

## Energy band gap of $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$ epilayer grown on GaAs(100) substrates

Yong Dae Choi<sup>†</sup>, Kab-Soo An, Kwang-Jae Lee, Seung-Gu Kim, Seok-Ju Shim, Hee-Joong Yun, Young-Moon Yu\*, Dae-Jung Kim\*\* and Yang-June Jung\*\*\*

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

*\*Department of Physics, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*

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

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

(Received February 14, 2003)

(Accepted June 9, 2003)

**Abstract** In this study,  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer of 0.7  $\mu m$ -thickness was grown on GaAs(100) substrate by using hot wall epitaxy. GaAs(100) substrate was removed from  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer by the selective etching solution. The crystal structure and the lattice constant of only  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer were investigated to be zincblende and 6.140  $\text{\AA}$  from X-ray diffraction pattern, respectively. Mn composition  $x$  of  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  epilayer was found to be 0.14 using this lattice constant and Vegard's law. The crystal quality of the epilayer was confirmed to be very good due to 256 arcsec-full-width at half-maximum of the double crystal rocking curve. The absorption spectra from the transmission ones were obtained to measure the band gap energy of  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer from 300 K to 10 K. With the decreasing temperature, strong absorption regions in the absorption spectra were shifted to higher energy side and the absorption peak meaning the free exciton formation appeared near the absorption edge. The band gap energy values of  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer at 0 K and 300 K were found to be almost 2.4947 eV and 2.330 eV from the temperature dependence of the free exciton peak position energy of  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer, respectively. The free exciton peak position energy of  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer without GaAs substrate was larger 15.4 meV than photoluminescence peak position energy at 10 K. This energy difference between two peaks was analysed to be Stokes shift.

**Key words**  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer, Absorption spectra, Band gap energy, Free exciton peak position energy

## GaAs(100) 기판 위에 성장된 $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$ 에피막의 띠 간격 에너지

최용대<sup>†</sup>, 안갑수, 이광재, 김성구, 심석주, 윤희중, 유영문\*, 김대중\*\*, 정양준\*\*\*

목원대학교 광·전자물리학과, 대전, 302-729

\*충남대학교 물리학과, 대전, 305-764

\*\*목원대학교 자연과학연구소, 대전, 302-729

\*\*\*목포대학교 물리학과, 목포, 534-729

(2003년 2월 14일 접수)

(2003년 6월 9일 심사완료)

**요약** 본 연구에서는 두께가 0.7  $\mu m$ 인  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막을 GaAs(100) 기판 위에 열벽 적층 성장하였다. 선택에칭 용액에 의하여 GaAs 기판이 제거된 X-선 회절 패턴으로부터  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 결정구조는 zincblende 이었으며 격자 상수는 6.140  $\text{\AA}$ 로 계산되었다. 이러한 격자상수 값과 Vegard 법칙으로부터 Mn의 조성비  $x=0.14$ 임을 알았다. 성장된 에피막의 결정성은 이중결정요동 곡선의 반폭치 값이 256 arcsec인 것으로부터 양호하다는 것이 확인되었다. 상온에서 10 K 까지  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 온도에 따른 띠 간격 에너지를 측정하기 위하여 투과 스펙트럼으로부터 흡수 스펙트럼이 얻어졌다. 온도가 감소할수록 흡수 스펙트럼에서 강하게 흡수가 일어나는 영역은 에너지가 큰 쪽을 향하여 이동하였고 흡수단 근처에서 자유 엑시톤 형성을 의미하는 흡수 피크가 생겨났다.  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 온도에 따른 자유 엑시톤 피크 에너지로부터 0 K와 300 K일 때 띠 간격 에너지는 각각 2.4947 eV와 2.330 eV로 구하여졌다. 10 K에서 기판이 제거된  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 흡수 스펙트럼의 자유 엑시톤 피크 에너지는 광발광 피크 에너지보다 15.4 meV 정도 크다. 이 에너지 차이는 흡수 스펙트럼과 발광 피크 사이의 에너지 차이를 의미하는 Stokes shift를 나타낸다.

