

## 선택적 에피 성장법에 의한 GaAs/AlGaAs 다층구조 및 InGaAs/GaAs 양자세선의 성장 및 photoluminescence 연구

김성일\* · 김영환

한국과학기술연구원 시스템연구부 반도체 소자실  
(논문접수일 : 2003년 6월 3일)

### Selectively Grown AlGaAs/GaAs Multilayers and InGaAs/GaAs Quantum Wire Structures Grown by Low Pressure MOCVD

Seong-Il Kim\* and Young-Hwan Kim

Semiconductor Devices Lab., Korea Institute of Science and Technology, Cheongnyang, Seoul 130-650, Korea  
(Received Jun 3, 2003)

#### 요 약

저압 MOCVD 장치를 이용하여 선택적 에피 성장 (selective area epitaxy) 기술을 개발하고, 이 기술을 이용하여 InGaAs/GaAs 양자세선(quantum wire) 구조를 성장하였다. SiO<sub>2</sub>로 선택적으로 마스크된 GaAs 기판위에 AlGaAs/GaAs 다층 구조 및 InGaAs/GaAs 양자세선 구조를 저압 MOCVD 방법으로 성장하였다. 매끄러운 사면을 갖고 끝 부분이 뾰족한 삼각형 구조의 양자세선 구조가 선택적 에피 성장법에 의해 자발적으로 형성되었다. 선택적 에피 층 성장을 위한 최적 조건을 알기 위해 먼저 GaAs/AlGaAs 다층구조에 대하여 여러 가지 성장변수들에 대하여 조사하였다. 성장 변수들은 성장률(growth rate), V/III 비 및 성장온도, 패턴의 정렬 방향 등이다. 양자세선에서 나오는 발광은 975 nm로 분석되었다. 측정 온도가 증가됨에 따라 삼각형 구조의 사면의 양자우물에서 나오는 발광은 급격하게 감소하였다. 그러나 양자세선에서 나오는 발광은 양자우물에서 나오는 발광에 비해 서서히 감소하였고, 50 K 이상의 온도에서는 양자세선에서 나오는 발광의 세기가 더 커졌다.

**주제어** : 선택적 에피 성장법, 양자세선, 저압 MOCVD, 주사전자현미경

#### Abstract

Using low pressure metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD), we have developed selectively area epitaxy (SAE). Using the developed SAE technology, we have grown AlGaAs/GaAs multi layers and InGaAs/GaAs quantum wire structures on the selectively SiO<sub>2</sub> masked GaAs substrates. We have obtained triangular shaped AlGaAs/GaAs and InGaAs/GaAs structures with sharp tips and smooth sidewalls. To find the optimum conditions, several growth parameters such as growth rate, V/III ratio, growth temperature, and direction of the opening stripes were investigated. The emission peak from quantum wires was observed at 975 nm. With increasing of temperature the emission intensity from side wall quantum wells decreased abruptly. But the intensity from quantum wires decreased slowly compared to that of side wall quantum wells and it became even stronger from above 50 K.

**Key Words** : Selective Area Epitaxy, quantum wire, low pressure MOCVD, SEM

## 1. 서 론

최근에 양자세선이나 양자점과 같은 저차원 양자구조의 제작이 집중적으로 활발하게 연구되고 있다 [1-4]. 그 이유는 저차원 양자구조에서는 광전이(optical transition) 또는 전기적 수송(electrical transport) 현상이 현저하게 개선되기 때문이다.

저차원 양자구조를 제작하기 위해서는 수평 방향의 크기를 잘 제어할 수 있는 것이 중요하다. 이와 같은 저차원 양자구조를 제작하기 위해 여러 가지 접근 방법이 제안되어 왔다. MOCVD 방법에 의한 선택적 에피 성장법은 반도체 구조의 수평 방향을 직접 제어하는데 더 유용한 방법이다 [3-6]. MOCVD 방법으로 성장한 기존의 결과들 [4-5]과 비교하여 볼 때, 본 실험의 결과 매끄러운 사면을 갖고 끝 부분이 뾰족한 삼각형 구조가 선택적 에피 성장법에 의해 자발적으로 형성되었음을 알 수 있다.

