

Growth and characterization of diluted magnetic $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayers

M.-Y. Yoon[†], Y.-M. Yu*, J. K. Park*, S. Nam*, Byungsung O*, P.-Y. Yu**, Y.-J. Jung*** and Y. D. Choi****

Department of Information and Communication Engineering, Joongbu University, Kumsan 312-702, Korea

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

***Department of Physics, Suncheon National University, Suncheon 540-742, Korea*

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

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

(Received March 3, 2001)

Abstract In this study, diluted magnetic $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayers were grown on GaAs (100) substrates by hot-wall epitaxy, and their characteristics were systematically examined. The maximum Mn composition of the $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayers was 0.97. The crystallographic orientation was toward $\langle 100 \rangle$ and the structure of the $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayers was the zincblende structure, identical to those of the GaAs substrate. With increasing the substrate temperature (350–400°C), Mn composition increased (0.02–0.23) and the quality of the epilayers became worse. The lattice constants increased linearly with increasing Mn composition, but the band gap energy increased nonlinearly with increasing x .

희박 자성 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 성장과 특성

윤만영[†], 유영문*, 박재규*, 남성문*, 오병성*, 유평열**, 정양준***, 최용대****

중부대학교 정보공학부, 금산, 312-702

*충남대학교 물리학과, 대전, 305-764

**순천대학교 물리학과, 순천, 540-742

***목포대학교 물리학과, 목포, 534-729

****목원대학교 광·전자물리학과, 대전, 302-729

(2001년 3월 3일 접수)

요약 본 연구에서는 열벽 적층 성장법으로 GaAs (100) 기판 위에 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 성장하여 그 특성을 조사하였다. $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 Mn 조성비는 $x = 0.97$ 까지 얻을 수 있었으며 성장된 시료의 결정구조는 징크블렌드이었다. 성장된 면은 GaAs (100) 기판과 동일한 방향으로 성장되었다. 성장시 기판 온도가 350°C에서 400°C로 증가함에 따라 Mn 조성비 x 는 0.02에서 0.23으로 증가하였다. $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 격자상수는 Mn 조성비 x 가 증가할수록 선형으로 증가하였고 띠 간격 에너지는 x 에 대하여 비선형으로 증가하였다.

1. 서론

Mn을 기반으로 하는 II-VI족 화합물 반도체 $X_{1-x}Mn_xY^VI$ ($X = Cd, Zn; Y = S, Se, Te$)는 가장 이상적인 희박 자성 반도체(diluted magnetic semiconductor, DMS) 혹은 반자성 반도체(semimagnetic semiconductor)로서 잘

알려져 있다. $X_{1-x}Mn_xY^VI$ 합금에서 철이 금속인 Mn은 $X^II Y^VI$ 화합물 반도체의 II족 양이온 원소의 일부와 치환되어 $Mn^{2+}(3d^5)$ 형태를 갖는다. 이와 같이 치환된 Mn^{2+} 이온은 $X^II Y^VI$ 의 주구성 물질에 결정구조에 영향을 주지 않고 상당한 양이 혼합될 수 있고 전기적으로는 중성이지만 비교적 큰 자기모멘트를 가지고 있어서 희박 자성 반도체로 만들어지는데 중요한 역할을 담당하고 있다. 이러한 Mn^{2+} 이온이 존재하고 있는 희박 자성 반도체는 띠 내의 전자와 자성을 갖는 국부적인 모멘트 사이의 스핀-스핀 교환 작용에 의하여 새로운 전기광학적 특성이 있기 때문에

[†]Corresponding author

Tel: 82-41-750-6635

Fax: 82-41-750-6648

E-mail: myyoon@joongbu.ac.kr

최근 많은 관심이 집중되고 있는 물질이다[1, 2].

