

Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs 다중 양자 우물 구조의 표면 광전압에 관한 연구

논문
13-1-4

Surface Photovoltage of Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs Multi-Quantum Well Structures

이정열*, 김기홍*, 손정식*, 배인호*, 김인수**, 박삼배***

(Jung-Yeul Lee*, Ki-Hong Kim*, Jeong-Sik Son*, In-Ho Bae*, In-Soo Kim**, Sung Bae Park***)

Abstract

We used the surface photovoltage spectroscopy (SPVS) for characterization of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As multi-quantum well (MQW) structures grown by molecular beam epitaxy (MBE) method. Energy gap related transitions in GaAs and AlGaAs were observed. The Al composition (x=0.3) was determined by Sek's composition formula. Transition energies in MQW were determined using the differential surface photovoltage spectroscopy (DSPVS) of the measured resonances. In order to identify the transitions, the experimentally observed energies were compared with results of the envelope function approximation for a rectangular quantum well. We have observed an interesting behavior of the temperature dependence (80 K ~ 300 K) of the 11Hand 11L transition for sample.

Key Words (중요용어) : Surface photovoltage spectroscopy (표면 광전압), Multi-quantum well infrared photodetector (다중 양자 우물 적외선 광검출기), Differential surface photovoltage spectroscopy (미분한 표면 광전압)

1. 서 론

III-V족 화합물 반도체 재료를 기초로 한 양자우물 적외선 광검출기 (quantum well infrared photodetector : QWIP) 구조는 적외선 초점평면 정렬 (focal plan arrays : FPAs)에 있어 II-IV족 화합물 반도체 재료를 대체하는데 새로운 구조로서 최근에 많은 관심의 대상이 되고 있으며, 장파장 적외선 QWIP 카메라의 급속한 발전은 고도로 균일한 면적을 가지는 FPA 영상기기, 높은 감도, 저전력 및 저비용등의 잇점을 수용하는 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 양자우물 적외선 광검출기 구조를 1998년 Bandara¹⁾와 Chen²⁾ 등이 제안한 바 있다.

GaAs는 AlAs와 격자상수가 비슷하여 GaAs 위에 Al_xGa_{1-x}As의 이종접합을 만들기가 용이하고, Al

의 함량을 조절하여 용도에 맞는 소자를 제작할 수 있다. 이러한 GaAs와 Al_xGa_{1-x}As의 이종접합을 응용한 구조인 다중 양자우물 (multi-quantum well : MQW) 구조의 분석을 위하여 초격자 (superlattice : SL) 및 미세구조 (microstructure)의 분석과 이해가 선행되어야 한다. 이에 적합한 구조로 설계된 Al_xGa_{1-x}As/GaAs 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조는 기존에 널리 사용되어왔던 Hg_xCd_{1-x}Te 소자 및 외인성 (extrinsic) 검출기 기술의 단점들을 보완하는데 유용하며³⁻⁴⁾, 다중 양자우물과 초격자 구조들의 물성 연구는 더욱 흥미롭다.

최근에 반도체 띠 구조를 조사하기 위한 방법으로 표면 광전압 (surface photovoltage : SPV) 방법이 흥미 있는 분야로 연구가 진행되고 있다. 이러한 SPV 신호는 물질들의 띠 간격에너지 (energy gap), AlGaAs, InGaAsP 물질과 같은 3원 및 4원 합금의 조성비, 그리고 양자우물과 초격자와 같은 다중층 반도체구조의 광 전기적 성질들을 연구하는데 전극의 부착이 필요 없고, 실온에서 측정할 수 있는 기술이다⁵⁻⁶⁾. SPV 신호는 입사광의 파장의 함수에 따라 반도체의 광 전압 (photovoltage)의 변화를 측정하는

