

분자선 에피택시법으로 성장된 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 슈우도형 고 전자 이동도 트랜지스터 구조의 광학적 특성

이동율 · 이철욱 · 김기홍 · 김종수 · 김동렬 · 배인호 · 전현무 · 김인수*

영남대학교 물리학과, *경운대학교 전자공학과
(1999년 9월 19일 접수)

The optical characteristics of $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ pseudomorphic high electron mobility transistor structure grown by molecular beam epitaxy

Dong-Yul Lee, Chul-Wook Lee, Ki-Hong Kim, Jong-Su Kim, Dong-Lyeul Kim,
In-Ho Bae, Hunmoo Jeon, and In-Soo Kim*

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

*Department of Electronic Engineering, Kyungwoon University, Kumi, 730-850, Korea

(Received September 19, 1999)

요 약 - Photoluminescence(PL)와 photoreflectance(PR)를 이용하여 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 슈우도형 고 전자 이동도 트랜지스터 구조에 대한 특성을 조사 하였다. 온도 10 K의 PL 측정에서 InGaAs 양자우물에 의한 e1-h1 및 e2-h1 전이 피크가 각각 1.322 및 1.397 eV에서 관측되었다. 온도 의존성으로부터 첫번째 가전자 띠와 두번째 가전자 띠의 에너지 차이는 약 23 meV로 나타났다. 또한 300 K에서의 PR 측정으로 e2-h2 및 e2-h1 전이에 의한 피크를 관측하였고, 두번째 전도 띠의 에너지 준위에 의한 피크가 띠 채움으로 인해 첫번째 전도 띠의 에너지 준위에 의한 피크보다 상대적으로 우세하였다. 반면에 PL 측정에서는 전자 가리게 효과 때문에 첫번째 전도 띠에 의한 피크가 우세하였다.

Abstract - We have analyzed characteristics for the structure of $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ pseudomorphic high electron mobility transistor (PHEMT) by photoluminescence (PL) and photoreflectance (PR) measurements. By the PL measurement at 10 K, we observed e1-h1 transition peak at 1.322 eV and e2-h1 transition peak at 1.397 eV in the InGaAs quantum well. We calculated value of 23 meV, the difference between the first energy level and the second energy level of a valence band by dependence of temperatures. Also, (e2-h2) transition signal was observed at 300 K by PR measurement. From the PR measurement, we recognized that the transition was dominated the second energy level of conduction band than the first energy level of conduction band due to band filling. The other hand, PL signal of the first energy level of conduction band was dominated because of the electron screening effect.

1. 서 론

슈우도형 고 전자 이동도 트랜지스터(pseudomorphic high electron mobility transistor; PHEMT)와 같은 변조 도핑된 구조는 전자 이동도가 크고, 이차원 전자 가스(two-dimensional electron gas; 2DEG)의 밀도가 높아 전하의 수송 특성이 뛰어나기 때문에 많은 연구와 응용의 대상이 되고 있다 [1, 2]. 고 전자 이동도 트랜지스터 HE 소자의 캐리어 공급층으로 균일하게 도핑한 AlGaAs 층을 사용하고 있으나, 최근에는 면도핑(planar

doping) 방법이 많이 사용되고 있다 [3-5]. 또한 PHEM의 경우, 채널층으로 InGaAs층을 사용함으로써 채널에서 보다 좋은 양자 우물이 형성되고, 띠 간격 불연속성도 커져서 GaAs를 채널층으로 사용하는 경우보다 이차원 전자 가스의 농도를 크게 할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 GaAs에 대한 변형(strain) 물질인 InGaAs를 사용함으로써 AlGaAs층의 Al 조성을 낮추어 DX center를 줄여 소자의 특성을 개선시킬 수 있다 [6]. 이러한 구조를 가진 소자는 높은 주파수에서 저잡음 특성과 소자의 동작 특성이 우수하다는 장점을 가지고 있다

이러한 장점에도 불구하고, PHEMT에서의 이차원 전자 가스의 물리적인 특성 및 소자에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 충분하지 않다.

본 연구에서는 반절연성 GaAs 기판 위에 분자선 에피택시법으로 성장시킨 PHEMT 구조에서 이차원 전자 가스의 특성을 자세히 알아보기 위해서 photoreflectance (PR)와 photoluminescence(PL)를 측정하여, 측정온도 및 여기광 세기의 변화에 따라 InGaAs 채널층의 이차원 전자 가스와 관련된 피크들의 거동을 조사하였다.

