

AlAs 습식산화와 열처리로 인한 InGaAs 양자점 레이저 구조의 Intermixing효과에 관한 공간 분해 광학적 특성

황준석¹ · 권봉준¹ · 곽호상¹ · 최재원¹ · 조용훈^{1*}
조남기³ · 전현수² · 조운조³ · 송진동³ · 최원준³ · 이정일³

¹충북대학교 물리학과, 청주 361-763

²서울대학교 물리학과, 서울 151-742

³한국과학기술연구원 나노소자 연구센터, 서울 136-971

(2006년 3월 9일 받음)

전류 차단층으로서 AlAs 자연산화층 (AlO_x) 을 갖는 InGaAs 양자점 (quantum dot) 구조를 분자선 박막 성장법 (molecular-beam epitaxy)과 습식 산화법 (wet oxidation)을 이용하여 제작하였고, 이들 구조의 열처리에 따른 광학적인 특성 변화를 photoluminescence (PL), PL excitation, 그리고 공간 분해능을 갖는 micro-PL을 이용하여 분석하였다. 습식 산화와 열처리 과정을 통해 intermixing된 InGaAs 양자점 영역에서 PL 특성을 조사한 결과, intermixing 되지 않은 영역보다 높은 에너지에서 완만한 PL peak이 추가적으로 관측되었다. 산화되지 않은 (non-oxidized) AlAs 아래에 있는 InGaAs 양자점 영역에서는 약 1.1 eV에서 PL emission이 주로 관측되었으나, AlO_x 와 SiN_x 에 의해 intermixing된 InGaAs 양자점 영역에서는 각각 약 1.16 eV와 1.18 ~ 1.20 eV 에서의 PL emission도 함께 관측되었다. 실험 결과, AlO_x 층이 있는 InGaAs 양자점 영역이 산화 되지 않은 AlAs 층이 있는 영역에 비해서 intermixing 효과가 크게 작용함을 알 수 있었다.

주제어 : InGaAs 양자점, 수직공진 면발광 레이저, Intermixing, Micro-PL

I. 서 론

최근 In(Ga)As 계열의 양자점을 이용한 광통신용 소자 (optical communication applications) 분야로의 응용이 활발해지고 있는데, 그 중 In(Ga)As 양자점 (quantum dot, QD)을 이용한 레이저 다이오드 (laser diode; LD)는 낮은 문턱 전류와 높은 출력, 그리고 안정적인 온도 특성 등으로 인해 많은 장점들이 기대되고 있다 [1]. 레이저 구조의 활성층으로서 자발 생성 양자점 (self assembled QD) 구조를 주로 사용하는데, 높은 에너지 밴드갭 (bandgap)을 가지는 반도체에 의해 감싸여 있어 양자점으로 주입된 carrier들이 lateral 방향의 높은 에너지 장벽에 의해 효과적으로 양자점 내에 구속 (confinement)될 수 있는 특성을 가지게 된다 [2]. 따라서, 양자점 구조를 이용하면 lateral carrier diffusion에 의한 전류 손실 (current leakage)을 줄임으로써 수직공진 면발광

레이저 (vertical cavity surface emitting laser; VCSEL)와 같은 small aperture를 갖는 레이저 구조의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 수직공진 면발광 레이저 구조는 표면에 수직 방향으로의 발진이 가능하므로 2차원 형태의 병렬 배열이 용이하고, 효과적인 광 구속 (optical confinement) 효과와 표면 발광 (surface light emission)과 같은 많은 장점들을 가지고 있어 광전자 소자 설계에 많이 응용되고 있다 [3-6]. 선택적인 산화 (selective oxidation) 방법을 통하여 보다 낮은 문턱 전류와 높은 발광 효율 특성을 구현할 수 있는데 [7], 이러한 선택적인 산화에 의해 광학적인 광손실 (optical loss)과 전류 퍼짐 (current spreading) 현상을 줄이고 광 도파로 내에 광파 (light wave)의 구속을 증가시켜 양자우물 (quantum well; QW) 계열의 수직공진 면발광 레이저 구조에서의 성능을 개선하였다는 보고가 있다 [8]. 또한 높은 Al 조성을 갖

