

수평 자기정렬 InGaAs/GaAs 양자점의 형태 및 분광 특성 연구

김준오^{1,2} · 최정우¹ · 이상준² · 노삼규^{2*}

¹경희대학교 전기컴퓨터공학부, 용인 446-711

²한국표준과학연구원 양자점기술 국가지정연구실, 대전 305-600

(2005년 12월 27일 받음)

다중 적층법을 이용하여 수평방향으로 자기정렬된 InGaAs/GaAs 양자점(quantum dot, QD)을 제작하고, 원자력간 현미경(AFM) 사진과 발광(PL) 스펙트럼을 이용하여 QD의 특성을 분석하였다. 적층주기가 증가함에 따라 정렬 QD의 길이가 길어지고, 임계 성장온도 이상에서는 QD 사이의 상호확 산에 의하여 양자선 형태로 변화함을 관측하였다. 성장 변수가 서로 다른 4개 시료의 비교 분석을 통하여, 수직으로 적층되면서 비등방성 정렬이 이루어지고, 수 μm 이상 1차원적으로 정렬된 QD 사슬 모양의 구조를 얻을 수 있었다. 또한 성장일시멈춤 과정을 통한 이주시간의 증가는 QD의 1차원 정렬에 중요한 변수임을 알 수 있었다. 고온에서 덮개층을 형성한 QD 구조에서 관측된 발광 에너지의 청색변위 현상은 InGaAs QD로부터 In이 덮개층으로 확산 되었기 때문으로 해석된다.

주제어 : 인듐갈륨비소, 양자점, 자기 정렬, 원자력간 현미경, 발광

I. 서 론

나노 크기(nanoscale, ~ 10 nm)의 양자점(quantum dot, QD) 구조는 원자와 같은 강한 구속효과에 의한 전자와 정공 파동함수의 특이 현상 때문에 지난 10여 년간 많은 연구가 이루어졌다. 특히, 표면결함이 거의 없이 자발적으로 형성되는 QD는 기초 물리학적 특이현상 연구뿐만 아니라 [1], QD를 기반으로 하는 레이저 다이오드 [2,3], 적외선 검출소자 [4,5], 단광자원 [6], 단전자소자 [7]와 같은 다양한 소자 [8,9]에 응용될 수 있기 때문에 많은 관심의 대상이 되어왔다. 그러나 자발형성 QD 제작기술은 정교한 제어기술로부터 발생하는 재현성 문제를 가지고 있으며, QD의 위치 제어를 위하여 가공한 기판을 사용할 경우에는 묘화 기술에 의한 결함 발생과 같은 근본적인 한계를 지니고 있다. 따라서 최근에는 QD가 규칙적으로 정렬된 배열소자를 실용소자에 적용하기 위한 노력의 일환으로, 위치와 크기의 균일도를 향상시키기 위한 자기정렬(self-aligned) QD기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

규칙적인 배열을 가지는 QD구조 제작에는 경사면(vicinal surface), 나노 크기의 trenches/holes 또

는 mesa 구조, masked templates와 같이 가공된 기판이나 변형층(strain layer)을 이용하는 등, 다양한 자발형성 QD기술에 관한 연구들이 진행되어왔다 [10-20]. 특히 Lee 등 [10]과 Springholz 등 [20]은 InAs/InGaAs 및 PbSe/PbEuTe계에서 patterned stressor mesa와 strain-controlled 초격자를 이용하여 결정 구조 형태를 가지는 2차원 또는 3차원적으로 정렬된 QD결정의 제작 가능성을 증명해 보인 바 있다. 최근에는 규칙적으로 정렬된 QD구조 제작의 또 다른 접근방법으로, 가공된 기판을 사용하지 않고 성장 변수와 층구조(layer structure)의 조절을 통하여 수직 또는 수평으로 1차원적으로 스스로 정렬되는 QD 구조 형성기술에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [14-18]. 몇몇 연구그룹은 덮개층(cap layer, CL) 성장 초기단계에서 성장일시멈춤(growth interruption, GI)이나 열처리(in-situ annealing) 과정을 도입함으로써 적층시 내부 변형력의 비등방성을 유발시켜 QD의 수평 자기정렬을 유도하였다 [16,17]. 그들은 다중 적층 과정을 통하여 떨어져 있던 QD들이 자발적으로 QD사슬(QD chain, QDC)의 형태로 정렬 되고, CL의 성장조건이 비등방성 QD 정렬에 결정적인 역할을 함을 밝혀낸 바 있다. 지금까지 자기정렬 된 QD와 QDC의 형

