

Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 에피층에서의 표면 광전압에 관한 연구

유재인 · 김도균 · 김근형 · 배인호 · 김인수* · 한병국**

영남대학교 물리학과, *경운대학교 전자공학과, **경산대학교 물리학과
(2000년 5월 7일 접수)

A study on surface photovoltage of Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs epilayer

Jae-In Yu, Do-Kjun Kim, Geun-Hyoung Kim, In-Ho Bae,
In-Soo Kim,* and Byung-Kuk Han**

Department of Physics Yeungnam University

*Department of Electronic Engineering, Kyungwoon University

** Department of Physics, Kyungsan University

(Received December 10, 1999)

요 약 - Molecular beam epitaxy(MBE)로 성장시킨 Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 에피층 구조의 표면 광전압을 측정하였다. 측정된 신호로부터 구한 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층, GaAs 기판 그리고 GaAs 완충층의 밴드갭 에너지는 각각 1.72, 1.40 그리고 1.42 eV이다. 이는 photoreflectance(PR) 측정 결과와 잘 일치하였다. 그리고 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층이 GaAs 기판의 표면 광전압 세기 보다 약 3배 정도 작게 나타났는데, 이는 캐리어의 이동도 차이로 나타나는 현상으로 해석된다. 또한 표면 광전압의 온도 의존성으로부터 Varshni 식의 계수들을 구하였다.

Abstract - We measured surface photovoltage (SPV) of Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs epilayer grown by molecular beam epitaxy (MBE). The band gap energies of Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer, GaAs substrate and buffer layer obtained from SPV signals are 1.70, 1.40 and 1.42 eV, respectively. There results are in good agreements with photoreflectance (PR) measurement. The measured SPV intensity of GaAs substrate is three times larger than Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer by carrier mobility difference. The parameters of Varshni equation were determined from the SPV spectra as a function of temperature.

1. 서 론

반도체 시료의 광 특성을 연구하는데 사용되는 광 변조 분광법 중에서 특히 photoreflectance(PR)과 photoluminescence(PL) 등이 많이 사용되어 왔으나, 최근에는 surface photovoltage(SPV) 방법이 많은 관심을 끌고 있다 [1]. SPV는 반도체의 특성을 연구하는데 있어서 비 접촉적, 비 파괴적이며 반도체 결정에서의 소수 캐리어의 확산거리, 표면 전위의 변화 등을 측정하는데 용이하다. 또한 SPV는 광 흡수와 과잉캐리어의 분리에 의존하며 공간전하영역에서 쌍극자(dipole) 모멘트의 변화에 의해서 생성된다 [2]. SPV 실험 방법은 Kelvin probe와 chopped light geometries 방법이 있으며, 본 연구에 사용된 방법은 chopped light geometries 방법이다. SPV 실험은 광 선속(photon flux)이 일정할 때

광 에너지의 함수에 대해서 측정한 것이다. 반도체에서 SPV 스펙트럼 세기의 주된 원인은 광에 의해 생성된 캐리어들로 인해 벌크(bulk)와 표면사이에서 Fermi 준위 차이가 발생되어 밴드 휨이 일어나서 표면 전기장의 세기가 변화하기 때문으로 보고 되고있다. 그러나 최근에는 표면 전기장의 세기 변화와 함께 캐리어 이동도가 SPV 스펙트럼의 세기에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다 [3]. 그리고 반도체 소자를 연구하는 많은 과학자들이 금속-반도체(metal-semiconductor; M-S) 접합시 Schottky 장벽의 문제가 많은 연구의 대상이 되고 있다. 여기서 계면 사이의 Fermi 준위 위치는 반도체 위에 금속 원자를 성장할 때 표면 상태에 따라 결정된다 [4]. 따라서 표면상태를 쉽게 이해하기 위해서는 표면상태의 이온화 에너지와 금속의 적용 범위를 측정하는 것이 중요하다. 이러한 것을 측정하는데 쓰이는 방법 중의 하나가 바로

SPV 방법이다.

본 연구에서는 반절연성 GaAs 기판 위에 성장온도 (TG) 580°C에서 molecular beam epitaxy(MBE)법으로 성장시킨 이중접합 구조인 Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs 에피층에서의 표면 광 전압을 연구하였다. 이때 각 시료들에 대하여 주파수(25~55 Hz), 측정온도(100~300 K), 및 광 세기(120~200 W)변화에 따른 SPV 스펙트럼들의 분석과 더불어 상온에서 photoreflectance(PR) 실험을 병행하여 SPV 실험 결과와 비교, 분석하였다.

