

Ar 플라즈마가 조사된 InP의 Photoreflectance 방법에 의한 표면상태 연구

김종수 · 이정열 · 손정식 · 배인호 · 김인수* · 김대년**

영남대학교 물리학과, *경운대학교 전자공학과, **대구 보건대학
(1998년 11월 4일 접수)

A study of surface states in Ar plasma exposed InP measured by photoreflectance

Jong Su Kim, Jung-Yeul Lee, Jeong-Sik Son, In-Ho Bae,
In-Soo Kim,* and Dae-Nyoun Kim**

Department of Physics Yeungnam University

*Department of Electronic Engineering Kyungwoon University

**Taegu Health College

(Received November 4, 1998)

요 약 - Fe가 첨가된 반질연성 InP에 Ar 플라즈마를 조사하였을 때 시료의 표면상태를 photoreflectance (PR) 방법으로 연구하였다. Ar 플라즈마(30 W, 10 sec.)를 조사한 시료에서는 상온에서 1.336 eV에서 새로운 피크(E_{Ar})가 형성되었으며, 이는 $V_m - V_p$ 에 관련된 얇은 준위에 의한 신호이며, 표면광전압(surface photovoltage spectroscopy; SPV)에서 관측된 결과와 잘 일치하였다. 또한 Ar 플라즈마의 영향으로 시료의 표면에 P-vacancy가 형성되어 시료에 V_p 와 관련된 얇은 준위(shallow level)가 형성되었다. 이는 시료의 표면 전기장 변화의 요인으로 작용하였다.

Abstract - The surface state of Ar plasma-exposed Fe doped SI-InP have been investigated by photoreflectance (PR). From Ar plasma-exposed InP with 30 W for 10 sec, the PR signals include a peak (E_{Ar}) that is located at 1.336 eV. We think that this peak was originated shallow level related to $V_m - V_p$. And we compared this level with the level obtained by surface photovoltage spectroscopy (SPV) measurement. The result of the PR agrees well with that from SPV. Additionally, Ar plasma induced phosphorus vacancy is related to shallow level. Therefore, the change of surface electric fields are attributed to the shallow level. This level is caused by the existence of phosphorus vacancy on InP surface.

1. 서 론

InP는 고속 [1] 및 광전 소자에 사용되고 있으며 [2, 3], $In_xGa_{1-x}As$, $In_xAl_{1-x}As$, 그리고 $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ 의 성장 시 기판으로 사용되는 물질이다 [3, 4]. 그러나 InP를 이용하여 소자를 제작하는 공정 중에서 플라즈마 식각은 중요한 공정이지만 [5], 플라즈마 식각에 의해 형성되는 결함들 [6, 7]은 소자의 효율과 특성을 저하시키는 원인으로 작용한다. 이때 소자 제작시 플라즈마 식각에 사용

되는 가스는 $CH_4/H_2/Ar$ 등의 혼합가스를 주로 사용하고 있으며, 플라즈마 식각 후에 시료에 나타나는 탄소나 수소 소에 의한 영향에 대해서는 많은 연구가 이루어졌다 [8, 9]. 그러나 Ar 플라즈마에 의해 시료의 표면에서 일어나는 영향을 Nakanishi 등 [7]이 GaAs 시료에 대해 photoreflectance(PR) 방법으로 연구하였으나, InP 시료에 대한 표면 상태(surface states)를 PR 방법으로 연구한 결과는 거의 보고된 바 없는 실정이다.

본 연구에서는 Fe가 첨가된 반질연성 InP에 Ar 플라

즈마를 조사하였을 때 표면 상태를 PR 방법으로 연구하였으며, 표면광전압(surface photovoltage spectroscopy; SPV) 방법과 비교하였다. 시료의 표면을 Ar 플라즈마로 처리시키기 전과 후의 PR 신호에 나타나는 피크가 얇은 준위임을 밝히고 표면 전기장의 변화로부터 표면 상태에 대해 알아보았다.