* [전자우편] sknoh@kriss.re.kr

성 기구를 규명하기 위한 성장 동역학에 기초한 구조에 관한 연구가 많이 이루어져 왔지만, 제한된 범위에서 성장이 이루어져 다소 단편적인 결과만이 보고 되었고, 형태의 변화와 관련된 분광학적 특성에 관한 발표는 거의 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 2단계 CL 성장법을 이용한 다중적층 기술을 도입하여 제작한 InGaAs/GaAs QD에서 관측된 자기정렬 QD의 구조 및 광학적 분석 결과를 보고한다. 적층주기, CL의 성장온도 및 GI시간을 변수로 하여 제작한 다양한 QD구조를 원자력간 현미경(atomic force microscopy, AFM) 형상과 발광(photoluminescence, PL) 스펙트럼을 통하여 구조적 특성과 광학적 특성과의 관계를 체계적으로 분석하였다 [21,22].

II. 실험방법

반절연성(semi-insulating, SI) GaAs(100) 위에 molecular beam epitaxy(MBE)법을 이용하여 Stranski-Krastanow(S-K) 성장모드에서 자발형성 In_xGa_{1-x}As(x=0.5) QD를 성장하였다. 먼저 570 °C에서 0.2 μm 두께의 GaAs 완충층(buffer layer)을 성장한 후 기판온도를 500-540 °C로 낮추어 7.5 단원자층(monolayer, ML)의 InGaAs QD와 GaAs 공간층(spacer layer)을 형성하였다. 이때 InGaAs와 GaAs의 성장률은 각각 0.8 ML/s 와 0.4 ML/s 이고, InGaAs와 GaAs의 III/V BEP (beam-equivalent pressure)는 각각 10과 25이었으며, As의 beam flux는 1-2x10⁻⁵ torr이었다.

먼저, 성장조건을 최적화를 위하여 2종류의 InGaAs-QD/GaAs 이중접합 구조를 성장하였다. 하나는 500 °C에서 성장한 1-15주기의 적층을 가지는 4개 시료이고, 다른 하나는 500-540 °C 범위에서 10 °C 간격으로 성장온도를 변화시킨 15주기 적층의 5개 시료이다. 이때 CL 성장 시에는, 매 3 ML마다 GI를 주면서 30 ML의 GaAs의 덮개층을 성장하고 나머지 30 ML의 GaAs CL은 GI없이 연속적으로 성장하여, 총 60 ML의 GaAs CL을 형성하였다. 여기서 결정된 최적 성장주기 및 온도를 이용하여 성장변수를 1개씩 변화시킨 4개의 서로 다른 시료를 제작하였다. 이때 제작한 QD 시료는 모두 성장온도를 510 °C에 고정시켰으며, CL 성장에는 QD 성장 직후 3 ML의 GaAs CL을 성장한 후 30 s 또는 120 s의 GI 준 후에 성장온도를 540 °C

Table 1, Specific for the four QD samples used in this study.

Sample Code	A	B	C	D
Period of Stacks	10	15	15	15
Growth Temperature of Cap Layer (°C)	510	510	540	540
Growth Interruption Time (s)	30	30	30	120

로 올려서 나머지 54 ML의 CL을 형성시켜 완성하였다. 이때, 적층주기는 10또는 15 주기(표면 QD 제외) 이며, 모든 시료의 표면층 QD는 AFM 분석을 위하여 CL을 성장하지 않았다. Table 1은 4개의 시료(A, B, C, D)에 대한 성장변수를 정리한 표이며, 굵은 글자는 한 쌍의 인접 시료에 주어진 변화시킨 조건을 나타낸 것이다.

RHEED(Reflection High Electron-Energy Diffraction) 형상을 통하여 InGaAs QD의 2차원-3차원(2D-3D) 천이는 모두 6 ML 근처에서 일어남을 관측하였으며, 이것으로부터 InGaAs/GaAs계의 젖음층(Wetting layer, WL)의 두께는 6 ML인 것으로 밝혀졌다. 형태 및 분광 특성 분석에는 각각 AFM 형상과 PL 스펙트럼을 이용하였다. PL 측정에는 Ar-ion 레이저(514.5 nm), 폐쇄회로 He 냉동기(10 K), 근적외선-가시광 분광기로 구성 된 PL 분석장치를 사용하였다. 이때 사용한 레이저의 여기출력은 50 mW 이며, 열전냉각기(thermo electric-cooler)에 부착된 InGaAs 검출기(0.8-1.6 μm)와 lock-in 증폭기를 이용하여 PL 신호를 처리하였다. 본 실험에서 사용한 QD 이중접합과 유사한 구조에 대한 박막 성장 방법과 기초 특성들은 다른 논문에 보고 되어 있다 [20-24].

