

MBE 법으로 성장시킨 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 Photoreflectance 특성에 관한 연구

이정열 · 김인수* · 손정식 · 김동렬 · 배인호 · 김대년**

영남대학교 물리학과, *한국산업대학 전자공학과, **대구보건대학 안경광학과
(1998년 6월 9일 접수)

The study on photoreflectance characteristics of the $Al_xGa_{1-x}As$ epilayer grown by MBE method

Jung-Yeul Lee, In-Soo Kim*, Jeonng-Sik Son, Dong-Lyeul Kim,
In-Ho Bae and Dae-Nyoun Kim**

Department of Physics, Yeungnam University

*Department of Electronics Engineering, Hankook University

**Department of Ophthalmic Optics, Daegu Health College

(Received June 9, 1998)

요 약 - MBE법에 의해 성장된 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 특성을 photoreflectance(PR) 측정으로 분석하였다. Low power Franz Keldysh(LPFK)를 만족하는 GaAs 완충층에 의한 Frang-Keldysh Oscillation(FKO) 분석에서 띠 간격에너지(E_0) 값은 1.415 eV, 계면 전기장(E_i)은 1.05×10^4 V/cm, 운반자 농도(N_c)는 1.3×10^{15} cm^{-3} 이었다. PR 상온 스펙트럼 분석에서 $E_0(Al_xGa_{1-x}As)$ 신호 아래 A^* 피크는 시료 성장시 존재하는 불순물 carbon에 의한 것으로 완충층 GaAs 보다 다소 PR 신호 세기가 낮고 왜곡된 신호를 나타내었다. 또한, GaAs 완충층의 트랩 특성시간은 약 0.086 ms 정도이며, 1.42 eV 부근 두 개의 중첩된 PR 신호는 화학적 식각으로 GaAs의 기판에 의해 나타나는 3차 미분형 신호와 GaAs 완충층에 의해 나타나는 FKO 신호가 중첩되어 나타남을 알 수있었다.

Abstract - We analyzed photoreflectance (PR) characterization of the $Al_xGa_{1-x}As$ epilayer grown by molecular beam epitaxy (MBE) method. The band-gap energy (E_0) satisfying low power Franz-Keldysh (LPFK) due to GaAs buffer layer is 1.415 eV, interface electrical field (E_i) is 1.05×10^4 V/cm, carrier concentration (N_c) is 1.3×10^{15} cm^{-3} . In PR spectrum intensity analysis at 300 K the A^* peak below E_0 signal is low and distorted because of residual impurity in sample growth. The trap characteristic time (τ_t) of GaAs buffer layer is about 0.086 ms, and two superposed PR signal near 1.42 eV consist of the third derivative signal of chemically etched GaAs substrate and Franz-Keldysh oscillation (FKO) signal due to GaAs buffer layer.

1. 서 론

Photoreflectance(PR) 분광법은 반도체의 전자적 구조를 조사하거나, 화합물 반도체의 이종접합 구조에서 띠 사이 전이 전이장 분포 및 결정성을 평가하는데 이용되고 있는 도구로서[1] 특히 시료의 띠간격 에너지(E_0)와 표면 및 계면의 운반자 농도(N)를 측정하는데 정확한 방법을 제공하는 비파괴적이고, 비접촉적인 광학적 기술로서 많은 연구가 진행되고 있다[2]. 그리고 상온에서도 두

릿하고 날카로운 미분형 신호를 가지기 때문에 띠간격 에너지를 높은 정밀도로 측정할 수 있을 뿐만 아니라 표면이나 계면의 상태에 대해서 민감하게 반응하는 신호를 가진다. 따라서 이러한 미분형의 신호로 인해 반도체의 표면과 계면 그리고 미세구조 등을 연구하는데 유용한 도구가 되어왔다[3, 4]. 특히 Huang[5]와 Sydor[6] 등은 불순물이 첨가되지 않은 $Al_xGa_{1-x}As$ 시료들에 대한 띠 가장자리(band edge)를 입증하는 연구를 수행된 바 있지만, 여러 변조원의 변화에 따른 $Al_xGa_{1-x}As$ 시료의

특성 조사는 다소 미흡한 편이다.

