

# InP/InGaAs/InP 분포귀환형 회절격자 위에 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점의 구조적·광학적 특성

곽호상<sup>1,2</sup> · 김진수<sup>1</sup> · 이진홍<sup>1</sup> · 홍성의<sup>1</sup> · 최병석<sup>1</sup> · 오대곤<sup>1</sup> · 조용훈<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국전자통신연구원 IT융합·부품연구소, 대전 305-350

<sup>2</sup>충북대학교 물리학과, 청주 361-763

(2006년 2월 22일 받음)

금속유기화학증착기 (metal-organic chemical vapor deposition)를 이용하여 분포귀환형 (distributed feed back) InP/InGaAs/InP 회절격자 구조를 제작하고 원자력간현미경 (atomic force microscopy)과 주사전자현미경 (scanning electron microscopy) 실험을 통해 표면 및 단면을 분석하였다. 그 위에 분자선증착기(molecular beam epitaxy)법을 이용하여 자발형성 (self-assembled) InAs/InAlGaAs 양자점 (quantum dot)을 성장하고, 광학적 특성을 온도변화 광여기 발광 (photoluminescence)으로 회절격자 구조 없이 성장한 양자점 시료와 비교 분석하였다. 회절격자의 간격 대비 폭의 비가 약 30 %인 InP/InGaAs/InP 회절격자가 제작되었으며, 그 위에 성장된 양자점의 경우 상온 파장이 1605 nm에서 PL이 관찰되었다. 이는 회절격자 없이 같은 조건에서 성장된 시료의 상온 파장인 1587 nm 보다 장파장에서 발광하였으며, 회절격자의 영향으로 양자점 크기가 변하였음을 조사하였다.

주제어 : 분포귀환형, InAs/InAlGaAs, 양자점, 분자선증착기

## 1. 서 론

현재 광통신에 사용 되는 광섬유에 있어서 분산 (dispersion) 및 손실 (loss)이 가장 적으면서 멀리까지 보낼 수 있는 파장이 1.3과 1.55  $\mu\text{m}$ 으로 알려져 있다 [1]. 따라서, 이러한 광통신용 광원으로 사용 되는 레이저 다이오드 (Laser diode, LD)를 1.3과 1.55  $\mu\text{m}$  파장에 맞도록 제작하는 것이 중요하며, 현재는 양자우물 (quantum well) 구조를 활성층으로 하는 광전소자 및 전자소자가 가장 널리 사용되고 있다 [2, 3]. 하지만, 보다 빠른 속도와 보다 작은 크기를 갖는 소자에 대한 요구가 예상되며, 고집적 기술을 이용한 신개념의 소자에 대한 필요성이 대두되고 있다. 양자우물 LD의 경우 주위 온도에 민감하기 때문에 안정적인 고속 동작을 위해 외부 변조가 필요하므로 앞으로 요구되는 초고속 및 소형화에 있어서 어려움이 예상된다 [4]. 반면에, 양자점 (quantum dot)을 이용한 LD는 이러한 문제점들을 많은 부분 해결하고 있으며, 향상된 성능을 보고하고 있다. 예를 들어, 양자점 LD는

문턱 전류 (threshold current) 값이나 특성 온도 (characteristic temperature)에 있어서 양자 우물보다 뛰어난 특성을 보이며, 초고속 직접 변조에 있어서도 우수한 특성이 보고되어 있다 [5-7]. 이러한 양자점을 이용한 광통신용 LD를 제작하는데 있어서 1.3  $\mu\text{m}$  대역에서는 GaAs를 기판으로 하는 In(Ga)As 양자점이 활발하게 연구 되고 있으며, 우수한 특성을 보고하고 있다. 하지만, 1.55  $\mu\text{m}$ 에서는 GaAs 계열이 가지는 한계성 때문에 InP를 기판으로 하는 In(Ga)As 양자점이 활발히 연구 되고 있다. 본 그룹에서 또한 최근 1.55  $\mu\text{m}$  대역에서 상온 연속 발진하는 우수한 LD를 보고하였다 [8].

