

## Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조의 Photoreflectance 연구

이정열 · 김기홍 · 손정식 · 배인호 · 임재영\* · 김인수\*\*

영남대학교 물리학과, \*한국표준과학연구원 소재특성평가센터

\*\*경운대학교 전자공학과

(1999년 3월 5일 접수)

### A Study on the photoreflectance chracterization of Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs multi-quantum well infrared photodetector structures

Jung-Yeul Lee, Ki-Hong Kim, Jeong-Sick Son, In-Ho Bae,  
Jae-Young Leem\* and In-Soo Kim\*\*

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

\*Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

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

(Received March 5, 1999)

**요 약** - MBE법에 의해 성장된 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조를 특성화하기 위하여 Photoreflectance 측정을 이용하였다. GaAs와 AlGaAs 영역에서 에너지 띠 관련 전이들을 관찰하고, Sek 등이 제안한 조성식을 이용하여 Al 조성(x)을 결정하였다. 다중 양자우물에 관련된 전이에너지 값은 Gaussian 1차 미분 피팅 결과와 네모난 양자우물 모델 적용으로 파동함수 근사식을 통해 구한 이론 값들과 비교하였다.

**Abstract** - We used the photoreflectance spectroscopy for characterization of the infrared photodetector structure with GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As multi-quantum well (MQW) structures grown by molecular beam epitaxy (MBE) method. Energy gap related transitions in GaAs and AlGaAs were observed. The Al composition(x) was determined by Sek's composition formula. MQW related transition energies were determined using the first derivative of a Gaussian profile of the measured resonances. In order to identify the transitions, the experimentally observed energies were compare with results of the envelope function approximation for a rectangular quantum well.

## 1. 서 론

III-V족 화합물 반도체 재료를 기초로 한 양자우물 적외선 광검출기(quantum well infrared photodetector; QWIP) 구조는 적외선 초점평면 정렬(focal plan arrays; FPAs)에 있어 II-IV족 화합물 반도체 재료를 대체하는데 새로운 구조로서 최근에 많은 관심의 대상이 되고 있으며, 장파장 적외선 QWIP 카메라의 급속한 발전은 고도로 균일한 면적을 가지는 FPA 영상기기, 높은 감도, 저 전력 및 저비용 등의 잇점을 수용하는 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 양자우물 적외선 광검출기 구조를 1998년 Huang[1],

Bandara[2] 및 Maimon 등[3]이 제안한 바 있다. 이에 GaAs는 AlAs와 격자상수가 비슷하여 GaAs 위에 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As의 이종접합을 만들기가 용이하고, Al의 함량을 조절하여 용도에 맞는 소자를 제작할 수 있다. 이러한 GaAs와 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As의 이종접합을 응용한 구조인 다중 양자우물(multi-quantum well; MQW) 구조의 분석을 위하여 초격자(superlattice; SL) 및 미세구조(microstructure)의 분석과 이해가 선행되어야 한다. 이에 적합한 구조로 설계된 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조는 기존에 널리 사용되어 왔던 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 소자 및 외인성(extrinsic) 검출기 기술의 단점들을 보완하는데

유용하며[4-6], 다중 양자우물과 초격자 구조들의 물성 연구는 더욱 흥미롭다.

