

MBE로 성장시킨 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에 피층의 Photoreflectance 특성 연구

이동율 · 유재인 · 손정식 · 김기홍 · 이동건 · 이정열 · 배인호 · 손영호* · 황도원*

영남대학교 물리학과
*브이엠티(주) 기술개발실

The Characteristics Study of Photoreflectance of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ Epi-layer Grown by Molecular Beam Epitaxy

Dong-Yul Lee, Jae-In Yu, Jeong-Sik Son, Ki-Hong Kim, Dong-Kun Lee,

Jung-Yeul Lee, In-Ho Bae, Yeong-Ho Son and Do-Weon Hwang

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan Kyongbuk 712-749

*R&D team, VMT Co., Ltd, Pohang, Kyung-Buk 790-330

(1999년 1월 21일 받음, 1999년 4월 8일 최종수정본 받음)

초 록 분자선 에피택시법으로 성장시킨 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ 이종접합 구조의 photoreflectance 특성에 대해 연구하였다. 상온 측정 결과 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ E_g 띠 간격 에너지는 약 1.3 eV에서 관측되었다. 이로부터 In 조성비를 계산하였다. 그리고, $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ E_g 띠 간격 에너지 이상에서 어깨 신호를 관측하였는데, 도핑 농도가 증가함에 따라 어깨 신호는 12 meV에서 70 meV 고 에너지 이상으로 이동하였다. 이러한 어깨 신호는 In의 표면 갈라놓기와 표면 재증발 현상때문에 생긴 것으로 생각된다. 어깨 신호의 고 에너지로의 이동은 에피층의 성장 직후 In의 재증발에 기인된 것으로 여겨진다.

Abstract We have investigated the photoreflectance characteristics for $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunction structure grown by molecular beam epitaxy (MBE). The E_g bandgap energy of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ at room temperature was observed at about 1.3 eV. From this result, the indium composition x value was calculated. The shoulder peaks were observed higher than E_g peaks, and peak positions were shifted toward 12 meV to 70 meV higher energy with increasing doping concentrations. The shoulder peaks can be observed by In segregation and re-evaporation. However, we think that indium re-evaporation cause the shift of shoulder peaks after epilayer growth.

1. 서 론

최근 InGaAs는 작은 유효 질량 (effective mass) 과 고 전자 이동도 (high electron mobility) 때문에 고 전자 이동도 트랜지스터 (high electron mobility transistor; HEMT), 전계 효과 트랜지스터 (field-effect transistor; FET) 와 같이 변조 도핑된 (modulation doped) 구조를 가지는 고속 소자에서 많이 사용되고 있다.^{1~3)}

InGaAs는 분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy; MBE) 법으로 성장하는 동안 성장 온도의 불균일성 등으로 인해 표면 갈라놓기 (segregation) 가 일어남으로 인해 성장 방향으로 조성비의 편차가 생기며, 전도 띠 끝 (conduction band edge) 과 가전자 띠 끝 (valence band edge) 의 찌그러짐이 형성된다.⁴⁾ 보통 이러한 시료의 성장 과정에서 깊이에 따른 조성비의 관찰로서 성장과 동시에 이차-이온 질량 분석기 (secondary-ion mass spectroscopy; SIMS) 나 고 에너지 전자선 회절 반사 (reflection high energy electron diffraction; RHEED) 로 분석하며, 성장 후에는 photoluminescence (PL) 이나 photoreflectance

(PR) 를 이용해 신호의 에너지를 계산함으로써 In의 조성비를 결정한다. 그리고, Bosacchi⁴⁾ 등은 MBE로 성장시킨 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 의 표면 갈라놓기를 알아보기 위해 양자우물 형태의 구조에서 PL 측정으로 발광신호의 에너지 위치를 이용하여 연구한 결과 표면 갈라놓기는 성장온도가 낮을수록 감소함을 보고하였다.

본 연구에서는 분자선 에피택시법으로 성장된 도핑농도에 따른 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에피층의 특성을 PR 분광법을 이용하여 조사하였다. 이로부터 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 표면에 관한 정보를 얻었으며, 특히 In의 표면 갈라놓기에 의해 형성된 어깨 신호에 대해 논의하였다.

