

GaAs 기판 위에 성장한 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 다중양자우물의 광학적 특성에 대한 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층 성장온도의 영향

김희연^a · 오현지^a · 안상우^a · 류미이^{a*} · 임주영^b · 신상훈^b · 김수연^b · 송진동^b

^a강원대학교 물리학과, 춘천 200-701

^b한국과학기술연구원 나노과학연구본부, 서울 136-791

(2010년 2월 5일 받음, 2010년 4월 24일 수정, 2010년 4월 27일 확정)

$In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층(buffer layer)의 성장온도 변화에 따른 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 다중양자우물(multiple quantum wells: MQWs)의 광학적 특성을 photoluminescence (PL)와 time-resolved PL (TRPL) 측정을 이용하여 분석하였다. $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층은 320°C에서 580°C까지 다양한 온도조건에서 1 μm 성장하였으며, 그 위에 6 nm, 4 nm, 그리고 2.5 nm 두께의 $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ 양자우물(quantum well)과 10 nm 두께의 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 장벽(barrier)의 MQWs를 성장하였다. 낮은 온도(320-480°C)에서 성장한 InAlAs 버퍼층의 MQWs는 4 nm QW과 6 nm QW로부터 모두 PL 피크가 측정되었으나, 높은 온도(320-580°C)의 버퍼층 위에 성장한 MQWs는 6 nm QW에서의 PL 피크만 관찰되었다. 일정한 온도 480°C에서 성장한 버퍼층의 MQWs의 PL 세기가 가장 강하게 측정되었으며, 가장 높은 온도에서(530-580°C)에서 성장한 버퍼층의 MQWs의 PL 세기가 가장 약하게 나타났다. 이러한 PL 결과로부터 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층의 최적의 성장조건은 일정한 온도 480°C임을 확인하였다. 방출과정에 따른 PL 소멸시간(decay time)과 PL 스펙트럼으로부터 4 nm QW과 6 nm QW에서의 운반자 수명시간을 얻었다.

주제어 : 포토루미네선스, 시간분해 포토루미네선스, 분자선 에피택시, InAlAs, InGaAs/InAlAs MQWs

I. 서 론

InAlAs/InGaAs 양자우물(quantum well: QW) 구조는 큰 대역의 전도대의 불연속성과 격자 일치(lattice matching) 때문에 양자폭포레이저(quantum cascade laser) 제작에 매우 적합하다 [1-6]. 또한 $In_xGa_{1-x}As$ 의 좁은 밴드 갭 에너지와 높은 전자 이동도 때문에 트랜지스터와 같은 전자소자 개발에도 많이 이용되고 있다. InP 기판에 성장한 InAlAs/InGaAs HEMT (high electron mobility transistor)는 GaAs 기판에 성장한 AlGaAs/InGaAs HEMT에 비해 밀리미터와 주파수 영역에서 높은 이득과 낮은 노이즈(noise)를 보인다. 그러나 InP 기판은 GaAs 기판에 비해 충격에 약하여 부서지기 쉽고 단가도 비싸며 또한 작은 사이즈만 이용가능하다는 단점이 있다. 따라서 단단하고 재료가 저렴한 GaAs 기판을 이용하면서 In 채널층을 이용하기 위해 metamorphic HEMT (MHEMT) 소자가 많은 관심을 받아왔다 [1-4]. MHEMT에 관한 연구는 InAlAs 장벽

과 InGaAs 우물 사이에 큰 대역의 전도대의 불연속성을 얻고, In 채널층의 캐리어 농도와 이동도를 개선하기 위한 연구를 해왔다 [7,8]. MHEMT는 GaAs 기판 위에 In의 몰분율을 점차적으로 높이는 metamorphic 버퍼층을 성장하여 GaAs 격자상수에서 채널층의 격자상수까지 변화시킬 수 있다. GaAs 기판에 InGaAs [3], InAlAs [2,4,8], InGaP [9], AlGaInAs [10] 또는 AlGaAsSb [7]와 같은 다양한 종류의 metamorphic 버퍼층을 성장하였다. Al을 포함하는 InAlAs 버퍼층은 InGaAs 버퍼층보다 적은 누설전류(leakage current)를 갖는 장점이 있다. Metamorphic InAl(Ga)As 소자에 $In_xAl_{1-x}As$ graded 버퍼층을 성장함으로써 threading dislocation density를 줄일 수 있어 폭넓게 사용되고 있다 [12-14].