* : 영남대학교 물리학과

** : 경운대학교 전자공학과

*** : 대구대학교 물리학과

1999년 5월 18일 접수, 1999년 12월 7일 심사완료

것으로, 띠 간격 보다 큰 에너지에서 광자들의 흡수로 생성된 여기 캐리어(excess carriers)의 재 분포로 표면 전위(surface-potential)의 변화를 일으키며, 전하 재분포 과정(charge redistribution processes)에 의존하여 양(positive) 또는 음(negative) SPV 신호를 얻을 수 있다. SPV 스펙트럼 실험에서 광자 에너지들의 함수와 같은 일정한 광자 다발(photon flux)에서 측정한다. 파장(λ)에 대한 SPV의 도함수 d(SPV)/dλ의 극소점이 에너지 준위들의 밀도의 분포가 최대의 위치가 된다. 이로부터 띠 간격(band gap)들과 다중층 구조에서 표면/계면의 위치에 관한 정보를 결정할 수 있다. 그리고 SPV 측정은 Kelvin probe 또는 chopped light geometries 방법⁷⁻⁹들을 사용한다. Leibovitch⁷ 등은 Kelvin probe 기술을 사용하여 반도체 이종접합(heterojunction)의 밴드 구조의 V_s 변화를 측정하여 설명하였다. 본 연구에서는 chopped light geometry 방법을 사용한 SPV mechanism을 이해하고 분자선 에피탁시(molecular beam epitaxy ; MBE)법으로 Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs 25주기의 초격자 구조를 가지는 다중 양자우물 적외선 광검출기 구조의 SPV 스펙트럼 분석을 통해 띠 간격 에너지(E_g), 조성비(x), 양자 우물 내에 형성된 전이에너지(interband transition energy) 결과와 Schrödinger 유한 네모난 양자우물 모델을 적용하여 파동함수(envelope-wave function approximation ; EFA)을 통해 구한 이론 값들과 비교, 그리고 온도의 의존성을 조사함으로써 띠 구조를 연구함과 동시에 그 특성을 이해함으로써 SPV 스펙트럼 분석의 확대와 응용성을 기르코자 한다.

2. 이 론

SPV 기술에서, 물질의 개회로 광전압(open circuit photovoltag ; V_{oc})의 응답은 반도체의 띠간 에너지에 대한 정보를 측정한다. 광 전류 밀도(photo-current density) J(λ)는 아래와 같이 근사할 수 있다⁹.

$$J_{ph}(\lambda) \approx qF(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \frac{L + W_d}{1 + \alpha(\lambda)L} \quad (1)$$

여기서 α(λ)는 흡수 계수, T(λ)는 Schottky 장벽 투과 인자, F(λ)는 입사광 다발(incident photon flux), L는 소수 캐리어 확산 길이, 그리고 W_d는 공핍층 길이이다. 이 방정식에서 α(λ)W_d < 1이고, undepleted material의 두께가 4L 보다 크면 성립한다. 또한 띠 간격 에너지 이상의 광자 에너지에서

약 10⁴cm⁻¹의 흡수계수(absorption coefficient)와 1 micron의 확산 길이를 가지는 반도체인 경우, 식 (1)를 아래와 같은 단순화 할 수 있다.

$$J_{ph}(\lambda) \approx qF(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot \alpha(\lambda)[L + W_d] \quad (2)$$

식 (2)에서 광 전류 밀도는 흡수계수에 비례한다. 광 전류의 스펙트럼 응답은 반도체에서 흡수가 장자리(absorption edge)인 띠 간격 에너지의 결정에 사용할 수 있다.

개회로 구성(open-circuit configuration)에서, 개회로 전압(V_{oc})이 생성되면, Rhoderick 등¹⁰이 제안한 계산에 따라 적은 신호 조건하에서 광 전류에 비례하게 된다.

$$J_{ph}(\lambda) = \left[\frac{qJ_o}{kT} + \frac{1}{AR} \right] \cdot V_{oc} \quad (3)$$

여기서 J_o는 포화 전류 밀도(saturation current density), A는 접합 면적(junction area), 그리고 R는 specific leakage resistance이다¹⁰. 개회로 전압의 스펙트럼 응답은 흡수계수와 식 (2)와 (3)에서 띠 간격 에너지의 결정에 사용할 수 있다.

$$V_{oc} = f(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \quad (4a)$$

여기서

$$f(\lambda) = qF(\lambda) \cdot T(\lambda)[L + W_d] \cdot \left[\frac{qJ_o}{kT} + \frac{1}{AR} \right]^{-1} \quad (4b)$$

