

In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs 이종접합 구조의 표면 광전압 특성

김정화^a · 김인수^b · 배인호^{a*}

^a영남대학교 물리학과, 경산 712-749

^b경운대학교 신소재에너지학과, 구미 730-739

(2010년 6월 16일 받음, 2010년 9월 14일 수정, 2010년 9월 16일 확정)

Metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD) 법으로 성장된 In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs 이종접합 구조의 특성을 표면 광전압(surface photovoltage; SPV) 분광법으로 조사하였다. SPV 측정은 입사광의 세기, 변조 주파수, 온도의 함수로 수행하였다. 상온에서 시료의 띠틈격 에너지(band gap energy)는 GaAs와 In_{0.49}Ga_{0.51}P는 각각 1.400 및 1.893 eV이었다. 광세기를 증가시키에 따라 SPV 크기는 증가하는 반면에, 변조 주파수를 증가시키에 따라 SPV 크기는 감소하였다. 그리고 SPV 스펙트럼의 온도 의존성으로부터 GaAs와 In_{0.49}Ga_{0.51}P의 띠틈격 에너지의 변화를 Varshni 및 Bose-Einstein 표현에 의해 분석하였다.

주제어 : In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs 이종접합, 표면 광전압, Varshni 계수, Bose-Einstein 파라미터

I. 서 론

InGaP/GaAs 이종접합 구조는 동일한 목적으로 사용되는 AlGaAs/GaAs 이종구조에 비해 산화와 표면 재결합률이 낮고, 깊은 준위의 영향이 적으므로 AlGaAs/GaAs 대체용으로 사용되고 있으며, 이종접합 바이폴라 트랜지스터(heterojunction bipolar transistor; HBT), 레이저 다이오드, 발광 다이오드 및 태양전지와 같은 전자 및 광 소자에 응용되고 있다 [1-3].

다양한 분야에서 응용되고 있기에 InGaP/GaAs 이종접합의 물리적 특성 연구는 활발히 이루어지고 있다. 여러 물성 연구 방법 중에서 표면 광전압(surface photovoltage; SPV)법은 반도체 띠틈 구조(band structure) 조사에 있어 흥미있는 분야로 연구되고 있다. 이 측정법은 비파괴적이고 비접촉식인 간단한 방법으로 시료 표면에 광자 에너지가 띠틈격 에너지(band gap energy; E_g)와 같거나 그 이상인 단색화된 빛을 조사시키면 전자-정공쌍(electron-hole pairs; EHP)이 생성되어 내부 전기장(built-in electric field)에 의해 공간전하층 양단 경계면에서 전하의 재 분포에 의해 표면에 광전압이 생성되는 현상을 응용한 것이다 [4]. 이때 광전압은 입사하는 광세기와 주파수의 변화로 조절이 가능하며, 다중층(multilayer)이나 양자우물(quantum well), 이종접합 바이폴라 트랜지스터, 고속소자 등의 시료의 특성

을 조사하는데 강력한 분광학적 도구로써 각광받고 있다 [5]. 또한 SPV의 스펙트럼은 물질의 흡수계수 등에 의존하고 있으므로, 광전압에 따른 전기적 특성까지 연구할 수 있는 장점이 있어 빛을 전기적으로 변환하여 사용하는 광검출기(photodetectors), 태양전지 및 광전자 화학전지의 물성을 연구하는데 유용하다 [6].

InGaP/GaAs 이종접합 구조의 특성 조사는 주로 photoluminescence (PL) [6-8], photoreflectance (PR) [9], Hall 효과 및 X-ray법 [6-8] 등에 의해 조사되었다. Datta 등 [10]은 In_{1-x}Ga_xP/GaP의 양자점(quantum dots)의 조성비(x)와 두께에 따른 SPV 특성을 조사했으나, 아직까지 In_{1-x}Ga_xP/GaAs 이종접합 구조에서 SPV법을 이용하여 다양한 측정에 의한 특성 조사는 거의 보고되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD)법으로 성장된 In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs 이종접합 구조에서의 SPV 특성을 입사광의 세기, 변조 주파수 및 측정 온도를 변화시켜가면서 측정된 스펙트럼으로부터 분석하였다.