III. 결과 및 고찰

Fig. 1은 적층주기가 다른 시료에 대한 표면 AFM 사진(1x1 μm)이다. 적층 수가 15주기로 증가함에 따라, 떨어져 있던 QD들이 특정 방향([110])으로 정렬이 이루어지기 시작하면서 정렬된 길이가 점차적으로 커짐을 볼 수 있다. 단일 QD(P=1 시료)의 평균 높이/직경과 밀도는 각각 약 6 nm/45 nm 와 5x10¹⁰ cm⁻² 이었다. 정렬된 QD들은 서로 연결되어 있기 때문에 정확한 측정은 다소 어렵지만, AFM 사진으로 분석해 보면 적층주기의 증가와 함

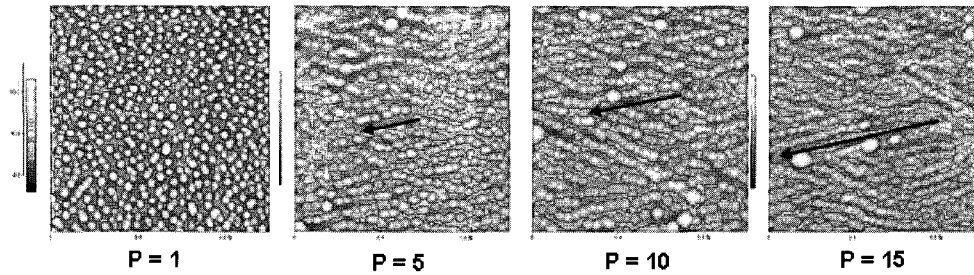


Fig. 1. Surface AFM images (1x1 μm) of QD ensembles for a series of samples with different periods of stacks. As the number of stacks increases, initially isolated QDs begins to spontaneously align along a specific direction, and the alignment length gradually increases.

계 정렬이 이루어짐에 따라 높이가 조금 증가(~ 7 nm) 하다가 다시 감소(~ 6 nm)하는 경향이 관측되었다. 그러나 QD의 직경은($\pm 10\%$) 오차범위 내에서 거의 변하지 않았다. 적층주기가 증가함에 따라 QD의 높이가 감소하는 것은, 수직정렬 QD구조에서 볼 수 있듯이, 적층이 진행되면서 잔류 변형이 다소 감소하기 때문으로 판단된다 [18].

Fig. 2 (a)와 (b)는 각각 AFM 측정에 사용한 시료의 상온(300 K) PL 스펙트럼과 적층주기에 따른 PL 피크 에너지에 관한 그래프이다. 300-K PL 스펙트럼에서 ~ 0.87 eV의 저에너지 피크(LEP)와 1.14 ~ 1.18 eV 근처에서 나타나는 고에너지 피크(HEP)의 2개의 주요 신호가 관측되었다. LEP는 bulk 상태의 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.5$) ($E_g=0.75$ eV, 300 K)의 밴드갭 에너지 보다도 큰 (0.87 ± 0.01) eV로 거의 일정한 값을 유지 하는데, 이것은 양자우물과 같이 행동하는 InGaAs WL(6.0 ML)에 의한 것으로 판단된다.(여기서 이용된 식은 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 계의 bulk에 관한 $E_g(\text{eV}) = 0.36 + 0.505(1-x) + 0.555(1-x)^2$ [25]이다.) HEP의 스펙트럼 양상은 상당히 특이하다. 잘 떨어져 있는 QD들로 구성된 1주기 시료의 경우에는 1.174 eV의 단일 피크만을 보이는 반면, 다른 시료들은 주 피크와 함께 1주기 시료에서 관측된 1.174 eV의 피크가 어깨(shoulder)에 중첩되어 있다. 주 피크의 에너지는 $P = 5, 10, 15$ 에 대하여 각각 1.115 eV, 1.119 eV, 1.140 eV로 주기의 증가와 함께 고에너지 방향으로 증가하는 현상을 보이고 있는데, 주 피크와 어깨 피크는 각각 정렬된 QD와 정렬되지 않은 격리된 QD에 의한 것으로 2종류의 QD구조가 존재하고 있는 것으로 해석된다. 주 피크의 청색변위(blue shift) 현상은 QD의 정렬에 따르는 1D 현상이라기 보다는 QD의 높이 감소에 의한 것으로 추정된다.

