

## Photoreflectance 측정에 의한 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(0.03 \leq x \leq 0.11)$ 에피층의 특성 연구

김인수 · 손정식\* · 이철욱\* · 배인호\* · 임재영\*\* · 한병국\*\*\* · 신영남\*\*\*\*

경운대학교 전자공학과, \*영남대학교 물리학과, \*\*한국표준과학연구원 소재특성평가센터 박막그룹,  
\*\*\*경산대학교 물리학과, \*\*\*\*대구대학교 물리학과  
(1998년 4월 7일 접수)

## A study on characteristics of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(0.03 \leq x \leq 0.11)$ epilayer by photoreflectance measurement

In-Soo Kim, Jeong-Sik Son\*, Cheul-Wook Lee\*, In-Ho Bae\*, Jae-Young Leem\*\*,  
Byung-Kuk Han\*\*\* and Young-Nam Shin\*\*\*\*

Department of Electronics Engineering, Kyungwoon University, Kyoungbuk 730-850, Korea

\*Department of Physics, Yeungnam University, Kyoungbuk 712-749, Korea

\*\*Thin Film Group of Materials Evaluation Center, KRISS, Taejon 305-600, Korea

\*\*\*Department of Physics, Kyonongsan University, Kyoungbuk 712-240, Korea

\*\*\*\*Department of Physics, Taegu University, Kyoungbuk 712-714, Korea

(Received April 7, 1998)

**요 약** - Molecular Beam Epitaxy(MBE)법으로 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  에피층에 대해 photoreflectance (PR) 실험을 통해 특성을 조사하였다. PR 측정결과 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층의 띠간격 에너지( $E_g$ ) 신호가 시료의 변형(strain)에 의해 heavy-hole( $E_v(\text{HH})$ )과 light-hole( $E_v(\text{LH})$ )로 분리되어 관측되었다. 에피층의 조성과 변형은 각각 시료에서의  $E_v(\text{HH})$  및  $E_v(\text{HH})$ 와  $E_v(\text{LH})$ 신호의 에너지 차이를 이용하여 구하였다. 또 160 K이하의 온도에서는  $E_v(\text{LH})$ 의 신호가 사라짐을 볼 수 있었다. Franz-Keldysh oscillation(FKO) 피크로부터 계산되어진  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  계면전장( $E$ )은 In 조성의 증가에 따라  $0.75 \times 10^5$  V/cm에서  $2.66 \times 10^5$  V/cm로 증가하였다. In 조성이  $x=0.09$ 인 시료에 대한 PR신호의 온도의존성 실험에서 Varshni 계수와 Bose-Einstein 계수들을 각각 구하였다.

**Abstract** - Photoreflectance (PR) measurements have been performed on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  grown by molecular beam epitaxy (MBE). Bandgap ( $E_g$ ) of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  epilayer measured from PR was separated as heavy-hole ( $E_v(\text{HH})$ ) and light-hole ( $E_v(\text{LH})$ ) by strain effect. The compositions and the strains of epilayer were obtained from the energy value of  $E_v(\text{HH})$  and from energy difference of  $E_v(\text{HH})$  and  $E_v(\text{LH})$ , respectively. In addition, the PR signal of  $E_v(\text{LH})$  was diminished below 160 K. The interface electric field ( $E$ ) of  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  was increased from  $0.75 \times 10^5$  V/cm to  $2.66 \times 10^5$  V/cm as In composition increased, which was calculated from Franz-Keldysh oscillation (FKO) peaks. As the temperature dependence of the PR signal at  $x=0.09$  sample, we obtained Varshni and Bose-Einstein coefficients.

### 1. 서 론

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 는 성장시 In의 조성비(x)와 에피층의 구조적 변화에 따라 이 시료가 가지는 특성을 효율적으로 변화시킬 수 있기 때문에 다양한 소자의 재료로 이용되고 있다[1, 2]. 특히 GaAs 기판 위에  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 를 이종접합

구조로 성장할 때 두 시료의 격자상수 차이로 인해 에피층이 변형을 받게 되며, 이러한 변형이 성장된 에피층의 광학 및 전기적 성질을 변화시키는 원인이 되기도 한다. 그리고 GaAs보다 빠른 이동도를 가진  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 를 고속전자 및 광소자로 이용하기 위해서는 변형된 초격자 및 이완된 상태의 에피층을 사용하게 된다[3].  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}$

