≪연구논문≫ 한국진공학회지 제20권 6호, 2011년 11월, pp.449~455
http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2011.20.6.449

InGaAs/InAlAs 양자우물구조의 발광특성에 대한 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층 성장온도의 영향

김희연[a] · 류미이[a*] · 임주영[b] · 신상훈[b] · 김수연[b] · 송진동[b]

[a]강원대학교 물리학과, 춘천 200-701
[b]한국과학기술연구원 나노과학연구본부, 서울 136-791

(2011년 8월 4일 받음, 2011년 9월 22일 수정, 2011년 10월 6일 확정)

$In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 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 포토루미네션스(photoluminescence, PL)와 시간분해 포토루미네션스(time-resolved PL, TRPL) 측정을 이용하여 분석하였다. $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층은 기판의 온도를 320°C에서 580°C까지 다양하게 변화시키며 1 μm 성장하였으며, 그 위에 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 층을 480°C에서 1 μm 성장한 후 InGaAs/InAlAs MQWs을 성장하였다. MQWs는 6-nm, 4-nm, 그리고 2.5-nm 두께의 $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ 양자우물과 10-nm 두께의 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 장벽으로 이루어졌다. 4-nm QW과 6-nm QW로부터 PL 피크가 나타났으나, $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 성장온도 변화가 가장 큰(320°C에서 580°C까지 변화) 시료는 6-nm QW에서의 PL 피크만 나타났다. 낮은 온도(320°C에서 480°C까지 변화)에서 성장한 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층 위에 성장한 MQWs의 PL 특성이 우수하게 나타났다. 발광파장에 따른 TRPL 결과로 4-nm QW과 6-nm QW에서의 캐리어 소멸시간을 얻었다.

주제어 : 다중양자우물, 포토루미네션스, 시간분해 포토루미네션스, InAlAs, InGaAs/InAlAs MQWs

I. 서 론

InGaAs/InAlAs 양자우물 구조는 큰 대역의 전도대의 불연속성(ΔE_C=0.52 eV)과 격자 일치 때문에 고출력 레이저 제작에 매우 적합하다. 또한 InGaAs/InAlAs 이종접합은 AlGaAs/GaAs와 비교하여 표면재결합이 낮고 이동도가 크므로 HBT (heterojunction bipolar transistor)나 HEMT (high electron mobility transistor) 등 초고속 이종접합 소자 제작에 많은 연구가 이루어지고 있다. InP 기반의 HEMT는 GaAs 기반의 HEMT와 비교하여 높은 이득과 낮은 잡음 및 우수한 초고주파 특성 등 여러 장점 때문에 밀리미터파 대역에서 동작하는 증폭기의 응용에 주로 사용되어져 왔다. 그러나 InP 기판은 역학적으로 부서지기 쉬운 성질, 높은 재료비용과 작은 사이즈만 이용가능하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 GaAs 기판 위에 metamorphic 버퍼층(buffer layer)을 사용하는 InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT (MHEMT) 소자가 많은 관심을 받아왔다 [1-4]. HEMT에 관한 연구는 InAlAs 장벽과 InGaAs 우물 사이에 큰 대역의 전도대의 불연속성을 얻고, In 채널층의 캐리어 농도와 이동도를 개선하기 위한 연구를 해왔다 [5,6]. MHEMT는 GaAs 기판 위에 In의 몰분율을 점차적으로 높이는 metamorphic 버퍼층을 성장하여 GaAs 격자상수에서 채널층의 격자상수까지 변화시킬 수 있다. Al을 포함하는 InAlAs 버퍼층은 InGaAs 버퍼층보다 적은 누설전류(leakage current)를 갖는 장점이 있어 metamorphic InAl(Ga)As 소자에 $In_xAl_{1-x}As$ 버퍼층이 폭넓게 이용되고 있다 [7-9].

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 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 성장하였다. $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 광학적 특성에 대한 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 성장온도의 영향을 포토루미네션스(photoluminescence, PL)와 시간분해 포토루미네션스(time-resolved PL, TRPL) 측정을 이용하여 분석하였다.