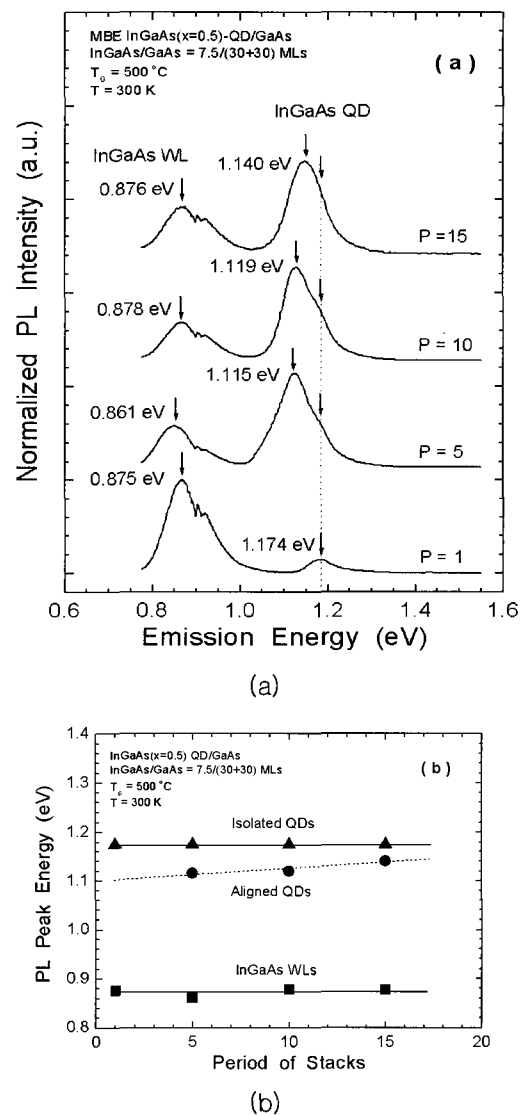


Fig. 2. (a) Room-temperature PL spectra and (b) corresponding peak energies plotted as a function of the stack period. The PL spectra show strong emissions with two dominant peaks, the WL peak at ~ 0.87 eV and the QD peak ranging from 1.14 to 1.18 eV

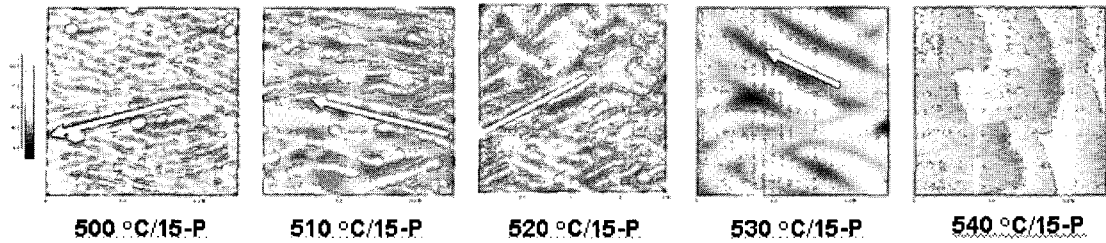


Fig. 3. Surface AFM images ($1 \times 1 \mu\text{m}$) of QD ensembles for a series of samples grown at different temperature. The structural features of aligned QDs are dramatically changed by increases in the growth temperature. While adjacent QDs begin to be closely coupled below 520°C , the aligned QDs rapidly degraded into thick wires at 530°C and transform into film-like wires with domain boundaries at 540°C

Fig. 3은 성장온도가 다른 시료들로부터 얻은 AFM 사진($1 \times 1 \mu\text{m}$)으로, 성장온도의 증가에 따라 QD구조가 급격하게 변화하고 있음을 보여주고 있다. 520°C 이하의 낮은 성장온도에서는 온도가 높아 질수록 QD의 크기가 증가하고, 인접한 QD들이 더 가까이 결합하면서 1차원 정렬 QD들의 선폭 (linewidth)이 커짐을 알 수 있다. 이와는 대조적으로, 520°C 이상의 고온에서 성장된 QD들은 온도가 증가할수록 양자선(quantum wire)의 형태로 바뀌고, 최종적으로는 박막에 가까운 두꺼운 선폭의 양자선 모양으로 열화(degradation) 되어 감을 볼 수 있다. 본 실험결과로부터 열화가 일어나지 않고 정렬이 가장 잘 형성되는 최적 성장온도는 510°C 이고, 520°C 의 임계온도 이상에서는 GaAs CL과 InGaAs QD 또는 WL 사이에서는 상호확산(inter-diffusion)이 심하게 발생되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 AFM 측정에 사용되었던 시료들의 상온(300 K) PL 스펙트럼과 기판온도에 따른 PL 피크 에너지의 변화를 나타낸 그래프이다. 2개의 피크를 가지고 있는 PL 스펙트럼은 성장 온도 증가에 따른 2가지의 특징을 나타내고 있다. 첫째는 정렬된 QD에 기인한 HEP의 장파장 변위이고, 두번째는 InGaAs-WL에 기인한 LEP의 소멸현상이다. 520°C 이하에서는, HEP는 1.142 eV 에서 1.105 eV 로 피크 에너지가 감소하지만 LEP는 PL 세기의 감소와 함께 높은 에너지로 변위($0.874\text{--}0.970 \text{ eV}$)가 일어난다. 한편, 520°C 이상에서 성장한 시료에서는, LEP는 사라지고 HEP는 1.300 eV 까지 피크 에너지가 증가하고 있다. 이러한 현상은 Fig. 3에서 보여준 성장온도의 증가에 의한 정렬 QD들의 형상 변화로써 설명이 가능하다. HEP의 적색변위는 정렬 QD의 직경 증가에 의한 것이며, 급격한 청색변위는 QD의 붕괴(collaps)에 의