한편, 이러한 특성을 가진 양자점을 이용하여 제작된 Fabry-Perot 레이저에서도 초고속 직접 변조에서의 주파수 떨림 (chirping) 이나 spectral width로 인한 분산과 mode hopping으로 인한 잡음과 같은 특성이 나타나기 때문에 레이저의 단일 모드 (single mode)와 고속동작에서의 파장안정성 및 보다 낮은 동작 전류밀도를 위해서 분포귀환형 (distributed feedback, DFB) LD가 사용되고 있다

\* [전자우편] yonghcho@chungbuk.ac.kr

[8-11]. 본 연구는 InAs/InAlGaAs 양자점에 있어서 DFB 구조가 활성층에 미치는 구조적, 광학적 특성을 DFB 구조 없이 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점 시료와 비교하여 광여기 발광 (photoluminescence; PL), 원자력간현미경 (atomic force microscopy; AFM), 그리고 주사전자현미경 (scanning electron microscopy; SEM)을 이용하여 조사하였다.

## II. 실험

본 연구에서 제작된 InP/InGaAs/InP DFB 회절격자 (grating)는 금속유기화학증착기 (metal-organic chemical vapor deposition; MOCVD)를 이용하여 n-InP 기판 위에 n-InP (200 nm) 완충층 및 n-InGaAsP (200 nm) 도파로 (waveguide)를 성장하였으며, 그 위에 다시 n-InP (100 nm)와 undoped InGaAs (40 nm)를 성장한 후, 마지막으로 undoped InP (20 nm)를 성장하였다. InP/InGaAs/InP 회절격자는 자기증식이온반응식각 (magnetically enhanced reactive ion etching), laser hologram lithography, 그리고 습식식각 (wet etching) 등의 공정을 통하여 제작하였으며, 그 위에 다시 MOCVD를 사용하여 undoped InP (130 nm)가 재성장 되었다. 각 회절격자 공정 단계에서 회절격자의 주기 형성 상태와 재성장 후 표면 상태는 AFM 및 SEM 이미지를 통하여 확인하였다.

이렇게 제작된 DFB 회절격자 시료 위에 분자선 증착기 (molecular beam epitaxy)를 이용하여 7 주기를 갖는 자발성장된 (self-assembled) InAs/

InAlGaAs 양자점을 성장하였으며, DFB 회절 격자를 갖지 않는 7주기 양자점을 기준시료로 성장하였다 [8]. 회절격자 존재 유무를 제외하고 실험 조건은 동일하다. 양자점은  $\sim 9 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 의 공간밀도를 보이며, 평균 폭과 높이는 각각 32.5와 3.5 nm 크기를 갖는 것으로 조사되었다.

DFB 회절격자의 유무에 대한 양자점의 광학적 특성을 조사하기 위해 532 nm에서 연속 동작하는 Nd:YVO4 레이저를 사용하였다. 온도 변화에 따른 InAs/InAlGaAs 양자점의 발광 특성을 분석하기 위해 10에서 300 K의 범위에서 특성을 관찰하였으며, 1.55  $\mu\text{m}$  파장 대역의 발광을 검출하기 위해 extended InGaAs 검출기가 사용되었다.

## III. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 laser hologram lithography 공정과 건식, 습식 식각을 마친 후, 비접촉방식 (non-contact)을 사용하여 측정된 DFB 회절격자의  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  AFM 이미지이다. 측정된 산과 산의 간격은 약 250 nm이고, 깊이는 약 70 nm로 조사되었다. AFM의 이미지는 비접촉 (non-contact) 방식으로 측정하였으며, 회절격자의 보다 정확한 크기를 SEM 이미지로 다시 한번 확인해 보았다. 그림 1(b)는 제작된 InGaAs 회절격자에 InP를 재성장한 후 조사한 표면의  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  AFM 이미지이다. 표면이 테라스 형태를 보였으며, 약 1.8의 표면 거칠기 (surface roughness)를 보이고 있다. 이것은 회절격자를 제작하기 전의 시료 표면 상태

