

GaAs 기판표면의 Tilt각도가 InGaP 에피막의 탄성특성 및 결정질에 미치는 영향

이종원, 이철로*, 김창수*, 오명석**, 임성욱**

대전산업대학교 재료공학과, 대전광역시 동구 삼성동 305, 대전 300-717

*한국표준과학연구원 소재특성평가센터, 대전 305-600

**삼성전기(주) 적층박막사업부 박막연구실, 수원 442-743

Role of Crystallographic Tilt Angle of GaAs Substrate Surface on Elastic Characteristics and Crystal Quality of InGaP Epilayers

Jongwon Lee, Lee Cheul-ro*, Kim Chang Soo*, Oh Myeong-Seok**, Sung-Wook Lim**

Department of Materials Engineering

Taejon National University of Technology, Taejon 300-717

*Korea Research Institute of Standards and Science, Materials Evaluation Center, Taejon 305-600

**Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd., Suwon 442-743

(1999년 1월 12일 접수, 1999년 3월 10일 게재승인)

초 록 : 본 논문에서는 평탄형 GaAs 기판과 2° , 6° , 10° 경사형 GaAs 기판 등 네 종류의 기판에 유기금속 기상성장장치를 이용하여 InGaP 에피막을 성장시켰고, 기판-에피막간의 격자부정합, 탄성변형, 격자굴곡, 부정합응력 등을 측정하여 기판 경사도, 즉 misorientation이 InGaP 에피막의 탄성특성에 미치는 영향에 대해 최초로 연구하였다. 또한 에피막의 x-선 반치폭과 PL 강도 및 PL 반치폭, 발진파장 등을 측정하여 기판의 경사도가 에피막의 결정질에 미치는 영향에 대하여도 연구하였다. 시료 분석은 TXRD(tripple-axis x-ray diffractometer)와 저온 (11K) PL(photoluminescence)를 이용하여 수행했다. 기판 경사도 증가에 따라 Ga 원자의 흡착율이 평탄기판의 경우에 비해 상대적으로 증가하였으며, x-선 반치폭이 감소하였다. 또한 선형 탄성이론에 입각하면 격자 misfit 감소에 따라 부정합응력도 감소해야 하나, 반대로 미세하게 증가하는 현상이 관측되었으며 이는 경사기판을 사용할 때 접계면의 에피막 원자의 탄성효율이 향상되는 것에 기인함을 밝혔다. 그리고 기판의 경사도가 증가함에 따라 PL 발진파장이 감소하였고, PL 강도는 증가하였으며, PL 반치폭은 감소하였다. 따라서 본 연구에서는 경사기판을 사용할 때 접계면의 탄성효율이 향상되고, InGaP 에피막의 결정질이 향상됨을 밝혔다.

Abstract : InGaP epilayers were grown on the *flat*, 2° off, 6° off, and 10° off GaAs substrates by organo-metallic vapor phase epitaxy, and influences of crystallographic misorientation of the substrate on the structural and optical properties such as lattice mismatch, elastic strain, lattice curvature, misfit stress, and PL intensity/line-width were investigated in this study. Material characterizations were carried out by TXRD(tripple-axis x-ray diffractometer) and low temperature (11K) PL (photoluminescence). With increase of the substrate misorientation angle (S.M.A.), the relative incorporation of Ga atoms on the substrate surface was found to be enhanced. Also, with increase of the S.M.A., the x-ray line-width of the InGaP epilayer was reduced, indicating that the crystal quality of the epilayer could be improved with a misoriented substrate. It was also found that the elastic accommodation of the strain-free lattice misfit was more remarkable in a misoriented sample. PL intensity increased, and PL line-width and emission wavelength decreased with the increase of S.M.A. The results conclude that the elastic characteristics and the crystal quality of the InGaP epilayer could be remarkably enhanced when the misoriented substrates were employed.

1. 서 론

InGaP III-V족 화합물 반도체에 대해 많은 연구가 진행되어 왔는데, 이 InGaP /GaAs 이종접

합구조는 레이저 다이오드, 발광 다이오드, 포토 다이오드 등의 광전 (optoelectronic) 소자에 사용되는 중요한 반도체 재료이다¹⁾. 기판과 에피막으로 구성되는 이종접합구조에서 고려되어야 할 가장

중요한 인자는 접계면 (interface)에서의 격자부정합과 이로 인해 발생하는 부정합응력, 부정합전위 등을 들 수 있는데 이들은 시료의 구조적, 광학적 물성과 더 나아가 소자의 광전물성에 많은 영향을 미치는 변수들이므로 정확하게 평가되고 조절되어야 한다²⁾.

1980년대 후반부터 평탄 orientation을 갖는 평탄기판 대신, 기판 표면이 경사진 경사기판이 사용되기 시작했는데, 이 경사형 기판은 에피막의 ordering 현상을 억제하여 에너지밴드갭 감소 현상을 방지하고, 이에 따라 발진파장을 감소시키며, 클래드 (clad) 층의 도핑 농도를 대폭 증가시켜서 운반자 구속 (confinement) 및 광구속 효율을 향상시킨다³⁾. 경사기판을 사용하면 기판 표면에는 많은 수의 step이 형성되고, 이 step의 밀도는 기판 경사도 증가에 따라 증가된다. 원자, 특히 양이온이 이 step 근처로 이동할 수 있는 충분한 이동도 (mobility)를 갖는다면, 이들 표면 step들은 대단히 양호한 원자 및 이온 흡착 장소로 작용할 수 있으며, 이에 따라 이들 표면 step에 힘입어 균일하고 smooth한 결정성장이 가능해지는 것이다⁴⁾. 이들 경사기판에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나 이들은 대부분 기판의 경사도가 에너지밴드갭, 임계전류밀도 (threshold current density), p-도핑 준위 등에 미치는 영향에 관한 연구들이었고, 경사기판이 기판-에피막간의 접계면에서의 탄성특성, 격자굴곡, 부정합응력, 에피막 자체의 결정질 등에 미치는 영향에 대하여는 거의 연구된 바 없다. 에피막의 탄성특성, 격자굴곡, 부정합응력 등의 기계적, 구조적 특성은 소자의 제작공정, 즉 lapping, polishing, sawing, scribing 등의 공정 효율에 지대한 영향을 미치는 요소로서 에피막의 결정질과 더불어 필히 연구되어야 하는 사항임에 주목해야 하며, 이에 따라 본 연구에서는 기판표면의 tilt 각도가 이들 물성에 미치는 영향을 연구하고자 하는 것이다.