II. 실 험

본 연구에 사용된 시료는 MOCVD 법으로 10° 기울어진

* [전자우편] ihbae@yu.ac.kr

III. 실험결과 및 고찰

350 μm 두께의 n-GaAs(100) 기판위에 GaAs buffer 층을 0.5 μm 의 두께로 성장한 다음, 0.064 μm 의 p-In_{0.49}Ga_{0.51}P를 성장시켰다.

시료의 광전압 측정을 위해 5×5 mm²의 크기로 자른 다음, trichloroethylene (TCE) 용액으로 세척한 후 아세톤, 메탄올 순으로 다시 5분간 세척하였다. 그리고 탈 이온수를 시료에 충분히 흘린 다음, 질소(N₂) 가스로 건조시켰다.

세척한 시료의 양쪽에 indium-tin-oxide (ITO)가 증착된 투명한 전도 유리(transparent conducting glass; TCG)를 사용하여 ITO막이 전극이 되는 측정용 시료를 제작하였다. 제작한 SPV 측정용 시료는 온도 조절이 가능한 진공 챔버(vacuum chamber) 내 홀더에 부착하고, 텅스텐 할로겐 램프에서 나온 백색광을 분광기(monochromator)에 통과시켜 단색화된 빛을 시료에 수직으로 입사시켰다. 조사 광원의 세기와 변조 주파수는 각각 20~200 W 및 25~100 Hz이며, 측정 온도는 23~300 K 범위에서 수행하였다. 실험에서 얻은 광응답 신호는 열린 회로전압(open circuit voltage; V_{oc}) 측정에 의해 얻었으며, 검출된 신호는 규격화된 락인 증폭기(lock-in amplifier)를 사용하여 증폭하였다.

Fig. 1은 상온에서 변조 주파수를 30 Hz로 하여 측정한 In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs 이종접합 구조의 SPV 신호 (a)와 이를 광자 에너지에 대해 미분(derivative surface photovoltage; DSPV)한 신호 (b)를 나타내었다. Fig. 1(a)의 SPV 신호에서 광자 에너지가 GaAs 및 In_{0.49}Ga_{0.51}P의 락간격 에너지 근처에서 기울기가 선형인 영역을 볼 수 있다. 이 기울기는 시료에 조사된 광에 의해 전자가 가전자대로부터 전도대로의 전이(transition)에 기인한다. 그리고 GaAs에서는 양의 기울기를, In_{0.49}Ga_{0.51}P에서는 음의 기울기를 보여주고 있는데, 이는 시료의 광생성 캐리어가 내부 전장장에 의해 정공은 n-GaAs, 전자는 p-In_{0.49}Ga_{0.51}P 공간전하층의 경계면으로 이동한 캐리어에 의해 나타난 것이다. Fig. 1(b)의 DSPV 신호의 피크점은 물질의 락 가장자리 흡수로부터 발생된 신호에서 기인되며, 락간 전이 에너지와 일치한다 [11,12]. GaAs 및 In_{0.49}Ga_{0.51}P의 락간격 에너지는 각각 1.400 및 1.893 eV이었고, 이 에너지에서의 SPV 크기는 각각 약 0.901, 1.017 V이었다.

In_{1-x}Ga_xP/GaAs 에피층의 락간격 에너지(E_g)와 조성비(x)와의 관계는 Roberts 등 [13]이 제안한 다음 식과 같다.

$$E_g(x) = (1.469 + 0.511x + 0.6043x^2) eV \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 구한 In_{1-x}Ga_xP 층의 x값은 0.51이었고, 이 값은 성장 시 조성비와 유사한 값을 확인하였다.