2. 실험

본 연구에서 사용된 시료는 분자선 에피택시법에 의해 PHEMT 구조를 반절연성 GaAs 기판 위에 성장하였으며, 성장된 시료의 단면과 전도 띠 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 먼저 6000 Å 두께의 불순물이 첨가되지 않은 GaAs 완충층과 130 Å 두께의 $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ 채널층을 성장시켰다. 이차원 전자 가스 층의 캐리어 공급원으로는 Si를 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 정도로 면도핑 시켰으며, 쇼트키 게이트층은 250 Å 두께로 불순물이 첨가되지 않은 $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$ 층을 사용하였고, $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

의 고 농도로 Si를 첨가시킨 GaAs cap 층을 차례로 성장하여 $Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ PHEMT의 구조를 만들었다. 성장된 에피층의 Hall 측정 결과 상온에서 이차원 전자 가스층의 캐리어 밀도는 $2.14 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 이고, 상온에서 전자 이동도는 $6100 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 이었다.

PR 측정은 변조 빔으로 He-Ne 레이저(6328 Å)를 사용하였고, 변조 주파수는 800 Hz로 하였다. 광원으로는 250 W 텅스텐-할로겐 램프를 사용하여 이를 초점거리가 0.27 m인 분광기(Spex 270 M)에 렌즈를 통해 집속시키고, 이 분광기를 통해 단색화된 빛을 시료에 입사시켜 시료로부터 반사된 빛을 p-i-n Si 포토다이오드에 입사시켜 lock-in 증폭기(EG & G PAR 5209)로 증폭한 값을 컴퓨터로 받아들였다.

PL측정은 여기광으로 He-Ne 레이저(6328 Å)를 사용하여 시료에 입사시키고, 시료로부터의 발광된 빛을 렌즈로 집속시켜 초점거리가 0.75 m인 분광기(Spex 750 M)에 입사시킨후 광전자 증배관으로 단색화된 빛을 검출하였다.

본 실험에서 PR 측정온도는 77-300 K, PL 측정온도는 10-300 K 범위에서 측정 하였다.

3. 이 론

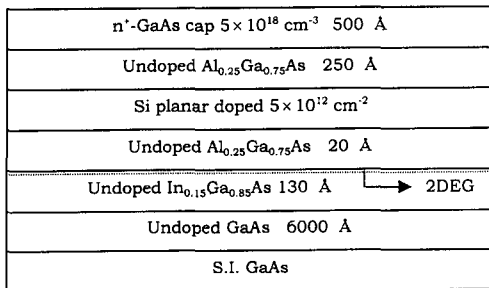
변조 분광학 신호는 Aspnes 방정식 즉, 3차 미분형 함수 형태로 나타나며 다음식으로 주어진다 [7, 8].

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re}[C e^{i\theta} (E - E_0 + i\Gamma)^{-n}] \quad (1)$$

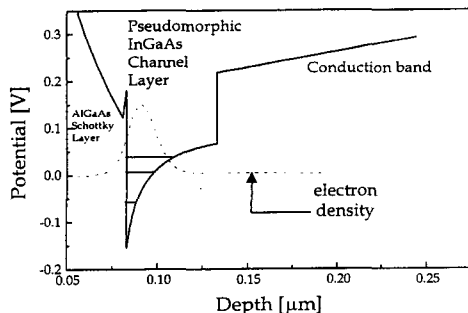
여기서, C는 진폭, θ 는 위상, E는 광자 에너지, E_0 는 띠 간격 에너지, Γ 는 평탄인자, 그리고 n은 임계점의 차원(3차원일 경우 $n=2.5$, 2차원일 경우 $n=3$, exciton일 경우 $n=2$)을 나타낸다.

반도체의 도핑농도에 관련된 내부 전기장 세기에 따라 저 전기장 영역과 고 전기장 영역으로 나눌 수 있다. 고 전기장 영역에서는 계의 특성 에너지 $\hbar\Omega$ 가 $\Gamma/3$ 보다 클 경우이며, 시료의 계면이나 표면에서 형성된 고 전기장으로 인해 띠 간격 에너지(E_0)보다 큰 영역에서 Franz-Keldysh oscillation(FKO)라는 형태의 신호가 관측되는데 다음과 같은 식으로 주어진다 [7].

$$\Delta R/R \propto \cos \left[\frac{2}{3} \{ (E - E_0) / \hbar\Omega \}^{3/2} + \pi(d-1)/4 \right] \quad (2)$$



(a) Cross sectional structure of PHEMT.



