

저압 MOCVD 방법으로 성장된 InGaAsP 에피층에서의 ordering 현상

김대연 · 문영부 · 이태완 · 윤의준 · 이정용* · 정현식**

서울대학교 재료공학부

*한국과학기술원 재료공학과

**National Renewable Energy Laboratory, U.S.A.

(1998년 2월 7일 접수)

Ordering in InGaAsP Epitaxial Layers Grown by Low Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition

Daeyeon Kim, Youngboo Moon, Taewan Lee, Euijoon Yoon,
Jeong Yong Lee* and Hyeonsik Cheong**

*School of Materials Science and Engineering and Inter-university Semiconductor Research Center
Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea*

**Department of Materials Engineering, KAIST*

***National Renewable Energy Laboratory, U.S.A.*

(Received February 7, 1998)

요 약 - 저압 유기금속 화학기상증착법을 이용하여 600°C와 620°C에서 InP 기판 위에 격자일치된 InGaAsP 에피층을 성장하였다. InGaAsP 에피층의 기상에서의 조성에 따른 고상에서의 조성의 변화를 분석하여, 3족 원소의 경우에는 기상에서 반응이 일어나는 표면으로의 3족 원료의 확산에 의해 조성이 결정되었으나, 5족의 경우에는 As과 P의 증기압의 차이와 AsH₃, PH₃의 열분해 효율의 차이에 의해 조성이 결정되었다. 측정 온도에 따른 PL 스펙트럼의 변화를 분석하여 75K 이하의 저온에서 비정상적인 PL 스펙트럼 피크의 거동을 관찰하였다. 이러한 PL 피크의 비정상적인 거동은 투과 전자현미경 분석과 투과 스펙트럼 분석을 통해 극부적인 ordering의 차이에 의한 에너지 갭의 공간적인 변화에 의해 나타나는 것으로 설명되었다.

Abstract - InGaAsP epitaxial layers lattice matched to InP were grown at 600 and 620°C by low pressure metalorganic chemical vapor deposition. Solid phase composition of group III was controlled by the diffusion flux from gas phase to the reaction surface. For the case of group V, the difference of As and P vapor pressure and pyrolysis efficiency of PH₃ and AsH₃ mainly determined their incorporation into solid. An abnormal behavior of peak energy shift was observed below 75K in temperature variant photoluminescence study. This abnormal behavior was explained by the difference in order of ordering which makes spatial variation of energy gap in InGaAsP layer and this explanation was supported by the analyses of transmission electron microscopy and transmission spectroscopy.

1. 서 론

4성분계 물질인 In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}는 격자상수와 에너지 갭을 독립적으로 조절할 수 있으므로 InP와 GaAs 기판 위에 격자일치 조건에서 여러 파장에 해당하는 에너지 갭을 갖도록 성장할 수 있다. 특히, InP 기판 위에 성장된 In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} 에피층은 광섬유가 최소 손실을 보이

는 1.55 μm과 최소 분산을 보이는 1.3 μm 파장에 해당하는 에너지 갭을 얻을 수 있으므로 광통신용 레이저 다이오드, 광검출기 등의 제작에 필수적인 물질로 널리 연구되고 있다. 그러나 In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}는 4성분계의 물질이고 3족 하위격자와 5족 하위격자의 조성을 모두 독립적으로 조절해야 하므로 원하는 에너지갭과 격자 일치를 얻기 위해서는 두 하위격자의 조성 결정기구를 이해

하는 것이 필요하다.

급속한 계면형성과 대량생산이 용이한 저압 유기금속 화학증착법(metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)에 의해 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층을 성장할 때, 성장속도와 3족 원소의 조성은 3족 원료의 기상화산에 의해 결정되는 것으로 알려져 있고, 5족 원소의 조성은 증기압 차이와 공급되는 5족 원료의 열분해 효율에 영향 받는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층 성장의 경우 5족 원료의 조성은 상대적으로 조절이 용이하지 않으며 온도에 따라서도 민감하게 변하므로, 재현성 있는 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층의 성장을 위해서는 5족 원소의 기상에서 고상으로의 인입 기구(incorporation mechanism)에 대한 이해가 요구된다.

또한, 최근들어 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층 성장에서도 InGaP 성장에서 자주 관찰되는 ordering[2-4] 및 상분리[5-10]와 같은 구조적 불균일성이 보고되고 있다[11, 12]. 그러나, 아직까지 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 성장에서 구조적 불균일성에 대한 연구는 상대적으로 미흡하며, 특히 InGaP 성장[5-10]을 중심으로 꾸준히 연구된 구조적 불균일성이 전기적, 광학적 물성에 미치는 영향에 대해서는 앞으로 많은 연구가 요구되고 있다[13-15].