Fig. 2(a)는 상온에서 광세기의 변화에 따른 SPV 신호를 나타내었다. 광세기를 증가시키에 따라 SPV 신호의 형태는 거의 변화가 없는 반면에, 크기는 점차로 증가하였다. 이와 같이 광세기가 증가함에 따라 SPV 크기가 증가하는 것은, 광에 의해 생성되는 전자와 정공들의 캐리어 수가 증가하기 때문이다 [14].

광세기에 따른 GaAs와 In_{0.49}Ga_{0.51}P 락간(band to band) 전이에서 나타나는 SPV의 크기와 관계는 Fig. 2(b)와 같다. 광세기 200 W에서는 20 W에 비해 SPV의 크기는 약 3배 정도 증가하였다.

Fig. 3(a)는 상온에서 저주파수 영역에서의 변조 주파수 변화에 따른 SPV 신호를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수를 증가시키에 따라 SPV 스펙트럼의 형태는

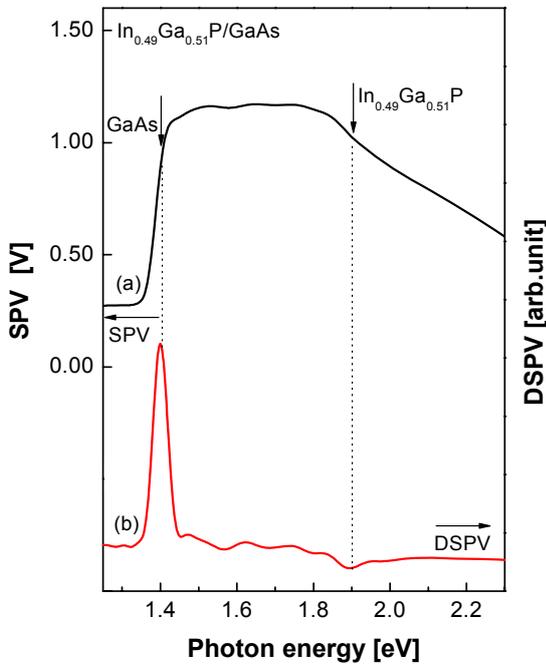


Figure 1. Room temperature SPV and DSPV spectra of In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure.

