

## AlGaAs/GaAs multiple-quantum well에 대한 상온에서의 photoreflectance 특성연구

김동렬 · 최현태 · 배인호 · 김말문 · 한병국\* · 우덕하\*\* · 김선호\*\* · 최상삼\*\*

영남대학교 물리학과, \*경산대학교 물리학과, \*\*한국과학기술연구원  
(1996년 7월 10일 접수)

### A study of room temperature PR(photoreflectance) characteristics for AlGaAs/GaAs multiple-quantum well

D. L. Kim, H. T. Choi, I. H. Bae, M. M. Kim, B. K. Han\*,  
D. H. Woo\*\*, S. H. Kim\*\* and S. S. Choi\*\*

Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan, 712-749

\*Department of Physics, Kyongsan University, Kyongsan, 712-240

\*\*Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 130-650

(Received July 10, 1996)

**요 약** - MBE로 성장한 AlGaAs/GaAs multiple-quantum well(MQW)에 대하여 pump source를 He-Ne laser와 Ar laser를 사용하여 상온에서 PR(photoreflectance)측정을 수행한 결과 여러 subband transition peak을 관찰하였다. PR결과를 standard analytic line shape으로 fitting하여 n=1의 conduction band와 heavy hole 그리고 light hole transition peak인 C1-H1, C1-L1에 대한 energy값들을 얻었다. 또한 상온에서의 PL(photoluminescence)측정에서 C1-H1, C1-L1과 관련된 main peak와 shoulder를 관찰하였다. 이 값은 PR 측정값과 잘 일치함으로써 PL에서의 main peak와 shoulder가 C1-H1, C1-L1과 관련된 peak임을 확인할 수 있었다. 또한 envelope function approximation(EFA)을 이용하여 구한 이론값과 PR과 PL에서 측정된 실험값들을 비교하였다.

**Abstract** - PR spectra of MBE grown AlGaAs/GaAs MQW have been measured at room temperature using the He-Ne laser and the Ar laser as the pump source. We have observed various subband transition peaks and PR spectra were fitted to standard analytic line shape. Above that results, obtained us transition energy from n=1 conduction band to heavy hole(C1-H1) and to light hole(C1-L1) subband. Photoluminescence(PL) at room temperature showed main peak with a shoulder. Good agreement between PL and PR measured n=1 intersubband transition energies was confirmed that PL main peak with a shoulder is associated with the C1-H1, C1-L1 transition. Additionally, we have calculated the C1-H1 and C1-L1 intersubband energy within envelope function approximation(EFA).

## 1. 서 론

최근에 superlattice, quantum well, heterojunction과 같은 초미세 구조로 된 device의 중요성이 점차 증가하고 있으며[1,2], 그 구조들에 대한 편리한 특성 연구방법 또한 요구된다. 특성 연구방법에는 absorption spectroscopy [3,4], photoluminescence(PL)[3,5], PL excitation spectroscopy [3,5-7] 그리고 resonant Raman scattering[8]등이 있

으며, 이러한 방법을 통하여 material의 밴드구조에 대한 가치있는 정보를 얻을 수 있지만 대부분의 방법들이 복잡하거나 저온에서의 측정이 필요하다. Photoreflectance(PR)는 secondary light source에 의해 물질내의 electric field를 변조시키는 electromodulation의 비접촉식 방법이므로 비파괴적이고, 실제 device가 동작하는 room temperature에서도 sharp spectrum(derivative-like feature) [9]을 얻을 수 있기 때문에 반도체의 초미세구조 연구에