본 연구에서는 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 다중양자우물(multiple quantum wells: MQWs) 구조의 최적의 성장조건을 찾기 위하여, 다양한 성장온도에서 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층을 성장하였다. $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층의 성장온도에 따른

* [전자우편] myryu@kangwon.ac.kr

In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As MQWs의 광학적 특성을 photo-luminescence (PL)과 time-resolved PL (TRPL) 측정을 이용하여 분석하였다.

II. 실험

실험에 사용된 In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As MQWs 시료는 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy: MBE) 장비를 이용하여 GaAs (001) 기판 위에 성장하였다. MQWs 구조를 성장하기 전에 GaAs 기판에 n-GaAs 버퍼층을 580°C에서 0.5 μm 성장한 후, 다양한 온도에서 In_{0.5}Al_{0.5}As 버퍼층을 1 μm 성장하였다. Fig. 1(a)는 In_{0.5}Al_{0.5}As 버퍼층 성장에 사용한 다양한 온도조건을 나타내었다. In_{0.5}Al_{0.5}As 버퍼층을 성장한 후 MQWs를 480°C에서 성장하였다. MQWs 구조는 Fig. 1(b)에 나타내었다. 본 연구는 다른 온도조건에서 성장한 In_{0.5}Al_{0.5}As 버퍼층 위에 성장한 MQWs 시료의 광학적 특성을 분석하였다. Fig. 1(a)에 보여주듯이 시료 N1은 GaAs 버퍼층을 580°C에서 성장한 후, 온도를 빠르게 320°C로 낮춘 후에 온도를 320°C에서 480°C까지 증가시키는 동안 InAlAs 버퍼층을 0.5 μm 성장하고, 480°C로 유지하면서 0.5 μm 성장하였다. 시료 N2는 온도를 480°C로 일정하게 유지하면서 InAlAs 버퍼층을 1 μm 성장하였으며, 시료 N3는 온도를 320°C에서 580°C로 증가하면서 InAlAs 버퍼층을 0.5 μm 성장하고, 580°C로 일정하게 유지하면서 0.5 μm 성장하였다. 시료 N4는 온도를 530°C에서 580°C로 증가하면서 InAlAs 버퍼층을 0.5 μm 성장하고 580°C로 유지하면서 0.5 μm 성장하였다. InAlAs 버퍼층의 성장온도에

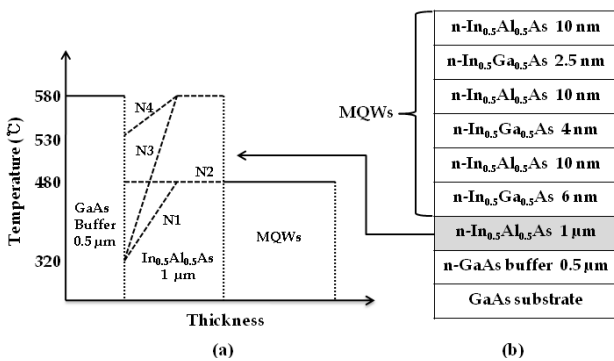


Figure 1. (a) The growth temperature sequences for the In_{0.5}Al_{0.5}As buffer layer and (b) the structures of In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As MQWs.

다른 InGaAs/InAlAs MQWs의 특성 변화를 연구하기 위해, Fig. 1(b)와 같이 6 nm, 4 nm, 그리고 2.5 nm 두께의 In_{0.5}Ga_{0.5}As 양자우물(quantum well)과 10 nm 두께의 In_{0.5}Al_{0.5}As 장벽(barrier)의 MQWs를 성장하였다.