As/GaAs 구조에서는 변형에 의한 pseudomorphic 성장 및 전위에 의한 이완 등이 소자의 특성에 매우 중요한 영향을 미치게 된다[4]. 결합이 없는 변형된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 성장시키기 위해서는 에피층의 두께가 임계두께보다 작아야 한다. 그러나 에피층의 두께가 임계두께 이하로 얇게 성장될 때는 에피층과 기판 사이의 격자가 tetragonal 변형을 받게 되며, 임계두께 이상으로 성장시에는 일부 이완된 tetragonal 또는 orthorhombic 변형을 받게 된다. 특히 off-cut angle를 가진 기판 위에 성장한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  구조에서는 orthorhombic 혹은 triclinic 변형을 받게 된다고 보고되고 있다[5, 6]. 또한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 성장시킬 때 In의 조성비를 증가시키에 따라 임계두께는 매우 작아야 하며, 특히 조성비가 0.1 정도만 되어도 임계두께는 약  $0.01 \mu\text{m}$  미만이 되어 그 자체만으로는 소자를 제작하기가 불가능하므로  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  성장시 In의 조성비 및 두께를 조절하는 방법들이 중요한 연구 과제로 되고 있다.

본 연구에서는 반절연성 GaAs 기판 위에 두께를  $1 \mu\text{m}$ 로 일정하게 고정하고 In의 조성비를 0.03~0.11로 변화시켜 molecular beam epitaxy(MBE)법으로  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 성장한 후, 이 시료의 특성을 photoreflectance (PR) 측정으로 연구하였다. 실온에서 PR 측정 결과, 성장된 에피층의 띠간격 에너지( $E_o$ ) 신호가 heavy-hole ( $E_o(\text{HH})$ )과 light-hole( $E_o(\text{LH})$ )로 분리됨을 관측하였다. 이때  $E_o(\text{HH})$  값으로부터 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  시료의 조성비를 결정하였으며, 분리된  $E_o(\text{HH})$ 와  $E_o(\text{LH})$  사이의 에너지 차이 즉,  $\Delta E_o$ 로부터 에피층에서 발생하는 변형( $\epsilon$ )의 값을 구한 다음, 이들 조성비 및 변형값들을 double crystal X-ray(DCX) 측정 결과와 비교하였다. 그리고 에피층과 기판의 PR 신호 사이에서 관측된 Franz-Keldysh oscillation(FKO) 피크들로부터 계면 전기장( $E$ )을 계산하였다. 또한  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x=0.09$ ) 시료를 사용하여 측정온도(80~300 K) 변화에 따른 PR 측정으로 성장된 에피층의 띠간격 에너지( $E_o$ )가  $E_o(\text{HH})$ 와  $E_o(\text{LH})$ 로 분리되는 온도를 확인함과 동시에 Varshni 및 Bose-Einstein 계수의 값들을 각각 계산하였다.

## 2. 이 론

변조 분광신호에서 반사율의 변화는 각 임계점에 대해 극대점과 극소점이 존재하는 3차 미분 함수형의 신호형태를 가지며, 띠간격 에너지( $E_o$ )보다 큰 영역에서

진동형태의 신호로 관측되는 FKO 피크는 다음과 같이 점근적 형태로 표현된다[7].

$$\Delta R / R = \cos \left[ \frac{4}{3} \{ (E - E_o) / \hbar\Omega \}^{2/3} + \pi(d-1)/4 \right] \quad (1)$$

여기서  $d$ 는 임계점의 차원을 나타내고,  $\hbar\Omega$ 는 특성에너지 즉,

$$\hbar\Omega = \left[ \frac{e^2 E^2 \hbar^2}{8\mu} \right]^{1/3} \quad (2)$$

이다. 여기서  $\mu$ 는  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 환산질량( $m_e^* = 0.0665 - 0.044x$ ,  $m_{hh}^* = 0.341 - 0.07x$ )[8] 및  $E$ 는 계면 전기장의 세기이다. 또한 식 (1)에서 cosine 함수의 인자가  $j\pi$ 일 때 그 함수는 극치값을 가지므로 이 관계식을 이용하면 FKO 신호의 위치( $E_j$ )는

$$E_j = \hbar\Omega(F_j) + E_o, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$F_j = \{ 3\pi [(j-1/2)/2] \}^{2/3} \quad (4)$$

식으로 주어지며[9],  $F_j$ 에 대한  $E_j$ 의 그래프에서 기울기가  $\hbar\Omega$ 이고, y 축과의 교점이 띠간격 에너지( $E_o$ )가 된다. 여기서  $j$ 는 FKO 피크의 정점의 위치값을 나타낸다. 따라서 식 (4)로부터  $E_o$ 를 구할 수 있으며, 기울기를 식 (3)에 대입하여  $E$ 를 구할 수 있다. 그리고 상온에서 In의 조성비에 따른 띠간격 에너지는 다음 식으로 구할 수 있다[10].

$$E_o(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) = E_o(\text{GaAs}) - 1.47x + 0.375x^2 \quad (5)$$

