[논 문] 한국재료학회지
*Korean Journal of Materials Research*
Vol. 11, No. 8 (2001)

# $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ 이중 이종접합 구조에 대한 표면 광전압 특성

김기홍 · 최상수 · 배인호 · 김인수* · 박성배**

영남대학교 물리학과
*경운대학교 전자공학과
**대구대학교 물리학과

# Surface Photovoltage Characteristics of $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ Double Heterostructures

Ki-Hong Kim, Sang-Soo Choi, In-Ho Bae, In-Soo Kim* and Sung Bae Park**

*Department of physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749*
**Department of Electronic Enginering, Kyungwoon University, Kumi Kyongbuk 730-850*
***Department of physics, Taegu University, Kyongsan Kyongbuk 712-749*

(2001년 6월 21일 받음, 2001년 7월 13일 최종수정본 받음)

**초 록** Metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD)으로 성장한 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ 이중 이종접합 구조의 특성을 표면 광전압 (surface photovoltage; SPV) 측정으로 연구하였다. $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ 이중 이종접합 구조의 SPV 측정값을 Lorentzian 피팅한 띠 간격에너지 ($E_0$) 값과 조성비 (x)로 구한 이론 값이 잘 일치하였다. 그리고 변조 주파수 의존성을 측정한 결과 SPV 신호의 형태는 변하지 않고, 신호의 크기만이 변하는 것은 광 조사에 따른 전기적 상태의 과도 현상에 따른 것이고, GaAs와 InGaAlP의 특성시간의 차이는 광 캐리어의 수명의 차이로 분석된다. 그리고 온도 의존성 측정으로 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ 이중 이종 접합 시료의 균일한 변형분포와 계면상태가 양호함을 알 수 있었다.

***Abstract*** Surface photovoltage spectroscopy was used to study $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ grown by metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD). Energy gap related transition in GaAs and $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$ were observed. By measuring the frequency dependence of $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$, we observed that SPV line shape does not change, whereas the amplitude change. This results is due to the difference in the lifetimes of the photocarriers in GaAs and in $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$. We also have evaluated the parameters that describe the temperature dependences of the band gap.

***Key words***: surface photovoltage, MOCVD, InGaAlP/GaAs

## 1. 서 론

4원 화합물인 InGaAlP는 가시광 영역에서 광소자 (optical device)로 적용할 수 있어 많은 흥미를 끌고 있다. InGaAlP/GaAs 이종접합은 GaAs와 격자 정합 (lattice matching)을 할 수 있고, 적색에서 녹색까지의 영역에서 직접 밴드 갭 전이 에너지를 가진다. 그러므로 가시광 레이저 다이오드 제작시 고용량의 고밀도 광 디스크및 바코드 판독 시스템과 같은 광 정보 시스템의 유용한 광원으로 사용할 수 있다.[1,2]

1985년 실온에서 InGaAlP 레이저의 연속발진은 InGaP/InGaAlP 이중 이종접합 (double heterostructure; DH) 구조를 이용하여 이루어졌다.[3] 이 레이저의 파장은 He-Ne 레이저 (633 nm)와 비교하여 상대적으로 길고 (670-690 nm), 최대 가동 (operation) 온도가 낮은 온도 (~50℃)로 제한되었다. 1990년에, 단파장 (632.8nm) 발진의 성공은 활성층 (active layer) 인 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$ 층에서의 Al 조성비 (x)를 변화함으로써 얻을 수 있었다. 따라서 더 짧은 단파장 레이저 다이오드를 얻기 위하여서는 활성층 (active layer)과 크래딩층 (cladding layer) 양쪽의 Al 조성비 증가를 필요로 한다. 그러나 결정 질이 좋은 Al조성 화합물을 얻기가 약간 어려운 문제이다. 그러므로 활성층 (active layer) 물질에서 높은 발광 세기와 특히 p-type층인 크래딩층에서 저항 감소를 어떻게 얻어야 하는지가 주된 문제이다. 그러므로 결정성장과 관련된 결정성 및 그에 따른 물성변화 등에 관한 정보가 매우 중요하다. 특히 성장시 조성비의 불균일로 결정성 저하와 함께 소자의 성능에도 커다란 영향을 미치므로 균일한 조성비의 에피층 성장이 매우 중요하다. 따라서 구조에 대한 광학적, 물리적 특성 조사는 반드시 선행되어야 한다.