In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As MQWs의 광학적 특성을 PL과 TRPL 측정을 이용하여 분석하였다. 저온유지장치를 통해 고순도 기체 헬륨을 순환 및 팽창시켜 시료의 온도를 10 K까지 냉각시켜 저온에서 실험하였다. PL과 TRPL 측정은 여기 광원으로 각각 cw 다이오드 레이저($\lambda=532$ nm)와 피코초 펄스 다이오드 레이저($\lambda=634$ nm, pulse width=93 ps)를 사용하였으며, PL 신호는 NIR-PMT 검출기로 측정하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2는 10 K에서 측정된 In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As MQWs 시료들의 PL 스펙트럼을 나타낸다. N1의 PL 피크는 1,290 nm와 1,390 nm 관찰되고, N2는 1,275 nm와 1,360 nm, N3는 1,347 nm, N4는 1,375 nm에 PL 피크가 관찰되었다. 1,270 nm에서 1,300 nm 파장영역의 PL 피크는 4 nm QW에서 방출되는 루미네이션이며, 1,340 nm에서 1,390 nm 파장영역의 PL 피크는 6 nm QW에서 방출되

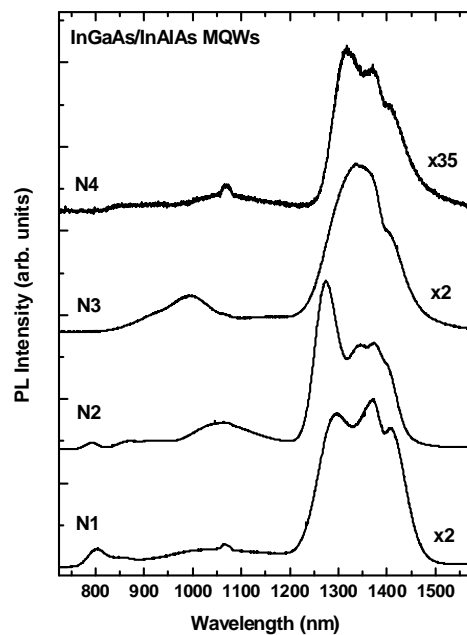


Figure 2. 10 K PL spectra for the InGaAs/InAlAs MQWs samples.

는 루미네선스이다 [11]. 1,000 nm에서 1,100 nm 파장영역의 약하면서 넓은 PL 피크는 2.5 nm QW 관련 피크로 설명할 수 있다 [4,11]. ~800 nm 근처의 PL 피크는 GaAs 관련 피크이며, 1,064 nm의 PL 피크는 레이저 파장(532 nm)의 SHG (second harmonic generation) 피크이다. Fig. 2에서 보여주듯이 N1과 N2는 4 nm QW과 6 nm QW에서의 PL 피크가 모두 관찰되었다. 그러나 상대적으로 높은 온도에서 InAlAs 버퍼층을 성장한 시료인 N3와 N4는 6 nm QW에서의 PL 피크만 나타났다. InAlAs 버퍼층을 일정한 온도(480°C)에서 성장한 N2의 PL 세기가 가장 강하게 측정되었으며, 높은 온도(530–580°C)에서 성장한 N4의 PL 세기가 가장 약하게 나타났다. 이러한 PL 결과로부터 InAlAs 버퍼층의 성장조건이 MQWs의 광학적 특성에 크게 영향을 끼치는 것을 알 수 있으며, 최적의 버퍼층 성장조건은 MQW 성장온도인 480°C에서 온도를 일정하게 유지하면서 성장하는 것임을 확인하였다.

