

論 文
6-6-7

LPE법으로 성장시킨 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 이중결정 X-선 회절 특성

Double Crystal X-ray Diffraction Characteristics of $Al_xGa_{1-x}As$ Grown by LPE

김인수*, 이철욱*, 최현태*, 배인호*, 김상기**
(In-Soo Kim, Chul-Wook Lee, Hyun-Tai Choi, In-Ho Bae, Sang-Gi Kim)

요 약

LPE(liquid phase epitaxy)법으로 성장시킨 $Al_xGa_{1-x}As(0.15 \leq x \leq 0.67)$ 에피층의 구조적 특성을 이중결정 X-선 회절장치를 사용하여 조사하였다. GaAs 기판과 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 격자상수 차이로 인해 피이크가 분리되었고, 이는 조성비가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 그리고 조성비는 Vegard의 법칙으로 구한 값과 기판 및 에피층 피이크 사이 각도분리($\Delta\theta$)를 측정함으로써 구한 값이 일치하였으며, 이때 관계식은 $\Delta\theta = 354 \cdot x$ 을 얻었다.

또한 성장된 에피층은 compressive stress를 받고 있으며, 조성비(x)가 0.15에서 0.67로 증가함에 따라 응력은 증가하였으며, 그리고 피이크의 반치폭으로 부터 계산된 전위밀도가 역시 증가하였다.

Abstract

The structural characteristics of $Al_xGa_{1-x}As(0.15 \leq x \leq 0.67)$ epilayer grown by LPE (liquid phase epitaxy) have been investigated using double crystal X-ray diffractometry. We observed that angular separation($\Delta\theta$) between the diffraction peaks from the $Al_xGa_{1-x}As$ epilayer and GaAs substrate linearly increased with compositions(x). The composition obtained from Vegard's law agreed with values by measuring angular separation($\Delta\theta$). From the results, the relation equation is found $\Delta\theta = 354 \cdot x$.

Epitaxial $Al_xGa_{1-x}As$ grown on GaAs is under compressive stress. The stress and dislocation density calculated from full width at half maximum increased with increasing compositions from 0.15 to 0.67, respectively.

* : 영남대학교 물리학과

** : 한국전자통신 연구소

接受日字: 1993年 7月 5日

1. 서 론

현재 대부분 전자 소자의 재료로는 Si을 사용하고 있으나, 특성상의 한계로 이를 보

완해야 할 새로운 반도체인 III-V족 화합물 반도체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 이들 중에서 GaAs와 AlAs는 격자상수의 차이가 0.14% 정도로 매우 작아 조

성비 만큼 혼합되는 소위 혼합결정을 이룰 수 있으며, 또한 조성비 전 영역에서 GaAs 기판과 격자정합이 가능하므로 $Al_xGa_{1-x}As$ 형태의 3원 화합물을 만들 수 있다.

이러한 $Al_xGa_{1-x}As$ 는 LED(light emitting diode), LD(laser diode) 및 solar cell 등 응용범위가 넓어 많은 연구가 되고 있다.^[1]

그러나 이런 형태의 에피층 성장시 기판과 에피층의 열팽창계수와 조성비에 따른 격자상수 차이로 인해 계면에서 격자부정합이 필연적으로 발생하게 된다. 이런 원인으로 인하여 계면에서 응력을 받게 되어 성장된 에피층의 결정성과 시료의 전기적 성질에 영향을 미치게 된다. 또한 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 전기적 성질은 조성비가 0.3 이상에서 민감하게 변하므로 HEMT(high electron mobility transistor)나 LD 제작시 사용되는 조성비 범위는 0.3~0.4에서 ± 0.01 이내로 정확히 결정해야 할 필요가 있게 된다.