2. 실 험

본 연구에 사용된 시료는 분자선 에피택시법으로 반절연성 GaAs 기판 위에 성장온도 560 °C에서 불순물이 첨가되지 않은 0.5 μm GaAs 완충층을 성장시키고, 다시 온도를 540 °C로 낮춘 후, 각각 다른 Si 농도를 첨가시켜 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 단일 에피층 (single epilayer) 을 1 μm 두께로 성장하였다. 그리고, 상온에서 Hall 측정결과 각 시료의 Si 농도는

각각 $1.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $1.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, $3.7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 으로 측정되었다.

PR 측정은 He 순환장치(CTI-22)를 이용하여 14~300K에서 수행하였으며, 여기광으로 1mW He-Ne 레이저(6328Å)를 사용하였고, 변조 주파수는 250 Hz로 하였다. 탐침 광원으로는 250 W 텅스텐-할로겐 램프를 사용하여 초점거리가 0.27m 인 분광기(Spex 270M)를 사용하여 광학 렌즈로 시료에 집속시키고, 시료로부터의 신호를 Si 포토다이오드로 검출하여 lock-in 증폭기를 이용하여 컴퓨터로 받아들였다.

3. 결과 및 고찰

변조 분광학 신호는 Aspnes 방정식 즉, 3차 미분형 함수 형태로 나타나며 다음식으로 주어진다.^{5,6)}

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re}[C e^{i\theta} (E - E_0 + i\Gamma)^{-n}] \quad (1)$$

여기서 C 는 진폭, θ 는 위상, E 는 광자 에너지, E_0 는 띠 간격 에너지, Γ 는 평탄인자, n 은 입계점의 차원(3차원일 경우 $n=2.5$, 2차원일 경우 $n=3$, 엑시톤일 경우 $n=2$)을 나타낸다.

그림 1은 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에피층을 300K에서 측정한 PR 스펙트럼이다. 그림 1(a)는 Si 도핑 농도가 약 $3.7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, (b)는 $1.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, (c)는 $1.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이다.

그림 1(a)에서 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 의 띠 간격 에너지(E_0)에 의한 신호가 약 1.27 eV에서 관측되었으며, 그리고 E_0 로부터 고 에너지쪽으로 약 12 meV 근처에서 어깨 신호(I)가 관측되었다. 1.28 eV 근처에서 관측된 어깨 신호는 InGaAs 성장 시 기관과 표면근처의 온도차이로 인해 In의

조성비가 감소함으로 나타나는 신호로써 In 조성비가 약 0.06으로 계산되었다. 그리고, 전도 띠와 spin-orbital split 띠간 전이($E_0 + \Delta_0$)에 의한 신호가 약 1.6 eV에서 관측되었다. $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 시료의 In 조성비($x=0.1$)와 성장 두께(1 μm)를 고려할 때, 이 시료의 이론적인 띠두께가 약 200Å 정도이다. 따라서 이 시료에 변형의 영향이 크게 작용하지 않고, 에피층이 이완된 상태라고 할 수 있으므로 In의 조성비를 구하기 위해서 관측된 E_0 를 S.H. Pan 등⁷⁾이 보고한 이완된 띠 간격 에너지 식(2)에 대입하여 구한 결과 In의 조성비는 0.095로 계산되었으며, 식(3)을 이용하여 $E_0 + \Delta_0$ 의 값을 구한 결과 1.603 eV로서 실험값과 잘 일치하였다.

$$E_0(x) = 1.43 - 1.53x + 0.45x^2 \text{ (eV)} \quad (2)$$

$$\Delta_0 = 0.341 - 0.09x + 0.14x^2 \text{ (eV)} \quad (3)$$

그림 1(b)에서는 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 의 E_0 에 의한 신호가 약 1.28 eV에서 관측되었으며, 식(2)에 대입하여 In 조성비를 구한 결과 0.0108로 계산되었다. 그리고, 약 50 meV 이상에서 표면의 In 조성비 차이에 의한 어깨 신호(II)가 뚜렷이 나타났고, 1.61 eV 부근에서 $E_0 + \Delta_0$ 에 의한 신호가 관측되었다.

