

# InP 기판 위에 저온 분자선 에피탁시로 성장된 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 다중 양자 우물의 특성 평가

(Material properties of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  MQWs grown on InP substrates by low-temperature molecular beam epitaxy)

李宗洙 \* 崔佑榮 \*\*

(Jong-Soo Lee and Woo-Young Choi)

## 요 약

저온에서 분자선 에피탁시에 의해 성장된  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  다중 양자 우물 구조에 대하여 여러 가지 실험을 통하여 그 물리적 특성을 분석하였다. 시료는 200°C, 300°C, 또는 500°C에서 성장되었으며 모두  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 Be으로 도핑되었다. 고해상도 X-선 회절을 통해서 성장 온도에 따른 결정성의 변화를 알 수 있었으며, Hall 측정은 성장 온도에 따른 캐리어 농도 및 이동도의 변화를 보여 주었다. Photoluminescence와 Fourier Transform Infrared Spectroscopy 측정을 통하여 저온에서 성장된 시료에 대한 광학적 특성을 파악하였다.

## Abstract

Material characterizations were performed for  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  MQWs grown on InP substrates by low-temperature molecular beam epitaxy. MQW samples were grown at different temperatures of 200°C, 300°C and 500°C, and doped with  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  Be. High resolution x-ray diffraction measurement showed the change in crystal qualities according to growth temperature. Hall measurement showed the changes in carrier concentrations and mobilities for different growth temperatures. The optical properties of MQW samples were investigated with photoluminescence and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy measurements.

## I 서 론

최근, 반도체 내에 포함된 defect의 양을 인위적으로 조절하여 반도체의 광학적 또는 전기적 특성을 원하는 응용에 적합하도록 변화시키는 연구가 관심의 대

상이 되고 있다. 예를 들어, Silicon-on-Sapphire에  $\text{O}^+$  이온 주입하거나<sup>[1]</sup> InP 기판 위에  $\text{H}^+$  이온을 주입시키어<sup>[2]</sup> 캐리어 수명(lifetime)을 단축시킬 수 있음이 보고되었으며, UV-enhanced 된 MOCVD로 성장된 CdTe를 이용하여 photoconductor를 만들고 이로부터 480 femto 초의 전기적 펄스를 발생시킨 연구 결과<sup>[3]</sup>가 보고된 바 있다.

하지만, 위의 결과들은 defect의 강제 주입 또는 에피탁시 성장의 어려움 등으로 인해 반도체의 구조적 특성이 크게 손상되므로 실용적인 면에서 많은 제약물 가지고 있다. 이와는 달리, 저온에서 분자선 에피탁시

\* 學生會員, \*\* 正會員, 延世大學校 電子工學科  
(Department of Electronic Engineering, Yonsei University)

\* 이 논문은 1996년도 한국학술재단의 공모과제연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字: 1998年2月23日, 수정완료일: 1998年4月27日

(Molecular Beam Epitaxy: MBE)로 As을 포함하는 III-V족 화합물 반도체 성장을 할 경우, 반도체 결정 내에 포함되는 과다(excess) As은 반도체의 구조적 특성을 그다지 저하시키지 않고 반도체의 전기적, 광학적 특성을 크게 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

저온 MBE로 성장된 GaAs는 성장 후 고온(600°C 이상)에서 잠시 annealing 되었을 경우, 저항이 아주 큰 반절연체(semi-insulating)의 특성을 가지게 된다. 이를 passivation layer로 사용하여 GaAs MES-FET의 breakdown voltage를 크게 향상시키거나<sup>[4]</sup>, 이를 buffer로 사용하여 MESFET의 back-gating을 현저히 감소시킨 연구 결과<sup>[5]</sup>가 보고되었다. 또한 저온 MBE로 성장된 GaAs에서는 As antisite로 인해 bandgap 안에 생긴 deep level 들이 전자와 정공의 결합을 돕는 fast recombination center의 역할을 하므로 인하여 carrier의 lifetime이 극히 빨라질 수 있다. 정상적인 화합물 반도체의 경우 전자와 정공의 재결합(recombination)을 위해서는 nano 초 영역의 시간을 필요로 하는데 비하여 저온 MBE로 성장된 GaAs의 경우 femto 초 영역의 시간 안에 전자와 정공이 재결합할 수 있다<sup>[6]</sup>. 이를 이용하여 carrier lifetime으로 인한 detector의 반응속도 제한의 문제를 극복할 수 있는 photodetector에 관한 연구가 보고되었다<sup>[7,8]</sup>.