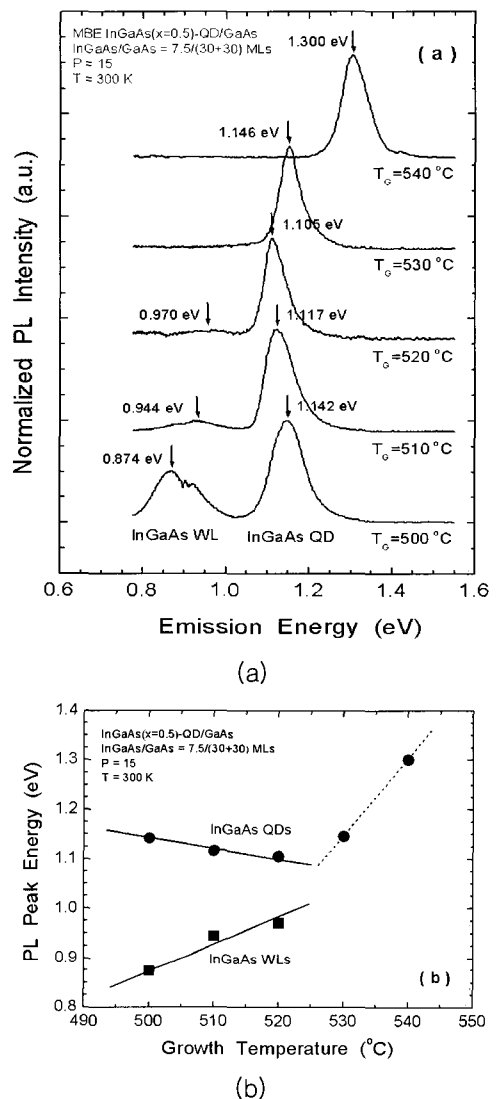


Fig. 4. (a) Room-temperature PL spectra and (b) corresponding peak energies plotted as a function of the substrate temperature. The spectra show two separated peaks and couple of distinguishing features, the red-to-blue shift of the QD peaks and the quenching behavior of the WL peaks

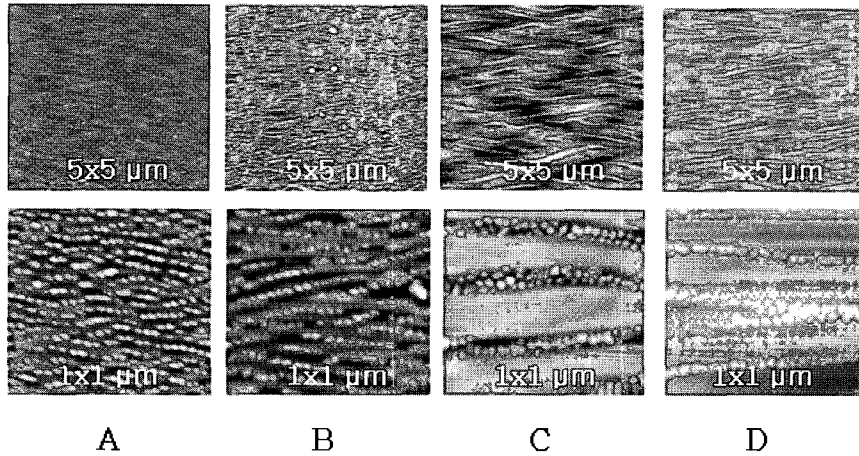


Fig. 5. Surface AFM images of QD ensembles for four samples (A, B, C, D from the left). Each structure is visualized by two kinds of images with different scales (5x5, 1x1 μm).