최근에 반도체 에너지 띠 구조를 조사하기 위한 방법으로 변조분광학 방법인 photoreflectance(PR)이 흥미 있는 분야로 연구가 진행되고 있다. 이러한 PR은 변조 전기장의 광 반응의 형태이고 측정 온도 범위가 저온에서 고온에 이르기까지 비교적 넓기 때문에 반도체 표면 및 계면에서 전하수송 현상에 관한 정보를 얻을 수 있다. 또한, PR은 비 파괴적 방법으로 전극 부착이 필요 없고, 매우 낮은 광 준위를 사용하며, ultra high vacuum(UHV)를 포함하는 어떠한 transient ambient에서도 측정할 수 있으므로 성장 및 처리 과정에서 in situ 측정이 가능하며 여러 분야에서 널리 이용될 수 있는 측정 기술이다 [7-9]. 특히 초 미세구조 및 다중 양자 우물 구조 분석에 있어 double crystal x-ray diffractometry(DCXD) 및 photoluminescence(PL) 기술보다도 더 강력하다. 따라서 본 연구에서 PR mechanism을 이해하고 molecular beam epitaxy(MBE)법으로 GaAs/GaAs:Si/GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As:Si 25주기의 초격자 구조를 가지는 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조의 PR 분석을 통해 띠 간격 에너지(E<sub>g</sub>), 조성비(x), 띠핑 에너지 의존성, 양자우물 내에 새로이 형성되는 준위들의 버금 띠 전이 에너지(intersubband transition energy), 및 띠 오프셋(band offset; Q<sub>c</sub>) 값 등을 Gaussian 1차 미분형 피팅 결과와 Schrodinger 유한 네모난 양자우물 모델을 적용하여 파동함수(envelope-wave function approximation;EFA)을 통해 구한 이론 값들과 비교함으로써 띠 구조를 연구함으로써 이상적인 구조 설계의 최적화와 PR 분석의 확대와 응용성을 기르코자 한다.

## 2. 실험

본 연구에서는 분자선 에피택시(MBE)법에 의해 반질연성 GaAs(100) 기판 위에 완충층(buffer)으로 Si이 2×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>로 첨가된 n-GaAs(0.5 μm)를 성장시킨 후, GaAs(10Å)/GaAs:Si(20Å)/GaAs(10Å)/barrier Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As:Si(500Å) 구조를 가지는 25주기의 초격자를 성장하고 시료의 산화를 막기 위하여 Si이 2×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>로 첨가된 n-GaAs를 caplayer로 사용하였다. 시료의 구조도는 Fig. 1에 나타내었다.

PR 측정은 여기광으로 Ar<sup>+</sup>(4880 Å) 레이저와 He-Ne (6328 Å) 레이저를 사용하였으며, 레이저의 변조 주파

GaAs : 2×10 <sup>18</sup> /cm <sup>3</sup> (Si)	3000 Å	× 25
Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As (Si)	500 Å	
GaAs	10 Å	
GaAs : 2×10 <sup>18</sup> /cm <sup>3</sup> (Si)	20 Å	
GaAs	10 Å	
Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As (Si)	500 Å	
GaAs : 2×10 <sup>18</sup> /cm <sup>3</sup> (Si)	5000 Å	
SI-GaAs(100) Wafer		

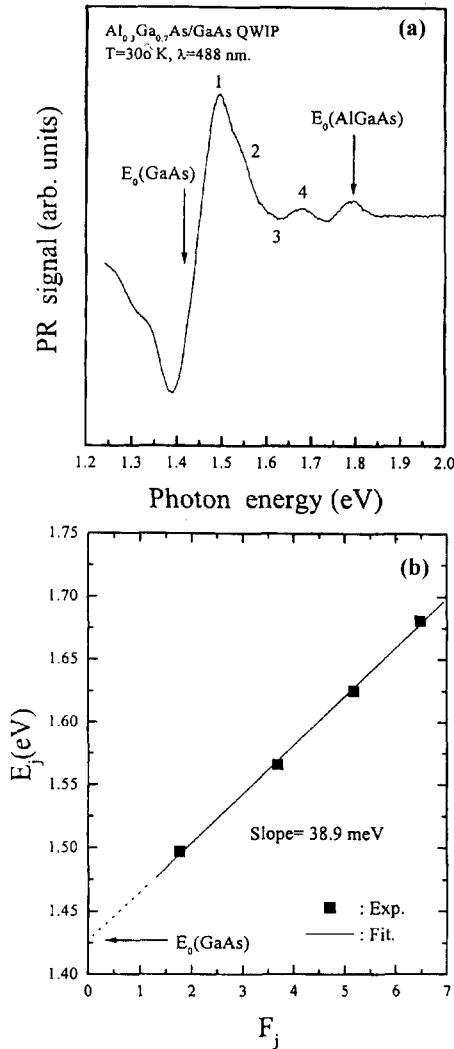
Fig. 1. The schematic diagram of the sample.