* [전자우편] yonghcho@chungbuk.ac.kr

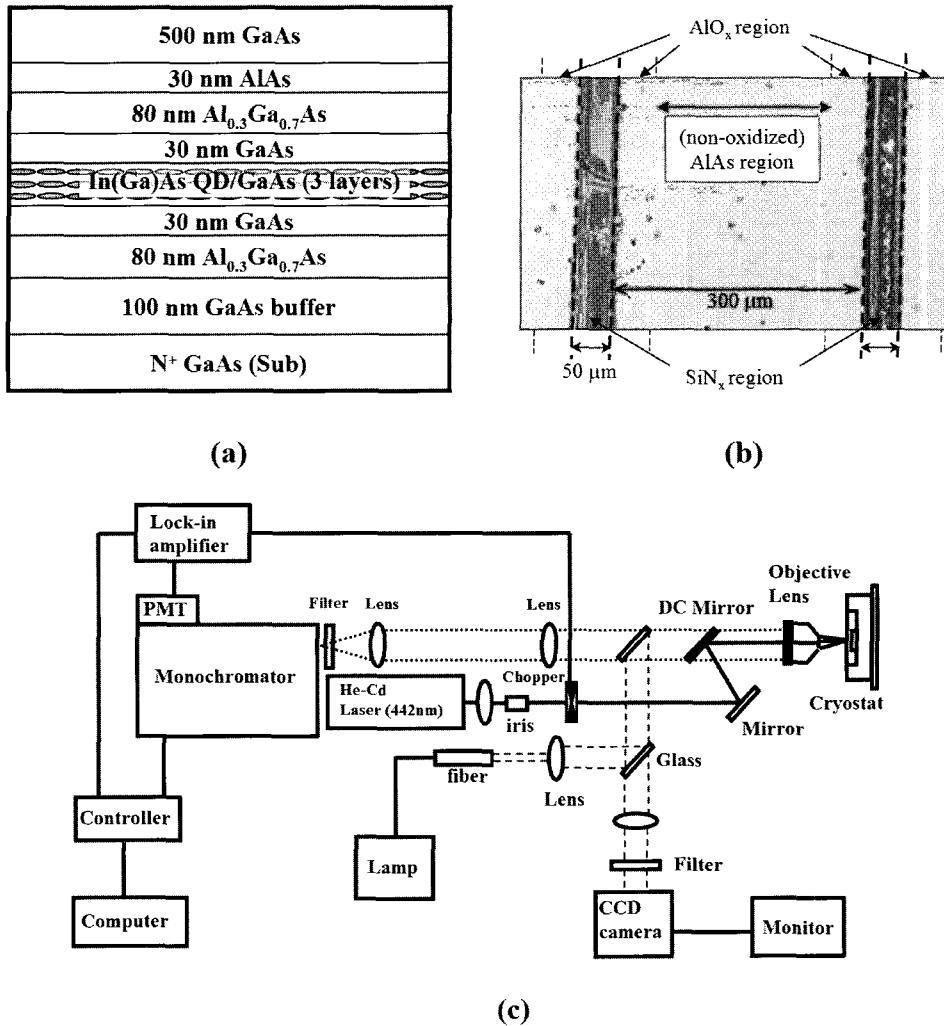


그림 1. (a) Schematic diagram of as-grown InGaAs QD samples, (b) optical microscope image of the prepared sample surface, and (c) schematic diagram of micro-PL experimental setup.

는 AlGaAs 층 또는 AlAs 층에 대한 Al의 산화막 (AlO_x) 형성 방법을 이용하면 양자우물 구조에서 수직공진 면발광 레이저 구조의 특성을 향상시킬 수 있음을 보고하고 있다 [9, 10]. 따라서, 양자우물 구조 대신 양자점 구조를 활성층으로 하고 수직공진 면발광 레이저 구조에서 AlO_x층을 활용한다면, 앞서 서술한 양자점 구조의 여러 장점들과 함께 Al 산화막을 이용하여 carrier 손실을 줄이고 광학적인 구속 (optical confinement) 효과를 증가시킴으로써 광통신용 소자로서의 특성이 더욱 향상될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 InGaAs 양자점을 활성층으로 하는 레이저 구조를 분자선 박막 성장법 (molecular beam epitaxy; MBE)으로 제작하고, AlO_x층에 의한 intermixing 영향과 열처리 온도에 따른 광학적인 특성을 photoluminescence (PL)와 PL excitation

(PLE), 그리고 공간 분해능을 갖는 (spatially resolved) micro PL 측정을 이용하여 수행하였다.