II. 실험방법

$In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs 시료는 MBE (molecular

* [전자우편] myryu@kangwon.ac.kr

beam epitaxy) 장비를 이용하여 GaAs (001) 기판 위에 성장하였다. MQWs 구조를 성장하기 전에 GaAs 기판에 n-GaAs 버퍼층을 580°C에서 0.5 μm 성장한 후, $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 1 μm 성장하였다. $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 광학적 특성을 향상하기 위하여 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 성장 온도를 변화시켰다. Fig. 1(a)은 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 성장에 사용한 다양한 온도조건을 나타내었다. $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 성장하고 그 위에 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 층을 480°C에서 1 μm 성장한 후 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs을 480°C에서 성장하였다. MQWs는 6-nm, 4-nm, 그리고 2.5-nm 두께의 $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ 양자우물과 10-nm 두께의 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 장벽으로 구성되었다. MQWs 구조는 Fig. 1(b)에 나타내었다. Fig. 1(a)에 보여주듯이 시료 S1은 GaAs 버퍼층을 580°C에서 성장한 후, 온도를 빠르게 320°C로 낮춘 후 온도를 320°C에서 480°C까지 증가시키는 동안 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 0.5 μm 성장하고, 480°C로 유지하면서 0.5 μm 성장하였다. 시료 S2는 온도를 480°C로 일정하게 유지하면서 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 1 μm 성장하였으며, 시료 S3는 온도를 320°C에서 580°C로 증가하면서 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 0.5 μm 성장하고, 580°C로 일정하게 유지하면서 0.5 μm 성장하였다. 시료 S4는 온도를 530°C에서 580°C로 증가하면서 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 0.5 μm 성장하고 580°C로 유지하면서 0.5 μm 성장하였다. $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 광학적 특성을 PL과 TRPL 측정을 이용하여 분석하였다. PL과 TRPL 측정은 여기 광원으로 각각 cw 다이오드 레이저(λ=532 nm)와 피코초 펄스 다이오드 레이저(λ=634 nm, pulse width=93 ps)를 사용하였으며, PL 신호는 NIR-PMT (near-infrared photomultiplier tube)를 이용하여 측정하였다. TRPL 소멸곡선은 TCSPC (time-correlated single photon counting) 시스템을 이용하여 측정하였으며, deconvolution fit을 이용한 TCSPC 시스템의 시간 분해능은 60 ps 이상이다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2는 10 K에서 측정한 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs 시료들의 PL 스펙트럼을 나타낸다. S1의 PL 피크는 1,322 nm와 1,442 nm, S2는 1,332 nm와 1,425 nm, S3는 1,453 nm, S4는 1,289 nm와 1,411 nm에서 관찰되었다. 1,290 nm에서 1,335 nm 파장영역의 PL 피크는 4-nm QW에서 방출되는 루미네션스이며, 1,400 nm에서 1,450 nm 파장영역의 PL 피크는 6-nm QW에서 방출되는 루미네션스이다 [4,10]. Fig. 2에서 보여주듯이 S3를 제외한 S1, S2, 그리고 S4는 4-nm QW과 6-nm QW에서의 PL 피크가 모두 관찰되었다. 그러나 가장 큰 온도변화(320-580°C)에서 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층을 성장한 시료인 S3는 6-nm QW에서의 PL 피크만 나타났다. 또한 S1과 S3 시료의 PL 세기가 S2와 S4의 PL 세기보다 약 1.5배 강하게 나타났다.

이전 연구에서 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 광학

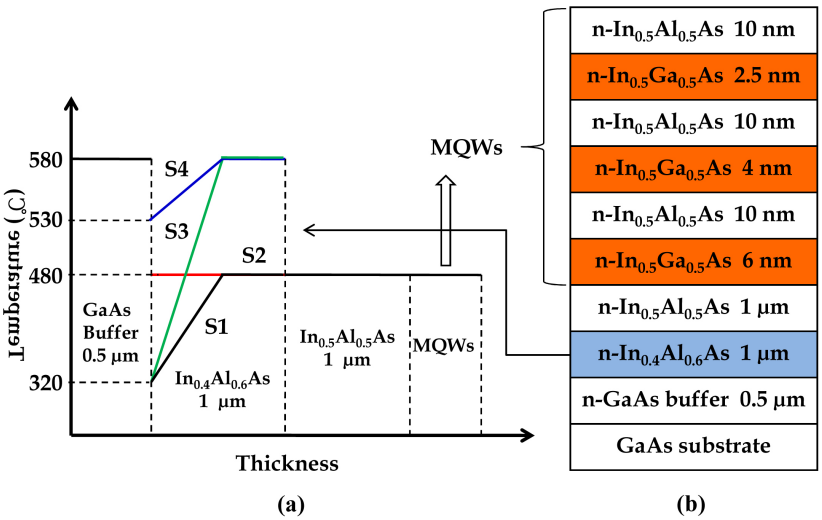

Figure 1. (a) The growth temperature sequences for the $In_{0.4}Al_{0.6}As$ buffer layer and (b) the structures of $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs.

