

# 광학적 방법으로 측정된 양자우물 안의 InAs 양자점의 에너지 준위

남형도<sup>1</sup> · 곽호상<sup>2</sup> · L. Doyennette<sup>3</sup> · 송진동<sup>1</sup> · 최원준<sup>1\*</sup> · 조운조<sup>1</sup> · 이정일<sup>1</sup>  
조용훈<sup>2</sup> · F. H. Julien<sup>3</sup> · 최정우<sup>4</sup> · 양해석<sup>5</sup>

<sup>1</sup>한국과학기술연구원 나노소자 연구센터, 서울 130-650

<sup>2</sup>충북대학교 물리학과, 충북 361-763

<sup>3</sup>Institut d'Electronique Fondamentale, Universite Paris-Sud, Orsay 91405, France

<sup>4</sup>경희대학교 물리학과, 용인 446-701

<sup>5</sup>중앙대학교 물리학과, 서울 156-756

(2006년 2월 14일 받음)

PL (photoluminescence), PLE (PL excitation) 그리고 근 적외선 투과 분광법을 활용하여 InAsGa/GaAs 우물 내 InAs 양자점 구조의 광학적 특성과 전자 버금 띠 구조에 대하여 연구하였다. 투과 스펙트럼과 PLE 스펙트럼으로부터 InAs 양자점 내 세 개의 구속 상태와 InGaAs/GaAs 우물 내에 두 개의 구속 상태가 존재함을 발견하였고, 광전류 스펙트럼에서 관측된 버금 띠 사이 전이들과 연관 지어 해석하였다.

주제어 : 양자점, 양자점 적외선 수광소자, 전자 버금 띠, 비대칭 우물내의 양자점

## I. 서 론

최근 반도체 양자구조는 성장 기술의 발전과 물리적 성질에 대한 이해의 진보로 이론과 응용 분야에서 중요 관심 대상 물질이 되었다. 반도체의 크기를 나노미터 크기로 조절 가능한 기술이 개발되면서 양자 크기 효과와 관련된 새로운 특성들을 연구하고 이의 소자응용이 가능하게 되었다. 특히 InAs/GaAs 자발 형성 양자점은 저 차원 물리와 전자/광전자 소자의 활용에서 큰 관심을 받고 있다[1-2]. 양자점의 전자/광전자 분야에서의 활용을 위해서는 이의 에너지 준위 상태를 이해하는 것이 중요하다. 최근에 eight-band k·p 이론 또는 실험적 준퍼텐셜 (EP) 이론 등을 사용하여 변형된 양자점의 전자 구조의 이론적인 계산이 이루어졌다[3-5]. 그러나 실제 연구되는 양자점의 정확한 구조적 정보의 부재로 인하여 실험결과와 이론적 계산결과를 비교하는 것에 많은 어려움이 따르고 있다.

한편 C-V 특성분석, 어드미턴스 (admittance) 분광법, 그리고 DLTS (deep level transient spectroscopy) 등과 같은 전기적 특성 분석을 통하여 버금 띠의 구조가 연구되고 있다[6-10]. 그리고, PL

(photoluminescence), PLE (PL excitation), 투과, 흡수, 광전류 분광법 등과 같은 방법으로 광학적 특성 분석을 통하여 띠 사이와 버금 띠 사이 전이를 연구하고 있다[11-13]. 위와 같이 자발 형성 양자점의 전자구조를 알기 위하여 이론과 실험에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 반 절연 GaAs (001) 기판 위에 성장된 비대칭 InGaAs/GaAs 우물 내 자발형성 InAs 양자점 구조의 광학적 특성을 연구하였다. 연구를 위하여 PL, PLE, 투과 분광법을 활용하였다. 시료의 전자 구조 확인을 위해 QDIP(quantum dot infrared photodetector; 양자점 적외선 수광소자)로 제작하여 광전류 측정을 하였다.