이러한 조성비 결정 방법은 PL(photoluminescence)^[2], AES(Auger electron spectroscopy)^[3], 그리고 XRD(X-ray diffraction)^[4] 등이 있다. 이들 중에서 흔히 사용되는 PL 측정법은 매우 정확한 방법이지만, 성장된 에피층의 에너지 갭 $E_g(x)$ 로 부터 조성비를 구하는 간접적인 방법으로 직접적이 영역에서만 가능하다. 반면에 X-선 회절법은 비파괴적인 방법으로 조성비 전 영역과 상온에서 측정 가능하고, 시료의 전기 및 광학적 성질에 거의 영향을 주지 않는다는 장점이 있다. 그리고 이 방법은 에피층에서의 격자 변형이나 다른 구조적 특성 측정에 아주 적합한 방법임이 확인되었다.^[4]

이에 본 연구에서는 Si이 첨가된 n^+ -GaAs 기판 위에 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층을 LPE법으로 성장시켜 이중결정 X-선 회절장치(double crystal X-ray diffractometry)를 사용하여 GaAs 기판과 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층 사이의 조성비(x)에 따른 격자변형을 측정하고, 이를 통해 변형률을 계산하였으며, 또 Vegard의 법칙^[5]을 고려하여 측정된 격자상수 차이로 부터 에피층의 조성비(x)를 결정하였다. 그리고 에피층의 반치폭으로 부터 전위밀도를 계산하였다.

2. 이 론

이중결정 X-선 회절법은 기판에 대해 서로 다른 조성을 가진 이중구조에서 기판과 에피층 사이의 격자부정합 측정에 많이 사용되고 있다.

이중구조로 성장시킨 시료에 대한 X-선 회절은 각도가 $\Delta\theta$ 만큼 분리된 2개의 Bragg 피이크(기판과 에피층)로 이루어지며, 이로 부터 유효 격자부정합을 아래식으로부터 구할 수 있다.^[6]

$$m^* = \left(\frac{\Delta a}{a} \right)_L = \frac{a_L - a_s}{a_s} = \cot\theta_B \cdot \Delta\theta \quad (1)$$

여기서 a_s 와 a_L 은 각각 기판과 에피층의 수직방향 격자상수이며, $\Delta\theta$ 는 기판과 에피층 피이크의 분리된 각도 차이를 나타낸다. θ_B 를 기판의 Bragg 각으로써 $\cot\theta_B \approx 1.5377$ 로 근사시키고 $\Delta\theta$ 를 radian으로 나타내면, 식 (1)을 다음 식으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$m^* = 1.5377 \times 10^{-4} \cdot \Delta\theta(\%) \quad (2)$$

그러나 변형되지 않은 층의 실제 부정합은 에피층의 4각 변형을 고려할 때 다음 식으로 나타낼 수 있다.^[7]

$$m = \left(\frac{\Delta a}{a} \right)_0 = \frac{a_L - a_s}{a_s} = \left(\frac{1-\nu}{1+\nu} \right) m^* \quad (3)$$

여기서 a_L 과 ν 는 각각 변형되지 않은 에피층의 격자상수와 Poisson 비이며, 그 값은 0.31이다.^[8]

이중구조에서 격자상수는 조성비에 따라 변한다는 Vegard의 법칙을 가정할 때 격자상수 차이를 측정함으로써 조성비를 결정할 수 있다. 따라서 조성비는

$$X = \frac{\Delta a_0}{a_A - a_s} \quad (4)$$

으로 표현된다.

여기서 a_A 와 a_s 는 AlAs와 GaAs의 격자상수로 5.6611Å과 5.6533Å이며^[8], Δa_0 는

Al_xGa_{1-x}As와 GaAs의 격자상수 차이로써 이러한 차이는 각각 변형되지 않을 때의 값으로 일반적으로 Al_xGa_{1-x}As가 GaAs보다 크게 된다. 그러나 이들을 이중구조로 성장할 때 계면 부근에서 Al_xGa_{1-x}As의 격자는 계면 수평 방향으로 수축하고, 수직 방향으로는 반대로 팽창하여 격자 부정합이 발생하게 된다. 이때 Δa는 X-선 회절에 의해 측정된 값이므로 이에 대해 보정을 해주어야 한다.