여기서 GaAs의  $E_o(\text{GaAs}) = 1.423 \text{ eV}$  값을 식 (5)에 대입하여 상온에서 In의 조성비에 따른 띠간격 에너지를 구할 수 있다. 그리고 격자상수가 다른 이종접합구조를 성장할 때 기판과 에피층의 격자 부정합에 의해 변형이 일어나며, 그 관계식은 다음과 같다[11].

$$\epsilon = \frac{a_{\text{GaAs}} - a_{\text{InGaAs}}}{a_{\text{GaAs}}} \quad (6)$$

여기서  $a_{\text{GaAs}}$ 와  $a_{\text{InGaAs}}$ 는 각각 GaAs와 InGaAs의 격자상수이다. 이러한 변형은 zinc-blende 구조를 지닌 반도체의 띠간격은 heavy-hole( $J=3/2$ ,  $m_j = \pm 3/2$ )과 light-hole( $J=3/2$ ,  $m_j = \pm 1/2$ )로 축퇴되어 띠간격이 "분리(split)"됨으로 인해 띠간격이 변화를 일으킨다. 따라서 변형에 의한 띠간격의 분리 즉, heavy-hole과 light-hole에 대한 띠간격 에너지의 관계식은 다음과 같다[11].

$$E_o(\text{HH}) = E_o(\text{InGaAs}) + \delta E_h - \delta E_s \quad (7)$$

$$E_o(\text{LH}) = E_o(\text{InGaAs}) + \delta E_h - \delta E_s - \frac{(\delta E_s)^2}{2\Delta_o} \quad (8)$$

$$\delta E_h = 2a_{CV} \left[ \frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon = 2a_{CV} \left[ \frac{S_{11} + S_{12}}{S_{11} + S_{12}} \right] \varepsilon \quad (9)$$

$$\delta E_s = -b \left[ \frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon = -b \left[ \frac{S_{11} - S_{12}}{S_{11} + S_{12}} \right] \varepsilon \quad (10)$$

여기서  $\delta E_h$ 와  $\delta E_s$ 는 각각 띠틈격 에너지에서 hydrostatic과 shear 기여도이다.  $\Delta o$ 는 spin-orbit 분리인  $\Gamma_6$ 과  $\Gamma_8$  띠틈격 차이 값을 나타낸다.  $a_{CV}$ 는 띠틈격 에너지 사이의 hydrostatic deformation 포텐셜을 나타내며,  $b$ 는 shear deformation 포텐셜 상수를 나타낸다. 실제로 식 (9)와 (10)에서 나타난 변형에 대한  $E_o(HH)$ 과  $E_o(LH)$ 차이는 변형과 탄성상수 값에 의존하며, 그 값은

$$\begin{aligned} \Delta E_o &= E_o(HH) - E_o(LH) = 2\delta E_s \\ &= -2b \left[ \frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon \end{aligned} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다[11]. 여기서  $S_{11}$ 과  $S_{12}$ 는 에피층의 탄성 compliance 상수이고,  $C_{11}$ 과  $C_{12}$ 는 에피층의 탄성 stiffness 상수로서 이 값들을 Table 1에 나타내었다[12].

일반적인 반도체에서 띠틈격 에너지는 변형뿐만 아니라 온도의 증가에 따라 변화되며, 그 값은

$$E_o(T) = E_o(0) - [\alpha T^2 / (\beta + T)] \quad (12)$$

의 형태로 주어진다[12]. 여기서  $\alpha$ (eV/K)는 상수이고,  $\beta$ (K)는 Debye 온도( $\theta_D$ )에 관계되는 계수로서 온도에 따른 띠틈격 에너지 변화를 계산하는 데 이용된다. 그리고 현상론적인 표현에 있어서 “열적인 띠틈격 에너지 수축”이라는 시료 내의 phonon과 phonon 주파수와의 상호력에 의한 전기적 상태의 renormalization으로 설명하는 하나의 모델로 제안된 Bose-Einstein 통계인자를 사용하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$E_o(T) = E_o(0) - a_B \frac{2}{\exp(\Theta/T) - 1} \quad (13)$$

여기서,  $\Theta$ 는 phonon 주파수에 관계하며,  $a_B$ 는 상호력의 강도를 의미한다.

### 3. 실험

본 연구에서 시료는 MBE법으로 반절연성 GaAs 기판 위에 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 사용하였다. 먼저 에피층을 성장하기 전에 온도 560°C에서 0.5  $\mu\text{m}$  정도로 GaAs buffer 층을 성장한 후, 온도를 540°C로 낮추어  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 성장하였다. 이때 In의 조성비를  $x = 0.03 \sim 0.11$ 로 변화시켰으며, 두께는 1  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 하였다.