이다. 시료의 전형적인 SPV 스펙트럼에서 띠 간격의 위치를 잘 결정하기는 어렵다. 그래서 α(λ)가 f(λ)보다 흡수 가장자리 주위에서 매우 빠르게 변한다면, 그 경우는 다음과 같이 근사 할 수 있다.

$$\frac{dV_{oc}}{d\lambda} \propto \frac{d\alpha}{d\lambda} \quad (5)$$

에피층(epitaxial layers)의 흡수 계수는 아래같이 나타낼 수 있다¹¹.

$$\alpha(\lambda) = C_1 H\left(\lambda - \frac{1.24}{E_g}\right) \quad (6)$$

여기서 H(.)는 unit step function 그리고 C₁ 값은 약 10⁴cm⁻¹이다. 따라서 식 (5)와 (6)으로부터

$$\frac{dV_{oc}}{d\lambda} \propto \delta\left(\lambda - \frac{1.24}{E_g}\right) \quad (7)$$

여기서 $\delta(\cdot)$ 는 $\lambda=1.24/E_g$ 에서 delta 함수이다. $dV/d\lambda$ 는 에피층의 띠틈격 에너지와 일치하는 파장에서 예리한 피크를 볼 수 있다. λ 의 측정으로 띠틈격 에너지 값과 조성비(x) 값이 주어질 것이다. 양자우물 구조에서 전이(transition)는 국소화된 엑시톤 상태에 기인하며, 흡수 계수는 $\Sigma\delta(\lambda)$ 와 같이 모델화할 수 있으며, 여기서 λ 는 엑시톤 전이와 일치하는 파장이다. 이 경우에, $dV/d\lambda$ 신호는 각 λ 주위에서 양 또는 음 피크가 될 것이다. 반도체의 흡수 가장자리의 정확하게 측정하여 제공된 신호의 미분으로부터 양자우물에서 낮은 준위 전이 에너지들의 관찰과 확인을 명확히 할 수 있다.

3. 실험

본 연구에서는 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy : MBE)법에 의해 반절연성 GaAs(100)기판 위에 완충층(buffer)으로 Si이 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 로 첨가된 n-GaAs($0.5 \mu\text{m}$)를 성장시킨후, barrier $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}:\text{Si}(500 \text{ \AA})/\text{GaAs}(40 \text{ \AA})$ 구조를 가지는 25주기의 초격자를 성장하고, 시료의 산화를 막기 위하여 Si이 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 로 첨가된 n-GaAs를 caplayer로 사용하였다.

SPV 측정은 copped light geometry 방법을 사용하였다. 투명 전도 유리(transparent conducting glass : TCG)를 전면 전극으로 사용하였고, TCG 전극과 시료는 약 $30 \mu\text{m}$ 의 공간을 두었다. 시료는 후면 전극인 구리 시료 걸이에 고정하였다. 그리고 광 여기(light excitation)의 세기를 조정할 수 있는 250 W 할로겐 광원을 이용하였으며, 이 광원을

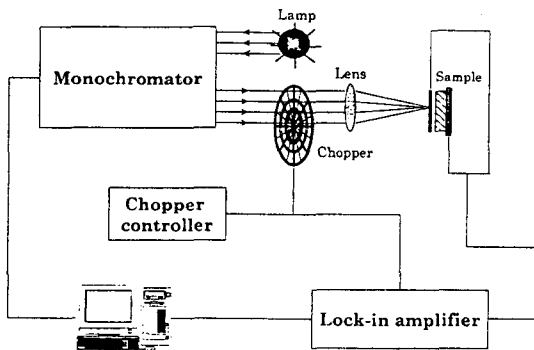


그림 1. 표면 광전압 측정의 개략도.
Fig. 1. Schematic diagram of the surface photovoltage measurement.

초점거리 0.27 m인 분광기(Spex 270M)에 집속시키고 분광기를 통해 나온 단색화 된 광을 광 단속기를 사용하여 25 Hz의 주파수로 시료에 수직으로 입사 시켰다. 광 응답(photoresponse) 스펙트럼은 개회로 전압 (open circuit voltage ; V_{oc}) 측정에 의해 얻었으며, 검출된 신호는 규격화된 lock-in amplifier에 의해 증폭하였다. SPV 측정 장치의 개략도는 그림 1에 나타내었다.