많이 적용되고 있다[10-12]. 특히 PR측정에 의한 multiple-quantum well(MQW)의 alloy composition, well width 그리고 interfacial quality에 대한 정보를 얻을 수 있고, 상온측정에서 allowed confined transition 뿐만 아니라 symmetry forbidden feature나 unconfined state를 관찰할 수 있다[10,12,13]. 본 실험에서는 MBE로 성장한 AlGaAs/GaAs multiple-quantum well(MQW)에 대하여 상온에서 PR측정을 수행하였으며, well에 수반되는 subband transition peak을 관찰하였다. 그리고 PR측정값을 standard analytic line shape으로 fitting하여 n=1의 conduction band와 heavy hole, light hole transition peak인 C1-H1, C1-L1에 대한 critical point energy를 구하였다. 또한 상온에서의 PL측정에서 C1-H1, C1-L1과 관련된 excitonic transition peak을 관찰하였고, envelope function approximation(EFA)을 이용하여 구한 이론값과 PR, PL측정에 의한 실험값들을 정량적으로 비교분석하였다.

### 2. 실험

본 실험에서 사용한 sample은 VG Semicon사의 VG-V80 MBE를 이용하여, Si-GaAs:CrO(100) 기판위에 30 periods의 AlGaAs/GaAs를 성장하였고, 성장시 온도는 580°C로 하였다. 성장중에 RHEED(reflection high-energy-electron diffraction) pattern들의 intensity oscillation에 의해 layer의 두께를 control하였으며 well과 barrier의 두께는 각각 70 Å과 100Å으로 하였다. 이때growth rate는 GaAs에 대해 1 μm/h, AlGaAs에 대하여 1.43 μm/h이었다. 또한 smooth interface를 얻기 위해 각각의 interface에서 interruption을 10초간 수행하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 PR측정 장치도이다. Pump beam으로는

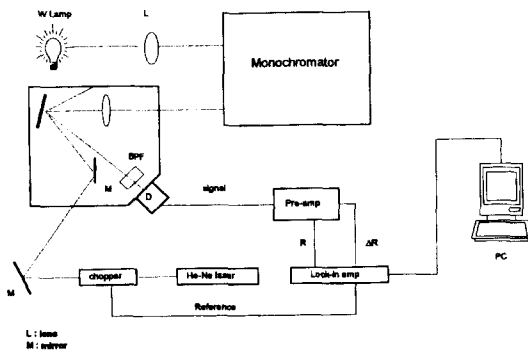


Fig. 1. Schematic diagram for photoreflectance.

He-Ne laser(6328 Å)와 Ar laser(5145 Å)를 사용하였고, laser의 modulating frequency는 chopper를 이용하여 200 Hz로 하였다. 그리고 probe beam으로는 500 W의 tungsten lamp를 사용하였으며, 0.25 m Spex 270 M monochromator를 통하여 1.35~2.0 eV범위로 energy scan하였고 sample에서 반사된 빛은 PIN silicon photodiode로 detect하였다.

### 3. 실험결과 및 논의

저전장 영역이나 QW에서의 PR spectra에 대한 line shape은 다음의 함수에 의해 fitting될 수 있다[14].

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} \left( \sum_{j=1}^p C_j e^{i\theta_j} (E - E_{g,j} + i\Gamma_j)^{-m_j} \right) \quad (1)$$

여기서 p는 critical point의 수이고, E는 probe beam의 energy, C, θ, E<sub>g,j</sub>, Γ<sub>j</sub>는 각각 j번째critical point의 amplitude, phase, energy, broadening parameter이다. m<sub>j</sub>는 critical point의 type과 derivative의 차수에 의존하는 parameter이다. m<sub>j</sub>=3은 two-dimensional critical point에 대한 third derivative이고, m<sub>j</sub>=2는 excitonic peak에 대한 Lorentzian function의 first derivative이다[15]. 본 실험에서는 C1-H1과 C1-L1에 대해서 m<sub>j</sub>=2로 하여 실험값에 대하여 fitting하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 AlGaAs(100 Å)/GaAs(70 Å) MQW에 대하여 상온에서 측정된 PR결과로서, 파장이 다른