$$\Delta a_0 = \frac{1-\nu}{1+\nu} \Delta a \quad (5)$$

따라서 식 (1), (3), (4) 및 (5)를 정리하면

$$X = \frac{a_s}{a_A - a_s} m \quad (6)$$

으로 된다. 이는 성장층의 두께가 2μm 이내에서는 잘 맞는 것으로 알려져 있다.^[9]

또한 성장된 에피층은 열팽창계수와 격자상수 차이로 인해 계면에서 응력을 받게 되어 에피층의 격자상수는 실제 격자상수보다 작거나(tensile) 혹은 크게(compressive)된다. 이러한 원인으로 인해 계면에서 발생된 응력은 탄성상수(E, ν)을 도입함으로써 다음 식으로 부터 쉽게 계산된다.^[10]

$$\sigma = \frac{E}{1-\nu} \left(\frac{\Delta a}{a} \right) \quad (\text{dyne/cm}^2) \quad (7)$$

여기서 E는 Young 율로써 8.53 × 10¹¹ dyne/cm²이다.^[8] 그리고 이중구조 성장시 두 물질사이 계면에서 필연적으로 발생하는 전위는 에피층의 결정특성에 영향을 끼쳐 결국 소자를 나쁘게 한다.

만약 에피층이 low-angle boundary로 구성된 mosaic 구조를 가진다고 가정하면 에피층에서 전위밀도(D)는 아래 식으로 부터 구할 수 있다.^[5]

$$D = \frac{a^2}{9b^2} = 6.94 \times 10^{13} \cdot a^2 \cdot (\text{cm}^{-2}) \quad (8)$$

여기서 a는 에피층의 반치폭으로써 radians으로 표시되며, b는 전위의 Burgers v-

ector 크기로 60° 전위에 대해 a√2값을 가진다. 이때 a는 Al_xGa_{1-x}As'격자상수이다.

3. 실험

3.1 Al_xGa_{1-x}As 에피층 성장

기판은 Si이 첨가된 n⁺-GaAs(100)을 사용하였으며, 먼저 기판을 1cm × 1cm 크기로 자른 후 끓는 trichloroethylene, acetone, methanol 순서로 각각 10분간 담근 다음, 탈이온수로 10분간 세척하였다. 세척한 기판을 H₂SO₄:H₂O₂:H₂O(6:1:1) 용액에 90초간 에칭한 후, 다시 탈이온수로 행군 다음, N₂ gas로 건조시켰다. 또한 시료를 정확히 천칭한 다음, 기판과 같은 순서로 5분간 초음파 세척을 하였다. 세척한 시료를 HCl 용액으로 에칭한 후, 탈이온수로 행군 다음 N₂ gas로 건조시켰다.

세척이 끝난 기판과 시료를 보트에 장착한 다음, 과냉각법으로 ΔT를 5°C, 냉각율을 0.5°C/min으로 하여 795°C의 수소 분위기에서 Al_xGa_{1-x}As 에피층을 1μm 정도의 두께로 성장시켰다. 성장된 에피층의 두께는 SEM(scanning electron microscopy)으로 측정하였으며, 성장시 사용된 시료는 일본 고순도 화학연구소의 7N Ga, 5N poly GaAs, 그리고 5N Al을 사용하였다.

본 실험에 사용된 LPE 성장장치는 sliding 방식으로 개략도는 Fig. 1과 같다.

3.2 DCX 장치 및 측정

이중결정 회절장치는 Bede사(영국)의 DC C-300으로써 Rigaku사의 12kW 회전대양극(rotating anode) X-선원(CuK_α)을 공유하고 있고, 시료이동 및 회절장치가 부착되어 있으며, 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

DCX측정은 Si 단결정을 기준결정으로 사용하여 (002) 반사면이 일어나도록 조정하였고, 시료결정은 측정하고자 하는 본 시료로써 (004) 반사면 및 CuK_{α1}(1.541 Å) X-선 파장을 사용하여 (+,-)평행 기하학으로 실온에서 측정하였다.