반도체 띠 구조를 조사하기 위한 방법으로 표면 광전압 (surface photovoltage ; SPV) 방법은 흥미있는 분야로 연구가 진행되고 있다.[4~10] 이 측정 방법은 입사광의 파장 함수에 따라 시료의 광전압 (photovoltage) 변화를 측정하는 것으로 띠 간격보다 큰 에너지가 시료에 입사하면 시료 내에 흡수된 광자들에 인해 생성된 여기 운반자들이 재분포되어 표면 전위 (surface potential)의 변화를 일으킬 때의 신호을 관측하는 것이다. 따라서 전하 재분포 과정에 따라

양 또는 음의 SPV 신호을 얻을 수 있으며, SPV 실험에서는 광자 에너지들의 함수인 일정한 광자 다발(photon flux)에서 측정한다. 이러한 SPV 방법은 관측된 스펙트럼로부터 시료의 띠 간격 에너지, InGaAs 및 InGaAsP와 같은 삼원 및 사원 화합물의 조성비, 그리고 양자우물과 초격자와 같은 다층 반도체 구조의 광 및 전기적 성질들을 연구하는데 많이 이용되는 기술로써 전극 부착이 필요 없고, 실온에서 측정할 수 있는 장점이 있다. SPV 측정에는 Kelvin probe 또는 chopped light geometry 방법[8,9]들이 사용되는데, 특히 Leibovitch 등[8]은 Kelvin probe 법을 사용하여 표면 광전압의 변화를 측정하여 이종접합구조에서의 띠 구조를 설명한바 있다.

본 연구에서는 chopped light geometry 방법을 사용한 SPV 측정 방법으로 MOCVD법 성장 장치를 이용하여 600 nm 파장의 레이저 다이오드를 n-GaAs(100) 기판위에 n-GaAs/n-InGaP/n-$In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P$/n-$In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P$/활성층-$In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P$/p-$In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P$/p-$In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P$/p-GaP/cap-GaAs의 구조를 제작하여 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs 이중 이종접합 시료의 띠 구조를 연구함과 동시에 그 특성을 이해함으로써, 이상적인 구조 설계의 최적화와 SPV 분석의 확대와 응용성을 기르고자 한다.

## 2. 실 험 방 법

본 연구에 사용된 시료는 n-GaAs(001) 기판 위에 MOCVD법으로 n-GaAs/n-InGaP/n-$In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P$/n-$In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P$/활성층-$In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P$/p-$In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P$/p-$In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P$/p-GaP/cap-GaAs의 구조를 성장하였다.

SPV 측정은 copped light geometry 방법을 사용하였다. 투명한 전도 유리(transparent conducting glass, TCG)를 전면 전극으로 사용하였고, TCG 전극과 시료는 약 30 $\mu$m의 간격을 두고 시료의 후면 전극인 구리 시료 걸이에 고정하였다. 그리고 광 여기의 세기를 조정할 수 있는 250 W 할로겐 램프를 광원으로 사용하였으며, 이 광원을 초점거리 0.27 m인 분광기(Spex 270M)에 집속시키고, 분광기를 통해 나온 단색광을 광 단속기를 사용하여 주파수를 25 Hz로 고정시킨 후, 시료에 수직으로 입사시켰다. 광응답(photoresponse) 신호는 열린 회로전압(open circuit voltage) 측정에 의해 얻었으며, 검출된 신호는 규격화된 lock-in amplifier로 증폭하였다.