본 실험에서는 저압 MOCVD 방법으로 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층을 성장하고 기체상에서의 조성ة 따른 고체상에서의 조성변화로부터 3족과 5족의 조성을 결정하는 주요 기구를 살펴보았으며, 성장조건에 따른 전기적, 광학적, 결정학적 특성의 변화를 분석하였다. 또한 photoluminescence (PL) 측정과 투과 스펙트럼의 측정 및 TEM 분석을 통해 ordering 또는 상분리 등의 구조적인 불균일성과 광학적인 특성 사이의 관계를 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층은 76 Torr의 저압에서 MOCVD 방법으로 성장하였고, 기판으로는 철(Fe)을 doping한 반절연성(semi-insulating) (100) InP를 사용하였다. 성장에 앞서 기판은, 초음파 세척기 내에서 TCE(trichloroethylene), 아세톤(acetone), 메탄올(methanol)의 순으로 각각 10분간 유기물 세척을 하였고, 5 H_2SO_4 : 1 H_2O_2 : 1 H_2O 황산에칭용액으로 2분동안 에칭하여 오염된 표면층을 제거하였다. 모든 기판은 620°C, 5분간 PH_3 분위기에서 *in situ* 산화막 제거 단계를 거친 후 에피층을 성장하였다. 3족 원료로는 TMIIn과

TMGa를 사용하였고, 5족 원료로는 99.9997%의 AsH₃과 PH₃를 사용하였다. 화학 흡착법을 이용하여 정제된 수소(99.9999%)를 이송기체로 사용하였고 이송기체의 유량은 12 slm으로 일정하게 유지하였다.

In situ 산화막 제거 후, 먼저 1000Å의 InP buffer층을 성장하고 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층을 성장하였다. 에피층의 성장은 600°C와 620°C의 온도에서 이루어졌고, TMGa과 PH₃의 유량을 일정하게 유지하며 TMIIn과 AsH₃의 유량을 조절함으로써 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층의 조성을 조절하였다. 이 때, 성장속도는 0.6 $\mu\text{m/hr}$ ~2.75 $\mu\text{m/hr}$, V/III 비는 307~620이고, 에피층은 1~1.5 μm 의 두께로 성장하였다.

성장된 에피층의 표면형상은 Nomarski 광학 현미경으로 관찰하였고, 두께는 stain 에칭후, 주사전자현미경(SEM)으로 측정하였다. X-ray 이중결정회절법(double crystal diffractometer, DCD)으로 격자상수를 측정하고 PL로 에너지 갭을 측정하여 에피층의 조성을 결정하였다. 에피층의 구조적 불균일성을 관찰하기 위해 평면 및 단면 TEM 분석을 하였다. 상분리와 ordering 등의 구조적 불균일성이 광학적 물성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 9K에서 상온까지 측정온도에 따른 PL 피크 에너지의 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 성장변수에 따른 3족 원소와 5족 원소의 인입률 변화

MOCVD 방법을 이용한 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층의 성장시 3족 원소와 5족 원소의 인입 기구를 규명하기 위하여 기상의 조성에 따른 고상의 조성의 변화를 관찰하였다. 고상에서의 조성은 DCD와 PL로 측정한 격자상수와 에너지 갭으로부터 결정하였다. 격자상수와 조성과의 관계는 Vegard 법칙을 이용하여 결정하였고, 에너지 갭으로부터 조성을 결정할 때에는 격자 불일치에 의한 응력(stress) 때문에 생기는 Γ point에서의 무거운 홀(heavy hole)과 가벼운 홀(light hole)의 에너지 준위 분리를 고려하였다[16].

3족 원소의 기상에서의 조성에 따른 고상에서의 조성의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, In의 고상으로의 인입률이 Ga에 비해 낮게 나타나고 있다. 이러한 In의 낮은 인입률은 기상에서의 반응에 의한 In의 손실, TMIIn과 TMGa의 열분해 효율의 차

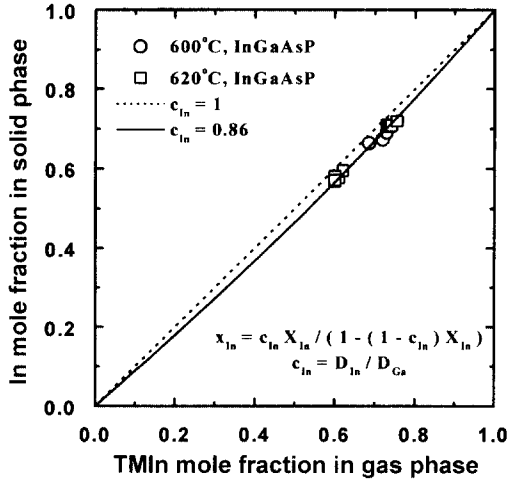


Fig. 1. Solid phase mole fraction change with gas phase mole fraction for group III. TMGa=0.034sccm, V/III=536~768, $\Delta a/a < 4 \times 10^{-3}$.

