

Si이 첨가된 In_{0.1}Ga_{0.9}As 에피층의 Si셀 온도에 따른 표면특성 연구

Surface characteristics of Si-doped In_{0.1}Ga_{0.9}As epilayers due to Si-cell temperature

김동렬*, 이동율*, 배인호*
(Dong-Lyeul Kim*, Dong-Yul Lee*, In-Ho Bae*)

Abstract

We have investigated the effect of surface In composition with Si doping cell temperature on the In_{0.1}Ga_{0.9}As epilayers grown on GaAs substrates. The epilayers were grown by molecular beam epitaxy(MBE) method and were characterized by the photoreflectance(PR) measurements. The E₀ bandgap energies of In_{0.1}Ga_{0.9}As epilayers were observed at around 1.28 eV at room temperature, and the additional shoulder peaks appeared at the higher energies than E₀ peaks. The shoulder peaks were shifted toward 12 meV to 70 meV higher energies than E₀ with increase of Si doping concentrations. The intensity of the additional shoulder peak was decreased with lowering the measurement temperature, and the peak disappeared with the increase of surface etching time. This result shows that In composition at surface of InGaAs epilayer is decreased with the increase of the doping cell temperature. We consider that the reason of the decrease of In composition at the surface should be due to In re-evaporation from the surface by radiation heat of Si doping cell.

Key Words(중요용어) : Si doping cell, In_{0.1}Ga_{0.9}As epilayer, molecular beam epitaxy(MBE), photoreflectance(PR)

1. 서 론

InGaAs는 GaAs에 비해 작은 유효 질량(effective mass)과 높은 전자 이동도(electron mobility)때문이고 전자 이동도 트랜지스터(high electron mobility transistor; HEMT)와 같이 변조 도핑된(modulation doped) 구조를 가지는 고속소자에서 많이 사용되고 있다^[1-3]. 이러한 InGaAs는 대부분 에피층의 형태로 이용되고 있으며, 에피층의 성장은 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy; MBE) 및 금속유기물 기상성장법(metal-organic vapor phase epitaxy; MOVPE)에 의해 성장되어지고 있다. InGaAs 에피

층을 분자선 에피택시법으로 성장할 경우 성장하는 동안 성장 온도와 조성비에 따라 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 성장과정에서 깊이에 따른 조성비의 관찰로서 성장과 동시에 이차-이온 질량 분석기(secondary-ion mass spectroscopy; SIMS)^[5]나 고 에너지 전자선 회절 반사(reflection high energy electron diffraction; RHEED)^[6]로 분석하며, 성장 후에는 photoluminescence (PL)이나 photoreflectance (PR)를 이용해 신호의 에너지를 계산함으로써 In의 조성비를 결정한다. Bosacchi 등^[4]은 MBE로 성장시킨 In_xGa_{1-x}As의 표면 갈라놓기를 알아보기 위해 양자 우물 형태의 구조에서 PL 측정으로 발광신호의 에

* : 영남대학교 물리학과

(경북 경산시 대동 214-1, Fax; (053)814-6141
E-mail; dlkim@physics.yeungnam.ac.kr)

