

Indium Interruption Growth법으로 성장한 InAs 양자점의 광학적 특성

이희종^a · 류미이^{a*} · 김진수^b

^a강원대학교 물리학과, 춘천 200-701

^b전북대학교 신소재공학부, 전주 561-756

(2009년 10월 23일 받음, 2009년 11월 20일 수정, 2009년 11월 23일 확정)

분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy: MBE)를 이용하여 GaAs (100) 기판에 Indium interruption growth법으로 성장한 InAs 양자점 (quantum dots: QDs)의 광학적 특성을 photoluminescence (PL)와 time-resolved PL (TRPL) 실험을 이용하여 분석하였다. In interruption growth법은 InAs 양자점 성장 동안 As 공급은 계속 유지하면서 셔터 (shutter)를 이용해서 In 공급을 조절하는 방법이다. 본 연구에서는 In을 1초 동안 공급하고 셔터를 0초, 9초, 19초, 29초, 또는 39초 동안 닫아 In 공급을 차단하였으며, 공급과 차단 과정을 각 30회 반복하여 양자점을 성장하였다. In interruption 시간을 0초에서 19초까지 증가하였을 때 PL 피크는 1096 nm에서 1198 nm로 적색편이 (~100 nm)하고 PL 세기는 증가하였으나, 19초에서 39초까지 증가하였을 때 PL 스펙트럼의 변화는 없고 PL 세기는 감소하였다. 모든 양자점의 PL 소멸시간 (decay time)은 약 1 ns로 바닥상태 (ground state) PL 피크에서 가장 길게 나타났다. In interruption 시간이 19초인 시료가 가장 좋은 PL 특성과 가장 짧은 운반자 소멸시간을 나타내었다. PL 특성의 향상은 In interruption 시간동안 일정한 양의 In 원자들의 분리와 이동이 증가한 것으로 설명될 수 있다. 이러한 결과로부터 In interruption 법을 이용하여 InAs 양자점의 크기, 균일도, 조밀도 등을 조절하여 원하는 파장대의 양자점을 성장할 수 있음을 알 수 있다.

주제어 : Photoluminescence, Time-resolved photoluminescence, 분자선 에피택시, 양자점

I. 서 론

발광 다이오드 (LED), 레이저 다이오드(LD), 반도체 광 증폭기 (SOA) 등 발광소자와 적외선 검출기 및 태양전지와 같은 수광소자에 양자점 (quantum dots: QDs)을 응용하였을 때 기존의 양자우물 (quantum well)을 활성층으로 갖는 경우에 비해 높은 양자 이득 (quantum efficiency), 높은 열적 안정성 (thermal stability), 그리고 낮은 문턱 전류 (threshold current) 등 소자의 특성이 현저하게 개선될 것으로 기대되어 양자점 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1-6]. In(Ga)As 양자점은 GaAs 기판을 이용한 경우 발광파장이 980-1300 nm 영역이고, InP 기판에 형성한 경우 1300-1550 nm 파장대역으로 광통신용 레이저 다이오드에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [7-14]. 특히, Stranski-Krastanov 성장모드를 이용한 자발형성 (self-assembled) 양자점에 대한 연구는 광전소

자 응용측면에서 활발하게 진행되고 있다. 그러나 자발형성 양자점은 In(Ga)As/GaAs, In(Ga)As/InP 등 격자부합 (lattice-mismatch) 성장으로 strain relaxation에 의해 3D 양자구조가 형성되므로 모양, 크기, 균일도, 공간적 밀도 제어에 한계가 있다. 자발형성 양자점은 높이가 측면 폭에 비해 작아 aspect ratio (height/width, AR)가 작다. 이러한 낮은 AR 양자점은 전자 파동함수를 완전히 구속하지 못하므로 파동함수가 장벽으로 상당히 스며들게 되어 양공 파동함수와의 겹침이 작아져 양자점의 광학적 특성이 좋지 않다. 낮은 AR 양자점의 성장특성을 제어하기 위하여 응력층 (strained layer)을 이용하거나 III족 물질의 성장 거동을 제어한 결과들이 발표되고 있다 [10-13].