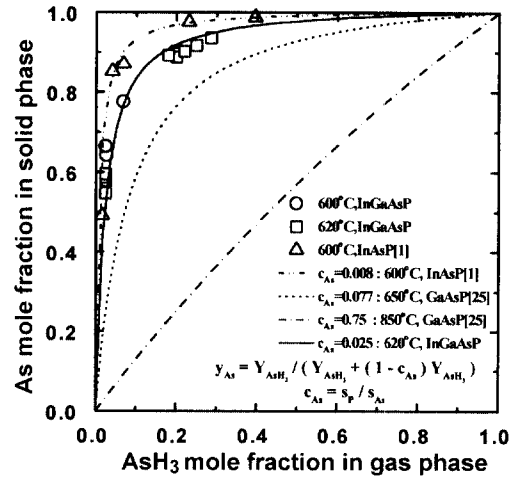


Fig. 2. Solid phase mole fraction change with gas phase mole fraction for group V. TMGa=0.034sccm, V/III=536~768, $\Delta a/a < 4 \times 10^{-3}$.

이, 확산속도의 차이 등에 의해 나타날 수 있다. 초기의 MOCVD 성장에서 많이 보고된 기상 반응에 의한 In의 손실은 반응성이 적은 TMIn을 사용하고 저압에서 성장이 이루어지므로 무시할 수 있음이 본 MOCVD 장비를 이용한 이전의 InGaAs 성장에서 확인되었다[17]. 또한, $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층의 성장온도인 600°C와 620°C에서는 TMIn과 TMGa가 모두 충분히 열분해된다고 보고되어 있으며[1], 본 MOCVD 장비를 이용한 이전의 InGaAs 성장에서 3족의 조성이 3족 원료의 물질 전달에 의해 결정되었던 결과를 이미 보고한 바 있다[17].

이 결과에 기초하여 $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층 성장에서도 3족 원소의 조성이 기상 확산속도에 의해 결정된다고 가정하였다. 이 경우 3족 원소의 고상에서의 물분율 x 는 계면으로의 flux 비에 의해 결정된다. In과 Ga에 대한 경계층(boundary layer)의 두께를 동일하다고 가정하고, 계면에서의 3족 원소의 분압은 V/III 비가 1보다 매우 큰 조건에서는 무시할 수 있으므로[1] 고체상에서의 In의 물분율 x_{in} 은 다음과 같이 근사적으로 표현된다.

$$x_{in} = \frac{J_{in}}{J_{in} + J_{Ga}} = \frac{D_{in} P_{in}^o}{D_{in} P_{in}^o + D_{Ga} P_{Ga}^o} = \frac{c_{in} X_{in}}{1 - (1 - c_{in}) X_{in}}$$

여기서 $X_{in} = \frac{P_{in}^o}{P_{in}^o + P_{Ga}^o}$, $c_{in} = \frac{D_{in}}{D_{Ga}}$

위에서 J 는 3족 원소의 flux이고, 기상확산계수 D 는 분자량에 의해 결정되며 D_{TMIn}/D_{TMGa} 의 계산값은 0.847

이다. 이 값은 Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층 성장에서 구해진 실험값 0.87과 1.5%의 매우 작은 오차를 보인다. 따라서, $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층의 성장에서도 InGaAs 성장의 경우와 마찬가지로 3족의 조성은 기상에서의 TMIn과 TMGa의 확산에 의해 결정되는 것으로 설명될 수 있다.

3족 원소와는 달리, 5족 원소의 고상에서의 조성은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 기상에서와 큰 차이를 보인다. Koukitu 등[18]의 열역학적 계산 결과에 따르면 일반적인 MOCVD 성장온도에서는 As과 P의 큰 증기압 차이로 인해 P의 인입율이 매우 낮게 나타난다. 본 연구에서 구한 P의 인입율은 열역학적인 계산값보다 더 낮게 나타나는데 이는 실제 저압 MOCVD 반응기안에서는 PH_3 이 반응기에 머무르는 시간이 매우 짧기 때문에 실제의 PH_3 열분해 효율이 Koukitu등이 고려한 평형상태에서의 열분해 효율에 미치지 못하기 때문으로 생각된다. 두 5족 원소의 평형 분압의 차이와 열분해 효율이 함께 고려된 유효흡착상수(effective sticking coefficient), s 를 도입하면, 기체상에서의 As 조성과 고체상에서의 As 조성의 정량적인 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다[19].