2. 이 론

PR 신호는 표면 전기장(E_s)의 크기에 따라 두개의 범주로 분류할 수 있는데, 임계점(critical point)과 관계된 계의 특성 에너지($\hbar\Omega$)가 $\hbar\Omega < \Gamma/3$ 일 때 저 전기장 조건 [10]으로 신호 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} [C e^{i\theta} (\hbar\omega - E_{cp} + i\Gamma)^{-n}] \quad (1)$$

여기서 $\hbar\omega$ 는 조사빔의 에너지이고 C 와 θ 는 $\hbar\omega$ 와 함께 변하는 진폭과 위상 인자이다. n 은 임계점의 형태에 관계되며, $n=2, 2.5$ 및 3 을 가지며 각각 엑시톤 전이, 3차원 및 2차원 띠간 전이에 대응된다 [11, 12].

한편으로 고 전기장 조건($\hbar\Omega < \Gamma/3$)의 PR 신호의 접근적인 형태는 다음과 같이 주어진다 [13].

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \cos \left[\frac{4}{3} \left(\frac{\hbar\omega - E_{CP}}{\hbar\Omega} \right)^{3/2} + \frac{\pi(d-1)}{4} \right] \quad (2)$$

이 식에서 d 는 임계점의 차원 수이며, $\hbar\Omega$ 와 표면 전기장(E_s)의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\hbar\Omega = (e^2 E_s^2 \hbar^2 / 2\mu)^{1/3} \quad (3)$$

여기서, μ 는 interband 환산질량, Γ 는 임계점 에너지 (E_{cp})에 대한 평탄인자이다. 그리고 E_s 와 시료의 캐리어 농도($N_0 = N_d - N_a$)의 관계는 다음과 같이 표현된다 [14].

$$E_s = \left[2eN_0(V_b - V_p - \frac{kT}{e}) / \epsilon \right]^{1/2} \quad (4)$$

여기서, V_b 는 built-in potential이며, V_p 는 레이저가 on 되었을 때 형성되는 준평형 광전압이다. 그리고 ϵ 은 반도체의 유전율이며, kT/e 는 열에 의한 항이다. 식 (2)의 경우 PR 신호의 형태는 Franz-Keldysh oscillation (FKO)라 불리는 진동 형태를 갖는다. 이러한 FKO 신호

가 존재할 때 계의 특성 에너지를 얻기 위하여 식 (2)에서 진폭인자를 무시하고 cosine 항이 극치를 가지는 점이 FKO 피크의 위치임으로 cosine 내의 항이 π 정수배가 될 때 $\Delta R/R$ 극치를 갖게 됨으로 다음과 같이 근사되어 진다.

$$[\hbar\omega_j] = \hbar\Omega (F_j) + E_g, \quad j = 1, 2, \dots \text{ (정수)} \quad (5)$$

여기서, $F_j = [3/4 \pi (j - 1/2)]^{2/3}$ 이다. 식(5)에서 $[\hbar\omega_j]$ 와 $[F_j]$ 에 함수는 기울기가 $\hbar\Omega$ 를 가지는 직선으로 나타나고, 절편은 임계점 에너지를 나타낸다.

3. 실험

본 실험에서는 liquid encapsulated Czochralski(LEC)법으로 성장된 Fe가 첨가된 상용화된 반절연성 InP(100)을 사용하였다. 시료의 비저항은 $1.53 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 이다.

먼저 시료를 trichloroethylene(TCE), acetone 및 methanol 용액 순으로 세척을 한 후, 탈이온수를 흘려 N_2 가스로 건조시켰다. 세척이 끝난 시료 표면의 산화막을 제거하기 위하여 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O (1 : 3 : 3)$ 용액에 30초간 담근 후, 탈이온수로 세척하여 N_2 가스로 건조시켰다 [1].

세척 후, 시료는 radio frequency(RF) 플라즈마 장치의 진공도 9×10^{-2} Torr에서 Ar gas flow rate를 30 cc/분으로, 플라즈마 출력을 30 W로 고정하여 10, 20 및 600초간 조사하였다. 플라즈마를 조사시킨 시료의 일부는 $HCl : H_3PO_4 = 1 : 3$ (etching rate 3500 Å/min)을 이용하여 식각을 하였다. 시료의 열처리온도는 $200 \sim 500^\circ\text{C}$ 의 범위에서 1분 동안 열처리시켰다.

PR 측정시 변조빔은 He-Ne 레이저($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)를 이용하였다. 조사(probe) 광원은 출력이 250 W인 텅스텐-할로겐 광원을 이용하여 이 광원을 초점거리 0.25 m인 분광기(Spex 270M)에 집속시키고 분광기를 통해 나온 단색화된 광을 시료에 입사시켜 반사된 빛을 Si-photodiode로 검출하여 lock-in amplifier(EG&G 5209)를 통하여 PC에 기록하였다. PR 측정 후 비교 분석을 위해서 표면광전압을 측정을 하였다.