(b) Conduction band diagram.

그림 1. Conduction band diagram and cross sectional structure of pseudomorphic HEMT.

여기서, d 는 임계점 차원으로 직접 전이에서는 3으로 주어지며, 섹동 특성에너지 $\hbar\Omega$ 는 다음과 같다 [7].

$$\hbar\Omega = \left(\frac{e^2 E_i^2 \hbar^2}{2m_r^*} \right) \quad (3)$$

여기서 e 는 전자의 전하, \hbar 는 Planck 상수, m_r^* 는 환산 질량, 그리고 E_i 는 내부 전기장 세기이다.

식 (2)에서 cosine 함수 값이 $j\pi$ 일 때, FKO 신호들은 극치값을 가지므로, 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다 [9, 10].

$$E_j = \hbar\Omega(F_j) + E_0, \quad j=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$$F_j = \{3\pi[(j-1/2)/4]\}^{2/3} \quad (5)$$

따라서, F_j 에 따른 E_j 그래프에서 기울기가 $\hbar\Omega$ 이고, 절편이 E_0 인 직선을 얻을 수 있다.

온도에 따른 띠 간격 에너지의 관계식 즉, Varshni 방정식[11]은 다음과 같다.

$$E(T) = E(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (6)$$

여기서, α , β 는 상수이고, β 는 Debye 온도 Θ_D 와 관계된다.

발광 피크의 온도에 따른 발광 세기의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [12].

$$I = C_1 / [1 + C_2 \exp(-E_a/kT)] \quad (7)$$

여기서 I 는 발광세기, E_a 는 활성화 에너지(activation energy) 및 C_1 과 C_2 는 각각 상수이다.

3. 결과 및 논의

상온에서 측정된 AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT의 PR 스펙트럼을 그림 2에서 보여주고 있다. 이때 측정 조건으로 변조 주파수 및 변조빔세기는 각각 800 Hz, 1 mW로 하였다.

측정된 PR 스펙트럼에서 1.35 eV 부근에서 나타나는 신호는 AlGaAs와 GaAs 사이에서 형성된 InGaAs 삼각 양자 우물에서의 전이에 의한 것이고, 1.4 및 1.75 eV에서는 각각 GaAs와 AlGaAs에 의한 신호가 관측되었다. 그리고, GaAs 신호 위에 AlGaAs와 GaAs사이의 양자우물에 구속된 높은 농도의 캐리어 즉 2DEG에 의해 계면에 고 전기장이 형성됨으로 인해 Franz-

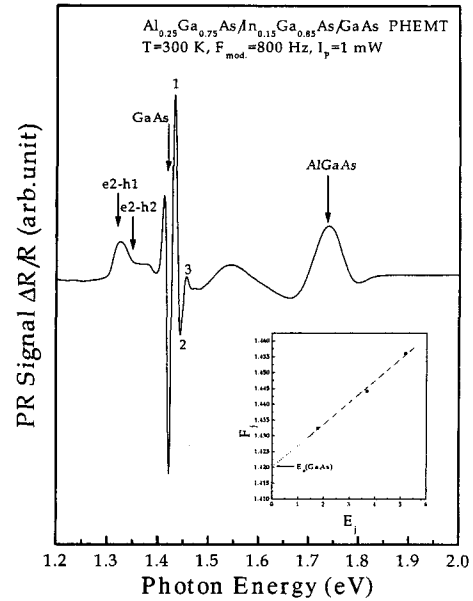


그림 2. The PR spectrum of AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT at room temperature.

Keldysh oscillation(FKO)이 관측되었다.

1.3 eV 부근의 e2-h1는 두번째 전도 버금띠(conduction subband)에서 첫번째 무거운 정공 버금띠(heavy hole subband)로의 전이에 의한 신호를 나타내며, e2-h2는 두번째 전도 버금띠에서 두번째 무거운 정공 버금띠로의 전이에 의한 신호를 나타낸다. 그리고, FKO와 AlGaAs사이의 선폭이 넓은 신호는 많이 도핑된 GaAs 캡층과 AlGaAs의 간섭효과에 의한 것이다.

그림 2에 삽입된 그림은 GaAs 신호 이상에서 나타난 FKO 신호의 극치값으로부터 구한 에너지 값을 이용하여 식 (4)로 피팅한 것이다. 피팅한 결과 GaAs의 E_0 는 1.42 eV로 계산되었다.