본 논문에서는 분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy: MBE)를 이용하여 GaAs (100) 기판에 Indium interruption growth법으로 InAs 양자점을 형성하고 photoluminescence (PL)과 time-resolved PL (TRPL)을

* [전자우편] myryu@kangwon.ac.kr

이용하여 광학적 특성을 분석하였다.

II. 실험

본 연구에 사용된 InAs 양자점 시료들은 MBE를 이용하여 GaAs (100) 기판 위에 성장하였다. 기판은 반절연 (semi-insulating) GaAs (100) 웨이퍼를 사용하였고, GaAs 기판의 산화물을 제거하기 위하여 챔버내에서 580°C 에서 15분간 열처리를 하였다. 먼저 GaAs 버퍼층을 580°C 에서 300 nm 성장한 후, 480°C 에서 InAs 양자점을 성장하였다. 성장조건으로 Ga, In, As 각각의 유량을 1.75×10^{-7} Torr, 17.2×10^{-8} Torr, 5.0×10^{-6} Torr로 공급하였다. Indium interruption growth법은 InAs 양자점 성장 동안에 As 공급은 계속 유지시켜주면서 셔터 (shutter)를 이용해서 In 공급을 조절하는 방법으로 셔터를 열어 In을 1초 동안 공급하고 셔터를 일정시간 닫는 과정을 반복하여 InAs 양자점을 성장하는 방법이다. 실험에 사용한 양자점 시료는 In을 1초 동안 공급하고 셔터를 0초, 9초, 19초, 29초, 또는 39초 동안 닫아 In 공급을 차단하였으며, 공급과 차단 과정을 30회 반복하여 InAs 양자점을 성장하였다. Fig. 1은 In interruption growth법을 도식화하여 나타내었다. 시료 S00, S09, S19, S29, S39는 각각 0초, 9초, 19초, 29초, 39초 동안 In 공급을 차단하여 성장한 시료를 나타낸다. 기준시료 S00은 In을 차단하지 않고 계속 공급하면서 30초 동안 InAs 양자점을 성장하였다. 따라서 모든

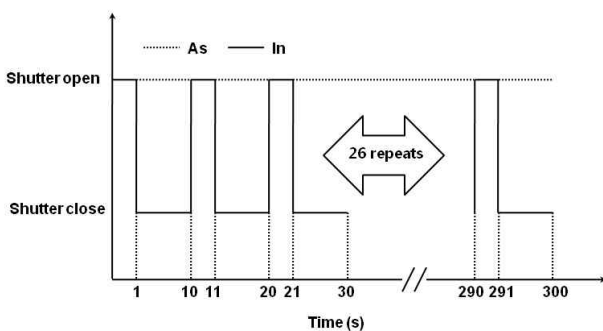


Figure 1. Schematic illustration of the indium interruption growth technique used for the sample S09. The As shutter is opened for the InAs QD growth. However, the In shutter is opened for 1 s and then closed for 9 s. This sequence was repeated 30 times for the QD growth.

InAs 양자점의 성장 동안 In은 30초간 공급하였으나 성장 시간은 30초에서 1200초까지 In interruption 시간으로 인해 서로 다르다. In interruption 시간에 따른 InAs 양자점의 광학적 특성을 분석하기 위하여 PL과 TRPL 측정하였다. PL은 여기광원으로 Ar^+ 레이저 ($\lambda=514$ nm)를 사용하여 Ge 검출기를 이용하여 PL 신호를 측정하였다. TRPL 측정은 여기광원으로 피코초 펄스 다이오드 레이저 ($\lambda=634$ nm, pulse width=50 ps)를 사용하고 NIR-PMT로 PL 신호를 검출하였다.