## 3. 결과 및 고찰

MOCVD로 성장한 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs 이중 이종 접합 구조를 상온에서 측정한 SPV 스펙트럼을 Fig. 1에 나타내었다.

전체적으로 음의 SPV 신호는 광 조사시 접합 부분에서 내부 전압(built-in voltage)의 감소에 기인 한 것이다. 일반적으로 p-i-n 접합의 경우, 평형상태 에너지밴드에서 공간 전하 영역(space charge region)은 바닥 n지역으로부터 i지역을 통하여 위의 p형 크래딩(cladding)쪽으로 굽는다(bent up). 띠 간격 이상 광조사시, 광생성 전자-정공쌍은 내부전기장(built-in electric field)에 기인하여 분리되어서, 공간전하영역의 내부전압을 감소시킨다. 이는 표면전압을 감소시키는 결과를 초래하므로 음의 SPV 신호가 나타나는 것이다.[11] 그리고 약 2.076eV으로부터 고 에너지 쪽으로는 SPV 신호가 반전되어 경사지게 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 도핑된 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$ 크래딩층(cladding layer)의 Al 조성비의 증가로, 이층의 흡수에 기인한 광 변조에(light modulation) 의한 표면 밴드 밴딩(surface band bending) 변화의 원인에 의한 것이라 할 수 있다.[12] 그리고 각 피크 지점은 Loretzian 피팅으로 구하여, 그림에 화살표시로 표시하였다.

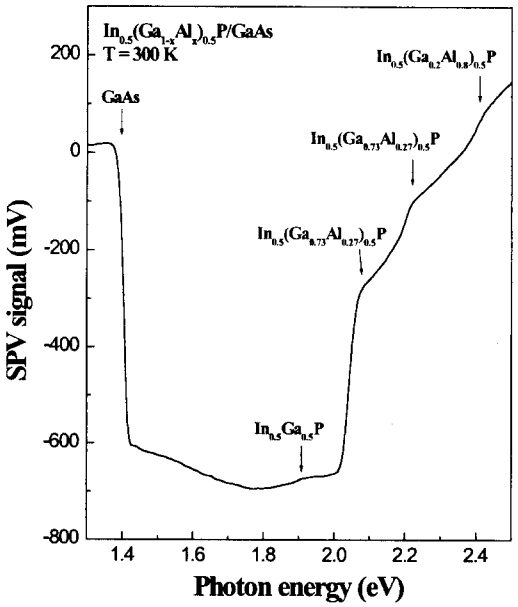


Fig. 1. SPV spectrum of $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs double heterostructures at 300 K.

$In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$의 조성비(x)는 Chui 등[13]이 제안한 Al 조성비(x)에 따른 에너지 변화식은

$$E_\Gamma(x) = 1.91 + 0.61x \quad (1)$$

$$E_X(x) = 2.19 + 0.085x \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있다. 상온에서 직접 띠 간격(direct bandgap) $\Gamma$로부터 간접 띠 간격(indirect bandgap) $X$로의 교차지점은 Al 조성비 x~0.63에서 일어나고, 낮은 온도(4.2-5 K)에서는 x~0.5-0.55라고 여러 연구자들이 보고하고 있다.[13~20]

그리고 $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ 3원 화합물(x=0)에서 $E_0$ 값은 약 1.91 eV로서 DeLong 등[21]이 보고한 값과 잘 일치하였다. $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$의 SPV신호인 $E_0$ 값을 식 (1)과 (2)에 대입하여 Al 조성(x)값을 구한 값과 성장시의 값과 잘 일치하였다.