II. 실험

본 연구에 사용된 양자점 구조의 시료들은 분자선 박막 성장법에 의해 제작되었으며, 모두 Si doped 된 n⁺ type GaAs 기판 위에 100 nm 두께의 GaAs 완충 층 (buffer layer)을 성장한 후 다음과 같은 구조를 성장하였다. 30 nm 두께의 GaAs 층 안에 성장된 InGaAs 양자점은 3주기로 구성되었고, 80 nm 두께의 Al_{0.3}Ga_{0.7}As waveguide 층으로 둘러싸여 있다. Al_{0.3}Ga_{0.7}As waveguide 층 위에 습식 산화를 위한 30 nm 두께의 AlAs 층을 성장하고, 마지막으로 500 nm 두께의 GaAs 층 (capping layer)을 성장하였다.

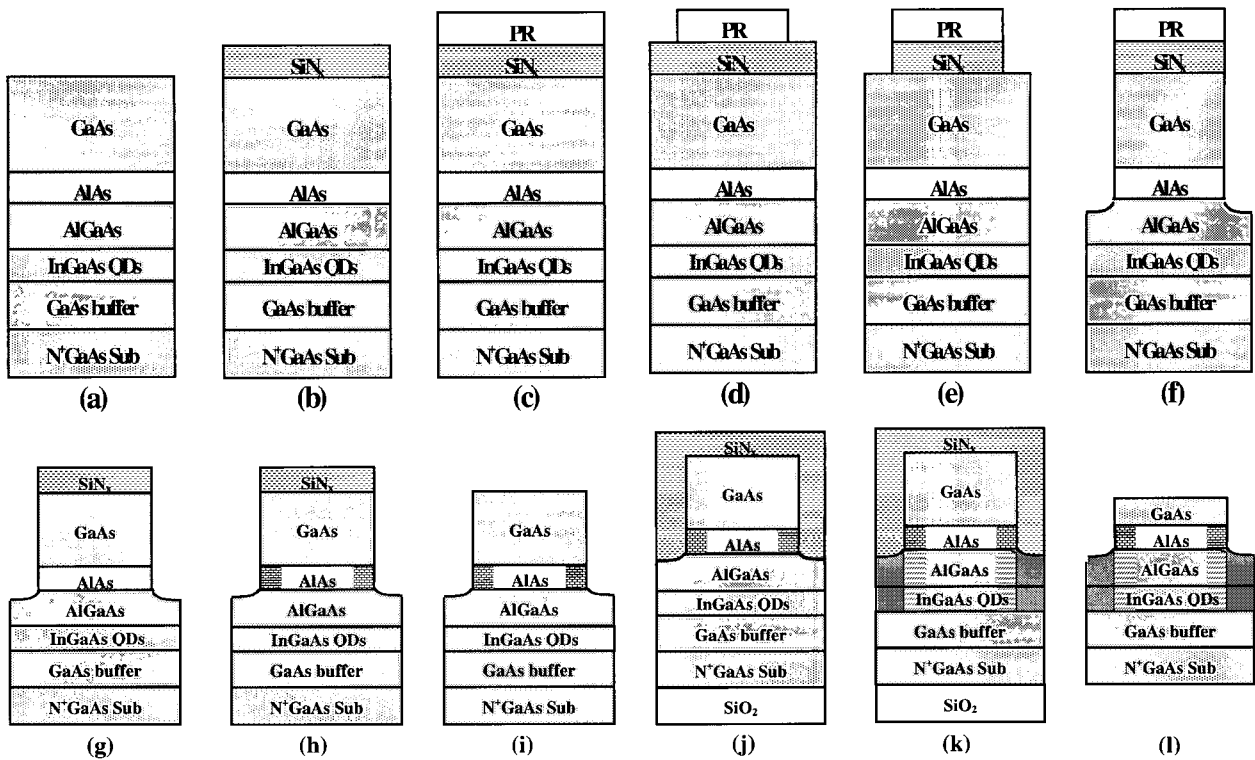


그림 2. Schematic diagrams of the fabricated InGaAs QD samples: (a) as-grown, (b) SiN_x deposition (c) PR coating, (d) patterning and developing, (e) SiN_x etching, (f) GaAs/AlAs etching, (g) PR removing, (h) wet oxidation, (i) SiN_x etching, (j) SiN_x and SiO_x deposition, (k) thermal annealing, (l) removing SiN_x and SiO_x layers, and etching some of GaAs capping layer.