그림 1(c)에서도 약 1.3 eV 부근에서 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 의 E_0 띠 간격 에너지에 의한 신호가 관측되었으며, 약 70 meV 이상에서 표면의 In 조성비 차이에 의한 E_0 신호(III)가 관측되었고, 1.65 eV 부근에서 $E_0 + \Delta_0$ 에 의한 신호가 관측되었다. 그림에서 도핑농도가 증가하면서 띠 끝의 에너지가 고 에너지쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있고, 띠의 평탄인자가 증가함을 보여준다. 이러한 결과는 PR 응답이 도핑농도에 직접 관련이 있다는 것을 말해주며, Peter 등⁸⁾은 도핑농도가 $1 \times 10^{16} \sim 6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 범위에서는 E_0 가 도핑농도에 선형적으로 의존한다고 하였다. 그러나 이러한 선형적인 의존성은 아직 뚜렷하게 밝혀진 것은 아니며, many-body effect에 의한 것으로 해석할 수 있다. Badakhshan 등⁹⁾은 도핑농도가 $1 \times 10^{17} \sim 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 범위에서 E_0 의 평탄인자가 도핑농도에 선형적으로 변한다는 것을 증명하였고, 이러한 현상은 도핑 농도에 의존하는 표면 전기장 세기에 의한 것이라고 밝혔다. 그러므로 도핑농도가 커짐에 따라 표면 전기장 세기가 증가하여 E_0 띠 간격 에너지가 고 에너지쪽으로 증가하고 띠의 평탄인자가 증가함을 알 수 있다. 또한 그림에서 볼 수 있듯이 도핑농도가 증가함에 따라 어깨 신호(I, II, III)가 고 에너지쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있으며, 이는 도핑 농도가 큰 시료에서 표면 In 조성비가 더 낮음을 나타낸다. 만일, In 갈라놓기에 의한 영향이라면 표면의 In 조성비가 내부보다 더 커야 하고, 이 경우 어깨 신호는 낮은 에너지 영역에서 나타나야 한다. 따라서 도핑농도가 증가함에 따라 표면 In 조성비가 작은 것은 성장 중에서 이용되는 Si 셀 온도가 높으므로 인해, 성장을 마친 후 시료의 표면이 Si 셀의 복사열에 의해 기관이 상온으로 냉각되는 동안 표면에서 In의 재증발(re-evaporation)에 의한 것으로 생각된다.

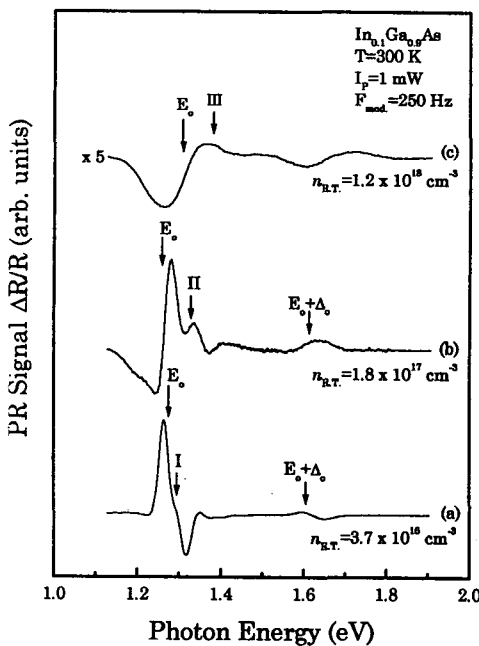


Fig. 1. PR spectra of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ with different doping concentration measured at room temperature.

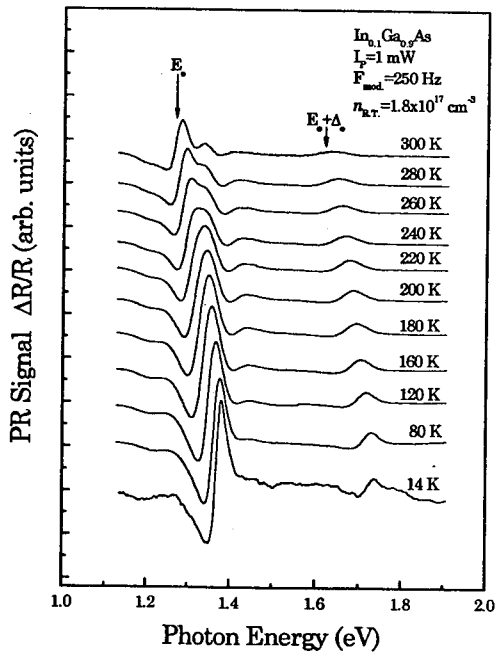


Fig. 2. PR spectra of In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs measured at various temperatures.