그림 3은 측정 온도(77~300 K)에 따른 PR 스펙트럼의 변화를 나타내었다.

온도가 감소함에 따라 신호의 형태는 변하지 않는 반면, 각각의 에너지 값이 고 에너지 영역으로 이동함을 볼 수 있고, 온도의 감소에 따른 열에너지 감소로 FKO의 주기가 감소한다. 또한 온도의 감소로 양자우물의 효율이 급격히 좋아지기 때문에 AlGaAs와 GaAs의 신호세기에 비해 InGaAs 양자우물에 의한 신호의 세기와 FKO의 신호가 증가한 것으로 볼 수 있다. 77 K에서 e2-h1와 e2-h2가 각각 1.39 및 1.41 eV이므로 첫번째 무거운 정공 버금띠와 두번째 무거운 정공 버금

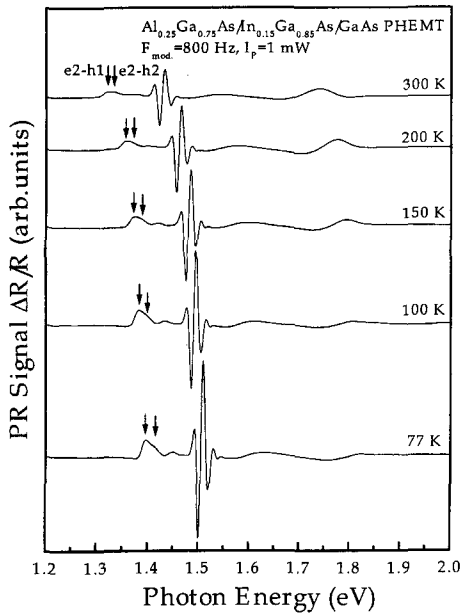


그림 3. The PR spectra of PHEMT measured at various temperatures.

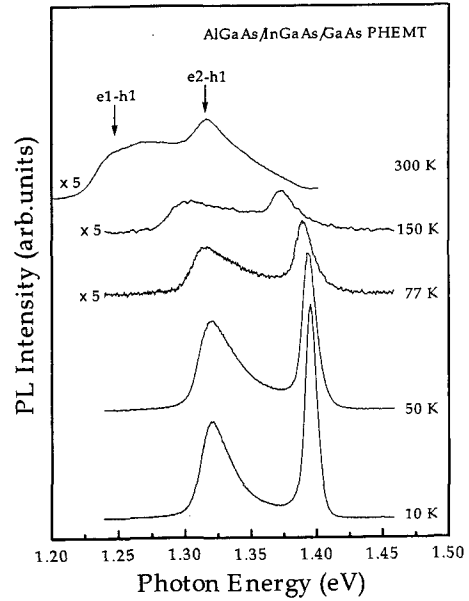


그림 4. The PL spectra of AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT measured at various temperatures.

띠의 에너지차이(h1-h2)는 약 23 meV였다.

그림 4는 측정온도 변화에 따른 PHEMT 구조의 PL 신호를 나타내었다. 10 K에서 1.32 및 1.395 eV에서 발광 피크가 관측되었는데, 이는 첫번째 전도 버금띠에서 첫번째 무거운 정공 버금띠로의 전이에 의한 발광 피크(e1-h1)와, 두번째 전도 버금띠에서 첫번째 무거운 정공 버금띠로의 전이에 의한 발광 피크(e2-h1)이다. 측정온도가 감소할 수록 두 피크 모두 낮은 에너지로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 온도 감소로 인한 띠 간격 에너지의 감소로 InGaAs 채널층에 구속된 양자화된 에너지 준위가 감소되었기 때문이다. 그리고 상온에서도 발광 피크들이 뚜렷이 나타나고 있는데, 이는 AlGaAs와 InGaAs의 띠 불연속이 크기 때문에 높은 농도의 2DEG를 양자 우물 내에 구속할 수 있으므로 상온에서도 양자효율이 뛰어나 발광이 뚜렷이 관찰되는 것이다.