2. 실험

본 연구에서는 분자선 에피택시(MBE)법에 의해 SI-GaAs(100) 기판 위에 완충층(buffer)으로 GaAs를 성장시킨 후, Al 조성비가 24%인 Al_{0.24}Ga_{0.76}As(500 nm) 에피층을 성장시켰다.

SPV 측정은 광여기(light excitation)의 세기를 조절할 수 있는 250 W 텅스텐-할로겐 광원을 이용하였다. 그리고 이 광원을 초점거리 0.27 m인 분광기(Spex 270M)에 집속시키고 분광기를 통해 나온 단색화된 광을 광 단속기를 사용하여 25~55 Hz의 주파수로 시료에 수직으로 입사시켰다. 광 응답(photoresponse) 스펙트럼은 개방회로전압 (open circuit voltage; V_{oc}) 측정에 의해 얻었으며, 검출된 신호는 규격화된 lock-in amplifier에 의해 증폭하였다.

3. 결과 및 논의

그림 1은 기판으로 사용한 반절연성 GaAs와 이 기판 위에 MBE법으로 성장한 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층에 대한 상온에서 측정한 표면 광 전압 스펙트럼이다. 이때 측정 주파수는 25 Hz로 고정하였다. 반절연성 GaAs의 신호를 보면 1.40 eV 부근에서 매우 가파른 응답을 보였다. 이는 광 흡수가 GaAs의 밴드갭 에너지인 1.40 eV 부근에서 크게 일어나 전자-정공 쌍을 생성시켜 이로 인해 표면 광 전압이 달라져 표면 전기장의 변화가 일어났기 때문이다 [5]. 그림 1의 SPV 스펙트럼들을 파장(λ)에 대한 미분한 표면 광 전압(differential surface photovoltage; DSPV)을 photoreflectance(PR) 스펙트럼과 함께 그림 2에 나타내었다.

DSPV 방법으로 구한 반절연성 GaAs 및 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 밴드갭 에너지는 각각 1.40 eV 및 1.72

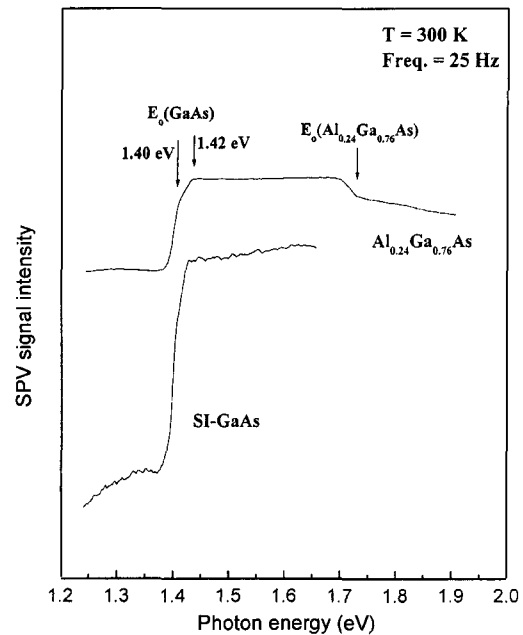


그림 1. SPV spectra of SI-GaAs and Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer at 300 K.

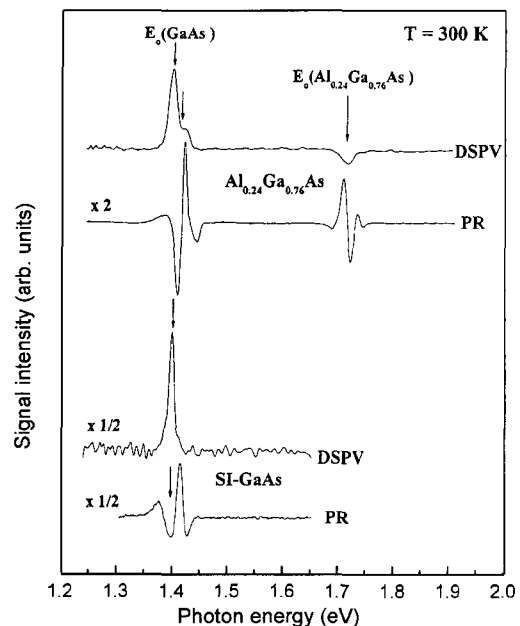


그림 2. DSPV and PR spectra of SI-GaAs and Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer at 300 K.

