

GaAs 기판의 표면 Offcut 각도가 InGaP 에피막의 전위밀도에 미치는 영향

이종원 · 박경수* · 이종식*

한밭대학교 신소재공학부, 대전광역시 유성구 덕명동 산 16-1, 대전 305-719
*삼성종합기술원 AE 센터, 수원 440-600

Effects of Surface Offcut Angle of GaAs Substrate on Dislocation Density of InGaP Epilayers

Jongwon Lee, Gyeong Su Park* and Jong Sik Lee*

Division of Materials Engineering, Hanbat National University, Taejeon 305-719
*AE Center, Samsung Advanced Institute of Technology, Suwon 440-600

초 록: 본 연구에서는 평탄형 (exact) GaAs 기판과 2°, 6°, 10° 경사형 (offcut) GaAs 기판 등 네 종류의 기판에 유기금속 기상성장장치를 이용하여 InGaP 에피막을 성장시켰고, 기판경사도에 따른 계면의 탄성특성이 InGaP 에피막의 전위밀도에 미치는 영향에 대하여 최초로 연구하였다. 탄성변형은 TXRD의 격자부정합과 격자 misfit 등을 고려하여 산출되었고, 전위밀도는 에피막의 x-선 반치폭을 이용하여 계산되었다. 기판경사도가 6°일 때 계면의 탄성특성이 가장 양호하였고, x-선 반치폭은 가장 낮았다. 11 K PL 측정 결과, 기판경사도 증가에 따라 PL 발진과장은 감소하였고, 기판경사도가 6°에서 PL 강도 역시 가장 높았다. 에피막의 TEM 관측 결과, 회절패턴은 전형적인 zincblende 구조를 보였고, 기판경사도 6°에서 전위밀도가 가장 낮게 관측되어 TXRD 및 저온 PL 측정 결과와 부합되었다. 본 연구의 결과와 소자제작 특성 및 빔특성을 종합적으로 고려해 볼 때, 광전소자용 InGaP/GaAs 이종접합구조에서 최적의 기판경사도는 6°임을 밝혔다.

Abstract: In this study, the InGaP epilayers were grown on the exact and the 2°, 6°, 10° offcut GaAs substrates by metal-organic vapor phase epitaxy, and the effects of interfacial elastic strains determined by the substrate offcut angle upon the resulting dislocation density of epilayer were investigated for the first time. The elastic strains were obtained from lattice mismatch and lattice misfit by TXRD, and the dislocation densities from epilayer x-ray FWHM. For the offcut angle range used in this study, the elastic strain was maximum and x-ray FWHM minimum at offcut angle 6°. From 11K PL measurements, PL wavelength was found to decrease with an increase of offcut angle. PL intensity was maximum at offcut angle 6°. TEM results showed that the electron diffraction pattern was of typical zincblende structure, and that the dislocation density was minimum for substrate offcut angle 6°. The results obtained in this study, along with the device fabrication process and beam characteristics, clearly demonstrated that the optimum substrate offcut angle for the InGaP/GaAs heterostructures is 6°.

Key Words: Substrate Offcut Angle, Dislocation Density, Epilayer Crystal Quality, TXRD, PL, TEM

1. 서 론

InGaP/GaAs 이종접합구조는 적색광 발광용 발광다이오드, 레이저다이오드와 같은 발광소자와 포토다이오드, 광스위치와 같은 수광소자 등 광전소자 전반에

걸쳐 사용되는 중요한 반도체재료이다¹⁾. 기판과 에피막 사이에 형성되는 계면은 에피막의 구조적, 전기·광학적 물성을 좌우하는 인자로서, 주로 고려해야 할 계면특성으로는 격자부정합, 응력, 탄성변형, 계면부정합전위 등을 들 수 있다. 이들 중 주어진 격자부정

합이 탄성변형에 의해 얼마만큼 보합될 수 있는가와, 그 결과로 결정되는 계면부정합전위의 형성 여부는 최종적인 소자특성을 좌우하는 매우 중요한 요소로서 정성적, 정량적으로 정확하게 평가되고 조절되어야 한다²⁾.