III. 결과 및 논의

Fig. 2은 In interruption 시간에 따른 PL 특성을 알아보기 위하여 저온 (10 K)에서 측정한 InAs 양자점 시료들의 PL 스펙트럼을 나타내었다. In interruption 시간을 0초에서 39초까지 증가시킴에 따라 각 시료의 PL 신호 세기

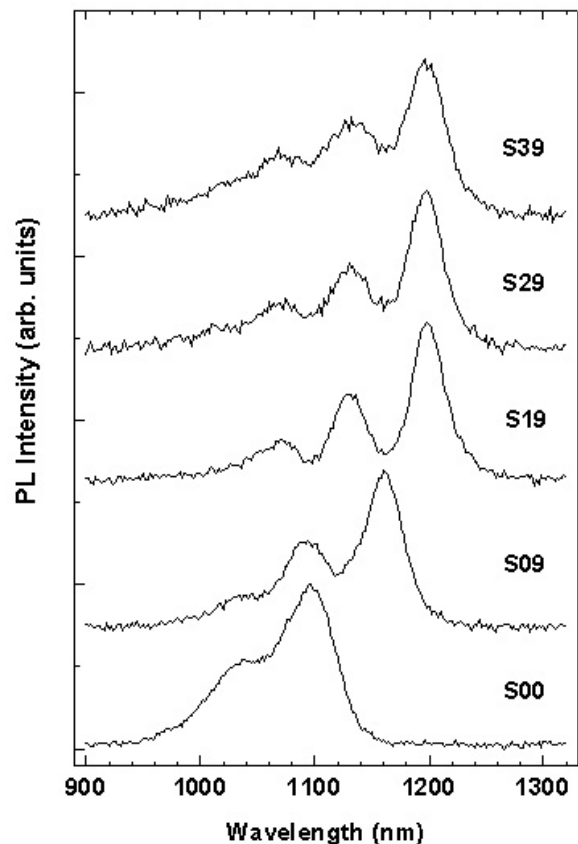


Figure 2. 10 K PL spectra for the InAs QD samples grown by the In interruption growth technique.

와 발광 위치 변화를 살펴보았다. Fig. 2에서 In interruption 시간이 0초에서 19초까지 증가하였을 때, PL 피크가 1096 nm에서 1198 nm로 약 100 nm 장파장 쪽으로 이동 (적색편이)하고 PL 피크와 shoulder 피크가 분리되어 높은 에너지 영역에 두 개의 PL 피크가 뚜렷하게 관찰되었다. 기준시료 S00의 PL 피크는 1096 nm에서 나타났고, 1055 nm에서 shoulder가 존재함을 알 수 있다. In interruption 시간이 9초인 S09는 1160 nm와 1094 nm에 PL 피크가 나타나고, 19초인 S19는 세 개의 PL 피크가 각각 1198 nm, 1131 nm, 1066 nm에서 관찰되었다. PL 피크 사이의 에너지 차는 약 62–67 meV이다. PL 피크의 반치폭 (full width at half maximum: FWHM)은 39 meV (S00)에서 26 meV (S19)로 In interruption 시간이 증가함에 따라 감소하였다. PL 세기는 0초에서 9초로 증가할 때 감소하였다가 19초로 증가하였을 때 PL 세기는 다시 증가하였다. 그러나 In interruption 시간을 19초에서 39초까지 증가하였을 때, PL 피크의 위치 변화는 나타나지 않고, PL 세기는 감소하였다. 기준시료 S00과 S19의 PL 세기가 가장 강하게 나타났으며, In interruption 시간을 19초에서 39초로 증가하였을 때 점차 감소하였다. 이러한 PL 특성은 InAs 양자점을 성장할 때 In interruption 시간의 변화에 의해 형성된 양자점의 크기와 밀도가 변화된 것으로 설명될 수 있다. S00 시료는 InAs QD 성장시간 30초 동안 계속해서 In이 기판에 도달하여 바로 양자점을 형성한다. 그러나 In interruption 시료들은 1초 동안 공급한 In이 기판에 도달한 후 interruption 시간동안 적절한 위치로 이동할 시간 (migration time)을 가지게 되어 양자점의 크기, 균일도 및 조밀도가 증가한 것으로 설명할 수 있다. In interruption 시간이 0초에서 19초로 증가하면서 PL 피크의 적색편이와 PL 세기의 증가는 InAs 양자점의 크기가 증가하고 균일도와 조밀도가 증가한 것으로 설명할 수 있다.