수는 광단속기를 사용하여 800 Hz로 고정하였다. 그리고 probe beam으로는 235 W 텅스텐-할로겐 광원을 사용하였다. 이를 초점거리가 0.27 m인 monochromator (Spex 270M)를 사용하여 단색화된 빛을 얻었으며, 이 빛을 렌즈로 집속시켜 시료에 입사시켰다. 반사된 빛은 p-i-n silicon photodiode를 사용하여 검출하였으며, 검출된 신호는 phase sensitive detector(PSD)인 lock-in amplifier(EG&G PAR 5209)로 증폭하였다. 규격화된 변조 반사율(ΔR/R)은 lock-in amplifier에서 ratio function을 이용하여 얻었다. 그리고 시료의 상대반사율 측정시 외부로부터 빛을 차단하기 위해 암상자를 사용하였으며, PR 측정은 80~300 K의 온도 범위에서 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 논의

Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs 다중 양자우물 적외선 광검출기(MQWIP) 구조의 상온에서 측정된 PR 스펙트럼을 Fig. 2(a)에 나타내었다.

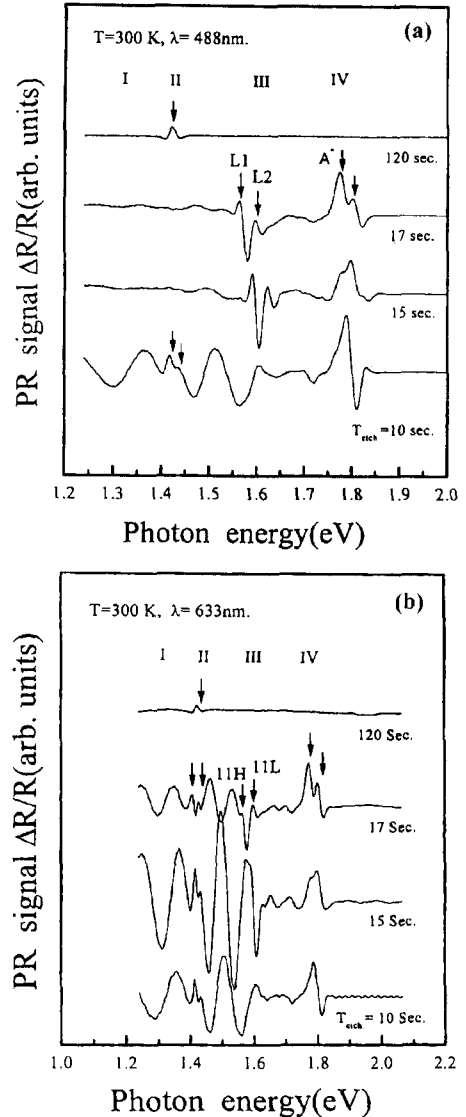
이러한 조건으로 측정된 PR 신호의 형태는 그림에서 본 바와 같이 3차 미분형으로써, 약 1.42 eV 이상의 영역에서 oscillation-like 신호[10]가 관측되었다. 이는 caplayer로 사용된 GaAs와 barrier AlGaAs의 띠간격 에너지 차이로 인해 생성된 Franz-Keldysh oscillation (FKO) 신호이며, 이는 시료내의 고전계장 형성에 기인된 것으로서 전형적인 벌크 n<sup>-</sup>GaAs 시료에서 나타나는 신호와 유사한 형태를 갖으며, 이러한 현상은 barrier AlGaAs보다도 caplayer GaAs의 두께가 두터워 PR 신호 세기도 caplayer쪽이 우세하게 나타나기 때문이다. 약 1.78 eV 부근에서 관측된 신호는 AlGaAs 시료의 띠 간격에너지 E<sub>g</sub> (AlGaAs)와 GaAs 관련 FKO 신호가 중첩되어 나타난 것으로 생각된다. 이는 식각을 통해 신호의



**Fig. 2.** (a) PR spectrum at room temperature of MQWIP sample, (b) Band gap values  $E_j$  according to  $F_j$  of the FKO signal appeared from caplayer of MQWIP sample.