변조 주파수에 따른 SPV 스펙트럼들을 Fig. 2에 나타내

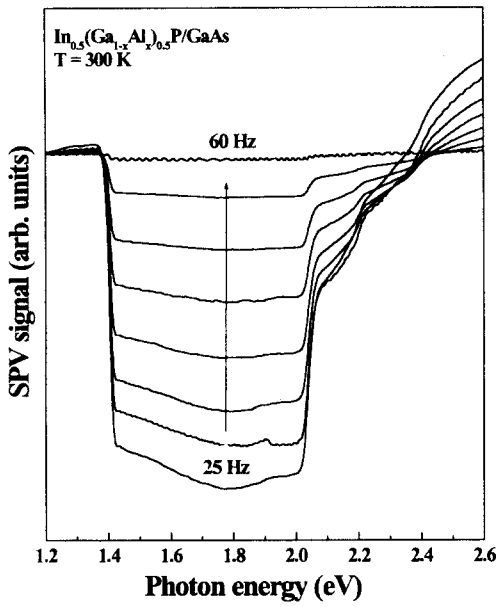


Fig. 2. SPV spectra as a function of modulation frequency in the $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ double heterostructures.

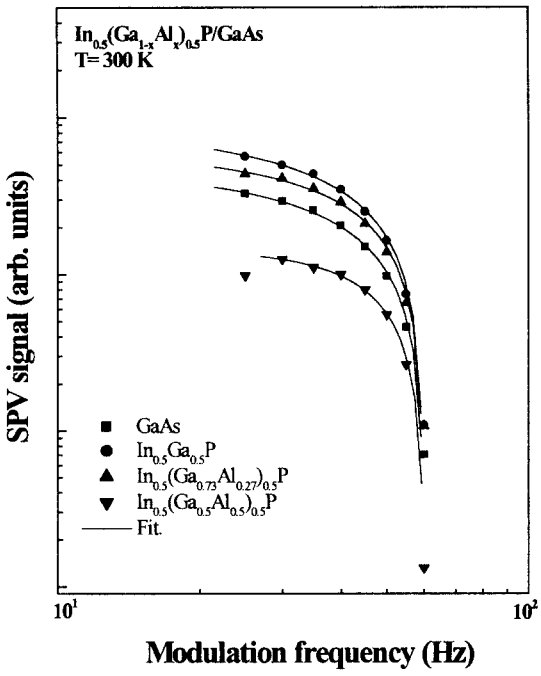


Fig. 3. The graph of SPV signal amplitude as a function of modulation frequency in the $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ double heterostructures.

었다. 스펙트럼 형태는 변조 주파수에 거의 무관하며, 주파수가 증가함에 따라 SPV신호의 진폭이 점차 감소함을 볼 수 있다. 변조 주파수 의존성의 메카니즘은, 변조빔이 단속될 때 트랩 점유도와 전기장 강도는 원래의 전위로 돌아가기 위해서 특성시간으로 붕괴하게 되며, 그 주된 주파수 의존 요인으로는 표면, 계면 및 깊은 준위(deep level)에서

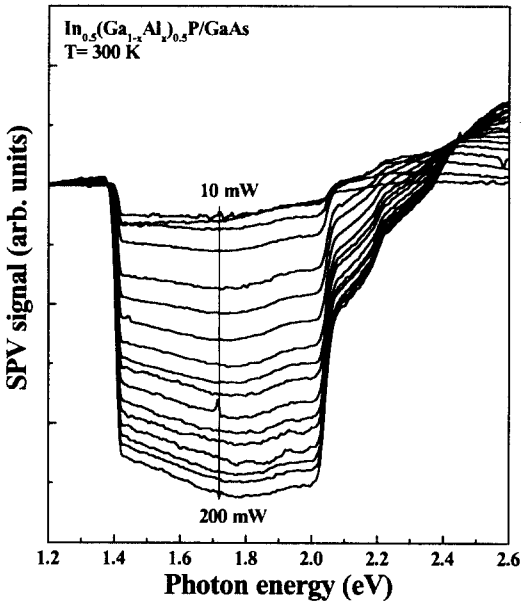


Fig. 4. SPV spectra as a function of modulation beam intensity in the $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P/GaAs$ double heterostructures.