투과전자현미경 (transmission electron microscope: TEM)으로 측정된 InAs 양자점들의 평균 높이와 폭은 각각 S00은 5.7 nm와 21.6 nm, S09는 9.9 nm와 30.8 nm, S19는 11.1 nm와 31.9 nm, S29 11.3 nm와 32.3 nm이다 [13]. In interruption 시간을 0초에서 19초까지 증가함에 따라 양자점의 높이와 폭 모두 증가하였으며, AR은 0.26에서 0.35로 증가하였다. 그러나 interruption 시간을 19초에서 29초로 증가하였을 때 양자점의 크기 변화는 관찰되지 않

았다. In interruption 시간을 증가함에 따라 양자점의 PL 피크가 1096 nm에서 1198 nm로 장파장 쪽으로 이동하는 현상은 양자점의 크기가 증가하기 때문임을 TEM 결과에서 확인할 수 있다. In interruption으로 인한 InAs 양자점의 PL 특성의 향상은 interruption 시간동안 일정한 양의 In 원자들의 분리와 이동이 증가한 것으로 설명될 수 있다. 그러나 In interruption 시간이 19초에서 39초까지 증가하였을 때는 더 이상 In interruption에 의한 PL 특성의 향상은 나타나지 않았다.

Fig. 2에서 보여주듯이 모든 양자점 시료의 PL 스펙트럼은 두 개 이상의 PL 피크들로 이루어져 있다. 가장 강한 PL 피크는 각각의 양자점의 바닥상태 (ground state) 신호이며, 단파장 (높은 에너지)쪽에 나타난 PL 피크들은 여기 상태 (excited state) 신호로 여겨진다. S00의 경우 바닥상태와 여기상태사이의 에너지 차가 57 meV이며, In interruption법으로 성장한 시료들의 경우에는 바닥상태

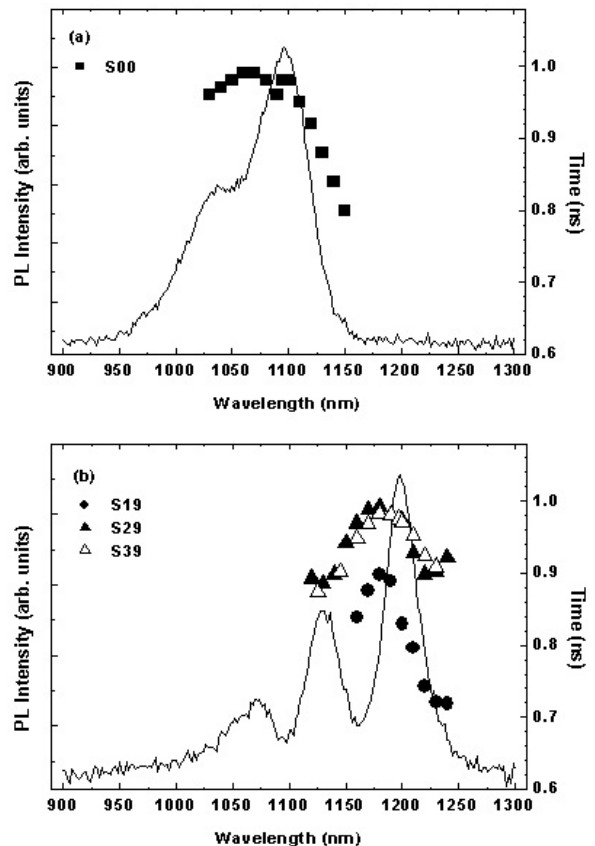


Figure 3. PL spectra and decay times taken at 10 K (a) for the reference sample S00 and (b) for the samples S19, S29, and S39 as a function of emission wavelength.