근원을 규명할 수 있었다. 이 진동으로부터  $M_0$  임계점 모델[11]을 적용 caplayer 관련 GaAs 띠 간격 에너지 ( $E_0(\text{GaAs})$ ) 및 caplayer과 barrier 사이의 계면 전기장( $E_i$ )을 구하기 위해 FKO 임계점 에너지( $E_j$ )와 FKO수( $F_j$ )의 관계 그래프를 Fig. 2(b)에 나타내었다.

그림에서 측정된 값은 선형함수로 피팅한 결과, y축 절편으로부터 구한 띠간격 에너지는 1.4256 eV였다. 그리고  $j=1$ 과  $j=2$ 의 에너지 차이( $\Delta E$ )는 약 69 meV이며, 계의 섭동 특성에너지( $\hbar\Omega$ )를 나타내는 기울기 값은 약 38.9 meV로서 caplayer과 barrier에서의 계면 전기장( $E_i$ )



**Fig. 3.** (a) PR spectra of  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWIP sample after chemical etching, (b) PR spectra of  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  MQWIP sample after chemical etching.

의 값은 약  $1.88 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 였다.

Fig. 3(a)에서는  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  다중 양자우물 적외선 광검출기 구조를 갖는 시료를 항온조에  $40^\circ\text{C}$ 로 유지하며 각각 10, 15, 17 및 120초간  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}(1:1:8)$  혼합 용액으로 처리한 시료들에 대한 상온에서 측정된 PR 스펙트럼들을 나타내었다.

식각 시간을 10~17초간 식각시킨 시료들의 상온 PR 신호에서는 크게 4가지 다른 효과에 의한 신호 형태를

보이고 있다. 약 1.42 eV 아래(I 영역)는 진동 형태 신호, 약 1.42 eV 부근(II 영역)는 GaAs 관련 전이 신호, 약 1.6 eV 부근(III 영역)는 초격자 양자우물 관련 전이 신호, 약 1.78 eV(IV 영역)는 AlGaAs barrier 관련 전이 신호이다. I, II 영역을 살펴보면, 10초간 식각시킨 시료에 대해서만 나타나고 10초 이상 식각시킨 시료에서는 나타나지 않았다. 일반적으로 I 영역의 신호 출현 이유는 대부분의 캐리어들은 시료의 표면영역에서 광생성하므로 첫째는 시료의 높은 반사표면으로 부터의 back-reflectance 영향 [12], 둘째는 표면에서 기판과 완충층 계면으로 전자들의 표동에 의한 간섭효과(interference effect)[13]으로 보고된 바 있다. 그 기원에 대해서는 Fig. 3(b)에서 상술하겠다. III 영역을 살펴보면 약 1.6~1.7 eV 부근에 초격자 양자우물 관련 신호가 caplayer를 완전 제거시킨 시료의 경우에서는 뚜렷하게 분리되어 나타났으며 내부전기장의 존재로부터 나타나는 FKO와 양자우물의 에너지 준위(L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>)들과 관계하는 구조의 중첩으로 나타났다. 15초와 17초간 식각시킨 시료에서 버금 띠와 초격자 양자우물 관련 피크가 저에너지 쪽으로 일정한 증가율(약 24 meV)로 이동하여 나타났다. 계면전기장 강도는 낮아지며, 진동 주기 또한 짧아짐을 보인다. IV 영역을 살펴보면 약 1.79 eV 부근에서 AlGaAs barrier 띠 간격에너지 E<sub>g</sub>(AlGaAs) 신호와 약 20 meV 정도 저에너지 쪽에 어개신호가 뚜렷하고 피크 변화는 없으며 신호세기가 역전되어 나타났다. 이 신호는 II 영역의 전이 신호와는 달리 저전기장 조건을 만족시키므로 3차 미분형 피팅(third derivative functional form; TDF)으로 결정된 AlGaAs barrier 띠 간격 에너지(E<sub>g</sub>(AlGaAs))와 평탄인자(I)는 각각 1.796 eV와 약 28.2 meV이다.