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-42-829-7552

Fax: +82-42-823-0639

E-mail: ydchoi@mokwon.ac.kr

## 1. 서 론

$Zn_{1-x}Mn_xTe$ 는 최근 들어 많이 연구되고 있는 희박자성반도체(diluted magnetic semiconductor, DMS)의 일종으로 양이온인  $Zn^{2+}$ 를  $Mn^{2+}$ 으로 치환시켜 성장한다. 일반적인 삼원 화합물 반도체와 같이 DMS는 전이금속 이온 조성비를 변화시켜 에너지 띠 간격을 바꿀 수 있고, 여러 가지 흥미로운 자기적 특성을 보이는 것으로 보고되고 있다[1, 2]. 치환된 전이금속 이온의 자기 모멘트와 띠 전자의 스핀 사이에 s,p-d 교환 상호작용은 자기장 하에서 거대한 제만 갈라지기(giant Zeeman splitting)와 거대한 페러데이 돌기(giant Faraday rotation)와 같은 자기광학적 효과를 야기시킨다.

$Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막에 대한 연구는 아직은 미약한 점이 많다. 그러나 지금까지 발표된 내용을 보면 Abramof 등이 열벽 적층 성장법(hot wall epitaxy, HWE)을 이용하여  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막을 성장하여 최초로 보고하였고[3], 분자선 증착법으로 성장한 박막에서는 반사율 차이 분광학(reflectance difference spectroscopy)에 관한 연구[4]와 자기적 특성에 관한 연구[5], 그리고 펄스 레이저 증착법으로 성장한 박막에서 구조 및 자기적 특성에 관한 연구[6]가 보고되었다. 최근에 본 연구 그룹에서는 HWE법을 이용하여  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막을 GaAs(100) 기판 위에 성장하여 Mn의 조성비  $x$ 에 따라 광발광의 특성을 보고하였다[7]. 한편 Mn의 성분비  $x$ 에 따라 벌크  $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 의 띠 간격 에너지 값은 반사스펙트럼을 측정하여 Mertins 등[2]이 발표한 바 있으나 에피층인  $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 의 띠 간격 에너지 값에 대해서는 지금까지 발표된 결과가 거의 없다.

그러므로 본 연구에서는 지금까지 박막 형태로는 보고된 바가 없는  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막의 띠 간격 에너지 값을 구하기 위하여 HWE법으로 GaAs(100) 기판 위에  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  박막을 성장하였다. 성장된 에피막은 기판을 제거한 후 투과 스펙트럼을 측정하여 띠 간격 에너지를 구하고 또한 광발광 스펙트럼의 엑시톤 관련 피크 에너지와 비교하고자 한다.

## 2. 실험 방법

HWE법을 이용하여 GaAs(100) 기판에 Mn 조성비  $x$ 가 0.14인  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막을 성장하였다. GaAs 기판은 에피막을 성장하기 전에 화학적 에칭과 열 에칭을 하였다. 화학적 에칭은 끓는 트리클로로에틸렌 용액에서 2차례 세척하고 아세톤과 메탄올에 각각 5분씩 초음파 세척을 하였다. 그 다음에 50~60°C의 에칭용액( $1H_2O_2 : 1H_2O : 3H_2SO_4$ )에서 1분간 에칭하고 초순수에 2~3분

정도 헹군 후 고순도의 Ar 가스로 불어 건조시켰다. 그 후에 HWE 장치 속의 기판 지지대에 GaAs 기판을 올려놓았다. 또 GaAs 기판은 박막을 성장하기 전에 화학 에칭 후에도 남아 있는 잔여불순물과 산화막을 제거하기 위하여  $\sim 10^{-7}$  torr의 진공도와 590°C에서 20분간 열 에칭한 후 성장 온도로 서서히 냉각시켰다.

