

In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합 구조의 Contactless Electroreflectance에 관한 연구

김정화 · 조현준 · 배인호*

영남대학교 물리학과, 경산 712-749

(2009년 12월 10일 받음, 2010년 1월 11일 수정, 2010년 1월 12일 확정)

Metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD)법으로 성장된 In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합 구조의 특성을 contactless electroreflectance (CER) 분광법으로 조사하였다. CER 측정은 변조전압(V_{ac}), 온도 및 dc 바이어스 전압(V_{bias})의 함수로 수행하였다. 상온에서는 5개의 신호가 관측되었는데, 이 신호들은 각각 GaAs, In_{0.5}Ga_{0.5}P, In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P, In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P 및 In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P 전이에 관련된 것이다. CER 스펙트럼의 온도 의존성으로부터 Varshni 계수 및 평탄인자를 구하였다. 그리고 인가전압에 따른 신호의 진폭은 순방향 바이어스 전압 인가시 점차로 감소하나, 역방향 바이어스 전압 인가시에는 반대의 경향을 보였다.

주제어 : In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합, CER, 평탄인자, Varshni 계수

I. 서 론

In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P는 Al과 Ga 원자의 비율 변화로 1.91 (In_{0.5}Ga_{0.5}P)에서 2.26 eV(In_{0.5}Al_{0.5}P)까지 유효한 띠틈 간격 에너지(bandgap energy)를 만들 수 있다 [1]. 이 물질은 고휘도 발광 다이오드, 가시광 레이저 다이오드 및 고속 이종접합 바이폴라 트랜지스터에 이용되고 있고, 특히 레이저 부분에서 소형화, 긴 수명, 높은 효율성 등의 장점으로 기존의 He-Ne 레이저와 같은 600 nm대 레이저 분야의 차세대 반도체 소자로서 많은 관심을 모으고 있다 [2-5].

Photoreflectance (PR), electroreflectance (ER) 및 piezoreflectance (PzR)과 같은 변조 분광학은 반도체 및 양자우물, 초격자, 양자점 및 이종접합 등과 같은 반도체 미세구조의 특성을 조사하는데 유용한 기술로 알려져 있다 [6,7]. 그 중 ER 분광법은 시료에 전극을 부착시키는 접촉 식이며, 시료에 전극 부착없이 측정이 가능한 비접촉식 분광법에는 PR과 contactless electroreflectance (CER) 방법이 있다. 특히 CER 방법은 PR보다 변조원을 저가로 이용할 수 있는 장점이 있어 소규모 실험실에서도 부담없이 이용할 수 있는 방법이다. 최근 Kudrawiec 등 [8,9]은 CER을 이용해서 Si 및 Mg이 도핑된 GaN층과 2차원 전자

가스(two dimensional electron gas)를 가진 AlGaIn/GaN 트랜지스터 및 GaN_yAs_{1-y}/GaAs 다중 양자우물 구조에 대하여 연구하였다. 그리고 Motyka 등 [10]은 AlGaIn/GaN 이종접합 구조에 대한 특성 조사를 수행하였다. 그러나 아직까지 CER 분광법에 의한 In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합 구조(double heterojunction : DH)의 특성 조사는 보고된 바 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD)법으로 성장된 In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합 구조에서의 광학적 전이를 CER 분광법을 이용해서 변조전압, 측정온도 및 dc 인가 전압을 변화시켜가면서 측정된 스펙트럼으로부터 분석하였다.

II. 실험

본 연구에 사용된 시료는 MOCVD 법으로 Si이 3~5×10¹⁸ cm⁻³ 도핑된 n-GaAs 기판위에 n-GaAs buffer 층을 500 nm의 두께로 성장한 다음, 300 nm의 n-In_{0.5}Ga_{0.5}P, 720 nm의 n-In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P, 540 nm의 n-In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P를 성장시켰다. 그 위에 활성층(active layer)으로 200 nm의

* [전자우편] ihbae@yu.ac.kr

In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P를 성장한 다음, p-In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P (540 nm), p-In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P(720 nm), p-In_{0.5}Ga_{0.5}P (200 nm)를 순서대로 성장하였다. 마지막으로 cap layer로 300 nm 두께의 p-GaAs를 성장시켰다. 성장된 In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합 구조를 나타내면 Fig. 1과 같다.