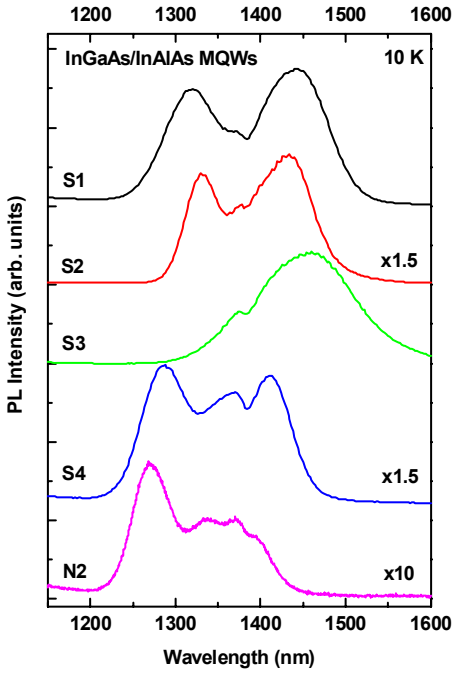

Figure 2. 10 K PL spectra for the $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs samples. The PL spectrum for $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs (N2) grown on $In_{0.5}Al_{0.5}As$ buffer layer is also shown to compare with the MQWs samples grown on $In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ buffer layers.

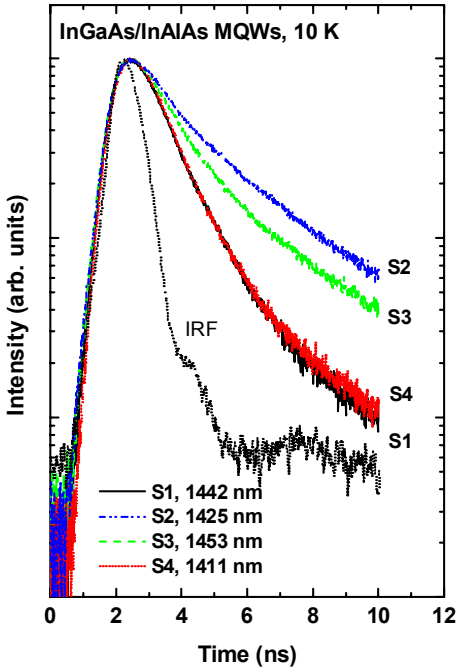

Figure 3. PL decay curves of the PL peaks from 6-nm-thick QW for InGaAs/InAlAs MQWs samples measured at 10 K.

적 특성에 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층의 성장온도의 영향을 보고하였다 [11]. 일정한 온도 480°C에서 성장한 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층을 사용한 MQWs의 PL 세기가 가장 강하게 측정되었으며, 가장 높은 온도에서(530-580°C)에서 성장한 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층의 MQWs의 PL 세기가 가장 약하게 나타났다. 이러한 결과로부터 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층의 성장조건은 일정한 온도 480°C인 것을 확인하였다. 본 연구에서는 1 μm 두께의 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 성장온도를 변화시켜 성장하고, 그 위에 480°C에서 1 μm 두께의 $In_{0.5}Al_{0.5}As$를 성장한 후 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs를 성장하였다. 따라서 $In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층에 성장한 MQWs 시료들의 PL 스펙트럼과 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층에 성장한 MQWs 시료의 PL 특성을 비교하기 위해 가장 우수한 PL 특성을 보인 N2 (480°C 성장한 $In_{0.5}Al_{0.5}As$) 시료의 PL 스펙트럼을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 보여주듯이 MQWs의 PL 스펙트럼은 유사하게 나타났으나, PL 세기는 $In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층을 사용하였을 때 대략 7-10배 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 PL 결과로부터 $In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층 구조가 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 버퍼층으로 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층보다 우수함을 확인하였다.