본 연구에서는 매우 선택적으로 성장된 다층구조 및  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  양자세선 구조의 최적 성장조건 및 특성들에 대하여 논의한다. 성장된 구조의 벽개면 및 표면 형상(surface morphology)을 주사전자현미경으로 분석하였고, 기 성장된 구조의 광학적 특성을 분석하기 위해 PL 측정을 수행하였다.

## 2. 실험방법

MOCVD 성장은 저압(76 torr) 수평형 리액터에서 수행되었고 적외선(IR) 가열 방법을 사용하였다. 사용재료는 trimethylgallium(TMg) trimethylaluminum(TMA), trimethylindium(TMI), 100 % arsine과 수소에 희석된 500 ppm  $\text{SiH}_4$  기체 등이다.  $\text{SiO}_2$ 로 패턴을 만든 GaAs 기판을 리액터에 장입한 후 표면에 형성될 수 있는 산화막을 제거하기 위해  $800^\circ\text{C}$ 에서 실험 전 열처리(pre-heating)를 하였다. 그 다음 원하는 성장 온도로 온도를 내린 다음 미리 설계된 AlGaAs/GaAs 다층구조 또는 InGaAs/GaAs 양자세선 구조를 성장하였다. 성장온도는  $550^\circ\text{C}$ 에서  $750^\circ\text{C}$ 까지 변화시켰고 V/III 비는 50에서 200까지 변화시켰다.

## 3. 실험 결과 및 논의

### 3.1 선택적 에피성장에 의한 GaAs/AlGaAs 다층 에피층 성장

그림 1은 GaAs/AlGaAs 다층 에피층 및 InGaAs 양자세선구조 제작을 위한 제작공정 개요도이다. 제 1단계는 플라즈마 강화 화학증착법(Plasma enhanced vapor deposition, PECVD)에 의한  $\text{SiO}_2$  증착과 포토레지스트(photoresist, PR) 증착이다. 다음 단계는 전자빔 또는 광학적 사진 식각(lithography) 방법으로 [110] 또는 [110] 방향과 나란하게 패턴을 형성한다. PR과  $\text{SiO}_2$ 층은 감광제(developer)와 buffered HF 용액으로 각각 제거한다. 최종 단계는 제작된 기판을 사용하여 다층구조 및 양자세선 구조를 형성하는 것이다.

본 연구에서는 먼저 선택적 에피 성장법에 의해  $\text{SiO}_2$ 로 마스크된 GaAs 기판 위에 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층구조를 성장하였다. 선택적 에피 성장법의 최적

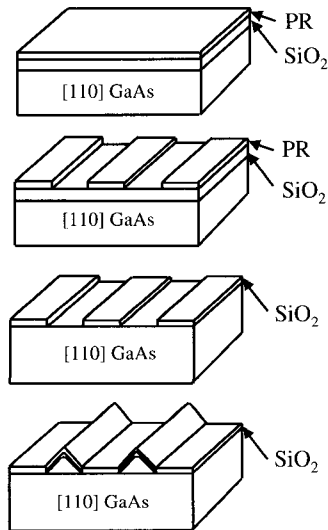


그림 1. GaAs/AlGaAs 다층구조 및 InGaAs 양자세선 구조 제작공정 개요도. (a) PECVD에 의한  $\text{SiO}_2$ 의 증착, (b) 기판 위에 PR을 입히고, 사진 식각(optical lithography) 방법으로 패턴을 형성, (c) PR과  $\text{SiO}_2$  제거, 및 (d) MOCVD에 의한 다층 구조 및 양자세선 제작.

조건을 찾기 위해 성장률 (growth rate), V/III 비, 성장 온도 및 패턴의 방향 등 여러 가지 성장 조건들이 조사되었다.