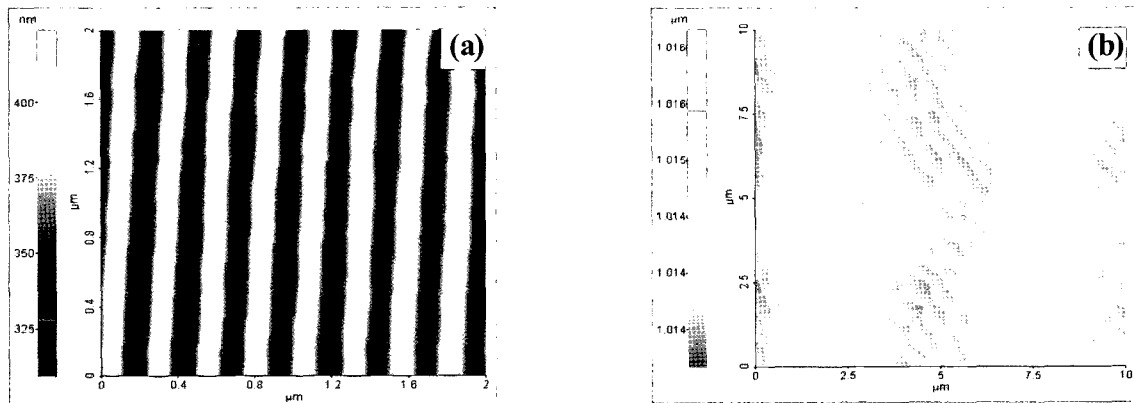


그림 1. (a) InP/InGaAs/InP 시료를 laser hologram lithography 공정과 건식, 습식 식각을 마친 후, 비접촉방식 (non-contact)을 사용하여 측정된 DFB 회절격자의  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  AFM 이미지, (b) 회절격자 위에 재성장된 InP의 표면  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  AFM 이미지.

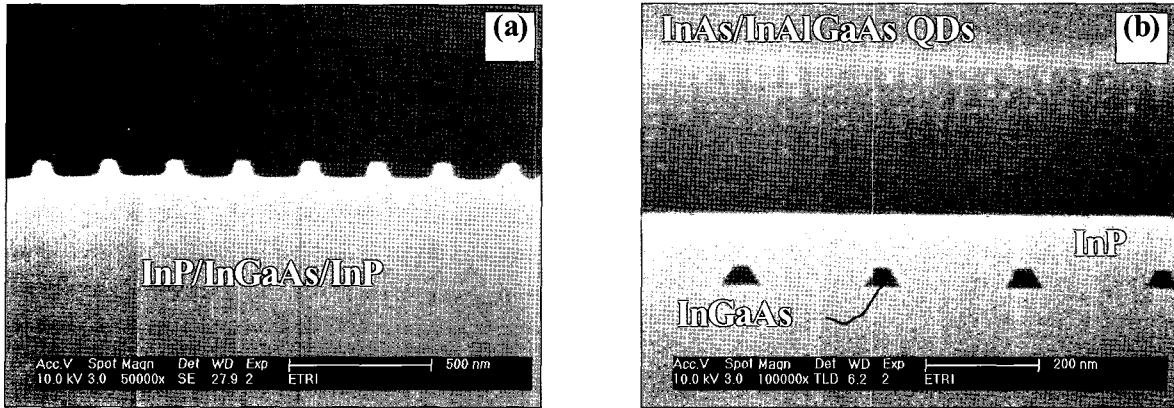


그림 2. (a) InP기판 위에 성장된 InP/InGaAs/InP 구조에 대하여 lithography와 식각 공정을 마친 후의 단면 SEM 이미지, (b) 회절격자 위에 InAlGaAs 장벽을 갖는 7 주기의 InAs 양자점 LD에 대한 단면 SEM 이미지.

와 별반 다르지 않은 표면 거칠기를 보이고 있으며, 회절격자 공정 후의 재성장을 통한 표면 평탄화 상태가 양호함을 나타내고 있다.