CER 측정을 위해 5×5 mm²의 크기로 시료를 자른 다음, trichloroethylene (TCE) 용액으로 세척한 후 아세톤, 메탄올 순으로 다시 5분간 세척하였다. 그리고 탈 이온수를 시료에 충분히 흘린 다음, 질소(N₂) 가스로 건조시켰다. 세척한 시료위에 두께가 약 0.1 mm이고, 비저항이~10¹² Ω cm인 high vacuum grease를 이용해 절연층을 구성하고, 그 위에 indium tin oxide (ITO)가 증착된 glass를 덮어 구리판과 ITO막을 전극으로 하여 축전기 구조를 제작하였다. 제작한 CER 측정용 시료는 온도 조절이 가능한 진공 챔버(vacuum chamber) 내 홀더에 부착하였다. 변조 전압 (V_{ac})과 dc 바이어스 전압(V_{bias})은 각각 ac square wave의 $V_{ac} = 2\sim 10$ V 및 $V_{bias} = +3\sim -6$ V 범위로 인가하였다. Prob light source로 180 W tungsten-halogen lamp를 사용하여 분광기(DM501)에 집속시켰으며, 이 분광기를 통해 나오는 단색광을 시료에 입사시켜 시료로부터 반사된 광을 p-i-n Si photodiode detector로 검출하였다. 검출한 신호를 phase sensitive detector (PSD)인 lock in amplifier (EG&G PAR 5302)로 증폭하고, ratio function 기능을 이용하여 규격화된 변조 반사율($\Delta R/R$)을 얻었다. 온도 의존성 실험은 CTI cryogenics (Model M22) He 순환 방식을 이용하여, 온도 23~300 K 범위에서 단계적으로 온도를 증가시키면서 측정하였다.

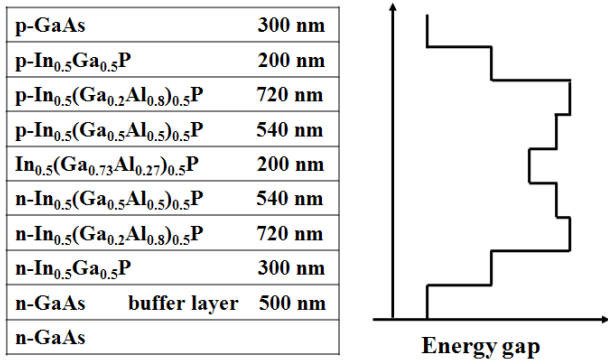


Figure 1. Schematic representation of the In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs double heterostructures.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 2에서는 In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종접합 구조인 시료를 300 K에서 측정된 CER 스펙트럼이다. 실선은 실험을 통해서 얻은 신호이고, 점선은 third derivative functional form (TDFF)을 이용해 피팅한 이론 곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 A~E로 표시된 5개의 피크가 관측되었고, 이들 피크의 에너지는 각각 약 1.43, 1.89, 2.04, 2.22 및 2.38 eV이며, 각각 GaAs, In_{0.5}Ga_{0.5}P, In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P, In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P 및 In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P에 관련된 신호이다.

CER 측정에 사용된 3차 미분법(third derivative function form : TDFF)은 다음 식 [11]과 같다.

$$\frac{\Delta R}{R} = Re \sum_{j=1}^m A_j e^{i\theta_j} (E - E_j + i\Gamma)^{-n} \quad (1)$$

여기서 R 은 반사율, ΔR 은 변조 전압에 의한 반사율의 변화, m 은 광 전이의 총수, A_j 와 θ_j 는 각각 신호의 진폭과 위상이고, E_j 는 포톤 에너지이다. 그리고 E_j 와 Γ_j 는 각각 전이 에너지와 평탄인자(broadening parameter)를 나타내고, n 은 광전이 형태를 나타낸다. n 의 값은 엑시톤일 경우에는 2이고, 2차원 및 3차원 띠와 띠 사이의 전이(transition)일 경우에는 각 3 및 2.5의 값으로 주어진다 [12].