2000년 5월 8일 접수, 2000년 6월 5일 심사완료

너지 위치를 이용하여 연구한 결과 표면 갈라놓기는 성장온도가 낮을수록 줄어들며, 이와 반대로 성장온도가 높을 경우에 In의 표면 갈라놓기가 커지게 되므로 $In_xGa_{1-x}As$ 와 GaAs 계면 거칠기(roughness)는 상대적으로 증가됨을 보고하였다. 이와 같이 InGaAs 에피층은 성장중에서 기판의 온도에 매우 민감하게 반응하고, 성장된 에피층의 특성에 아주 큰 영향을 주게된다. 또한 대부분의 InGaAs층은 수십 Å ~ 수백 Å 정도로 매우 얇게 성장되어 양자우물 형태로 이용되고 있다. 따라서 성장직후 표면의 조성비에 영향을 줄 수 있는 표면갈라놓기 및 표면 재증발(re-evaporation) 등은 소자의 특성에도 많은 영향을 주게된다. 본 연구에서는 분자선 에피택시법으로 Si 이 첨가된 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 에피층을 성장하고, 성장된 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 에피층의 특성을 PR 분광법을 이용하여 조사하였다. 이로부터 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 에피층 표면에 관한 정보를 얻었으며, 특히 Si를 첨가하기 위해 고온에서 이용되는 Si 분자선 셀에 의한 InGaAs 에피층의 표면 영향에 대해 연구하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 시료는 분자선 에피택시법으로 반질연성 GaAs 기판 위에 성장온도 560 °C에서 불순물이 첨가되지 않은 0.5 μm GaAs 완충층을 성장시키고, 기판의 온도를 다시 540 °C로 낮춘 후, Si이 첨가된 농도가 다른 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 단일 에피층(single epilayer)을 약 1 μm 두께로 각각 성장하였다. 이때 Si셀의 온도는 각각 960 °C, 1,020 °C, 1,080 °C 이었으며, 상온에서 Hall 효과를 측정결과 각 시료의 전자농도는 각각 $3.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 으로 측정되었다. 시료의 성장이 끝난 후에는 성장온도에서 상온으로 냉각하는 동안 시료 표면 As의 재증발을 막기 위해 시료의 온도가 약 300 °C 이하로 될때까지 As빔을 계속적으로 쬐여주었다. PR 측정은 He 순환방식 저온장치(CTI-22)를 이용하여 14 K ~ 300 K에서 수행하였으며, 여기광으로 1 mW He-Ne 레이저(6328 Å)를 사용하였고, 변조 주파수는 250 Hz로 하였다. 탐침 광원으로는 250 W 텅스텐-할로젠 램프를 사용하여 초점거리가 0.27 m 인 분광기(Spex 270M)를 사용하여 광학 렌즈로 시료에 집속시키고, 시료로부터의 신호를 Si 포토다이오드로 검출하여 lock-in 증폭기(EG & G 5302)를 이용하여 컴퓨터로 받아들였다.

3. 실험결과 및 논의

그림 1은 첨가된 Si의 농도가 각각 다른 $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ 에피층을 300 K에서 측정한 PR 스펙트럼이다. PR 스펙트럼과 같은 변조 분광학 신호는 Aspnes 방정식 즉, 3차 미분형 함수형태로 나타나며 다음과 같다^{17,18)}.

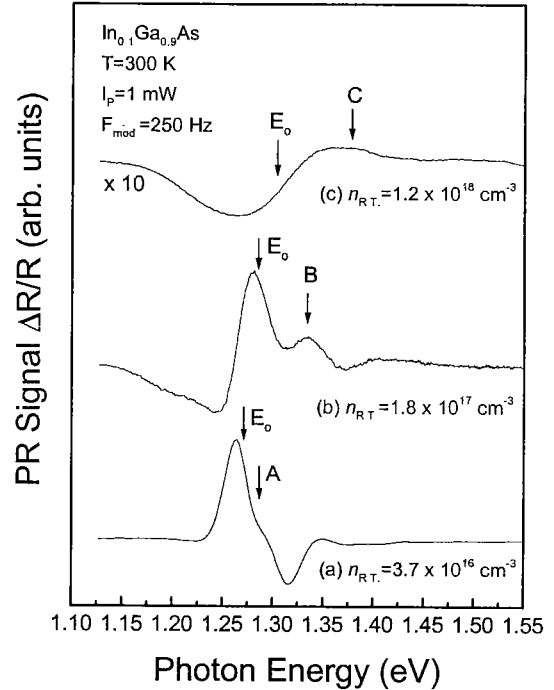


그림 1. 도핑농도에 따른 $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ 의 상온에서 측정한 PR 스펙트럼.

Fig. 1. PR spectra of $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ with different doping concentration measured at room temperature.