본 연구에서는 유기금속 기상성장 (organo-metallic vapor phase epitaxy, OMVPE) 장치에 의해 $In_xGa_{1-x}P$ (목표 조성 $x \sim 0.49$) 에피막을 성장시켰고, 기판은 평탄형 GaAs ([100] orientation)과 [110] 방향으로 2°, 6°, 10° 경사진 경사형 GaAs 기판 (Sumitomo, EPD < 500 / cm)을 사용하였다.

에피막 성장은 triethylgallium, trimethylindium, phosphine 등의 반응물을 이용하여 이루어졌고, 성장온도는 730°C (기판온도) 이었다. 성장된 InGaP / GaAs 이중접합구조는 TXRD (triple-axis x-ray diffractometer)와 저온 (11K) PL (photoluminescence)로 분석하였다. 본 연구에서는 평탄형 시료와 경사형 시료에 대해 격자부정합, 탄성변형, 격자굴곡, 부정합응력 등을 측정하여 기판 경사도에 따른 접계면의 탄성특성에 대해 최초로 연구하며, x-선 반치폭과 PL 강도 및 PL 반치폭, 발진파장 등을 측정함을 통해 기판의 경사도가 InGaP 에피막의 결정질에 미치는 영향에 대해 체계적으로 연구하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 InGaP / GaAs 이중접합구조는 OMVPE 장치로 성장하였다. InGaP 에피막의 두께는 4 μ m이며 도핑 되지 않았다. 에피막은 다음과 같이 네 종류의 기판에 성장되었다. i) [100] orientation을 갖는 평탄 (flat) GaAs 기판; ii) [100] 방향에서 [110] 방향으로 2° ($\pm 0.25^\circ$) 기울어진 orientation을 갖는 경사 GaAs 기판; iii) 동일한 방향으로 6° 기울어진 경사기판; iv) 10° 기울어진 경사기판. 이들 기판은 각각 flat, 2° off, 6° off, 10° off의 명칭으로 그림과 표에서 사용된다. GaAs 기판의 두께는 경사도에 관계없이 공히 350 μ m이었다. 에피막의 두께는 주사 전자현미경 (SEM)으로 측정하였다.

OMVPE 성장에 사용된 반응물은 triethylgallium, trimethylindium, phosphine 등이고 성장온도는 730°C이었다. 시료의 격자부정합은 TXRD를 이용하여 측정하였고 (400) 대칭반사와 (511) 비대칭반사를 사용하였다. 각 시료의 조성은 TXRD 스펙트럼에서 직접 산출되었고, 이는 PL 피크 위치와 InGaP의 무변형 격자상수 (strain free lattice parameter)와의 관계를 이용하여 비교 확인되었다⁵⁾. TXRD 장치는 Bede사에서 제작되었으며 $CuK\alpha_1$ 빔 ($\lambda = 0.154056\text{nm}$)을 이용하였다. 특히 이 TXRD장치는 x-선 빔이 세축 (triple axis) monochromator에 의해 반사된 상태로, 즉 빔의 분산성 (divergency)과 다파장성

(multi-wavelength)이 극소화된 상태로 분석하고자 하는 시료에 도달하므로 분해능이 대단히 우수한 장치이다. PL 장치는 Ar 이온 레이저 (Inova 305)와 double monochromator (Spex 1403) 장치를 이용하였으며 온도에 따른 PL 특성의 변화 추이를 알아보기 위해 11K, 77K, 300K의 세 가지

온도에서 PL 측정을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1에는 본 연구에 사용된 InGaP / GaAs 이종 접합구조의 격자부정합 (lattice mismatch)을

Table 1. Normal Mismatches and Parallel Mismatches Obtained From (400) Symmetric and (511) Asymmetric Reflections.

Sample	Normal Mismatch $\Delta a^{\perp}/a_b$		Parallel Mismatch $\Delta a^{\parallel}/a_b$ (511) ($\times 10^{-4}$)
	(400) ($\times 10^{-4}$)	(511) ($\times 10^{-4}$)	
Flat	8.69	8.89	1.22
2° off	8.49	8.60	0.83
6° off	3.11	3.17	0.21
10° off	2.26	2.28	0.13