PR 측정 장치의 구성은 변조 광원으로 800 Hz의 광단속기를 거친 2 mW He-Ne 레이저(6328 Å)를 사용하였다. Probe 빔은 텅스텐-할로겐 램프(250 W)를 사용하였으며 이를 초점거리 0.27 m인 분광기(Spex 270M)에 렌즈를 통하여 집속시키고, 분광기를 통해 단색화된 빛을 시료에 입사시켰다. 이때 시료에서 반사된 빛을 Si 포토다이오드로 검출하여 이를 전치증폭기(pre-amplifier)를 통하여 증폭시킨 다음, lock-in 증폭기를 거쳐 컴퓨터에 규격화된 변조 반사율을 기록하였다.

### 4. 결과 및 논의

기관으로 사용한 반절연성 GaAs와 MBE법으로 성장시킨  $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}/\text{GaAs}$  시료들에 대하여 실온에서 측정된 PR 스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었다.

반절연성 GaAs의 PR 스펙트럼을 살펴보면 실선은 측정된 값을 나타내는 것으로써 1.4 eV 부근에서 지배적인 신호만 관측되었으며, 점선은 Aspnes[7]의 식을 사용하여 최소자승법으로 fitting한 결과를 나타낸 것이다. Fitting 결과, 기관으로 사용된 반절연성 GaAs 시료의  $E_o$ 와  $\Gamma$  값은 각각 1.412 eV와 15.5 meV로서 이 값들은 Wang과 Jiang이 구한 결과와 거의 일치하였다[14]. 그리고 MBE법으로 성장시킨  $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$  시료의 PR 측정 결과, 기관 GaAs의 신호세기는 bulk GaAs보다 약 0.3배 감소되었지만, 에피층의 신호와 함께 뚜렷하게 분리되어 관측되었으며, 이들 두 신호사이에서 FKO 피크가 관측되었다. 이는 기관과 에피층의 띠틈격 에너지

**Table 1.** The deformation potential (b), elastic coefficients (C) and compliance coefficients (S) for GaAs and InAs, respectively

	b(eV)	$C_{11}$ ( $\times 10^{11}\text{dyn/cm}^2$ )	$C_{12}$ ( $\times 10^{11}\text{dyn/cm}^2$ )	$S_{11}$ ( $\times 10^{-12}\text{cm}^2/\text{dyn}$ )	$S_{12}$ ( $\times 10^{-12}\text{cm}^2/\text{dyn}$ )
GaAs	-8.65	11.88	5.38	1.765	-3.65
InAs	-5.79	8.329	4.53	1.945	-6.85

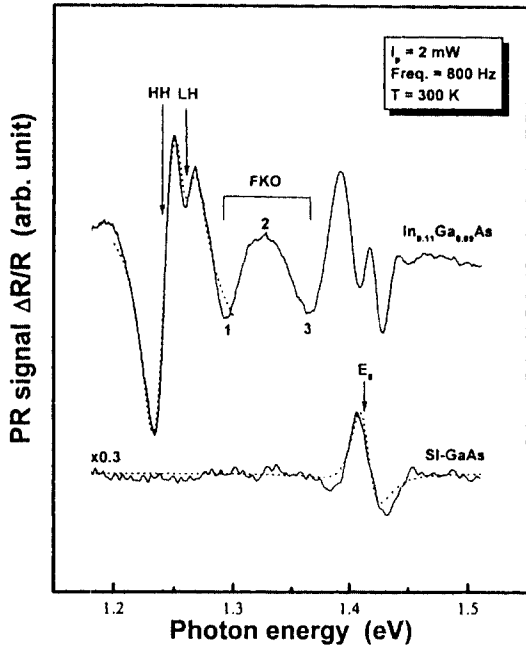


Fig. 1. PR spectra at 300 K obtained from semi-insulating GaAs and  $\text{In}_{x.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$  epilayer grown by MBE.

( $E_g$ ) 차이로 인해 나타난 것임을 알 수 있다. 또한  $\text{In}_{x.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$  에피층의 PR 스펙트럼에서 실선은 측정 결과이며, 점선은 에피층의 주된 신호가 관측되는 에너지인 1.2~1.3 eV 영역에서 식 (1)로 fitting한 결과로서 주된 신호가 1.25 eV 부근에서  $E_g(\text{HH})$ 와  $E_g(\text{LH})$ 로 분리됨을 관측하였다. 따라서 성장된  $\text{InGaAs}$  에피층의  $E_g(\text{HH})$ 는 1.243 eV로서, 이 값은 식 (3)을 사용하여 구한 결과와도 잘 일치하였으며,  $E_g(\text{HH})$  값을 식 (5)에 대입하여 In의 조성비를 구한 결과 0.11의 값을 얻었다.