그림 1 (a)에 성장된 시료 구조에 대한 개략도를 나타내었으며, 그림 2에 도식된 바와 같은 다음의 공정 과정에 따라 단계적으로 제작하였다. 우선, 그림 2 (a)와 같이 시료를 성장하였고, etching을 위해 SiN_x와 감광제 (photo resist; PR)가 증착되었다 [그림 2 (b), (c)]. 두 개의 시료들은 photo lithography와 wet chemical etching에 의해 AlAs 층까지 etching되었고, 50 μm 간격으로 300 μm의 너비의 패턴이 형성되었다 [그림 2 (d), (e), (f), (g)]. 패턴 형성 후에 AlAs 층을 460 °C에서 120분 동안 습식 산화 (wet oxidation) 방법으로 산화를 시켜, 30 μm 폭의 AlO_x 전류 차단층 (current blocking layer)이 형성되었다 [그림 2 (h), (i)]. 습식 산화 후, SiN_x와 SiO₂를 증착하고 질소 환경 (N₂ atmosphere)에서 rapid thermal annealing (RTA)를 수행하여 500 ~ 700 °C 사이에서 70초 간 열처리 (thermal annealing) 하였다 [그림 2 (j), (k)]. 열처리 한 후에 SiN_x와 SiO₂를 제거하고 PL 측정과 micro PL 측정을 위해서 맨 위의 GaAs 층 (capping layer)을 300 nm etching 하였다 [그림 2 (l)]. 이와 같은 과정으로 제작된 최종 시료

의 표면 현미경 사진을 그림 1 (b)에서 보이고 있는데, 그림에서 습식 산화된 AlO_x 영역과 산화되지 않은 AlAs 영역 사이의 경계가 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다.

이렇게 준비된 시료들의 광학적 특성을 조사하기 위하여 PL, PLE, 그리고 micro PL 측정을 수행하였다. Xe lamp의 연속적인 넓은 파장의 빛을 분광기(monochromator)로 통과시켜 원하는 특정 파장의 빛을 15 K에서의 PL과 PLE 실험을 위한 여기 광원으로 사용하였으며, 442 nm 파장의 He Cd 레이저를 이용하여 온도에 따른 PL 실험을 수행하였다. 그림 1 (c)는 구성한 저온 micro PL 장치의 개략도로서, 액체 질소(liquid nitrogen)를 이용한 진동이 적은 open cycle 저온 유지 장치를 사용하여 77 K 부근에서 micro PL 실험을 수행하였다. 시료의 각 영역에 대한 PL 스펙트럼 분석을 위해 50 배율의 대물렌즈를 이용하였으며, 여기 광원으로는 442 nm의 파장을 갖는 He Cd 레이저 빔의 크기를 10 μm 정도로 줄여 시료의 원하는 표면 위에 입사시켰다.

III. 결과 및 고찰

우선 InGaAs 양자점의 일반적인 광학적 특성을 조사하기 위하여 비슷한 성장 조건에서 성장된 3주기의 InGaAs 양자점 시료에 대하여 광학적인 특성을 조사하였다. 우선, 15 K에서 Xe lamp와 분광기를 이용한 광원을 여기 광원으로 이용하여 측정한 PL과 PLE 스펙트럼을 그림 3 (a)에 나타내었다. 각각의 단일 양자점은 델타 함수적인 상태 밀도 (density of state)를 갖고 있으나 성장된 양자점 군집(ensemble)은 Gaussian 분포를 갖는 크기의 변화를 갖게 되므로 측정된 PL emission의 broadening은 양자점 크기 변화 분포로 인한 inhomogeneous broadening을 보이게 된다. PLE 실험을 위하여 검출용 분광기의 파장을 1060 nm 또는 1100 nm로 고정시키고, 여기 광원용 분광기의 파장을 변화시켜 가면서 PLE 신호를 관측하였다. 검출한 두 파장 모두에서 비슷한 에너지 위치에서 PLE 흡수 특성이 관측되었는데, InGaAs QD에 의한 특성과 함께 약 1.45 eV에서 wetting 층 (wetting layer, WL)과 약 1.52 eV에서 GaAs 층에 의한 PLE 특성이 뚜렷이 나타나고 있다 [11]. 다음으로, 18 K에서 300 K까지 온도를 변화시키면서 3주기의 InGaAs 양자점의 PL 스펙트럼의 변화를 조사하였는데, 온도에 따른 적분된 PL 세기의 변화를 그림 3 (b)에 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 전체적인 PL 세기의 감소와 함께 PL peak 에너지의 낮은 에너지로의 shift를 관측할 수 있었다. 3주기 양자점 시료의 PL 적분 세기의 저온 대 상온 비율은 1/27로서 같은 조건에서 성장된 1주기 양자점 시료의 저온 대 상온에 대한 PL 적분 값의 비율인 1/65 보다 좋은 내부 양자 효율 특성이 관측되었다 [12].