희박 자성 반도체 중 대표적인 연구 중심 대상 물질로 삼고 있는 $ZnMnTe$ 에피층의 성장은 주로 분자선 증착법(molecular-beam epitaxy, MBE)이나 유기 금속 기상 증착법(metalorganic vapor phase epitaxy, MOVPE) 등을 이용하고 있다. 유기 금속 기상 증착법을 이용한 Tromson-Carli 등의 연구 결과에 의하면 고품질의 $ZnMnTe$ 에피층의 결정성은 GaAs (100)면 기판 위에서 초기에 형성되는 ZnTe (111) 층에 Mn이 들어갈 때 성장되는 것으로 보고하고 있다[3]. 또한 Ferrand 등은 MBE를 이용하여 질소가 주입된 p-형 $ZnMnTe$ 에피층을 성장하여 정공과 강자성과의 상호 작용이 유도되고 있음을 발표하였다[4]. 이외에도 열벽 적층 성장법(hot-wall epitaxy, HWE)이 고품질의 ZnTe나 ZnS 에피층을 성장하는데 사용되었기 때문에[5, 6] Mn을 기반으로 하는 II-VI족 화합물 반도체의 희박 자성 반도체 에피층의 성장에 열벽 적층 성장법이 일부 이용되고 있다[7].

본 연구에서는 열벽 적층 성장법으로 GaAs (100) 기판 위에 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 성장하여 Mn 조성비 x 의 온도 의존성과 에피층의 특성을 조사하기 위하여 수행하였다.

2. 실험

Fig. 1은 본 연구의 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 성장하기 위하여 자체 제작된 열벽 적층 성장장치 중 성장로의 단면을 나타낸 것이다. Fig. 1과 같이 성장로는 기판부, 열벽부, 원료부, 그리고 도펀트부로 구성되어 있다. 이들 4부분의 온도는 성장 시에 각각 독립적으로 온도 조절이 가능하도록 하였다. 본 연구에서 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 성장하기 위하여 사용한 기판은 Cr-도핑된 반질연 GaAs (100) 기판이었다. 에피층 시료 제작의 원료 물질로서는 순도가 각각 5N(99.999%)인 ZnTe 다결정 분말과 Mn 다결정 분말을 사용하였다. 성장 시에 Mn 분말은 원료부에 놓았고 ZnTe 분말은 도펀트부에 각각 놓았다. 본 연구에서 사용한 GaAs (100) 기판은 트리클로로에틸렌 용액에서 세정하여 보관하였고, 성장할 때에 아세톤, 메탄올 순으로 초음파 세척한 후 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O = 3:1:1$ 의 용액에서 1분간 화학에칭을 하였다. 그리고 기판을 성장 챔버에 넣은 후, 기판 표면에 남아 있을 수 있는 산화막과 잔여 흡착물을 제거하기 위하여 챔버 내에서 기판을 열에칭하였다. 열에칭은 $590^\circ C$ 에서 20분간 실시하였다. $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 성장하기 위하여 주어진 기판의 온도는 $340\sim 400^\circ C$, Mn의 온도는 $660\sim 820^\circ C$, ZnTe의 온도는 $550\sim 630^\circ C$ 이었으며, 성장시 진공도는 대개 8×10^{-7} torr 이었다. 성장된 박막의 두께는 광반사 스펙트럼을 이용하여 측정하였고, 박

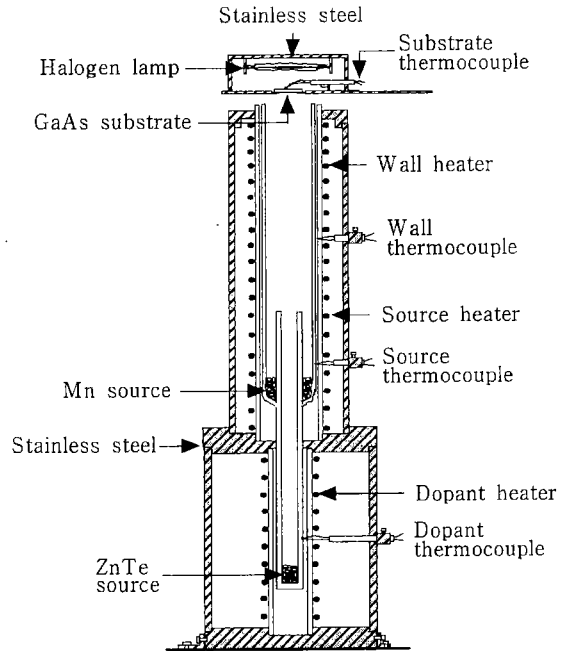


Fig. 1. Schematic diagram of the hot-wall epitaxy system for the $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayer growth.