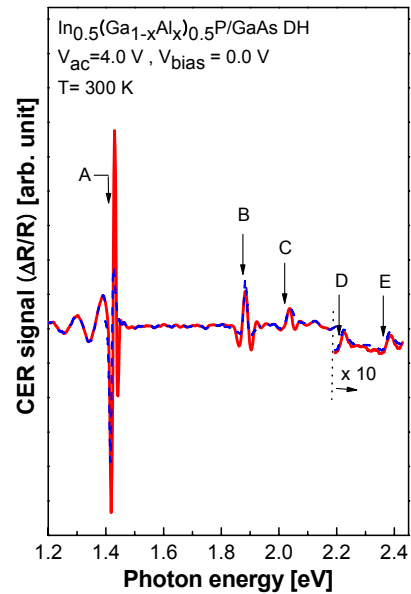


Figure 2. Room temperature CER spectrum In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs double heterostructures.

피크에 관련된 띠 간격 에너지(E_g)를 구하기 위하여 식 (1)을 이용하여 피팅한 결과 A, B, C, D 및 E의 각 전이 피크에 대한 에너지는 각각 1,425, 1,885, 2,035, 2,219 및 2,377 eV이었고, 그림에서 화살표로 나타내었으며, 피크들에 대한 I 와 E_g 값들을 문헌 [13–15]에서의 결과와 함께 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3은 온도 23에서 300 K 사이의 범위에서 측정한 CER 스펙트럼이다. 그림에서 화살표는 식 (1)로부터 얻은 띠 간격 에너지를 나타낸 것이다. 온도가 감소함에 따라 신호의 진폭은 감소하고, 피크는 고에너지 쪽으로 이동하였다. 온도의 감소에 따라 진폭의 감소는 열에너지에 의해 생성되는 전자-정공 쌍의 감소 때문이고, 피크의 이동은 시료의 결정격자 수축이 일어나 원자 간의 결합이 강화되어

Table 1. Fitting results of the $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ double heterostructures at 300 K.

Peak	Material	Γ (meV)	E_g (eV)	Reference E_g (eV)
A	GaAs	9.0	1,425	1,424 [12]
B	$\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$	16.0	1,885	1,870 [13]
C	$\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.73}\text{Al}_{0.27})_{0.5}\text{P}$	19.1	2,035	2,074 [14]
D	$\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5})_{0.5}\text{P}$	28.9	2,219	2,215 [14]
E	$\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.2}\text{Al}_{0.8})_{0.5}\text{P}$	27.6	2,377	2,398 [14]

띠 간격 에너지가 증가하기 때문이다 [16].

Fig. 4(a)는 GaAs, $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$ 및 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.73}\text{Al}_{0.27})_{0.5}\text{P}$ 의 평탄인자(I)에 대한 온도 의존성을 나타내었다. 그림에서 점들은 신호로부터 얻은 I 이고, 실선은 다음의 Bose-Einstein 식 [17,18]을 이용하여 피팅한 결과이다.

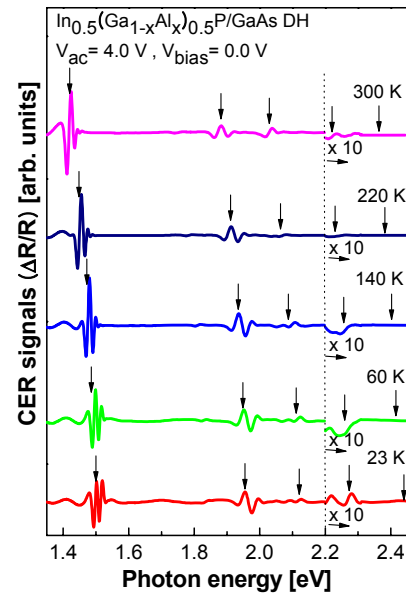


Figure 3. The CER spectra of $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ double heterostructures as a function of temperature.

