피크 에너지도 거의 일치하였다. ZnTe의 자유엑시톤 피크들은 무거운 양공과 가벼운 양공 피크로 분리되어 나타난다. 이것은 GaAs 기판과 ZnTe 박막 사이의 열적 인장스트레인 때문이다 [3]. 2.3905 eV와 2.3855 eV의 피크는 각각 무거운 양공과 가벼운 양공의 일차 들뜬

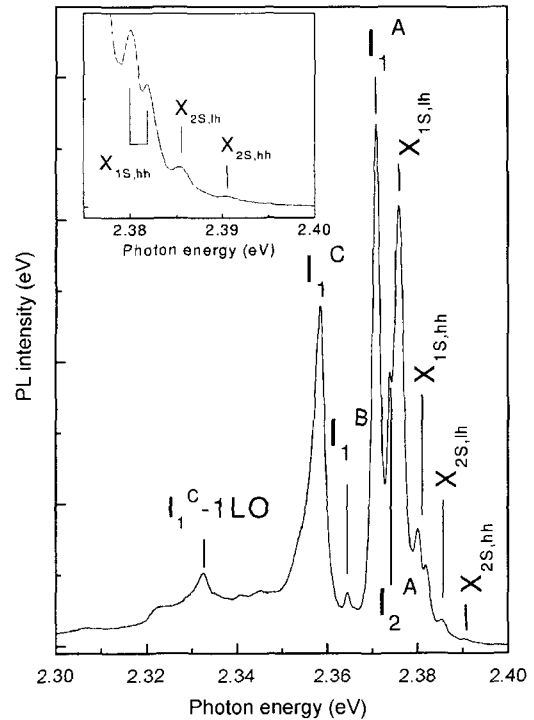


Fig. 5. Typical PL spectrum for ZnTe/GaAs epilayers. The inset shows the doublet structure of heavy hole free exciton of the ground state and the light hole and heavy hole free exciton ( $n=2$ ) of the first excited state.

상태  $X_{2S,hh}$ 와  $X_{2S,lh}$ 에 의한 피크이다. 2.3819 eV와 2.3801 eV의 피크는 무거운 양공의 자유엑시톤  $X_{1S,hh}$ 에 의한 피크로 이중구조를 나타내고, 2.3759 eV의 피크는 가벼운 양공의 자유엑시톤  $X_{1S,lh}$ 에 의한 피크이다. 이러한 강한 자유엑시톤 발광의 관측은 성장한 단결정 박막의 결정성이 매우 우수함을 의미하며 특히 무거운 양공의 일차 들뜬상태는 거의 보고되지 않았다. 엑시톤의 결합에너지는 수소원자모형의 들뜬상태 ( $n=2$ )와 바닥상태 ( $n=1$ )의 에너지 차이로부터 간단히 결정할 수 있다. 이렇게 결정한 ZnTe 단결정 박막의 엑시톤 결합에너지는 가벼운 양공과 무거운 양공에 대하여 각각 12.8 meV와 12.7 meV로 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 자유엑시톤 발광 피크보다 낮은 에너지 쪽의 속박엑시톤 피크들은 GaAs 기판으로부터 확산된 Ga과 As 원자와 관련된 2.3740 eV ( $I_2^A$ )와 2.3709 eV ( $I_1^A$ )의 피크가 나타나며 근원이 아직 보고되지 않은 2.3646 eV ( $I_1^B$ )와 2.3585 eV ( $I_1^C$ )의 중성 발광에 속박된 엑시톤 피크들이 나타난다.

Fig. 5에 삽화로 나타낸  $X_{1S,hh}$  피크가 이중구조를 갖는 원인은 엑시톤-폴라리톤 결합 때문으로 알려져 있다 [13].  $X_{1S,hh}$  피크 중에 2.3819 eV의 피크는 UPB(upper polariton branch)에서의 발광 피크이고 2.3801 eV의 피크는 LPB(lower polariton branch)에서의 발광 피크이다. UPB와 LPB의 분리 1.8 meV는 본질적으로 세로방향 엑시톤  $E_{XL}(0)$ 과 가로방향 엑시톤  $E_{XT}(0)$  사이의 차이 [ $E_{XL}(0) -$

$E_{XT}(0) = \Delta E_{LT} = 2\pi\beta^0 E_{XT}(0)$  때문이다. 여기서 분극성 파라미터(polarizability parameter)인  $\beta^0$ 는 에너지 띠 간격에서 측정된 흡수계수로부터 결정할 수 있다. 운동량에 대한 분산을 고려하지 않고 수소원자 모형의 엑시톤을 가정한다면,  $\beta^0$ 는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다[14].

$$2\pi\beta^0 = \frac{2\pi c \sqrt{\epsilon_s} R_b^* \alpha(E_g)}{\pi \epsilon_s E_g^2} \quad (1)$$

여기서  $R_b^*$ 는 엑시톤 결합에너지(12.8 meV)이고,  $\alpha(E_g)$ 는 에너지 띠 간격에서의 흡수계수이다. ZnTe 에너지 띠 간격(2.391 eV)에서의 흡수계수는  $\alpha(E_g) \approx 35000 \text{ cm}^{-1}$  [1] 정도이기 때문에  $2\pi\beta^0 \approx 3.1 \times 10^{-4}$ 이다. 그리고 무거운 양공과 가벼운 양공 엑시톤의 천이 확률은[15] 대략 3대 1 정도이기 때문에  $2\pi\beta_{mh}^0 \approx 2.3 \times 10^{-4}$ 와  $2\pi\beta_{ml}^0 \approx 0.8 \times 10^{-4}$ 로 어림잡을 수 있다. 따라서 스트레인이 없는 가로방향 엑시톤 에너지  $E_{XT}(0) = 2.3805 \text{ eV}$  [1]를 대입하여 계산하면,  $n=1$  상태의 무거운 양공 엑시톤에서  $\Delta E_{LT} = 0.5 \text{ meV}$ 의 에너지 분리가 생긴다.