에피층의 두께를 일정하게 하고 In의 조성비를 0.03~0.11로 변화시켜 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  시료에 대하여 실온에서 측정한 PR 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다.

1.412 eV 부근에서 관측된 기판 GaAs의 신호는 조성비 변화에 따라 위치와 모양은 불변인 반면, 신호의 세기가 감소함을 알 수 있었다. 그리고 성장된 에피층의 신호를 살펴보면 실선은 측정치이며, 점선은 조성비 변화에 따라 에피층의 주된 신호가 관측되는 영역에서만 fitting한 결과이다. 따라서 조성비를 증가시키에 따라 에피층의 주된 신호는 저 에너지로 이동하면서  $E_g(\text{HH})$ 과  $E_g(\text{LH})$ 로 분리되어 관측되었다. 신호가 저 에너지로 이동하는 것은 조성비를 증가시키에 따라  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의

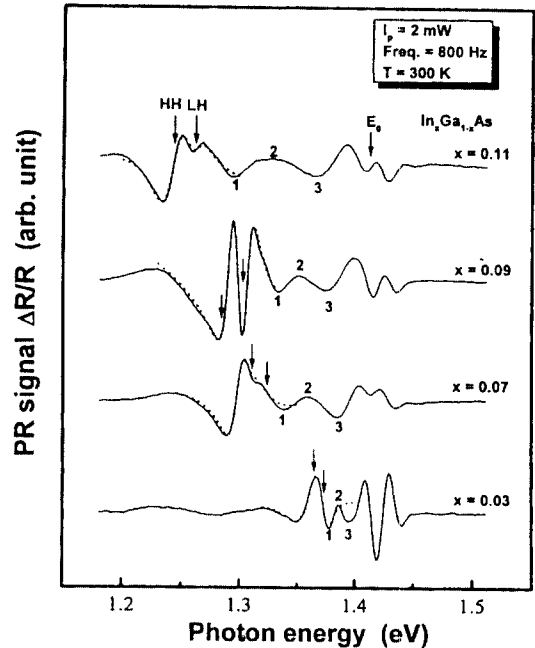


Fig. 2. PR spectra at 300 K for  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x=0.03, 0.07, 0.09$  and  $0.11$ ) epilayers grown by MBE.

$E_g$ 가 감소하기 때문이며, 신호가 분리되는 것은  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  성장시 기판과의 격자부정합으로 인해 에피층에서 변형이 발생되었기 때문이다. 그리고 이미 보고된 연구에 의하면 조성비 전 영역에서 결함이 없는  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 성장시키기 위해서는 두께가 임계두께 즉, 약  $1000 \text{ \AA}$ 보다 작아야 하며, 이때 최대의 변형이 에피층에 작용함으로 인해 신호가 분리되며, 또한 이 두께보다 두꺼우면 격자상수가 이완되어 에피층은 변형이 생성되지 않는다고 보고되었으며[15], 양자우물 구조에서는 띠간격 에너지( $E_g$ ) 차이로 인해 역시 신호가 분리 된다고 보고되었다[16]. 그러나 본 연구에서 사용된 시료의 두께는 임계두께보다 훨씬 두꺼운  $1 \mu\text{m}$ 이지만, 에피층의 주된 신호 즉,  $E_g$ 가 분리되어 관측된 것으로부터 에피층의 격자상수가 완전히 이완되지 않음을 알 수 있었다. 이때 각 조성비에 따른 주된 신호의 분리 중에서  $E_g(\text{HH})$ 의 값은 식(1)을 이용한 경우 각각 1.365, 1.312, 1.285 및 1.243 eV였으며, 이는 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층의  $E_g$ 를 나타내고, 이를 식 (5)에 대입하여 조성비를 각각 계산한 결과 0.03, 0.07, 0.09 및 0.11의 값을 얻었다. 이 값은 DCX 측정결과와도 잘 일치하였다. 또한  $E_g(\text{HH})$ 와  $E_g(\text{LH})$ 의 차이 즉,  $\Delta E_g$ 는 조성비를 증가시키에 따라 각각 7, 11, 16 및 20 meV로 증가하였다. 이는 조성비 증가에