다음으로 그림 2와 같은 공정 과정을 통하되 열처리 온도(thermal annealing temperature, T_a)만을 달리한 시료들을 제작하였으며, 이렇게 제작된 시료들에 대한 77 K PL 실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 모든 시료들에 대한 열처리 시간은 70초이며, 열처리 온도는 520 °C (시료 B), 605 °C (시료 C), 그리고 700 °C (시료 D)로 조절되었다. 비교를 위하여 습식 산화 과정과 열처리 과정을 거치지 않은 InGaAs 양자점 시료(시료 A)도 함께 측정하였다. PL 실험을 위한 여기 광원의 빔의 크기를 넓게 하여 시료 표면 전체에 대한 광학적인 정보를 얻었다. 시료 A에서는 1.1 eV 부근의 InGaAs 양자점에 대한 peak emission 만

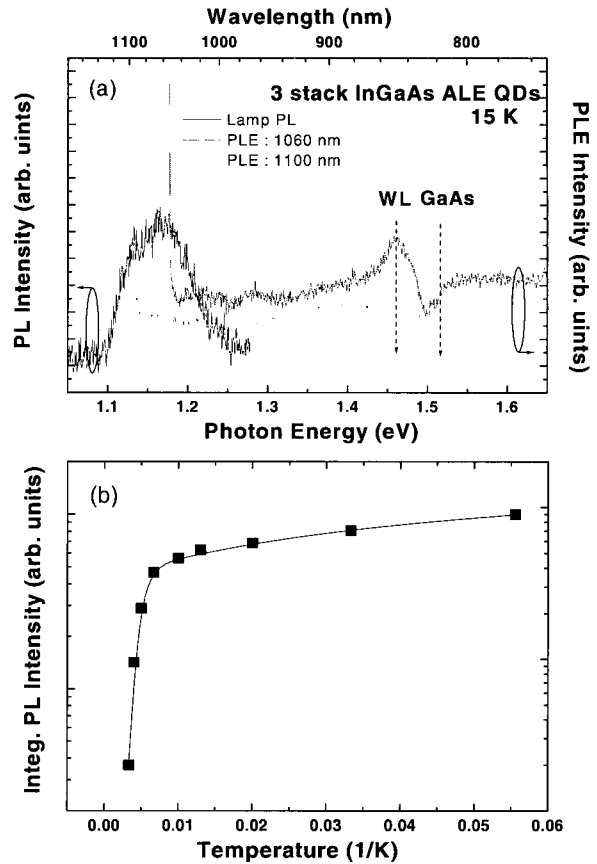


그림 3. (a) 15 K PL and PLE spectra of 3 stacked InGaAs QD layer. The excitation wavelength for PL experiments was 900 nm, and the detection wavelengths for PLE experiments were 1060 nm and 1100 nm. (b) Integrated PL intensity as a function of $1/T$ for 3 stacked InGaAs QD layer in the temperature range from 18 to 300 K.

관측된 반면, 시료 B, C, D에서는 1.1 eV 부근의 emission 뿐만 아니라 intermixing과 관련된 1.16 - 1.19 eV 영역에 걸친 넓은 emission이 추가로 관측되었다. 한편, 시료 제작 과정에서 드러난 GaAs buffer 층 및 GaAs 기판에 의한 강한 emission이 약 1.49 eV에서 관측되었다. 열처리 온도의 증가에 따라 InGaAs 양자점과 관련된 emission과 GaAs 부근의 emission의 세기가 감소하였는데, 이는 열처리 과정에서 오는 시료 전체의 발광 세기의 저하로 인한 결과로 보인다. 따라서, 열처리로 인한 intermixing 효과를 거두면서도 적절한 광학적 특성을 유지하기 위해서는 약 520 °C에서 열처리된 시료가 최적의 조건으로 판단된다.