$$y_{As} = \frac{s_{As} f_{AsH_3}}{s_{As} f_{AsH_3} + s_P f_{PH_3}}$$

$$= \frac{f_{AsH_3}}{f_{AsH_3} + c_{As} f_{PH_3}} = \frac{Y_{AsH_3}}{Y_{AsH_3} + c_{As} (1 - Y_{AsH_3})}$$

$$\text{여기서 } c_{As} = \frac{S_P}{S_{As}}, Y_{AsH_3} = \frac{f_{AsH_3}}{f_{AsH_3} + f_{PH_3}}$$

위에서 f 는 5족 원료의 유량이다. 본 실험에서 c_{As} 값은 0.025로 As의 인입율이 P 인입율의 40배임을 알 수 있다. 이렇게 c_{As} 값이 작은 것은 PH_3 의 분자량이 AsH_3 의 분자량보다 훨씬 크지만, PH_3 의 열분해 효율이 매우 작기 때문으로 생각된다. 따라서, MOCVD 방법을 이용한 $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층 성장에서 5족의 조성은 As과 P의 증기압과 AsH_3 과 PH_3 의 열분해 효율의 차이에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

3.2 $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층의 광학적 물성과 구조적 불균일성과의 관계

$In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 에피층의 광학적 특성을 분석하기 위해 온도에 따른 PL 스펙트럼의 변화를 관찰하였다. 일반적으로 온도에 따른 에너지갭의 변화는 다음과 같이 Varshni 방정식[20]으로 표현된다. 여기서 $E_G(0)$ 는 0K에서의 에너지갭이고, α , β 는 물질 상수이다.

$$E_G(T) = E_G(0) + \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 상온에서의 에너지갭이 1.57 μm 인 $In_{0.617}Ga_{0.383}As_{0.883}P_{0.117}$ 에피층과 1.29 μm 인 $In_{0.719}Ga_{0.281}As_{0.595}P_{0.405}$ 에피층의 온도에 따른 PL 스펙트럼의 변화이다. 1.57 μm 에피층의 경우에는 PL 피크가 Varshni 방정식으로 표현된 일반적인 온도 경향성을 보인다. 하지만, 1.29 μm 에피층의 경우에는 측정 온도가 증가함에 따라 PL 피크가 높은 에너지 쪽으로 움직이다가 75 K 이상에서는 다시 낮은 에너지 쪽으로 움직이는 비정상적인 거동을 보이고 있다. 이와 같은 PL 피크의 비정상적인 거동은 Rechenberg 등[15], Razeghi 등[21], LaPierre 등[22]에 의해서도 보고된 것으로, 밴드 가장자리(band edge) 부근에 2개 이상의 에너지 준위가 존재할 때나 에너지갭의 크기가 다른 영역이 이웃해 있을 경우 나타나는 현상으로 설명된다. 이런 경우, 저온에서는 상대적으로 안정한 낮은 준위에서 재결합이 일어나지만 온도가 증가하게 되면 열에너지를 얻은 전자와 정공이 높은 준위로 여기되어 재결합하므로 PL 피크가 높은 에너지 쪽으로 이동하는 현상이 나타난다.