그림 2는 온도 의존성을 알아보기 위해 Si 도핑농도가 $1.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 인 In_{0.1}Ga_{0.9}As 시료의 측정온도 변화 (14K ~ 300K)에 따른 PR스펙트럼이다.

반도체의 온도 의존성은 온도가 감소함에 따라 결정 격자의 수축과 운반자들의 얼어붙음 (frozen)으로 인해 표면 근처에 전하밀도의 감소로 표면전기장이 감소하기 때문에 E₀는 증가하고, 띠의 평탄인자는 감소한다. 그러나 그림에서 온도가 감소함에 따라 In_{0.1}Ga_{0.9}As E₀의 에너지가 고 에너지로 이동하지만, 평탄인자는 오히려 증가함을 볼 수 있다. 이것은 상온에서의 E₀신호와 어깨 신호의 에너지 차이가 저온으로 갈수록 온도에 따른 E₀의 감소율이 틀려져 두 신호가 중첩되어 저온으로 갈수록 평탄인자가 커지는 것으로 보이는 것이다. 이러한 사실은 온도에 따른 E₀의 변화를 나타내는 Varshni 방정식에서 E₀의 변화율을 결정하는 Varshni 계수 α와 β에 따라서 결정되기 때문이다.

그림 3은 그림 2에서 온도에 따라서 측정된 In_{0.1}Ga_{0.9}As 시료에 대한 E₀의 온도에 따른 에너지 값의 변화를 보여주고 있다.

띠 간격 에너지의 변화는 주로 Varshni 방정식¹⁰⁾으로 나타내는데, 그림에서 사각형은 E₀의 변화를 나타내며, 비워진 원형으로 나타낸 것은 어깨 신호의 변화를 나타낸다. 그리고, 점선은 식 (4)에 나타낸 온도에 따른 띠 간격 에너지의 이론식, 즉 Varshni 방정식으로 피팅한 것이다. 저온으로 갈수록 어깨 신호의 온도에 대한 에너지 변화율이 E₀보다 커짐을 알 수 있다. 그러므로 저온에서는 두 신호의 중첩으로 인해 어깨 신호가 사라진 것이다.

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

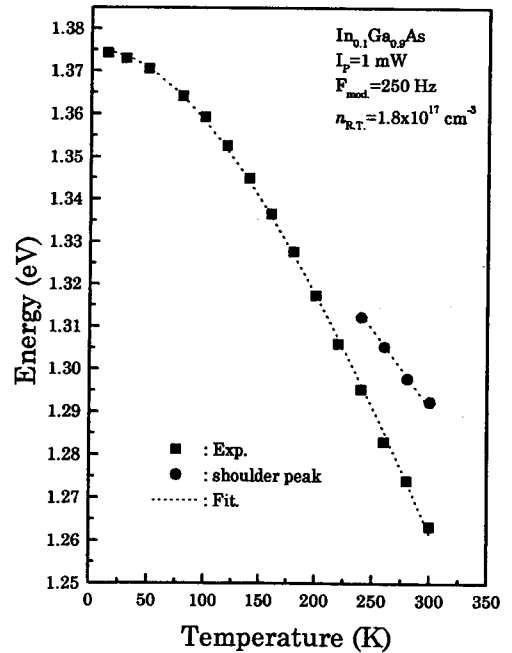


Fig. 3. The temperature dependence of In_{0.1}Ga_{0.9}As E₀.

Table 1. Values of the parameters, which describe the temperature dependence of In_{0.1}Ga_{0.9}As E₀.

	E ₀ (0)(eV)	α (10 ⁻⁴ eV/K)	β (K)
In _{0.1} Ga _{0.9} As	1.375	10	403
Shoulder peak	1.369	3.8	143
In _{0.15} Ga _{0.85} As ⁽¹⁰⁾	1.285	5.0	231
In _{0.06} Ga _{0.94} As ⁽¹⁰⁾	1.420	4.8	200

여기서, E₀는 0K에서의 띠 간격 에너지이고, α와 β는 Varshni 계수이다.

그리고, 피팅 결과는 표 1에 나타내었으며, Y.S. Huang 등¹¹⁾이 보고한 값과 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이 In 조성비가 작을수록 β값이 작은 것을 볼 수 있는데, 보고에 따르면 In_{0.1}Ga_{0.9}As층에 작용하는 변형력에 의해 Varshni 계수가 의존한다고 하였다. 본 실험에서는 이런 변형력의 영향보다는 In 조성에 따른 영향이 큰 것을 나타내고 있다.

