

# Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 계면에 대한 Photoreflectance 특성



## Photoreflectance Characteristics of Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs Interface

이정열\*, 김동렬\*, 이동율\*, 유재인\*, 손정식\*, 배인호\*, 김상기\*\*

(Jung-Yeul Lee\*, Dong-Lyeul Kim\*, Dong-Yul Lee\*, Jae-In Yu\*, Jeong-Sik Son\*, In-Ho Bae\*, Sang-Gi Kim\*\*)

### Abstract

We have performed photoreflectance(PR) measurement for Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs structure and have observed that PR spectrum is superposition of two signals which originate from GaAs substrate. From the modulation beam power dependence, we reveal that the photo-carriers, which cause the PR signals from the GaAs, are generated at the vicinity of the interface. We have also demonstrated that PR signals from GaAs substrate can be separated from the other contributions at a high modulation frequency. Through measuring the modulation frequency dependence, we have confirmed that this results from the difference of the lifetimes of photo-carriers.

**Key Words(중요용어)** : Franz-Keldysh oscillation(FKO), Lifetimes of photo-carriers, 2D electron, Modulation frequency(변조 주파수), Notch

### 1. 서 론

Photoreflectance(PR)는[1] secondary light source에 의해 물질내의 전기장을 변조시키는 electromodulation의 비접촉 방법(contactless method)으로서 비파괴적(nondestructive)이며, 실제 소자가 동작하는 상온에서도 예리한 스펙트럼을 얻을 수 있기 때문에 반도체의 특성연구에 많이 적용되고 있다[2~5]. 최근에는 양자우물(quantum well), 초격자(superlattice) 그리고 2-차원 전자가스(twodimensional electron gas)와 같은 초미세 구조로된 소자의 중요성이 점차 증가함에 따라, 이러한 구조들에 대한 특성연구 방법으로 PR이 많이 사용되고 있다. 그러나 초미세 구조에 대한 PR 연구는

기관과 완충층에서보다도 주로 활성층에 대해 이루어지고 있다. 특히 AlGaAs와 GaAs로 이루어진 반도체에서 GaAs 영역인 기관과 완충층에서 나타나는 PR 신호의 연구는 그 물질의 중요성에 비해 아주 적은 편이고, 또한 명확하게 규명되고 있지 못하다. 따라서 본 실험에서는 MBE에 의해 성장된 AlGaAs/GaAs 구조에 대하여 GaAs에 의한 PR 신호의 특성을 조사하였다. 특히 AlGaAs/SI-GaAs 구조에서 GaAs에 의한 신호를 중심으로 하여 레이저 세기, 측정온도 그리고 변조 주파수에 따른 PR 스펙트럼을 비교 분석하였다.

### 2. 이 론

반도체에 대한 PR신호는 표면 전기장 E<sub>s</sub>의 크기에 따라 높은 전기장 상태(high-field condition)와 낮은 전기장 상태(low-field condition)로 나눌 수 있다. 높은 전기장 상태는 표면 전기장이 큰 경우이며 보통 도핑된 시료에서 나타나고, 낮은 전기장 상태는 도핑되지 않은 시료에서 관찰된다.

Aspnes[6]은 다음 식을 만족할 때 낮은 전기장 상

\* : 영남대학교 물리학과  
(경북 경산시 대동 214-1, Fax : 053-814-6141  
E-mail : dlkim@physics.yeungnam.ac.kr)

\*\* : 한국전자통신연구원 단위공정연구소  
1998년 12월 21일 접수, 1999년 5월 27일 심사완료

태임을 보여 주었다.

$$h \Omega < \frac{\Gamma}{3} \quad (1)$$

여기서  $h \Omega$ 는 임계점(critical point)과 관련된 특성 에너지(characteristic energy)이고,  $\Gamma$ 는 임계점 에너지  $E_g$ 에 대한 평탄 인자(broadening parameter)이다.

$h \Omega$ 는 표면 전기장  $E_s$ 와 다음의 식을 만족한다.

$$h \Omega = \left( \frac{e^2 E_s^2 h^2}{8\mu} \right)^{1/2} \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 환산질량이다.