4. 결과 및 논의

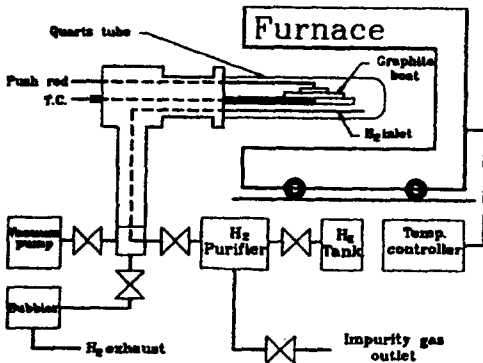


그림 1 액상에 피탁시 성장장치 개략도
Fig. 1 Block diagram for LPE growth apparatus.

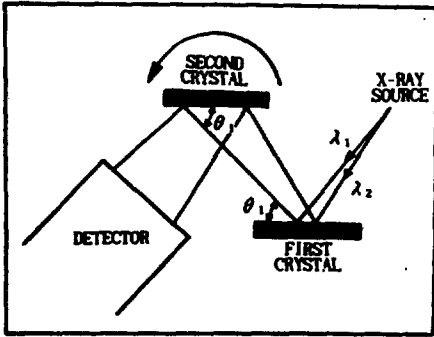


그림 2 DCX 측정 개략도
Fig. 2 System of DCX measurement.

Fig. 3은 기판으로 사용한 bulk GaAs와 LPE로 성장시킨 $Al_{0.67}Ga_{0.33}As$ 에피층의 (004) 반사면에 대한 DCX 측정 결과이다.

Fig. 3에서 (a) 피이크를 살펴보면 반치폭이 14sec로 GaAs 기판의 (004) 면에서 결정성을 분석하였다. 이러한 GaAs 기판위에 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층을 성장시켰을 때 (b) 피이크와 같이 기판과 에피층으로부터 회절된 피이크가 분리됨을 분명히 보여주고 있다. 이는 GaAs와 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 격자부정합에서 기인된다. 또한 이런 피이크의 분리 원인은 기판의 Bragg 각이 33.036° 로써 Bragg 식을 사용하면 이때 GaAs 격자상수는 5.6533 \AA 인 반면에, AlAs 경우는 5.6682 \AA 으로 GaAs보다 크므로 $33.036^\circ - \Delta\theta$ 의 값을 가지기 때문에 기판과 에피층의 피이

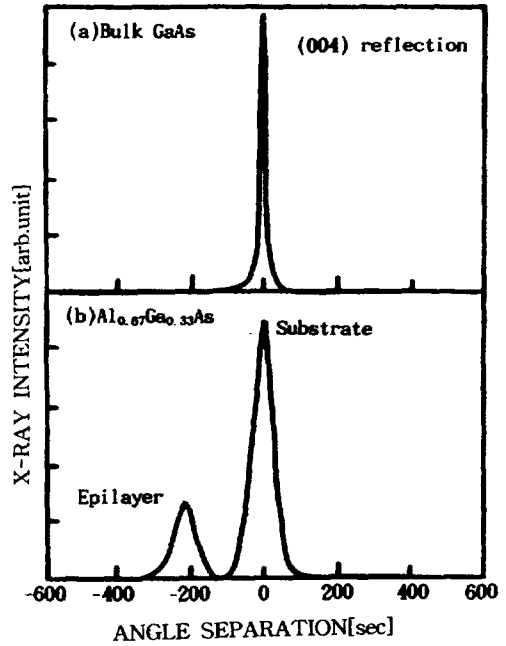


그림 3 (a) bulk GaAs와 (b) $Al_{0.67}Ga_{0.33}As$ 에피층의 (004) 반사면에 대한 이중결정 X-선 회절모양

Fig. 3 Double crystal X-ray diffraction patterns for (004) reflection of (a) bulk GaAs and (b) $Al_{0.67}Ga_{0.33}As$ epilayer.