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

여기서, C 는 진폭, θ 는 위상, E 는 광자 에너지, E_0 는 띠 간격 에너지, Γ 는 평탄인자, n 은 임계점의 차원(3차원일 경우 $n=2.5$, 2차원일 경우 $n=3$, exciton일 경우 $n=2$)을 나타낸다. 그림 1에서는 각 시료에서 띠 간격 에너지(E_0)에 의한 신호가 약 1.28 eV 부근에서 관측되었으며, 각 시료에서 E_0 로부터 고 에너지쪽에 작은 어깨신호(shoulder peak)가

나타났다. 그림에서 전자농도가 $3.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 인 경우(A)에는 약 12 meV, $1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 인 경우(B) 약 50 meV, $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 인 경우(C) 약 70 meV정도 높은 에너지에서 나타났다. 그림에서 도핑농도가 증가하면서 띠 간격 에너지가 고 에너지쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있고, 띠의 평탄인자가 증가함을 보여준다. 이러한 결과는 PR 응답이 도핑농도에 직접 관련이 있다는 것을 말해주며, Peter 등¹⁰⁾은 도핑농도가 $1 \times 10^{16} \sim 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 범위에서는 E_o 가 도핑농도에 선형적으로 의존한다고 하였다. Badakhshan 등¹¹⁾은 도핑농도가 $1 \times 10^{17} \sim 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 범위에서 $E_1(A_{4.5e} - A_{6e})$ 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 띠 간격 에너지가 고 에너지쪽으로 증가하고 띠의 평탄인자가 증가함을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서는 도핑농도에 따른 띠의 평탄인자의 증가가 뚜렷하게 나타나고 있지 않다. 이것은 In의 표면 갈라짐에 의해 표면 떠뜸 층(floating layer)의 생성으로 인한 어깨 신호와의 중첩으로 인해 평탄인자가 작게 나타난 것이라고 생각된다¹⁴⁾.

그림 2는 그림 1에서 나타난 상온에서 측정된 PR 스펙트럼에서 시료의 전자농도에 따른 주피크와 어깨 피크의 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 첨가되는 Si의 양이 증가함에 따라 주피크 위치의 고 에너지로의 이동보다 어깨 피크 위치의 이동이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 띠간격 에너지 이상에서 관측된 어깨 신호가 Si 도핑 농도에 관계가 있다는 것을 말해주며, 도핑 농도를 증가함에 따라 Si 셀의 복사열과 장시간에 걸쳐 기판에 고온을 가해줌으로 인해 시료내의 In의 표면으로의 이동이 점점 커짐을 나타낸다. 만약 이러한 고 에너지로의 이동이 온도의 영향이 아니고 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에피층의 변형에 의한 것이라고 생각하면 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에피층의 두께가 임계두께를 넘었으므로 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에피층이 완전히 이완된 상태여서, 이러한 영향에 의해 어깨 신호가 이동된다면 저 에너지쪽으로 이동되어야 한다. 그러나 본 결과에서는 반대의 결과이므로 에피층의 이완에 의한 영향이라고는 볼 수 없다. 1.28 eV 근처에서 관측된 어깨 신호는 InGaAs 성장 시기와 표면 근처의 온도차이로 인해 In의 조성비가 감소함으로 나타나는 신호로써 In 조성비가 약 0.06으로 계산되었다. $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 시료의 In 조성비

($x=0.1$)와 성장두께($1 \mu\text{m}$)를 고려할 때, 이 시료의 이론적인 임계두께가 약 200 Å 정도이다. 따라서 이 시료에 변형의 영향이 크게 작용하지 않고, 에피층이 이완된 상태라고 할 수 있으므로 In의 조성비를 구하기 위해서 관측된 E_o 를 S. H. Pan 등¹¹⁾이 보고한 이완된 띠 간격 에너지 식 (2)에 대입하여 구한 결과 In의 조성비는 0.095로 계산되었다.

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

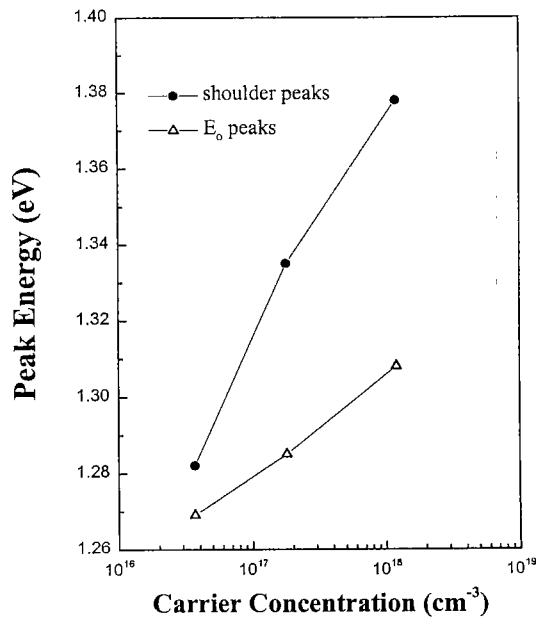


그림 2. 도핑농도에 따른 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ 의 E_o 피크와 어깨 피크.