시료는 ZnTe 5 N(99.999%)과 MnTe 3 N(99.9%)을 사용하였다. Mn의 조성비가  $x=0.14$ 인 시료를 얻기 위하여 기판부 온도는 320°C, 열벽부는 610°C, 원료부는 850°C 그리고 보충부는 530°C로 하였다. 이렇게 성장된 에피막의 두께는 반사 스펙트럼으로부터 대개 0.7  $\mu m$ 임을 확인할 수 있었고 에피막의 표면 관찰을 위하여 Nomarski 간섭현미경을 사용하였다. 구조적 특성으로서  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 결정구조, 결정성과 격자상수를 조사하기 위하여 X선 회절(X-ray diffractometer, XRD) 분석장치와 이중결정요동곡선(double crystal rocking curve, DCRC)장치를 사용하였다. 투과 스펙트럼을 측정하기 위하여  $Al_2O_3$  투명 기판에 에폭시를 이용하여  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te/GaAs$  에피막을 붙이고 일차적으로 GaAs 기판을 수십  $\mu m$ 가 되도록 갈아낸 후 선택 에칭용액( $100H_2O_2 : 1NH_4OH$ )으로 GaAs 기판을 완전히 제거하여 순수한  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막만을 얻을 수 있었다. 투과 스펙트럼은 분광광도계를 사용하여 입사광자의 파장이 200 nm~900 nm 범위의 빛을 투과시켜 측정하였고 온도에 따른 투과 스펙트럼의 변화를 관찰하기 위하여 저온장치에 박막을 장착한 후 10 K~300 K까지 변화를 주었다. 엑시톤 관련 광발광 특성을 알아보기 위해서 여기광으로는 He-Cd 레이저(442 nm)를 사용하였으며 측정온도는 10 K이었다. 그리고 광발광 신호는 초점거리  $f$ 가 0.85 m인 이중 분광기로 분광하여 CCD 검출기를 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 논의

본 연구는 GaAs (100) 기판 위에 성장한  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 띠 간격 에너지를 구하기 위하여 GaAs 기판을 제거한 후 투과 스펙트럼을 측정하였다. 그리고 기판이 제거된  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 결정구조와 격자상수 및 결정성을 조사하기 위하여 XRD와 DCRC를 측정하였다. Fig. 1(a)는 GaAs (100) 기판이 제거된 Mn 조성비  $x$ 가 0.14인  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피층의 XRD 회절피크를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 약 29도와 61도 근처에서  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 (200)와 (400) 피크가 강하게 나타난다. 그리고 투과 스펙트럼 측정에 영향을 끼치지 못하는 가장자리 영역에 아직 남아있는 기판물질로부터 생기는 GaAs (400) 피크가 나타나고 있다. 본 연구에서 성장한 0.7  $\mu m$ 의  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막은 (200)

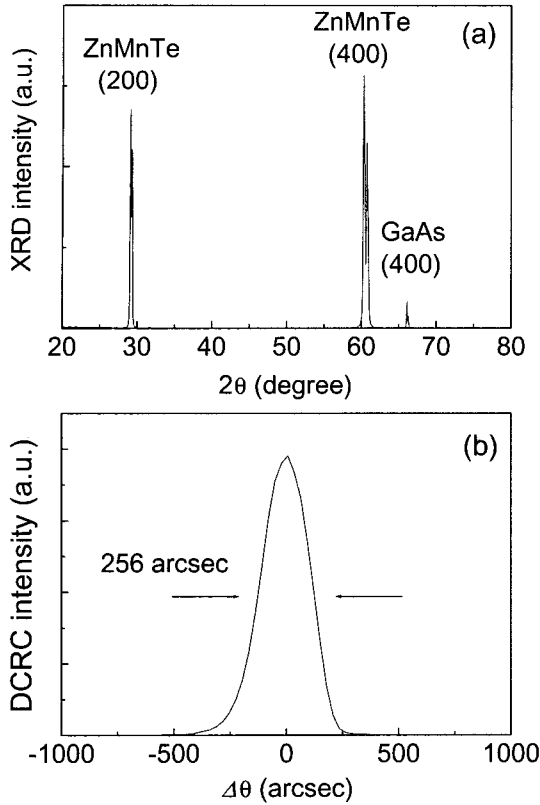


Fig. 1. (a) X-ray diffraction spectrum and (b) double crystal rocking curve of  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer. This epilayer is a free standing film which the GaAs substrate is removed mechanically and chemically.

