

분자선 에피택시 성장시킨 InAs/GaAs 양자점 이중접합구조의 응력특성 분석

Strain characterization of InAs/GaAs quantum dot heterostructures grown by
molecular-beam epitaxy

김형석¹, 서주형¹, 박관경¹, 이상준², 노삼규², 송진동³, 박용주³, 최원준³, 이정일³

¹포항공대 신소재공학과 미세구조분석 연구실, ²한국표준과학연구원

양자점기술 연구실, ³한국과학기술연구원 나노소자 연구센터

이종재료에서 Stranski-Krastanow (S-K) 성장모드의 부정합 응력 해소를 이용한 자발 형성 (self-assembly) 성장원리에 의해 고품위 (high quality) 양자점을 제조할 수 있게 되어 양자점을 이용한 적외선 수광소자, 레이저소자, 차세대 메모리소자 등의 연구가 활발히 진행되고 있다. 양자점에서 발생하는 양자구속효과 (quantum confinement effect)는 그 구조가 작음에서 비롯되므로 양자점 소자의 성공적 개발을 위해서는 양자점의 구조를 나노미터 수준 이하에서 정확히 제어해야 한다. 이를 위해서 원자거리 수준에서 양자점의 구조 및 양자점과 기지물질 사이의 부정합 응력특성에 대한 이해가 요구된다. 양자점 및 양자점 주위에서 부정합 응력은 양자점 형성 시 양자점 구조를 결정하며, 양자점 형성 후 잔류응력은 양자점의 에너지밴드 구조에 큰 영향을 미치므로 양자점/기지물질 이중접합 구조에서 부정합 응력 크기 및 분포 등의 응력특성 분석은 양자점의 성공적 제조를 위해서 매우 중요하다 [1].

많은 연구그룹에서 양자점/기지물질 이중접합구조의 응력특성 분석을 위해서 유한요소법, 연속체 탄성이론 등을 이용한 이론적 계산이 이루어지고 있다 [2, 3]. 그런데 이러한 이론적 접근은 양자점의 구조를 가정하여 응력계산이 이루어지므로 정확한 응력특성 분석을 위해서는 양자점 구조에 대한 정확한 규명이 함께 이루어져야 한다. 그러나 양자점의 크기가 작고 기지물질에 묻혀있는 구조로 인해 정확한 구조 및 응력특성 규명이 매우 어려운 실정이다. 투과전자현미경을 이용한 분석은 투과된 전자에 의한 영상 및 전자빔 회절 등을 이용한 분석이 가능하므로 이종 재료에 묻혀있는 양자점의 구조 및 응력특성 분석에 매우 유용한 분석기법이다. 특히, HREM 기법을 이용하면 원자단위 분해능의 양자점 구조 분석이 가능하며, HREM 이미지에서 격자들의 간격을 측정함으로써 양자점과 양자점 주위의 응력 분포를 실험적으로 직접 측정할 수 있는 장점이 있다.

본 실험에서는 적외선 수광소자 (infrared photo detector)에 적용이 기대되는 InAs 양자점을 분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy, MBE) 방법을 이용하여 GaAs 기판에서 성장시킨 후 양자점의 구조 및 응력특성을 TEM을 사용하여 분석하였다. 기초과학지원

연구원 (KBSI)의 가속전압 1.25 MV 초고전압 투과전자현미경 (HVEM: high voltage electron microscope, JEM ARM1300S)을 사용하여 0.12 nm 이하의 원자단위 분해능으로 양자점의 구조를 관찰하였다. HREM 이미지의 격자 간격을 측정함으로써 양자점과 기지물질 사이의 격자상수 변화를 측정하여 양자점과 그 주위의 응력상태를 분석하였다. 또한, 막스플랑크 연구소 (Max-Planck Institute Metallforschung, Stuttgart)에서 개발한 격자변형분석 (Lattice Distortion Analysis, LADIA) 프로그램을 사용하여 HREM 이미지에서 양자점과 양자점 주위의 응력분포를 분석하였다.