본 연구에서는 molecular beam epitaxy(MBE)법으로 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층을 성장하여 변조빔의 세기, 광단속 주파수 및 식각 등의 변화에 따른 시료의 특성을 PR 측정으로 조사하였다. 여러 변조원의 변화에 따라 관측된 PR 스펙트럼의 Franz-Keldysh oscillation(FKO) 신호로부터 시료의 접동 특성에너지($\hbar\Omega$), 띠간격 에너지(E_g), 계면 전기장(E_i), 운반자 농도(N) 및 Al 조성비(x)를 결정하였으며, 식각에 의한 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층의 특성을 PR 신호의 분석으로 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 molecular beam epitaxy(MBE)법에 의해 반절연성 GaAs(100) 기판 위에 완충층 GaAs(0.5 μm)을 성장시킨 후, $Al_xGa_{1-x}As$ (0.5 μm) 에피층을 성장하여 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs/SI-GaAs$ 이중접합 구조를 사용하였다.

PR 측정은 여기광으로 He-Ne 레이저(6328 Å)를 사용하였으며, 레이저의 변조 주파수는 광단속기를 사용하여 800 Hz로 고정하였다. 그리고 probe beam으로는 235 W 텅스텐-할로겐 광원을 사용하였다. 이를 초점거리가 0.25 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($\Delta R/R$)은 lock-in amplifier에서 ratio function을 이용하여 얻었다. 그리고 시료의 상대반사율 측정시 외부로부터 빛을 차단하기 위해 암상자를 사용하였으며, PR 측정은 온도 300 K에서 수행하였다.

3. 실험결과 및 논의

Fig. 1(a)에서는 기판으로 사용된 반절연성 GaAs와 이 기판 위에 완충층 GaAs를 성장한 다음, 불순물을 첨가시키지 않고 성장시킨 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층에 대하여 상온에서 측정된 PR 스펙트럼들을 나타내었다.

측정조건은 변조빔으로 8 mW He-Ne 레이저(6328 Å)을 사용하여 광단속 주파수 800 Hz로 수행하였다. 이러한 조건으로 측정된 PR 신호의 형태는 그림에서 본 바와 같이 3차 미분형으로써, 먼저 기판 GaAs에 대한 PR

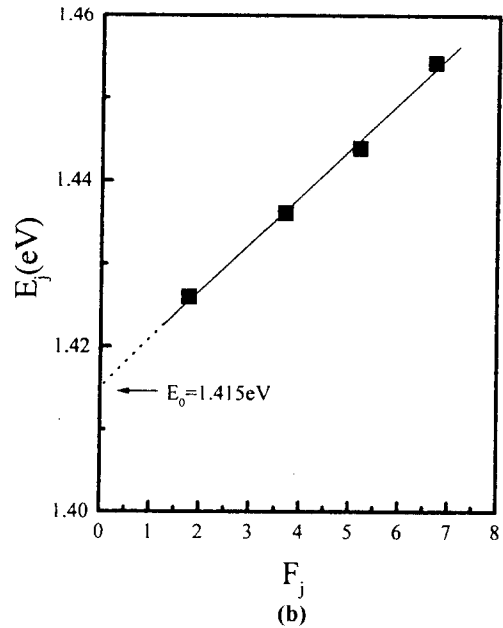
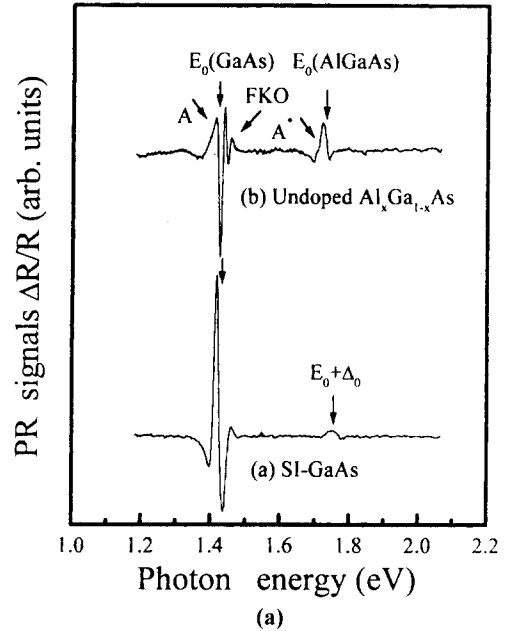


Fig. 1. (a) PR spectra of the semi-insulating GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ epilayer measured at 300 K.