그림 4는 시료 깊이에 따른 In의 양을 조사하기 위해 Si 도핑농도가 $1.8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 인 In_{0.1}Ga_{0.9}As 시료의 에칭시간에 따른 PR 스펙트럼이다.

그림에서 에칭시간이 증가함에 따라 어깨 신호가 점점 사라지고 있는 것을 볼 수 있고 신호의 세기는 거의 변함이 없었다. 이것은 표면 가까이의 In 조성비가 성장 시 여러 가지 효과에 의해 표면 아래의 In 조성비와 달라져 나타난 것으로 여겨진다. 여기서는 여러 가지 효과 중에서 성장 온도의 효과에 의해 In의 표면으로의 이동 즉 표면 갈라놓기가 나타났다. 이러한 표면 갈라놓기에 의해서는 표면 바로 가까이에는 아래의 조성비보다 더 큰 조성비가 나타나야 하는데 본 연구 결과는 그와 반대로 나타났다. 이것은 표면

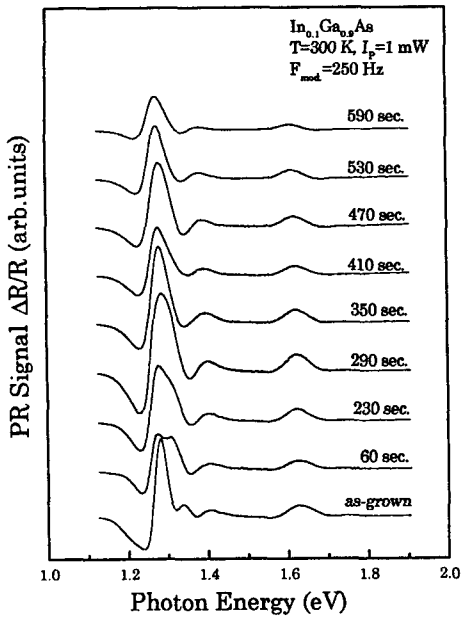


Fig. 4. PR spectra of $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ as a function of chemical etching times.

아래보다 더 큰 조성비를 가진 표면 가까이의 층의 In이 성장 시 Si 셀의 복사열로 인해 재증발 되었기 때문에 In의 조성이 작아진 것으로 생각된다. 그리고, 이러한 효과에 의해 표면 층으로의 In의 이동으로 인해 표면층 아래의 적어진 In 조성비에 의해 어깨 신호가 나타난 것이다. 계면 거칠기와 표면 갈라놓기는 성장 방향으로 조성비의 편차(deviation)의 원인이 되며, 이러한 결과는 전도 띠 끝과 가전자 띠 끝의 찌그러짐(distortion)을 형성시킨다. 계면 거칠기는 성장 방향으로 양이온(cation) 이동(migration)에 의해 결정되며, 계면 거칠기의 경우에는 이러한 양이온의 이동이 잘 되도록 충분한 성장온도가 될 때 최소가 된다. 반면에 표면 갈라 놓기는 낮은 성장 온도에서 줄일 수 있다. 보통 표면 갈라놓기에 의해 표면 조성비가 달라져 PR 신호의 에너지 위치가 달라지는데, 이러한 결과는 분자선 에피택시법에 의해 성장 시 In과 Ga 분자선 선속(flux)의 변화 때문에 In 조성비의 요동(fluctuation), 성장 시 온도차이에 의한 In의 재증발, 그리고 InGaAs 층의 이완에 의해 In의 조성비가 달라질 수 있기 때문이다.⁴⁾

그림 5는 Si 도핑농도가 $3.7 \times 10^{16} cm^{-3}$ 인 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 의 온도 의존성을 알아보기 위해 측정 온도 14K ~ 300K 변화에 대해 측정한 PR스펙트럼이다.