AlGaAs barrier에 의한 PR 신호를 살펴보면 TDF에 의한 E<sub>g</sub> 값은 Han 등[14]과 Huang 등[15]에 의해 보고된 것처럼 주된 신호 부근이며, 본 연구에 사용된 시료의 조성값(x)을 Sek 등이 제시한 AlGaAs barrier(E<sub>g</sub>(AlGaAs))와 x의 관계식을 나타내면 아래식[16]과 같다.

$$E_g^I(x) = 1.424 + 1.155x + 0.37x^2 \text{ [eV]} \quad (0 < x < 0.4) \quad (1)$$

이 식으로부터 구한 시료의 조성(x)의 값은 약 30%이었다. 띠 가장자리의 PR 신호는 다소 왜곡되고 AlGaAs barrier의 주된 신호와 약 20 meV 차이를 보이는 어개신호(A\*) 피크는 MBE법으로 성장시 존재하는 잔여 불순물인 carbon에 의해 형성되는 신호로 추정된다[17]. 약 120초간 식각시킨 시료의 경우 전형적인 반결연성

GaAs(100) 기판 신호만 나타났고, 긴 시간동안의 식각으로 표면상태가 나빠져 신호 세기는 낮게 나타난 것으로 보인다. 이는 I, III, 및 IV 영역에서의 효과는 나타나지 않았음을 말한다.

Fig. 3(b)에서는 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조를 가지는 시료의 펄핑 레이저의 파장에 관계하는 침투깊이와 구조 분석 관계를 알아보기 위하여 He-Ne 레이저를 사용하여 상온에서 측정된 PR 스펙트럼들을 나타내었다.

Fig. 3(a)에서 II 영역의 신호는 완전히 caplayer를 제거했을 때 GaAs 관련 피크는 관측되지 않았으나 Fig. 3(b)에서는 II와 III 영역에서 GaAs 및 양자우물에서의 관련 전이 피크와 FKO 신호도 뚜렷하게 나타났다. 이는 띠 가장자리에 가장 가까운 진동은 Franz-Keldysh 효과에 직접적으로 관계하며 내부전기장의 강도를 추정할 수 있게 허용할 뿐만아니라 구조내 많은 영역에서의 분석을 용이하게 한다[10, 12, 17]. 즉, 레이저 파장의 침투깊이의 차이로 설명할 수 있다. 장파장은 단파장보다 시료내 깊이까지 변조를 일으키기 때문에 구조에 따른 분석 목적에 따라 선택을 필요로 한다.

Fig. 4(a)는 15초간 화학적 식각시킨 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조를 가지는 시료의 변조빔 세기(1~18 mW)에 따른 PR 스펙트럼을 나타내었다.

그림에서와 같이 변조빔의 세기를 증가시키에 따라 PR 신호와 주기는 거의 변화가 없는 반면, 신호의 진폭은 증가하였다. E<sub>g</sub>(AlGaAs) barrier(▲), 초격자 양자우물 관련 전이(■) 및 A\* 피크(●)의 진폭을 변조빔 세기의 변화에 따라 나타내면 Fig. 4(b)와 같다.

변조빔의 세기를 증가시키에 따라 E<sub>g</sub>(AlGaAs)와 초격자 양자우물 관련 피크의 진폭은 선형적으로 증가한다. 반면 A\* 피크는 약 10 mW 부근에서 포화되므로 일반적으로 불순물(impurity) 관련 피크로 생각할 수 있다. 변조빔 세기(I)와 진폭(ΔR/R) 사이의 관계는 아래 식과 같다[17].

$$\frac{\Delta R}{R} \propto I^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

여기서  $\frac{1}{n}$ 은 변조빔 세기에 대한 진폭과의 관계에서 기울기를 나타내는 변수로서 임계점 형태를 나타낸다. 특히 이러한 현상은 PL 측정에서도 밝혀진 바[17]와 같이 변조빔의 세기를 증가시키에 따라 밴드간 및 엑시톤 전