이와 같이 2개 이상의 에너지 준위가 존재하는 원인으로서는 상분리로 인해 서로 다른 에너지 갭을 가지는

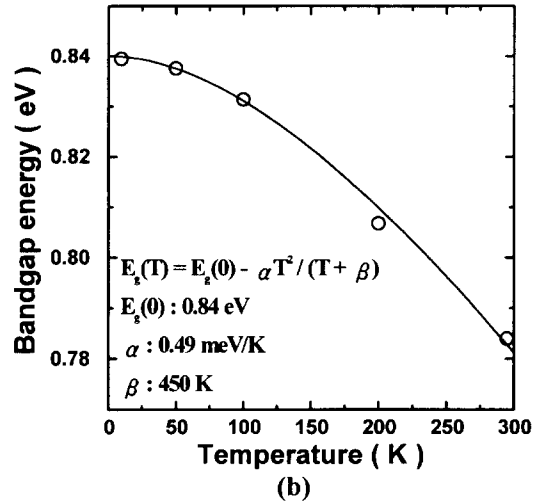
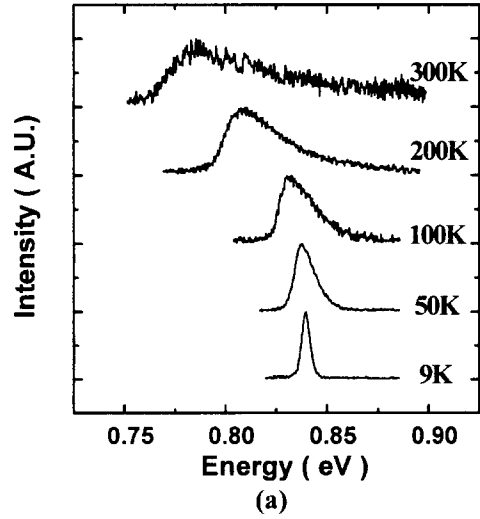
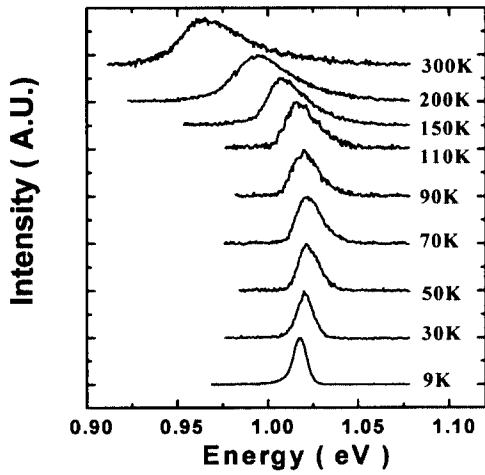
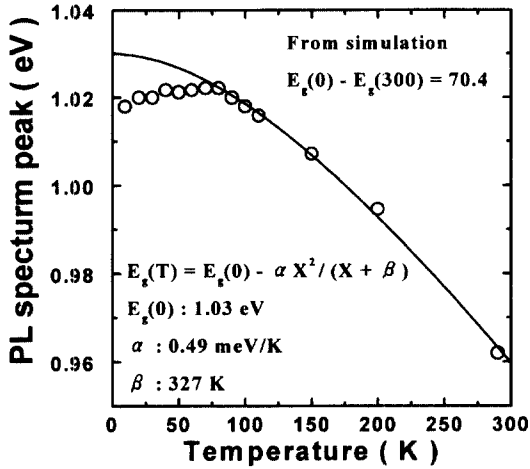


Fig. 3. Temperature dependence of PL peak of Epi396. Room temperature $\lambda=1.57 \mu\text{m}$, $\Delta a/a=4.0 \times 10^{-3}$, $T_g=600^\circ\text{C}$, $V/III=556$, Growth rate= $0.79 \mu\text{m/hr}$. ($E_g(0)$, α , β are values fitted from varshni equation).

상들이 공간적으로 분포해 있거나[22], ordering이 일어나면 에너지 갭의 크기가 감소하게 되는데, 이런 ordering 정도가 다른 영역이 공간적으로 분포되어 있는 경우[20, 23]를 생각할 수 있다. 상분리와 ordering은 TEM 측정을 통해 규명될 수 있고, Fig. 5는 Fig. 3과 Fig. 4 시편의 TEM 측정 결과이다. Fig. 3 시편의 경우($\lambda=1.57 \mu\text{m}$)에는 평면 및 단면 TEM 측정결과 상분리나 ordering 현상은 관찰되지 않았다. 그러나, Fig. 4 시편($\lambda=1.29 \mu\text{m}$)에 대한 TEM 회절 패턴에서는 $\langle 111 \rangle$ 방향으



(a)



(b)

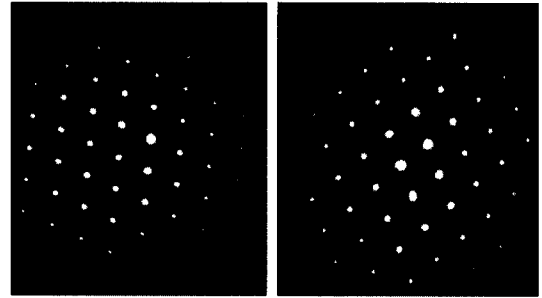
Fig. 4. Temperature dependence of PL peak of Epi469. Room temperature $\lambda=1.29 \mu\text{m}$, $\Delta a/a=-8 \times 10^{-4}$, $T_g=620^\circ\text{C}$, $V/III=563$, Growth rate= $0.98 \mu\text{m/hr}$.

로의 ordering에 의한 extra spot이 뚜렷이 관측되었다.

$\langle 111 \rangle$ 방향으로 ordering (CuPt ordering)이 일어나게 되면, $\langle 111 \rangle$ 방향으로 초격자가 형성되어 zone folding 효과에 의해 Γ 점에서 무거운 정공과 가벼운 정공의 에너지 준위가 분리되고, 에너지 갭의 크기는 감소한다. 이때 에너지 갭의 크기 변화는 ordering 정도에 따라 달라지며 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다[13].

$$\Delta E_G(\eta) = \eta^2 \Delta E_G \quad (1)$$

여기서 η 는 ordering의 정도를 나타내고, $\Delta E_G(1)$ 는 에피



(a)

(b)

Fig. 5. [110] diffraction patterns of cross sectional TEM. (a) Epi 396, no ordering. (b) Epi 469, CuPt-type($\langle 111 \rangle$ direction) ordering.