Fig. 3(a)는 10 K에서 측정한 InGaAs/InAlAs MQWs 시료들의 6 nm QW에서 방출된 PL 피크에서의 소멸곡선을 나타낸다. Fig. 3(a)에서 보여주듯이 N3와 N4의 PL 소멸이 N1과 N2에 비해서 운반자 소멸이 느리게 이루어지는 것을 알 수 있다. 또한 PL 소멸곡선은 PL 세기가 빠르게 감소하는 성분과 느리게 감소하는 성분으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이것은 운반자 재결합 과정에 두 가지 요소가 포함되었음을 나타낸다. 이러한 PL 소멸곡선은 이항지수 함수인 $I(t) = A_1 \exp(-\frac{t}{\tau_1}) + A_2 \exp(-\frac{t}{\tau_2})$ 로 잘 표현된다. 여기서 τ_1 과 τ_2 는 각각 빠른 소멸성분과 느린 소멸성분의 운반자 소멸시간을 나타내고, A_1 과 A_2 는 각각의 성분의 PL 진폭에 대응하는 부분을 나타낸다. Fig. 3(a)의 각 시료의 PL 소멸곡선에서 얻은 각 성분들의 PL 소멸시간과 PL 진폭을 Table 1에 나타내었다. 빠른 소멸시간 τ_1 은 N1 시료가 1 ns로 가장 길고 N4가 0.70 ns로 가장 빠른 것을 알 수 있다. 느린 소멸 시간 τ_2 는 N1이 4.37 ns로 가장 빠르고 N4의 경우 6.48 ns로 가장 길게 나타났다. 시료들 중에서 N1의 τ_1 이 가장 길지만 빠른 성분의 PL 진폭 A_1 이 90%로 가장 크고 τ_2 는 가장 짧고 A_2 가 10%로 가장 작으므로 N1의 PL 세기가 가장 빠르게 감소하는 것을 Fig. 3(a)와 Table 1에서 확인할 수 있다. N4의 PL 소멸곡선은 τ_1 은 가장 짧지만 A_1 이 63%로 가장 작으며, τ_2 는 가장 길고 A_2 가 37%로 느린 소멸성분이 시료들 중에서 가장 커서 가장 느리게 소멸한다. 또한 Table 1과 Fig. 3(a)에서 보여주듯이 N1과

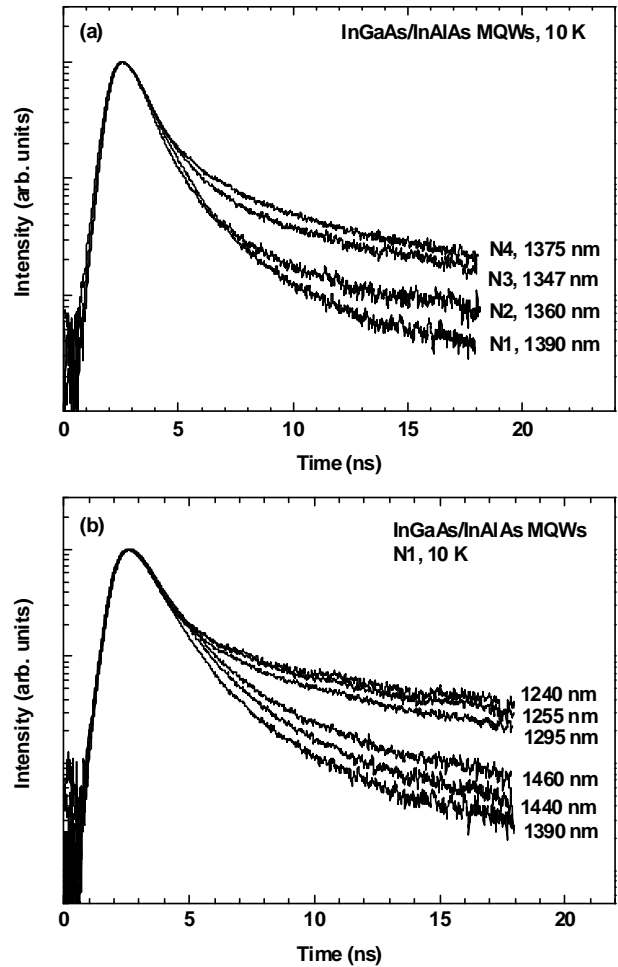


Figure 3. (a) PL decay profiles of the PL peaks from 6 nm thick QW for InGaAs/InAlAs MQWs samples measured at 10 K. (b) PL decay profiles for the sample N1 as a function of emission wavelength.