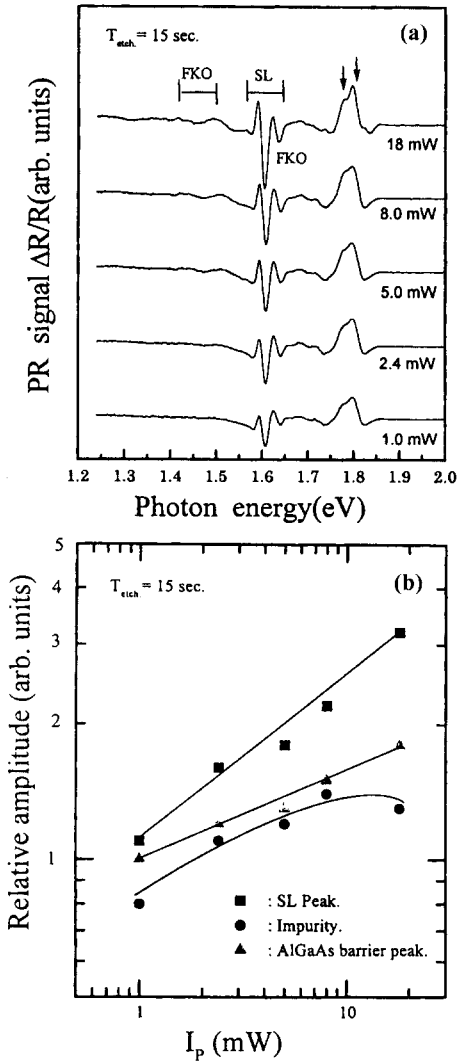


Fig. 4. (a) PR spectra according to modulation beam intensity for the  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$  MQWIP sample, (b) The graph of the PR signal amplitude according to modulation beam intensity in the  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$  MQWIP sample.

이에 의한 신호의 진폭은 선형적으로 증가하고, 불순물과 관련된 신호의 진폭은 증가하다가 포화되는 경우와 일치한다.

Fig. 5는 15초간 화학적 식각시킨  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$  다중 양자우물 적외선 광검출기 구조의 측정온도(80K~300K) 변화에 따른 PR 신호의 변화를 나타낸 것이다.

각 영역의 신호 형태를 살펴보면, I 영역의 약 1.42 eV 아래의 진동은 온도에 무관한 진동임을 확인할 수

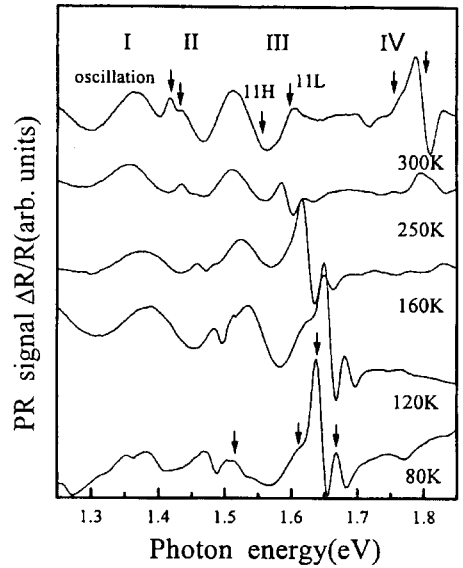


Fig. 5. The PR spectra according to temperature in the  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$  MQWIP sample.