첫째, 성장률이 1.0  $\mu\text{m}/\text{hour}$  이상이 되면 성장된 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층구조의 표면은 나빠지게 되고  $\text{SiO}_2$  위에도 입자들이 달라붙게 된다.  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 의 표면 형상은 GaAs 보다 성장률에 더 민감하다. 이것은 성장표면에서의 Al의 이동속도가 Ga의 이동속도보다 더 느리기 때문이다 [5]. 따라서 본 연구에서는  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 의 성장률을 0.52  $\mu\text{m}/\text{hour}$ 로 하고 GaAs의 성장률을 0.7  $\mu\text{m}/\text{hour}$ 로 고정하였다.

둘째, 패턴의 방향에 대한 효과를 조사하였다. 그림 2는 600°C에서 성장한 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층구조를 보여준다. 그림 2(a)에서 스트라이프 패턴은 [110] 방향으로 정렬되어 있고, 그림 2(b)에서는 [110] 방향으로 정렬되어 있다. GaAs와 AlGaAs의 경계면을 선명하게 관찰하기 위해  $\text{KFe}(\text{CN})_6$ 를 사용하여 스테인 에칭을 한 후 주사전자현미경으로 단면을 관찰하였다. 그림 2(a)와 그림 2(b)에서 명확하게 볼 수 있는 바와 같이 양자세선을 제작하기 위해서는 [110] 방향으로 정렬된 패턴을 사용하는 것이 더 유리하다.

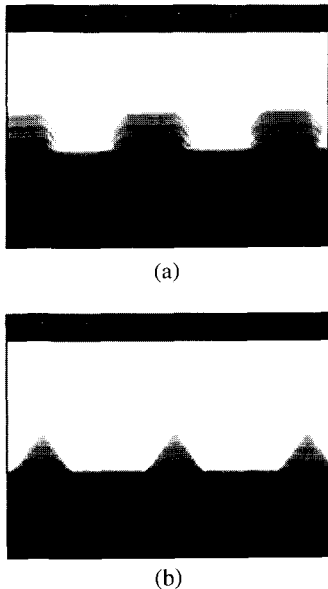


그림 2. 600°C에서 성장한 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층구조의 단면사진. (a) [110] 방향, (b) [1 $\bar{1}$ 0] 방향.

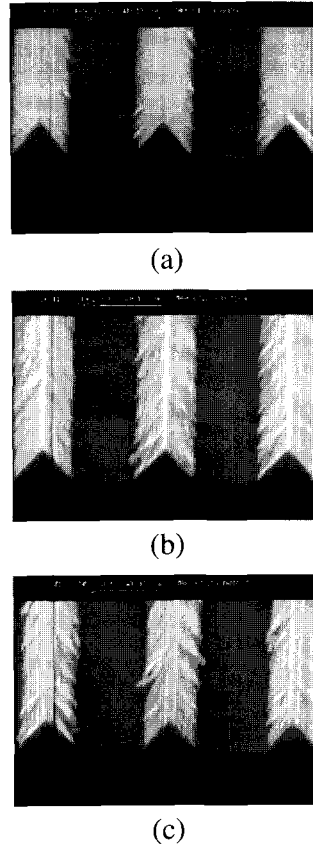


그림 3. GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층구조의 단면사진 (a) [110] 방향, (b) [1 $\bar{1}$ 0] 방향, (c) 700°C.

셋째, GaAs/AlGaAs 다층구조의 최적 조건을 알기 위해 여러 가지 V/III 비에 대하여 조사하였다. V/III 비는 50, 100 및 200이 사용되었고, V/III 비가 100과 200 일 때는 표면형상이 우수하였으나, V/III 가 50 일 때는 표면형상의 특성이 나빠졌다.

넷째, 여러 가지 성장 온도에 대하여 선택 성장 방법으로 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층 구조를 성장하고 표면형상을 조사하였다. 그림 3은 (a) 600°C, (b) 650°C 및 (c) 700°C에서 성장한 GaAs/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$  다층구조의 주사전자현미경 사진들이다. 600°C에서 성장한 구조의 표면이 가장 우수한 표면 형상을 보여준다. 또한 성장온도가 증가됨에 따라 표면형상의 특성이 나빠지고, 550°C에서 성장한 구조의 표면형상도 600°C에서 성장한 것에 비해 특성이 열화되었다.