이제까지의 저온 MBE에 의해 성장된 반도체에 관한 연구가 GaAlAs 계의 물질을 중심으로 이루어졌으나, InP 기판 위에 저온 MBE 성장된 InGaAs, InAlAs와 같은 InGaAlAs 계의 물질도 큰 관심의 대상이 되고 있다<sup>[9,10]</sup>. InGaAlAs 계의 물질을 이용한 HEMT, HBT와 같은 초고속 전자 소자는 차세대 초고속 회로 시스템 구현을 위한 중요 소자로 활발하게 연구되고 있으며, 실지로 저온 MBE 성장된 InAlAs buffer를 이용하여 back-gating 효과가 감소된 HEMT 소자가 보고된 바 있다<sup>[11]</sup>. 또한, InGaAlAs 계 물질의 bandgap은 광섬유를 이용한 광통신 시스템에 사용되는 빛의 파장대역인 1.3 또는 1.5  $\mu\text{m}$  영역을 포함하므로 저온 MBE 성장된 InGaAlAs 계 물질을 이용하여 차세대 초고속 광통신 시스템에 사용될 수 있는 femto 초 영역의 광소자의 응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[12-14]</sup>.

본 연구에서는 InP 기판 위에 저온 MBE로 성장된

InGaAlAs 재료를 이용하여 초고속 광소자를 구현한다는 궁극적인 목표아래, 여러 조건하에서 생성된 InGaAs/InAlAs 다중 양자 우물의 구조적, 전기적, 그리고 광학적 물성 분석을 수행하였다. 고해상도 X-선 회절을 통하여 성장 온도에 따른 시료의 구조적인 특성의 변화를 조사하였고, 전기적 특성의 변화는 Hall 측정을 통하여 파악하였다. 광학적 특성 파악은 PL(Photoluminescence)과 FTIR(Fourier Transform Infrared spectroscopy)를 통하여 수행되었다. 이와 같은 저온 MBE 성장된 InGaAlAs 재료를 대상으로 실행된 연구는 국내에서는 처음으로 수행된 연구라 생각된다.

## II 실험

본 연구에 사용된 시료는 일본 NTT 광전자 연구소에서 gas-source MBE에 의하여 성장된 시료로서 반절연 InP 기판 위에 well인  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 는 7 nm, barrier인  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 는 9 nm의 target 두께를 가지며 양자 우물의 개수는 총 100개이다. 자세한 구조는 그림 1과 같다. 이와 같은 많은 수의 양자 우물이 사용된 이유는 본 연구의 궁극적 목표인 초고속 광 스위치의 경우, 큰 contrast ratio를 얻기 위해서 많은 수의 양자 우물이 필요하기 때문이다<sup>[14]</sup>.

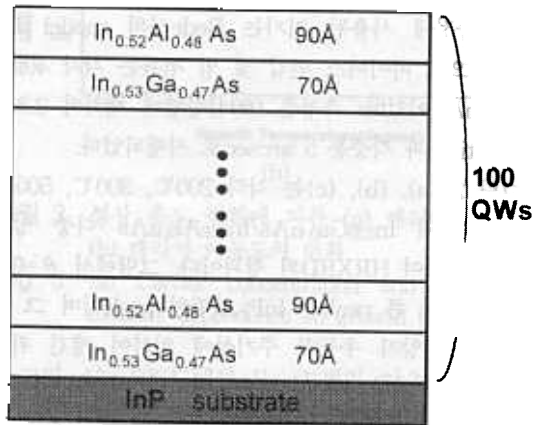


그림 1. 저온 MBE 성장된 InGaAs/InAlAs 다중 양자 우물 구조

Fig. 1. Structure of low-temperature MBE grown InGaAs/InAlAs MQWs.

