

Photoreflectance 측정에 의한 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ 계면의 특성 조사

이철욱 · 김인수 · 손정식 · 김동렬 · 임재영* · 배인호

영남대학교 물리학과, 한국표준과학연구원*
(1997년 4월 8일 접수)

A study of interfacial characteristics for $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ by photoreflectance measurement

Chul-Wook Lee, In-Soo Kim, Jeong-Sik Son, Dong-Lyeul Kim
Jae-Young Leem* and In-Ho Bae

Department of Physics, Yeungnam University
*Korea Research Institute of Standards and Science
(Received April 8, 1997)

요 약 - $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ 의 계면 특성을 상온에서 photoreflectance(PR) 측정을 통하여 연구하였다. 에피층의 두께가 증가함에 따라 PR 신호에서 Franz-Keldysh oscillation(FKO)의 주기가 감소하였고, 계면 전기장은 감소되었다. 이것은 InGaAs와 GaAs의 이종접합계면 부근에서 격자부정합에 의한 결함이 증가되었기 때문으로 생각된다. 에피층의 두께가 300 Å보다 적은 경우 두께가 얇아짐에 따라 InGaAs 층이 임계 두께에 가까워져 strain의 영향으로 밴드갭 에너지가 크게 이동하였다.

Abstract - We studied an interfacial characteristics of $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{GaAs}$ by photoreflectance (PR) measurement at room temperature. With increasing thickness of epitaxial layer, Franz-Keldysh oscillation (FKO) periods of PR signals were decreased, and interfacial electric field was decreased. This can be explained by the increase of defects due to lattice mismatch near the heterointerface between InGaAs and GaAs. For the thickness of epitaxial layer thinner than the 300 Å, InGaAs epitaxial layer closed to critical thickness and increased strain, and then the bandgap energy shifted high energy greatly.

1. 서 론

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 삼원 화합물 반도체는 이원 화합물인 GaAs와 InAs 사이의 격자상수를 가지고 In의 조성에 따라 0.4 eV에서 1.4 eV의 밴드갭을 가진다. InGaAs/GaAs 이종접합 구조에서 두 물질의 큰 밴드 불연속 때문에 InGaAs 층에 전자와 양공을 구속하여 2차원 전자 가스를 형성하는 것이 가능하다. 또한 InGaAs 층에서 In의 조성이 증가함에 따라 전자 이동도가 커지게 되므로 field effect transistor(FET)나 high electron mobility transistor(HEMT) 같은 소자에 많이 이용되고 있다[1-4].

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 와 GaAs 사이에는 격자상수의 차이로 인하

여 조성의 전 영역에서 격자 부정합을 이루므로 결함이 없는 strained 층을 성장시키기 위하여 에피층의 두께가 임계두께(critical thickness)보다 작아야 한다[5]. 그러나 In의 조성이 증가함에 따라 임계두께의 값이 줄어들기 때문에 소자 제작에 매우 불리하게 된다. 따라서 InGaAs 층을 소자에 적용하기 위해서는 strained 초격자 상태를 이용하거나 이완된 상태의 에피층을 사용하게 된다. 그러므로 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 구조에서 strain에 의한 pseudomorphic 성장 및 dislocation에 의한 이완[5,6]뿐만 아니라 이종접합 계면의 상태에 따라서 소자 특성에 매우 중요한 영향을 미치게 된다[5,6].

단색광을 교류 신호로 시료에 인가하여 유전상수의

변조량을 측정하는 photorefectance(PR) 분광법은 반도체의 밴드갭 구조, 밴드갭 사이의 전이 및 고체의 표면이나 계면을 특징 지우는 방법이다. PR은 시료 내부의 전기장에 따라 변화되는 유전상수의 변조를 측정하므로 계면의 상태에 따라 신호가 민감하게 변화하고 특히 상온에서도 매우 예리한 피크들을 나타내므로 양자 우물 구조나 HEMT 등과 같은 구조의 분석에 매우 유리하다[7].

본 연구에서는 In 조성을 10%로 고정시키고 InGaAs 층의 두께를 변화시켜 반절연성 GaAs(100) 기판 위에 $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ 이종접합 구조를 성장시키고, 상온에서 PR 측정을 통하여 이종접합 계면의 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 InGaAs 에피텍셀 층은 molecular beam epitaxy(MBE)법으로 (100) GaAs 반절연성 기판 위에 성장하였다. InGaAs 에피텍셀 층을 성장하기 전에 약 560°C에서 0.5 μm 정도의 GaAs buffer 층을 성장한 후 온도를 540°C로 낮추어 InGaAs 에피텍셀 층을 성장하였다. 이때 에피텍셀 층의 두께에 따른 특성을 알아보기 위하여 두께를 100-1500 Å까지 변화시켰고 In의 함유량은 10%로 고정하였다.