* Experimental Conditions : $\text{CuK}\alpha_1$ radiation, 40kV/20mA

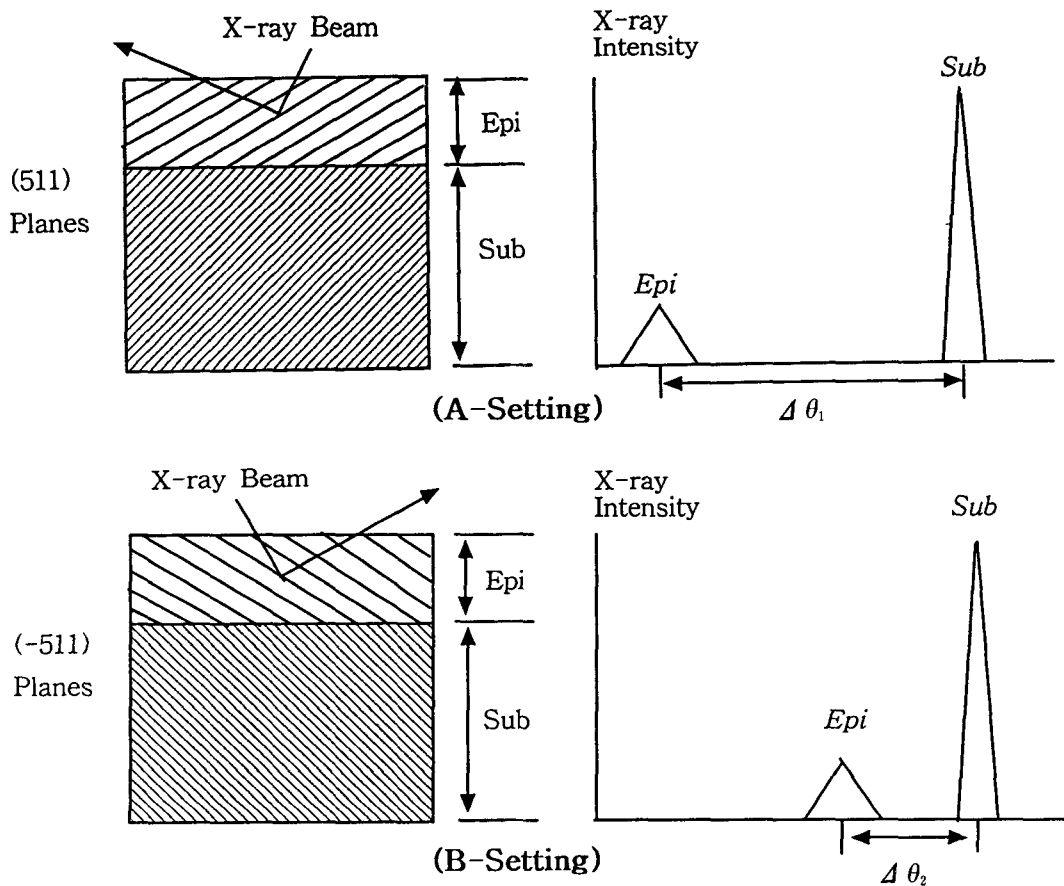


Fig. 1. Schematic diagram of (511) asymmetric reflection.

GaAs 기판의 경사도에 따라 나타났다. InGaP 에피막과 GaAs 기판 사이의 격자부정합에는 수직부정합 (normal mismatch) $\Delta a^{\perp}/a_b$ 와 평행부정합 (parallel mismatch) $\Delta a^{\parallel}/a_b$ 을 들 수 있는데, (400) 대칭반사 (symmetric reflection)와 (511) 비대칭반사 (asymmetric reflection)에 의해 이들을 측정했다. 여기서 $\Delta a^{\perp}=a^{\perp}-a_b$ 로 정의되고, $\Delta a^{\parallel}=a^{\parallel}-a_b$ 로 정의된다. a^{\perp} 와 a^{\parallel} 는 각각 접계면에 수직하고 평행한 방향으로의 InGaP 에피막의 격자상수이고, a_b 는 GaAs 기판의 격자상수이다.

그림 1은 격자부정합 측정을 위한 (511) 비대칭 반사의 개략도를 나타내고 있다. 알려진 바와 같이⁶⁾, (511) 비대칭 반사에서 얻어지는 두 개의 피크 분리각은 첫째 측정구도 (A-setting)에서 스펙트럼을 얻은 후, (511) 방향을 축으로 시료를 180° 회전시켜서 두 번째 측정구도 (B-setting)로 놓은 후 스펙트럼을 측정함으로써 얻어진다. 이렇게 되면 첫째 측정구도에서의 입사 x-선 빔이 둘째 측정구도에서는 반사 x-선 빔이 되는 구도가 된다. (511) 반사에서 부호 $\Delta\theta$ 와 $\Delta\pi$ 는 기판과 에피막 내의 반사면들의 면각거리와 경사각이 서로 다름을 나타낸다. 이는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2) / 2 \\ \Delta\pi &= (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) / 2\end{aligned}\quad (1)$$

(511) 반사에서의 수직 및 평행부정합은 식 (1)의 결과를 이용하여 다음 식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}\Delta a^{\perp}/a_b &= -(\tan\pi\Delta\pi + \cot\theta\Delta\theta) \\ \Delta a^{\parallel}/a_b &= (\cot\pi\Delta\pi - \cot\theta\Delta\theta)\end{aligned}\quad (2)$$

이 식에서 θ 는 (511) 반사의 Bragg각이고, π 는 (511)면과 시료 표면과의 각을 의미한다. 여기서 주목할 사항은 지금까지 논의된 측정 절차는 평탄기판구조를 기준으로 한 것이라는 점이다. 경사기판의 경우에는 먼저 시료가 rocking 축을 기준으로 기판의 해당 경사도만큼 회전되어야 하는데, 이를 통해 경사기판 내의 (100)면들의 경사도가 x-선 축을 기준으로 평탄화되어 Bragg 조건이 만족되는 것이다⁷⁾. 그 외의 측정절차는 평탄기판의 경우와

동일하다. 수직부정합을 (400) 대칭반사에 의하여도 측정해 보았는데 표 I에 나타난 바와 같이 실험 오차 한계 내에서 동일하였다. 평탄기판 시료와 모든 경사기판 시료의 평행부정합이 1.22×10^{-4} 보다 적은 값을 갖는데, 이를 통해서 접계면이 정합하고 (coherent) 부정합전위가 존재하지 않음을 알 수 있었다.