막의 표면은 노마스키(Nomarski) 간섭현미경을 사용하여 관찰하였다. 성장된 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 특성으로서는 엑스선 회절분석 장치(X-ray diffractometer, XRD)를 이용하여 결정구조와 격자상수 등을 중점적으로 조사하였다. 그리고 Mn의 조성비 x 값은 엑스선 회절분석법을 이용하여 구하였고 이 값은 러더퍼드 후방산란 분광분석법(Rutherford backscattering spectrometry, RBS)로 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 열벽 적층 성장법으로 성장한 성분비 $x = 0.22$ [Fig. 2(a)]와 0.97 [Fig. 2(b)]인 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 표면 상태를 관찰하기 위한 노마스키 사진이다. 시료들의 두께는 약 $1.5 \mu m$ 이었으며, 전반적으로 Mn의 성분비 x 가 0.7 보다 작을 때는 Fig. 2(a)와 같이 거울 면처럼 보였으며 표면 거칠기도 비교적 작았다. 그러나 Mn의 성분비 x 가 0.7 보다 커지면서 Fig. 2(b)와 같이 표면 거칠기는 증가하고 뿌옇게 보였다. 대체로 에피층의 표면 상태를 보면 결정상태를 알 수 있었는데 거울 면 같을 때는 결정성이 양호하였다. $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 벌크의 경우에 Mn의 조성비가 증가함에 따라 결정성이 좋아지지 않는다는 것으로 보고되고 있다[2]. GaAs (100)면 위에 성장한 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층은 Mn의 조성비가 증가함에 따라서 격자부정합이 증가하

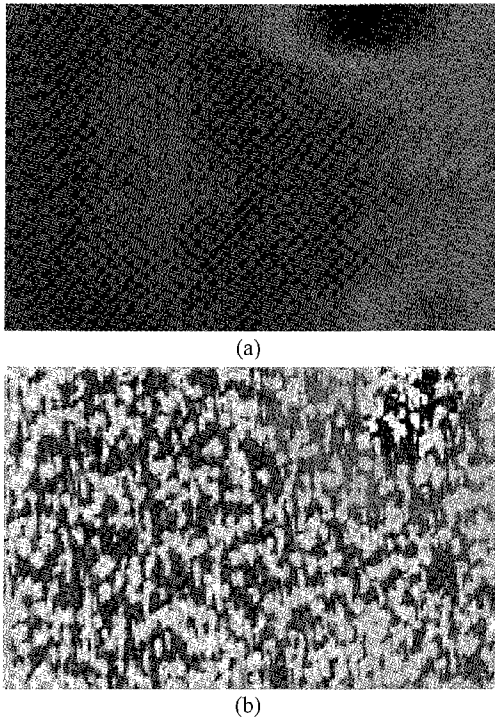


Fig. 2. Nomarski photographs of the surface of the $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayers with x equal to (a) 0.22; (b) 0.97.

고[2], Mn 원자가 박막 내에 마구잡이로 존재하는 무질서도(disorder)가 증가하기 때문에 표면 상태는 Fig. 2(b)와 같이 거칠어지는 것으로 본다.