Figure 1 (a)와 (b)는 각각 [110] 정대축 방향에서 관찰한 덮개층을 증착하기 전과 후 양자점의 HREM 이미지들이다. 덮개층을 덮지 않은 양자점은 둥근 상부구조와 정면을 측면으로 하는 렌즈형상이었으며 정면과 표면층 간의 각도는 23-26°로 기존에 보고된 {136}, {137} 면들이 이에 상응한다. HREM 이미지에서 격자들 사이 간격을 측정함으로써 양자점과 그 주위에서 부정합 응력에 의한 격자상수 변화를 살펴보았다. Figure 1 (c)와 (d)는 덮개층을 덮지 않은 양자점과 덮은 양자점에서 (-220) 면들의 면간 거리를 양자점 중심부의 높이 방향을 따라가며 측정한 값이다. 양자점 아래에서는 약 40개의 (-220) 면들의 평균값을, 양자점에서는 최 외곽 격자점을 제외하고 측정한 격자면의 평균값을 나타내었다. GaAs와 InAs의 (-220)면의 면간 거리는 각각 3.998 Å, 4.280 Å이다. 덮개층을 덮지 않은 양자점에서는 젖음층을 기준으로 기판방향으로는 격자상수 변화는 거의 관찰할 수 없으나 양자점의 격자상수는 원래 InAs 격자상수보다 크게 감소한 것을 관찰할 수 있다. 덮개층 증착 전 양자점에서 기판 근처 InAs의 격자상수는 GaAs 기판의 격자상수와 거의 같은 값을 보였으며 젖음층 으로부터 약 2개 이상의 단위포가 증착된 ~1.2 nm 위에서부터 격자상수 값이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 양자점 최상층에서도 InAs의 격자상수보다 2.3 % 줄어든 4.18 Å으로 양자점이 기판으로부터 큰 압축응력을 받고 있음을 확인할 수 있다. 덮개층을 증착한 후의 양자점은 더욱 GaAs 격자에 근접한 격자 간격을 가지고 있었다. 양자점 중심부에서 측정된 가장 큰 격자상수 값이 4.02 Å으로 InAs 격자상수보다 6.1 %나 감소하였다. 이로부터 양자점을 덮개층으로 덮어줌에 따라 GaAs 기지로부터 보다 큰 압축응력을 받고 있음을 확인할 수 있었다.

막스플랑크 연구소에서 개발된 LADIA 프로그램을 사용하여 양자점 및 양자점 주위 응력분포를 분석하였다. LADIA는 기준으로 선정한 영역의 격자점들을 선택하여 표준 단위 포를 만들어 각 영역의 단위포들과 넓이 또는 길이를 비교하는 원리로 응력분포를 나타내게 된다. 자세한 LADIA의 원리 및 응용 예는 참고문헌 [4, 5]에서 찾아볼 수 있다. Figure 2 (a)는 덮개층을 덮은 양자점의 고분해능 이미지이며, (b)는 LADIA를 사용하여 기지물질에 묻혀있는 양자점과 양자점 주위의 상대적인 응력분포를 보여준다. GaAs 단위포를 기준으로 하였으므로 양자점 부근에서 인장응력을 받는 것과 같은 결과로 나타나지만 실제 InAs 격자상수를 기준으로 했을 때는 양자점은 기지물질로부터 압축응력을 받고 있음을

앞의 격자상수 측정으로부터 확인한 바 있다. 양자점과 젖음층에 인접한 GaAs 기지에서 인장응력이 작용하고 있으며, 특히 양자점 위쪽으로 인장응력이 약 15 nm 높이에 걸쳐 확장되어 작용하고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 기존 연구결과의 정렬된 적층구조 양자점 성장원리와 부합하고 있다 [6].

적외선 수광소자에 적용이 기대되는 InAs 양자점을 MBE 방법을 이용하여 GaAs 기판에서 성장시킨 후 투과전자현미경을 이용하여 양자점의 응력특성을 분석하였다. 고분해능 이미지에서 직접 격자 간격을 측정하여 양자점과 그 주위 격자상수를 측정한 결과 GaAs 기지의 격자상수는 크게 변하지 않았으나 기지물질로부터의 압축응력에 의해 양자점에서 InAs 격자상수는 고유의 격자상수보다 6 % 이상 감소되었음을 확인하였다. 또한 LADIA 프로그램을 사용하여 양자점과 주위 기지물질의 응력분포 도식적으로 관찰할 수 있었으며 양자점 위쪽으로 인장응력이 10 nm에 걸쳐 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 양자점 중심부에서는 응력장에 의해 격자점들의 이미지가 어둡게 관찰되어 격자점들의 정확한 위치를 측정하기 어렵기 때문에 LADIA를 이용한 응력 측정에서 밝은 격자점들을 기준으로 단위포의 면적을 계산하는데 많은 오차가 발생하였다. 이로 인해 양자점 내부의 응력분포 및 정량적인 응력측정에 한계가 있었다. 양자점 내부에서 보다 선명한 HREM 이미지를 관찰할 수 있다면 양자점 내부의 응력 분포 및 정량적인 응력크기 계산이 가능하므로 양자점과 그 주위 응력특성 이해에 큰 도움이 될 것이다.