4. 실험결과 및 논의

반절연성 GaAs 벌크와 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{SI-GaAs}$ 를 상온에서 측정된 SPV(surface photovoltage) 및 DSPV(differential surface photovoltage)로 얻은 스펙트라를 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

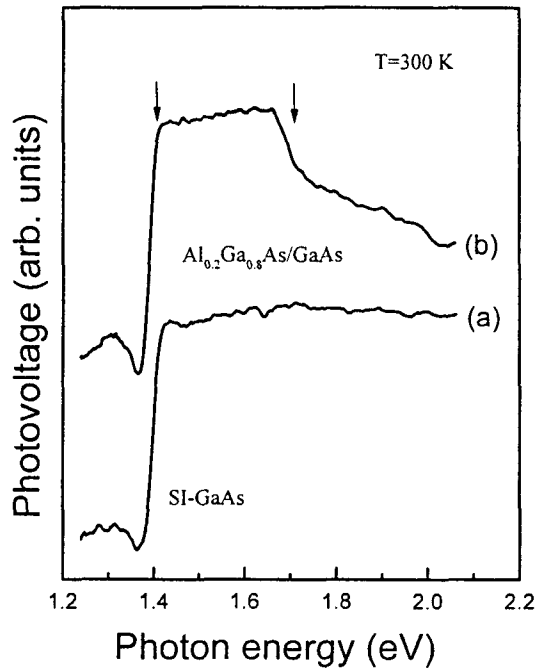


그림 2. 300 K에서 (a) SI-GaAs와 (b) $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{SI-GaAs}$ 시료의 표면 광전압 스펙트럼.
Fig. 2. Surface photovoltage spectra of (a) SI-GaAs and (b) $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{SI-GaAs}$ samples at 300 K.

일반적으로 GaAs 벌크는 직접 띠틈격(direct band

gap) 구조를 가지고 있는 반도체이다. GaAs의 기본적인 흡수는 띠간격 에너지 보다 큰 광자 에너지를 지닌 광이 입사되면 에너지가 가전자대에 의해 흡수되어 광자가 하나 감소하면서 한 쌍의 전자와 정공이 생긴다¹²⁾. 광자에 의한 전자-정공 생성에 따라 광의 강도는 점차 감소하면서 반도체내에 침투한다. 반도체내에서의 광의 감소는 흡수계수를 써서 표현할 수 있다. 그러므로 SPV 응답은 위 식(4)에서 표현한 것과 같이 흡수 계수에 비례하는 것이다. 그래서 그림 2의 (a)스펙트럼은 1.4 eV 근방에서 매우 가파른 응답을 보여 주는 데, 이는 GaAs의 띠 가장자리 흡수로부터 일어 나는 것이다[14]. 그림 2의 (b)스펙트럼은 1.4 eV 부근에서 기관으로 사용된 GaAs 및 1.68 eV 부근에서 Al_{0.2}Ga_{0.8}As 에피층의 신호가 관측되었다. 그러나 Al_{0.2}Ga_{0.8}As 에피층의 신호인 굴곡점의 지정으로 어떤 확신을 단정하기가 어려움이 있어, 식 (7)을 사용하여 Fig. 3에서 보여 주는 것과 같이 Al_{0.2}Ga_{0.8}As 띠간격 에너지 피크 점인 1.685 eV를 구할 수 있다. 여기서 1.685 eV를 사용하여 Al_{0.2}Ga_{0.8}As의

조성값(x)를 구할 수 있는데, 여기서는 Sek 등¹³⁾이 제시한 AlGaAs barrier(E₀(AlGaAs))와 x의 관계식을 나타내면 아래식과 같다.

$$E_g(x) = 1.424 + 1.155x + 0.37x^2 \quad (0 < x < 0.4) \quad (8)$$

이 식으로부터 구한 시료의 조성비는 약 21 %로, 실제 성장 조건의 조성비 20 %와 거의 일치 하였다.

Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs 다중 양자 우물 적외선 광검출기(multi-quantum well infrared photodetector : MQWIP) 구조를 상온에서 측정된 SPV와 DSPV 도함수로 얻은 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다.