크 분리가 발생하게 된다.

그리고 bulk GaAs에 대한 기판 GaAs의 피이크를 살펴보면 기판 GaAs의 피이크 강도는 감소하고 반치폭이 증가하였다. 이는 에피층 성장시 두 물질 사이의 열팽창계수 차이로 격자부정합이 발생되어 이로 인해 계면에서 응력을 받기 때문이다.^[11]

Fig. 4는 조성비를 달리하여 성장시킨 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 (004) 반사면에 대한 DCX 측정 결과로써 조성비가 증가함에 따라 GaAs 기판 피이크에 대한 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층 피이크 사이 각도분리 차이가 $53'' \sim 237''$ 로 점차로 커짐을 알 수 있다. 이는 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 격자상수가 조성비에 따라 증가하기 때문으로 이때 측정된 각도분리와 에피층의 반치폭으로부터 식 (2), (3), (6), (7) 및 (8)를 사용하여 계산한 결과들을 Table 1에 나타내었다.

Table 1을 살펴보면 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층 성장시 변형된 상태에서 격자상수 차이 즉, 유효 격자부정합은 0.04~0.18%였다. 이러한

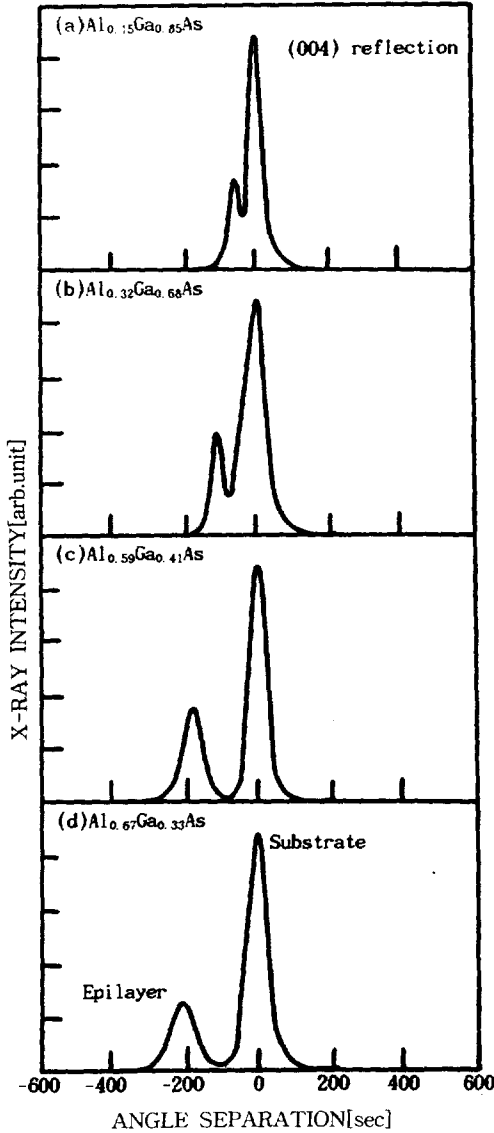


그림 4 조성비 [(a)x=0.15, (b)x=0.32, (c)x=0.59 및 (d)x=0.67]에 따른 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 (004) 반사면에 대한 이중결정 X-선 회절모양.

Fig. 4 Double crystal X-ray diffraction patterns for (004) reflection of $Al_xGa_{1-x}As$ epi-layers as (a)x=0.15, (b)x=0.32, (c)x=0.59, and (d)x=0.67.

격자변형은 성장온도에서는 완화되지만 성장 후 cooling과정 동안 변형된 것^[12]으로 이로 부터 기판에 수직인 $Al_xGa_{1-x}As$ 격자상수는 5.6555Å ~ 5.6633Å으로 계산되었다.

그리고 조성비에 대한 격자상수의 변화가 Vegard 법칙^[5]을 따른다고 고려할 때, 에피층의 조성비를 알기 위해서 Poisson 비를 도입하여 계산된 실제 부정합 정도는 0.021 ~ 0.093%였다. 이로 부터 성장된 에피층의 조성비(x)는 0.15, 0.32, 0.59 및 0.67이었다.