본 실험에 사용된 PR 측정 장치[8]의 구성은 변조 광원으로 800 Hz의 광단속기를 거친 10 mW He-Ne 레이저(6328 Å)를 사용하였다. Probe 빔은 250 W 텅스텐-할로젠 램프를 광원으로 사용하였으며 이를 초점거리 0.25 m인 분광기(Spex 270 M)에 렌즈를 통하여 집속시키고, 이 분광기를 통해 단색화된 빛을 시료에 입사시켰다. 시료에서 반사된 빛은 렌즈를 통하여 Si photodiode에 집속시키고 시료에서 산란된 레이저 광을 차단하기 위하여 검출기 앞에 적외선 필터를 사용하였다. 검출기에서 나온 신호는 pre-amplifier를 통하여 증폭시킨 다음 lock-in amplifier를 거쳐 personal computer에 규격화된 변조 반사율을 기록하였다.

3. 결과 및 논의

MBE법으로 성장시킨 $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ 시료의 두께에 따른 상온 PR 측정 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 이때 변조 광으로 사용된 레이저의 세기는 10 mW였고 단속 주파수는 800 Hz로 하였다. 측정된 PR 스펙트럼은 GaAs에 의한 1.4 eV 부근의 신호와 1.3 eV 부근의 In-

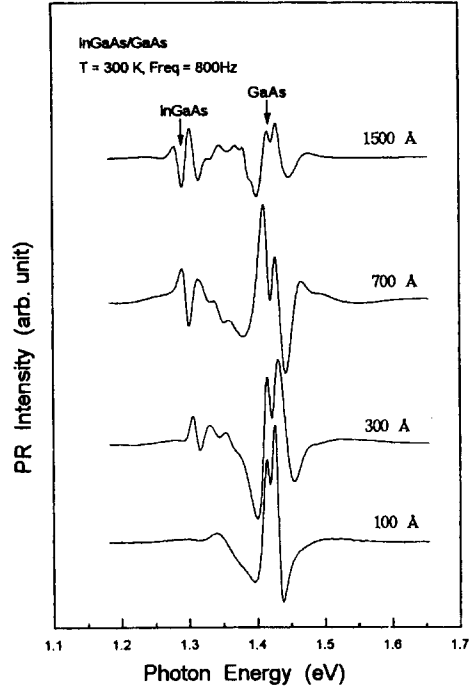


Fig. 1. PR spectra of InGaAs epitaxial layers grown on GaAs as a function of layer thickness.

GaAs에 의한 신호 두 영역으로 나타난다. InGaAs 밴드갭 이상의 에너지에 나타나는 신호는 Franz-Keldysh oscillation(FKO)이다. 에피층의 두께가 증가함에 따라 FKO 피크의 주기가 감소하는 것을 볼 수 있다.

PR 스펙트럼의 형태는 표면 또는 계면 전기장에 따라 저전기장 영역과 고전기장 영역으로 구분되는데, Aspnes[9]에 의하면 저전기장 영역에서 PR 스펙트럼의 형태는

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

으로 주어진다. 여기서 C 는 진폭, θ 는 위상, E_0 은 밴드갭 에너지, Γ 는 평탄인자(broadening parameter)이고, n 은 임계점의 차원을 나타낸다. n 의 값은 엑시톤 전이일 경우에는 2이고, 2차원 및 3차원 전이일 경우는 각각 3 및 2.5의 값으로 주어진다.

한편 Aspnes[10]은 electromodulation에서 관찰된 FKO로부터 Ge에서 다른 임계점에 대한 밴드갭 환산 질량을 결정하였다. 만약 환산 질량을 알고 있다고 가정하면 같은 방법을 사용하여 $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ 계면 부근에서 전기장의 세기를 구할 수 있다.

고전기장의 경우는[11]

$$\Delta R/R \sim \cos \left[\frac{4}{3} \{ (E_m - E_0) / \hbar \Omega \}^{3/2} + \theta_0 \right] \quad (2)$$

으로 근사된다. 여기서 $\hbar \Omega$ 는 특정 에너지이고, θ_0 은 특정한 임계점에 대한 상수이다. 진동의 정점은

$$\frac{4}{3} \{ (E_m - E_0) / \hbar \Omega \}^{3/2} + \theta_0 = m \pi \quad (3)$$

에 의해 결정되고 여기서 E_m 은 m 번째 정점의 에너지이고 m 은 m 번째 정점의 차수이다. m 에 대한 $\frac{4}{3\pi} (E_m - E_0)^{3/2}$ 을 그리면 직선이 나오고 직선의 기울기로부터 특정 에너지 $\hbar \Omega$ 를 얻을 수 있다. 또한 계면 전기장은[12]

$$\begin{aligned} (\hbar \Omega)^3 &= e^2 E_s^2 \hbar^2 / 8 \mu \\ E_s &= (4\sqrt{2} \mu^{1/2} / 3\pi e \hbar) k \end{aligned} \quad (4)$$