표 I에서 주목할 사항은, 각 시료별로 수직부정합 대 평행부정합의 비율을 계산해 보면 평탄기판의 경우 약 7.3, 2° 경사기판의 경우 10.4, 6° 경사기판의 경우 15.1, 10° 경사기판의 경우 17.5로 나타났다. 이는 기판의 경사도에 따라 접계면에서의 InGaP 에피막 단위정의 원자 단위의 탄성도가 차이 남을 나타내는 것이며 중요한 사항이라 하겠다. 이에 대해서는 상세히 후술된다. 본 연구에서는 평탄기판과 2°, 6°, 10° 경사기판을 OMVPE 성장장치에 동시에 넣고 에피성장을 한 번에 완료한 것인데, 표 I에 나타난 바와 같이 기판의 경사도에 따라 InGaP 에피막의 격자상수, 즉 InGaP의 조성이 다르게 나타났다. 따라서 기판의 경사도에 따라 In 원자와 Ga 원자가 접계면에 흡착 (adsorption)되는 효율이 다름을 알 수 있다. TXRD 측정결과로부터 얻은 본 연구의 InGaP의 조성은 평탄기판의 경우 In의 조성을 기준으로 In=49.65%로 나타났으며 2°, 6°, 10° 경사기판의 경우 각각 49.62%, 48.92%, 48.8%로 나타나서 기판 경사도 증가에 따라 Ga의 흡착 효율이 증가하여, 평탄기판의 경우에 비해 상대적으로 Ga-rich 경향을 나타냈다. GaAs 기판에 흡착되는 In 원자와 Ga 원자의 경우 Ga 원자가 기판과의 결합에너지가 높은 것으로 알려져 있는데⁸⁾, GaAs 기판의 경사도가 증가할수록 기판 표면의 step의 수가 증가하게 되며 이에 따라 Ga 원자의 높은 결합에너지가 step에 의해 다소 경감되어, 기판 경사도 증가에 따라 Ga 원자의 흡착 효율이 증가함에 의해 발생한 결과로 생각된다. 즉 경사기판을 사용할 때 기판 표면 step이 에피막 조성에 많은 영향을 미침을 알 수 있다⁹⁾.

수직 및 평행부정합이 측정되고 나면, 격자 misfit으로 정의되는 무변형 격자부정합을 간단하게 계산할 수 있다. 이 격자 misfit은 에피성장 변수에 영향을 받지 않고, 조성에 의해서만 결정되는 사항임에 주목할 필요가 있으며, 이 격자 misfit은

격자부정합의 척도로 이 논문 전반에 걸쳐 사용된다. 수직부정합과 평행부정합으로부터 격자 misfit ($\Delta a/a$)₀는 다음 식에 의해 구할 수 있다¹⁰⁾.

$$\left(\frac{\Delta a}{a}\right)_0 = \frac{1-\nu}{1+\nu} \left(\frac{\Delta a^\perp}{a_b}\right) + \frac{2\nu}{1+\nu} \left(\frac{\Delta a^\parallel}{a_b}\right) \quad (3)$$

이 식에서 ν 는 Poisson 비이며, 1/3으로 계산했다.

에피막의 무변형 (strain-free) 격자상수는 격자 misfit에서 직접 계산할 수 있다. 이를 위해 격자 misfit을 다시 정의하면 다음과 같다.

$$(\Delta a/a)_0 = (a^{sf} - a_b) / a_b \quad (4)$$

이 식에서 a^{sf} 는 조성에 의해서만 결정되는 InGaP

에피막의 무응력 격자상수이다. GaAs의 격자상수는 5.6532nm로 계산하였다⁷⁾.

격자 misfit이 기판과 관련되어 결정되는 반면, 탄성변형 ϵ 는 에피막 자체의 접합면의 평행한 방향으로의 변형에 의해 결정된다.

$$\epsilon = (a - a^{sf}) / a^{sf} \quad (5)$$

표 2에는 이같은 배경을 토대로 본 연구에서 사용된 시료의 무변형 격자상수, 격자 misfit, 평행 격자상수, 탄성변형 등을 실었다.

그림 2에는 본 연구의 InGaP 에피막의 x-선 반치폭 (full-width at half maximum, FWHM)을 기판 경사도의 함수로 나타냈는데, 기판의 경사도가 증가함에 따라 x-선 FWHM이 현저하게 감소하

Table 2. Normal Mismatches, Strain Free Lattice Parameters, Lattice Misfits, Parallel Lattice Parameters, and Elastic Strains

Sample	Normal Mismatch $\Delta a^\perp/a_b$ ($\times 10^{-4}$)	Strain Free L.P. of Epi a^{sf} (nm)	Lattice Misfit $(\Delta a/a)_0$ ($\times 10^{-4}$)	a^\parallel (nm)	Elastic Strain ϵ ($\times 10^{-4}$)
Flat	8.89	0.56561	5.06	0.56539	-4.03
2° off	8.60	0.56559	4.72	0.56537	-3.96
6° off	3.17	0.56542	1.69	0.56533	-1.53
10° off	2.28	0.56539	1.21	0.56532	-1.20

는 것을 명확하게 알 수 있다. 특히 경사도가 6° 이상 될 경우 시료의 FWHM이 대폭 감소하여 에피막의 결정질 (crystal quality)이 현저히 향상됨을 알 수 있다. 에피막의 x-선 FWHM은 에피막의 결정질과 두께의 함수로 나타난다는 것은 잘 알려져 있다¹¹⁾. 본 연구의 경우에는 InGaP 에피막의 두께가 4 μ m로 일정하게 유지되어 있으므로 x-선 FWHM의 막 두께 의존성은 배제될 수 있고, 따라서 그림 2에 나타난 에피막 x-선 FWHM은 원칙적으로 에피막의 결정질에 따라 좌우된 것이다. 잘 알려진 바와 같이 경사기판은 시료의 에너지밴드 갭, 발진과장, 클래드 (clad)층의 도핑농도 등의 물성을 향상시킨다¹²⁾. 경사기판의 표면에는 많은 수의 step이 형성되는데 이 step들이 안정한 핵생성 (nucleation) 장소로 작용되므로, 평탄기판에