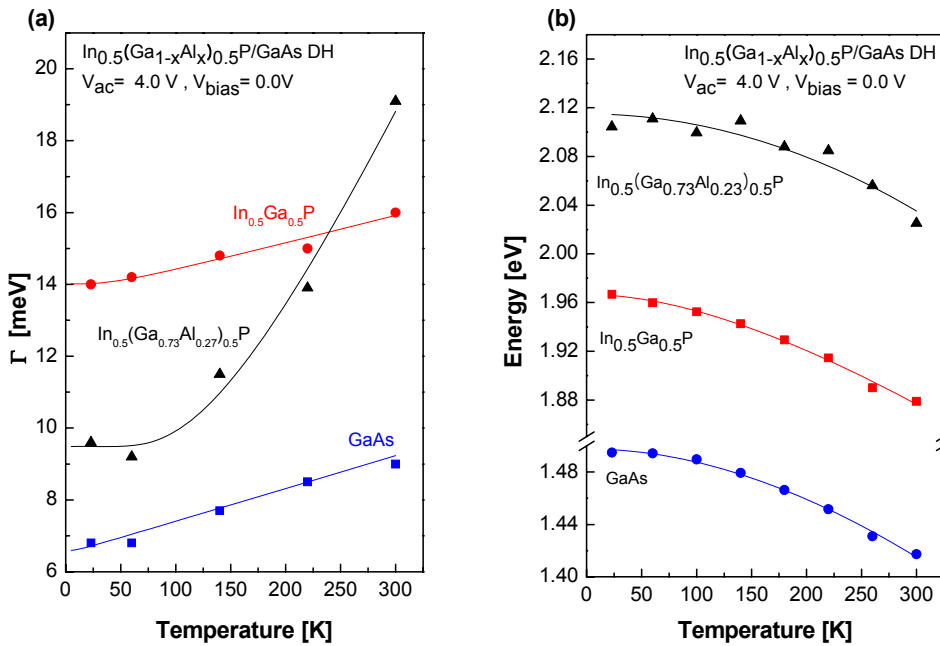


Figure 4. The variation of (a) broadening parameters and (b) band gap energies with temperature for GaAs, $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, and $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.73}\text{Al}_{0.27})_{0.5}\text{P}$.

$$\Gamma(T) = \Gamma_1 + \Gamma_0 \left[1 + \frac{2}{e^{\theta/T} - 1} \right] \quad (2)$$

여기서 Γ 는 전자-광학 포논 결합의 강도를 의미하고, Γ_0 는 계면 거칠기, 진성 운반자의 수명, 전자-전자간의 상호작용, 불순물, dislocation 및 혼정산란(alloy scattering) 효과로 인한 평탄 메카니즘이고 θ 는 평균 포논온도이다. 그림에서 본 바와 같이 평탄인자 Γ 는 모든 전이 피크에 대해 점차적으로 증가를 보였으며, 특히, In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P의 Γ 가 GaAs 및 In_{0.5}Ga_{0.5}P에 비해 가파른 증가를 보였는데, 이는 두 물질에 비해 첨가된 불순물이 적어 온도의 영향에 민감한 것으로 추정된다. 식 (2)를 사용해서 구한 Γ_1 , Γ_0 및 θ 는 Table 2에 나타내었다.

온도 변화에 따른 각 전이 피크들의 띠 간격 에너지는 Fig. 4(b)와 같다. 그림에서 점들은 온도에 따른 각 신호의 피크 에너지이다. 일반적으로 온도에 따른 띠 간격 에너지는 다음과 같은 Varshni 식 [19]으로 표현할 수 있다.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (3)$$

여기서 $E_g(T)$ 와 $E_g(0)$ 는 각각 임의의 온도 T와 0 K에서의 띠 간격 에너지이며, Varshni 계수인 α 와 β 는 각각 온도에 따른 띠 간격 에너지의 평균 이동과 평균 온도를 나타낸다. 그림에서 실선은 식 (3)을 사용하여 피팅하였으며, 각 전이에

Table 2. Parameters of Bose-Einstein fitting obtained for the In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs double heterostructures.

Material	Γ_1 (meV)	Γ_0 (meV)	θ (K)
GaAs	6.49	0.10	21.92
In _{0.5} Ga _{0.5} P	13.56	0.45	117.70
In _{0.5} (Ga _{0.73} Al _{0.27}) _{0.5} P	-4.88	14.37	421.80

Table 3. Parameters of Varshni fitting obtained for the In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs double heterostructures.

Transition	$E_g(0 \text{ K})$ (eV)	α (10^{-4} eV/K)	β (K)
GaAs	1.502	6.31	366
In _{0.5} Ga _{0.5} P	1.966	5.60	278
In _{0.5} (Ga _{0.73} Al _{0.27}) _{0.5} P	2.119	4.20	198

대해 구하여진 $E_g(0)$, α 및 β 의 값들은 Table 3과 같다.