신호의 전이 에너지 위치는 각각 1.42 eV와 1.72 eV 부근에서 관측되었다. 이는 띠간격 에너지(E_g) 및 전도띠와 spin orbital($E_g + \Delta_0$) 간의 전이에 대응된다. 그러나 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층 경우에는 약 1.42 eV 부근의 GaAs에

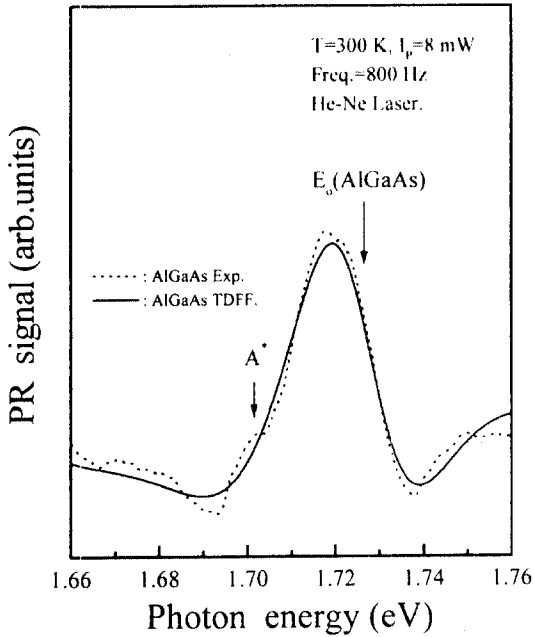


Fig. 2. TDFD fitted graph of PR spectrum in Al_xGa_{1-x}As epilayer.

의한 E₀ 신호 및 Al_xGa_{1-x}As 에피층에 의한 E₀ 신호가 관측되었으며, GaAs의 E₀ 신호보다 낮은 에너지 영역에 A*로 표시된 어깨 신호가 나타났다. 이는 기판 GaAs와 성장된 GaAs 완충층 사이의 간섭효과로 인해 PR 신호가 증첩되어 나타난 것으로 보여진다. 그리고 GaAs의 주된 신호 이상 에너지 영역에서 관측된 Franz-Keldysh oscillation(FKO) 신호는 GaAs와 AlGaAs의 띠간격 에너지 차이로 인해 나타나는 것이다. 또한 약 1.72 eV 부근에서 Al_xGa_{1-x}As 에피층의 E₀ 신호와 약 20 meV 정도 저 에너지 쪽에 A*로 표시된 어깨신호가 관측되었다. A* 피크는 불순물 구조에 의한 것인지 아니면 밴드간 전이에 의한 것인지는 Fig. 3(a)와 (b)에서 상세하게 다루겠다.

일반적으로 반도체에서 PR 측정시 관측되는 신호는 표면 전기장(E_s)의 크기에 따라 높은 전기장 상태(high-field condition)와 낮은 전기장 상태(low-field condition)로 나누어진다. 높은 전기장 상태는 표면 전기장이 큰 경우와 불순물을 첨가시킨 시료에서 나타나고, 낮은 전기장 상태는 불순물이 첨가되지 않은 시료에서 관측된다. 따라서 Aspnes[2]는 다음 식을 만족할 때 낮은 전기장 상태임을 보여 주었다.

$$\hbar\Omega < \frac{\Gamma}{3}$$

여기서 $\hbar\Omega$ 는 임계점(critical point)과 관련된 계의 섹션 특성에너지이고, Γ 는 임계점 에너지 (E_{cp})에 대한 넓어지기 인자(broadening parameter)이다. 낮은 전기장 상태에서 PR 신호의 형태는 다음과 같이 주어진다[2].