그림 2(a)는 InP기판 위에 성장된 InP/InGaAs/InP 구조에 대하여 그림 1(a)에서와 마찬가지로 lithography와 식각 공정을 마친 후의 단면 SEM 이미지이다. InP/InGaAs/InP의 회절격자가 주기적으로 형성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 간격은 약 250 nm이고, 산의 폭은 약 75 nm로서 간격 대비 폭의 비가 30 % 임을 확인 할 수 있었다. 그림 2(b)는 회절격자 위에 두께가 28 nm인 InAlGaAs 장벽을 갖는 7 주기 InAs 양자점 시료에 대한 단면 SEM 이미지이다. 회절격자 위에 7 주기의 양자점이 일정한 방향으로 배열되어 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, SEM은 선택적 식각을 통하여 얻은 단차의 이미지이므로 정확한 양자점의 크기를 확인하기는 어렵다. GaAs 계열의 In(Ga)As 양자점에 있어서 적층에 따라 수직 방향으로 잘 배열되는 것이 관찰되는데, 투과전자현미경 (transmission electron microscopy)를 통하여 확인해 본 결과, 본 시료에서는 특정한 각을 가지고 수직 방향으로 배열이 되어 있는 것을 관찰하였다 [12]. 이것은 맨 처음 성장되는 양자점과 장벽층으로부터 성장시에 그룹 III-족 (In, Ga, Al 원자)의 국부적인 성장거동의 차이로 기인한 상분리 (phase separation) 현상으로 설명될 수 있다 [13].

그림 3(a)는 InAs/InAlGaAs 단일 양자점의 표면 이미지로 모양이 대칭적인 형태를 갖고 있다. 기존 연구보고에 따르면 InAl(Ga)As 물질계에 In(Ga)As

로 양자구조를 형성하면 양자점이 아닌 양자세선 (quantum wire)이나 양자데쉬 (quantum dash) 구조가 성장되는데 반해, 본 연구에서는 대칭적인 양자점을 얻을 수 있었다. 양자구조의 모양이 비대칭성을 갖는 경우, 방향에 따라 내부 전계가 달라지기 때문에 양자점 특성과 다소 차이가 나고, 소자 제작 시 방향성을 고려해야 한다 [14]. 또한 내부전계에 의한 전자 (electron) 와 정공 (hole)의 파동함수 (wavefunction) 중첩 정도가 나빠져서 광효율이 저하되는 특성을 보이게 된다 [15]. 그림 3(b)는 InAs/InAlGaAs 양자점의 1  $\mu\text{m}$  x 1  $\mu\text{m}$ 의 범위에서 측정한 AFM 이미지이다. AFM표면 이미지로부터 얻은 양자점의 평균 폭과 높이는 각각 32.5 nm 와 3.5 nm 크기를 보이며, 공간밀도는  $\sim 9 \times 10^{10} / \text{cm}^2$  으로 조사되었다. 양자점의 공간밀도는 높은 반면, 균일도가 InAs/GaAs 양자점계에 비해 상대적으로 좋지 않다. 따라서, InP 기판에 자발성장 양자점을 형성함에 있어서 균일도를 제어하는 기술이 중요한 현안 중의 하나이다.

그림 4 는 10 에서 300 K 까지 온도를 변화시키기에 따라, (a) 회절격자가 없이 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점과 (b) 회절격자 위에 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점에서의 PL 이다. 두 시료 모두 온도가 증가함에 따라 PL 강도가 감소하면서 파장이 장파장으로 변화하는 것을 관찰 할 수 있다. 온도가 증가함에 따라 PL 강도가 감소하는 것은 양자점에 갇혀 있던 운반자 (carrier)들이 급격한 열적 들뜸으로 인하여 장벽을 넘어 빠져 나감으로써 나타나는 현상으로 설명할 수 있다 [16]. 본 연구