## II. 실 험

그림 1 (a)는 본 실험에 사용된 QDIP의 구조를 나타낸다. 시료는 반 절연 GaAs (001) 기판 위에 분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy)로 자발형성 방법으로 형성된 양자점을 이용하여 제작되었다. 활성층은 5층의 DWELL (dots in a well) 구조를 갖는다. InAs 양자점은 성장 온도  $T_g = 480^\circ\text{C}$ 에서 3-ML

\* [전자우편] wjchoi@kist.re.kr

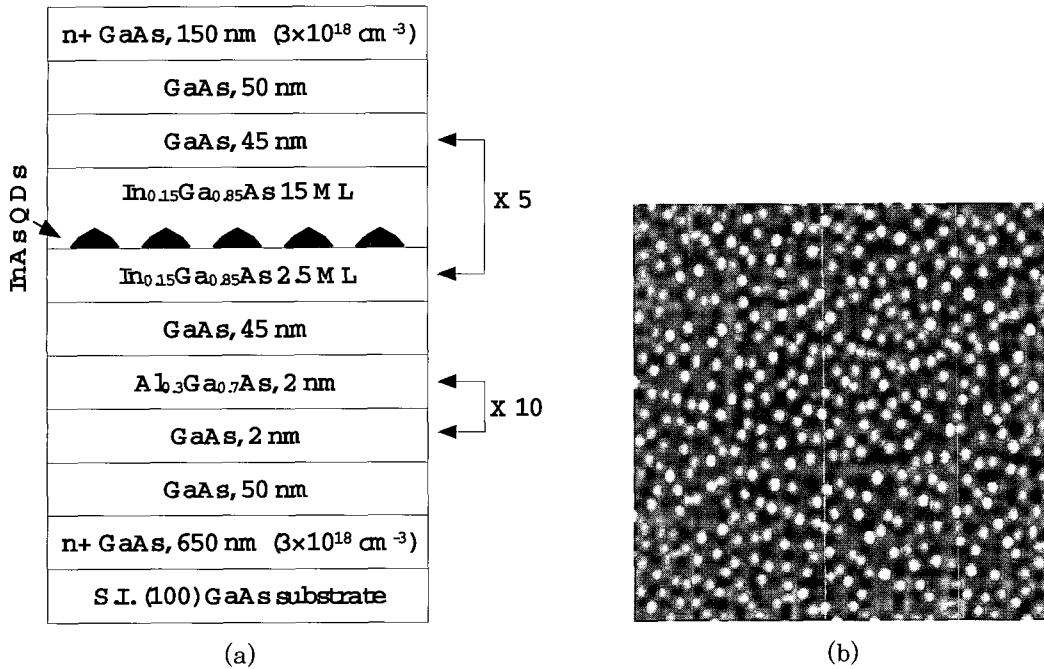


그림 1. (a) Schematic diagram of InAs quantum dots in a well infrared photodetector structure, (b) AFM image ( $1.0 \times 1.0 \mu\text{m}^2$ ) of the QDIP.

(monolayer)로 성장 시켰다. 각각 다른 두께의  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  층의 두께는 각각 15-ML 와 2.5 ML 이다. 각각의 DWELL 구조는 45-nm 두께의 GaAs 층으로 분리되어 있다. 활성층 아래쪽에는 2-nm  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  층과 2-nm GaAs 층을 한 주기로 하는 10 쌍의 초격자 (superlattices, SLs) 층을 성장하였다. 5 층의 DWELL과 SL는 150-nm 두께의 엔(n)형 GaAs 위쪽 접합 층과 650-nm 두께의 엔(n)형 GaAs 아래쪽 접합 층으로 덮여 있는 구조이다. 이들 접합 층은  $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  농도로 실리콘(Si)이 도핑되어 있다. 그림 1 (b)는 시료의 원자력현미경 (atomic force microscope, AFM) 이미지를 나타낸다. 이미지를 얻기 위하여 2.5-ML 두께의  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$  위에 같은 조건으로 InAs 양자점을 성장시킨 후 위쪽을 덮지 않은 상태로 시료를 준비하였다. AFM 이미지로 확인한 결과 양자점의 폭, 높이 그리고 밀도는 각각  $\sim 41 \text{ nm}$ ,  $\sim 7 \text{ nm}$ ,  $\sim 4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  이다.

사건식판인쇄 (photolithography)와 습식 화학적 식각 (wet chemical etching)을 사용하여  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 의 mesa 형태의 소자를 만들고, 열적증착기를 사용하여 엔(n)형의 전극으로 AuGe/Ni/Au 층을 증착하였다. GaAs와 증착한 금속 사이의 특성을 음 접합으로 바꾸기 위해 급속열불림(rapid thermal anneal-

ing, RTA) 장치를 사용하여 열 불림 작업을 하였다.