으로 주어지고, 여기서 $k = (3\pi/2)(\hbar \Omega)^{3/2}$ 이고 E_s 는 계면 전기장, μ 는 환산질량이다. Fig. 1로부터 측정된 PR 신호의 FKO 피크들을 식 (3)에 따라 m 에 대한 $\frac{4}{3\pi}$

$(E_m - E_0)^{3/2}$ 의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 에피층의 두께가 증가함에 따라 직선의 기울기가 감소함을 알 수 있고, 이것은 식 (4)에 의해 계면 전기장이 감소함을 나타낸다.

Fig. 3에는 에피층 두께에 따른 밴드갭 에너지와 평탄 인자의 값을 나타내었다. 시료의 두께가 300 Å 이상인 시료에서는 두께가 증가함에 따라 밴드갭 에너지의 이동이 적고 평탄 인자의 값이 크게 변화하지 않는다. 이는 InGaAs 층의 두께가 300 Å 이상의 시료에서 두께가 증가함에 따라 InGaAs 층이 이완되고 있음을 나타내고, 따라서 Fig. 2에서와 같이 계면 전장이 감소하는 것은 층의 이완에 따라 전위 밀도와 같은 전기적 결합이 증가되었기 때문으로 생각된다. 또한 층의 두께가 300 Å 보다 적은 시료의 경우 층 두께의 감소에 따라 밴드갭 에너지의 이동이 큰 것으로 보아 InGaAs 층의 두께가 임계 두께에 가까워져 strain의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

1.42 eV 부근에 나타나는 복잡한 신호를 분석하기 위하여 100 Å InGaAs/GaAs 시료를 에칭하여 PR 측정을 하여 Fig. 4에 나타내었다. 시료의 에칭에 사용된 용액

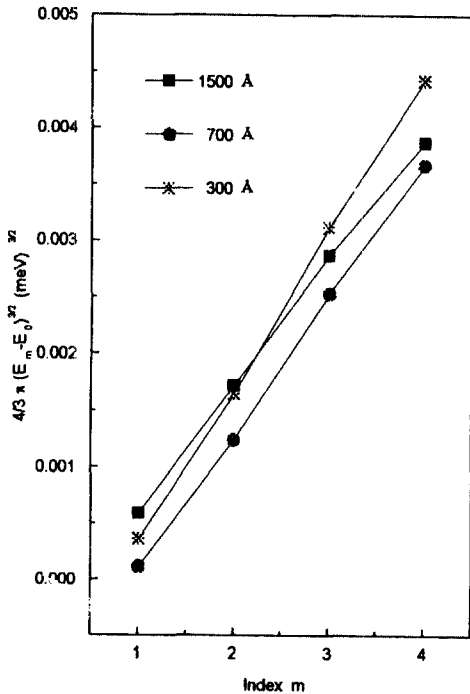


Fig. 2. Plot of $\frac{4}{3\pi} (E_m - E_0)^{3/2}$ vs index number m for PR spectra in Fig. 1.

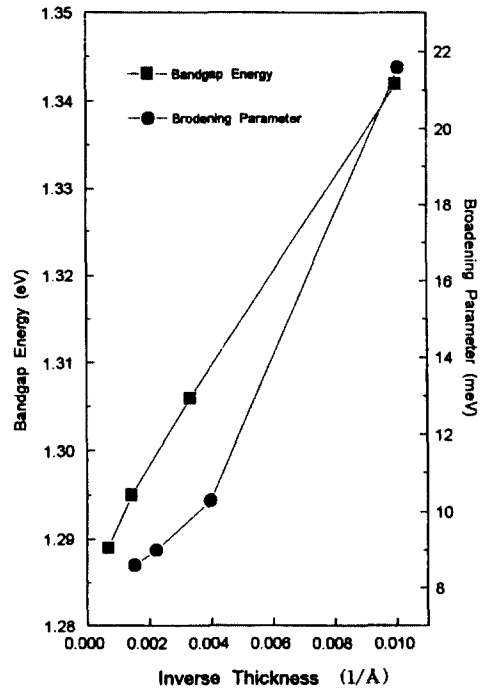


Fig. 3. The bandgap energy and broadening parameter as a function of layer thickness.