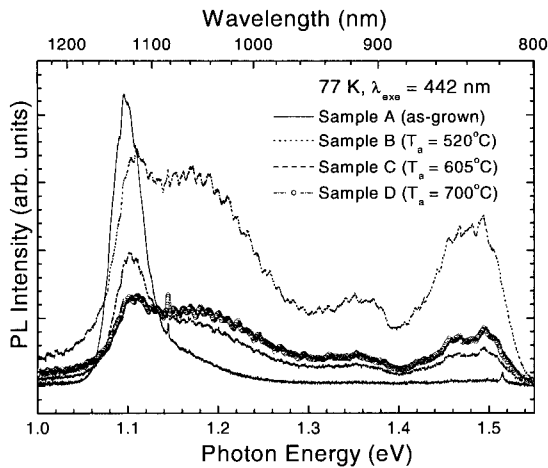
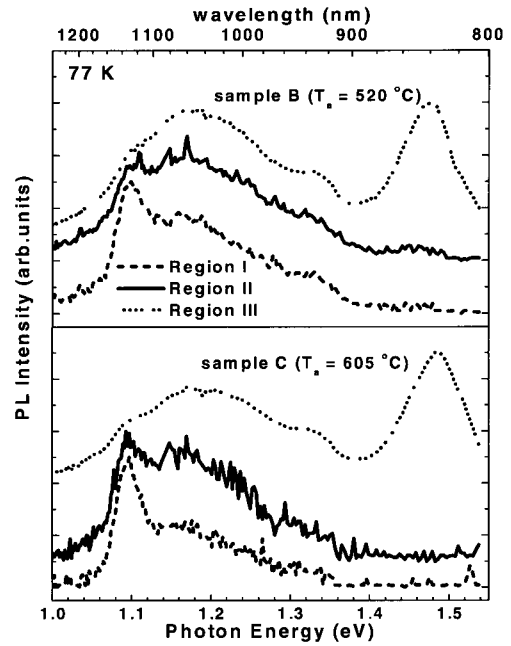
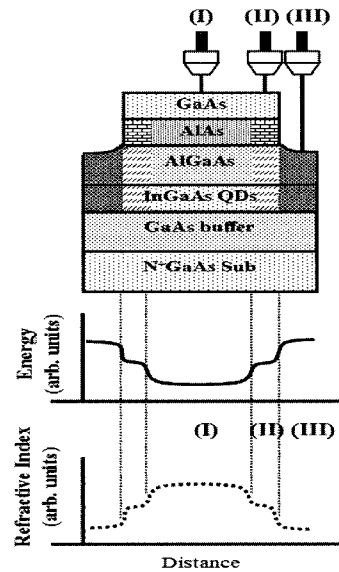


그림 4. 77 K PL spectra of 3 stacked InGaAs QD samples with different annealing temperature; sample A (as-grown), sample B ($T_a = 520\text{ }^\circ\text{C}$), sample C ($T_a = 605\text{ }^\circ\text{C}$), and sample D ($T_a = 700\text{ }^\circ\text{C}$).



(a)



(b)

그림 5. (a) 77 K micro-PL spectra of the QD regions under non-oxidized AlAs (region I, dashed line), AlO_x (region II, solid line), SiN_x (region III, dotted line) and for samples B and C. (b) Schematic diagram of the fabricated InGaAs QD sample with the energy and the refractive index profile as a function of lateral distance of the sample.

이들 시료들의 표면 위치에 따른 미세 광학적인 특성을 조사하기 위하여 $10\text{ }\mu\text{m}$ 정도의 크기를 갖는 레이저 빔을 시료의 서로 다른 영역에 대해 집속하여 micro PL 특성을 조사하였다. 그림 5는 시료 B와 C에 대한 각 영역 I (긴 점선)와 II (실선), 그리고 III (점선)에 대한 저온 77 K에서의 micro PL 실험 결과이다. 산화 되지 않은 AlAs 층 (non oxidized AlAs)이 있는 InGaAs 양자점 영역 ($\sim 300\text{ }\mu\text{m}$)을 영역 I, AlO_x ($\sim 30\text{ }\mu\text{m}$)와 SiN_x ($\sim 50\text{ }\mu\text{m}$)에 의해 intermixing 된 InGaAs 양자점 영역을 각각 영역 II와 III으로 표시하였다. 비교를 위하여 동일한 여기 조건에 대해 영역 I, II, III의 위치에 따른 PL 스펙트럼을 조사하였다.