와 (400)의 회절피크가 관측되는 것으로 보아 (100) 방향의 zincblende 결정구조임을 알 수 있으며, 기판이 제거된 이후에도 (200)와 (400) 피크의 세기가 강한 것으로 보아 에피막의 결정구조가 잘 보존되고 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막의 격자상수( $a_1$ )는 다음과 같은 식[8]

$$a_1 = \frac{[h^2 + k^2 + l^2]^{1/2}}{2\sin\theta} \lambda \quad (1)$$

을 이용하여 6.140 Å으로 계산되었다. 여기서  $\theta$ 는  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막의 XRD (400) 회절피크 값 60.293도를 이용하였고  $\lambda$ 는 X-선의 파장 1.54187 Å을 대입하였다. Mn이 Zn 격자점을 대신하여 치환형으로 고용될 경우 Mn의 이온적경(1.60 Å)이 Zn의 이온적경(1.48 Å)보다 크기 때문에 Mn이 혼합된  $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 의 격자상수는 ZnTe의 격자상수(6.103 Å)[9] 보다 커지게 된다. 이전에 보고된 결과에 의하면  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피막은 Mn의 조성비  $x$  값에 따라 격자상수( $a_1$ )는 선형으로 증가하는 Vegard 법칙( $a_1 = 6.1059 + 0.2403x$ )을 잘 만족하고 있다[7]. 따라서 XRD 측정으로부터 결정한 격자상수 값을 이용하여 본 연구의 에피막의 Mn의 조성비  $x$ 는

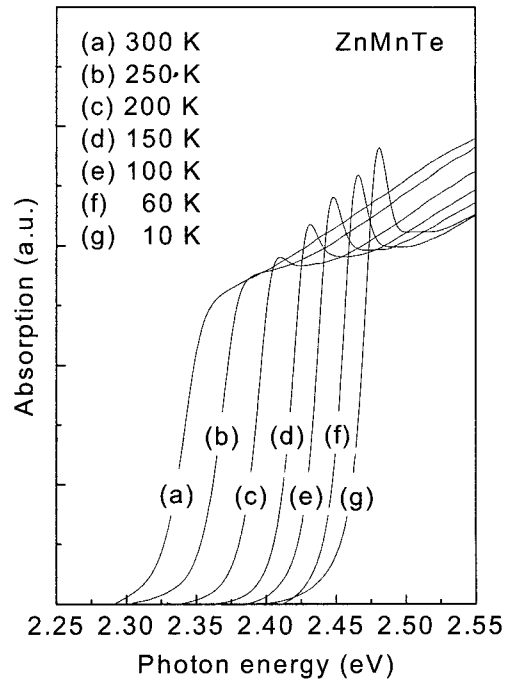


Fig. 2. Temperature dependence of absorption spectra for  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  epilayer.

약 0.14 정도가 됨을 알 수 있었다. Fig. 1(b)는 GaAs 기판을 제거하고 두께가 약 0.7 μm인  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막만의 결정성을 살펴보기 위하여 측정한 DCRC 스펙트럼을 나타낸다. 이 피크의 반폭치 값이 256 arcsec인 것으로부터  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 결정성이 대단히 양호함을 알 수 있다.

Fig. 2는  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 상온에서 10 K까지의 온도에 따른 흡수 스펙트럼의 변화를 나타낸다. 이 흡수 스펙트럼은 GaAs 기판을 제거하고 측정한  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 투과 스펙트럼으로부터 얻어졌다. 일반적으로 얇은 박막의 투과 스펙트럼은 입사하는 광자의 에너지가 박막의 띠 간격 에너지보다 작을 때 박막을 투과하면서 간섭효과에 의한 파장에 따른 주기적인 간섭무늬를 만들고, 광자의 에너지가 증가하면서 약하게 흡수되다가 박막의 띠 간격 에너지 근처에서 급격하게 흡수가 일어난다. 그리고 띠 간격 에너지보다 에너지가 큰 광자는 모두 흡수된다. 투과 스펙트럼의 주기적인 간섭무늬는 박막의 표면 상태와 두께의 균일성을 반영하는데 박막의 표면이 거칠거나 두께가 고르지 못하면 이들 간섭무늬는 찌그러지거나 혹은 진동 폭이 매우 작게 된다. 그리고 투과율도 현저히 저하되는 특징을 가지고 있다. 투과 스펙트럼으로부터 파장에 따른 흡수계수를 결정하기 위해서는 다음과 같은 관계식을 사용하여야 한다[10].