성장된 에피막에 비하여 기판과의 원자 결합력이 상승하고, 결정 성장의 안정성이 향상되어서 결과

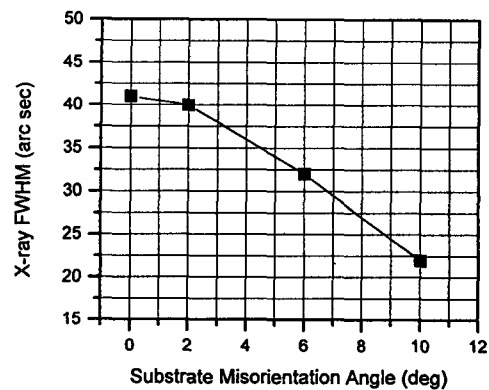


Fig. 2. X-ray FWHM of InGaP epilayers plotted as a function of substrate misorientation angle.

적으로 에피막 자체의 결정질이 향상되는 것이고 이러한 결과가 그림 2와 같이 나타난 것이다. 경사 기판의 영향에 관하여는 많은 연구가 진행되었으나^{13,14)}, 이들은 대부분 평탄기판과 한 종류의 경사기판(예를 들어 7° 경사기판)을 사용하여 에피성장을 한 후 이들의 전위 거동 혹은 광소자 특성을 단순 비교한 것들로서, 본 연구에서와 같이 다양한 범위의 기판 경사도에서 x-선 FWHM의 증감 여부가 단계적으로 도출된 경우는 거의 없었다.

그림 3은 InGaP 에피막과 GaAs 기판과의 격자 misfit에 따른 이론적 부정합응력 (misfit stress) σ_e 와 실제적으로 측정된 부정합응력 σ_R 을 나타낸 것이다. 여기서 σ_e 는 표 2에 주어진 탄성변형 ϵ 을 이용하여 계산한, 선형탄성이론 (linear elasticity)

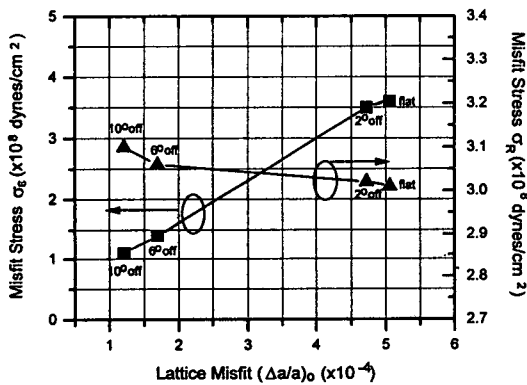


Fig. 3. Theoretical misfit stress σ_e and measured misfit stress σ_R plotted as a function of lattice misfit.

에 입각한 응력이다. 성장 방향의 측면 방향으로의 부정합응력 σ_e 는 평면응력조건 ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$, $\sigma_{zz} = 0$)을 가정하면 계산할 수 있다⁶⁾.

$$\sigma_e = \{E / (1 - \nu)\} \epsilon \quad (6)$$

탄성변형 ϵ 은 이미 알고 있는 수치이므로 σ_e 는 쉽게 계산될 수 있다. 여기서 InGaP에 대한 탄성계수 E는 $E = 6 \times 10^{10}$ dynes/cm²으로 계산했다¹⁵⁾. 표 2에 나타났듯이 탄성변형 ϵ 은 격자 misfit ($\Delta a/a$)₀의 증가에 따라 증가하므로 이론적 부정합응력 σ_e 은 그림 3에서와 같이 격자 misfit 증가에 따라 선형적으로 증가한 것이다.

그림 3에서 σ_R 은 격자 곡률반경 (radius of curvature of lattice) R의 측정치를 이용하여 얻은 것으로서, 실제로 InGaP/GaAs 이종접합구조에 가해지고 있는 응력을 나타내고 있다. 즉, 탄성변형은 시료의 굴곡과 밀접하게 연관되어 있는 것인데, 격자부정합된 층들이 상호 접합되면 탄성변형의 발생으로 인해 시료 전반에 걸쳐서 굴곡이 형성된다¹⁶⁾ X-선 기술은 결정내의 미세한 orientation 변화를 매우 정밀하게 감지할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 알려진 여러 방법 중 automatic Bragg angle control 기술이 측정의 단순성과 정확성으로 인해 널리 사용되어 왔다. 이 기술에 대한 상세한 설명은 널리 보고되어 있고¹⁷⁾, 여기에서 간단히 설명하면 다음과 같다. 시료가 굴곡져 있는 상태로 시료의 일부가 x-선 빔에 노출되면 다른 부분은 적절하게 회절 되지 않는다. 이에 따라 정확한 Bragg 조건으로 시료가 회절되지 않으면 회절 강도는 저하될 것이다. 따라서 시료를 입사빔에 대해 수평이동시키며 회절조건을 만족할 수 있도록 회전시켜야 할 각의 양을 재면 시료의 굴곡도는 측정된다. 곡률반경 R은 다음과 같이 정의된다.

$$R = s / \delta \quad (7)$$

여기서 s는 시료가 수평이동된 거리의 합이고, δ 는 회절조건을 만족시키기 위해서 시료를 회전시키는 각도의 합이다. 모든 시료들은 오차 한계 ($\pm 1 \times 10^4$) 내에서 구형 (spherical)으로 격자굴곡 되었다. 그림 3에 나타났듯이 기판의 경사도가 증가할수록, 즉 격자 misfit이 감소할수록 선형 탄성이론에 의해서 시료에 가해지는 부정합응력이 감소해야 하나, 실제적으로는 격자 misfit이 감소함에도 불구하고 σ_R 이 미세하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 기판 경사에 따른 접계면 탄성 특성을 나타내는 중요한 결과이다.