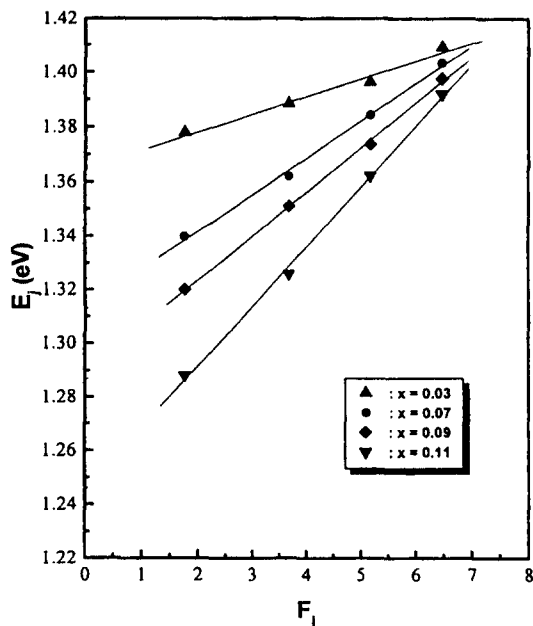
**Table 2.** Parameters obtained from PR and DCX measurements at room temperature for  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  epilayers grown with various compositions by MBE

PR				
Bandgap energy (eV)	1.365	1.312	1.285	1.243
$\Delta E_v = E_v(\text{HH}) - E_v(\text{LH})$ (meV)	7	11	16	20
Composition (x)	0.03	0.07	0.09	0.11
Strain ( $\times 10^{-3}$ )	1.04	1.62	2.35	2.93
DCX				
Peak separation ( $\text{sec}^{-1}$ )	-869	-1.637	-1.656	-2073
Composition (x)	0.03	0.07	0.10	0.12
Strain ( $\times 10^{-3}$ )	3.67	7.01	7.65	9.74

따라 에피층에서 변형이 많이 작용하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 값들을 식 (11)에 대입하여 에피층에서 생성된 변형( $\epsilon$ ) 값이  $1.04 \times 10^{-3} \sim 2.95 \times 10^{-3}$ 임을 얻었다. 이상의 결과들을 DCX 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다.

그리고 Fig. 2에서  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층의  $E_g$  이상에서 3개의 피크 즉, FKO 피크가 관측되었다. 이 피크들은 기판과 에피층 사이의  $E_g$  차이로 인해 발생된 것으로 조성비 증가에 따라 주기가 길어짐을 알 수 있으며, 이를  $F_j$ 에 대한  $E_j$ 의 관계 그래프를 나타내면 Fig. 3과 같다.

그림에서 y축의 절편값은 식(2)에서와 같이  $E_g$ 와  $F_j$ 의



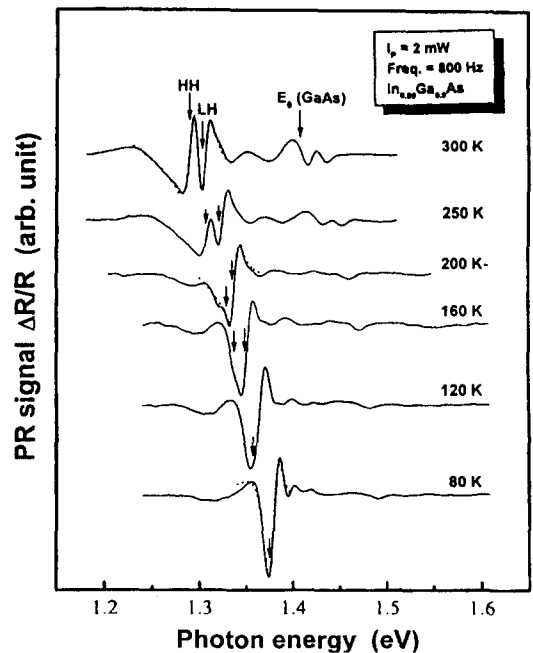
**Fig. 3.** The plot of  $F_j$  versus  $E_j$  for  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $0.03 \leq x \leq 0.11$ ) epilayers grown by MBE.

**Table 3.** The interface electric field ( $E$ ) obtained from FKO peaks with various compositions

Compositions (x)	0.03	0.07	0.09	0.11
Interface electric field ( $E : \times 10^5$ V/cm)	0.75	1.60	1.93	2.66

상호관계에서 띠간격에너지의 값을 나타낸다. 그림에서 실선은 FKO정점을 이용한 기울기를 나타내고 있다. 그리고 각 실선의 기울기를 식 (2)에 대입하여 계면 전기장( $E$ )을 구한 결과를 Table 3에 나타내었다. 조성비를 증가시키에 따라 직선의 기울기가 증가하는 것은 조성비 증가에 따라 기판과 성장된 에피층 사이의 변형이 증가하게 되고, 이러한 변형에 의해 계면전장  $E_g$ 가 증가함을 알 수 있었다. 이 값은 대부분 약  $\sim 10^5$  V/cm 정도로 상당히 큰 계면전장이 형성되어 있음을 알 수 있었고, 이러한 계면전장의 형성은 변형에 의해 발생되고 변형이 증가할 수록 큰 값을 지니고 있다. 이러한 형성의 원인으로서는 변형에 의한 압전효과에 의한 것으로 알려져 있고 문헌에서 보고되는  $\text{InGaAs/GaAs}$  이종접합 시료에서의 계면전장과 유사한 결과를 보이고 있다[18, 19].