eV였다. 여기서 구한 1.72 eV 값을 아래 식에 대입한 결과 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 Al 조성비는 약 24%이

었다 [6].

$$E_g = 1.420 + 1.087x + 0.438x^2 \quad (1)$$

그리고 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 DSPV 스펙트럼에서 1.42 eV 부근에서 관측된 어깨 피크는 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층 성장시 사용된 완충층 GaAs와 관련된 피크로 사료된다. 특히 이 방법으로 구한 SI-GaAs와 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 밴드갭 에너지를 신호를 확인하기 위해 PR 방법을 사용하여 측정하였다. 측정된 Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs와 SI-GaAs의 PR 스펙트럼 형태는 가우스 함수의 3차 미분형 형태로 관측되었으며, 이 스펙트럼을 third derivative functional form(TDFF) 방법으로 피팅하여 구한 밴드에너지의 값과 DSPV 방법으로 구한 값이 거의 일치하였다.

그림 3에서는 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층에 대한 상온에서 주파수 변화에 따른 SPV 스펙트라를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수를 증가시키기에 따라 SPV 신호의 형태는 거의 변하지는 않은 반면, 신호의 세기는 주파수가 증가함에 따라 감소하였다. 이는 주파수를 증가시키기에 따라 캐리어 이동도가 감소하였기 때문이

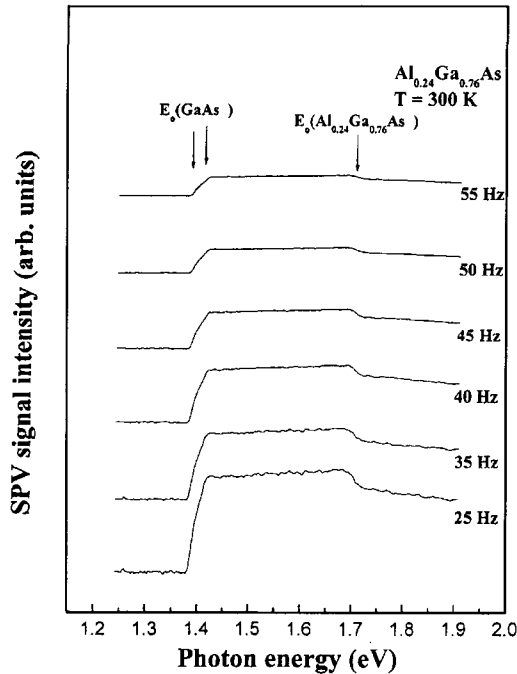


그림 3. SPV spectra of Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer as a function of frequency.

다 [7]. 주파수 변화에 따른 반절연성 GaAs 및 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층에서 SPV 신호의 세기를 나타내면 그림 4와 같다. 그림에서 점선은 아래 식을 사용하여 피팅한 것으로 피팅으로 얻은 값은 표 1에 나타내었다.

$$\frac{dV}{df} = Z \frac{dI}{df} + I \frac{dZ}{df} \quad (2)$$

여기서 Z, I, f는 각각 시료에 대한 임피던스, 광전류 그리고 chopper의 주파수를 나타낸다.

표 1에서 시료들의 표면 광전압을 살펴보면 반절연성 GaAs는 6.12 mV인 반면, Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층 경우는 2.04 mV로 약 3배 정도 낮다. 따라서 주파수 증가에 따라 반절연성 GaAs 신호가 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 신호의 세기보다 크다. 이러한 현상은 반절연성 GaAs 시료에서의 캐리어 이동도가 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피

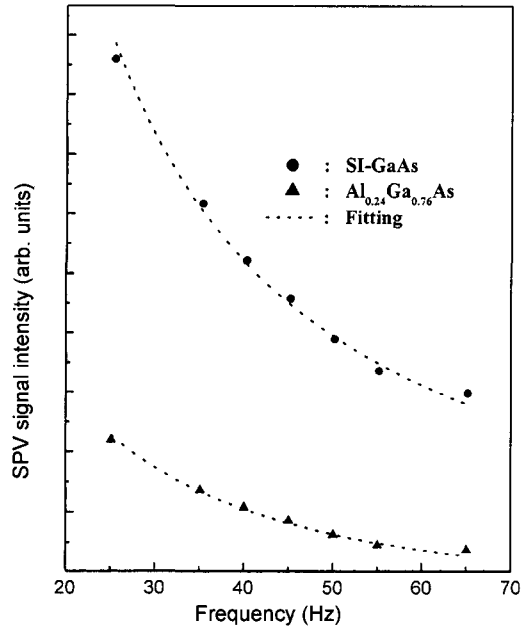


그림 4. The graph of the SPV signal intensity as a function of frequency in Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer.