낮은 전기장 상태에서 PR의 신호형태는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re}[\Sigma C \theta^n (E - E_g + i\Gamma)^{-n}] \quad (3)$$

여기서  $E$ 는 probe beam의 에너지이고,  $C$ ,  $\theta$ 는 진폭과 위상을 나타내는 요소(factor)로서 변조신호 형태의 크기(amplitude)와 비대칭성(asymmetry)으로부터 결정된다.  $E_g$ 와  $\Gamma$ 는 각각 띠틈 에너지와 평탄인자이다.  $n$ 은 임계점의 차원(dimension)을 나타내는 것으로서  $n=2, 2.5$  그리고  $3$ 으로 나타낼 수 있으며, 각각 엑시톤(exciton), 3-차원 띠틈(three-dimensional band-to-band), 2-차원 띠틈(two dimensional band-to-band) 전이(transition)에 해당된다. 식 (3)은 PR 측정값을 이론적으로 피팅(fitting)할 때 사용된다.

높은 전기장 상태에서는 PR 신호가 Airy 함수와 derivative의 곱에 비례한다. 이것은 asymptotic form으로 나타난다[7].

$$\frac{\Delta R}{R} = \cos\left(\frac{2}{3}\right) \left( \frac{E - E_g}{h \Omega} \right)^{3/2} + \frac{\pi(d-1)}{4} \quad (4)$$

여기서  $d$ 는 임계점의 차원이다. 식 (4)의 신호모양은 진동형태를 가지며 Franz-Keldysh oscillation (FKO)이라고 한다[8].

### 3. 실험 방법

본 연구에서 사용한 시료는 MBE(molecular beam epitaxy)를 이용하여 SI-GaAs 기판위에 먼저 산화막을 제거한 뒤, GaAs 완충층(buffer layer) 없이 Al의 조성비가 약 20 %인  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 층을 두께  $0.5 \mu m$ 로 성장하였다. 시료의 성장온도는  $580 \text{ }^\circ C$

로 하였다. PR 측정은 여기광으로  $10 \text{ mW He-Ne}$  레이저( $6328 \text{ \AA}$ )를 사용하였으며, 레이저의 변조 주파수(modulating frequency)는 광단속기를 사용하여  $200 \text{ Hz} \sim 2 \text{ kHz}$ 로 하였다. 그리고 probe beam으로는  $250 \text{ W}$  텅스텐-할로젠 램프를 사용하였다. 이를 초점거리가  $0.27 \text{ m}$ 인 Spex 270M 분광기를 사용하여 단색화된 빛을 얻었고, 이 빛을 렌즈로 집속시켜 시료에 입사 시켰다. 반사된 빛은 PIN silicon photodiode를 사용하여 검출하였고, 이 신호는 PSD(phase sensitive detector)인 EG&G PAR 5209 모델의 lock-in amplifier로 증폭하였다. 규격화된 변조 반사율( $\Delta R/R$ )은 lock-in amplifier에서 ratio function을 이용하여 구하여 졌다.

### 4. 실험 결과

그림 1은 GaAs 기판과  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조에서의 상온에서 측정된 PR 스펙트럼을 나타내었다. GaAs 기판에 대한 PR 신호는 약  $1.42 \text{ eV}$ 에서 띠틈 에너지( $E_g$ )가 나타났고, 약  $1.76 \text{ eV}$ 에서  $E_g + \Delta_0$ 에 의한 신호를 관측할 수 있었다. 그리고  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조에서의 PR 스펙트럼은  $1.42 \text{ eV}$  부근에서 GaAs에 의한 신호를 관측할 수 있었고, 이때 기판의 PR 신호와 다르게 띠틈 에너지( $E_g$ ) 외에 높은 에너지에서 피크 A를 관측할 수 있었다. 이 피크 A에 대해서는 뒤에서 상세히 다룰 것이다. 또한  $1.7 \text{ eV}$  부근에서  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 에 의한 피크가 나타났고, three-point method[1]에 의해서  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 의 띠틈 에너지가 약  $1.721 \text{ eV}$ 임을 알 수 있었다. 이 값으로부터 Al의 조성비가  $\sim 0.2$ 임을 얻을 수 있었다[9].

그림 2는 온도  $80 \text{ K}$ 에서 측정된 PR 스펙트럼을 보여준다. GaAs 기판에 대한 PR 신호는 3차 미분 형태인 한 개의 신호가 관측되었으나,  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$ 에 대한 PR 스펙트럼은 GaAs에 의한 피크가 고 전기장 영역에서 나타나는 FKO 처럼 나타났다. 그리고 약  $1.8 \text{ eV}$  부근에서 두 개의 신호를 관측하였고, 이는 그림에서 나타난 것처럼  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$ 의 띠틈 에너지와 GaAs의  $E_g + \Delta_0$ 에 의한 신호로 보여진다. 또한 온도가 낮아짐에 따라서 SI-GaAs인 경우 캐리어의 양은 급격하게 감소하게 되고 이 경우  $E_g + \Delta_0$ 의 에너지 값이 크기 때문에 충분한 검출을 얻을 수 없으므로 그 신호가 거의 사라졌지만  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$  경우 계면의 notch에 고립된 캐리어가 존재하므로 GaAs의  $E_g + \Delta_0$ 에 의한 피크가 나타남을 알 수 있다.