모든 소자 공정 과정이 끝난 후에 소자의 암전류를 줄이기 위하여 10분간 수소화 처리를 하였으며, 수소화 처리 후 광전류 스펙트럼을 얻을 수 있었다. 수소화 처리하는 동안 수소 플라즈마의 RF 파워 밀도는  $60 \text{ mW/cm}^2$ , 기판 온도는  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. 수소화 처리는 상대적으로 낮은 성장 온도 조건으로부터 발생하는 시료 내의 결함을 불활성화시키기 위하여 사용하였다[14].

PL 실험을 위하여 시료는  $514.5 \text{ nm Ar}^+$  레이저를 여기 광원으로 사용하였고, 시료로부터 나온 빛은 300 mm 분광기로 분광하여 InGaAs 검출기로 측정하였다. PLE 실험은 여기 광원으로 텅스텐 할로겐등을 150 mm 분광기를 사용하여 원하는 파장의 여기 광원을 시료에 입사 시켰고, 이 때의 기저 상태 발광의 세기를 InGaAs 검출기로 측정하여 스펙트럼을 얻었다. 투과 스펙트럼을 얻기 위하여 Nicolet FTIR (Fourier-transform infrared) Spectrometer Nexus 870을 사용하여 실온 (300 K)에서 측정하였다. 소자의 흡수를 증가시키기 위하여 다중 경로 도파로를 만들었는데, 먼저 막대 형태로 길게 시료를 자르고 양쪽 가장 자리를  $45^\circ$  각도로 갈아서 거울면을 만들었다. 시료를 준비한 후 한 쪽 가장 자리의  $45^\circ$  면에 수직하게 빛을 입사 시키고, 반대쪽으로 통

과해서 나오는 빛의 세기를 검출기로 검출하여 분석하였다. QDIP의 광전류 스펙트럼은 띠 통과 필터 셀 (band pass filter set)과 흑체 복사 광원 (blackbody source)을 사용하여 수직 입사 형태로  $T = 10$  K에서 측정되었다. 수소화 처리 전의 QDIP는 높은 암전류 특성 때문에 광전류를 측정 할 수 없었으나, 수소화 처리 후 낮은 암전류로 인해 광전류 측정이 가능하였다. 이 때 아래쪽 전극을 접지(ground)로서 기준으로 삼았다.

### III. 결과 및 토의

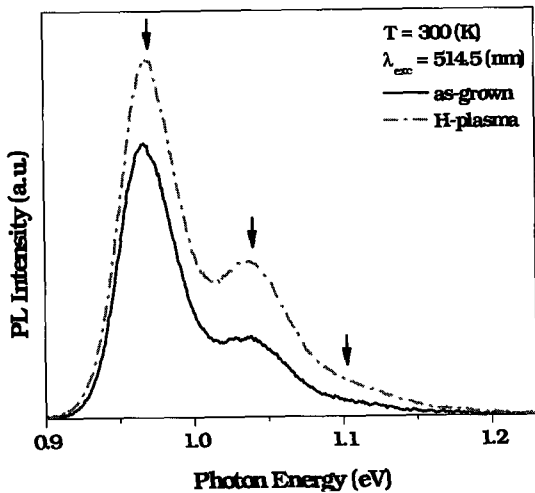


그림 2. Photoluminescence spectra at 300 K of as-grown sample and hydrogen-plasma treated (for 10 min) sample.

그림 2는 300 K에서 측정된 PL 스펙트럼을 나타낸다. 스펙트럼은 0.96 eV에서 현저한 봉우리를 보여주고 있으며, 이는 기저 전자 버금 띠로부터 기저 무거운홀(hole) 버금 띠 사이의 전이(e0-h0)이다. PL 스펙트럼에 대한 3개 가우스 맞춤으로부터 0.96 eV 외에 1.04 eV와 1.11 eV에서 다른 두 개의 봉우리를 확인하였다. 그림 2에서 수소화 처리 후 스펙트럼의 세기가 처리 전 시료에 비하여 증가하였고, 각각의 봉우리 위치는 변하지 않았음을 확인할 수 있다. 수소화 처리 후 PL 세기의 증가는 InGaAs/GaAs 부분 또는 젓은 층 주변의 결함들을 불활성화한 때문으로 여겨진다[15]. 수소화 처리 후 PL 봉우리의 위치가 변하지 않았으므로, 양자점 구조에 어떤 중요한 영향도 미치지 않은 것으로 생각된다.