또한 실제 부정합으로부터 bulk $Al_xGa_{1-x}As$ 의 격자상수는 5.6545 ~ 5.6586Å였다.

따라서 $Al_xGa_{1-x}As$ 의 수직성분 즉, 변형된 상태의 격자상수와 bulk 상태의 격자상수를 비교하면 bulk 상태가 작게 나타났다. 이로 부터 성장된 에피층이 compressive stress를 받고 있음을 알 수 있고, 이때 그 값은 조성비(x)가 0.15에서 0.67로 증가함에 따라 4.89×10^5 에서 2.18×10^9 dyne/cm²로 증가하였다. 이것은 조성비 증가시 격자 부정합이 증가하기 때문이며, 이러한 응력은 시료 특성에 영향을 미치는 것으로 소자 제작시 발생하지만, 에피층 두께를 2 μm 이상으로 성장시키면 감소시킬 수 있다고 보고된 바 있다.^[13] 그러나 본 연구에서는 성장된 에피층 두께가 1 μm 이내였으므로 이러한 현상을 볼 수 없었다. 그리고 Vegard 법칙을 고려하여 실제 부정합으로부터 얻어진 조성비와 각도분리 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 본 바와 같이 조성비와 각도분리는 선형적인 관계를 보여주고 있다. 이 그림에서 기울기를 결정하면 각도분리만 측정함으로써 조성비를 간단히 계산할 수 있는데, 본 실험의 측정 영역내에서 이들 관계식은 $\Delta\theta = 354 \cdot x$ 임을 얻었다. 이는 Vegard 법칙을 고려하여 격자상수 차이로 계산한 조성비와 잘 일치하였다.

Fig. 6은 기판과 에피층의 강도와 반치폭을 조성비에 따라 비교한 결과를 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 조성비가 증가함에 따라 기판 피이크의 강도와 반치폭은 변

표 1 DCX 측정으로 구한 값들.

Table 1 Parameters obtained from DCX measurement.

Composition, x		0.15	0.32	0.59	0.67
Elastic strain	m^* (%)	0.0395	0.084	0.1558	0.1767
	m (%)	0.021	0.044	0.082	0.093
Stress, σ (dyne/cm ²)		0.021	0.044	0.082	0.093
Al _x Ga _{1-x} As Lattice constant	a_1 (Å)	5.6555	5.6581	5.6621	5.6633
	a_2 (Å)	5.6545	5.6558	5.6579	5.6586
FWHM, α (rad)		1.12×10^{-4}	1.45×10^{-4}	2.28×10^{-4}	3.01×10^{-4}
Dislocation density, D (cm ⁻²)		8.71×10^5	1.46×10^6	3.61×10^6	6.29×10^6

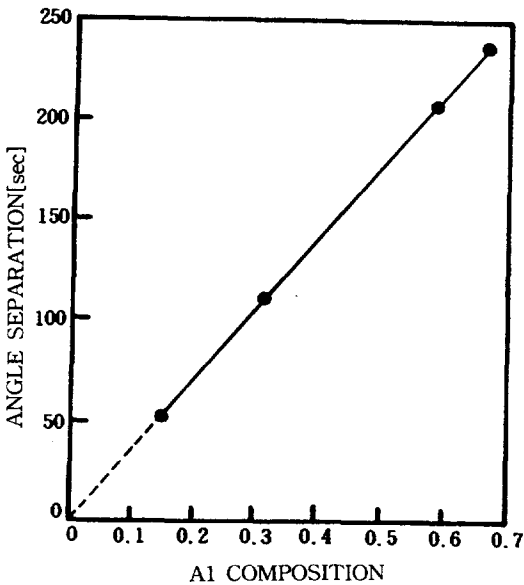


그림 5 Al_xGa_{1-x}As 에피층에서 조성비에 따른 각도 분리의 변화.