### 3.2 선택성장법에 의한 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 양자 세선 제작

위 실험에서 얻어진 기본적인 정보를 이용하여 InGaAs/GaAs 양자세선 구조를 성장하였다. 그림 4는 SiO<sub>2</sub>로 마스크된 GaAs 위에 성장된 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 구조의 단면 주사현미경 사진이다. 그림 4에서 성장된 다층구조는 GaAs(40 nm)/Si-delta doped layer/GaAs(7 nm)/InGaAs(5 nm)/GaAs 버퍼 층으로 구성되어 있다. 성장온도는 600 °C 이고 SiO<sub>2</sub>로 마스크된 표면에는 아무 것도 증착 되지 않았음을 알 수 있다. 성장된 구조의 측면들은 {111} B면들이고 완전한 경면임을 알 수 있다. (111) B면이 경면인 이유는 (100) 면에 비해 (111) B면 위에서는 원자들의 이동속도가 더 빠르기 때문인 것으로 추정된다 [4].

그림 5는 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 양자세선 구조의 PL 스펙트럼을 온도의 함수로 측정한 것이다. 실선은 10 K 에서 측정한 PL 스펙트럼을 나타내고, 다른 선들은 각각의 온도에 대응한다. 측정된 PL 스펙트럼에는 3개의 주요한 피크가 존재하는데, 각 피크들은 양자세선, 측면의 양자우물 그리고 GaAs 기판 및 버퍼로부터 나온다고 추정된다. 그림에 삽입된 구조는 각각의 피크가 나오는 위치를 보여준다. 첫째, 10 K에서 관측된 PL 피크에서 947 nm에서 나오는 피크는 (111) B측면의 양자우물에서 나오고, 이 양자우물은 성장 중에 형성되는 삼각기둥의 측

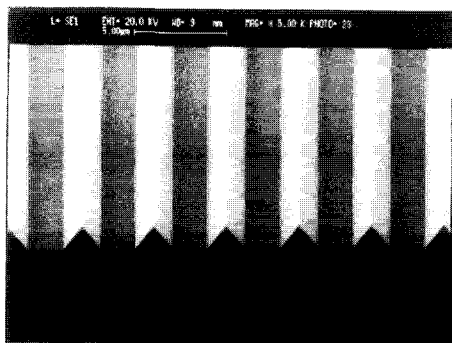


그림 4. In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 양자세선 구조의 단면 주사현미경 사진. 스트라이프 패턴은 [110] 방향으로 정렬되어 있다.

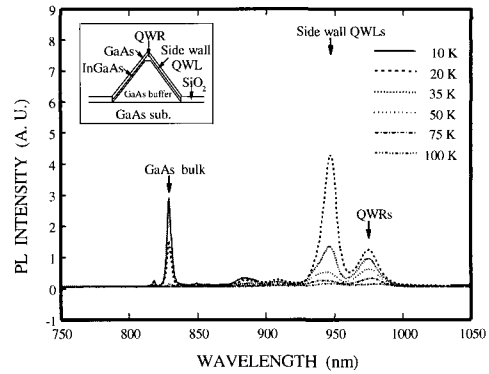


그림 5. 온도의 함수로 측정된 Si 델타 도핑된 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 양자세선 구조의 PL 스펙트럼. 실선은 10K에서 측정된 PL 스펙트럼을 나타내고, 다른 선들은 각각의 온도에 대응한다. 삽입된 그림은 피크가 나오는 양자세선, 측면의 양자우물 그리고 GaAs 기판 및 버퍼의 각각의 위치들을 보여준다.