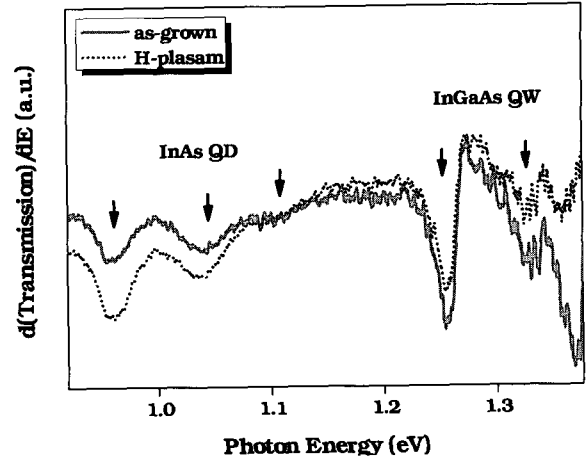


그림 3. Derivative of the transmission spectra of as-grown and hydrogen-plasma treated samples at  $T = 300$  K.

그림 3은 300 K에서 측정된 투과 스펙트럼을 일차 미분한 그래프를 나타낸다. 그림 3에서 0.9 - 1.15 eV 영역에 띠 사이 흡수에 해당하는 변곡점 (0.96, 1.04 그리고 1.11 eV)을 확인 할 수 있다. 0.96 eV는 상온에서의 PL 데이터와 일치하며, 명백히 InAs 양자점의 e0-h0 흡수에 대응한다. 두 개의 나머지 변곡점 (1.04 그리고 1.11 eV)은 InAs 양자점 내의 여기 띠 사이 흡수에 대응시킬 수 있다. 투과 스펙트럼의 결과는 InAs 양자점 내에 전도 띠와 원자가 띠 각각에 최소 두 개 이상의 구속 상태가 존재 하는 것을 보여준다. 1.2 eV 이상에서 확인 되는 변곡점(1.26 그리고 1.33 eV)들은 InAs 양자점들 사이의 InGaAs/GaAs로 형성된 양자 우물과 관련된 흡수이다.

그림 4 (a)는 고정된 검출 에너지 ( $E_{det} = 1.046$  eV는 10 K에서의 e0-h0 PL 봉우리의 위치)에서의 PLE 스펙트럼을 보여주고 있다. 에너지 축은 검출 에너지를 기준으로 하였으며,  $\Delta E = E_{exc} - E_{det}$ 에 해당한다. 투과 스펙트럼의 양자구조의 흡수 특성과 같은 특성 스펙트럼을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 먼저  $\Delta E < 200$  meV인 영역에서 가장 현저한 봉우리의 에너지인 85 meV와 160 meV를 확인할 수 있다. 85 meV ( $=\Delta E_1 + \Delta H_1$ )의 봉우리는 e1-h1 공명에 대응하며, 160 meV ( $=\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta H_1 + \Delta H_2$ )의 봉우리는 e2-h2 공명에 대응한다.

$$\Delta E_n = e_n - e_{n-1}$$

$$\Delta H_n = h_n - h_{n-1}, n = 1, 2, 3, \dots$$

또한 약한 공명에 해당하는 30, 63, 그리고 130 meV의 봉우리를 확인할 수 있다. 이들 봉우리는 이상적인 경우에서의 띠 사이 전이의 선택규칙( $\Delta n = 0$ )