층이 완전히 ordering되었을 때($\eta=1$)의 에너지 갭의 변화 정도이다. 이때 η 는 하나의 값을 가지지 않고 평균적인 값(η_0) 주위로 특정한 분포를 가지는 것으로 생각되며[13] 따라서 에너지 갭의 크기도 평균값 주변으로 분포를 가지게 된다. 에너지 갭이 이와 같이 분포되어 있는 시편에 대해 PL 측정을 하게 되면, PL 측정에서 전자와 정공의 재결합 과정에는 확산 과정이 개입되어 있으므로, Fig. 4에서 관찰된 온도에 따른 피크의 비정상적인 거동이 예상된다. 저온에서는 전자와 정공이 확산 과정을 통해 가장 낮은 에너지 준위를 가지는 영역으로 이동하여 재결합이 일어나게 되지만, 측정 온도가 올라가면 보다 높은 에너지 준위를 가지는 영역으로의 여기가 가능하므로 PL 피크가 높은 에너지 쪽으로 이동할 수 있다. 그러나, 전자와 정공의 재결합 과정에 전자와 정공의 확산 과정이 개입되지 않는 투과 스펙트럼 측정에서는 위와 같은 비정상적인 거동은 나타나지 않을 것으로 예측된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 Fig. 3과 Fig. 4의 시편에 대한 온도에 따른 투과 스펙트럼의 변화와 에너지 갭의 이동을 보여준다. PL 측정 결과와는 달리 에너지 갭의 크기가 Varshni 방정식을 따르는 일반적인 온도 의존성을 보이고 있다. 투과 스펙트럼 측정에서는 부피에 대해 평균을 낸 정보가 얻어지므로 이 평균적인 에너지 갭의 온도 의존성이 나타나게 된다. 또한, 투과 스펙트럼의 밴드 가장자리 부근의 기울기를 살펴보면 Fig. 8에서 볼 수 있는 것처럼 $1.29 \mu\text{m}$ 시편의 경우가 $1.57 \mu\text{m}$ 시편의 경우보다 완만하게 나타난다. Ordering이 일어난 시편에서 밴드 가장자리 부근의 경사가 완만하게 나타나는 것은 η 가 분포를 가지는 경우, 에너지 갭의 크기가 명확히 정

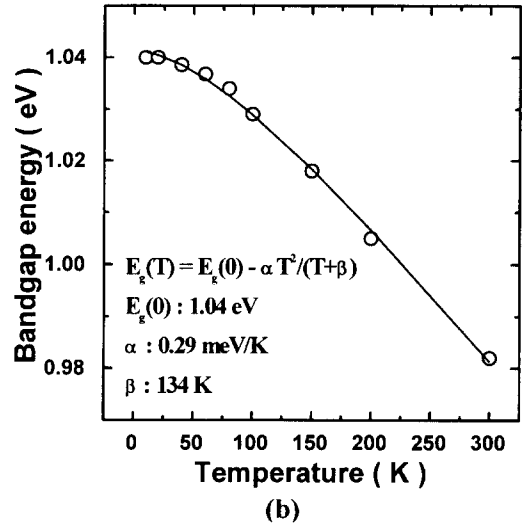
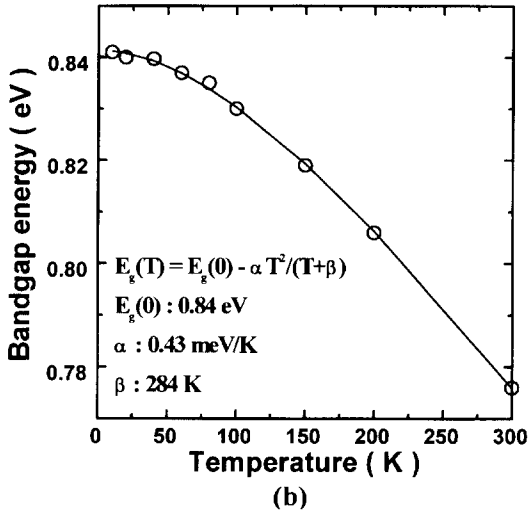
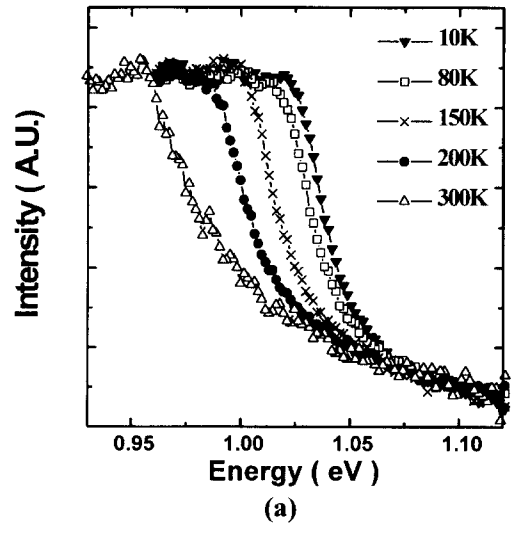
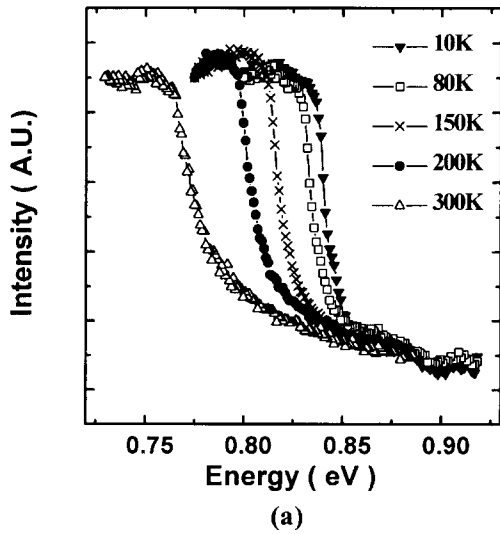