한 현상이다. 또한 LEP의 청색변위와 소멸은 InGaAs-WL와 GaAs-CL 사이의 상호확산에 의한 WL의 두께 감소에 의한 결과로 판단된다. 일반적으로, 고온 성장 과정에서는 QD 이중접합 계면에서 열확산에 의한 상호혼합(intermixing) 효과가 활성화되는 것은 흔히 관측되는 현상이다. 그러므로 계면 근처에서 InGaAs QD와 WL 및 GaAs CL 사이의 상호확산에 의하여 낮은 In f조성을 갖는 박막 형태의 InGaAs 양자점의 형성을 고려해 볼 수가 있다.

Fig. 5는 Table 1에 제시한 4개 시료(A, B, C, D)에 대한 2종류 크기의 표면 AFM 사진(5x5, 1x1 μm)이다. 적층주기, CL의 성장온도, GI시간 변화에 따라 비등방성 정렬이 점점 더 명확해짐을 볼 수 있다. 특히, 시료D의 AFM 사진은 수 μm 이상 수평으로 정렬된 QD의 1D 사슬 모양을 잘 보여주고 있다. 이것은 비등방성 변형이 적층주기의 증가(A→B)에 따라 커지고, CL 성장온도(B→C)는 1D 자기정렬에 중요한 변수임을 보여주는 결과이다. 또한 시료 C, D의 형상 변화로부터 GI에 의한 이주 시간(migration time)도 QD사슬의 배열에 중요한 역할을 함을 볼 수가 있다.

앞서 논의된 형태적 접근을 뒷받침하기 위하여, AFM 구조 분석에 사용되었던 시료들의 분광학적 특성을 조사하였다. Fig. 6은 저온(17 K)에서 얻은 PL 발광 스펙트럼이고, Fig. 7은 각각의 시료에 대한 PL 피크 에너지(원형)와 이에 대응되는 반치폭(full-width at half maximum, FWHM)(사각형)을 나타낸 그림이다. 모든 시료는 1.24-1.31 eV의 에너지 범위에서 InGaAs-QD에서 기인한 강한 PL

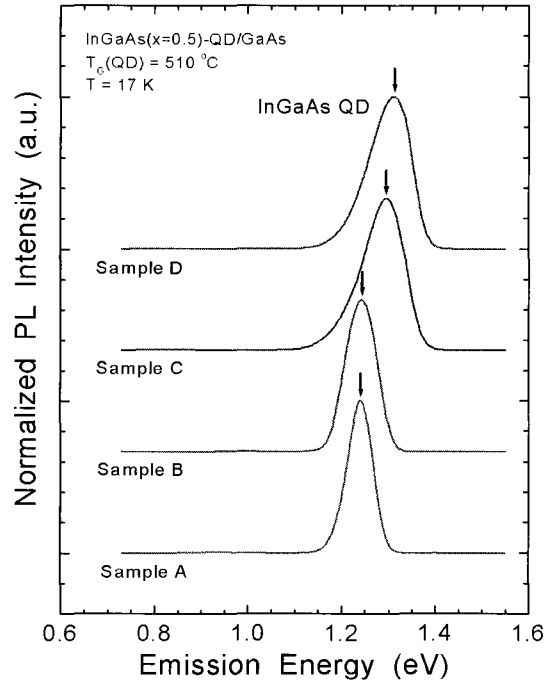


Fig. 6. The PL emission spectra taken at low temperature (17 K). All the samples show strong luminescence attributed to InGaAs QDs.

발광을 보여 주고 있다. 시료A와 B의 스펙트럼을 비교해 볼 때, 피크 에너지에는 거의 변화가 없지만 FWHM은 다소 증가하고 있다. 이것은 적층주기가 다른 2종류의 시료는 QD의 정렬 정도와는 관계 없이 거의 비슷한 발광 특성을 가지지만, QD이 적층수가 증가하면 PL의 FWHM은 커짐을 의미한다. PL 에너지의 AFM 사진에서 현저하게 수평 정렬의