Fig. 3은 10 K에서 측정한 InGaAs/InAlAs MQWs 시료들의 6-nm QW에서 방출된 PL 피크에서의 소멸곡선을 나타낸다. S2와 S3의 PL 소멸이 S1과 S4에 비해 느리게 이루어지는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 보여주듯이 PL 소멸곡선은 PL 세기가 빠르게 감소하는 성분과 느리게 감소하는 성분으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 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_1과 τ_2는 각각 빠른 소멸성분과 느린 소멸성분의 캐리어 소멸시간(decay time)을 나타내고, A_1과 A_2는 각각의 성분의 PL 진폭에 대응하는 부분을 나타낸다. 여기 광원의 펄스 폭과 전기적 영향 등을 제거하기 위해 IRF를 측정하여 deconvolution fit을 이용하여 캐리어 소멸시간을 얻었다. Fig. 3의 각 시료의 PL 소멸곡선에서 얻은 각 성분들의 PL 소멸시간과 PL 진폭을 Table 1에 나타내었다. 빠른 소멸시간 τ_1은 S3 시료가 1.17 ns로 가장 길고 S1과 S4가 0.83 ns로 가장 빠른 것을 알 수 있다. 느린 소멸 시간 τ_2는 S1이 2.68 ns로 가장 빠르고 S3가 5.23 ns로 가장 길게 나타났다. 그러나 S2의 τ_1이 0.90 ns로 S3의 τ_1 보다 짧지만 느린 소멸성분의 PL 진폭 A_2가 61%로 가장 커서 PL이 가장 느리게 소멸한다. S1과 S4의 빠른 소멸은 Table 1에 보여주듯이 느린 소멸성분의

Table 1. Calculated PL decay times and amplitudes for the $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs samples at the PL peak position of 6-nm-thick QW measured at 10 K.

	PL peak (nm)	τ_1 (ns)	A_1 (%)	τ_2 (ns)	A_2 (%)
S1	1,442	0.83	82	2.68	18
S2	1,425	0.90	39	3.60	61
S3	1,453	1.17	68	5.23	32
S4	1,411	0.83	85	2.91	15

영향이 작아서 빠르게 소멸한다.

S1과 S3의 10 K에서 측정한 발광파장에 따른 PL 소멸곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 발광파장이 증가함에 따라 PL 소멸은 점차 빨라지다가 S1과 S3 각각 6-nm QW의 PL 피크인 1,442 nm와 1,453 nm에서 가장 빠른 소멸을 보였다. 발광파장이 더 증가하였을 때 PL은 점차 느리게 소멸한다. S2와 S4도 비슷한 경향의 발광파장에 따른 PL 소멸 특성을 보였다.

Fig. 5는 10 K에서 측정한 시료 S1과 S3의 PL 스펙트럼

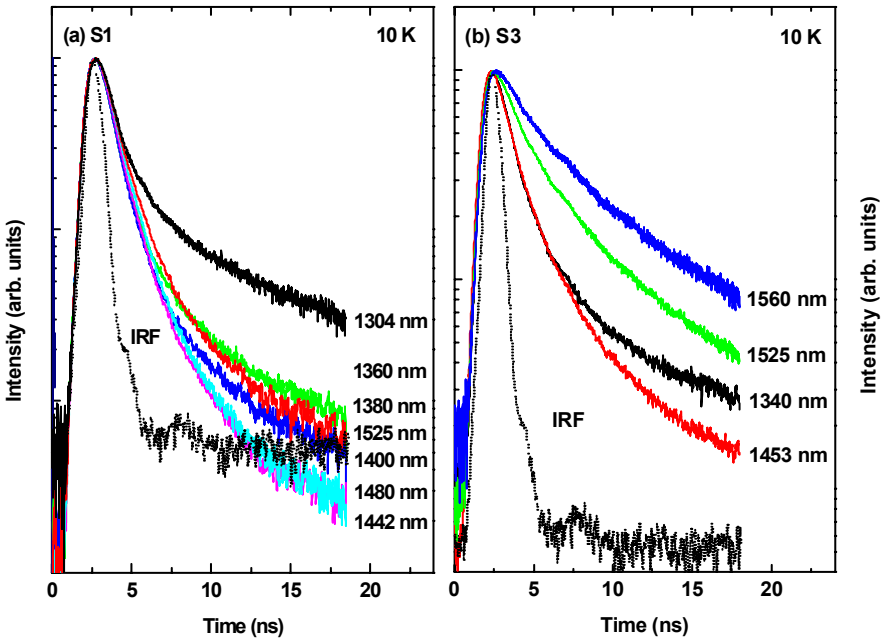

Figure 4. PL decay curves for (a) S1 and (b) S3 as a function of emission wavelength.