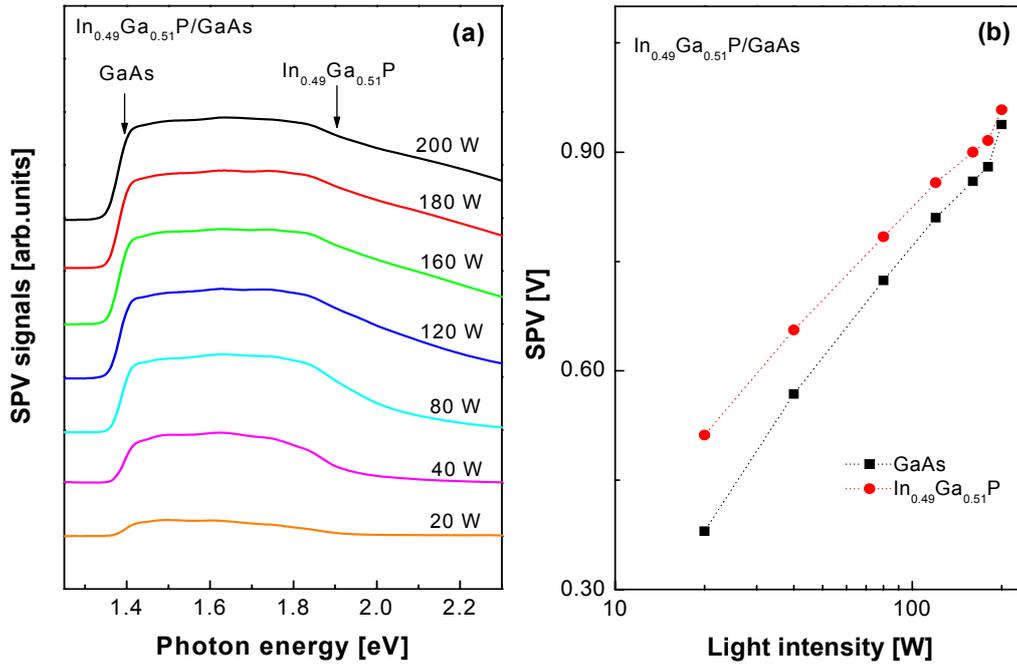


Figure 2. (a) SPV spectra of In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure as a function of light intensity. (b) Light intensity dependence of SPV magnitude for GaAs and In_{0.49}Ga_{0.51}P.

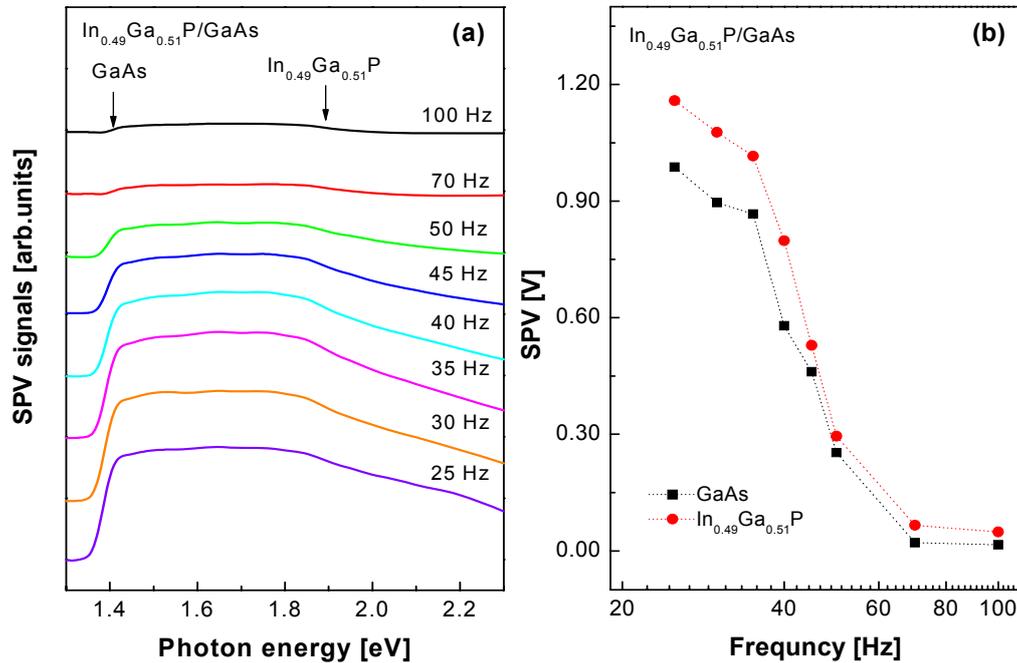


Figure 3. (a) SPV spectra of In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure at various modulation frequencies. (b) Modulation frequency dependence of SPV magnitude for In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure.

거의 변하지 않는 반면, SPV 크기는 감소하였다.

주파수 변화에 따른 In_{0.49}Ga_{0.51}P와 GaAs 띠간(band to band) 전이에서의 SPV 크기의 변화를 나타내면 Fig. 3(b)

와 같다. 주파수가 증가함에 따라 35~70 Hz 사이에는 가파른 감소를 나타내며, 그 이상의 주파수에서는 표면 광전압의 변화가 적었다. 이러한 주파수 증가에 따른 SPV 신호

의 감소는 공간전하층 양단에 분포된 전위차에 의한 것이며, 이 공간전하층의 폭의 변화가 용량의 변화에 관계한다. 따라서 공간전하층 용량(C_{sc})의 변화는 SPV의 크기와 관련되며, SPV의 크기는 변조 주파수의 함수로서 주어진다. 이 경우의 SPV와 주파수 (ω)의 관계는 Kronik과 Shapira [15]에 의해 다음 식과 같이 표현된다.

$$SPV(\omega) = \frac{J_{ph}}{\frac{C_{sc}}{\tau_s} + i\omega C_{sc}} \quad (2)$$

여기서 ω 는 변조 각주파수, J_{ph} 는 광전류 밀도, C_{sc} 공간전하층에서의 용량, τ_s 시상수이다.