Fig. 5 Variation of angle separation as x composition in Al_xGa_{1-x}As epilayer.

하지 않았지만, 에피층 피이크의 강도는 감소한 반면에, 반치폭은 반대로 증가하였다. 이때 에피층 피이크의 반치폭으로부터 계산한 전위밀도는 Table 1에서와 같이 조성비 (x) 가 0.15에서 0.67로 증가함에 따라 8.71×10^5 에서 $6.29 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 로 증가하였다. 이렇게 전위밀도가 증가하는 원인은 반치폭이 성장된 에피층의 결정성 여부를 알 수 있는 것으로 이중구조를 갖는 에피층 성장시 계면에서 격자부정합에 의해 발생된 응력때문이며, 또한 이러한 전위는 성장전 기판 세척

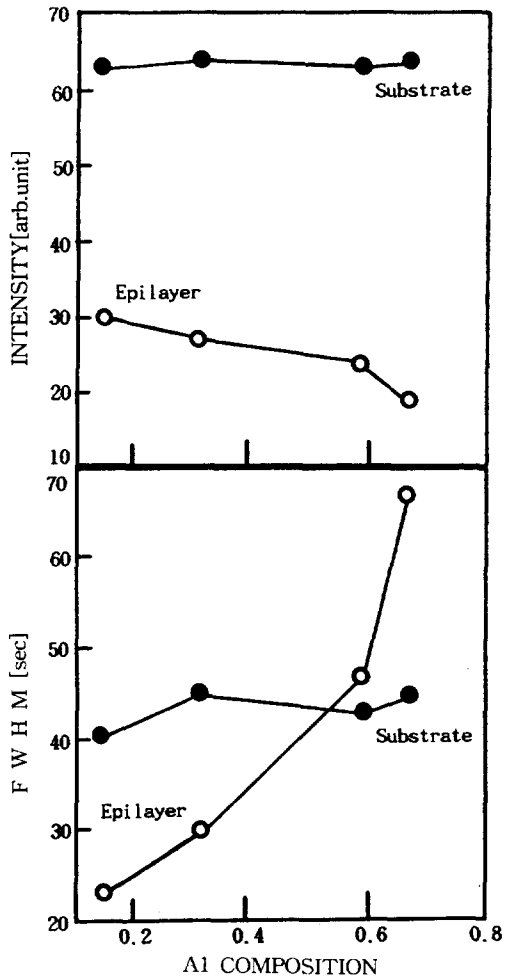


그림 6 조성비에 대한 GaAs 기판과 Al_xGa_{1-x}As 에피층에서 강도와 반치폭 변화.

Fig. 6 Variation of intensity and FWHM in GaAs substrate and Al_xGa_{1-x}As epilayer for various composition.

과정에서도 발생하여 성장중에 에피층으로 전파되어 시료의 전기적 성질 감소에 원인이 된다. 이러한 전위전파를 방지하기 위해서는 기판과 에피층 사이에 AlAs/GaAs superlattice spacer을 도입하면 가능하리라 생각된다.^[12]

5. 결 론

Si이 첨가된 n⁻-GaAs 기판 위에 조성비 (0.15 ≤ x ≤ 0.67)을 달리하여 LPE법으로 성장시킨 Al_xGa_{1-x}As 에피층의 DCX 측정 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GaAs와 Al_xGa_{1-x}As의 격자상수 차이로 인해 GaAs 기판 피이크와 Al_xGa_{1-x}As 에피층 피이크가 분리되었으며, 이는 조성비가 증가함에 따라 증가함을 알았다.
2. Vegard 법칙을 고려하여 두 물질사이의 격자상수 차이로 부터 조성비를 계산한 결과 0.15, 0.32, 0.59, 그리고 0.67이었다. 또한 기판과 에피층 피이크 사이 각도분리를 측정함으로써 조성비를 계산한 결과 그 값이 일치하였다. 이때 관계식은 Δθ = 354 · x이었다.
3. 변형된 Al_xGa_{1-x}As 에피층의 격자상수가 bulk Al_xGa_{1-x}As 격자상수보다 크기 때문에 성장된 에피층은 compressive stress을 받고 있으며, 조성비(x)가 증가함에 따라 증가하였다.
4. 기판 피이크의 강도와 반치폭은 조성비가 증가함에 따라 일정한 반면, 에피층 피이크의 강도는 감소하였고, 반치폭은 증가하였다. 이는 에피층 성장시 계면에서 발생된 응력때문에 기인되며, 그리고 전위 밀도도 역시 조성비가 증가함에 따라 증가하였다.