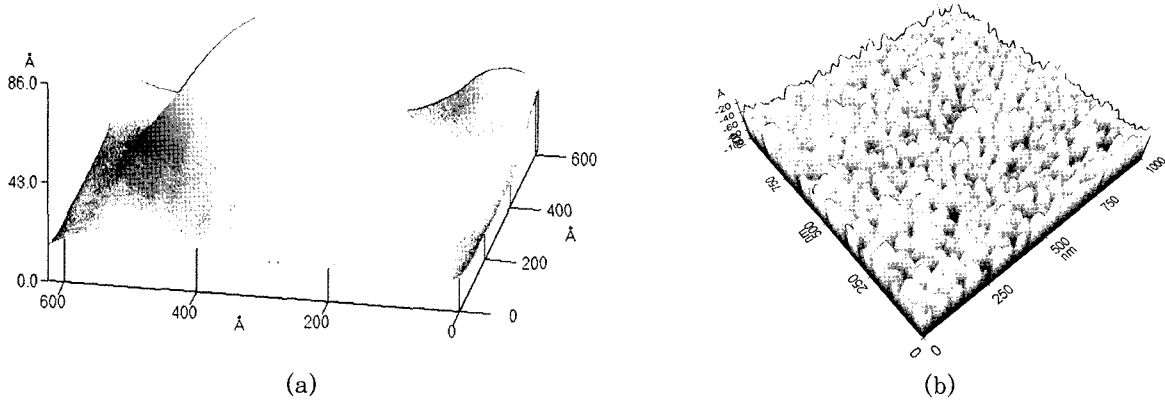


그림 3. 성장된 InAs/InAlGaAs (a) 단일 양자점과 (b) 1 μm x 1 μm 범위로 측정된 AFM 이미지.

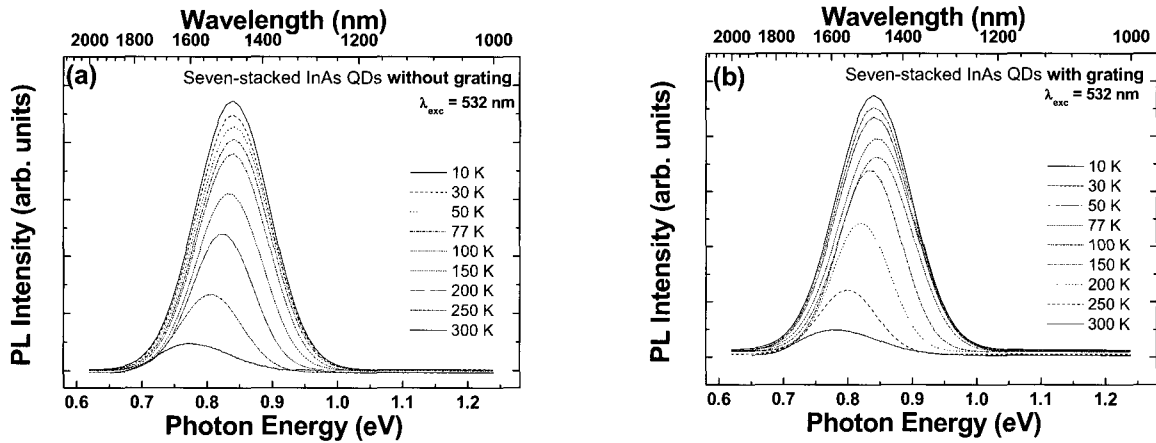


그림 4. (a) 회절격자 위에 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점과 (b) 회절격자 없이 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점의 온도변화 PL.

에서는 보이지 않았지만, 여기광 파워 변화에 따른 실험에서 기저상태 (ground state)와 여기상태 (excite state)가 뚜렷이 구분되지 않았으며, 이것은 양자점의 균일도가 좋지 않은 상태에서 각 크기에 따른 양자점들의 준위들이 혼재되어 있는 것으로 풀이된다.

그림 5는 그림 4를 바탕으로 회절격자 위에 InAs 양자점을 성장한 구조와 회절격자 없이 성장된 InAs 양자점 구조에서의 각 온도 변화에 따른, (a) 반치폭 (full width at half maximum)과 PL 파장 변화를 나타내었으며, (b) 각 온도에서의 PL 스펙트럼에 대한 적분값을 온도에 따라 나타내었다. 반치폭의 경우, 두 시료 모두 저온에서 상온으로 갈수록 반치폭 값이 다소 좁아지는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 그림 4에서 보이는 것처럼 작은 크기의 양자점들로부터 얻을 수 있었던 단파장에서 발광이 온도가 증가함에 따라 운반자가 쉽게 열화됨으로써 상온 PL에는 기여를 하지 못하는 것으로