Fig. 6. Temperature dependence of transmission spectrum of Epi396. Band edge energy is the energy of the half intensity of maximum intensity.

Fig. 7. Temperature dependence of transmission spectrum of Epi469. Band edge energy is the energy of the half intensity of maximum intensity. Band edge energy decreased monotonically as measurement temperature increased.

의되지 않기 때문이다. 투과 스펙트럼의 밴드 가장자리 부근에서 보이는 완만한 기울기는 PL 측정에서 얻어진 온도 의존성이 ordering 정도의 분포에 의한 것임을 간접적으로 보여준다. 따라서 Fig. 4에서 관찰된 비정상적인 PL 피크의 온도 의존성은 ordering에 의한 국부적인 에너지 갭의 변화에 의한 것으로 설명될 수 있다.

In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} 에피층의 성장에서 ordering 현상은 As의 몰분율이 낮은 경우 잘 일어나는 것으로 보고되며, 이는 ordering이 매우 잘 일어나는 InGaP와 비교하였을 때, As의 몰분율이 증가함에 따라 ordering을 일으키는

경향이 감소하기 때문으로 생각되고 있다. 지금까지, In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} 에피층의 성장에서는 GaAs 기판을 사용한 Rechenberg 등[15]이 보고한 0.5 이상의 As의 몰분율에서는 ordering 현상이 거의 보고되어있지 않다. 그러나, 본 연구에서는 InP 기판위에 In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} 에피층을 성장하여 As의 몰분율이 0.6인 경우에도 ordering을 관찰하였고, InGaAs 성장에서도 ordering 현상이 보고되었다[24]. 이처럼 연구자에 따라 ordering의 경향성이 달라

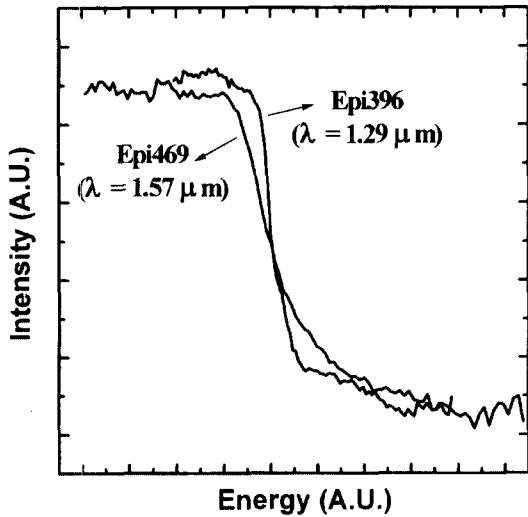


Fig. 8. Comparison of transmission spectrum of Epi396 and Epi469. Spectrum of Epi396 shows more steep intensity change at the absorption edge.