본 연구의 실험에 사용된 시료들은 크게 두 개의 그룹으로 나눌 수 있다. 첫 번째 그룹의 시료들은 성

장 온도의 변화에 따른 양자 우물의 특성 변화를 관찰하기 위해 각각 200°C, 300°C, 500°C의 기판 온도에서 성장되었으며 well과 barrier 모두  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 농도로 Be doping 되었다. 여기서 Be이 doping된 이유는 저온 성장된 InGaAs/InAlAs 양자 우물만으로는 pico 초 미만의 캐리어 수명을 얻을 수 없으므로, 추가적인 defect가 필요하기 때문이다<sup>[14]</sup>.

두 번째 그룹의 시료들은 Be 농도의 변화에 따른 특성 변화를 관찰하기 위해 성장 온도를 200°C로 고정한 상태에서 Be doping 농도를  $1 \times 10^{18}$ ,  $2 \times 10^{18}$ ,  $3 \times 10^{18}$ ,  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 로 변화시켰다. 두 그룹의 시료들은 모두 annealing은 되지 않았으며 Be doping은 well과 barrier에 균일하게 되었다.

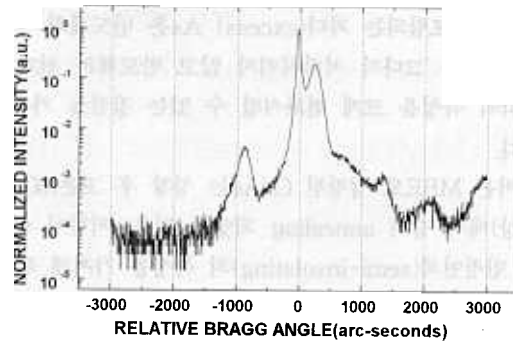
### III 실험 결과 및 논의

#### 1. 고해상도 X선 회절

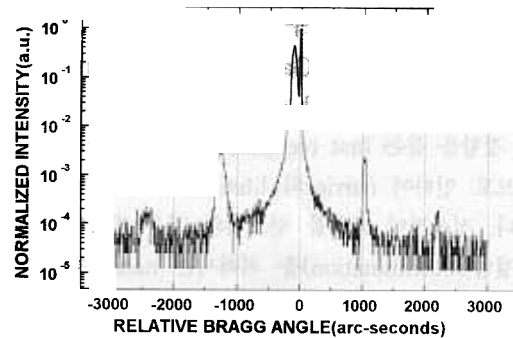
저온 성장 시료에 대한 격자성의 파악은 고해상도 X-선 회절(High Resolution X-Ray Diffraction: HRXRD)을 통하여 수행되었다. HRXRD은 반도체 에피택시의 구조적 특성을 파악하는데 일반적으로 사용되는 유용한 방법이다. 본 연구에서는 HRXRD을 통하여, 시료의 성장 온도의 변화에 따른 전반적인 시료의 격자성의 변화를 파악하고 ternary 반도체의 구성비와 well과 barrier의 두께 및 주기성 등을 파악하였다. 측정에 사용된 기기는 Bede사의 model D3 system으로 바이어스 전압 및 빔 전류는 각각 40kV와 40mA 이었다. 측정은 (004)방향에 대하여 2초의 count time과 각증분 5 arcsec로 시행되었다.