참 고 문 헌

[1]. P.L. Souza, E.V.K. Rao, and F. Alexandre, "Si_{As} Related Photoluminescence Emission in Low-Temperature Al_xGa_{1-x}As Grown by Molecular Be-

am Epitaxy", Appl. Phys. Lett., Vol.72, p.1498, 1992.

[2] G. Oelgart, R. Schwabe. M. Heider, and B. Jacobs, "Photoluminescence of Al_xGa_{1-x}As near the R-X Crossover", Semicond. Sci. Technol., Vol.2, p. 468, 1978.

[3] R. Dingle, R.A. Logen, and J.R. Arthur, Jr., "Gallium Arsenide and Related Compounds", Iop. London, p. 210, 1976.

[4] L. Tapfer and K. Ploog, "Improved Assesment of Structural Properties of Al_xGa_{1-x}As/GaAs Heterostructures and Superlattices by Double Crystal X-ray Diffraction", Phys. Rev.B, Vol. B33, p.5565, 1986.

[5] S.L. Chang, N.B. Patel, Y. Nannichi, and F.C. de Prince, "Determination of Lattice Mismatch in Ga_{1-x}Al_xAs LPE Layer on GaAs Substrate by using a Divergent X-ray Source", J. Appl. Phys., Vol.59, p.2975, 1979.

[6] V. Swaminathan and A.T. Macrander, "Materials Aspects of GaAs and InP Based Structures", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., pp.181-228, 1991.

[7] M. Shinohara, T. Ito, K. Yamada, and Y. Imamura, "Misfit Dislocation Generation for MBE Grown GaAs on In-doped LEC-GaAs Substrates", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.24, p.L711, 1985.

[8] S. Adchi, "GaAs, AlAs, and Al_xGa_{1-x}As: Material Parameter for Use in Research and Device Applications", J. Appl. Phys., Vol.58, p.R1, 1985.

[9] R.D. Dupis, L.A. Moudy, and P.D. Dapkus, Inst. Phys., Conf. Ser., Vol. 45, Ch.1, 1979.

[10]. W.A. Brantly, "Calculated Elastic Constants for Stress Problems Associated with Semiconductor Devices.", J. Appl. Phys., Vol.44, p.534,

1973.

- [11] T. Kato, T. Matsumoto, H. Ogura, and T. Ishida, "Temperature Variation of Lattice Strain in Slightly Mismatch In GaP/GaAs LPE Layers($0 \leq (\Delta \alpha / \alpha)_{\perp} \leq 0.6\%$)." Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, p.L159, 1989.

- [12] K. Ishida, M. Akiyama, and S. Nishi, "Tetragonal Lattice Distortion and Tensile Stress in GaAs Layers Grown on Si Substrates by MOCVD." Jpn. J. Appl. Phys., Vol.26, p. L530, 1987.

著者紹介



김인수

1961년 8월 19일생. 1985년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1987년 8월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 박사과정 수료.



이철욱

1967년 8월 13일생. 1990년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 8월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학중.



최현대

1963년 3월 12일생. 1990년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학중.



배인호

1949년 10월 13일생. 1973년 2월 영남대학교 물리학과 졸업. 1978년 2월 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년 8월 동국대학교 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 영남대학교 물리학과 교수.



김상기

1957년 1월 2일생. 1991년 8월 영남대학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학중. 한국전자통신연구소 물성분석실 선임기술원.