지난 약 15년간 반도체 광전소자 분야의 연구팀과 산업현장에서는 평탄한 배향성을 갖는 평탄 GaAs 기판 대신 경사 GaAs 기판을 사용하는 추세를 보여왔는데, 이 경사기판은 InGaP 에피막의 고유한 특성인 ordering 현상을 억제하여 발진과장을 안정시키고, 클래드 (clad) 층의 도핑농도를 증가시켜서 발광특성을 향상시키며 임계전류를 낮추는 등 많은 구조적, 광학적 장점을 제공해 왔다³⁾. 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 이동도를 갖는다면, 이들 표면 step들은 대단히 양호한 원자 및 이온 흡착 장소로 작용할 수 있으며, 이에 따라 균일하고 안정한 결정성장이 가능해지는 것이다⁴⁾. 이들 경사기판이 에피막 특성에 미치는 영향에 대하여는 광통신용 레이저다이오드 시스템인 InGaAs/GaAs에 대하여는 많은 연구가 진행되어 왔다^{5,6)}. 그러나 현재 광정보처리용 광전소자의 주류를 이루는 InGaP/GaAs에 대해서는 경사기판의 영향에 대한 연구가 상대적으로 매우 부족한 실정이며, 수행된 연구의 대부분은 임계전류밀도와 에너지밴드갭, p-도핑농도에 미치는 영향에 관한 것들이고, 탄성변형, 부정합전위와 같은 구조적 특성에 대한 연구는 전무한 실정이다. 광전소자용 이종접합구조에서 계면부정합전위는 비발광재결합 (nonradiative recombination)을 야기해서 소자의 양자효율을 저하시키는 주된 요소이므로 철저히 규명되어야 하는 사항이다.

본 연구에서는 InGaP/GaAs 이종접합구조에서 GaAs 기판의 경사도가 InGaP 에피막 내에 형성된 부정합전위의 거동에 미치는 영향에 대하여 주된 관심을 가지고 연구하며, 특히 격자부정합, 탄성변형과 같은 계면특성을 정량적으로 분석하고 그 결과가 전위밀도에 미치는 영향에 대하여 최초로 연구한다. 그리고 모든 결과를 종합적으로 고려하여 광전소자용 GaAs기판의 최적 기판경사도를 제시하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 유기금속 기상성장장치 (metal-organic vapor phase epitaxy, MOVPE) 장치를 사용하

여 경사진 GaAs 기판에 InGaP 에피막을 성장하였다. InGaP 에피막은 도핑되지 않았으며 두께는 $4\mu\text{m}$ ($\pm 0.2\mu\text{m}$) 이다. MOVPE 성장에 사용된 반응물은 triethylgallium, trimethylindium, phosphine 등이고 성장온도는 730°C 였다. 에피막은 다음과 같이 네종류의 GaAs 기판에 성장되었다. i) [100] 배향성을 갖는 평탄 (exact) GaAs 기판; ii) [100] 방향에서 [110] 방향으로 2° ($\pm 0.25^\circ$) 기울어진 배향성을 갖는 경사 (offcut) GaAs 기판; iii) 6° 경사기판; iv) 10° 경사기판. 이들 기판은 각각 Exact, 2° off, 6° off, 10° off 기판이라는 명칭으로 본 논문 전반에 걸쳐 사용된다. In_xGa_{1-x}P 에피막의 조성은 $x=0.52$ 로 맞추어서 InGaP 에피막의 단위정의 격자상수가 GaAs 기판의 격자상수보다 크게 해서 압축변형이 발생되게 하였고 이 압축변형의 완화 (strain relaxation)에 따른 부정합전위를 유도하였다. GaAs 기판의 두께는 경사도에 관계없이 $350\mu\text{m}$ 였고, 에피막의 두께는 주사전자현미경 (SEM, JEOL-6300)과 α -step 두께측정기 (AS-500)로 측정하였다.