그림 2 (a), (b), (c)는 각각 200°C, 300°C, 500°C에서 성장된  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  다중 양자 우물에 대하여 HRXRD의 결과이다. 그림에서  $\theta = 0^\circ$ 에 위치한 가장 큰 peak는 InP 기판의 peak이며 그 주변에 다중 양자 우물의 주기성에 의하여 생긴 위성 peak들이 보인다. 각 성장 온도에서의 시료의 결정성을 비교하기 위해 각 시료의 0th order 위성 peak의 FWHM이 표1에 나타나 있다. 200°C 시료의 경우 FWHM의 값이 300°C나 500°C에서 성장시킨 시료에 비하여 매우 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 200°C까지 성장 온도가 내려감에 따라 시료에 포함된 과다 As의 양이 증가하고 이로 인하여 격자성이 어느 정도 열화됨을 의미한다. 뿐만 아니라 같은 이유로 위

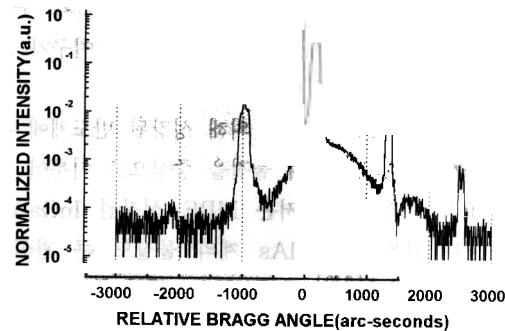
성 peak들이 날카롭게 나타나지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 기판 온도 (a) 200°C (b) 300°C 그리고 (c) 500°C에서 성장된 시료들에 대한 HRXRD 결과  
Fig. 2. HRXRD results of samples grown at (a) 200°C (b) 300°C and (c) 500°C.

식 (1)에 의해서 각각의 시료에 대하여 0th order 위성 peak의 위치로부터 계산된 평균 strain은 표1에 나타내었다.

$$\left[ \frac{\Delta a}{a} \right] = \frac{\sin \theta_B}{\sin(\theta_B + \Delta \theta)} - 1 \quad (1)$$

식 (1)에서  $\theta_B$ 는 기판에 대한 Bragg 각을 나타내

고,  $\Delta\theta$ 는 기판 peak와 0th order 위성 peak간의 차이각을 나타낸다. 계산된 조성비로부터 시료가 무척 많은 수의 양자 우물을 가지고 있음에도 불구하고 에 피택시의 격자 정합이 큰 오차 없이 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한, 위성 피크의 간격으로 식 (2)에 의해 계산된 다중 양자 우물의 주기성, 즉 well과 barrier의 두께의 합도 표 1에 나와있다. 이 값들은 target인 160Å보다 10Å정도 크을 알 수 있다. 식 (2)에서  $\Lambda$ 는 다중 양자 우물의 두께를,  $\lambda$ 는 X-선의 파장인 1.54062Å을 의미한다.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \cos(\theta_B) \Delta\theta} \quad (2)$$

표 1. HRXRD 측정 결과  
Table 1.

성장 온도	FWHM (arc-seconds)	평균 strain	양자 우물의 두께(Å)
200℃	169.935	-0.21	171.34
300℃	116.565	0.07	163.93
500℃	114.757	-0.16	169.02

2. Hall 측정

시료의 전기적 특성의 파악은 상온 Hall 측정을 통하여 이루어 졌다. Hall 측정은 van der Pauw 방법으로 수행되었으며, 이를 위한 4개의 접촉은 n형 소자의 경우 AuGe(Ge: 12%)을 thermal evaporator를 이용하여 1000Å 증착시켰고, p형 소자의 경우 AuZn(Zn: 10%)를 2000Å 증착시킨 후 다시 Au를 500Å 증착시켰다. n형, p형 모두 Rapid Thermal Annealer를 이용하여 350℃에서 2분간 annealing하였다. 측정 결과에 대한 해석을 위하여 전류의 흐름이 InGaAs well에 한정되어 있다고 가정하였다. 이 가정은 어느 정도의 오차를 포함하리라 예상되나, 본 연구에서 수행하고자 하는 성장온도에 따른 시료 특성의 상대적 비교에는 문제가 없다고 생각된다.