Fig. 3은 Mn의 성분비 x 가 0.12와 0.97인 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 대표적인 엑스선 회절 피크이다. Fig. 3에 나타난 것처럼 $x = 0.12$ 일 때는 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 (200)

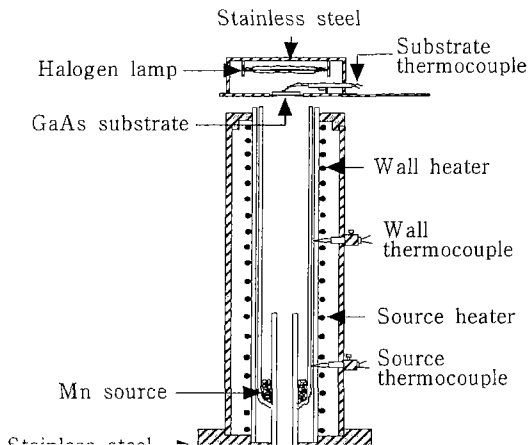


Fig. 3. X-ray diffraction spectra for the $Zn_{1-x}Mn_xTe/GaAs$ epilayers with x equal to (a) 0.12; (b) 0.97.

와 (400) 회절 피크가 각각 $2\theta = 29.233^\circ$ 와 60.515° 근처에서 나타났고, $x = 0.97$ 일 때는 (200)와 (400) 회절 피크가 $2\theta = 28.263^\circ$ 와 58.347° 근처에서 관측되었다. 이는 징크브렌드(zincblende) 구조의 (100) 배향성을 갖는 에피층의 전형적인 회절각도이다. 따라서 본 연구에서 성장한 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 결정구조는 징크브렌드 구조이고, 배향성은 (100) 방향임을 알 수 있었다. 그리고 Mn을 기반으로 하는 II-VI족 화합물 반도체의 희박 자성 반도체 중 일부는 Mn의 조성비가 증가함에 따라 결정구조가 징크브렌드 구조에서 우르짜이트(wurtzite) 구조로 변하는 것으로 알려져 있다[8]. 그러나 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 우르짜이트 구조에 해당하는 피크는 관측되지 않았다. 또 Furdyna의 보고에 의하면 브리지만(Bridgman)법으로 성장한 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 벌크의 경우에 Mn의 조성비 x 가 0.86까지 비교적 큰 범위에 걸쳐 있는 값을 갖고 있는데도 불구하고 본 연구에서는 이보다 더 큰 $x = 0.97$ 의 값을 가질 수 있는 에피층의 시료도 성장할 수 있어서 GaAs (100) 기판 위에서는 조성비 x 는 $0 \leq x \leq 1$ 의 영역에서 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층이 성장될 가능성이 있음을 나타내고 있다[2]. 따라서 본 연구에서는 Mn의 조성비 x 값이 0에서 1 근처까지 갖는 징크브렌드 결정구조를 GaAs (100) 기판 위에서 열벽 적층 성장법으로 성장할 수 있음을 나타내고 있다.

본 연구의 중심 내용은 열벽 적층 성장법을 통하여 희박 자성 반도체인 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 성장함에 있어서 Mn과 ZnTe 증발 온도 그리고 기판 온도 등을 조절하여 Mn이 ZnTe 매질에 함유되는 조성비를 조절하는 것이다. 즉 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 의 조성을 원하는 대로 재현성 있게 조절할 수 있는 열벽 적층 성장 조건을 찾고 그와 동시에 고

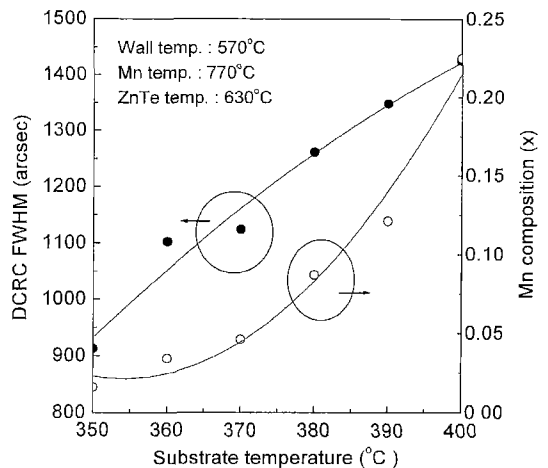


Fig. 4. The substrate temperature dependence of the FWHM and the Mn composition of double crystal rocking curve for $Zn_{1-x}Mn_xTe$ epilayers.