Table 1. Calculated PL decay times and amplitudes for the $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ MQWs samples at the PL peak position of 6 nm thick well measured at 10 K.

	PL peak (nm)	τ_1 (ns)	A_1 (%)	τ_2 (ns)	A_2 (%)
N1	1,390	1.00	90	4.37	10
N2	1,360	0.85	85	5.22	15
N3	1,347	0.82	70	5.95	30
N4	1,375	0.70	63	6.48	37

N2의 PL 소멸곡선은 빠른 소멸성분이 우세하고, InAlAs 버퍼층을 높은 온도에서 성장한 N3와 N4는 느린 소멸성분이 우세하다는 것을 알 수 있다.

시료 N1의 10 K에서 측정된 방출파장에 따른 PL 소멸곡선을 Fig. 3(b)에 나타내었다. 방출파장이 1,240 nm에서 6 nm QW의 PL 피크인 1,390 nm까지 증가하였을 때, PL 소멸은 점차 빨라지고, 1,390 nm에서 파장이 더 증가하면 PL 소멸은 다시 점차 느려진다. 다른 시료들로부터도 비슷한 경향의 방출파장에 따른 PL 소멸 특성을 얻었다.

Fig. 4는 10 K에서 측정된 시료 N1과 N3의 PL 스펙트럼과 방출파장에 따른 PL 소멸시간을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보여주듯이 N1의 빠른 소멸시간인 τ_1 (closed circle)은 방출파장이 1,240 nm에서 1,460 nm까지 증가할 때 증가-감소-증가의 S자 형태가 관찰되었다. τ_1 은 1,290 nm에서 0.95 ns로 피크에 도달한 후 1,335 nm까지 감소하다가 파장이 더 증가함에 따라 다시 증가, 즉 소멸시간이 길어진다. N1의 느린 소멸시간 τ_2 (open circle)는 방출파장이 증가함에 따라 급격하게 감소하다가 1,390 nm에서 가장 빠른 소멸시간 4.37 ns에 도달한 후 파장이 증가함에 따라 다

시 증가한다. Fig. 4(a)에서 4 nm QW의 PL 피크인 1,290 nm에서 τ_1 은 피크 소멸시간 0.95 ns이고, 6 nm QW의 PL 피크인 1,390 nm에서는 τ_2 가 가장 짧은 소멸시간 4.37 ns인 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 N3의 방출파장에 따른 PL 소멸시간을 나타낸다. N3의 τ_1 은 방출파장이 1,250 nm에서 1,465 nm까지 증가함에 따라 0.66 ns에서 1.19 ns까지 계속 증가한다. τ_2 는 파장이 증가함에 따라 감소하다가 증가한다. 6 nm QW의 PL 피크 근처인 1,400 nm에서 가장 짧은 소멸시간 5.20 ns를 얻었다. 시료 N2의 방출파장에 따른 PL 소멸시간은 N1과 유사한 결과를 얻었으며, N4의 결과는 N3 시료와 비슷한 특성을 보였다. 모든 시료들의 방출파장에 따른 느린 소멸시간 τ_2 는 6 nm QW의 PL 피크에서 소멸시간이 가장 짧은 것을 확인하였다. 그러나 빠른 소멸시간 τ_1 은 N1과 N2 시료에서는 방출파장이 증가함에 따라 S자 형태가 관찰되었으며 4 nm QW의 PL 피크에서 τ_1 의 피크 소멸시간을 얻었다. 하지만 PL 스펙트럼에서 4 nm QW의 PL 피크가 나타나지 않은 N3와 N4의 τ_1 은 방출파장이 증가함에 따라 계속 증가하였다. 이러한 PL과 TRPL 결과들로부터 소멸시간 τ_1 과 τ_2 는 각각 4 nm QW과 6 nm QW에서의 운반자재결합과 관련되어 있는 것으로 설명할 수 있다.