SPV 신호는 300 K에서 입사광으로 생성된 전자-정공들은 표면 전기장(surface electric field)에 의해 시료의 상하로 이동하는 전자-정공들의 공간분리(spatial separation)로부터 얻는 것으로 신호의 형태와 크기는 띠사이 흡수(intereband absorption)과 캐리어 수송(carrier transport)에 의존한

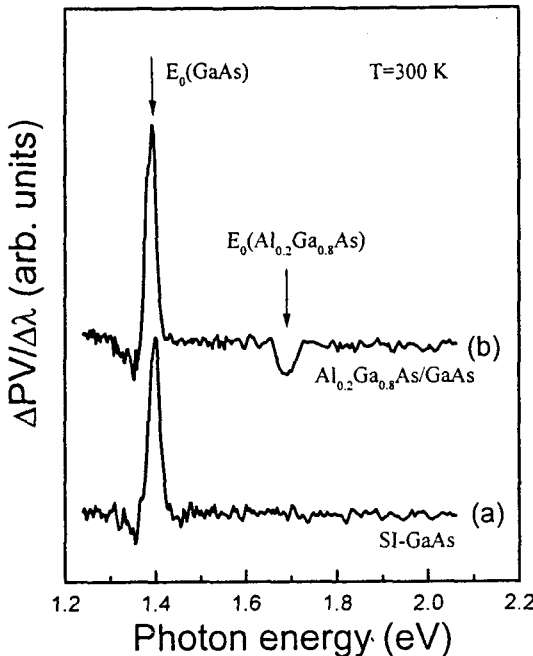


그림 3. 300 K에서 (a) SI-GaAs와 (b) Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs 시료의 미분한 표면 광전압 스펙트럼.

Fig. 3. Differential surface photovoltage spectra of (a) SI-GaAs and (b) Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs samples at 300 K.

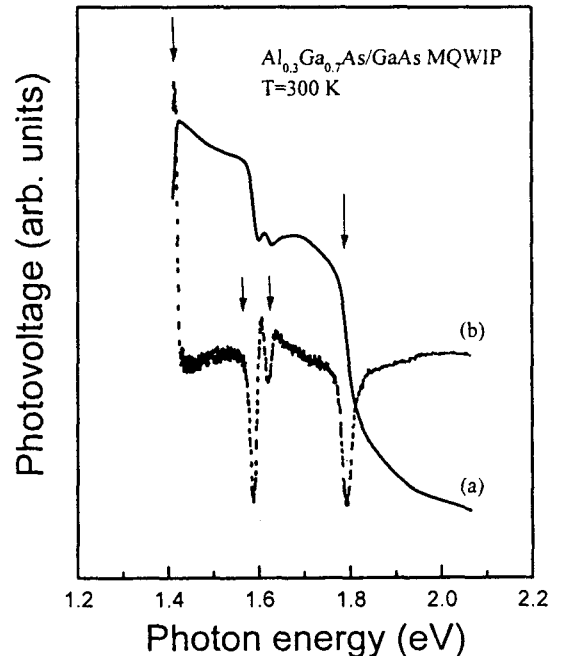


그림 4. Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP 시료의 (a) 표면 광전압 스펙트럼과 (b) 미분한 표면 광전압 스펙트럼

Fig. 4. (a) Surface photovoltage spectra and (b) Differential surface photovoltage spectra of Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP sample.

다. 일반적으로 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP 구조에서는 전면접합과 GaAs층 사이인 계면, $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 와 GaAs층의 이중접합계면, 그리고 다중 양자우물 층인 이중 장벽등에서 광자에 의해 발생한 전하의 분리로부터 발생되는 것이다¹⁴⁾. 그림 2의 (b)스펙트럼은 $Al_{0.2}Ga_{0.8}As/SI-GaAs$ 에서 측정된 SPV 신호의 형태는 그물(net)모양이나 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP SPV 신호의 형태는 그렇지 못하다. 이는 아마 양자우물에서 광자흡수에 의해 발생하는 전자와 정공이 포획되어 머무르고, 어떤 경우에는 thick wide gap 층들에 의해 간혀 외부신호에 기여하지 못하기 때문인 것 같다. 그림 4에서 본 바와 같이 띠 간격과 일치하는 에너지는 굴곡 지점이어서, 이를 정확하게 지정하는 것은 일반적으로 어려움으로, DSPV 도함수를 적용함으로써 정확한 피크들을 결정할 수 있다. 약 1.412 eV 부근은 GaAs, 약 1.6 eV 부근의 신호는 양자 우물, 그리고 약 1.79는 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 장벽층 관련 전이 신호이다⁵⁾.