품질의 결정성을 갖는 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층을 GaAs (100) 기판 위에 성장할 수 있는 조건을 확립하는 것이다.

Fig. 4는 기판 온도를 350~400°C로 하고, 열벽부 온도는 570°C, Mn 원료부 온도는 770°C, ZnTe 원료부 온도를 630°C로 주어질 때 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 고분해능 엑스선 회절장치(high resolution X-ray diffractometer, HRXRD)로 측정된 이중 결정 요동 곡선(double crystal rocking curve, DCRC)의 반치폭(full width at half maximum, FWHM)과 Mn 조성비 x 를 나타내고 있다. Fig. 4에서 기판 온도가 증가함에 따라 Mn 조성비 x 가 증가하고 있으며 동시에 이중 결정 요동 곡선 반치폭이 증가하고 있다. 이중 결정 요동 곡선 반치폭이 커진다는 것은 에피층의 결정성이 나빠지고 있음을 나타내고 있다. 다시 말하면 Mn의 조성비 x 가 증가하면 결정성이 나빠진다는 것을 의미한다. 이것은 앞에서 Mn의 조성비 x 가 증가할수록 에피층의 표면이 거칠어져서 결정성에 나쁜 영향을 준다는 결과와도 일치한다.

Fig. 5는 기판 온도는 400°C, ZnTe 증발 온도는 600°C, 열벽부 온도는 610°C로 고정한 후 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 Mn 조성비 x 의 Mn 증발 온도에 대한 의존성을 조사하였다. 이러한 조건에서 시도된 Mn의 증발 온도 범위는 760~820°C이었다. Fig. 5로부터 Mn의 증발 온도는 810°C를 넘으면 Mn의 증발률이 급격하게 증가하여 820°C에서는 거의 $x = 1$ 에 가까운 시료가 제작됨을 알 수 있었다.

Fig. 6은 성장 온도를 조절하여 제작된 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 격자상수 $a(x)$ 를 Mn 조성비 x 의 함수로 나타낸 것이다. 본 연구에서 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 조성비 x 는 ZnTe와 MnTe 격자상수를 각각 6.104 Å [5]와 6.334 Å [2]으로 간주하고 계산하였다. 여기서 ZnTe의 격자상수는 열벽 적용 성장법으로 성장한 에피층에서 측정된 값이고,

MnTe의 실제 구조는 NiAs이므로 징크브랜드 구조라고 가상적으로 언급하고서 얻은 문헌의 값을 이용하였다. 일반적으로 3원 화합물에 대한 비박 자성 반도체의 격자상수는 베가드(Vegard) 법칙을 잘 만족하는 것으로 알려져 있다 [2]. 그러므로 ZnTe와 MnTe로 구성되는 3원 화합물 합금의 격자상수는 $a(x)$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$a(x) = (1-x)a_{\text{ZnTe}} + xa_{\text{MnTe}} = 6.104 + 0.23x \quad (1)$$

여기서 a_{ZnTe} 와 a_{MnTe} 는 각각 ZnTe와 MnTe의 격자상수이다. 본 연구에서는 Mn 조성비가 각각 다르게 성장된 시료들의 Fig. 3과 같은 엑스선 회절분석 스펙트럼의 (400) 피크 값을 읽어서 격자상수를 구한 후 (1)식을 이용하여 Mn 조성비 x 를 구하였다. 이와 같이 구한 Mn 조성비 x 는 러더포드 후방산란 분광분석법으로 확인한 결과 10% 오차범위 안에서 거의 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 6에서 Mn 조성비 x 가 증가할 때 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 격자상수는 실선으로 나타낸 것처럼 선형으로 증가하였다. 이것은 상대적으로 이온 직경이 큰 1.6 Å의 Mn 이온 이온 직경이 작은 1.48 Å의 Zn와 치환되어 합금되는 양이 많아지므로 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 격자상수는 증가하게 된다. 따라서 Mn 증발 온도와 ZnTe 증발 온도를 올려 주면 Mn의 조성비가 증가되어 Zn_{1-x}Mn_xTe 에피층의 격자상수는 증가하게 된다. 이러한 사실로부터 열벽 적용 성장법은 성장 온도를 적당하게 조절하면 Mn의 조성비를 조절할 수 있으며 또한 Mn 조성비가 조절된 에피층을 재현할 수 있음을 의미한다.