시료의 격자부정합은 삼중결정 x-선 회절장치 (TXRD, tripple-axis x-ray diffractometer (Bede), $\text{CuK}\alpha_1$, $\lambda=0.154056\text{ nm}$)를 이용하여 측정하였고, (400) 대칭반사와 (511) 비대칭반사를 공히 사용하였다. 특히 본 TXRD 장치는 x-선 빔이 세축 monochromator에 의해 반사된 상태로 빔의 분산성과 다파장성이 극소화된 상태로 시료에 도달하므로 분해능이 우수한 장치이다. Photoluminescence (PL) 장치는 Ar 이온 레이저 (Inova 305)와 이중 monochromator (Spex 1403)를 이용했고 11 K에서 측정을 수행했다. 투과전자현미경 (TEM, Hitachi M-900N, 300 kV)을 사용하여 InGaP 에피막의 전자회절패턴을 구하였고, 에피막의 전위를 관측하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1에는 본 연구에 사용된 InGaP/GaAs 이종접합구조의 격자부정합 (lattice-mismatch)을 GaAs 기판의 경사도에 따라 나타냈다. 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 격

자상수이고, a_b 는 GaAs 기판의 격자상수이다.

알려진 바와 같이⁷⁾, (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 면간거리와 경사각이 서로 다를 때 나타낸다. 즉, 기판과 에피막의 격자상수 차이가 존재하면 기판과 에피막 내의 (511) 면간거리가 달라지게 되는데 이것이 $\Delta\theta$ 로 나타나는 것이고, 이에 따라 기판과 에피막의 (511) 면들이 서로 미세한 각을 이루며 경사를 형성하게 되는데 이것이 $\Delta\pi$ 로 반영되는 것이다. 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 것이다⁸⁾. 그 외의 측정절차는 평탄기판의 경우와 동일하다. 수직부정합

Table 1. Normal mismatches and parallel mismatches obtained from (400) symmetric and (511) asymmetric reflections

Samples	Parallel		
	Normal Mismatches $\Delta a^\perp / a_b$		Mismatch $\Delta a^\parallel / a_b$
	(400) ($\times 10^{-3}$)	(511) ($\times 10^{-3}$)	(511) ($\times 10^{-3}$)
Exact	9.27	9.65	7.50
2° off	9.82	9.37	7.45
6° off	9.95	9.91	3.99
10° off	9.13	9.22	5.26

을 (400) 대칭반사에 의하여도 측정해 보았는데 표 1에 나타난 바와 같이 실험 오차 한계 내에서 동일하였다.

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 사항이다. 수직부정합과 평행부정합으로부터 격자 misfit ($\Delta a / a$)_o는 다음 식에 의해 구할 수 있다⁹⁾.

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

이 식에서 v 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.

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

이 식에서 a^{sf} 는 조성에 의해서만 결정되는 InGaP 에피막의 무응력 격자상수이다. GaAs의 격자상수는 0.56532 nm로 계산하였다⁸⁾.

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

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

표 2에 실은 격자 misfit, 무변형 격자상수, 탄성변형 등은 이같은 방식으로 계산된 것이며, 특히 탄성변형은 주어진 격자부정합이 계면전위의 발생 없이 얼마만큼 탄성적으로 포함되는가 하는 탄성특성의 척도가 된다. Fig. 1에는 기판의 경사도에 따른 탄성변형의 변화 추이를 보였는데, 기판의 경사도가 6°인 경우에 탄성변형이 가장 크게 나타났다. 즉, 기판경사도가 6°인 GaAs 기판을 사용했을 경우, 계면에서의 탄성효율이 향상되어 변형완화에 의한 전위발생

Table 2. Strain-free lattice parameters, lattice misfits, parallel lattice parameters, and elastic strains of epilayers

Samples	Lattice Misfit	Strain-Free	a^\parallel (nm)	Elastic Strain ϵ ($\times 10^{-3}$)
	$(\Delta a/a)_o$ ($\times 10^{-3}$)	L.P. a^{sf} (nm)		
Exact	8.58	0.57017	0.56955	-1.08
2° off	8.41	0.57007	0.56953	-0.94
6° off	6.95	0.56925	0.56757	-2.94
10° off	7.24	0.56942	0.56830	-1.96

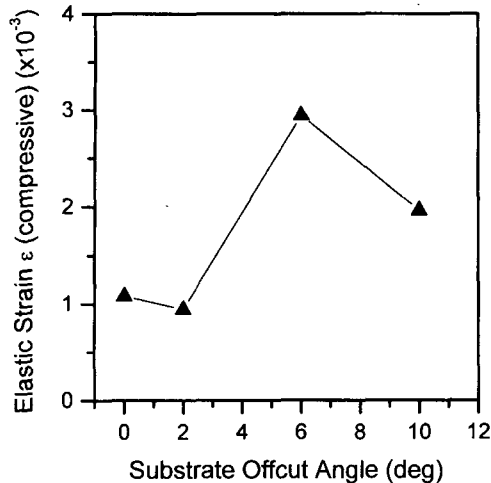


Fig 1. Elastic strain of epilayers plotted as a function of substrate offcut angle.