$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 장벽층에 대한 SPV 신호를 살펴보면 $dSPV/d\lambda$ 에 의한 $E_0=1.793$ eV로 본 연구에 사용된 시료의 조성값(x)를 Sek 등¹³⁾이 제시한 AlGaAs barrier($E_0(AlGaAs)$)와 x의 관계식 (8)을 사용하여 구한 시료의 조성비는 약 29.6 %로, 실제 성장 조건 조성비 30 %와 거의 일치하였다.

특히 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP 구조에서 주양자수(n) $n=1(11H, 11L)$ 인 때사이 전이(inter-band transition)와 일치하는 피크들이 나타나는데, 각 well band와 barrier material사이에서 광에너지 흡수에 의해 일어나는 것으로, 양자우물 관련 에너지 준위(11H, 11L)들에 대한 DSPV 도함수로 얻은 실험치 값과 envelope-wave function approximation(EFA) 분석으로 얻은 이론 값이 좋은 일치율을 보였으며, EFA 계산에 사용된 인자들은 양자 우물내의 전자(e), 무거운 정공(HH) 및 가벼운 정공(LH)의 유효질량 값은 각각 $m_0^* = 0.0665 m_0^{15)}$, $m_{HH}^* = 0.45 m_0^{16)}$ 및 $m_{LH}^* = 0.088 m_0^{17)}$ 이며, 전도대로 부터의 band offset(Q_c) 값은 64%로서 Miller 등이 보고한 값¹⁶⁾과 잘 일치하였다. 그 결과들은 표 1에 나타내었다.

$Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP 구조의 온도 의존성을 알아보기 위하여 측정온도(77 K~300 K) 변화에 따른 SPV 스펙트라를 그림 5에 나타내었다. 온도가 감소함에 따라 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 띠 간격 에너지의 위치가 고 에너지 쪽으로 이동하며, 이는 온도가 감소함에 따라 시료 내부 결정 격자의 수축으로 인해 띠 간격 에너지가 증가하기 때문이다¹⁸⁾. 그리고 온도에 따

른 11H, 11L의 영향을 볼 수 있는데, 90 K 아래에서는 전이를 볼 수가 없었다. 이는 주어진 온도에서 SPV 신호가 관측되지 않는 경우는 전이와 관련된 자유 캐리어가 표면 광 전압 변화에 기여하지 못하기 때문이고, 자유 캐리어들이 저온에서 관측되지 않는 것은 well로부터 벗어날 수 없어 표면에 도달할 수 없기 때문이다. 시료의 온도가 증가하게 되면, 열적인 활성화 과정에 의하여 캐리어들이 well로부터 벗어나 표면에 도착할 수 있는 것이다⁹⁾.

표 1. $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP 시료의 실험치와 이론치 전이 에너지.

Table 1. Experimental and calculated transition energies of $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP sample.

Transition classification	Experimental (eV)	Calculated (eV)	$E_0(GaAs)$ (eV)	$E_0(AlGaAs)$ (eV)
11H	1.571	1.551	1.416	1.793
11L	1.612	1.602		

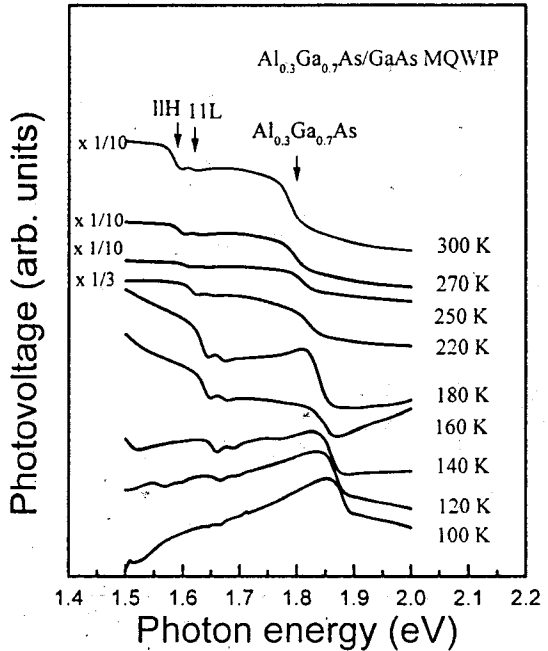


그림 5. 온도 변화에 따른 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP 시료의 표면 광전압 스펙트럼.