Fig. 7(a)는 성장된 모든 시료의 표면 상태를 확인하기 위하여 분광 광도계의 광반사 스펙트럼 중 일부를 보여주고 있다. 본 연구에서는 이 광반사 스펙트럼으로부터 에피층의 두께, 표면 상태와 띠편 에너지에 대한 정보를 얻

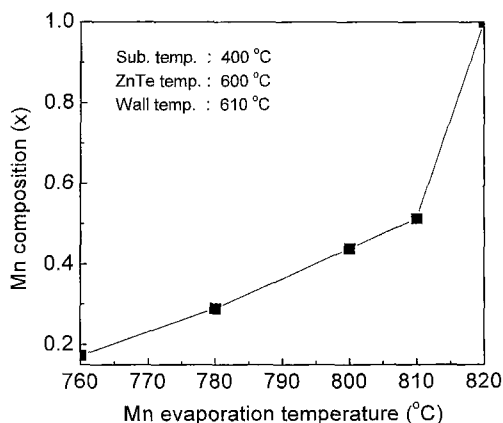


Fig. 5. The Mn temperature dependence of the Mn composition for Zn_{1-x}Mn_xTe epilayers.

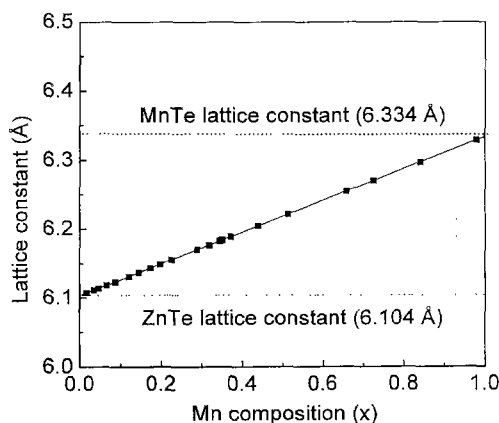


Fig. 6. Lattice constant of Zn_{1-x}Mn_xTe epilayers as a function of Mn composition at 300 K.

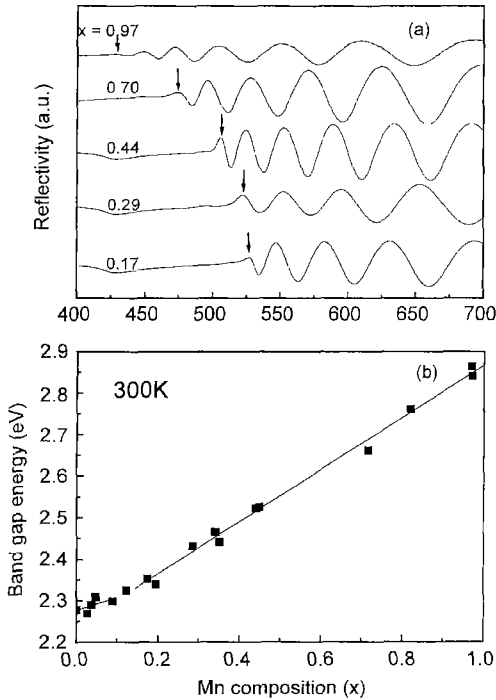


Fig. 7. (a) The reflectivity spectra as a function of Mn composition at 300 K. (b) The Mn temperature dependence of the band gap energy calculated by reflectivity spectrum.