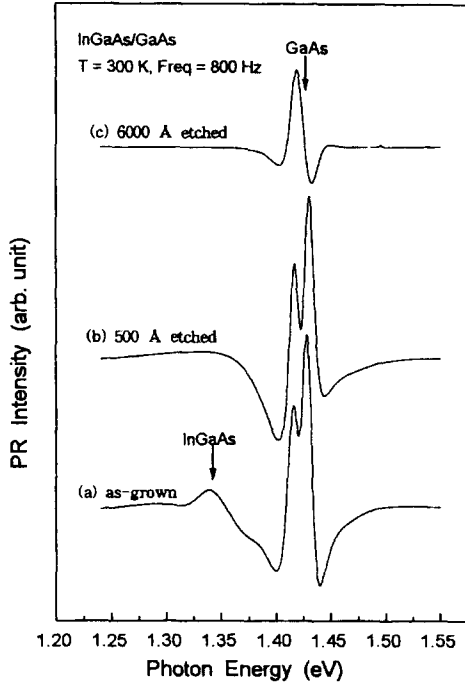


Fig. 4. PR spectra of 100 Å InGaAs/GaAs sample before and after etching. (a) as-grown, (b) 500 Å etched, and (c) 6000 Å etched.

은 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O=1:2:200$ 으로 구성하였고 에칭율은 약 5 \AA/s 이다. 시료를 약 500 \AA 에칭하였을 때 1.34 eV 부근의 InGaAs 피크는 사라졌으나, 1.42 eV 부근의 피크들은 여전히 나타났다. 한편 6000 \AA 에칭한 시료의 PR 스펙트럼에서 복잡한 신호는 사라지고 1.42 eV 의 기판에 의한 피크만 남는 것을 알 수 있다. 이는 InGaAs/GaAs 구조에서 완충 층으로 사용된 5000 \AA 의 GaAs 층이 에칭에 의해 완전히 제거되었기 때문이다. 따라서 1.42 eV 이상의 에너지에 나타난 예리한 신호는 M. Gal 등[13]에 의해 보고된 MBE로 성장된 시료에서 spike 신호이다. 이들은 spike 신호의 원인을 반절연성 GaAs 기판 위에 MBE로 성장된 GaAs 에피층에서 기판과 에피층 사이의 농도 차이에 의한 영향으로 보고하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 MBE로 성장시킨 $In_{0.1}Ga_{0.9}As/GaAs$ 구조에서 두께에 따른 계면의 특성을 상온 PR을 측정하여 조사하였다. 층의 두께가 증가함에 따른 FKO 피크의 주기의 감소로 시료의 계면 전기장이 감소됨을 알았다. 이는 InGaAs 층이 두꺼워짐에 따라 계면의 전기적 결합이 증가되었기 때문으로 생각된다. 층의 두께가 300 \AA 보다 적은 시료에서 두께가 얇아짐에 따라 밴드갭의 이동이 큰 것은 InGaAs 층의 두께가 임계 두께에 가까워질수록 strain의 영향이 커지기 때문이다.

참고문헌

1. K. Seo, M. Heblum, C. M. Knoedler, W. P. Hong and P. Bhattacharya, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 1946(1988).
2. J. J. Rosenberg, M. Benlarmi, P. D. Kirchner, J. M. Woodall and G. D. Pettit, *IEEE Electron Device Lett.*, **6**, 491 (1985).
3. K. Chang, R. Gibala, D. J. Srolovitz, P. K. Bhattacharya and J. F. Mansfield, *J. Appl. Phys.*, **67**, 4093 (1990).
4. S. Katsumoto, A. Yamamoto, and M. Yamaguchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, 636 (1985).
5. T. P. Pearsall, *IEEE J. Quantum Electron*, **QE-16**, 709 (1980).
6. K. W. Carey, S. Y. Wang, R. Hull, J. E. Turner, D. Oertel, R. Bauer and D. Bimberg, *J. Cryst. Growth*, **77**, 558 (1986).
7. T. Kanata, M. Matsunage, H. Takakura, Y. Hamakawa and T. Nishino, *J. Appl. Phys.*, **69**, 3691 (1991).
8. 김인수, 이정열, 배인호, 김상기, 안행근, 박성배, *한국진공학회지*, **5**, 127 (1996).
9. D. E. Aspnes, *Surf. Sci.*, **37**, 418 (1973).
10. D. E. Aspnes, *Phys. Rev. Lett.*, **31**, 230 (1973).
11. W. Zhou, C. H. Perry, L. Ma, K. S. Lee, J. M. Worlock, A. Zrenner, F. Koch and K. Ploog, *J. Appl. Phys.*, **69**, 4075 (1991).
12. N. Pan, X. L. Zheng, H. Hendriks, and J. Carter, *J. Appl. Phys.*, **68**, 2355 (1990).
13. M. Gal, R. Shi and J. Tann, *J. Appl. Phys.*, **66**, 6196 (1989).