$\text{In}$ 의 조성비가  $x = 0.09$ 로 나타난  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  시료의 온



**Fig. 4.** PR spectra of  $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  epilayer measured at 80-300 K.

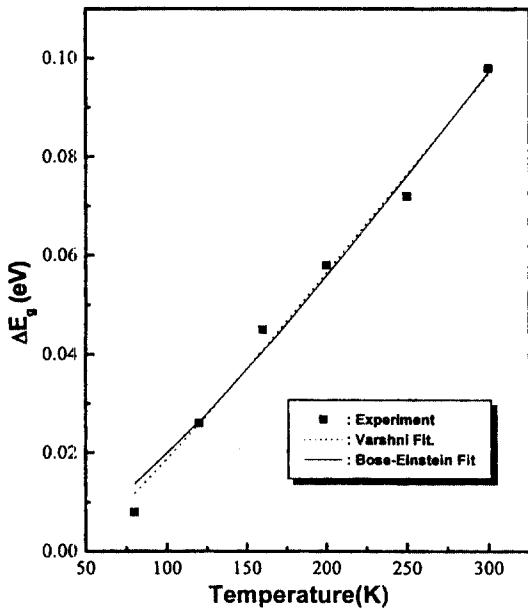


Fig. 5. The bandgap difference of  $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  with temperature. The fitting curves were calculated from Varshni eq. (dot line) and Bose-Einstein expression (solid line).

도 의존성을 조사하기 위하여 온도 80~300 K의 범위에서 측정된 PR 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다.

측정온도를 감소시키에 따라 PR 신호는 높은 에너지 쪽으로 이동함이 관측되었다. 이는 측정온도를 감소시키에 따라  $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  시료의 격자들이 수축되어 원자간 결합이 강해져서 띠간격 에너지( $E_g$ )가 증가되었기 때문이다[17]. 그리고 측정온도를 변화시키에 따라 관측된 PR 신호의 모양이 달라짐을 알 수 있다. 측정온도를 300~160 K로 낮춤에 따라 신호의 세기는 거의 변화가 없으며, 에피층의 주된 신호가  $E_v(\text{HH})$ 와  $E_c(\text{HH})$ 로 분리되어 관측된 반면, 온도 160 K 이하에서는 신호의 세기가 증가하면서 주된 신호가 중첩되어 관측되었다. 여기서 측정온도 감소에 따라 PR 신호의 세기가 증가하는

것은 반사율의 변화로 형성된 표면상태보다 광 흡수에 의한 효율이 더 크기 때문이며, 주된 신호가 분리되는 것은 온도 160 K 이상에서 일어나는 것으로 생각된다. 그리고 성장된  $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  시료의 Varshni 및 Bose-Einstein 계수를 구하기 위해 본 시료의 측정온도 범위 내에서 식 (12)와 (13)을 사용하여 얻은 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

그림에서 y축은 0 K에서의 띠간격 에너지( $E_g(0\text{ K})$ )와 측정된 에너지와의 차이값( $\Delta E_g$ )을 나타내고, 사각형은 실험치이다. 점선과 실선은 각각 Varshni 및 Bose-Einstein 표현식을 나타낸 것으로 Fig. 4에서 측정된 결과를 최소제곱법으로 fitting하여 계산하였다.  $\text{In}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  시료에서 얻어진 파라메타는 Table 4에 나타내었으며, 다른 연구결과와 비교하였다[20, 21]. 본 연구의 측정온도 범위에서 띠간격 에너지( $E_g$ )는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

반질연성 GaAs 기판 위에 두께를 1  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 고정하고 In의 조성비를  $x = 0.03 \sim 0.11$ 로 변화시켜 MBE법으로  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  에피층을 성장시킨 시료에 대한 PR 측정과 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

성장된 에피층의  $E_g$  신호가  $E_v(\text{HH})$ 와  $E_c(\text{HH})$ 로 분리되어 관측되었다. 이는 에피층 성장시 격자부정합에 의해 변형이 생성되었기 때문이며, 이때  $E_v(\text{HH})$ 의 에너지 값으로부터 성장된  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 조성비가 각각 0.03, 0.07, 0.09 및 0.11임을 알았다. 그리고 분리되어 관측된  $E_v(\text{HH})$ 와  $E_c(\text{LH})$  사이의 에너지 차이 즉,  $\Delta E_g$ 는 각각 7, 11, 16 및 20 meV이었고 이 값들로부터 에피층에서 생성된 변형( $\epsilon$ ) 값을  $1.04 \times 10^{-3} \sim 2.95 \times 10^{-3}$ 로 얻었으며, 이 값들은 DCX 측정결과와도 거의 일치하였다. 그리고 에피층과 기판의 PR 신호 사이에서 관측된 FKO 피크