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

여기서  $I_0$ 는 입사된 빛의 세기,  $\alpha$ 는 흡수계수이고  $x$ 는 박

막의 두께이다. 더 구체적으로 말하자면 Fig. 2는 (1) 식으로부터 파장에 따른 흡수계수  $\alpha$  값을 구하여 그려진 흡수 스펙트럼을 나타낸다. Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te 에피막의 온도에 따른 흡수 스펙트럼에서 강한 흡수가 일어나는 영역은 온도가 감소할수록 에너지가 큰 쪽을 향하여 이동하고 있다. 또 온도가 감소할수록 각 흡수 스펙트럼의 흡수단 근처에서 자유 엑시톤 형성을 의미하는 흡수 피크가 생겨나고 이 피크는 온도 감소에 따라 세기는 커지고 계속적으로 고에너지 쪽으로 이동함을 나타내고 있다. Fig. 2에서 상온(300 K) 흡수 스펙트럼의 흡수단은 직접천이형 에너지 띵 간격에서 나타나는 모양을 갖는다. 따라서 본 연구의 Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te 에피막은 직접천이형 에너지 띵 간격을 갖는 반도체임을 알 수 있다. 그리고 상온 띵 간격 에너지는 직접천이형 에너지 띵 간격을 갖는 물질의 띵 간격 에너지와 파장에 따른 흡수계수 사이의 다음과 같은 관계식을 이용하여 결정할 수 있다[11].

$$\alpha = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3)$$

여기서  $E_g$ 는 띵 간격 에너지이고,  $A$ 는 물질의 특성에 의존하는 상수이다. 투과 측정으로부터 구한 파장에 따른 흡수계수를 식 (2)에 대입한 후 양변을 제곱하여 광자의 에너지( $h\nu$ )에 따른  $(\alpha h\nu)^2$ 의 변화가 선형적으로 변하는 구간을 외삽하여  $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 인 곳에서의  $h\nu$  값을 상온 에너지 띵 간격을 2.330 eV로 결정하였다. 그러나 온도가 감소하면 자유엑시톤 피크가 에너지 띵 간격에

의한 흡수 스펙트럼과 중첩되어 나타나기 때문에 직접적으로 에너지 띵 간격을 결정할 수는 없다. 어쨌든 자유엑시톤의 결합에너지는 온도 변화에 무관하기 때문에 자유엑시톤의 온도 의존성은 에너지 띵 간격의 온도 의존성을 따른다. 상온에서의 에너지 띵 간격과 그 외 온도에서의 자유엑시톤 피크 에너지를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3은 Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te 에피막의 온도에 따른 자유 엑시톤 피크 에너지의 변화를 나타낸다. 자유 엑시톤 피크 에너지는 저온 영역에서 거의 변화가 없다가 온도 증가에 따라 급격한 변화를 보이고 100 K 이상에서는 온도 증가에 따라 거의 선형적으로 감소한다. Fig. 3의 실선은 다음과 같은 Varshni 식[12]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (4)$$

으로 피팅하여 얻은 것이며 온도 의존성이 (4) 식에 의하여 잘 설명되고 있음을 나타내고 있다. 여기서 피팅하여 얻은 Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te 에피막의 자유 엑시톤 피크 에너지는 온도  $T = 0$  K일 때 2.482 eV로 구하여졌다. 이 값에 ZnTe의 엑시톤 속박 에너지 12.7 meV를 고려하면 온도  $T = 0$  K에서 Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te의 띵 간격 에너지는 2.4947 meV로 Mertins의 반사 측정으로 결정된 값[2]과 거의 비슷한 값을 나타내었다. 그리고 상수값  $\alpha = 7.2 \times 10^{-4}$  eV/K와  $\beta = 1.04 \times 10^2$  K로 피팅되었다. 300 K에서 에너지 띵 간격은 자유 엑시톤의 온도 의존성을 나타내