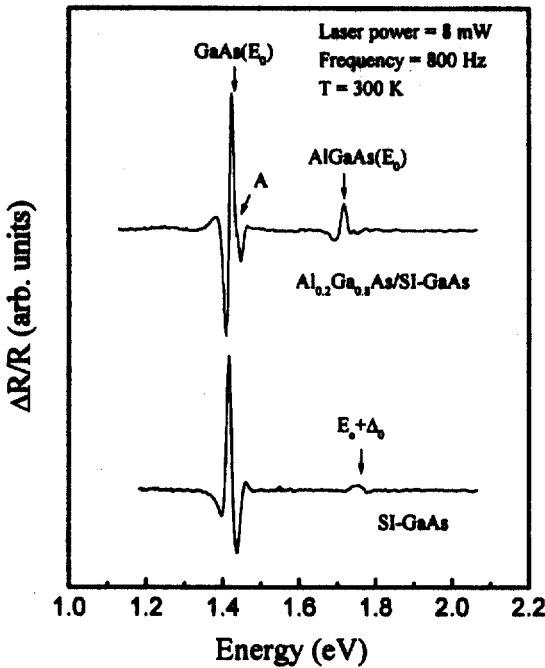


그림 1. 300 K에서 측정 한 GaAs 기판, Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/SI-GaAs 구조에서의 PR 스펙트럼.

Fig. 1. PR spectra of the GaAs substrate and Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/SI-GaAs structure at 300 K.

그림 3은 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/SI-GaAs 구조의 온도에 따른 PR 스펙트럼을 나타내었다. 온도가 낮아짐에 따라 GaAs와 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As의 신호가 높은 에너지로 이동함을 알 수 있다. 또한 온도가 낮아짐에 따라 높은 에너지의 피크 A가 GaAs의 E<sub>g</sub> 피크와 분리되면서 상대적인 세기가 증가하였고, 80 K에서는 두 개의 피크가 서로 중첩되어 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서 80 K에서 나타나는 GaAs 영역에서의 피크는 고 전기장 영역에서 나타나는 FKO에 의한 피크가 아니라 두 개의 피크가 서로 중첩되어 나타나는 신호라는 것을 알 수 있다.

그림 4는 300 K에서 측정 한 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/SI-GaAs 구조에서의 레이저 세기에 따른 PR 스펙트럼을 나타내었다. 레이저 세기가 증가함에 따라 GaAs 영역의 높은 에너지 피크가 주 피크와 뚜렷하게 분리되는 것을 볼 수 있고, 이는 GaAs 영역의 두 개의 피크가 서로 다른 근원을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 AlGaAs와 GaAs의 이종접

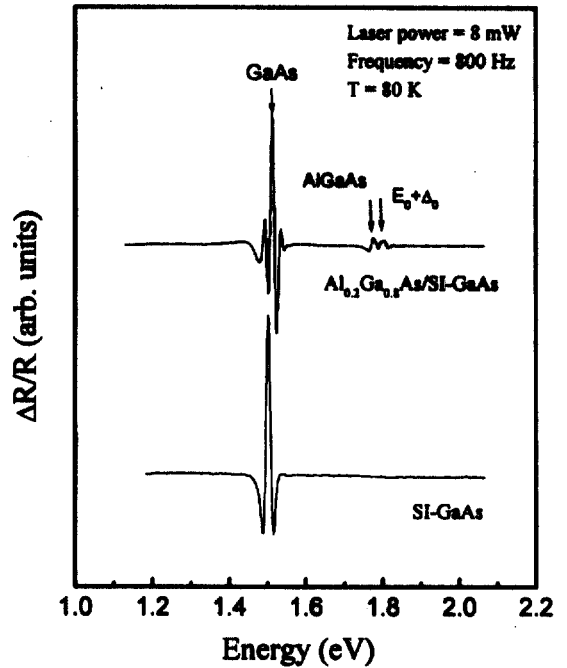


그림 2. 온도 80 K에서 측정 한 PR 스펙트럼.  
Fig. 2. PR spectra measured at 80 K.

