

## GaAs-AlGaAs 다양자선편 레이저; MBE 성장과 특성 조사

## GaAs-AlGaAs Multi-Quantum Well Laser; MBE Growth and Characterization

우덕하, 이정승, 김대욱, 우종천  
(서울대학교 물리학과)

## 1. 머릿말

Quantum well(QW) laser란 반도체 laser의 일종으로 active layer를 반도체로 된 양자선편(quantum well)을 이용하는 첨단 광소자이다<sup>(1)</sup>. 반도체 laser의 특징으로는 그 크기가 아주 작고( $\sim 0.1\mu\text{m}$ )  $I_{th}$ 가 아주 작으면서도 단일 파장의 광원을 얻을 수 있으므로 광통신, compact disk, laser printer 등 그 응용이 무한하다.

QW에서는 전자의 subband level이 형성되는데, 이 subband level transition을 이용하면 epilayer의 두께 조절만으로 lasing하는 빛의 파장을 쉽게 조절하는, 소위 bandgap engineering 효과를 얻을 수 있다. 특히 QW laser에서는 전자가 2차원적(2-D) density of state를 갖는데, 2-D 상태의 전자와 정공의 재결합 발광 과정에서는 결정 성장 때 필연적으로 도입되는 dislocation이 nonradiative trap으로 작용하지 않는다. 따라서 QW laser는 다른 형태의 반도체 laser와 비교하여 낮은  $I_{th}$ 와 높은 양자 효율을 갖고 있다.

QW의 성장은 well의 두께가 50Å - 100Å정도가 되면서 분자층(monolayer, ML)의 정밀도로 성장을 조절하여야 된다. 따라서, QW은 MBE<sup>(2,3)</sup> 혹은 MOCVD<sup>(4)</sup> 등의 한정된 방법으로만 성장이 가능하다. 여기서는 MBE로 성장한 multi-quantum well laser의 초기 결과를 보고한다. 이는 국내에서 처음으로 성공적으로 제작한 QW laser의 연구 결과라고 생각된다.

## 2. 이론

Energy gap이 서로 다른 두 반도체를 번갈아 배치하여 아주 얇은 층상 구조를 갖게 만들면, 두 물질의 band gap 차이 때문에 양자선편(QW)이 형성된다. 이렇게 형성된 양자선편 구조 시료에서 전자의 상태는 흔히 간단한 1-D square well potential 모형으로 기술된다<sup>(5)</sup>.

양자선편이 한 개만 존재할 경우 양자선편에 속박된 전자와 정공은 각각 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$E = E_n + \frac{\hbar^2}{2m}(k_x^2 + k_y^2) \quad (1)$$

$$[P_x^2/2m + V(z)]\psi(z) = E_n\psi(z) \quad (2)$$

여기서 z 방향은 계면에 수직 방향이고,

$$V(z) = 0 \quad (0 < z < L_z) \\ = V_0 \quad (z < 0, z > L_z) \quad (3)$$

로 놓을 수 있다. 여기에 경계 조건을 도입하면 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$(2mE_nL_z^2/\hbar^2)^{1/2} = (n-1)\pi + 2\cos^{-1}(E_n/V_0)^{1/2} \quad (4)$$

단;  $n = 1, 2, 3, \dots$

위의 식 (4)에 계수법을 쓰면  $E_n$ 을 구할 수 있다.

앞의 모형은 양자선편이 한 개인 single quantum well에 해당되는 것으로, 본 실험에 사용한 시료와 같은 multi-quantum well (MQW)의 경우에는 Kronig-Penney 모형을 발전시킨 envelop function approximation(EFA)<sup>(6)</sup>이 흔히 사용된다. 그러나, 본 실험 결과와 같이 실온에서 전자와 정공의 재결합 과정에 의한 stimulated emission의 파장을 예측할 경우에는, 여러 변수가 개입되기 때문에 굳이 EFA를 쓸 필요가 없이 취급이 수월한 1-D square well 모형으로 충분하다.