어내고 있다. 첫째, 이 광반사 스펙트럼을 이용하여 두께를 측정하는 식은 다음과 같다.

$$d = \frac{p}{2\sqrt{n^2 - \sin^2\phi}} \times \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \times \frac{1}{1000} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (2)$$

d 는 박막의 두께, p 는 주기적인 피크의 수, λ_1 과 λ_2 는 인접한 피크들의 최고값이나 최저값에 해당하는 파장, n 은 굴절률, ϕ 는 광의 입사각 5° 이다. 이와 같은 방법으로 측정된 본 연구의 시료들의 두께는 약 $1.5 \mu\text{m}$ 이었다. 둘째, 에피층의 표면 상태는 반사율의 세기로 판단한다. $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층은 Mn 조성비 x 가 0.7 정도일 때까지는 반사율이 80~90%에 도달한다. 그러나 x 가 0.7 보다 점점 커질수록 반사율이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 앞에서 설명한 노마스키 간섭현미경의 관찰 결과와 일치하는데 즉 Mn 조성비 x 가 커질수록 거칠기가 증가하여 반사율이 떨어진다. 또 Mn 조성비 x 가 비슷하거나 에피층의 두께가 비슷한 시료의 경우 반사율의 좋고 나쁨을 보고 대략적으로 시료의 상태를 확인할 수 있었다. 셋째, Fig. 7(a)의 화살표로 표시한 곳은 각 에피층에서 반사가 시작되는 피크에 해당한다. 이 피크의 파장 값을 읽어서 Mn 성분비가 각각 다른 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층의 띠간격 에너지를 대략적

으로 구할 수가 있다. 즉 반사가 시작되는 피크는 Mn 성분비가 증가할수록 단파장쪽으로 이동하기 때문에 띠간격 에너지가 커지는 경향성을 Fig. 7(a)로부터 알 수 있었다. Mn 조성비에 따른 에피층의 정확한 띠간격 에너지 값은 GaAs 기판을 제거하고 남은 박막에 광을 투과하여 얻은 투과 스펙트럼으로부터 흡수계수를 얻어 에너지 띠간격을 결정하여야 한다. 그러나 GaAs 기판을 제거하는 것이 쉽지 않기 때문에 본 연구에서는 광반사 스펙트럼으로 각 시료의 띠간격 에너지를 결정하였다.

Fig. 7(b)는 Mn 조성비 x 에 대하여 Fig. 7(a)로부터 구한 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층의 띠간격 에너지를 eV로 나타내고 있다. Fig. 7(b)로부터 Mn 조성비 x 가 증가함에 따라 띠간격 에너지는 약간의 오차 범위 안에서 비선형적으로 변화함을 알 수 있었다. 그림에서 실선은 상온에서의 ZnTe 띠간격 에너지와 MnTe 띠간격 에너지 그리고 본 연구에서 광반사 스펙트럼으로 구한 실험치를 연결한 선이다. II-VI족 화합물 반도체에서 삼원 화합물의 조성비에 따른 띠간격 에너지의 변화는 크게 두 가지로 나타난다. 하나는 ZnS-ZnSe 합금처럼 각각의 이원 화합물의 띠간격 에너지 사이에서 선형으로 변하는 경우이고[9] 다른 하나는 ZnS-ZnTe 합금과 같이 띠간격 에너지가 휨 상수(bowing parameter)를 포함하고 있기 때문에 포물선 형태의 곡선으로 변하는 경우 등이 있다[10]. 이와는 달리 본 연구에서 성장한 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층의 경우에는 띠간격 에너지는 Mn 조성비가 $x = 0.1$ 인 값을 중심으로 변화하는 직선의 기울기 값이 다르게 나타났다. 즉 x 가 $0.1 \leq x \leq 1$ 인 범위에서는 $0 \leq x \leq 0.1$ 인 범위에서는 보다 기울기 값이 2배 정도 크게 나타내었다. 이와 같은 결과로부터 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층의 띠간격 에너지는 Mn의 조성비 x 의 전 구간 $0 \leq x \leq 1$ 에서 보면 비선형으로 변화함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 문헌의 값과 거의 일치하였다[11].