표 1. Photocurrent, impedance and photovoltage of samples surface obtained from variation of frequency.

Parameters	Samples	
	SI-GaAs	Al _{0.24} Ga _{0.76} As epi.
Z (mΩ)	1.75	1.01
I (mA)	3.50	2.02
V(mV)	6.12	2.04

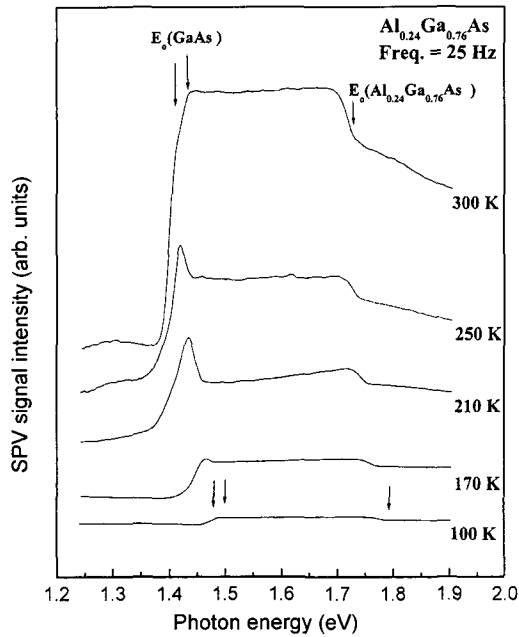


그림 5. SPV spectra of Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer as a function of temperature.

층에 비해 더 크기 때문이다.

그림 5에서는 측정온도 변화(100~300 K)에 따른 표면 광전압 스펙트라를 나타내었다. 측정온도를 감소시킴에 따라 SPV 신호의 세기가 감소하였다. 이는 측정온도가 감소함에 따라 시료가 받는 열에너지가 감소하여 시료의 표면 광전압이 감소하기 때문이다. 그리고 측정온도를 감소시킴에 따라 밴드갭 에너지가 고 에너지 쪽으로 이동하였으며, 이는 온도 감소에 따라 밴드갭 에너지가 증가하기 때문이다 [9, 10]. 특히 관측된 스펙트럼의 형태를 살펴보면 측정온도 300 K 경우는 170, 210 및 250 K에서 측정된 스펙트럼 비해서 그 형태가 다르게 관측된 반면, 100 K에서는 300 K와 같은 형태로 관측되었다. 이러한 현상은 밴드갭 에너지 부근에서 일어나는 광흡수가 특정한 온도에서 민감하기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 측정온도 변화에 따른 반절연성 GaAs 및 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 SPV 신호의 세기를 나타내면 그림 6과 같다

그림 7에서는 측정온도 변화에 따른 SI-GaAs 및 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층의 밴드갭 에너지 변화를 나타내었다. 그림에서 ▲는 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층 및 ●는 반절연성 GaAs에 대한 측정치이고, 실선은 아래의 Varshni 식을 이용한 피팅 결과이다. 그림에서와 같이

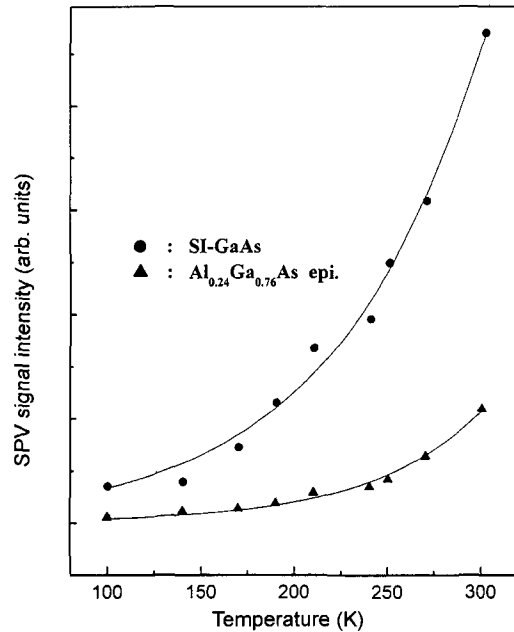


그림 6. The graph of the SPV signal intensity as a function of temperature in SI-GaAs and Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer.