보인다. 그리고, 회절격자 유무에 따른 양자점의 PL 파장을 살펴보면, 저온에서는 거의 비슷한 것을 볼 수 있는데, 상온으로 올라오면서 회절격자 위에 성장된 양자점의 PL 파장이 회절격자 없이 성장된 시료의 파장 보다 장파장으로 옮겨가는 것을 알 수 있다. 비록 본 연구에 사용된 양자점은 같은 조건으로 키워졌지만, 회절격자 위에 성장된 양자점이 크기 분포도에 있어서 회절격자가 없는 시료보다 크기가 큰 양자점이 많이 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 회절격자 위에 성장되는 양자점의 경우 회절격자로부터 영향을 받는다는 사실을 내포하고 있다. 앞선 연구에서도 주기가 약 37%인 회절격자의 위에 성장된 양자점과 회절격자 없이 같은 조건으로 성장된 양자점 시료에서 90 nm 차이를 보이며 장파장으로 변화하는 것을 보고하였다 [8]. 그림 5(b)에서 반치폭 변화와 마찬가지로 온도 변화에 따른 상온과 저온 대비 PL 세기에 있어서 두 시료가 거의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 이것

은 DFB LD 응용을 위해 회절격자 구조에 양자점을 형성할 때 회절격자 구조가 없는 시료의 특성과 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 하지만, 광통신 영역에 사용되는 양자점 DFB LD 구조에 있어서 1.55  $\mu\text{m}$  파장이 중요하므로 에피 상태에서는 보다 단파장에서 발광하는 양자점을 성장하기 위해, 양자점의 성장 시간을 줄이는 등의 조건을 고려해야 함을 알 수 있다.

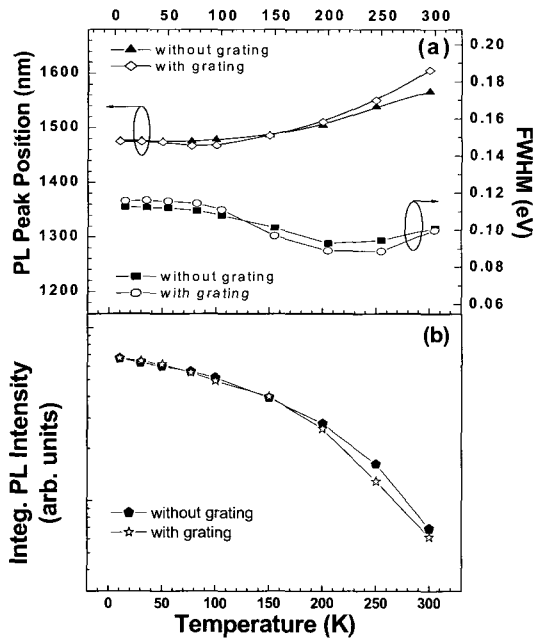


그림 5. 온도 변화에 따른 양자점 시료에서의 (a) 반치폭과 PL 파장 및 (b) 적분된 PL 스펙트럼.

#### IV. 결론

In/InGaAs/InP 회절격자를 제작하여 그 위에 7 주기 InAs/InAlGaAs 양자점 구조를 성장하였다. 이 시료와 회절격자 없이 동일한 성장 조건에서 성장된 InAs/InAlGaAs 양자점 시료와 구조적, 광학적 특성을 비교 분석하였다. 구조적 분석을 통하여 양자점 형태가 원형 모양을 형성하였고, 적층시 변위와 같은 결함이 없이 잘 이루어졌음을 확인하였으며, 온도 변화 PL 측정을 통하여 회절격자의 유무에 있어서도 상온 대비 저온의 광학적 특성이 유사한 것을 관찰 하였다. 하지만, 회절격자 구조 위에 성장된 양자점의 경우, 상온 PL 파장이 회절격자 구조 없이 성장된 양자점 시료보다 장파장에 위