이상과 같은 격자상수와 광반사 스펙트럼으로부터 측정된 띠간격 에너지 결과로부터 본 연구에서 열벽 적층 성장법으로 성장한 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층은 성장 온도를 적절히 조절하면 $0 \leq x \leq 1$ 범위에서 Mn 조성비 x 값을 갖는 고품질의 자성 반도체 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층을 성장할 수 있음을 알았다.

4. 결 론

열벽 적층 성장법으로 GaAs (100) 기판 위에 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층을 성장하여 얻은 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 성장한 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 에피층을 노마스키 간섭 현미경으로 관찰하여 본 결과 Mn 조성비 x 가 증가할수록 표면 거칠기는 증가하였다.

2) 엑스선 회절 분석 결과 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층은 GaAs 기판과 동일한 (100) 배향성을 가지고 있었으며, (200)와 (400) 회절 피크만이 나타난 것으로 보아 본 연구의 열박 적층 성장법으로는 Mn 조성비 영역에서 에피층이 징크브 랜드 구조로 성장될 가능성이 있었다.

3) 기판 온도가 증가함에 따라 Mn 조성비 x 는 증가하고 동시에 이중 결정 요동 곡선 반치폭이 증가하고 있는 것으로 보아 에피층의 결정성이 점점 떨어짐을 알 수 있었다.

4) Mn 조성비 $0 \leq x \leq 1$ 영역의 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층을 얻기 위하여 Mn의 증발 온도는 $760 \sim 820^\circ C$ 이었다.

5) $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 에피층의 Mn 조성비 x 는 베가드 법칙에 따라 엑스선 회절 피크로부터 격자상수를 구하여 정하였다. 또한 Mn 조성비 x 는 러더퍼드 후방산란 분광분석법으로 측정된 조성비의 오차범위 내에서 거의 일치하였다.

6) 광반사 스펙트럼으로부터 구한 상온의 띠 간격 에너지는 Mn 조성비 $x = 0.1$ 을 전후로 비선형으로 증가하였다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 중부대학교 학술연구개발비 지원에 의하여 이루어진 것임.

참 고 문 헌

[1] M. Oestreich, J. Hubner, D. Hagele, P.J. Klar, W.

Heimbrodt, W.W. Ruhle, D.E. Ashenford and B. Lunn, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 1251.

- [2] J.K. Furdyna and J. Kossut (Eds.), Diluted Magnetic Semiconductors, Vol. 25, in: series Semiconductors and Semimetals (Academic Press, New York, 1988). Chap. 1 and 2.
- [3] A. Tromson-Carli, A. Zozime, J. Ertel, M. Seibt, R. Druilhe, C. Grattepain and R. Triboulet, J. Cryst. Growth 170 (1997) 549.
- [4] D. Ferrand, J. Cibert, C. Bourgognon, S. Tatarenko, A. Wasiela, G. Fishman, A. Bonanni, H. Sitter, S. Kolesnik, J. Jaroszynski, A. Barcz and T. Dietl, J. Cryst. Growth 214/215 (2000) 387.
- [5] S. Nam, J. Rhee, O. Byungsung, K.-S. Lee, Y.D. Choi, G.-N. Jeon and C.-H. Lee, J. Cryst. Growth 180 (1997) 47.
- [6] S. Nam, O. Byungsung, K.-S. Lee, Y.D. Choi and C.-S. Kim, J. Appl. Phys 180 (1997) 47.
- [7] J. Wang, C.S. Zhu, A.U.H. Qureshi, D.M. Huang, X. Wang and X.L. Shen, J. Cryst. Growth 152 (1995) 286.
- [8] D. Li, J.M. Gonsalves and N. Otsuka, Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 449.
- [9] S. Larach, R.E. Shrader, C.F. Stocker, Phys. Rev. 108 (1957) 587.
- [10] Y.-M. Yu, S. Nam, J.-K. Rhee, O. Byungsung, K.-S. Lee and Choi, J. Cryst. Growth 210 (2000) 521.
- [11] H.-C. Mertins, H.-E. Gumlich and C.H. Jung, Semicond. Sci. Technol. 8 (1993) 1634.