

# InGaAs/GaAs MQWs 구조의 Photoreflectance 및 Photoluminescence 특성 연구

## Photoluminescence and photoreflectance studies on InGaAs/GaAs multiple quantum wells (MQWs)

유재인, 이제훈, 신동식  
한국기계연구원, 대전 305-343  
김동렬  
영남대학교, 경산 712-749  
이동건  
LG 실트론 연구소, 구미 730-350

### I. 서론

최근까지 1.3 ~ 1.5  $\mu\text{m}$  대의 파장을 가지는 레이저들은 광섬유 통신 기술의 발달로 광범위하게 연구되어 왔다[1]. Stranski-Krastanow(S-K) 방법을 사용하여 성장시킨 self-assembled quantum dots(QDs)은 반도체 소자들을 제작하는데 중요한 재료이다[1]. QDs을 만들 때, InAs QD 위에 strain-reduced layers(SRLs)으로 InGaAs 층을 사용한다. AlGaAs 층도 사용되지만, 상대적으로 변형을 적게 받는 InGaAs 층이 반도체 소자 제작에 수요가 더 크다. InGaAs 층은 광 소자의 재료로 많이 개발되어 왔고, 최근에는 QDs 레이저와 양자우물 레이저와 같은 고기능의 소자를 개발하는데 유용하게 이용되고 있다[2,3]. 일반적으로 소자의 물리적 특성은 양질의 기판과 성장되는 층의 결정성 정도에 크게 영향을 받는다. InGaAs/GaAs와 같은 이종접합 구조의 반도체에서는 기판의 격자상수와 다른 격자상수를 가지고 있는 물질을 양질의 에피층으로 성장시킬 때는 많은 제약이 따르게 되며, 성장되는 층의 결정성은 에피층의 조성과 두께에 영향을 받게 된다. 또한, 부정합 정도가 크게 나타나는 물질에 있어서, 두께 변화에 따라서 나타나는 격자이완 시에 성장된 에피층의 구조적 변화가 동시에 일어난다. 에피층의 구조적 변화와 결정성을 향상시키기 위한 연구들이 이종접합 구조를 한 반도체 물질들에 대해서 많이 진행되어 왔다[4,5]. 본 연구에서는 molecular beam epitaxy(MBE)법을 사용하여 방향이 다른 기판 위에 InGaAs/GaAs 다중양자우물 구조의 우물 층의 두께를 다르게 성장하여 photoreflectance(PR)와 photoluminescence(PL) 방법으로 광학적 특성을 조사하였다.

## II. 이론

에피층의 성장이 [001] 방향으로 되어있다면,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  층은 GaAs와의 격자상수 차이로 인해 응력을 받게 된다. 일반적으로 반도체 물질들은 등방성의 탄성변형을 하게 되므로  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 내의 변형은 다음과 같다[6].

$$\begin{aligned}\varepsilon_r^\perp &= (a_L^\perp - a_r)/a_r \\ \varepsilon_r^\parallel &= (a_L^\parallel - a_r)/a_r\end{aligned}\quad (1)$$

여기서  $\varepsilon_r^\perp$ 와  $\varepsilon_r^\parallel$ 는 [001] 및 [100] 방향에서의 변형력을 각각 나타낸다.  $a_L^\perp$ 와  $a_L^\parallel$ 는 각각  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  층의 성장 방향인 [001] 방향으로의 격자상수와 면 방향인 [100] 방향의 격자상수를 의미한다. 탄성변형에 의한 밴드갭  $E_g^s$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$E_g^s = E_C^0 + \Delta E_C - \Delta_V \quad (2)$$

여기서,  $E_C^0$ 는 탄성변형을 받지 않았을 때의 전도대의 에너지 준위로서, 밴드 구조를 결정하는데 기준이 되는 것으로 그 값은 0으로 고정한다. 그리고  $\Delta E_C$ 는 물정역학 변형(hydrostatic deformation)에 의한 전도대의 밴드단의 이동을 의미하며,  $\Delta_V$ 는 전도대를 기준으로 응력에 의해 변화하는 가전자대의 변화 크기를 나타낸다.