Fig. 4에서는 측정온도 변화에 따른 SPV 신호를 나타내었다. 화살표는 DSPV로 얻은 시료의 띠간격 에너지를 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 $In_{0.49}Ga_{0.51}P$ 와 GaAs의 띠간 전이는 저에너지로 이동하면서, SPV 크기는 점차로 증가하였다. 이는 측정 온도가 증가함에 따라 띠간 전이의 이동은 시료의 띠간격 에너지가 감소됨을 의미하고, SPV 신호의 증가는 시료가 받는 열에너지가 증가하여 시료의 표면 광전압이 증가하기 때문이다. 온도 변화에 따른 각 물

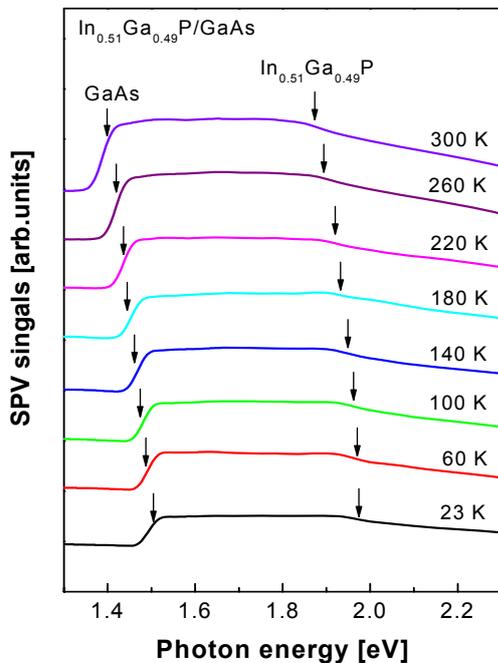


Figure 4. SPV spectra of $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$ heterostructure at different temperatures.

질의 띠간격 에너지 변화는 Fig. 5와 같다. 그림에서 점들은 온도 변화에 따른 각 신호의 띠간격 에너지이고, 직선과 점선은 각각 Varshni [16] 및 Bose-Einstein [17] 방정식을 사용하여 피팅한 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 온도 변화에 따른 띠간격 에너지는 다음과 같은 Varshni 식으로 표현할 수 있다.

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (3)$$

여기서 $E_g(T)$ 와 $E_g(0)$ 는 각각 임의의 온도 T와 0 K에서의 띠간격 에너지이며, Varshni 계수인 α 와 β 는 각각 온도에 따른 띠간격 에너지의 평균 이동과 평균 온도를 나타낸다. 각 전이에 대해 구하여진 $E_g(0)$, α 및 β 의 값들은 Table 1과 같다. Table 1에서 본 바와 같이 이 결과는 GaAs에 대해서는 Mejía-García 등 [18] 및 Contactless Electroreflectance (CER) 결과 [19]와 유사하였고, $In_{0.49}Ga_{0.51}P$ 물질에 대해서는 Prutskij 등 [20]이 구한 결과와 잘 일치하였다.