Fig. 5. Surface photovoltage spectra of $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$ MQWIP sample at various temperature.

그림 6는 그림 5에서 온도에 따라 측정된 Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP 시료에 대한 E₀의 온도에 따른 에너지 값의 변화를 보여 주고 있다. 띠 간격 에너지의 변화는 Varshni 방정식¹⁹⁾으로 나타내는데, 그림에서 (▲)는 Al_{0.3}Ga_{0.7}As(E₀)의 변화를 나타내며, (●)와 (■)는 각각 11H와 11L 신호의 변화를 나타낸다. 그리고 실선은 식 (9)에 나타낸 온도에 따른 띠 간격 에너지의 이론식, 즉 Varshni 방정식으로 피팅한 것이다. Varshni 방정식은

$$E_0 = E_0(0) - \alpha T^2 / (\beta + T) \quad (9)$$

으로 표현된다. 여기서 E₀(0)는 0 K에서의 띠 간격 에너지이고, α와 β는 Varshni 계수이다. 그리고 피팅한 결과는 표 2에 나타내었다. 표 2에서 전자와 포논간의 상호 작용의 강도(α)를 비교해보면, 식 (9)에 의해 구해진 GaAs 벌크 시료에 대한 α 값은 5.4 × 10⁻⁴ eV/K이고 GaAs 양자우물 내에 존재하는 에너지 준위(11H, 11L)에 대한 값은 5.1 및 7.1 × 10⁻⁴ eV/K로서 다소의 차이가 있다. 이는 우물내에 존재하는 유효질량(m₀^{*}, m_{MH}^{*} 및 m_{LH}^{*})의 차이로 인

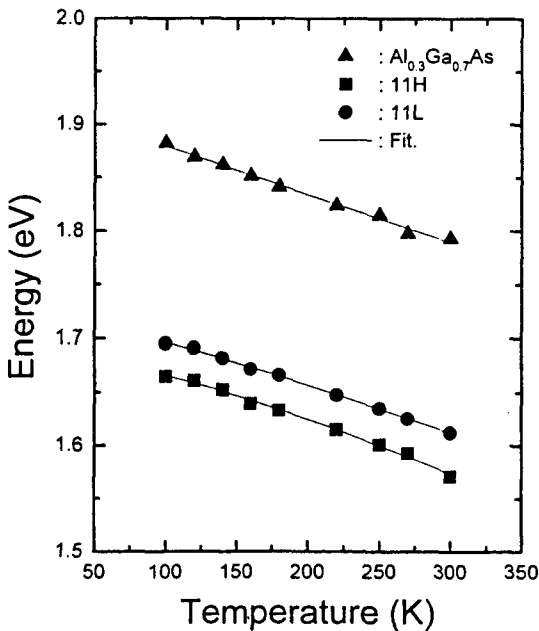


그림 6. Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP 시료의 온도 의존성.

Fig. 6. The temperature dependence of Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP sample.

표 2. Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP 시료에 관한 E₀(0 K), α 및 β 파라미터의 값.

Table 2. Values of the parameters E₀(0 K), α, and β for Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP sample.

	E ₀ (0 K) (eV)	α (10 ⁻⁴ eV/K)	β (K)
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	1.924	4.5	243
11H	1.719	5.1	124.3
11L	1.685	7.1	270.4

한 것이다. 이로 부터, 11H와 11L의 축퇴(degeneration)정도를 정량적으로 계산할 수 있었다.

