

## Electron-beam으로 패터닝 산화막 마스크를 이용한 양자점의 선택성장

박윤주, 한철구, 오치성, 장영준, 정석구, 김광무, 고동완, 김은규, 민석기

한국과학기술연구원 반도체재료연구실, 서울 130-650

### 1. 서 론

양자구조의 선택성장법은 양자구조의 위치나 크기를 쉽게 조절할 수 있기 때문에 많은 관심의 대상이 되고 있다.[1,2] 그러나, 거의 모든 self-assembled 3차원 성장은 islands 사이의 배열을 마음대로 할 수 없으며, island의 크기와 밀도를 조절하기가 힘들다. 따라서, 보다 광범위한 응용을 위해서는 양자점의 크기분포 조절, 균일성, 위치등의 조절이 가능해야 한다. 본 연구는 MBE법을 사용한  $In_xGa_{1-x}As$  양자점의 선택 성장에 관한 것으로서, 특히 전자선 리소그래피법으로 준비된 갈륨산화막( $Ga_2O_3$ )을 마스크 물질로 사용하여  $In_xGa_{1-x}As$  양자점을 선택적으로 성장하는데 초점을 맞추었다. 이 방법의 장점은 양자점의 크기와 위치가 산화막 패터닝과 self-assembled 양자점의 성장조건에 따라서 조절될 수 있다는 것이다.

### 2. 실험

반질연성 GaAs(100) 기판위에 갈륨 산화막을 RF 스퍼터링법을 통해서 증착시켰다. 전형적인 산화막의 두께는 대략 30 nm 정도이다. 산화막은 4%의 polymethylmethacrylate (PMMA)를 사용해서, 전자선 리소그래피(JSM 6400 SEM, JEOL Co.)를 35 keV에서 작동시켜서 패터닝하였다. 전자빔 주사량과 빔 probe 전류는 각각 1.4 nC/cm 와 6 pA이다. 산화막의 표면에 0.1  $\mu m$  폭을 갖는 점과 선을 0.3~0.9  $\mu m$ 의 다양한 간격으로 패터닝함으로써 self-assembled InGaAs 양자점구조의 선택 성장을 위한 기판준비를 하였다. 분자선 에피택시(MBE; VG80H MK-II)법으로 self-assembled InGaAs 양자점을 성장시켰다. Self-assembled InGaAs 양자점의 형성은 beam equivalent pressure가  $1 \times 10^{-5}$  torr인 As flux 하에서, 25% 의무주기로 In과 Ga 분자선을 주입함으로써 수행된다. Self-assembled  $In_{0.43}Ga_{0.57}As$  양자점의 성장률은 0.40 ML/sec 이다. 에피택시층의 표면에서 양자점 형성시 발생하는 2차원에서 3차원로의 성장방식변환은 MBE 챔버에 부착된 reflection high energy electron diffraction(RHEED) pattern으로 확인하였다. 그리고 Field-emission scanning electron microscopy(FE-SEM)과 atomic force microscopy (AFM)로 양자점구조를 확인하였다.

### 3. 결과 및 논의

그림 1은 전자빔에 의해 패터닝된 갈륨산화막위에 선택적으로 형성된 3D 구조의 AFM 형상이며, 이는 InGaAs 양자점의 선택 성장이 갈륨산화막을 마스크물질로 사용하고 MBE법으로 성공적으로 성장할 수 있음을 나타내는 것이다. 전자빔에 의해 0.1  $\mu m$ 의 폭으로 패터닝된 영역은 에칭과정 중에 다소간 더 넓어진 경향이 있으나 비교적 양호하게 패터닝 되었음을 알 수 있다. 그림 1(a)는 reference시료의 경우로써, 패터닝 되지 않은 GaAs(100) 기판에 형성된 전형적인 양자점의 모습이다. 성장된 양자점들의 모습은 반구모양으로 그 밀도와 크기, 그리고 높이는 각각  $3 \times 10^9 cm^{-2}$ , 50 nm, 4 nm이다. 세가지 다른 간격(spacing) 즉, 0.3  $\mu m$  ( $S_1$ 로 표시함), 0.6  $\mu m$  ( $S_2$ 로 표시함), 0.9  $\mu m$  ( $S_3$ 로 표시함)을 갖도록 패터닝된 영역들에서 선택적으로 형성된 양자점들의 모습을 그림 1(b)~(d)에 나타내었다.  $In_{0.43}Ga_{0.57}As$  양자점들이 산화막의 패터닝된 영역에만 형성되었음을 알 수 있다. 동일한 성장 조건하에서 패터닝 되지 않은 기판에서 보다 산화막의 패터닝된 영역에서 양자점들이 뭉쳐져 이루어지는 3D island들이 더 쉽게 이루어지는 것을 알 수 있다. 산화막이 패터닝된 기판의 경우 3D island의 모양은 타원형의 모양에 가까운데, 이는 패터닝된 영역에서 개별적으로 생성된 양자점들이 서로 뭉쳐지면서 발생하는 것으로 생각된다. 또한 양자점들간의 뭉쳐짐이  $S_1$ 이나  $S_2$  같이 좁은 패터닝 간격을 갖는 기판에서 보다  $S_3$  같이 비교적 넓은 패터닝 간격을 갖는 기판에서 더 용이하게 발생한다는 것이 흥미롭다. 한편 패터닝되지 않은 기판에서 성장 중지시간(interruption time)동안 개개의 양자점들이 뭉쳐지는 것은 패터닝 되지 않은 기판에서 보다 패터닝 산화막위에서 더 자주 발생한다. 이것은 In과 Ga adatom의 migration이  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  처럼 각기 다른 패터닝 간격을 갖는 영역에 따라 조금씩 차이를 보여주는 것이다. 즉,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ 의 간격 영역 위의 adatom들은 패터닝된 영역으로 이동해서, 서로 다른 모양의 3D island를 형성하게 되는 것으로 사료된다. 패터닝되지 않은 GaAs 기판과 패터닝된 산화막 기판간에 형성된 3D island의 차이는 산화막 표면으로부터 이동해오는 In과 Ga의 adatom들의 총량과 관련 있게 되는 것이다. 한편 갈륨산화막에서는 다결정의 성장이 발생하지 않았다. 이때 기판의 온도는 510  $^{\circ}C$  이었으며, 패터닝된 갈륨 산화막위의 선택성을 향상시키기 위해서 In과 Ga source의 주입 후에 5초간의 성장중단을 하였다. 이는 패터닝된 산화막 영역에 형성된 양자점의 분포와 관련된 성장조건 뿐만 아니라, 산화막에서의 보다 나은 선택 성장을 꾀하기