4. 결과 및 논의

그림 1은 Ar 플라즈마를 30 W로 고정하여 10초간 조사한 시료와 as-grown 시료에 대해 각각 상온(291 K) 및

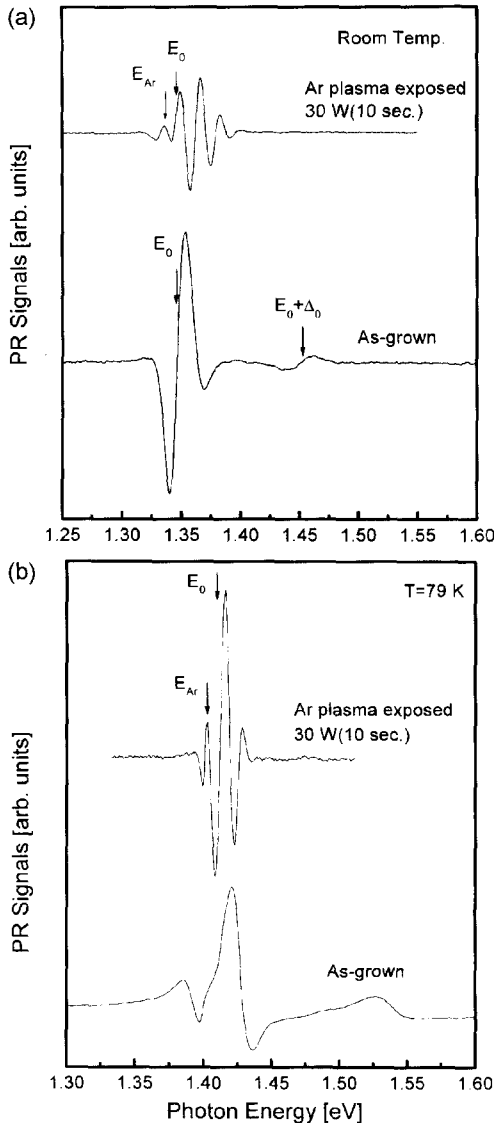


그림 1. (a) At 291 K photoreflectance spectra of as-grown and Ar plasma-exposed (30 W, 10 sec) InP. (b) At 79 K photoreflectance spectra of as-grown and Ar plasma-exposed (30 W, 10 sec) InP.

저온(79 K)에서 측정된 PR 신호를 나타내었다.

그림 1(a)는 as-grown 시료에 대한 측정된 PR 결과로서 InP의 띠틈 전이(E_0)와 spin-orbital split 전이($E_0 + \Delta_0$)에 의한 피크가 관측되었다. 이 신호를 식 (1)로 fitting하여 계산한 임계점의 parameter는 표 1에 나타내었다. 그리고 시료의 비저항 ρ 를 계산하기 위하여 Berry 등 [15]이 사용한 실험식인 PR 신호와 위상 θ 와의 관계식

표 1. The fitting parameters of PR signals of SI-InP(100)

Critical point	Amplitude C_i (arb. unit)	Broadening Γ_i (meV)	Phase θ_i (degree)	Energy E_{CB_i} (eV)
E_0	0.032	14.6	-73.49	1.345
$E_0 + \Delta_0$	-0.0256	16.1	139.20	1.450

E_0 : Bandgap energy, $E_0 + \Delta_0$: Spin-orbit split valence band.