그림 3(a)은 200℃, 300℃, 500℃에서 성장된 시료들의 캐리어 농도를 보여 주고 있다. 이 모든 시료들의 well과 barrier는 성장시  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 Be으로 도핑 되었다. 200℃에서 성장시킨 시료의 경우 Be 도핑에도 불구하고 n형으로  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  정도의 전자 농도를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 200℃에서 성장된 시료의 경우 저온 성장으로 인한 과다 As이

도핑된 Be를 compensate시키고도 남아서 전체 시료를 n형으로 바꾸었기 때문이라 판단된다. 그림 3(b)는 시료의 성장 온도에 따른 이동도의 변화를 보여 주고 있다. 200℃에서 성장시킨 시료는 n형의 성질을 띠고 있으므로 전자의 높은 이동도를 보이고 있으나, 300℃, 500℃에서 성장된 시료들의 경우 정공의 낮은 이동도를 보인다. 본 실험에서 300℃와 500℃의 시료가 서로 유사한 특성을 가지고 있음을 볼 때, InGaAs 내의 과다 As은 성장온도가 300℃ 보다 낮아야 생성됨을 알 수 있다.

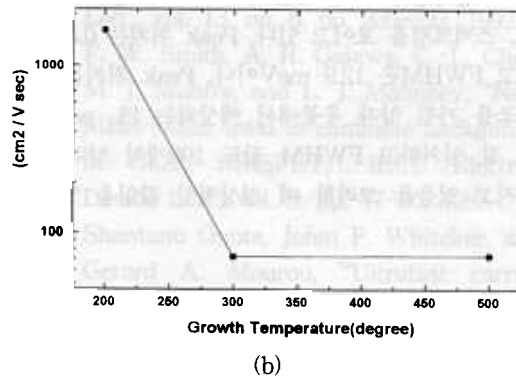
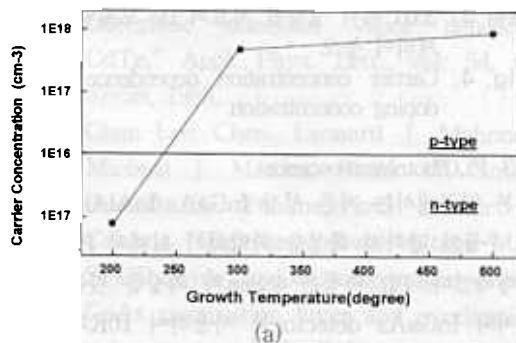


그림 3. 성장 온도 변화에 따른 (a) 캐리어의 농도와 (b) 캐리어 이동도의 변화

Fig. 3. (a) Carrier concentration and (b) carrier mobility dependence on growth temperature.

그림 4는 200℃에서 Be 도핑의 양을 변화시키며 성장시킨  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  다중 양자 우물 시료의 캐리어의 농도를 측정된 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 저온 성장된 시료는 Be이 충분히 도핑되었을 경우 p형의 특성을 가지나 그렇지 못할 경우 과다 As으로 인해 n형의 특성을 갖는다. 시료 내에 다른 불순물의 영향을 무시한다면, 200℃에서 성장된 InGaAs는 대략  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  정도의 이온화된 과다

As을 가지고 있음을 알 수 있다.

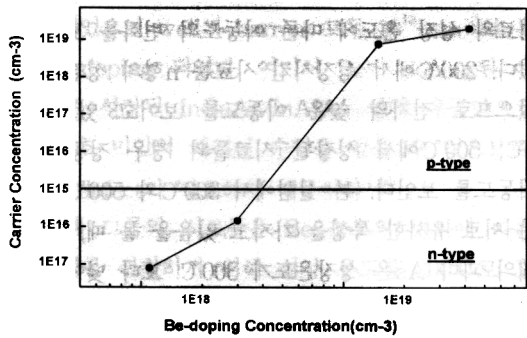


그림 4. 200°C에서 성장된 시료의 Be 도핑양에 따른 캐리어 농도

Fig. 4. Carrier concentration dependence on Be doping concentration.