온도가 감소함에 따라 InGaAs E_0 의 위치가 고 에너지쪽으로 이동함과 동시에 띠 끝 이상에서 나타나는 어깨 신호가 사라진다. 신호의 고 에너지쪽으로의 이동은 온도가 감소함에 따라 시료내부 결정 격자의 수축으로 인해 띠 간격 에너지가 증가하기 때문이다.¹²⁾ 온도의 감소로 인해 어깨 신호가 사라지고 50K 이하에서 InGaAs E_0 는 엑시톤과 같은 신호 형태를 보이는 것을 볼 수 있다. 이러한 엑시톤 효과는 Evangelisti 등¹³⁾이 처음으로 제안하였는데, 저온으로 갈수록 띠 전이보다 엑시톤 전이에 의한 것이 우세하

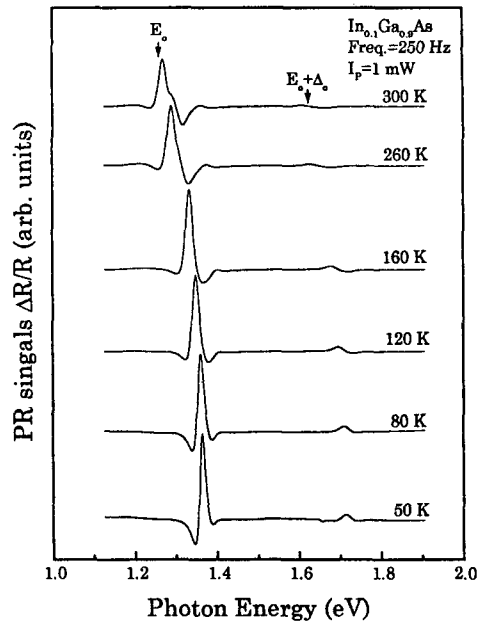


Fig. 5. PR spectra of $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ measured at various temperatures.

기 때문에, InGaAs E_0 신호의 평탄인자가 14K에서 17 meV 정도로 매우 작아졌다. 여기서 평탄인자의 값을 볼 때 자유 엑시톤의 평탄인자가 수 meV 정도¹⁴⁾인데 비해 매우 크므로 불순물에 의한 엑시톤에 의한 것으로 생각된다.

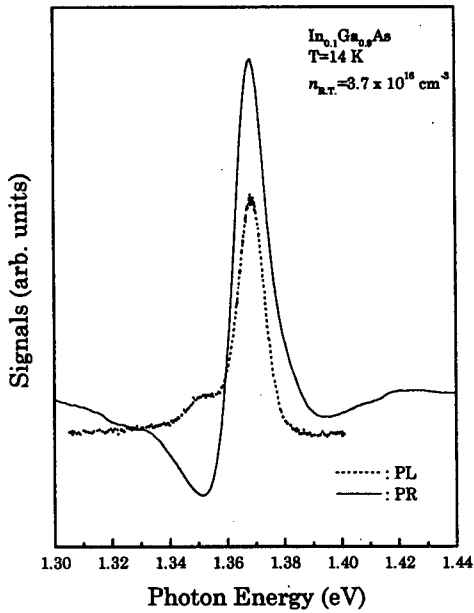
그림 6(a)과 그림 6(b)는 위에서 설명한 구속 엑시톤을 확인하기 위해 14K에서 측정한 PL과 PR 신호를 비교한 것이다.

그림 6(a)에서는 PL 측정에서 중성도너(Si^0)에 구속된 엑시톤에 의한 발광(D^0X) 신호와 PR에서 관측한 InGaAs E_0 신호가 정확히 일치함을 보인다. 이것은 InGaAs E_0 의 신호가 저온으로 가면서 엑시톤과 같은 형태로 됨을 보여주는 것이다. 반면에 그림 6(b)도 저온에서 엑시톤의 형태가 나타나고 두 신호의 에너지 위치가 잘 일치함을 보여주고 있지만 도핑 농도의 영향이 그림 6(a)의 경우보다 더 큰 것으로 볼 때, 이것은 불순물 도핑 농도가 증가함에 따라 띠 간격 에너지 E_g 가 증가한다는 보고⁶⁾와 잘 일치하며, 이러한 In 조성비의 요동 때문에 시료내의 결정성에도 크게 영향을 준다는 것을 말해준다.¹⁵⁾