References

1. Th Wiebach, M. Schmidbauer, M. Hanke, H. Raidt, R. Kohler and H. Wawra, Phys. Rev. B **61**, 5571 (2000).
2. G R Liu and S S Quek Jerry, Semicond. Sci. Technol. **12**, 630 (2002).
3. C. Pryor, Phys. Rev. B **60**, 2869 (1999).
4. N. Y. Jin-Phillipp and F. Phillipp, J. Appl. Phys. **88**, 710 (2000).
5. K. Du, Y. Rau, N. Y. Jin-Phillipp and F. Phillipp, J. Mater. Sci. Technol. **18**, 135 (2002).
6. Qianghua Xie, Anupam Madhukar, Ping Chen and Nobihiko P. Kobayashi, Phys. Rev. Lett. **75**, 2542 (1995).

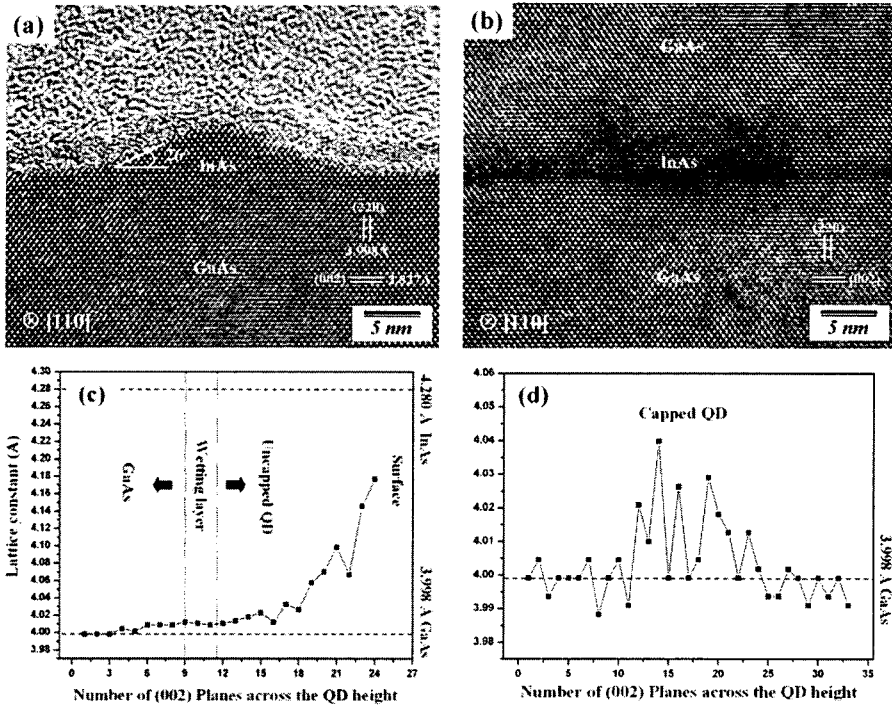


Fig. 1. HREM images of uncapped QD (a) and capped QD (b), lattice constants of the uncapped QD (c) and the capped QD (d), respectively.

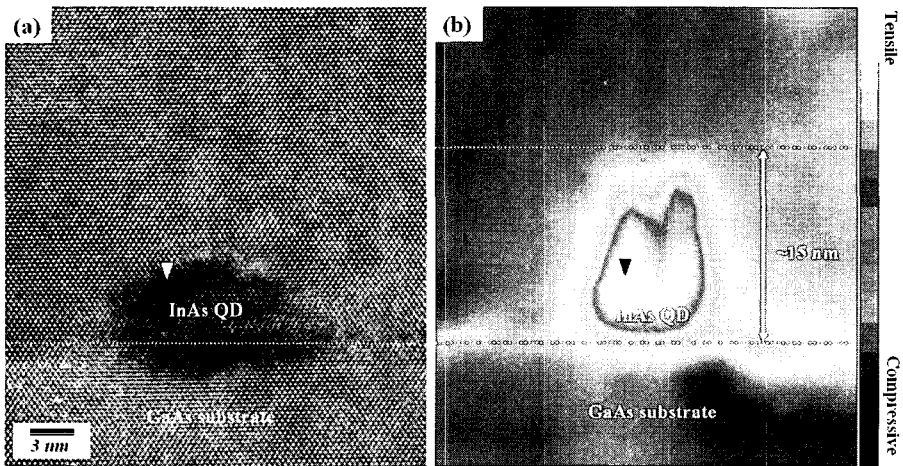


Fig. 2. HREM of capped QD (a) and its local strain distribution (b) measured by the Lattice Distortion Analysis (LADIA) program.