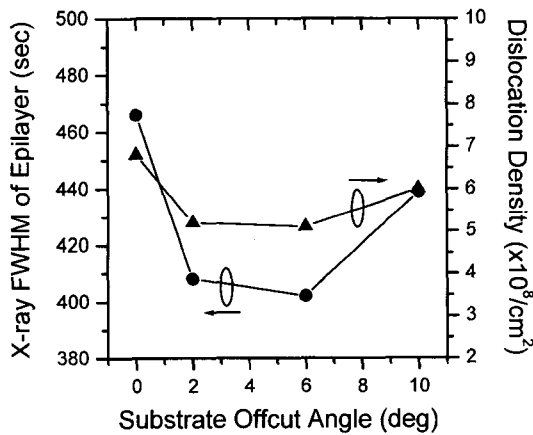


Fig. 2. Epilayer FWHM and dislocation densities plotted as a function of substrate offcut angle.

이 최대한 억제된다고 볼 수 있다.

이러한 추론을 보다 명확히 설명하기 위하여 Fig. 2에는 (400) 대칭반사 x-선 회절을 통해 얻은 InGaP 에피막의 x-선 반치폭 (full-width at half maximum, FWHM)을 기판경사도의 함수로 나타냈다. 에피막의 x-선 FWHM은 에피막의 결정질과 두께의 함수로 나타난다는 것은 잘 알려진 사실이다¹⁰⁾. 본 연구의 경우에는 InGaP 에피막의 두께가 4 μm 로 일정하게 유지되어 있으므로 x-선 FWHM의 막 두께 의존성은 배제될 수 있고, 따라서 Fig. 2에 나타난 에피막 x-선 FWHM은 원칙적으로 에피막의 결정질에 따라 좌우된 것이다. 그림에 나타났듯이 기판의 경사도가 6°인

경우에 에피막의 x-선 FWHM이 최소치를 나타냈다.

일반적으로 에피막의 전위밀도 ρ 는 에피막 x-선 FWHM (β)으로부터 다음 식을 이용하여 간접적으로 평가한다¹¹⁾.

$$\beta^2 = 4.35 b^2 \rho \quad (6)$$

여기서 b 는 Burgers 벡터의 단위길이이다 (GaAs의 경우 $b=0.415 \text{ nm}$). 이 식을 사용하여 계산한 전위밀도는 기판경사도가 6°인 GaAs 기판에 성장된 InGaP 에피막의 경우에 최소치를 나타냈다. 이는 Fig. 1에서 설명한 탄성변형과 기판경사도와의 관계, 즉 기판 경사도가 6°일 경우에 탄성변형량이 가장 컸던 사실과 맥락을 같이 한다. 즉, 6° 경사기판의 경우 계면의 탄성특성이 우수해서 전술한대로 변형완화가 가장 적게 발생해서 계면 부정합전위가 가장 적게 발생한 것이다.

이와 비슷한 현상이 분자선성장법 (MBE)으로 성장한 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{Se}/\text{GaAs}$ 이중접합구조에서도 나타난 바 있다¹²⁾. 이들의 연구에서는 GaAs 기판의 경사도로 각각 3°, 10°, 15°를 사용하였는데, 기판경사도가 10°에서 에피막의 적층결함과 그 외의 구조적 결함들이 가장 적게 나타났고 그에 따라 turn-on 전압, 역전류, 역과피전압 등의 전류/전압 특성이 가장 양호하게 나타난 바 있다. 알려진 바와 같이 경사기판은 시료의 에너지밴드갭, 발진파장, 클래드층의 도핑농도 등과 같은 물성을 향상시킨다¹³⁾. 경사기판의 표면에는 많은 수의 step이 형성되는데 이 step들이 일정한 핵생성 (nucleation) 장소로 작용되므로, 평탄기판에 성장된 에피막에 비하여 결정성장의 안정성이 향상되어서 계면 탄성효율이 양호해져서 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 탄성변형량이 증가하고 결과적으로 전위밀도 역시 감소하는 것으로 보인다. 반면 기판경사도가 10°로 증가하면 이들 기판 표면의 step이 오히려 결함으로 작용하여 에피막의 결정질이 불량해지고 전위밀도 역시 증가하는 것으로 보인다.