Fig. 2. E_o peak and additional shoulder peak position of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ with different doping concentration at room temperature.

그림 3(a)는 PR 스펙트라의 온도 의존성을 알아보기 위해 Si 도핑농도가 $1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 인 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 시료에 대한 측정 온도 변화(14 K ~ 300 K)에 따른 결과를 나타낸 것이다. 반도체의 온도 의존성은 온도가 감소함에 따라 결정 격자의 수축과 운반자들의 얼어붙음(frozen)으로 인해 표면 근처에

전하밀도의 감소로 표면전기장이 감소하기 때문에 E_o 는 증가하고, 띠의 평탄인자는 감소한다. 그러나 그림에서 온도가 감소함에 따라 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 의 에너지가 고 에너지로 이동하지만, 평탄인자는 오히려 증가함을 볼 수 있다. 우리는 온도에 따른 띠 간격 에너지의 변화가 단지 주 신호와 어깨 신호의 중첩에 의한 변화가 아니라 조성비가 각기 다른 3개의 영역에 의해 나타난다고 가정하였다.

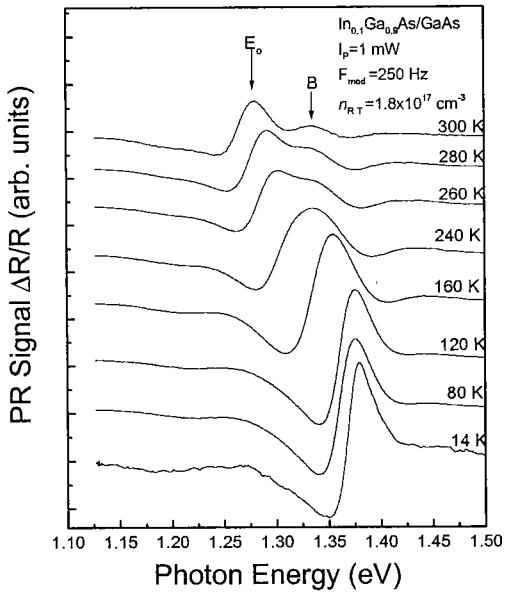


그림 3. (a) 온도에 따른 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 에피층의 PR 스펙트럼.

(a) PR spectra of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ epilayer measured at various temperatures.

이러한 현상을 설명하기 위해 그림 3(b)에 나타낸 바와 같이 3개의 In 조성비를 가진 영역으로 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 의 영역을 나누었는데, 첫 번째 영역은 In의 조성이 비교적 균일한 영역(I), 두 번째 영역은 In의 표면이동으로 인해 In 조성이 첫 번째 영역보다 큰 영역(II), 세 번째 영역은 In의 표면 재증발에 의해 In 조성이 적은 영역(III)으로 나눈다. 그러므로 In 조성비가 다르기 때문에 온도에 따른 세 영역의 띠 간격에 대한 기여가 다르다. 상온에서는 표면 공핍 영역이 비교적 적으므로 두 번째 영역에 의해 주 신호가 나타난 것이고, 어깨 신호는 세 번째 영역에 의해 나타난 것이라고 생각된다. 온도가 점점 감소함에 따라 표면 공핍 영역의 증가로 인해 실험에서 얻어지는 주 신호에 기여하는 것은 두 번째(II) 영역에서 첫