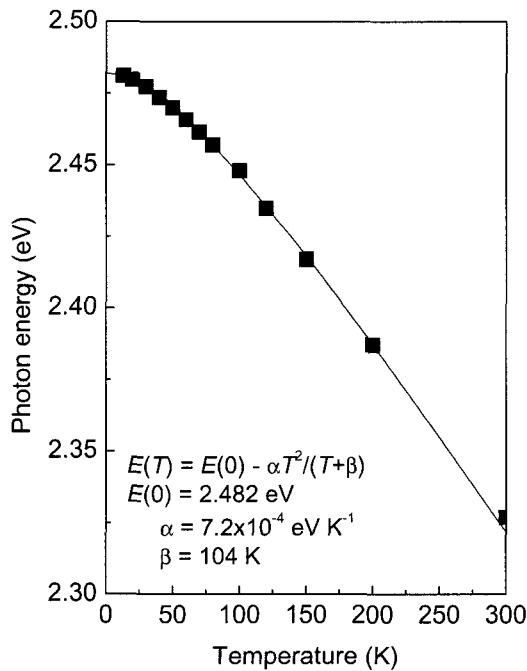


Fig. 3. Temperature dependence of free exciton peak energy for Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te epilayer. The solid line is fitted by Varshni's equation.

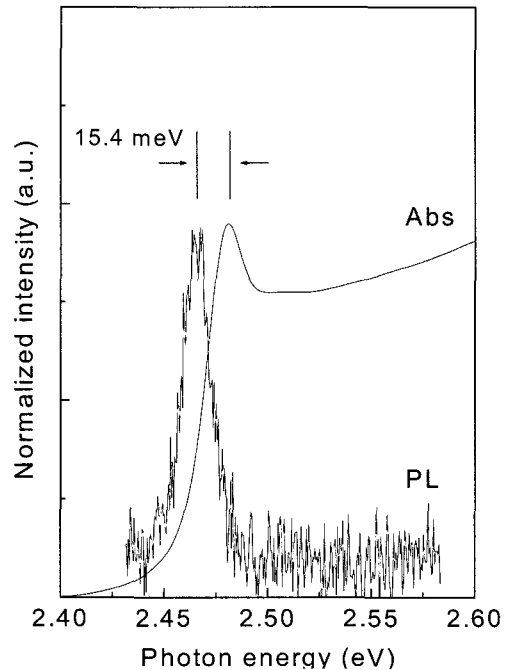


Fig. 4. Photoluminescence and absorption spectra at 10 K for a free standing Zn<sub>0.86</sub>Mn<sub>0.14</sub>Te epilayer.

는 실선보다 10 meV 정도 크다. 이와 같은 차이는 자유 엑시톤의 결합에너지 때문으로 볼 수 있다.

Fig. 4는 10 K에서 기판이 제거된  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 흡수 스펙트럼과 광발광 스펙트럼을 나타낸다. 흡수 스펙트럼의 자유 엑시톤 피크 에너지는 광발광 피크 에너지 보다 15.4 meV 정도 크다. 따라서  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 발광 피크(2.466 eV)는 약하게 속박된 자유 엑시톤과 관련된 것으로 볼 수 있다. 그리고 15.4 meV의 에너지 차이는 흡수 스펙트럼과 발광 피크 사이의 에너지 차이를 의미하는 Stokes shift를 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 연구는 지금까지 보고된 바가 거의 없는 DMS  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  에피층의 띠 간격 에너지를 구하기 위하여 시도되었다. 에피막은 HWE 방법으로 GaAs (100) 기판 위에 두께 0.7  $\mu m$ 로 성장되었다. 본 연구의 목적상 에피막으로부터 GaAs 기판을 제거하고 먼저 XRD와 DCRC 등을 이용하여 에피막의 결정구조와 결정성을 각각 조사하였다. 기판이 제거된 에피막은 (200)와 (400)의 회절 피크가 관측되는 것으로 보아 zincblende 결정구조이고 격자상수는 6.140 Å임을 알았다. 이러한 격자상수 값과 Vegard 법칙으로부터 본 연구의 시료는 Mn의 조성비  $x$ 가 0.14인  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막이 성장되었음을 알았다. GaAs 기판이 제거된 상태에서  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  박막의 DCRC 피크의 반폭치 값이 256 arcsec인 것으로부터 결정성이 대단히 양호함을 알 수 있었다.

$Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 띠 간격 에너지를 구하기 위해서 측정된 흡수 스펙트럼에서 강한 흡수가 일어나는 영역은 온도가 감소할수록 에너지가 큰 쪽을 향하여 이동하였다. 또한 상온으로부터 온도가 낮아질 때 각 흡수 스펙트럼의 흡수단 근처에서는 자유 엑시톤 형성을 의미하는 흡수 피크가 생겨나 피크의 세기는 커지면서 고에너지 쪽으로 이동하였다. 상온 흡수 스펙트럼의 흡수단으로부터는  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막이 직접천이형 에너지 띠 간격을 갖는 반도체임을 알 수 있었고 흡수 스펙트럼의 자유 엑시톤 피크 에너지로부터  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 띠 간격에너지는 0 K에서 2.4947 eV이고 300 K에서는 2.330 eV임을 알 수 있었다. 10 K에서 기판이 제거된  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  에피막의 흡수 스펙트럼의 자유 엑시톤 피크 에너지는 광발광 피크 에너지보다 15.4 meV 정도 크다. 이러한 에너지 차이는 흡수 스펙트럼과 발광

피크 사이의 에너지 차이를 의미하는 Stokes shift를 나타낸다.

#### 감사의 글

“본 논문은 2001년도 목원대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행되었음”.

#### 참 고 문 헌

- [1] J.K. Furdyna, “Diluted magnetic semiconductors”, J. Appl. Phys. 64 (1988) R29.
- [2] H.-C. Mertins, H.-E. Gumlich and Ch Jung, “Bandgap of  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  : nonlinear dependence on composition and temperature”, Semicond. Sci. Technol. 8 (1993) 1634.
- [3] E. Abramof, A. Pesek, P. Juza, H. Sitter, T. Fromherz and W. Jantsch, “Growth and characterization of  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  epilayers grown by hot wall epitaxy on (001)GaAs substrates”, Appl. Phys. Lett. 60 (1992) 2368.
- [4] A. Bonanni, K. Hingerl, W. Hilber, D. Stifter and H. Sitter, “In situ reflectance difference spectroscopy of intra-Mn transitions in highly N-doped II-VI diluted magnetic semiconductors”, J. Crystal Growth 214/215 (2000) 163.
- [5] A. Stachow-Wojcik, W. Mac, A. Twardowski, G. Karczewski, E. Janik, T. Wojtowicz, J. Kossut and E. Dynowska, “Magnetic Properties of  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  and  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  epilayers with high concentration of Mn”, Phys. Stat. Sol. 177 (2000) 555.
- [6] H.J. Masterson, J.G. Lunney and J.M.D. Coey, “Investigation into the magnetic properties of  $Zn_{0.86}Mn_{0.14}Te$  thin films by the Faraday effect”, J. Appl. Phys. 81 (1997) 799.
- [7] Y.-M. Yu, Byungwung O, M.-Y. Yoon, J. B. Kim and Y. D. Choi, “Effect of Mn concentration on photoluminescence characteristics of  $Zn_{1-x}Mn_xTe$  epilayers”, Thin Solid Films 426 (2003) 265.
- [8] B.D. Cullity, “Elements of X-ray diffraction”, (Addison-Wesley, Melon Park, 1978).
- [9] Landolt-Bornstein, “Numerical data and function relationships in science and technology”, Vol 17, edited by O. Madelung, M. Schulz, and H. Weiss (Springer, Berlin, 1982).
- [10] C. F. Klingshirm, “Semiconductor Optics” (Springer, 1995).
- [11] J.I. Pankove, “Optical Processes in Semiconductors” (Dover Publications, Inc., New York, 1971) 36.
- [12] ibid p.27.