그림 5는 그림 3와 그림 4에서 얻은 PR과 PL의 측정 온도에 따른 e2-h2, e2-h1 및 e1-h1 발광 피크의 에너지 값의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 사각형으로 표시된 데이터는 PR에서 얻은 e2-h2에 의한 것이며, 원으로 표기된 것은 PL 측정에서 얻은 e2-h1, e1-h1 전이에 의한 발광 피크이고, 점선은 GaAs의 띠 간

격 에너지 변화를 계산하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두 피크 모두 GaAs 띠 간격 변화와

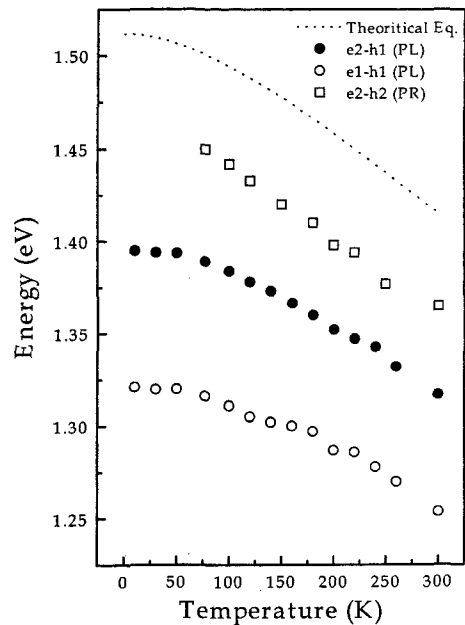


그림 5. Temperature dependence of the energies of e2-h1 and e1-h1 for measured PL spectra.

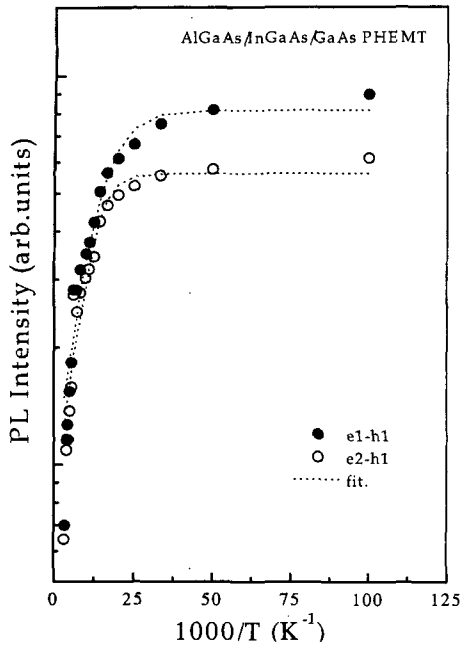


그림 6. Temperature dependence of the integrated intensities of e2-h1 and e1-h1.

매우 유사한 경향을 보이므로 2-DEG에 의한 발광 피크는 진성 발광 특성을 가지고 있음을 나타낸다.

그림 6은 e2-h1 및 e1-h1 전이에 의한 발광 피크의 온도에 따른 발광 세기의 변화를 나타낸 것인데, 그림에서 점선은 식 (7)로 피팅한 결과이다.

피팅한 결과 e2-h1 및 e1-h1의 활성화 에너지는 각각 22 및 24 meV이었고, 이 값은 PR에서 측정된 e2-h1과 e2-h2의 에너지 차이와 잘 일치하였고, 따라서 두 전이에 의한 피크의 활성화 에너지 값은 정공 버금띠간의 차이(h2-h1)에 해당한다고 볼 수 있다 [12]. 이러한 결과는 온도가 증가함에 따라 h1 무거운 정공 버금띠로부터 열적 여기(thermal excitation)에 기인된 h2 무거운 정공 버금띠의 정공 밀도(population)의 증가에 기인한다.

그림 7은 e1-h1 피크에 대한 e2-h1 피크의 온도에 따른 PL 신호 세기의 비 I_{21}/I_{11} 를 나타내었다. 그림에서와 같이 온도가 증가함에 따라 PL 신호 세기의 비가 감소하고 있다. 이 결과는 온도가 증가함에 따라 시료의 열적 에너지가 증가하고, Fermi 준위 부근의 전자 밀도가 증가하게 되어 전자 가리개(electron screening) 효과가 발생하기 때문이다. 따라서 e2-h1 전이에 의한 발광 신호가 상대적으로 감소하기 때문에 e1-h1 전이에

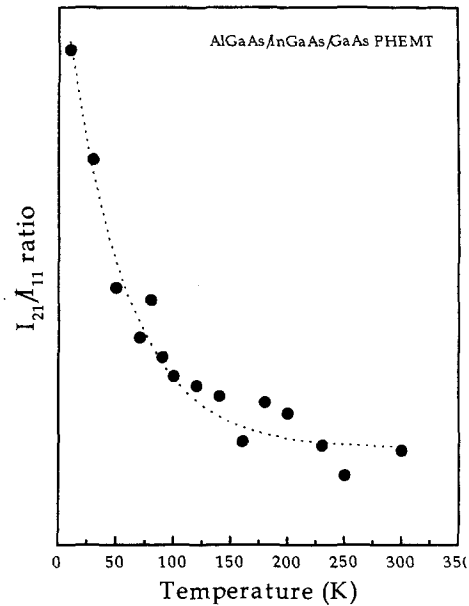


그림 7. Ratio PL intensities of e2-h1 transition to that of e2-h1 transition vs. temperature relation.