이 결과를 설명하기 위해서 그림 4에는 기판 경사도에 따른 탄성보합 (elastic accommodation, E.A.) 특성에 대하여 나타냈다. 탄성보합은 $E.A. = \epsilon / (\Delta a/a)$ 로 정의되며 이는 표 2에 주어진 ϵ 와 $(\Delta a/a)$ ₀ 값을 이용하면 구할 수 있다. 즉, 이는 에피막 조성에 의해 결정되어 주어진 격자 misfit이 탄성변형 ϵ 에 의해 얼마큼 효율적으로 보합되는가

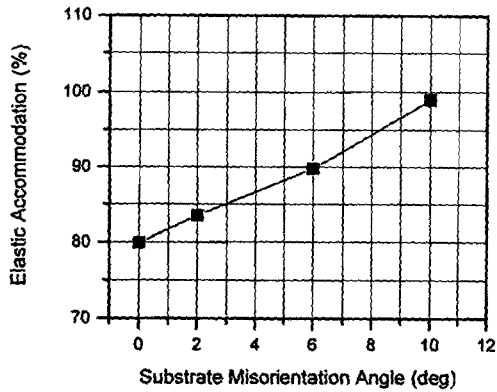


Fig. 4. Elastic accommodation plotted as a function of substrate misorientation angle.

하는 탄성특성의 척도가 되는 것이다. 그림 4에 나타났듯이 GaAs 기판의 경사도가 10°까지 증가함에 따라 접계면에서의 InGaP 에피막의 탄성특성은 80%에서 거의 100%에 가깝게 향상되었다. 즉 기판 경사도가 증가할수록 주어진 격자 misfit이 탄성적으로 보합되는 효율이 향상된 것이다. 그림 3의 결과는 이같은 관점에서 설명될 수 있다. 즉 본 연구의 경우 기판 경사도 증가에 따라, 격자 misfit을 해소하고자 발생하는 탄성변형의 효율이 증가하는 것이다. 그림 3의 이론적 부정합응력 σ_e 는 평탄형 에피택셜 (epitaxial) 이중접합구조를 갖는 시료에 대해 유도된 선형탄성이론에 의해 계산된 것이다. 즉, 시료가 평탄기판에 성장된 상태로 격자 misfit이 감소한다면 이 이론에 입각하여 실제 측정된 부정합응력 σ_e 도 감소하였을 것이지만, 본 연구의 경우 그림 4의 결과로 설명할 수 있듯이 기판의 경사도가 증가하면 격자 misfit이 감소해도 경사기판 접계면 원자들의 탄성효율이 향상되어 격자 굴곡이 다소 심화되어 부정합응력이 미세하게 증가하는 효과가 있는 것이다. 이 결과는 기판 경사도 증가에 따라 변형 완화 (strain relaxation) 및 전위 형성이 억제된다고 하는 다른 연구 결과와 그 맥락을 같이 하고 있다¹³⁾.

PL은 반도체 에피구조에 대해 에피막의 결정질, 에너지밴드갭, 조성, 양자효율 등의 중요한 정보를 비파괴적으로 제공해주는 양호한 방법이다. 본 연구에서는 서로 다른 경사도를 갖는 기판 위에 성장된 InGaP 에피막의 결정질, 에너지밴드갭 변화 추

이 등을 고찰하기 위해 PL 강도 (intensity) 및 PL FWHM, 그리고 발진파장 등에 대해서 연구하였다. 그림 5에는 각 시료의 PL 강도를 발진파장의 함수로 표시하였다. 측정은 11K, 77K, 300K에서 수행하였고, 그림 5에는 11K의 측정 결과를 실었다. 높은 온도에서 PL 측정을 행하면 어떤 불순물 및 결함의 거동에 필요한 활성화 에너지가 높은 온도로 인한 열에너지로부터 부여될 수 있으므로 PL 데이터의 신뢰도가 떨어지고 PL 강도의 저하와 FWHM의 증가 현상이 발생할 수 있다. 따라서

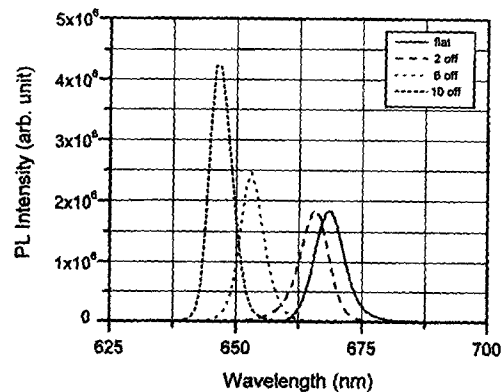


Fig. 5. PL intensity plotted as a function of emission wavelength. Measurements were performed at 11K.

본 연구에서와 같이 기판 경사도에 따라 InGaP 에피막의 결정질이 어떻게 변화하는가를 고찰하려면 저온에서 PL 측정을 해야 피크가 sharp해져서 결정질 변화에 따른 미세한 선폭 (line-width) 증감도 다 나타나게 되어 측정의 분해능이 높아지는 것이다.