## III. 실험

양질의 에피층의 성장을 위해 본 연구에서는 MBE(River 32P)법을 사용하였다. 기판으로 사용된 GaAs는 etch pit density(EPD)가  $\sim 1500/\text{cm}^2$ 으로 모든 기판이 epi-ready 상태인 양질의 기판을 이용하였다. 기판의 결정학적 방향에 따른 에피층의 광학적 특성의 변화를 살펴보기 위해 (001) 면이 표면에 평행한 기판과 표면에 대해  $2^\circ$ -off 된 기판을 사용하였다. 에피층의 성장 전에 약  $620^\circ\text{C}$ 에서 undoped GaAs buffer layer을 약  $5000 \text{ \AA}$  정도 성장하였다. 표 1은 본 연구를 위해 성장한 multiple quantum wells(MQWs)의 구조를 간단하게 나타내었다.

표 1. Schematic of the  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWs structures.

Structure	Composition	Substrate	Layer/Barrier thickness (nm)
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$	0.06	$2^\circ$ -off	2/13

MQW (20 periods)	GaAs	4/13
		8/13
0.08	Exact	2/10
		4/10
	GaAs	8/10

#### IV. 결 과

그림 1은 2°-off된 GaAs와 exact GaAs 기판 위에 성장 된 우물층의 두께가 4 nm인 MQW에 대한 PL 스펙트라를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 시료에서 관측된 피크는 첫번째 전도대의 전자에서 첫번째 가전자대의 무거운 정공 사이의 전이(e1-hh1)에 관련된 피크로써, 근원은 같으나 에너지 차이를 보이고 있다. 2°-off된 GaAs의 경우에 있어서는 약 1.505 eV 이었지만, exact GaAs 경우에 있어서는 1.49 eV 정도로 오히려 작은 에너지로 관측되었다. 이는 2°-off된 GaAs가 exact GaAs 보다 변형력을 더 받기 때문으로 사료된다. 또한, PL 피크의 반치폭이 2°-off GaAs의 경우에 있어서는 약 12 meV 정도였다. 이것은 MQWs을 형성하고 있는 층의 결정성이 상당히 양호하다는 것을 의미한다. 그러나 exact GaAs 경우에는 약 32.3 meV로 peak broadening이 2°-off 된 시료보다 크게 나타났다. 이는 2°-off GaAs의 경우보다 결정성이 떨어지므로 인해서 발광효율이 낮아지는 것으로 사료된다.

그림 1. PL signals from InGaAs/GaAs MQWs for various substrates.

그림 2. PL signals for various well width of In<sub>0.06</sub>Ga<sub>0.94</sub>As/GaAs MQWs.

그림 2는 15 K에서 2°-off GaAs 기판에 성장 된 MQWs의 우물층 두께(2, 4, 6 nm)에 따른 PL 신호들이다. 각각에 대한 피크의 위치는 1989년 D. J. Arent[7] 등이 계산한 방법으로 얻어진 e1-hh1 전이와 잘 일치함을 알 수 있으며, 표 2에 나타내었다.

표 2. Comparison between calculation and PL measurement for peak position of e1-hh1 transition of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs MQWs.

	2 nm	4 nm	6 nm
PL Measurement (meV)	1502 ± 5	1491 ± 5	1479 ± 5
Calculation(meV)	1502 ± 5	1489 ± 5	1478 ± 5

Band offset	$0.6 \pm 0.1$	$0.75 \pm 0.1$	$0.75 \pm 0.1$
-------------	---------------	----------------	----------------

일반적으로,  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}(x \geq 0.12)$ 인 경우에 있어 우물층의 폭이 상당히 좁을 경우 엑시톤결합 에너지가 약 10 meV 정도로 알려지고 있다 [8]. Table 2에서 보이는 것은 PL 신호의 위치와 계산이 거의 차이가 나타나지 않고 있다. 이것은 실험 장치의 정확한 배열의 정도와 전이 에너지 계산시 필요한 parameter의 이용에서 나타날 수 있는 오차로 여겨지나, 상당히 잘 일치하였다. 또한, 전도대의 밴드 offset이 우물층의 두께에 따라 다르게 나타나고 있으며, 2 nm의 두께를 가지는 시료 이외에서 전도대의 밴드 offset은 0.75가 됨을 알 수 있다.