Fig. 5는 온도 23 K에서의 측정한 시료에 대한 변조 전압(V_{ac})의 함수로 CER 스펙트라를 나타내었다. 변조전압을 2에서 10 V까지 증가시킴에 따라 신호의 모양이나 위치는 거의 변화없이 신호의 진폭만 증가하였는데, 이는 CER 신

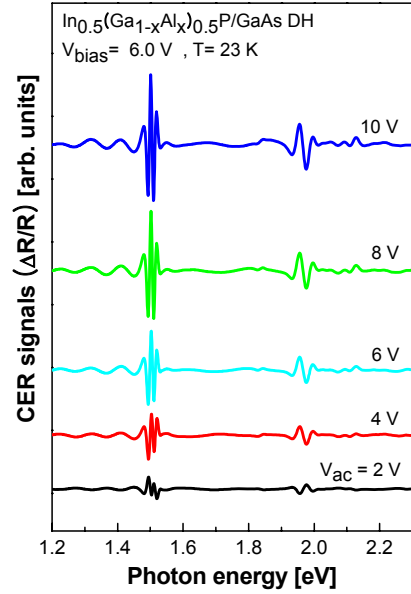


Figure 5. The CER spectra of In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs double heterostructures as a function of the modulation voltage.

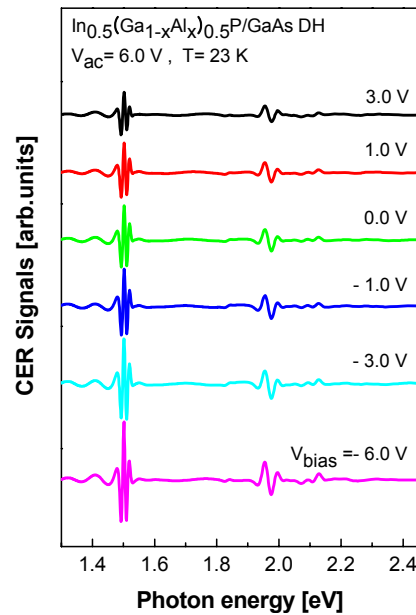


Figure 6. The CER spectra of In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs double heterostructures measured under different biases.

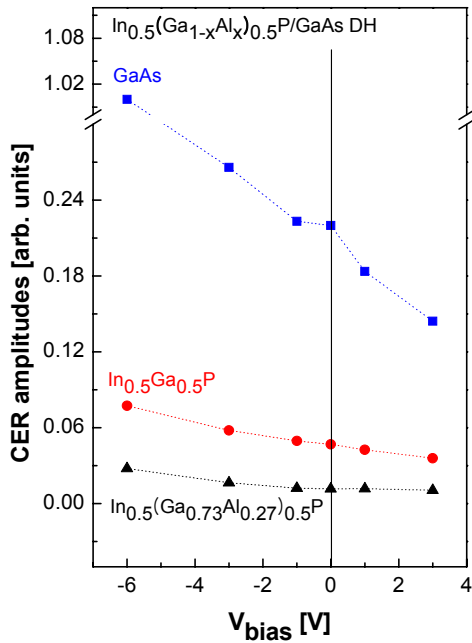


Figure 7. The variation of the CER amplitudes with applied bias voltage for GaAs, In_{0.5}Ga_{0.5}P, and In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P transitions.

호의 진폭이 변조 전압에 관련되기 때문이다.

Fig. 6에서는 온도 23 K에서의 변조전압을 6 V로 고정 한 뒤 측정된 dc 바이어스 전압(V_{bias})의 함수로 CER 스펙트럼을 나타내었다. 인가 바이어스 전압을 순방향인 0에서 +3 V로 증가시 진폭은 점차로 감소하였고, 이와는 반대로 0에서 -6 V로 인가시 진폭의 크기는 증가하였다. dc 바이어스 전압에 따른 CER 진폭의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 순방향 바이어스 전압이 증가할수록 진폭은 점차로 감소되고, 역방향 전압이 증가할수록 진폭은 증가하는데, 이는 Wrobel 등 [20]의 결과와 같은 경향을 보이고 있으며, 인가 전압에 의한 공간전하층에서의 전기장의 변화에 기인된다.

IV. 결 론

CER 분광법에 의한 In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs 이중 이종 접합 구조의 광학적 전이를 조사하였다. 상온 CER 스펙트럼에서는 각각 GaAs, In_{0.5}Ga_{0.5}P, In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P, In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P 및 In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P에 관련된 5개의 전이 신호가 관측되었다. 이론적 피팅으로부터 얻은 각 시료의 띠 간격 에너지는 각각 1.425, 1.885, 2.035, 2.219

및 2.377 eV이었다. 온도가 증가함에 따라 CER 스펙트럼의 진폭은 점차로 증가되는 반면에, 시료의 띠 간격 에너지는 감소하였다. 그리고 dc 바이어스 전압을 3에서 -6 V로 변화시킴에 따라 CER 진폭은 점차로 증가하는데, 이는 시료내 공간전하층의 변화에 기인된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 영남대학교 학술연구조성비에 의한 것임.