즉, $\rho = 5.6 + 4.0 \times 10^{-3} \theta + 4.6 + 10^{-3} \theta^2$ 을 이용하여 계산한 결과 시료의 비저항은 $1.53 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 였다. 이 결과는 시료의 spec 값과 잘 일치하며, Berry 등 [15]이 제안한 방법인 PR 측정으로 비저항을 계산할 수 있었다. Ar 플라즈마를 조사한 시료의 PR 신호에서는 as-grown 시료에서 관측된 피크 외에 새로운 피크($E_{Ar} = 1.336 \text{ eV}$)가 형성되었고, E_0 이상 영역에서 FKO 신호가 뚜렷이 관측되었다. 1.336 eV의 피크에 관한 분석을 위하여 Fefer 등 [16]이 제안한 표면광전압 측정결과 Ar plasma를 조사한 후의 시료에서 1.335 eV에서 새로운 준위가 형성됨을 볼 수 있었다. Kuriyama 등 [17]이 반절연성 InP를 950°C에서 열처리하여 열자극전류 측정에서 관측된 활성화 에너지가 0.02~0.05 eV 인 $V_{in} - V_F$ 에 관련된 얇은 준위를 관측하였다. 표면광전압 측정결과 및 Kuriyama 등이 관측한 얇은 준위의 활성화 에너지를 고려하여볼 때, 본 실험에서 관측된 1.336 eV PR 피크는 얇은 준위에 관련된 신호이며, 그 근원은 $V_{in} - V_F$ 에 관련된 얇은 준위이다. 그리고 FKO 신호로부터 식 (3)과 (5)를 사용하여 표면 전기장(E_s)를 계산한 결과, 그 값은 10.37 kV/cm였다. 이러한 표면 전기장의 형성은 Ar 플라즈마에 의해 시료의 표면이 변화되었음을 알 수 있다. 그리고 FKO 신호로부터 구한 E_0 는 1.347 eV였으며, 이 값은 as-grown 시료의 E_0 값과 약 2 meV 차이를 보이지만 거의 잘 일치하였다.

그림 1(b)에서는 (a)의 두 시료에 대해 79 K에서 측정된 PR 신호를 나타내었다. 두 시료의 신호형태는 상온에서 측정된 신호와 비교하여 변화는 없으나, E_0 와 E_{Ar} 피크는 다같이 고 에너지쪽으로 이동하였다. 그리고 이 온도에서 E_s 는 4.74 kV/cm로 상온에서보다 약 54% 감소하였다.

그림 2에서는 79 K에서 관측된 E_{Ar} 피크에 대해 알아보기 위하여 변조빔의 세기에 따른 PR 신호들의 진폭변화를 나타내었다.

그림 2에서 E_0 피크의 강도는 변조빔의 세기가 증가할 수록 증가하는 양상을 보이지만, E_{Ar} 에 의한 신호의

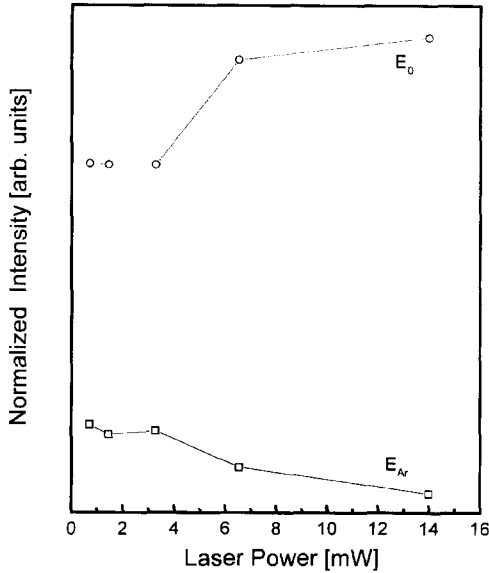


그림 2. The PR intensity of peaks E₀ and E_{A_r} for various modulation laser power.

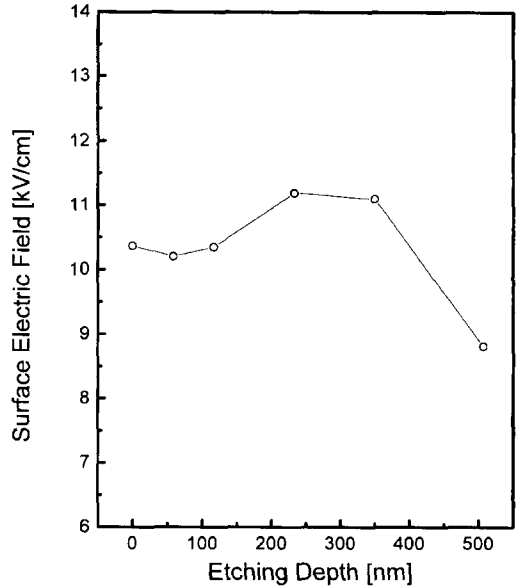


그림 4. Surface electric field of the Ar plasma-exposed (30 W, 10 sec) InP for various etching depth.