그림 6에는 그림 5의 PL 피크의 발진파장을 기판 경사도의 함수로 나타냈다. 경사도가 10°까지 증가함에 따라 InGaP 에피막의 발진파장이 668.5nm에서 646.5nm까지 감소했음을 알 수 있다. 이를 에너지밴드갭으로 환산해 보면 $E_g=1.855\text{eV}$ 에서 1.918eV까지 약 0.063eV 증가하였다. 이같은 기판 경사도의 증가에 의한 에너지밴드갭 증가는 잘 알려진 사실이다¹⁸⁾. InGaP 에피막에는 근본적으로 In-rich 면과 Ga-rich 면이 상호 교차되어 형성되는 ordering 현상이 존재하는데¹⁹⁾, 이같은 ordering의 결과로 In과 Ga의 초격자

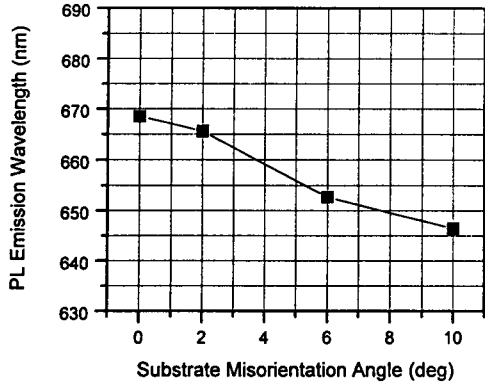


Fig. 6. Reduction of PL emission wavelength with an increase of substrate misorientation angle. Measurements were performed at 11K.

(superlattice)가 형성되면 시료의 에너지갭은 대폭 감소하고 이에 따라 발진파장은 대폭 증가하게 된다. 반도체 레이저 다이오드나 포토 다이오드, 광스위치 등의 광전소자에 있어서 발진파장이 증가하게 되면 광기록 및 광판독 밀도가 저하되고 가시광 레이저의 경우 시감도 (eye sensitivity)가 저하되는 등 큰 단점으로 작용됨은 잘 알려져 있다²⁰⁾. 따라서 InGaP 에피막의 ordering 현상을 억제시켜서 발진파장 증가를 방지함에 많은 연구가 집중되었는데 그 효율적 방법의 하나로 부상한 것이, 본 연구에서와 같이 경사기판을 사용하는 것이다¹²⁾. 즉 경사기판을 사용할 때 ordering을 억제할 수 있어서, 그림 6의 결과와 같이 기판 경사도가 증가함에 따라 에너지갭은 증가하고 발진파장은 감소

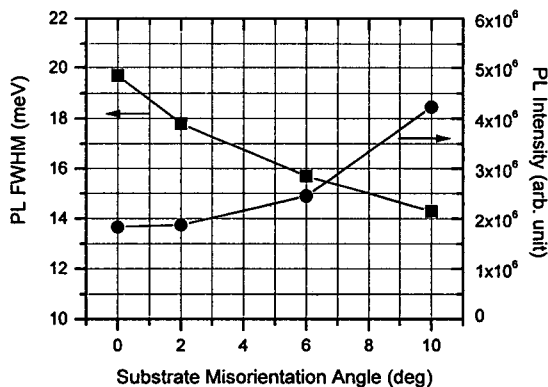


Fig. 7. PL intensity and PL FWHM plotted as a function of substrate misorientation angle.

한 것이다.

그림 7에는 PL 강도와 PL FWHM을 기판의 경사도의 함수로 나타냈다. 그림에서 보듯이 기판의 경사도가 10°까지 증가함에 따라 PL 강도는 2배 이상 증가하고, PL FWHM은 5meV 가량 감소하였다. PL 강도와 FWHM은 x-선 강도 및 x-선 FWHM과 마찬가지로 에피막의 결정질을 나타내는 간접적인 척도이다²¹⁾. 특히 PL FWHM은 전위나 불순물, 혹은 조성 불균일성에 의한 에피막의 결정특성에 민감하게 작용하는 것으로 알려져 있다²²⁾. 또한 PL 강도는 시료의 양자효율 (quantum efficiency)에 직접적으로 좌우되는데 이 양자효율을 좌우할 수 있는 요인으로는 결정질, 불순물의 존재 유무 등을 들 수 있겠다. 따라서 본 연구에서 기판 경사도 증가에 따라 PL 강도가 증가하고, PL

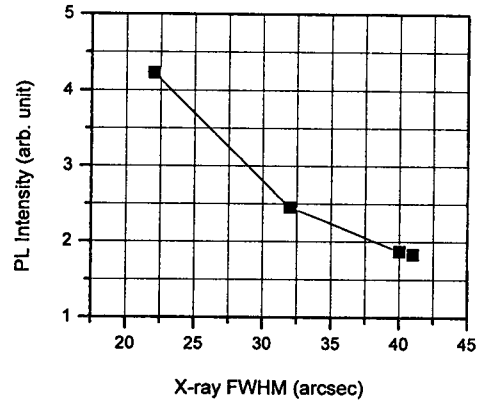


Fig. 8. Relation between PL intensity and x-ray FWHM of InGaP epilayers.

FWHM은 감소하는 것은 경사기판의 표면의 원자면 step에 의한 안정한 핵생성 및 원자 흡착, 그리고 기판 원자와 에피막 원자와의 강한 결합력⁹⁾ 등의 요인에 의한 에피막의 결정 (crystal) 안정성과 높은 결정질에 기인한다고 볼 수 있다. 그림 8에는 PL 강도와 x-선 FWHM과의 관계를 보이고 있는데, 이 두 가지 변수 사이에 형성된 선형적 관계로 보아 두 가지 모두 InGaP 에피막의 결정질의 간접적 척도로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 전술한대로 PL 강도는 시료의 양자효율에 좌우되는데, 이 양자효율은 온도, 결함, 결정 완벽도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다²²⁾. 본 연구의 경우 PL 측