와 첫 번째 여기상태사이의 에너지 차는 약 62 meV이다. In interruption법으로 성장한 시료에서는 두 번째 여기상태 피크도 관찰되었으며 첫 번째와 두 번째 여기상태사이의 에너지 차는 대략 63–66 meV이다. 양자점의 에너지 준위는 양자점의 높이가 높을수록 바닥상태 PL 피크는 장파장에 나타나며, 양자점의 높이가 높을수록 바닥상태와 여기상태사이의 차이가 크게 나타난다. 이러한 PL 결과는 In interruption법으로 성장한 양자점들의 포텐셜 우물이 기준시료 S00보다 깊어서 바닥상태 신호는 S00 보다 훨씬 낮은 위치에서 얻어지고, 두 번째 여기상태까지 운반자들이 양자점에 구속되었음을 나타낸다.

Fig. 3은 10 K에서 측정된 양자점 시료 S00, S19, S29, S39의 PL 스펙트럼과 방출파장에 따른 PL 소멸시간 (decay times)을 나타낸다. 측정된 InAs 양자점의 PL 소멸곡선은 단일지수함수인 $I(t) = A \exp(-\frac{t}{\tau})$ 을 이용하여 운반자 소멸시간 τ 을 얻었다. 모든 시료의 PL 스펙트럼은 양자점의 바닥상태에서 방출되는 PL 피크와 여기상태의 운반자 재결합에 의해 방출되는 첫 번째 여기상태와 두 번째 여기상태 피크들로 이루어져있다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 모든 시료들에서 PL 소멸시간이 바닥상태 PL 피크를 중심으로 장파장과 단파장으로 이동하면서 점차 짧아진다. InAs 양자점에서 바닥상태 운반자의 소멸시간이 가장 길고 여기상태 운반자의 소멸시간은 짧아지는 것을 알 수 있다.

Table 1은 10 K에서 측정된 InAs 양자점 시료들의 바닥상태 PL 피크에서의 PL 소멸시간을 나타낸다. 기준시료 S00는 1096 nm에서 소멸시간이 0.98 ns이고, S09, S19, S29, S39는 각각 0.86 ns (1160 nm), 0.83 ns (1198 nm), 0.97 ns (1198 nm), 0.97 ns (1196 nm)이다. PL 특성이 가장 좋은 S19의 PL 소멸시간이 0.83 ns로 가장 짧게 나타났다. In interruption 시간에 따른 양자점 시료의 PL 소멸시간은 모든 시료가 약 1 ns로 거의 변화가 없다.

Fig. 4는 In interruption 시간이 19초인 S19의 바닥상태 PL 피크에서 측정된 온도에 따른 운반자 소멸시간이다.

Table 1. Calculated PL decay times for the samples S00, S19, S19, S29, and S39 at the PL peak position measured at 10 K.

	S00	S09	S19	S29	S39
PL peak (nm)	1096	1160	1198	1198	1196
Decay time (ns)	0.98	0.86	0.83	0.97	0.97