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re}[C e^{i\theta} (\hbar\omega - E_{cp} + i\Gamma)^{-n}] \quad (2)$$

여기서 $\hbar\omega$ 는 광원 에너지이고, C와 θ 는 $\hbar\omega$ 에 따라 변하는 진폭과 위상각이다. n은 임계점의 모양으로 n=2, 2.5, 그리고 3으로 나타낼 수 있으며, 이들은 각각 exciton, 3차원 및 2차원 띠간 전이에 해당된다. 측정된 신호를 식 (2)를 사용하여 fitting한 결과, 기판 GaAs의 띠간격 에너지(E₀)는 1.416 eV ($\Gamma_{sv} - \Gamma_{ic}$)이고, Γ 는 11 meV였으며, 띠간격 에너지로부터 약 340 meV 정도 큰 에너지 부근에서 spin orbital split-off(E₀+ Δ_0) 신호가 관측되었다. 그리고 Al_xGa_{1-x}As 에피층에서 E₀ 및 Γ 는 각각 1.726 eV와 25.2 meV였다. 특히 1.42 eV 이상 에너지 영역에서 관측된 FKO 신호를 살펴보면 GaAs 시료에서 환산질량(μ_1)은 가전자대로부터 heavy-hole이 전도대로 전이됨에 관계하므로 계면에서 전기장은 불균일하게 되며, 이중접합 계면으로부터 멀어짐에 따라 전기장이 감소하게 되며, 낮은 변조영역에서 FKO 신호로부터 변조된 전기장은 계면 전기장과 같다고 Shen과 Pollak 등[7-9]에 해서 보고된 바 있다. 따라서 전기장의 불균일은 PR 결과 분석에 실질적인 영향을 미치지 못하므로 계면 전기장의 값은 low power Franz Keldysh(LPFK)을 만족함을 알 수 있다. 한편 기판 GaAs의 섹션 특성에너지 값이 식 (1)의 조건을 만족시키기에는 다소 큰 값으로 관측된 FKO 신호로부터 띠간격 에너지와 계면 전기장을 구하기 위해 E₀와 F₀의 관계 그래프를 Fig. 1(b)에 나타내었다.

그림에서 측정된 값은 선형함수(linear function)로 피팅한 결과, y축 절편으로부터 구한 띠간격 에너지는 1.415 eV였다. 그리고 j=1과 j=2의 에너지 차이(ΔE)는 약 11 meV이며, 계의 섹션 특성에너지($\hbar\omega$)를 나타내는 기울기 값은 약 5.7 meV로서 완충층과 에피층에서의 계면 전기장(E₀)의 값 [2,9]은 약 1.05×10^4 V/cm였다. 그리고 계면에서 운반자의 농도(N)값[10]은 약 1.3×10^{15} cm⁻³이었다. 이 계산에서 사용된 환산질량의 값은 0.055m₀[11]를 사용하였다.

불순물이 첨가되지 않은 Al_xGa_{1-x}As 에피층 시료의 전형적인 PR 신호를 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 점선은 실험값이며, 실선은 3차 미분함수 형

Table 1. Parameters obtained from PR measurement in $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ epilayer

Samples	Fit method	TDFF	E_f-F_i
GaAs buffer	E_0 (eV)	1.416	1.415
	Γ (meV)	11.0	11.0 ($\Delta E = E_2 - E_1$)
	E_0 (eV)	1.726	-
$Al_xGa_{1-x}As$ epi.	Γ (meV)	25.2	-

태(third derivative functional form : TDFF)의 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 얻은 값들을 Table 1에 요약하였다. 그림에서 본 바와같이 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피층에 의한 PR 신호를 살펴보면 TDFF에 의한 E_0 값은 약 1.726 eV로서 Han[3]과 Huang 등[5]에 의해 보고된 것처럼 주된 신호 부근이며, $0.15 < x < 0.30$ 범위에서 본 연구에 사용된 시료의 조성값(x)이 결정될 수 있으며, Huang이 제시한 E_0 와 x의 관계식을 나타내면 아래와 같다.

$$E_g^f(x) = 1.424 + 1.427x + 0.041x^2 \quad (0 < x < 0.45) \quad (3)$$

식 (3)을 사용하여 Al 조성비를 구한 결과 약 21%였다. 이 값은 photoluminescence(PL) 측정으로 얻은 값과 좋은 일치를 보였다. 특히 띠 가장자리(band edge)의 PR 신호는 다소 왜곡되고 $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ 에피층의 주된 신호와 약 27 meV 차이를 보이는 A* 피크는 MBE법으로 성장시 존재 하는 잔여 불순물인 carbon에 의해 형성되는 신호로 추정된다[12]. 이를 좀 더 상세히 규명하기 위해 변조빔 세기(2~20 mW)에 따른 PR 특성을 Fig. 3(a)에 나타내었다.