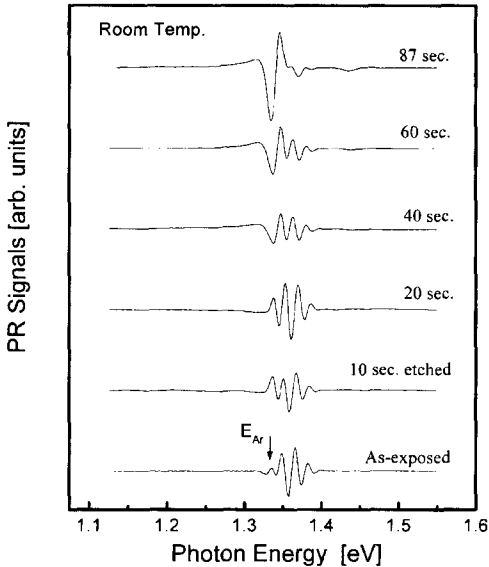


그림 3. Photoreflectance spectra of Ar plasma-exposed (30 W, 10 sec) InP for various etching time.

강도는 감소하는 현상을 나타내었다.

그림 3은 Ar 플라즈마 출력을 30 W로 고정하여 10초간 조사한 시료를 HCl:H₃PO₄=1:3(etching rate 350 nm/min)로 10~87초 동안 식각한 후, 실온에서 측정된 PR 신호를 나타내었다.

Ar 플라즈마를 조사한 시료에서 관측된 E_{A_r} 피크는 40초 이상으로 식각했을 때 사라짐을 볼 수 있으며, FKO 신호는 87초간 식각을 하여도 약하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상으로 미루어 보아 출력이 30 W 정도인 Ar 플라즈마는 시료에 손상을 충분히 줄 수 있음을 알 수 있다.

그림 4는 Ar 플라즈마를 처리한 시료를 식각했을 때 깊이에 따른 표면 전기장의 변화를 나타내었다.

그림 3과 비교하여 볼 때 E_{A_r} 피크가 관측되는 표면으로부터 1200 Å까지 식각한 시료에서 표면 전기장은 약 10.3 kV/cm로 거의 변화가 없으며, 2000 Å 이상 식각했을 때는 E_{A_r} 피크가 사라지면서 표면 전기장은 11.1 kV/cm로 약 10% 정도 증가함을 보였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 E_{A_r} 피크는 표면 전기장의 변화에 영향을 주는 요소로 여겨진다. 그리고 표면 전기장이 특정한 식각 깊이(2000 Å)에서 증가하는 현상은 다음과 같다. 표면 전기장에 영향을 주는 요소는 식 (4)와 같이 시료의 총 캐리어 농도(N₀)의 변화이므로 시료에 Ar 플라즈마를 조사하면 P-Vacancy(V_p)의 증가로 인해 얇은 도너 준위 (shallow doner level; SDL)가 형성되는 동시에 시료의 표면층에서 In과 P의 몰비가 변화되기 때문에 InP 시료에 첨가된 Fe가 억셉터 준위(accepter like level; ALL)로 작용하여 시료의 억셉터 농도(N₀)를 증가시키게 된다.

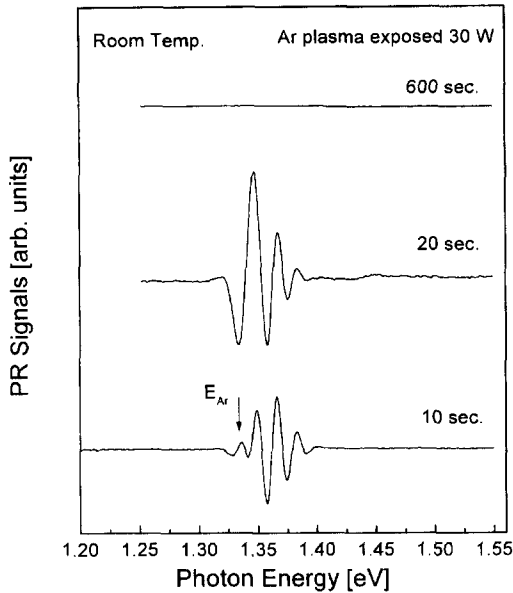


그림 5. Photoreflectance spectra of Ar plasma 30 W exposed InP for various plasma-exposing time.