이같은 사실은 본 InGaP/GaAs 이중접합구조의 주된 응용분야인 레이저다이오드, 발광다이오드와 같은 광전소자의 소자제작 과정과 관련하여 또 다른 중요한 의미를 지닌다. 전술한 장점으로 인해 경사 GaAs 기판을 사용하는 것이 요즘의 일반적인 추세인데 경사도가 10° 이상으로 되면 레이저다이오드의 발광영역을 정의하는 부위인 ridge 부위가 습식식각시 과도하게 비대칭으로 형성되고, 또한 제작된 소자에서 방출되는 빛의 근거리형상 (near-field pattern)이 일그러지는 등 실제 현장에서 문제가 제기되어 왔다¹⁴⁾. 따

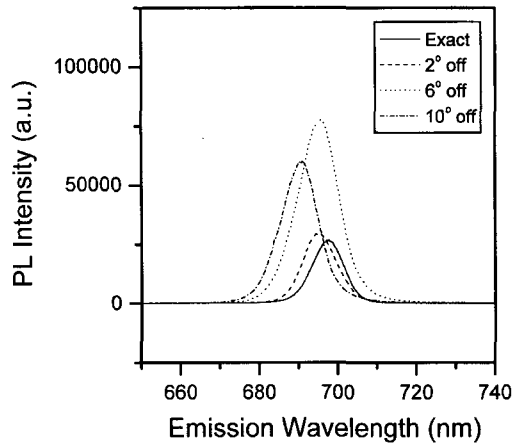


Fig. 3. Photoluminescence (PL) spectra of InGaP epilayers measured at 11 K.

라서 본 연구에서 사용한 기판경사도 범위 (0° ~ 10°)에서는 6° 의 경우에 전위밀도가 최소화된다는 것을 최초로 밝혔고, 소자제작 특성과 빔의 특성 상 기판 경사도를 10° 이상 가져가지 않는다는 그간의 사실과 더불어 볼 때 레이저다이오드 및 발광다이오드와 같은 광전소자용 InGaP/GaAs 이중접합구조의 경우 최적의 GaAs 기판경사도는 6° 라는 것을 알 수 있었다.

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 추이를 고찰하기 위해 PL 강도 (intensity) 및 발진파장과 관련하여 연구하였다. Fig. 3에는 각 시료의 11 K PL 스펙트럼을 발진파장의 함수로 표시하였고, Fig. 4에는 Fig. 3의 PL 피크의 발진파장과 PL 강도를 기판 경사도의 함수로 나타냈다. 경사도가 10° 까지 증가함에 따라 InGaP 에피막의 발진파장이 697.5 nm에서 691 nm까지 감소했음을 알 수 있다. 이를 에너지밴드갭으로 환산해 보면 $E_g=1.776$ eV에서 1.794 eV까지 약 0.02 eV 증가하였다. 이같은 기판 경사도의 증가에 의한 에너지밴드갭 증가는 잘 알려진 사실이다¹⁵⁾. InGaP 에피막에는 근본적으로 In-rich 면과 Ga-rich 면이 상호 교차되어 형성되는 ordering 현상이 존재하는데¹⁶⁾, 이같은 ordering의 결과로 In과 Ga의 초격자 (superlattice)가 형성되면 시료의 에너지갭은 감소하고 이에 따라 발진파장은 증가하게 된다. 반도체 레이저 다이오드나 포토 다이오드, 광스위치 등의 광전소자에 있어서 발진파장이 증가하게 되면 광기