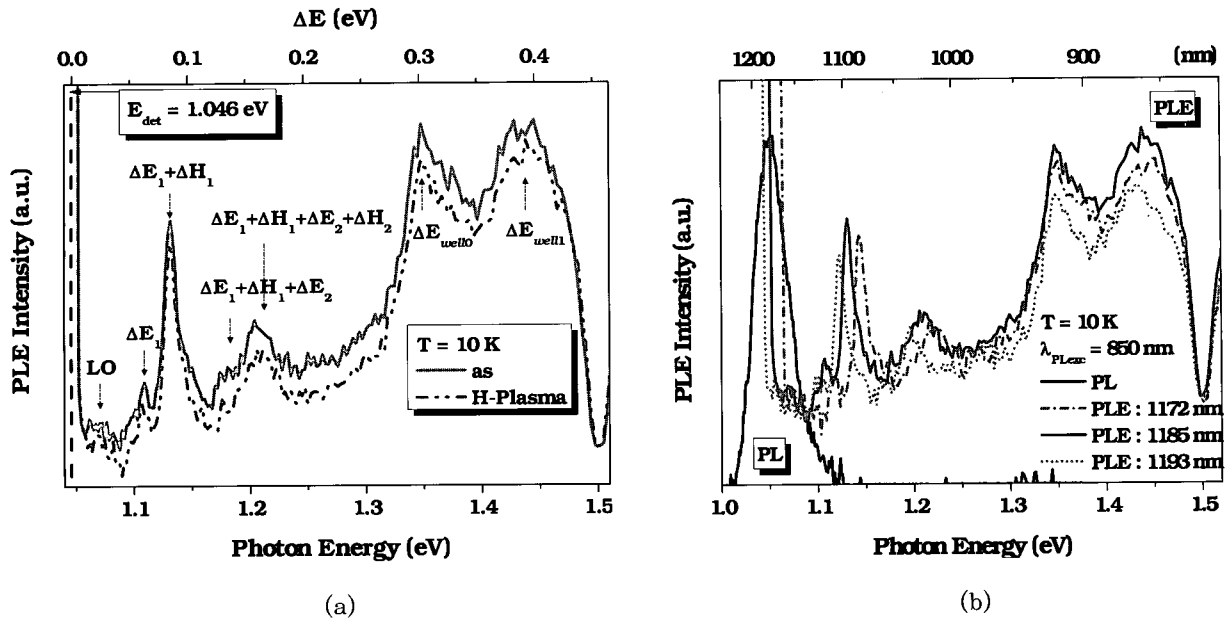


그림 4. (a) PLE spectra of as-grown and hydrogen-plasma treated samples at 10 K. The top axis refers to the detection energy, thus showing the excess excitation energy  $\Delta E = E_{exc} - E_{det}$  (b) PL spectrum and PLE spectra with the detection wavelength at 1172, 1185, and 1193 nm at  $T = 10$  K.

이 실제 양자 구조의 경우에 깨지면서 전이 확률이 0 이상의 값을 가지게 된다. 그리고 여기 광원으로부터 생성된 전자와 호일(hole)이 양자점 내로 확산되어 양자점의 상태들을 채우게 되는데, 전자에 비해 호일의 이동도가 작기 때문에 전자 버금 띠에 비해 양공의 버금 띠를 채우는 속도가 느리게 된다. 위의 사실로부터 63 meV ( $=\Delta E_1$ )와 130 meV ( $\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta H_1$ )는 각각 e1-h0 공명과 e2-h1 공명에 대응된다. 30 meV에서의 공명은 양자점의 기저 상태에서 포논이 도운 여기자 (exciton)의 생성 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다[11,17].

그림 4 (a)의  $\Delta E > 200$  meV 인 영역에서 두 개의 강한 봉우리를 확인 할 수 있는데, 이들 봉우리가 양자점 내의 구속 상태가 아니라 InGaAs/GaAs 양자우물의 속박 상태임을 확인하기 위하여 검출 에너지를 바꾸며 PLE 스펙트럼을 얻었다(그림 4 (b)). 이때 검출 에너지의 변화에 대하여 InAs 양자점의 속박 상태의 공명에 해당되는  $E < 1.3$  eV 영역 내의 봉우리의 위치에 많은 변화를 볼 수 있으나,  $E > 1.3$  eV 인 영역의 봉우리들은 검출 에너지 변화에 대하여 봉우리의 위치는 변하지 않고 단지 스펙트럼의 세기만 변화하였다. 이것은 양자점의 개수의 분포와 관계가 있어 스펙트럼 세기의 변화를 이해 할 수 있고, 에너지의 위치가 변하지 않은 것은  $E > 1.3$  eV 인 영역의

봉우리가 양자점의 크기와 무관함을 의미한다. 즉, 양자점 내의 구속 상태가 아니라 InGaAs/GaAs 양자우물 내의 구속 상태임을 의미한다. 투과 스펙트럼과 PLE 스펙트럼으로부터 InAs 양자점 내에 적어도 세 개의 구속 상태가 있음을 확인하였고, 양자점을 감싸고 있는 InGaAs/GaAs 양자우물 내에 적어도 두 개의 구속 상태가 있음을 확인하였다.