따라서 플라즈마 처리 후, 약 2000 Å을 식각하게 되면 Fe와 관련된 ALL이 형성되어 있는 층이 없어짐으로 N_0 는 증가하므로 표면 전기장의 일시적인 증가 현상을 일으키게 된다.

그림 5는 Ar 플라즈마의 출력을 30 W로 고정하고, 시간을 10, 20, 그리고 600초간 조사한 시료를 실온에서 측정된 PR 신호를 나타내었다.

Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료에서는 PR 신호가 관측되지 않는 반면, 10 및 20초간 조사한 시료에서는 PR 신호가 관측되었다. 특히 20초간 조사한 시료에서는 E_0 아래 신호의 형태가 10초간 조사한 시료와 상이함을 볼 수 있으며, 띠틈 전이에 의한 신호의 진폭이 증가함이 관측하였다. 이러한 현상은 그림 4에서 언급한 바와 같이 플라즈마 조사 시간을 증가시키에 따라 V_p 에 관련된 SDL의 형성되는 양이 Fe에 관련된 ALL 보다 많기 때문이다.

그림 6은 as-grown 시료와 Ar 플라즈마를 20초간 조사한 시료, 그리고 as-grown 시료의 표면에 In을 증착한 시료와 Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료의 반사율(reflectance) 측정 결과를 비교하여 나타내었다.

Ar 플라즈마 조사시간을 증가시킬 수록 as-grown 시료에 비해 반사율의 변화가 적음을 볼 수가 있다. 그리고 Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료와 In을 증착한

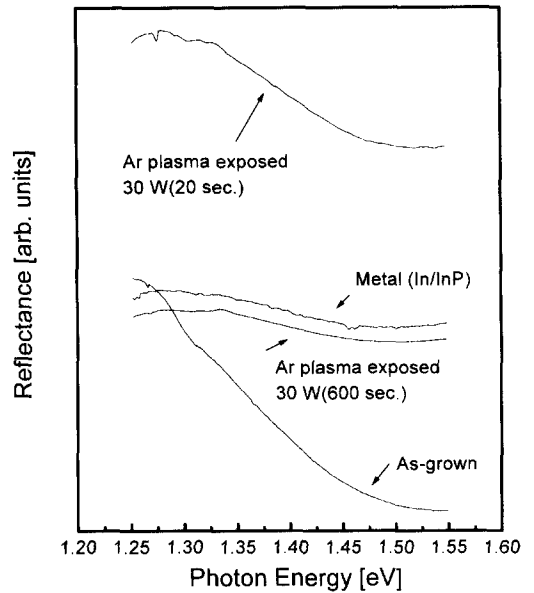


그림 6. Reflectance spectra Ar plasma 30 W exposed InP for different plasma-exposing time.

시료의 반사율의 변화는 거의 비슷한 형태를 보이고 있다. 이러한 사실로부터 Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료의 표면은 Ar 플라즈마의 조사시간이 길어짐에 따라 InP 시료의 표면에서 Ar 플라즈마에 의해 이탈된 In과 P들에 의해 표면이 재구성되어졌으며, 이러한 재구성의 형태는 표면의 In-rich로 인한 금속화(metallization)이다.

그림 7에서는 (a) Ar 플라즈마를 30 W로 600초간 조사한 후 온도 400°C에서 60초간 열처리한 시료와, (b) 온도 400°C에서 60초간 열처리한 as-grown 시료, 그리고 (c) as-grown 시료에 대한 PR 신호들을 나타내었다.

그림 5에서 관측된 바와 같이 Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료에서는 PR 신호가 관측되지 않은 반면, 이 시료를 온도 400°C에서 1분간 열처리하면 다시 PR 신호가 관측되었다. 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 만약 Ar 플라즈마가 시료의 표면에 조사될 때 손상을 주는 두께가 Ar 플라즈마의 표면 입사속도에 비례하여 조사시간이 길어짐에 따라 손상밀도가 증가한다면, 본 실험에서 계산된 30 W Ar 플라즈마를 10초간 조사한 경우 InP에 영향을 주는 깊이는 약 5000~6000 Å 정도이고, 시료에 조사되는 시간을 증가시키면 손상밀도가 증가하게 될 것이다. 이러한 손상의 형태는 앞에서 제안된 것처럼 표면의 In-rich화이다. 이러한 시료를 열