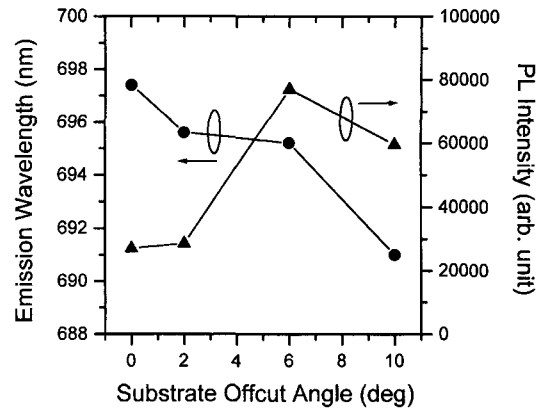


Fig. 4. PL Intensity and emission wavelength variation plotted as a function of substrate offcut angle.

록 및 광관측 밀도가 저하되고 가시광 레이저의 경우 시감도 (eye sensitivity)가 저하되는 등 큰 단점으로 작용됨은 잘 알려져 있다¹⁴⁾. 따라서 InGaP 에피막의 ordering 현상을 억제시켜서 발진파장 증가를 방지함에 많은 연구가 집중되었는데 그 효율적 방법의 하나로 부상한 것이, 본 연구에서와 같이 경사기판을 사용하는 것이다¹³⁾. 즉 경사기판을 사용할 때 ordering을 억제할 수 있어서, Fig. 4의 결과와 같이 기판 경사도가 증가함에 따라 에너지갭은 증가하고 발진파장은 감소한 것이다.

Fig. 4에는 PL 강도를 기판의 경사도의 함수로 나타냈다. 그림에서 보듯이 기판경사도가 6° 일 때 PL 강도가 가장 높았는데, PL 강도는 에피막의 결정질을 나타내는 간접적 척도로 사용될 수 있다¹⁷⁾. PL 강도는 또한 시료의 양자효율 (quantum efficiency)에도 직접적으로 좌우되는데 이 양자효율을 좌우할 수 있는 요인으로는 결정질, 불순물의 존재 유무 등을 들 수 있겠다. 따라서 본 연구에서 기판경사도 6° 에서 PL 강도가 가장 높은 것은 전술한대로 6° 에서 기판표면의 안정한 핵생성과 원자흡착에 기인한 높은 탄성 효율에 의한 전위 발생 억제효과가 가장 높아서 비발광 재결합이 가장 억제되어 나타난 결과인 것이다.

Fig. 5는 본 연구에서 성장한 InGaP 에피막의 투과 전자현미경 (TEM) 관측 결과로서 (a) 전자회절패턴, (b) 평탄 (exact) 기판 상에 성장된 에피막의 형상, (c) 6° 경사기판 상의 에피막, (d) 10° 경사기판 상의 에피막의 형상을 보이고 있다. 먼저 Fig. 5(a)는 영역축 (zone axis)이 001인 전형적인 InGaP의 zincblende 구조의 회절패턴을 보이고 있다. 또한 회절패턴이 점 (spot) 패턴으로만 선명하게 이루어져 있는 것으로 보