위한 성장조건도 동시에 고려해야 한다는 것을 의미한다. 상기와 같은 양자점의 선택적 배열은 novel electronics 또는 신기능의 optical 소자 제조에 응용가능하기 때문에 매우 흥미있는 결과로 사료된다.

#### 4. 결론

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  양자점(quantum dots : QDs)의 선택성장에 관한 연구를 분자선 에피택시법을 통하여 수행하였다. 특히 전자선 리소그래피(electron beam lithography)를 사용해서 갈륨산화막( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ )을 미세 패터닝하여 GaAs(100) 기판 위에  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  양자점들 특정 지역에 선택적으로 성장하였다. 산화막 위에서 In과 Ga adatom들의 migration과 desorption이 MBE를 사용한 양자점의 선택성장에 매우 중요한 요소가 됨을 확인하였다. 특히 성장온도, 2D에서 3D로의 표면전환(morphological transformation), 그리고 성장 중단시간(interruption time)의 영향에 대해서 조사한 후, 갈륨산화막의 stripe pattern 영역에 양자점을 배열시키는데 성공하였다. 이와같은 양자점의 선택적 배열은 novel electronics 또는 신기능의 optical 소자제조에 응용가능하리라 기대된다.

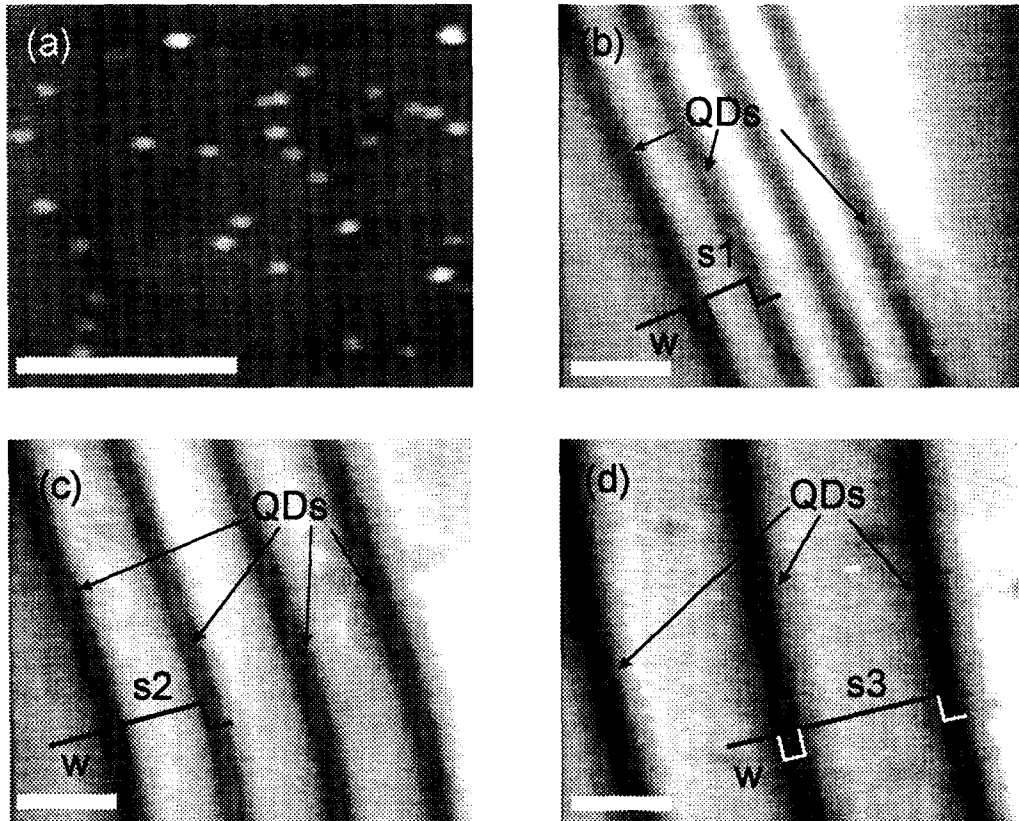


Fig. 1. AFM images of the QDs formed on nonpatterned GaAs (100) substrate(a), and the images of selectively formed 3D islands on the patterned gallium oxide layer with (b) 0.3  $\mu\text{m}$  (c) 0.6  $\mu\text{m}$ , and (d) 0.9  $\mu\text{m}$ . The markers represent 0.5  $\mu\text{m}$  length.

#### 참고문헌

- [1] C. Sikorski and U. Merkt, Phys. Rev. Lett. **62**, 2164 (1989).
- [2] M.A. Reed, J.N. Randall, R. J. Aggarwal, R.J.Matyti, T.M. Moore, and A.E. Wetsel, Phys. Rev. Lett. **60**, 535 (1988).

#### 감사의 글

본 연구는 KIST-2000 과제 및 과기처 미래원천 과제의 지원을 받아 이루어 졌습니다.