정 시 11K의 항온 측정을 수행하였으므로 PL 강도의 온도 의존성은 배제할 수 있겠고, 따라서 그림 8에서 PL 강도와 x-선 FWHM이 거의 선형적 관계를 이룬다고 하는 점, 그리고 전술한 접계면의 탄성보합 효율이 경사도에 따라 좌우되는 점 등을 종합적으로 고려할 때 GaAs 기판의 경사도의 증가에 따라 InGaP 에피막의 결정질이 향상됨을 명확하게 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 OMVPE에 의해 InGaP/GaAs 이중접합구조를 성장시켰고, 기판은 평탄형, 2° 경사형, 6° 경사형, 10° 경사형 GaAs 등 네 종류를 사용하여 기판의 경사도가 InGaP 에피막의 구조적, 광학적 물성에 대해 미치는 영향에 대해 연구했고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 기판의 경사도가 증가함에 따라 Ga 원자의 흡착율이, 평탄기판의 경우에 비해 상대적으로 증가하였다.
- (2) 기판의 경사도가 증가함에 따라 x-선 반치폭은 감소하였고, 이를 통해 InGaP 에피막의 결정질이 향상됨을 알 수 있었다.
- (3) 격자 misfit 감소에 따라 부정합응력도 감소해야 하나, 미세하게 증가하는 현상이 관측되었고, 이는 경사기판의 경우 접계면의 탄성효율이 증가함에 기인하는 것을 최초로 밝혔다.
- (4) 기판 경사도 증가에 따라 PL 강도는 증가하고, PL 반치폭은 감소했으며 발진파장도 감소했다.
- (5) 이들 결과를 통해 본 연구에서는, 경사기판을 사용할 때 접계면의 탄성효율과 에피막의 결정질이 향상됨을 밝혔다.

참고문헌

1. M. Ikeda, H. Sato, T. Ohata, K. Nakano, A. Toda, "Electrical and optical properties of highly pure InGaP grown on GaAs by liquid phase epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 1572 (1987).
2. R. L. Hartman, A. R. Hartman, "Strain

- induced degradation of GaAs injection lasers", *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 147 (1972).
3. A. Gomyo, S. Kawata, T. Suzuki, S. Ijima, I. Hino, "Observation of strong ordering in GaInP alloy semiconductors", *Jap. J. Appl. Phys.*, **28**, L1728 (1989).
4. A. S. Brown, U. K. Mishra, J. A. Henige, M. J. Delaney, "The effect of InP substrate misorientation on GaInAs-AllnAs interface and alloy quality", *J. Appl. Phys.*, **64**, 3476 (1988).
5. R. E. Nahory, M. A. Pollack, W. D. Johnston, "Bandgap versus composition and demonstration of Vegard law for InGaAsP lattice matched to InP", *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 659 (1978).
6. J. Matsui, K. Onabe, T. Kamejima, I. Hayashi, "Lattice mismatch study of LPE grown InGaPAs on (001) InP using x-ray double crystal diffraction", *J. Electrochem. Soc.*, **126**, 664 (1979).
7. V. Swaminathan, A. T. Macrander, "Materials Aspects of GaAs and InP based Structures", Prentice Hall, Englewood Cliffs (1991).
8. Landolt-Bornstein Series vol. 17, subvol. b, Springer-Verlag, Berlin (1982).
9. T. Suzuki, T. Nishinaga, "Surface diffusion and atom incorporation kinetics in MBE of InGaAs and AlGaAs", *J. Crystal Growth*, **111**, 173 (1991).
10. S. N. G. Chu, A. T. Macrander, K. E. Strege, W. D. Johnston, "Misfit stress in InGaAs/InP heterostructures grown by vapor phase epitaxy", *J. Appl. Phys.*, **57**, 249 (1985).
11. C. Bocchi, C. Ferrari, P. Franzosi, "LPE highly perfect InGaAsP/InP structure characterization by x-ray double crystal diffraction", *J. Electron. Mater.*, **16**, 245 (1987).
12. H. Hamada, M. Shono, S. Honda, R.

- Hiroshima, K. Yoshida, T. Yamaguchi, "Trends in development of red semiconductor lasers", *J. Quantum Elec.*, **27**, 1483 (1991).
13. P. Maigne, A. P. Roth, "Structural properties of partially relaxed InGaAs layers grown on (100) and misoriented GaAs substrate", *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 873 (1993).
 14. M. Fatemi, J. Chaudhuri, J. Mittereder, A. Christou, "X-ray double crystal analysis of misoriented and strain in GaAs/Si and related heterostructures", *J. Appl. Phys.*, **73**, 1154, (1993).
 15. K. Lal, S. Niranjana, N. Goswami, "Effect of metallization on crystalline perfection and level of stress in semiinsulating and n-type GaAs", *J. Appl. Phys.*, **67**, 4105 (1990).
 16. M. A. G. Halliwell, M. H. Lyons, M. J. Hill, "The interpretation of x-ray rocking curves for III-V semiconductor device structures", *J. Cryst. Growth*, **68**, 523 (1973).
 17. G. A. Roznogyi, T. J. Ciesielka, "X-ray de-termination of stress in thin films and substrates by automatic Bragg angle control", *Rev. Sci. Instrum.*, **44**, 1053 (1973).
 18. T. Tanaka, S. Minagawa, T. Kawano, T. Kajimura, "Lasing wavelength of index guided AlGaInP semiconductor lasers as function of off-angle from (100) plane", *Elec. Lett.*, **6**, 906 (1989).
 19. A. Gomyo, T. Suzuki, S. Ijima, "Large off-angle effects on sublattice ordering and bandgap energy in GaInP grown on (001) GaAs substrate", *Phys. Rev. Lett.*, **20**, 2645 (1988).
 20. A. Kikuchi, K. Kishino, "600nm-range GaInP/AlInP multiquantum well (MQW) lasers grown on misoriented substrates", *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 1046 (1992).
 21. H. Asai, K. Oe, "Lattice deformations and misfit dislocation in GaInAsP/InP double heterostructure layers", *J. Appl. Phys.*, **54**, 2052 (1983).
 22. S. Mukai, "Photoluminescent and electrical properties of InGaPAs mixed crystal liquid phase epitaxially grown on (100) GaAs", *J. Appl. Phys.*, **54**, 2635 (1983).