치함을 확인하였다. 이것은 회절격자가 양자점 성장에 있어서 영향을 미치고 있다는 것을 의미하며, 광통신용 LD 구조의 파장을 결정하는데 있어서 고려해야 하는 변수임을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 정보통신부 지원 (과제계정번호; 06MB2810)과 과학기술부 지원 국가지정연구실 사업(충북대학교)에 의해 지원된 연구 결과로서 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Y. Liu, M. Hopkinson, C. N. Harrison, M. J. Steer, R. Frith, I. R. Sellers, D. J. Mowbray, and M. S. Skolnick, *J. Appl. Phys.* **93**, 2931 (2003).
- [2] W. T. Tsang, F. S. Choa, M. C. Wu, Y. K. Chen, R. A. Logan, T. Tanbun-Ek, S. N. G. Chu, K. Tai, A. M. Sergent, and K. W. Wecht, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 2375 (1991).
- [3] Z. C. Niu, S. Y. Zhang, H. Q. Ni, D. H. Wu, H. Zhao, H. L. Peng, Y. Q. Xu, S. Y. Li, Z. H. He, Z. W. Ren, Q. Han, X. H. Yang, Y. Du, and R. H. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **87**, 231121 (2005).
- [4] M. Sugawara, *Semiconductors and Semimetals*, Vol. **60** (Academic Press, San Diego, 1999), Chap. 1.
- [5] Y. Arakawa and H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982).
- [6] Jin Soo Kim, Jin Hong Lee, Sung Ui Hong, Ho-Sang Kwack, Chul Wook Lee, and Dae Kon Oh, *ETRI J.* **26**, 475 (2004).
- [7] M. Kuntz, G. Fiol, M. Lammlin, D. Bimberg, M. G. Thompson, K. T. Tan, C. Marinelli, R. V.enty, H. White, V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, Yu. M. Shernyakov, and A. R. Kovsh, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 843 (2004).
- [8] J. S. Kim, J. H. Lee, S. U. Hong, H.-S.

- Kwack, B. S. Choi, and D. K. Oh, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **18**, 595 (2006).
- [9] H. Konig, S. Rennon, J. P. Reithmaier, A. Forchel, J. L. Gentner, and L. Goldstein, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 1491 (1999).
- [10] L. D. Westbrook, I. D. Henning, A. W. Nelson, and P. J. Fiddymment, *IEEE J. Quantum Electron.* **21**, 612 (1985).
- [11] J. C. Cartledge and A. F. Elrefaie, *IEEE J. Lightwave Technol.* **8**, 704 (1990).
- [12] J. S. Kim, J. H. Lee, S. U. Hong, H.-S. Kwack, C. W. Lee, and D. K. Oh, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1033 (2004).
- [13] J. S. Kim, J. H. Lee, S. U. Hong, H.-S. Kwack, C. W. Lee, and D. K. Oh, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **16**, 1607 (2004).
- [14] R. H. Wang, A. Stintz, P. M. Varangis, T. C. Newell, H. Li, K. J. Malloy, and L. F. Lester, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **13**, 767 (2001).
- [15] L. V. Asryan, M. Grundmann, N. N. Ledentsov, O. Stier, R. A. Suris, and D. Bimberg, *J. Appl. Phys.* **90**, 1666 (2001).
- [16] Y. H. Cho, B. J. Kwon, J. Barjon, J. Brault, B. Daudin, H. Mariette, and Le Si Dang, *Appl. Phys. Lett.* **81**, 4934 (2002).

## Structural and Optical Characteristics of InAs/InAlGaAs Quantum Dots Grown on InP/InGaAs/InP Distributed Feedback Grating Structure

H. S. Kwack<sup>1,2</sup>, J. S. Kim<sup>1</sup>, J. H. Lee<sup>1</sup>, S. U. Hong<sup>1</sup>, B. S. Choi<sup>1</sup>, D. K. Oh<sup>1</sup>, and Y. H. Cho<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>*IT Convergence & Components Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute  
Daejeon 305-350*

<sup>2</sup>*Department of Physics and Institute for Basic Science Research, Chungbuk National University,  
Cheongju 361-763*

(Received February 22, 2006)

We fabricated the distributed feedback (DFB) InP/InGaAs/InP grating structures on InP (100) substrates by metal-organic chemical vapor deposition, and their structural properties were investigated by atomic force microscopy and scanning electron microscopy. Self-assembled InAs/InAlGaAs quantum dots (QDs) were grown on the InP/InGaAs/InP grating structures by molecular beam epitaxy, and their optical properties were compared with InAs/InAlGaAs QDs without grating structure. The duty of the grating structures was about 30%. The PL peak position of InAs/InAlGaAs QDs grown on the grating structure was 1605 nm, which was red-shifted by 18 nm from that of the InAs/InAlGaAs QDs without grating structure. This indicates that the formation of InAs/InAlGaAs QDs was affected by the existence of the DFB grating structures.

Keywords : Distributed feedback, InAs/InAlGaAs, Quantum dot, Molecular beam epitaxy

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