그림에서와 같이 변조빔의 세기를 증가시키에 따라 PR 신호와 주기는 거의 변화가 없는 반면, 신호의 진폭은 증가하였다. $E_0(GaAs)$, $E_0(Al_{0.21}Ga_{0.79}As)$, 및 A* 피크의 진폭을 변조빔 세기의 변화에 따라 나타내면 Fig. 3(b)와 같다.

변조빔의 세기를 증가시키에 따라 $E_0(GaAs)$ 와 $E_0(Al_{0.21}Ga_{0.79}As)$ 의 피크의 진폭은 선형적으로 증가함을 보여 주고 있으며, 불순물과 관련된 A* 피크는 약 10 mW 부근에서 포화됨을 볼 수 있다. 이는 변조빔 세기 (I_p)와 진폭($\Delta R/R$) 사이의 관계가 아래 식과 같이 주어지기 때문이다[13].

$$\frac{\Delta R}{R} \propto I_p^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

여기서 $\frac{1}{n}$ 은 변조빔 세기에 대한 진폭과의 관계에서

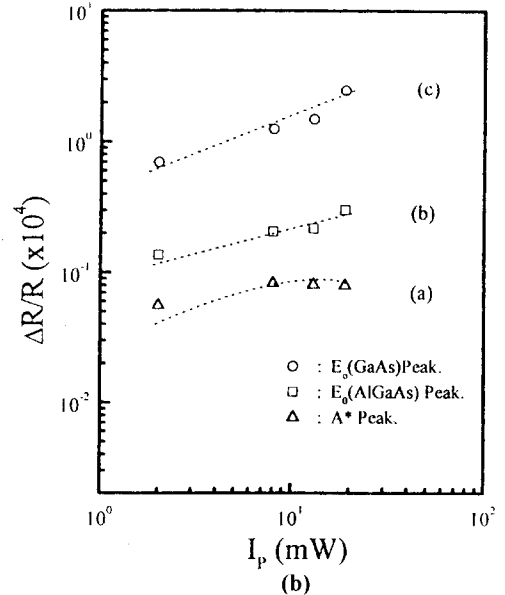
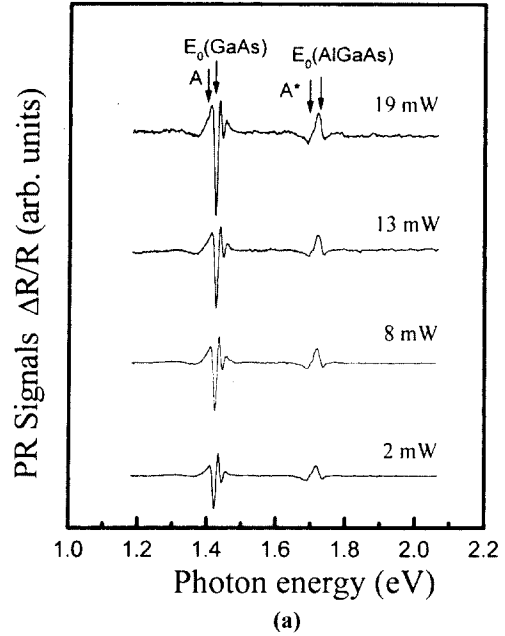


Fig. 3. (a) PR spectra according to modulation beam intensity of the $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ epilayer, (b) The graph of the PR signal amplitude according to modulation beam intensity in $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ epilayer.