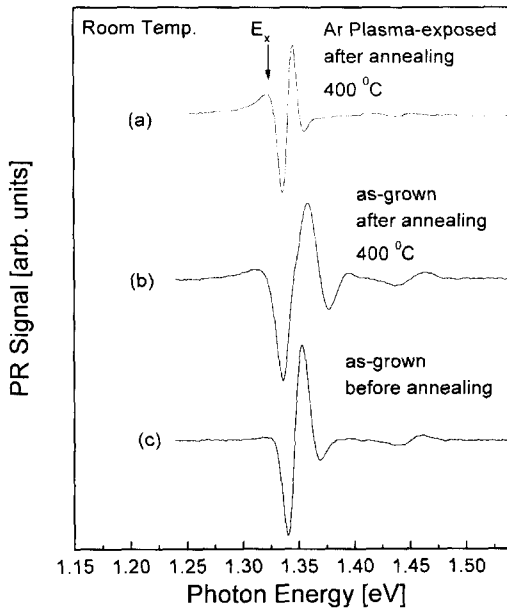


그림 7. PR spectra of (a) Ar plasma-exposed (30 W, 600 sec) InP after annealing at 400°C (b) as-grown InP after annealing at 400°C (c) as-grown InP before annealing.

처리하게 되면 손상면 아래의 P가 열에 의해 확산되면서 다시 InP 구조를 형성한다고 볼 수 있다. 그리고 온도 400°C에서 열처리한 as-grown 시료와 Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료를 비교해 볼 때, Ar 플라즈마를 600초간 조사한 시료의 PR 신호의 평탄인자(10 meV)가 감소됨을 볼 수 있다. 이러한 사실로부터 InP 시료의 In과 P의 몰비가 In이 상대적으로 매우 클 경우에 PR 신호의 평탄인자는 감소하게 되며, 띠틈 에너지 아래의 1.322 eV에 나타난 피크(E_x)는 Ar 플라즈마 처리 후, 열처리로 인해 나타나는 신호이다.

그림 8은 Ar 플라즈마를(30 W, 600초) 조사한 시료를 온도 200~500°C에서 1분간 열처리한 시료의 PR 측정 결과를 나타내었다.

열처리 온도가 증가할 수록 띠틈 전이에 의한 신호의 진폭은 증가하는 현상을 보였다. 이는 시료가 열처리에 의해 표면이 재구성되어 나타나기 때문이다.

지금까지의 Ar 플라즈마에 의해 유도된 현상들을 살펴보면 다음과 같은 가정을 유추할 수 있다. 첫 번째는 Ar 플라즈마에 의해 P 또는 In이 시료 외부로 이탈되는 경우(V_p 와 V_n 형성), 두 번째는 P 또는 In이 자신의 위치에서 이탈하여 시료 내부에서 위치가 변하는 경우(P- 및 In-antisite 또는 P- 및 In-interstitial 형성), 세 번째는 Ar

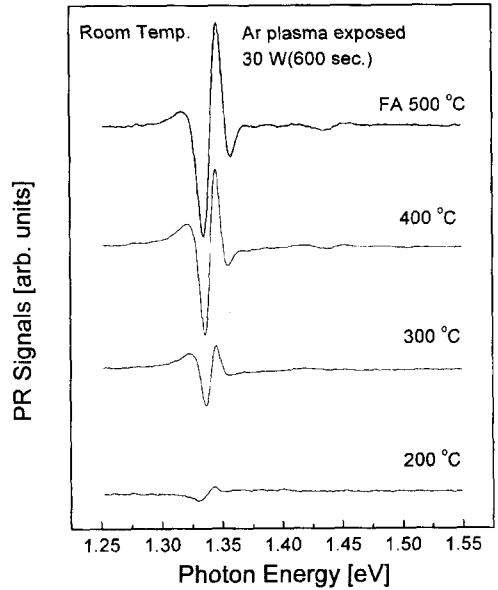


그림 8. Photoreflectance spectra of Ar plasma-exposed (30 W, 600 sec) InP for various annealing temperature.