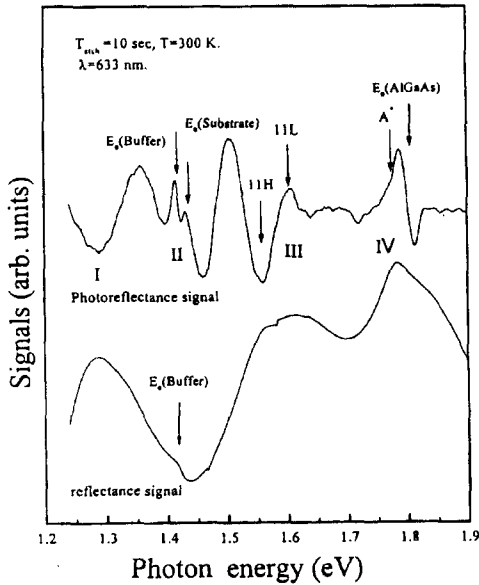
있다. II와 III 영역에서 저온으로 갈수록 화살표로 표시한 관련 피크들이 고에너지 쪽으로 이동하며 피크 분리가 뚜렷하게 나타났다. 특히 II 영역에서 고온에서는 완충층과 기판 관련 피크의 중첩으로 나타났지만 저온(80K)에서는 완충층에 관련된 피크만 나타났다. 또한 III 영역에서 저온으로 갈수록 격자간 응축(lattice compression)에 의한 초격자 양자우물 계면이 뚜렷이 경계되고 있음을 보인다. 이에 양자 우물 내에 새로운 에너지 준위(11H, 11L)가 형성되었음을 알았다. 여기서 11H와 11L은 양자수(n)가 1일 때 전도대의 전자상태에서 가전자대의 무거운 정공 및 가벼운 정공 준위까지의 전이 에너지를 나타낸다. 이런 구조에서는 전도대와 가전자대의 양자수가 같을 경우만 나타날 수 있음을 말한다.

I영역의 진동 신호의 기원을 규명하기 위하여 광변조 없이 반사도 측정 신호를 얻어 PR 신호와 비교하고, II와 III 영역에서 관련 피크들의 기원을 결정하여 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 반사도 측정 신호를 살펴보면 약 1.35 eV 이하까지는 probe beam 으로 사용한 할로겐 램프 특성과 유사한 경향성을 보였다. 이에 이 진동의 기원은 Fig. 2(a)에서 제시한 첫 번째를 따른다 할 수 있다. 다음은 양자우물 관련 에너지 준위(11H, 11L)들에 대한 Gaussian 1차 미분으로 피팅하여 얻은 실험적 값과

**Table 1.** Transition in the Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs MQWIP sample. The ETHE. means that the value was obtained theoretically

Transition classification	ETHE. (eV) by EFA	Transition energy (eV)	E <sub>0</sub> (GaAs) (eV)	E <sub>0</sub> (AlGaAs) (eV)	ΔE <sub>c</sub> (eV)	ΔE <sub>v</sub> (eV)
11H	1.551	1.555	1.4256	1.796	0.2371	0.1333
11L	1.602	1.596				

**Fig. 6.** Photorefectance and reflectivity spectra of the Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs MQWIP sample.

envelope-wave function approximation(EFA) 분석으로 얻은 이론 값들은 좋은 일치율을 보였으며, EFA 계산에 사용된 인자들은 양자 우물내의 전자(e), 무거운 정공(HH) 및 가벼운 정공(LH)의 유효질량 값은 각각  $m_c^* = 0.0665 m_0$ [18],  $m_{HH}^* = 0.45 m_0$ [19] 및  $m_{LH}^* = 0.088 m_0$ [20]이며, 전도대로 부터의 band offset( $Q_c$ ) 값은 64%로서 Miller 등이 보고한 값[18]과 잘 일치하였다. 그 결과들은 Table 1에 나타내었다.

#### 4. 결 론

MBE법에 의해 성장된 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조를 갖는 시료의 특성을 PR 법으로 측정하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

다른 파장을 가지는 두가지 레이저( $\lambda = 488 \text{ nm}$ 와  $633 \text{ nm}$ )으로 광변조시켜 얻은 PR 신호에서 back-reflec-