기울기를 나타내는 변수로서 임계점 형태를 나타낸다. 특히 이러한 현상은 photoluminescence(PL) 측정에서도 밝혀진 바와 같이 변조빔의 세기를 증가시키에 따라 밴드간 및 엑시톤 전이에 의한 신호의 진폭은 선형적으로

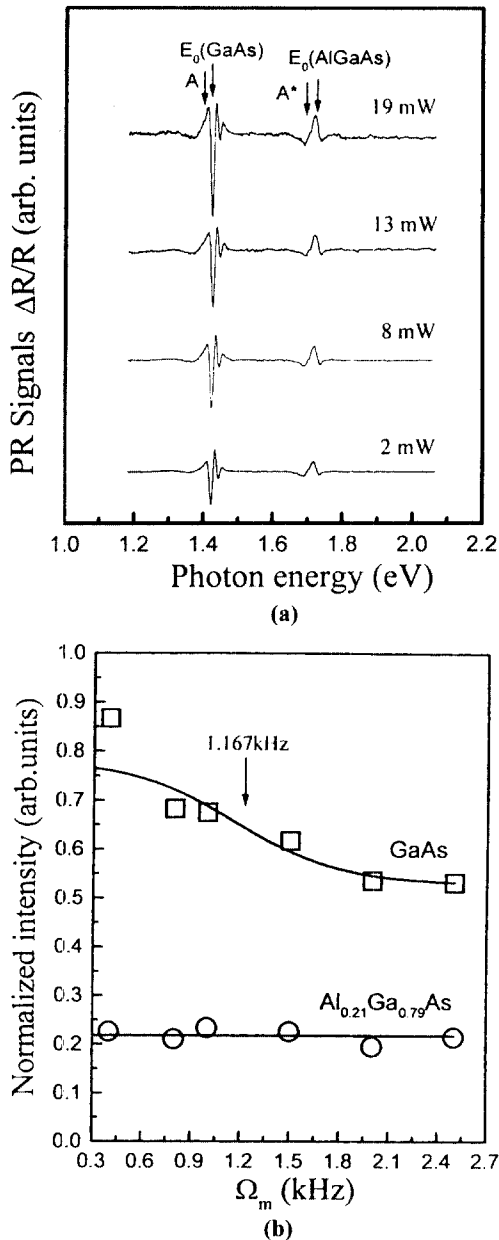


Fig. 4. (a) The PR spectra according to modulation frequency in $Al_{0.21}Ga_{0.79}As/GaAs$ epilayer. (b) The graph of the PR signal amplitude according to modulation frequency in $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ epilayer.

증가하고, 불순물과 관련된 신호의 진폭은 증가하다가 포화되는 경우와 일치한다[14].

Fig. 4(a)는 변조 주파수 변화에 따른 PR 신호의 변화를 나타낸 것이다.

신호의 형태는 변조 주파수에 거의 무관하며, 주파수가 증가함에 따라 PR 신호의 진폭은 점차 감소함을 볼 수 있다. 이는 GaAs의 계면에서 전자상태의 과도현상[7]으로 설명될 수 있다. Fig. 4(a)로부터 PR 신호의 진폭을 변조 주파수의 함수로 나타내면 Fig. 4(b)와 같다.

변조 주파수 의존성의 메커니즘을 살펴보면, 변조빔이 단속될 때 트랩 점유도와 전기장 강도는 원래의 전위로 돌아가기 위해서 특성시간으로 붕괴하게 되며, 그 주된 주파수 의존 요인으로는 표면, 계면 및 깊은준위(deep level)에서 전기적 상태의 과도현상[15]에 의한 것으로 알려지고 있다. 그림과 같이 주어진 온도에서 PR 신호의 진폭은 주파수 증가에 따라 GaAs 완충층에서는 점차로 감소하다가 약 1.167 kHz 이상의 변조 주파수에서 급격하게 감소하였다. 이는 Shen 등[7]이 보고한 결과에서와 같이 변조빔의 침투깊이는 주파수가 증가할수록 감소하기 때문이다. 이로부터 추론되는 GaAs 완충층의 응답 트랩 특성시간(τ)이 약 0.086 msec. 정도로 빠른 시간임을 알 수 있다. 반면, $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ 에피층에 대해서는 변화가 거의 없기 때문에 측정 주파수 영역에서 빠른 응답 트랩 특성시간을 가지는 상태들(states)은 out-of-phase 신호 기여는 작기 때문에 응답 트랩 특성시간(τ_c)을 구할 수가 없었다. 다만 $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ 에피층의 τ_c 은 τ 보다 짧을 것이며, 이는 $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ 에피층의 결정성과 관계지어 생각할 수 있는 동기를 제공하리라 사료된다.