그림 5 (a)에서 보는 것과 같이, AlO_x 와 SiN_x 에 의해 intermixing 된 InGaAs 양자점 영역인 영역 II와 III에서는 산화 되지 않은 AlAs 층이 있는 InGaAs 양자점 영역 I의 PL 스펙트럼과 비교해서 높은 에너지의 영역까지 완전한 PL 스펙트럼을 보이고 있다. AlO_x 와 SiN_x 에 의해 intermixing 된 InGaAs 양자점 영역의 emission이 넓고 완전한 특성을 보이는 것은 3주기로 구성된 InGaAs 양자점 층이 공간적으로 서로 다른 정도의 intermixing을 겪기 때문으로 판단된다. 영역 I에서는 InGaAs 양자점에 대한 PL peak emission이 약 1.1 eV 위치에서 주로 보이는 반면, 영역 II인 AlO_x 로 인해 intermixing 된 InGaAs 양자점에 대한 PL peak emission은 약 1.16 eV 부근에서 주요

한 넓은 PL emission이 관찰되었다. 또한, 영역 III인 SiN_x에 의해 intermixing 된 InGaAs 양자점에 대한 emission은 약 1.18 - 1.20 eV 부근의 발광 에너지를 보이고 있으며, 약 1.49 eV의 위치의 emission은 영역 III에서 공정 과정 중에 노출된 아래쪽 GaAs 층에 의한 것이다. 영역 II와 영역 III에서 관측된 이들 높은 에너지의 emission들은 각각 AlO_x층과 SiN_x층에 의해 intermixing된 InGaAs 양자점 영역의 emission들로서 해석되는데, 영역 III의 SiN_x와 intermixing된 InGaAs 양자점의 PL peak emission 에너지 (1.18 ~ 1.20 eV)가 영역 II의 AlO_x와 intermixing 된 InGaAs 양자점 층의 PL peak emission 에너지 (~ 1.16 eV) 보다 높은 것은 비정질인 SiN_x (amorphous SiN_x)의 보다 우세한 intermixing 효과에 의한 것으로 해석된다. [13, 14]. 영역 I과 영역 II의 주된 emission 에너지 차이는 약 60 meV, 영역 II와 영역 III과는 약 20 - 40 meV 정도로서 영역 I에서 영역 II, 그리고 영역 III으로 갈수록 높은 에너지 구조를 갖게 된다. 이러한 특징은 수직공진 면발광 레이저 구조에서 AlO_x와 SiN_x에 의한 intermixing 영향에 의해 가로 평면 방향 (lateral direction)으로 이중 에너지 장벽을 갖는 구조를 형성하게 해 준다 [그림 4 (b)]. 이러한 이중 에너지 장벽 구조는 활성 영역 내의 전하 구속 (carrier confinement) 효과를 향상시킬 뿐만 아니라, 상대적으로 낮은 굴절 계수 (refractive index)를 가지게 되므로 광 구속 (optical confinement) 효과를 향상시킬 수 있다. 따라서, AlO_x와 SiN_x에 의해 intermixing 된 InGaAs 양자점 영역으로 인한 이중 에너지 장벽 구조 [그림 5 (b)]는 수직공진 면발광 레이저 구조에서 활성층에서의 전류 누설 (current loss)을 감소시키고 전하 구속 및 광 구속 효과를 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 AlAs 층을 포함하는 InGaAs 양자점 레이저 구조를 분자선 박막 성장법으로 성장시킨 후, 습식 산화를 통하여 AlO_x 층을 국소적으로 형성시키고 열처리를 통하여 AlO_x 층 및 SiN_x 층에 의해 각각 intermixing 된 InGaAs 양자점 영역들 (II, III)과 intermixing되지 않은 InGaAs 양자점 영역 (I)을 형성하는데 성공하였다. 이들 서로 다른 영역들에 대한 공

