

## InGaAs/InP 양자 줄의 제작과 PL 특성

### Fabrication and PL property of InGaAs/InP quantum wires

고은하\*, 우덕하\*\*, 김선호\*\*, 우정원\*

\*이화여자대학교 물리학과, \*\*한국과학기술연구원 광기술연구센터

highmilky@hanmail.net

1차원 반도체 구조인 양자 줄(Quantum Wire)은 새로운 물리 현상의 가능성을 보여줄 것으로 기대된다.<sup>(1)(2)</sup> 이 구조에서 운반자는 2차원 퍼텐셜에 가두어지므로 1차원 퍼텐셜인 양자 우물에 갇힌 운반자보다 더 많이 양자화가 이루어져 이 운반자의 상태 에너지는 더 쪼개지며, 양자 줄의 상태 밀도는 에너지 준위에 대해 계단 함수가 아닌 변형된 Dirac  $\delta$  함수꼴을 가진다.<sup>(3)</sup> 그러나, 1차원 반도체 구조인 양자 줄이 나노(nano) 크기 내에서 만들어져야 하므로, 잘 정의된 양자 줄을 만드는 일은 기술상 매우 어려운 일이다. 양자 우물 구조에서 운반자는 결정을 키우는 방향을 따라 나노 크기의 활성 영역 안에 가두어지게 된다. 양자 줄 구조에서의 운반자는 결정 성장 방향뿐만 아니라 수직인 한 방향에서 각각 나노 크기를 갖는 활성 영역에 가두어져야 한다. 여기에서, 결정 성장 방향과 수직으로 활성 영역을 정의하는 것은, 결정 성장 방향과 평행하게 활성 영역을 정의하는 것보다 어려운 일이다.

양자 줄을 만드는 여러 방법 중 몇 가지만 소개한다. 첫 번째 방법은, ex-situ 로서, 양자 우물 구조를 성장시킨 후 전자 선속(electron beam)과 x 선을 이용하여 가는 줄을 그어 만든다. 크기를 제어하고 줄간의 간격을 조절할 수 있는 가장 효과적인 방법으로, 양자 우물을 습식(wet) 또는 건조(dry) 부식으로 양자 줄을 정의한 후 모양이 생긴 면에 다른 물질 층을 덮는 방식이라고 볼 수 있다. 다른 방법은 이온살 모음(focusing of ion beam) 기법을 이용하는 것이다. 두 번째 방법은, in-situ로서, 양자 줄을 결정 성장 동안 결정 성장관 내에서 정의하는 방식이다. 외부에 노출된 표면이 없어 표면 상태에 의한 영향이 줄어들어, 양질의 계면을 만들 수 있다.

본 연구에서는 첫 번째 방식(ex-situ)인  $1.55\mu\text{m}$  파장을 가지는 InGaAs 양자 우물 층을 사용하여 양자 줄을 제작하였다. 가는 줄을 형성하는 방법으로 레이저 선속의 간섭 현상을 이용한 리소그래피를 사용하였고, 습한 부식을 선택적으로 하였다. 광원으로 쓰인 파장  $325\text{nm}$ 의 He-Cd 레이저는 출력  $10\text{mW}$ 의 CW 레이저이다. 레이저에서 나온 빛은 여닫개(shutter)에 의해 노광 시간이 조절된다. 배율이 27인 UV 대물 렌즈와 지름  $5\mu\text{m}$ 의 바늘구멍(pin hole)으로 구성된 공간 거르개(spatial filter)는 레이저 빛의 높은 차수 방사를 제거하여 깨끗한 광속을 만들어 확산시킨 후 시준 렌즈(collimating lens)로 보낸다. 빛의 간섭현상을 일으키기 위한 UV 코팅을 한 거울은 시료와  $90^\circ$  각도를 이루도록 고정을 시키고 회전대 위에 설치하여 입사각의 변화를 줄 수 있도록 하였다.

충분히 활성 영역 층의 너비를 줄이기 위해 InGaAs 층을 우물 구조 위에 성장하여 마스크로 사용하여 선택 부식을 하였다. 너비를 줄여주기위하여 InGaAs 부식액을  $\text{H}_2\text{SO}_4$  계열로 사용하였다.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 의 부식 모양은 결정 방향( $01\bar{1}$ )에 대하여 부식되는 각도가 용액의 혼합 비율을 조절하여 주면  $50^\circ$  이상으로 굉장히 커서 너비를 많이 줄일 수 있다.