참고문헌

- [1] C. P. Kuo, R. M. Fletcher, T. D. Osentowski, M. C. Lardizable, M. G. Grafard, and V. M. Robbins, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2937 (1990).
- [2] Z. Qingke, Z. Xianfu, L. Changjun, and Songhao, *Solid-State Electronics* **42**, 993 (1998).
- [3] Arto V. Nurmikko and P. L. Gunshor, *Solid State Commun.* **92**, 113 (1994).
- [4] E. Kapon, *semiconductor Laser* (Academic Press, London, 1999), pp. 4-8.
- [5] K. Itaya, H. Sugawara, and G. Hatakoshi, *J. Crystal Growth*, **138**, 768 (1994).
- [6] F. H. Pollak and H. Shen, *Mater. Sci. Eng. R.* **10**, xv (1993).
- [7] 김기홍, 심준형, 배인호, *한국진공학회* **18**, 208 (2009).
- [8] R. Kudrawiec, M. Motyka, J. Misiewicz, B. Paszkiewicz, R. Paszkiewicz, and M. Tłaczała, *Microelectronics Journal* **40**, 370 (2009).
- [9] R. Kudrawiec, M. Motyka, M. Gładysiewicz, J. Misiewicz, J. A. Gupta, and G. C. Aers, *Solid State Communications* **138**, 365 (2006).
- [10] M. Motyka, R. Kudrawiec, M. Syperek, J. Misiewicz, M. Rudziński, P. R. Hageman, and P. K. Larsen, *Thin Solid Films* **515**, 4662 (2007).
- [11] D. P. Aspnes, *Phys. Rev. B*, **10**, 4228 (1974).
- [12] M. Cardona, *Modulation Spectroscopy* (Academic

- Press, New York, 1969), pp. 11.
- [13] J. S. Blackemore, *J. Appl. Phys.* **53**, R123 (1982).
- [14] J. S. Roberts, G. B. Scott, and J. P. Gowers, *J. Appl. Phys.* **52**, 4018 (1981).
- [15] H. Chui, N. F. Gardner, P. N. Grillo, J. W. Huang, M. R. Krames, and S. A. Maranowski, *Semiconductors and Semimetals* **64**, 49 (2000).
- [16] O. G. Koshelev and V. A. Morozova, *Solid-State Electronics* **39**, 1379 (1996).
- [17] P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis, and M. Cardona, *Phys. Rev. B* **35**, 9174 (1987).
- [18] K. F. Hyang, K. Tai, S. N. G. Chu, and A. Y. Cho, *Appl. Phys. Lett.* **54**, 2026 (1989).
- [19] Y. P. Varshni, *Physica* **34**, 149 (1967).
- [20] J. M. Wrobel, U. K. Reddy, L. C. Bassett, J. L. Aubel, and S. Sundaram, *J. Appl. Phys.* **60**, 368 (1986).

Contactless Electroreflectance Spectroscopy of $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ Double Heterostructures

Jeong-Hwa Kim, Hyun-Jun Jo, and In-Ho Bae*

Department of Physics, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749

(Received December 10, 2009, Revised January 11, 2010, Accepted January 12, 2010)

We have investigated the contactless electroreflectance (CER) properties of $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ double heterostructures grown by metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD). The CER measurements on the sample were studied as a function of temperature, modulation voltage (V_{ac}), and dc bias voltage (V_{bias}). Five signals observed at room temperature are related to the GaAs, $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$, $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.73}\text{Al}_{0.27})_{0.5}\text{P}$, $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5})_{0.5}\text{P}$, and $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{0.2}\text{Al}_{0.8})_{0.5}\text{P}$ transitions, respectively. From the temperature dependence of CER spectrum, the Varshni coefficients and broadening parameters were determined and discussed. In addition, we found that the behavior of the CER amplitude for the reverse bias is larger than that of the forward bias.

Keywords : $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ double heterostructures, CER, Broadening parameters, Varshni coefficients

* [E-mail] ihbae@yu.ac.kr