번째(I) 영역으로 변하고, 어깨 신호는 세 번째(III) 영역에서 점점 두 번째(II) 영역의 기여가 크게 작용한다. 따라서 In의 조성비가 균일한 영역(I)이 주 신호를 이루고 있는 저온영역에서의 신호위치는 온도에 따른 피크에너지 변화가 이론적인 값과 유사한 변화를 보이고 있으며, 나머지 두 부분은 조성비가 변화되고 있는 부분의 신호이므로 이론적인 값에서 얻어지는 기울기와는 다르게 나타나는 것이다. 또 상온에서의 주 신호와 어깨 신호의 에너지 차이가 이러한 다른 조성을 가진 영역에 의해 저온으로 갈수록 온도에 따른 E_o 의 감소율이 틀려져 두 신호가 중첩되어 저온으로 갈수록 평탄인자가 커지는 것으로 보이는 것이다. 이러한 사실은 온도에 따른 E_o 의 변화를 나타내는 Varshni 방정식에서 조성비에 따른 E_o 의 변화율을 결정하는 Varshni 계수 α 와 β 의 값에 따라서 결정되기 때문이다.

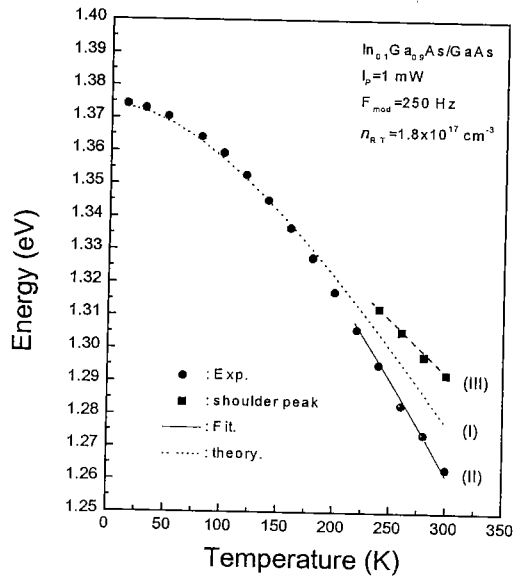


Fig. 3. (b) $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ E_o 의 온도의존성.

(b) The temperature dependence of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ E_o

그림 4는 조성이 다른 영역으로 나눈 우리의 가정을 확인하기 위해 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 가까이에서 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, 우리의 결과는 그와 반대로 나타났다. 이것은 표면 아래보다 더 큰 조성비를 가진 표면 가까이의 층의 In이 위에서 언급한 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.

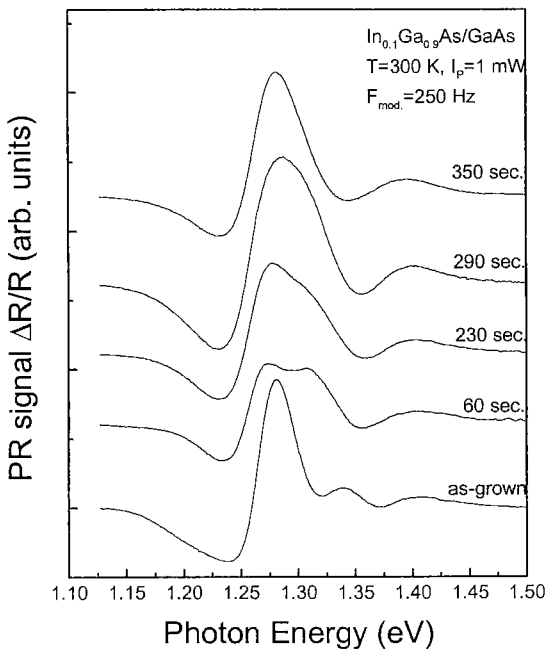


그림 4. 화학적 에칭시간에 따른 In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs의 PR 스펙트럼.

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

이러한 계면 거칠기와 표면 갈라놓기는 성장 방향

으로 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 갈라놓기는 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 때문이다⁴¹. 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 도핑 농도가 증가함에 따라 표면 In 조성비가 작은 것은 성장 중에서 이용되는 Si 셀 온도가 높으므로 인해, 성장을 마친 후 시료의 표면이 Si 셀의 복사열에 의해 기판이 상온으로 냉각되는 동안 표면에서 In의 재증발(re-evaporation)에 의한 것으로 생각된다. 본 실험에서 Si 도핑농도에 따른 In_{0.1}Ga_{0.9}As의 PR 특성은 도핑농도가 증가함에 따라 띠 간격 에너지와 평탄인자는 증가하였고, 띠 간격 에너지 이상에서 관측된 어깨 신호는 In의 표면으로의 이동에 의해 나타난 것이며, 도핑농도가 증가함에 따라 어깨 신호는 성장 시 Si 셀의 온도차이에 때문에 In 재증발에 의해 표면쪽에 In의 조성비가 더 작아졌다. 그리고, 이러한 어깨 신호가 저온으로 가면서 띠 간격 에너지의 감소율보다 더 커져 저온에서는 관측되지 않았다.