지는 원인은 아직까지 명확히 규명되어 있지 않으며, 성장 장치와 조건에 따라 성장이 일어나는 표면상태 등의 성장기구가 달라지기 때문으로 예상할 수 있다. 따라서, 성장조건에 따른 ordering의 경향성과 ordering 형성기구를 규명하기 위해서는 계속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층의 기상에서의 조성ة 따른 고상에서의 조성을 분석함으로써 3족과 5족 원소에 대한 성장결정단계를 규명하였다. 3족 원소의 경우에는, 기체상에서 반응이 일어나는 표면으로의 3족 원료의 확산 속도에 의해 조성이 결정되었으며, 5족 원소의 경우에는 P와 As의 증기압 차이와 PH_3 과 AsH_3 의 열분해 효율 차이에 의해 조성이 결정되는 것으로 생각된다.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 에피층에 대해 온도에 따른 PL 스펙트럼을 측정하였고, 그 결과 상온에서의 에너지 갭이 1.3 μm 인 시편의 경우, 75K 이하의 저온에서 측정온도가 낮아질수록 PL 피크가 낮은 에너지쪽으로 이동하는 비정상적인 PL 피크의 거동이 관찰되었다. 또한, TEM 회절 패턴 분석을 통해 <111> 방향으로의 CuPt ordering 현상이 관찰되었다. 이로부터 PL 측정에서 관찰된 온도에 따른 피크의 비정상적인 거동은 국부적인 ordering

정도의 차이에 의해 서로 다른 에너지 갭을 가지는 영역이 공간적으로 분포하여 나타나는 것으로 설명되었다. 투과 스펙트럼 측정에서는 피크의 비정상적인 거동이 관찰되지 않았으나, 이는 전자와 정공의 재결합 과정에 확산 과정이 개입되지 않는 투과 스펙트럼의 특성 때문으로 생각되며, 밴드 가장자리 부분의 기울기가 완만해지는 현상은 에너지 갭이 다른 물질의 공간적인 분포에 의한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. G. B. Stringfellow, *J. Cryst. Growth* **62**, 225 (1983).
2. O. Ueda, M. Takechi, and J. Komeno, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 2312 (1989).
3. M. A. Shahid, S. Mahajan, and D. E. Laughlin, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2567 (1987).
4. W. E. Plano, D. W. Nam, J. S. Major, Jr., K. C. Hsieh, and N. Holonyak, Jr., *Appl. Phys. Lett.* **53**, 2537 (1988).
5. P. Henoc, A. Izrael, M. Quillec, and H. Launois, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 963 (1982).
6. T. L. McDevitt, S. Mahajan, D. E. Laughlin, W. A. Bonner, and V. G. Keramidas, *Phys. Rev. B* **45**, 6614 (1992).
7. A. G. Norman and G. R. Booker, *J. Appl. Phys.* **57**, 4715 (1985).
8. S. N. G. Chu, S. Nakahara, K. E. Stregge, and W. D. Johnston, Jr., *J. Appl. Phys.* **57**, 4610 (1985).
9. U. Bangert, A. J. Harvey, V. A. Wilkinson, C. Dieker, J. M. Jowett, A. D. Smith, S. D. Perrin, and C. J. Gibbins, *J. Cryst. Growth* **132**, 231 (1993).
10. R. W. Glew, K. Scarrott, A. T. R. Briggs, A. D. Smith, V. A. Wilkinson, X. Zhou, M. Silver, *J. Cryst. Growth* **145**, 764 (1994).
11. M. A. Shahid, and S. Mahajan, *Phys. Rev. B* **38**, 1334 (1988).
12. I. Rechenberg, A. Oster, A. Knauer, U. Richter, J. Menniger, and M. Weyers, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **417**, 49 (1996).
13. E. Kuphal, *J. Cryst. Growth* **67**, 441 (1984).
14. S. Mukai, *J. Appl. Phys.* **54**, 2635 (1983).
15. A. Zunger and S. Mahajan, "Atomic Ordering and Phase Separation in Epitaxial III-V Alloys", *Moss series in Handbook on Semiconductors 3b*, North-Holland, 1994.
16. A. T. Macrander and S. Lau, *J. Electrochem. Soc.* **138**, 1147 (1991).
17. H. S. Park, Y. Moon, E. Yoon, H. -D. Cho, and T.

- W. Kang, *J. Korean Vac. Soc.* **5**, 206 (1996).
18. A. Koukitu and H. Seki, *J. Cryst. Growth* **76**, 233 (1986).
19. B. W. Liang and C. W. Tu, *J. Appl. Phys.* **74**, 255 (1993).
20. Y. P. Varshni, *Physica* **34**, 149 (1967).
21. M. Razeghi, X. G. He, J. Diaz, J. Hoff, M. Erdtmann, and E. Kolev, *SPIE* **2145**, 23 (1994).
22. R. R. LaPierre, T. Okada, B. J. Robinson, D. A. Thompson, and G. C. Weatherly, *J. Cryst. Growth* **158**, 6 (1996).
23. M. C. Delong, D. J. Mowbray, R. A. Hogg, M. S. Skolnick, M. Hopkinson, J. P. R. David, P. C. Taylor, S. R. Kurtz, and J. M. Olsen, *J. Appl. Phys.* **73**, 5163 (1993).
24. T. S. Kuan, W. I. Wang, and E. L. Wilkie, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 51(1987).