의한 발광 세기가 우세해진 것으로 생각된다.

PR과 PL의 결과를 비교해보면 Fermi 준위는 양자 우물의 e1 준위보다 높은 에너지 위치에 놓여 있어 저온에서 띠 채움(band filling)효과에 의해 PR 결과에서 e1에 의한 신호가 나타나지 않았는데, 이것은 띠 채움으로 인해 e2 준위에 비해 상대적인 반사율의 차이가 아주 적었기 때문이고, PL 결과에서는 e1 준위의 높은 전자농도로 인한 가리개 효과 때문에 e2 준위의 전이가 상대적으로 적었기 때문에 e2 준위에 의한 신호가 온도가 증가함에 따라 감소하였다.

4. 결 론

PR 및 PL 측정으로 분자선 에피택시법으로 성장된 $Al_{0.25}Ga_{0.75}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs$ PHEMT 구조의 온도에 따른 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

PR 측정결과 AlGaAs와 GaAs 사이에 FKO 신호가 관측되었다. 이는 양자우물에 구속된 이차원 전자 가스에 의한 것이다.

측정온도 77 K에서 PR 측정결과 e2-h1 및 e2-h2 전이에 의한 신호를 1.39, 1.41 eV에서 관측하였고, 이때의 e2-h1와 e2-h2의 에너지 차이가 23 meV이었고, 이는 PL 측정에서 구한 e1-h1 및 e2-h1 전이에 의한

피크의 활성화 에너지 값인 22 및 24 meV와 근사한 값을 보였다. 이러한 에너지 차이는 온도가 증가함에 따라 h1무거운 정공 버금 띠로부터 열적 여기로 인한 h2의 정공 밀도의 증가에 기인된 것이다.

PR 결과에서 띠 채움으로 인해 e2 준위에 비해 e1 준위의 상대적인 반사율의 차이가 아주 적었기 때문에 e1에 의한 피크가 나타나지 않았고, PL 결과에서는 e1 준위의 높은 전자농도로 인한 가리개 효과로 e2 준위의 전이가 상대적으로 적었기 때문에 e2 준위에 의한 신호가 온도가 증가함에 따라 감소하였다.

참고문헌

- [1] M. Wojtowicz, D. Pascua, A. C. Han, T. R. Block and D. C. Streit, *J. Crystal Growth* **175**, 930 (1997).
- [2] W. Liu, D. Jiang and Y. Zhang, *J. Appl. Phys.* **77**(9), 4564 (1995).
- [3] C. Kizilyalli, K. Hess, J. L. Larson and D. J. Widiger, *IEEE Trans. Electron Devices* **33**, 1427 (1986).
- [4] P. R. de la Houssaye, D. R. Allee, Y. C. Pao, D. G. Schlom, J. S. Harris and R. F. W. Pease, *IEEE Electron Devices Lett.* **9**, 148(1988).
- [5] R. Grundbacher, D. Balleger, A. A. Ketterson, Y. C. Kao and I. Adesida, *IEEE Trans. Electron Devices* **44**, 2136 (1997).
- [6] G. Sek, J. Misiewicz and T. S. Cheng, *Advanced Materials for Optics and Electronics* **V7**, 241 (1997).
- [7] D. P. Wang and C. T. Chen, *J. Appl. Phys.* **78**(3), 2117 (1995).
- [8] D. E. Aspnes, *Phys. Rev.* **B10**, 4228 (1974).
- [9] K. M. Huang, K. L. Wang and D. P. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **71**(26), 3889 (1997).
- [10] V. M. Airaksinen and H.K. Lipsanen, *Appl. Phys. Lett.* **60**(17), 2110 (1992).
- [11] P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis, and M. Cardona, *Phys. Rev.* **B35**, 9174 (1987).
- [12] P. W. Yu, B. Jogai, T. J. Rogers, P. A. Martin, and J. M. Ballingall, *J. Appl. Phys.*, **76**, 7537 (1994).