포논의 운동을 살펴보기 위해 다음의 Bose-Einstein 식

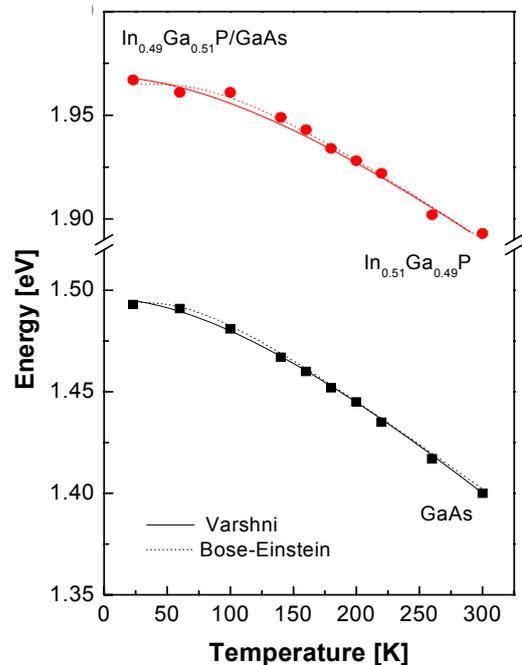


Figure 5. Temperature dependent band gap energies of $In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs$ heterostructure. The solid lines and dotted lines are fit to Varshni and Bose-Einstein type expressions.

Table 1. Parameters of Varshni fitting obtained for the In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure.

Transition	E_g (0 K) (eV)	α (10 ⁻⁴ eV/K)	β (K)	Remark
GaAs	1.501	6.61	314	This work
	1.506	6.06	327	Ref.[18]
	1.502	6.31	366	Ref.[19]
In _{0.49} Ga _{0.51} P	1.970	5.52	330	This work
	1.990	5.90	320	Ref.[20]

을 이용하여 평균 포논 진동수(Θ)와 전자-포논간의 상호작용의 강도(a_B) 그리고 0 K에서의 띠틈격 에너지(E_B)를 구하였다.

$$E_g(T) = E_B - a_B \left(1 + \frac{2}{\exp(\frac{\Theta}{T}) - 1} \right) \quad (4)$$

이 식을 이용하여 구한 파라미터들의 값은 문헌 값 [21] 과 함께 Table 2에 정리하였다. 그리고 그림으로부터 온도 변화에 따른 띠틈격 에너지의 변화는 GaAs의 경우 80 K 이하의 온도에서는 Bose-Einstein 식이, 그 이상의 온도에서는 Varshni 식이 더 적절함을 알 수 있으나, In_{0.49}Ga_{0.51}P의 경우 전반적으로 Bose-Einstein 식이 더 잘 일치함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

MOCVD법으로 성장된 In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs 이중접합 구조의 SPV 특성을 조사하였다. 상온 SPV 스펙트럼에서 GaAs와 In_{0.49}Ga_{0.51}P에 관련된 전이를 관찰하였고, DSPV 신호로부터 각각 1.400 및 1.893 eV의 띠틈격 에너지를 얻었다. 광세기가 증가함에 따라 생성되는 전자와 정공의 캐리어 수가 증가하기 때문에 SPV 크기도 증가하였다. 반면, 주파수가 증가함에 따라 SPV 크기는 감소하였는데, 이는 저 주파수 대역에서는 주파수의 변화에 따라 공간전하층 용량의 변화에 기인되기 때문이다. 측정 온도가 증가함에 따라 열에너지의 영향으로 SPV 스펙트럼의 크기는 점차로 증가되었고, 시료의 띠틈격 에너지는 저에너지로 이동하였다. 그리고 띠틈격 에너지의 온도 의존성으로부터 Varshni

Table 2. Parameters of Bose-Einstein fitting obtained for the In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure.

Transition	E_B (eV)	a_B (meV)	Θ (K)	Remark
GaAs	1,549	55	236	This work
	1,571	57	240	Ref.[21]
In _{0.49} Ga _{0.51} P	2.03	64.8	300.9	This work

및 Bose-Einstein 식의 파라미터들을 구하였으며, 이를 비교 분석하였다.