그림 3은 우물층의 두께가 2 nm인 MQW에 대한 PL의 온도 의존성을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정온도가 증가할 수록 전이 에너지가 저 에너지로 이동하고 있으며, 세기는 점차 감소하였다. 이는 온도의 증가에 따라 밴드갭 에너지가 감소하기 때문이다.

그림 4는 우물층의 두께가 각각 2, 4, 6 nm인 경우에 대한 e1-hh1 전이의 온도에 따른 피크 이동을 나타내고 있다. 우물층의 두께가 다른데도 온도의 증가에 따라 전이 에너지의 감소 경향이 같다. 따라서, QW에 의한 전이 이외의 불순물이나 결함에 의한 전이는 관측되지 않았다.

그림 3. Temperature dependence of PL signals for  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWs with 2 nm well width.

그림 4. Variation of e1-hh1 transition energies for  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWs as a function of temperature.

그림 5는 2°-off GaAs 기판에 성장 한  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWs에 대한 상온에서의 PR 스펙트럼들이다. 모든 시료들에 대해서 신호의 크기가 크게 나타남을 볼 수 있으며, broadening이 작은 양호한 신호들을 관측할 수 있었다. 그림에서 A와 C는 각각 상온에서의 heavy hole과 light hole의 전이에 관련된 피크이다. 또한, B와 C사이에서 GaAs 장벽의 밴드갭보다 높은 에너지 영역에서 확인되지 않은 신호들이 관측되고 있다. Pan[9] 등에 의하면 이러한 피크들은 약 10 nm의 장벽층의 폭을 가지는 MQWs 내에서 coupling effect에 의해 우물층의 중앙과 edge 부분에서의 전이가 추가되어 나타나기 때문이다 [9,10].

그림 5. PR signals of  $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWs for various well widths.

## V. 결론

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWs에 대한 광학적 특성을 PL 및 PR 방법으로 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 다중 양자우물 구조에서 e1-hh1 전이는  $2^\circ$ -off GaAs와 exact GaAs에서 각각 1.505 및 1.49 eV에서 관측되었으며, 이 피크는 Arent[7] 등이 계산한 방법으로 구한 값과 잘 일치 하였다.
2. 기판이  $2^\circ$ -off GaAs 와 exact GaAs MQWs의 15 K PL 반치폭이 각각 12.5 와 32.3 meV로 관측되었으며, 두 시료중  $2^\circ$ -off GaAs에 성장한 MQW의 시료가 결정성이 더 우수 하다.
3. 상온 PR 스펙트럼에 있어서 e1-hh1과 e1-lh1 이외의 전이 피크들이 GaAs 밴드갭보다 높은 에너지에서 관측되었다. 이는 coupling effect에 기인된 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Wu. W, Tucker. J. R, Solomon. G. S and Harris. J. S, Appl. Phys. Lett. 71, 1083 (1997).
- [2] N. K. Dutta, J. Appl. Phys. 53, 7311 (1982).
- [3] W. T. Tsang, Appl. Phys. Lett. 40, 217 (1982).
- [4] N. G. Anderson, W. D. Laidig, R. M. Kolbas and Y. C. Lo, J. Appl. Phys. 60(7), 2361 (1986).
- [5] H. K. Dong, S. C. H. Hung and C. W. Tu, J. Electron. Mater. 24(4) 327 (1995).
- [6] T. P. Pearsall, F. H. Pollak, J. C. Bean and R. Hull, J. Vac. Sci. Technol. B1(2), 338 (1983).
- [7] D. J. Arent, K. Deneffe, C. Van Hoof, J. De Boeck and G. Borghs, J. Appl. Phys. 66(4), 1739 (1989).
- [8] D. C. Reynolds, K. R. Evan. C. E. Stutz, B. Jogai, C. R. Wie and P. W. Yu, Amer. Phys. Soci. 45(19), 11156 (1992).
- [9] H. Shen, S. H. Pan, Fred. H. Pllack and R. N. Sacks, Phys. Rev. B37(18), 10919 (1988).
- [10] D. N. Talwar, John. P. Loehr and B. Jogai, Phys. Rev. B49(15), 10345 (1994).