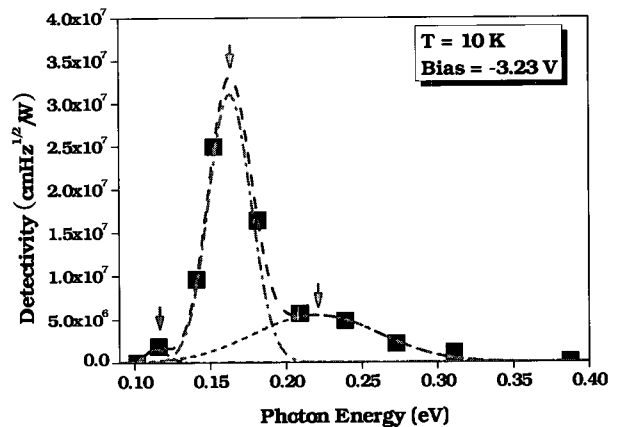


그림 5. Photocurrent spectrum at 10 K of hydrogen-plasma treated (for 10 min) QDIP.

그림 5 는 수소화 처리한 시료의 -3.23 V 바이어스 전압 조건, 10 K 온도에서의 광전류 측정 결과이다. 광전류 스펙트럼의 3개 가우스 맞춤을 통하여 에

너지의 위치를 확인한 결과 110, 163, 그리고 220 meV에서 측정되었으며, 각각의 봉우리의 위치는 본 논문 시료의 PLE 스펙트럼 분석으로 발표한 참고문헌 16의 버금 띠 구조와 비교하여 볼 때 각각의 봉우리는  $e_0-e_2$  (108 meV),  $e_0-e_{well0}$  (184 meV), 그리고  $e_0-e_{well1}$  (236 meV)의 버금 띠 간격에 대응한다. PLE 스펙트럼 분석으로 얻은 버금 띠 간격과 광전류 스펙트럼의 봉우리 값이 일치하지 않는 이유는 높은 바이어스 조건하에서는 띠가 굽어지게 되고, 이로 인해 전자가 느끼는 유효 퍼텐셜 우물의 깊이가 낮아지면서 에너지 간격이 줄어들기 때문이다[11,17]. 이런 현상은 퍼텐셜 우물의 깊은 쪽에서의 버금 띠 간격보다 높은 들뜬 상태와의 버금 띠 간격에 더 큰 영향을 받게 된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 광전류, PL, PLE 및 투과 스펙트럼을 활용하여 DWELL 구조의 InAs 양자점 소자 구조를 조사하였다. PLE 와 투과 스펙트럼으로부터 InAs 양자점 내에 적어도 세 개의 구속 상태가 존재 함을 확인 하였으며, 양자점을 둘러 싸고 있는 InGaAs/GaAs 양자 우물 내에 두 개의 구속 상태가 존재 함을 확인하였다. 광전류 스펙트럼에서 현저한 봉우리 (163 meV)는 PLE 스펙트럼으로 얻어진 버금 띠 구조[16]에서 전자의 기저 상태로부터 InGaAs/GaAs 양자우물의 첫 번째 구속 상태로의 전이에 해당되는 것을 확인 하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원의 나노과학기술 국가 R&D 프로젝트, 과학기술부 지원의 한중 광기술 연구협력센터 및 국가지정연구실사업과 KIST 기관고유사업의 지원을 통하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, *Quantum Dot Heterostructures* (Wiley, Chichester, 1999), and references therein.  
 [2] S. Kim and M. Razeghi, in *Handbook of*

*Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, edited by H. Singh Nalwa, (Academic Press, San Diego, 2001), Vol. 2, Chap. 3.  
 [3] H. Jiang and J. Singh, *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, 1188 (1998).  
 [4] O. Stier, M. Grundmann, and D. Bimberg, *Phys. Rev. B* **59**, 5688 (1999).  
 [5] R. Heitz, F. Guffarth, K. Potschke, A. Schliwa, D. Bimberg, N. D. Zakharov, and P. Werner, *Phys. Rev. B* **71**, 045325 (2005).  
 [6] P. N. Brounkov, A. Polimeni, S. T. Stoddart, M. Henini, L. Eaves, P. C. Main, A. R. Kovsh, Yu. G. Musikhin, and S. G. Konnikov, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 1092 (1998).  
 [7] R. J. Luyken, A. Lorke, A. O. Govorov, J. P. Kotthaus, G. Medeiros-Ribeiro, and P. M. Petroff, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2486 (1999).  
 [8] C. M. A. Kapteyn, F. Heinrichsdorff, O. Stier, R. Heitz, M. Grundmann, N. D. Zakharov, D. Bimberg, and P. Werner, *Phys. Rev. B* **60**, 265 (1999).  
 [9] H. K. Park, E. K. Kim, C. H. Lee, J. D. Song, W. J. Choi, Y. J. Park, and J. I. Lee, *J. Korean Phys. Soc.* **45**, 223 (2004).  
 [10] J. S. Kim, E. K. Kim, S. J. Lee, and S. K. Noh, *J. Korean Phys. Soc.* **46**, S163 (2005).  
 [11] T. Steiner, *Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications* (Artech House, Boston, 2004), and references therein.  
 [12] F. Fossard, A. Helman, G. Fishman, F. H. Julien, J. Brault, M. Gendry, E. Peronne, A. Alexandrou, S. E. Schacham, G. Bahir, and E. Finkman, *Phys. Rev. B* **69**, 155333 (2004).  
 [13] W-H. Chang, T. M. Hsu, C. C. Huang, S. L. Hsu, C. Y. Lai, N. T. Yeh, T. E. Nee, and J-I. Chyi, *Phys. Rev. B* **62**, 6959 (2000).  
 [14] H. D. Nam, J. D. Song, W. J. Choi, J. I.

- Lee, and H. S. Yang, 2005 MRS Spring Meeting Proceeding **864**, E9.40 (2005).
- [15] A. P. Jacob, Q. X. Zhao, M. Willander, F. Ferdos, M. Sadeghi, and S. M. Wang, J. Appl. Phys. **92**, 6794 (2002).
- [16] H. D. Nam, J. D. Song, W. J. Choi, J. I. Lee, H. S. Yang, H. S. Kwack, and Y. H. Cho, J. Korean. Phys. Soc. **47**, 1002 (2005).
- [17] E. T. Kim, Z. H. Chen, M. Ho, and A. Madhukar, J. Vacuum. Sci. Technol. B **20**, 1188 (2002).

## Optical Characteristic of InAs Quantum Dots in an InGaAs/GaAs Well Structure

H. D. Nam<sup>1</sup>, H. S. Kwack<sup>2</sup>, L. Doynnette<sup>3</sup>, J. D. Song<sup>1</sup>, W. J. Choi<sup>1\*</sup>, W. J. Cho<sup>1</sup>, J. I. Lee<sup>1</sup>,  
Y. H. Cho<sup>2</sup>, F. H. Julien<sup>3</sup>, J. W. Choe<sup>4</sup>, and H. S. Yang<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Nano Device Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 130-650

<sup>2</sup>Department of Physics, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763

<sup>3</sup>Institut d'Electronique Fondamentale, Universite Paris-Sud, Orsay 91405, France

<sup>4</sup>Department of Physics, Kyung Hee University, Yongin 446-701

<sup>5</sup>Department of Physics, Chung-Ang University, Seoul 156-756

(Received February 14, 2006)

We investigated the optical property and the electronic subband structure of InAs quantum dots in an InAsGa/GaAs well structure utilizing photoluminescence (PL), PL excitation (PLE) and near infrared transmission spectroscopy. From transmission and PLE spectra, we found three bound states in the InAs quantum dot and two bound states in InGaAs/GaAs quantum well, and correlated to the results of intersubband transitions observed in photocurrent spectrum.

Keywords : Quantum dot, Quantum dot infrared photodetector, Electronic subband, Dots in a well

\* [E-mail] wjchoi@kist.re.kr