참고문헌

- [1] J. B. Lee, I. Kim, H. K. Kwon, and B. D. Choe, Appl. Phys. Lett. **62**, 1620 (1993).
- [2] L. B. Chang, K. Y. Cheng, and C. C. Liu, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 1145 (1988).
- [3] H. Kroemer, J. Vac. Sci. Technol. **B1(2)**, 126 (1983).
- [4] S. L. Jang, Solid State Electronics **34**, 373 (1991).
- [5] S. A. Tabatabaei, A. A. Iliadis, E. C. Colin, and E. C. Wood, J. Electronics Materials **24**, 87 (1995).
- [6] G. Attolini, C. Bocchi, F. Germini, C. Pelosi, A. Parisini, L. Tarricone, R. Kùdela, and S. Hasenohrl, Materials Chemistry and Physics **66**, 246 (2000).
- [7] X. Z. Shang, P. J. Niu, B. N. Mao, W. X. Wang, L. W. Guo, Q. Huang, and J. M. Zhou, Solid State Communications **138**, 114 (2006).
- [8] M. Begotti, M. Longo, R. Magnanini, A. Parisini, L. Tarricone, C. Bocchi, F. Germini, L. Lazzarini, L. Nasi, and M. Geddo, Applied Surface Science **222**, 423 (2004).
- [9] M. Murtagh, J. T. Beechinor, N. Cordero, P. V. Kelly, G. M. Crean, and S. W. Bland, Materials Science and Engineering **B66**, 185 (1999).
- [10] S. Datta, A. Bhattacharya, M. R. Gokhale, S. P. Pai, J. John, and B. M. Arora, Journal of Crystal Growth **241**, 115 (2002).
- [11] J. Lagowski, W. Walukiewicz, M. M. G. Slusarczyk, and H. C. Gatos, J. Appl. Phys. **50**, 5059 (1979).

- [12] 유재인, 김도균, 김근형, 배인호, 김인수, 한병국, 한국진공학회 **9**, 116 (2000).
- [13] J. S. Roberts, G. B. Scott, and J. P. Growers. *J. Appl. Phys.* **52**, 4018 (1981).
- [14] W. Liu, D. Jiang, and Y. Zhang, *J. Appl. Phys.* **77**, 4564 (1995).
- [15] L. Kronik and Y. Shapira, *Surface Science Reports* **37**, 1, (1999)
- [16] Y. P. Varshni, *Physica* **34**, 149 (1967).
- [17] L. Pevesi, F. Piazzze, A. Rudra, J. F. Carlin, and M. Hegema, *Phys. Rev. B* **44**, 9052 (1991).
- [18] C. Mejía-García, A. Caballero-Rosas, M. López-López, A. Winter, H. Pascher, and J. L. López-López, *Thin Solid Films* **518**, 1825 (2010).
- [19] 김정화, 조현준, 배인호, 한국진공학회지 **19**, 134 (2010).
- [20] T. Prutskij, C. Pelosi, and R. A. Brito-Ort, *Microelectronics Journal* **36**, 374 (2005).
- [21] P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis, and M. Cardona, *Phys. Rev. B* **35**, 9174 (1987).

Surface Photovoltage Characterization of In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs Heterostructures

Jeong-Hwa Kim^a, In-Soo Kim^b, and In-Ho Bae^{a*}

^a*Department of Physics, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749*

^b*Department of Material and Energy Engineering, Kyungwoon University, Kumi 730-739*

(Received June 16, 2010, Revised September 14, 2010, Accepted September 16, 2010)

We report the surface photovoltage (SPV) properties of In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure grown by metal-organic chemical vapour deposition (MOCVD). The SPV measurements were studied as a function of modulation beam intensity, modulation frequency and temperature. From a line shape analysis of room temperature derivative surface photovoltage (DSPV) spectrum, the band gap energies for GaAs and In_{0.49}Ga_{0.51}P transitions were 1.400 and 1.893 eV respectively. The surface photovoltage (SPV) increases with increasing the light intensity and temperature, whereas the SPV decreases with increasing the modulation frequency. From the temperature variation of the energy gaps, we have analysis by both Varshni and Bose-Einstein type expressions.

Keywords : In_{0.49}Ga_{0.51}P/GaAs heterostructure, SPV, Varshni coefficients, Bose-Einstein parameters

* [E-mail] ihbae@yu.ac.kr