tance, GaAs, quantum well 및 AlGaAs barrier 등 3가지 또는 4가지의 다른 관련 신호들이 중첩되어 나타남을 알았으며, 식각을 통해 관련된 피크들의 기원을 규명하였다. 약 1.42 eV 이하 영역의 oscillation-like 신호는 시료의 높은 반사표면으로 부터의 back-reflectance 효과에 기인한 것으로 온도의존성과 반사도 조사로 규명할 수 있었다. 약 1.42 eV 영역의 GaAs 관련 신호는 caplayer가 완전히 제거되는 15초 이상에서는 펄핑 파장에 따라 칩 두께의 차이로 얻을 수 있는 정보도 차이가 있었으며, 장파장계는 완충층과 기판에 이르기까지 광변조를 일으킴을 알 수 있었다. 또한 약 1.42~1.7 eV 영역에서 내부 전기장의 영향으로 FKO와 양자우물 내에 새로이 형성된 준위들의 중첩된 신호가 온도를 낮춤으로서 뚜렷한 분리를 나타내었으며, 이는 저온에서 격자간 응축에 의한 계면 경계가 뚜렷해졌기 때문이다. 약 1.78 eV 영역에서 AlGaAs barrier에 관련된 전이가 나타났으며, 밴드 단 아래 성장시 잔여 불순물인 carbon에 의한 A\* 피크를 변조법 세기 의존성 조사로 규명하였다. 조성비(x)는 Huang 등의 제안식보다 Sek 등이이 제안한 조성식에 잘 일치되었으며, 그 값은 약 29.6%으로 실제 성장 조건의 30%와 거의 일치하였다. 양자우물 관련 에너지 준위(HH1, LH1)에 대한 Gaussian 1차 미분으로 피팅하여 얻은 실험적 값과 Schrodinger 유한 네모난 양자우물 모델을 적용하여 envelope-wave function approximation(EFA) 분석으로 얻은 이론 값들은 좋은 일치율을 보였다.

#### 참고문헌

- [1] D. Huang and S. K. Lyo, *J. Appl. Phys.* **83**, 4531 (1998).
- [2] S. V. Bandara, S. D. Gunapala, J. K. Liu, E. M. Luong, J. M. Mumolo and W. Hong, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2427 (1998).
- [3] C. J. Chen, K. K. Choi, W. H. Chang and D. C. Tsui, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 7 (1998).
- [4] B. F. Levine, C. G. Jethoe, G. Hasnain, J. Walker

- and R. J. Malik, *Appl. Phys. Lett.* **53**, 296 (1988).
- [5] B. K. Jenousek, M. J. Daugherty, W. L. Bloss, M. L. Resenbluth, M. J. O'loughin, H. Kanfer, F. J. De Luccia and L. E. Perry, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 7608 (1990).
- [6] B. F. Levine, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2354 (1990).
- [7] O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Botka, W. T. Beard and J. Comas, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 970 (1985).
- [8] H. Shen, F. H. Pollak and J. M. Woodall, *J. Vac. Sci. Technol.* **B8**, 413 (1990).
- [9] H. Shen, M. Dutta, L. Fotiadis, P. G. Newman, R. P. Moerkirk, W. H. Chang and R. N. Sacks, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2118 (1990).
- [10] G. Wang, P. Tilong, R. Melliti and E. Mao, *Phys. Stat. Sol.* **164**, 117(1997).
- [11] D. E. Aspnes, "Handbook on Semiconductors", edited by T. S. Moss(North-Holland, New York, 1980), 2, p. 109.
- [12] G. Sek, J. Misiewicz, M. Kaniewska, K. Reginski and J. Muszailski, *Vacuum.* **48**, 283 (1997).
- [13] Lipsanen and V. M. Airaksinen, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 2863 (1993).
- [14] A. C. Han, M. Wojtowicz, D. Pascua, T. R. Block and D. C. Streit, *J. Appl. Phys.* **82**, 2607 (1997).
- [15] D. Huang, G. Ji, U. K. Reddy, H. Motkoe, F. Xiong and T. A. Tombrello *J. Appl. Phys.*, **63**, 5447 (1988).
- [16] G. Sek, J. Misiewicz and T. S. Cheng, *Advanced Material for Optics and Electronics.* **7**, 241 (1997).
- [17] 이정열, 김인수, 손정식, 김동렬, 배인호, 김대년, *한국진공학회지* **7**, 341 (1998).
- [18] S. Adachi, *J. Appl. Phys.* **58**, R1 (1985).
- [19] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus. *Phys. Rev.* **B32**, 1043 (1985).
- [20] B. V. Shanabrook, O. J. Glembocki and D. A. Broide, *Phys. Rev.* **B39**, 3411 (1989).