#### 4. 결 론

HWE법을 이용하여 경사진 GaAs( $100 \pm 2^\circ$ ) 기판에 ZnTe 박막을 성장하였다. 성장한 모든 박막은 (100) 방향을 갖는 zincblende 구조로 성장하였다. 표면에 기울어진 피라미드 구조가 나타나고 기판온도 증가에 따라 성장률은 증가하다가 감소하고 DCRC 스펙트럼에 모자이크 구조가 나타났다. 이러한 것은 경사진 기판에 성장한 ZnTe 박막이 기울어져 성장하기 때문으로 설명되었다. 그리고 기판온도가  $470^\circ\text{C}$ 일 때 DCRC 반치폭 값이 가장 작은 값이었고 표면도 가장 좋았다. 10 K 광발광 측정으로부터 열적 인장스트레인에 의하여 분리된 가벼운 양공과 무거운 양공을 관측하였고 이들의 일차 들뜬상태를 관측하였다. 이러한 자유엑시톤의 관측으로부터 박막의 결정성이 매우 우수함을 알 수 있었다. 무거운 양공의 자유엑시톤의 이중구조는 엑시톤-폴라리톤 결합에 의한 세로방향 엑시톤과 가로방향 엑시톤 사이의 에너지 차이( $\Delta E_{LT} = 0.5 \text{ meV}$ ) 때문이다.

#### 감사의 글

“본 논문은 2002학년도 북포대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음”.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Leiderer, G. Jahn, M. Silberbauer, W. Kuhn, H.P. Wagner, W. Limmer and W. Gebhardt, “Investigation of strain in metalorganic vapor-phase epitaxy grown ZnTe layers by optical methods”, J. Appl. Phys. 70 (1991) 398.
- [2] Y. Zhang, B.J. Skromme and F.S. Turco-Sandroff, “Effects of thermal strain on the optical properties of heteroepitaxial ZnTe”, Phys. Rev. B 46 (1992) 3872 and references herein.
- [3] Y.-M. Yu, S. Nam, K.-S. Lee, Y.D. Choi and B.O., “Photoluminescence characteristics of ZnTe epilayers”, J. Appl. Phys. 90 (2001) 807.
- [4] R.J. Thomas, M.S. Boley, H.R. Chandrasekhar, M. Chandrasekhar, C. Parks, A.K. Ramdas, J. Han, M. Kobayashi and R.L. Gunshor, “Raman and modulated-reflectivity spectra of a strained pseudomorphic ZnTe epilayer on InAs under pressure”, Phys. Rev. B 49 (1994) 2181.
- [5] J. Camacho, A. Cantarero, I. Hernandez-Calderon and L. Gonzalez, “Raman spectroscopy and photoluminescence of ZnTe thin films grown on GaAs”, J. Appl. Phys. 92 (2002) 6014.
- [6] S. Nam, J. Rhee, B.O., K.-S. Lee, Y.D. Choi, G.-N. Jeon and C.-H. Lee, “Characterization and growth of high quality ZnTe epilayers by hot-wall epitaxy”, J. Crystal Growth 180 (1997) 47.
- [7] S.J.C. Irvine, A. Stafford and M.U. Ahmed, “Substrate/layer relationships in II-VIs”, J. Cryst. Growth 197 (1999) 616.
- [8] H.P. Wagner, W. Kuhn and W. Gebhardt, “Photoluminescence properties of MOVPE grown ZnTe layers on (100) GaAs and (100) GaSb”, J. Crystal Growth 101 (1990) 199.
- [9] B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction 2nd Edition (Addison-Wesley, 1978) p. 103.
- [10] V. Swaminathan and A. T. Macrander, Materials Aspects of GaAs and InP Based Structures (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1991).
- [11] T. Taguchi, T. Kusao and A. Hiraki, “Growth of high-purity ZnSe by sublimation THM and the characteristics of the Y and Z deep-level emission lines”, J. Cryst. Growth 72 (1985) 46.
- [12] M. Ekawa, Y. Kawakami, T. Taguchi and A. Hiraki, “Fabrication and photoluminescence properties of ZnTe and CdZnTe films by low pressure metalorganic chemical-vapour deposition”, J. Crystal Growth 93 (1988) 667.
- [13] H.P. Wagner, S. Lankes, K. Wolf, D. Lichtenberger, W. Kuhn, P. Link and W. Gebhardt, “Resonant excitation of intrinsic and shallow trap luminescence in MOVPE grown ZnTe layers”, J. Luminescence 52 (1992) 41.
- [14] D.D. Sell, S.E. Stokowski, R. Dingle and J.V. DiLorenzo, “Polariton reflectance and photoluminescence in high-purity GaAs”, Phys. Rev. B7 (1973) 4568.
- [15] F.H. Pollak and M. Cardona, “Piezo-electroreflectance in Ge, GaAs, and Si”, Phys. Rev. 172 (1968) 816.