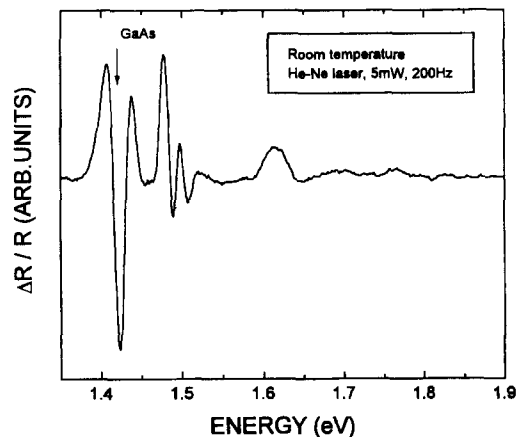


Fig. 2. Photoreflectance spectra of GaAs/AlGaAs MQW at 300 K using the He-Ne laser as the pump source.

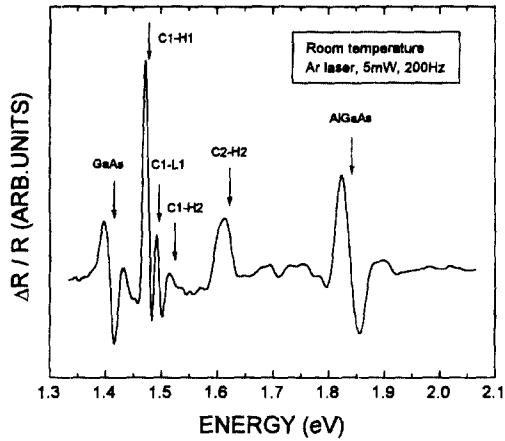


Fig. 3. Photoreflectance spectra of GaAs/AlGaAs MQW at 300 K using the Ar laser as the pump source.

He-Ne laser와 Ar laser를 pump source로 한 실험값이다. 약 1.42 eV 근처의 peak는 GaAs 기판으로부터 나타나는 GaAs의 direct gap이고, Fig. 3에 나타나는 1.8 eV 근처의 신호는 AlGaAs barrier peak이다. Fig. 2에서는 band pass filter의 영향으로 인하여 AlGaAs barrier 신호가 관측되지 않았다. AlGaAs barrier peak에 대하여 식 (1)을 이용하여 fitting한 결과 에너지값은 1.829 eV로 나타났으며, 이로부터 Al의 composition 값이 0.32임을 알 수 있었다[16]. Fig. 2와 Fig. 3에서 GaAs peak의 상대적 크기가 다를 수 있는데, 이것은 각 laser의 penetration depth가 다르므로[17] 이로 인해 GaAs 기판에 미치는 Ar laser의 modulation effect가 He-Ne laser 것보다 더 적기 때문으로 분석된다. GaAs와 AlGaAs 신호 사이에 여러 peak들이 관찰되었는데, 이는 conduction subband와 valence subband 사이의 transition peak들이다. C1-H1은 well에서의 첫 번째 heavy-hole subband에서 첫 번째 conduction subband의 transition을 표시하였다.  $n=2$ 의 C2-H2뿐만 아니라  $\Delta n \neq 0$ 인 C1-H2와 같은 forbidden transition도 관찰되었다.

Fig. 4는 상온과 9 K에서 측정된 photoluminescence (PL)의 결과이다. 상온에서의 PL 측정 결과 1.4790 eV에서 main peak이 관찰되었고, 약 1.495 eV 근처에서 shoulder가 관측되었는데 이들 peak는 high quality의 quantum well 구조에서 나타나는 free exciton peak으로 볼 수 있다[18]. 온도 9 K에서 PL 측정 결과 C1-H1의 peak만 나타나는데, 이는 온도가 감소함에 따라 C1-H1에서 carrier들의 probability의 증가로 인한 것으로 분석된다. 이때