## 3. MQW Laser의 제작

## 가) Wafer 성장

MQW laser에 쓴 wafer는 MBE 방법으로 제작되었으며, 두께는 RHEED 무늬의 세기의 변화를 이용한 phase-lock control 방법을 이용하였다. Wafer의 성장 과정을 기술하면 (100) 방향의 n<sup>+</sup>-GaAs 기판 위에 먼저 두께가 0.2 $\mu\text{m}$ 인 n<sup>+</sup>-GaAs buffer layer ( $n=1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )를 성장하고, 그 위에 0.8 $\mu\text{m}$ 의 N<sup>+</sup>-Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As cladding layer ( $N=1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )를 성장한 다음 MQW active layer를 성장하였다. MQW는 layer의 두께가 14 ML인 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As barrier와 두께가 36 ML(약 100 Å)인 undoped GaAs를 5 period가 되게 번갈아 성장하였다.(그림 1 참조) 그 위에 1.1 $\mu\text{m}$ 인 P<sup>+</sup>-Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As cladding layer

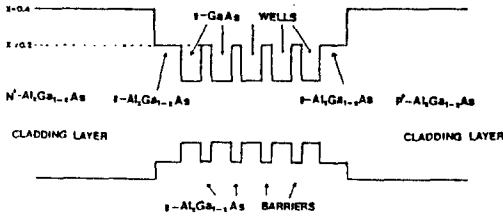


그림 1. Schematic band diagram of MQW laser

( $P=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )와  $0.2 \mu\text{m}$ 인  $P^{++}\text{-GaAs}$  contact layer ( $p=2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )를 성장하였다. 여기서 n-type dopant는 Si으로, p-type dopant는 Be으로 하였다.

나) Laser 제작

성장된 wafer의 기관 쪽을 lapping해서 두께가  $100 \mu\text{m}$  정도로 얇게 한 후, 이 면에 Au-Ge/Au를 증착시키어 n-type Ohmic contact를 만들고 반대 쪽에는 Au/Zn/Au로 p-type 전극을 만들었다. 다음 wafer를 길이가  $200 \mu\text{m}$  정도, 너비가  $100 \mu\text{m}$  정도 되도록 잘라서 긴 쪽에 수직인 cleavage면이 cavity mirror가 되도록 하였다.

이렇게 제작된 laser는 broad area형으로,  $I_{th}$ 나 monochromaticity 면에서는 stripe형 등보다 작동 특성이 떨어지나 일차적으로 wafer의 특성과 lasing 여부를 관측하기 위하여 만든 것이다.

4. 결과

전류 - 전압특성에서 cut-in 전압은 약 1.2 V, breakdown 전압은 약 8.5 V 로 측정되었다. 이 결과로부터 p-N 접합과 Ohmic 접촉이 양호하게 되었음을 알 수 있었다.

Laser의 출력 특성, 즉 L-I 특성 측정은 pulse로 구동하였다. Laser 출력은 calibrate된 photo-diode로 측정하였다. 그림 2는 구동 전류에 따른 빛의 출력을 보여 주고 있다. 출력이 급격히 직선적으로 증가하는 부분이 stimulated emission을 나타내고 천천히 증가하는 부분은 spontaneous emission이 일어나는 부분이다. 직선과 횡축이 만나는 점을 취하면  $I_{th}$ 는 85 mA이다.

Stimulated emission이 일어나는 직선 부분의 기울기로부터 미분 양자 효율, 즉 입력 전자수의 변화에 대한 출력 광자수의 변화의 비율 구하였다. Laser mirror 한 면 당 미분 양자 효율은 14 %로 측정되었다.

그림 2에는 MQW 와 비슷한 구조와 방법으로 제작된 DH laser의 L-I 특성이 비교되어 있다. 이 DH laser의  $I_{th}$ 는 170 mA, 양자 효율은 0.9%로 측정되었다.

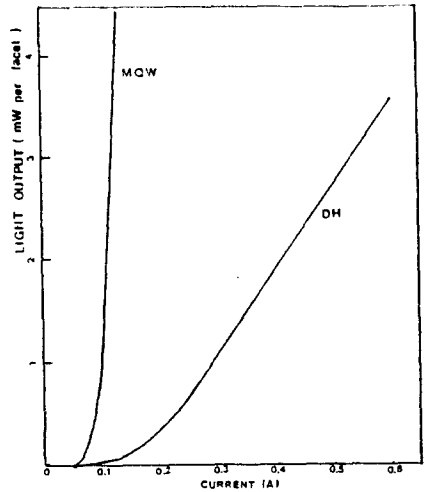


그림 2. Light output versus injected current

그림 3에 MQW laser의 문지방 전류( $I_{th}$ )보다 조금 높은 전류에서 나오는 stimulated emission의 spectrum이 있다.