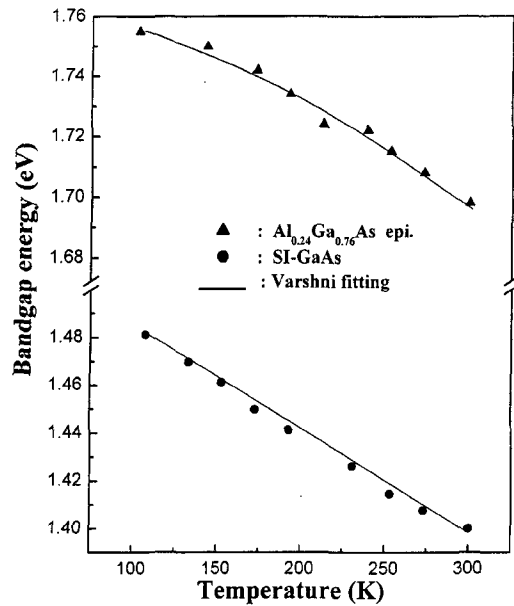


그림 7. The temperature dependence of the band gap in SI-GaAs and Al_{0.24}Ga_{0.76}As epilayer.

각 시료들의 밴드갭 에너지는 온도를 증가시킴에 따라 감소함을 알 수 있다. 그리고 반절연성 GaAs 및 Al_{0.24}Ga_{0.76}As 에피층에서 Varshni 계수를 결정하기 위

한 식을 나타내면

$$E_0(T) = E_0(0) - \alpha T^2 / (\beta + T) \quad (3)$$

과 같다. 이 식에서 $E_0(0)$ 는 0 K에서의 밴드갭 에너지이고, α 와 β 는 Varshni 계수이며, β 는 Debye 온도에 비례한다.

표 2에서 본 바와 같이 본 실험의 결과는 Shen 등 [11]이 측정된 값과 잘 일치하였다.

그림 8은 광원의 세기를 변화(120~200 W)시킴에 따라 관측된 SPV 스펙트라를 나타내었다. 광원의 세기를 변화시킴에 따라 관측된 신호의 형태는 변화가 없는 반면, 신호의 세기는 증가하였다. 이는 광원의 세기를 증가시킬수록 표면 전기장의 세기가 증가하여 이로 인해 표면 광전압 세기가 증가하기 때문이다 [12-14]. GaAs

표 2. Parameters obtained from Varshni fitting in the SI-GaAs and $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ epilayer.

Parameters	$E_0(0)$ (eV)	α (10^{-4} eV/K)	β (K)
SI-GaAs	1.514 ± 0.006^a 1.512 ± 0.005^b	5.05 ± 0.6^a 5.1 ± 0.5^b	210 ± 75^a 225 ± 82^b
$Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ epi.	1.78 ± 0.006^a	6.5 ± 0.4^a	240 ± 40^a

^aThis work

^bReference 11.

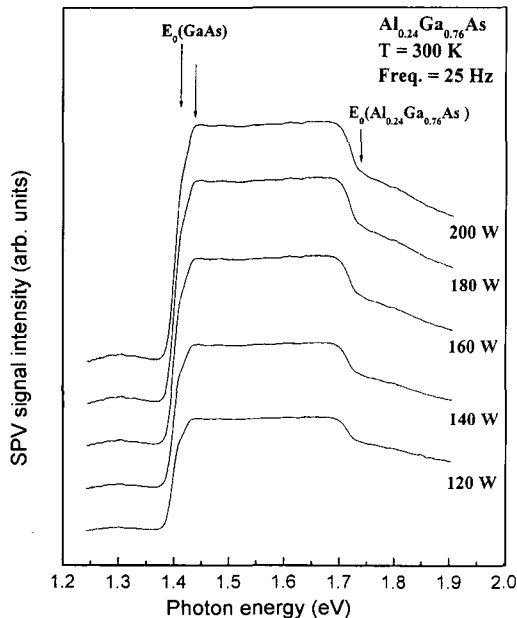


그림 8. The graph of the SPV signal amplitude as a function of light power in $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ epilayer.