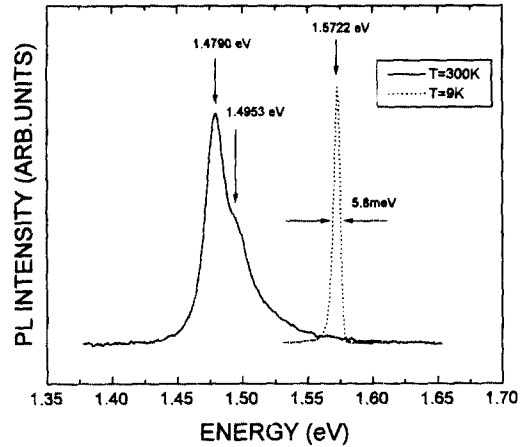


Fig. 4. Photoreflectance spectra of GaAs/AlGaAs MQW at 300 K (solid line) and 9 K (dotted line).

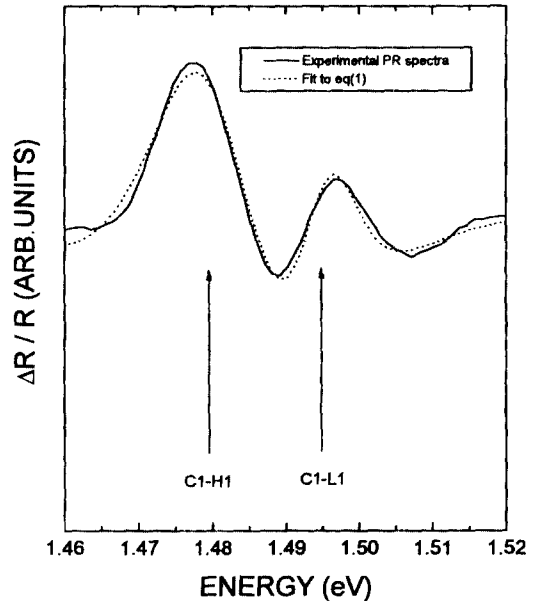
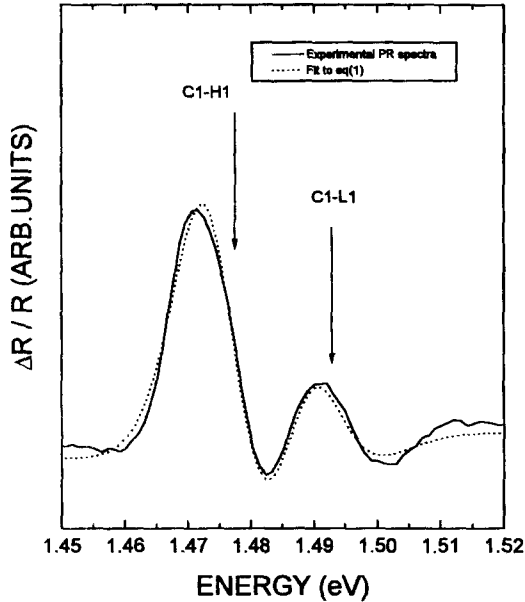


Fig. 5. Photoreflectance spectra of GaAs/AlGaAs sample at 300 K using He-Ne laser as pump source. The solid line is the experimental data while dotted line the least squares fit to Eq. (1).

C1-H1 exciton의 peak 에너지는 1.5722 eV이었으며 반치폭(FWHM)은 5.8 meV이었다. 온도가 감소하면 bulk GaAs band gap은 온도의존성함수[19]에 따라서 증가하고, 또한 well에서의 C1-H1 peak의 에너지값도 같은 함수로 증가한다. 9 K에서 GaAs band gap energy의 온도의존성에 의해 계산된 C1-H1의 값과 실제 PL 측정값에서



**Fig. 6.** Photoreflectance spectra of GaAs/AlGaAs sample at 300 K using Ar laser as pump source. The solid line is the experimental data while dotted line is the least squares fit to Eq. (1).

에너지가 3.2 meV 정도 차이가 나는데, 이 Stokes shift 값은 다른 high quality sample에서 측정된 값과 비슷하게 나타났다[18].