면에서 자발적으로 생성된다. 둘째, 975 nm 피크는 양자세선에서 나오고, 상대적으로 강한 발광은 양자세선구조의 측면 방향으로 나오는 무수하게 많은 여러개의 피크들이 중첩되었기 때문이다. 셋째, 818 nm 에서 나오는 비교적 약한 피크는 GaAs 버퍼 층과 기판에서 연유한다.

10 K의 저온에서는 삼각기둥의 측면에 있는 (111) B면의 양자우물에서 나오는 947 nm 피크가 가장 강하다. 그러나, 온도가 증가함에 따라 (111) B면에서 나오는 피크는 급격하게 감소한다. 양자세선으로부터 나오는 피크도 온도가 증가함에 따라 감소한다. 그러나 감소되는 비율은 양자우물에서 나오는 피크의 감소 비율보다 작다. 또한 50 K 이상의 온도에서는 양자세선의 발광 피크의 세기는 양자우물에서 나오는 피크의 세기 보다 더 강해진다. 따라서 선택적 성장법에 의한 양자세선 구조는 양자세선 반도체 레이저에 응용될수 있을 것이다.

InGaAs 에피층의 성장, 특히 삼각형 구조의 성장에 있어서, 인듐의 공간 분포는 일정하지 않게 된다. 왜냐하면 삼각형 구조에서 (100) 윗면쪽으로의 인듐의 이동은 매우 빨라서 (111) B방향의 측면 양자우물 영역에 비해 인듐이 더 많이 함유된 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As

( $x > 0.2$ )가 성장되기 때문이다 [4]. 따라서 측정 온도가 상승하면 캐리어들은 양자우물 영역에서 양자세선 영역으로 용이하게 공급될 수 있다.

도에서는 양자세선에서 나오는 피크의 세기가 양자우물에서 나오는 피크의 세기 보다 강해졌다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 먼저 선택 성장법으로 AlGaAs/GaAs 다층 구조의 에피층을 성장할 때 성장속도, V/III 비 및 성장온도 등 여러 가지 변수들을 변화시키면서 최적 조건을 구하였다. 그 결과 얻어진 정보들을 활용하여 매끄러운 (111) B 표면을 가진 InGaAs/GaAs 양자세선 구조를 성장할 수 있었다. 양자세선 구조는 저압 MOCVD 장치를 사용하여 성장하였고 SiO<sub>2</sub>로 마스크 된 GaAs 기판을 사용하였다. 성장된 양자세선 구조의 광학 특성을 개선하기 위해 급속 열처리를 하였고, 성장된 에피층의 단면구조와 발광 특성을 조사하기 위해 주사전자현미경과 PL 측정이 사용되었다. 양자세선에서 나오는 피크는 975 nm이었다. 측정 온도가 증가함에 따라 측면 양자우물에서 나오는 피크의 세기는 급격하게 감소하였고, 50 K 이상의 온

#### 참 고 문 헌

- [1] E. Kapon, M. Walther, D.M. Hwang, E. Colas, C. Caneau, and R. Bhat, in *Phonons in Semiconductor nanostructures*, eds. J.P. Leburton, J. Pascual (Academic Publishers, Dordreche, 1993) p. 317.
- [2] Y. Kim, S. Yuan, R. Leon, C. Jagadish, M. Gal, M. Johnston, M. Phillips, M.S. Kalceff, J. Zou, and D. Cockayne, *J. Appl. Phys.* **80**, 5014 (1996).
- [3] T. G. Kim, J. H. Park, Y. Kim, S. I. Kim, C. S. Son, M. S. Kim, E. K. Kim, and S. K. Min, *Semicon. Sci. Technol.* **11**, 1214 (1996).
- [4] M. Kappelt, M. Grundmann, A. Krost, V. Turck, and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 3596 (1996).
- [5] K. Shimoyama, N. Hosoi, K. Fujii, and H. Gotoh, *J. Crystal Growth* **145**, 283 (1994).
- [6] M. S. Kim, C. Caneau, E. Colas, and R. Bhat, *J. Crystal Growth* **123**, 69 (1992).