Fig. 5(a)와 (b)는 Fig. 1(a)에서 나타난 피크 A*를 규명하기 위해 시간에 따라 화학적 식각을 한 후, 상온에서 측정된 PR 신호 및 PR 신호의 진폭을 식각 시간의 함수로 나타내었다.

이때 식각 용액은 $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O(1:1:8)$ 를 사용하였으며, 식각률은 약 250 Å/sec 정도[15]였다. 2초와 6초간 식각을 하였을 때는 PR 신호의 진폭 변화는 거의 없었으며, 1.42 eV 부근에서 $E_0(GaAs)$ 신호는 두 개의 신호가 중첩되어 나타났는데, 이는 화학적 식각[14-16]으로 GaAs 기판에서 나타나는 3차 미분형 신호와 GaAs 완충층에 의해 나타나는 FKO 신호가 중첩되어 나타남을 알 수 있다. 에피층과 완충층이 없어지는 40초간 식각하였을 때는 $Al_{0.21}Ga_{0.79}As$ 에피층과 GaAs 완충층으로부터 나타나는 신호는 사라지고, 전형적인 반질연성 GaAs 시료에서 볼 수 있는 PR 신호만을 관측할 수 있었다. 따라서 식각 전, PR 스펙트럼에서 나타난 피크

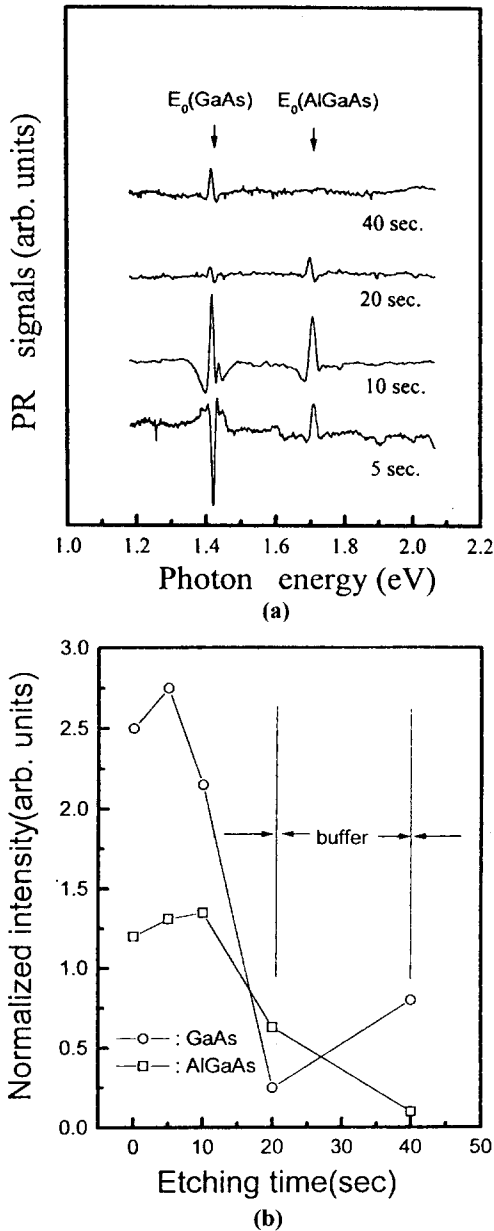


Fig. 5. (a) The PR spectra according to etched thickness in Al_{0.21}Ga_{0.79}As epilayer, (b) The graph of PR signal amplitude according to etched thickness in Al_{0.21}Ga_{0.79}As epilayer.

A는 GaAs 기판에서 나타나는 신호임을 알 수 있다. 특히, 10초간 식각을 하였을 때는 기판과 완충층의 간섭이 사라지는 PR 신호의 변화가 나타났다. 이는 에너지 변화가 아니라 상변화(phase shift) 때문이다.