이러한 방법으로 만들어진 양자 줄의 단면 사진은 그림 1이다. 이 시료의 PL을 측정하여 양자 우물

구조의 PL 측정값과 비교하여 운반자의 2D 퍼텐셜 효과를 확인하였다. PL 측정은 여기 광원으로 532 nm의 파장을 갖은 Nd-YAG 레이저로 양자 줄의 광학적 특성을 연구하였다. 여기 power는 저온에서 3 mW이다. 그림 2에서 1441.3(0.8600 eV) nm의 PL 세기 최고점은 InP/InGaAs/InP의 양자 줄을 제작하지 않은 단일 우물 구조에서 측정된 값이며, 1430.0(0.8668 eV) nm에서 나타나는 높은 에너지의 PL 세기 최고점은 양자 줄 구조로부터 측정된 값이다. 광전이의 상대적인 행렬 요소는 광선택율에 의해 계산되어지는데 이는 나노 크기 영역에서 2차원 양자 가둠을 명확히 보여주게 된다. 이 실험에서 이용한 구조에서 운반자들은 InGaAs 층으로 모이게 되고 퍼텐셜 변화에 의해 측면으로 가두어지게 된다. 따라서, 퍼텐셜 변화로 인한 봉오리의 위치 변화를 볼 수 있다. 또한, 양자 줄의 제작 확인을 위해 PL 입사 선속의 편광 방향을 조절하여 세기 변화를 관찰하였다. PL 세기가 가장 강한 편광 방향과 가장 약한 편광 방향을 찾아서 세기를 비교해 본 결과는 그림 3과 같다. 시료에 입사하는 방향이 양자 줄에 수직인 방향인지 평행한 방향인지에 따라 PL 세기가 거의 2배정도 차이가 남을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 양자 줄이 제작되었음을 확인할 수 있다.

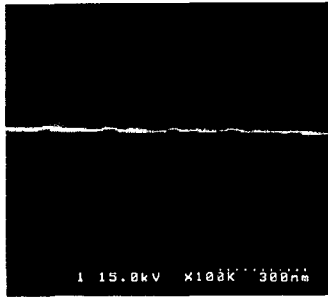


그림 1) 230nm 주기를 갖는 PR 무늬에 선택적 부식을 이용하여 양자 줄을 제작한 시료의 단면(10만 배율 SEM)

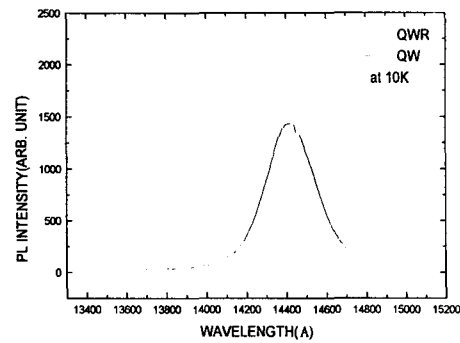


그림 2) QW과 QWR의 PL 측정치 비교 그래프(점선은 QWR, 실선은 QW)

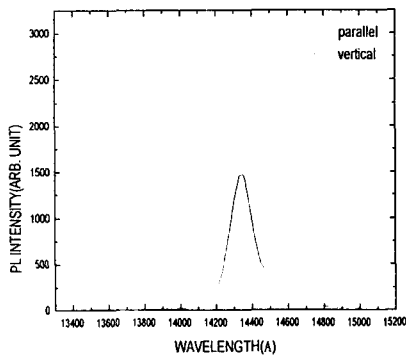


그림 3) 입사 선속의 편광 방향을 변화시켜 측정된 양자 줄 구조의 PL 측정 그래프

[참고문헌]

- (1) S. Schmitt-Rink, D. A. B. Miller, Adv. Phys. 38, 89 (1989)
- (2) Y. Arakawa, A. Yarive, IEEE J. Quantum Electron. 22, 1887 (1986)
- (3) Y. Arakawa, H. Sakaki, Appl. Phys. Lett. 40, 939 (1982)