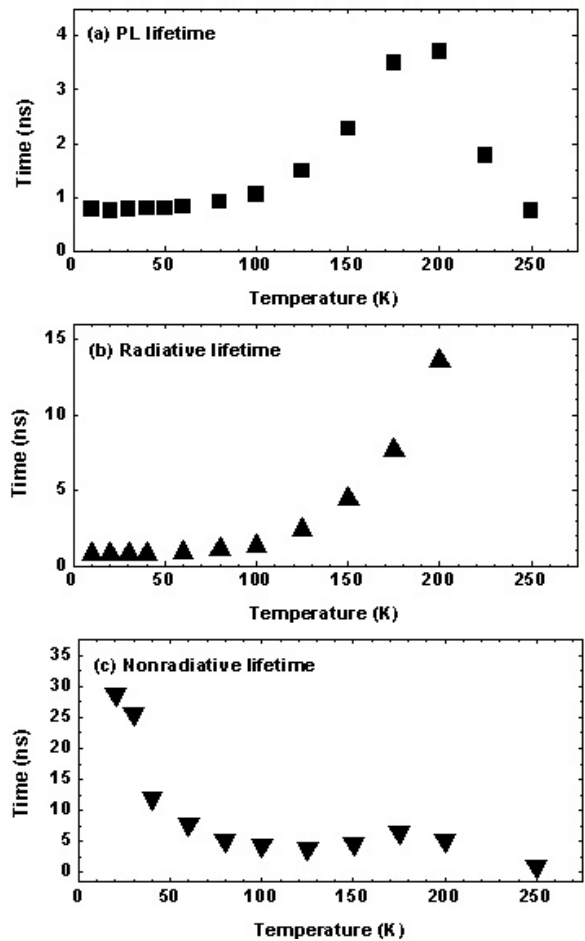


Figure 4. (a) PL lifetimes, (b) radiative lifetimes, and (c) non-radiative lifetimes for the sample S19 measured as a function of temperature. Each PL lifetime was measured at the PL peak.

S19는 가장 좋은 PL 특성을 보였으며, TRPL 결과에서는 가장 짧은 운반자 소멸시간을 얻었다. Fig. 4(a)에서 나타난 바와 같이 온도를 10 K에서 100 K까지 증가하였을 때 PL 소멸시간은 0.83 ns에서 1.04 ns로 서서히 길어지다가 100 K에서 200 K까지 온도가 증가하였을 때 소멸시간은 1.04 ns에서 3.71 ns로 급격히 길어지는 것을 알 수 있다. 하지만 온도가 200 K에서 250 K로 증가하였을 때, PL 소멸시간은 3.71 ns에서 0.74 ns로 다시 급격하게 짧아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4의 (b)와 (c)는 S19의 발광수명시간 (radiative lifetime)과 비발광수명시간(non-radiative lifetime)의 온도의존성을 나타낸다. 발광수명시간과 비발광수명시간은 양자점 시료의 온도를 변화시키며 측정된 PL 소멸시간

과 PL 세기를 이용하여 계산할 수 있다 [15]. 온도에 따른 내부양자효율 (internal quantum efficiency) $\eta(T)$ 에 관한 식(1)과 PL 소멸시간에 관한 식(2)을 사용하여 발광수명 시간 τ_{rad} 과 비발광수명시간 $\tau_{non-rad}$ 을 결정할 수 있다.

$$\eta(T) = \frac{\tau_{PL}(T)}{\tau_{rad}} \approx \frac{I(T)}{I_0} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\tau_{PL}(T)} = \frac{1}{\tau_{rad}(T)} + \frac{1}{\tau_{non-rad}(T)} \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 τ_{rad} 과 $\tau_{non-rad}$ 으로 정리하면,

$$\tau_{rad}(T) = \tau_{PL}(T) \frac{I_0}{I(T)} \quad (3)$$

$$\tau_{non-rad}(T) = \tau_{PL}(T) \frac{1}{1 - \frac{I(T)}{I_0}} \quad (4)$$

이 된다. 여기서 $\eta(T)$ 는 내부양자효율이고, $\tau_{PL}(T)$ 와 $I(T)$ 는 각 온도에서 측정된 PL 소멸시간과 PL 세기를 나타낸다. 10 K에서 측정된 PL 세기를 I_0 으로 사용하였다. 따라서 10 K에서의 내부양자효율을 1로 가정하고 $\tau_{rad}(T)$ 와 $\tau_{non-rad}(T)$ 계산하여 Fig. 4의 (b)와 (c)에 나타내었다.

Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 시료의 온도가 10 K에서 100 K까지 증가할 때 τ_{rad} 은 0.83 ns에서 1.37 ns로 서서히 길어지다가 100 K에서 200 K까지 증가하였을 때 τ_{rad} 은 1.37 ns에서 13.6 ns까지 급격하게 길어짐을 알 수 있다. 그러나 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 온도가 10 K에서 100 K로 증가할 때 $\tau_{non-rad}$ 은 29 ns에서 4.41 ns로 급격하게 짧아진 후 100 K에서 250 K까지는 거의 변화 없이 일정한 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 τ_{rad} 은 온도가 증가함에 따라 급격히 길어지고 $\tau_{non-rad}$ 은 아주 빠르게 짧아지는 것을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 4의 (a), (b), (c)를 비교해 보면 온도에 따른 PL 소멸시간은 10 K에서 200 K 영역에서는 발광수명시간의 특성을 나타내고, 200 K 이상에서는 비발광재결합이 우세하여 온도가 증가함에 따라 소멸시간이 급격히 짧아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 S19시료의 PL 특성이 ~200 K까지 발광재결합이 비발광재결합보다 우세하다는 것을 나타내는 것으로 In interruption법으로 성장한 InAs 양자점 시료의 광학적 특성이 매우 우수하다고 설명할 수 있다.

IV. 결 론

MBE를 이용하여 GaAs 기판에 In interruption growth 법으로 성장한 InAs 양자점의 광학적 특성을 PL과 TRPL을 이용하여 분석하였다. In interruption 시간을 0초에서 19초로 증가하였을 때 약 100 nm의 PL 피크의 적색편이와 약 11 meV의 FWHM의 감소가 관찰되었다. 그러나 In interruption 시간이 19초에서 39초까지 증가하였을 때 PL 스펙트럼의 변화는 없고 PL 세기는 감소하였다. 모든 시료의 PL 스펙트럼은 두 개 이상의 PL 피크들로 이루어졌으며, 기준시료인 S00의 경우 바닥상태와 첫 번째 여기상태 PL 피크가 관찰되었다. In interruption법으로 성장한 시료들은 바닥상태, 첫 번째 여기상태와 두 번째 여기상태 PL 피크까지 관찰되었다. 이러한 PL 결과는 In interruption법으로 성장한 양자점들의 크기와 모양이 항상 (중형비 증가)되어 기준시료보다 양자점 포텐셜 우물이 깊어서 두 번째 여기상태까지 운반자들이 구속되었음을 나타낸다.

10 K에서 측정된 각 시료의 바닥상태 PL 피크에서의 소멸시간은 약 1 ns로 양자점의 성장조건에 따른 변화가 거의 관찰되지 않았으나, PL 특성이 가장 좋은 S19의 소멸시간이 0.83 ns로 가장 짧게 나타났다. S19의 온도에 따른 PL 소멸시간은 10 K에서 200 K까지 길어지다가 200 K 이상에서는 빠르게 짧아졌다. 이것은 S19의 PL 특성이 200 K까지 발광재결합이 비발광재결합보다 우세하여 발광수명시간의 특성을 나타내는 것으로 In interruption법으로 성장한 InAs 양자점의 광학적 특성이 우수하다고 설명할 수 있다. PL과 TRPL 결과로부터 InAs 양자점 성장 동안에 In 공급을 일정시간 차단함으로써 양자점의 크기와 밀도를 조절할 수 있음을 확인하였다. 또한 In interruption 시간을 조절하여 PL 피크를 상온에서 1200 nm에서 1300 nm까지 자유롭게 변화시킬 수 있으므로 근거리 광통신용 소자 개발에 InAs/GaAs 양자점을 이용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

감사의 글

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

0073699).