4. 결 론

MBE법에 의해 성장된 Al_xGa_{1-x}As 에피층의 특성을 PR로 측정 및 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al_xGa_{1-x}As 에피층에서는 저전기장 조건하에 TDFP법으로 얻은 완충층 GaAs에 의한 E₀와 Γ는 1.416 eV와 11 meV였으며, Al_xGa_{1-x}As 에피층에서는 1.726 eV와 25.2 meV였다. 특히, low power Franz Keldysh (LPFK)를 만족하는 GaAs 완충층에 의한 FKO 분석에서 E_i 대 F_i 그래프로부터 얻은 값 1.415 eV와 거의 일치하였으며, 계면 전기장은 1.05×10⁴ V/cm 이며, 운반자 농도는 1.3×10¹⁵ cm⁻³이었다.

2. E₀(Al_{0.21}Ga_{0.79}As) 신호 아래 A* 피크는 시료 성장시 존재하는 불순물 carbon에 의한 것으로 완충층 GaAs 보다 다소 PR 신호 세기가 낮고 왜곡된 신호를 관측하였다.

3. 변조빔 세기에 따른 PR 측정으로 E₀(GaAs)와 E₀(Al_{0.21}Ga_{0.79}As)의 진폭은 변조빔 세기에 비례하였고, A* 피크는 포화됨에 따라 불순물과 관련된 것임을 알았다.

4. 변조 주파수 의존 실험에서 GaAs 완충층의 응답 트랩 특성시간은 약 0.086 ms정도이며, Al_{0.21}Ga_{0.79}As 에피층의 τ_e은 τ_b보다 짧을 것이며, 이는 Al_{0.21}Ga_{0.79}As 에피층의 결정성과 관계지어 생각할 수 있는 동기를 제공하리라 사료된다.

5. 1.42 eV 부근의 두 개의 중첩된 PR 신호는 화학적 식각으로 GaAs의 기판에 의해 나타나는 3차 미분형 신호와 GaAs 완충층에 의해 나타나는 FKO 신호가 중첩되어 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. D. E. Aspnes, "Handbook on Semiconductors", edited by T. S. Moss (North-Holland, Amsterdam, 1980), Vol. 2, p109.
2. D. E. Aspnes, *Surf. Sci.* **37**, 418 (1973).
3. A. C. Han, M. Wojtowicz, D. Pascua, T. R. Block, and D. C. Streit, *J. Appl. Phys.* **82**, 2607 (1997).
4. M. L. Gray and F.H. Pollak, *J. Appl. Phys.* **74**, 3426 (1993).
5. D. Huang, G. Ji, U.K. Reddy, H. Morkoc, F. Xiong, and T. A. Tombrello, *J. Appl. Phys.* **63**, 5445(1988).
6. M. Sydor, J. Angelo, J. J. Wilson, W. C. Mitchel, and M. Y. Yen, *Phys. Rev.* **B40**, 8473 (1989).
7. H. Shen, F. H. Pollak, J. M. Woodal, and R. N.

- Sacks, *J. Vac. Sci. Technol.* **B7**, 804 (1989).
8. X. Yin, F. H. Pollak, L. Pawlowicz, T. O'Neill, and M. Hafizi, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 1278 (1990).
 9. E. M. Goldys, A. Mitchell, T. L. Tansley, R. J. Egan, and A. Clark, *Optics Communications.* **124**, 392 (1996).
 10. M. Sydor, N. Jähren, W. C. Mitchel, W. V. Lampert, T. W. Haas, M. Y. Yen, S. M. Mudare, and D. H. Tomich, *J. Appl. Phys.* **67**, 7423 (1990).
 11. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard, and J. Comas, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 970 (1985).
 12. V. Swaminathan, M. D. Sturge, and J. L. Zilko, *J. Appl. Phys.* **52**, 6306 (1981).
 13. P. J. Hughes, B. L. Weiss, and T. J. C. Hosea, *J. Appl. Phys.* **77**, 6472 (1995).
 14. N. C. Tayler, R. W. Bicknell, D. K. Blanks, T. H. Myers, and J. F. Schetzna, *J. Vac. Sci. Technol.* **A3**, 76 (1985).
 15. P. J. Hughes and B. L. Weiss, *J. Vac. Sci. Technol.* **B14**, 632 (1996).
 16. N. Pan, X. L. Zheng, H. Hendriks, and J. Carter, *J. Appl. Phys.* **68**, 2355 (1990).