전기적 상태의 과도 현상에 의한 것으로 알려지고 있다.[22,23]

Fig. 2으로부터 SPV 스펙트럼의 진폭을 변조 주파수 함수로 나타내면 Fig. 3과 같다. 도형은 실험 값이고 실선은 아래 식 (3)을 사용하여 피팅한 결과이다.[24]

$$V_{ph}(\omega) = Z_{sf}(\omega)\ J_{ph}(\omega) \tag{3}$$

여기서 표면 광전압 $V_{ph}(\omega)$는 표면 임피던스(impedance) $Z_{sf}(\omega)$와 광전류 밀도 $J_{ph}(\omega)$의 곱으로 주어진다. 그리고 표면 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{sf}(\omega) = \frac{1}{G + J\omega C} \tag{4}$$

여기서 $G$와 $C$는 각각 콘덕턴스(conductance)와 용량(capacitance)이다. 그리고 SPV 스펙트럼의 변조 주파수 의존으로부터 얻은 특성시간(carrier lifetime)은 광에 의해 생성된 캐리어들의 수명과 일치한다. 왜냐하면 SPV 신호는 광으로 생성된 캐리어에 의해 표면 광전압의 변조로부터 얻는 결과이기 때문이다. 그러므로 특성시간에 기인한 knee point 주파수는 계면 트랩의 영향 없이, 표면 광전압율의 주파수 의존성으로부터 구할 수 있다.[25] 따라서 다음 식 (5)을 이용하여

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_k} \tag{5}$$

표면 광전압율이 급격히 감소되는 knee point 주파수로부터 GaAs와 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$의 특성 시간을 구하였다. 주파수 의존성 실험에서 구한 값들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Fitting parameters obtained from the frequency dependence.

| Material \ Parameter | $G$ ($cm^2/\Omega$) | $C$ (F) |
|---|---|---|
| GaAs | $1.0397\times10^{-6}$ | $1.3218\times10^{-8}$ |
| $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ | $9.9355\times10^{-7}$ | $1.2314\times10^{-8}$ |
| $In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P$ | $9.5130\times10^{-7}$ | $1.2861\times10^{-8}$ |
| $In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P$ | $3.6781\times10^{-7}$ | $1.8797\times10^{-8}$ |

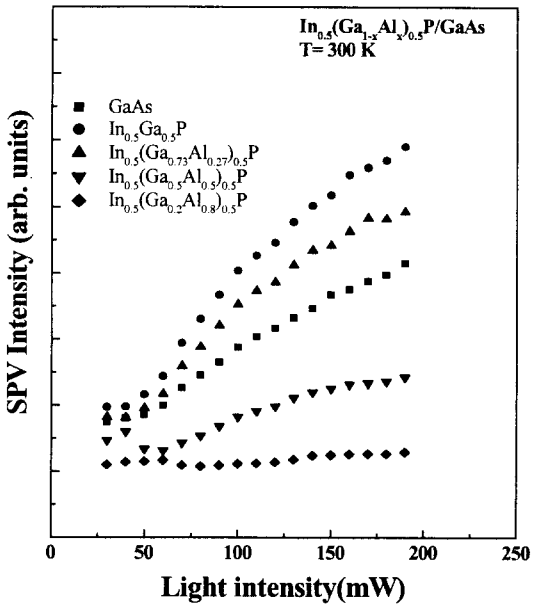


Fig. 5. The graph of SPV signal amplitude as a function of modulation beam intensity in the $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs double heterostructures.