합은 band discontinuity에 의해 계면에서 노치(notch)에 구속된 2D 전자와 계면근처의 GaAs bulk에서 3D 정공이 형성되고[10], 따라서 높은 에너지의 피크 A는 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As와 GaAs의 계면에서 생성되는 노치(notch)에 구속된 2D 전자와 계면근처의 GaAs bulk에서 3D 정공에 기인한 것으로 보여진다.

그림 5는 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/SI-GaAs 구조의 변조 주파수에 따른 PR 스펙트럼을 나타내었다. 변조 주파수가 증가함에 따라 GaAs 영역의 신호의 상대적인 세기가 감소함을 알 수 있다. 변조 주파수에 따른 PR 신호 세기의 측정 결과, 변조 주파수가 증가함에 따라 PR 신호 세기가 감소되었고, 이러한 PR 신호의 감소는 레이저 세기의 감소에 의한 것이 주된 원인이라 생각한다. 그러나 변조 주파수가 증가함에 따라 레이저 세기가 감소함에도 불구하고, 레이저 세기가 증가할 때와 마찬가지로 GaAs 영역의 높은 에너지 피크 A와 주 피크가 뚜렷하게 분리되었다. 이것은 두 신호의 근원이 되는 광캐리어들이 서로 다른 lifetime을 가지기 때문이라고 할 수 있으며, 변조 주파수가 증가함에 따라 뚜렷하게 분리되는 높은

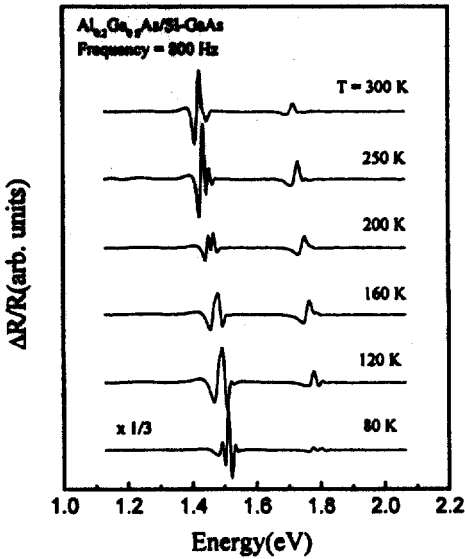


그림 3.  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조의 온도에 따른 PR 스펙트럼.

Fig. 3. PR spectra of  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  structure at various temperature.

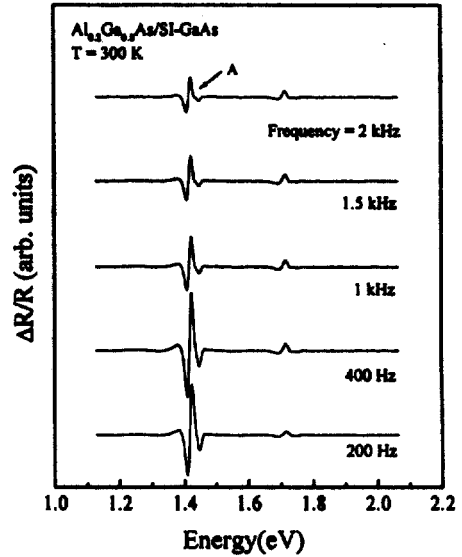


그림 5.  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조의 변조 주파수에 따른 PR 스펙트럼.

Fig. 5. PR spectra of  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  structure at various modulation frequency.

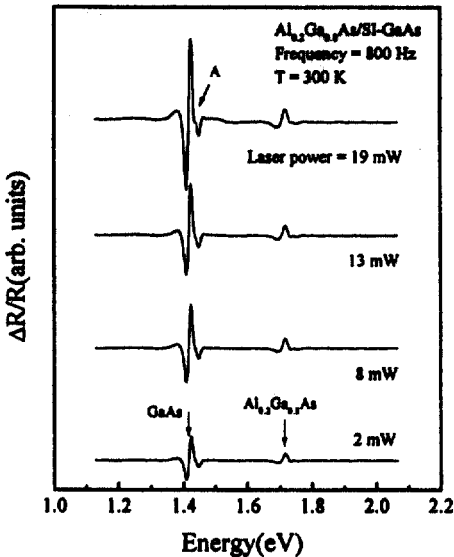


그림 4.  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조의 레이저 세기에 따른 PR 스펙트럼.