플라즈마가 시료 내부에 주입 가능을 가정할 수 있다. 이러한 가정에서 중점을 두어 해석한 것은 먼저 시료 표면의 V_p 의 형성을 들 수 있다. 이러한 분석의 가능성은 InP 시료에서 V_p 의 형성이 시료 내에서 SDL을 이루며, 시료 내의 In과 P의 몰비 변화는 Fe에 관련된 ALL을 형성시킨다. 그 결과 이러한 SDL과 ALL은 N_D 를 변화시켜 시료의 표면 전기장을 변화시키게 된다. 다음으로 시료의 구조적인 결함을 가져오게 하는 Ar 플라즈마의 시료 내부로의 침투를 들 수 있다. Ar 플라즈마의 효과는 PR 신호의 E_0 아래에 형성되는 E_n 과 E_x 피크들의 근원으로 추정할 수 있다. 이러한 결과로부터 InP 시료에 Ar 플라즈마를 조사하게 되면 시료의 표면이 In-rich가 되어 주로 형성되는 결함에 관련된 결함임을 알 수 있다. 또한 InP 시료에서 V_p 와 관련된 결함들은 시료 내에서 SDL을 형성하기 때문에 시료의 전기적 특성을 변화시키며, 반절연성 시료인 경우 전도성으로 상전이를 일으킬 수도 있다.

5. 결 론

LEC법으로 성장시킨 Fe가 첨가된 반절연성 InP(100) 시료를 사용하여 이 표면에 Ar 플라즈마를 조사시킨 후, 표면상태를 photoreflectance 방법으로 조사하였다.

이 결과를 표면광전압 측정 결과와 비교하였다. Ar 플라즈마 30 W로 10초간 조사한 시료의 상온에서 PR 측정 결과 1.336 eV에 E_{Ar} 피크가 관측되었다. 이 피크는 얇은 준위에 관련된 신호이며, 그 근원은 $V_n - V_p$ 에 관련된 얇은 준위이다. 시료의 표면 상태는 In-rich를 형성하였다. 이러한 표면 구조의 변화는 시료 표면에서의 In과 P의 몰비 변화를 가져오게 되며, 이것은 ALL과 SDL을 형성하게 된다.

참고문헌

- [1] T. Kimura, M. Kuwata, Ji-Kui Luo, S. Yugo, and Y. Adachi, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B37**, 321 (1989).
- [2] L. Pavesi, F. Piazza, A. Rudra, J. F. Carlin, and M. Illegems, Phys. Rev. **B44**, 9052 (1991).
- [3] T. P. Pearsall "GaInAsP Alloy Semiconductor" (John Wiley and Sons Ltd. 1982).
- [4] P. Lautenschlager, M. Garriga and M. Cardona, Phys. Rev. **B36**, 4813 (1987).
- [5] R. A. Gottscho, G. Smolinsky and R. H. Burton, J. Appl. Phys. **53**, 5908 (1982).
- [6] H. Nakanishi, K. Wada and W. Walukiewicz, J. Appl. Phys. **78**, 5103 (1995).
- [7] H. Nakanishi and K. Wada, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 6206 (1993).
- [8] G. Bruno, M. Losurdo, P. Capezzuto, V. Capozzi, T. Trovato, G. Perna, and G. F. Lorusso, Appl. Phys. Lett. **69**, 685 (1996).
- [9] D. G. Yu, B. P. Keller, A. L. Holmes, Jr., and E. L. Hu, J. Vac. Sci. Technol. **B13**, 2381 (1995).
- [10] D. E. Aspens, Surf. Sci. **37**, 418 (1973).
- [11] B. V. Shanabrook, O. J. Glembociki and W. T. Beard, Phys. Rev. **B35**, 2540 (1987).
- [12] O. J. Glembociki and B. V. Shanabrook, Superlatt. Microstruct. **3**, 235 (1987).
- [13] X. Yin, H.-M. Chen, P. A. Montano, P. D. Kirchner, G. D. Pettit, and J. M. Woodall, Appl. Phys. Lett. **58**, 260 (1991).
- [14] M. Sydor, J. Angelo, W. Mitchel, T. W. Haas, and Ming-Yuan Yen, J. Appl. Phys. **66**, 156 (1989).
- [15] A. K. Berry, D. K. Gaskill, G. T. Stauf, and N. Bottka, Appl. Phys. Lett. **58**, 2824 (1991).
- [16] E. Fefer, Y. Shapira and I. Balberge, Appl. Phys. Lett. **67**(3), 371 (1995).
- [17] K. Kuriyama, K. Ushiyama, T. Tsunoda, M. Uchida, and K. Yokoyama, J. Electronic Materials **27**(5), 462 (1998).