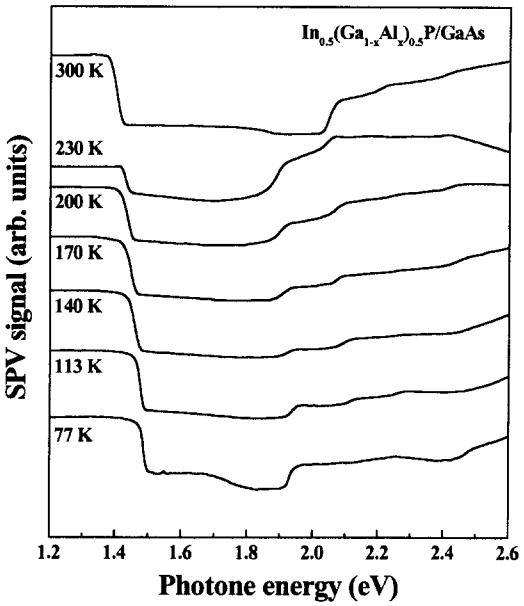


Fig. 6. SPV spectra of $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs double heterostructures at various temperatures.

Fig. 4은 광세기에 따른 상온에서의 SPV 스펙트럼을 나타내었다. 광세기를 증가시킴에 따라 SPV 신호의 형태는

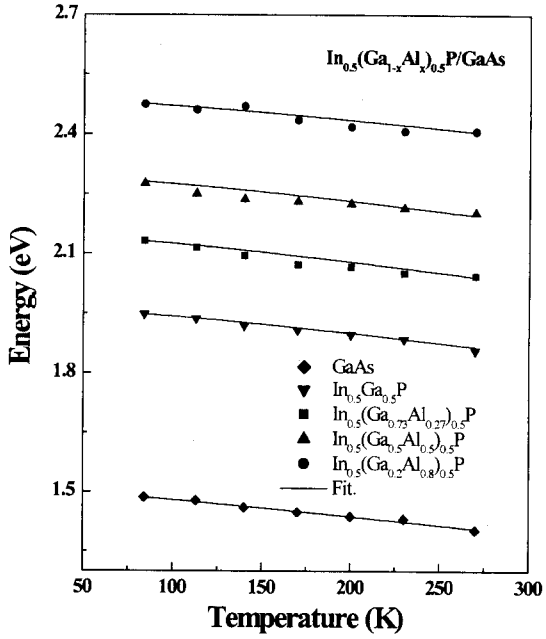


Fig. 7. The temperature dependence of $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs double heterostructures.

변하지 않고, GaAs와 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$ 층에서 나타나는 상대적인 SPV 신호의 크기는 변함을 알 수 있다. Fig. 5은 광세기에 따른 GaAs로부터 나타나는 신호와 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$층에서 나타나는 신호의 크기를 나타내었다. 광세기가 증가함에 따라 SPV 신호의 크기가 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 이는 입사광 세기에 따라 생성되는 전자와 정공들의 운반자 수가 증가하여 표면 광전압 영향을 미치기 때문이다.[26] 그리고 Leibovitch 등[27]은 입사광 세기에 대한 신호의 관계에서 입사광 세기를 증가시킴에 따라 띠 간 및 엑시톤 전이에 의한 신호는 선형적으로 증가하고, 반면 불순물과 관련된 신호의 크기는 증가하다가 포화된다고 보고하고 있다. 또한 GaAs와 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$ 층의 상대적인 크기의 변화가 다름을 볼 수 있다. 이것은 GaAs와 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$층에서 나타나는 신호가 서로 다른 메카니즘을 가지고 있음을 알 수 있다.

시료의 온도에 따른 전이 에너지 변화를 조사하기 위하여 온도 80~300 K 사이에서 측정한 값을 Fig. 6에 나타내었다. 온도가 감소함에 따라 SPV신호는 고 에너지쪽으로 이동하였으며, 신호의 크기는 감소하였다. 이 신호의 이동은 온도가 감소함에 따라 시료의 결정격자 수축은 보통 원자간의 결합을 강화시키고 띠 간격 에너지를 증가시키기 때문이며[23], SPV 스펙트라 세기의 감소는 온도 감소에 따라 전이와 관련된 운반자가 표면 광전압에 기여하지 못하기 때문인 것으로, 온도가 낮아지면 낮은 온도 범위에서 열전자 방출(thermionic emission)의 효율이 낮기 때문에 표면 및 계면에 존재하는 운반자의 농도를 감소시키기 때문이다.