3. PL(Photoluminescence)

본 연구에서는 저온 성장 InGaAs/InAlAs 다중 양자 우물의 광학적 특성을 파악하기 위해서 PL 측정을 시행하였다. PL 측정은 488nm의 파장을 갖는 Ar 레이저와 InGaAs detector를 사용하여 10K의 온도에서 수행되었다. 그림 5는 500°C에서 성장된 시료의 PL 스펙트럼을 보이고 있다. Peak 위치는 0.8623 eV 이고 FWHM은 12.9 meV이다. Peak 위치는 주어진 구조를 가진 양자 우물에서 예상되는 PL peak 위치와 잘 일치하고 FWHM 값도 100개의 양자 우물을 가지고 있음을 고려할 때 정상적인 값을 알 수 있다.

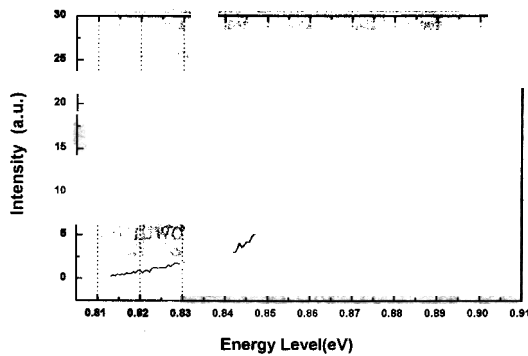


그림 5. 500°C에서 성장된 시료의 photoluminescence 결과

Fig. 5. Photoluminescence spectrum for sample grown at 500°C.

500°C 시료가 정상적인 PL 스펙트럼을 보인 반면, 300°C 및 200°C에서 성장시킨 시료의 경우 PL peak

를 관찰할 수 없었다. 이는 낮은 성장 온도에서 포함되는 과다 As를 비롯한 여러 defect로 인해 radiative recombination이 일어나기 힘들기 때문이라 생각된다.

4. FTIR(Fourier Transform Infrared spectroscopy)

저온 성장으로 인한 과다 As의 bandgap 내 에너지 준위를 조사하기 위해 FTIR 측정을 시도하였다. 본 연구에서는 Jasco사의 FT-IR-300Z 장비를 사용하여 0.15eV에서 0.85eV까지의 범위에서 시료의 상온 투과율을 구하였다. 그림 6은 200°C와 500°C에서 성장시킨 시료의 normalize된 적외선 투과 스펙트럼을 보여주고 있다. 실험이 상온에서 진행된 이유로 측정의 해상도가 그다지 높지 않아 측정한 결과에 대한 정량적인 해석은 어려우나, 그림 6에 제시된 스펙트럼을 통하여 다음과 같은 사항을 관찰할 수 있다. 먼저 두 시료는 0.82eV 주변에서 흡수 peak를 가지고 있다.

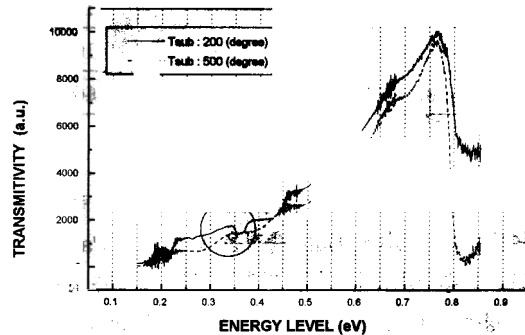


그림 6. 200°C와 500°C에서 성장된 시료의 FTIR 스펙트럼 결과

Fig. 6. FTIR spectra for samples grown at 200°C and 500°C.