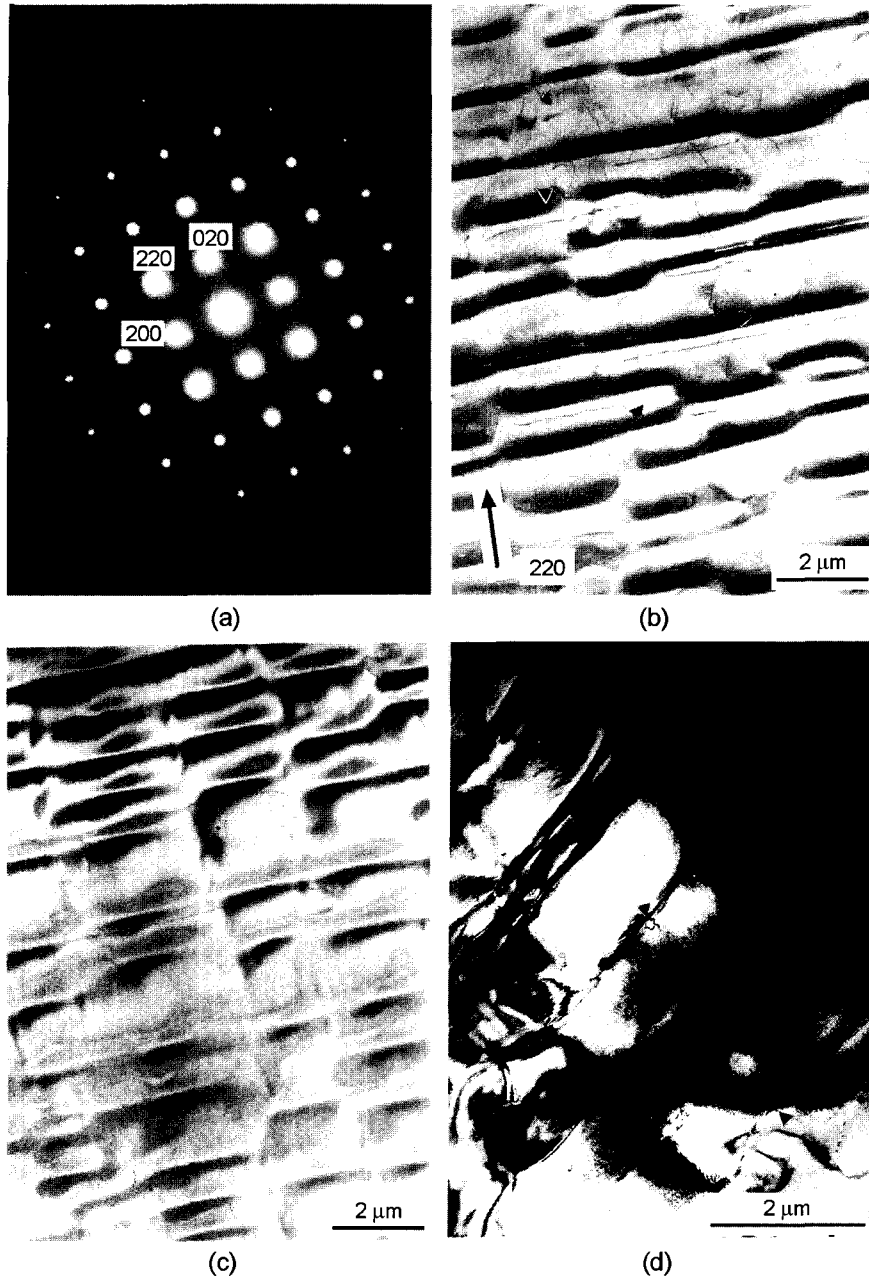


Fig. 5. (a) Electron diffraction pattern of InGaP epilayer; (b) TEM micrograph of InGaP epilayer grown on exact substrate; (c) on 6° offcut substrate; (d) on 10° offcut substrate.

아 본 InGaP 에피막의 단결정성은 우수한 것으로 보인다. Fig. 5(a)의 회절패턴은 10° 경사기판 상에 성장된 InGaP 에피막의 회절패턴이다. Fig. 5(b)는 평탄기판에 성장된 InGaP 에피막의 형상으로서, 전술한대로 평탄기판 상의 에피막은 변형완화가 많은 특성, 즉 탄성변형효율이 낮은 시료이므로 계면 부정합전

위가 많이 예상되는 시료인데, 그림에서 화살표로 나타났듯이 많은 전위가 관측되고 있다. Fig. 5(c)는 6° 경사기판에 성장된 InGaP 에피막을 보이고 있는데 이 시료는 Fig. 1, Fig. 2에서 설명했듯이 탄성효율이 가장 높은 시료로서 전위형성이 가장 억제되는 시료이다. Fig. 5(b)와는 달리 개별적으로 식별가능한 전

위는 거의 관측되지 않고 있다. 즉, 평탄기판에 비해 전위밀도가 상당히 낮아진 것을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 10° 경사기판에 성장된 에피막의 형상으로서, 6° 경사기판의 경우보다는 부분적으로 전위가 관측되고 있다. 이 또한 Fig. 1과 Fig. 2의 경향과 부합하는 것으로서, 기판경사도가 10° 이상으로 되면 계면의 탄성변형이 다시 감소하여 부정합전위의 밀도가 다시 증가하는 것이다. Fig. 5(b), 5(c), 5(d)에 기판경사도와 관계없이 전반적으로 나타난 간격 1~2 μm의 줄무늬 모양의 우선배향 (preferred orientation) 조직은 다른 연구자에 의해 이미 밝혀진 현상인데¹⁸⁾, In과 Ga 원자층이 교차배열하는 InGaP 층 자체의 고유현상인 ordering 현상에 의해 본 연구의 InGaP 에피막에서도 우선 배향에 의한 조직구조 (texture)가 형성된 것이다.

4. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다

- (1) InGaP/GaAs 이종접합구조에서 계면에서의 탄성변형은 기판경사도가 6°일 때 가장 높았다.
- (2) 에피막의 x-선 FWHM과 전위밀도 역시 기판경사도가 6°일 때 가장 낮았으며, 이를 통해 InGaP 에피막의 결정질이 기판경사도가 6°일 때 가장 향상됨을 알 수 있었다.
- (3) 기판경사도 증가에 따라 PL 발진파장은 감소하였다.
- (4) PL 강도는 기판경사도 6°에서 최고치를 이루다, 기판경사도가 더 증가하면 다시 감소하는 추세를 보였다.
- (5) InGaP 에피막의 TEM 회절패턴은 점 (spot) 패턴만으로 이루어진 전형적인 zincblende 구조의 회절패턴을 보였으며, 경사도 6°인 GaAs 기판에 성장된 InGaP 에피막의 전위밀도가 가장 낮게 나타났다.
- (6) 본 연구에서는 기판경사도 6°에서 InGaP 에피막의 탄성효율이 가장 양호해서 전위밀도가 가장 낮게 나타난다는 사실을 최초로 밝혔고, 소자제작특성 및 빔의 특성과 이 사실을 종합적으로 고려할 때, 광전소자용 InGaP/GaAs 이종접합구조에서 최적의 기판경사도는 6°임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 한밭대학교 교내 학술연구비 지원을 받았다.

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-AlInAs interface and alloy quality", *J. Appl. Phys.*, 64, 3476 (1988).
5. M. Guiterez, D. Gonzalez, A. Aragon, "Influence of substrate misorientation on structural characteristics of InGaAs/GaAs MQW on (111)B GaAs grown by MBE", *Thin Solid Films*, 343-344, 558 (1999).
6. P. Werner, N. D. Zakharov, Y. Chen, "Stress releasing mechanism in In_{0.2}Ga_{0.8}As layers grown on misoriented GaAs[001] substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 62, 2798 (1993).
7. 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).
8. V. Swaminathan, A. T. Macrander, "Materials Aspects of GaAs and InP based Structures", Prentice Hall, Englewood Cliffs (1991).
9. S. N. G. Chu, A. T. Macrander, K. E. Sturge, W. D. Johnston, "Misfit stress in InGaAs/InP heterostructures grown by vapor phase epitaxy", *J. Appl. Phys.*, 57, 249 (1985).
10. 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).
11. J. W. Matthews, A. E. Blakeslee, "Defects in epitaxial multilayers", *J. Cryst. Growth*, 27, 118 (1974).
12. C. W. Wang, "Substrate misorientation effects on ZnMgSe layers grown on GaAs(111) by molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth*, 203, 355 (1999).
13. H. Hamada, M. Shono, S. Honda, R. Hiroyama, K. Yoshida, T. Yamaguchi, "Trends in development of red semiconductor lasers", *J. Quantum Elec.*, 27, 1483 (1991).
14. A. Kikuchi, K. Kishino, "600 nm-range GaInP/AlInP multiquantum well (MQW) lasers grown on misori-

- ented substrates', Appl. Phys. Lett., 60, 1046 (1992).
15. 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).
 16. 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).
 17. H. Asai, K. Oe, "Lattice deformations and misfit dislocation in GaInAsP/InP double heterostructure layers", J. Appl. Phys., 54, 2052 (1983).
 18. L. Nasi, G. Salviati, M. Mazzer, "Influence of surface morphology on ordered GaInP structures", Appl. Phys. Lett., 68, 3263 (1996).