현저한 변화를 나타낸 시료 B와 C사이에서 청색변위(52 meV) 현상이 관측되었다. 일반적으로, 1D 정렬에 기인한 효과는 피크 에너지를 감소시킴을 고려하면, 청색 변위는 QD의 정렬보다는 열확산(thermal diffusion)과 관련된 현상이다. 그러나, 시료 C와 D사이의 PL 스펙트럼이 보여준 피크 에너지(16 meV)와 FWHM(3 meV)의 적은 변화는 In의 외부로의 확산 보다는 GI시간의 증가로 인한 QD 크기의 감소로부터 기인된 효과인 것으로 판단된다. 일반적으로 구성원소의 상호확산은 CL이 QD보다 높은 온도에서 성장될 때 발생할 수가 있다. 낮은 온도에서 CL을 성장한 시료 B와 비교해 볼 때, QD성장온도인 510 °C 보다 높은 540 °C 에서 CL을 형성시킨 시료C에서 PL 에너지가 높은 에너지로 변위가 발생한 것은 InGaAs-QD로부터 In이 바깥으로 확산되었기 때문으로 생각된다. Fig. 7에서 보여주고 있는 시료C의 FWHM의 증가는 In의 외부확산에 대한 간접적인 증거가 될 수 있다. 이러한 분석결과를 근거로 할 때, InGaAs QD의 1차원 정렬, 즉 QDC를 보다 균일하게 배열시키기 위해서는 QD의 성장온도보다 다소 높은 온도에서 CL을 성장하여야 하는 것은 피할 수 없는 과정인 것으로 생각된다.

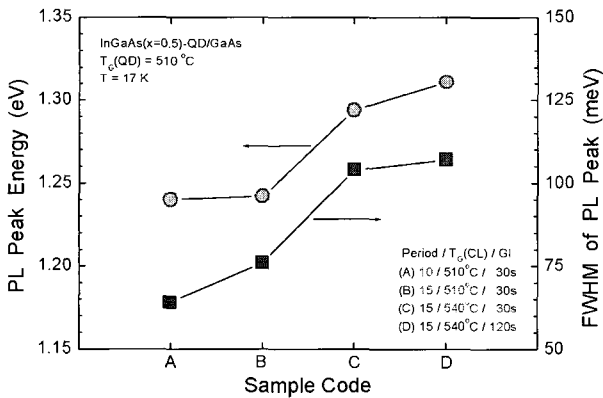


Fig. 7. A pair of curves for the peak energy (circles) and the corresponding full-width at half maximum (FWHM) (squares) plotted in terms of sample code. An abrupt blue shift in the PL peak energy is observed between Samples B and C.

IV. 결 론

2단계의 CL 성장법을 이용한 다중 적층기술을

도입하여 수평으로 자기정렬하는 InGaAs/GaAs QD를 제작하였다. 먼저, 성장조건을 최적화를 위하여 적층주기와 성장온도의 변화에 따른 자기정렬 QD의 형태 및 분광 특성을 AFM 형상과 PL스펙트럼을 이용하여 분석하였다. 적층 주기의 증가에 따라 QD의 정렬이 향상 되었으나, 520 °C의 임계 성장온도 이상에서는 열화가 일어남을 관측하였다. 적층주기, CL의 성장온도, GI시간 등이 서로 다른 4개 시료에 대한 분석 결과는, 적층주기가 증가할수록 비등방성 변형력이 증가하고 CL층 성장온도가 자기정렬 QDC의 형성에 중요한 역할을 함을 보여주었다. 또한 GI 시간도 1D QDC의 형성에 중요 변수로 작용하고 있음을 알 수 있었으며, CL의 고온 성장과정은 InGaAs QD 바깥으로 In을 확산시켜 PL 에너지가 청색변위가 일어남을 알았다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지정한 양자점기술 국가 지정연구소 (한국표준과학연구원) 사업(M1-0104-00-0127)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. M. Petroff, A. Lorke, and A. Imamoglu, *Phys. Today* **54**, 46 (2001).
- [2] M. Kuntz, G. Fiol, M. Laemmlin, D. Bimberg, M. G. Thompson, K. T. Tan, C. Marinelli, R. V. Penty, I. H. White, V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, Yu. M. Shernyakov, and A. R. Kovsh, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 843 (2004).
- [3] I. R. Sellers, H. Y. Liu, K. M. Groom, D. T. Childs, D. Robbins, T. J. Badcock, M. Hopkinson, D. J. Mowbray, and M. S. Skolnick, *Electron. Lett.* **40**, 1412 (2004).
- [4] J. Jiang, K. Mi, S. Tsao, W. Zhang, H. Lim, T. O'Sullivan, T. Sills, M. Razeghi, G. J. Brown, and M. Z. Tidrow, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2232 (2004).
- [5] E. -T. Kim, A. Madhukar, Z. Ye, and C. Campbell, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 3277