4. 결 론

MBE로 성장시킨 In_{0.1}Ga_{0.9}As 에피층의 특성을 photoreflectance 분광법으로 조사한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 상온에서의 PR 측정으로 띠 간격 에너지가 도핑 농도에 따라 각각 1.27, 1.28 및 1.34 eV에서 관측되었으며, 이로부터 In 조성비를 구한 결과 약 0.1이다. 그리고 E₀+12 meV에서 관측된 어깨 피크는 In의 표면 갈라놓기 현상으로 인해 성장방향으로 조성비의 편차 때문에 생긴 것이다.
2. E₀ 신호 이상에서 관측된 어깨신호는 도핑농도

가 증가함에 따라 고 에너지 쪽으로 이동하였는데, 이것은 Si 셀의 온도 증가로 인해 도핑농도가 증가할수록 표면 재증발이 커졌기 때문이다.

3. 측정 온도를 감소시킴에 따라 신호의 피크는 엑시톤에 의한 발광피크와 같으며, 이를 PL 측정으로 확인하였다. 그리고 이 신호의 평탄인자는 약 17 meV이었다.

참고 문헌

[1] Wei Liu, Desheng Jinag, and Yaohui Zhang, "Spectroscopic studies of the effects of two-dimensional electron gas on interband transitions", *J. Appl. Phys.* **77**(9), 4564 (1995).

[2] P. W. Yu, and B. Jogai, "Temperature dependence of photoluminescence in modulation-doped pseudomorphic high electron mobility transistor $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ structures", *J. Appl. Phys.* **76**(11), 7535 (1994).

[3] H. Brugger, H. Mussig, and C. Wolk, "Optical determination of carrier density in pseudomorphic $\text{AlGaAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ hetero-filed-effect transistor structures by photoluminescence", *Appl. Phys. Lett.* **59**(21), 2739 (1991).

[4] A. Bosacchi, F. Colonna, S. Franchi, P. Pascarella, and P. Allegri, "Indium surface segregation in InGaAs -based structures prepared by molecular beam epitaxy and atomic layer molecular beam epitaxy", *J. Crystal Growth* **150**, 185 (1995).

[5] K. Muraki, S. Fukatsu, and Y. Shiraki, "Surface segregation of In atoms during molecular beam epitaxy and its influence on the energy levels in $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ quantum wells", *Appl. Phys. Lett.* **61**(5), 557 (1992).

[6] R. Kaspi, and K. R. Evans, "Improved compositional abruptness at the InGaAs on GaAs interface by presaturation with In during molecular-beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* **67**(6), 819 (1995).

[7] D. P. Wang and C. T. Chen, "Observation of quantum confined Stark effect in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ single-quantum well by photo-

reflectance spectroscopy", *J. Appl. Phys.* **78**(3), 2117 (1995).

[8] D. E. Aspnes, "Band nonparabolicities, broadening, and internal field distributions: The spectroscopy of Franz-Keldysh oscillations", *Phys. Rev.* **B10**, 4228 (1974).

[9] L. Peters, L. Phaneuf, L. W. Kapitan, and W. M. Theis, "Noncontact doping level determination in GaAs using photoreflectance spectroscopy", *J. Appl. Phys.* **62**, 4558 (1987).

[10] Ali Badakhshan, R. Glosser, and K. Alavi, "Carrier concentration determination by photoreflectance at E_1 in thin film highly doped GaAs ", *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1218 (1991).

[11] S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang, and F. H. Pollak, "Photoreflectance study of narrow-well strained-layer $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ coupled multiple-quantum-well structures", *Phys. Rev.* **B38**, 3375 (1988).