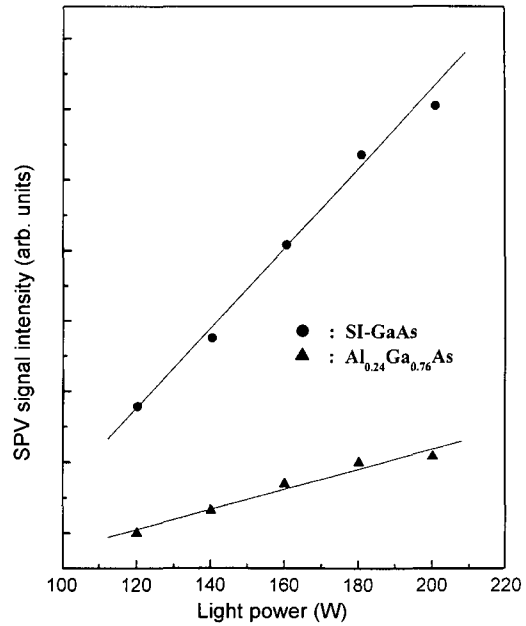


그림 9. SPV spectra of SI-GaAs and $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ epilayer as a function of light power.

와 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 에피층에서 광원세기의 변화에 따른 SPV 신호의 세기를 나타내면 그림 9와 같다. 그림에서 본 바와 같이 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 시료는 GaAs 시료에 비해 기울기가 크게 증가함을 볼수 있는데, 이는 GaAs가 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 에 비해 광원의 영향에 더 민감하기 때문이다.

4. 결 론

MBE법에 의해 성장된 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs$ 에피층의 특성을 SPV법으로 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SPV법으로 측정된 $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 에피층, GaAs 기판 그리고 GaAs 완충층의 밴드갭 에너지는 각각 1.72 eV, 1.40 eV 그리고 1.42 eV 이다. 이 값들은 PR 측정결과와 잘 일치하였다.

(2) $Al_{0.24}Ga_{0.76}As$ 에피층의 광전압 세기는 2.04 mV로 GaAs 기판에 비해 3배 정도 감소하였는데, 이는 시료내 캐리어 이동도의 감소로 나타나는 현상이다.

(3) 밴드갭 에너지의 온도 의존성을 측정한 결과 밴드갭 에너지의 이동이 Varshni 식에 잘 따르며, 온도가 증가할수록 SPV 신호의 세기가 증가하는데, 이는 온도

가 증가할수록 표면 광전압이 증가하기 때문이다.

(4) SI-GaAs에서의 Varshni 계수를 구한 결과 α 및 β 값은 각각 $5.05 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, 210 K정도이며, 이 값은 Shen 등이 구한값과 잘 일치하였다. 그리고 Al_{0.24}-Ga_{0.76}As 시료의 경우 α 와 β 값은 각각 $6.5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, 240 K이었다.

참고문헌

- [1] Shailendra Kumar, Tapas Ganguil, Pijush Bhattacharya and U. N. Roy, Appl. Phys. Lett. **72**(23), 3020 (1998).
- [2] M. Leibovitch, L. Kronik, B. Mishori and Yoram Shapira, Appl. Phys. Lett. **69**(17), 2587 (1996).
- [3] B. Mishori, M. Leibovitch, Yoram Shapira, Fred-H. Pollak, Dwight C. Streit and Michael Wojtowicz, Appl. Phys. Lett. **73**(5), 650 (1998).
- [4] L. Kronik and Yoram Shapira, J. Vac. Sci. Technol. A **11**(6), 3081 (1993).
- [5] Q. Guo and A. Yoshida, J. Appl. Phys. **33**, 2453 (1994).
- [6] Y. B. A, L. K and Y. Shapira, Appl. Phys. Lett, **68**, 879 (1996).
- [7] Q. Liu, C. Chen and H. Ruda, J. Appl. Phys. **74**, 7492 (1993).
- [8] Kamal. Mishra, Appl. Phys. Lett. **68**, 3281 (1996).
- [9] A. A. Istratov, C. Flink, H. Hieslmair, T. Heiser and E.R. Weber, Appl. Phys. Lett. **71**, 2121 (1997).
- [10] Y. Chen and N. J. Wu, International Journal of Modern Physics. **12**, 3365 (1998).
- [11] H. Shen, S. H. Pan, Z. Hang, Jing. Leng, Fred H. Pollack, J. M. Woodall and R. N. Sacks, Appl. Phys. Lett. **B53**, 1080 (1988).
- [12] P. Lautenschlager, P. B. Allen and M. Cardona, Phys. Rev. **B33**, 5501 (1997).
- [13] L. Pevesi, F. Piazza, A. Rudra, J. F. Carlin and M. Hegema, Phys. Rev. **B44**, 9052 (1991).
- [14] C. Van Hoof, D.J. Arent, K. Deneffe, J. De Boeck and G. Borghs, J. Appl. Phys. **64**, 4233 (1988).