이는  $el-hh1$  천이에 의한 흡수로 인한 결과이다. 또한 성장 온도가 높은 시료가 더 크고 날카로운 흡수 peak를 가지고 있음을 볼 수 있다. 이는 시료의 성장 온도가 높을수록 광학적 특성이 우수함을 나타내는 것으로 이로써 저온 성장 시료의 과다 As가 반도체의 광학적 특성을 열화시킴을 알 수 있다. 또한 주목할 만한 점은 0.35eV~0.37eV 주변에서 200°C 시료만이 가지고 있는 투과율의 감소이다(그림에서 원으로 표시). 두 시료의 경우, 성장 온도를 제외한 성장 조건 및 구조 등의 거의 모든 것이 일치한다. 그러므로 0.36eV 주변에서 발견되는 이 차이는 성장 온도의 차이, 즉 저온 성장으로 인한 과다 As과 관련된 현상으

로 해석될 수 있다. 200°C 시료가 n형이므로, 이는 과다 As으로 인해 생성된 에너지 레벨과 conduction 밴드 간에 전자의 optical transition의 결과이고, 따라서 과다 As의 에너지 준위가 conduction band로부터 0.36eV 밑에 존재하고 있다고 해석될 수 있다. 과다 As의 에너지 준위에 관한 자세한 해석은 현재 수행된 실험보다 좀 더 정확한 실험을 필요로 하고 이는 곧 앞으로의 연구 과제라 생각된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 MBE에 의하여 성장된 Be-doped  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  다중 양자 우물의 구조적, 전기적, 광학적 특성 분석 실험을 수행하였다. HRXRD을 통하여 성장 온도가 낮아질수록 시료의 격자성이 열화됨을 볼 수 있었다. Hall 측정을 통하여 성장 온도가 저온으로 갈수록 시료가 n형의 특성을 가짐을 볼 수 있었다. 이는 결과적으로 저온 성장에 의한 과다 As에 의한 영향으로 판단되며 이를 통하여 과다의 As의 양적 관계를 파악할 수 있었다. FTIR의 결과 성장 온도가 낮을수록 시료의 광학적 특성이 열화됨을 확인할 수 있었으며 특히 저온에서 성장시킨 시료의 경우 0.36eV 주변에서 흡수 peak를 발견할 수 있었는데 이를 통해 과다 As의 에너지 준위를 추정할 수 있었다. 본 연구의 결과는 저온에서 MBE로 성장된  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  다중 양자 우물을 이용한 초고속 광 스위치의 개발을 비롯한 여러 응용 분야의 연구에 큰 도움이 될 수 있으리라 예상된다.

본 연구의 수행은 시료와 측정 장비 면에서 많은 분들의 도움을 받았다. 본 연구에 사용된 다중 양자 우물 시료를 공급해준 일본 NTT 광전자 연구소의 Hidetoshi Iwamura 부장과 PL 측정에 도움을 주신 경희대학교 물리학과 유건호 교수님, X-선 측정에 도움을 주신 서울대학교 재료공학부 윤의준 교수님, Hall 측정에 도움을 주신 한국표준과학연구원 노삼규 박사님, 그리고 FTIR 측정에 도움을 주신 연세대학교 재료공학부 최세영 교수님께 감사의 말을 전한다.

#### 참 고 문 헌

- 1 F. E. Doany, D. Grischkowsky, and C. C. Chi, "Carrier lifetime versus ion-im-

plantation dose in silicon on sapphire," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, pp. 460-462, 1987.