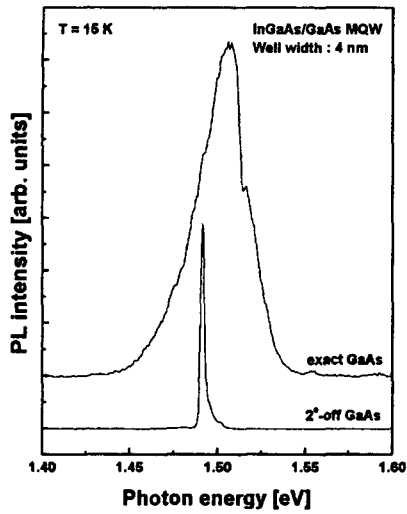


Fig. 1

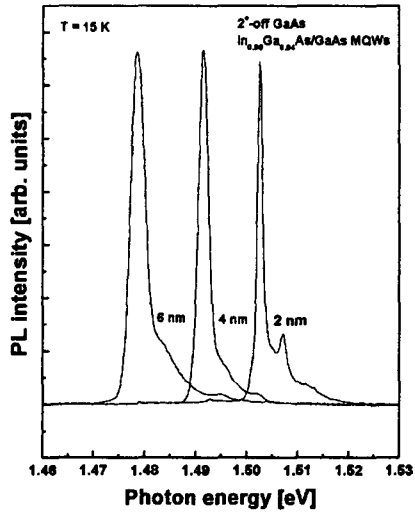


Fig. 2

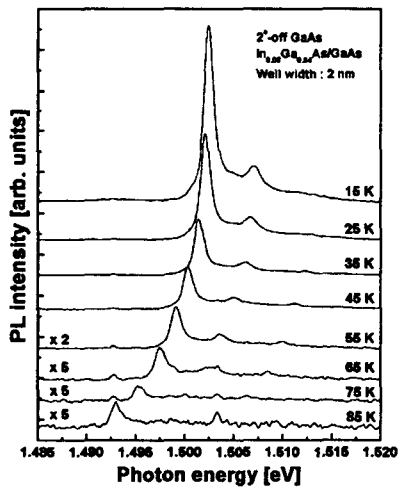


Fig. 3

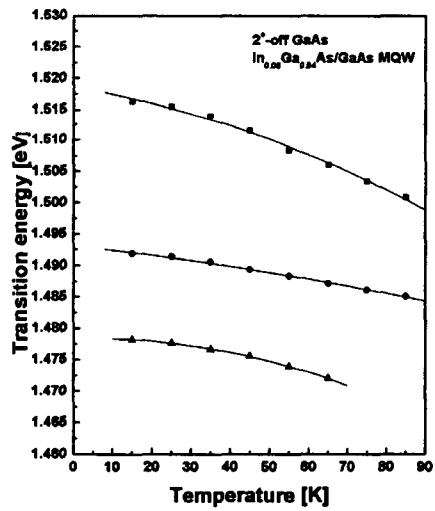


Fig. 4

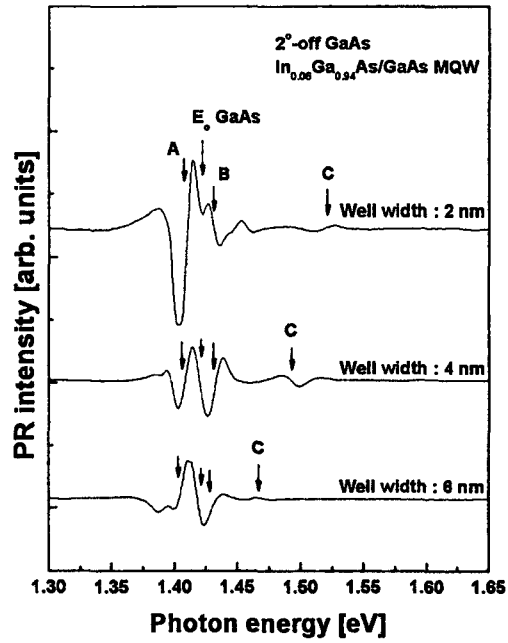


Fig. 5