Fig. 7은 시료의 띠 간격 에너지의 온도에 따른 그래프이다. 그림에서 도형으로 표시된 것들은 측정온도 변화에 따른 SPV 실험에서 측정된 전이 에너지를 나타낸 것이고, 실선은 아래식에 나타낸 온도에 따른 띠 간격 에너지의 이론

Table 2. Fitting parameters obtained from the temperature dependence of $E_0$ for $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs double heterostructures.

| Transitions | $E_0$(0 K) (eV) | $\alpha$ ($10^{-4}$eV/K) | $\beta$ (K) |
|---|---|---|---|
| $In_{0.5}(Ga_{0.73}Al_{0.27})_{0.5}P$ | 2.490 | 6.3 | 191 |
| $In_{0.5}(Ga_{0.5}Al_{0.5})_{0.5}P$ | 2.298 | 6.5 | 200 |
| $In_{0.5}(Ga_{0.2}Al_{0.8})_{0.5}P$ | 2.150 | 6.7 | 185 |
| $In_{0.5}Ga_{0.5}P$ | 1.965 | 6.2 | 189 |
| GaAs | 1.503 | 5.8 | 190 |

식, 즉 Varshni 방정식[24]을 최소 제곱법으로 피팅한 결과를 나타낸 것으로 이때 그 방정식은 다음과 같다.

$$E_0 = E_0(0) - \alpha T^2/(\beta + T) \quad (6)$$

여기서 $E_0(0)$는 온도 0K에서 전이 에너지이고, $\alpha$와 $\beta$는 Varshni 계수이다. 그리고 피팅한 결과는 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 전자와 포논간의 상호 작용의 강도($\alpha$)를 비교해보면, $(In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$, 벌크 GaAs 값들과 약간 차이가 나는데, 이는 유효질량(effective mass) 차이로 인한 것이라고 설명할 수 있겠다. 여기서 우리는 전이 에너지의 온도 영향은 전기장의 영향보다는 격자 정합하는 $Al_xGa_{1-x}As$/GaAs 이종접합 구조에서와 같이 조성 물질의 띠 간격 에너지 변화에 기인한다 것과 피팅한 값이 실험치와 잘 일치함으로($In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs 이중 이종 접합 시료의 균일한 변형분포와 계면상태가 양호함을 알 수 있다.[25]

## 4. 결 론

MOCVD법으로 성장된 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs 이중 이종 접합 구조를 갖는 시료의 특성을 SPV 측정으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

이 시료에서는 GaAs 신호와 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$와 관련된 신호들이 관측하였다. 이 값은 Lorentzian으로 피팅한 $E_0$ 값과 조성비로 구한 값이 잘 일치하였다. 그리고 변조주파수 의존성을 측정한 결과 SPV 신호의 형태는 변하지 않고, 신호의 크기만이 변하는 것은 광 주입에 따른 전기적 상태의 과도 현상에 따른 것이고, GaAs와 InGaAlP의 특성시간의 차이는 광캐리어의 수명의 차이로 분석된다. 그리고 SPV 측정온도 변화에 따른 에너지 준위들의 온도 의존성 측정으로 $In_{0.5}(Ga_{1-x}Al_x)_{0.5}P$/GaAs 이중 이종 접합 시료의 균일한 변형분포와 계면상태가 양호함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌


1. E. Kapon, Semiconductor Laser, Academic Press, London, 8 (1999).
2. K. Itaya, H. Sugawara and G. Hatakoshi, J. Cryst. Growth **138**, 768 (1994).
3. K. Kobayashi, S. KaWaTa, A. Gomyo, I. Hino and T. Suzuki, Electron Lett. **21**, 931 (1985).
4. B.Q. Sun, Z.D. Lu, D.S. Jiang, J.Q. Wu and Zy. Xu, Appl. Phys. Lett. **73**, 2697 (1998).
5. A. Anedda, M.B. Casu, and A. Serpi, J. Appl. Phys. **79**, 6995 (1996).
6. N.B. Shkenasy, L. Kronik and Y. Spira, Appl. Phys. Lett., **68**, 879 (1996).
7. L. Aigouy, F.H. Pollak, J. Pelruzzllo and K. shahzad, Solid State Commun. **102**, 877 (1997).
8. M. Leibovitch, L. Kronik, E. Fefer, V. Korobov and Y. Shapira, Appl. Phys. Lett. **79**, 8549 (1996).
9. S. Kumar, T. Ganguli, P. Bhattacharya and U.N. Roy, Appl. Phys. Lett. **72**, 3020 (1998).
10. P. Blood, J. Appl. Phys. **58**, 2288 (1985).
11. N. Ashkenasy, M. Leibovitch, Y. Rosenwaks, Y. Shapira, K. W. J. barnham, J. Nelson, and J. barnes, J. Appl. Phys. **86**, 6902 (1999).
12. L. Kronik, Y. Shapira, Surf. Sci. Rep. **37**, 1 (1999).
13. H. Chui, N. F. Gardner, P. N. Grillot, J. W. Huang, M. R. Krames, and S. A. Maranowski, Semiconductors and semimetals, **64**, 49 (2000).
14. Z. C. Feng, E. Armour, I. Ferguson and R.A. Stall, J. Appl. Phys. **85**, 3824 (1999).
15. S. Adachi, S. Ozaki, M. Sato, and K. Ohtsuka, Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 537 (1996).
16. D.S. Cao, A.W. Kimball, and G.B. Stringfellow, J. Appl. Phys. **67**, 739 (1990).
17. H. Asahi, Y. Kawamura, and H. Nagai, J. Appl. Phys. **53**, 4928 (1982).
18. D. P. Bour, and J. R. Shearly, IEEE J. Quantum Electron. **QE-24**, 1856 (1988).
19. D. J. Mowbray, O. P. Kowalski, M. Hopkinson, M. S. Skolnick. and J. P. R. David, Appl. Phys. Lett. **65**, 213 (1994).
20. S. P. Najda, A. H. Kean, M. D. Dawson and G. Duggan, J. Appl. Phys. **77** 3412 (1995).
21. M. C. DeLong, D. J. Mowbray, R. A. Hogg, M. S. Skolnick, J. E. Williams, K. Meehan, S.R. Kurtz, J. M. Olson, R. P. Schneider, M. C. Wu and M. Hopkinson, Appl. Phys. Lett. **66**, 3185 (1995).

22. V. Swaminathan, M. D. Sturge, and J. L. Zilko, J. Appl. Phys. **52**, 6306 (1981).
23. O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. beard, and J. Comas, Appl. Phys. Lett. **46**, 970 (1985).
24. N. Honma, C. Munakata, and H. Shimizu, Jap. J. Appl. Phys. **27**, 1498 (1988).
25. N. Honma, C. Munakata, H. Itoh, and T. Warabisako, Jan, J. Appl. Phys. **25**, 743 (1986).
26. W. Liu, D. Jiang, and Y. Zhang J. Appl. Phys. **77**, 4564 (1995).
27. M. Leibovitch, L. Kronik, E. Fefer, and Y. Shapira, Phys. Rev. **B50** 1739 (1994).
28. W. Zhou, M. Dutta, H. Shen, J. Pamulapati, B. R. Bennett, C .H. Perry and D. W. Weyburne, J. Appl. Phys. **73**, 1266 (1993).
29. P. Lautenschlager, M. Garriga, L. Vina and M. Cardona, Phys. Rev. **B36**, 4821 (1987).
30. A. Kangarlu, H. R .Chandrasekher, M. Chandrasekher, Y. M. Kapoor, F. A. Chambers, B. A. Vojak and J. M. Meese, Phys. Rev. **B37**, 1035 (1988).