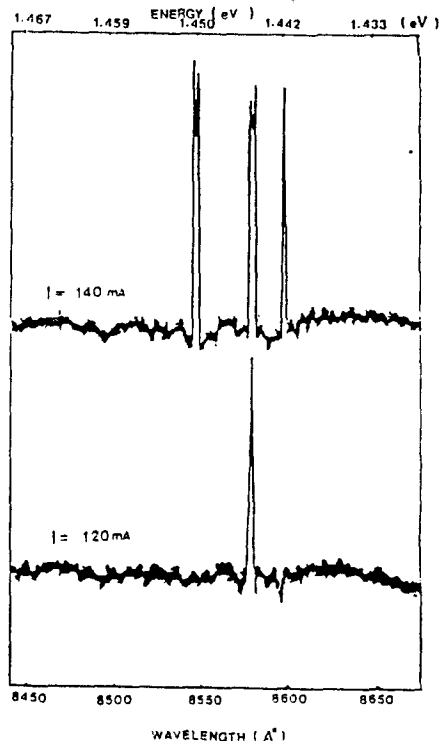


그림 3. Lasing spectra for MQW laser

Laser의 spectrum을 조사하면 120 mA에서는 파장이 8562 Å, 즉 광자 에너지가 1.448 eV인 단일 peak가 관측되었다. 그러나 140 mA에서는 8538 Å ~ 8588 Å 사이에서 여러 개 (8개이상)의 peak가 보이는 데, 이는 mirror의 편평도, 전극의 너비 등 broad area 형에서 기인되는 것으로 사료된다.

한편, spontaneous emission spectrum을 상온에서 관측하면, MQW laser의 경우에는 최고점이 8530 Å, 즉 1.453 eV에, DH laser의 경우에는 8745 Å, 즉 1.417 eV에 나타난다. 즉 DH laser의 경우보다 MQW laser의 spontaneous emission의 peak가 36 meV 높은 곳에서 관측된다.

결론적으로 이론에서 주어진 식 (4)로 계산하면 36 meV를 얻을 수 있는데 이것은 출력 파장이 quantum well의 subband의 형성에 기인하는 것임을 보여 주고 있다.

#### 5. 결 론 과 토 론

앞의 2 절에서 유도된 식(4)를 이용하여 폭이 100 Å인 QW의 전자와 정공의 subband level을 계산하면 각각 28.3 meV와 6.9 meV으로 그 합은 35.2 meV 인데, DH와 MQW laser의 spontaneous emission의 파장의 차이가 36 meV임을 고려할 때 잘 일치함을 알 수 있다.

또, 양자 효율도 mirror 당 14%로 합계가 28%가 되는데, 이는 DH laser의 0.9%에 비하여 약 16 배이다. 이 실험에서 얻은  $I_{th} = 85$  mA나 양자 효율 14%는 MQW laser로서는 만족스러운 값이 아니다.

그러나 이것은 본 실험에서 쓴 laser가 broad area 이기 때문인 것으로 사료된다.

이 MQW laser는 QW laser용으로는 처음 성장한 wafer에서 만들어진 것이다. 앞으로 성장 조건의 개선과 stripe형 laser 제작등 소자화 기술을 향상하여, 첨단 data에 접근할 수 있는 결과를 얻도록 계속 노력할 것이다.

알리는 말씀

본 연구는 과학기술훈 연구비의 도움으로 수행된 것입니다.

#### 참 고 문 헌

1. N. Holonyak, R. M. Kolbas, R. D. Dupuis, and P. D. Dapkus, IEEE QE-16, 170 (1980)
2. E. H. C. Parker, ed., The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy (Plenum, 1985)
3. M. A. Herman and H. Sitter, Molecular Beam Epitaxy (Springer-Verlag, 1989)
4. M. Razeghi, The MOCVD Challenge (Hilger, 1989)
5. R. Dingle, W. Wiegmann, and C. H. Henry, Phys. Rev. Lett. 33, 827 (1974)
6. G. Bastard, Phys. Rev. B25, 7584 (1982)