IV. 결 론

MBE를 이용하여 GaAs 기판에 성장한 $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 버퍼층의 성장온도에 따른 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ MQWs의 광학적 특성 변화를 PL과 TRPL 측정을 이용하여 분석하였다. InAlAs 버퍼층 성장온도가 낮은(320–480°C) N1과 N2는 4 nm QW과 6 nm QW로부터 각각 PL 피크가 측정되었으나, 높은 온도(320–580°C)에서 InAlAs 버퍼층을 성장한 N3와 N4는 6 nm QW에서의 PL 피크만 관찰되었다. 또한 InAlAs 버퍼층의 성장온도가 높을수록 PL 세기가 감소하였다. 방출파장에 따른 PL 소멸곡선 측정으로 소멸시간 τ_1 과 τ_2 는 각각 4 nm QW과 6 nm QW에서의 운반자 재결합 수명 시간으로 설명할 수 있다. 이러한 결과로부터 $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 버퍼층의 성장온도가 InGaAs/InAlAs MQWs의 광학적 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며, 최적의 $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 버퍼층의 성장조건은 일정한 온도 480°C인 것을 확인하였다.

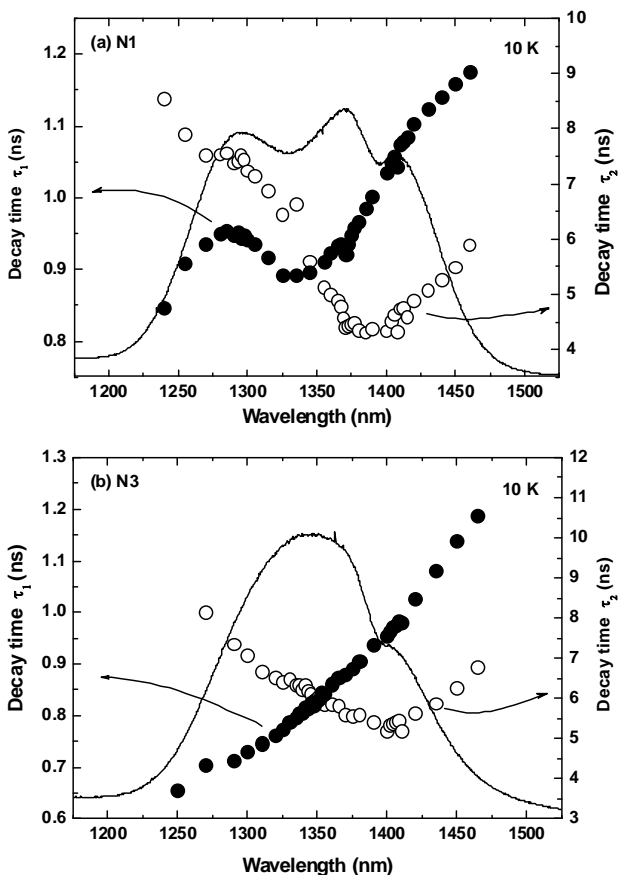


Figure 4. Decay times and PL spectra (a) for the sample N1 and (b) for the sample N3 as a function of emission wavelength.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2009-0073699).