Fig. 5와 Fig. 6은 pump beam으로 He-Ne laser를 사용한 PR 측정 (Fig. 2)과 Ar laser를 사용한 PR 측정 (Fig. 3)에서 1.35~1.53 eV 범위에 대한 실험값과 fitting 값을 나타내었다. 여기서 실선은 실험값을 나타내고, 점선은 식 (1)에 의해서 fitting한 결과로 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

C1-H1과 C1-L1의 에너지는 He-Ne laser를 사용하였을 때 약 1.4794 eV와 1.4946 eV, Ar laser를 사용하였을 때는 약 1.4787 eV와 1.4944 eV로 나타났고, 서로 다른 pump source에 따른 peak의 에너지값들이 거의 일치하였다. 이는 well들이 깊이에 따라 uniform하게 성장되었음을 보여준다. 또한 상온에서의 PL 측정에서 main peak와 shoulder 값이 PR 측정에서 C1-H1과 C1-L1 값과 잘 일치함을 알 수 있고, 이는 main peak와 shoulder가 n=1의 conduction subband와 heavy-hole(C1-H1) 그리고 light-hole(C1-L1) subband transition에 기인한 peak임을 알 수 있다.

Table 1은 실험값과 이론값에 대한 C1-H1과 C1-L1의

**Table 1.** Experimentally determined energies and calculated energies from n=1 conduction band to the heavy hole(C1-H1) and to the light hole(C1-L1) subband

Measurement	Energy(eV)		Energy Difference (L1-H1)
	C1-H1	C1-L1	
PR(He-laser)	1.4794	1.4946	15.2
(Ar-laser)	1.4787	1.4944	15.7
PL	1.4790	1.4953	16.3
EFA	1.486	1.503	17

에너지값을 나타내었는데 이론값은 envelope function approximation(EFA)[20]을 이용하였다. EFA에 대한 parameter들로서  $m_c^*/m_0=0.0665$ [21],  $m_{hh}^*/m_0=0.45$ [22],  $m_{lh}^*/m_0=0.088$ [23]을 사용하였으며  $m_c^*$ ,  $m_{hh}^*$ ,  $m_{lh}^*$ 는 각각 GaAs의 electron, heavy-hole, light-hole의 effective mass이다. conduction band offset은 C1-H1과 C1-L1의 에너지 차이로부터 실험값과 이론값이 가장 근사한  $Q_c=0.64$ 를 사용하였고, valence band에 대한 band offset은  $(1-Q_c)\Delta E_g$ 와 같은 값을 가진다. 여기서  $\Delta E_g$ 는 well과 barrier의 밴드-갭 차이이다. EFA를 이용하여 구한 C1-H1과 C1-L1 transition 에너지값은 각각 1.486 eV, 1.503 eV이었고 exciton binding energy[24, 25]를 고려한다면 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

MBE를 이용하여 well과 barrier의 두께가 각각 70 Å, 100 Å인 30주기의 AlGaAs/GaAs multiple-quantum well (MQW)을 성장하였고, 특성조사를 위해 PR과 PL 측정을 하였다. pump source로 He-Ne laser와 Ar laser를 사용하여 상온에서 PR 측정을 수행한 결과 subband transition peak를 관찰하였고, standard analytic lineshape으로 fitting하여 C1-H1, C1-L1과 AlGaAs barrier peak에 대한 energy 값들을 구하였다. C1-H1과 C1-L1의 에너지값은 He-Ne laser를 사용하였을 때 1.4794 eV, 1.4946 eV이었고, Ar laser를 사용하였을 때는 1.4787 eV, 1.4944 eV이었고 pump source에 따른 에너지값들이 잘 일치함으로써 well들이 깊이에 따라 uniform하게 성장되었음을 알 수 있었다. 또한 AlGaAs barrier peak에 대한 에너지값으로부터 Al의 composition이 0.32임을 얻을 수 있었다. 그리고 상온에서의 PL 측정에서 n=1의 conduction band와 heavy hole(C1-H1), light hole(C1-L1)