5. 결 론

MBE법에 의해 성장된 Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs 다중 양자 우물 적외선 광검출기 구조를 갖는 시료의 특성을 SPV를 측정하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

상온에서의 SPV 신호는 굴곡점으로 나타나므로 실질적인 피크점을 지정하기가 어려우나, DSPV에서는 명백한 피크를 결정할 수 있었다. Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs MQWIP 구조의 Al 조성비는 Sek 등이 제안한 조성식을 사용하여, 그 값은 약 29.6 %로 실제 성장 조건의 30 %와 거의 일치하였다. 양자우물 관련 에너지 준위(11H, 11L)에 대한 DSPV로 얻은 실험 값과 Schr dinger 유한 네모난 양자우물 모델을 적용하여 envelope-wave function approximation(EFA) 분석으로 얻은 이론 값들과 잘 일치하였다. 그리고 SPV 측정온도 변화에 따른 신호의 형태는 저온으로 내려 갈수록 11H, 11L신호의 세기가 감소하는 것은 캐리어가 well로부터 벗어나 표면 광 전압에 영향을 미치는 캐리어 수가 감소되기 때문이다.

양자우물 관련 전이 에너지의 측정으로, 계면의 특성은 피크들의 신호세기와 에너지 준위들의 이동을 관찰함으로써, 성장시킨 시료의 균일성을 평가할 수 있음을 알았다. 이는 시료의 특성과 균일성을 빠르고 정확한 mapping의 유용성을 제공할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. S. V. Bandara, S. D. Gunapala, J. K. Liu, E. M. Luong, J. M. Mumolo, and W. Hong, Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 19, pp. 2427-2429, 1998.
2. C. J. Chen, K. K. Choi, W. H. Chang, and D. C. Tsui, Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 1, pp. 7-9, 1998.
3. C. Mermelstein, H. Schneider, A. Sa'ar, C. Schonbein, M. Walther, and G. Bihlmann, Appl. Phys. Lett. Vol. 71, No.14, pp. 2011-2013, 1997.
4. B. F. Levine, Appl. Phys. Lett. Vol. 56, No. 23, pp. 2354-2356, 1990.
5. N. Bachrach-Ashkenasy, L. Kronik, and Yoram shapira, Appl. Phys. Lett. Vol. 68, No. 7, pp. 879-881, 1996.
6. L. Aigouy, F. H. Pollak, J. Pelruzzllo, and K. shahzad, Solid State Commun. Vol. 102, No. 12, pp. 877-882, 1997.
7. M. Leibovitch, L. Kronik, E. Fefer, V. Korobov, and Y. Shapira, Appl. Phys. Lett. Vol. 79, No. 11, pp. 8549-8556, 1996.
8. S. Kumar, T. Ganguli, P. Bhattacharya, and U. N. Roy, Appl. Phys. Lett. Vol. 72, No. 23 pp. 3020-3022, 1998.
9. J. P. Stagg, J. Appl. Phys. Vol. 53, No. 5, pp. 3680-3685, 1982.
10. E. H. Rhoderick, Metal-Semiconductor Contacts(Oxford : University Press, 1978).
11. S. Ahmad Tabatabaei, Agis A. Iliadis, and Colig E. C. Wood. J. Electron. Mater. Vol. 24, No. 2, pp. 87-92, 1995.
12. H. C. Casey Jr, D. D. Sell, and K. W. Wecht, J. Appl. Phys. Vol. 46, No. 1, pp. 250-257, 1975.
13. G. Sek, J. Misiewicz, and T. S. Cheng, Advanced Material for Optics and Electronics. Vol. 7, pp. 241-247, 1997.
14. P. Blood. J. Appl. Phys. Vol. 58, No. 6, pp. 2288-2295, 1985.
15. S. Adachi, J. Appl. Phys. Vol. 58, No. 3, pp. R1-R29, 1985.
16. D. A. B. Miller, D. S. Chemla, A. C. Gos-sard, W. Wiegmann, T. H. Wood, and C. A. Burrus., Phys. Rev. B, Vol. 32, No. 2, pp. 1043-1060, 1985.
17. B. V. Shanabrook, O. J. Glembocki and D. A. Broide, Phys. Rev. B, vol. 39, No. 5, pp. 3411-3414, 1989.
18. M. Sydor, J. Angeio, J. J. Wilson, W. C. Mirchel, and M. Y. Yen, Phys. Rev. B, Vol. 40, No. 12, pp. 8473-8484, 1989.
19. P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logthetidis, and M. Cardona, Phys. Rev. B, Vol. 35, No. 17, pp. 9174-9189, 1987.