Table 4. The results of the fitting parameters using Eq. (12), (13) and the data in Fig. 5

Sample Parameters		$\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{As}^a$	GaAs <sup>b</sup>	$\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}^c$	$\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}^c$
Varshni equation	$\alpha(\text{meV/K})$	0.48	1.06	0.48	0.50
	$\beta(\text{K})$	142	671	200	231
Bose-einstein expression	$a_g(\text{meV})$	29.8	10.4	44	53
	$\Theta(\text{K})$	144	102.4	203	238

<sup>a</sup>from this study

<sup>b</sup>reference [18]

<sup>c</sup>reference [19]

로부터 계면 전기장(E)의 값  $0.75 \times 10^5 \sim 2.66 \times 10^5$  V/cm 을 계산하였다. 그리고  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x=0.09$ ) 시료를 사용하여 측정온도(80~300 K) 변화에 따른 PR 실험으로 Varshni 계수( $\alpha=0.48$  meV/K,  $\beta=142$  K)와 Bose-Einstein 계수( $a_B=29.8$  meV,  $\Theta=144$  K) 값들을 각각 구하였고, 성장된 에피층의 주된 신호  $E_o$ 가 온도 160 K 이상에서  $E_o$  (HH)와  $E_o$ (LH)로 분리됨을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 1998학년도 대구대학교 학술연구비 일부 지원에 의해 이루어졌음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. J. C. P. Chang, J. Chen, J. M. Foormandez, H. H. Wieder and K. L. Kavanaph, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 1129 (1992).
2. K. Nakajima, *J. Cryst. Growth* **113**, 477 (1991).
3. M. Grundmann, U. Lienert, J. Christen, D. Bimberg, A. F. Colbrie and J. N. Miller, *J. Vac. Sci. Technol.* **B8**, 751 (1990).
4. P. Melman, B. Elman, C. Jagannth, A. E. S. Koteles, A. Silletti and D. Dugger, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1436 (1989).
5. P. Maigne and A. P. Roth, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 873 (1993).
6. P. F. Fewster and N. Andrew, *J. Appl. Phys.* **74**, 312 (1993).
7. X. Yin, H. M. Chen, F. H. Pollak, P. A. Motano, P. D. Kirchner, G. D. Petti and J. M. Woodall, *Appl. Phys. Lett.* **58**, 260 (1991).
8. K. A. Jones, M. W. Cole, P. Cooke, J. R. Flemish, R. L. Pfeffer and H. Shen, *J. Appl. Phys.* **76**, 1609 (1994).
9. N. Bottka, D. K. Gaskill, R. T. M. Griffiths, T. B. Joyce, C. Ito and D. McIntyre, *J. Cryst. Growth* **3**, 481 (1988).
10. S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang, F. H. Pollak, W. Q. Xu, A. P. Roth, R. A. Masut and D. Marris, *Phys. Rev.* **B38**, 3375 (1988).
11. K. N. Tu, J. W. Mayer, and L. C. Feldman, "Electronic Thin Film Science for *Electrical Engineers and Materials Scientists*" Ch. 7, Macmillian, New York (1992).
12. D. K. Gaskill, N. Bottka, L. Aina and M. Mattingly, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1269 (1990).
13. Q. Guo and A. Yoshida, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 2453 (1994).
14. R. Wang and D. Jiang, *J. Appl. Phys.* **72**, 3826 (1992).
15. T. P. Pearsall, *J. Quantum Electron.* **QE-16**, 709 (1980).
16. S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang and F. H. Pollak, *Phys. Rev.* **B33**, 3375 (1988).
17. W. Zhou, M. Dutta, H. Shen, J. Pamulapati, B. R. Bennett, C. H. Perry and D. W. Weyburne, *J. Appl. Phys.* **73**, 1266 (1993).
18. C. Mailhot and D. L. Smith, *J. Vac. Sci. Technol.* **A 5**, 2060 (1987).
19. P. K. Laurich, K. Elcess, C. G. Fonstad, J. G. Berry, C. Mailhot and D. L. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 649 (1989).
20. E. Grilli, M. Guzzi, R. Zamboni, L. Pavesi, *Phys. Rev.* **B45**, 1638 (1992).
21. Z. Hang, D. Yan, F. H. Pollak, G. D. Pettit, J. M. Woodall, *Phys.Rev.* **B44**, 10546 (1991).