excitonic transition peak와 관련된 main peak와 shoulder를 관찰하였으며, 이때 main peak의 에너지 값은 1.4790 eV이었고 shoulder는 약 1.4953 eV이었다. 이 값은 PR 측정에서의 C1-H1, C1-L1에 대한 에너지값과 잘 일치하였고, 이는 상온 PL에서의 main peak와 shoulder가 C1-H1과 C1-L1에 의한 peak임을 알 수 있었다. 또한 envelope function approximation(EFA)을 이용하여 C1-H1, C1-L1에 대한 transition 에너지를 구하였으며, 각각 1.486 eV, 1.503 eV이었다.

### 참고문헌

1. L. Esaki, IEEE. J. Quantum Electronics. **QE-22**, 1611 (1986).
2. H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, 315 (1987).
3. C. Weisbuch, R. C. Miller, R. Dingle, A. C. Gossard and W. Weigman, Solid state commun. **37**, 219 (1981).
4. H. Iwamura, H. Kobataski and H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys. **23**, L795 (1984).
5. R. C. Miller, A. C. Gossard, G. D. Sanders, Y. C. Chang and J. N. Schulman, Phys. Rev. **B32**, 8452 (1985).
6. R. C. Miller, D. A. Kleinman, W. T. Tsang and A. C. Gossard, Phys. Rev. **B24**, 1134 (1981).
7. P. Dawson, K. J. Moore, G. Duggan, H. I. Ralph and C. T. B. Foxon, Phys. Rev. **B34**, 6007 (1986).
8. J. E. Zucker, A. Pinczuk, D. S. Chemla, A. C. Gossard and W. Wiegman, Phys. Rev. Lett. **51**, 1293(1983); Phys. Rev. **B29**, 7065 (1984).
9. D. E. Aspnes, Surf. Sci. **37**, 418 (1973).
10. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard and J. Comas, Appl. Phys. Lett. **46**, 970 (1985).
11. P. Parayanthal, H. Shen, F. H. Pollak, O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook and W. T. Beard, Appl. Phys. Lett. **48**, 1261 (1986).
12. H. Shen, P. Parayanthal, F. H. Pollak, M. Tomkiewicz T. J. Drummond and J. N. Schulman, Appl. Phys. Lett. **48**, 653 (1986).
13. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook and W. T. Beard, Surf. Sci. **174**, 206 (1986).
14. D. P. Wang, C. T. Chen, H. Kuan, S. C. Shei and Y. K. Su, J. Appl. Phys. **78**, 2117 (1995).
15. D. E. Aspnes, "Handbook on Semiconductors", edited by T. S. Moss (North-Holland, Amsterdam, 1980), Vol. 2, p. 109.
16. H. J. Lee, L. Y. Juravel, J. C. Woolley and A. J. SpringThorpe, Phys. Rev. **B21**, 659 (1980).
17. Palik. D. E, "Handbook of optical constants of Solid" (Orlando, FL:Academic).
18. K. Fugiwara, N. Tsukada and Nakayama, Appl. Phys. Lett. **53**, 675 (1988).
19. H. C. Casey and M. B. Panish, "Heterostructure Lasers". (Academic, New York, 1978) pt. A.
20. G. Bastard, Phys. Rev. **B24**, 5693 (1981); **B25**, 7484 (1982).
21. S. Adachi, J. Appl. Phys. **58**, R1 (1985).
22. D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, Phys. Rev. Lett. **53**, 2173 (1984).
23. B. V. Shanabrook, O. J. Glembocki and D. A. Broide, Phys. Rev. **B39**, 3411 (1989).
24. D. F. Nelson, R. C. Miller, C. W. Tu and S. K. Sputz, Phys. Rev. **B36**, 8063 (1987).
25. R. L. Greene, K. K. Bajaj and D. E. Phelps, Phys. Rev. **B29**, 1807 (1984).