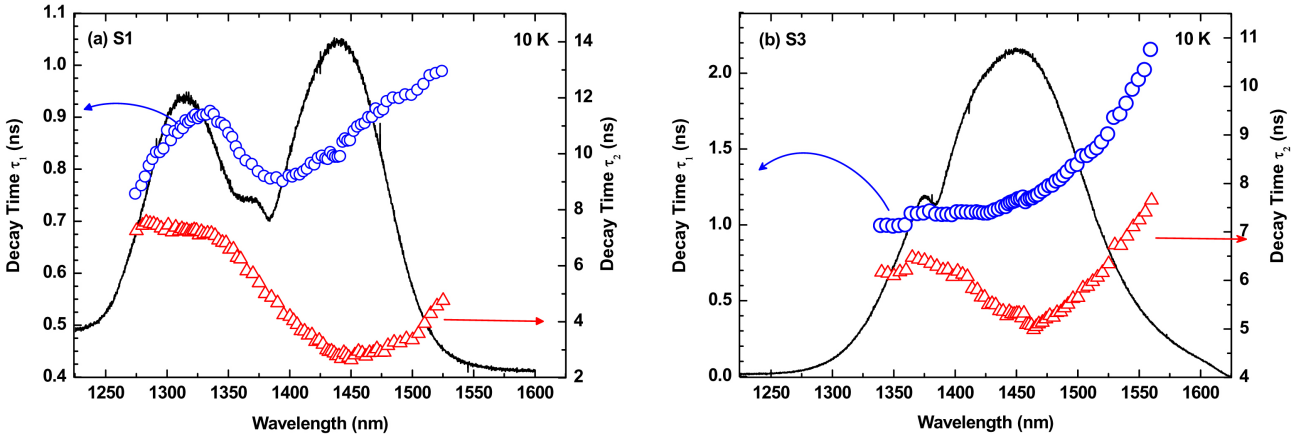

Figure 5. PL decay times and PL spectra for (a) S1 and (b) S3 as a function of emission wavelength measured at 10 K.

과 발광파장에 따른 PL 소멸시간을 나타낸다. Fig. 5(a)에서 보여주듯이 S1의 빠른 소멸시간인 τ_1 (open circles)은 발광파장이 1,275 nm에서 1,525 nm까지 증가할 때 증가-감소-증가의 S자 형태가 관찰되었다. τ_1은 1,336 nm에서 0.91 ns로 피크에 도달한 후 1,385 nm까지 감소하다가 파장이 더 증가함에 따라 다시 증가, 즉 소멸시간이 길어진다. S1의 느린 소멸시간 τ_2 (open triangles)는 발광파장이 1,275 nm에서 1,336 nm까지는 ~7.2 ns로 거의 일정하다가 발광파장이 더 증가함에 따라 급격하게 감소하다가 1,450 nm 근처에서는 가장 빠른 소멸시간 2.64 ns에 도달한 후 파장이 증가함에 따라 다시 서서히 증가한다. Fig. 5(a)에서 4-nm QW의 PL 피크인 1,322 nm에서 τ_1은 소멸시간 0.90 ns이고, 6-nm QW의 PL 피크인 1,442 nm에서는 τ_2가 가장 짧은 소멸시간 2.68 ns인 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 S3의 발광파장에 따른 PL 소멸시간을 나타낸다. S3의 τ_1은 발광파장이 1,340 nm에서 1,560 nm까지 증가함에 따라 1.00 ns에서 2.16 ns까지 계속 증가한다. τ_2는 발광파장이 증가함에 따라 감소하다가 PL 피크 근처인 1,464 nm에서 가장 빠른 소멸시간 5.00 ns에 도달한 후 파장이 증가함에 따라 점차 증가한다. S2와 S4의 발광파장에 따른 PL 소멸시간은 S1과 비슷한 특성을 보였다. 모든 시료들의 발광파장에 따른 느린 소멸시간 τ_2는 6-nm QW의 PL 피크에서 소멸시간이 가장 짧은 것을 확인하였다. 그러나 빠른 소멸시간 τ_1은 발광파장이 증가함에 따라 S자 형태가 관찰되었으며 4-nm QW의 PL 피크에서 τ_1의 피크 소멸시간을 얻었다. 하지만 PL 스펙트럼에서 4-nm QW의 PL 피크가 나타나지 않은 S3의 τ_1은 방출파장이 증가함에 따라 계속 증가하였다. 이것은 단파장(높은 에너지) 영역의 캐리어는 재결합 과정과 장파장(낮은 에너지) 영역으로의 이완이 동시에 일어나기 때문으로 설명할 수 있다. 이러한 PL과 TRPL 결과들로부터 PL 소멸시간 τ_1과 τ_2는 각각 4-nm QW과 6-nm QW에서의 캐리어 재결합과 관련된 것으로 설명할 수 있다.