참고문헌

- [1] Y. Arakawa and H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982).
- [2] G. Park, O. B. Shchekin, D. L. Huffaker, and D. G. Deppe, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12**, 230 (2000).
- [3] S. G. Li, Q. Gong, Y. F. Lao, K. He, J. Li, Y. G. Zhang, S. L. Feng, and H. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 111109 (2008).
- [4] C. K. Chia, J. R. Dong, and B. K. Ng, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 053512 (2009).
- [5] R. Oshima, A. Takata, and Y. Okada, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 083111 (2008).
- [6] K. W. Kim, N. K. Cho, J. D. Song, J. I. Lee, and W. J. Choi, *J. Kor. Vac. Soc.* **18**, 266 (2009).
- [7] D. Sreenivasan, J. E. M. Haverkort, T. J. Eijkemans, and R. Nötzel, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 112109 (2007).
- [8] K.-H. Kim, J. H. Sim, and I.-H. Bae, *J. Kor. Vac. Soc.* **18**, 208 (2009).
- [9] S. Barik, H. H. Tan, C. Jagadish, N. Vukmirović, and P. Harrison, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 193112 (2009).
- [10] J. S. Kim, D. K. Oh, P. W. Yu, J.-Y. Leem, J. I. Lee, and C. R. Lee, *J. Crystal Growth* **261**, 38 (2004).
- [11] L. M. Kong, J. F. Cai, Z. Y. Wu, Z. Gong, Z. C. Niu, and Z. C. Feng, *Thin Solid Films* **498**, 188 (2006).
- [12] J. S. Kim, C.-R. Lee, and S. U. Hong, *J. Crystal Growth* **305**, 78 (2007).
- [13] S. U. Hong, J. S. Kim, J. H. Lee, H.-S. Kwack, W.-S. Han, and D. K. Oh, *J. Crystal Growth* **286**, 18 (2006).
- [14] A. Convertino, L. Cerri, G. Leo, and S. Viticoli, *J. Crystal Growth* **261**, 458 (2004).
- [15] M. Guriol, A. Vinattieri, M. Colocci, C. Deparis, J. Massies, G. Neu, A. Bosacchi, and S. Franchi, *Phys. Rev. B* **44**, 3115 (1991).

Optical Properties of InAs Quantum Dots Grown by Using Indium Interruption Growth Technique

Hi Jong Lee^a, Mee-Yi Ryu^{a*}, and Jin Soo Kim^b

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

^b*Division of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756*

(Received October 23, 2009, Revised November 20, 2009, Accepted November 23, 2009)

We have investigated optical properties of InAs quantum dots (QDs) grown on GaAs (100) substrate by molecular beam epitaxy, by means of photoluminescence (PL) and time-resolved PL spectroscopy. InAs QDs were grown by using In interruption growth technique, in which the In flux was periodically interrupted by a closed In shutter during InAs QDs growth. The shutter of In source was opened for 1 s and then closed for 0, 9, 19, 29, or 39 s. This growth sequence was repeated 30 times during QDs growth. For each sample, the total amount of In contributing to the growth was the same (30 s) but total growth time was varied during the InAs growth. As the In interruption time is increased from 0 to 19 s, the PL peak position of the QDs is red-shifted from 1096 to 1198 nm, and the PL intensity is increased. However, the PL peak is unchanged and the intensity is decreased as the In interruption time is increased further to 39 s. The PL decay times measured at the PL peak position for all the InAs QDs are independent on the QD growth conditions and showed about 1 ns. The red-shift of PL peak and the increase of PL intensity can be explained due to increased QD size and the enhancement in the migration of In atoms using In interruption technique. These results indicated that the size and shape of InAs QDs can be controlled by using In interruption growth technique. Thus the emission wavelength of the InAs QDs on GaAs substrate can also be controlled.

Keywords : InAs, Quantum dots, Photoluminescence, Time-resolved photoluminescence, Molecular beam epitaxy

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