Fig. 4. PR spectra of  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  structure at various laser power.

에너지의 피크 A는 주 피크보다 작은 lifetime을 가진다고 볼 수 있다. 따라서 변조 주파수가 증가함에 따라 뚜렷하게 분리되는 높은 에너지의 피크는 GaAs와 AlGaAs 계면에서 발생하는 notch에 구속된 2D 전자에 의한 것이라고 볼 수 있다.

### 5. 결 론

GaAs 기판과  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조에 대하여 PR 측정 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. GaAs 기판에 대해 상온에서 측정된 PR 스펙트럼은 3차 미분형 형태인 한 개의 신호가 관측되었으며,  $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$  구조에서는 GaAs의 에너지 띠  $E_0$  외에 높은 에너지에서 피크가 관측되었다.

2. AlGaAs에 의한 PR 신호는 상온에서 1.721 eV 이었고 이 값으로부터 Al의 조성비가 0.2임을 얻을 수 있었다. 또한 GaAs의  $E_0$ 와  $E_0 + \Delta_0$ 는 각각 1.415 eV, 1.756 eV 이었다.

3. 온도 80 K에서 측정된 PR 스펙트럼은 GaAs에 의한 피크가 고 전기장 영역에서 나타나는 FKO와 같이 보이지만, 온도에 따른 PR 측정 결과

온도가 낮아짐에 따라 높은 에너지의 피이크가 GaAs의 E<sub>0</sub> 피이크와 분리되면서 상대적인 세기가 증가하였다. 이로부터 80 K에서는 두 개의 피이크가 서로 중첩되어 나타난다는 것을 알 수 있다.

4. 높은 에너지 피이크는 레이저 세기와 주파수가 증가함에 따라 주 피이크와 뚜렷하게 분리가 되었다. 이는 GaAs 영역의 두 개의 피이크가 서로 다른 근원을 가지고 있다는 것을 보여준다.

5. 변조 주파수 의존성으로부터 두 신호의 근원이 되는 광캐리어들은 서로 다른 lifetime을 가진다는 것을 알 수 있었고, 높은 에너지의 피이크는 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As와 GaAs의 계면에서 생성되는 노치(notch)에 구속된 2D 전자에 기인한 것으로 설명하였다.

### 참 고 문 헌

1. D. E. Aspnes, "Handbook on Semiconductors", edited by T. S. Moss(North-Holland, Amsterdam, 1980), Vol. 2, p. 109.
2. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard and J. Comas, "Photoreflectance chacterization of interband-transitions in GaAs/AlGaAs multiple quantum wells and modulation-doped heterojunctions", Appl. Phys. Lett. **46**, 970(1985).
3. H. Okamoto, "Semiconductor quantum-well structures for optoelectronics : Recent advances and prospects", Jpn. J. Appl. Phys. **26**, 315(1987).
4. M. Sydor, J. Angelo, J. J. Wilson, W. C.

- Mitchel and M. Y. Yen, "Photoreflectance from GaAs and GaAs/GaAs interfaces", Phys. Rev. **B40**, 8473(1989).
5. P. D. Berger, C. Bru, T. Benyattou, G. Guillot, A. C. Paule, L. Couturier and P. Grosse, "Investigations of vertical cavity surface emitting laser by photoreflectance spectroscopy", Appl. Phys. Lett. **68**, 4(1996).
6. D. E. Aspnes, "Third-derivative modulation spectroscopy with low-field electroreflectance", Surf. Sci. **37**, 418(1973).
7. D. E. Aspnes and A. A. Studna, "SchottkyBarrier Elecrtoreflectance : Application to GaAs", Phys. Rev. **B7**, 4605(1973).
8. D. E. Aspnes, "Band nonparabolicities, broadening, and internal field distributions : The spectroscopy of Franz-Keldysh oscillations", Phys. Rev. **B10**, 4228(1974).
9. T. F. Kuech, D. J. Wolford, R. Potemski, J. A. Bradley and K. H. Kelleher, D. Yan, J. P. Farrell, P. M. S. Lesser and F. H. Pollak, "Dependence of the Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As band edge on alloy composition based on the absolute measurement of x", Appl. Phys. Lett. **51**, 505(1987).
10. V. N. Bessolov, V. V. Evstropov and M. V. Lebedev, "Interface exciton luminescence : An indication of interface inhomogeneities in single GaAs/AlGaAs heterostructures", J. Vac. Sci. Technol. **A31**(6), 2684(1995).