참고문헌

- [1] L. J. Cui, Y. P. Zeng, B. Q. Wang, J. Wu, Z. P. Zhu, and L. Y. Lin, *J. Appl. Phys.* **91**, 2429 (2002).
- [2] X. Z. Shang, J. Wu, W. C. Wang, W. X. Wang, Q. Huang, and J. M. Zhou, *Solid-State Electron.* **51**, 85 (2007).
- [3] I. Tångring, S. M. Wang, M. Sadeghi, Q. F. Gu, and A. Larsson, *J. Cryst. Growth* **281**, 220 (2005).
- [4] K. S. Joo, S. H. Chun, J. Y. Lim, J. D. Song, and J. Y. Chang, *Physica. E.* **40**, 2874 (2008).
- [5] 조중석, 김상호, 황보수정, 장재호, 최현광, 전민현, *한국진공학회지* **18**, 352 (2009).
- [6] 한일기, 이정일, *한국진공학회지* **18**, 468 (2009).
- [7] M. Behet, K. van der Zanden, G. Borghs, and A. Behres, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2760 (1998).
- [8] S. Bollaert, Y. Cordier, V. Hoel, M. Zaknoune, H. Happy, S. Lepilliet, and A. Cappy, *IEEE Electron Device Lett.* **20**, 123 (1999).
- [9] K. Yuan and D. Ferre, *J. Cryst. Growth* **243**, 288 (2002).
- [10] M. Haupt, K. Kohler, P. Ganser, S. Emminger, S. Muller, and W. Rothmund, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 412 (1996).
- [11] J. C. Harmand, T. Matsuno, and K. Inoue, *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, 233 (1990).
- [12] J.-I. Chyi, J.-L. Shieh, J.-W. Pan, and R.-M. Lin, *J. Appl. Phys.* **79**, 8367 (1996).
- [13] Y. Cordier and D. Ferre, *J. Cryst. Growth* **201/202**, 263 (1999).
- [14] A. Sayari, N. Yahyaoui, A. Meftah, A. Sfaxi, and M. Oueslati, *J. Lumin.* **129**, 105 (2009).

Growth Temperature Effects of $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ Buffer Layer on the Optical Properties of $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ Multiple Quantum Wells Grown on GaAs

Hee Yeon Kim^a, H. J. OH^a, S. W. Ahn^a, Mee-Yi Ryu^{a*}, J. Y. Lim^b,
S. H. Shin^b, S. Y. Kim^b, and J. D. Song^b

^a*Department of Physics, Kangwon National University, Chuncheon 200-701*

^b*Nano-Science Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791*

(Received February 5, 2010, Revised April 24, 2010, Accepted April 27, 2010)

The luminescence properties of $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ multiple quantum wells (MQWs) grown on $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ buffer layers have been studied by using photoluminescence (PL) and time-resolved PL measurements. A 1- μm thick $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ buffer layers were deposited on a 500 nm thick GaAs layer, followed by the deposition of the InGaAs/InAlAs MQWs. In order to investigate the effects of InAlAs buffer layer on the optical properties of the MQWs, four different temperature sequences are used for the growth of InAlAs buffer layer. The growth temperature for InAlAs buffer layer was varied from 320°C to 580°C. The MQWs consist of three $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ wells with different well thicknesses (2.5 nm, 4.0 nm, and 6.0 nm thick) and 10 nm thick $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ barriers. The PL spectra from the MQWs with InAlAs layer grown at lower temperature range (320-480°C) showed strong peaks from 4 nm QW and 6 nm QW. However, for the MQWs with InAlAs buffer grown at higher temperature range (320-580°C), the PL spectra only showed a strong peak from 6 nm QW. The strongest PL intensity was obtained from the MQWs with InAlAs layer grown at the fixed temperature of 480°C, while the MQWs with buffer layer grown at higher temperature from 530°C to 580°C showed the weakest PL intensity. From the emission wavelength dependence of PL decay times, the fast and slow decay times may be related to the recombination of carriers in the 4 nm QW and 6 nm QW, respectively. These results indicated that the growth temperatures of InAlAs layer affect the structural and optical properties of the MQWs.

Keywords : Photoluminescence, Time-resolved photoluminescence, Metamorphic, Molecular beam epitaxy

* [E-mail] myryu@kangwon.ac.kr