- [2] K. F. Lamprecht, S. Juen, L. Palmetshofer, and R. A. Hopfel, "Ultrashort carrier lifetime in  $\text{H}^+$  bombarded  $\text{InP}$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 926-928, 1991.
- [3] M. C. Nuss, D. W. Kisker, P. R. Smith, and T. E. Harvey, "Efficient generation of 480fs electrical pulse on transmission lines by photoconductive switching metalorganic chemical vapor deposited  $\text{CdTe}$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 54, pp. 57-59, 1989.
- [4] Chan-Lee Chen, Leonard J. Mahoney, Micheal J. Manfra, Frank W. Smith, Donald H. Temme, and Arthur R. Calawa, "High-breakdown-voltage MESFET with a low-temperature-grown GaAs passivation layer and overlapping gate structure," *IEEE Electronic Device Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 335-337, 1992.
- [5] F. W. Smith, A. R. Galawa, C.-L. Chen, M. J. Manfra, and L. J. Mahoney, "New MBE buffer used to eliminate backgating in GaAs MESFET," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 9, pp. 77-80, 1988.
- [6] Shantanu Gupta, John F. Whitaker, and Gerard A. Mourou, "Ultrafast carrier dynamics in III-V semiconductors grown by molecular-beam epitaxy at very low substrate temperature," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 28, no. 10, pp. 2464-2472, 1992.
- 7 Stephen Y. Chou, and Mark Y. Liu, "Nanoscale tera-hertz metal-semiconductor-metal photodetectors," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 28, no. 10, pp. 2358-2368, 1992.
- Alan C. Warren, H. H. Burroughes, Jerry M. Woodal, D. T. McInturff, Rodney T. Hodgson, and Micheal R. Melloch, "1.3- $\mu\text{m}$  P-i-N Photodetector using GaAs with As precipitates ( $\text{GaAs}:\text{As}$ )," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 12, no. 10, pp.

- 527-529, 1991.
- 9] H. Kunzel, J. Bottcher, R. Gibs, and G. Urmann, "Material properties of  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  grown on InP by low-temperature molecular beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 11, pp. 1347-1349, 1992.
- 10 R. A. Metzger, A. S. Brown, W. E. Stanchina, M. Lui, R. G. Wilson, T. V. Kargodorian, L. G. McCray, and J. A. Henoge, "Growth and characterization of low temperature AlInAs," *Journal of Crystal Growth*, vol. 111, pp. 445-449, 1991.
- 11 April S. Brown, Umesh K. Mishra, C. S. Chou, C. E. Hooper, M. A. Melendes, M. Thompson, L. E. Larson, S. E. Rosenbaum, and M. J. Delaney, "AlInAs-GaInAs HEMT's utilizing low-temperature AlInAs buffers grown by MBE," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 565-569, 1989.
- 12] S. Gupta, P. K. Bhattacharya, J. Pamulapati, and G. Mourou, "Subpicosecond photoresponse of carriers in low-temperature molecular beam epitaxial  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 8, pp. 1543-1545, 1990.
- [ 13 R. Takahashi, Y. Kawamura, T. Kagawa, and H. Iwamura, "Ultrafast  $1.55\mu\text{m}$  photoresponse in low-temperature-grown InGaAs/InAlAs quantum wells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 3, pp. 1790-1792, 1994.
- [ 14] R. Takahashi, Y. Kawamura, and H. Iwamura, "Ultrafast  $1.55\mu\text{m}$  all-optical switching using low-temperature-grown multiple quantum wells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 8, no. 8, pp. 153-155, 1996.

## 저자 소개

## 李宗洙(學生會員)

1973년 8월 16일생. 1996년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업. 1998년 2월 동대학원 석사 학위 취득. 현재 삼성 전자 연구원. 주 관심분야는 아날로그 회로 설계 및 소자 물성 파악



연세대학교 전자공학과 조교수. 주 관심 분야는 초고속 시스템 설계 및 해석과 이의 구현을 위한 소자 연구

## 崔佑榮(正會員)

1963년 8월 10일생. 1988년 5월 Massachusetts Institute of Technology의 EECS Department B.S. 및 M.S. 취득. 1994년 5월 동 대학원 Ph.D 취득. 1994년 10월부터 1995년 8월까지 일본 NTT 광전자