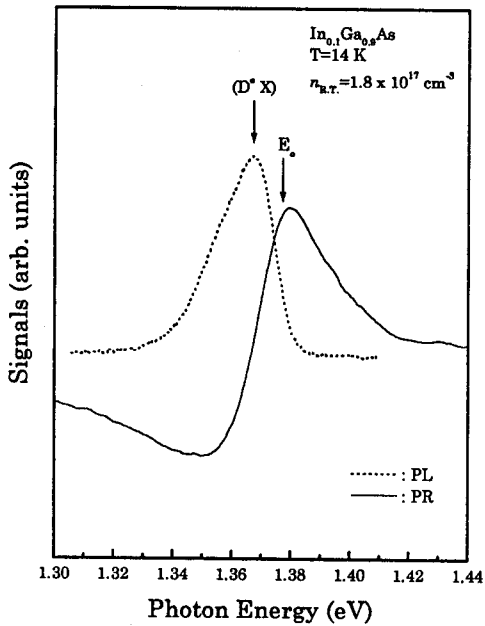
본 실험에서 Si 도핑농도에 따른 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 의 PR 특성은 도핑농도가 증가함에 따라 E_0 띠 간격 에너지와 평탄인자는 증가하였고, E_0 띠 간격 에너지 이상에서 관측된 어깨 신호는 In의 표면으로의 이동에 의해 나타난 것으로 나타났다, 도핑농도가 증가함에 따라 어깨 신호는 성장 시 Si 셀의 온도 차이에 때문에 In 재증발에 의해 표면쪽에 In의 조성비가 더 작아졌다. 그리고, 이러한 어깨 신호가 저온으로 가면서 E_0 띠 간격 에너지의 감소율보다 더 커져 저온에서는 관측되지 않았다.

4. 결 론

MBE로 성장시킨 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 에피층의 특성을



(a)



(b)

Fig. 6. PR and PL spectra of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ measured at 14 K.

photoreflectance 분광법으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상온에서의 PR 측정으로 E_0 띠 간격 에너지가 도핑 농도에 따라 각각 1.27, 1.28 및 1.34 eV에서 관측되었으

며, 이로부터 In 조성비를 구한 결과 약 0.1이다. 그리고 $E_0 + 12$ meV에서 관측된 어깨 피크는 In의 표면 갈라놓기 현상으로 인해 성장방향으로 조성비의 편차 때문에 생긴 것이다.

2) E_0 신호 이상에서 관측된 어깨 신호는 도핑농도가 증가함에 따라 고 에너지쪽으로 이동하였는데, 이것은 Si 셀의 온도 증가로 인해 도핑농도가 증가할수록 표면 재증발이 커졌기 때문이다.

3) 측정 온도를 감소시키기에 따라 E_0 신호의 피크는 엑시톤에 의한 발광 피크와 같으며, 이를 PL 측정으로 확인하였다. 그리고 이 신호의 평탄인자는 약 17 meV였다.

참고 문헌

1. Wei Liu, Desheng Jinag, and Yaohui Zhang, *J. Appl. Phys.* **77** (9), 4564 (1995).
2. P.W. Yu, and B. Jogai, *J. Appl. Phys.* **76** (11), 7535 (1994).
3. H. Brugger, H. Mussig, and C. Wolk, *Appl. Phys. Lett.* **59** (21) 2739 (1991).
4. A. Bosacchi, F. Colonna, S. Franchi, P. Pascarella, and P. Allegri, *J. Crystal Growth*, **150**, 185 (1995).
5. D.P. Wang and C.T. Chen, *J. Appl. Phys.* **78** (3), 2117 (1995).
6. D.E. Aspnes, *Phys. Rev. B* **10**, 4228 (1974).
7. S.H. Pan, H. Shen, Z. Hang, and F.H. Pollak, *Phys. Rev. B* **38**, 3375 (1988).
8. L. Peters, L. Phaneuf, L.W. Kapitan, and W. M Theis, *J. Appl. Phys.* **62**, 4558 (1987).
9. Ali Badakhshan, R. Glosser, and K. Alavi, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1218 (1991).
10. P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis, and M. Cardona, *Phys. Rev. B* **35**, 9174 (1987).
11. Y.S. Hunang, H. Qiang, and Fred H. Pollak, *J. Appl. Phys.* **70** (12), 7537 (1991).
12. A. Badakhshan, C. Durbin, R. Glosser, K. Alavi and R. Pathak, *J. Vac. Sci. Technol. B* **11**, 167 (1991).
13. F. Evangelisti, A. Frova, and J. U. Fischbach, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 1516 (1974).
14. Alok K. Berry, D.K. Gaskill, G.T. Stauf, and N. Bottka, *Appl. Phys. Lett.* **58** (24), 2824 (1991).
15. M.J. Joyce, M. Gal, and J. Tann, *J. Appl. Phys.* **65** (3), 1377 (1989).