IV. 결 론

MBE를 이용하여 GaAs 기판에 성장한 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 성장온도에 따른 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 광학적 특성 변화를 PL과 TRPL 측정을 이용하여 분석하였다. $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층 성장온도의 변화가 가장 큰(320-580°C) S3는 6-nm QW에서의 PL 피크만 나타났다. 그 외 다른 시료들은 4-nm QW과 6-nm QW로부터 각각 PL 피크가 측정되었다. 발광파장에 따른 PL 소멸곡선 측정으로 4-nm QW과 6-nm QW에서의 캐리어 재결합은 각각 빠른 소멸시간 τ_1과 느린 소멸시간 τ_2인 것을 확인하였다. 또한 $In_{0.4}Al_{0.6}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층에 성장한 $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ MQWs의 PL 특성이 $In_{0.5}Al_{0.5}As$ 버퍼층을 이용한 경우보다 PL 특성이 10배 정도 향상된 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터 $In_{0.4}Al_{0.6}As$ 버퍼층의 성장온도뿐만 아니라 버퍼층 물질에 따라 InGaAs/InAlAs MQWs의 광학적 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0021555). 본 연구는 강원대학교 공동실험실습관의 기기를 이용하여 수행되었음.

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] J. Cho, S. Kim, S. Hwangboe, J. Janng, H. Choi, and M. Jeon, J. Korean Vaccum Soc. **18**, 352 (2009).

[6] I. K. Han and J. I. Lee, J. Korean Vaccum Soc. **18**, 468 (2009).

[7] J. -I. Chyi, J .-L. Shieh, J. -W. Pan, and R.-M. Lin, J. Appl. Phys. **79**, 8367 (1996).

[8] Y. Cordier and D. Ferre, J. Cryst. Growth **201/202**, 263 (1999).
[9] A. Sayari, N. Yahyaoui, A. Meftah, A. Sfaxi, and M. Oueslati, J. Lumin. **129**, 105 (2009).
[10] J. C. Harmand, T. Matsuno, and K. Inoue, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, 233 (1990).
[11] H. Y. Kim, H. J. Oh, S. W. Ahn, M. -Y. Ryu, J. Y. Lim, S. H. Shin, S. Y. Kim, and J. D. Song, J. Korean Vaccum Soc. **19**, 211 (2010).

≪Research Paper≫ Journal of the Korean Vacuum Society Vol.20 No.6, November 2011, pp.449~455
http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2011.20.6.449

Growth Temperature Effects of $In_{0.4}Al_{0.6}As$ Buffer Layer on the Luminescence Properties of InGaAs/InAlAs Quantum Well Structures

Hee Yeon Kim[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 August 4, 2011, Revised September 29, 2011, Accepted October 6, 2011)

The luminescence properties of $In_{0.5}Ga_{0.5}As/In_{0.5}Al_{0.5}As$ multiple quantum wells (MQWs) grown on $In_{0.4}Al_{0.6}As$ buffer layer have been investigated by using photoluminescence (PL) and time-resolved PL measurements. A 1-μm-thick $In_{0.4}Al_{0.6}As$ buffer layers were deposited at various temperatures from 320°C to 580°C on a 500-nm-thick GaAs layer, and then 1-μm-thick $In_{0.5}Al_{0.5}As$ layers were deposited at 480°C, followed by the deposition of the InGaAs/InAlAs MQWs. In order to study the effects of $In_{0.4}Al_{0.6}As$ layer on the optical properties of the MQWs, four different temperature sequences are used for the growth of $In_{0.4}Al_{0.6}As$ buffer layer. The MQWs consist of three $In_{0.5}Ga_{0.5}As$ wells with different well thicknesses (2.5-nm, 4.0-nm, and 6.0-nm-thick) and 10-nm-thick $In_{0.5}Al_{0.5}As$ barriers. The PL peaks from 4-nm QW and 6-nm QW were observed. However, for the MQWs on the $In_{0.4}Al_{0.6}As$ layer grown by using the largest growth temperature variation (320-580°C), the PL spectrum only showed a PL peak from 6-nm QW. The carrier decay times in the 4-nm QW and 6-nm QW were measured from the emission wavelength dependence of PL decay. These results indicated that the growth temperatures of $In_{0.4}Al_{0.6}As$ layer affect the optical properties of the MQWs.

Keywords : Multiple quantum wells, Photoluminescence, Time-resolved photoluminescence, InAlAs, InGaAs/InAlAs multiple quantum wells

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