- (2004).
- [6] Z. Yuan, B. E. Kardynal, R. M. Stevenson, A. J. Shields, C. J. Lobo, K. Cooper, N. S. Beattie, D. A. Ritchie, and M. Pepper, *Science* **295**, 102 (2002).
- [7] M. Jung, K. Hirakawa, Y. Kawaguchi, S. Komiyama, S. Ishida, and Y. Arakawa, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 033106 (2005).
- [8] M. Sugawara, N. Hatori, T. Akiyama, Y. Nakata, and H. Ishikawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L488 (2001).
- [9] H. Nakamura, S. Nishikawa, S. Kohmoto, K. Kanamoto, and K. Asakawa, *J. Appl. Phys.* **91**, 922 (2002).
- [10] Y. Nakamura, N. Ikeda, S. Ohkouchi, Y. Sugimoto, H. Nakamura, and K. Asakawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L362 (2004).
- [11] N. Koguchi, *J. Korean Phys. Soc.* **45**, S650 (2004).
- [12] J. S. Kim, M. Kawabe, and N. Koguchi, *J. Cryst. Growth* **262**, 265 (2004).
- [13] H. J. Kim, Y. J. Park, Y. M. Park, E. K. Kim, and T. W. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 3253 (2001).
- [14] K. Yamaguchi, K. Kawaguchi, and T. Kanto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L996 (2002).
- [15] Z. M. Wang, K. Holmes, Yu. I. Mazur, and G. J. Salamo, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 1931 (2004).
- [16] Zh. M. Wang, H. Churchill, C. E. George, and G. J. Salamo, *J. Appl. Phys.* **96**, 6908 (2004).
- [17] T. Mano, R. Noetzel, G. J. Hamhuis, T. J. Eijkemans, and J. H. Wolter, *J. Appl. Phys.* **95**, 109 (2004).
- [18] M. A. Migliorato, L. R. Wilson, D. J. Mowbray, M. S. Skolnick, M. Al-Khafaji, A. M. Cullis, and M. Hopkinson, *J. Appl. Phys.* **90**, 6374 (2001).
- [19] H. Lee, J. A. Johnson, M. Y. He, J. S. Speck, and P. M. Petroff, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 105 (2001).
- [20] G. Springholz, V. Holy, M. Pinczolits, and G. Bauer, *Science* **282**, 734 (1998).
- [21] J. O. Kim, S. J. Lee, S. K. Noh, Y. H. Ryu, S. M. Choi and J. W. Choe, *J. Korean Phys. Soc.* **47**, 94 (2005).
- [22] J. O. Kim, S. J. Lee, S. K. Noh, Y. H. Ryu, S. M. Choi and J. W. Choe, *J. Korean Phys. Soc.* **47**, 838 (2005).
- [23] S. J. Lee, S. K. Noh, J. W. Choe, and E. K. Kim, *J. Cryst. Growth* **267**, 405 (2004).
- [24] S. J. Lee, J. O. Kim, Y. G. Kim, S. K. Noh, Y. H. Ryu, S. M. Choi, and J. W. Choe, *J. Korean Phys. Soc.* **46**, 1396 (2005).
- [25] S. Adachi, *J. Appl. Phys.* **53**, 8775 (1982).

Morphological and Photoluminescence Characteristics of Laterally Self-aligned InGaAs/GaAs Quantum-dot Structures

J. O. Kim^{1,2}, J. W. Choe¹, S. J. Lee², and S. K. Noh^{2*}

¹*Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Kyunghee University, Yongin 446-701*

²*Quantum-Dot Technology Laboratory, Korea Research Institute of Standards and Science,
Daejeon 305-600*

(Received December 27, 2005)

Laterally self-aligned InGaAs/GaAs quantum-dots (QDs) have been fabricated by using a multilayer stacking technique. For the growth optimization, we vary the number of stacks and the growth temperature in the ranges of 1–15 periods and 500–540 °C, respectively. Atomic force microscope (AFM) images and photoluminescence (PL) spectra reveal that the lateral alignment of QDs is enhanced in extended length by an increased stack period, but severely degrades into film-like wires above a critical growth temperature. The morphological and the photoluminescence characteristics of laterally self-aligned InGaAs QDs have been analyzed through mutual comparisons among four samples with different parameters. An anisotropic arrangement develops with increasing number of stacks, and high-temperature capping allows isolated QDs to be spontaneously organized into a one-dimensionally aligned chain-like shape over a few μm . Moreover, the migration time allowed by growth interruption plays an additional important role in the chain arrangement of QDs. The QD chains capped at high temperature exhibit blue shifts in the emission energy, which may be attributed to a slight outdiffusion of In from the InGaAs QDs.

Keywords : InGaAs, Quantum dot, Self-alignment, Atomic force microscope, Photoluminescence

* [E-mail] sknoh@kriss.re.kr