간 분해능을 갖는 광학적 특성을 분석하기 위해 저온 77 K에서의 micro PL 측정을 수행하였다. 산화 되지 않은 AlAs 영역 (I)에서는 약 1.1 eV에서 InGaAs 양자점의 PL peak emission이 관측된 반면, AlO_x와 SiN_x에 의해 intermixing 된 영역 (II, III)에서는 약 1.16 eV와 1.18 ~ 1.20 eV에서 PL peak emission이 나타났다. AlO_x와 SiN_x에 의해 intermixing 된 InGaAs 양자점 영역은 산화 되지 않은 AlAs 영역에 비해서 intermixing 효과가 단계적으로 크게 작용하고 있으므로, 활성층인 InGaAs 양자점 층에서의 전하 구속과 광 구속 효과를 동시에 가져올 수 있다. 활성층인 InGaAs 양자점 영역 (I)로 carrier가 주입되면 효과적으로 양자점 층에 구속되어 전류 누설을 억제함으로써 보다 낮은 문턱 전류 (low threshold)에서도 레이저가 동작할 수 있으며, 영역 I은 영역 II와 III보다 상대적으로 높은 굴절 계수를 갖게 되어 광 구속 효과를 높일 수 있다. 그리고 열 처리 온도를 520 °C 부근에서 적절히 조절함으로써 InGaAs 양자점 레이저 구조의 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. A. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, M. V. Maximov, B. V. Volovik, Zh. I. Alferov, and D. Bimberg, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **36**, 1384 (2000).
- [2] J. K. Kim, T. A. Strand, R. L. Naone, and L. A. Coldren, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2752 (1999).
- [3] D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar, and T. J. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 97 (1994).
- [4] K. L. Lear, K. D. Choquette, R. P. Schneider, S. P. Kilcoyne, and K. M. Geib, *Electron. Lett.* **31**, 208 (1995).
- [5] B. J. Thibeault, K. Bertilsson, E. R. Hegblom, E. Strzelecka, P. D. Floyd, R.

- Naone, and L. A. Coldren, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **9**, 11 (1997).
- [6] J. J. Wierer, P. W. Evans, N. Holonyak, Jr., and D. A. Kellogg, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2742 (1998).
- [7] G. M. Yang and M. H. MacDougal, *Electron. Lett.* **31**, 886 (1995).
- [8] P. D. Floyd, D. Sun, and D. W. Treat, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **10**, 45 (1998).
- [9] M. Osiński, T. Svimonishvili, G. A. Smolyakov, V. A. Smagley, P. Maćkowiakm, and W. Nakwaski, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **13**, 687 (2001).
- [10] B. Koley, M. Dagenais, R. Jin, G. Simonis, J. Pham, G. McLane, F. Johnson, and R. Whaley, Jr., *J. Appl. Phys.* **84**, 600 (1998).
- [11] R. Heitz, M. Veit, N. N. Ledentsov, A. Hoffmann, D. Bimberg, V. M. Ustinov, P. S. Kop'ev, and Zh. I. Alferov, *Phys. Rev. B* **56**, 10435 (1997).
- [12] H. S. Kwack, B. O. Kim, Y. H. Cho, J. D. Song, W. J. Choi, and J. I. Lee, *Appl. Phys. Lett.* submitted (2006).
- [13] J. C. Shin, W. J. Choi, I. K. Han, Y. J. Park, and J. I. Lee, *J. Korean. Phys. Soc.* **42**, S165 (2003).
- [14] J. H. Lee, W. J. Choi, Y. J. Park, I. K. Han, J. I. Lee, and W. J. Cho, *J. Korean. Phys. Soc.* **42**, S313 (2003).

Spatially-resolved Photoluminescence Studies on Intermixing Effect of InGaAs Quantum Dot Structures Formed by AlAs Wet Oxidation and Thermal Annealing

J. S. Hwang¹, B. J. Kwon¹, H. S. Kwack¹, J. W. Choi¹, Y. H. Cho^{1*},
N. K. Cho³, H. S. Cheon², W. C. Cho³, J. D. Song³, W. J. Choi³, and J. I. Lee³

¹*Department of Physics Chungbuk National University, Chungju 361-763*

²*Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742*

³*Nano-Device Research Center, Korea Institute of Science Technology, Seoul 136-971*

(Received March 9, 2006)

Optical characteristics of InGaAs quantum dot (QD) laser structures with an Al native oxide (AlOx) layer as a current-blocking layer were studied by means of photoluminescence (PL), PL excitation, and spatially-resolved micro-PL techniques. The InGaAs QD samples were first grown by molecular-beam epitaxy (MBE), and then prepared by wet oxidation and thermal annealing techniques. For the InGaAs QD structures treated by the wet oxidation and thermal annealing processes, a broad PL emission due to the intermixing effect of the AlOx layer was observed at PL emission energy higher than that of the non-intermixed region. We observed a dominant InGaAs QD emission at about 1.1 eV in the non-oxide AlAs region, while InGaAs QD-related emissions at about 1.16 eV and 1.18 ~ 1.20 eV were observed for the AlOx and the SiNx regions, respectively. We conclude that the intermixing effect of the InGaAs QD region under an AlOx layer is stronger than that of the InGaAs QD region under a non-oxidized AlAs layer.

Keywords : InGaAs QD, VCSEL, Intermixing, Micro-PL

* [E-mail] yonghcho@chungbuk.ac.kr